

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออน

LIGNIN CONTAMINATED WASTEWATER TREATMENT
BY PERSULFATE/FERROUS ION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีสิ่งแวดล้อม)
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ **ปีการศึกษา 2561** ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LIGNIN CONTAMINATED WASTEWATER TREATMENT
BY PERSULFATE/FERROUS ION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (ENVIRONMENTAL CHEMISTRY)
DEPARTMENT OF CHEMISTRY, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า

ACADEMIC YEAR 2018

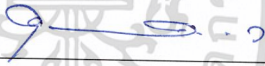


ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออน

Lignin Contaminated Wastewater Treatment by
Persulfate/Ferrous ion

ชื่อนักศึกษา นายพิชาญ์พล บุญครอง รหัสนักศึกษา 58050660
นางสาวสินาวดี มาลัย รหัสนักศึกษา 58050691
นางสาวอัญญา คำหอม รหัสนักศึกษา 58050703
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี
สิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออน Lignin Contaminated Wastewater Treatment by Persulfate/Ferrous ion	
ชื่อนักศึกษา	นายพิชาญ์พล บุญครอง	58050660
	นางสาวสินาวดี มาลัย	58050691
	นางสาวอัญญา คำหอม	58050703
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
คณะ	วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ปีการศึกษา	2561	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการบำบัด COD ของน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน และการบำบัดค่าสี ด้วยวิธีเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออน และ วิธีเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออนโดยมีกระบวนการโซนิเคชันร่วมด้วย โดยน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินที่มีปริมาณความเข้มข้นของซีโอดีอยู่ประมาณ 923.36 มิลลิกรัม/ลิตร มีค่าพีเอชประมาณ 7-8 และค่าสีประมาณ 1,550.44 ADMI โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ในการบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน โดยมีปัจจัยต่าง ๆ ที่ศึกษาในกระบวนการเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออน ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน/โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 1: 0-1: 5 ค่า พีเอช 2-6 และ ไม่ทำการปรับพีเอช และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 10-50 นาที ส่วนปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาในกระบวนการเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออนโดยมีกระบวนการโซนิเคชันร่วมด้วย ได้แก่ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 10-50 นาที โดยมีการทำการทดลองกับน้ำกลั่นเพื่อเป็นแบลนด์ และการทดลองทั้งหมดทำซ้ำ 3 ครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน/โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 1: 1 ค่าพีเอช 2 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีและสี 90.83 เปอร์เซ็นต์ และ 97.62 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในกระบวนการเปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออนโดยมีกระบวนการโซนิเคชันร่วมด้วย ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีและสี 82.25 เปอร์เซ็นต์ และ 75.14 เปอร์เซ็นต์ พบว่า กระบวนการบำบัดด้วย เปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออนมีความสามารถในการบำบัดสีและซีโอดีได้มากกว่าการบำบัดด้วยเปอร์ ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออนโดยมีกระบวนการโซนิเคชันร่วมด้วย

คำสำคัญ : เปอร์ซัลเฟต/เฟอร์รัสไอออน, โซนิเคชัน, ซีโอดี, ลิกนิน
 เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Lignin Contaminated Wastewater treatment by Persulfate/Ferrous ion		
Students	Mr. Pichapon Boonkrong	Student ID 58050660	
	Miss Sinawadee Malai	Student ID 58050691	
	Miss Anya Khamhom	Student ID 58050703	
Degree	Bachelor of Science		
Department	Environmental Chemistry		
Faculty	Science		
University	King Mongkut's Institute of technology Ladkrabang		
Academic year	2018		
Advisor	Asst. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa		

ABSTRACT

This special project is a study of the COD treatment of lignin synthetic wastewater and color treatment With Persulfate / ferrous ion method and Persulfate / ferrous ion method with the joint sonication process by synthetic lignin wastewater containing COD concentration of approximately 923.36 mg / l With a pH value of about 7-8 and a color value of about 1,550.44 ADMI by studying the optimum conditions for COD and color treatment from lignin synthetic wastewater With various factors The study of persulfate / ferrous ion processes, namely molar ratio of ferrous ions / sodium Persulfate 1: 0-1: 5, pH 2-6 and no pH adjustment And the reaction time 10-50 minutes As for the factors that have been studied in the process of persulfate / ferrous ion with the sonication process the reaction time is 10-50 minutes by experimenting with distilled water to be a shield And all trials, repeated 3 times Which can be seen that Mole ratio of ferrous ions / sodiumpersulfate 1: 1, pH 2 and reaction time of 10 minutes with the ability to treat COD and color 90.83 percent and 97.62 percent respectively In the process of persulfate / ferrous ion with the joint sonication process The reaction time of 30 minutes had the ability to treat COD and color 82.25 percent and 75.14 percent. It was found that the treatment with Persulfate / ferrous ion can treat color and COD more than the treatment with Persulfate / ferrous ion with the joint sonication process.

Keywords : Persulfate / ferrous ion , sonication , COD, lignin

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์ จากบุคลากรหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อุสารัตน์ ถาวรชัยสิทธิ์ และ ผศ.ดร.วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ อาจารย์ประจำ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ของโครงการพิเศษฉบับนี้

ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน และเป็นกำลังใจให้ตลอดมา

พิชาญ์พล บุญครอง
สินาวดี มาลัย
อัญญา คำหอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 นำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ.....	3
2.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	3
2.1.2 กระบวนการฟอกเยื่อ.....	4
2.1.3 กระบวนการการล้างเยื่อ.....	4
2.1.4 การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O ₂ Delignification).....	4
2.2 ลิกนิน.....	4
2.2.1 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน.....	5
2.2.2 การแยกประเภทลิกนิน.....	5
2.2.3 ประโยชน์ของลิกนิน.....	6
2.3 ซีโอดี.....	6
2.3.1 ความสำคัญของการวิเคราะห์ซีโอดี.....	6
2.3.2 ทฤษฎีของซีโอดีและหลักการวิเคราะห์พื้นฐาน.....	6
2.3.3 สารมาตรฐานซีโอดี.....	7
2.4 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.....	8
2.4.1 สีแท้หรือสีจริง (True color).....	8
2.4.2 สีปรากฏ (Apparent color).....	8
2.5 การวัดค่าสี ในหน่วย ADMI.....	9
2.5.1 หลักการตรวจวัดค่าสีในหน่วย ADMI.....	9
2.6 คลื่นเสียงโซนิเคชันหรืออัลตราโซนิก.....	10
2.6.1 การกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก.....	10
2.6.2 การสร้างคลื่นอัลตราซาวด์.....	11
2.6.3 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic reactor).....	13
2.7 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสีย.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.6.2 การสร้างคลื่นอัลตราซาวด์ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ใด ๆ การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง 2.6.3 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic reactor) เอกสารทุกครั้งที่มีเลขที่ 13

