

การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษ  
ด้วยกระบวนการฟenton โฟโต-ฟenton และโซโน-ฟenton

TREATMENT OF PULP MILL WASTEWATER USING FENTON,  
PHOTO-FENTON AND SONO-FENTON PROCESSES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-016-038

การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษ  
ด้วยกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน

TREATMENT OF PULP MILL WASTEWATER USING FENTON,  
PHOTO-FENTON AND SONO-FENTON PROCESSES



สุกัญญา โป่งรักษ์  
SUKUNYA PONGRUK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2558

KMITL-2015-SC-M-016-038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TREATMENT OF PULP MILL WASTEWATER USING FENTON,  
PHOTO-FENTON AND SONO-FENTON PROCESSES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

FACULTY OF SCIENCE

2015

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

KMITL-2015-SC-M-016-038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

“การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตัน  
โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน”

“TREATMENT OF PULP MILL WASTEWATER USING FENTON,  
PHOTO-FENTON AND SONO-FENTON PROCESSES”

ชื่อนักศึกษา

นางสาวสุกัญญา โป่งรักษ์

รหัสประจำตัว

55651303

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม)

ภาควิชา


เคมี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

-

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวศ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกสถาบันฯ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 09.30 – 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 305 ชั้น 3 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุชนิ อัมระบริพัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 16 เดือน ๗ พ.ศ. ๕๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการ เฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน
นักศึกษา	นางสาวสุกัญญา โปงรักษ์
รหัสประจำตัว	55651303
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นงานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของซีโอดีอยู่ประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ที่มีค่าพีเอชประมาณ 7-8 และซีโอดีประมาณ 2,400-2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน โดยศึกษาผลของปัจจัยต่างๆ เพื่อนำไปหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ ปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษาในกระบวนการเฟนตัน ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สอออน 0.00-0.05 โมล อัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:0-1:5 ค่าพีเอช 2-6 และไม่ทำการปรับพีเอช และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 0-50 นาที ส่วนปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาในกระบวนการโฟโต-เฟนตัน คือ ค่าความเข้มแสงต่อการเกิดปฏิกิริยา 0-500 ลักซ์ และระยะเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา 0-40 นาที และปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาในกระบวนการโซโน-เฟนตัน คือ ระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงต่อการเกิดปฏิกิริยา 0-40 นาที โดยมีการทำการทดลองกับน้ำกลั่นเพื่อเป็นแบลนด์ และการทดลองทั้งหมดทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สอออน 0.03 โมล อัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2 ค่าพีเอช 3 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 40 นาที ในกระบวนการเฟนตัน ค่าความเข้มแสงต่อการเกิดปฏิกิริยา 200 ลักซ์ และระยะเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที ในกระบวนการโฟโต-เฟนตัน ระยะเวลาการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงต่อการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ในกระบวนการโซโน-เฟนตัน ทำให้มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีและสีเหมาะสมที่สุดโดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไปบำบัดกับน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษพบว่า กระบวนการโฟโต-เฟนตัน มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีและสีได้มากกว่ากระบวนการเฟนตัน และกระบวนการโซโน-เฟนตัน กล่าวคือกระบวนการโฟโต-เฟนตัน บำบัดซีโอดี และสีได้ 95.07 และ 91.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่เนื่องจากกระบวนการเฟนตันในขั้นตอนสุดท้ายจะเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตกตะกอนโลหะหนักของเหล็ก จึงทดลองนำตะกอนโลหะหนักของเหล็กเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการผลิต พบว่าไม่มีความเหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ได้ เนื่องจากเหล็กที่ได้จากการตกตะกอนมาแล้วนั้น เมื่อนำกลับเอาไปเข้าทำปฏิกิริยาอีกครั้งไม่มีส่วนช่วยในการทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น แต่กลับมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ทำให้ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียแล้วปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ เนื่องจากมีค่าซีไอดีเกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้คือ 120 มิลลิกรัม/ลิตร

**คำสำคัญ :** กระบวนการเฟนตัน กระบวนการโซโน-เฟนตัน กระบวนการโฟโต-เฟนตัน คลื่นความถี่เหนือเสียง, ซีไอดี, ความเข้มแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Treatment of Pulp Mill Wastewater Using Fenton, Photo-Fenton and Sono-Fenton Process
<b>Student Name</b>	Ms. Sukunya Pongruk
<b>Student ID</b>	55651303
<b>Degree</b>	Master of Science (Environmental Chemistry)
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Year</b>	2015
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa

### ABSTRACT

The purpose of this study was treating of lignin synthetic wastewater with ~2,000 mg/L COD and wastewater from Pulp mill with ~2,400-2,500 mg/L COD (pH 7-8) using Fenton process, Photo-Fenton process and Sono-Fenton process. An optimum COD and color removing condition for Fenton process was studied by varying the amount of ferrous ion (0.00-0.05 mol), the mole ratio of ferrous ion : hydrogen peroxide (1:0-1:5), pH value (2-6 and its original pH) and contact time (0-50 minutes). For Photo-Fenton process, the light intensity (0-500 Lux) and contact time (0-40 minutes) were studied to obtain its optimum condition. For Sono-Fenton process, the sonication time was varied from 0 to 40 minutes. The treating of deionized water was done as a control. All experiments were repeated triplicately. The highest COD and color treating efficiency for Fenton process was found when using 0.03 mole of ferrous ion, 1:2 mole ratio of ferrous ion : hydrogen peroxide at pH 3 with 40 minutes contact time. For Photo-Fenton process and Sono-Fenton process, the treating efficiency was highest when using 200 Lux light intensity for 10 minutes and 30 minutes sonication time, respectively. The COD and color could be reduced more than 90% and 97%, respectively. By using the optimum condition of each process to treat wastewater from Pulp mill, Photo-Fenton process was found giving a higher treating efficiency than Fenton process and Sono-Fenton process. The highest removing efficiency was 95.07% for COD and 91.77% for color. At the end of reaction, the precipitation of iron would occur. The precipitated iron was found not suitable to be reused.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Keywords :** Fenton Process, Sono-Fenton Process, Photo-Fenton process, Ultrasonic Waves, COD, Light intensity



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.เสาวภาค สุขตระกูลเวช อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้คำแนะนำ ความถูกต้อง และเรียบร้อยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวก ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณเรวัต เจริญใจ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทุกๆ ด้าน พร้อมทั้งให้คำแนะนำ และคอยเป็นกำลังใจให้ตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

นางสาวสุกัญญา โป่งรักษ์  
ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
คำย่อและสัญลักษณ์.....	ท
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 อุตสาหกรรมกระดาษ.....	4
2.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	4
2.1.2 ขั้นตอนการเดินแผ่น (Sheeting) และการอบแห้ง (Dryer).....	6
2.1.3 กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่.....	6
2.1.4 ลักษณะของสีและลิกนินในน้ำเสีย.....	8
2.1.5 ผลกระทบของสีและลิกนิน.....	9
2.2 ลิกนิน (Lignin).....	9
2.3 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	11
2.3.1 สีแท้หรือสีจริง (True color).....	11
2.3.2 สีปรากฏ (Apparent color).....	11
2.4 กระบวนการฟenton (Fenton Process).....	11
2.4.1 กลไกของปฏิกิริยาฟenton.....	12
2.4.2 ปฏิกิริยาฟentonกับสารอินทรีย์.....	13
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการฟenton.....	15
2.5 กระบวนการโฟโต-ฟenton (Photo-Fenton Process).....	16
2.5.1 กระบวนการโฟโต-ฟenton (Photo-Fenton Process).....	16
2.5.2 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation : UV).....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 กระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton Process).....	18
2.6.1 การเกิดปฏิกิริยา Sonochemistry กับโมเลกุลของน้ำ.....	18
2.6.2 กระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton Process).....	19
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>26</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	26
3.1.1 อุปกรณ์.....	26
3.1.2 สารเคมี.....	27
3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์.....	27
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.3.1 การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน.....	28
3.3.2 การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตัน	31
3.3.3 การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโน-เฟนตัน	32
3.3.4 การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ.....	33
3.3.5 การนำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่.....	35
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....</b>	<b>37</b>
4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	37
4.1.1 กระบวนการเฟนตัน (Fenton).....	37
4.1.2 กระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton).....	52
4.1.3 กระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton).....	60
4.2 การบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ.....	64
4.3 การนำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่.....	67
4.4 การประเมินค่าใช้จ่าย.....	71
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>73</b>
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	73
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก.....	78
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย.....	79
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร.....	90

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ค กราฟสารละลายมาตรฐาน.....	95
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง.....	97
ภาคผนวก จ ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายสารเคมี.....	99
ภาคผนวก ฉ ภาพประกอบการทดลอง.....	103
ภาคผนวก ช ตารางผลการทดลองทั้งหมด.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	138



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่างๆ.....	8
2.2	ข้อมูลการใช้น้ำโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่างๆ.....	9
2.3	ค่าศักยภาพรีดออกซ์ของการออกซิไดซ์ต่างๆ.....	12
3.1	พารามิเตอร์และวิธีการสำหรับวิเคราะห์.....	28
4.1	การคำนวณค่าใช้จ่ายในกระบวนการเพนตัน โฟโต-เพนตัน และโซโน-เพนตัน.....	72
ก-1	การวัดหาค่าทราวนส์มิตแดนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น.....	82
ข-1	ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานลิกนินของแต่ละความเข้มข้น.....	90
ข-2	ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานสีของแต่ละความเข้มข้น.....	91
ข-3	ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็กของแต่ละความเข้มข้น.....	92
ข-4	ปริมาณเพอร์สัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใช้ในกระบวนการเพนตัน.....	93
ข-5	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเพนตัน.....	94
ค-1	ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานสี.....	95
ค-2	ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเหล็ก.....	96
ช-1	ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	108
ช-2	ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่เหมาะสม (สี).....	109
ช-3	ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่เหมาะสม (เหล็ก).....	110
ช-4	ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	111
ช-5	ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม (สี).....	112
ช-6	ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม (เหล็ก).....	113
ช-7	ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	114
ช-8	ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (สี).....	115
ช-9	ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (เหล็ก).....	116
ช-10	ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	117
ช-11	ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (สี).....	118
ช-12	ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (เหล็ก).....	119
ช-13	ผลการทดลองการศึกษาหาค่าความเข้มแสงที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	120
ช-14	ผลการทดลองการศึกษาหาค่าความเข้มแสงที่เหมาะสม (สี).....	121

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ช-15	ผลการทดลองการศึกษาค่าความเข้มแสงที่เหมาะสม (เหล็ก).....	122
ช-16	ผลการทดลองการศึกษาค่าเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (ซีโอดี)...	123
ช-17	ผลการทดลองการศึกษาค่าเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (สี).....	124
ช-18	ผลการทดลองการศึกษาค่าเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (เหล็ก)...	125
ช-19	ผลการทดลองการศึกษาค่าเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาที่ เหมาะสม (ซีโอดี).....	126
ช-20	ผลการทดลองการศึกษาค่าเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาที่ เหมาะสม (สี).....	127
ช-21	ผลการทดลองการศึกษาค่าเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาที่ เหมาะสม (เหล็ก).....	128
ช-22	ผลการทดลองการศึกษาค่ากระบวนการบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจริงจาก อุตสาหกรรมกระดาษ (ซีโอดี).....	129
ช-23	ผลการทดลองการศึกษาค่ากระบวนการบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจริงจาก อุตสาหกรรมกระดาษ (สี).....	130
ช-24	ผลการทดลองการศึกษาค่ากระบวนการบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจริงจาก อุตสาหกรรมกระดาษ (เหล็ก).....	131
ช-25	ผลการทดลองการศึกษาค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 ที่เหมาะสม (ซีโอดี).....	132
ช-26	ผลการทดลองการศึกษาค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 ที่เหมาะสม (สี).....	133
ช-27	ผลการทดลองการศึกษาค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 ที่เหมาะสม (เหล็ก).....	134
ช-28	ผลการทดลองการศึกษาค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ที่เหมาะสม (ซีโอดี).....	135
ช-29	ผลการทดลองการศึกษาค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ที่เหมาะสม (สี).....	136
ช-30	ผลการทดลองการศึกษาค่าการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ที่เหมาะสม (เหล็ก).....	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัสโดยกระบวนการซัลเฟต.....	7
2.2	สูตรโครงสร้างของลิกนิน.....	10
2.3	การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้.....	10
2.4	แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลกับสารประกอบอินทรีย์ Aromatic Ring.....	14
2.5	แสดงสเปกตรัมของรังสีเล็กโทรมกเนติก.....	18
3.1	ตู้แสงยูวี ขนาด 50 × 45 × 55 เซนติเมตร ภายในติดตั้งหลอดยูวี หลอดละขนาด 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด.....	26
3.2	น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (ซีไอดี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร)....	27
3.3	ถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการเฟนตัน).....	28
3.4	ถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโฟโต-เฟนตัน).....	31
3.5	ถึงปฏิกิริยาที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโซโน-เฟนตัน).....	32
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเพอร์สไอออน ปริมาณซีไอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	38
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเพอร์สไอออน ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	39
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเพอร์สไอออนและปริมาณเหล็กที่ ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด.....	40
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ ปริมาณซีไอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย สังเคราะห์ลิกนิน.....	42
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดี ที่ได้จากการบำบัด น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	43
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด.....	44
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ปริมาณซีไอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	46
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์ การบำบัดซีไอดีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ห้ามนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอชและปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังจากการบำบัด.....	48
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์ การบำบัดซีโอดีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	49
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	50
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณเหล็กที่ตกค้าง ในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด.....	51
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์การ บำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	53
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และ เปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	54
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสีย สังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด.....	55
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	57
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นใน หน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน	58
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณ เหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด.....	59
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนิน.....	61
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย.....	62
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด.....	63
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการบำบัด ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์ การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดฉีกอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการบำบัด ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ..	65
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการบำบัดและปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษหลังจากการบำบัด.....	66
4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน (การนำกลับมาใช้ใหม่).....	68
4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน (การนำกลับมาใช้ใหม่).....	70
4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด (การนำกลับมาใช้ใหม่).....	71
ค-1	กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานสี.....	95
ค-2	กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานเหล็ก.....	96
ฉ-1	เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer).....	103
ฉ-2	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer).....	103
ฉ-3	เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic).....	104
ฉ-4	เครื่องวัดพีเอช (pH meter).....	104
ฉ-5	เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital Balance).....	105
ฉ-6	การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร.....	105
ฉ-7	ชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการเฟนตัน).....	106
ฉ-8	ชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโฟโต-เฟนตัน).....	106
ฉ-9	ชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโซโน-เฟนตัน).....	107
ฉ-10	เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงและทำการตกตะกอนเหล็กไอออนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นทิ้งให้เหล็กไอออนตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง.....	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำย่อและสัญลักษณ์

COD (Chemical Oxygen Demand)	ค่าความต้องการออกซิเจน เพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ
BOD <sub>5</sub> (Biochemical Oxygen Demand)	ปริมาณของออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในเวลา 5 วัน
m <sup>3</sup> /d	ลูกบาศก์เมตรต่อวัน
m <sup>3</sup> /ton	ลูกบาศก์เมตรต่อตัน
n/a	ไม่ปรากฏ
kg/d	กิโลกรัมต่อวัน
kg/ton	กิโลกรัมต่อตัน
UV	รังสีอัลตราไวโอเล็ต
AOPs	กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง
mg/L	มิลลิกรัมต่อลิตร
nm	นาโนเมตร
ppm	ส่วนในล้านส่วน
kJ/L	กิโลจูลต่อลิตร
kW/m <sup>2</sup>	กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร
TFE	Tetrafluoroethylene
ADMI	หน่วยความเข้มข้น
Pt-Co unit	หน่วยความเข้มข้น
Conc.	ความเข้มข้น
mM	มิลลิโมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษและสิ่งพิมพ์ เป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีกระบวนการผลิตที่เชื่อมโยงและครบวงจรตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ กระบวนการผลิตต้นน้ำคืออุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ อุตสาหกรรมกลางน้ำคือกระดาษ และอุตสาหกรรมปลายน้ำคืออุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ ตลอดจนมีการเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ตามสถิติของกรมโรงงานอุตสาหกรรมพบว่ามีจำนวนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ กระดาษ และวัสดุเกี่ยวกับกระดาษ รวมทั้งสิ้น 2,317 โรงงาน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2558) ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษนั้นมีน้ำเสียที่เป็นปัญหาอย่างมากต่อสภาพแวดล้อมในปัจจุบัน โดยเฉพาะสีของน้ำเสียซึ่งมีผลทางด้านสุขภาพจิตใจต่อผู้คนและชุมชนที่พบเห็น โดยลิกนินเป็นสารที่ทำให้เกิดสีในน้ำเสีย ซึ่งมาจากการต้มและพอกย้อมเยื่อเคมี ถึงแม้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์จะเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่ใช้กันมากในปัจจุบันจะมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ แต่ยังมีปัญหาเรื่องการบำบัดสีของ น้ำเสียที่ยังมีสีน้ำตาลเข้ม และมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ไม่มีมาตรฐานที่ชัดเจนเป็นตัวเลขวอกมากำหนด ซึ่งกำหนดเพียงว่าให้สีของน้ำทิ้งไม่เป็นที่น่ารังเกียจ จึงทำให้น้ำทิ้งเหล่านี้ที่ปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมมีผลทางด้านลบในแง่ของสุขภาพทางด้านจิตใจ ส่วนความเข้มข้นของซีโอดีที่สูงเกินมาตรฐานกำหนด (ซีโอดีสูงกว่า 120 มิลลิกรัม/ลิตร) ก่อให้เกิดมลพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก (กรมควบคุมมลพิษ, 2558)

เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสียของอุตสาหกรรมผลิตกระดาษนี้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น เทคโนโลยีทางกายภาพ เทคโนโลยีทางเคมี และเทคโนโลยีทางชีวภาพ ซึ่งเทคโนโลยีทางเคมีด้วยกระบวนการออกซิเดชันทางเคมี เช่น การบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton) ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงที่จะสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารพิษประเภทสารประกอบอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ เช่น ยาง สารกันบูด สารเคมีต่างๆ ที่ได้มาจากวัสดุสีย้อม สารประกอบอะโรมาติก ฟีนอล พลาสติก ยาฆ่าแมลง พอร์มลิตไฮด์ ซึ่งกระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับดินหรือตะกอน ซึ่งมีผลคือ ทำลายมลพิษที่เป็นสารอินทรีย์ ช่วยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ ลดค่าบีโอดี และซีโอดี ลดสี และกลิ่น (ธนภฤต, 2552) สารเคมีที่ใช้ในปฏิกิริยาเฟนตัน (Fenton) คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) และเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ซึ่งทำปฏิกิริยากันได้เป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัล ( $HO^\cdot$ ) ที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงในสภาวะที่เป็นกรด โดยปฏิกิริยาเฟนตันนี้จะดำเนินการร่วมกับปฏิกิริยาอื่นๆ อีกหลายปฏิกิริยา ซึ่งมีลักษณะของการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ในสภาวะที่ไม่มีแสงมากระตุ้นในระหว่างที่เกิดปฏิกิริยาหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ในระบบจะสะสมเพิ่มปริมาณขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเหล็กไอออน ( $Fe^{2+}$ ) หมดลง ปฏิกิริยาก็จะหยุด แต่สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ด้วยการฉายรังสียูวี ซึ่งรังสียูวีจะกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโฟตรีดักชัน (Photo reduction) ของเหล็กไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ทำให้ได้เหล็กไอออน ( $Fe^{2+}$ ) หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ (สุชนม์ และบุญสร้าง, 2554) อีกทั้งยังมีการใช้สารเพนตันร่วมกับการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียง (sono-Fenton) ซึ่งเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงที่สามารถลดซีโอดี และสี ได้จนถึงระดับที่ไม่สามารถตรวจวัดได้โดยวิธีการทั่วไป โดยใช้สารเคมีปริมาณที่น้อย (ธนนท์, 2552) แต่อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเพนตันยังคงมีโลหะหนักของเหล็กตกค้างอยู่และไม่ควรปล่อยทิ้งลงสู่ธรรมชาติ จึงควรนำเหล็กเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย เพื่อลดการใช้สารเคมีในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งยังเป็นการลดค่าใช้จ่ายของการใช้เหล็กเป็นสารป้อนเข้าระบบได้อีกทางหนึ่งด้วย (จันทิมา และคณะ, 2552)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ด้วยกระบวนการเพนตัน (Fenton), โฟโต-เพนตัน (photo-Fenton) และ โซโน-เพนตัน (sono-Fenton) เพื่อลดค่าซีโอดีและสี นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษานำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วในกระบวนการเพนตันนำกลับมาใช้ใหม่ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีทั้งสาม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการลดค่าซีโอดี และสี ด้วยกระบวนการเพนตัน (Fenton), โฟโต-เพนตัน (Photo-Fenton) และ โซโน-เพนตัน (Sono-Fenton)

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี และสี ในน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเพนตัน (Fenton), โฟโต-เพนตัน (Photo-Fenton) และโซโน-เพนตัน (Sono-Fenton)

1.2.3 เพื่อศึกษาการนำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วในกระบวนการเพนตันนำกลับมาใช้ใหม่

1.2.4 เพื่อประเมินให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยวิธีทั้งสาม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซีโอดีประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

1.3.2 เป็นการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการเพนตัน (Fenton) มีตัวแปรที่ทำการศึกษา ดังต่อไปนี้ คือ

- ปริมาณของ  $Fe^{2+}$  คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมล
- อัตราส่วนโดยโมลของ  $Fe^{2+}:H_2O_2$  คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5
- ค่าพีเอช คือ 2, 3, 4, 5, 6 และไม่ทำการปรับพีเอช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที

1.3.3 เป็นการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการโฟโต-เฟนตัน (photo-Fenton) มีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ คือ

- ปริมาณของ  $Fe^{2+}$  ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในหัวข้อ 1.3.2
- ปริมาณของ  $H_2O_2$  ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในหัวข้อ 1.3.2
- ค่าพีเอช ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในหัวข้อ 1.3.2
- ค่าความเข้มแสง คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ลักซ์
- ระยะเวลาการใช้แสงในการเกิดปฏิกิริยา คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

1.3.4 เป็นการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมโดยใช้กระบวนการโซโน-เฟนตัน (sono-Fenton) มีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ คือ

- ปริมาณของ  $Fe^{2+}$  ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในหัวข้อ 1.3.2
- ปริมาณของ  $H_2O_2$  ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในหัวข้อ 1.3.2
- ค่าพีเอช ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในหัวข้อ 1.3.2
- เวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที

1.3.5 ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบบลงค์ในทุกการทดลอง

1.3.6 ทำการทดลองกับน้ำเสียจริงโดยนำสภาวะที่เหมาะสมที่ทำการทดลองไว้ข้างต้นมาบำบัด

1.3.7 การนำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วนำกลับมาบำบัดน้ำเสียใหม่อีก 2 ครั้ง และคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดของเหล็กที่ผ่านการใช้แล้วเปรียบเทียบกับเหล็กใหม่

1.3.8 พารามิเตอร์ที่ทำการประเมิน คือ ความเข้มข้นของเหล็ก (Atomic Absorption Spectrophotometer) ซีไอดี (Closed-Reflex) และสี (UV-Vis Spectrophotometer)

1.3.9 ประเมินผลการวิจัยที่ได้ทั้งสภาวะที่เหมาะสม การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ และการประเมินค่าใช้จ่าย โดยใช้ราคาสารเคมี ค่าไฟฟ้า ค่าหลอดไฟ เป็นปัจจัยในการประเมินเท่านั้น โดยไม่รวมค่าสร้างอุปกรณ์

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอื่นที่มีซีไอดี และสี สูง

1.4.2 เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษทั้งก่อนได้รับการบำบัด และหลังได้รับการบำบัดแล้วแต่ยังมีค่าซีไอดี และสี สูง

1.4.3 เป็นแนวทางในการเลือกเทคโนโลยีที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีซีไอดี และสี สูง

1.4.4 เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการบำบัดน้ำเสียประเภทที่มีค่าซีไอดี และสี ให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 อุตสาหกรรมกระดาษ

อุตสาหกรรมกระดาษเริ่มต้นมาจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยการนำเยื่อกระดาษมาผลิตออกมาเป็นกระดาษประเภทต่างๆ อีกทั้งอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษนั้นยังเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานในการพัฒนาเศรษฐกิจในการลดปัญหาการนำเข้า ซึ่งตัวบ่งชี้คืออัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษนี้จะบ่งบอกถึงการขยายตัวของเศรษฐกิจของประเทศ และความก้าวหน้าทางสังคมเป็นอย่างดี โดยประเทศไทยมีอัตราการใช้กระดาษประมาณ 40 กิโลกรัม/คน/ปี อีกทั้งยังมีแนวโน้มอีกว่าจะเพิ่มสูงขึ้นในทุกๆ ปี โดยอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ กระดาษ และสื่อสิ่งพิมพ์ ถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสัมพันธ์ต่อเนื่องกัน มีความต้องการใช้ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีอุตสาหกรรมกระดาษขยายตัวขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งเพื่อการส่งออกและเพื่อใช้ในการบริโภคภายในประเทศเอง (ปฐมาพร, 2549)

#### 2.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษสามารถแบ่งออกเป็นกระบวนการย่อยทั้งหมด 3 กระบวนการ ซึ่งประกอบด้วย กระบวนการผลิตเยื่อ (Pulp Mill Process) กระบวนการทำแผ่นเยื่อ (Sheeting Process) และกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (Recovery Process) (รสสุคนธ์ และศิวาพร, 2553)

##### 1) กระบวนการผลิตเยื่อ (Pulp Mill Process)

1.1) หน่วยสับไม้ชิ้นและคัดขนาดชิ้นไม้ (Chipping) เป็นกระบวนการเตรียมชิ้นไม้ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ โดยการนำส่วนที่ไม่ต้องการออกและนำไปทำการลดขนาดของชิ้นไม้ลงให้ได้ตามความต้องการ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้เพียงเครื่องจักรเท่านั้น ยังไม่มีการใช้สารเคมีมาร่วมในกระบวนการ

1.2) หน่วยต้มเยื่อ (Cooking) เป็นกระบวนการนำชิ้นไม้ที่ผ่านกระบวนการสับไม้ชิ้นและคัดขนาดชิ้นไม้เรียบร้อยแล้วส่งต่อไปยังกระบวนการต้มเยื่อด้วยกระบวนการเคมีแบบซัลเฟตหรือคราฟท์ (Sulphate or Kraft Process) ด้วยหม้อต้ม Kamyr อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเมื่อจะทำการต้มจะต้องต้มในอุณหภูมิและความดันที่กำหนดไว้ และยังมีการใช้โซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na<sub>2</sub>S) ร่วมในการต้มเยื่ออีกด้วย เพื่อช่วยในการย่อยสลายลิกนินและสารประกอบอื่นๆ ที่ปะปนมาในเนื้อไม้ และในกระบวนการนี้ยังเติมโซเดียมซัลเฟต (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการแบบซัลเฟต ดังรูปที่ 2.1 ส่วนเยื่อที่ไม่ได้ทำการฟอกจะนำไปทำเป็นกระดาษห่อหรือกระดาษผิวกล่อง (Kraft Paper and Kraft Linerboard) เรียกว่ากระบวนการคราฟท์ (Kraft Process) ส่วนการต้มเยื่อโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์เป็นน้ำยาต้มเยื่อในการแยกเส้นใยเรียกว่า White Liquor ด้วยหม้อต้ม

Digester 2 แบบคือ แบบ Batch Digester เป็นการต้มแบบถังเดียวที่มีขนาดใหญ่ แล้วใช้อุณหภูมิในการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมอุณหภูมิและความดันภายในถัง จากนั้นเติมชิ้นไม้สับ (Chip) และน้ำยาต้มเยื่อ (White Liquor) ทำการควบคุมระยะเวลาในการต้ม เมื่อเยื่อสุกจึงลดอุณหภูมิและความดัน และปล่อยเยื่อออกสู่ถังแยกเยื่อ จากนั้นต้มเยื่อใหม่อีกครั้งในหม้อต้มเยื่อแบบ Continuous Digester โดยการเติมชิ้นไม้สับ (Chip) และน้ำยาต้มเยื่อ (White Liquor) ลงที่ด้านบนของถังต้มเยื่อและให้ความร้อนไปพร้อมๆ กันในขณะที่ชิ้นไม้สับ (Chip) ไหลลงถังต้มเยื่อ ซึ่งจะช่วยให้อุณหภูมิของไม้สับ (Chip) ในการต้มสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับน้ำยาต้มเยื่อ และไม้สับ (Chip) ก็จะค่อยๆ จมลงในถังน้ำยาต้มเยื่อ (Digester) จากนั้นทำการควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และระยะเวลาในการต้มเยื่อ เมื่อต้มเรียบร้อยแล้ว ไม้สับ (Chip) จะกลายเป็นเยื่อและออกมาทางด้านล่างของถังต้มเยื่อ ซึ่งขั้นตอนการต้มเยื่อแบบ Continuous Digester นี้จะสามารถต้มเยื่อได้ในปริมาณที่มากกว่าแบบ Batch Digester เพราะสามารถเติมไม้สับ (Chip) ได้เลยโดยไม่ต้องหยุดพัก

1.3) การแยกเยื่อ เป็นกระบวนการแยกเยื่อและน้ำยาต้มเยื่อที่ได้มาจากถังต้มเยื่อ (Digester) เมื่อความดันลดลงไอน้ำก็จะลอยเข้าถังปล่อยลม (Blow Tank) จะเกิดการควบแน่นตรง Condensator ทำให้เยื่อถูกแยกภายในถัง Blow Tank แล้วเยื่อก็จะถูกส่งไปที่หน่วยล้างเยื่อและน้ำยาต้มเยื่อที่ใช้แล้ว

1.4) การล้างและทำความสะอาดเยื่อ โดยการใช้ตะแกรงหยาบ (Johnson Knotter Screen) เพื่อทำการแยกวัตถุขี้ที่มีขนาดใหญ่และที่ต้มไม่สุกออกไป แล้วนำเยื่อที่แยกเรียบร้อยแล้วไปหน่วยล้างเยื่อ ซึ่งมีขั้นตอนทั้งหมด 3 ขั้นตอน (Brown Stack Washer) หรือชนิด Drum Washer จากนั้นนำไปล้างด้วยวิธี Counter Current โดยการใช้ความร้อนเพื่อล้าง Black Liquor ออก น้ำต้มเยื่อ (Black Liquor) และน้ำล้างเยื่อนำไปเก็บไว้ในถัง Seal Tank ซึ่งจะทำให้สามารถนำกลับไปปรับปรุงใหม่เป็นน้ำยาต้มเยื่อสะอาด ซึ่งเยื่อที่ผ่านการล้างเอาน้ำต้มเยื่อออก คือ การทำความสะอาดเยื่อ และยังมีสิ่งเจือปนอื่นอีก เช่น กรวดทราย เส้นไม้ ตาไม้ เปลือกไม้ เป็นต้น จากนั้นเยื่อก็จะถูกส่งต่อไปยังตะแกรงร้อน โดยเยื่อดังกล่าวจะมีลักษณะ ได้แก่ Centricleaner, Primary Centricleaner Vibration Screen และ Hopper Screen เป็นต้น ซึ่งทำหน้าที่ในการแยกทราย ดิน กรวด ออกจากเยื่อ ส่วนเยื่อที่ผ่านการทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว จะถูกส่งต่อไปยังที่หน่วยสกัดลิกนิน

1.5) การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน ( $O_2$  Delignification) เมื่อเยื่อถูกรวมเข้ากับน้ำ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และออกซิเจน ให้ทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 90-130 องศาเซลเซียส โดยเยื่อก่อนสกัดจะมีอัตราการใช้ออกซิเจนประมาณ 2% ของน้ำหนักเยื่อแห้งและมีค่า Kappa Number 10-12 เมื่อเยื่อทำการสกัดลิกนินเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะนำไปล้างด้วยเครื่อง Wash Pass และส่งต่อไปที่หน่วยฟอกเยื่อ

1.6) การฟอกเยื่อ (Bleaching) ขั้นตอนนี้เป็นการเพิ่มความขาวสว่าง (Brightness) ของเยื่อกระดาษ ซึ่งขั้นตอนฟอกเยื่อนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะความขาวสว่างของเยื่อตามความต้องการ และสามารถที่จะฟอกได้ทั้งแบบหลายขั้นตอนหรือขั้นตอนเดียวก็ได้ โดยการฟอกเยื่อที่มีการใช้ก๊าซคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนมีทั้งหมด 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 (Chlorination : C) เป็นการละลายสารลิกนินให้ออกจากเยื่อได้มากที่สุด โดยยังไม่ทำการฟอกสี ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกมาเป็นสาร Chlorolignin ในช่วงพีเอช 1-2

ขั้นตอนที่ 2 (Caustic Extraction and Oxygen : E) เป็นการละลายหรือล้าง Chlorolignin ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยา Chlorination ออกไป โดยคุณสมบัติของ Chlorolignin มีความสามารถในการละลายได้ดีในน้ำร้อนที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

ขั้นตอนที่ 3 (Hypochlorite Bleaching : H or Chlorinedioxide : D) เป็นการลดสีของเยื่อที่ยังมีลิกนินตกค้างอยู่ตามความต้องการ ซึ่งเยื่อที่ผ่านการฟอกเรียบร้อยแล้วจะยังคงมีสีคล้ำ สารเคมีที่ใช้คือ คลอรีนไดออกไซด์ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ และแคลเซียมไฮโปคลอไรท์

ขั้นตอนที่ 4 (Chlorine Dioxide Bleaching : C) เป็นการฟอกสีของเยื่อโดยใช้คลอรีนไดออกไซด์ เพื่อให้มีสีขาวสว่างและมีความแข็งแรง ซึ่งเมื่อทำการฟอกเยื่อของทุกขั้นตอนด้วยสารเคมีแล้ว จากนั้นจะทำการล้างด้วยน้ำร้อน

1.7) การทำความสะอาดเยื่อภายหลังการฟอกเยื่อ (Bleached Stock Screening) เป็นขั้นตอนการนำสิ่งสกปรกที่ตกค้างอยู่ออก เพื่อเป็นการทำความสะอาด ซึ่งจะทำให้เยื่อนั้นมีคุณภาพที่สูงขึ้น โดยผ่าน Centrifugal Cleaner โดยเยื่อที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วจะเข้า Decker เพื่อทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้นก่อนจึงจะส่งต่อไปที่หน่วยทำแผ่น

### 2.1.2 ขั้นตอนการเดินแผ่น (Sheeting) และการอบแห้ง (Dryer)

เยื่อที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้วจะมีความเข้มข้นประมาณ 3% จากนั้นจะส่งต่อไปที่ Head Box เพื่อทำการเจือจางเยื่อให้สามารถป้อนกระจายออกตะแกรงลวดเดินแผ่น แล้วน้ำก็จะซึมผ่านตะแกรงทางด้านล่างแล้วนำกลับมาใช้ใน Head Box อีกครั้ง ส่วนเยื่อที่ผ่านตะแกรงก็จะถูกชูดูกกด (Press) เพื่อทำการบีบน้ำออกและจากนั้นก็นำไปที่ชุดลูกอบ (Cylinder Dryer) และให้ความร้อนด้วยไอน้ำ และแผ่นเยื่อที่ผ่านเครื่องเดินแผ่นแล้วจะมีความความชื้นอยู่ประมาณ 10% จากนั้นก็จะส่งไปเก็บไว้ที่เก็บผลิตภัณฑ์ (Warehouse) (รสสุคนธ์ และศิวาพร, 2553)

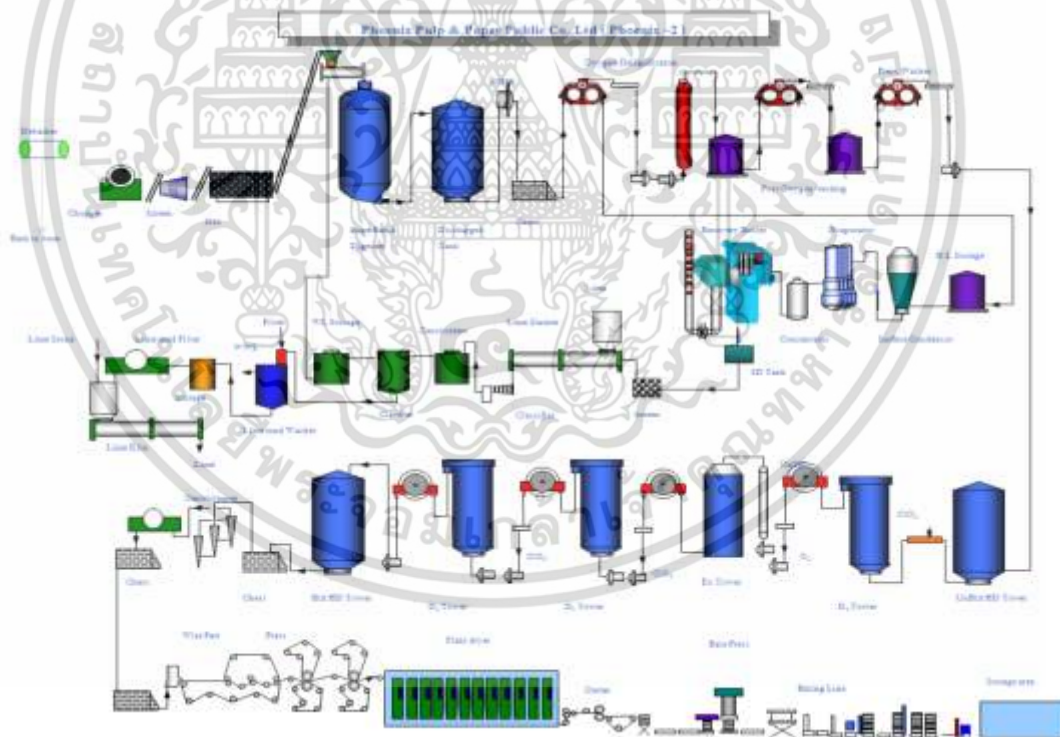
### 2.1.3 กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่ (รสสุคนธ์ และศิวาพร, 2553)

1) โรงระเหย (Evaporator) คือ การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำที่ได้มาจากกระบวนการผลิตเยื่อ โดยการล้างเยื่อ ซึ่งมีองค์ประกอบคือ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เมื่อได้น้ำที่มีความเข้มข้นขึ้นแล้วก็จะนำไปเตาเผาเพื่อนำสารเคมีกลับคืน (Recovery Boiler) ซึ่งในระหว่างที่ทำการ

ระเหยเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของน้ำรีเบรียแล้ว น้ำก็จะถูกกำจัดออกและนำกลับไปใช้ใหม่ยังขั้นตอนการผลิต Caustic Soda (Causticizing)

2) เตาเผา นำสารเคมีกลับคืน (Recovery Boiler) คือ การเผา น้ำที่มีสีดำเข้มข้น (Black Liquor) เมื่อได้อิอน้ำก็จะนำไปใช้ในการผลิตต่อไป และความร้อนก็จะนำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนน้ำที่มีสีเขียว (Green Liquor) ที่ได้จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นของการผลิตน้ำขาว (White Liquor) ในหน่วยผลิต Caustic Soda ซึ่งในน้ำขาวจะต้องมีการควบคุมความเข้มข้นของกำมะถันด้วย ดังนั้น เครื่องบำบัดมลพิษทางอากาศที่อยู่ในเตาเผา นำสารเคมีกลับคืนจึงมีการผลิตเถ้าและโซเดียมซัลเฟตขึ้นมาด้วย

3) หน่วยการผลิต Caustic Soda (Causticizing) น้ำที่มีสีเขียวที่ได้มาจากเตาเผา นำสารเคมีกลับคืนมีองค์ประกอบของ Smelt และ Weak Liquor ซึ่งส่วนมากจะมีโซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) และโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เป็นองค์ประกอบ โดยในหน่วยของการผลิตจะมีการนำน้ำที่มีสีเขียว (Green Liquor) ผสมกับปูนขาว ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีเกิดเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในการต้มเยื่ออีกครั้ง



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจากไม้ยูคาลิปตัสโดยกระบวนการซัลเฟต (รสสุคนธ์ และศิวาพร, 2553)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 ลักษณะของสีและลิกนินในน้ำเสีย

