



การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

รัชฎาพร เจริญศรี

การค้นคว้าอิสระเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



WASTEWATER TREATMENT OF TAPIOCA STARCH WASTEWATER
BY PHOTO – FENTON PROCESS

RATCHADAPORN CHAROENSRI

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 การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

ผู้วิจัย นางสาวรัชฎาพร เจริญศรี

คณะกรรมการสอบ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สอนองราชกุล	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพوخ	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนพงศ์เสชา	กรรมการ

อาจารย์ที่ปรึกษา

Chakkrit

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพوخ)

[Signature]

(รองศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง)
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

[Signature]

(รองศาสตราจารย์ ดร.อริยาภรณ์ พงษ์รัตน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ปีการศึกษา 2557

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง “การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน” สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช อาจารย์ที่ปรึกษาคณาจารย์ที่ได้อิสระที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษา ถ่ายทอดความรู้ต่างๆ ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงาน แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหา ให้ข้อคิดเห็น อบรมสั่งสอน ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิกา รัตนพงษ์เลขา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ สอนองราชฤทธิ์ อาจารย์กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาช่วยเหลือในการให้ข้อเสนอแนะในการแก้ไขคณาจารย์อิสระ

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ต่างๆ ให้ความช่วยเหลือ อบรมสั่งสอน รวมถึงเจ้าหน้าที่ธุรการบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่กรุณาช่วยเหลือในระหว่างดำเนินงานวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และที่สำคัญขอขอบคุณ บริษัท เอี่ยมศิริแป้งมัน จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บน้ำตัวอย่างมาใช้ในการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณครอบครัว เพื่อน ๆ นักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ทุกๆ เรื่องของชีวิต ให้ความรัก สติ และเป็นกำลังใจที่สำคัญ จนสามารถทำทุกสิ่งทุกอย่างได้ตามที่มุ่งหวัง

รัชฎาพร เจริญศรี

ผู้วิจัย

บทคัดย่อ

เรื่อง : การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ยด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน
 ผู้วิจัย : รัชฎาพร เจริญศรี
 ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา : วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
 อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรกฤษณ์ อัมพูช
 คำสำคัญ : โฟโตเฟนตัน, น้ำเสียโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย, ซีโอดี, ของแข็งแขวนลอย, ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด COD SS และ TDS ของน้ำทิ้งจากระบบ UASB ของโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ยแห่งหนึ่งในจังหวัดศรีสะเกษ ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นดังนี้ COD เฉลี่ยเท่ากับ $1,788 \pm 269$ mg/l SS เฉลี่ยเท่ากับ $1,075 \pm 123$ mg/l และ TDS เฉลี่ยเท่ากับ $1,335 \pm 157$ mg/l โดยการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน ที่สภาวะ pH 3 กวนผสมที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง ที่เวลา 120 นาที และปรับอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เป็น 7,500: 1,000 1,000: 1,000 และ 1,000: 7,500 mg/l: mg/l จากผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และ SS สูงสุด เท่ากับ $84.86 \pm 0.19\%$ และ $93.76 \pm 0.58\%$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000: 1,000 mg/l: mg/l ส่วนที่ 2 การบำบัดน้ำเสียด้วยการฉายรังสี UV เพียงอย่างเดียว ทำการทดลองในลักษณะเดียวกับการทดลองในส่วนที่ 1 โดยกำลังของหลอด UV ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 11 22 และ 33 W โดยไม่เติมสารเคมีเฟนตันลงไป พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังวัตต์ของหลอดยูวี ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ SS สูงสุดมีค่าเท่ากับ $64.38 \pm 2.65\%$ และ $76.23 \pm 0.52\%$ ตามลำดับ โดยใช้กำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 W ส่วนที่ 3 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ทำการทดลองในลักษณะเดียวกับการทดลองส่วนที่ 1 แต่จะมีการฉายรังสี UV ที่กำลังของหลอด UV เท่ากับ 11 22 และ 33 W จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ SS สูงสุด เท่ากับ $91.70 \pm 1.07\%$ และ $95.76 \pm 0.63\%$ ตามลำดับที่อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000: 1,000 mg/l: mg/l ที่กำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 W ดังนั้นกระบวนการโฟโตเฟนตันมีประสิทธิภาพสูงกว่าอีกทั้งสองกระบวนการ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โฟโตเฟนตันเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูงในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย แต่ค่า COD ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพ

น้ำทิ้ง จำเป็นต้องมีระบบบำบัดเพิ่มเติม เช่น การตกตะกอน หรือ การกรอง เป็นต้น ในขณะที่ TDS และ SS ของน้ำที่บำบัดแล้ว มีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

ABSTRACT

TITLE : WASTEWATER TREATMENT OF TAPIOCA STARCH WASTEWATER BY PHOTO-FENTON PROCESS

AUTHOR : RATCHADAPORN CHAROENSRI

DEGREE : MASTER OF ENGINEERING

MAJOR : ENVIRONMENTAL ENGINEERING

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

KEYWORDS : PHOTO-FENTON, TAPIOCA STARCH WASTEWATER, CHEMICAL OXYGEN DEMAND, SUSPENDED SOLIDS, TOTAL DISSOLVED SOLIDS

The objective of this research was to study the removal efficiency of COD, SS and TDS of the effluent from the UASB of a tapioca starch in Srisaket province using Photo-Fenton process. The initial parameters include a mean COD of $1,788\pm 269$ mg/l, a mean SS of $1,075\pm 123$ mg/l, and a mean TDS of $1,335\pm 157$ mg/l. The experiment was divided into three parts. First, wastewater treatment by Fenton process was investigated under pH 3, agitation speed of 120 rpm, room temperature, contact time of 120 minutes. The concentration ratio of $H_2O_2: Fe^{2+}$ was varied between 7,500: 1,000, 1,000: 1,000, and 1,000: 7,500 mg/l: mg/l. The results showed that the highest removal efficiencies of COD and SS were $84.86\pm 0.19\%$ and $93.76\pm 0.58\%$, respectively which were carried out under the concentration ratio of 1,000: 1,000 mg/l: mg/l. Second, wastewater treatment using only UV light irradiation was investigated. The experiment was conducted in the same fashion as described in the first one; but the UV light bulbs were used in the range of 11, 22, and 33 W without Fenton reagents. The removal efficiency of COD and SS increased with the increase in the power of the UV lamps. At 33 W of UV power, the highest values of COD and SS obtained were $64.38\pm 2.65\%$ and $76.23\pm 0.52\%$, respectively. Wastewater treatment by the Photo-Fenton was included in the third part. The experiment was conducted in the same fashion as described in the first one; but, the UV light power was varied between 11, 22, and 33 W. The results showed that the highest removal efficiencies of COD and SS were $91.70\pm 1.07\%$ and $95.76\pm 0.63\%$, respectively which were carried out under the concentration ratio of

1,000: 1,000 mg/l: mg/l and 33 W of UV power. The results showed that the Photo-Fenton process yielded the higher removal efficiency as compared to those of other two process. From the results, it was indicated that the Photo-Fenton process has high potential to reduce the amount of organic matter in the tapioca starch wastewater. However, the COD value of treated water still exceeded the regulations permitted. Therefore, additional purification step such as precipitation and filtration would be required. While, TDS and SS values of treated water meet the standards.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมติฐาน	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 สถานที่ทำการวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 น้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนีย	4
2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย	5
2.3 ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย	7
2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียที่โรงงานผลิตแอมโมเนียใช้ในปัจจุบัน	8
2.5 การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน	11
2.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง	11
2.7 กระบวนการเฟนตัน	12
2.8 กระบวนการโฟโตเฟนตัน	14
2.9 ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน	15
2.10 ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย	17
2.11 รังสีอัลตราไวโอเล็ต	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	
3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	20
3.2 กรอบงานวิจัย	22
3.3 วิธีการเตรียมสารละลาย	24
3.4 วิธีดำเนินการศึกษา	24
3.5 วิธีการวิเคราะห์	26
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง	29
4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน	30
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการฉายรังสี UV	34
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	37
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน การฉายรังสี UV และกระบวนการโฟโตเฟนตัน	41
4.6 ประเมินค่าใช้จ่าย	44
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	46
5.2 ข้อเสนอแนะ	47
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก	
ก ตารางข้อมูล	53
ข วิธีวิเคราะห์	60
ค วิธีคำนวณ	65
ง มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม และนิคมอุตสาหกรรม	68
ประวัติผู้วิจัย	69

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ย	4
2.2	ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆของรังสีอัลตราไวโอเล็ต	19
4.1	ลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตแอมโมเนียสำหรับปุ๋ยที่ผ่านระบบ UASB	29
4.2	ต้นทุนค่าใช้จ่ายของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย	45
ก.1	อิทธิพลของอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ COD ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	54
ก.2	อิทธิพลอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ SS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	54
ก.3	อิทธิพลอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ TDS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	54
ก.4	pH ก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน	55
ก.5	อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อปริมาณความเข้มข้นของ COD ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV	55
ก.6	อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อปริมาณความเข้มข้นของ SS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV	55
ก.7	อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อปริมาณความเข้มข้นของ TDS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV	56
ก.8	pH ก่อนและหลังการบำบัดด้วยการฉายรังสี UV	56
ก.9	อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ COD ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	56
ก.10	อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ SS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	57
ก.11	อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ TDS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	58
ก.12	pH ก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง.1	ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม
	69

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
3.1 ชุดการทดลองและแบบจำลอง UV-Box	21
3.2 กรอบแนวคิดงานวิจัย	23
4.1 ปริมาณความเข้มข้น COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	30
4.2 ปริมาณความเข้มข้น SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	31
4.3 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	31
4.4 อิทธิพลของอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	32
4.5 อิทธิพลของอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	32
4.6 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน	33
4.7 ปริมาณความเข้มข้น COD และ SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการฉายรังสี UV	34
4.8 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการฉายรังสี UV	35
4.9 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV	35
4.10 อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV ต่อประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV	36
4.11 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV	36
4.12 ปริมาณความเข้มข้น COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 ปริมาณความเข้มข้น SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	38
4.14 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	39
4.15 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการ โฟโตเฟนตัน	39
4.16 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการ โฟโตเฟนตัน	40
4.17 เปรียบเทียบการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน	40
4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที	42
4.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที	42
4.20 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที	43
4.21 (ก) ภาพก่อนการบำบัด และ หลังการบำบัดด้วย (ข) การฉายรังสี UV ที่สภาวะ pH 3 กำลังของหลอด UV 33W (ค) การบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน ที่สภาวะ pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2: Fe^{2+}$ 1,000: 1,000 mg/l: mg/l และ (ง) กระบวนการ โฟโตเฟนตัน ที่สภาวะ pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2: Fe^{2+}$ 1,000: 1,000 mg/l: mg/l กำลังของหลอด UV 33W	44

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ	ความหมาย
COD	ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย
SS	ของแข็งแขวนลอย
TDS	ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด
cm	เซนติเมตร
ml	มิลลิลิตร
mg	มิลลิกรัม
mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
g/l	กรัมต่อลิตร
L	ลิตร
W	วัตต์ (กำลังของหลอด UV)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มันสำปะหลัง เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ มีการเพาะปลูกเป็นจำนวนมาก จึงมีโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังกระจายอยู่ทั่วประเทศ เนื่องจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีการใช้น้ำในปริมาณมาก จึงเกิดน้ำเสียจำนวนมากตามมา น้ำเสียเหล่านี้มีปริมาณสารอินทรีย์สูง ถ้าปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อาจก่อให้เกิดผลกระทบอย่างรุนแรงต่อสภาพแวดล้อมและชุมชนที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้เคียง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

การบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการบำบัดทางชีวภาพ เช่นระบบ UASB และ ABR ซึ่งมีอัตราการย่อยสารอินทรีย์สูง (ธนรัตน์ วรสูตร และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ, 2550) แต่ระบบเหล่านี้ยังไม่มีประสิทธิภาพสูงพอ จึงต้องนำน้ำทิ้งไปพักไว้ที่บ่อฝัง ซึ่งต้องใช้เวลาและใช้พื้นที่ในการบำบัดสูง ดังนั้น จึงมีการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านวิธีบำบัดทางเคมี ที่ใช้เวลาและพื้นที่ในการบำบัดน้อยกว่า แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD สูง

ปฏิกิริยาเฟนตันเป็นกระบวนการทางเคมีที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ก่อให้เกิดเพอริกไอออน (Fe^{3+}) และอนุมูลไฮดรอกซิล (OH^{\cdot}) โดยมีไอออนเหล็กเป็นคะตะลิสต์ ไฮดรอกซิลแรดิคัล (hydroxyl radicle) มีค่าศักย์ออกซิเดชัน (Oxidation potential) สูง โดยสูงกว่าคลอรีนถึงร้อยละ 200 และสูงกว่าโอโซนประมาณร้อยละ 25 นานา ภูวงศ์ผา (2555) ซึ่งอนุมูลไฮดรอกซิลนั้นจะไปออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ทำให้ค่า COD ลดลง แต่เมื่อเกิดปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ Fe^{2+} จะลดลงจนหมด และปฏิกิริยาจะหยุดลง การฉายแสง UV จะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตรีดักชันของเพอริกไอออน (Fe^{3+}) ไปเป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ทำให้ได้ Fe^{2+} หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า “โฟโตเฟนตัน” ซึ่งมีผู้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยกระบวนการเฟนตัน (ณัชชารีย์ ธนกรจิตติพัฒน์, 2555) พบว่าสามารถกำจัด COD SS และ TDS ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก็สอดคล้องกับ Huang et al. (2010) ที่ได้ทำการศึกษากการย่อยสลายฟีนอลด้วย Fe^{2+} ที่ความเข้มข้นต่ำโดยกระบวนการโฟโตเฟนตัน พบว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีได้ถึง 98% ในการศึกษาครั้งนี้จึงคาดว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันสามารถบำบัดน้ำเสียจากโรงงานแป้งมันสำปะหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากระบวนการโฟโตเฟนตันในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่า COD SS และ TDS รวมทั้งศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย เพื่อเป็นแนวทางให้กับโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง และโรงงานสามารถบำบัดน้ำเสียเป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้งผ่านการบำบัดของกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยการศึกษาในประเด็นดังนี้

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดด้วยแสง UV กระบวนการเฟนตัน และกระบวนการโฟโตเฟนตัน

1.2.2 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

1.3 สมมติฐาน

1.3.1 กระบวนการโฟโตเฟนตันสามารถลดค่า COD SS และ TDS จากน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังได้ เนื่องจากมีอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิลที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์สูง

1.3.2 ปัจจัยต่างๆ เช่น สัดส่วนความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อความเข้มข้นของเฟอร์ริลซัลเฟต และความเข้มแสง ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตันได้ เนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ข้างต้นอาจส่งผลกระทบต่อปริมาณของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน เป็นน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่งในจังหวัดศรีสะเกษ จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 – มีนาคม พ.ศ. 2558 ซึ่งจะใช้วิธีการเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง จำนวน 20 L เก็บตัวอย่างทั้งสิ้น 5 ครั้ง

1.4.2 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยกระบวนการเฟนตัน

1.4.2.1 สัดส่วนความเข้มข้นของ H_2O_2 : Fe^{2+} ที่ความเข้มข้น 7,500: 1,000 1,000: 1,000 และ 1,000: 7,500 mg/l: mg/l ตามลำดับ

1.4.2.2 ค่า pH ที่ pH 3

1.4.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยกระบวนการฉายรังสี UV

1.4.3.1 ความเข้มแสงของรังสี UV(C) กำลัง 11 22 และ 33 W ตามลำดับ

1.4.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

1.4.4.1 ความเข้มแสงของรังสี UV(C) กำลัง 11 22 และ 33 W ตามลำดับ

1.4.4.2 ค่า pH ที่ pH 3

1.4.4.3 อัตราการกวนคงที่ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที

1.4.4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ก่อนและหลังกระบวนการบำบัด คือ pH COD SS และ TDS

1.4.4.5 สัดส่วนความเข้มข้นของ H_2O_2 ต่อ Fe^{2+} ที่ความเข้มข้น 7,500: 1,000 1,000: 1,000 และ 1,000: 7,500 mg/l: mg/l ตามลำดับ

1.4.5 การวิเคราะห์ค่า COD โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux Method)

1.4.6 การวิเคราะห์ค่า SS และ TDS โดยวิธี Gravimetric method

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงประสิทธิภาพการกำจัด COD SS และ TDS ในน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

1.5.2 ทราบถึงประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน การฉายรังสี UV และกระบวนการโฟโตเฟนตัน

1.5.3 ผลการวิจัยที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังได้

1.6 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยส่วนใหญ่จะมีการใช้น้ำปริมาณมาก จึงเกิดน้ำเสียจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น มีกลิ่นเหม็นเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างมาก รวมทั้งมีค่า COD สูง ดังนั้นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจึงเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะเกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการผลิตต่างๆ ได้แก่ น้ำเสียจากการล้างหัวมัน จากเครื่องตีแคนเตอร์ น้ำเสียจากการอัดกาก และน้ำเสียจากการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแป้งและการสลัดแห้ง ซึ่งน้ำเสียแต่ละขั้นตอนมีลักษณะต่าง ๆ กัน ซึ่งจากการศึกษาของ โสภิตา บุญอนุเคราะห์ (2541) พบว่าลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	โรงงานขนาดเล็ก	โรงงานขนาดกลาง	โรงงานขนาดใหญ่	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
pH	4.75	4.69	6.33	5.5-9.0
COD (mg/l)	13,000	15,000	19,300	400
BOD (mg/l)	6,465	10,555	12,645	60
TKN (mg/l)	228	248	512	200
TS (mg/l)	13,030	12,550	19,845	-
SS (mg/l)	7,445	5,790	6,990	150
TDS (mg/l)	5,580	6,820	12,850	5000

จากตารางที่ 2.1 พบว่าน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแห่งหนึ่งในจังหวัดศรีสะเกษจัดอยู่ในประเภทของโรงงานขนาดใหญ่ โดยค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงต้องมีการบำบัดด้วยระบบที่มีความเหมาะสมและให้ประสิทธิภาพที่ดีเพื่อสามารถปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียแอมโมเนียมซัลเฟตเป็นการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ซึ่งพบว่าสามารถบำบัดได้โดยแบ่งออกเป็นวิธีการบำบัดทางกายภาพ (Physical treatment) วิธีการบำบัดทางเคมี (Chemical treatment) วิธีการบำบัดทางชีววิทยา (Biological treatment) และวิธีการบำบัดทางกายภาพ-เคมี สำหรับอุตสาหกรรมผลิตแอมโมเนียมซัลเฟต กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยานับเป็นวิธีการที่เหมาะสมเนื่องจากของเสียอยู่ในรูปสารอินทรีย์และสารอินทรีย์เหล่านั้นสามารถเป็นอาหารให้จุลินทรีย์ได้ดี

ระบบบำบัดทางชีวภาพแบ่งตามแบคทีเรียที่ใช้ได้เป็น 2 ชนิด คือ Autotrophic bacteria และ Heterotrophic bacteria

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

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

2.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้มาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งต่างกันจะมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน ดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงมีหลายวิธี (ภิญโญ พานิชพันธ์ และคณะ, 2557) โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 3 วิธีคือ

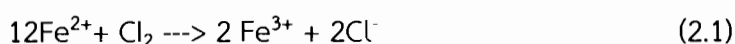
2.2.1 กระบวนการทางเคมี (chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรด ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมีประโยชน์ในการแยกสาร แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้วทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

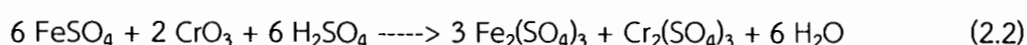
การทำให้เกิดตะกอน (precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนลอยจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้ต่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ

โดยส่วนมากสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนจะละลายน้ำ เช่น เกลือของสารประกอบต่างๆ เช่น เกลืออะลูมิเนียมซัลเฟต หรือสารส้ม ($Al_2(SO_4)_3$) เกลือเหล็ก ($FeCl_3$, $FeSO_4$) และเกลือของแคลเซียม ($Ca(OH)_2$) ส่วนเกลือที่นำมาช่วยในการเกิดตะกอนได้ดียิ่งขึ้นนี้เป็นสารประกอบของกลุ่ม Activated ของ Silica และ Polyelectrolytes โดยกระบวนการทางเคมีมีหลายวิธี