2.7 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสีย..... 15

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1 เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical Technology).....	15
2.7.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology).....	16
2.7.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological Technology).....	17
2.8 เปอร์ซัลเฟต (Persulfate).....	17
2.8.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปอร์ซัลเฟต.....	17
2.9 กระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน (Persulfate oxidation).....	18
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	23
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	23
3.1.1 อุปกรณ์.....	23
3.1.2 สารเคมี.....	23
3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ (ซีไอดี 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร).....	24
3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	24
3.3.1 การบำบัดซีไอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์รัสไอออน.....	24
3.3.2 การบำบัดซีไอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์รัสไอออน โดยมีกระบวนการโซนิเคชันร่วมด้วย.....	25
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	26
4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน.....	26
4.1.1 การบำบัดด้วยเพอร์รัสไอออน/เปอร์ซัลเฟต.....	26
4.2 การศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมโดยร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน.....	32
4.3 ศึกษาการเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์รัส- ไอออนกับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์รัสไอออนร่วม กับกระบวนการโซนิเคชัน.....	34
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	36
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	36
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
บรรณานุกรม.....	37
ภาคผนวก.....	40
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์น้ำเสีย.....	41
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร.....	44
ภาคผนวก ค กราฟสารละลายมาตรฐาน.....	47
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณการทดลอง.....	48
ภาคผนวก จ ภาพประกอบการทดลอง.....	50
ภาคผนวก ฉ ตารางผลการทดลองทั้งหมด.....	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเกลือเปอร์ซัลเฟต.....	19
ก-1 การวัดหาค่าทรานส์มิตแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่น.....	43
ข-1 ปริมาณเปอร์ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใช้.....	45
ข-2 ปริมาณโซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่ใช้.....	46
ค-1 ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานสี.....	47
ฉ-1 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$ ครั้งที่1(ซีไอดี)	54
ฉ-2 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$ ครั้งที่2(ซีไอดี)	55
ฉ-3 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$ ครั้งที่3(ซีไอดี)	56
ฉ-4 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสมครั้งที่1(ซีไอดี).....	57
ฉ-5 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสมครั้งที่2(ซีไอดี).....	58
ฉ-6 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสมครั้งที่3(ซีไอดี).....	59
ฉ-7 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมครั้งที่1(ซีไอดี).....	60
ฉ-8 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมครั้งที่2(ซีไอดี).....	61
ฉ-9 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมครั้งที่3(ซีไอดี).....	62
ฉ-10 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสมครั้งที่1(ซีไอดี).....	63
ฉ-11 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสมครั้งที่2(ซีไอดี).....	64
ฉ-12 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสมครั้งที่3(ซีไอดี).....	65
ฉ-13 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม(ซีไอดี).....	66
ฉ-14 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม(ซีไอดี).....	67
ฉ-15 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$ (ค่าสี).....	68
ฉ-16 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	68
ฉ-17 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	69
ฉ-18 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	69
ฉ-19 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม (ซีไอดี).....	70
ฉ-20 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$ (ค่าสี).....	70
ฉ-21 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสม (ค่าสี).....	71
ฉ-22 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม (ค่าสี).....	71
ฉ-23 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสม (ค่าสี).....	72
ฉ-24 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม (ค่าสี)....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสารตั้งต้นโดยตรงของการสังเคราะห์คลอรีน.....	5
2.2 คลื่นความถี่ของอัลตราซาวด์ในช่วงต่าง ๆ.....	10
2.3 ลิควิดไดร์.....	12
2.4 แมกนีโตสตรีกที่ฟทรานส์ติวเซอร์.....	12
2.5 พีโซอิเล็กตริกทรานส์ติวเซอร์.....	13
2.6 อ่างอัลตราโซนิก.....	14
2.7 อ่างอัลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น.....	14
2.8 ลักษณะของฮอร์นชนิดต่าง ๆ.....	15
2.9 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ.....	15
4.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของอัตราส่วนเหล็กต่อเปอร์ซัลเฟต.....	26
4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของอัตราส่วนเหล็กต่อเปอร์ซัลเฟต.....	27
4.3 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	28
4.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	29
4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม.....	30
4.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม.....	31
4.7 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีในการใช้เครื่องอัลตราโซนิก.....	32
4.8 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิก.....	33
4.9 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเปรียบเทียบการบำบัดด้วยเครื่องปั่นกวนกับเครื่องอัลตราโซนิก... ..	34
4.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเปรียบเทียบการบำบัดด้วยเครื่องปั่นกวนกับเครื่องอัลตราโซนิก... ..	35
ค-1 กราฟมาตรฐานสารละลายมาตรฐานสี.....	47
จ-1 เครื่องยูวี-วิลิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์.....	50
จ-2 เครื่องอัลตราโซนิก.....	50
จ-3 เครื่องวัดพีเอช.....	51
จ-4 เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง.....	51
จ-5 เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน.....	52
จ-6 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คลอรีนที่เจือจาง 5 เท่า.....	52
จ-7 การตกตะกอนเหล็กไอออนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) เวลา 60 นาที.....	53
จ-8 หลังกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศแล้วนำส่วนใสไปใช้ในการหาค่าซีไอดีและค่าสี.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษจัดเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาประเทศ มีปริมาณการผลิตและการส่งออกเพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้มีรายได้เข้าประเทศเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องมาจากภาคการเกษตร วัตถุดิบของการผลิตกระดาษคือเยื่อไม้ ในประเทศไทยมีจำนวนโรงงานผลิตเยื่อกระดาษทั้งสิ้น 7 โรงงาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2550) และเป็นอุตสาหกรรมที่มีแนวโน้มการขยายตัวอย่างต่อเนื่อง จึงอาจสร้างผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษเป็นอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการต้มเยื่อ ล้างเยื่อ และฟอกเยื่อ จึงทำให้เกิดการแยกกลินออกจากเส้นใยส่งผลให้น้ำเสียที่ปล่อยทิ้งจากโรงงานมีสีเข้มและค่าซีโอดีสูง ซึ่งค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อที่กำหนดไว้คือ สี (Color) ไม่เกิน 600 เอตีเอ็มไอ, ซีโอดี (COD) ไม่เกิน 400 มิลลิกรัมต่อลิตร (ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2561)

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีและมีค่า COD สูงมีหลายวิธี เช่น 1) ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติ ในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลวหรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูงเนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Duygu and Van, 2010) ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และสีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยนำวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน กะลามะพร้าว เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอบอากาศ และเผาเร่งที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อนยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200-1,600 องศาเซลเซียส (Bansal and Goyal, 2005) 2) การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane) กระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนใช้หลักการเหมือนออสโมซิสผันกลับแต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดที่เล็กกว่าทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอนินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5-2.5 นาโนเมตร และมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10-34 บาร์ (Van et.al, 1995; Seungkwan and Menachem, 1997; Yacubowicz, 2005) 3) กระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ซึ่งสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียของโรงงานฟอกย้อม โดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกิริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยังสารที่เกิดรีดักชันผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสมทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดสี ทำให้เลขออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไปและสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่าง ๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโทรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น (Avsar et al, 2007) 4) การใช้เปอร์ซัลเฟตและเพอร์สไอออน เพอร์ซัลเฟตเป็นแอนไอออนที่รุนแรงสารประกอบเปอร์ซัลเฟตที่พบมากที่สุดคือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และโซเดียมเปอร์ซัลเฟต สารเหล่านี้เป็นสารอนินทรีย์มีลักษณะเป็นของแข็ง มีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดซ์ที่รุนแรง ปกตินิยมใช้โซเดียมเปอร์ซัลเฟตมากกว่าการใช้โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตและแอมโมเนียมซัลเฟต

กระบวนการโซนิกเคชันคือ การใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิก (ultrasonic) ใช้สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของอาหารและกระบวนการผลิต Segura *et.al* (2009) กล่าวว่า การใช้คลื่นเสียงร่วมกับกระบวนการเพนตัน จะส่งผลให้การบำบัดค่า COD ในน้ำดีขึ้น เนื่องจากการใช้คลื่นเสียงร่วมกับปฏิกิริยาออกซิเดชันกับสารอื่น ๆ ที่จะช่วยเพิ่มตัวออกซิไดซ์ให้รุนแรงมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษด้วย เปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนและเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนโดยมีกระบวนการโซนิกเคชันร่วมด้วยเพื่อลดค่าซีโอดีและสี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการลดค่าซีโอดีและสีด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออน
- 2) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการลดค่าซีโอดีและสีด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนโดยมีกระบวนการโซนิกเคชันร่วมด้วย
- 3) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีและสีด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนและเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนโดยมีกระบวนการโซนิกเคชันร่วมด้วย

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของซีโอดีประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร
- 2) เป็นการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนมีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ คือ
 - อัตราส่วนโดยโมลของ $Fe^{2+} : S_2O_8^{2-}$ คือ 1:0, 1: 1, 1: 2, 1: 3, 1: 4 และ 1: 5
 - ค่าพีเอช คือ 2, 3, 4, 5, 6 และไม่ทำการปรับพีเอช
 - ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา คือ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที
- 3) เป็นการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนโดยมีกระบวนการโซนิกเคชันร่วมด้วย มีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังต่อไปนี้ คือ
 - อัตราส่วนโดยโมลของ $Fe^{2+} : S_2O_8^{2-}$ คือ 1:0, 1: 1, 1: 2, 1: 3, 1: 4 และ 1: 5
 - ค่าพีเอช คือ 2, 3, 4, 5, 6 และไม่ทำการปรับพีเอช
 - ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถไปประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอื่นที่มีค่าซีโอดีและสีสูง
- 2) เป็นแนวทางในการแก้ปัญหการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษทั้งก่อนได้รับการบำบัด และหลังการได้รับการบำบัดแล้วแต่ยังมีค่าซีโอดี และสีสูง
- 3) ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดลิกนินในน้ำเสียด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ

อุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษเป็นที่ยอมรับกันว่ามีการใช้น้ำมากที่สุดในกระบวนการผลิตใช้วัตถุดิบที่เป็นไม้ ซึ่งถ้าไม่มีการปลูกเพื่อการผลิตก็จะเป็นการทำลายต้นไม้ไปเรื่อย ๆ เป็นการทำลายป่าและพื้นที่สีเขียวจำเป็นต้องมีการปลูกทดแทนมีการใช้สารเคมีที่มีความเป็นพิษสูงและใช้ในปริมาณมากปล่อยน้ำทิ้งและน้ำเสียที่มีสารเจือปนสูงและมีสีค้ำซึ่งเป็นสารประกอบของลิกนินที่มีอยู่ในเนื้อไม้ มีรายงานว่ากระดาษหนัก 1 ตัน ต้องใช้ต้นไม้ถึง 17 ตัน กระแสไฟในการผลิต 4,200 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ใช้น้ำถึง 31,500 ลิตร ปล่อยสารเคมีประเภทคลอรีนที่ใช้ในการฟอกถึง 7 กิโลกรัม ดังนั้นในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จึงต้องมีระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง (กรมคุ้มครองสิทธิและเสรีภาพ, 2557)