การเกิดสีในน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษนั้นส่วนมากเกิดมาจากลิกนิน รวมไปถึงอนุพันธ์ของลิกนิน และโพลีเมอร์ของแทนนิน ซึ่งน้ำเสียทั้งหมดนี้จะถูกปล่อยมาจากกระบวนการฟอกเยื่อ ต้มเยื่อ ล้างเยื่อ และส่วนการนำสารเคมีกลับคืน โดยในกระบวนการ Kraft Process ลิกนินจะถูกเปลี่ยนไปเป็น thio- และ alkali-lignin จากนั้นในกระบวนการ Sulfite Process จะเปลี่ยนเป็น Lignosulfates ส่วน Chlorine ที่ใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อ จะมีสาร Chlorolignin เกิดขึ้น ซึ่งลิกนิน รวมไปถึงอนุพันธ์ของลิกนินเหล่านี้จะเกิดการย่อยสลายได้ยากทางด้านชีวภาพ ทำให้ค่า COD:BOD ยังมีค่าที่สูงเมื่อผ่านการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา และส่วนมากแล้วค่าซีโอดีก็จะสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้คือไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร ดังตารางที่ 2.1 ทำให้น้ำเสียที่ได้มาจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยวิธีการทางชีวภาพบำบัดได้ยาก และที่สำคัญคือ ลิกนินเป็นสารที่มีองค์ประกอบสำคัญที่ทำให้สามารถบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการทางชีวภาพได้ยาก เพราะลิกนินเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และลิกนินคือสารที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดสีในน้ำเสียอีกด้วย และอีกทั้งยังมีการใช้ปริมาณน้ำที่ค่อนข้างสูงในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ จึงทำให้อุตสาหกรรมผลิตกระดาษมีปริมาณของน้ำเสียที่ค่อนข้างมาก ดังตารางที่ 2.2 (รสสุคนธ์ และ ศิวาพร, 2553)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำเสียโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่างๆ (รสสุคนธ์ และศิวาพร, 2553)

กระบวนการผลิต	ปริมาณน้ำเสีย (ลบ.ม./ตัน)	ซีโอดี (มก./ล.)	บีโอดี (มก./ล.)	ระดับสี (Pt-Co)	ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)
1. กระบวนการผลิตเยื่อชานอ้อยฟอกขาวกึ่งเคมี	27.37	5,180	2,060	456	2,190
2. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบซัลเฟต	40	2,058	460	958	340
3. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบโซดา	53.9	1,300	400	535	400

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 2.2** ข้อมูลการใช้ น้ำโรงงานผลิตเยื่อกระดาษประเภทต่างๆ (รสสุคนธ์ และศิวาพร, 2553)

กระบวนการผลิต	วัตถุดิบ	ปริมาณการใช้น้ำ (ลบ.ม./ตัน)
1. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบ ซัลเฟต	ไม้ยูคาลิปตัส	50
2. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบโซดา	ไม้ยูคาลิปตัส	55
3. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกขาวแบบโซดา และเยื่อกึ่งเคมี	ไม้ยูคาลิปตัส, ชานอ้อย	34.2
4. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีฟอกและผลิต กระดาษพิมพ์เขียน	ไม้ยูคาลิปตัส	22
5. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีแบบไม่ฟอก	ไม้ยูคาลิปตัส	50
6. กระบวนการผลิตเยื่อเคมีที่ใช้ทำกระดาษสา	ปอสา	225-1000
7. กระบวนการผลิตเยื่อเชิงกลที่ใช้ทำกระดาษ ไขว้เจ้า	ไม้ไผ่	30-47

### 2.1.5 ผลกระทบของสีและลิกนิน (รสสุคนธ์ และศิวาพร, 2553)

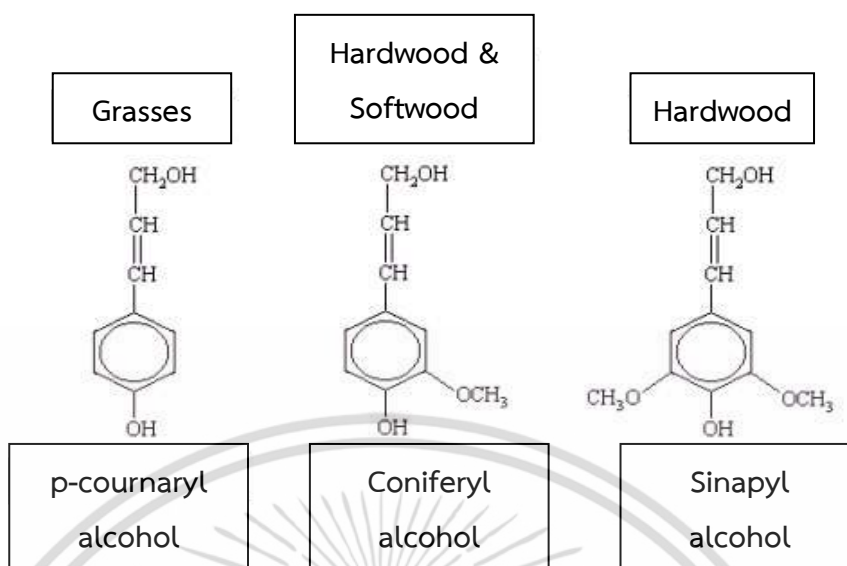
1) เมื่อปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนลิกนินลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยตรงในปริมาณที่มาก จะทำให้เกิดการบดบังการส่งผ่านของแสงอาทิตย์ในน้ำ โดยจะทำให้แหล่งผลิตปฐมภูมิไม่สามารถ สังเคราะห์แสงได้ และอีกทั้งยังทำให้ในน้ำขาดแคลนออกซิเจน

2) ลิกนินบางประเภทเมื่ออยู่ในน้ำอาจจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ เช่น ปลาชนิด ที่ได้รับน้ำเสียจากการฟอกสีของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ พบว่าจะทำให้กระดูกของปลา เสียรูปร่างไปได้ และทำให้เกิดแผลในตับ ไต ม้าม และทางเดินอาหาร จนสุดท้ายอาจตายได้

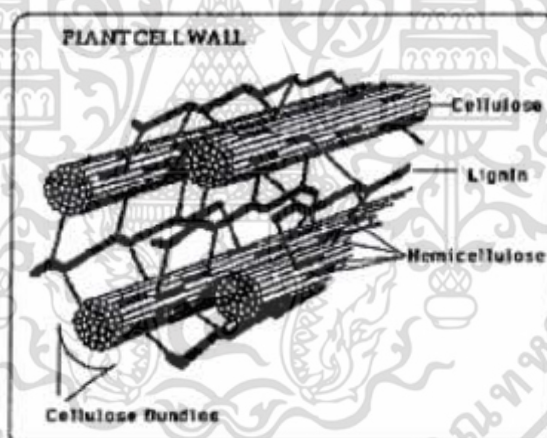
## 2.2 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูง ซึ่งมักจะพบอยู่กับเซลลูโลส โดยลิกนิน จะประกอบไปด้วย ออกซิเจน คาร์บอน และไฮโดรเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดที่มีลักษณะ เป็นสารประกอบอะโรมาติก ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่มีคุณสมบัติในการยึดหยุ่น ดังนั้นพืชชนิดไหนที่มี ปริมาณลิกนินอยู่มาก พืชชนิดนั้นจะมีความแข็งแรงทนทานมาก แต่เมื่อพืชชนิดนั้นตายลิกนินก็จะถูก ย่อยสลายด้วยเอนไซม์ลิกเนส (Lignase) หรือลิกนินเนส (Ligninase) ที่มีความสำคัญในรา ตัวอย่าง หน่วยที่ซ้ำกันของลิกนินแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนของลิกนิน เซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับอายุและชนิดของไม้ ซึ่งไม้ที่มีลิกนินอยู่มากก็จะมี ความแข็งแรง ที่มาก แต่หากเป็นไม้ชนิดเดียวกัน ไม้ที่มีอายุมากกว่าก็จะมีลิกนินในปริมาณที่มากกว่า โดยการ จัดเรียงตัวของลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ในไม้ จะเป็นไปตามรูปที่ 2.3 (สารชัย, 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของลิกนิน (สารชัย, 2548)



รูปที่ 2.3 การจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินในไม้ (สารชัย, 2548)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม (Types of color industrial wastewater)

### 2.3.1 สีแท้หรือสีจริง (True color)

สีที่เกิดจากสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำแล้วเกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำ ซึ่งได้แก่ สารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ยากจำพวกกรดฮิวมิก และฟัลวิค (Humic acid and fulvic acid) ที่มาจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต และจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิต ซึ่งไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรองได้ จึงทำให้สามารถบำบัดได้ยาก (วนิดา, 2555)

### 2.3.2 สีปรากฏ (Apparent color)

สารแขวนลอยต่างๆ ที่อยู่ในน้ำแล้วเกิดการสะท้อนแสงปรากฏให้เห็น เช่น ตะกอนของดิน และทราย เกล็ดของซากพืชซากสัตว์ แพลงก์ตอนพืช และแพลงก์ตอนสัตว์ ซึ่งสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ เช่น การตกตะกอน หรือการกรอง (วนิดา, 2555)

ในน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีทั้งสีแท้และสีปรากฏ ซึ่งสีแท้ในน้ำเสียอุตสาหกรรมนั้นจะพบมากในอุตสาหกรรมอบไม้ยางพาราและสกัดน้ำมันปาล์ม แต่สีปรากฏที่เกิดมาจากสารแขวนลอยนั้นมีอยู่ 2 กรณี คือ สีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เยื่อกระดาษ และทอผ้า ซึ่งมาจากสารเคมีในกระบวนการผลิต รวมทั้งแทนนินและลิกนิน ซึ่งแบ่งประเภทจากการแตกตัวให้ประจุ โครงสร้างทางเคมีของสี รวมทั้งเส้นใยที่ใช้ย้อมหมู่ช่วยละลาย นอกจากนี้ยังมีสีที่เกิดขึ้นหลังจากการผ่านการบำบัดแล้วหรือหลังจากการกักเก็บ เช่น ระบบบำบัดแบบบ่อผึ่ง (Oxidation Pond) ที่มีสาหร่ายทำหน้าที่ในการให้ออกซิเจน แต่สาหร่ายก็สามารถทำให้น้ำมีสีเขียวได้ เป็นต้น (วนิดา, 2555)

## 2.4 กระบวนการเฟนตัน (Fenton Process)

กระบวนการเฟนตันเป็นปฏิกิริยาที่ที่ถูกค้นพบครั้งแรกปี ค.ศ. 1894 และในปี ค.ศ. 1930 ก็ได้พบปฏิกิริยานี้อย่างสมบูรณ์ จึงได้มีการนำเข้ามาใช้บำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสารพิษประเภทสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ เช่น บี.ที.อี.เอ็กซ์ สารประกอบอะโรมาติก พอร์มัลดีไฮด์ ฟีนอล วัสดุสีย้อม ยาง พลาสติก สารกันบูด ยาฆ่าแมลง เป็นต้น รวมไปถึงถึงกระบวนการเฟนตันนี้ยังมีความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีตะกอนหรือดินที่มีสิ่งปนเปื้อน โดยมีข้อดีคือ (ธนฤต, 2552)

- ทำลายสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษ (Organic Pollutant Destruction)
- เพิ่มสัดส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ (Biodegradability Improvement)
- ลดซีโอดีหรือบีโอดีที่อยู่ในรูปของสารอินทรีย์ได้ (COD or BOD Removal)
- ลดสีและกลิ่น (Color and Odor Removal)

โดยปฏิกิริยานี้สามารถที่จะออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพยาก และอาจสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ (Mineralization) คือ เปลี่ยนรูปกลายเป็นน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งกระบวนการเพนตันนี้เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะเกิดการสร้างและรวมตะกอน (Coagulation) ซึ่งถือได้ว่าเป็นการช่วยกำจัดสารอินทรีย์ที่เป็นคอลลอยด์ (Colloids) อีกด้วย (ธนภุต, 2552)

#### 2.4.1 กลไกของปฏิกิริยาเพนตัน

กลไกของปฏิกิริยาเพนตันคือ การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของสารประกอบอินทรีย์ในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โดยมีเหล็กที่เป็นไอออนบวกมาเป็นตัวเร่งในการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แรดิคัล (Hydroxyl Radicals :  $OH^\circ$ ) ตามสมการที่ (2.1) เป็นตัวกลางสำคัญ โดยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แรดิคัลจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าในการออกซิเดชันที่สูงมากรองจากฟลูออรีน (Fluorine) ซึ่งสูงกว่าโอโซนถึง 25% และสูงมากกว่าคลอรีนมากถึง 200% โดยค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันเป็นการแสดงถึงการรับอิเล็กตรอน ถ้ามีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่แรงก็จะมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนได้ง่าย คือ มีความเป็นบวกสูงของค่าศักย์รีดอกซ์ เช่น ฟลูออรีน (Fluorine) ดังแสดงตามตารางที่ 2.3 (ธนภุต, 2552)

ตารางที่ 2.3 ค่าศักย์รีดอกซ์ของการออกซิไดซ์ต่างๆ (ธนภุต, 2552)

Oxidizing Agent	Redox potential (volts)
Fluorine	3.06
Hydroxyl radicals	2.80
Ozone	2.08
Hydrogen peroxide	1.78
Hypochlorite	1.49

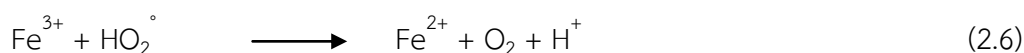
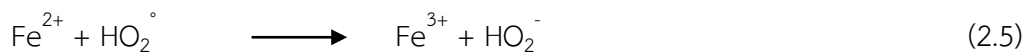
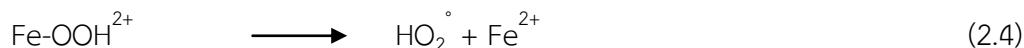
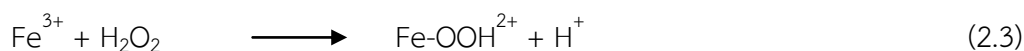


แต่ในการเกิดปฏิกิริยานี้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แรดิคัล ( $OH^\circ$ ) อาจถูกยับยั้งให้เกิดปฏิกิริยาโดยเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) ได้เช่นเดียวกัน โดยการที่เฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ ) สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล แรดิคัล ( $OH^\circ$ ) แล้วถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นเฟอร์ริกไอออน ( $Fe^{3+}$ ) ตามสมการที่ (2.2) (ธนภุต, 2552)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเฟอร์ริกไอออนและอนุมูลไฮดรอกซิลก็มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สลายตัวไปเป็นออกซิเจนและน้ำได้ ตามสมการที่ (2.3)- (2.7) (ธนภุต, 2552)



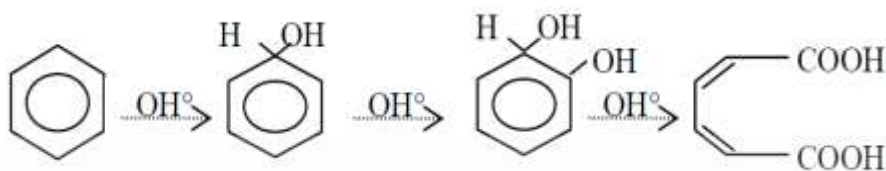
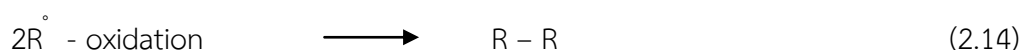
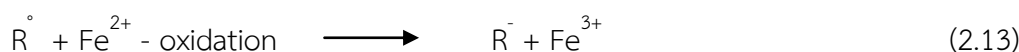
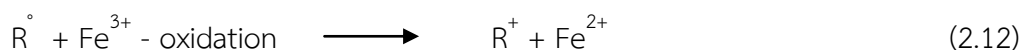
โดยจากสมการ (2.7) อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ได้จากสมการ (2.1) ถูกยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาคู่ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทำให้ได้สารตัวใหม่คือ อนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ดรอกซิล ( $\text{HO}_2^\circ$ ) ที่มีความรุนแรงน้อยกว่า (ธนภุต, 2552)

#### 2.4.2 ปฏิกิริยาเพนตันกับสารอินทรีย์

ปฏิกิริยาเพนตัน เมื่อเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ทำปฏิกิริยากันในสภาวะที่เป็นกรด ทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์แตกตัวออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) แล้วอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยาต่อไปกับสารอินทรีย์ โดยการเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ตำแหน่งของพันธะคู่ หรือ C=C (Unsaturated Bonds) หรือการแตกพันธะคาร์บอนและอะตอมของออกซิเจน ส่วนโมเลกุลที่อะตอมแตกต่างกันออกไป เช่น S หรือ N ก็สามารถเกิดปฏิกิริยาได้เช่นเดียวกัน (มณฑา, 2550) ซึ่งเมื่ออนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลได้ทำการออกซิไดซ์สารอินทรีย์นั้น สารอินทรีย์ก็จะถูกอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลดึงอิเล็กตรอนออกมา ทำให้สารอินทรีย์กลายเป็นอนุมูลอิสระสารอินทรีย์ ( $\text{R}^\circ$ ) แล้วอนุมูลอิสระสารอินทรีย์ก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยาแบบต่อเนื่องอีก (ธนภุต, 2552)



จากอนุมูลอิสระสารอินทรีย์ ( $\text{R}^\circ$ ) ที่ได้มาจากปฏิกิริยาตามสมการที่ (2.8) อาจถูกออกซิไดซ์จากเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ได้เป็นเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) หรือสารอินทรีย์ที่มีสองขั้น ตามสมการที่ (2.12)-(2.14) (มณฑา, 2550)



**รูปที่ 2.4** แสดงการเกิดปฏิกิริยาระหว่างอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลกับสารประกอบอินทรีย์ Aromatic Ring (มณฑา, 2550)

จากรูปที่ 2.4 เป็นการสลายพันธะ (Breakdown) ทำให้โครงสร้างกลายเป็น Heterocyclic Ring โดยอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เข้าไปสลายพันธะของสารประกอบอินทรีย์ Aromatic Ring ที่มีโครงสร้างเป็นวง จนกลายเป็นพันธะเดี่ยว และพันธะคู่ (ชนกฤต, 2552)

ส่วนเฟอร์ริกไอออนที่ได้จากการทำปฏิกิริยายังสามารถกับอนุมูลไฮดรอกไซด์ ทำให้เปลี่ยนรูปกลายเป็นสารประกอบเฟอร์ริกไฮดรอกซอคอมเพล็กซ์ (Ferric Hydroxo Complexes) ในสถานะที่เป็น พีเอช 3 ตามสมการที่ (2.15) และพีเอช 7 ตามสมการที่ (2.16) (ชนกฤต, 2552)



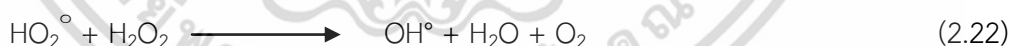
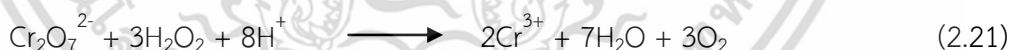
ซึ่งจากสมการที่ (2.17)-(2.19) แสดงให้เห็นว่าเกิดกระบวนการสร้างตะกอนและรวมตะกอนขึ้นในกระบวนการเฟนตัน ทำให้ของแข็งแขวนลอยถูกจับและตกตะกอน (ชนกฤต, 2552)

โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มาจากการออกซิเดชันในการบำบัดน้ำเสียนั้น แสดงให้เห็นว่าสารประกอบอินทรีย์ได้เปลี่ยนรูปไปจนหมด จนไม่เหลือสภาพความเป็นพิษ และเมื่อนำไปทดสอบการบำบัดน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่ธรรมชาติด้วยการตรวจสอบค่าซีโอดี (COD) จะพบว่าหากปฏิกิริยานั้นได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ซีโอดีจะมีค่าที่น้อยลง น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วนั้นก็จะสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ (ชนกฤต, 2552)

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเฟนตัน

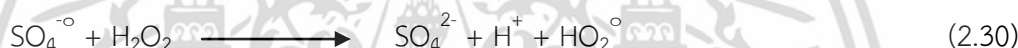
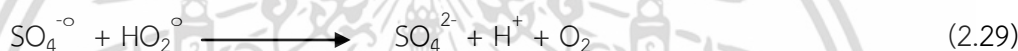
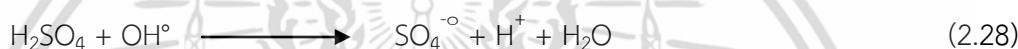
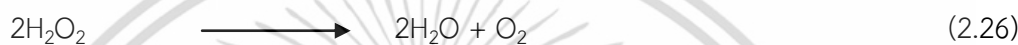
1) ความเข้มข้นของเหล็กไอออน (Effect of Iron Ion Concentration) ซึ่งหากปฏิกิริยานั้นไม่มีการเติมเหล็กไอออน อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลก็จะเกิดขึ้นน้อยมาก แต่หากปฏิกิริยานั้นมีการเติมเหล็กไอออนลงไปก็จะทำให้มีการเร่งการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่มากขึ้น อัตราการย่อยสลายก็จะเพิ่มขึ้นด้วย จนถึงที่ความเข้มข้นของเหล็กไอออนค่าหนึ่งแล้วปฏิกิริยาจะไม่เกิดเพิ่มขึ้นอีก (ธนภุต, 2552) ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยานั้นไม่สามารถรู้ได้ว่าตัวเร่งที่แท้จริงคือ เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) หรือเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) เนื่องจากว่าตัวเร่งปฏิกิริยานั้นจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ทันทีหากมีสารอินทรีย์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากพอ (ปฐมาพร, 2549)

2) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Effect of  $\text{H}_2\text{O}_2$  Concentration) มีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาในการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายสารมลพิษ ซึ่งจะพบว่าเมื่อปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสลายสารมลพิษก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แต่หากปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไป ส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะไปรบกวนการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ทำให้มีค่าซีโอดีมากเกินไปจริง ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่อยู่ในแหล่งน้ำหากมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ (ปฐมาพร, 2549) ซึ่งเกิดจากการรบกวน (Interference) ระหว่างโพแทสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ตามสมการที่ (2.20)-(2.21) (ธนภุต, 2552) อีกทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเปอร์ไฮดรอกซิล ( $\text{HO}_2^\circ$ ) และทำปฏิกิริยาต่อเนื่องไปอีกเรื่อยๆ ตามสมการที่ (2.22)-(2.25) ซึ่งมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากเกิดการสลายตัวไปเป็นน้ำและออกซิเจน ที่ไม่มีความสามารถในการออกซิไดซ์กับสารอินทรีย์ (มณฑา, 2550)



3) ผลของอุณหภูมิ (Effect of Temperature) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเฟนตันก็จะเพิ่มสูงขึ้น แต่หากอุณหภูมิสูงเกินกว่า 40-50 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีประสิทธิภาพค่อยๆ ลดลง เนื่องจากการเร่งการสลายตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้กลายเป็นน้ำและออกซิเจน ดังนั้นในปฏิกิริยาเฟนตันจึงมักใช้อุณหภูมิที่ 20-40 องศาเซลเซียส (ธนภุต, 2552)

4) ผลของพีเอช (Effect of pH) ที่มีความเหมาะสมในกระบวนการเฟนตันคือ 2-4 เนื่องมาจากจะทำให้เหล็กอยู่ในรูปของสารละลาย หากพีเอชมีค่ามากกว่า 3 จะทำให้เหล็กเกิดการตกตะกอนอยู่ในรูปของเฟอริกไฮดรอกไซด์ ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) ซึ่งไม่สามารถเป็นตัวเร่งในกระบวนการเฟนตันได้ อีกทั้งที่ค่าพีเอชสูงมากขึ้นยังมีผลกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เสถียรและเกิดการสลายตัวกลายเป็นออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ได้ง่าย ตามสมการที่ (2.26) ประสิทธิภาพในการบำบัดสีก็จะลดลง (มณฑา, 2550) แต่ที่พีเอชต่ำกว่า 3 จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ลดลง เนื่องมาจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) จะลดลงเมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ตามสมการที่ (2.27) และถูกยับยั้งจากกรดซัลฟูริก ตามสมการที่ (2.28)-(2.31) (ธนภฤต, 2552)



5) ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Effect of Reaction Time) โดยเวลาที่ใช้ในกระบวนการเฟนตันให้สมบูรณ์นั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น โดยส่วนใหญ่จะเน้นที่ความเข้มข้นของน้ำเสียก่อนการบำบัดและปริมาณตัวเร่งของปฏิกิริยาและสารที่มีความเข้มข้นและมีความซับซ้อนมากจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานกว่าสารที่มีความเข้มข้นและมีความซับซ้อนน้อย (ธนภฤต, 2552)

## 2.5 กระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton Process)

### 2.5.1 กระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton Process)

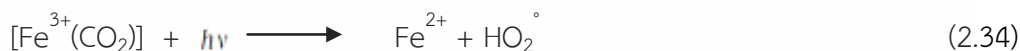
กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes : AOPs) เป็นกลุ่มเทคโนโลยีที่รู้จักกันอย่างทั่วโลก ซึ่งกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนั้นมีประสิทธิภาพอย่างมากในการกำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษ (Organic Pollutants) โดยมีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษนั้น อีกทั้งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ยังมีความสามารถในการย่อยสลายโมเลกุลที่มีขนาดเล็กได้ง่ายที่อุณหภูมิและความดันบรรยากาศใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมบริเวณนั้นๆ (Haithem, 2014)

กระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton) ก็เป็นอีกกระบวนการหนึ่งของกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes : AOPs) โดยกระบวนการนี้มีความสามารถในการออกซิเดชันที่สูงมาก ซึ่งสามารถออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากได้ และโดยทั่วไปแล้วกระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton) มักจะใช้ร่วมกันกับกระบวนการทางชีวภาพ โดยนำมาใช้หลังกระบวนการบำบัดเพื่อกำจัดสารพิษที่ย่อยสลายได้ยากต่อจากกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งกระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton) นี้เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันของเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) แล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) ที่เป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษ (Carra, 2013) ตามที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังสมการที่ (2.1) และมีการใช้แสงยูวี (UV Irradiation) เข้าไปร่วมด้วยในปฏิกิริยา เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของการออกซิเดชันนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) ที่ได้มาจากแสงยูวีเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ดังสมการที่ (2.32) และเหล็กก็เข้าไปเร่งการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ดังสมการที่ (2.33) (Haithem, 2014)



โดยข้อแตกต่างของกระบวนการออกซิเดชันนี้ (Fenton และ Photo-Fenton) คือเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการนี้เป็นสารเคมีที่ไม่เป็นอันตราย นอกจากนี้ทั้งวิธีทำและการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ก็ง่าย สามารถบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเคมีที่เป็นพิษได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Haithem, 2014)

อีกทั้งการใช้แสงยูวีเข้ามามีร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน (Photo-Fenton Reaction) ยังแสดงให้เห็นถึง photo-decarboxylation ของเฟอร์ริกคาร์บอกซิเลต (Ferric Carboxylates) และการรีดิวส์จากเฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) เป็นเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) โดยกระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis) ทำให้มีแรดิคัล (Radicals) เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ (2.34)-(2.36) (Lisete, 2014)



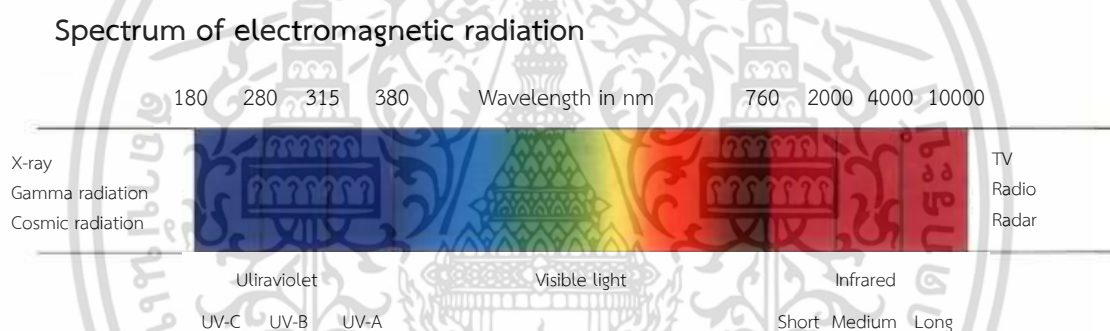
## 2.5.2 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet Radiation : UV)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สั้น ซึ่งต่อจากแสงสีม่วง (ระหว่าง Visible Spectrum กับ X-ray) ไม่สามารถรับรู้ได้เหมือนคลื่นอินฟราเรด (IR) กับรังสีที่ตามองไม่เห็น ดังรูปที่ 2.5 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้ (อุตม, 2546)

1) รังสี UV-A ความยาวคลื่น 315-380 นาโนเมตร ไม่ค่อยมีความอันตราย และสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลากหลายทาง เช่น ฟิสิกส์ เคมี เป็นต้น

2) รังสี UV-B ความยาวคลื่น 280-315 นาโนเมตร ก่อให้เกิดการอักเสบที่ตาดำ และการไหม้ที่ผิวหนัง (Sunburn or Erythematic) แต่สามารถรักษาโรคผิวหนังบางชนิดได้ และยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมทางเคมี

3) รังสี UV-C ความยาวคลื่น 100-280 นาโนเมตร มีความอันตรายเป็นอย่างมากต่อร่างกาย เช่น เยื่อบุตาอักเสบ (Conjunctivitis) หรือ ผิวแดงไหม้เกรียม (Erythema) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการฆ่าเชื้อโรคได้



รูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมของรังสีเล็กโทรแมกเนติก (อุตม, 2546)

## 2.6 กระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton Process)

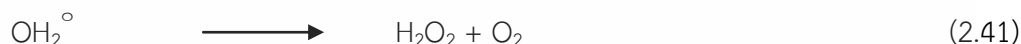
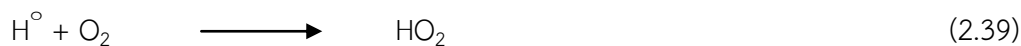
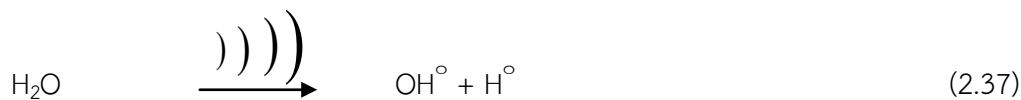
### 2.6.1 การเกิดปฏิกิริยา Sonochemistry กับโมเลกุลของน้ำ

ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้ 3 ปฏิกิริยาที่จะทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยา Sonochemistry ประการแรกคือ สิ่งที่อยู่ภายในฟองของโพรงของอากาศ ประการที่สองคือ พื้นที่สัมผัสระหว่างแก๊สที่อยู่ภายในฟองของโพรงของอากาศและของเหลวที่อยู่ในสารละลาย และประการที่สามคือ สิ่งที่อยู่ในสารละลาย (Emine, 2014)

เมื่อนำน้ำเข้าไปทำการ Sonication ที่ความร้อนประมาณ 4,000-5,000 K มีผลทำให้มีฟองอากาศเกิดขึ้นและมีการแตกตัวของฟองอากาศนั้น ซึ่งภายในฟองอากาศจะมีแก๊สและบริเวณของน้ำก็จะมีการระเหยของน้ำเกิดขึ้นด้วย ส่วนที่เกิดการแตกตัวของฟองอากาศนั้นจะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นเริ่มจากการสลายฟองอากาศโดยนำไปผ่านการ Thermolytic ทำให้ได้อนุมูลอิสระไฮดรอก

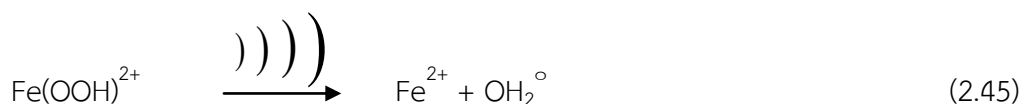
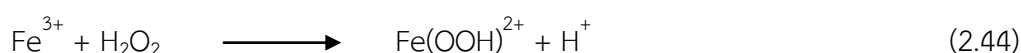
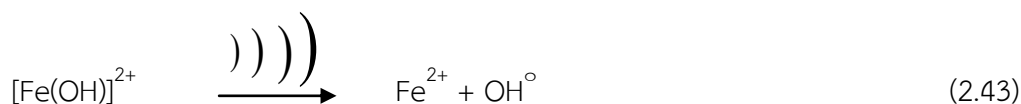
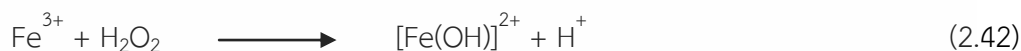
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ที่มีความสามารถในการเข้าไปออกซิเดชันกับสารที่ละลายอยู่ในน้ำได้ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนำน้ำไปทำการ Sonication เป็นไปตามสมการที่ (2.37)-(2.41) (Emine, 2014)

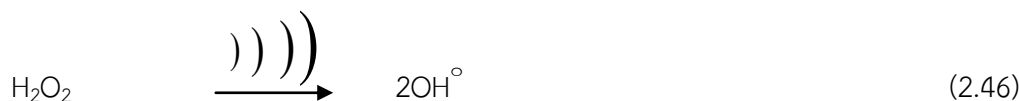


### 2.6.2 กระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton Process)

การบำบัดด้วยกระบวนการ Sonochemical พบว่าเป็นวิธีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากและมีความเป็นพิษในน้ำ ซึ่งผลของการใช้คลื่นอัลตราซาวด์ในการออกซิเดชันทางเคมีกับไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ในระหว่างที่น้ำเกิดการแตกตัวด้วยความร้อนทำให้มีโพรงอากาศเกิดขึ้น (Cavitation-Induced) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพิ่มเติมเข้ามาคือ อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ที่ได้มาจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) จึงทำให้ปฏิกิริยาเต็มไปด้วยสารตั้งต้นและอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งหมดเหล่านี้พิจารณาจาก Homogeneous Sonochemistry โดยปฏิกิริยาส่วนใหญ่ของสารประกอบไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic Compounds) จะอยู่ภายในฟองอากาศ (Cavitation Bubble) ขณะที่ไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic) จะเกิดปฏิกิริยาใน Bulk Phase ซึ่งจากการศึกษาผลของอัลตราซาวด์ในการออกซิเดชันสารประกอบอะโรมาติก โดยเฉพาะสีย้อมสังเคราะห์ พบว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) เป็นสารที่ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ (Ivana, 2012) ดังสมการที่ (2.42)-(2.45) อีกทั้งการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกนั้น คลื่นอัลตราโซนิกเข้าไปกระตุ้นการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เร็วขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ดังสมการที่ (2.46) (กัญญารัตน์ และเกษมสันต์, 2555)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Emine and Mustafa (2014) ได้อธิบายไว้ว่ากระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes : AOPs) เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมากขึ้นในการกำจัดสีของน้ำเสียจากการออกซิเดชันด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เนื่องจากสามารถกำจัดสีของน้ำเสียได้อย่างถาวร โดยเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) มีการใช้แสงยูวี (UV Light) เข้าร่วมด้วยในปฏิกิริยาการย่อยสลายจะทำให้ได้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่สูงมากของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ นอกจากนี้แสงยูวี (UV Irradiation) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ยังสามารถทำปฏิกิริยาได้กับเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) (Fenton's Reagent) และโอโซน และเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการอธิบายไว้เกี่ยวกับการใช้อัลตราซาวด์เข้ามาช่วยในปฏิกิริยาด้วยว่าสามารถทำให้เกิด  $\text{OH}^\circ$ ,  $\text{HOO}^\circ$ ,  $\text{H}^\circ$  แรดิคัลได้มากขึ้น

Taha and Ibrahim (2013) ได้อธิบายไว้ว่าการใช้อัลตราซาวด์ (Ultrasound) ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) หรือที่เรียกว่ากระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton) เป็นหนึ่งในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes : AOPs) ที่มีความสำคัญมากในการใช้บำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษในน้ำเสีย โดยการใช้เหล็กซัลเฟต ( $\text{FeSO}_4$ ) เป็นตัวให้เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) แล้วเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.4) แล้วอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron Transfer) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.11)-(2.14) และเมื่อปฏิกิริยาที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของสารอินทรีย์เสร็จสิ้นแล้วจะทำให้ได้น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และเกลือ (Salts) ซึ่งการใช้อัลตราซาวด์ (Ultrasound) ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) นั้นเป็นหนึ่งในนวัตกรรมที่ทำให้กระบวนการเฟนตันมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้การใช้อัลตราซาวด์ (Ultrasound) ร่วมกับกระบวนการเฟนตัน (Fenton Process) ยังไม่จำกัดเพียงแค่การบำบัดน้ำเสียเพียงเท่านั้น ยังเป็นเทคนิคที่มีความสามารถในการบำบัดกากตะกอนของน้ำมัน (Oily Sludge) ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดปิโตรเลียมไฮโดรคาร์บอน (Petroleum Hydrocarbon) ได้ดีอีกด้วย

Kazuaki. *et al.* (2013) ได้อธิบายไว้ว่าปฏิกิริยาเฟนตันเป็นกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes : AOPs) ที่มักใช้บ่อย ซึ่งเกี่ยวกับการออกซิเดนต์ (Oxidant) ที่มักจะใช้เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) และตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มักจะใช้เป็นเฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) เพื่อใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีพิษอยู่ด้วย นอกจากนี้ยังมีนักวิจัยหลายคนที่ได้มีการศึกษาอย่างอื่นที่จะนำมาใช้ร่วมกันกับกระบวนการเฟนตันกับแสงยูวีและตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Photo-Fenton (UV+Fenton), Sono-Fenton (US+Fenton), Sono-Photo-Fenton เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(US+UV+Fenton), Photocatalytic-Fenton (UV/TiO<sub>2</sub>+Fenton) และ Sonophotocatalytic-Fenton (US+UV/TiO<sub>2</sub>+ Fenton) สำหรับการย่อยสลายวัสดุที่มีความอันตราย

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จันทิมา และคณะ (2552) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษที่มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 125-172 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร อยู่ในช่วง 0.07-0.90 ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและทำการแยกตะกอนเฟนตันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาด้วยพอลิเมอร์ชนิดโพลีเอทิลามีน (Polyethylamine) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ดีที่สุดคือ ความเข้มข้น H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ที่ 0.008-0.011 โมล/ลิตร ความเข้มข้น Fe<sup>2+</sup> ที่ 0.20-0.27 กรัม/ลิตร ค่าพีเอชของการตกตะกอนเท่ากับ 8 และปริมาณพอลิเมอร์เท่ากับ 0.003 กรัม/ลิตร โดยระบบให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและสีเท่ากับ 35-40% และ 90-95% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่า แสงมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน โดยสภาวะที่ไม่มีแสงจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดค่าซีโอดีและสีลดลงถึง 20% และ 3% ตามลำดับตะกอนที่ได้จากปฏิกิริยาเฟนตัน (Fe<sup>3+</sup>) สามารถนำกลับมาใช้แทนสารตั้งต้นของเหล็ก Fe<sup>2+</sup> ได้ถึง 20-40%

สุชนม์ (2554) มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางในการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์จากสีย้อมผ้า ซึ่งมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 1,987-2,195 มิลลิกรัม/ลิตร มาทำการทดลองเป็นเวลา 2 ชั่วโมงในปฏิกรณ์ 2 ชนิดคือ ท่อพีวีซี และ ท่อแก้ว ระดับความลึกของน้ำเสีย 2, 4 และ 6 นิ้วและควบคุมอุณหภูมิด้วยน้ำเย็นอุณหภูมิ 7 องศาเซลเซียส จากนั้นศึกษาผลกระทบของปริมาณความเข้มแสงอาทิตย์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสีย และอุณหภูมิของน้ำเสีย ผลการทดลองโดยการเติมสาร 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ปริมาตร 30 มิลลิลิตร และสาร FeSO<sub>4</sub> 1.08 โมล ต่อ น้ำเสีย 1 ลิตรในปฏิกรณ์ชนิดท่อแก้ว ในช่วงเวลา 12.00-14.00 น. ซึ่งมีค่าพลังงานแสงอาทิตย์อยู่ที่ 0.8-1.0 kW/m<sup>2</sup> พบว่าสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้ 87.06% โดยค่าความลึกของน้ำทั้ง 3 ระดับได้ค่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำที่เท่ากัน ในขณะที่การทดลองในสภาวะไม่มีแสง (Dark Fenton) สามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียได้เพียง 66.29% ซึ่งทำให้ได้แนวทางในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตันที่มีประสิทธิภาพสูงในลำดับต่อไป