การเกิดออกซิเดชันทางเคมี (chemical oxidation) อาศัยหลักการเสียอิเล็กตรอนของอะตอม ให้แก่สารเคมีที่เติมลงไป ในน้ำเสียโดยสารเคมีนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (oxidizing agent) ส่วนมากวิธีนี้จะนิยมใช้เปลี่ยนโมเลกุลของโลหะที่เป็นพิษ เช่น การเปลี่ยน Fe^{2+} ซึ่งมีพิษมากไปเป็นสาร Fe^{3+} ซึ่งมีพิษน้อย ด้วยคลอรีน ดังแสดงในสมการต่อไปนี้



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



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

2.2.2 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)

กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการอาศัยหลักการใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้เลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของจุลินทรีย์ โดยสัมพันธ์กับปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) ส่วนกลุ่มที่ 2 เป็นพวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

2.2.3 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การดักด้วยตะแกรง (screening) เป็นการแยกเศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถุงพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การดักด้วยตะแกรงจึงเป็นการแยกขั้นต้นแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมันโดยทำการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสียโดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

2.2.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process)

เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้ในขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสีย ที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น กระบวนการดังต่อไปนี้

2.2.4.1 การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

2.2.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียบกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ โดยจะมีการลำเลียงน้ำภายใน

2.3 ขั้นตอนในการบำบัดน้ำเสีย

กรมควบคุมมลพิษ (2545) กล่าวว่า เนื่องจากน้ำเสียมมีแหล่งที่มาแตกต่างกันจึงทำให้มีปริมาณและความสกปรกของน้ำเสียแตกต่างกันไปด้วย ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียจำเป็นจะต้องเลือกวิธีการที่เหมาะสม สำหรับกรรมวิธีในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำเสียนั้นก็มีหลายวิธีด้วยกันโดยพอจะแบ่งขั้นตอน ในการบำบัดออกได้ดังนี้

2.3.1 การบำบัดน้ำเสียขั้นเตรียมการ (Pretreatment)

เป็นการกำจัดของแข็งขนาดใหญ่ออกเสียก่อนที่น้ำเสียจะถูกปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย เพื่อป้องกันการอุดตันท่อน้ำเสีย และเพื่อไม่ทำความเสียหายให้แก่เครื่องสูบน้ำการบำบัดในขั้นนี้ได้แก่

2.3.1.1 การดักด้วยตะแกรง เป็นการกำจัดของแข็งขนาดใหญ่โดยใช้ตะแกรง ตะแกรงที่ใช้โดยทั่วไปมี 2 ประเภทคือ ตะแกรงหยาบและตะแกรงละเอียด

2.3.1.2 การบดตัดเป็นการลดขนาดหรือปริมาตรของแข็งให้เล็กลง ถ้าสิ่งสกปรกที่ลอยมากับน้ำเสียเป็นสิ่งที่เน่าเปื่อยได้ต้องใช้เครื่องบดตัดให้ละเอียดก่อนแยกออกด้วยการตกตะกอน

2.3.1.3 การดักกรวดทราย เป็นการกำจัดพวกกรวดทราย ทำให้ตกตะกอนในรางดักกรวดทราย โดยการลดความเร็วน้ำลง

2.3.1.4 การกำจัดไขมันและน้ำมันเป็นการกำจัดไขมันและน้ำมันซึ่งมักอยู่ในน้ำเสียที่มาจากรั้ว โรงอาหาร ห้องน้ำ ปิมน้ำมัน และโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดโดยการกักน้ำเสียไว้ในบ่อดักไขมันในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้น้ำมันและไขมันลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำแล้วใช้เครื่องดักหรือกวาดออกจากบ่อ

2.3.2 การบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง (Secondary Treatment)

เป็นการกำจัดน้ำเสียที่เป็นพวกสารอินทรีย์อยู่ในรูปสารละลาย หรืออนุภาคคอลลอยด์ โดยทั่วไปมักจะเรียกการบำบัด ขั้นที่สองนี้ว่า “การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีววิทยา” เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย หรือทำลายความสกปรกในน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสีย ในปัจจุบันนี้อย่างน้อยจะต้องบำบัดถึงขั้นที่สองนี้ เพื่อให้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วมีคุณภาพมาตรฐานน้ำทิ้งที่ทางราชการกำหนดไว้ การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีววิทยาแบ่ง เป็น 2 ประเภท ได้แก่ กระบวนการที่ใช้ออกซิเจน เช่น ระบบบ่อเติมอากาศ ระบบแคตติเวตเตดสลัดจ์ ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ ฯลฯ และ กระบวนการที่ไม่ใช้ออกซิเจน เช่น ระบบถังกรองไร้อากาศ ระบบถังหมักตะกอน ฯลฯ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย

2.3.3 การบำบัดน้ำเสียขั้นสูง (Advanced Treatment)

เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดในขั้นที่สองมาแล้ว เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบางอย่างที่ยังเหลืออยู่ เช่น โลหะหนัก หรือเชื้อโรคบางชนิดก่อนจะระบายน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ การบำบัดขั้นนี้มักไม่นิยมปฏิบัติกัน เนื่องจากมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูงนอกจากผู้บำบัดจะมีวัตถุประสงค์ในการนำน้ำที่บำบัดแล้วกลับคืนมาใช้อีกครั้ง

2.4 ระบบบำบัดน้ำเสียที่โรงงานผลิตแอมโมเนียปุ๋ยในปัจจุบัณ

2.4.1 ระบบบำบัดแบบบ่อเปิด (Open pond)

วันทนา เกียรติสมาน (2543) ได้อธิบายไว้ว่า โรงงานผลิตแอมโมเนียปุ๋ยหลังเป็นอุตสาหกรรมเกษตรน้ำเสียจากโรงงานจึงมีอินทรีย์สารอยู่สูง ระบบบำบัดน้ำเสียดั้งเดิมที่โรงงานผลิตแอมโมเนียปุ๋ยส่วนใหญ่ใช้เป็นระบบเปิดที่เป็นบ่อขุดหลายๆ บ่อไหลอย่างต่อเนื่องกัน ซึ่งใช้พื้นที่ในการบำบัดสูง เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำ บ่อบำบัดจึงมีขนาดใหญ่ระบบบำบัดน้ำเสียระบบบ่อเปิดประกอบด้วย บ่อหมัก (Anaerobic ponds) ติดตามด้วยบ่อกึ่งหมัก (Facultative ponds) และบ่อผึ่ง (Aerobic ponds) ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพ (Biological wastewater

treatment) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียอาศัยหลักการที่ใช้สิ่งมีชีวิตหรือจุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเพื่อไม่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษต่อแหล่งน้ำธรรมชาติ

ระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียปัสเปหลังที่ใช้ในปัจจุบันประกอบด้วยบ่อ บำบัดแบบหมัก บ่อบำบัดแบบกึ่งหมัก และบ่อบำบัดแบบผึ่ง ตามลำดับ

2.4.1.1 บ่อบำบัดแบบหมัก (Anaerobic ponds)

เป็นบ่อดินขนาดใหญ่ มีความลึกประมาณ 3.0-4.0 เมตร สามารถรับน้ำเสียที่มี ภาระอินทรีย์ (Organic loading rate) ได้มาก หรือมีค่าบีโอดีสูงๆ จนทำให้บ่อไม่สามารถผลิต ออกซิเจนเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์แสงภายในบ่อสามารถทำ ให้ไม่เกิดขึ้นได้ โดยการลดพื้นที่ผิวของบ่อ เพิ่มความลึกของบ่อ และเพิ่มภาระการรับสารอินทรีย์ขึ้น ในระหว่างที่น้ำทิ้งอยู่ในบ่อ สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจะถูกแบคทีเรียทำลายด้วยปฏิกิริยาเคมีแบบไม่ใช้ ออกซิเจนทำให้น้ำทิ้งมีกลิ่นเหม็นอันเนื่องมาจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์และสารประกอบซัลไฟด์อื่นๆ และบางส่วนจะเปลี่ยนรูปไปเป็นก๊าซหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำเสียจะถูกปล่อยเข้ามาในบริเวณก้นบ่อ เพื่อให้มีโอกาสสัมผัสกับชั้นของตะกอน จุลินทรีย์ที่จมตัวอยู่ ที่ก้นบ่อ และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วจะถูกปล่อยออกไปตามท่อที่อยู่ตรงข้ามกับท่อน้ำเข้า และท่อน้ำ ออกนี้จะต้องอยู่ต่ำกว่าระดับไขมันที่ปกคลุมบ่อ ไม่จำเป็นต้องมีการกวนตะกอนให้เกิดการหมุนเวียน ภายในบ่อ เพราะก๊าซที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้มีปริมาณมากพอที่ ทำให้เกิดการหมุนเวียนของตะกอนจุลินทรีย์ภายในบ่อได้อย่างพอเพียง

2.4.1.2 บ่อบำบัดแบบกึ่งหมัก (Facultative ponds)

เป็นบ่อดินที่มีความลึกน้อยกว่าบ่อหมัก โดยมีความลึกประมาณ 1.0-2.5 เมตร การทำงานของจุลินทรีย์ในบ่อกึ่งหมักมี 3 เขต คือ เขตบนเป็นการทำงานของแบคทีเรียที่ต้องการ ออกซิเจน (Aerobic bacteria) และจะมีสาหร่ายเกิดขึ้นอยู่ร่วมกัน เขตก้นบ่อเป็นการทำงานของ แบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic bacteria) ที่จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ก้นบ่อ และเขตรอยต่อ เป็นการทำงานของแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ในสภาพที่มีออกซิเจนน้อย คือ สามารถอาศัยได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจนและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria)

2.4.1.3 บ่อบำบัดแบบบ่อผึ่ง (Aerobic ponds)

เป็นบ่อดินกว้าง มีความลึกน้อยที่สุดในทั้งสามบ่อบำบัดคือมีความลึกประมาณ 1.0-1.5 เมตร จุลินทรีย์ในระบบซึ่งประกอบด้วย แบคทีเรียและสาหร่าย ดำรงชีพอยู่ด้วยการพึ่งพา อาศัยซึ่งกันและกัน และสาหร่ายจะสังเคราะห์แสงโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ปล่อยออกมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนของแบคทีเรีย ให้ก๊าซออกซิเจนออกมา ก๊าซออกซิเจนที่เกิดขึ้นก็จะ ถูกนำไปใช้โดยแบคทีเรียที่ใช้ในอากาศในการย่อยสลายสารอินทรีย์คาร์บอนในน้ำเสีย และให้ ผลผลิต ออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะถูกลำเลียงนำไปใช้เป็นวัฏจักรต่อไป นอกจากนี้ การทำให้

เกิดสภาวะมีออกซิเจนละลายอยู่ในบ่ออย่างทั่วถึงนั้น บ่อจึงไม่ควรลึกเพราะออกซิเจนจากบรรยากาศ จะแทรกซึมลงไปได้มากขึ้น และสาหร่ายจะได้รับแสงแดดอย่างทั่วถึง และนำไปใช้ในการสังเคราะห์ มากยิ่งขึ้น รอบๆบ่อไม่ควรปลูกต้นไม้ใหญ่หรือสิ่งกีดขวางที่จะบดบังกระแสลมและแสงแดด

2.4.2 ระบบบำบัดแบบปิด (Closed system)

2.4.2.1 ถังไร้อากาศแบบปั่น (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR)

เป็นระบบบำบัดไร้อากาศที่ใช้จุลินทรีย์ เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ภายในถังกลมที่ปิดมิดชิดไร้อากาศติดตั้งอุปกรณ์กวนตะกอนตรงด้านล่างของถัง เพื่อเพิ่ม ประสิทธิภาพในการบำบัด ข้อดีของระบบหมักนี้ คือ การกวนผสมภายในถังตลอดเวลาทำให้จุลินทรีย์ ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์อย่างทั่วถึง ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการผลิตแก๊สชีวภาพได้อีกด้วย เมื่อ จุลินทรีย์ย่อยสลายสารแขวนลอยในน้ำเสีย จะได้แก๊สชีวภาพเป็นผลพลอยได้ลอยสู่ด้านบนระบบนี้ เหมาะกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง (ธีรพล วัฒนโกศล, 2548)

2.4.2.2 ถังไร้อากาศแบบชั้นสลัดจ์ (Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB)

ระบบนี้จะให้น้ำเสียไหลขึ้น น้ำเสียที่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ ซึ่งเป็น สารอาหารของจุลินทรีย์จะถูกป้อนเข้าจากทางด้านล่าง ระหว่างที่ลอยขึ้นสู่ด้านบนของถังนั้น สารอินทรีย์จะสัมผัสกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ แก๊สชีวภาพที่ถูกจุลินทรีย์ผลิตขึ้นจากการย่อยสลายจะ ลอยขึ้นสู่ด้านบนของถัง ลักษณะเด่นของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลาย คือ จุลินทรีย์จะจับตัวเป็นเม็ด เล็ก ๆ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 - 2 mm มีคุณสมบัติในการตกตะกอนที่ดีมาก ภายในระบบจะ แบ่งออกเป็น 2 ชั้น คือ ชั้นน้ำและชั้นตะกอน โดยจะมีระบบแยกน้ำใสภายในถัง และมีระบบเก็บ รวบรวมแก๊สที่ผลิตขึ้นมาได้เพื่อนำออกจากถัง วิธีการนี้เม็ดตะกอนจุลินทรีย์สามารถกระจายอยู่ทั่วไป ในระบบโดยไม่ต้องเกาะยึดกับวัสดุตัวกลาง จึงประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับวัสดุตัวกลางได้ระบบนี้เหมาะ กับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยต่ำ

2.4.2.3 ถังไร้อากาศแบบตรึงเซลล์บนผิววัสดุตัวกลาง (Anaerobic Filter: AF)

หลักการของระบบนี้ คือ การจัดวางวัสดุตัวกลางไว้ในถังปฏิกรณ์ เพื่อให้เป็นที่ อาศัยของจุลินทรีย์ เกิดเป็นฟิล์มชีวะ (Biofilm) ขึ้นมา วัสดุตัวกลางนี้อาจมีลักษณะเป็นท่อหรือตาข่าย ที่มีความพรุน เมื่อน้ำเสียถูกป้อนเข้าสู่ระบบสารอินทรีย์จะเคลื่อนตัวไหลผ่านฟิล์มชีวะแต่ละชั้น ทำให้ จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายไปที่ละน้อยเหมือนผ่านการกรอง ผลพลอยได้จากการย่อยสลายคือแก๊ส ชีวภาพจะลอยสู่ด้านบนระบบนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยต่ำ

2.4.2.4 ถังไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (Anaerobic Baffled Reactor: ABR)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้มีลักษณะเป็นถังที่มีแผ่นกั้นขวางหลายแผ่นติดตั้งไว้ใน ถังยาวการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบจะเป็นในลักษณะไหลขึ้นไหลลง (หรือซ้ายขวา) สลับกันไปเมื่อน้ำ

เสียไหลไปตามช่องทางที่ออกแบบไว้ภายในบ่อ สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะสัมผัสจุลินทรีย์ระหว่างการเดินทางภายในบ่อจนความสกปรกมีค่าลดลงก่อนจะออกจากระบบ

2.5 การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นปฏิกิริยาที่สารมีการให้อิเล็กตรอนหรือเพิ่มเลขออกซิเดชันของสารนั้น ซึ่งตัวอย่างปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบง่าย ๆ ดังนี้



โดย M คือ โลหะ

Mn^{n+} คือ จำนวนประจุ

ปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เหมือนกับปฏิกิริยาการเผาไหม้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรืออากาศ เพื่อเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กับ น้ำ (H_2O) ซึ่งการใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันนั้นสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การออกซิเดชันด้วยโอโซน การออกซิเดชันด้วยแสงและตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน การใช้เซลล์ไฟฟ้าเคมีในการออกซิเดชัน เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีต่างมีข้อจำกัดและข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันออกไป ซึ่งปฏิกิริยาเฟนตันเป็นปฏิกิริยาที่น่าสนใจเนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่ใช้เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัว แล้วเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลาย ในงานวิจัยนี้นำปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน ซึ่งเป็นการนำปฏิกิริยาเฟนตันร่วมการให้แสงยูวีในการออกซิเดชัน

2.6 กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes: AOPs)

การบำบัดสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากทำได้หลายวิธี คือ ใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ต โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งแต่ละตัวมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ระดับหนึ่ง แต่ถ้ามีการใช้ร่วมกัน เช่น ปฏิกิริยาการใช้แสงร่วมกับโอโซน ปฏิกิริยาการใช้แสงกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือปฏิกิริยาการใช้โอโซนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยจะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต สามารถทำให้โอโซน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แตกตัวให้อนุมูลไฮดรอกซิลแรดดิคัล และอื่นๆ ได้มากขึ้น (OH^\cdot เป็นแรดดิคัลที่ว่องไวมาก สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำได้) (ศิริวิชญ์ แสงนาค และ ศุภลักษณ์ พยานอน, 2554)

จินต์ อโนทัย และคณะ (2547) ได้ศึกษาการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงบำบัดซีไอดีในน้ำออกจากกระบวนการบำบัดน้ำชะซึมจากหลุมฝังกลบมั่นคง ทำการทดลองกับน้ำเสียด้วย

กระบวนการเฟนตัน ที่ความเข้มข้นของอนุมูลเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในช่วง 1,000 ถึง 5,000 และ 5,000 ถึง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีที่ดีที่สุดทำได้เพียงร้อยละ 20 ซึ่งเกิดขึ้นที่พีเอช 2.0 อุณหภูมิ 25 เซลเซียส และความเข้มข้นของอนุมูลเพอร์ร็อกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1,000 และ 7,500 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทั้งนี้คาดว่าน่าจะเป็นผลจากการรบกวนของอนุมูลคลอไรด์และอนุมูลไฮโดรเจนพอสเฟตซึ่งมีอยู่มากในน้ำเสีย การเติมสารเฟนตันรีเอเจนต์ ด้วยความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการบำบัดได้ อย่างไรก็ตามหากมีการป้อนสารเฟนตันรีเอเจนต์ทุก 120 นาทีเป็นจำนวนหลายครั้งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีและซีโอดีได้ โดยประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดที่โอซีเท่ากับร้อยละ 45 เกิดขึ้นเมื่อมีการเติมสาร เฟนตันรีเอเจนต์ที่ความเข้มข้นที่ภาวะที่ดีที่สุด 3 ครั้งติดต่อกันหลังจากนั้นจะมีค่าคงที่ แต่ซีโอดีสามารถลดลงได้อย่างต่อเนื่องโดยในการเติมครั้งที่ 4 สามารถลดได้ถึงร้อยละ 75

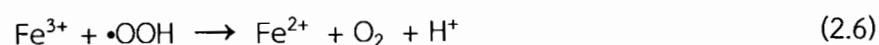
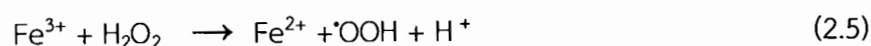
2.7 กระบวนการเฟนตัน

กระบวนการเฟนตันถูกค้นคิดขึ้นโดย H.J.H. Fenton ในปี ค.ศ. 1876 ซึ่งพบว่าเมื่อนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาทำปฏิกิริยากับอนุมูลเพอร์ร็อกไซด์สภาวะที่เป็นกรดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ขึ้นจนเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลซึ่งเป็นสารหลักที่ก่อให้เกิดกระบวนการออกซิเดชันทางเคมีที่สามารถนำไปใช้ในการกำจัดสารมลพิษอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก อาจถึงขั้นการกำจัดโดยสมบูรณ์ (Completely Oxidation) กล่าวคือคาร์บอนในสารอินทรีย์เปลี่ยนรูปไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้กระบวนการเฟนตันยังสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดกระบวนการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation Process) ได้อีกด้วยเมื่อมีการปรับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง ปฏิกิริยาที่อนุมูลเพอร์ร็อกไซด์เร่งให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลภายใต้สภาวะที่เป็นกรด