2.1.1 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

การทำเยื่อกระดาษเริ่มจากการนำไม้มาตัดเป็นท่อน ๆ ลอกเปลือกไม้ออก ทำความสะอาด แล้วสับเป็นชิ้นเล็ก ๆ สามารถทำเยื่อกระดาษได้ 3 ประเภทคือ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2550)

1..เยื่อเชิงกลหรือเยื่อบด (Mechanical Pulp)

เป็นเยื่อที่ผลิตโดยใช้พลังงานกล โดยนำชิ้นไม้ไปบดด้วยหินบดหรือจานบด เยื่อที่ได้จะมีลักษณะไม่สมบูรณ์ สั้นและขาดเป็นท่อน ทำให้กระดาษที่ได้มาไม่แข็งแรง อีกทั้งยังมีสารลิกนินคงเหลืออยู่ซึ่งเป็นสารที่ทำให้กระดาษเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อได้รับแสง กระดาษที่ได้จากกรรมวิธีนี้มีความที่บสูงดูดความชื้นได้ดี มีราคาถูก แต่ไม่แข็งแรงและดูเก่าเร็วมักจะนำไปใช้ทำสิ่งพิมพ์ประเภทหนังสือพิมพ์ เพื่อพัฒนาเยื่อบดให้ดีขึ้น ได้มีการนำชิ้นไม้ไปบดด้วยความร้อนก่อนนำไปบดเพื่อให้เยื่อไม้กับลิกนินแยกออกจากกันได้ง่ายคุณภาพกระดาษที่ได้ก็จะดีขึ้น

2..เยื่อเคมี (Chemical Pulp)

เป็นเยื่อที่ผลิตโดยใช้สารเคมีและความร้อนในการแยกเยื่อและขจัดลิกนิน เยื่อกระดาษที่ได้จากวิธีการนี้มีความสมบูรณ์กว่าเยื่อบด แต่ได้ผลผลิตที่ต่ำกว่าราคาก็สูงกว่าเยื่อเคมีที่ได้จากการใช้สารซัลเฟต ซึ่งเรียกว่าเยื่อซัลเฟต (Sulfate Pulp) จะเป็นเยื่อที่เหนียวมีสีคล้ำอมน้ำตาล มักจะนำไปใช้ทำกระดาษเหนียว (Kraft Paper) สำหรับทำถุงและบรรจุภัณฑ์ต่าง ๆ ส่วนเยื่อเคมีที่ได้จากการใช้สารซัลไฟต์ ซึ่งเรียกว่าเยื่อซัลไฟต์ (Sulfite Pulp) จะมีความแข็งแรงน้อยกว่าเยื่อซัลเฟต นิยมนำไปฟอกให้ขาวเพื่อใช้เป็นกระดาษสำหรับเขียนและกระดาษเพื่อใช้ในงานพิมพ์

3..เยื่อกึ่งเคมี (Semi-chemical Pulp)

เป็นเยื่อที่ผลิตโดยนำไม้ขึ้นมาต้มในสารเคมีเพื่อให้เยื่อแยกออกจากกันง่ายขึ้นและเพื่อละลายลิกนิน เสร็จแล้วจึงนำมาบดด้วยจานบด กรรมวิธีนี้ทำให้ได้เยื่อที่มีคุณภาพดีกว่าเยื่อบด และได้ผลผลิตมากกว่าเยื่อเคมี เยื่อกึ่งเคมีมักนำไปใช้ในการผลิตกระดาษสำหรับบรรจุภัณฑ์เป็นส่วนเอกสาคัญเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระบวนการฟอกเยื่อ

การฟอกเยื่อทำหลังจากกระบวนการผลิตเยื่อจุดประสงค์หลักของการฟอกเยื่อ คือ เพื่อเพิ่มความขาวของเยื่อที่เหมาะสมเพื่อจะนำไปผลิตกระดาษพิมพ์และเขียน และในการทำให้ขาวขึ้น ต้องไม่ทำลายความแข็งแรงของเยื่อแบ่งเป็น 2 วิธีคือ วิธีฟอกเยื่อเพื่อขจัดลิกนินออกและวิธีฟอกเยื่อเพื่อเปลี่ยนสีของลิกนินให้อยู่ในรูปไม่มีสี การทำให้เยื่อมีความขาวสว่างขึ้นนั้นทำโดยการแยกลิกนิน ออกโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับลิกนิน ขั้นตอนในการฟอกเยื่อมีหลายวิธีเรียกตามสารเคมีที่ใช้ ฟอก

2.1.3 กระบวนการการล้างเยื่อ

เยื่อที่ได้จากกระบวนการทั้งแบบเคมีและกึ่งเคมีเมื่อผ่านการคัดขนาดแล้วจะต้อง นำไปผ่านขั้นตอนการล้างซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับเยื่อกึ่งเคมีในนั้นขั้นตอนนี้ของเหลวจากการ ต้มเยื่อจะถูกล้างแยกออกจากเยื่อของเหลวนี้ เรียกว่า Black Liquor จะถูกปรับสภาพเพื่อนำกลับไป ใช้ในขบวนการได้อีก

2.1.4 การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (O_2 Delignification)

ในการผลิตเยื่อเคมีโดยใช้ต้นยูคาลิปตัส นั้นเมื่อเยื่อผ่านขั้นตอนการล้างแล้วจะนำ เข้าขั้นตอนของการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน ซึ่งจะเป็นการฟอกเยื่อขั้นตอนแรกโดยใช้ออกซิเจนทำ ปฏิกิริยากับลิกนินให้ลิกนินหลุดออกจากเยื่อมากขึ้นเป็นผลให้ค่า Kappa Number ลดลงจาก ประมาณ 25 = 28 เป็น 10 -12 ซึ่งหมายถึง ปริมาณลิกนินจะเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณตั้งแต่ต้นเป็น ผลทำให้สารเคมีในขั้นตอนการฟอกลดน้อยลงรวมทั้งลดปริมาณน้ำเสียจากการฟอกเยื่อด้วยสารเคมี

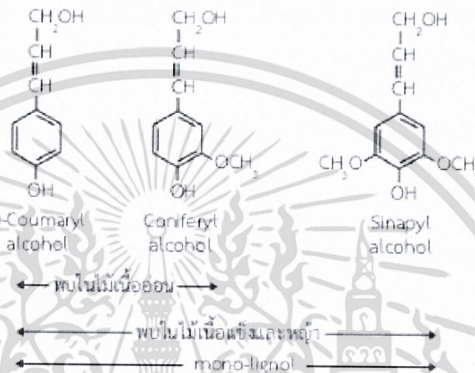
การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนจะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในปฏิกิริยาจับลิกนินนี้ประมาณ 20 กิโลกรัมออกซิเจนต่อตันเยื่อที่ฟ ลิต (หรือ ประมาณร้อยละ 2 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง) การฟอกจะเกิดจากการที่โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยา กับออกซิเจนไปสกัดลิกนินในเยื่อโดยมีไอน้ำเพื่อรักษาอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง 90 - 110 °C ระยะเวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้ประมาณ 20 - 60 นาทีเยื่อที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วจะส่งเข้า ล้างในเครื่องล้างแบบ Wash press โดยปกติแล้วภายหลังจากการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนแล้วจะทำ การล้าง 1 ครั้ง หรือ 2 ครั้ง แล้วส่งไปเก็บในถุงเก็บเยื่อความเข้มข้นปานกลางถึงสูงก่อนส่งเข้าหน่วย ฟอกขาวสำหรับการผลิตเยื่อฟอก

2.2 ลิกนิน

ลิกนิน (Lignin) มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{10}H_{12}O_4$ ลิกนินเป็นสารประกอบระหว่างคาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด จนกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มี น้ำหนักโมเลกุลสูง ลิกนินมีสมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่ยืดหยุ่นแต่มีความแข็งแรงทนทานสูง โดยลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบที่มีอยู่ในผนังเซลล์พืชชั้นสูง (ทั้งพืชใบเลี้ยงเดี่ยวและพืช ใบเลี้ยงคู่) ในอัตราส่วนที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดและอายุของพืช ลิกนินยังมีโครงสร้างเป็นร่างแหเพื่อ ทำหน้าที่เชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสให้ติดกันภายในผนังเซลล์ ทำให้ โครงสร้างพืชมีความแข็งแรงทนทานสูง ยังช่วยลดการระเหยของน้ำที่อยู่ระหว่างเนื้อเยื่อไซเลมและ ผนังเซลล์ป้องกันการถูกทำลายเนื้อเยื่อของพืชจากจุลินทรีย์ได้ด้วย ลิกนินยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ในเนื้อไม้ โดยเฉพาะไม้ยืนต้น ซึ่งจะช่วยให้ต้นไม้มีความแข็งแรงและทำให้ผนังเซลล์กันน้ำและมีสมบัติ ป้องกันโรคได้ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2561)