ธนันท์ (2552) ศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้กระบวนการอะคูสติกออกซิเดชัน (Acoustic Oxidation) ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนน้ำมันตัด (Cutting Oil Wastewater) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้สารเฟนตันร่วมกับการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงนั้นทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงถึง 92.3% โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ

140 กรัม และสารเฟอร์รัสซัลเฟตในปริมาณ 500 มิลลิกรัมของเหล็กต่อลิตรของน้ำเสีย (mg/L as เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Fe^{2+}$ ) ซึ่งเป็นปริมาณที่สูง แต่ก็สามารถลดปริมาณเพื่อให้ได้มาซึ่งการกำจัดที่เหมาะสมได้โดยการใช้สมการจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยา (Reaction Kinetic)

ปฐมมาพร (2549) ได้นำปฏิกิริยาเฟนตันมาใช้ในการบำบัดค่าซีโอดีและสีในน้ำทิ้งจากกระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพาราและโรงงานผลิตกล่องกระดาษ น้ำทิ้งจากกระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพารามีสีน้ำตาลดำเข้ม มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 800-2,400 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าสี 1,127-2,299 Pt-Co unit หลังการบำบัดลดค่าซีโอดีได้ 84-97% ลดค่าสีได้ 97-99% การใช้กรดไนตริกเพื่อช่วยปรับพีเอชจะทำให้ผลการลดลงของซีโอดีและสี ได้มากกว่าและใช้สารเคมีน้อยกว่า (COD : Fe = 1 : 0.06) การใช้กรดซัลฟูริก (COD : Fe = 1 : 0.12) สำหรับโรงงานผลิตกล่องกระดาษน้ำทิ้งมีสีชมพูและมีตะกอนสีดำ มีค่าซีโอดี 500-600 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสี 1,739-1,800 Pt-Co unit หลังการบำบัด ซีโอดีลดลง 93-96% และค่าสีลดลง 86-96% และการใช้กรดไนตริกให้ผลการทดลองของซีโอดี และสี ได้มากกว่าเช่นกัน แต่ใช้สารเคมีมากกว่าการบำบัดน้ำทิ้งจากกระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพารา (COD : Fe = 1 : 0.34)

รสสุคนธ์ และศิวาพร (2554) น้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบยากต่อการบำบัด งานวิจัยนี้จึงศึกษาการลดลงของค่าซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยาริวไรต์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดลงของซีโอดีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา การทดลองทำโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) จากผลการทดลอง พบว่า เมื่อทำปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กเคลือบบนตัวรองรับอะลูมินากับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (450 ppm : 10,000 ppm) ร้อยละของการลดลงของค่าซีโอดีเท่ากับ 45.9 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดลงของค่าซีโอดีมากที่สุดภายใน 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ และเมื่อทำปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัสซัลเฟตกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (450 ppm : 10,000 ppm) จะเห็นได้ว่า ร้อยละของการลดลงของค่าซีโอดีเท่ากับ 24.09 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสถานะเดียวกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบริวไรต์ มีประสิทธิภาพในการลดลงของค่าซีโอดีในน้ำเสียมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

สันติ (2545) การกำจัดสี ซีโอดี และลิกนิน ในน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้เถ้าไม้ขาวและเถ้าไม้ดำซึ่งเป็นกากของเสียจากหม้อต้มไอน้ำภายในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษเอง โดยใช้การทดลองเป็นแบบแบทช์เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สภาวะสมดุล สภาพพีเอช ปริมาณของเถ้าไม้ที่เหมาะสม ตลอดจนไอโซเทอร์มของการดูดติดผิวจากการทดลองเวลาสัมผัสที่เข้าสู่สภาวะสมดุล พบว่าเมื่อใช้เถ้าไม้ขาวและเถ้าไม้ดำแตกต่างกันคือ 2 นาทีและ 25 นาทีตามลำดับ ส่วนการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำเสียโดยปรับให้เป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 ก่อนเติมเถ้าไม้ นั่น พบว่าพีเอชไม่ส่งผลต่อการกำจัดทั้งสีซีโอติ และลิกนินเมื่อใช้เถ้าไม้ขาวซึ่งแสดงโดยประสิทธิภาพการกำจัดที่มีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือ สีจะถูกกำจัดในช่วงร้อยละ 89.93 ซีโอติร้อยละ 66.70 ลิกนินร้อยละ 78.82 สำหรับเถ้าไม้ดำนั้น พีเอชจะส่งผลต่อการกำจัดทั้งสี ซีโอติ และลิกนิน โดยที่พีเอช เท่ากับ 2 นั้นจะได้ค่าการกำจัดสูงสุดคือสีร้อยละ 42.2 ลิกนินร้อยละ 31.1 และซีโอติร้อยละ 29.7 และการกำจัดจะลดลงเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้น และพบว่าที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 เมื่อเติมเถ้าไม้ดำค่าพีเอชสูงขึ้นเป็น 7.1 เนื่องจากเวลาสัมผัสเข้าสู่สมดุลในเถ้าไม้ขาวสั้นมากคือเพียง 2 นาที การศึกษาปริมาณเถ้าไม้ที่เหมาะสมในเถ้าไม้ขาวจะพิจารณาจากประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดกล่าวคือประสิทธิภาพสูงสุดการกำจัดสีร้อยละ 95 ลิกนินร้อยละ 80 และซีโอติร้อยละ 69 ตามลำดับ ใช้เถ้าไม้ขาว 20 กรัม/ลิตร น้ำเสีย ส่วนกรณีเถ้าไม้ดำ การหาปริมาณเถ้าไม้ที่เหมาะสมทำได้โดยคำนวณจากสมการไอโซเทอร์มของการดูดติดผิวทั้งแบบแลงมัวร์เชิงเส้นและแบบฟรุนดลิช โดยพิจารณาเฉพาะสี และลิกนิน เนื่องจากค่าซีโอติไม่สามารถเข้ากับไอโซเทอร์มดังกล่าวได้ พฤติกรรมการดูดติดผิวสีและลิกนินของเถ้าไม้ดำจึงมีแนวโน้มเป็นแบบกายภาพ การทดลองด้วยแบบจำลองในเถ้าไม้ขาว พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดคือร้อยละ 93, 76 และ 61 ของสี ลิกนิน และซีโอติตามลำดับ ในขณะที่เถ้าไม้ดำมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 49, 45 และ 24 ตามลำดับ จากผลการวิจัยบ่งชี้ได้ว่า เถ้าไม้ขาวมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่า

สายฝน (2557) ศึกษาการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเพนตัน และโฟโต-เพนตัน (UV และแสงอาทิตย์) โดยมีการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการฟอกสี ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมสังเคราะห์ อัตราส่วนเริ่มต้นของ  $Fe^{2+} : H_2O_2$  เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ จากผลการทดลอง พบว่า การใช้โฟโต-เพนตันโดยใช้แสงอาทิตย์ให้ผลดีที่สุด และเมื่อใช้อัตราส่วนของ  $Fe^{2+} : H_2O_2$  เท่ากับ 4:80 mM ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 เป็นเวลา 360 นาที ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 205 ลักซ์ มีประสิทธิภาพในการฟอกสีย้อมสังเคราะห์ทั้ง 3 สี (แดง เหลือง และน้ำเงิน) มากกว่าร้อยละ 80 นอกจากนี้เมื่อศึกษาประสิทธิภาพการฟอกสีของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอในจังหวัดลำพูน ด้วยสภาวะที่เหมาะสม ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการฟอกสีเท่ากับ 76.62 % ค่าซีโอติลดลง 37% และค่าความขุ่นลดลง 46%

มณฑา (2550) ศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์ โดยใช้กระบวนการเพนตันออกซิเดชัน โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง  $Fe^{2+}$  และ  $H_2O_2$  ในการทดลองนี้ใช้น้ำเสียจริงที่ผ่านกระบวนการบำบัดทางเคมีมาแล้ว งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมประกอบด้วย ค่าพีเอชเริ่มต้น ปริมาณสารเพนตันรีเอเจนต์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติของน้ำเสีย ซึ่งผลการลดค่าซีโอติของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยโคแอกกูเลชันมาก่อนแล้วจากโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์ ซึ่งมีช่วงซีโอติอยู่ในช่วง 1,500-2,200 มิลลิกรัม/ลิตร โดยวิธีเพนตันออกซิเดชัน พบว่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการลดค่าซีโอติคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีเอช 3 ความเข้มข้นของ  $\text{Fe}^{2+}$  และ  $\text{H}_2\text{O}_2$  ที่เหมาะสมคือ 1.33 กรัม/ลิตร หรือ 0.024 โมล และ 1.36 กรัม/ลิตร หรือ 0.040 โมล ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับน้ำเสียของโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์คือ 30 นาที มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี 65-70%

Daphne. *et al.* (2012) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเฟนตันแบบดั้งเดิมและกระบวนการ Ultraviolet-Assisted Oxidation สำหรับการบำบัดของ Reverse Osmosis Retentate จากโรงงานกระดาษที่มีการประเมินผลระบบ Reverse Osmosis (RO) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของเป้าหมายในการบำบัดน้ำทิ้งไปถึงการ Recover น้ำเสียสุดท้ายและการนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตน้ำหนึ่งในข้อบ่งชี้ที่สำคัญที่สุดของการบำบัดเหล่านี้คือการผลิตของ Retentated Stream ซึ่งมักจะเต็มไปด้วยอินทรีย์วัตถุ Biorecalcitrant และสารอนินทรีย์สูง การบำบัดของ Biorefractory RO Retentate จากโรงงานกระดาษโดยกระบวนการ Advanced Oxidation Processes (AOPs) มีแนวโน้มหลากหลาย Conventional Fenton, Photo-Fenton and Photocatalysis ถูกพิจารณาปรับให้เหมาะสมกับผลกระทบและการมีปฏิสัมพันธ์ของปฏิกิริยาพารามิเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ Response Surface Methodology (RSM) ที่เหมาะสม (กระบวนการ Fenton) การประหยัดค่าใช้จ่ายของการบำบัดเหล่านี้ยังมีการประเมินเปรียบเทียบกระบวนการ Photo-Fenton ที่สามารถกำจัด COD ได้ทั้งหมดของ Retentate และแม้กระทั่งผลการ Operatively ที่ถูกกว่าในระดับการกำจัด COD ที่สูงกว่า Fenton แบบเดิม ซึ่งประสบความสำเร็จในการลด COD ได้ดีที่สุดใน 80% นอกจากนี้ ผลที่ดีที่สุดในการผลิตที่  $\text{pH} = 2.8$  ได้มีทดสอบกระบวนการ Fenton ว่ามีประสิทธิภาพในการลด COD ได้ดี (>60%) โดยไม่มีการปรับค่า pH เริ่มต้น

Emine and Mustafa (2014) ศึกษาการบำบัดสี้อมรีแอกทีฟ Blue 181 ด้วยกระบวนการเฟนตัน และโซโน-เฟนตัน โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาคือ ปริมาณ  $\text{Fe}^{2+}$   $\text{H}_2\text{O}_2$  ค่าพีเอช ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิ ซึ่งกระบวนการโซโน-เฟนตัน ดำเนินการที่ความถี่ 35 เฮอร์ทซ์ สภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ  $[\text{Fe}^{2+}] = 30$  มิลลิกรัม/ลิตร  $[\text{H}_2\text{O}_2] = 50$  มิลลิกรัม/ลิตร และค่า  $\text{pH} 3$  สำหรับกระบวนการเฟนตัน และ  $[\text{Fe}^{2+}] = 10$  มิลลิกรัม/ลิตร  $[\text{H}_2\text{O}_2] = 40$  มิลลิกรัม/ลิตร และ ค่า  $\text{pH} 3$  สำหรับกระบวนการโซโน-เฟนตัน ซึ่งสามารถกำจัดสีได้ 88% และ 93.5% โดยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการโซโน-เฟนตัน ตามลำดับ

Kazuaki. *et al.* (2013) การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการทำงานร่วมกันของปฏิกิริยา Sonocatalytic (โดยใช้อัลตราซาวนด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์) และปฏิกิริยาเฟนตัน ทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) เพิ่มมากขึ้นจากเดิม โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของกรด Dihydroxybenzoic (DHBA) 13 และ 115  $\mu\text{M}$  ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที ของปฏิกิริยา

Sonocatalytic และ Fenton ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นของ DHBA เป็น 378  $\mu\text{M}$  ใช้เวลาในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำปฏิกิริยา 10 นาที ในการทำปฏิกิริยา Sonocatalytic-Fenton สามารถย่อยสลายลิกนินได้ 1.8%, 49.9% และ 60.0% ที่ระยะเวลา 180 นาที ในปฏิกิริยา Sonocatalytic, Fenton และ Sonocatalytic-Fenton ตามลำดับ นอกจากนี้ปฏิกิริยา Sonocatalytic-Fenton ถูกนำไปใช้ปรับสภาพของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเพื่อเพิ่มแซคคาเอโนไซม์ในภายหลังอัตราส่วนแซคคาเซลลูโลสเป็น 11%, 14%, 16% และ 25% ที่ระยะเวลา 360 นาที ของการปรับสภาพจากปฏิกิริยา การควบคุมปฏิกิริยา Sonocatalytic, Fenton และ Sonocatalytic-Fenton ตามลำดับ

Marco. *et al.* (2012) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตัน ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) และโฟโต-เฟนตันจากแสงอาทิตย์ ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ ) โดยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตันจากแสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่มากกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีแสง ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน สามารถกำจัด DOC COD และฟีนอล ได้มากกว่า 90% โดยกระบวนการโฟโต-เฟนตันจากแสงอาทิตย์ ดำเนินการที่เหล็ก 5 mg/L สามารถกำจัด DOC ได้ถึง 90% ใช้พลังงานแสง 31 kJ/L และใช้  $\text{H}_2\text{O}_2$  50 mM และเมื่อทำการทดสอบ Respirometry และอัตราส่วน  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  ด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตันจากแสงอาทิตย์ ดำเนินการโดยใช้ปริมาณเหล็ก 20 และ 50 mg/L แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโต-เฟนตันจากแสงอาทิตย์สามารถย่อยสลาย DOC ได้ถึง 90%

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

- 3.1.1.1 เครื่องแก้วต่างๆ
- 3.1.1.2 หลอดทดลองชนิด borosilicate ขนาด 25×150 มิลลิเมตร พร้อมจุก TFE
- 3.1.1.3 ตะแกรงที่ใส่หลอดทดลอง
- 3.1.1.4 เครื่องกรองแบบลดความดันและกรวยบุษเนอร์
- 3.1.1.5 เตาให้ความร้อน (hot plate)
- 3.1.1.6 กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมโครเมตร
- 3.1.1.7 นาฬิกาจับเวลา ยี่ห้อ Canon รุ่น CT-20
- 3.1.1.8 เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital Balance) ยี่ห้อ Denver Instrument Company รุ่น TL-254
- 3.1.1.9 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827
- 3.1.1.10 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ PG INSTRUMENTS รุ่น T60
- 3.1.1.11 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) ยี่ห้อ Perkin Elmer Precisely รุ่น AAnalyst 200
- 3.1.1.12 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ยี่ห้อ NDI รุ่น 136H
- 3.1.1.13 ตู้อบ ที่อุณหภูมิ  $150\pm 2$  องศาเซลเซียส
- 3.1.1.14 เครื่องวัดแสง (Lux meter) ยี่ห้อ Lutron รุ่น SP-82UV
- 3.1.1.15 ตู้แสงยูวี ขนาด  $50 \times 45 \times 55$  เซนติเมตร ภายในติดตั้งหลอดยูวี ขนาด 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด ยี่ห้อ NARWAR รุ่น G18 T8



รูปที่ 3.1 ตู้แสงยูวี ขนาด  $50 \times 45 \times 55$  เซนติเมตร ภายในติดตั้งหลอดยูวี หลอดละขนาด 18 วัตต์ จำนวน 4 หลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 สารเคมี

3.1.2.1 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 30% AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK

3.1.2.2 เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) AR Grade บริษัท Unilab, Austratia

3.1.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK

3.1.2.4 กรดซัลฟูริก (Conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) AR Grade บริษัท Fisher Chemical, UK

3.1.2.5 โพตัสเซียมไดโครเมต ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK

3.1.2.6 ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK

3.1.2.7 1,10-พีแนนโทลีน ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}$ ) AR Grade บริษัท Panreac, E.U.

3.1.2.8 แอมโมเนียมเฟอร์รัสซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) AR Grade บริษัท Loba Chemie, India

3.1.2.9 เมอร์คิวริกซัลเฟต ( $\text{HgSO}_4$ ) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK

3.1.2.10 โคบอลคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) AR Grade บริษัท J.T.Baker, USA

3.1.2.11 ลิกนิน, อัลคาไลน์ ( $\text{C}_{30}\text{H}_{25}\text{ClN}_6$ ) บริษัท Aldrich Chemistry, USA

### 3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ (ซีโอดี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร)

ซึ่งลิกนิน 1 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่นและเจือจางในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีโอดี และสี ดังตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (ซีโอดี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์และวิธีการสำหรับวิเคราะห์ (Andrew. *et al.* (1995))

พารามิเตอร์	วิธีการ	วิธีการมาตรฐาน
ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	Closed Reflux, Titrimetric Method	5220C
สี (ADMI)	ADMI Tristimulus Filter Method	2120E
เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	Atomic Absorption Spectrophotometer	-
พีเอช	pH meter	-

### 3.3 การดำเนินงานวิจัย

#### 3.3.1 การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการเฟนตัน

##### 3.3.1.1 การศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ เป็น 3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์
3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมล และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล แล้วนำไปปั่นจนเป็นเวลา 40 นาที ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์ที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการเฟนตัน)

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสูญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1

7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

8. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการเติมเฟอร์รัสไอออนลงไปในการทำปฏิกิริยา

### 3.3.1.2 การศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ เป็น 3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และเติมอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 แล้วนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 40 นาที

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก

5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสูญญากาศเพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป

6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1

7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

8. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

### 3.3.1.3 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ เป็น 2, 3, 4, 5 และ 6 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ และไม่ทำการปรับพีเอช 1 บีกเกอร์

3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 แล้วนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 40 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป
6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี
7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการปรับพีเอชเริ่มต้น

#### 3.3.1.4 การศึกษาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ ให้เป็นไปตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์
3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 แล้วนำไปปั่นกวนเป็นเวลา 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที
4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป
6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1
7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 และพีเอชตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 แต่ไม่ทำการปั่นกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตัน

#### 3.3.2.1 การศึกษาหาค่าความเข้มแสงที่เหมาะสม

1. เตรียมปิกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละปิกเกอร์ ให้เป็นไปตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์
3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 นำไปปั่นจนเป็นเวลา 10 นาที โดยฉายแสงยูวีซึ่งมีค่าความเข้มแสง 0, 100, 200, 300, 400 ลักซ์ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ถึงปฏิกรณ์ที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโฟโต-เฟนตัน)

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป
6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใสไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีโอดี และสี ดังตารางที่ 3.1
7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 และพีเอชตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที แต่ไม่ให้แสงสว่างลงไปในการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2.2 การศึกษาหาเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ ให้เป็นไปตามที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์
3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 นำไปปั่นจนเป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที โดยให้แสงยูวีซึ่งมีค่าความเข้มแสงตามที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.2.1 ภายในตู้ฉายแสงยูวี
4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก
5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศเพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป
6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใสไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1
7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 และพีเอชตามที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 และค่าความเข้มแสงที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.2.1 แต่ไม่ทำการปั่นจน

### 3.3.3 การบำบัดซีไอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซโน-เฟนตัน (ธนันท์, 2552)

#### 3.3.3.1 การศึกษาหาเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ ให้เป็นไปตามที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์
3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 นำไปให้คลื่นความถี่เหนือเสียงเป็นเวลา 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic) ดังรูปที่ 3.5
4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ถึงปฏิกรณ์ที่เป็นชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโซโน-เฟนตัน)

5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป
6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1
7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ
8. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 และพีเอชตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 แต่ไม่ให้คลื่นความถี่เหนือเสียง

### 3.3.4 การบำบัดซีไอดีและสีจากน้ำเสียจริงของอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ จากขั้นตอนกระบวนการล้างและทำความสะอาดเยื่อ โดยเก็บน้ำตัวอย่างแบบจ้วง (Grab Sampling) แล้วนำไปกรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อแยกกรวดทราย เส้นไม้ ตาไม้ เปลือกไม้ ออกไป จึงนำไปทำการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ของน้ำเสียตัวอย่าง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าซีไอดี สี และพีเอช

#### 3.3.4.1 การบำบัดน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการเฟนตัน

1. นำน้ำเสียจริงมากรองแบบสุญญากาศ แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียจริงแต่ละบีกเกอร์ ให้เป็นไปตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 นำไปปั่นจนเป็นเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.4

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก

5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป

6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1

7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

### 3.3.4.2 การบำบัดน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตัน

1. นำน้ำเสียจริงมากรองแบบสุญญากาศ แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. ปรับพีเอชของน้ำเสียจริง ให้เป็นไปตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 นำไปปั่นจนเป็นเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.2.2 โดยให้แสงสว่างซึ่งมีค่าความเข้มแสงที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.2.1

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก

5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป

6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใส่ไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1

7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

### 3.3.4.3 การบำบัดน้ำเสียจริงด้วยกระบวนการโซโน-เฟนตัน

1. นำน้ำเสียจริงมากรองแบบสุญญากาศ แล้วใส่ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. ปรับพีเอชของน้ำเสียจริง ให้เป็นไปตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 นำไปให้คลื่นความถี่เหนือเสียงเป็นเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.3.1 ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก

5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรอง เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป

6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใสไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1

7. ทำข้อ 1-6 อีก 2 ซ้ำ

### 3.3.5 การนำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการเฟนตัน (จันทิมา, 2552)

#### 3.3.5.1 การนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2.1 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ ให้เป็นไปตามที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 ด้วยกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

3. เติมเฟอร์รัสไอออนในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 นำไปปั่นจนเป็นเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.4

4. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก

5. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป

6. จากนั้นนำส่วนของสารละลายใสไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1

7. นำตะกอนเหล็กที่ได้จากการกรองในข้อ 5. ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเฟนตันอีกครั้ง โดยนอกจากทำการเติมตะกอนเหล็กที่ได้แล้ว ทำการเติมเฟอร์รัสไอออนใหม่เข้าไปเพิ่มอีกในปริมาณที่ลดลงจากการทดลองที่ได้ในข้อ 3.3.1.1 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 แล้วนำไปปั่นจนเป็นเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.4

8. ทำข้อ 4-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ทำข้อ 1-8 อีก 2 ซ้ำ

10. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 และพีเอชตามที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.4 แต่ไม่ทำการเติมเฟอร์รัสไอออนใหม่เพิ่มลงไปในการทำปฏิกิริยา

### 3.3.5.2 การนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2

1. นำตะกอนเหล็กที่ได้จากการกรองในข้อ 3.3.5.1 ไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเฟ้นต้นอีกครั้ง โดยนอกจากทำการเติมตะกอนเหล็กที่ได้แล้ว ทำการเติมเฟอร์รัสไอออนใหม่เข้าไปเพิ่มอีกในปริมาณที่ลดลงจากการทดลองที่ได้ในข้อ 3.3.1.1 10, 20, 30, 40, 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในปริมาณที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 แล้วนำไปปั่นจนเป็นเวลาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.4

2. นำน้ำเสียสังเคราะห์มาทำการปรับสภาพให้ได้พีเอชประมาณ 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้เกิดการตกตะกอนของเหล็ก

3. เมื่อเหล็กเกิดการตกตะกอนแล้วนำมากรองด้วยเครื่องกรองแบบสุญญากาศ เพื่อกรองตะกอนของเหล็กออกไป

4. จากนั้นนำส่วนของสารละลายไปวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของเหล็ก ซีไอดี และสี ดังตารางที่ 3.1

5. ทำข้อ 1-4 อีก 2 ซ้ำ

6. ทำการทดลองกับน้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2 และพีเอชตามที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.4 แต่ไม่ทำการเติมเฟอร์รัสไอออนใหม่เพิ่มลงไปในการทำปฏิกิริยา

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ที่มีค่าพีเอชประมาณ 7-8 ซีไอดีประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสีประมาณ 3,000 ADMI ซึ่งมีขั้นตอนในการศึกษา คือ การหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยกระบวนการเฟนตัน (Fenton) โฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton) และ โซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton) โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไดออกไซด์ ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พีเอช และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน นอกจากนี้ในการบำบัดด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton) ยังศึกษาถึงความเข้มข้นแสง และระยะเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย ส่วนกระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton) ศึกษาถึงระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย อีกทั้งยังศึกษาการนำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วในกระบวนการเฟนตันนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจึงนำมาใช้ในการบำบัดกับน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ที่มีค่าพีเอชประมาณ 7-8 ซีไอดีประมาณ 2,400 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสีประมาณ 2,400-2,500 ADMI ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงไว้ดังนี้

#### 4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

##### 4.1.1 กระบวนการเฟนตัน (Fenton)

##### 4.1.1.1 การศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไดออกไซด์ที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไดออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ได้ทำการทดลองแปรผันค่าปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไดออกไซด์นี้ คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมล ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่า สามารถบำบัดซีไอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $1,990.83 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $1,229.63 \pm 0.00$ ,  $702.65 \pm 134.16$ ,  $333.76 \pm 0.00$ ,  $111.25 \pm 17.57$ ,  $76.12 \pm 17.57$  และ  $128.82 \pm 17.57$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $38.24 \pm 0.00$ ,  $64.71 \pm 6.74$ ,  $83.24 \pm 0.00$ ,  $94.41 \pm 0.88$ ,  $96.18 \pm 0.88$  และ  $93.53 \pm 0.88$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อไม่ทำการเติมเพอร์สไดออกไซด์เข้าไปในการบำบัดก็สามารถช่วยในการบำบัดได้เหมือนกัน แต่สามารถช่วยบำบัดได้ในปริมาณที่ยังน้อยอยู่ซึ่งอาจเป็นผลมาจากที่ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถแตกตัวให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลได้เอง แต่ได้ในปริมาณที่น้อย เพราะไม่มีตัวเร่งปฏิกิริยาจากเพอร์สไดออกไซด์เข้ามาช่วย (ธนภฤต, 2552) และเมื่อเติมเพอร์สไดออกไซด์เพิ่มลงไปช่วง 0.01-0.02 โมล ซึ่งถือได้ว่าเป็นช่วงแรกที่เติมเพอร์สไดออกไซด์ลงไป ทำให้เพอร์สไดออกไซด์เข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลได้เอง

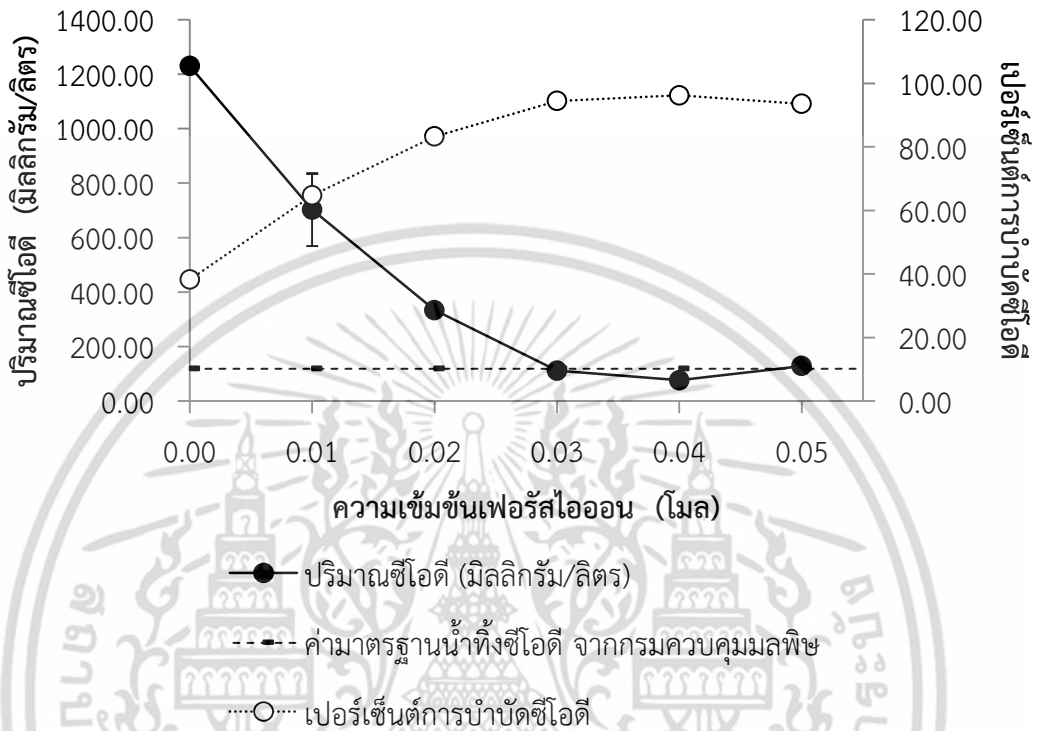
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลแลคคัลมีน้อย ทำให้ไม่เพียงพอต่อการเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์ (มณฑา, 2550) แต่เมื่อเติมเพอร์สไอออนช่วง 0.03-0.04 โมล พบว่าเพอร์สไอออนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแลคคัลได้อย่างเพียงพอและเหมาะสม ตามสมการที่ (2.1) และ (2.8) ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อเติมเพอร์สไอออน 0.03 โมล และ 0.04 โมล ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเติมปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนมากกว่า 0.04 โมล ซึ่งเป็นปริมาณที่มากเกินไปจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เนื่องจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแลคคัลและอนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ดรอกซิลถูกยับยั้งการเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแลคคัลโดยเพอร์สไอออน และเพอร์ริกไอออน ตามสมการที่ (2.2) และ (2.6) จากสมการ จะเห็นได้ว่า เมื่อเหล็กเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จะทำให้เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกไซด์ และไฮโดรเจนไอออน ซึ่งไม่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ (ธนภุต, 2552) สำหรับเหล็กไอออนนั้นจะมีการรวมเวียนและเปลี่ยนรูปกันไประหว่างเพอร์สไอออน และเพอร์ริกไอออน ขึ้นอยู่กับว่าอยู่ในขั้นตอนของปฏิกิริยาใด (จันทิมา, 2552) และในการเกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์นั้น สารอินทรีย์จะต้องถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำทั้งหมด ซึ่งเป็นไปได้ยาก และในการวิจัยครั้งนี้ไม่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ (ธนภุต, 2552) ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบบลงค์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการเติมเพอร์สไอออนลงไปในการทำปฏิกิริยา พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกากล้นมีปริมาณ ซีโอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีโอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้ ซึ่งถือได้ว่าไม่มีผลกับปริมาณของซีโอดีที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

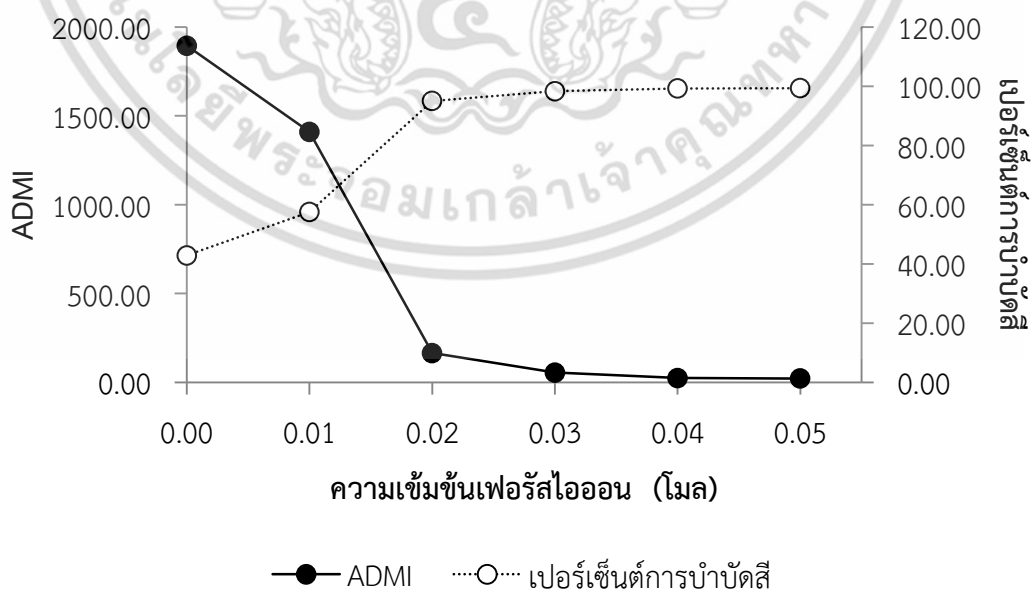
ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันค่าปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนดังนี้ คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมล ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,318.23 \pm 1.57$  ADMI เหลือ  $1,895.10 \pm 0.38$ ,  $1,409.83 \pm 3.64$ ,  $164.91 \pm 0.13$ ,  $54.90 \pm 0.17$ ,  $24.03 \pm 0.07$  และ  $21.56 \pm 3.06$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $42.89 \pm 0.01$ ,  $57.51 \pm 0.11$ ,  $95.03 \pm 0.00$ ,  $98.35 \pm 0.01$ ,  $99.28 \pm 0.00$  และ  $99.35 \pm 0.09$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 จากรูปพบว่าเมื่อไม่ทำการเติมเพอร์สไอออนเข้าไปในการบำบัดก็สามารถช่วยในการบำบัดได้เหมือนกัน แต่สามารถบำบัดได้ในปริมาณที่ยังน้อยอยู่ และเมื่อเติมเพอร์สไอออนเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.01-0.02 โมล มีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าสูงขึ้นมา เนื่องจากมีเพอร์สไอออนที่เป็นตัวเร่งให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแลคคัลมากขึ้น อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแลคคัลที่เกิดขึ้นจึงไปสลายพันธะคู่และพันธะเดี่ยวของโครงสร้างสารอินทรีย์ ทำให้ความเข้มสีลดลงได้ โดยที่ความเข้มข้นเพอร์สไอออนช่วง 0.03-0.05 โมล จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เนื่องจากเพอร์สไอออนเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดเป็นอนุมูล

อิสระไฮดรอกซิลแลคคัลได้เพียงพอและเหมาะสมสำหรับการบำบัดสี ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสีย

สังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลงค์ ที่มีค่าสี  $3.31 \pm 0.00$  ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.06 โมล พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการเติมเฟอร์รัสไอออนลงไปในการทำปฏิกิริยา พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีค่าสีอยู่  $6.62 \pm 0.02$  ADMI ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



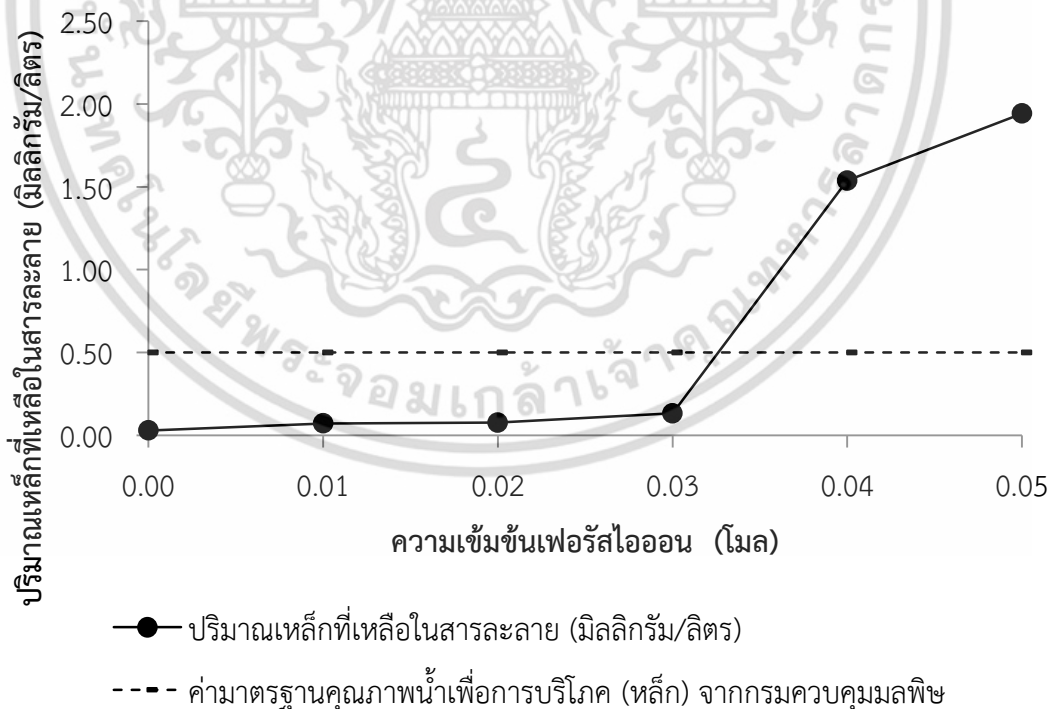
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ปริมาณซีไอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ความเข้มสีในหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ซึ่งด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันค่าปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนดังนี้ คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 โมล ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $0.03 \pm 0.02$ ,  $0.07 \pm 0.01$ ,  $0.080 \pm 0.1$ ,  $0.13 \pm 0.02$ ,  $1.54 \pm 0.04$  และ  $1.94 \pm 0.01$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนเพิ่มมากขึ้นจาก 0.00-0.03 โมล จะพบปริมาณของเหล็กไอออนหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วน้อยมาก เนื่องจากเมื่อทำการเติมเฟอร์รัสไอออนเข้าไปในการทำปฏิกิริยาน้อย ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาแล้วจึงทำให้เหลือปริมาณของเหล็กไอออนที่ยังตกตะกอนไม่หมดอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วน้อยมาก แต่เมื่อปริมาณเฟอร์รัสไอออนเพิ่มมากกว่า 0.03 โมล พบปริมาณของเหล็กไอออนที่ยังตกตะกอนไม่หมดหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากมีปริมาณของเหล็กไอออนเพิ่มมากขึ้นจากการเติมเพิ่มเข้าไปในการทำปฏิกิริยา จึงทำให้ไม่สามารถตกตะกอนเหล็กไอออนออกมาได้หมด นอกจากนี้ปริมาณเหล็กไอออนที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วยังมีผลกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี โดยถ้ามีเหล็กหลงเหลืออยู่มากปริมาณซีโอดีก็จะเพิ่มมากขึ้น (มณฑา, 2550) และปริมาณของเหล็กไอออนไม่มีมาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม แต่กำหนดมาตรฐานปริมาณของเหล็กในการบริโภคที่ไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) แต่ก็ไม่ควรปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อมในปริมาณที่มากเกินไป



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออนและปริมาณเหล็กที่

ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด

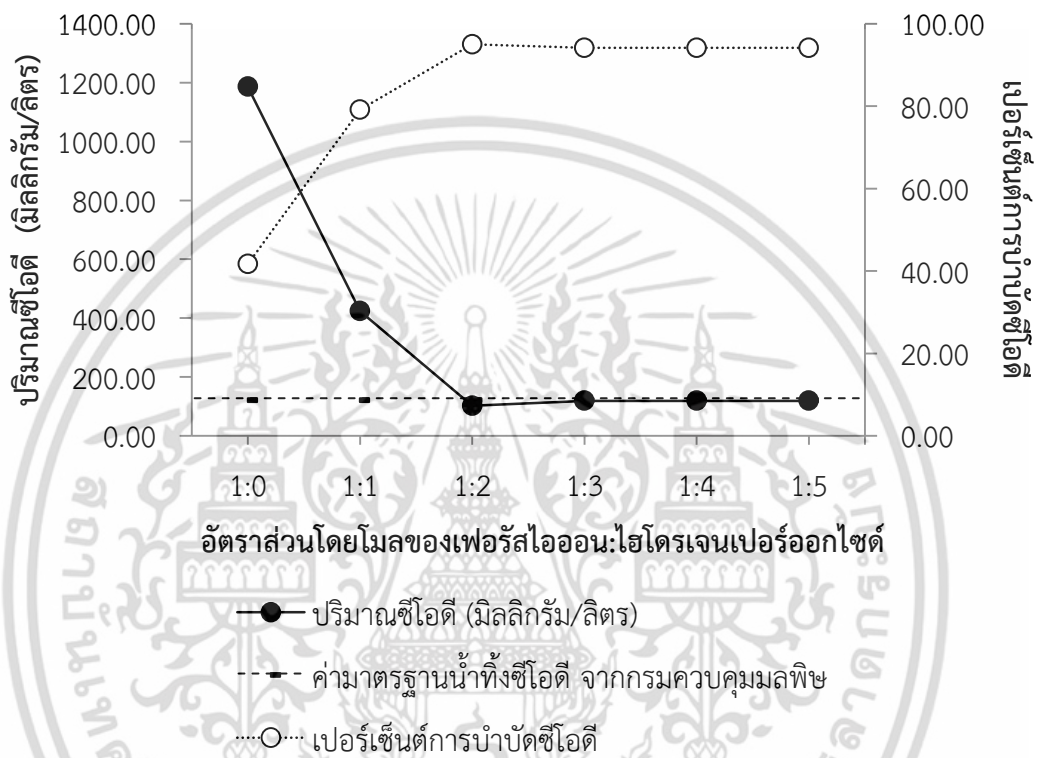
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี จึงควรเลือกเติมปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน คือ 0.03 โมล ซึ่งสามารถลดปริมาณซีโอดีลงเหลือ  $111.25 \pm 17.54$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $94.41 \pm 0.88$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $54.90 \pm 0.17$  ADMI หรือ  $98.35 \pm 0.01$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ มณฑา (2550) ที่ทำการลดค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยโคแอกกูเลชันมาก่อนแล้วจากโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์ ด้วยวิธีเฟนตันออกซิเดชัน โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน 0.024 โมล ซึ่งเป็นปริมาณใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ที่เลือกใช้ปริมาณความเข้มข้นของเพอร์สไอออน 0.03 โมล