ธนภุต พรหมทอง และคณะ (2552) ศึกษาการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยกระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตัน ซึ่งการทดลองโฟโตเฟนตันใช้แหล่งกำเนิดแสงยูวีกำลัง 6 วัตต์ โดยทำการศึกษาผลของพีเอช ของแข็งแขวนลอย ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเพอร์ร็อกไซด์ไอออน จากการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม คือ ที่ pH 3.0 มีความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 50 mM และเพอร์ร็อกไซด์ไอออน เท่ากับ 1.0 mM โดยมีสัดส่วนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อเพอร์ร็อกไซด์ไอออน เท่ากับ 50 โดยใช้เวลา 60 นาที กระบวนการเฟนตันและโฟโตเฟนตันมีประสิทธิภาพการกำจัดสี 74.68 และ 81.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.7.1 กลไกของปฏิกิริยาเฟนตัน

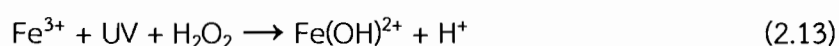
ปฏิกิริยาเฟนตัน คือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง และรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) โดยมีไอออนเหล็กทั้งเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และเฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.4 ถึง 2.10 โดยอาศัยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล หรือ ไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) ซึ่งมีค่าศักย์ออกซิเดชันเกิดขึ้นระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวออกซิไดซ์หลัก โดยปฏิกิริยาเคมีหลักๆสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



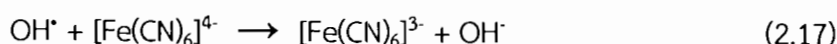
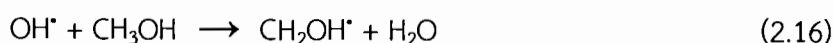
จากสมการจะเห็นว่าไฮดรอกซิลเรดิคัล ($\cdot\text{OH}$) อยู่ในระบบตลอดเวลาทำให้สามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบอินทรีย์เกือบทั้งหมด และให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ดังสมการที่ (2.8) ส่วนสำคัญของปฏิกิริยาเฟนตันที่ต้องมีการควบคุม คือ ปริมาณสารประกอบเฟนตันและพีเอชในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เพราะหากไม่มีการควบคุมแล้วจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีโดยเปล่าประโยชน์ อีกทั้งยังทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย (กนกวรรณ แก้วดี และคณะ, 2555)

2.8 กระบวนการโฟโตเฟนตัน

กระบวนการโฟโตเฟนตันเป็นการประยุกต์ใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) มาใช้ร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน มีความสามารถในการทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) ในปริมาณสูง เนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะไปจับตัวกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) เกิดกระบวนการโฟโตไลซิสของแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ดังสมการที่ (2.12) และยังสามารถเปลี่ยนรูปของเฟอร์ริกไอออนที่เกิดจากกระบวนการเฟนตันให้กลับมาเป็นเฟอร์รัสไอออนได้ด้วย กระบวนการโฟโตรีดักชันของเฟอร์ริกไอออน สมการแสดงดังนี้ (ณัชชารีย์ ธนกรจิตติพัฒน์, 2555)



กลไกการกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดจากการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ของไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) โดยที่จะเริ่มต้นจากการรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ที่ไม่อิ่มตัว (Aliphatic or Aromatic) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูป (Cyclohexadieny Radical) จากนั้นจะดึงไฮโดรเจนอะตอมออกจากสารอินทรีย์ เกิดอนุมูลสารอินทรีย์และน้ำ ต่อมาจะเป็นการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน ซึ่งอนุมูลอิสระที่เป็นประจุลบจะถูกไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) ออกซิไดซ์แย่งอิเล็กตรอนไปและท้ายสุดไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) จะทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) อีกตัวหนึ่งหรือกับอนุมูลที่แตกต่างกันจนเปลี่ยนมาอยู่ในรูปที่เสถียร สมการแสดงดังนี้





2.9 ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปฏิกิริยาโฟโตเพนตัน

2.9.1 ผลกระทบของความเข้มข้นของเหล็ก ในสภาวะที่ขาดเหล็กจะไม่มีการสร้างไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) เกิดขึ้น เนื่องจากเหล็กเป็นตัวทำให้เกิดไฮดรอกซิลเรดิคัลขึ้นจนกระทั่งถึงจุดหนึ่งการเติมเหล็กลงไปจะไม่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซึ่งปริมาณความเข้มข้นของเหล็กจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมที่เป็นคุณลักษณะของเพนตันรีเอเจนต์ (Fenton's Reagent) ซึ่งมีข้อกำหนดดังนี้ (ณัชชารีย์ ธนกรจิตติพัฒน์, 2555)

2.9.1.1 ปริมาณความเข้มข้นต่ำสุดของเหล็ก คือ 3-5 mg/l ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปภายในระยะเวลาที่เหมาะสมโดยไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบอินทรีย์ที่ปนอยู่ในน้ำเสีย

2.9.1.2 อัตราส่วนคั่งที่ของเหล็กต่อสารตั้งต้นภายใต้ความเข้มข้นตามข้อ 2.9.1.1 โดยทั่วไปควรจะเท่ากับ 1 : 10 ถึง 1 : 50 โดยน้ำหนัก เพื่อได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ซึ่งอัตราส่วนของสารนี้อาจจะมีผลต่อการกระจายตัวในการทำปฏิกิริยาการสร้างสารผลิตภัณฑ์ ซึ่งอาจจะออกมาในรูปของอัตราส่วนของปริมาณเหล็กกับปริมาตรของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) โดยทั่วไปอัตราส่วนของเหล็กต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) เท่ากับ 1 : 5 ถึง 1 : 25 โดยน้ำหนัก

2.9.2 ผลกระทบของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียมมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) เป็นสารเคมีหลักสำหรับการแตกตัวให้ไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH[•]) แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มถึงระดับหนึ่งก็จะมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัด เพราะอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากันเองเกิดเป็นน้ำและออกซิเจน นอกจากนั้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂) สามารถถูกดูดกลืนโดยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ทำให้พลังงานที่ใช้ในการออกซิเดชันลดลง

จินต์ อโนทัย และคณะ (2547) กล่าวว่า การเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่พร้อมทำปฏิกิริยาได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามหากมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงเกินไปหรือมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คั่งค้างมากเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะแสดงพฤติกรรมเป็นตัวยับยั้งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล

ศิริวิชญ์ แสงนาค และศุภลักษณ์ พยานอน (2554) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการโฟโตเพนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยาออกเปอร์พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้นเรื่อยๆ ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ก็จะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แต่เมื่อถึงความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด ร้อยละการลดลงของค่าซีโอดี ดีก็จะลดลง เพราะว่าอนุมูลไฮดรอกซิลที่ได้จากการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะไปทำการสลายสารอินทรีย์ แล้วจะให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา

2.9.3 ผลกระทบจากเวลา เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์นั้นจะขึ้นอยู่กับค่าตัวแปรต่างๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยส่วนใหญ่จะเน้นในเรื่องของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาและความเข้มข้นของน้ำ

เสียก่อนการบำบัด สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันเวลาของปฏิกิริยายังมากการเกิดประสิทธิภาพการบำบัดก็จะมากตามไปด้วย ส่วนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นมากหรือมีสารที่มีความซับซ้อนมากในการเกิดปฏิกิริยาจึงอาจใช้เวลาหลายชั่วโมง

Ebrahiem and et al. (2013) ศึกษาการประเมินความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้เทคนิคโฟโตออกซิเดชันขั้นสูง ในการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจากการผลิตเครื่องสำอาง จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมพบว่าค่า pH 3 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 1 mg/l ปริมาณ Fe^{2+} 0.75g/l และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 40 นาที ความต้องการออกซิเจนของน้ำ (COD) ก่อนและหลังกระบวนการออกซิเดชันเป็นตัวชี้วัดเพื่อให้มั่นใจว่าสารอินทรีย์ถูกกำจัดออกจากน้ำเสีย จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระบวนการเฟ้นต้นออกซิเดชันมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ดีมากกว่า 95%

ณัชชารีย์ ธนกรจิตติพัฒน์ (2555) ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียการใช้แสงยูวีร่วมกับกระบวนการเฟ้นต้นที่กำลังวัตต์ของหลอดยูวี 15 วัตต์ และ 40 วัตต์ พบว่ากำลังวัตต์ของหลอดยูวีที่ 40 วัตต์ มีประสิทธิภาพมากกว่า 15 วัตต์ โดยทำ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ pH 5 ความเข้มข้นของสารเฟอร์รัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) เท่ากับ 2.5 g/l และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เท่ากับ 0.5 g/l ประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดีที่ เวลา 90 นาที เท่ากับ $85.58 \pm 0.57\%$

Jin et al. (2012) ทำการศึกษาวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ขั้นตอนของโรงงานผลิตเส้นใยอะคริลิกโดยกระบวนการเฟ้นต้น จากการศึกษาค่าเวลาที่เหมาะสมในการกำจัดซีโอดีโดยปฏิกิริยาเฟ้นต้น พบว่าค่าเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 2 ชั่วโมง ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 65.5% การย่อยสลายทางชีวภาพของโรงงานผลิตเส้นใยอะคริลิกเป็น 42.9% แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียดีเป็นอย่างมากและยังช่วยลดการใช้สารเคมีในการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย

2.9.4 ผลกระทบจากค่าพีเอช (pH) ค่าพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาจะอยู่ในช่วง 3-6 โดยประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์จะลดลงเมื่อเฟอร์รัสไอออนเปลี่ยนเป็นเฟอร์ริกไอออนที่พีเอช (pH) ค่าสูง ซึ่งในช่วงพีเอช (pH) เป็นกรดนี้ จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวไปเป็นออกซิเจนและน้ำ โดยจะไม่มีการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล (Hydroxyl Radical, OH^{\cdot})

จันทนภา สหุณิล และคณะ (2546) ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดย กระบวนการออกซิเดชันโฟโตเฟ้นต้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม คือ pH 3 ปริมาณเฟอร์รัสไอออน 80 มิลลิกรัมต่อลิตรและใช้กำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ ซึ่งสามารถลด COD และสีได้ 50 และ 90% ตามลำดับ เวลาที่เหมาะสมในการบำบัด คือ 5 นาที

ณัฐพล สุนทรวิภาต (2547) ทำการศึกษาการนำกระบวนการโฟโตเพนต์มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาล โดยประสิทธิภาพในการบำบัดของกระบวนการโฟโตเพนต์วัดจากการลดลงของค่าซีโอดีเป็นหลัก ซีโอดี และทีโอซีของน้ำเสียที่ลดลงหลังจากผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งจะใช้หลอดแสงอัลตราไวโอเล็ตขนาด 10 วัตต์ จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโรงพยาบาลนั้นคือ ที่ pH 3

2.9.5 ผลกระทบจากความเข้มแสง การเลือกใช้กำลังของหลอด UV อาจดูจากปริมาณความเข้มข้นหรือความขุ่นของน้ำเสีย หากน้ำเสียมีความขุ่นที่ค่อนข้างมากประสิทธิภาพในการบำบัดก็จะน้อย หากความเข้มข้นหรือความขุ่นไม่มากก็จะเลือกใช้กำลังของหลอดที่มีความเหมาะสม

จินต์ อโนทัย และคณะ (2547) อธิบายว่า เมื่อจำนวนวัตต์ของแสงยูวีสูงขึ้นจะทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น เช่นเดียวกันกับอัตราการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดจะเร็วขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้กำลังของหลอดยูวีน้อยกว่า การที่กำลังของหลอดยูวีน้อยกว่ามีอัตราการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดช้ากว่า เนื่องจากความเข้มของแสงยูวีไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลได้เร็วและเพียงพอที่จะกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด

ณัชชาธิ์ ธนกรจิตติพัฒน์ (2555) ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยใช้แสงยูวีร่วมกับกระบวนการเพนต์ที่กำลังวัตต์ของหลอดยูวี 15 วัตต์ และ 40 วัตต์ พบว่ากำลังวัตต์ของหลอดยูวีที่ 40 วัตต์ มีประสิทธิภาพมากกว่า 15 วัตต์ นั้นแสดงว่าเมื่อกำลังวัตต์เพิ่มขึ้นมีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น

2.10 ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย

2.10.1 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

Chemical Oxygen Demand หรือที่เรียกกันสั้นๆ ว่า COD นั้น เป็นค่าความต้องการออกซิเจนของน้ำที่ทำได้โดยวิธีการทางเคมี หรือเป็นค่าที่แสดงถึงความสกปรกของน้ำเสีย ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้

ค่า COD เป็นที่นิยมใช้กันมากในการวิเคราะห์น้ำเสีย เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้ผลการวิเคราะห์ในเวลาอันสั้น (3-5 ชั่วโมง) เมื่อเทียบกับการวัดในรูปแบบของค่า BOD ซึ่งต้องใช้ระยะเวลาถึง 5 วัน ทำให้สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดและควบคุมระบบได้อย่างทันท่วงที นอกจากนี้การวิเคราะห์ค่า COD ยังสามารถวิเคราะห์ได้ในน้ำตัวอย่างทุกชนิด แม้จะเป็นน้ำตัวอย่างในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษหรือสารที่มีคุณสมบัติในการฆ่าเชื้อเจือปนอยู่ ซึ่งในกรณีดังกล่าว ไม่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ปนเปื้อนได้ด้วยวิธีการวิเคราะห์ BOD (อาจวิเคราะห์ได้แต่มีขั้นตอนยุ่งยากในการเตรียมเชื้อสำหรับใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์)

2.10.2 ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids; SS)

ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids; SS หรือ Total Suspended Solids; TSS) หมายถึง ของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ แต่แขวนลอยอยู่ในน้ำ สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดรูกรองประมาณ 1.2 ไมครอน แล้วนำของแข็งดังกล่าวที่ติดค้างบนกระดาษกรองไปผ่านการระเหยน้ำออกจนหมด ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส

2.10.2 ของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids; TDS)

ของแข็งละลายน้ำ (Dissolved Solids; DS หรือ Total Dissolved Solids; TDS) หมายถึง ของแข็งที่ละลายน้ำได้ ทำให้สามารถลอดผ่านกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดรูกรองประมาณ 1.2 ไมครอน ประกอบด้วยอนุภาคของคอลลอยด์ที่มีขนาดเล็กกว่ารูกระดาษกรอง และโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายน้ำ ถ้า TDS มากแสดงว่ามีสารแปลกปลอมในน้ำมาก และ TDS ยังสามารถบอกความกระด้างของน้ำได้

2.11 รังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีคุณสมบัติไม่แตกตัว รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นเส้นของรังสีชนิดแตกตัวได้และแตกตัวไม่ได้ รังสีอัลตราไวโอเล็ตแบ่งได้เป็นรังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (UVA), รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (UVB) และรังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (UVC) มีความยาวคลื่นของรังสีดังแสดงในตารางที่ 2.2 (ณัฐพล สุนทรวิภาต, 2547)

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การสั่นของสนามไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดพลังงานที่จะส่งผ่านให้เกิดรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวอย่าง เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นแสง และรังสีเอ็กซ์เรย์ เป็นต้น รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดสามารถจำแนกประเภทได้โดยความแตกต่างของความถี่ และความยาวคลื่น ส่วนรังสีไม่แตกตัว (Non-ionizing Radiation, NIR) เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 100 นาโนเมตร เป็นพลังงานที่น้อยที่สุดที่สามารถแตกพันธะอ่อนของโมเลกุลใหญ่ได้

ตารางที่ 2.2 ความยาวคลื่นในช่วงต่างๆของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

รังสี	ความยาวคลื่น (nm)
Ultraviolet	100-400
UVA	315-400
UVB	280-315
UVC	100-280
Visible Radiation (light)	400-760
Infrared Radiation (IR)	760-106 (1 mm)

ความยาวคลื่น 200-280 nm สามารถใช้ฆ่าเชื้อเนื่องจากจะไปยับยั้งพันธะระหว่างไฮโดรเจนกับโมเลกุลของคาร์บอน การดูดกลืนคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่มากที่สุดของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 200 nm จะลดลงเรื่อย ๆ ตามความยาวของคลื่นที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันใช้หลอดรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่บรรจุปรอทความดันต่ำ เป็นที่นิยมมากเพราะ 85% ของรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสม่ำเสมอที่ 257.7 nm ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการฆ่าเชื้อ (250-270 nm) หลอดอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ใช้ในปัจจุบันหลอดยาวประมาณ 0.75-1.5 m และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 15-20 mm หลอดอัลตราไวโอเล็ต (UV) อาจใช้โดยวางไว้ข้างนอกหรือจุ่มในของเหลวได้และหลอดจะต้องถูกหุ้มด้วยควอทซ์เพื่อป้องกันการเย็นตัวของหลอด

2.11.1 การเกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต

แหล่งกำเนิดของรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งได้หลายประเภท ตัวอย่างเช่น แบ่งตามชนิดของวัสดุอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดรังสี ในระดับเล็กมาก (Submicroscopic) แหล่งกำเนิดรังสีอธิบายในรูปของพลังงานนิวเคลียร์ พลังงานไฟฟ้าหรือการส่งผ่านระหว่างโมเลกุล หรือโดยการเร่งพลังงานของอนุภาค แต่โดยทั่วไปแหล่งกำเนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะเป็นการส่งผ่านพลังงานระหว่างชั้นของโมเลกุล

2.11.2 แหล่งกำเนิดของรังสีอัลตราไวโอเล็ต

สเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเล็ตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ซึ่งสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตแตกต่างกัน อัลตราไวโอเล็ตเอ ที่มีความยาวคลื่น 320-400 นาโนเมตร มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คลื่นยาวอัลตราไวโอเล็ตอาร์ (Long Wave UVR) หรือคลื่นใกล้ (Near UVR หรือ Black Light) ส่วนอัลตราไวโอเล็ตที่มีความยาวคลื่น 280-320 นาโนเมตร มีชื่อเรียกว่า คลื่นกลาง (Middle UVR หรือ Sunburn radiation) และ อัลตราไวโอเล็ตซี มีความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 200 นาโนเมตร จะมีผลต่อสิ่งมีชีวิตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และความยาวคลื่นในช่วงนี้จะถูกดูดซึมไว้ในบรรยากาศ

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

3.1.1 สารเคมี

- 3.1.1.1 สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
- 3.1.1.2 เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
- 3.1.1.3 สารโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)
- 3.1.1.5 สารละลายซัลฟิวริก (H_2SO_4 20%)
- 3.1.1.6 สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous Ammonium Sulphate, FAS)
- 3.1.1.7 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
- 3.1.1.8 กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4)
- 3.1.1.9 สารซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)
- 3.1.1.10 สารเมอร์คิวรีซัลเฟต ($HgSO_4$)
- 3.1.1.11 เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (Ferroien indicator)

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.1.2.1 อุปกรณ์

- 1) เครื่อง Magnetic Stirrer
- 2) บีกเกอร์ขนาด 600 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) ตู้ดูดความชื้นพร้อมสารดูดความชื้น (Dessicator)

- 11) ตู้อบ ที่อุณหภูมิ $150 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- 12) เครื่องชั่ง (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
- 13) ขวดดูดสุญญากาศ
- 14) เครื่องดูดสุญญากาศ
- 15) ถ้วยกระเบื้อง
- 16) กระดาษกรอง
- 17) filter holder ใช้ gooch crucible adapter หรือ membrane filter

funnel

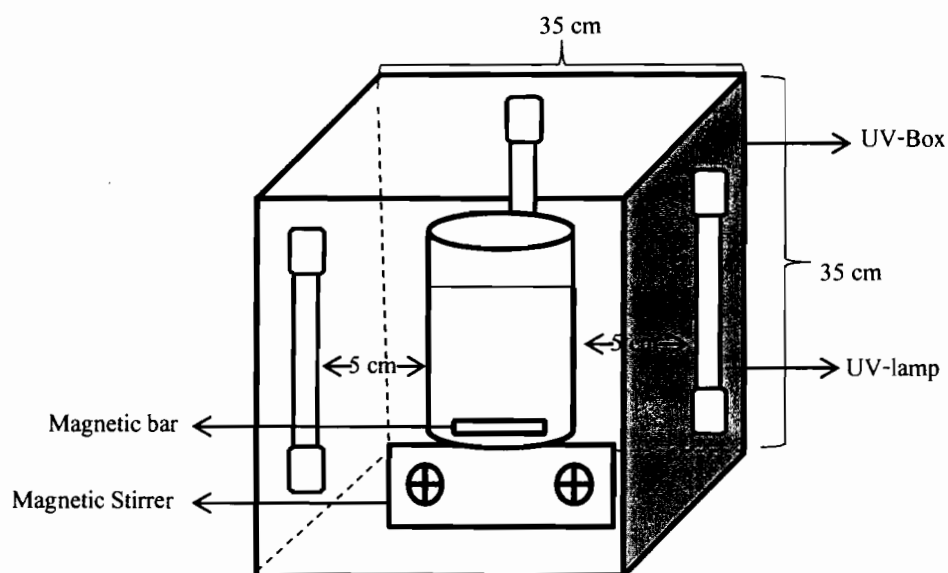
- 18) ถ้วยกรองกุช สำหรับ glass fiber filter
- 19) UV-Box (หลอดขนาด 11 W จำนวน 3 หลอด)