2.2.1 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน

ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเธอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนการต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ภายในโมเลกุลขนาดใหญ่ของลิกนินประกอบด้วยหน่วยย่อยซ้ำ ๆ กัน เรียกว่า ฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมธิลอยู่บนโมเลกุลแสดงในรูป 2-1 ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน ไม้เนื้อแข็ง และหญ้า จะมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (Methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.1 แสดงสารตั้งต้นโดยตรงของการสังเคราะห์ลิกนิน (LinkedIn, 2019)

2.2.2 การแยกประเภทลิกนิน

อนุพันธ์ต่าง ๆ มากมายที่มาจากไม้ มักเรียกรวมกันว่า ลิกนิน จึงต้องมีการแยก คุณสมบัติของลิกนินในไม้โดยอาจใช้ชนิดของพืชที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น ลักษณะของผลิตภัณฑ์ วิธีการเตรียม หรือใช้หลายอย่างประกอบกันในการพิจารณา (พิมพ์ชนก, 2546)

ถ้าหากแบ่งลิกนินโดยใช้ชนิดของพืชที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้น จะแบ่งได้ 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน (Softwood lignin) ได้แก่ ลิกนินจากไม้จำพวกสนที่มีใบเขียวตลอดปีและมีลักษณะใบแคบ โดยไม้ชนิดนี้นำไปทำเยื่อกระดาษจะได้เยื่อใยยาวซึ่งมีคุณสมบัติทำให้กระดาษมีความเหนียวและแข็ง
2. ลิกนินจากไม้เนื้อแข็ง (Hardwood lignin) ได้แก่ ลิกนินจากไม้เบญจพรรณต่าง ๆ ที่ผลัดใบทุกปีและมีลักษณะใบกว้าง ไม้ชนิดนี้นิยมนำไปผลิตเยื่อกระดาษประเภทเยื่อใยสั้นซึ่งมีคุณสมบัติทำให้กระดาษมีความทึบและหน้ากระดาษเรียบ
3. ลิกนินจากหญ้าหรือพืชล้มลุก (Grass or Annual plant) เป็นไม้ใบสั้นซึ่งมีคุณภาพดี เช่น ปอ กก อ้อย หญ้าขจรจบ ต้นอ้อ และต้นแขม

ถ้าแบ่งตามกรรมวิธีการเตรียมทางเคมีจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. ซัลไฟต์ลิกนิน (Sulfite lignin) หรือ ลิกโนซัลโฟเนต (Lignosulfonate) เป็นลิกนินที่สามารถผลิตขึ้นได้จากน้ำดำที่ได้จากกระบวนการทำเยื่อแบบซัลไฟต์ ซึ่งในน้ำดำจากกระบวนการแบบซัลไฟต์จะมีลิกโนซัลโฟเนตอยู่ประมาณ 40-60% โดยมีมวลโมเลกุลประมาณ 250 ต่อหนึ่งโมเนอเมอร์ ลิกโนซัลโฟเนตละลายน้ำแต่ไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์

2. อัลคาไลน์ลิกนิน (Alkaline black) เป็นลิกนินที่ผลิตจากน้ำดำที่เรียกว่า Soda black liquor และ Sulfate black liquor หรือ Kraft black liquor อัลคาไลน์ลิกนินประกอบไปด้วยหมู่กรด 2 ชนิด คือ กรดอ่อนซึ่งได้แก่ หมู่ฟีนอลิก (phenolic) และกลุ่มกรดแก่ ได้แก่ คาบอกซิลิก

(carboxylic) อัลคาไลน์ลิคินินโดยทั่วไปจะเป็นผงสีน้ำตาลและละลายในเบสและตัวทำละลายอินทรีย์

2.2.3 ประโยชน์ของลิคินิน

1. ใช้ผสมกับหินเพื่อลดฝุ่นที่ฟุ้งกระจาย
2. ใช้เป็นสารช่วยในการเกาะติด เช่น การซ่อมผิวหน้าของถนนลาดยางมะตอย
3. ใช้ในอุตสาหกรรมการหล่อ เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรง
4. ใช้ในการกำจัดไขมันที่ลอยอยู่บนผิวหน้าของน้ำ
5. ใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดรูพรุนในแผ่นยิปซัม

2.3 ซีโอดี

Chemical Oxygen Demand หรือที่เรียกกันสั้นๆ ว่า COD นั้น เป็นค่าความต้องการออกซิเจนของน้ำที่หาได้โดยวิธีการทางเคมี หรือเป็นค่าที่แสดงถึงความสกปรกของน้ำเสีย ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำทิ้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ (ไพฑูริย, 2560)

2.3.1 ความสำคัญของการวิเคราะห์ซีโอดี

ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) เป็นวิธีวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดซ์ (Oxidize) สารอินทรีย์ในน้ำให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำค่าซีโอดีเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำเสียรวมถึงใช้ในการออกแบบ ติดตามควบคุม และประเมินประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงผลกระทบ และศักยภาพของแหล่งรองรับน้ำทิ้งว่าจะสามารถรับความสกปรกได้มากน้อยเพียงใดด้วย และด้วยเหตุ ที่การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีนั้น สามารถที่จะทำการวิเคราะห์และได้รับผลการวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่สั้น (3-5 ชั่วโมง) ซึ่งถ้าเทียบกับการหาค่าบีโอดี (BOD) ที่ใช้เวลาานกว่า (5วัน) และมีวิธีการที่ยุ่งยากกว่าจึงทำให้มีประโยชน์อย่างมากในการควบคุมและแก้ไขปัญหาในเรื่องของมลพิษทางน้ำได้เป็นอย่างดี และทันต่วงที่ทำให้การวิเคราะห์หาค่าซีโอดีในน้ำเสียเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย

2.3.2 ทฤษฎีของซีโอดีและหลักการวิเคราะห์พื้นฐาน

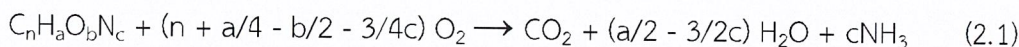
การวิเคราะห์ค่าซีโอดีมี 3 วิธี คือ

1. วิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open Reflux Method)
2. วิธีรีฟลักซ์แบบปิด/การไตเตรท (Closed Reflux, Titrimetric Method)
3. วิธีรีฟลักซ์แบบปิด/เปรียบเทียบสี (Closed Reflux, Colorimetric Method)

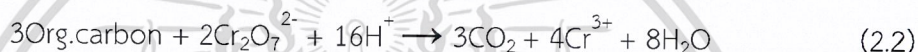
โดยที่วิธีรีฟลักซ์แบบเปิดจะเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ค่าซีโอดีในตัวอย่างน้ำเสียหลากหลายชนิดโดยใช้ปริมาณตัวอย่างน้ำในการวิเคราะห์จำนวนมากเพื่อลดความผิดพลาดในการสุ่มตัวอย่างและการปิเปตตัวอย่างแต่จะใช้สารประกอบโลหะต่าง ๆ ในปฏิกิริยาจำนวนมากตามไปด้วย ส่วนวิธี Closed Reflux ทั้งสองแบบเป็นวิธีการวิเคราะห์ที่ค่อนข้างประหยัดการใช้สารประกอบโลหะต่าง ๆ ในปฏิกิริยาแต่จะมีความผิดพลาดในการปิเปตตัวอย่างหากตัวอย่างไม่ผสมกันดีเพียงพอ

เนื่องจากใช้ปริมาณตัวอย่างในการวิเคราะห์น้อยมากจะเห็นได้ว่าในแต่ละวิธีจะมีข้อบ่งชี้ในการใช้ที่แตกต่างกัน แต่ทุกวิธีจะมีหลักการเหมือนกัน กล่าวคือ ค่าซีโอดีจะเป็นปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกซิไดซ์ สารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยที่ สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95-100%) จะถูกออกซิไดซ์ โดยสาร ออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังสมการ (2.1)



โดยสารออกซิไดซ์อย่างแรง (Strong oxidizing agent) ที่ใช้ในการหาค่าซีโอดีมี ด้วยกันหลายตัว ได้แก่ โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) เฟอริกซัลเฟต (Ferric sulfate) โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate) และโพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate) ซึ่งการหาค่าซีโอดีโดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมตเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก เพราะให้ผลที่น่าเชื่อถือและแน่นอน หลักการของวิธีนี้คือ สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกออกซิไดซ์โดยโพแทสเซียมไดโครเมตในสภาวะที่เป็นกรดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงใช้การรีฟลักซ์เพื่อป้องกันการระเหยสูญหายของสารเคมี จากนั้นจึงไทเทรตหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ด้วยเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



มีการเติมซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) เพื่อเร่งปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ของพวกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่าง ๆ (Straight chain aliphatic) นอกจากนี้ ซิลเวอร์ซัลเฟตที่ใส่ไปจะไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบเฮไลด์ (Halide Compounds) พวกคลอไรด์ (Cl^-) โบรมีน (Br^-) หรือไอโอดีน (I^-) ได้ แต่ซิลเวอร์ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ได้ผลในการออกซิไดซ์สารประกอบพวกอะโรมาติก (aromatic) อะลิฟาติก (Aliphatic) และสารไพริดีน (Pyridine) และในการวิเคราะห์ค่าซีโอดีมีสาร รบกวนที่สำคัญคือคลอไรด์จึงต้องใส่เมอร์คิวริกซัลเฟต (HgSO_4) ลงไปเพื่อไปจับกับคลอไรด์ให้อยู่ในรูปของสารประกอบเมอร์คิวริกคลอไรด์ (Mercuric chloride complex) ทำให้ได้ค่าซีโอดีที่ต้องการ โดยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีค่าซีโอดี ตั้งแต่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไปได้และมีความแน่นอน

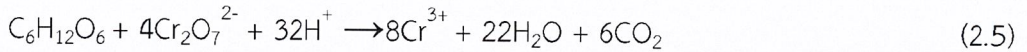
2.3.3 สารมาตรฐานซีโอดี

สารประกอบที่ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบวิธีการวิเคราะห์และการดำเนินการวิเคราะห์ซีโอดีนั้นมีหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส (D-glucose) กรดออกซาลิก (Oxalic acid) โพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate) กรดกลูตาริก (Glutaric acid) กรดนิโคตินิก (Nicotinic acid) และเมทานอลไพริดีน (Methanol pyridine) แต่ที่ใช้กันโดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ

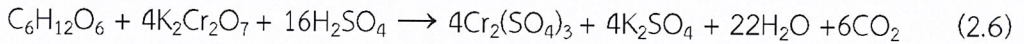
1. น้ำตาลกลูโคส (D-glucose)

น้ำตาลกลูโคส (Glucose) เป็น คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ประเภทน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) มีคาร์บอน 6 อะตอม (Hexose) เซลล์ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดใช้ กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานและสารเผาผลาญชั้นกลาง (Metabolic intermediate) กลูโคสเป็นหนึ่งใน ผลิตภัณฑ์หลักของการสังเคราะห์แสง (Photosynthesis) และเป็นแหล่งพลังงานสำหรับการหายใจของ เซลล์ (Cellular respiration) โครงสร้างโมเลกุลตามธรรมชาติของมัน (D-glucose) จะอยู่ในรูปที่ เรียกว่า เดกซ์โทรส (Dextrose) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมอาหาร (ไพฑูริย์, 2555) กล่าวไว้ว่า เมื่อน้ำตาลกลูโคสทำปฏิกิริยากับ โพแทสเซียมไดโครเมตตามวิธีการหาค่าซีโอดีตามมาตรฐาน กลูโคสจะถูกใช้ออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์และ ได้ผลิตภัณฑ์คือน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

ปฏิกิริยาการรีฟลักซ์ในสารละลายกรด



ปฏิกิริยาในกรดซัลฟิวริก



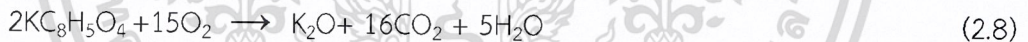
กรณีการใช้ออกซิเจนในการออกซิไดซ์กลูโคสในลักษณะเช่นเดียวกับการย่อย สลาย กลูโคสแบบสมบูรณ์จะได้ดังสมการ



ทั้งนี้เนื่องจาก $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ จำนวน 1 โมล จะมีอำนาจในการออกซิไดซ์เทียบเท่ากับ O_2 จำนวน 1.5 โมล จากสมการ (2.6) กลูโคส จำนวน 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมต จำนวน 4 โมล และจากสมการ (2.7) กลูโคส จำนวน 1 โมล จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จำนวน 6 โมล และกลูโคสมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 180 กรัมต่อโมล และออกซิเจนมีมวลโมเลกุล เท่ากับ 32 กรัมต่อ โมล ดังนั้นกลูโคส มีค่าซีไอดีเท่ากับ 1.067 กรัมออกซิเจนต่อกรัมกลูโคส

2. โพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลต (Potassium hydrogen phthalate, KHP)

เมื่อนำโพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลตมาทำปฏิกิริยาร่วมกันกับโพแทสเซียม ไดโครเมตตามวิธีการหาค่าซีไอดี โพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลตจะถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์และได้ ผลิตภัณฑ์คือโพแทสเซียมออกไซด์ น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเมื่อเทียบกับการใช้ออกซิเจนใน การออกซิไดซ์จะได้ดังสมการ



จากสมการ (2.8) โพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลตจำนวน 2 โมล จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนจำนวน 15 โมล แต่โพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลตมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 204.1 กรัมต่อโมล และออกซิเจนมีมวลโมเลกุลเท่ากับ 32 กรัมต่อโมล ดังนั้นโพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลตมี ค่าซีไอดีเท่ากับ 1.176 กรัมออกซิเจนต่อกรัมโพแทสเซียมไฮโดรเจนพธาเลต

2.4 ประเภทของสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม (วนิดา, 2555)

2.4.1 สีแท้หรือสีจริง (True color)

สีที่เกิดจากสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำแล้วเกิดการละลายเป็นเนื้อเดียวกันกับน้ำซึ่งได้แก่สารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ยากจำพวกกรดฮิวมิก และฟัลวิค (Humic acid and fulvic acid) ที่มาจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของสิ่งมีชีวิต และจากการย่อยสลายของสิ่งมีชีวิตซึ่งไม่สามารถย่อยสลายและแยกออกโดยการกรองได้ จึงทำให้สามารถบำบัดได้ยาก

2.4.2 สีปรากฏ (Apparent color)

สารแขวนลอยต่างๆ ที่อยู่ในน้ำแล้วเกิดการสะท้อนแสงปรากฏให้เห็น เช่น ตะกอนของดินและทรายเกล็ดของซากพืชซากสัตว์ แพลงก์ตอนพืชและแพลงก์ตอนสัตว์ซึ่งสามารถบำบัดได้ด้วยวิธีการทางชีวภาพ เช่น การตกตะกอน หรือการกรอง (วนิดา, 2555)

ในน้ำเสียอุตสาหกรรมจะมีทั้งสีแท้และสีปรากฏ ซึ่งสีแท้ในน้ำเสียอุตสาหกรรมนั้นจะพบมากในอุตสาหกรรมอบไม้ยางพาราและสกัดน้ำมันปาล์มแต่สีปรากฏที่เกิดมาจากสารแขวนลอยนั้นมีอยู่ 2 กรณี คือ สีของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมฟอกย้อม เยื่อกระดาษ และทอผ้าซึ่งมาจากสารเคมีในกระบวนการผลิตรวมทั้งแทนนินและลิกนินซึ่งแบ่งประเภทจากการแตกตัวให้ประจุ โครงสร้างทางเคมีของสีรวมทั้งเส้นใยที่ใช้อยู่ช่วยละลาย นอกจากนี้ยังมีสีที่เกิดขึ้นหลังจากการผ่านการบำบัดแล้วหรือหลังจากการกักเก็บเช่น ระบบบำบัดแบบบ่อผึ่ง (Oxidation Pond) ที่มีสาหร่ายทำหน้าที่ในการให้ออกซิเจน แต่สาหร่ายก็สามารถทำให้น้ำมีสีเขียวได้ เป็นต้น

2.5 การวัดค่าสี ในหน่วย ADMI

ADMI (American Dye Manufacturers Institute) เป็นหน่วยมาตรฐานในการวัดค่าสี ที่ออกใหม่ในมาตรฐานน้ำทิ้ง ทั้งในประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม และประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ในปี 2559 และ 2560 ตามลำดับ ซึ่งมีค่ามาตรฐานไม่เกิน 300 ADMI และสำหรับประกาศของกรมควบคุมมลพิษ ปี พ.ศ. 2560 ค่ามาตรฐานสีของน้ำทิ้งที่ระบายลงสู่ระบบบำบัดน้ำเสียส่วนกลางในนิคมอุตสาหกรรม ไม่เกิน 600 ADMI สีของน้ำเกิดจากอะไร สีของน้ำเกิดจากการปนเปื้อนของสารต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดยที่สีนั้นสามารถถูกกำจัดออกได้เพื่อทำให้น้ำเหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ ปัจจุบันมีการวัดค่าสี อยู่หลายหน่วย เช่น หน่วยโลวิบอนด์ (Lovibond unit) หน่วยอะฟา (APHA unit) หน่วยแพลตินัมโคบอลต์ (Platinum-cobalt unit) และหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI unit) ซึ่งในการวัดค่าสีในน้ำตัวอย่างนั้นจะต้องกระทำทันทีหลังจากเก็บน้ำตัวอย่าง แต่ถ้าไม่สามารถกระทำได้ทันทีให้เก็บไว้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส และโดยทั่วไปการวัดค่าสีจะเป็นการวัดค่าสีจริง คือ สีที่ได้หลังจากการกำจัดเอาสารแขวนลอยออกแล้ว ซึ่งการกำจัดสารแขวนลอยออกนั้น ก็มีใช้กัน 2 วิธี คือ