#### 4.1.1.2 การศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ได้ทำการทดลองแปรผันอัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สไอออน: ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนี้ คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่า สามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $2,033.50 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $1,186.21 \pm 0.00$ ,  $423.65 \pm 0.00$ ,  $101.67 \pm 0.00$ ,  $118.62 \pm 0.00$ ,  $118.62 \pm 0.00$  และ  $118.62 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $41.67 \pm 0.00$ ,  $79.17 \pm 0.00$ ,  $95.00 \pm 0.00$ ,  $94.17 \pm 0.00$ ,  $94.17 \pm 0.00$  และ  $94.17 \pm 0.00$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อไม่ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปในการบำบัดคือ 1:0 ก็สามารถช่วยในการบำบัดได้เหมือนกัน แต่สามารถบำบัดได้ในปริมาณที่ยังน้อยอยู่ เนื่องมาจากเหล็กไอออนสามารถที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอินทรีย์ได้บางส่วน ตามสมการ (2.12)-(2.13) (มณฑา, 2550) อีกทั้งเหล็กไอออนยังสามารถเข้าไปรบกวนการวิเคราะห์ค่าซีโอดี ซึ่งเกิดจากการรบกวนกันกับเพอร์สแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) แต่เมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มลงไปตั้งแต่ 1:1-1:2 จะพบว่าเมื่อความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดจากสารเคมีเฟนตันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยมีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลเป็นตัวออกซิไดซ์ ดังนั้นเมื่อมีปริมาณมากก็จะทำให้มีความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์หรือซีโอดีได้มากขึ้น ตามสมการ (2.1) และ (2.8) (มณฑา, 2550) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไปมากกว่าค่าที่เหมาะสมแล้วคือ 1:2 ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จะไม่เพิ่มขึ้นอีก ทั้งนี้เนื่องจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลนอกจากจะจับกับสารอินทรีย์แล้วยังสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เป็นอนุมูลอิสระเปอร์ไฮดรอกซิล ( $\text{HO}_2^\cdot$ ) ซึ่งมีความแรงต่ำกว่าอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล (มณฑา, 2550) ตามสมการ (2.7) และ (2.22)-(2.25) (ธนภุต, 2552) โดยที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วง 1:2-1:5 จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ส่วนการใช้กากแลนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีโอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีโอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้ ซึ่งถือได้ว่าไม่มีผลกับปริมาณของซีโอดีที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

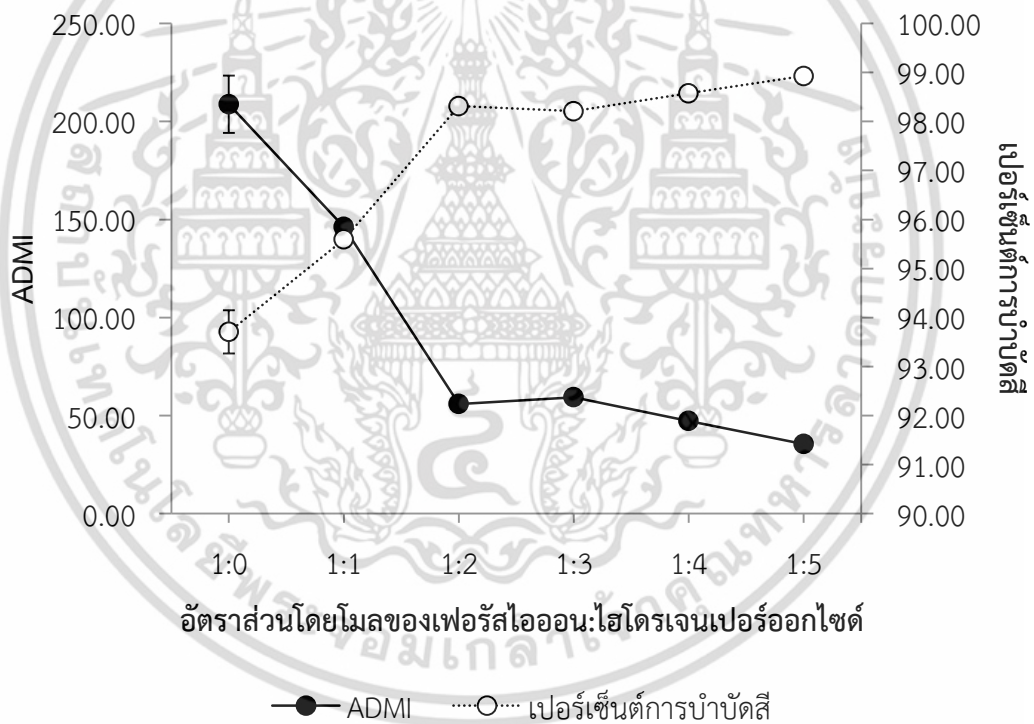


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์กลั่น

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนี้ คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,318.23 \pm 1.57$  ADMI เหลือ  $208.80 \pm 14.67$ ,  $146.25 \pm 1.20$ ,  $55.92 \pm 2.98$ ,  $59.39 \pm 0.85$ ,  $47.29 \pm 1.22$  และ  $35.53 \pm 1.28$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $93.71 \pm 0.44$ ,  $95.59 \pm 0.04$ ,  $98.31 \pm 0.09$ ,  $98.21 \pm 0.03$ ,  $98.57 \pm 0.04$  และ  $98.93 \pm 0.04$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.5 จากรูปจะพบว่าเมื่อไม่ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปในการบำบัดคือ 1:0 ก็สามารถช่วยในการบำบัดได้เหมือนกัน และเมื่อเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1:1-1:2 จะพบว่า

ประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีเปอร์เซ็นต์สูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เอกลำดับที่ 1 หรือที่เรียกว่าไฮดรอกซิลแรดิคัลที่ 1 ซึ่งมีอยู่มากในน้ำเสียสังเคราะห์กลั่น เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีไม่ต่ำกว่า 90% ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้น ตามสมการ (2.1) และ (2.8) (ธนภุต, 2552) แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากกว่า 1:2 กลับไม่มีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลลดลง จากการที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลและอนุมูลอิสระเปอร์ไฮดรอกซิลเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตามสมการ (2.7) และ (2.22) และเกิดการจับตัวกันเองของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลและอนุมูลอิสระเปอร์ไฮดรอกซิล ตามสมการ (2.23)-(2.25) เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีไม่เพิ่มขึ้นอีก (ธนภุต, 2552) โดยที่ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ช่วง 1:2-1:5 จะให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ส่วนการใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ ที่มีค่าสี  $3.31 \pm 0.00$  ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 พีเอช 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่ามีค่าสีอยู่  $3.31 \pm 0.07$  ADMI ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



**รูปที่ 4.5** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มสีในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนี้ คือ 1:0, 1:1, 1:2, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1:3, 1:4 และ 1:5 ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $1.57 \pm 0.01$ ,  $0.61 \pm 0.01$ ,  $0.15 \pm 0.01$ ,  $0.27 \pm 0.01$ ,  $0.23 \pm 0.01$  และ  $0.02 \pm 0.01$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เพิ่มขึ้นในช่วง 1:0-1:5 จะพบปริมาณของเหล็กไอออนหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากเมื่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเข้าทำปฏิกิริยาจึงเกิดออกมาเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์ที่มากขึ้น แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีและมีความเหมาะสม ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาแล้วทำการตกตะกอนจึงสามารถทำให้เหล็กไอออนสามารถตกตะกอนออกมาได้ดีขึ้น ปริมาณเหล็กไอออนที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วจึงน้อยลง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด

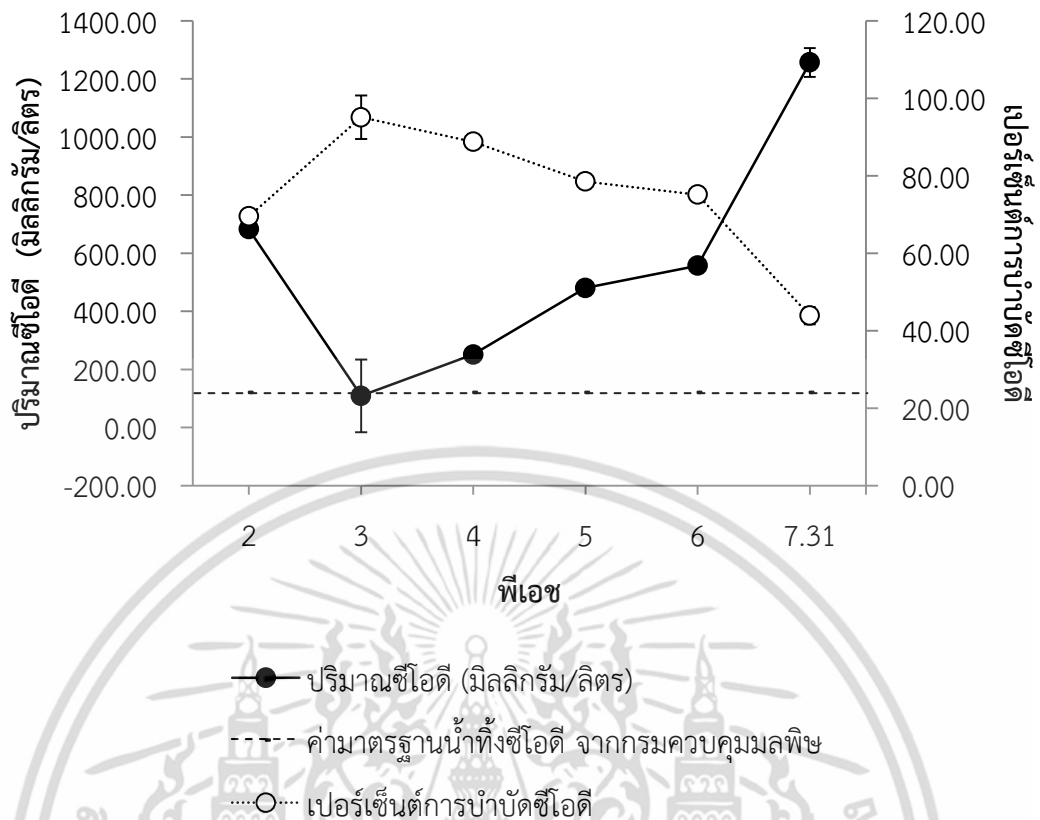
ดังนั้น อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี คือ 1:2 หรือ ปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็น 0.06 โมล ซึ่งสามารถลดปริมาณซีไอดีลงเหลือ  $101.67 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $95.00 \pm 0.00$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $55.92 \pm 2.98$  ADMI หรือ  $98.31 \pm 0.09$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ มณฑา (2550) ที่ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยโคแอกกูเลชันมาก่อนแล้วจากโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์ ด้วยวิธีเฟนตันออกซิเดชัน โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:1.67 หรือปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.04 โมล ซึ่งเป็นปริมาณใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ที่เลือกใช้อัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2 หรือปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.06 โมล

#### 4.1.1.3 การศึกษาหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินได้ทำการทดลองแปรผันค่าพีเอช ดังนี้ คือ 2, 3, 4, 5, 6 และไม่ทำการปรับพีเอช ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที พบว่า สามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $2,240.35 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $683.03 \pm 125.20$ ,  $109.29 \pm 0.00$ ,  $251.36 \pm 0.00$ ,  $480.86 \pm 0.00$ ,  $557.36 \pm 50.08$  และ  $1,256.78 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $69.51 \pm 5.59$ ,  $95.12 \pm 0.00$ ,  $88.78 \pm 0.00$ ,  $78.54 \pm 0.00$ ,  $75.12 \pm 2.24$  และ  $43.90 \pm 0.00$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ค่าพีเอช 3 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากเพอร์สไอออน ( $Fe^{2+}$ ) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) จะมีเสถียรภาพมากขึ้นในสภาวะความเป็นกรดของปฏิกิริยาเฟนตัน จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ดีขึ้นด้วย (มณฑา, 2550) แต่ที่พีเอชต่ำกว่า 3 จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ลดลง เนื่องมาจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $OH^\cdot$ ) จะลดลงเมื่อเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ดังสมการที่ (2.27) และถูกยับยั้งจากกรดซัลฟูริก ดังสมการที่ (2.28)-(2.31) (ชนกฤต, 2552) ส่วนที่พีเอชมากกว่า 3 เหล็กจะเกิดการตกตะกอน ทำให้เหล็กอยู่ในรูปเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ ( $Fe(OH)_3$ ) ซึ่งไม่มีความสามารถในการเป็นตัวเร่งของปฏิกิริยาเฟนตันได้ (ชนกฤต, 2552) ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที แต่ไม่ทำการปรับพีเอชเริ่มต้น พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีโอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีโอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้ ซึ่งถือได้ว่าไม่มีผลกับปริมาณของซีโอดีที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

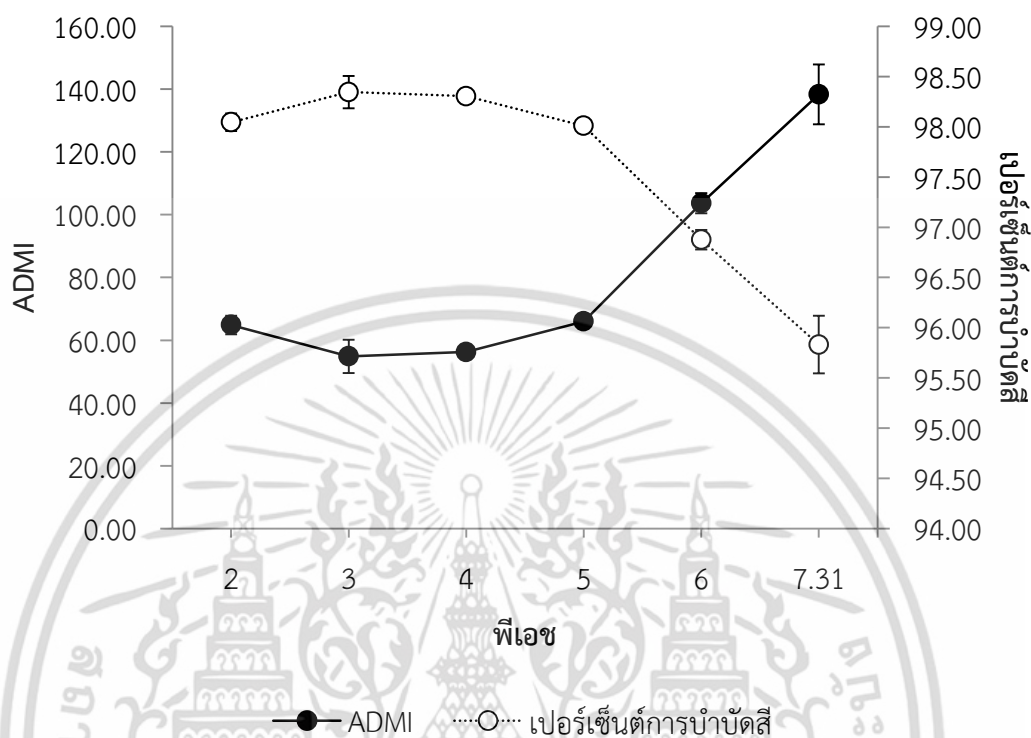


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ปริมาณซีไอต์ และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอต์ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์หลักนิน

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ดังนี้ คือ 2, 3, 4, 5, 6 และไม่ทำการปรับพีเอช ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,318.23 \pm 1.57$  ADMI เหลือ  $64.87 \pm 5.30$ ,  $62.60 \pm 4.47$ ,  $56.29 \pm 1.99$ ,  $66.02 \pm 3.24$ ,  $103.66 \pm 9.51$  และ  $138.31 \pm 2.93$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $98.04 \pm 0.16$ ,  $98.11 \pm 0.13$ ,  $98.30 \pm 0.06$ ,  $98.01 \pm 0.10$ ,  $96.88 \pm 0.29$  และ  $95.83 \pm 0.09$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 จากรูปพบว่าที่พีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เนื่องมาจากปฏิกิริยาเฟนตันจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด แต่ในทางตรงกันข้ามหากมีค่าพีเอชที่สูงขึ้นก็จะยิ่งทำให้เพอร์สไอออนไม่เสถียรเปลี่ยนรูปไปเป็นเพอริกไอออนได้ง่าย ซึ่งเป็นผลทำให้มีปริมาณของเพอร์สไอออนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลง นอกจากนี้ที่ค่าพีเอชสูงมากขึ้นยังมีผลกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ไม่เสถียรและเกิดการสลายตัวให้ออกซิเจน ( $O_2$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) ได้ง่าย ดังสมการที่ (2.26) ประสิทธิภาพในการบำบัดสีก็จะลดลง (มณฑา, 2550) ส่วนการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ ที่มีค่าสี 3.31 ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้น

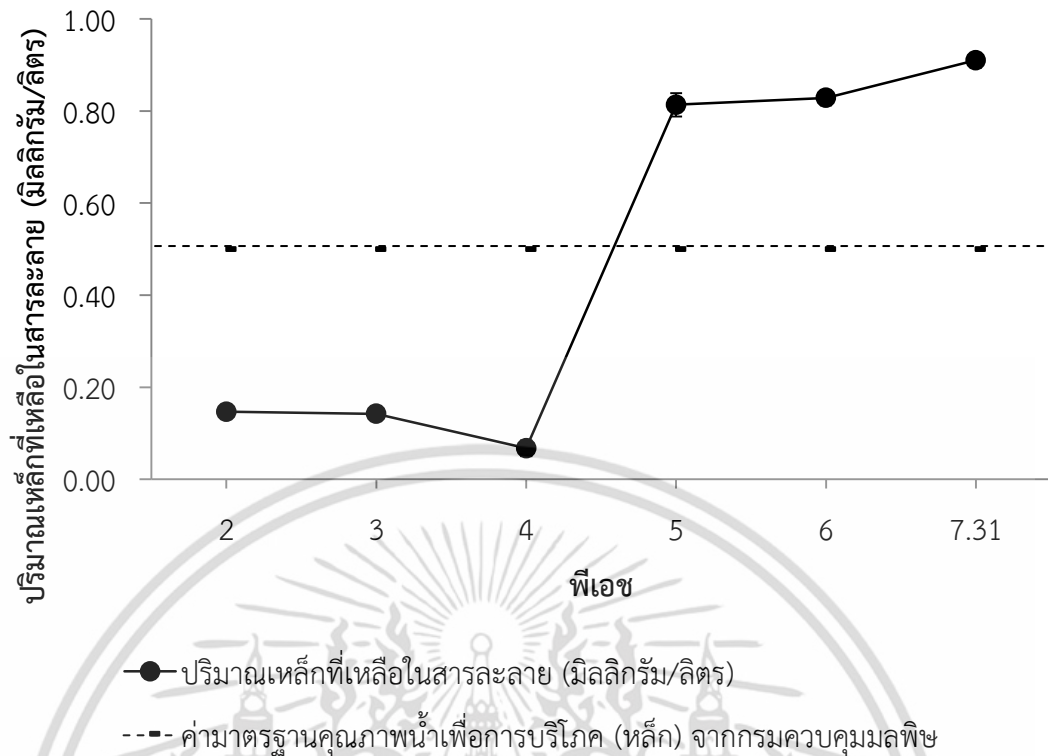
เอกสารนี้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40 นาที แต่ไม่ทำการปรับพีเอชเริ่มต้น พบว่ามีค่าสื่ออยู่  $5.76 \pm 0.05$  ADMI ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ความเข้มสีในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้น ดังนี้ คือ 2, 3, 4, 5, 6 และไม่ทำการปรับพีเอช ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $0.15 \pm 0.01$ ,  $0.14 \pm 0.01$ ,  $0.07 \pm 0.02$ ,  $0.81 \pm 0.03$ ,  $0.83 \pm 0.02$  และ  $0.91 \pm 0.02$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ที่สภาวะเป็นกรดปฏิกิริยาเฟนตันจะเกิดขึ้นได้ดี หลังจากนั้นเมื่อสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยา จะทำการตกตะกอนเหล็กไอออนด้วย NaOH จึงทำให้เหล็กไอออนตกตะกอนออกมาได้ดี ปริมาณเหล็กไอออนที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วจึงมีน้อย แต่เมื่อพีเอชมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 4 ปฏิกิริยาเฟนตันที่เกิดขึ้นจะไม่สมบูรณ์ ทำให้ปริมาณของเหล็กไอออนที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วจึงมีมากขึ้น



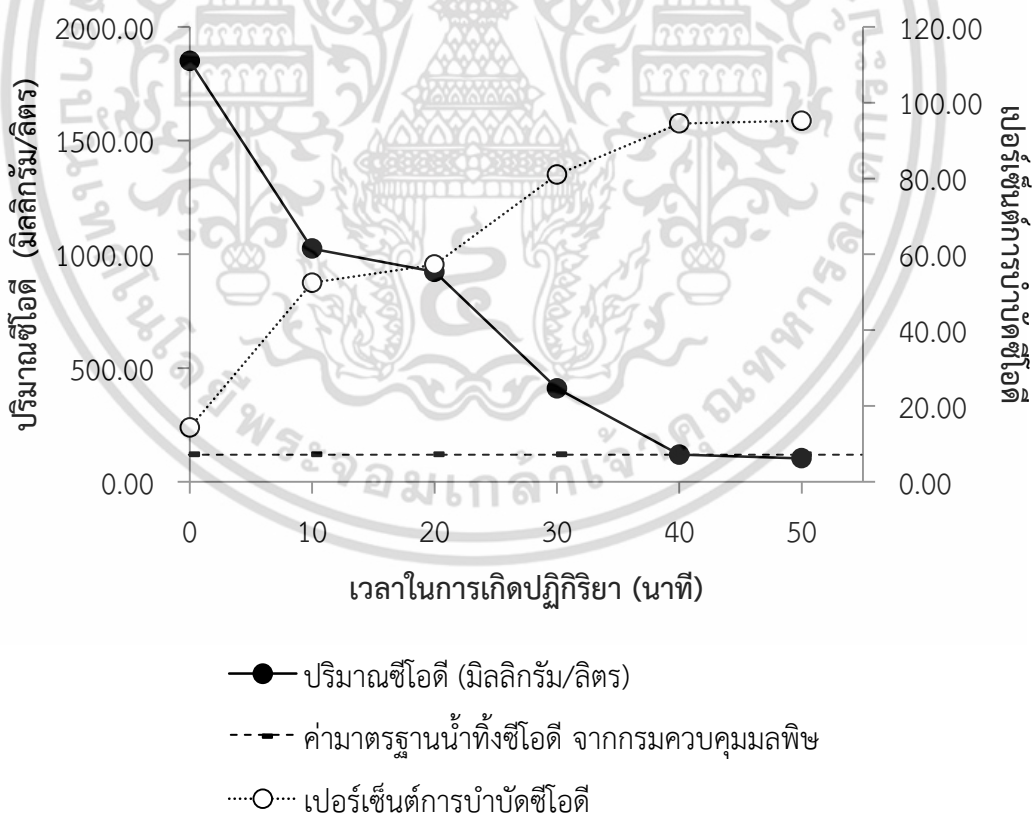
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์  
 ลิกนินหลังจากการบำบัด

ดังนั้น ค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่ากำจัดกากตะกอน จึงควรเลือกค่าพีเอช 3 ซึ่งสามารถลดปริมาณซีโอดีลงเหลือ  $109.29 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $95.12 \pm 0.00$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $62.60 \pm 4.47$  ADMI หรือ  $98.11 \pm 0.13$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ ธนฤต (2552) ที่ทำการกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเพนตันรีเอเจนต์ โดยใช้ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3 ซึ่งถือได้ว่าเป็นสภาวะเดียวกันกับงานวิจัย

#### 4.1.1.4 การศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ได้ทำการทดลองแปรผันเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และพีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 พบว่า สามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $2,157.85 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $1,850.36 \pm 0.00$ ,  $1,024.98 \pm 0.00$ ,  $922.48 \pm 0.00$ ,

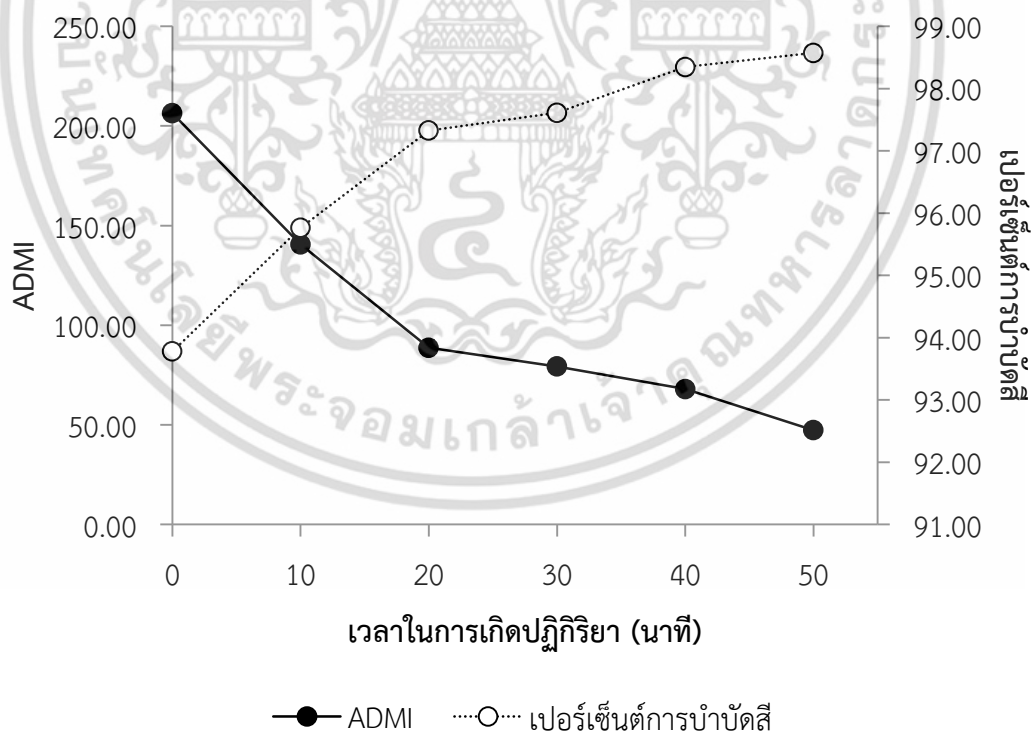
409.99±0.00, 118.68±0.00 และ 102.50±0.00 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 14.25±0.00, 52.50±0.00, 57.25±0.00, 81.00±0.00, 94.50±0.00 และ 95.25±0.00 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจาก 0-40 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องมาจากว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลจับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น (วีระนุช, 2553) และหลังจากที่ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 40-50 นาที ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ก็จะเริ่มคงที่ (มณฑา, 2550) และให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลลงค์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และพีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 แต่ไม่ทำการปั่นกววน พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณซีไอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีไอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้ ซึ่งถือได้ว่าไม่มีผลกับปริมาณของซีไอดีที่ได้จากการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณซีไอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดีที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์กลินิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,318.23 \pm 1.57$  ADMI เหลือ  $206.38 \pm 1.01$ ,  $140.60 \pm 0.01$ ,  $88.74 \pm 3.74$ ,  $79.29 \pm 1.38$ ,  $67.97 \pm 1.27$  และ  $47.36 \pm 1.54$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $93.78 \pm 0.03$ ,  $95.76 \pm 0.00$ ,  $97.33 \pm 0.11$ ,  $97.61 \pm 0.04$ ,  $98.35 \pm 0.01$  และ  $98.57 \pm 0.01$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.11 จากรูปพบว่า ถึงแม้จะไม่ทำการปั่นกววนสาร แต่ทั้งเฟอร์สไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากันเองได้เช่นกันทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดี และเมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจาก 0-10 นาที ก็จะมีความสามารถในการบำบัดสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 10-50 นาที ก็จะสามารถบำบัดสีได้เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง และให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ส่วนการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ ที่มีค่าสี  $3.31 \pm 0.00$  ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์สไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และพีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 แต่ไม่ทำการปั่นกววน พบว่ามีค่าสีอยู่  $7.61 \pm 0.01$  ADMI ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก

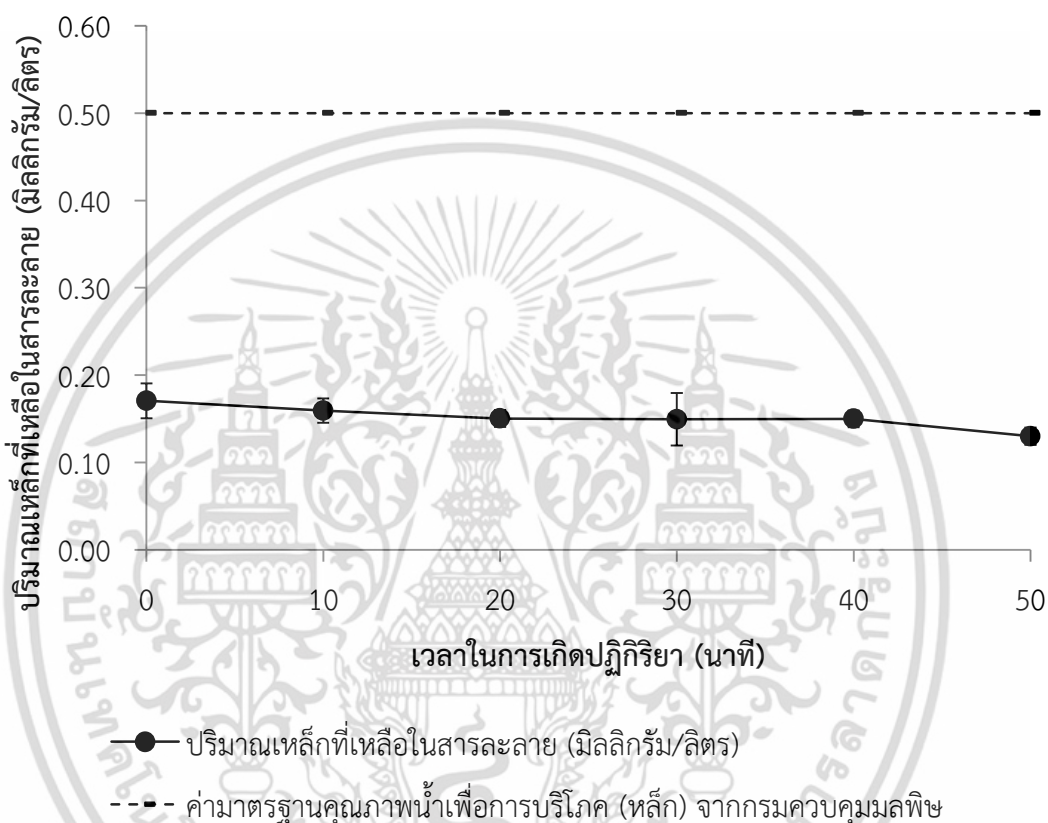


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นในหน่วย ADMI

และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์กลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $0.17 \pm 0.02$ ,  $0.16 \pm 0.01$ ,  $0.15 \pm 0.01$ ,  $0.15 \pm 0.03$ ,  $0.15 \pm 0.01$  และ  $0.13 \pm 0.01$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.12 จากปริมาณที่มีเหล็กตกค้างทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีค่าไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด

ดังนั้น เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี และค่ากำจัดกากตะกอน จึงควรเลือกเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 40 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณซีโอดีลงเหลือ  $118.68 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $94.50 \pm 0.00$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $67.97 \pm 1.27$  ADMI หรือ  $98.35 \pm 0.01$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ มณฑา (2550) ที่ทำการลดค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยโคแอกกูเลชันมาก่อนแล้วจากโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์ ด้วยวิธีเฟนตันออกซิเดชัน โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ซึ่งเป็นปริมาณใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ที่เลือกใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

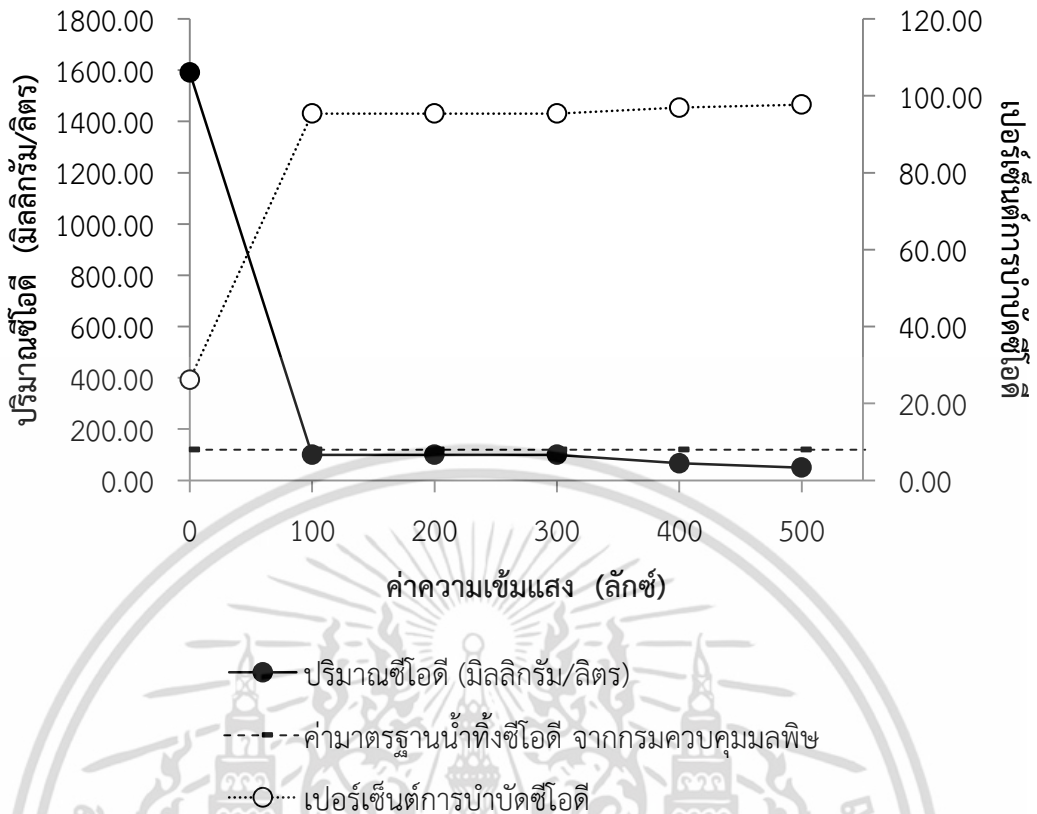
เป็นเวลา 40 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.1.2 กระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton)

### 4.1.2.1 การศึกษาหาค่าความเข้มแสงที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของค่าความเข้มแสงที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนิน ได้ทำการทดลองแปรผันค่าความเข้มแสง ดังนี้ คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ลักซ์ ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที พบว่า สามารถบำบัดซีไอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $2,153.43 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $1,590.23 \pm 0.00$ ,  $99.39 \pm 0.00$ ,  $99.39 \pm 0.00$ ,  $99.39 \pm 0.00$ ,  $66.26 \pm 0.00$  และ  $49.69 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $26.15 \pm 0.00$ ,  $95.38 \pm 0.00$ ,  $95.38 \pm 0.00$ ,  $95.38 \pm 0.00$ ,  $96.92 \pm 0.00$  และ  $97.69 \pm 0.00$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการทำปฏิกิริยาโดยการฉายแสงยูวี (0 ลักซ์) โดยการนำสารไปทำปฏิกิริยาภายในตู้ที่ปิดมิดชิดจนมืดสนิท พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้น้อย เนื่องจากใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาไม่เพียงพอ อีกทั้งยังไม่มีแสงยูวีมาช่วยกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลให้มีปริมาณที่เพียงพอต่อการบำบัดสารอินทรีย์ เมื่อเพิ่มความเข้มแสงเป็น 100 ลักซ์ จากนั้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มแสงตั้งแต่ 100-300 ลักซ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับการไม่ฉายแสงยูวี ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อฉายแสง 100-300 ลักซ์ ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงมากขึ้นไปอีกเป็น 400 และ 500 ลักซ์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นอีก เนื่องจากแสงยูวีที่เข้าร่วมเข้าไปด้วยกับปฏิกิริยาเฟนตัน มีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกซิเดชันสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของการออกซิเดชันนี้เป็นการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\cdot$ ) ที่ได้มาจากแสงยูวีเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ดังสมการที่ (2.32) และเหล็กก็เข้าไปเร่งการแตกตัวของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) ดังสมการที่ (2.33) (Haithem, 2014) อีกทั้งการที่ฉายแสงยูวีเข้ามาร่วมกับปฏิกิริยาเฟนตัน (Photo-Fenton Reaction) ยังแสดงให้เห็นถึง photo-decarboxylation ของเฟอร์ริกคาร์บอกซิเลต (Ferric Carboxylates) และการรีดิวส์จาก เฟอร์ริก ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ไปเป็นเฟอร์รัส ( $\text{Fe}^{2+}$ ) โดยกระบวนการโฟโตไลซิส (Photolysis) ทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ (2.34)-(2.36) (Lisete, 2014) ส่วนการใช้ น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที แต่ไม่ฉายแสงยูวีลงไปในการทำปฏิกิริยา พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีไอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีไอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้ ซึ่งถือได้ว่าไม่มีผลกับปริมาณของซีไอดีที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