3.1.2.2 เครื่องมือวิเคราะห์

- 1) เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)

3.1.2.3 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง (UV-Box)

ชุดอุปกรณ์การทดลองทำจากตู้ไม้ทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส 4 เหลี่ยม แต่ละด้านมีความกว้าง 35 cm ความสูง 35 cm ความยาว 35 cm ทำจากไม้อัด ภายในติดตั้งหลอด UVC TOKIVA G12T5 ยาว 23 cm ขนาด 11 W จำนวน 3 หลอด ด้านนอกกล่องจะมีสวิตซ์เปิด-ปิดไฟ ภายในตู้ ด้านล่างของตู้จะเปิดโล่งเพื่อใช้ครอบเครื่อง Magnetic Stirrer ตามแบบจำลอง UV-Box ตามภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ชุดการทดลองและแบบจำลอง UV-Box

3.2 กรอบงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังซึ่งแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

3.2.1 ทำการศึกษาความเข้มแสง UV

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความเข้มแสง UV ที่เหมาะสม โดยการศึกษานี้จะทำการทดลองโดยใช้กำลังของหลอด UV(C) กำลัง 11 22 และ 33 W

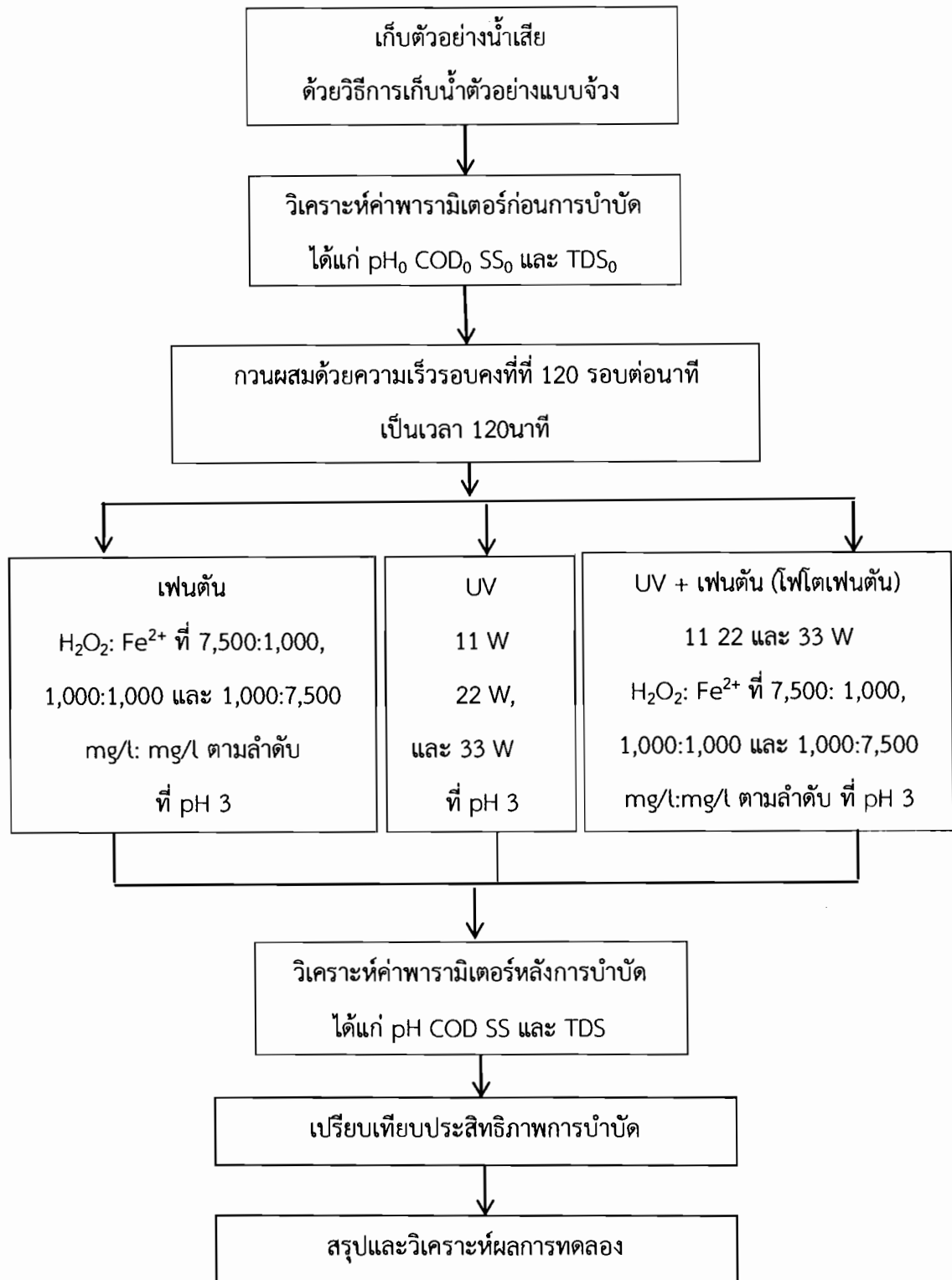
3.2.2 ทำการศึกษาสัดส่วนความเข้มข้นของ H_2O_2 ต่อ Fe^{2+} ที่เหมาะสม

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาสัดส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยการศึกษานี้จะทำการเติมสัดส่วนความเข้มข้นของ $H_2O_2 : Fe^{2+}$ ที่ความเข้มข้น 7,500:1,000 1,000:1,000 และ 1,000:7,500 mg/l:mg/l ตามลำดับ

3.2.4 การวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลที่ศึกษาข้างต้น เพื่อนำมาวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

ในการทดลองขั้นตอนการวิจัยทั้งหมดสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นแผนภาพได้ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 กรอบแนวคิดงานวิจัย

3.3 วิธีการเตรียมสารละลาย

3.3.1 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 ตั้งทิ้งไว้ให้ละลายและปล่อยให้เย็นแล้วทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 L

3.3.2 กรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่ผสมกับสารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต

โดยทำการเติม Ag_2SO_4 5.5 g ลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 L ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1-2 วัน เพื่อให้ Ag_2SO_4 ละลาย

3.3.3 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

3.3.4 สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์

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

3.4 วิธีดำเนินการศึกษา

วิธีการดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง มีวิธีการดังนี้

3.4.1 วิธีการเก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บน้ำเสียแบบจ้วง (Grab Samples) ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างครั้งเดียวที่จุดเดียวในเวลาใดเวลาหนึ่ง แล้วนำมาวิเคราะห์โดยผลที่ได้จะแสดงคุณสมบัติของน้ำเสีย ณ จุดนั้นและในเวลานั้นเท่านั้น การเก็บตัวอย่างแบบนี้จะทำให้ทราบถึงลักษณะสมบัติของแหล่งน้ำเฉพาะจุด และทำให้เห็นความผันแปรของลักษณะสมบัติและคุณภาพน้ำในจุดต่างๆได้อย่างชัดเจน (กรมควบคุมมลพิษ, 2553) โดยทำการเก็บน้ำเสียที่ทอรวมซึ่งผ่านการบำบัดด้วยระบบบำบัดทางชีวภาพ (UASB) มาแล้ว ณ โรงงานแห่งหนึ่งในจังหวัดศรีสะเกษ ซึ่งทำการเก็บรักษาน้ำเสียโดยการเก็บไว้ในตู้แช่ที่อุณหภูมิ $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำการเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนมีนาคม พ.ศ. 2558 โดยค่า COD เฉลี่ย ของน้ำเสียมีค่าเท่ากับ $1,788 \pm 0$ mg/l SS เฉลี่ยเท่ากับ $1,075 \pm 0$ mg/l TDS เฉลี่ยเท่ากับ $1,335 \pm 0$ mg/l และค่า pH ในช่วง 6-7

3.4.2 วิธีการทดลอง

3.4.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดของกระบวนการเฟนตัน

1) เตรียมน้ำเสีย 500 ml ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ pH COD SS และ TDS

2) ทำการปรับ pH ให้ได้ค่าที่ pH 3

3) ทำการใส่สาร $H_2O_2: Fe^{2+}$ ที่ความเข้มข้น 7,500:1000 1,000:1,000 และ 1,000:7,500 mg/l:mg/l ตามลำดับ

4) ทำการกวนผสมด้วย Magnetic Stirrer ที่อัตราการกวนคงที่ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีเพื่อให้ตกตะกอน และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ pH COD SS และ TDS

3.4.2.2 ศึกษาอิทธิพลความเข้มแสง UV ที่เหมาะสม ในกระบวนการฉายรังสี UV(C) ในการบำบัดน้ำเสีย

1) เตรียมน้ำเสีย 500 ml ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ pH COD SS และ TDS

2) ทำการกวนผสมด้วย Magnetic Stirrer ที่อัตราการกวนคงที่ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที พร้อมกับฉายแสงด้วยหลอด UV(C) ที่มีกำลังขนาด 11 W ด้วย UV-Box จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีเพื่อให้ตกตะกอน และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ pH COD SS และ TDS

3) ทำการทดลองซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนขนาดกำลังหลอด UV(C) เป็น 22 วัตต์ และ 33 วัตต์ ตามลำดับ และทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

3.4.2.3 ศึกษาอิทธิพลความเข้มแสง UV และอัตราส่วนความเข้มข้นของ H_2O_2 ต่อ Fe^{2+} ที่เหมาะสม ในกระบวนการโฟโตเพนตัน

1) เตรียมน้ำเสีย 500 ml ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ pH COD SS และ TDS

2) ทำการปรับ pH ให้ได้ค่าที่ pH 3

3) ทำการใส่สาร $H_2O_2: Fe^{2+}$ ที่ความเข้มข้น 7,500: 1,000 1,000: 1,000 และ 1,000: 7,500 mg/l: mg/l ตามลำดับ

4) ทำการกวนผสมด้วย Magnetic Stirrer ที่อัตราการกวนคงที่ที่ความเร็วรอบ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที พร้อมกับฉายแสงด้วยหลอด UV(C) ที่มีกำลังขนาด 11 W ด้วย UV-Box จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีเพื่อให้ตกตะกอน และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ pH COD SS และ TDS

5) ทำการทดลองซ้ำ โดยทำการเปลี่ยนขนาดกำลังหลอด UV (C) เป็น 22 W และ 33 W ตามลำดับ และทำการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการบำบัดโดยพิจารณาจากประสิทธิภาพในการกำจัดพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด

3.4.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำทั้งด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนต์กับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม พ.ศ. 2539 โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของน้ำเสียจากโรงงานแป่งมันสำปะหลังก่อนและหลังการบำบัดด้วยปฏิกิริยาโฟโตเพนต์กับมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยการใช้แสง UV เพียงอย่างเดียว กระบวนการเพนต์ กับกระบวนการโฟโตเพนต์ โดยเปรียบเทียบพารามิเตอร์ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป่งมันสำปะหลังก่อนและหลังการบำบัด

3.5 วิธีการวิเคราะห์

3.5.1 วิธีวิเคราะห์ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

3.5.1.1 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD)

น้ำเสียตัวอย่างจะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าซีโอดีก่อนและหลังการบำบัด ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux method) และทำการหาประสิทธิภาพของการบำบัดทั้งก่อนและหลังทำการทดลอง

3.5.1.2 การหาค่า COD

$$\text{COD (mg/l)} = \frac{\{(A-B) \times N \times 8000\}}{C} \quad (3.1)$$

เมื่อ A คือ ปริมาณของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำกลั่น (ml)

B คือ ปริมาณของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรตน้ำตัวอย่าง (ml)

N คือ ความเข้มข้นในหน่วยนอร์มิลลิตรีของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ (mol)

C คือ ปริมาณน้ำตัวอย่าง (ml)

3.5.1.3 การหาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี

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

เมื่อ COD_0 คือ ค่า COD ของน้ำเสียเริ่มต้น (mg/l)
 COD คือ ค่า COD ของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/l)

3.5.2 การวิเคราะห์ค่าของแข็ง

น้ำเสียตัวอย่างถูกนำมาวิเคราะห์ค่าของแข็งด้วยวิธี Gravimetric method โดยสามารถคำนวณหาค่าของแข็งและประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งได้จาก

3.5.2.1 การหาค่าของแข็ง

$$\text{Suspended solids (mg/l)} = \frac{(A-B) \times 1,000}{C} \quad (3.3)$$

เมื่อ A คือ ค่าน้ำหนักของกระดาษกรอง + ของแข็ง (mg)
 B คือ ค่าน้ำหนักของกระดาษกรอง (mg)
 C คือ ปริมาณน้ำตัวอย่าง (ml)

$$\text{Total dissolved solid at } 180^\circ\text{C (mg/l)} = \frac{(A-B) \times 1,000}{C} \quad (3.4)$$

เมื่อ A คือ ค่าน้ำหนักของของแข็งที่แห้ง + ถ้วยกระเบื้อง (mg)
 B คือ ค่าน้ำหนักของถ้วยกระเบื้อง (mg)
 C คือ ปริมาตรของน้ำที่ผ่านการกรองที่นำมาใช้ (ml)

3.5.2.2 การหาประสิทธิภาพการบำบัดของของแข็ง

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด SS} = \frac{((SS_0 - SS) \times 100)\%}{SS_0} \quad (3.5)$$

เมื่อ SS_0 คือ ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียเริ่มต้น (mg/l)
 SS คือ ค่าของแข็งแขวนลอยของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/l)

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด TDS} = \frac{((\text{TDS}_0 - \text{TDS}) \times 100)\%}{\text{TDS}_0} \quad (3.6)$$

เมื่อ TDS_0 คือ ค่าของแข็งละลายน้ำของน้ำเสียเริ่มต้น (mg/l)

TDS คือ ค่าของแข็งละลายน้ำของน้ำเสียหลังการบำบัด (mg/l)

บทที่ 4 ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียปัสเปหลังด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน โดยทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของกระบวนการโฟโตเฟนตัน ในการลดค่า COD SS และ TDS

4.1 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตแอมโมเนียปัสเปหลัง

กระบวนการผลิตแอมโมเนียปัสเปหลังในโรงงานที่เข้าไปศึกษา มีการใช้น้ำปริมาณมาก จึงเกิดน้ำเสียจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งจะมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น มีกลิ่นเหม็นเนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างมาก รวมทั้งมีค่า COD สูง ซึ่งน้ำเสียเกิดจากขั้นตอนการผลิตต่างๆ ได้แก่ น้ำเสียจากการล้างหัวมันน้ำเสียจากการอัดกาก และน้ำเสียจากการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแอมโมเนียและการสลัดแห้ง เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียแต่ละขั้นตอนมีลักษณะต่างกัน โดยมีน้ำเสียเข้าระบบวันละประมาณ 3,600 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าคุณภาพน้ำต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

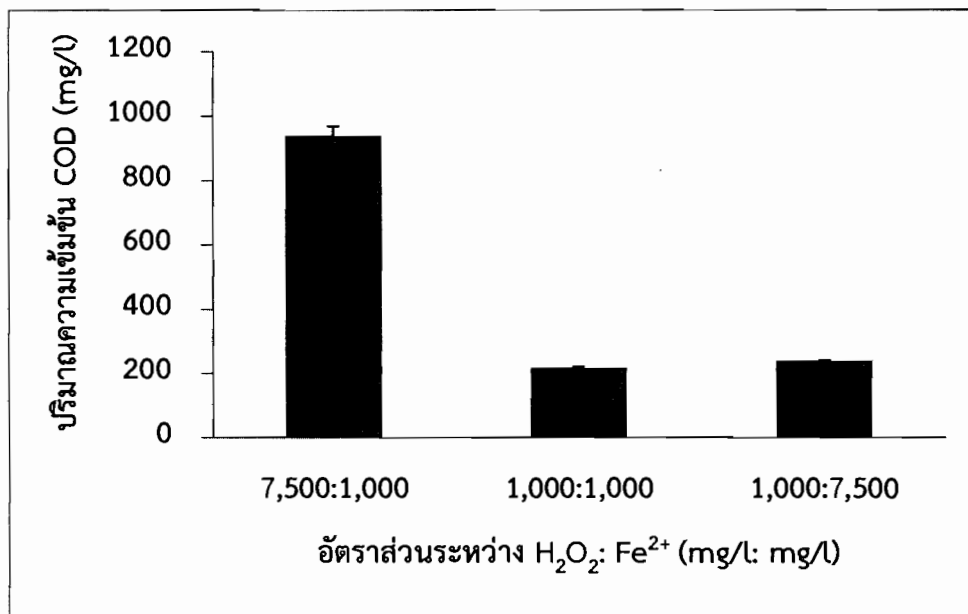
ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตแอมโมเนียปัสเปหลังที่ผ่านระบบ UASB

พารามิเตอร์	ค่าคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม
pH	6 – 7	5.5-9.0
COD เฉลี่ย (mg/l)	1,788±269	ไม่เกิน 120 mg/l
SS เฉลี่ย (mg/l)	1,075±123	ไม่เกิน 50 mg/l
TDS เฉลี่ย (mg/l)	1,335±157	ไม่เกิน 3,000 mg/l

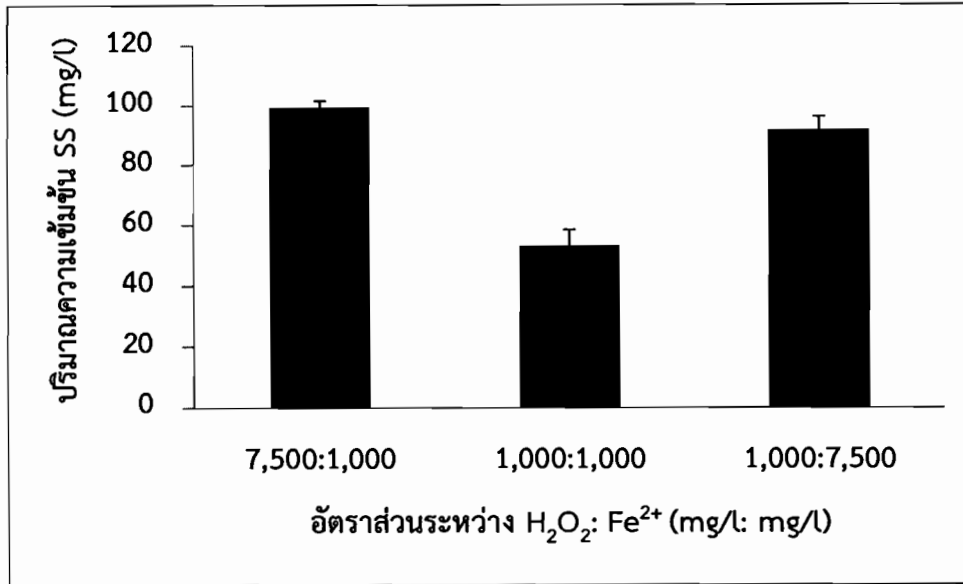
จากการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเสียก่อนทำการบำบัดพบว่าน้ำเสียที่ได้จากการเก็บตัวอย่างมีค่าคุณภาพน้ำทิ้ง ได้แก่ TDS ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งส่วน COD และ SS เกินค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจึงจำเป็นต้องมีการบำบัดด้วยการฉายรังสียูวี กระบวนการเฟนตัน และกระบวนการโฟโตเฟนตัน