1. วิธีการกรอง Filtration system ผ่าน calcined filter aids และ micrometallic filter crucible ขนาด 40 μm
2. วิธีการหมุนเหวี่ยง Centrifuge system

2.5.1 หลักการตรวจวัดค่าสีในหน่วย ADMI

การวัดค่าสีในหน่วย ADMI มีการตรวจวัดค่าสีในทุก ๆ หน่วยสี ดังนั้น จึงมีความสลับซับซ้อนกว่าการวัดค่าสีในหน่วย Platinum-Cobalt การวัดค่าสีในหน่วย ADMI ใน Standard Method for Examination of Water & Wastewater มี 2 วิธีมาตรฐาน ดังนี้

1. APHA 2120E ADMI Tristimulus Filter method
2. APHA 2120F ADMI Weighted-Ordinate Spectrophotometer

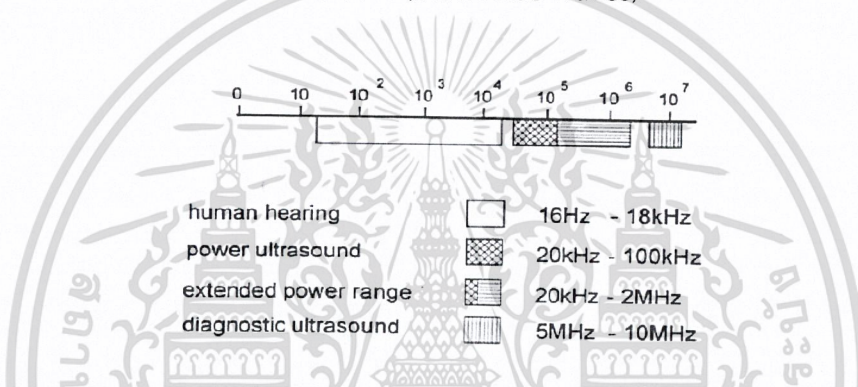
โดยทั้ง 2 วิธีมาตรฐานดังกล่าวเป็นการวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 400-700 nm ซึ่งเป็นการวัดค่าสีที่แท้จริง โดยวัดปริมาณเม็ดสีตั้งแต่เฉดสีม่วงถึงเฉดสีแดง (หน่วยเครื่องมือ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 คลื่นเสียงโซนิเคชันหรืออัลตราโซนิค (กัญญารัตน์ และเกษมสันต์, 2555)

อัลตราโซนิค (ultrasonics) หรือโซนิเคชัน (sonications) หมายถึง การศึกษาเกี่ยวกับคลื่นเสียงหรืออัลตราซาวนด์ในช่วงความถี่ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน คลื่นอัลตราซาวนด์หรือคลื่นอัลตราโซนิค (ultrasonic waves) หมายถึง พลังงานที่เกิดจากคลื่นเสียงที่มีการสั่นของคลื่นประมาณ 20,000 ครั้งต่อวินาทีหรือสูงกว่า หรือหมายถึงคลื่นความดัน (pressure waves) ที่มีความถี่ (frequency) สูงกว่าคลื่นเสียงปกติ (สูงกว่า 20,000 กิโลเฮิร์ตซ์ kHz)

คลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยินเกิดจากการสั่นของตัวกลางที่ยืดหยุ่น (elastic medium) ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 20,000 kHz คลื่นเสียงผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่ยืดหยุ่นในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาว (longitudinal waves) แต่คลื่นเสียงที่ผ่านเข้าไปภายในวัตถุที่เป็นของแข็งอาจอยู่ในลักษณะที่เป็นคลื่นตามยาวหรือคลื่นตามขวาง (transverse waves)



รูปที่ 2.2 คลื่นความถี่ของอัลตราซาวนด์ในช่วงต่าง ๆ ที่มา : Mason (1998)

การใช้พาวเวอร์อัลตราซาวนด์ในกระบวนการแปรรูปอาหาร ทำให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางกลและทางเคมีของอาหารเนื่องจากคลื่นดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปิวเทชัน (cavitation) และส่วนมากใช้คลื่นในช่วงความถี่ 20 – 40 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่สร้างขึ้นจากอุปกรณ์อัลตราซาวนด์ทั่วไปที่ใช้ในการทำมาสะอาด การทำให้เซลล์แตกและใช้ในการขึ้นรูปพลาสติก เป็นต้น

2.6.1 การกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิค

คลื่นอัลตราโซนิคอาจกำเนิดขึ้นได้โดยวิธีการต่างๆ ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น

3กระบวนการคือ

1. กระบวนการทางกล (Mechanical) มีใช้ไม่มากนัก ใช้เฉพาะในกรณีที่ต้องการสั่นสะเทือนอย่างแรงของอากาศ เช่นในกรณี Gas-Jet Generators, Sirens เป็นต้น

2. กระบวนการเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) วิธีนี้ใช้ผลึกที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก กล่าวคือ มีความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียด (Strain) ของชิ้นผลึก กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นผลึกนั้น ตัวอย่างเช่น Barium Titanate และ Lead Zirconate Titanate ซึ่งใช้ในเครื่องตรวจหารอยร้าว (Flaw Detector) และเครื่องทำความสะอาด (Cleaners)

3. กระบวนการแมกนีโตสตริกทิฟ (Magnetostrictive) วิธีนี้อาศัยคุณสมบัติของสารแม่เหล็กบางชนิด ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้น เมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีค่าเปลี่ยนแปลง สารแม่เหล็กที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ Nickel, Alfer, Permalloys และ Ferrites มีข้อดีคือสามารถทำให้ Transducer มีขนาดเล็ก และสามารถรักษาคุณสมบัติแมกนีโตสตริกทิฟได้ที่อุณหภูมิสูง (ถึง

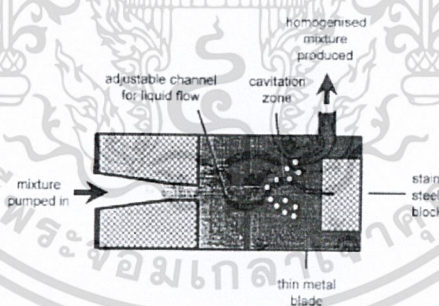
ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) แต่มันก็มีข้อเสียคือมีความแข็งแรงทางกลน้อย ทำให้ไม่สามารถใช้งานในสภาวะที่ต้องการความเข้มของคลื่นสูงได้

2.6.2 การสร้างคลื่นอัลตราซาวด์

การใช้ประโยชน์จากคลื่นอัลตราซาวด์ในกระบวนการแปรรูปอาหารจำเป็นต้องรู้และเข้าใจถึงการเกิดคลื่นรวมทั้งวิธีการนำพลังงานคลื่นที่สร้างขึ้นไปใช้ในกระบวนการดังกล่าว แหล่งของคลื่นอัลตราซาวด์และชนิดของอุปกรณ์ให้กำเนิดคลื่นที่สร้างขึ้นจาก ทรานส์ดิวเซอร์(transducer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าไปเป็น พลังงานเสียง เป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการตัดสินใจนำอัลตราซาวด์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหาร โดยทั่วไปสามารถแบ่งทรานส์ดิวเซอร์เป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 3 ประเภทได้แก่

1. ลิควิดไดรฟ์เวนทรานส์ดิวเซอร์ (liquid driven transducer)

ลักษณะการทำงานของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์ได้โดยการบังคับของเหลวให้เคลื่อนที่ผ่านช่องขนาดเล็กและผ่านไปกระทบกับแผ่นโลหะขนาดบาง (thin blade) ซึ่งวางอยู่ในทิศทางเคลื่อนที่ของของเหลว ทำให้แผ่นโลหะดังกล่าวเกิดการ สั่นไปมา ในการสั่นแต่ละครั้งจะทำผิวหน้าของแผ่นโลหะเกิดการปะทะกับของเหลวเป็นผลทำให้เกิดคลื่นความดันขึ้นและทำให้เกิดปรากฏการณ์แคปพิเตชันขึ้นภายในของเหลว นั่น การเกิดคลื่นความดันสลับกับแคปพิเตชันเป็นผลทำให้ของเหลวสามารถผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้นลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ แสดงดังรูปที่ 2-3