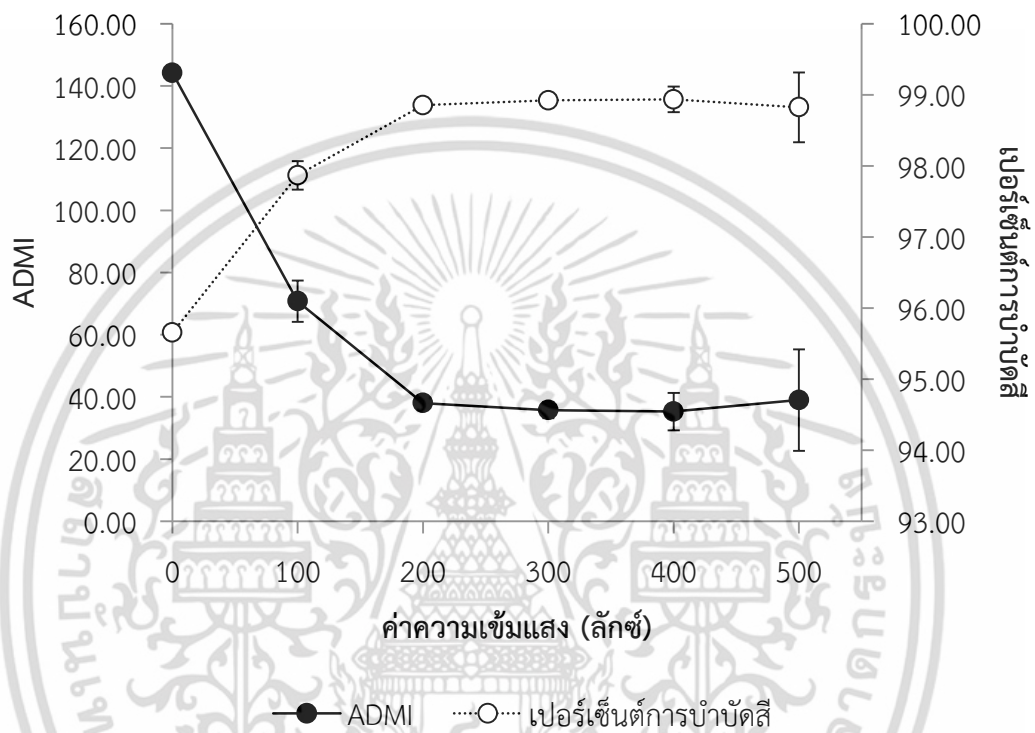


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้น ปริมาณซีโอติ และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอติ ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันค่าความเข้มข้นดังนี้ คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 กรัม/ลิตร ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,318.23 \pm 1.57$  ADMI เหลือ  $144.20 \pm 1.67$ ,  $70.77 \pm 6.64$ ,  $38.02 \pm 1.08$ ,  $35.75 \pm 2.65$ ,  $35.28 \pm 6.01$  และ  $39.00 \pm 16.33$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $95.65 \pm 0.05$ ,  $97.87 \pm 0.20$ ,  $98.85 \pm 0.03$ ,  $98.92 \pm 0.08$ ,  $98.94 \pm 0.18$  และ  $98.82 \pm 0.49$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการทำปฏิกิริยาโดยการไม่ใช้แสง (0 กรัม/ลิตร) โดยการนำสารไปทำปฏิกิริยาภายในตู้ที่ปิดมิดชิดจนมีดสนิทพบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องมาจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่เกิดขึ้นมีค่อนข้างมาก ทำให้สามารถบำบัดสีได้ดีพอสมควร จากนั้นเมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 100-200 กรัม/ลิตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพการบำบัดเมื่อใช้ค่าความเข้มข้น 200-500 กรัม/ลิตร ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ทั้งนี้เป็นไปตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น คือ แสงยูวีไปกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ (2.32)-(2.33) (Haithem, 2014) และการรีดิวส์เฟอร์ริก ( $Fe^{3+}$ ) ไปเป็นเฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มมากขึ้น ดังสมการที่ (2.34)-(2.35) (Lisete, 2014)

ส่วนการใช้กากถั่วเหลืองแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลงค์ ที่มีค่าสี  $3.31 \pm 0.00$  ADMI โดยใช้ปริมาณไม่ต่ำกว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

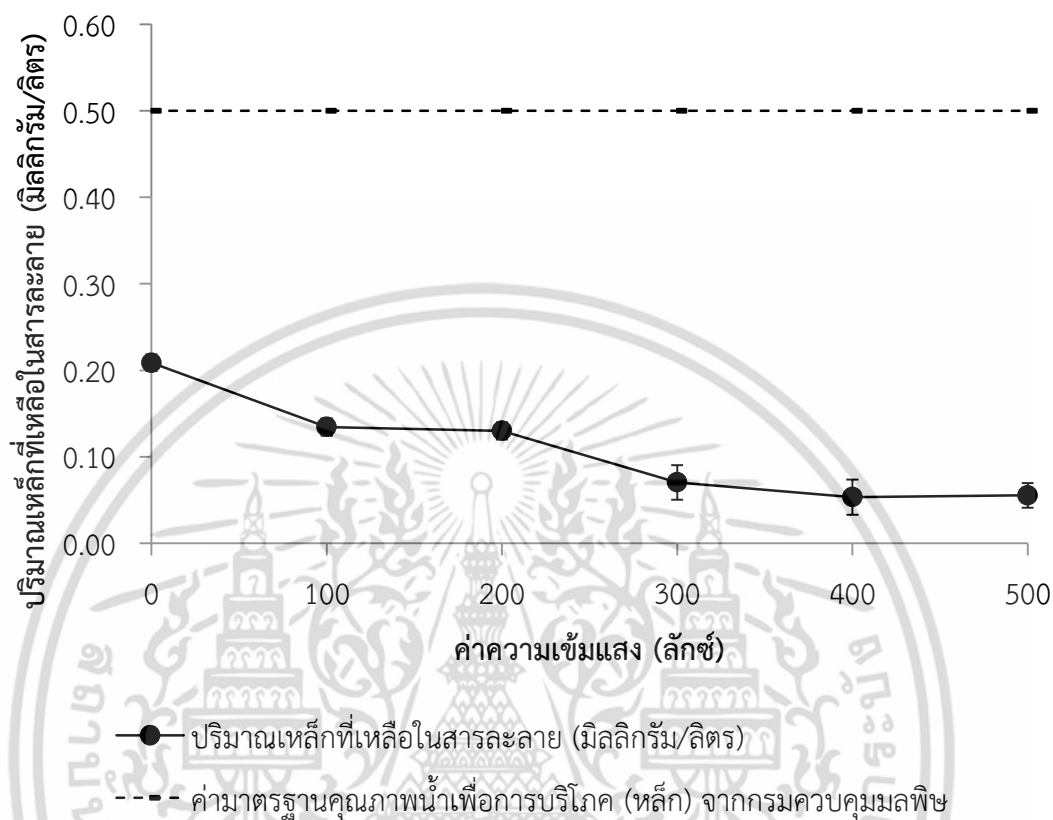
ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที แต่ไม่ให้แสงสว่างลงไปในการทำปฏิกิริยา พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีค่าสีอยู่  $6.63 \pm 0.03$  ADMI ลิตร ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง ความเข้มสีในหน่วย ADMU และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ลิกนิน

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันค่าความเข้มแสง คือ 0, 100, 200, 300, 400 และ 500 ลักซ์ ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $0.21 \pm 0.01$ ,  $0.13 \pm 0.01$ ,  $0.13 \pm 0.01$ ,  $0.07 \pm 0.02$ ,  $0.05 \pm 0.02$  และ  $0.06 \pm 0.01$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณค่าความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นตั้งแต่ 100-500 ลักซ์ จะพบปริมาณของเหล็กไอออนหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วลดน้อยลงเรื่อยๆ และเมื่อยิ่งค่าความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นก็จะยิ่งทำให้เหลือปริมาณเหล็กในสารละลายในปริมาณที่น้อยมาก เนื่องมาจากการที่มีแสงยูวีที่เข้าไปกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาทำให้กระบวนการเพนต์ทำปฏิกิริยากันได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาและทำการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จึงมีผลทำให้ตะกอนเหล็กเกิดการรวมตัวกันได้ดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงตกตะกอนกันได้ปริมาณที่มาก ทำให้ปริมาณของเหล็กไอออนที่ยังตกตะกอนไม่หมดอยู่ในน้ำเสีย ที่ได้รับการบำบัดแล้วเหลืออยู่ในสารละลายน้อยมาก

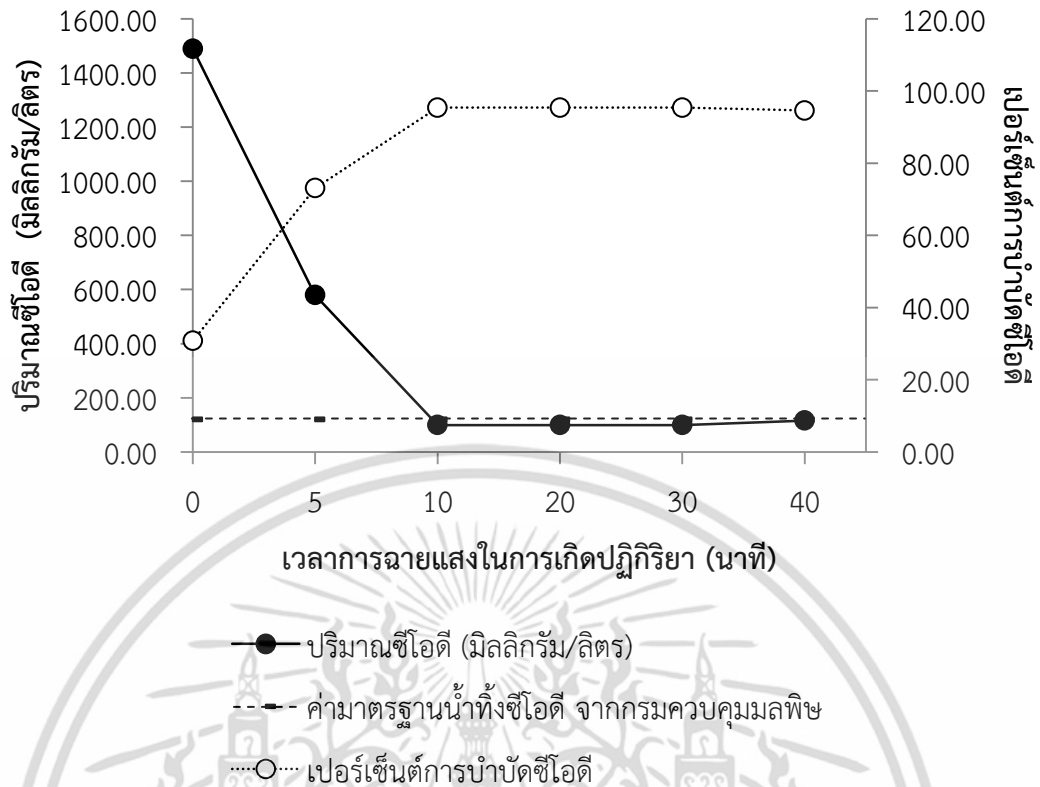


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสง และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสีย ส่งเคราะห์ลิกนินหลังจากรับบำบัด

ดังนั้น ค่าความเข้มแสงที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี ที และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี จึงควรเลือกค่าความเข้มแสง คือ 200 ลักซ์ ซึ่งสามารถลดปริมาณซีไอดีลงเหลือ  $99.39 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $95.38 \pm 0.00$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $38.02 \pm 1.08$  ADMI หรือ  $98.85 \pm 0.03$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ สายฝน (2557) ที่ทำการศึกษาการฟอกสีน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าในจังหวัดลำพูนโดยกระบวนการเฟนตัน และโฟโต-เฟนตัน (ยูวี และแสงอาทิตย์) โดยใช้หลอดยูวีขนาด 20 วัตต์ จำนวน 5 หลอด ซึ่งมีค่าความเข้มแสงเท่ากับ 205 ลักซ์ ซึ่งเป็นความเข้มแสงที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ที่เลือกใช้ค่าความเข้มแสง 200 ลักซ์

#### 4.1.2.2 การศึกษาหาเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ได้ทำการทดลองแปรผันเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และค่าความเข้มแสงที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2.1 พบว่า สามารถบำบัดซีไอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $2,151.72 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $1,489.66 \pm 0.00$ ,  $579.31 \pm 0.00$ ,  $99.39 \pm 0.00$ ,  $99.31 \pm 0.00$ ,  $99.31 \pm 0.00$  และ  $115.86 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $30.77 \pm 0.00$ ,  $73.08 \pm 0.00$ ,  $95.38 \pm 0.00$ ,  $95.38 \pm 0.00$ ,  $95.38 \pm 0.00$  และ  $94.62 \pm 0.00$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0-10 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากว่ามีเวลาที่อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลจับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น (วีระนุช, 2553) และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 10-30 นาที ก็จะสามารถบำบัดได้เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลง (มณฑา, 2550) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และหลังจากที่ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นกว่า 30 นาที ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์จะลดลงเล็กน้อยอาจเนื่องจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในสารละลายหลงเหลืออยู่น้อยมากจนทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลง ส่วนการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และค่าความเข้มแสงที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2.1 แต่ไม่ทำการปั่นกววน พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีไอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีไอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้ ซึ่งถือได้ว่าไม่มีผลกับปริมาณของซีไอดีที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

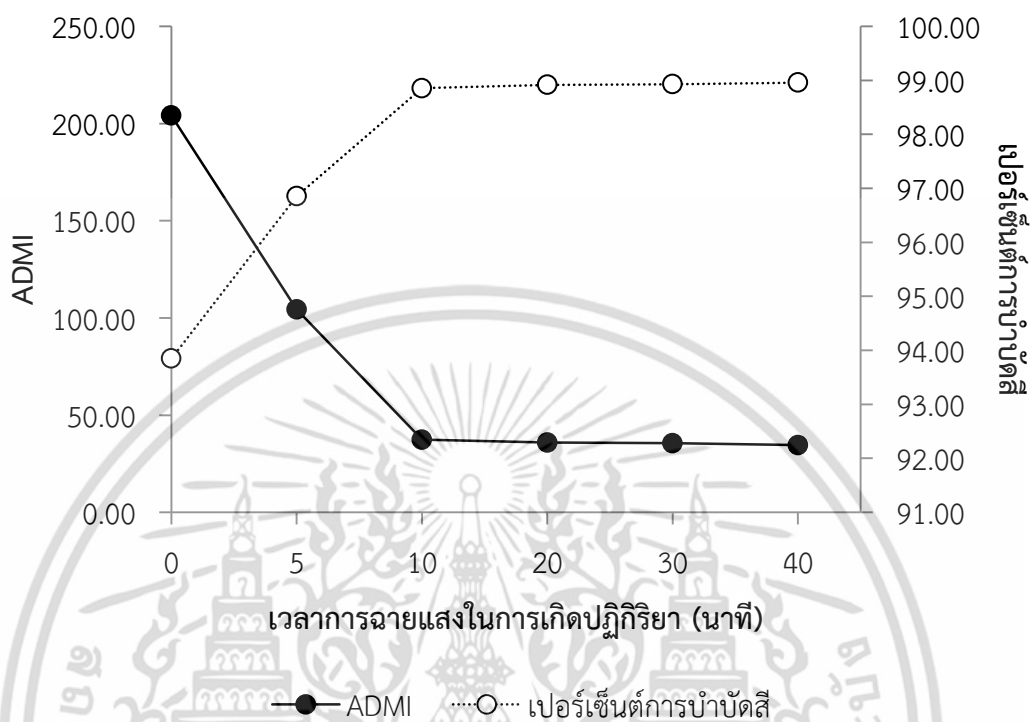


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณซีไอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลักษณะ

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,318.23 \pm 1.57$  ADMI เหลือ  $204.12 \pm 2.56$ ,  $104.42 \pm 0.08$ ,  $37.35 \pm 0.52$ ,  $35.92 \pm 1.13$ ,  $35.55 \pm 0.85$  และ  $34.59 \pm 2.11$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $93.85 \pm 0.08$ ,  $96.85 \pm 0.00$ ,  $98.85 \pm 0.03$ ,  $98.92 \pm 0.03$ ,  $98.93 \pm 0.03$  และ  $98.96 \pm 0.06$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.17 จากรูปพบว่าเมื่อมีการให้แสงยูวีเป็นตัวช่วยในการเกิดปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว โดยที่ไม่ทำการปั่นกววนสารเพิ่มในการเกิดปฏิกิริยา ทั้งเฟอร์สไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ก็ยังสามารถในเกิดปฏิกิริยาได้เช่นกันทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดีพอสมควร และเมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจาก 0-10 นาที ก็จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นมาอยู่ในช่วง 10-40 นาที ก็จะสามารถบำบัดสีได้เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (มณฑา, 2550) และให้ประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ส่วนการใช้กากถั่วแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลงค์ ที่มีค่าสี  $3.31 \pm 0.00$  ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์สไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และค่าความเข้มแสงที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2.1 แต่ไม่ทำการปั่นกววน พบว่า

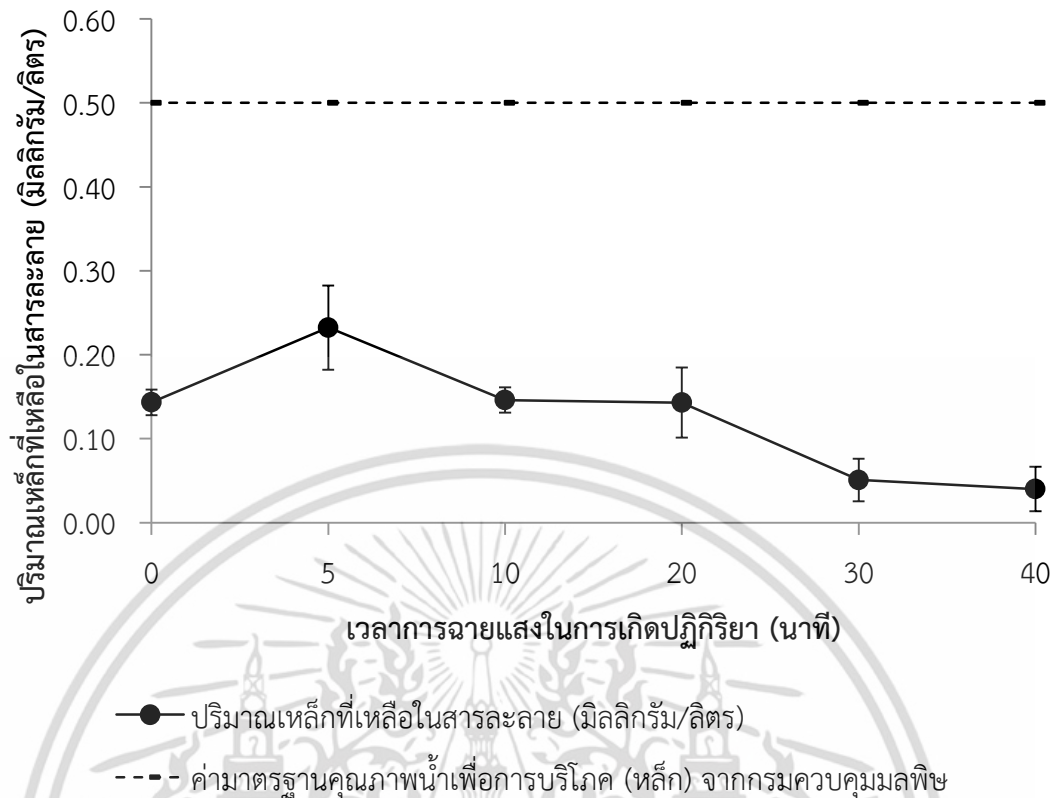
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน โดยผู้เขียนขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา ไม่สามารถนำเนื้อหาไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาต ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีค่าสื่ออยู่  $10.42 \pm 4.83$  ADMI ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มสีในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $0.14 \pm 0.02$ ,  $0.23 \pm 0.05$ ,  $0.15 \pm 0.02$ ,  $0.14 \pm 0.04$ ,  $0.05 \pm 0.03$  และ  $0.04 \pm 0.03$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้นานขึ้นปริมาณเหล็กไอออนที่ยังหลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วก็จะยิ่งน้อยลง เนื่องจากจากการที่มีแสงยูวีที่เข้าไปกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาทำให้กระบวนการเพนตันทำปฏิกิริยากันได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาและทำการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จึงทำให้ตะกอนเหล็กเกิดการรวมตัวกันได้ดี จึงตกตะกอนกันได้ปริมาณที่มาก ทำให้ปริมาณของเหล็กไอออนที่ยังตกตะกอนไม่หมดอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วเหลืออยู่ในสารละลายน้อยมาก



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด

ดังนั้น เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี จึงควรเลือกเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา คือ 10 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณซีโอดีลงเหลือ  $99.39 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $95.38 \pm 0.00$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $38.02 \pm 0.52$  ADMI หรือ  $98.85 \pm 0.03$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ จันทิมา และคณะ (2552) ที่ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษ ด้วยกระบวนการเฟนตัน และโฟโต-เฟนตัน พบว่าการบำบัดน้ำทิ้งด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและสีได้ดีกว่าปฏิกิริยาเฟนตัน โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 10-15 นาที ซึ่งใกล้เคียงกับของงานวิจัยนี้คือ ใช้เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที

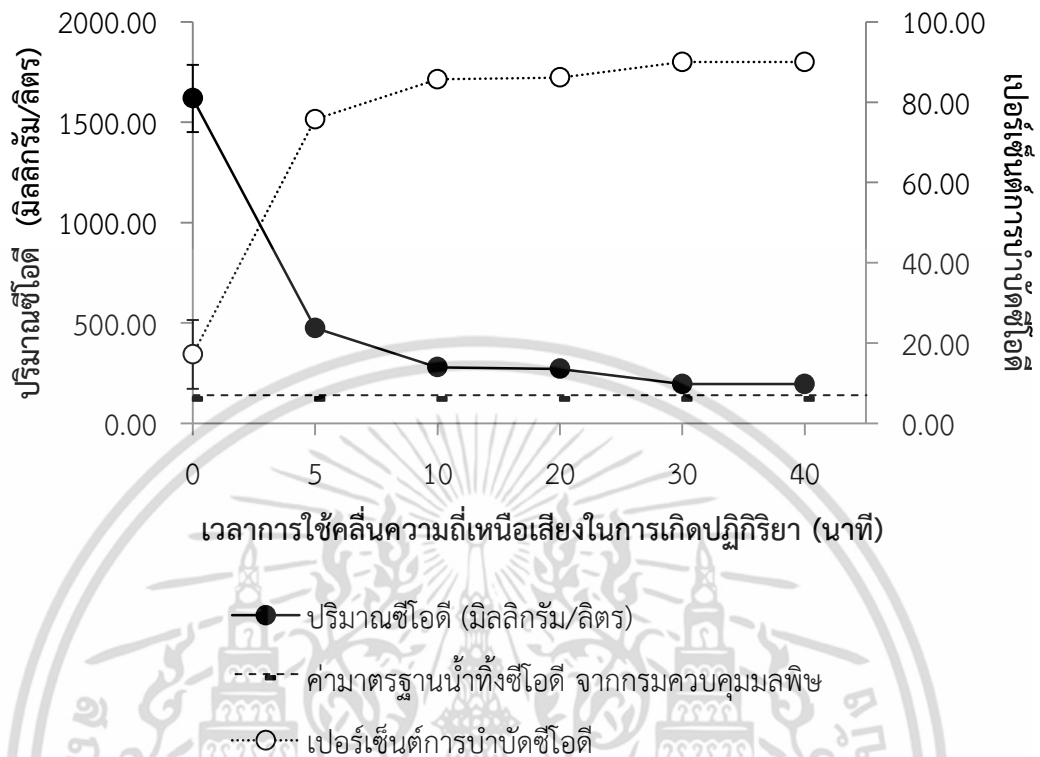
### 4.1.3 กระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton)

#### 4.1.3.1 การศึกษาหาเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ได้ทำการทดลองแปรผันเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และพีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $1,954.02 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $1,619.05 \pm 0.00$ ,  $474.55 \pm 0.00$ ,  $279.15 \pm 0.00$ ,  $279.15 \pm 16.75$ ,  $195.40 \pm 0.00$  และ  $195.40 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $17.14 \pm 8.57$ ,  $75.71 \pm 0.00$ ,  $85.71 \pm 0.00$ ,  $85.71 \pm 0.86$ ,  $90.00 \pm 0.00$  และ  $90.00 \pm 0.00$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 0-10 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากคลื่นความถี่เหนือเสียงที่นำมาใช้ร่วมกันกับกระบวนการเฟนตันนั้นสามารถเร่งการแตกตัวของน้ำและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\bullet$ ) ได้มากขึ้น ตามสมการที่ (2.37) และ (2.42) (Emine, 2014) ทำให้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่มีมากขึ้นนั้นสามารถเข้าไปกำจัดสารอินทรีย์ได้จำนวนที่มากขึ้นและรวดเร็วขึ้น อีกทั้งเฟอร์ริกไอออน ( $\text{Fe}^{3+}$ ) ยังสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ( $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$ ) และ ( $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ ) ตามสมการที่ (2.43) และ (2.45) จากนั้นคลื่นความถี่เหนือเสียงก็จะเข้าไปทำการสลายสารประกอบเชิงซ้อน ( $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$ ) และ ( $\text{Fe}(\text{OOH})^{2+}$ ) ให้ได้เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) กลับมาใช้ในปฏิกิริยาอีกครั้ง ตามสมการที่ (4.24) และ (4.26) (Ivana, 2012) และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจาก 10-30 นาที ก็จะสามารถบำบัดสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยจนไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่เวลา 40 นาที แต่จากกราฟจะเห็นได้ว่ากระบวนการโซโน-เฟนตัน ไม่สามารถบำบัดซีโอดีให้ลดต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง 120 มิลลิกรัม/ลิตร อาจเนื่องจากเมื่อมีการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงทำให้น้ำมีอุณหภูมิขึ้น จึงมีผลทำให้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการสลายตัวกลายเป็นน้ำและออกซิเจน (ชนกฤต, 2552) แต่กระบวนการโซโน-เฟนตันยังสามารถนำมาใช้ในการบำบัดได้เนื่องจากค่ามาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษหรือกระดาษ สามารถอนุโลมระบายน้ำทิ้งที่มีค่าซีโอดีไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/ลิตร (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) ส่วนการใช้กากแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และพีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 แต่ไม่ใช้คลื่นความถี่เหนือเสียง พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาน้ำกลั่นมีปริมาณ ซีโอดีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจวัดได้ และหลังจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วปริมาณของซีโอดีก็ยังมีน้อยมากจนไม่สามารถตรวจสอบพบได้ ซึ่งถือได้ว่าไม่มีผลกับปริมาณของซีโอดีที่ได้จากการทำปฏิกิริยา

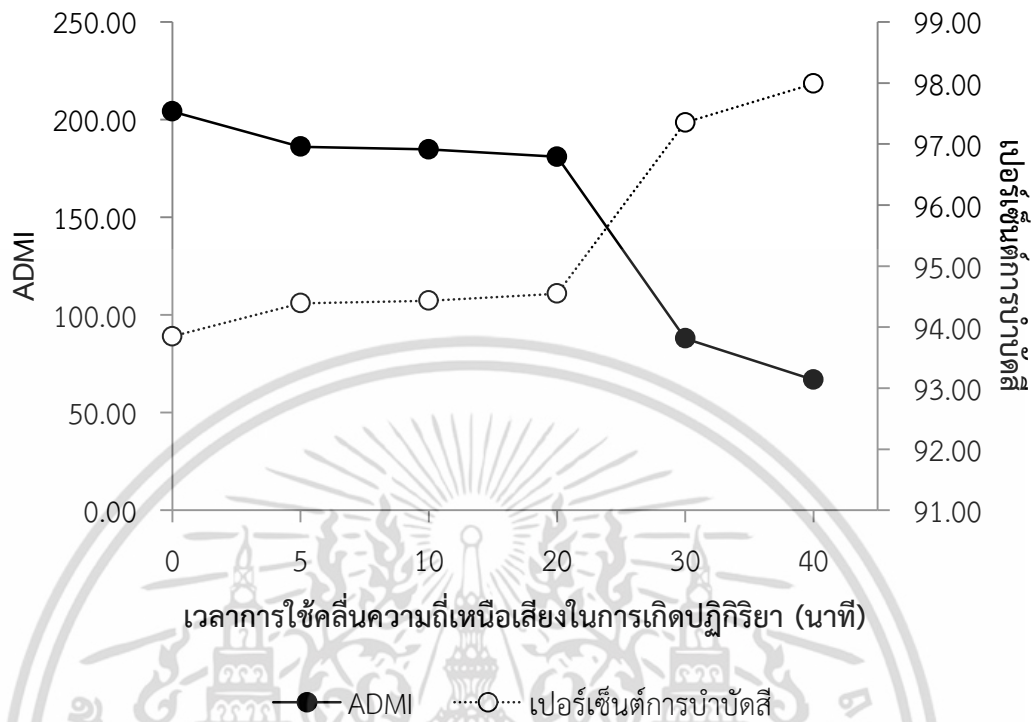


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา ปริมาณซีโอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,318.23 \pm 1.57$  ในหน่วย ADMI เหลือ  $204.53 \pm 1.56$ ,  $186.15 \pm 0.28$ ,  $184.75 \pm 1.21$ ,  $180.94 \pm 0.23$ ,  $87.92 \pm 3.48$  และ  $66.77 \pm 1.04$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $93.80 \pm 0.05$ ,  $94.39 \pm 0.01$ ,  $94.43 \pm 0.04$ ,  $94.55 \pm 0.01$ ,  $97.35 \pm 0.10$  และ  $97.99 \pm 0.03$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาตั้งแต่ 0-20 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดสีที่มีประสิทธิภาพการบำบัดที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และเมื่อเพิ่มเวลาในการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นมาอยู่ในช่วง 20-40 นาที ประสิทธิภาพในการบำบัดสีจะเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีเวลาที่อนุภาคอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลจับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียนานขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มมากขึ้น ส่วนการใช้กากล้นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ ที่มีค่าสี  $3.31 \pm 0.00$  ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 และพีเอชที่ได้

จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 แต่ไม่ให้เกิดคลื่นความถี่เหนือเสียง พบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ข้อมูลใดๆ ไม่ควรละเมิดลิขสิทธิ์ หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ โทร. 0-2524-6000 หรือ e-mail: info@scs.ac.th

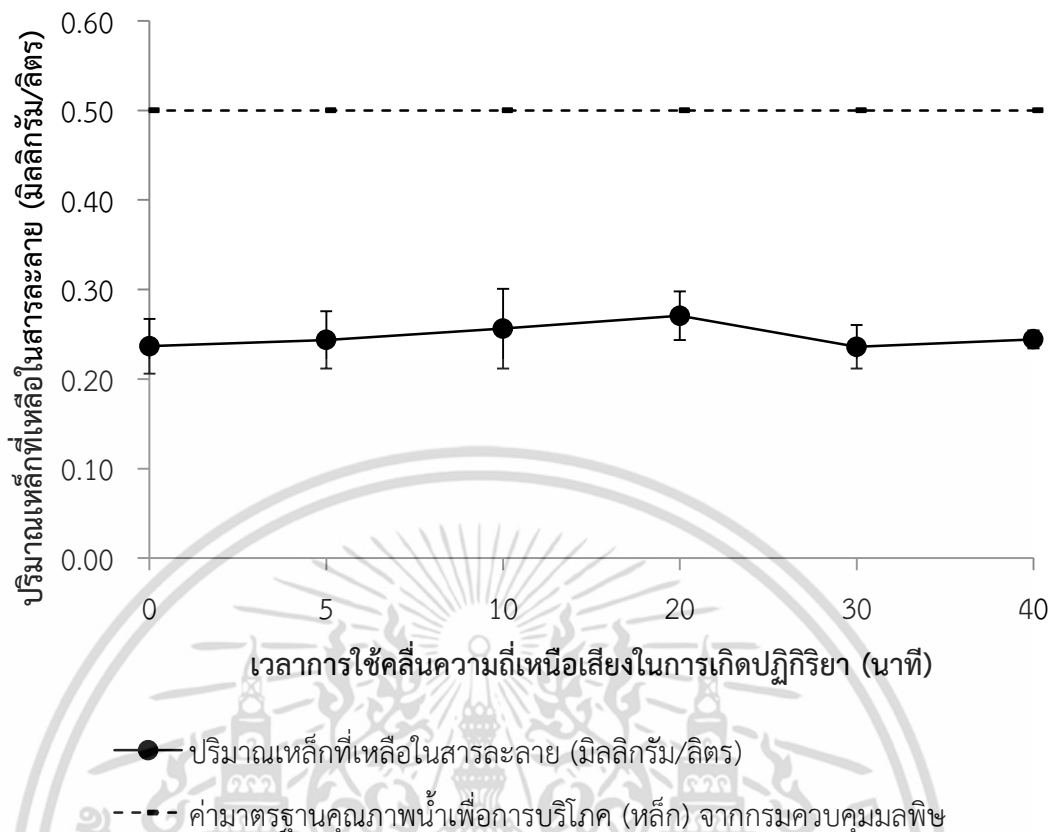
เรียบร้อยแล้วมีค่าเฉลี่ย  $7.70 \pm 1.07$  ADMI ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



**รูปที่ 4.20** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มสีในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสีย สังกะหรณ์ลิกนิน

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 0, 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $0.24 \pm 0.03$ ,  $0.24 \pm 0.03$ ,  $0.26 \pm 0.04$ ,  $0.27 \pm 0.03$ ,  $0.24 \pm 0.02$  และ  $0.24 \pm 0.01$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.21 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้เวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ความสามารถในการทำให้เหล็กไอออนตกตะกอนออกมาจากน้ำเสียที่บำบัดเรียบร้อยแล้วได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% อาจเนื่องมาจากคลื่นความถี่เหนือเสียงที่เข้าไปช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการเพนตันให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นนั้น ให้ประสิทธิภาพในการบำบัดที่แตกต่างกันไม่มาก อีกทั้งในกระบวนการยังใช้ปริมาณของเฟอร์รัสไอออนที่เท่ากัน เมื่อสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยาตะกอนเหล็กที่ตกตะกอนจึงตกตะกอนได้ปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ปริมาณของเหล็กไอออนที่ยังตกตะกอนไม่หมดอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วจึงเหลืออยู่ในสารละลายในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



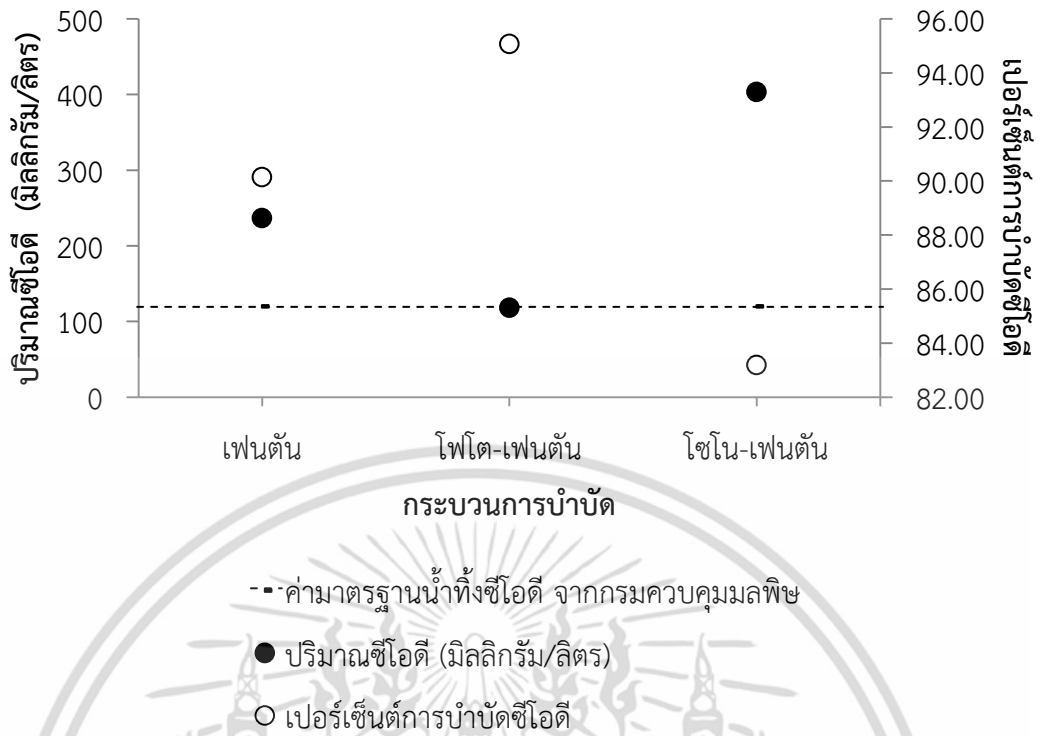
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการใช้คลอรีนความถี่เพื่อเสี่ยงในการเกิดปฏิกิริยา และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินหลังจากการบำบัด

ดังนั้น เวลาการใช้คลอรีนความถี่เพื่อเสี่ยงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี จึงควรเลือกเวลาการใช้คลอรีนความถี่เพื่อเสี่ยงในการเกิดปฏิกิริยา คือ 30 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณซีโอดีลงเหลือ  $195.40 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $90.00 \pm 0.00$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $89.92 \pm 3.48$  ADMI หรือ  $97.29 \pm 0.10$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ Emine (2014) ที่ทำการศึกษการออกซิเดชันขั้นสูงของสีรีแอกทีฟ Blue 181 โดยใช้กระบวนการโซโน-เพนตัน พบว่าใช้เวลาการให้คลอรีนความถี่เพื่อเสี่ยงในการเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่ใช้เวลาการให้คลอรีนความถี่เพื่อเสี่ยงในการเกิดปฏิกิริยาเป็นเวลา 30 นาที เช่นเดียวกัน

## 4.2 การบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน

จากการศึกษาผลของกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตันที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์ซอไดออกไซด์ที่ทำได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ทำได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่ทำได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ทำได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.4 ในกระบวนการเฟนตัน ส่วนกระบวนการโฟโต-เฟนตัน ก็ใช้ปริมาณสารเช่นเดียวกับกระบวนการเฟนตัน โดยมีการใช้แสงยูวีเข้ามาช่วยร่วมด้วยในกระบวนการ ใช้ค่าความเข้มของแสงยูวีที่ทำได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2.2 และระยะเวลาการฉายแสงยูวีในการทำปฏิกิริยาที่ทำได้จากการทดลองในข้อ 4.1.2.3 ส่วนกระบวนการโซโน-เฟนตัน ก็ใช้ปริมาณสารเช่นเดียวกับกระบวนการเฟนตัน โดยมีการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงเข้ามาช่วยร่วมด้วยในกระบวนการ และระยะเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการทำปฏิกิริยาที่ทำได้จากการทดลองในข้อ 4.1.3.1 พบว่า สามารถบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่มีค่าซีไอดีประมาณ  $2,400.00 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ลดลงเหลือ  $236.52 \pm 0.00$ ,  $118.26 \pm 0.00$  และ  $403.48 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $90.14 \pm 0.00$ ,  $95.07 \pm 0.00$  และ  $83.19 \pm 0.00$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจะเห็นได้ว่า กระบวนการโฟโต-เฟนตัน มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ได้มากที่สุดและสามารถปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้ เพราะเมื่อบำบัดแล้วมีค่าซีไอดีไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งตรงตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมอุตสาหกรรมที่ได้กำหนดไว้ เนื่องมาจากกระบวนการโฟโต-เฟนตัน มีแสงยูวีเข้ามาใช้ในการทำปฏิกิริยาทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มมากขึ้น รองลงมาคือกระบวนการเฟนตัน ที่มีเพียงแค่ว่าปริมาณสารเคมีทำปฏิกิริยากันเองเท่านั้น ไม่มีแสงยูวีเข้ามาช่วยกระตุ้นให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัล ( $\text{OH}^\circ$ ) เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สามารถบำบัดสารอินทรีย์ได้น้อยกว่ากระบวนการโฟโต-เฟนตัน และสุดท้ายคือ กระบวนการโซโน-เฟนตัน ที่มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ได้น้อยที่สุด

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยใช้กระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $2,441.83 \pm 22.42$  ADMI เหลือ  $471.37 \pm 7.35$ ,  $201.01 \pm 46.04$  และ  $878.77 \pm 4.68$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $80.70 \pm 0.30$ ,  $91.77 \pm 1.89$  และ  $64.01 \pm 0.19$  ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.23 พบว่า เป็นไปตามที่กล่าวไว้ข้างต้น คือ กระบวนการโฟโต-เฟนตัน มีความสามารถในการกำจัดได้มากที่สุด เนื่องจากมีแสงยูวีเข้าไปช่วยในการทำปฏิกิริยา ทำให้มีอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลเพิ่มมากขึ้น รองลงมาคือกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการโซโน-เฟนตัน ที่มีความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ได้น้อยที่สุด



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการบำบัด ปริมาณซีโอติ และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอติ ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการบำบัด ความเข้มข้นในหน่วย ADMI

และเปอร์เซ็นต์การบำบัดที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้โดยไม่ชำระค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยใช้กระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน พบว่า มีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $1.41 \pm 0.47$ ,  $0.49 \pm 0.35$  และ  $2.11 \pm 0.05$  มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่า กระบวนการโฟโต-เฟนตัน จะมีปริมาณเหล็กที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วน้อยที่สุด เนื่องมาจากกระบวนการเฟนตันมีแสงยูวีที่เข้าไปกระตุ้นในการเกิดปฏิกิริยาทำให้กระบวนการเฟนตันทำปฏิกิริยากันได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้น เมื่อสิ้นสุดการทำปฏิกิริยาและทำการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จึงทำให้ตะกอนเหล็กเกิดการรวมตัวกันได้ดี จึงตกตะกอนกันได้ปริมาณที่มาก ทำให้ปริมาณของเหล็กไอออนที่ยังตกตะกอนไม่หมดอยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วเหลืออยู่ในสารละลายน้อยที่สุด รองลงมาคือกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการโซโน-เฟนตัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการบำบัด และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษหลังจากการบำบัด

ดังนั้น กระบวนการบำบัดที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี และสี จึงควรเลือกใช้กระบวนการโฟโต-เฟนตัน ซึ่งสามารถลดปริมาณซีไอดีลงเหลือ  $118.26 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร หรือ  $95.07 \pm 0.00$  เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงเหลือ  $201.01 \pm 46.04$  ADMI หรือ  $91.77 \pm 1.89$  เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับ จันทิมา และคณะ (2552) ที่ทำการศึกษการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษ พบว่าการบำบัดน้ำทิ้งด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน

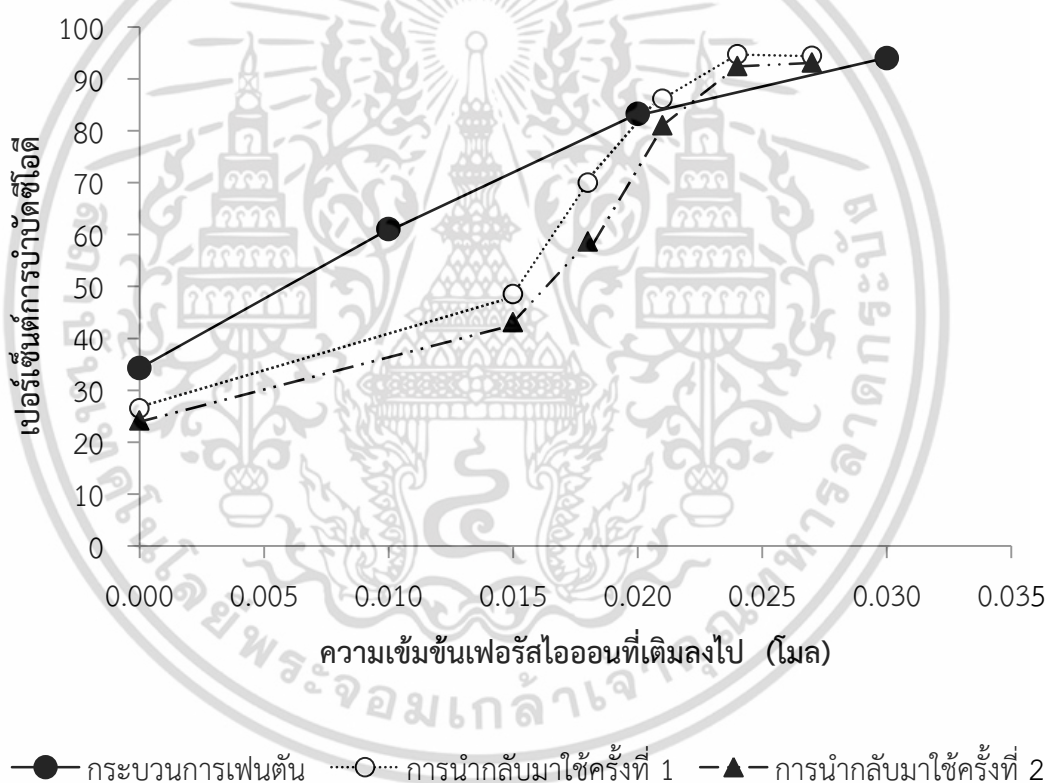
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและสีได้ดีกว่าปฏิกิริยาเฟนตัน ซึ่งจากงานวิจัยนี้ กระบวนการโฟโต-เฟนตัน ก็มีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุด

### 4.3 การนำตะกอนเหล็กที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ในกระบวนการเฟนตันกลับมาใช้ใหม่

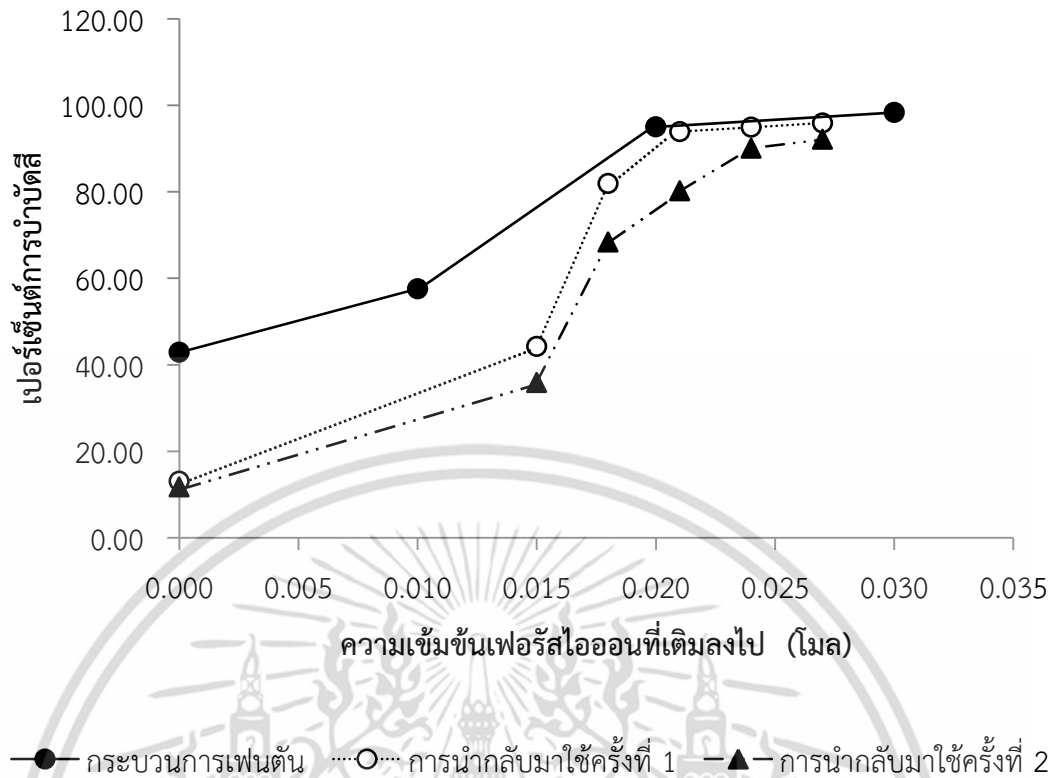
จากการศึกษาผลของการนำกลับมาใช้ใหม่ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ได้ทำการทดลองแปรผันลดค่าปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่จะเติมลงไป ดังนี้ คือ เติมลงไป 0.027, 0.024, 0.021, 0.018, 0.015 และ 0.000 โมล นั่นคือลดการเติมเฟอร์รัสไอออนลงไป 10%, 20%, 30%, 40%, 50% และ 100% ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.4 พบว่า สามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ ลดลงจาก  $1,942.86 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $108.57 \pm 0.00$ ,  $102.86 \pm 26.19$ ,  $251.43 \pm 34.29$ ,  $582.86 \pm 0.00$ ,  $1,000.00 \pm 0.00$  และ  $1,428.57 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $94.41 \pm 0.00$ ,  $94.71 \pm 1.35$ ,  $87.06 \pm 1.76$ ,  $70.00 \pm 0.00$ ,  $48.53 \pm 0.00$  และ  $26.47 \pm 0.00$  ตามลำดับ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 และสามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลงจาก  $1,933.33 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร เหลือ  $133.33 \pm 0.00$ ,  $146.67 \pm 0.00$ ,  $366.67 \pm 0.00$ ,  $800.00 \pm 0.00$ ,  $1,100.00 \pm 0.00$  และ  $1,466.67 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $93.10 \pm 0.00$ ,  $92.41 \pm 0.00$ ,  $81.03 \pm 0.00$ ,  $58.62 \pm 0.00$ ,  $43.10 \pm 0.00$  และ  $24.14 \pm 0.00$  ตามลำดับ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ดังรูปที่ 4.25 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อลดปริมาณการเติมเฟอร์รัสไอออนเข้าไปในการเกิดปฏิกิริยาจากเดิม 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ลดลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ในการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 เนื่องจากยังมีเฟอร์รัสไอออนที่เติมลงไปใหม่ที่เพียงพอต่อการเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อให้ได้อนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลที่จะเข้าไปสลายสารอินทรีย์ อีกทั้งยังมีเหล็กไอออนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาก่อนหน้านั้นที่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระเปอร์ไฮดรอกซิล ( $\text{HO}_2^\cdot$ ) ทำให้ได้เฟอร์รัสไอออน ( $\text{Fe}^{2+}$ ) กลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการอีกครั้ง ตามสมการที่ (4.4) (ธนกฤต, 2552) แต่เมื่อลดปริมาณของเฟอร์รัสไอออนลงไปอีกในช่วง 20-100 เปอร์เซ็นต์ พบว่า มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีปริมาณของเฟอร์รัสไอออนที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีน้อยลง จึงทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลน้อยลง ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์จึงลดน้อยลง และอาจเนื่องมาจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลและอนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ออกซิลถูกยับยั้งการเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดิคัลโดยเฟอร์รัสไอออน และเฟอร์ริกไอออน ตามสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะทำให้เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกไซด์ และไฮโดรเจนไอออน ซึ่งไม่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ (ธนกฤต, 2552) เมื่อเทียบกับกระบวนการเฟนตันเดิม ส่วนการใช้กากเลนแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.4 แต่ไม่ทำการเติมเฟอร์รัสไอออนเพิ่มลงไปจากที่มีอยู่แล้วในการทำปฏิกิริยา พบว่าก่อนทำปฏิกิริยาตรวจสอบไม่พบค่าซีไอดี และหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีซีไอดีอยู่  $22.86 \pm 0.00$  มิลลิกรัม/ลิตร จะเห็นได้ว่ามีปริมาณซีไอดีเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากมีปริมาณของเฟอร์รัสไอออนในปฏิกิริยาน้อย ใช้เพียงหลักที่หลีกเลี่ยงจากการทำปฏิกิริยาก่อนหน้านั้นเท่านั้น จึงทำให้มีปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มากเกินไป ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่วนที่หลีกเลี่ยงจากการทำปฏิกิริยาจึงไปรบกวนการวิเคราะห์ค่าซีไอดี ทำให้มีค่าซีไอดีมากเกินไปจริง ซึ่งเกิดจากการรบกวน (Interference) ระหว่างโพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ตามสมการที่ (2.20)-(2.21) (ธนภุต, 2552)



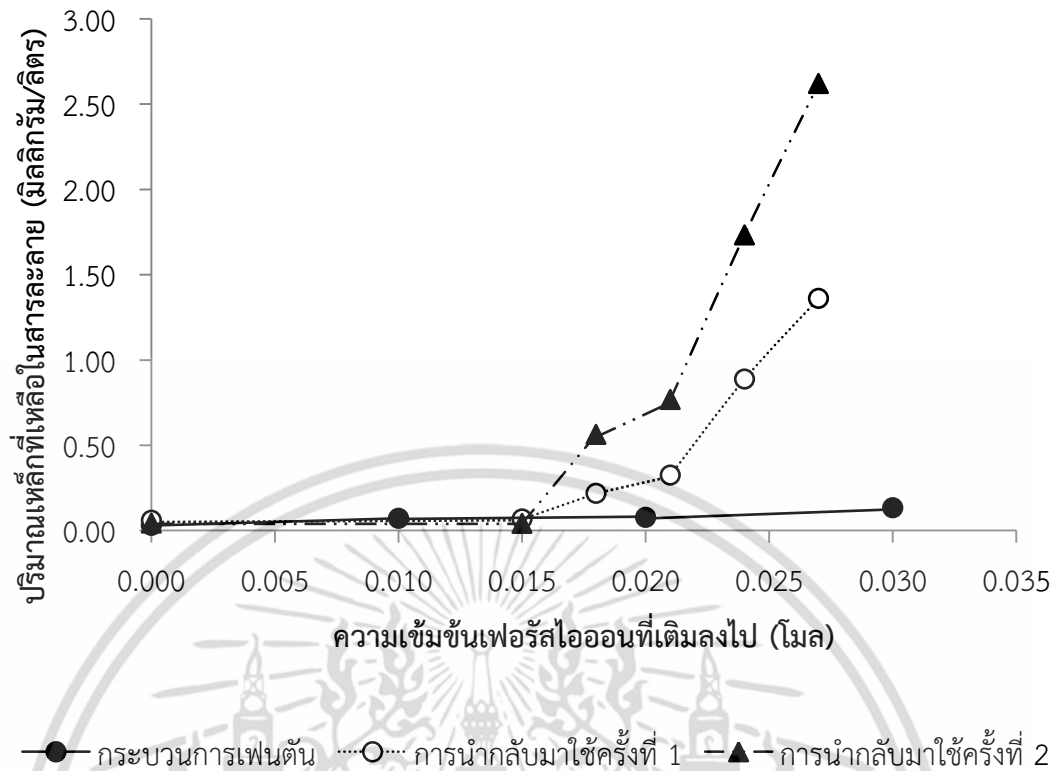
**รูปที่ 4.25** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ปริมาณซีไอดี และเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน (การนำกลับมาใช้ใหม่)

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันลดค่าปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่จะเติมลงไป ดังนี้ คือ เติมลงไป 0.027, 0.024, 0.021, 0.018, 0.015 และ 0.000 โมล นั่นคือลดการเติมเพอร์สไอออนลงไป 10%, 20%, 30%, 40%, 50% และ 100% ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ  $3,100.03 \pm 2.57$  ADMI เหลือ  $126.03 \pm 1.73$ ,  $157.33 \pm 1.76$ ,  $188.31 \pm 9.93$ ,  $560.50 \pm 1.66$ ,  $1,729.24 \pm 1.35$  และ  $2,696.17 \pm 1.51$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $95.93 \pm 0.06$ ,  $94.92 \pm 0.06$ ,  $93.93 \pm 0.32$ ,  $81.92 \pm 0.05$ ,  $44.22 \pm 0.04$  และ  $13.03 \pm 0.05$  ตามลำดับตามลำดับ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 และสามารถลดสีลงเหลือ  $244.66 \pm 1.70$ ,  $308.12 \pm 1.93$ ,  $613.61 \pm 1.70$ ,  $980.65 \pm 2.05$ ,  $1,987.61 \pm 1.59$  และ  $2,736.46 \pm 1.48$  ADMI ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้  $92.11 \pm 0.05$ ,  $90.06 \pm 0.06$ ,  $80.21 \pm 0.05$ ,  $68.37 \pm 0.07$ ,  $35.88 \pm 0.05$  และ  $11.73 \pm 0.05$  ตามลำดับ ในการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ดังรูปที่ 4.26 จากรูปพบว่า เมื่อลดปริมาณการเติมเพอร์สไอออนเข้าไปในการเกิดปฏิกิริยาจากเดิมในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีลดลงเพียงเล็กน้อย เนื่องจากยังมีการเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลที่เพียงพอต่อการกำจัดสี แต่เมื่อลดปริมาณของเพอร์สไอออนลงไปอีกในช่วง 30-100 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลในปริมาณที่น้อยไม่เพียงพอต่อการกำจัดสี และอาจเนื่องมาจากอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลและอนุมูลอิสระไฮโดรเปอร์ออกซิลถูกยับยั้งการเกิดเป็นอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลเรดิคัลโดยเพอร์สไอออน และเพอริกไอออน จะทำให้เกิดเป็นอนุมูลไฮดรอกไซด์ และไฮโดรเจนไอออน ซึ่งไม่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ (ชนกฤต, 2552) เมื่อเทียบกับกระบวนการเฟนตันเดิม ส่วนการใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทำเป็นแบลนด์ ที่มีค่าสี  $3.31 \pm 0.00$  ADMI โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.2 พีเอชที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.4 แต่ไม่ทำการเติมเพอร์สไอออนเพิ่มลงไปจากที่มีอยู่แล้วในการทำปฏิกิริยาพบว่าหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จเรียบร้อยแล้วมีค่าสีอยู่  $3.85 \pm 0.19$  ADMI ในการนำกลับมาใช้ครั้งที่ 1 และ  $5.20 \pm 1.43$  ADMI ในการนำกลับมาใช้ครั้งที่ 2 ซึ่งถือได้ว่าปริมาณที่พบมีผลกับการบำบัดสีที่ได้จากการทำปฏิกิริยาน้อยมาก



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเฟอร์รัสไอออน ความเข้มข้นในหน่วย ADMI และเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน (การนำกลับมาใช้ใหม่)

จากการศึกษาหาปริมาณเหล็กที่ตกค้างอยู่ในน้ำที่ได้รับการบำบัดแล้ว โดยทำการทดลองแปรผันลดค่าปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่จะเติมลงไป ดังนี้ คือ เติมลงไป 0.027, 0.024, 0.021, 0.018, 0.015 และ 0.000 โมล นั่นคือลดการเติมเฟอร์รัสไอออนลงไป 10%, 20%, 30%, 40%, 50% และ 100% ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณเหล็กตกค้างอยู่ในปริมาณ  $1.36 \pm 0.02$ ,  $0.89 \pm 0.02$ ,  $0.32 \pm 0.01$ ,  $0.22 \pm 0.02$ ,  $0.07 \pm 0.02$  และ  $0.06 \pm 0.02$  มิลลิกรัม/ลิตร ในการนำกลับมาใช้ครั้งที่ 1 และ  $2.62 \pm 0.03$ ,  $1.73 \pm 0.02$ ,  $0.77 \pm 0.01$ ,  $0.56 \pm 0.06$ ,  $0.43 \pm 0.01$  และ  $0.04 \pm 0.01$  ในการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.27 จะเห็นได้ว่า เมื่อยังลดปริมาณการเติมเฟอร์รัสไอออนลงไปในการทำปฏิกิริยาจาก 10-50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่มีการเติมเฟอร์รัสไอออนเพิ่มเข้าไปเลย จะพบปริมาณเหล็กไอออนที่หลงเหลืออยู่ในน้ำเสียที่ได้รับการบำบัดแล้วน้อยลง



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเพอร์สไอออน และปริมาณเหล็กที่ตกค้างในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากการบำบัด (การนำกลับมาใช้ใหม่)

ดังนั้น จากการนำเหล็กกลับมาใช้ใหม่ จะเห็นได้ว่าไม่มีความเหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ได้ เนื่องจากเหล็กที่ได้จากการตกตะกอนมาแล้วนั้น เมื่อนำกลับมาเอาไปเข้าทำปฏิกิริยาอีกครั้งไม่มีส่วนช่วยในการทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น

#### 4.4 การประเมินค่าใช้จ่าย

จากการคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน ที่ปริมาตรน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร มีค่าใช้จ่าย 10,028, 15,628 และ 12,744 บาท ในราคาสารเคมี AR grade ตามลำดับ และ 421, 12,914 และ 3,137 บาท ในราคาสารเคมีเกรด Commercial ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า กระบวนการเฟนตัน มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ถูกที่สุด และใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด คือ 40 นาที แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดถือได้ว่ามีประสิทธิภาพอยู่ในขั้นที่ดี รองลงมาในช่วงของการประหยัดค่าใช้จ่าย คือ กระบวนการโซโน-เฟนตัน แต่กระบวนการโซโน-เฟนตัน ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ซึ่งไม่ใช่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่นานที่สุด แต่ก็ถือได้ว่าใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ใกล้เคียงกับกระบวนการเฟนตัน อีกทั้งกระบวนการนี้ยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่น้อยที่สุด ส่วนกระบวนการบำบัดที่แพงที่สุดคือ กระบวนการโฟโต-เฟนตัน ถึงแม้ว่าจะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยที่สุดเพียง 10 นาที แต่ถ้า

พิจารณาค่าไฟฟ้า และค่าเสื่อมราคาของหลอดยูวีแล้ว จะแพงมาก และยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดีที่สุดของกระบวนการทั้งหมด

ดังนั้น กระบวนการบำบัดที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอที สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี จึงควรเลือกใช้กระบวนการเฟนตัน เนื่องจากกระบวนการเฟนตันมีค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ถูกลงที่สุด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ถือได้ว่ามีประสิทธิภาพอยู่ในขั้นที่ดี และอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษที่กำหนดไว้ว่าอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษและกระดาษ สามารถอนุโลมระบายน้ำทิ้งที่มีค่าซีโอทีได้ไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/ลิตร อีกทั้งกระบวนการเฟนตัน ยังไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการติดตั้งหลอดไฟ และค่าไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น เหมือนกระบวนการโฟโต-เฟนตัน และกระบวนการโซโน-เฟนตัน

ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าใช้จ่ายในกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน

ค่าใช้จ่าย/ ปริมาตรน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร	กระบวนการเฟนตัน (บาท)		กระบวนการโฟโต- เฟนตัน (บาท)		กระบวนการโซโน- เฟนตัน (บาท)	
	AR grade	Commercial	AR grade	Commercial	AR grade	Commercial
1. เพอร์ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต	6,250	169	6,250	169	6,250	169
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	3,172	167	3,172	167	3,172	167
3. กรดซัลฟูริก	26	13	26	13	26	13
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์	580	72	580	72	580	72
5. การฉายแสงจากหลอดยูวี	-	-	0.5600	0.5600	-	-
6. ค่าไฟฟ้า (กิจการขนาดกลาง)	-	-	0.6893	0.6893	0.2716	0.2716
รวมทั้งสิ้น	10,028	421	15,628	12,914	12,744	3,137

หมายเหตุ 1. ค่าใช้จ่ายนี้ไม่รวม Reactor

2. ราคาไม่รวมค่ากำจัดตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินโดยทำการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน ปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พีเอช และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการเฟนตัน (Fenton) นอกจากนี้ยังศึกษาถึงค่าความเข้มแสงและระยะเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย ในกระบวนการโฟโต-เฟนตัน (Photo-Fenton) ศึกษาถึงระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสีย ในกระบวนการโซโน-เฟนตัน (Sono-Fenton) และศึกษาการนำตะกอนเหล็กที่ใช้แล้วในกระบวนการเฟนตันกลับมาใช้ใหม่ เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมจากทั้ง 3 กระบวนการ จึงนำมาใช้ในการบำบัดกับน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ซึ่งมีค่าพีเอช ประมาณ 7-8 ซีไอดีประมาณ 2,400 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสี ประมาณ 2,400-2,500 ADMI

5.1.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ด้วยกระบวนการเฟนตัน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน คือ ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2 พีเอช 3 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 40 นาที พบว่า สามารถบำบัดซีไอดีได้มากกว่า 94.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 98.00 เปอร์เซ็นต์

5.1.2 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตัน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน คือ ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2 พีเอช 3 ค่าความเข้มแสง 200 ลักซ์ และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที พบว่า สามารถบำบัดซีไอดีได้มากกว่า 95.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 98.00 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ด้วยกระบวนการโซโน-เฟนตัน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน คือ ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2 พีเอช 3 และระยะเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงเกิดในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที พบว่า สามารถบำบัดซีไอดีได้ 90.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้มากกว่า 97.00 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 การศึกษาการบำบัดน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน โดยใช้สภาวะเหมาะสมที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน พบว่า กระบวนการบำบัดที่ดีที่สุดในการบำบัดซีไอดีและสีของน้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ คือ กระบวนการโฟโต-เฟนตัน พบว่าสามารถบำบัดซีไอดีได้ 95.07 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

91.77 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ กระบวนการเฟนตัน พบว่า สามารถบำบัดซีโอดีได้ 90.14 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้ 80.70 เปอร์เซ็นต์ และสุดท้ายคือ กระบวนการโซโน-เฟนตัน พบว่า สามารถบำบัดซีโอดีได้ 83.19 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้ 64.11 เปอร์เซ็นต์

5.1.5 การศึกษาการนำตะกอนเหล็กที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิแกนด์ในกระบวนการเฟนตันกลับมาใช้ใหม่ พบว่า ไม่มีความเหมาะสมที่จะสามารถนำกลับมาใช้ได้

5.1.6 จากการประเมินค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการเฟนตัน โฟโต-เฟนตัน และโซโน-เฟนตัน พบว่า ควรเลือกใช้กระบวนการเฟนตัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 หลังการทำปฏิกิริยาเฟนตันจะเกิดตะกอนของเหล็ก ซึ่งควรมีการกำจัดที่ถูกต้อง เช่น การเติม Binding Agent ที่เหมาะสม เพื่อตรึงตะกอนเหล็กไว้ไม่ให้กระจายตัว

5.2.2 ศึกษาสารที่นำมาช่วยในการตกตะกอนที่ดีกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.2.3 นำกระบวนการเฟนตันไปประยุกต์ใช้กับอุตสาหกรรมประเภทอื่น เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เป็นต้น

5.2.4 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละกระบวนการที่ต้องการศึกษา เพราะแต่ละกระบวนการอาจมีการใช้สภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกัน

5.2.5 ในขั้นตอนการนำตะกอนเหล็กที่ได้กลับมาใช้ใหม่ควรหาเฟอร์รัสไอออนที่อาจหลงเหลืออยู่ในตะกอนก่อนนำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง

5.2.6 สารบางชนิดอาจปนเปื้อนในน้ำเสียที่ทำให้กระบวนการบำบัด จึงควรทดสอบสารปนเปื้อนในน้ำเสีย เช่น Chlorides และความขุ่น เป็นต้น

## บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2558. ข้อมูลโรงงาน. [Online]. Available : <http://www.diw.go.th/hawk/content.php?mode=data1search>.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2558. มาตรฐานคุณภาพน้ำเพื่อการบริโภค. [Online]. Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water01.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water01.html).
- กรมควบคุมมลพิษ. 2558. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม. [Online]. Available : [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/reg\\_std\\_water04.html](http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html).
- กัญญารัตน์ หงส์ประภาวงศ์, เกษมสันต์ ทองอยู่. 2555. “การบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียยางสังเคราะห์ด้วยวิธีการเฟนตันร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก.” ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทิมา ชั่งสิริพร, ณรงค์พล ทองสังข์, วุฒิไกร วงษ์มะยุรา และจรรยา อินทมณี. 2552. “การกำจัด COD และสีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษด้วยปฏิกิริยาเฟนตัน.” ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ครั้งที่ 7. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ฉันทน์ เกลิมสินสุวรรณ. 2552. “การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชันและโซโน-เฟนตัน.” ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนกฤต พรหมทอง. 2552. “การกำจัดสีและสารอินทรีย์ของน้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มด้วยน้ำหมักชีวภาพและเฟนตันรีเอเจนต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปฐมพร นันทากุล. 2549. “การใช้ปฏิกิริยาเฟนตันในการบำบัดค่า COD และสีของน้ำทิ้งจากกระบวนการรักษาเนื้อไม้ยางพาราของโรงงานผลิตเฟอร์นิเจอร์ และน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- มณฑา ประดิษฐข้า. 2550. “การปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมีของโรงงานผลิตเคมีภัณฑ์โดยเฟนตันออกซิเดชัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รสสุคนธ์ เกษมณี และศิวาพร ชูเรือง. 2553. “การลดซีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน.” วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วีระนุช บุญรุ่ง. 2553. “การกำจัดสารอินทรีย์ และสีด้วยกระบวนการเฟนตัน และกระบวนการสร้างตะกอนในน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม.” บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วนิดา ชูอักษร. 2555. “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17(1) : 181-191.
- สายฝน มะโนคำ. 2557. “การฟอกสีน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าในจังหวัดลำพูนโดยกระบวนการโฟโต-เฟนตันด้วยแสงอาทิตย์.” วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 22(5) : 629-640.
- สารชัย เวชรัตน์พิมล. 2548. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์กระดาษห่ออาหารเพื่อใช้สำหรับเตาอบแบบไมโครเวฟ.” วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สุขนัม แก้วมาตย์ และบุญสร้าง ดิเรกสถาพร. 2554. “การบำบัดน้ำเสียจากสีย้อมผ้าด้วยกระบวนการเฟนตันแบบฉายแสงโดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- สันติ สกลไชย. 2546. “การกำจัดสีซีไอดี และลิกนินในน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยถ่านไม้.” วิทยาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- อุดม สิทธิการุณ. 2558. **หลอดไฟพิเศษในการฆ่าเชื้อโรค.** [Online]. Available : [www.sathitavl.com/...file/uv.Germicidal%20lamp.pdf](http://www.sathitavl.com/...file/uv.Germicidal%20lamp.pdf).
- Andrew, D., Lenore, S. and Arnold, E. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC : American Public Health Association.
- Carra, I., Casas, J.L., Santos, L., Malato, S. and Sanchez, J.A. 2012. “Iron dosage as a strategy to operate the photo-Fenton process at initial neutral pH.” Chemical Engineering Journal. 224(2013) : 67-74.
- Daphne, H., Noemi, M., Ruth, O. and Angeles, B. 2012. “Optimization of conventional Fenton and ultraviolet-assisted oxidation processes for the treatment of reverse osmosis retentate from a paper mill.” Waste Management. 32(1) : 1236-1243.
- Emine, B. and Mustafa, K. 2014. “Advanced oxidation of Reactive Blue 181 solution: A comparison between Fenton and Sono-Fenton Process.” Ultrasonics Sonochemistry. 21(2014) : 1881-1885.
- Haithem, B.H., Patrick, D.C., Patricia, B., Maria, E.G. and Mourad, B.Z. 2014. “Fe-clay-plate as a heterogeneous catalyst in photo-Fenton oxidation of phenol as probe molecule for water treatment.” Applied Clay Science. 91-92 (2014) : 46-54.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ivana, G., Ana, S. Natalija, K. and Domagoj, V. 2012. "Global parameter of ultrasound exploitation (GPUE) in the reactors for wastewater treatment by sono-Fenton oxidation." *Ultrasonics Sonochemistry*. 19(2012) : 270–279.
- Kazuaki, N., Hiromi, T., Ayaka, O., Kenji, T. and Nobuaki, S. 2013. "Sonocatalytic-Fenton reaction for enhanced OH radical generation and its application to lignin degradation." *Ultrasonics Sonochemistry*. 20(2013) : 1092–1097.
- Lisete, F., Marco, S.L., Manuel, I.M., Isabel, O. and Ana S. 2014. "Treatment of pulp mill wastewater by *Cryptococcus podzolicus* and solar photo-Fenton: A case study." *Separation and Purification Technology*. 132(2014) : 552–560.
- Marco, S.L., Jose, A.P., Carlos, A. Lucia, P. and Manuel, I.M. 2012. "Tertiary treatment of pulp mill wastewater by solar photo-Fenton." *Journal of Hazardous Materials*. 225– 226(2012) : 173– 181.
- Taha, M.R. and Ibrahim A.H. 2014. "Characterization of nano zero-valent iron (nZVI) and its application in sono-Fenton process to remove COD in palm oil mill effluent." *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2(2014) : 1–8.

## ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### วิธีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย

#### ก.1 การวิเคราะห์ซีไอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed-Reflux, Titrimetric Method)

##### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) : ควรใช้หลอดแก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต (borosilicate culture tubes) ขนาด 16×100 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียวชนิดที่เอพีย (Tetrafluoroethylene ; TFE) หรือใช้หลอดบอโรซิลิเกต ความจุ 10 มิลลิลิตร
- 2) ฮีทติ้งบล็อก (Heating block) ลึก 45-50 มิลลิเมตร ที่มีรูขนาดพอดีกับหลอดแก้ว และใช้งานได้ดีในอุณหภูมิ 150±2 องศาเซลเซียส
- 3) ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 150±2 องศาเซลเซียส การใช้ตู้ต้องแน่ใจว่าการอบ 2 ชั่วโมง ที่ 150 องศาเซลเซียส จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหาย
- 4) ไมโครปิเปต (Micro pipette) ขนาด 1-5 มิลลิลิตร
- 5) ถังมือกันกรด
- 6) ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 มิลลิลิตร

##### สารเคมี

- 1) สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium dichromate digestion solution) 0.1 นอร์มัล : นำโพแทสเซียมไดโครเมตอบแห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่ง 4.913 กรัม และปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม จากนั้นทำการละลาย ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
- 2) สารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid reagent) : เติมสารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 22 กรัม ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2.5 ลิตร แล้วทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟต ละลาย
- 3) สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ (Ferroin indicator solution) : ละลาย 1, 10-ฟีแนนโทโรไลน์โมโนไฮเดรต 1.485 กรัม และเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.695 กรัม ในน้ำกลั่น จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
- 4) สารละลายมาตรฐานไอร์ออน(II)แอมโมเนียมซัลเฟตไทแทนต์ (Standard ferrous ammonium sulfate titrant (FAS)) : นำสารละลายไอร์ออน(II)แอมโมเนียมซัลเฟตมา 19.6 กรัม ละลายในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร ทำให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร และจากนั้นนำมาหาความเข้มข้นที่แน่นอน (Standardize) ก่อนทุกครั้ง ดังต่อไปนี้ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตมา 1.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร และเติมซัลฟูริกเข้มข้น 3.5 มิลลิลิตร ทิ้งให้เย็น จากนั้นเติมสารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ ลงไป 1-2 หยด และนำไปไทเทรตกับสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

นอร์มัลลิตีของสารละลาย FAS

$$\text{นอร์มัลลิตี} = \frac{\text{ปริมาตรสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต (มิลลิลิตร)}}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ในการไทเทรต}} \times 0.1$$

### ขั้นตอนการวิเคราะห์

- 1) ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟูริก 20% ก่อนใช้ทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน
- 2) นำหลอดแก้วมา 3 หลอด ทำแบลนด์ โดยเติมน้ำกลั่นหลอดละ 2.5 มิลลิลิตร
- 3) นำหลอดแก้วมาเติมน้ำตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 หลอด หลอดละ 2.5 มิลลิลิตร (หากตัวอย่างน้ำแขวนอยู่ต้องทำให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้องก่อน แล้วเขย่าให้ตัวอย่างน้ำผสมเข้ากันให้ดี)
- 4) เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร
- 5) จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟูริก 3.5 มิลลิลิตร โดยต้องค่อยๆ เติมเข้าไปช้าๆ ให้ไหลลงข้างหลอดแก้ว จะทำให้สารละลายกรดซัลฟูริกตกไปอยู่ข้างล่างหลอดแก้ว
- 6) เช็ดปากขวดหลอดแก้วตรงเกลียวให้แห้ง (ป้องกันการเปิดฝาหลอดแก้วยากหลังอบ) แล้วปิดฝาหลอดแก้วให้แน่นสนิท กลับหลอดแก้วไปมาเพื่อให้สารผสมเข้ากัน และในขณะที่กลับหลอดแก้วไปมาควรสวมถุงมือป้องกันความร้อน
- 7) นำหลอดแก้วทุกหลอดใส่ลงในฮีทตั้งบล็อก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 8) เมื่อครบ 2 ชั่วโมง นำหลอดแก้วออกมาแล้วทำให้เย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง
- 9) เมื่อหลอดแก้วทุกหลอดเย็นเท่ากับอุณหภูมิห้อง ให้เทสารในหลอดแก้วแต่ละหลอดลงในขวดวัดปริมาตรของแต่ละขวด จากนั้นนำแต่ละขวดไปเติมสารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ ลงไป 1-2 หยด และนำไปไทเทรตกับสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง
- 10) บันทึกปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ในการไทเทรต จากนั้นนำไปคำนวณหาปริมาณซีโอดี ดังต่อไปนี้

$$\text{ซีโอดี (มิลลิกรัม } O_2 \text{ /ลิตร)} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $A$  = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตแบลงค์ (มิลลิลิตร)  
 $B$  = ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)  
 $N$  = นอร์มัลลิตีของ FAS  
 $8,000$  = milliequivalent weight ของออกซิเจน  $\times 1000$  มิลลิลิตร/ลิตร

ที่มา : Andrew. *et al.* (1995)

## ก.2 การวิเคราะห์สี (ADMI Tristimulus Filter Method)

### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร
- 2) ฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
- 3) หลอดชนิดยา
- 4) เครื่องแก้วต่างๆ

### สารเคมี

- 1) โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट (K<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>) 1.246 กรัม และโคบอลต์(II)คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต (CoCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O) 1 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จากนั้นเติมไฮโดรคลอริกเข้มข้น 100 มิลลิลิตร และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเข้มข้นเท่ากับ 500 หน่วยสี
- 2) สารละลายมาตรฐานสี 5, 20, 35, 50, 70, 100, 200, 300, 400 และ 500 หน่วยสี จากสารละลายสี ข้อ 1 ปริมาตร 0.1, 0.4, 0.7, 1.0, 1.4, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0 และ 10.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เป็นปริมาตร 10 มิลลิลิตร (เพื่อป้องกันการระเหยและการปนเปื้อนควรปิดจุกให้สนิท และเก็บไว้ที่อุณหภูมิต่ำ)

### ขั้นตอนการวิเคราะห์

- 1) นำสารละลายมาตรฐานสีที่เตรียมไว้ทั้งหมด และน้ำตัวอย่างที่จะทำการวัดสีมาทำการกรองด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร วัดค่าทรานส์มิทแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น ดังตารางที่ ก-1 ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วคำนวณหาค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI) จากโปรแกรมการคำนวณ

### การคำนวณค่าสี (ADMI)

$$\text{ADMI UNIT} = \frac{(F)(DE)}{b}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $F$  = ค่า Calibration Factor ที่ได้จากความชันของการพลอตกราฟของค่า ADMI กับ

ค่า DE ของตัวอย่างสีมาตรฐาน

$b$  = ความกว้างของเซลล์วัดแสง

DE หาจาก

$$DE = [(0.23 \Delta V_y)^2 + (\Delta(V_x - V_y))^2 + (0.4 \Delta(V_y - V_z))^2]^{1/2}$$

โดยที่

$$\Delta V_y = V_{yc} - V_{ys}$$

$$\Delta(V_x - V_y) = (V_{xc} - V_{yc}) - (V_{xs} - V_{ys})$$

$$\Delta(V_y - V_z) = (V_{yc} - V_{zc}) - (V_{ys} - V_{zs})$$

ตารางที่ ก-1 การวัดหาค่าทรานสมิตแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น

Coordinate No.	Wavelength (nm)		
	X	Y	Z
2	435.5	489.5	422.2
5	461.2	515.2	432.0
8	544.3	529.8	438.6
11	564.1	541.4	444.4
14	577.4	551.8	450.1
17	588.7	561.9	455.9
20	599.6	572.5	462.0
23	610.9	584.8	468.7
26	624.2	600.8	477.7
29	654.9	627.3	495.2
Factor when 10 Ordinate Used	0.09806	0.10000	0.11814

ที่มา : Andrew. *et al.* (1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

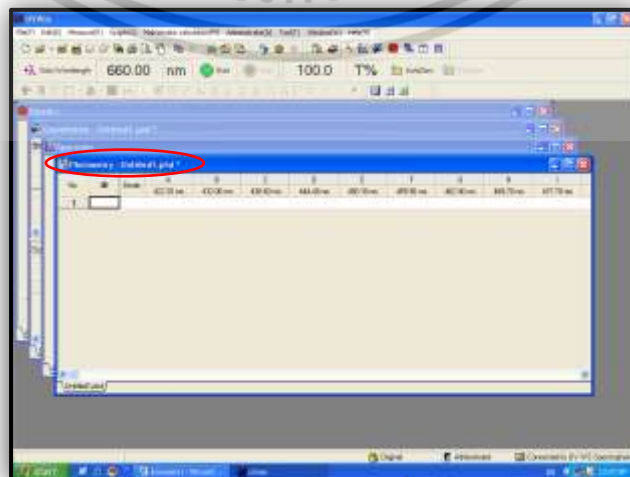
## การใช้โปรแกรมช่วยคำนวณค่าสี (ADMI)

ขั้นตอนการดำเนินงานบนคอมพิวเตอร์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. เปิดโปรแกรม UVWin5 Software v5.1.1 พอหน้าจอเปิดออกมา โปรแกรมจะทำการตรวจเช็คสภาพการใช้งานต่างๆ

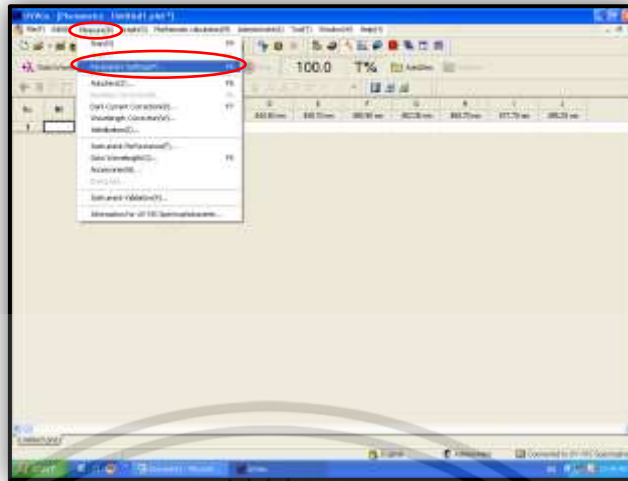


2. เมื่อเข้าโปรแกรมเรียบร้อยให้เลือกโปรแกรมหน้า Photometry ส่วนหน้าต่างอื่นปิดให้หมด