4.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

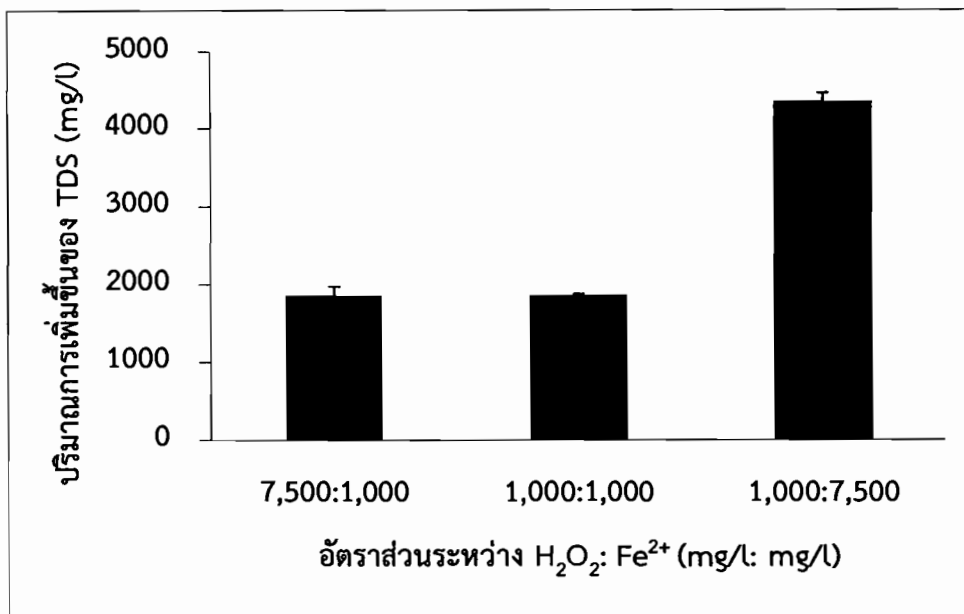
จากการศึกษาอิทธิพลอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD SS และ TDS ของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ที่ pH 3 ความเข้มข้นของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 7,500: 1,000 1,000: 1,000 และ 1,000:7,500 mg/l:mg/l มีระยะเวลาในการกวนด้วย Magnetic Stirrer ด้วยความเร็วรอบคงที่ที่ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ณ อุณหภูมิห้อง ผลการวิเคราะห์ปริมาณการกำจัด COD SS และ TDS สรุปผลดังแสดงในภาพที่ 4.1 4.2 และ 4.3



ภาพที่ 4.1 ปริมาณความเข้มข้น COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน

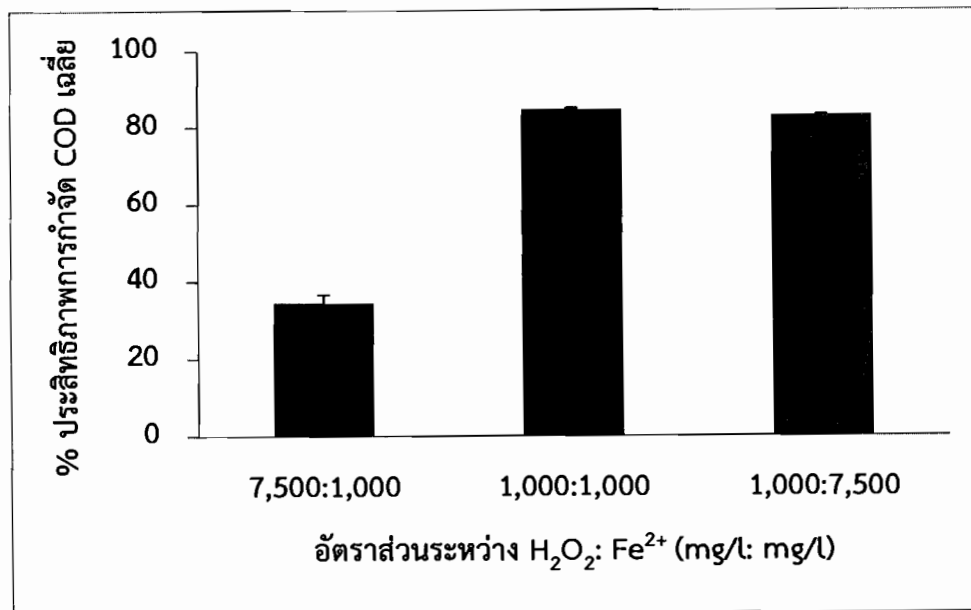


ภาพที่ 4.2 ปริมาณความเข้มข้น SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน

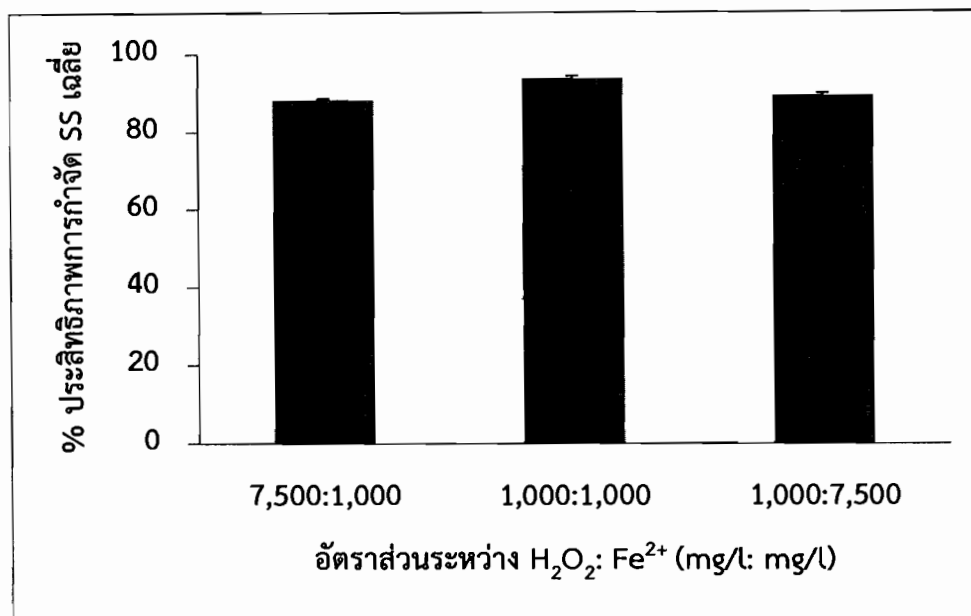


ภาพที่ 4.3 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน

จากภาพที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนของ H_2O_2 : Fe^{2+} ที่แตกต่างกัน ปริมาณในการกำจัดก็แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของ H_2O_2 : Fe^{2+} ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเฟนตันในน้ำเสียนี้ คือ 1,000:1,000 mg/l:mg/l ซึ่ง COD และ SS ลดลงเหลือ 218.00 ± 2.83 mg/l และ 53.50 ± 4.95 mg/l ตามลำดับ ส่วน TDS เพิ่มขึ้นเป็น $1,863.00 \pm 12.73$ mg/l ดังภาพที่ 4.3



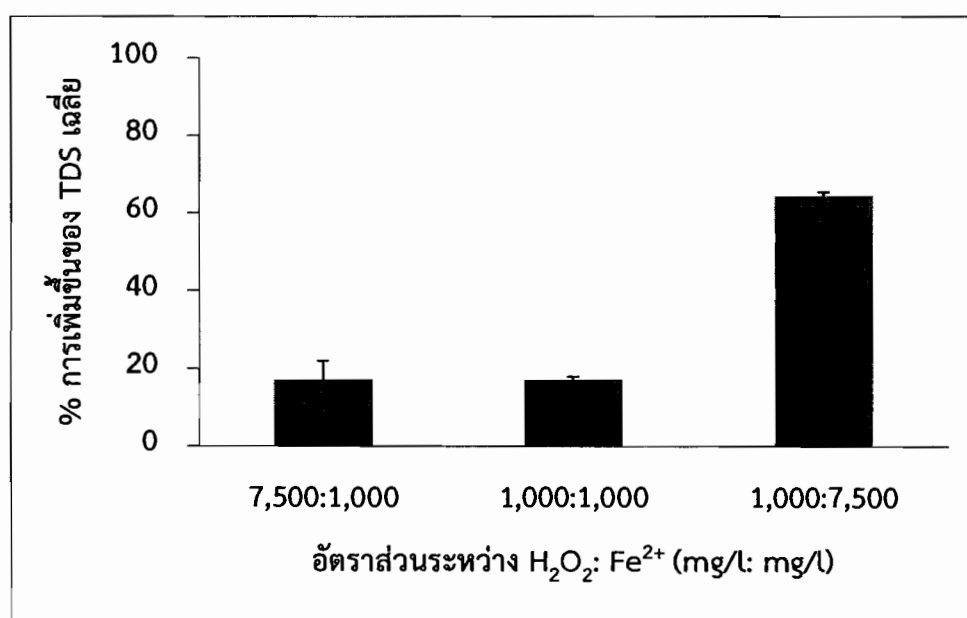
ภาพที่ 4.4 อิทธิพลอัตราส่วนของ H_2O_2 : Fe^{2+} ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน



ภาพที่ 4.5 อิทธิพลของอัตราส่วนของ H_2O_2 : Fe^{2+} ต่อประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน

อิทธิพลของอัตราส่วนของ H_2O_2 : Fe^{2+} ต่อประสิทธิภาพการบำบัด COD และ SS ในน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน ดังแสดงในภาพที่ 4.4 และ 4.5 พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ SS

สูงสุด มีค่าเท่ากับ $84.86 \pm 0.19\%$ และ $93.76 \pm 0.58\%$ ตามลำดับ โดยมีค่า COD ลดลงจาก $1,440 \pm 0$ mg/l เหลือ 218.00 ± 2.83 mg/l และ SS ลดลงจาก 858 ± 0 mg/l เหลือ 53.50 ± 4.95 mg/l ตามลำดับ ที่อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์ และมีอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l จะส่งผลต่อพฤติกรรมการสลายตัวของ H_2O_2 แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เกิดการสลายตัวของ H_2O_2 แล้วก็เกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์เลย และเมื่อมีสารอินทรีย์มากๆ จะเป็นตัวขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง $OH\cdot$ และ Fe^{2+} (Neyens and Baeyens, 2003) เมื่อมีอัตราส่วนของ H_2O_2 สูงขึ้น จะส่งผลให้เกิดอนุมูลไฮดรอกซิลลดลง เนื่องจากเกิดการจับตัวกันเองของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเติม Fe^{2+} เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูงขึ้นเช่นกัน เนื่องจาก Fe^{2+} เป็นตัวเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล ทั้ง COD และ SS ก็ยังไม่ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

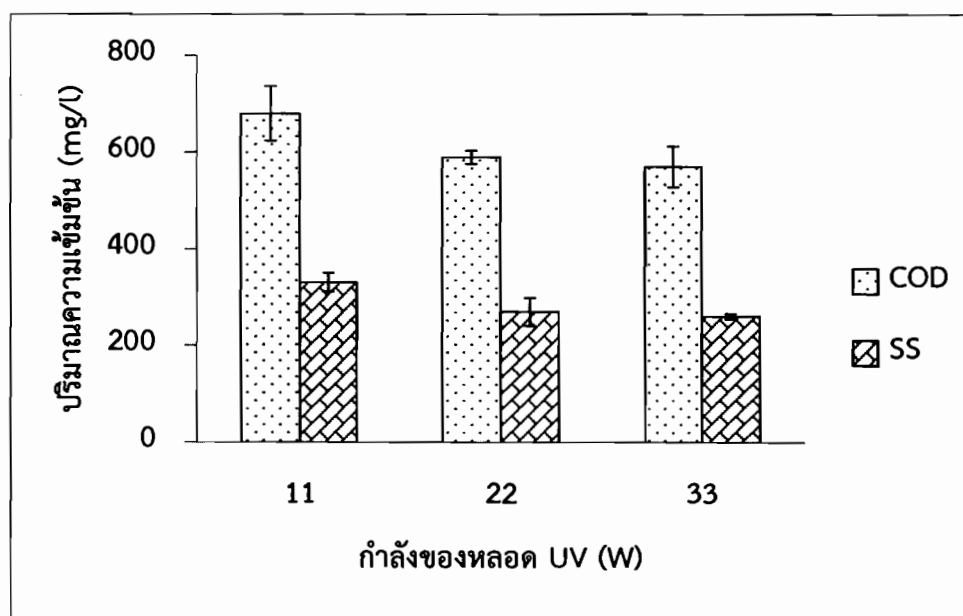


ภาพที่ 4.6 เปอร์เซนต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟ้นต้น

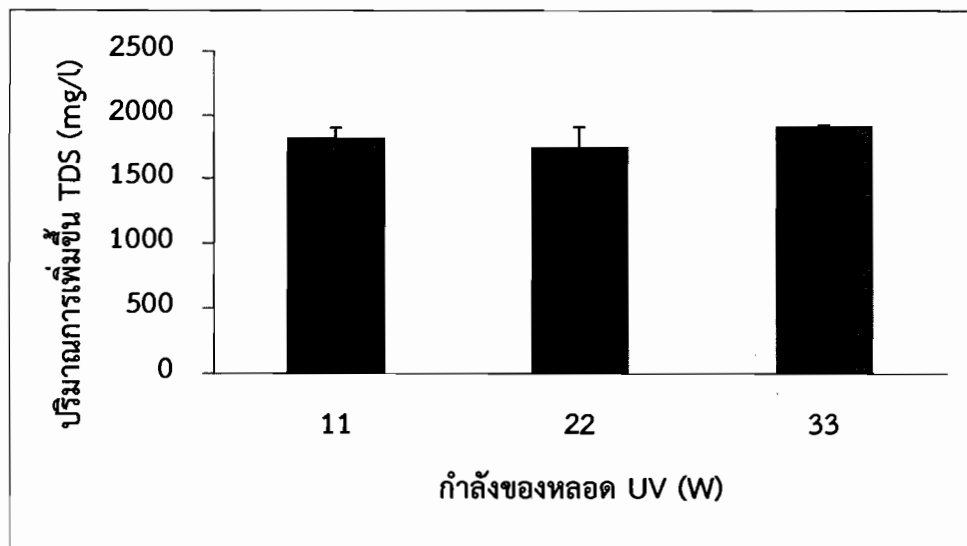
การใช้ Fe^{2+} ในปริมาณที่มากเกินไปทำให้มี Fe^{3+} หลงเหลือในน้ำเสียจึงมีปริมาณของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ที่อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l TDS เพิ่มขึ้นจาก $1,540 \pm 0$ mg/l เป็น $1,863.00 \pm 12.73$ mg/l คิดเป็น $17.34 \pm 0.56\%$ อย่างไรก็ตาม TDS ถึงจะเพิ่มขึ้นแต่ยังผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการฉายรังสี UV

ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการฉายรังสี UV อย่างเดียว จากการศึกษพบว่ากำลังของหลอด UV ที่เหมาะสม ในสภาวะที่ pH 3 กวณผสมด้วยความเร็วรอบคงที่ 120 รอบต่อนาที อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยกำลังของหลอด UV ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 11 22 และ 33 W พบว่าปริมาณการกำจัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังของหลอด UV ดังแสดงในภาพที่ 4.7

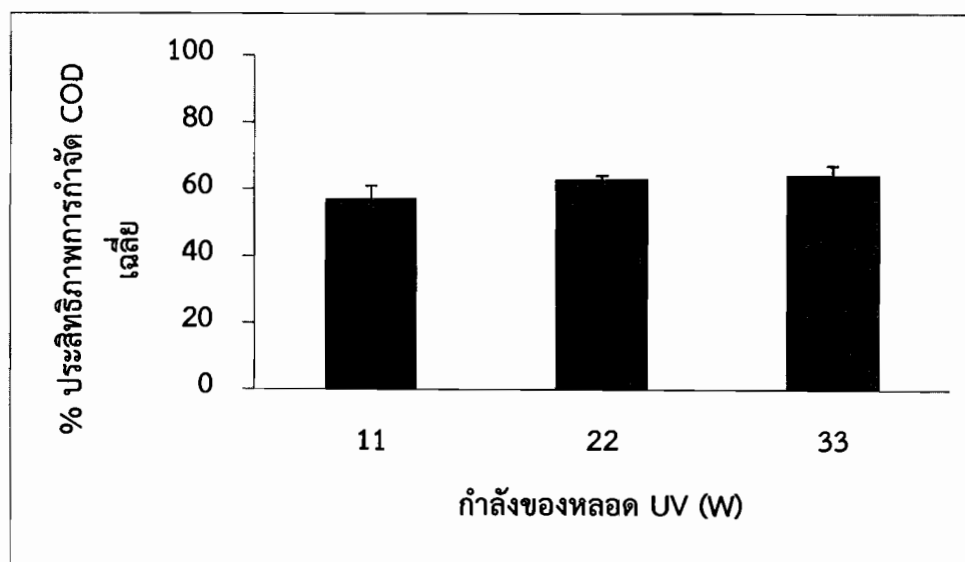


ภาพที่ 4.7 ปริมาณความเข้มข้น COD และ SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการฉายรังสี UV

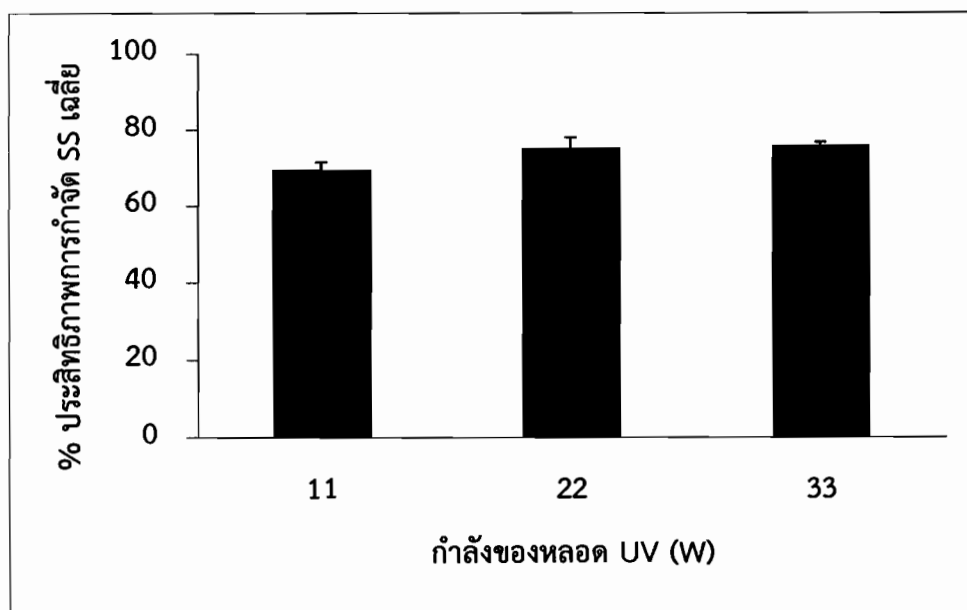


ภาพที่ 4.8 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการฉายรังสี UV

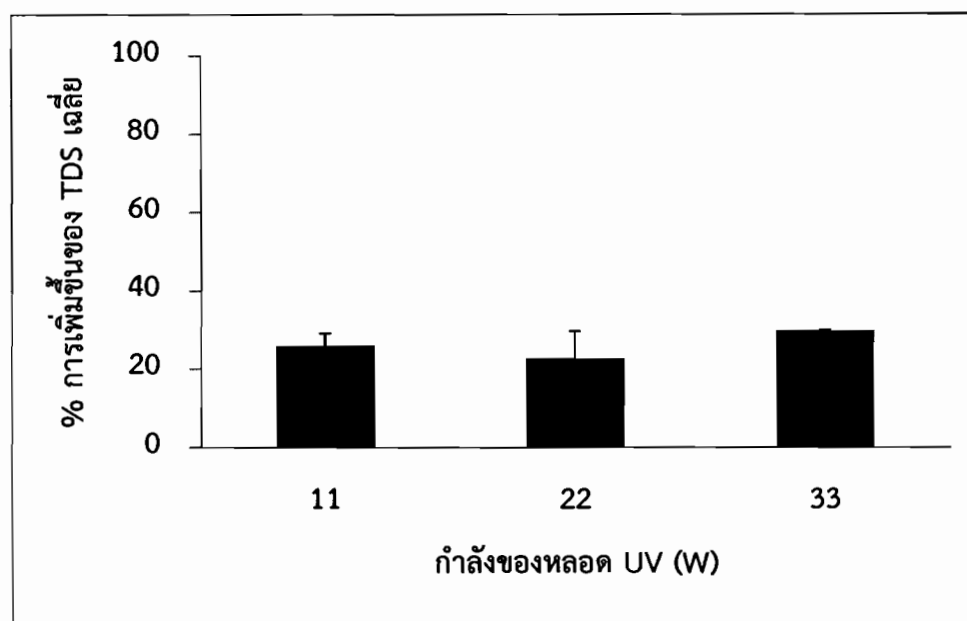
จากภาพที่ 4.6 และ 4.7 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มแสงของรังสี UV ที่แตกต่างกัน ปริมาณในการกำจัดก็แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าความเข้มแสงของรังสี UV ที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียนี้ คือ 33 วัตต์ ซึ่ง COD และ SS ลดลงเหลือ 570.00 ± 42.43 mg/l และ 260.00 ± 5.66 mg/l ตามลำดับ ส่วน TDS เพิ่มขึ้นเป็น $1,920.00 \pm 2.83$ mg/l ดังแสดงในภาพที่ 4.8