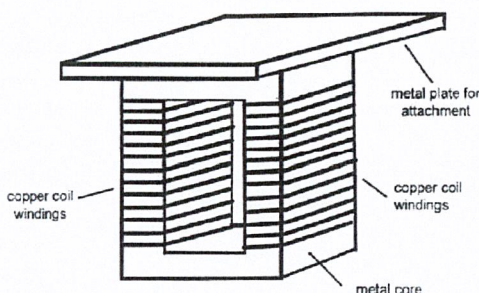


รูปที่ 2.3 ลิควิดไดรฟ์พม่า : Mason (1998)

2.แมกนีโตสตริกทิฟทรานส์ดิวเซอร์ (magnetostrictive transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล โดยใช้คุณสมบัติแมกนีโตสตริกชัน(magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่สารเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic materials) เช่นนิกเกิล (nickel) หรือเหล็ก (iron) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของมิติหรือขนาดเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ลักษณะของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้คล้ายกับโซลินอยด์ (solenoid) ที่ใช้สารเฟอร์โรแมกเนติกเป็นแกน โดยแกนดังกล่าวประกอบขึ้นจากแผ่น

นิกเกิลหรือนิกเกิลอัลลอย (nickel alloy) ขนาดบางจำนวนหลายชั้นโดยรูปที่ง่ายที่สุดจะมีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยมที่พันด้วยลวดทองแดงในแต่ละด้านที่อยู่ตรงกันข้ามดังรูปที่ 2-4 สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

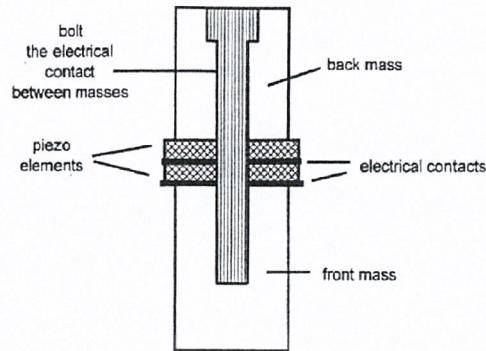


รูปที่ 2.4 แมกนีโตสตริกทีฟทรานส์ดิวเซอร์ ที่มา : Mason

จากภาพเมื่อผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดจะทำให้เกิดการลดขนาดของแกนซึ่งผลิตจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (เรียกว่าเกิดแมกนีโตสตริกชัน - magnetostriction) และทำให้ขนาดของทรานส์ดิวเซอร์ลดลงไปด้วยและเมื่อหยุดให้กระแสไฟฟ้าจะทำให้แกนหรือทรานส์ดิวเซอร์กลับมามีขนาดเท่าเดิม ดังนั้นการให้และหยุดให้กระแสไฟฟ้าแก่ตัวแกนจะทำให้แกนมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดอย่างต่อเนื่องและทำให้เกิดแรงสั่นที่ต้องการขึ้นได้ ทั้งนี้ต้องออกแบบทรานส์ดิวเซอร์ให้มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการสั่นตามความถี่ของคลื่นที่กำหนดไว้ ข้อเสียของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้ได้แก่สามารถสร้างคลื่นอัลตราซาวนด์ต่ำกว่า 100 kHz และระบบมีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าเพียง 60% โดยจะสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนระบบนี้จึงมักต้องใช้อุณหภูมิเย็นภายนอกควบคุมกันไปด้วย ส่วนข้อดีได้แก่การที่ระบบนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทาน

3. พิโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์ (piezoelectric transducer)

ทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้เป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในการทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวนด์โดยใช้เซรามิกส์ (ceramics) ที่มีส่วนผสมของสารพิโซอิเล็กตริก (piezoelectric materials) เช่น แบเรียมไทแทนเตต (barium titanate) หรือเลดเมตาไนโอเบต (lead metaniobate) สารพิโซเซรามิกดังกล่าวนิยมใช้ในเครื่องอัลตราซาวนด์ที่ใช้ขั้วส่งสกรกที่ติดอยู่ให้หลุดออกหรือเพื่อทำความสะอาด หรือใช้กับระบบโพรบ (probe systems) โดยจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีรูตรงกลาง ทรานส์ดิวเซอร์เซรามิกนี้จะมีขนาดเล็กและแตกหักง่ายมาก ดังนั้นจึงต้องใช้แท่งโลหะมาประกบทั้งทางด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งนอกจากจะช่วยป้องกันการแตกหักแล้ว ยังช่วยป้องกันความเสียหายที่เกิดจากความร้อนส่วนเกินโดยทำหน้าที่เป็นตัวรับความร้อน โดยทั่วไปโครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ชนิดนี้จะประกบกันโดยใช้แผ่นพิโซเซรามิกสองชนิด (เรียกว่า sandwich construction) ซึ่งจะทำให้การสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้นกว่าการใช้เพียงชนิดเดียว พิโซอิเล็กตริกทรานส์ดิวเซอร์แสดงรูปที่ 2-5 โดยทรานส์ดิวเซอร์นี้มีประสิทธิภาพในการใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 95% และสามารถปรับใช้งานได้ทุกช่วงของคลื่นอัลตราซาวนด์



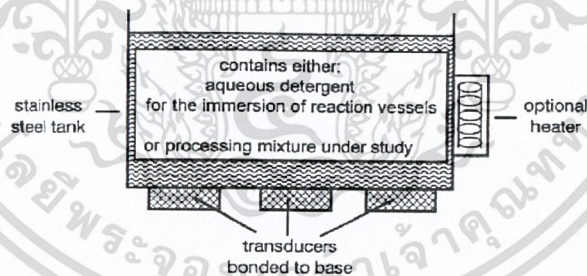
รูปที่ 2.5 พิโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ ที่มา : Mason (1998)

2.6.3 ประเภทของเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic reactor)

เครื่องอัลตราโซนิกที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีความแตกต่างกันตรงที่การออกแบบแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แหล่งกำเนิดคลื่นและตัวเครื่องหรือเซลล์ที่ใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดคลื่นโดยสามารถแบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ดังนี้

1. อ่างอัลตราโซนิก (ultrasonic baths)

อ่างอัลตราโซนิกเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีการนำมาใช้เป็นเวลานานแล้วโดยเฉพาะในห้องปฏิบัติการเนื่องจากมีราคาไม่แพงเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้ระบบโพรบโดยทั่วไปทรานส์ดิวเซอร์จะติดอยู่กับบริเวณฐานด้านล่างของอ่างและความถี่ที่ใช้งานส่วนใหญ่ประมาณ 40 kHz อ่างอัลตราโซนิกมีลักษณะดังรูปที่ 2-6

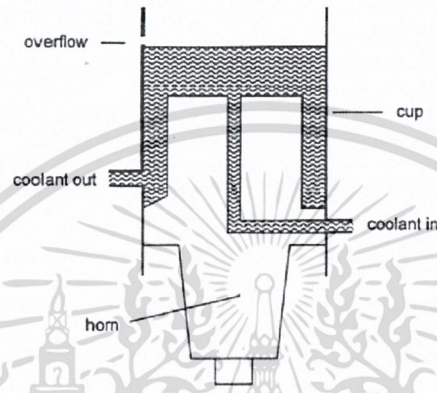


รูปที่ 2.6 อ่างอัลตราโซนิก ที่มา : Mason (1998)

สำหรับอ่างอัลตราโซนิกนั้นพลังงานสูงสุดที่สร้างได้จะอยู่ตรงบริเวณระดับความสูงค่าหนึ่งตลอดความลึกของอ่าง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดคลื่นจากการสะท้อน (reflection) ของคลื่นอัลตราซาวนด์ที่ถูกสร้างขึ้นตรงบริเวณรอยต่อระหว่างอากาศและของเหลว ซึ่งแยกโดยระยะทางที่เทียบเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นเสียงของของเหลวภายในอ่าง (สำหรับน้ำ มีค่า $\lambda = 37$ มิลลิเมตรที่ความถี่ 40 kHz) ดังนั้นถ้าระดับน้ำในอ่างลดลงต่ำกว่าค่า λ จะมีผลทำให้ไม่สามารถทำให้เกิดคลื่นเสียงที่มีพลังงานสูงได้ อ่างอัลตราโซนิกนั้นมีอุปกรณ์เสริมประเภทต่างๆ ที่นำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้ดีขึ้น เช่น อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (thermostatically controlled heating) อุปกรณ์กระจายคลื่น (frequency sweeps) ที่ทำให้แคปิตเวชันเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ อุปกรณ์ปรับระดับพลังงาน สวิตช์เปิดปิดแบบจังหวะหรือนาฬิกาจับเวลา เป็นต้น อ่างอัลตราโซนิกทั่วไปมักจะให้