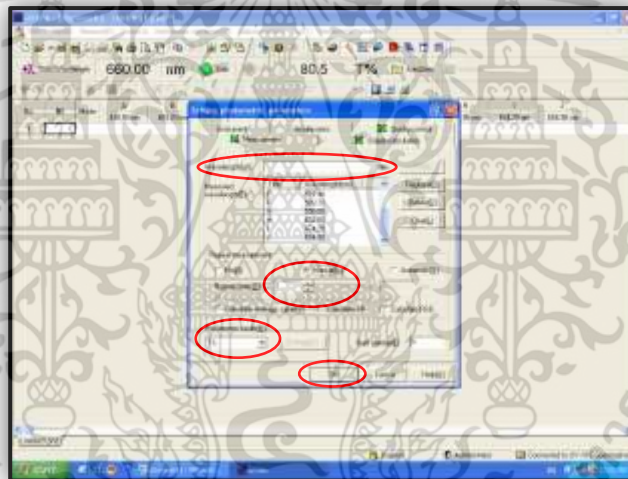


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

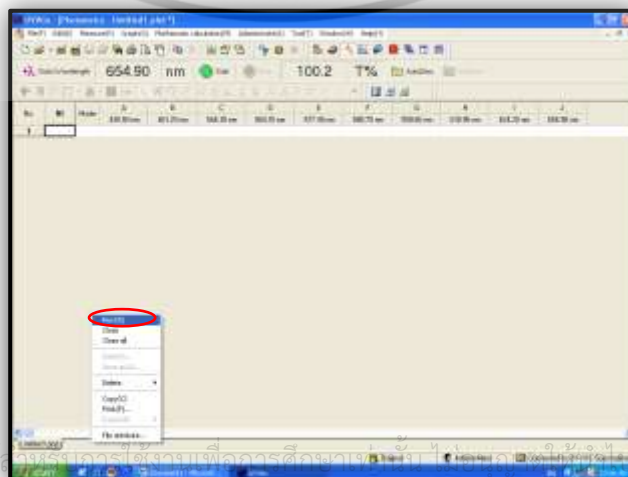
3. จากนั้นไปที่ Measure(R) → Parameters Settings(P)



4. จากนั้นจะขึ้นหน้าต่าง Setting photometric parameters แล้วใส่ความยาวคลื่นแกน x ลงในช่อง Wavelength(W) → เลือก Manual(A) 3 ครั้ง → เลือก Photometric mode(M) T% → OK



5. คลิกขวาข้าง Untitled1.phd → New(N) ทำทั้งหมด 2 ครั้ง ก็จะขึ้น Untitled2.phd และ Untitled3.phd ตามลำดับ จากนั้นทำตามข้อ 3) และ 4) ทั้ง Untitled2.phd และ Untitled3.phd แต่เปลี่ยนจากใส่แกน x เป็นแกน y และแกน z ตามลำดับ

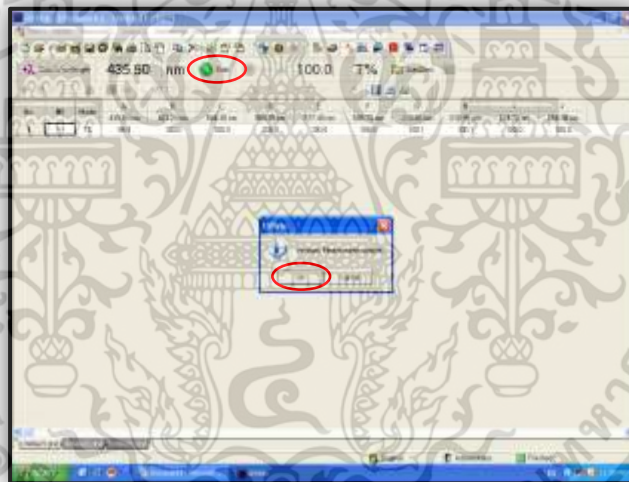


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี การนำไปใช้  
ข้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มี การนำไปใช้

6. ใส่น้ำกลั่นลงเครื่อง จากนั้นกด AutoZero จะขึ้นหน้าต่าง UVWin แล้วกด OK ทำทั้ง 3 แกน



6. นำน้ำกลั่นออกจากเครื่อง แล้วนำตัวอย่างน้ำใส่แทน จากนั้นกด Start จะขึ้นหน้าต่าง UVWin แล้วกด OK

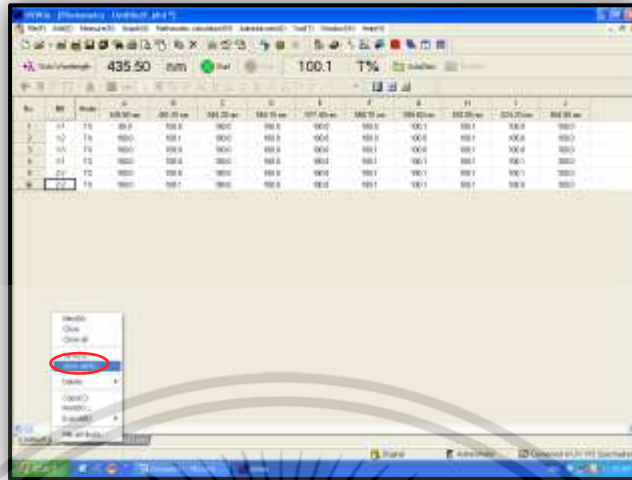


7. เมื่อวัดตัวอย่างน้ำเสร็จจะขึ้นหน้าต่าง UVWin อีกครั้ง แล้วกด OK วัดให้ครบทั้ง 3 แกน และ แกนละ 3 ครั้ง

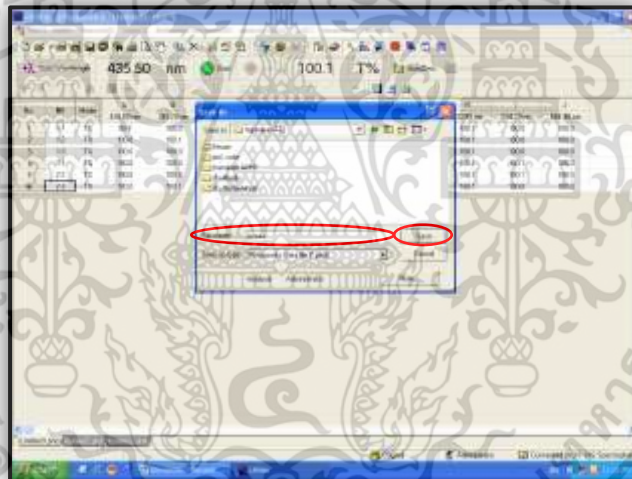


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสาร การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและจะดำเนินคดีตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

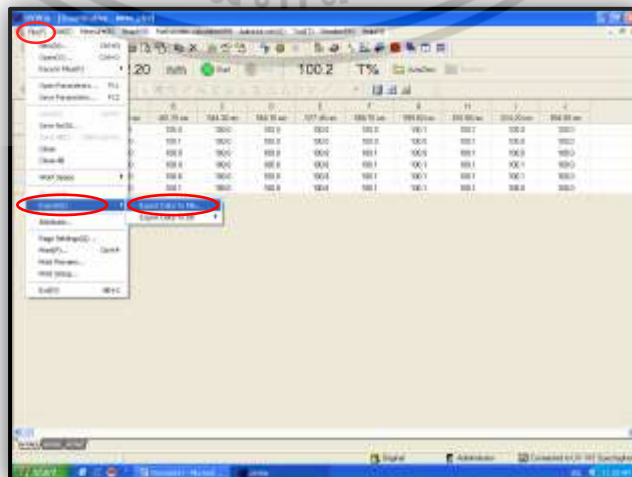
8. เมื่อวัดตัวอย่างน้ำเสร็จทั้งหมดแล้ว คลิกขวา → Save as(A)



9. จะขึ้นหน้าต่าง Save as เลือกเก็บข้อมูลตามโฟลเดอร์ของตัวเองแล้วตั้งชื่อ แกน x ตรงช่อง File name จากนั้นกด Save ทำให้ครบทั้ง 3 แกน



10. กด File(F) → Export(E) → Export Data To File



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



12. เปิดไฟล์ Excell ทั้ง 3 แขนขึ้นมา และเปิดไฟล์ Excell ชื่อ ADMI01, ADMI02 และ ADMI03 ขึ้นมาทั้ง 3 ไฟล์ จากนั้น copy ข้อมูลจากแกน x ใส่ ADMI01, แกน y ใส่ ADMI02 และ แกน z ใส่ ADMI03 เมื่อครบแล้วเปิดไฟล์ ADMI\_inw ขึ้นมาก็จะได้ค่า ADMI ของแต่ละตัวอย่างนี้

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0.0	100	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100	100	100
2	1.54e-7%	-300	400.4	400	300	400	400	100	100.1	100	100.1	100
3	1.54e-7%	300	300	300	300	300	100.1	100	100.1	100	100	100
4	1.54e-7%	300	300	300	300	300	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1	100
5	1.54e-7%	300	300	300	400	400	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1	100
6	1.54e-7%	300	300.4	300	400	400	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1	100

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0.0	100	100	100	100	100	100	100.1	100.1	100	100	100
2	1.54e-7%	-300	400.4	400	300	400	400	100	100.1	100	100.1	100
3	1.54e-7%	300	300	300	300	300	100.1	100	100.1	100	100	100
4	1.54e-7%	300	300	300	300	300	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1	100
5	1.54e-7%	300	300	300	400	400	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1	100
6	1.54e-7%	300	300.4	300	400	400	100.1	100.1	100.1	100.1	100.1	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.3 การวิเคราะห์เหล็ก (Fe)

#### เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 2) ฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร
- 3) หลอดฉีดยา
- 4) เครื่องแก้วต่างๆ

#### สารเคมี

- 1) สารละลายเหล็กเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

#### ขั้นตอนการวิเคราะห์

- 1) เตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตร จากสารละลายเหล็กเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาตร 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เป็นปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- 2) นำน้ำตัวอย่างที่จะทำการวัดมากรองด้วยฟิลเตอร์ขนาดรูพรุน 0.45 ไมโครเมตร และสารละลายมาตรฐานเหล็ก ที่เตรียมไว้จากข้อ 1) มาวัดหาปริมาณเหล็ก ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร

## ข.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

สารละลาย	1,000	มิลลิลิตร	ชั่งลิกนิน	= 1.0000	กรัม
สารละลาย	1,000	มิลลิลิตร	ชั่งลิกนิน	= (1×1,000)/1,000	กรัม
				= 1.0000	กรัม

ดังนั้น ชั่งลิกนิน 1.0000 กรัม แล้วปรับปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

## ข.2 การเตรียมสารละลายมาตรฐานลิกนินเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัม/ลิตร

- การเตรียมสารละลายมาตรฐานลิกนินเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร จากเสียสังเคราะห์ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

สารละลายเข้มข้น	1,000	มิลลิกรัม/ลิตร	ปิเปตมา	= 10	มิลลิลิตร
สารละลายเข้มข้น	10	มิลลิกรัม/ลิตร	ปิเปตมา	= (10 × 10)/1,000	มิลลิลิตร
				= 0.1	มิลลิลิตร

ดังนั้น ปิเปตจากน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินมา 0.1 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรครบ 10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานลิกนินเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

ตารางที่ ข-1 ปริมาตรที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานลิกนินของแต่ละความเข้มข้น

สารละลายมาตรฐานลิกนินเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาตรที่ปิเปต (มิลลิลิตร)
10	0.1
20	0.2
30	0.3
40	0.4
50	0.5

### ข.3 การเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ 5, 20, 35, 50, 70, 100, 200, 300, 400 และ 500 หน่วย

- การเตรียมสารละลายมาตรฐานที่ 5 หน่วยสี จากสารละลายมาตรฐานที่ 500 หน่วยสี

สารละลายเข้มข้น 500 หน่วยสี ปีเปตมา = 10 มิลลิลิตร

สารละลายเข้มข้น 5 หน่วยสี ปีเปตมา =  $(10 \times 5) / 500$  มิลลิลิตร

= 0.1 มิลลิลิตร

ดังนั้น ปีเปตจากสารละลายมาตรฐานสีมา 0.1 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรครบ 10 มิลลิลิตร  
จะได้สารละลายมาตรฐานที่ 5 หน่วยสี

### ตารางที่ ข-2 ปริมาตรที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานของแต่ละความเข้มข้น

สารละลายมาตรฐานที่ (หน่วยสี)	ปริมาตรที่ปีเปต (มิลลิลิตร)
5	0.1
20	0.4
35	0.7
50	1.0
70	1.4
100	2.0
200	4.0
300	6.0
400	8.0
500	10.0

### ข.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 มิลลิกรัม/ลิตร

- การเตรียมสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร จากสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร

สารละลายเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ปีเปตมา = 10 มิลลิลิตร

สารละลายเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร ปีเปตมา =  $(10 \times 0.1) / 10$  มิลลิลิตร

= 0.1 มิลลิลิตร

ดังนั้น ปีเปตจากสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้นมา 0.1 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรครบ  
10 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ปริมาณที่ใช้ในการเตรียมสารละลายมาตรฐานหลักของแต่ละความเข้มข้น

สารละลายมาตรฐานหลักเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ปริมาตรที่ปิเปต (มิลลิลิตร)
0.1	0.1
0.5	0.5
1.0	1.0
1.5	1.5
2.0	2.0
2.5	2.5
3.0	3.0

**ข.5 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ (MW. = 40)**

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร เนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล =  $5 \times 40$  กรัม

ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร เนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมล =  $(5 \times 40 \times 100) / 1000$  กรัม  
= 20 กรัม

ดังนั้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม แล้วปรับปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์

**ข.6 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ (MW. = 98, S.G = 1.83, 95% w/w)**

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเนื้อกรดซัลฟูริก 1 โมล =  $1 \times 98$  g

มีเนื้อกรด 95 กรัม จากสารละลาย = 100 กรัม

มีเนื้อกรด  $1 \times 98$  กรัม จากสารละลาย =  $(100 \times 1 \times 98) / 95$  กรัม

กรดซัลฟูริก 1.83 กรัม ในปริมาตร = 1 มิลลิลิตร

กรดซัลฟูริก  $(100 \times 1 \times 98) / 95$  กรัม ในปริมาตร =  $(100 \times 1 \times 98 \times 1) / (95 \times 1.83)$  มิลลิลิตร

= 56.37 มิลลิลิตร

ซัลฟูริก 1 โมล ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ดวงซัลฟูริกเข้มข้น = 56.37 มิลลิลิตร

ซัลฟูริก 1 โมล ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ดวงซัลฟูริกเข้มข้น =  $(56.37 \times 50) / 1,000$  มิลลิลิตร

= 2.8 มิลลิลิตร

ดังนั้น ดวงซัลฟูริกเข้มข้นมา 2.8 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรครบ 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์

### ข.7 การเตรียมเฟอร์รัสไอออน ( $Fe^{2+}$ )

เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 278.006 กรัม มีเฟอร์รัสไอออน = 55.845 กรัม  
 เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 1.000 กรัม มีเฟอร์รัสไอออน =  $(55.845 \times 1.000) / 278.006$  กรัม  
 = 0.2009 กรัม

จาก  $n = g/MW$   
 ดังนั้น  $n = 0.2009 / 55.845$  โมล  
 = 0.0036 โมล

เฟอร์รัสไอออน 0.0036 โมล ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต = 1.000 กรัม  
 เฟอร์รัสไอออน 0.001 โมล ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต =  $(1.000 \times 0.001) / 0.0036$  กรัม  
 = 0.2778 กรัม

สารละลายในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร มีเฟอร์รัสไอออน = 0.001 โมล  
 สารละลายในบีกเกอร์ 1,000 มิลลิลิตร มีเฟอร์รัสไอออน =  $(0.001 \times 1,000) / 100$  โมล  
 = 0.01 โมล/ลิตร

ดังนั้น เฟอร์รัสไอออน 0.01 โมล/ลิตร จะต้องชั่งเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมา 0.2778 กรัม

ตารางที่ ข-4 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใช้ในกระบวนการเฟ้นต้น

ความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน (โมล/ลิตร)	ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (กรัม)
0.01	0.2778
0.02	0.5556
0.03	0.8333
0.04	1.1111
0.05	1.3889

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.8 การเตรียมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร (MW = 34.015, d = 1.11)

$$\begin{aligned} \text{จาก} & \quad d = m/v \\ \text{ดังนั้น} & \quad m = 1.11 \times 1,000 \times 0.3 \text{ กรัม/ลิตร} \\ & \quad = 333.000 \text{ กรัม/ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก} & \quad n = g/MW \\ \text{ดังนั้น} & \quad n = 333.000/34.015 \text{ โมล/ลิตร} \\ & \quad = 9.7898 \text{ โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก} & \quad C_1V_1 = C_2V_2 \\ \text{ดังนั้น} & \quad 9.7898 \times V_1 = 0.03 \times 100 \text{ มิลลิลิตร} \\ & \quad V_1 = 0.31 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 0.03 โมล/ลิตร จะต้องปิเปตมา 0.31 มิลลิลิตร

ตารางที่ ข-5 ปริมาตรไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในกระบวนการเฟ้นต้น

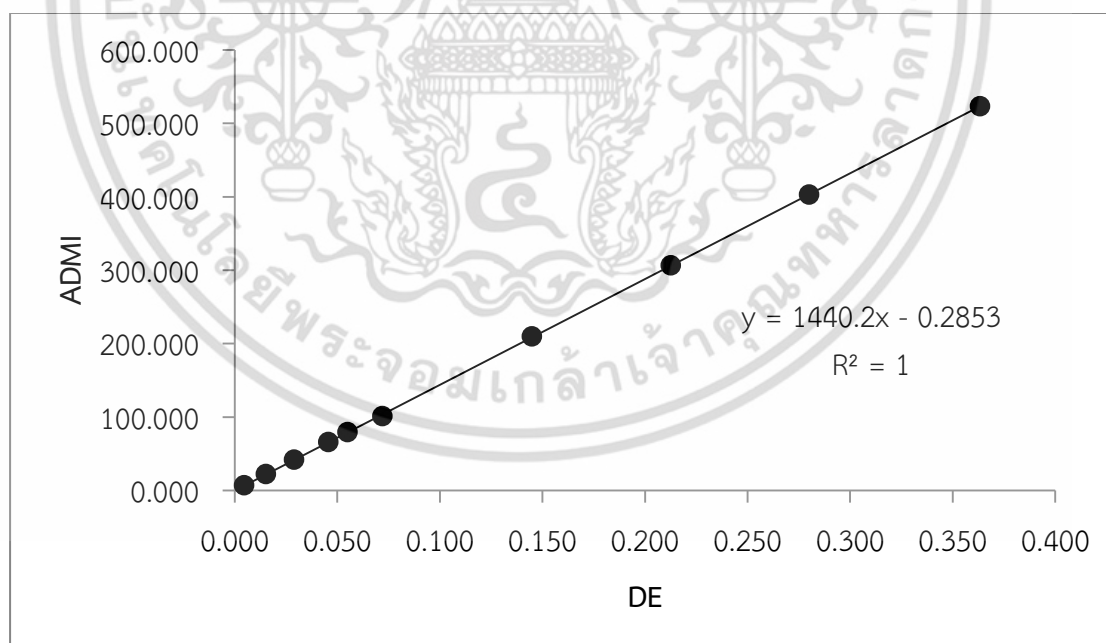
เพอร์สไอออน : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (โมล/ลิตร)	ปริมาตรที่ปิเปต (มิลลิลิตร)
1 : 1	0.03	0.31
1 : 2	0.06	0.61
1 : 3	0.09	0.92
1 : 4	0.12	1.23
1 : 5	0.15	1.53

## ภาคผนวก ค

### กราฟสารละลายมาตรฐาน

ตารางที่ ค.1 ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐาน

ลำดับ	หน่วยสี	DE	ADMI
1	5	0.005	6.644
2	20	0.015	21.801
3	35	0.029	41.682
4	50	0.046	65.731
5	70	0.055	79.171
6	100	0.072	100.948
7	200	0.145	209.371
8	300	0.213	306.151
9	400	0.280	402.542
10	500	0.363	523.246

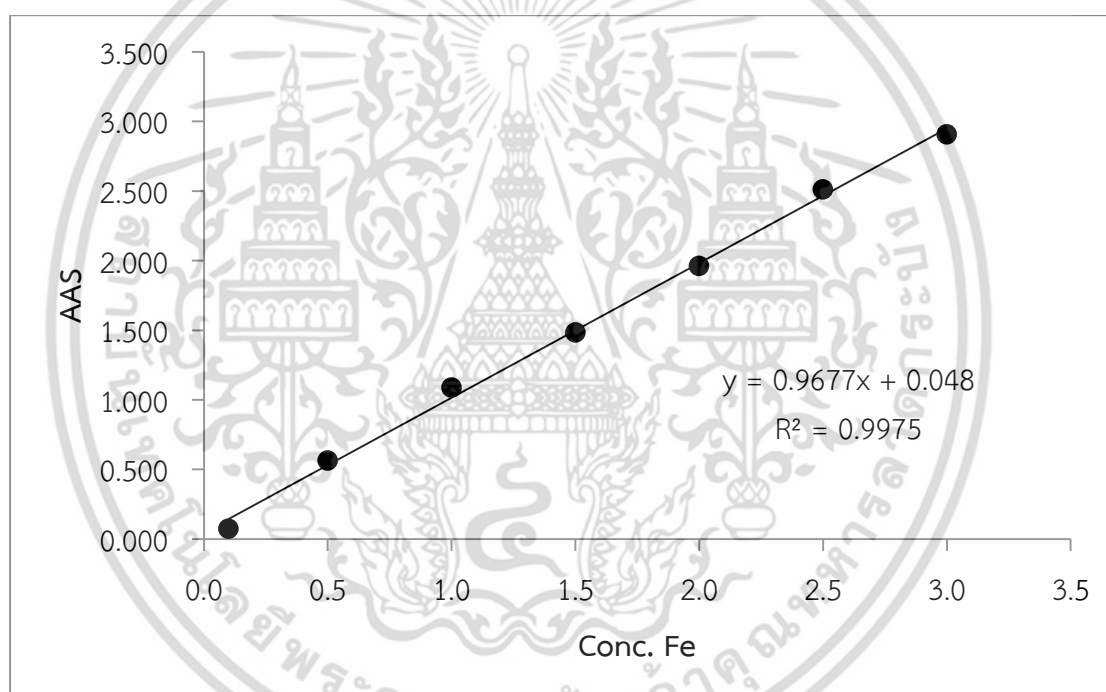


รูปที่ ค-1 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานเหล็ก

ลำดับ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	ค่าการดูดกลืนแสง
1	0.1	0.074
2	0.5	0.564
3	1.0	1.089
4	1.5	1.484
5	2.0	1.962
6	2.5	2.512
7	3.0	2.908



รูปที่ ค-2 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง

ง.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นซีโอทีในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินก่อนการบำบัด

- นอร์มัลลิตี

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.0 - 2.7 = 2.7 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 2.7 - 5.4 = 2.7 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 5.4 - 8.2 = 2.8 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 2.733 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{นอร์มัลลิตี} = \frac{\text{ml } 0.1 \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \times 0.1}{\text{ml FAS}} = \frac{1.5 \times 0.1}{2.733} = 0.055$$

- แบลงค์

$$\text{ครั้งที่ 1} = 8.2 - 10.8 = 2.6 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 10.8 - 13.4 = 2.6 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 13.4 - 16.1 = 2.7 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 2.633 \text{ มิลลิลิตร}$$

- น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเจือจางความเข้มข้นลง 10 เท่า

$$\text{ครั้งที่ 1} = 16.1 - 17.5 = 1.4 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 17.5 - 19.3 = 1.5 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 19.3 - 20.8 = 1.5 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ตัดครั้งที่ 1 ออก ใช้ครั้งที่ 2 และ 3 ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ซีโอที} &= \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}} = \frac{(2.633 - 1.5) \times 0.055 \times 8,000}{2.500} && \text{มิลลิกรัม/ลิตร} \\ &= 199.083 \times 10 && \text{มิลลิกรัม/ลิตร} \\ &= 1,990.83 && \text{มิลลิกรัม/ลิตร} \end{aligned}$$

หมายเหตุ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ง.2 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นเฟอร์สไอออนที่เหมาะสม

### 1) ซีโอดี

#### - นอร์มัลลิตี

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.0 - 2.7 = 2.7 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 2.7 - 5.4 = 2.7 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 5.4 - 8.2 = 2.8 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 2.733 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{นอร์มัลลิตี} = \frac{\text{ml } 0.1 \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \times 0.1}{\text{ml FAS}} = \frac{1.5 \times 0.1}{2.733} = 0.055$$

#### - แบลงค์

$$\text{ครั้งที่ 1} = 8.2 - 10.8 = 2.6 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 10.8 - 13.4 = 2.6 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 13.4 - 16.1 = 2.7 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 2.633 \text{ มิลลิลิตร}$$

#### - ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์สไอออน 0.03 โมล

$$\text{ครั้งที่ 1} = 35.2 - 37.2 = 2.0 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 37.2 - 39.1 = 1.9 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 39.1 - 41.2 = 2.1 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ซีโอดี} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}} = \frac{(2.633 - 2.05) \times 0.055 \times 8,000}{2.500} \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$= 111.25 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร}$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี} = \frac{COD_{\text{ก่อนบำบัด}} - COD_{\text{หลังบำบัด}}}{COD_{\text{ก่อนบำบัด}}} \times 100$$

$$= \frac{1,990.83 - 102.47}{1,990.83} \times 100$$

$$= 94.41$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก จ

### ตัวอย่างการคำนวณค่าใช้จ่ายสารเคมี

#### 1. ตัวอย่างการคำนวณการใช้เฟอร์รัสไอออน

- เฟอร์รัสไอออนใช้ไป 0.03 โมล ได้มาจากเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.8333 กรัม ใน น้ำเสีย 100 มิลลิลิตร (ราคา AR grade 750 บาท/กิโลกรัม หรือ 0.75 บาท/กรัม) (ราคา เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 98.5% Commercial 20 บาท/กิโลกรัม หรือ 0.02 บาท/กรัม)

$$\text{ราคาเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต (AR grade)} = 0.8333 \times 0.75 = 0.6250 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคาเฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 98.5% (Commercial)} = 0.8460 \times 0.02 = 0.0169 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 0.6250 บาท (AR grade) และ 0.0169 บาท (Commercial) ถ้าน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร จะใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต 6,250 บาท (AR grade) และ 169 บาท (Commercial)

#### 2. ตัวอย่างการคำนวณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

- 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ใช้ไป 0.06 โมล หรือ 0.61 มิลลิลิตร ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร (ราคา AR grade 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1,300 บาท/2.5 ลิตร หรือ 0.52 บาท/มิลลิลิตร) (ราคา Commercial 50% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1,600 บาท/35 ลิตร หรือ 0.0457 บาท/มิลลิลิตร)

$$\text{จาก } C_1V_1 = C_2V_2$$

$$V_1 = (30 \times 100) / 50$$

$$V_1 = 60 \text{ มิลลิลิตร}$$

จะได้สารละลาย 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

$$\text{ราคา 30\% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.61 มล. (AR grade)} = 0.61 \times 0.52 = 0.3172 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคา 30\% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 มล. (Commercial)} = 60 \times 0.0457 = 2.7429 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคา 30\% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.61 มล. (Commercial)} = (0.61 \times 2.7429) / 100 = 0.0167 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร ใช้ 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.3172 บาท (AR grade) และ 0.0167 บาท (Commercial) ถ้าน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร จะใช้ 30% ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3,172 บาท (AR grade) และ 167 บาท (Commercial)

### 3. ตัวอย่างการคำนวณการใช้กรดซัลฟูริกในการปรับพีเอช

- กรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ ใช้ปรับพีเอชจากประมาณ 9.00 เป็น 3.00 ปริมาตร 0.30 มิลลิลิตร ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร จากภาคผนวก ข.6 ดวงซัลฟูริกเข้มข้นมา 2.8 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตร จะได้สารละลายกรดซัลฟูริก 1 โมลาร์ (ราคา AR grade กรดซัลฟูริกเข้มข้น 98% ราคา 156 บาท/ลิตร หรือ 0.156 บาท/มิลลิลิตร) (ราคา Commercial กรดซัลฟูริกเข้มข้น 98% ราคา 75 บาท/ลิตร หรือ 0.075 บาท/มิลลิลิตร)

$$\text{ราคากรดซัลฟูริก (50 มิลลิลิตร) (AR grade)} = 2.8 \times 0.156 = 0.4368 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคากรดซัลฟูริก (0.30 มิลลิลิตร) (AR grade)} = (0.3 \times 0.4368) / 50 = 0.0026 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคากรดซัลฟูริก (50 มิลลิลิตร) (Commercial)} = 2.8 \times 0.075 = 0.2100 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคากรดซัลฟูริก (0.30 มิลลิลิตร) (Commercial)} = (0.3 \times 0.21) / 50 = 0.0013 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร ใช้กรดซัลฟูริก 0.0026 บาท (AR grade) และ 0.0013 บาท (Commercial) ถ้าน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร จะใช้ กรดซัลฟูริก 26 บาท (AR grade) และ 13 บาท (Commercial)

### 4. ตัวอย่างการคำนวณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับพีเอช

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ ใช้ปรับพีเอชจากประมาณ 2.30 เป็น 7.00 ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร จากภาคผนวก ข.5 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 20 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5 โมลาร์ (ราคา AR grade โซเดียมไฮดรอกไซด์ ราคา 290 บาท/กิโลกรัม หรือ 0.29 บาท/กรัม) (ราคา Commercial โซเดียมไฮดรอกไซด์ ราคา 36 บาท/กิโลกรัม หรือ 0.036 บาท/กรัม)

$$\text{ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (100 มิลลิลิตร) (AR grade)} = 20 \times 0.29 = 5.8000 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (1 มิลลิลิตร) (AR grade)} = (1 \times 5.8) / 100 = 0.0580 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (100 มิลลิลิตร) (Commercial)} = 20 \times 0.036 = 0.7200 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคาโซเดียมไฮดรอกไซด์ (1 มิลลิลิตร) (Commercial)} = (1 \times 0.72) / 100 = 0.0072 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ในน้ำเสีย 100 มิลลิลิตร ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.0580 บาท (AR grade) และ 0.0072 บาท (Commercial) ถ้าน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร จะใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 580 บาท (AR grade) และ 72 บาท (Commercial)

### 5. ตัวอย่างการคำนวณการใช้ลิกนิน

- ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร จากภาคผนวก ข.1 ลิกนิน 1 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร (ลิกนิน ราคา 23,500 บาท/กิโลกรัม 23.5 บาท/กรัม)

$$\text{ราคาลิกนิน (100 มิลลิตร)} = (100 \times 23.5) / 1,000 = 2.3500 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ในน้ำเสีย 100 มิลลิตร ใช้ลิกนิน 2.3500 บาท

### 6. ตัวอย่างการคำนวณการฉายแสงจากหลอดยูวี

- หลอดยูวีขนาด 18 วัตต์ มีอายุการใช้งานเฉลี่ย 3,000 ชั่วโมง ราคา 360 บาท/หลอด ซึ่งภายในตู้ให้แสงยูวี มีหลอดยูวีทั้งหมด 4 หลอด โดยก่อนทำการทดลองได้เปิดหลอดยูวีทิ้งไว้ 60 นาที จึงเริ่มทำการทดลอง และจากนั้นทำการทดลองด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตัน ใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลา 10 นาที ใช้เวลาทั้งสิ้นรวม 70 นาที (1 ชั่วโมง เท่ากับ 60 นาที)

$$\text{อายุการใช้งานหลอดยูวี 3,000 ชั่วโมง} = 3,000 \times 60 = 180,000 \text{ นาที}$$

$$\text{ราคาการใช้งานแสงยูวี 1 หลอด/70 นาที} = (70 \times 360) / 180,000 = 0.1400 \text{ บาท}$$

$$\text{ราคาการใช้งานแสงยูวี 4 หลอด/70 นาที} = 0.1400 \times 4 = 0.5600 \text{ บาท}$$

ดังนั้น ใช้แสงยูวี 0.5600 บาท

### 7. ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าในการฉายแสงยูวี

- จากหลอดยูวีขนาด 18 วัตต์ ทั้งหมด 4 หลอด และบอลลาสต์ 20 วัตต์ โดยก่อนทำการทดลองได้เปิดหลอดยูวีทิ้งไว้ 60 นาที และจากนั้นทำการทดลองด้วยกระบวนการโฟโต-เฟนตัน ใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลา 10 นาที ใช้เวลาทั้งสิ้นใช้เวลารวม 70 นาที

เนื่องจากกำลังไฟฟ้า 1 กิโลวัตต์เท่ากับ 1,000 วัตต์ ดังนั้น ถ้าใช้พลังงานไฟฟ้าไป 1 กิโลวัตต์/ชั่วโมง จึงหมายถึง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าไป 1,000 วัตต์ เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} &= (\text{กำลังไฟฟ้า(วัตต์)} / 1,000) \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า} \\ &= (38 / 1,000) \times 4 \\ &= 0.152 \text{ กิโลวัตต์} \end{aligned}$$

การใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นกิโลวัตต์/ชั่วโมง หรือหน่วย หรือยูนิต คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} &= \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลา (ชั่วโมง)} \\ &= 0.152 \times 1.67 \\ &= 0.2538 \text{ หน่วย} \end{aligned}$$

จากอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.7628 บาท/หน่วย

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 0.2538 \times 2.7628 = 0.7012 \text{ บาท}$$

จากอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.7160 บาท/หน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 0.2538 \times 2.7160 = 0.6893 \text{ บาท}$$

จากอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่ ต่ำกว่า 12 กิโลวัตต์ ราคา 2.7160 บาท/หน่วย

$$\text{ค่าไฟฟ้า} = 0.2538 \times 2.7160 = 0.6893 \text{ บาท}$$

#### 8. ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าในการใช้เครื่องอัลตราโซนิก

- จากเครื่องอัลตราโซนิกขนาด 10 ลิตร 200 วัตต์ ใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลา 30 นาที

$$\text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} = (\text{กำลังไฟฟ้า(วัตต์)}/1,000) \times \text{จำนวนเครื่องใช้ไฟฟ้า}$$

$$= (200/1,000) \times 1$$

$$= 0.2000 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{พลังงานไฟฟ้า (หน่วย)} = \text{กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)} \times \text{เวลา (ชั่วโมง)}$$

$$= 0.2 \times 0.5$$

$$= 0.1000 \text{ หน่วย}$$

$$\text{จากอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 2 กิจการขนาดเล็ก} 0.1000 \times 2.7628 = 0.2763 \text{ บาท}$$

$$\text{จากอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 3 กิจการขนาดกลาง} 0.1000 \times 2.7160 = 0.2716 \text{ บาท}$$

$$\text{จากอัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 4 กิจการขนาดใหญ่} 0.1000 \times 2.7160 = 0.2716 \text{ บาท}$$

- หมายเหตุ 1. ราคาสารเคมี Commercial มาจาก บริษัท อีดีลมาร์ (ประเทศไทย) จำกัด  
ณ วันที่ 22 ก.ค. 2558
2. อัตราค่าไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้านครหลวง

## ภาคผนวก ฉ

### ภาพประกอบการทดลอง



รูปที่ ฉ-1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)



รูปที่ ฉ-2 เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ-3 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)



รูปที่ ฉ-4 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ-5 เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital Balance)



รูปที่ ฉ-6 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

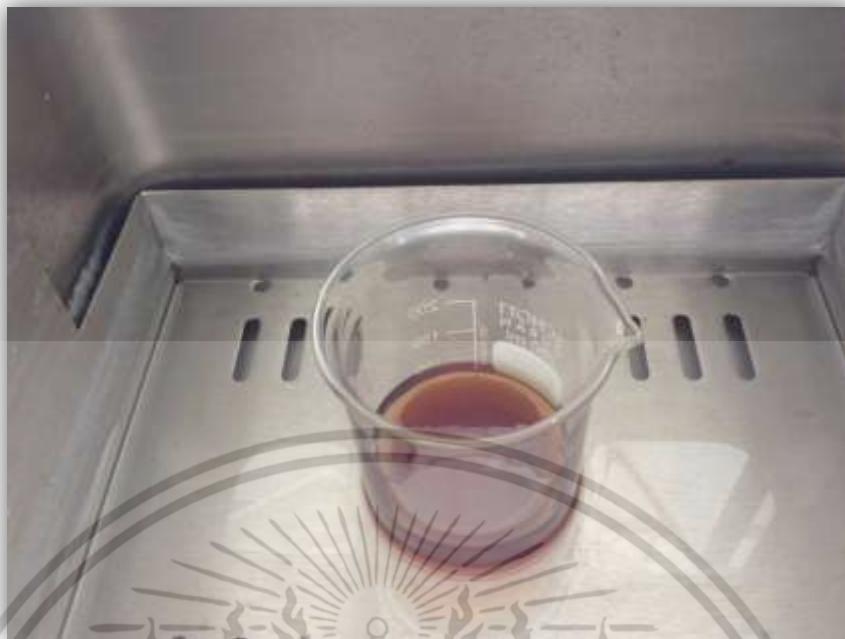


รูปที่ ฉ-7 ชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการเฟนตัน)



รูปที่ ฉ-8 ชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโฟโต-เฟนตัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฉ-9 ชุดการทดลองแบบแบทช์ (กระบวนการโซโน-เฟนตัน)



รูปที่ ฉ-10 เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดลงและทำการตกตะกอนเหล็กไอออนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากนั้นทิ้งให้เหล็กไอออนตะกอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ตารางผลการทดลองทั้งหมด

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออน (โมล)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออน (โมล)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น	0.00	1	0.01	731.92	63.24
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		819.75	58.82
3	(0.00)	0.00	3		556.26	72.06
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		702.65	64.71
SD		0.00	SD		134.16	6.74
%RSD		0.00	%RSD		19.09	10.41
1	น้ำเสียสังเคราะห์	<del>2,166.49</del>	1	0.02	<del>386.46</del>	<del>80.59</del>
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	1,990.83	2		333.76	83.24
3	(0.00)	1,990.83	3		333.76	83.24
ค่าเฉลี่ย		1,990.83	ค่าเฉลี่ย		333.76	83.24
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่น	0.00	1	0.03	111.25	94.41
2	หลังการบำบัด	0.00	2		128.82	93.53
3	(Blank : 0.00)	0.00	3		93.69	95.29
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		111.25	94.41
SD		0.00	SD		17.57	0.88
%RSD		0.00	%RSD		15.79	0.93
1	น้ำเสียสังเคราะห์	1,229.63	1	0.04	93.69	95.29
2	ลิกนินหลังการบำบัด	<del>1,176.93</del>	2		76.12	96.18
3	(Control : 0.00)	1,229.63	3		58.55	97.06
ค่าเฉลี่ย		1,229.63	ค่าเฉลี่ย		76.12	96.18
SD		0.00	SD		17.57	0.88
%RSD		0.00	%RSD		23.08	0.92
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		38.24	1	0.05	111.25	94.41
			2		146.38	92.95
			3		128.82	93.53
			ค่าเฉลี่ย		128.82	93.53
			SD		17.57	0.88
			%RSD		13.64	0.94

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test  
 เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์ ผู้เผยแพร่เห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออน (โมล)	ความเข้มข้น (ADMI)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออน (โมล)	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น	3.31	1	0.01	1,413.97	57.39
2	ก่อนการบำบัด	3.31	2		1,408.39	57.56
3	(0.00)	3.31	3		1,407.14	57.59
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		1,409.83	57.51
SD		0.00	SD		3.64	0.11
%RSD		0.00	%RSD		0.26	0.19
1	น้ำเสียสังเคราะห์	3,320.04	1	0.02	164.93	95.03
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	3,317.32	2		164.77	95.03
3	(0.00)	3,317.32	3		165.02	95.03
ค่าเฉลี่ย		3,318.23	ค่าเฉลี่ย		164.91	95.03
SD		1.57	SD		0.13	0.00
%RSD		0.05	%RSD		0.08	0.00
1	น้ำกลั่น	6.64	1	0.03	55.05	98.34
2	หลังการบำบัด	6.63	2		54.71	98.35
3	(Blank : 0.00)	6.60	3		54.95	98.34
ค่าเฉลี่ย		6.62	ค่าเฉลี่ย		54.90	98.35
SD		0.02	SD		0.17	0.01
%RSD		0.34	%RSD		0.31	0.01
1	น้ำเสียสังเคราะห์	1,974.49	1	0.04	23.97	99.28
2	ลิกนินหลังการบำบัด	1,895.36	2		24.11	99.27
3	(Control : 0.00)	1,894.83	3		24.01	99.28
ค่าเฉลี่ย		1,895.10	ค่าเฉลี่ย		24.03	99.28
SD		0.38	SD		0.07	0.00
%RSD		0.02	%RSD		0.29	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		42.89	1	0.05	19.93	99.40
			2		19.65	99.41
			3		25.09	99.24
			ค่าเฉลี่ย		21.56	99.35
			SD		3.06	0.09
			%RSD		14.21	0.09