ภาพที่ 4.9 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV



ภาพที่ 4.10 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาทีด้วยการฉายรังสี UV



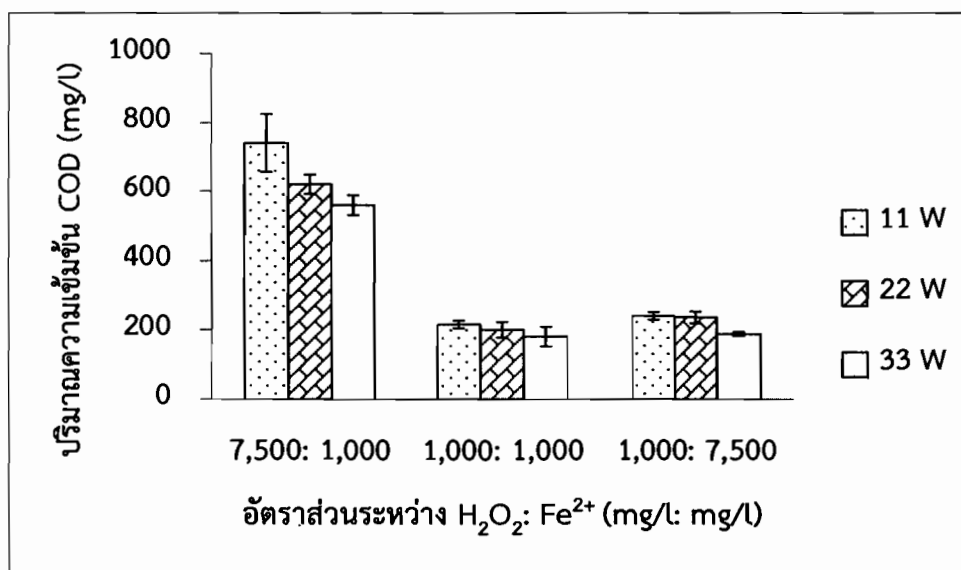
ภาพที่ 4.11 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV

ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อประสิทธิภาพการบำบัดด้วยการฉายรังสี UV อย่างเดียว แสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 จากการศึกษาพบว่ากำลังของหลอด UV ที่เหมาะสมต่อ

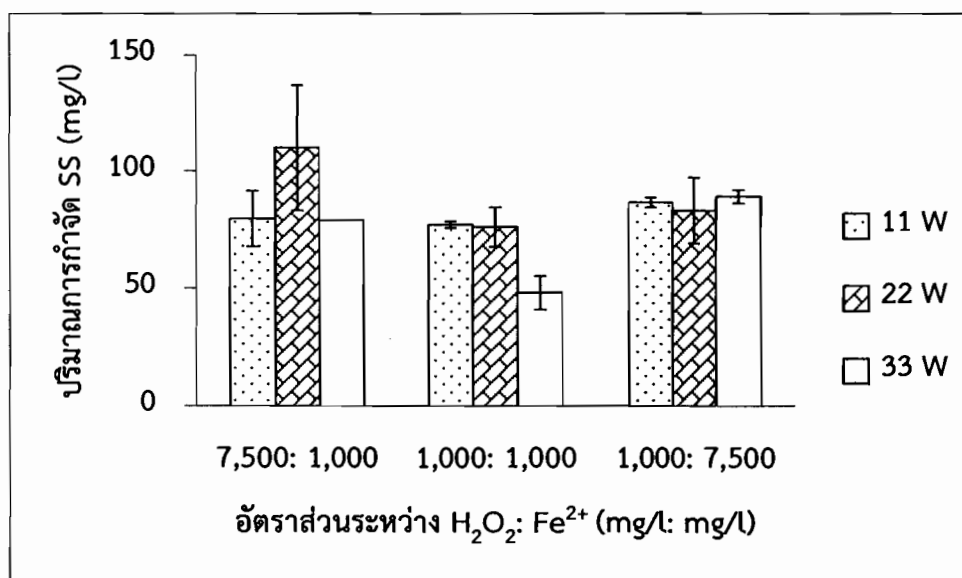
ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยการฉายรังสี UV พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังของหลอด UV เนื่องจากแสงของรังสี UV สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ ทำให้สารอินทรีย์เกิดการสลายตัวไป เป็นคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ เมื่อมีการเพิ่มความเข้มแสงของรังสี UV จึงย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้น ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดมีค่าเท่ากับ $64.38 \pm 2.65\%$ และ SS สูงสุดมีค่าเท่ากับ $76.23 \pm 0.51\%$ ในสภาวะที่มีกำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 W ทำให้ค่า COD ลดลงจาก $1,600 \pm 0$ mg/l เหลือ 570.00 ± 42.43 mg/l และ SS ลดลงจาก $1,094 \pm 0$ mg/l เหลือ 260.00 ± 5.66 mg/l จากการศึกษาของ Fernando et al, (1997) ศึกษาการออกซิเดชันของน้ำเสียโรงกลั่นสุราและโรงแปรรูปมะเขือเทศโดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่น 254 nm เพียงอย่างเดียว ผลการศึกษาแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เพียงอย่างเดียวพบว่าน้ำเสียจากโรงกลั่นสุราทนต่อการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) เนื่องจากไม่สามารถกำจัดซีโอดี (COD) ได้เลย ขณะที่ซีโอดี (COD) ในน้ำเสียจากโรงแปรรูปมะเขือเทศถูกกำจัดได้เล็กน้อย ทั้งนี้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ด้วยการฉายรังสี UV เพียงอย่างเดียวขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียที่แตกต่างกัน เช่น ความขุ่น เป็นต้น ซึ่งลักษณะของน้ำเสียที่ต่างกันทำให้การทำงานของรังสี UV ทำงานได้ต่างกัน จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกัน นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าค่าของแข็งละลายน้ำ (TDS) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.11 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ $1,920.00 \pm 2.83$ mg/l คิดเป็น $29.69 \pm 0.10\%$ แต่ค่า TDS ดังกล่าวมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ส่วน COD และ SS ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง จึงต้องนำไปบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

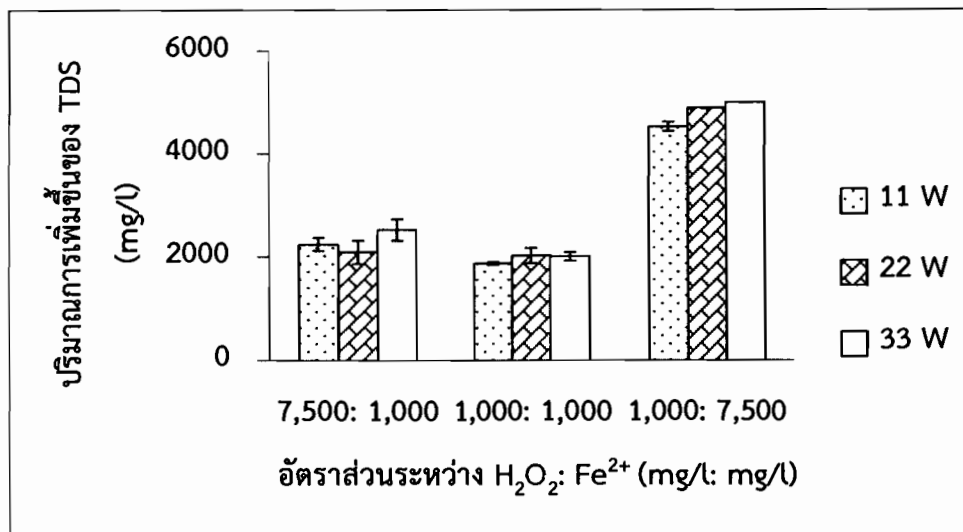
ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน ในสภาวะที่ pH 3 กวนผสมด้วยความเร็วรอบคงที่ 120 รอบต่อนาที ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยกำลังของหลอด UV ที่ใช้ในการทดลองเท่ากับ 11 22 และ 33 W ตามลำดับ และเติมอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 7,500:1,000 1,000:1,000 และ 1,000:7,500 mg/l:mg/l ตามลำดับ พบว่า ปริมาณการกำจัดของ COD และ SS เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของกำลังของหลอด UV และเติม $H_2O_2: Fe^{2+}$ ในอัตราส่วนที่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 4.12 และ 4.13



ภาพที่ 4.12 ปริมาณความเข้มข้น COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

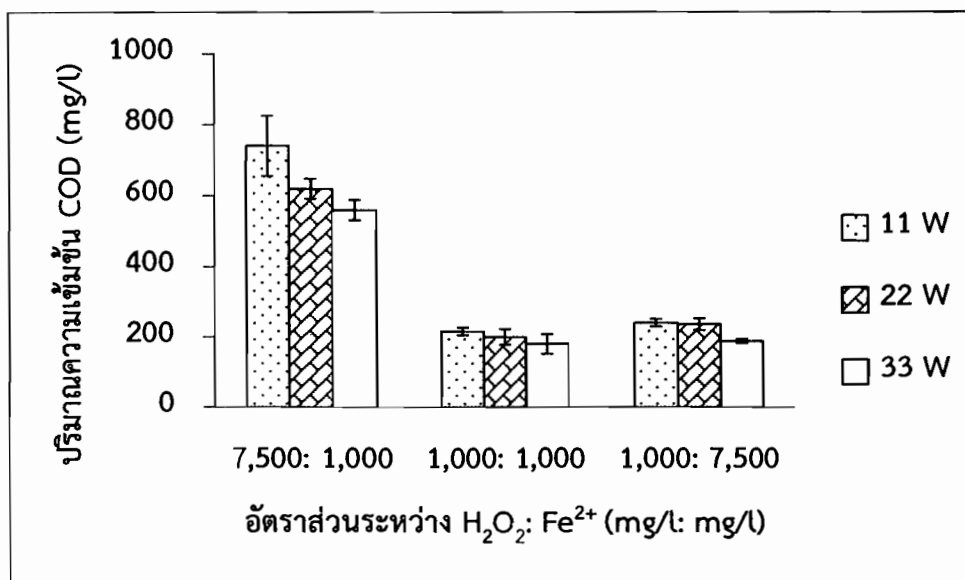


ภาพที่ 4.13 ปริมาณความเข้มข้น SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

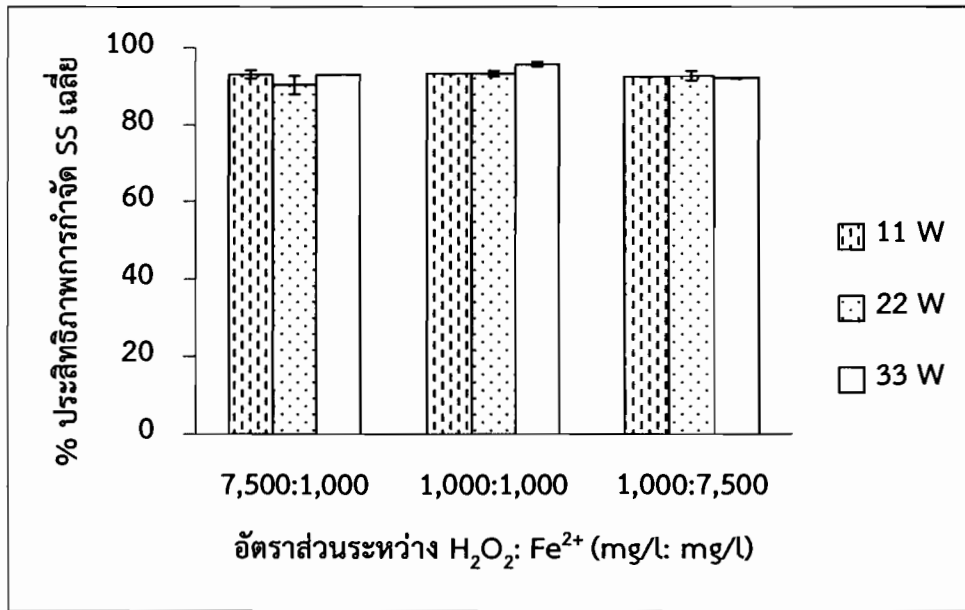


ภาพที่ 4.14 ปริมาณการเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

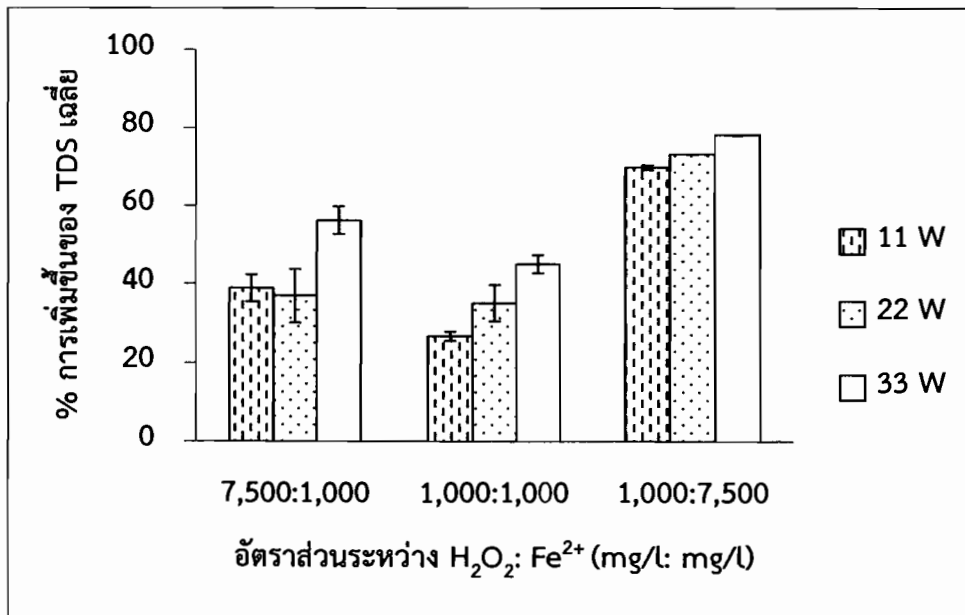
จากภาพที่ 4.12 และ 4.13 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ H₂O₂: Fe²⁺ ที่แตกต่างกัน ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ SS ก็แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าความเข้มแสงของรังสี UV ที่เหมาะสมในการบำบัด คือ 33 W และอัตราส่วนของ H₂O₂: Fe²⁺ ที่เหมาะสมเท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l ซึ่งมีค่า COD และ SS ลดลงเหลือ 180.00±28.28 mg/l และ 48.00±7.07 mg/l ตามลำดับ ส่วน TDS เพิ่มขึ้นเป็น 2,006.00±84.85 mg/l ดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.15 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ H₂O₂: Fe²⁺ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน



ภาพที่ 4.16 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ H₂O₂: Fe²⁺ ต่อประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน



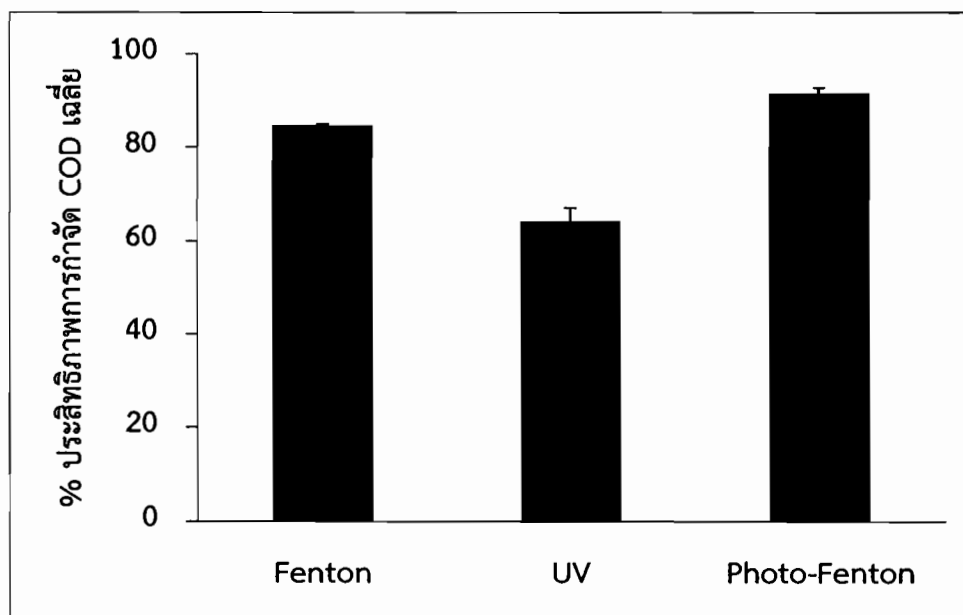
ภาพที่ 4.17 เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการบำบัด COD และ SS ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน แสดงในภาพที่ 4.15 และภาพที่ 4.16 ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดเท่ากับ $91.70 \pm 1.07\%$ และ SS สูงสุดเท่ากับ $95.76 \pm 0.63\%$ ตามลำดับ ซึ่ง COD ลดลงจาก $2,120 \pm 0$ mg/l เหลือ 180 ± 28.28 mg/l และ SS ลดลงจาก $1,131 \pm 0$ mg/l เหลือ 48.00 ± 7.07 mg/l ที่สัดส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l ที่กำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 วัตต์ เมื่อมีสัดส่วนของ Fe^{2+} ที่สูงขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดก็สูงขึ้นเช่นกัน สอดคล้องกับการศึกษาของ Oscar et al., (2008) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากน้ำชะขยะจากหลุมฝังกลบโดยกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงต่างๆ พบว่า ปฏิกิริยาโฟโตเฟนตัน เป็นปฏิกิริยาที่ดีที่สุดในการลดค่าซีโอดี เนื่องจาก Fe^{2+} เป็นตัวเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น ส่งผลให้สารอินทรีย์ถูกออกซิไดซ์สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มสัดส่วนของ H_2O_2 มากขึ้น กลับทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยากันเองของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (ณัชชารีย์ ธนกรจิตติพัฒน์, 2555) ทำให้มีปริมาณอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD น้อยลง ซึ่ง Fernando et al., (1997) ได้ทำการศึกษาการออกซิเดชันของน้ำเสียโรงกลั่นสุรา และโรงแปรรูปมะเขือเทศ โดยใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ที่ความยาวคลื่น 254 nm ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ผลการศึกษาเมื่อใช้แสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) พบว่า ซีโอดี (COD) ในน้ำเสียจากโรงกลั่นสุราลดลง 38% ขณะที่น้ำเสียจากโรงแปรรูปมะเขือเทศสามารถกำจัดซีโอดี (COD) ได้มากกว่า 60% ส่วน TDS เพิ่มขึ้นเป็น $2,006.00 \pm 84.85$ mg/l คิดเป็น $45.02 \pm 2.33\%$ ดังแสดงในภาพที่ 4.17 เนื่องจากมีการเติม Fe^{2+} ซึ่งเป็นของแข็งละลายน้ำในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย จึงไม่สามารถกำจัด TDS ได้ และ pH ยังมีอิทธิพลต่อการกำจัด TDS ที่ pH สูงๆจึงจะสามารถกำจัด TDS ได้ แต่ยังคงผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง (ณัชชารีย์ ธนกรจิตติพัฒน์, 2555) หลังจากผ่านกระบวนการ โฟโตเฟนตันแล้ว SS ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วน TDS มีค่าสูงขึ้นแต่ยังผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งอยู่ แต่ค่า COD ยังไม่ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง จึงต้องมีการบำบัดเพิ่มเติม เช่น การตกตะกอน และการกรอง เป็นต้น

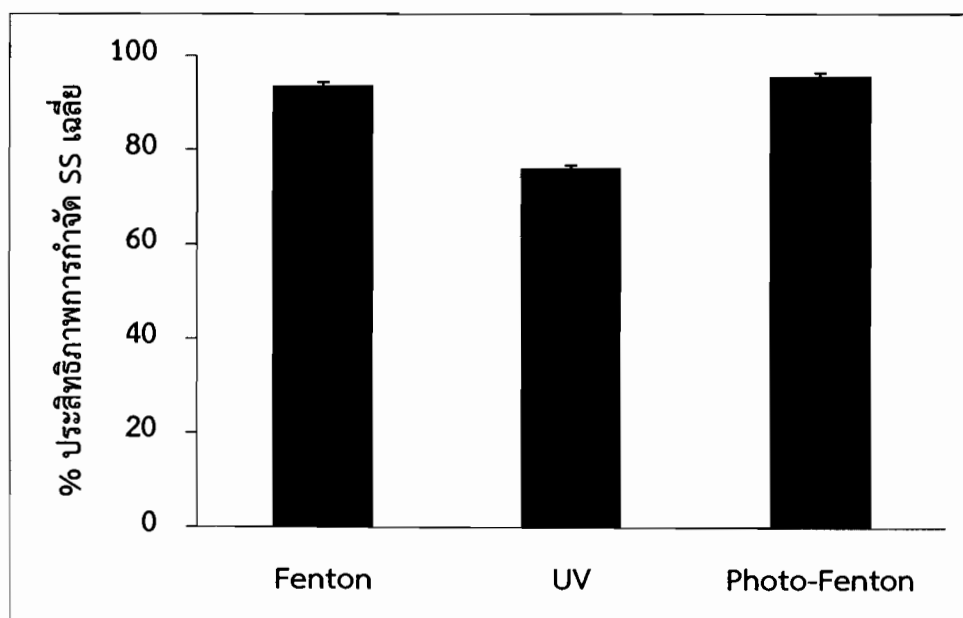
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน การฉายรังสี UV และกระบวนการโฟโตเฟนตัน

จากผลการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการเฟนตัน การฉายรังสี UV และกระบวนการโฟโตเฟนตัน ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และ 4.11 พบว่า กระบวนการโฟโตเฟนตันมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังสูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดเท่ากับ $91.70 \pm 1.07\%$ SS สูงสุดเท่ากับ $95.76 \pm 0.63\%$

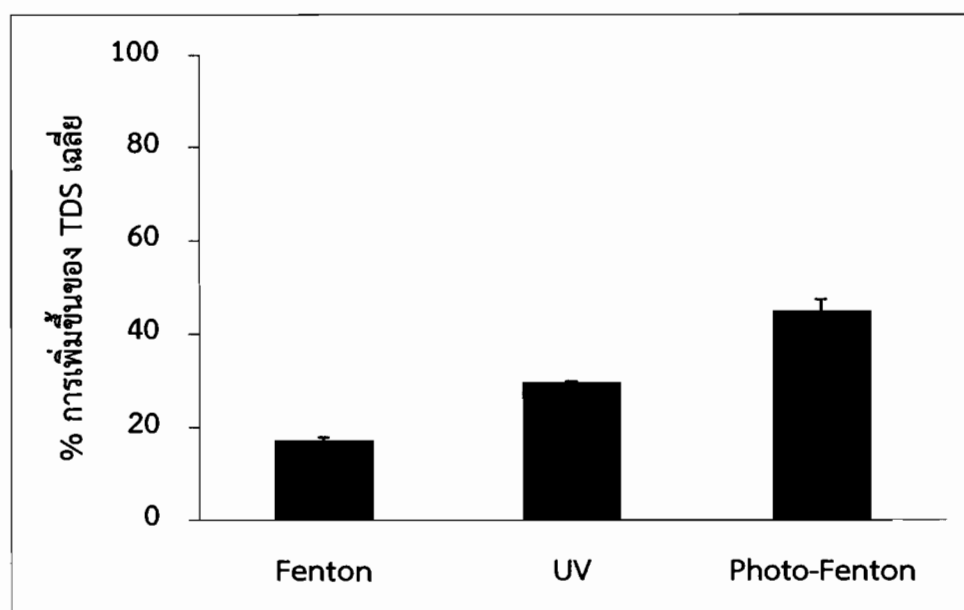
รองลงมาคือกระบวนการเฟนตัน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD และ SS สูงสุดเท่ากับ $84.86 \pm 0.19\%$ และ $93.76 \pm 0.58\%$ ตามลำดับ และสุดท้ายการฉายรังสี UV เพียงอย่างเดียว โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดมีค่าเท่ากับ $64.38 \pm 2.65\%$ และ SS สูงสุดมีค่าเท่ากับ $76.23 \pm 0.51\%$ ส่วน TDS มีค่าเพิ่มขึ้นในทุกกระบวนการ ดังแสดงในภาพที่ 4.12



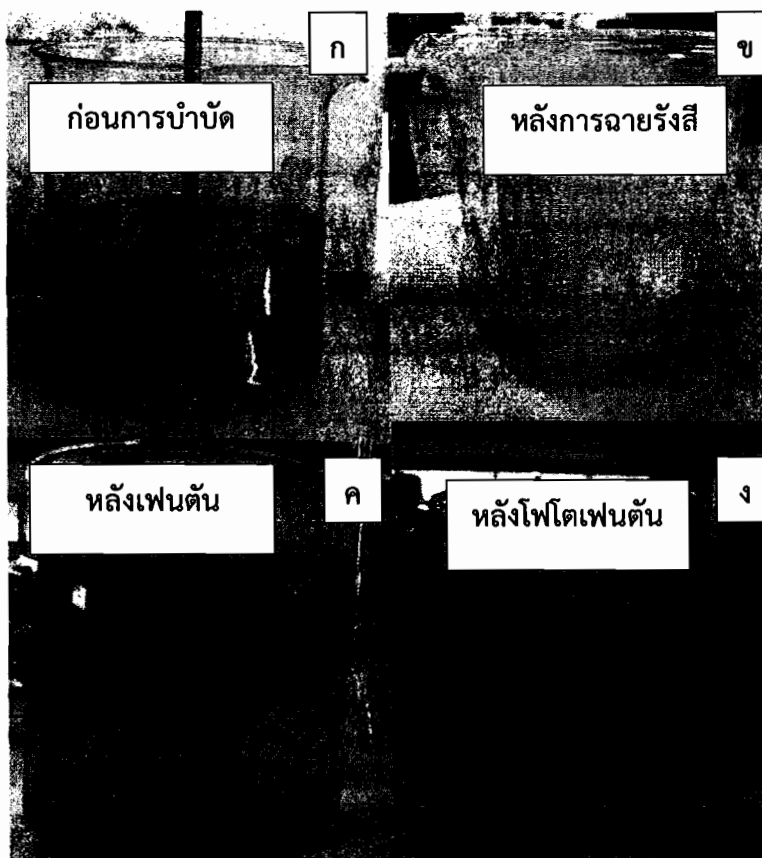
ภาพที่ 4.18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที



ภาพที่ 4.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัด SS ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที



ภาพที่ 4.20 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของของแข็งละลายน้ำ (TDS) ที่สภาวะ pH 3 เวลา 120 นาที



ภาพที่ 4.21 (ก) ภาพก่อนการบำบัดและหลังการบำบัดด้วย (ข) การฉายรังสี UV ที่สภาวะ pH 3 กำลังของหลอด UV 33W(ค) การบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตันที่สภาวะ pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2: Fe^{2+}$ 1,000: 1,000 mg/l: mg/l และ (ง) กระบวนการโฟโตเฟนตัน ที่สภาวะ pH 3 อัตราส่วน $H_2O_2: Fe^{2+}$ 1,000:1,000 mg/l:mg/l กำลังของหลอด UV 33W

4.6 ประเมินค่าใช้จ่าย

วิเคราะห์ค่าใช้จ่ายกระบวนการบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการเฟนตัน พบว่าที่อัตราส่วนของสารเคมี $H_2O_2: Fe^{2+}$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l มีค่าใช้จ่ายต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรเท่ากับ 26 บาท ส่วนกระบวนการฉายรังสี UV พบว่า ที่กำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 วัตต์ สามารถบำบัดได้ดีที่สุด ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในส่วนของหลอด UV กำลัง 33W 1,500.00 บาท/ลิตรน้ำเสีย ส่วนค่าไฟฟ้าคิดตามอัตราของการไฟฟ้านครหลวง เท่ากับ หน่วยละ 1.81 บาท เทียบ 33 W กับเวลาที่ใช่ไป 2 ชั่วโมงคิดเป็น 0.066 หน่วย ประมาณ 0.12 บาท/วัน หรือ 3.6 บาท/เดือน และในส่วนของกระบวนการโฟโตเฟนตัน จากการประเมินค่าใช้จ่ายของสารเคมีและหลอด UV ที่ใช้ในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน พบว่าที่อัตราส่วนของสารเคมี $H_2O_2: Fe^{2+}$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 1,000: 1,000 mg/l: mg/l และกำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 W จะมีค่าใช้จ่าย

ในส่วนของสารเคมี $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 26 บาท/ลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย และหลอด UV กำลัง 33 W 1,500.00 บาท/ลิตรน้ำเสีย นั้นแสดงว่า จะต้องใช้หลอด UV ที่มีกำลัง 33,000W/ลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย ส่วนค่าไฟฟ้าคิดตามอัตราของการไฟฟ้านครหลวง เท่ากับ หน่วยละ 1.81 บาท เทียบ 33 W กับเวลาที่ใช้ไป 2 ชั่วโมงคิดเป็น 0.066 หน่วย ประมาณ 0.12 บาท/วัน หรือ 3.6 บาท/เดือน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการฉายรังสี UV ถึงแม้ว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันจะมีศักยภาพในการบำบัดที่สูงแต่ก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงเช่นกัน จึงอาจจะต้องมีการพิจารณาในส่วนนี้ โดยประเมินค่าใช้จ่ายในรูปของการคิดเป็นสารเคมีทั่วไป (Commercial Grade) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ต้นทุนค่าใช้จ่ายของกระบวนการบำบัดน้ำเสีย (ราคา commercial grade ของ H_2O_2 และ $FeSO_4$)

สารเคมี *	ราคา (บาท/กิโลกรัม)
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	9.00
H_2O_2	17.00
H_2SO_4	18.6
NaOH	48.00

ที่มา: สุเทพ สิริวิทยาปกรณ์ และวีระนุช บุญรุ่ง, 2553

โฟโตเฟนตันเป็นกระบวนการที่สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมมันสำปะหลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD และ SS สูงสุดเท่ากับ $91.70 \pm 1.07\%$ และ $95.76 \pm 0.63\%$ และค่า COD และ SS ลดลงเหลือ 180.00 ± 28.28 mg/l และ 48.00 ± 7.07 mg/l ส่วน TDS เพิ่มขึ้นเป็น $2,006.00 \pm 84.85$ mg/l คิดเป็น $45.02 \pm 2.33\%$ ภายใต้สภาวะที่มีค่า pH 3 กำลังของหลอดยูวี 33 W และมีอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l ซึ่ง ค่า COD ยังไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วน SS และ TDS ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ดังนั้นกระบวนการโฟโตเฟนตันมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการเฟนตัน และการฉายรังสี UV จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โฟโตเฟนตัน เป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูงในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานผลิตแอมมันสำปะหลัง ถึงแม้ว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันจะมีประสิทธิภาพสูงกว่ากระบวนการอื่น แต่ก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่ากระบวนการอื่นๆ เช่นกัน

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการเฟนตัน การฉายรังสี UV เพียงอย่างเดียว และกระบวนการโฟโตเฟนตันในการบำบัด โดยศึกษาอิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งทำการศึกษาพารามิเตอร์ COD SS และ TDS

ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ SS สูงสุด เท่ากับ $84.86 \pm 0.19\%$ และ $93.76 \pm 0.58\%$ ตามลำดับ ที่อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l ซึ่ง COD และ SS ลดลงเหลือ 218.00 ± 2.83 และ 53.50 ± 4.95 mg/l ตามลำดับ ส่วนค่า TDS เพิ่มขึ้นเป็น $1,863.00 \pm 12.73$ mg/l คิดเป็น $17.34 \pm 0.56\%$ อย่างไรก็ตามทั้ง COD และ SS ก็ยังไม่ผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วน TDS ถึงจะเพิ่มขึ้นแต่ยังผ่านตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยการฉายรังสี UV เพียงอย่างเดียว พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัด COD และ SS สูงสุด เท่ากับ $64.38 \pm 2.65\%$ และ $76.23 \pm 0.52\%$ ตามลำดับ ที่กำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 W ซึ่ง COD และ SS ลดลงเหลือ 570.00 ± 42.43 และ 260.00 ± 5.66 mg/l ตามลำดับ ส่วนค่า TDS เพิ่มขึ้นเป็น $1,920.00 \pm 2.83$ mg/l คิดเป็น $29.69 \pm 0.10\%$ แต่ค่า TDS ดังกล่าวมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วน COD และ SS ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง จึงต้องนำไปบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

ผลการทดลองการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน พบว่าประสิทธิภาพการกำจัด COD และ SS สูงสุด เท่ากับ $91.70 \pm 1.07\%$ และ $95.76 \pm 0.63\%$ ตามลำดับ ที่สัดส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ เท่ากับ 1,000:1,000 mg/l:mg/l ที่กำลังของหลอด UV เท่ากับ 33 W ซึ่ง COD และ SS ลดลงเหลือ 180.00 ± 28.28 และ 48.00 ± 7.07 mg/l ตามลำดับ ส่วนค่า TDS เพิ่มขึ้นเป็น $2,006.00 \pm 84.85$ mg/l คิดเป็น $45.02 \pm 2.34\%$ แต่ค่า TDS ดังกล่าวมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง ส่วน COD และ SS ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

ดังนั้นกระบวนการโฟโตเฟนตันมีประสิทธิภาพสูงกว่าปฏิกิริยาเฟนตัน และการฉายรังสี UV จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โฟโตเฟนตันเป็นกระบวนการที่มีศักยภาพสูงในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้อาจต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในแต่ละกระบวนการด้วย ถึงแม้ว่ากระบวนการโฟโตเฟนตันจะมีศักยภาพในการบำบัดที่สูงกว่ากระบวนการอื่น

แต่ก็มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่ากระบวนการอื่นเช่นกัน ดังนั้นจะต้องพิจารณาในส่วนนี้ด้วยว่าคุ้มหรือไม่ในการใช้กระบวนการนี้ในการบำบัด แต่อย่างไรก็ตาม COD หลังการบำบัดยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง จำเป็นต้องมีระบบบำบัดเพิ่มเติมเช่น การตกตะกอน หรือ การกรอง เป็นต้น สำหรับ TDS และ SS มีค่าผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรศึกษาที่สภาวะของ pH ที่แตกต่างกัน เนื่องจาก pH มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด
- 5.2.2 ควรศึกษากระบวนการโฟโตเฟนตันร่วมกับกระบวนการอื่น เช่น กระบวนการโฟโตเฟนตันร่วมกับการตกตะกอน

เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- กนกวรรณ แก้วดี, จันทา จงงาม และจินตนา โสทับ. ผลกระทบของกระบวนการเฟนตันที่มีต่ออัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดี ในกระบวนการบำบัดน้ำชะขยะ. ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2555.
- เกษม ประดิษฐ์พัฒนกิจ. การพัฒนาต้นแบบระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคโนโลยีดีเอสอาร์จทางไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.
- กรรณิการ์ สิริสิงห. การวิเคราะห์ค่าซีโอดี เคมีน้ำ น้ำโสโครกและการวิเคราะห์. กรุงเทพฯ: ประยูรวงศ์, 2549.
- กรมควบคุมมลพิษ. น้ำเสียชุมชนและระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, 2545.
- จันทนภา สหุณิล และคณะ. รายงานการวิจัยการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมโดยวิธี Photo-Fenton oxidation process. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมีเทคนิคจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546
- จินต์ อโณทัย และคณะ. โครงการการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงบำบัดซีโอดีในน้ำออกจากระบบชีวภาพที่บำบัดน้ำชะซึมจากหลุมฝังกลบมันคง. งานวิจัยภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2547.
- ณัชชารีย์ ธนกรจิตติพัฒน์. การบำบัดน้ำเสียจากโรงอาหารโดยกระบวนการเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2555.
- ณัฐพล สุนทรวิภาต. การลดความเป็นพิษของน้ำเสียโรงพยาบาลด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2457.
- ธนภฤต พรหมทอง, ธันวดี เตชะภัทวารกุล สุขสาโรจน์ และชัยศรี สุขสาโรจน์. “กลไกและจลพลศาสตร์ ของปฏิกิริยากำจัดสีในน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยเฟนตันรีเอเจนต์”, วารสารสิ่งแวดล้อมไทย. 24(2): 37-47; 2553.
- ธนรัตน์ วรสุตร และสมคิด วงศ์ไชยสุวรรณ. โครงการสนับสนุนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วยระบบ UASB. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2545.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- ธีรพล วัฒนโกศล. “ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบผสมกวน”, การบำบัดและใช้ประโยชน์จากน้ำเสียจากกระบวนการผลิต. <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/2/3/>. 20 กันยายน, 2557
- นาถ ภูวงศ์ผา. การกำจัดสีและซีไอดีในน้ำเสียห้องปฏิบัติการเคมีด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2555.
- ภิญโญ พานิชพันธ์ และคณะ. “การบำบัดน้ำเสีย”, นิเวศวิทยาและสิ่งแวดล้อม. http://www.il.mahidol.ac.th/emedial/ecology/chapter3/framechapter3_frame.htm. 15 กันยายน, 2557.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
- วันทนา เกียรติสมาน. “ระบบบำบัดแบบบ่อเปิด”, การบำบัดและใช้ประโยชน์จากน้ำเสียจากกระบวนการผลิต. <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/2/3/>. 20 กันยายน, 2557
- โสภิตา บุญอนุเคราะห์. “ลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง”, การบำบัดและการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียจากกระบวนการผลิต. <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/2/3/>. 20 กันยายน, 2557.
- ศิริวิชญ์ แสงนาค และศุภลักษณ์ พยานอน. การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ด้วยกระบวนการโฟโต้เฟนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยากอปเปอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต: มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2554.
- Alejandro, M.S., Yamila, M.R. and Marta, I.L. “Treatment of wastewater from an alkaline cleaning solution by combined coagulation and photo-Fenton processes”, *Separation and Purification Technology*. 132(1): 552-560, 2014.
- Ebrahiem, E.E., Mohammednoor, N.A., and Ahmed, R.M. “Removal of organic pollutants from industrial wastewater by applying photo-Fenton oxidation technology”, *Arabian Journal of Chemistry*. 6(4): 145-252, 2013.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- Fernado, J. B., Manuel, G. A. and Juan, F. G. "Industrial Wastewater Advanced Oxidation Part 2.Ozone combined with hydrogenperoxide or UV radiation", **Elsevier Science**. 31(2): 2415-2528; 1997.
- Huang, Y.H. and et al. "Degradation of phenol using low concentration of ferric ions by the photo-Fenton process", **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**. 41(2): 699-704, 2010.
- Jin, L and et al. "Pretreatment of acrylic fiber manufacturing wastewater by the Fenton process", **journal of desalination**. 284(1): 62-65, 2012.
- Kang, S-F., Liao, C-H. and Po, S-T. "Decolorization of textile wastewater by photofenton oxidation technology", **Chemosphere**. 41(8): 1287-1294, 2000.
- Neyens, E. and Baeyens, J. "A review of classic Fenton's peroxidation as an advanced oxidation technique", **Journal of Hazardous Materials**. 98(1-3): 33-50, 2003.
- Oscar, P., Maria, J.R. and Inmaculada, O. "Photo-Fenton process as an efficient alternative to the treatment of landfill leachates", **Journal of Hazardous Materials**. 153(1-2): 834-842, 2008.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ตารางข้อมูล