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไอออน (โมล)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไอออน (โมล)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น	0.00	1	0.01	0.09
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		0.06
3	(0.00)	0.00	3		0.07
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		0.07
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		13.89
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด (0.00)	0.01	1	0.02	0.08
2		0.01	2		0.09
3		0.01	3		0.06
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.08
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		18.28
1	น้ำกลั่น	0.02	1	0.03	0.11
2	หลังการบำบัด	0.04	2		0.14
3	(Blank : 0.00)	0.01	3		0.15
ค่าเฉลี่ย		0.02	ค่าเฉลี่ย		0.13
SD		0.02	SD		0.02
%RSD		75.04	%RSD		15.47
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (Control : 0.00)	0.01	1	0.04	1.58
2		0.03	2		1.51
3		0.05	3		1.53
ค่าเฉลี่ย		0.03	ค่าเฉลี่ย		1.54
SD		0.02	SD		0.04
%RSD		71.62	%RSD		2.50
			1	0.05	1.93
			2		1.96
			3		1.94
			ค่าเฉลี่ย		1.94
			SD		0.01
			%RSD		0.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม (ซีไอดี)

ครั้งที่	เฟอร์สไอออน: ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เฟอร์สไอออน: ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น	0.00	1	1:1	423.65	79.17
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		<del>338.92</del>	<del>83.33</del>
3	1:0	0.00	3		423.65	79.17
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		423.65	79.17
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	<del>2,202.96</del>	1	1:2	101.67	95.00
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	2,033.50	2		101.67	95.00
3	1:0	2,033.50	3		101.67	95.00
ค่าเฉลี่ย		2,033.50	ค่าเฉลี่ย		101.67	95.00
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่น	0.00	1	1:3	<del>101.67</del>	<del>95.00</del>
2	หลังการบำบัด	0.00	2		118.62	94.17
3	(Blank : 1:0)	0.00	3		118.62	94.17
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		118.62	94.17
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	1,186.21	1	1:4	118.62	94.17
2	ลิกนินหลังการบำบัด	1,186.21	2		<del>101.67</del>	<del>95.00</del>
3	(Control : 1:0)	<del>1,016.75</del>	3		118.62	94.17
ค่าเฉลี่ย		1,186.21	ค่าเฉลี่ย		118.62	94.17
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		41.67	1	1:5	<del>135.57</del>	<del>93.33</del>
			2		118.62	94.17
			3		118.62	94.17
			ค่าเฉลี่ย		118.62	94.17
			SD		0.00	0.00
			%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม  
(สี่)

ครั้งที่	เฟอร์สไอออน: ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์	ความเข้มข้น (ADMI)	ครั้งที่	เฟอร์สไอออน: ไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น	3.31	1	1:1	145.61	95.61
2	ก่อนการบำบัด	3.31	2		145.50	95.62
3	1:0	3.31	3		147.63	95.55
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		146.25	95.59
SD		0.00	SD		1.20	0.04
%RSD		0.00	%RSD		0.82	0.04
1	น้ำเสียสังเคราะห์	3,320.04	1	1:2	53.20	98.40
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	3,317.32	2		59.10	98.22
3	1:0	3,317.32	3		55.47	98.33
ค่าเฉลี่ย		3,318.23	ค่าเฉลี่ย		55.92	98.31
SD		1.57	SD		2.98	0.09
%RSD		0.05	%RSD		5.32	0.09
1	น้ำกลั่น	3.31	1	1:3	58.79	98.23
2	หลังการบำบัด	3.31	2		46.87	98.59
3	(Blank : 1:0)	3.31	3		59.98	98.19
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		59.39	98.21
SD		0.00	SD		0.85	0.03
%RSD		0.00	%RSD		1.43	0.03
1	น้ำเสียสังเคราะห์	SD	1	1:4	48.69	98.53
2	ลิกนินหลังการบำบัด	%RSD	2		46.66	98.59
3	(Control : 1:0)	203.26	3		46.51	98.60
ค่าเฉลี่ย		208.80	ค่าเฉลี่ย		47.29	98.57
SD		14.67	SD		1.22	0.04
%RSD		7.02	%RSD		2.57	0.04
เปอร์เซ็นต์การบำบัด			1	1:5	34.82	98.95
			2		34.77	98.95
			3		37.01	98.88
			ค่าเฉลี่ย		35.53	98.93
			SD		1.28	0.04
			%RSD		3.60	0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองการศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสม  
(เหล็ก)

ครั้งที่	เฟอร์รัสไอออน: ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เฟอร์รัสไอออน: ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น	0.00	1	1:1	0.61
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		0.60
3	1:0	0.00	3		0.62
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		0.61
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		1.56
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด 1:0	0.00	1	1:2	0.16
2		0.01	2		0.15
3		0.01	3		0.15
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.15
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		5.31
1	น้ำกลั่น	2.36	1	1:3	0.26
2	หลังการบำบัด	2.36	2		0.27
3	(Blank : 1:0)	2.37	3		0.28
ค่าเฉลี่ย		2.36	ค่าเฉลี่ย		0.27
SD		0.01	SD		0.01
%RSD		0.25	%RSD		3.58
1	น้ำเสียสังเคราะห์	1.58	1	1:4	0.24
2	ลิกนินหลังการบำบัด	1.56	2		0.23
3	(Control : 1:0)	1.57	3		0.23
ค่าเฉลี่ย		1.57	ค่าเฉลี่ย		0.23
SD		0.01	SD		0.01
%RSD		0.61	%RSD		4.29
			1	1:5	0.02
			2		0.01
			3		0.04
			ค่าเฉลี่ย		0.02
			SD		0.01
			%RSD		55.19

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ครั้งที่	พีเอช	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	พีเอช	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น	0.00	1	2	710.36	68.29
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		792.32	64.63
3	(ไม่ปรับพีเอช : 5.54)	0.00	3		546.43	75.61
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		683.03	69.51
SD		0.00	SD		125.20	5.59
%RSD		0.00	%RSD		18.33	8.04
1	น้ำเสียสังเคราะห์	<del>2,404.28</del>	1	3	109.29	95.12
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	2,240.35	2		109.29	95.12
3	(ไม่ปรับพีเอช : 7.31)	2,240.35	3		109.29	95.12
ค่าเฉลี่ย		2240.35	ค่าเฉลี่ย		109.29	95.12
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	0.00	1	4	251.36	88.78
2	Blank	0.00	2		<del>218.57</del>	<del>90.24</del>
3	(ไม่ปรับพีเอช : 5.54)	0.00	3		251.36	88.78
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		251.36	88.78
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน	1,256.78	1	5	<del>513.64</del>	<del>77.07</del>
2	หลังการบำบัด Control	1,256.78	2		480.86	78.54
3	(ไม่ปรับพีเอช : 7.31)	<del>764.00</del>	3		480.86	78.54
ค่าเฉลี่ย		1,256.78	ค่าเฉลี่ย		480.86	78.54
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		43.90	1	6	546.43	75.61
			2		612.00	72.68
			3		513.64	77.07
			ค่าเฉลี่ย		557.36	75.12
			SD		50.08	2.24
			%RSD		8.99	2.98

หมายเหตุ เส้นคาสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองการศึกษาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	พีเอช	ความเข้มข้น (ADMI)	ครั้งที่	พีเอช	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
1	น้ำกลั่น	3.31	1	2	67.40	97.97
2	ก่อนการบำบัด	3.31	2		58.78	98.23
3	(ไม่ปรับพีเอช : 5.54)	3.31	3		68.44	97.94
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		64.87	98.04
SD		0.00	SD		5.30	0.16
%RSD		0.00	%RSD		8.17	0.16
1	น้ำเสียสังเคราะห์	3,320.04	1	3	60.46	98.18
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	3,317.32	2		67.74	97.96
3	(ไม่ปรับพีเอช : 7.31)	3,317.32	3		59.60	98.20
ค่าเฉลี่ย		3,318.23	ค่าเฉลี่ย		62.60	98.11
SD		1.57	SD		4.47	0.13
%RSD		0.05	%RSD		7.15	0.14
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	5.76	1	4	58.59	98.23
2	Blank	5.71	2		55.07	98.34
3	(ไม่ปรับพีเอช : 5.54)	5.80	3		55.20	98.34
ค่าเฉลี่ย		5.76	ค่าเฉลี่ย		56.29	98.30
SD		0.05	SD		1.99	0.06
%RSD		0.78	%RSD		3.54	0.06
1	น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน	140.11	1	5	69.64	97.90
2	หลังการบำบัด Control	139.89	2		65.02	98.04
3	(ไม่ปรับพีเอช : 7.31)	134.94	3		63.40	98.09
ค่าเฉลี่ย		138.31	ค่าเฉลี่ย		66.02	98.01
SD		2.93	SD		3.24	0.10
%RSD		2.12	%RSD		4.90	0.10
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		95.83	1	6	97.38	97.07
			2		99.00	97.02
			3		114.59	96.55
			ค่าเฉลี่ย		103.66	96.88
			SD		9.51	0.29
			%RSD		9.17	0.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	พีเอช	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	พีเอช	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด (ไม่ปรับพีเอช : 5.54)	0.00	1	2	0.12
2		0.00	2		0.13
3		0.00	3		0.19
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		0.15
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		6.82
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด (ไม่ปรับพีเอช : 7.31)	0.00	1	3	0.15
2		0.01	2		0.13
3		0.01	3		0.15
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.14
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		9.33
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด Blank (ไม่ปรับพีเอช : 5.54)	0.02	1	4	0.08
2		0.01	2		0.07
3		0.04	3		0.05
ค่าเฉลี่ย		0.02	ค่าเฉลี่ย		0.07
SD		0.02	SD		0.02
%RSD		65.47	%RSD		25.18
1	น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน หลังการบำบัด Control (ไม่ปรับพีเอช : 7.31)	0.92	1	5	0.79
2		0.91	2		0.81
3		0.89	3		0.84
ค่าเฉลี่ย		0.91	ค่าเฉลี่ย		0.81
SD		0.02	SD		0.03
%RSD		1.75	%RSD		3.09
			1	6	0.81
			2		0.83
			3		0.84
			ค่าเฉลี่ย		0.83
			SD		0.02
			%RSD		1.93

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-10 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ครั้งที่	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
1	น้ำกลั่น	0.00	1	10	1,024.98	52.50
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		<del>1,186.82</del>	<del>45.00</del>
3	(0)	0.00	3		1,024.98	52.50
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		1,024.98	52.50
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	<del>2,319.69</del>	1	20	<del>776.83</del>	<del>64.00</del>
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	2,157.85	2		922.48	57.25
3	(0)	2,157.85	3		922.48	57.25
ค่าเฉลี่ย		2,157.85	ค่าเฉลี่ย		922.48	57.25
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	0.00	1	30	409.99	81.00
2	(Blank : 0)	0.00	2		409.99	81.00
3		0.00	3		409.99	81.00
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		409.99	81.00
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	1,850.36	1	40	<del>102.50</del>	95.25
2	ลิกนินหลังการบำบัด	<del>1,737.07</del>	2		118.68	94.50
3	(Control : 0)	1,850.36	3		118.68	94.50
ค่าเฉลี่ย		1,850.36	ค่าเฉลี่ย		118.68	94.50
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		14.25	1	50	102.50	95.25
			2		102.50	95.25
			3		102.50	95.25
			ค่าเฉลี่ย		102.50	95.25
			SD		0.00	0.00
			%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มข้น (ADMI)	ครั้งที่	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
1	น้ำกลั่น	3.31	1	10	140.60	95.76
2	ก่อนการบำบัด	3.31	2		140.61	95.76
3	(0)	3.31	3		<del>152.26</del>	<del>95.41</del>
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		140.60	95.76
SD		0.00	SD		0.01	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.01	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	3,320.04	1	20	86.79	97.38
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	3,317.32	2		93.06	97.20
3	(0)	3,317.32	3		86.37	97.40
ค่าเฉลี่ย		3,318.23	ค่าเฉลี่ย		88.74	97.33
SD		1.57	SD		3.74	0.11
%RSD		0.05	%RSD		4.22	0.12
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	7.60	1	30	77.93	97.65
2	(Blank : 0)	7.62	2		79.25	97.61
3		7.63	3		80.69	97.57
ค่าเฉลี่ย		7.61	ค่าเฉลี่ย		79.29	97.61
SD		0.01	SD		1.38	0.04
%RSD		0.18	%RSD		1.74	0.04
1	น้ำเสียสังเคราะห์	<del>295.50</del>	1	40	66.72	98.34
2	ลิกนินหลังการบำบัด	207.10	2		67.93	98.35
3	(Control : 0)	205.67	3		69.25	98.34
ค่าเฉลี่ย		206.38	ค่าเฉลี่ย		67.97	98.35
SD		1.01	SD		1.27	0.01
%RSD		0.49	%RSD		1.86	0.01
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		93.78	1	50	45.91	98.62
			2		48.97	98.52
			3		47.20	98.58
			ค่าเฉลี่ย		47.36	98.57
			SD		1.54	0.05
			%RSD		3.24	0.05

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ คือ การตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-12 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น	0.00	1	10	0.15
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		0.16
3	(0)	0.00	3		0.17
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		0.16
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		8.79
1	น้ำเสียสังเคราะห์	0.00	1	20	0.14
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	0.01	2		0.16
3	(0)	0.01	3		0.15
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.15
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		6.39
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	0.02	1	30	0.18
2	(Blank : 0)	0.03	2		0.15
3		0.05	3		0.12
ค่าเฉลี่ย		0.04	ค่าเฉลี่ย		0.15
SD		0.01	SD		0.03
%RSD		41.50	%RSD		20.10
1	น้ำเสียสังเคราะห์	0.15	1	40	0.16
2	ลิกนินหลังการบำบัด	0.19	2		0.15
3	(Control : 0)	0.17	3		0.15
ค่าเฉลี่ย		0.17	ค่าเฉลี่ย		0.15
SD		0.02	SD		0.01
%RSD		11.74	%RSD		6.56
			1	50	0.10
			2		0.11
			3		0.18
			ค่าเฉลี่ย		0.13
			SD		0.01
			%RSD		7.69

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าความเข้มแสงที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ครั้งที่	ค่าความเข้มแสง (ลักซ์)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ค่าความเข้มแสง (ลักซ์)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์ การบำบัด
1	น้ำกลั่น	0.00	1	100	99.39	95.38
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		99.39	95.38
3	(0)	0.00	3		99.39	95.38
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		99.39	95.38
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	<del>2,319.08</del>	1	200	99.39	95.38
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	2,153.43	2		99.39	95.38
3	(0)	2,153.43	3		<del>115.95</del>	<del>94.62</del>
ค่าเฉลี่ย		2,153.43	ค่าเฉลี่ย		99.39	95.38
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	0.00	1	300	99.39	95.38
2	(Blank : 0)	0.00	2		99.39	95.38
3		0.00	3		<del>115.95</del>	<del>94.62</del>
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		99.39	95.38
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	1,590.23	1	400	66.26	96.92
2	ลิกนินหลังการบำบัด	<del>1,325.19</del>	2		<del>82.82</del>	<del>96.15</del>
3	(Control : 0)	1,590.23	3		66.26	96.92
ค่าเฉลี่ย		1,590.23	ค่าเฉลี่ย		66.26	96.92
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		26.15	1	500	49.69	97.69
			2		<del>66.26</del>	<del>96.92</del>
			3		49.69	97.69
			ค่าเฉลี่ย		49.69	97.69
			SD		0.00	0.00
			%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-14 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าความเข้มแสงที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	ค่าความเข้มแสง (ลักซ์)	ความเข้มสี (ADMI)	ครั้งที่	ค่าความเข้มแสง (ลักซ์)	ความเข้มสี (ADMI)	เปอร์เซ็นต์ การบำบัด
1	น้ำกลั่น	3.31	1	100	78.38	97.64
2	ก่อนการบำบัด	3.31	2		66.19	98.01
3	(0)	3.31	3		67.74	97.96
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		70.77	97.87
SD		0.00	SD		6.64	0.20
%RSD		0.00	%RSD		9.38	0.20
1	น้ำเสียสังเคราะห์	3,320.04	1	200	36.97	98.89
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	3,317.32	2		37.95	98.86
3	(0)	3,317.32	3		39.13	98.82
ค่าเฉลี่ย		3,318.23	ค่าเฉลี่ย		38.02	98.85
SD		1.57	SD		1.08	0.03
%RSD		0.05	%RSD		2.85	0.03
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	6.60	1	300	33.70	98.98
2	(Blank : 0)	6.64	2		38.74	98.83
3		6.65	3		34.82	98.95
ค่าเฉลี่ย		6.63	ค่าเฉลี่ย		35.75	98.92
SD		0.03	SD		2.65	0.08
%RSD		0.41	%RSD		7.40	0.08
1	น้ำเสียสังเคราะห์	140.79	1	400	41.92	98.74
2	ลิกนินหลังการบำบัด	143.02	2		33.70	98.98
3	(Control : 0)	145.38	3		30.23	99.09
ค่าเฉลี่ย		144.20	ค่าเฉลี่ย		35.28	98.94
SD		1.67	SD		6.01	0.18
%RSD		1.16	%RSD		17.03	0.18
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		95.65	1	500	28.93	99.13
			2		57.84	98.26
			3		30.23	99.09
			ค่าเฉลี่ย		39.00	98.82
			SD		16.33	0.49
			%RSD		41.87	0.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-15 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	ค่าความเข้มข้น (ลิกซ์)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ค่าความเข้มข้น (ลิกซ์)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น	0.00	1	100	0.11
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		0.14
3	(0)	0.00	3		0.15
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		0.13
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		7.44
1	น้ำเสียสังเคราะห์	0.01	1	200	0.14
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	0.01	2		0.13
3	(0)	0.01	3		0.12
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.13
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		7.69
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	0.17	1	300	0.05
2	(Blank : 0)	0.18	2		0.09
3		0.15	3		0.07
ค่าเฉลี่ย		0.17	ค่าเฉลี่ย		0.07
SD		0.01	SD		0.02
%RSD		8.84	%RSD		28.45
1	น้ำเสียสังเคราะห์	0.22	1	400	0.03
2	ลิกนินหลังการบำบัด	0.20	2		0.07
3	(Control : 0)	0.21	3		0.06
ค่าเฉลี่ย		0.21	ค่าเฉลี่ย		0.05
SD		0.01	SD		0.02
%RSD		4.55	%RSD		38.30
			1	500	0.07
			2		0.04
			3		0.06
			ค่าเฉลี่ย		0.06
			SD		0.01
			%RSD		25.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-16 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (ซีไอดี)

ครั้งที่	เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด (0)	0.00	1	5	<del>662.07</del>	<del>69.23</del>
2		0.00	2		579.31	73.08
3		0.00	3		579.31	73.08
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		579.31	73.08
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด (0)	2,317.24	1	10	99.31	95.38
2		2,151.72	2		99.31	95.38
3		2,151.72	3		99.31	95.38
ค่าเฉลี่ย		2,151.72	ค่าเฉลี่ย		99.31	95.38
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด (Blank : 0)	0.00	1	20	99.31	95.38
2		0.00	2		99.31	95.38
3		0.00	3		99.31	95.38
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		99.31	95.38
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (Control : 0)	1,489.66	1	30	<del>132.41</del>	<del>93.85</del>
2		1,489.66	2		99.31	95.38
3		1,489.66	3		99.31	95.38
ค่าเฉลี่ย		1,489.66	ค่าเฉลี่ย		99.31	95.38
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		30.77	1	40	115.86	94.62
			2		<del>99.31</del>	<del>95.38</del>
			3		115.86	94.62
			ค่าเฉลี่ย		115.86	94.62
			SD		0.00	0.00
			%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาคาสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-17 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มสี (ADMI)	ครั้งที่	เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มสี (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	
1	น้ำกลั่น	3.31	1	5	104.37	96.85	
2	ก่อนการบำบัด	3.31	2		99.10	97.01	
3	(0)	3.31	3		104.48	96.85	
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		104.42	96.85	
SD		0.00	SD		0.08	0.00	
%RSD		0.00	%RSD		0.07	0.00	
1	น้ำเสียสังเคราะห์	3,320.04	1	10	36.97	98.89	
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	3,317.32	2		37.95	98.86	
3	(0)	3,317.32	3		37.13	98.82	
ค่าเฉลี่ย		3,318.23	ค่าเฉลี่ย		37.35	98.85	
SD		1.57	SD		0.52	0.03	
%RSD		0.05	%RSD		1.40	0.03	
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	6.62	1	20	36.69	98.89	
2	(Blank : 0)	15.85	2		34.63	98.96	
3		8.78	3		36.44	98.90	
ค่าเฉลี่ย		10.42	ค่าเฉลี่ย		35.92	98.92	
SD		4.83	SD		1.13	0.03	
%RSD		46.33	%RSD		3.13	0.03	
1	น้ำเสียสังเคราะห์	201.20	1	30	35.92	98.92	
2	ลิกนินหลังการบำบัด	205.17	2		34.58	98.96	
3	(Control : 0)	205.98	3		36.15	98.91	
ค่าเฉลี่ย		204.12	ค่าเฉลี่ย		35.55	98.93	
SD		2.56	SD		0.85	0.03	
%RSD		1.25	%RSD		2.39	0.03	
เปอร์เซ็นต์การบำบัด			1	40	33.10	99.00	
			2		36.08	98.91	
			3		39.29	98.82	
			ค่าเฉลี่ย		34.59	98.96	
			SD		2.11	0.06	
			%RSD		6.11	0.06	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-18 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด (0)	0.00	1	5	0.29
2		0.00	2		0.20
3		0.00	3		0.21
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		0.23
SD		0.00	SD		0.05
%RSD		0.00	%RSD		21.52
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด (0)	0.00	1	10	0.13
2		0.01	2		0.15
3		0.01	3		0.16
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.15
SD		0.00	SD		0.02
%RSD		0.00	%RSD		10.34
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด (Blank : 0)	0.21	1	20	0.13
2		0.20	2		0.11
3		0.28	3		0.19
ค่าเฉลี่ย		0.20	ค่าเฉลี่ย		0.14
SD		0.04	SD		0.04
%RSD		21.18	%RSD		29.23
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (Control : 0)	0.16	1	30	0.04
2		0.13	2		0.08
3		0.14	3		0.03
ค่าเฉลี่ย		0.14	ค่าเฉลี่ย		0.05
SD		0.02	SD		0.03
%RSD		10.66	%RSD		49.72
			1	40	0.07
			2		0.03
			3		0.02
			ค่าเฉลี่ย		0.04
			SD		0.03
			%RSD		66.14

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-19 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา  
ที่เหมาะสม (ซีไอดี)

ครั้งที่	เวลาการใช้คลื่น ความถี่เหนือเสียงใน การเกิดปฏิกิริยา (นาท)	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เวลาการใช้คลื่น ความถี่เหนือเสียงใน การเกิดปฏิกิริยา (นาท)	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์ การบำบัด
1	น้ำกลั่น	0.00	1	5	474.55	75.71
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		<del>390.80</del>	<del>80.00</del>
3	(0)	0.00	3		474.55	75.71
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		474.55	75.71
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	<del>2,121.51</del>	1	10	279.15	85.71
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	1,954.02	2		279.15	85.71
3	(0)	1,954.02	3		<del>262.40</del>	<del>86.57</del>
ค่าเฉลี่ย		1,954.02	ค่าเฉลี่ย		279.15	85.71
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	0.00	1	20	262.40	86.57
2	(Blank : 0)	0.00	2		295.89	84.86
3		0.00	3		279.15	85.71
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		279.15	85.71
SD		0.00	SD		16.75	0.86
%RSD		0.00	%RSD		6.00	1.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	1,619.05	1	30	195.40	90.00
2	ลิกนินหลังการบำบัด	1,786.54	2		<del>212.15</del>	<del>89.14</del>
3	(Control : 0)	1,451.56	3		195.40	90.00
ค่าเฉลี่ย		1,619.05	ค่าเฉลี่ย		195.40	90.00
SD		167.49	SD		0.00	0.00
%RSD		10.34	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		17.14	1	40	195.40	90.00
			2		195.40	90.00
			3		<del>212.15</del>	<del>89.14</del>
			ค่าเฉลี่ย		195.40	90.00
			SD		0.00	0.00
			%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-20 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา  
ที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	เวลาการใช้คลื่น ความถี่เหนือเสียงใน การเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มข้น (ADMI)	ครั้งที่	เวลาการใช้คลื่น ความถี่เหนือเสียงใน การเกิดปฏิกิริยา (นาที)	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์ การบำบัด
1	น้ำกลั่น	3.31	1	5	185.88	94.40
2	ก่อนการบำบัด	3.31	2		186.43	94.38
3	(0)	3.31	3		186.14	94.39
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		186.15	94.39
SD		0.00	SD		0.28	0.01
%RSD		0.00	%RSD		0.15	0.01
1	น้ำเสียสังเคราะห์	3,320.04	1	10	186.13	94.39
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	3,317.32	2		184.24	94.45
3	(0)	3,317.32	3		183.88	94.46
ค่าเฉลี่ย		3,318.23	ค่าเฉลี่ย		184.75	94.43
SD		1.57	SD		1.21	0.04
%RSD		0.05	%RSD		0.65	0.04
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	6.61	1	20	180.77	94.55
2	(Blank : 0)	7.75	2		101.21	96.95
3		8.75	3		181.10	94.54
ค่าเฉลี่ย		7.70	ค่าเฉลี่ย		180.94	94.55
SD		1.07	SD		0.23	0.01
%RSD		13.90	%RSD		0.13	0.01
1	น้ำเสียสังเคราะห์	202.89	1	30	90.03	97.29
2	ลิกนินหลังการบำบัด	205.99	2		89.82	97.29
3	(Control : 0)	204.71	3		83.91	97.47
ค่าเฉลี่ย		204.53	ค่าเฉลี่ย		87.92	97.35
SD		1.56	SD		3.48	0.10
%RSD		0.76	%RSD		3.95	0.11
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		93.84	1	40	67.95	97.95
			2		65.96	98.01
			3		66.40	98.00
			ค่าเฉลี่ย		66.77	97.99
			SD		1.04	0.03
			%RSD		1.56	0.03

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-21 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	เวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	เวลาการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น	0.00	1	5	0.23
2	ก่อนการบำบัด	0.00	2		0.23
3	(0)	0.00	3		0.23
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		0.23
SD		0.00	SD		0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์	0.00	1	10	0.30
2	ลิกนินก่อนการบำบัด	0.01	2		0.21
3	(0)	0.01	3		0.21
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.26
SD		0.00	SD		0.04
%RSD		0.00	%RSD		17.40
1	น้ำกลั่นหลังการบำบัด	0.21	1	20	0.28
2	(Blank : 0)	0.20	2		0.28
3		0.20	3		0.29
ค่าเฉลี่ย		0.21	ค่าเฉลี่ย		0.28
SD		0.01	SD		0.01
%RSD		3.52	%RSD		2.80
1	น้ำเสียสังเคราะห์	0.24	1	30	0.24
2	ลิกนินหลังการบำบัด	0.24	2		0.26
3	(Control : 0)	0.24	3		0.26
ค่าเฉลี่ย		0.24	ค่าเฉลี่ย		0.25
SD		0.00	SD		0.01
%RSD		0.00	%RSD		4.02
			1	40	0.23
			2		0.23
			3		0.24
			ค่าเฉลี่ย		0.23
			SD		0.01
			%RSD		4.34

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-22 ผลการทดลองการศึกษาหากระบวนการบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจริงจาก  
อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ (ซีโอดี)

ครั้งที่	กระบวนการบำบัด	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัดซีโอดี
1	น้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ก่อนการบำบัด	2,400.00	
2		<del>2,086.96</del>	
3		2,400.00	
ค่าเฉลี่ย		2,400.00	
SD		0.00	
%RSD		0.00	
1	กระบวนการฟenton	278.26	<del>88.41</del>
2		236.52	90.14
3		236.52	90.14
ค่าเฉลี่ย		236.52	90.14
SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	0.00
1	กระบวนการโฟโต-ฟenton	118.26	95.07
2		118.26	95.07
3		118.26	95.07
ค่าเฉลี่ย		118.26	95.07
SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	0.00
1	กระบวนการไฮโดร-ฟenton	403.48	83.19
2		403.48	83.19
3		403.48	83.19
ค่าเฉลี่ย		403.48	83.19
SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-23 ผลการทดลองการศึกษาหากระบวนการบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจริงจาก  
อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ (สี)

ครั้งที่	กระบวนการบำบัด	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การบำบัดสี
1	น้ำเสียอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ก่อนการบำบัด	2,425.98	
2		2,531.01	
3		2,457.69	
ค่าเฉลี่ย		2441.83	
SD		22.42	
%RSD		0.92	
1	กระบวนการฟenton	463.96	81.00
2		478.66	80.40
3		471.48	80.69
ค่าเฉลี่ย		471.37	80.70
SD		7.35	0.30
%RSD		1.56	0.37
1	กระบวนการโฟโต-ฟenton	201.27	91.76
2		280.76	88.50
3		200.75	91.78
ค่าเฉลี่ย		201.01	91.77
SD		0.37	0.02
%RSD		0.18	0.02
1	กระบวนการโซโน-ฟenton	883.66	63.81
2		874.33	64.19
3		878.31	64.03
ค่าเฉลี่ย		878.77	64.01
SD		4.68	0.19
%RSD		0.53	0.30

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-24 ผลการทดลองการศึกษาหากระบวนการบำบัดที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจริงจาก  
อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ (เหล็ก)

ครั้งที่	กระบวนการบำบัด	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	กระบวนการเพนตัน	1.94
2		1.25
3		1.03
ค่าเฉลี่ย		1.41
SD		0.47
%RSD		33.52
1	กระบวนการโฟโต-เพนตัน	0.83
2		0.52
3		0.12
ค่าเฉลี่ย		0.49
SD		0.35
%RSD		72.33
1	กระบวนการโซโน-เพนตัน	2.13
2		2.05
3		2.15
ค่าเฉลี่ย		2.11
SD		0.05
%RSD		2.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-25 ผลการทดลองการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 ที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไดออกไซด์ที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไดออกไซด์ที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด	0.00	1	10%	108.57	94.41
2		0.00	2		<del>125.71</del>	<del>93.53</del>
3		0.00	3		108.57	94.41
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		108.57	94.41
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด	<del>2,114.29</del>	1	20%	125.71	93.53
2		1,942.86	2		74.29	96.18
3		1,942.86	3		108.57	94.41
ค่าเฉลี่ย		1,942.86	ค่าเฉลี่ย		102.86	94.71
SD		0.00	SD		26.19	1.35
%RSD		0.00	%RSD		25.46	1.42
1	น้ำกลั่น หลังการบำบัด (100%)	22.86	1	30%	217.14	88.82
2		22.86	2		251.43	87.06
3		<del>40.00</del>	3		285.71	85.29
ค่าเฉลี่ย		22.86	ค่าเฉลี่ย		251.43	87.06
SD		0.00	SD		34.29	1.76
%RSD		0.00	%RSD		13.64	2.03
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (100%)	1,428.57	1	40%	<del>634.29</del>	<del>67.35</del>
2		1,428.57	2		582.86	70.00
3		1,428.57	3		582.86	70.00
ค่าเฉลี่ย		1,428.57	ค่าเฉลี่ย		582.86	70.00
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		26.47	1	50%	1,000.00	48.53
			2		1,000.00	48.53
			3		1,000.00	48.53
			ค่าเฉลี่ย		1,000.00	48.53
			SD		0.00	0.00
			%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-26 ผลการทดลองการศึกษานำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 ที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น (ADMI)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด	3.31	1	10%	124.18	95.99
2		3.31	2		126.28	95.93
3		3.31	3		127.62	95.88
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		126.03	95.93
SD		0.00	SD		1.73	0.06
%RSD		0.00	%RSD		1.37	0.06
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด	3,098.55	1	20%	156.80	94.94
2		3,098.55	2		155.90	94.97
3		3,102.99	3		159.29	94.86
ค่าเฉลี่ย		3,100.03	ค่าเฉลี่ย		157.33	94.92
SD		2.57	SD		1.76	0.06
%RSD		0.08	%RSD		1.12	0.06
1	น้ำกลั่น หลังการบำบัด (100%)	3.85	1	30%	176.86	94.29
2		4.03	2		193.48	93.76
3		3.66	3		194.59	93.72
ค่าเฉลี่ย		3.85	ค่าเฉลี่ย		188.31	93.93
SD		0.19	SD		9.93	0.32
%RSD		4.81	%RSD		5.27	0.34
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (100%)	2,697.32	1	40%	558.71	81.98
2		2,694.46	2		560.80	81.91
3		2,696.74	3		561.99	81.87
ค่าเฉลี่ย		2,696.17	ค่าเฉลี่ย		560.50	81.92
SD		1.51	SD		1.66	0.05
%RSD		0.06	%RSD		0.30	0.07
เปอร์เซ็นต์การบำบัด			1	50%	1,727.96	44.26
			2		1,729.11	44.22
			3		1,730.65	44.17
			ค่าเฉลี่ย		1,729.24	44.22
			SD		1.35	0.04
			%RSD		0.08	0.10

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-27 ผลการทดลองการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 1 ที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด	0.00	1	10%	1.34
2		0.00	2		1.36
3		0.00	3		1.38
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		1.36
SD		0.00	SD		0.02
%RSD		0.00	%RSD		1.38
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด	0.01	1	20%	0.89
2		0.01	2		0.90
3		0.01	3		0.87
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		0.89
SD		0.00	SD		0.02
%RSD		0.00	%RSD		1.74
1	น้ำกลั่น หลังการบำบัด (100%)	0.09	1	30%	0.34
2		0.04	2		0.33
3		0.05	3		0.31
ค่าเฉลี่ย		0.06	ค่าเฉลี่ย		0.32
SD		0.03	SD		0.01
%RSD		44.10	%RSD		4.52
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (100%)	0.04	1	40%	0.20
2		0.07	2		0.23
3		0.08	3		0.22
ค่าเฉลี่ย		0.06	ค่าเฉลี่ย		0.22
SD		0.02	SD		0.02
%RSD		32.87	%RSD		7.33
			1	50%	0.05
			2		0.07
			3		0.08
			ค่าเฉลี่ย		0.07
			SD		0.02
			%RSD		22.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-28 ผลการทดลองการศึกษาการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด	0.00	1	10%	133.33	93.10
2		0.00	2		133.33	93.10
3		0.00	3		133.33	93.10
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		133.33	93.10
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด	<del>2,133.33</del>	1	20%	<del>186.67</del>	<del>90.34</del>
2		1,933.33	2		146.67	92.41
3		1,933.33	3		146.67	92.41
ค่าเฉลี่ย		1,933.33	ค่าเฉลี่ย		146.67	92.41
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำกลั่น หลังการบำบัด (100%)	<del>53.33</del>	1	30%	366.67	81.03
2		33.33	2		366.67	81.03
3		33.33	3		366.67	81.03
ค่าเฉลี่ย		33.33	ค่าเฉลี่ย		366.67	81.03
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (100%)	1,466.67	1	40%	800.00	58.62
2		1,466.67	2		800.00	58.62
3		1,466.67	3		800.00	58.62
ค่าเฉลี่ย		1,466.67	ค่าเฉลี่ย		800.00	58.62
SD		0.00	SD		0.00	0.00
%RSD		0.00	%RSD		0.00	0.00
เปอร์เซ็นต์การบำบัด		24.14	1	50%	1,100.00	43.10
			2		1,100.00	43.10
			3		1,100.00	43.10
			ค่าเฉลี่ย		1,100.00	43.10
			SD		0.00	0.00
			%RSD		0.00	0.00

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-29 ผลการทดลองการศึกษาหาการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ที่เหมาะสม (สี)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น (ADMI)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เพอร์สไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ความเข้มข้น (ADMI)	เปอร์เซ็นต์การ บำบัด
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด	3.31	1	10%	243.12	92.16
2		3.31	2		244.37	92.12
3		3.31	3		246.48	92.05
ค่าเฉลี่ย		3.31	ค่าเฉลี่ย		244.66	92.11
SD		0.00	SD		1.70	0.05
%RSD		0.00	%RSD		0.69	0.06
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด	3,098.55	1	20%	306.12	90.13
2		3,098.55	2		308.27	90.06
3		3,102.99	3		309.96	90.00
ค่าเฉลี่ย		3,100.03	ค่าเฉลี่ย		308.12	90.06
SD		2.57	SD		1.93	0.06
%RSD		0.08	%RSD		0.63	0.07
1	น้ำกลั่น หลังการบำบัด (100%)	6.29	1	30%	615.16	80.16
2		5.74	2		611.79	80.27
3		3.58	3		613.87	80.20
ค่าเฉลี่ย		5.20	ค่าเฉลี่ย		613.61	80.21
SD		1.43	SD		1.70	0.05
%RSD		27.45	%RSD		0.28	0.07
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (100%)	2,763.49	1	40%	1086.46	64.95
2		2,684.49	2		979.20	68.41
3		2,761.40	3		982.10	68.32
ค่าเฉลี่ย		2,736.46	ค่าเฉลี่ย		980.65	68.37
SD		1.48	SD		2.05	0.07
%RSD		0.05	%RSD		0.21	0.10
เปอร์เซ็นต์การบำบัด			1	50%	1,988.73	35.85
			2		1,991.44	35.76
			3		1,986.49	35.92
			ค่าเฉลี่ย		1,987.61	35.88
			SD		1.59	0.05
			%RSD		0.08	0.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-30 ผลการทดลองการศึกษาหาการนำกลับมาใช้ใหม่ครั้งที่ 2 ที่เหมาะสม (เหล็ก)

ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)	ครั้งที่	ความเข้มข้น เฟอร์รัสไอออนที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	เหล็ก (มิลลิกรัม/ลิตร)
1	น้ำกลั่น ก่อนการบำบัด	0.00	1	10%	2.65
2		0.00	2		2.61
3		0.00	3		2.60
ค่าเฉลี่ย		0.00	ค่าเฉลี่ย		2.62
SD		0.00	SD		0.03
%RSD		0.00	%RSD		0.97
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินก่อนการบำบัด	0.01	1	20%	1.71
2		0.01	2		1.74
3		0.01	3		1.75
ค่าเฉลี่ย		0.01	ค่าเฉลี่ย		1.73
SD		0.00	SD		0.02
%RSD		0.00	%RSD		1.16
1	น้ำกลั่น หลังการบำบัด (100%)	0.05	1	30%	0.76
2		0.04	2		0.77
3		0.03	3		0.78
ค่าเฉลี่ย		0.04	ค่าเฉลี่ย		0.77
SD		0.01	SD		0.01
%RSD		21.43	%RSD		1.24
1	น้ำเสียสังเคราะห์ ลิกนินหลังการบำบัด (100%)	0.05	1	40%	0.63
2		0.03	2		0.55
3		0.04	3		0.51
ค่าเฉลี่ย		0.04	ค่าเฉลี่ย		0.56
SD		0.01	SD		0.06
%RSD		20.58	%RSD		10.27
			1	50%	0.42
			2		0.43
			3		0.44
			ค่าเฉลี่ย		0.43
			SD		0.01
			%RSD		1.69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุกัญญา โป่งรักษ์
วัน เดือน ปีเกิด	5 ตุลาคม พ.ศ. 2529
ที่อยู่	197/4 ม.9 ต.น้ำซำ อ.สูงเม่น จ.แพร่ 54130
ประวัติการศึกษา	2548 ครุศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี เกรดเฉลี่ย 3.00 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ 2555 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม เกรดเฉลี่ย 3.50
ผลงานวิชาการ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เรื่อง การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนลิกนินด้วยกระบวนการเฟนตัน (TREATMENT OF WASTEWATER LIGNIN CONTAMINATED USING THE FENTON) การประชุมวิชาการระดับชาติ มศว วิจัย ครั้งที่ 8 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ระหว่างวันที่ 26-27 พฤศจิกายน 2557 ณ อาคารนวัตกรรม ศาสตราจารย์ ดร.สาโรช บัวศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้