ตารางที่ ก.1 อิทธิพลของอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ COD ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/l)	COD ครั้งที่ 1 (mg/l)	COD ครั้งที่ 2 (mg/l)	COD เฉลี่ย (mg/l)	STDEVA
7,500: 1,000	960	920	940	28.28427
1,000: 1,000	220	216	218	2.828427
1,000: 7,500	240	240	240	0

หมายเหตุ * COD เริ่มต้น เท่ากับ 1,440 mg/l ** ทำการทดลองวันที่ 13 มกราคม 2558

ตารางที่ ก.2 อิทธิพลอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ SS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/l)	SS ครั้งที่ 1 (mg/l)	SS ครั้งที่ 2 (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)	STDEVA
7,500: 1,000	98	101	99.5	2.12132
1,000: 1,000	50	57	53.5	4.949747
1,000: 7,500	95	89	92	4.242641

หมายเหตุ * SS เริ่มต้น เท่ากับ 858 mg/l ** ทำการทดลองวันที่ 13 มกราคม 2558

ตารางที่ ก.3 อิทธิพลอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ TDS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการเฟนตัน

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/l)	TDS ครั้งที่ 1 (mg/l)	TDS ครั้งที่ 2 (mg/l)	TDS เฉลี่ย (mg/l)	STDEVA
7,500: 1,000	1,940	1,790	1,865	106.066
1,000: 1,000	1,854	1,872	1,863	12.72792
1,000: 7,500	4,278	4,424	4,351	103.2376

หมายเหตุ * TDS เริ่มต้น เท่ากับ 1,540 mg/l ** ทำการทดลองวันที่ 13 มกราคม 2558

ตารางที่ ก.4 pH ก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน

อัตราส่วนของ H ₂ O ₂ : Fe ²⁺ (mg/L)	ก่อนการบำบัด		หลังการบำบัด	
	pH ครั้งที่ 1	pH ครั้งที่ 2	pH ครั้งที่ 1	pH ครั้งที่ 2
7,500: 1,000	3.01	3.04	2.65	2.77
1,000: 1,000	3.08	3.06	2.8	2.52
1,000: 7,500	3.08	3.08	2.5	2.48

ตารางที่ ก.5 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อปริมาณความเข้มข้นของ COD ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV

กำลังของหลอด UV (W)	COD ครั้งที่ 1 (mg/L)	COD ครั้งที่ 2 (mg/L)	COD เฉลี่ย (mg/L)	STDEVA
11	720	640	680	56.56854
22	600	580	590	14.14214
33	600	540	570	42.42641

หมายเหตุ * COD เริ่มต้น เท่ากับ 1,600 mg/l ** ทำการทดลองวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2558

ตารางที่ ก.6 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อปริมาณความเข้มข้นของ SS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV

กำลังของหลอด UV (W)	SS ครั้งที่ 1 (mg/L)	SS ครั้งที่ 2 (mg/L)	SS เฉลี่ย (mg/L)	STDEVA
11	317	345	331	19.79899
22	249	290	269.5	28.99138
33	256	264	260	5.656854

หมายเหตุ * SS เริ่มต้น เท่ากับ 1,094 mg/l ** ทำการทดลองวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2558

ตารางที่ ก.7 อิทธิพลของความเข้มแสงของรังสี UV ต่อปริมาณความเข้มข้นของ TDS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยการฉายรังสี UV

กำลังของหลอด UV (W)	TDS ครั้งที่ 1 (mg/L)	TDS ครั้งที่ 2 (mg/L)	TDS เฉลี่ย (mg/L)	STDEVA
11	1,772	1,878	1,825	74.95332
22	1,646	1,864	1,755	154.1493
33	1,918	1,922	1,920	2.828427

หมายเหตุ * TDS เริ่มต้น เท่ากับ 1,350 mg/L ** ทำการทดลองวันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2558

ตารางที่ ก.8 pH ก่อนและหลังการบำบัดด้วยการฉายรังสี UV

กำลังของหลอด UV (W)	ก่อนการบำบัด		หลังการบำบัด	
	pH ครั้งที่ 1	pH ครั้งที่ 2	pH ครั้งที่ 1	pH ครั้งที่ 2
11	3.07	3.07	3.27	3.29
22	3.03	3.05	3.15	3.08
33	3.08	3.08	3.11	3.05

ตารางที่ ก.9 อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มข้นของ COD ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/L)	COD ครั้งที่ 1 (mg/L)	COD ครั้งที่ 2 (mg/L)	COD เฉลี่ย (mg/L)	STDEVA
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 11 W				
7,500: 1,000	680	800	740	84.85281
1,000: 1,000	208	224	216	11.31371
1,000: 7,500	248	232	240	11.31371

หมายเหตุ * COD เริ่มต้น เท่ากับ 1,860 mg/L ** ทำการทดลองวันที่ 6 มีนาคม 2558

ตารางที่ ก.9 อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มชั้นของ COD ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน (ต่อ)

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/l)	COD ครั้งที่ 1 (mg/l)	COD ครั้งที่ 2 (mg/l)	COD เฉลี่ย (mg/l)	STDEVA
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 22 W				
7,500: 1,000	640	600	620	28.28427
1,000: 1,000	216	184	200	22.62742
1,000: 7,500	224	248	236	16.97056
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 33 W				
7,500: 1,000	580	540	560	28.28427
1,000: 1,000	200	160	180	28.28427
1,000: 7,500	192	184	188	5.656854

หมายเหตุ * COD เริ่มต้นที่หลอด UV 22W เท่ากับ 1,920 mg/l ทำการทดลองวันที่ 28 มีนาคม 2558 ** COD เริ่มต้นที่หลอด UV 33W เท่ากับ 2,120 mg/l ทำการทดลองวันที่ 8 เมษายน 2558

ตารางที่ ก.10 อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณความเข้มชั้นของ SS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/l)	SS ครั้งที่ 1 (mg/l)	SS ครั้งที่ 2 (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)	STDEVA
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 11 W				
7,500: 1,000	88	71	79.5	12.02082
1,000: 1,000	78	76	77	1.414214
1,000: 7,500	88	85	86.5	2.12132
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 22 W				
7,500: 1,000	129	91	110	26.87006
1,000: 1,000	82	70	76	8.485281
1,000: 7,500	73	93	83	14.14214

ตารางที่ ก.10 อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณ ความเข้มข้นของ SS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน (ต่อ)

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/l)	SS ครั้งที่ 1 (mg/l)	SS ครั้งที่ 2 (mg/l)	SS เฉลี่ย (mg/l)	STDEVA
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 33 W				
7,500: 1,000	79	79	79	0
1,000: 1,000	53	43	48	7.071068
1,000: 7,500	91	87	89	2.828427

หมายเหตุ * SS เริ่มต้นที่หลุด UV 11W เท่ากับ 1,149 mg/l ทำการทดลองวันที่ 6 มีนาคม 2558

** SS เริ่มต้นที่หลุด UV 22W เท่ากับ 1,143 mg/l ทำการทดลองวันที่ 28 มีนาคม 2558

*** SS เริ่มต้นที่หลุด UV 33W เท่ากับ 1,131 mg/l ทำการทดลองวันที่ 8 เมษายน 2558

ตารางที่ ก.11 อิทธิพลความเข้มแสงของรังสี UV และอัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ ต่อปริมาณ ความเข้มข้นของ TDS ที่ pH 3 เวลา 120 นาที ด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

อัตราส่วนของ $H_2O_2: Fe^{2+}$ (mg/l)	TDS ครั้งที่ 1 (mg/l)	TDS ครั้งที่ 2 (mg/l)	TDS เฉลี่ย (mg/l)	STDEVA
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 11 W				
7,500: 1,000	2,154	2,334	2,244	127.2792
1,000: 1,000	1,850	1,892	1,871	29.69848
1,000: 7,500	4,462	4,592	4,527	91.92388
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 22 W				
7,500: 1,000	1,932	2,252	2,092	226.2742
1,000: 1,000	1,922	2,126	2,024	144.2498
1,000: 7,500	4,884	4,904	4,894	14.14214
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 33 W				
7,500: 1,000	2,670	2,380	2,525	205.061
1,000: 1,000	2,066	1,946	2,006	84.85281
1,000: 7,500	4,998	5,002	5,000	2.828427

หมายเหตุ * TDS เริ่มต้นที่หลอด UV 11W เท่ากับ 1,370 mg/l ทำการทดลองวันที่ 6 มีนาคม 2558 ** TDS เริ่มต้นที่หลอด UV 22W เท่ากับ 1,312 mg/l ทำการทดลองวันที่ 28 มีนาคม 2558 *** TDS เริ่มต้นที่หลอด UV 33W เท่ากับ 1,102 mg/l ทำการทดลองวันที่ 8 เมษายน 2558

ตารางที่ ก.12 pH ก่อนและหลังการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโตเฟนตัน

อัตราส่วนของ H ₂ O ₂ : Fe ²⁺ (mg/l)	ก่อนการบำบัด		หลังการบำบัด	
	pH ครั้งที่ 1	pH ครั้งที่ 2	pH ครั้งที่ 1	pH ครั้งที่ 2
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 11 W				
7,500: 1,000	3.09	3.06	2.72	2.47
1,000: 1,000	3.04	3.09	2.58	2.73
1,000: 7,500	3.08	3.09	2.48	2.47
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 22 W				
7,500: 1,000	3.08	3.08	2.33	2.44
1,000: 1,000	3.05	3.05	2.65	2.59
1,000: 7,500	3.05	3.09	2.53	2.07
ความเข้มแสงของรังสี UV เท่ากับ 33 W				
7,500: 1,000	3.04	3.07	2.6	2.55
1,000: 1,000	3.06	3.09	2.64	2.65
1,000: 7,500	3.07	3.03	2.37	2.48

ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์

ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)

วิธีการวิเคราะห์หา COD ด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด

วิธีนี้จะประหยัดกว่าวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด จำเป็นต้องผสมตัวอย่างน้ำที่มีสารแขวนลอยให้เข้ากันให้ดี เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้อง และวิธีนี้จะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ระเหยได้มากกว่า เนื่องจากสัมผัสกับสารโปแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ได้นานกว่าวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (เกษมประดิษฐ์วัฒนกิจ, 2555)

วิธีการวัด

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 25x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE 5 ml (แทนปริมาตรน้ำตัวอย่าง)

ขั้นตอนที่ 3 ทำการเติมน้ำตัวอย่างจำนวน 0.5 ml ลงในหลอดโตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25x150 mm ชนิดฝาเกลียวพร้อมจุก TFE จากนั้นเติมน้ำกลั่นเพื่อเจือจาง ให้ได้ปริมาตรรวม 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 จากนั้นนำเข้าสู่เตาอบที่มีอุณหภูมิ 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 ใช้หลอดไตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (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 ทำการเติมน้ำกลั่นแทนน้ำตัวอย่างลงในหลอดไตเจสต์แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate) ขนาด 25x150 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 ในการไตเตรทจะต้องค่อยๆหยดทีละหยด เนื่องจากการถึงจุดยุติจะเร็วมาก คือจะเปลี่ยนเป็นสีแดงอิฐ

ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS)

หลักการ

กรองตัวอย่างน้ำผ่านกระดาษกรอง GF/C ที่ทราบน้ำหนักตะกอนที่ติดอยู่บนกระดาษกรอง จะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส และทำให้เย็นในโถทำแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักที่เพิ่มคือ น้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดต่อปริมาตรตัวอย่างน้ำที่ใช้ของแข็งแขวนลอยหรือเอสเอส หมายถึง ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สามารถกรองได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้ว ("Whatman" GF/C) เอสเอสมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร (มันซิน ดัชนีอุตสาหกรรม, 2543)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 มม.
2. ชุดกรอง
 - กรวยบุชเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม.
 - ขวดกรอง
3. เครื่องดูดสูญญากาศ พร้อมขวดดูดสูญญากาศ ขนาด 500-1,000 มล.
4. เครื่องชั่งอย่างละเอียดสามารถชั่งได้ถึง 0.0001 กรัม
5. โถทำแห้งพร้อมสารดูดความชื้น

6. ตู้อบที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
7. ถ้วยอะลูมิเนียม ฟอยล์
8. ครีมคัส

การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS)

- ขั้นตอนที่ 1 นำกระดาษกรองขนาด 47 มม. ไปอบที่อุณหภูมิ 103 -105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งต้องนำกระดาษกรองวางไว้บนกระดาษฟลอยรูปถ้วย
- ขั้นตอนที่ 2 นำกระดาษกรองใส่ในโถดูดความชื้น 30 นาที
- ขั้นตอนที่ 3 นำกระดาษกรองออกมาชั่งตวง 4 ตำแหน่ง โดยทำการเปิดเครื่องชั่ง นำตัวอย่างเข้าไปชั่ง บันทึกผล
- ขั้นตอนที่ 4 ตวงน้ำตัวอย่างปริมาตร 100 มล. ด้วยกระบอกตวง
- ขั้นตอนที่ 5 ติดตั้งชุดกรองสุญญากาศบุชเนอร์และปั๊มดูดอากาศ โดยวางกระดาษกรองลงบนบุชเนอร์ ทำให้เปียกด้วยน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อยเปิดปั๊มดูดอากาศ
- ขั้นตอนที่ 6 ค่อยๆ เทน้ำตัวอย่างลงบนกรวยกรองบุชเนอร์ เมื่อน้ำตัวอย่างหมด ทำการล้างเครื่องแก้วด้วยน้ำกลั่น แล้วเทน้ำตัวอย่างที่ติดค้างลงไปบนบุชเนอร์
- ขั้นตอนที่ 7 หลังจากทีกรองตัวอย่างน้ำเรียบร้อยแล้ว นำกระดาษที่กรองไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 103 -105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- ขั้นตอนที่ 8 หลังจากอบกระดาษกรองเรียบร้อยแล้ว นำกระดาษกรองไปทำให้แห้งในโถดูดความชื้น 30 นาที
- ขั้นตอนที่ 9 นำไปชั่งอีกครั้ง บันทึกผลน้ำหนักกระดาษกรองที่เปลี่ยนแปลง

ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด หรือ ทีดีเอส (total dissolved solids, TDS)

หลักการ

กรองตัวอย่างน้ำผ่านกระดาษกรอง GF/C ที่ทราบน้ำหนักตะกอนที่ติดอยู่บนกระดาษกรองจะนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ทำให้เย็นแล้วชั่ง น้ำหนักที่เพิ่มคือน้ำหนักของของแข็งที่ละลายน้ำทั้งหมด หรืออาจหาได้จากน้ำหนักของของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมาหักออกจากค่าของแข็งทั้งหมด ทีดีเอส หมายถึง ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ และสามารถไหลผ่านกระดาษกรองใยแก้ว เมื่อกรองปริมาณของแข็งแขวนลอยออก แล้วเอาน้ำใสที่ผ่านกระดาษกรองใยแก้วไประเหยจะหาปริมาณของแข็งละลายได้ ทีดีเอสมีหน่วยเป็น มิลลิกรัม/ลิตร

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ถ้วยระเหย ซึ่งมีความบรรจุ 100 มล. เลือกใช้ข้อใดข้อหนึ่งดังนี้
-ถ้วยกระเบื้อง เส้นผ่านศูนย์กลาง 90 ซม.

- ถ้วยแพลทตินัม

2. เครื่องอังน้ำ (water bath หรือ steam bath)
3. ชุดกรอง
 - กรวยบุคเนอร์ ความจุ 100 ลบ.ซม.
 - ชุดกรอง
4. เครื่องชั่งอย่างละเอียดสามารถชั่งได้ถึง 0.0001 กรัม
5. โถทำแห้งพร้อมสารดูดความชื้น
6. กระดาษกรองใยแก้ว GF/C เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.7 มม.
7. เครื่องดูดสุญญากาศ พร้อมขวดดูดสุญญากาศ ขนาด 500-1,000 มล.
8. ตู้อบ ที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
9. ครีมคิบบ

วิธีวิเคราะห์

ขั้นตอนที่ 1 นำถ้วยระเหยไปอบที่อุณหภูมิ 103 -105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากอบถ้วยระเหยแล้ว ทำให้แห้งโดยนำไปใส่ในโถดูดความชื้น

ขั้นตอนที่ 3 นำไปชั่ง บันทึกน้ำหนักของถ้วยระเหย

ขั้นตอนที่ 4 เปิดเครื่องอัง น้ำถ้วยระเหยขึ้นไปวางบนเครื่องอัง

ขั้นตอนที่ 5 ตวงน้ำตัวอย่างส่วน ที่ได้จากการกรองของการวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย ปริมาตร 50 มล. ใส่ลงในถ้วยระเหย โดยค่อยๆ ริน ให้ปริมาตรน้ำเป็น 3/4 ของปริมาตร

ถ้วยระเหย

ขั้นตอนที่ 6 นำถ้วยระเหยที่ระเหยแห้งแล้วไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 103 -105 °C ใช้เวลา

ในการอบ 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 7 หลังจากอบเป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว นำไปทำให้แห้งในโถดูดความชื้น 30 นาที

ขั้นตอนที่ 8 นำถ้วยระเหยไปชั่ง บันทึกผลน้ำหนักของถ้วยระเหยที่เปลี่ยนแปลง

ภาคผนวก ค
วิธีคำนวณ

การหาความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในสต็อกเข้มข้น 35% (v/v) หมายความว่า
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 1000 mg/l ในปริมาตร 0.5 L

วิธีคิด หาคความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในสต็อก

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

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

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

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

จากสูตร $C_1V_1 = C_2V_2$

$$(388,500 \text{ mg/l}) \times V_1 = (1000 \text{ mg/l}) \times (0.5 \text{ L})$$

$$V_1 = \frac{1000 \text{ (mg/l)} \times 0.5 \text{ (l)} \times 1000 \text{ (ml)}}{507,500 \text{ (mg/l)} \times 1 \text{ (L)}}$$

$$V_1 = 0.98 \text{ ml}$$

จะได้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 35% ความเข้มข้น 1000 mg/l ต้องใช้ปริมาณ 0.98 ml

การหาความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน



จากสมการ มวลโมเลกุลของ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 278.01 g/mol

มวลโมเลกุลของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เท่ากับ 55.8 g/mol

ต้องการเตรียมความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ที่ 1,000 mg/l ในปริมาตร 0.5 L

วิธีคิด เนื้อสารเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) 55.8 g/mol มาจาก $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 278.01 g/mol

ถ้าต้องการเนื้อสารเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) 1,000 mg มาจาก

$$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = \frac{278.01 \text{ (g/mol)} \times 1000 \text{ mg}}{55.8 \text{ (g/mol)}}$$

$$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 4,982.25 \text{ mg/l}$$

เปลี่ยนหน่วย จาก mg เป็น g จะได้ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 4.98 \text{ g/l}$

ต้องการที่ความเข้มข้น 1000 mg/l จะต้องทำการชั่ง $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 4.98 g/l

ถ้าน้ำตัวอย่าง 1 L ใช้ 4.98 g

$$\text{ถ้าน้ำตัวอย่าง 0.5 L จะได้ว่า} = \frac{4.98 \text{ g} \times 0.5 \text{ L}}{1 \text{ L}}$$

$$= 2.49 \text{ g}$$

ถ้าต้องการที่ความเข้มข้น 1000 mg/l จะต้องทำการชั่ง $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 2.49 g/l

ภาคผนวก ง
มาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรม
และนิคมอุตสาหกรรม

ตารางที่ ง.1 ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539)
เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงาน
อุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0
ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand: COD)	ไม่เกิน 120 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ละ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุม มลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 mg/l
ค่าของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids: SS)	ไม่เกิน 50 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภท ของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ ไม่เกิน 150 mg/l
ค่าของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids: TDS)	- ไม่เกิน 3,000 mg/l หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ละ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของ โรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุม มลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 mg/l - น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 mg/l หรือสูงสู่ทะเลค่าที่ดี เอสในน้ำ ทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ดีเอสที่มีอยู่ใน แหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 mg/l

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นางสาวรัชฎาพร เจริญศรี
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2552 – 2555 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย
ผลงานในการ ประชุมวิชาการ	รัชฎาพร เจริญศรี และจักรกฤษณ์ อัมพูช. “การลดปริมาณสารอินทรีย์ ในน้ำเสียจากโรงงานผลิตแอมโมเนียปัสเปหลังด้วยกระบวนการโฟโตเฟน ตัน”, ใน การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 14. : สมาคม วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2558.