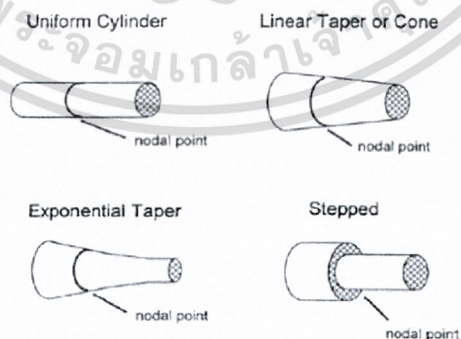
พลังงานต่ำ เพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายจากแคปวิตีที่เพิ่มขึ้นตรงบริเวณผนังด้านในของอ่าง นอกจากนั้นของเหลวที่เติมในอ่างมักมีปริมาณมากทำให้ปริมาณพลังงานมีค่าลดลง

รูปแบบของอ่างอัลตราโซนิกอีกประเภทหนึ่งเรียกว่าคัพฮอร์น (cup horn) แสดงดังภาพที่ 2.7 โดยจัดว่าเป็นอ่างอัลตราโซนิกที่สร้างพลังงานได้สูงมาก ทั้งนี้เนื่องจากบริเวณผิวหน้าที่เกิดคลื่นอัลตราซาวด์ซึ่งติดอยู่กับทรานส์ดีวเซอร์จะสัมผัสโดยตรงกับของเหลวและลักษณะการทำให้เกิดพลังงานหรือคลื่นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องและระดับของของเหลวซึ่งมีความสำคัญมาก



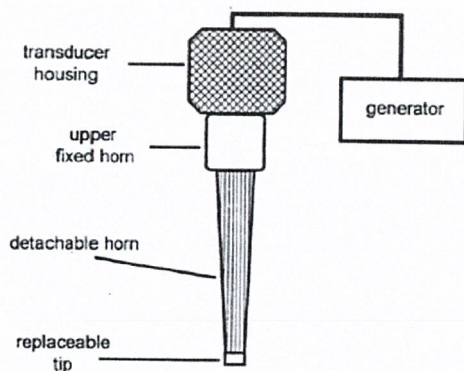
รูปที่ 2.7 อ่างอัลตราโซนิกแบบคัพฮอร์น ที่มา : Mason (1998)

ในการขยายพลังงานหรือคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากทรานส์ดีวเซอร์นั้น โดยทั่วไปจะนำทรานส์ดีวเซอร์มาต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่าฮอร์น (horn) ลักษณะของฮอร์นจะมีความแตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 2-8 โดยฮอร์นส่วนใหญ่จะให้ขนาดของความยาวคลื่นครึ่งหนึ่งหรือเป็นพหุคูณกับความยาวของคลื่นเสียงของวัสดุที่นำมาผลิต ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบแสดงดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2.8 ลักษณะของฮอร์นชนิดต่าง ๆ ที่มา : Mason (1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 ระบบอัลตราโซนิกแบบโพรบ ที่มา : Mason (1998)

3. อุปกรณ์ที่ใช้ระบบแผ่นสั่นคู่ขนาน (equipment involving parallel vibrating plates) ระบบนี้พบว่าเป็นทางเลือกที่ดีในการนำคลื่นอัลตราซาวด์มาใช้กับงานที่มีลักษณะต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์จะได้รับคลื่นอัลตราซาวด์อย่างสม่ำเสมอในระหว่างทางที่ไปยังเครื่อง อัลตราโซนิกซึ่งทำให้เกิดการสั่นที่บริเวณผนังด้านในตัวเครื่อง เมื่อแผ่นดังกล่าวเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันมากขึ้นจะมีผลทำให้การลดทอนพลังงาน (attenuation) ของคลื่นเสียงภายในของเหลวมีค่าต่ำสุดและไม่เกิดคลื่น ข้อดีของระบบแผ่นสั่นคู่ที่ติดตั้งในแต่ละด้านของของเหลวเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระบบแผ่นสั่นแผ่นเดียวคือคลื่นพลังงานที่เกิดขึ้นก่อนที่จะส่งถ่ายไปยังของเหลวจะสะท้อนไปยังแผ่นที่สั่นอีกแผ่นหนึ่งที่อยู่ตรงกันข้าม ทำให้ผลที่เกิดจากแรงกลมีค่าสูงสุด

4. ระบบการสั่นตามแนวรัศมี (radial vibrating systems)

ในการให้พลังงานคลื่นอัลตราซาวด์กับของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อนั้น วิธีที่ดีที่สุดคือการใช้การสั่นของท่อเพื่อทำให้เกิดคลื่นพลังงานขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดการไหลมีค่าสูงขึ้นรวมทั้งใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความข้นหนืดสูงได้ ลักษณะการตัดขวางของท่อดังกล่าวมีความสำคัญโดยท่อทรงกระบอกที่สั่นจะทำให้เกิดคลื่นอัลตราซาวด์สูงสุดตรงบริเวณกึ่งกลางของท่อเช่นเดียวกับท่อที่มีลักษณะหกเหลี่ยมและการเกิดพลังงานน้อยกว่าตรงบริเวณที่ใกล้พื้นผิวด้านในของท่อมีผลคือช่วยลดปัญหาที่เกิดจากการกัดกร่อนตรงบริเวณดังกล่าว การรานส์ดิฟเซอร์มาเชื่อมติดกับท่อโลหะโดยตรง ทำให้สามารถเกิดคลื่นในแนวรัศมีและเกิดบัพ (nodes) และปฏิบัพ (antinodes) เป็นช่วงระยะเท่ากับ $\lambda/2$ ตามความยาวของท่อ

2.7 เทคโนโลยีการบำบัดสีในน้ำเสีย (วนิดา 2555)

2.7.1. เทคโนโลยีทางกายภาพ (Physical technology)

1. การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีรูพรุนสูงและมีคุณสมบัติ ในการดูดซับสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในของเหลว หรือก๊าซเอาไว้ได้ในปริมาณสูง เนื่องจากมีรูขนาดเล็ก (Microporosity) (Duygu & Van, 2010) ทำให้สามารถกำจัดสีแท้และ สีปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยนำวัตถุดิบพวกสารอินทรีย์ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ถ่านหิน ปีโตรเลียม กะลามะพร้าว เปลือกถั่ว เมล็ดแข็ง กากชานอ้อย ชีลื้อย กระดุกสัตว์ เป็นต้น นำมาเผาด้วยความร้อนในเตาอบอากาศ และเผา

เร่งที่ อุณหภูมิสูงเพื่อให้เกิดความพรุน (Porosity) แล้วอัดด้วยไอน้ำร้อน ยิ่งยวดที่อุณหภูมิประมาณ 200-1,600 องศาเซลเซียส (Roop & Meenakshi, 2005)

2. การกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น สามารถแบ่งได้ 3 วิธี คือ อัลตราฟิวเตรชัน (Ultrafiltration) ออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis) และนาโนฟิวเตรชัน (Nanofiltration) แต่วิธีอัลตราฟิวเตรชันไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากมีขนาดรูเปิดของเยื่อกรองใหญ่ไม่สามารถกรองอนุภาคของสีออกจากน้ำเสียได้ (กัลยา ศรีสุวรรณ, 2547; ศุภลักษณ์ อรรถพร, 2552) ส่วนวิธีออสโมซิสย้อนกลับเหมาะสำหรับการกำจัดสีที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ได้แก่ สีแท้เป็นการกรองแยกน้ำออกจากของแข็งแขวนลอย หรือของแข็งที่ละลายน้ำ โดยผ่านรูพรุนขนาดเล็กและใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลผ่านตัวกรองเป็นกระบวนการที่ต้องผ่านเยื่อแผ่น 2 ชั้นตอน คือ เยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำกร่อย และเยื่อแผ่นออสโมซิสย้อนกลับที่บรรจุน้ำทะเล ซึ่งเยื่อแผ่นแรกสามารถกำจัดสีปรากฏซึ่งมาจากโรงฟอกย้อมได้ถึงร้อยละ 90 ความเข้มข้นของสีที่เหลืออยู่จะถูกส่งผ่านไปยังเยื่อแผ่นที่สองและสามารถกำจัดสีได้ถึงร้อยละ 94 สำหรับกระบวนการกำจัดสีโดยใช้แผ่นกรองนาโนโซลหลักการเหมือนออสโมซิสย้อนกลับแต่การกรองผ่านแผ่นนาโนมีประสิทธิภาพมากกว่าเนื่องจากมีรูขนาดเล็กกว่าทำให้แยกสีออกจากน้ำได้ดีกว่าโดยสามารถแยกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เช่น สารอินทรีย์ เชื้อจุลินทรีย์กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งขนาดของแผ่นกรองส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงประกอบที่มีรูพรุนประมาณ 1.5-2.5 นาโนเมตร และมีช่วงความดันที่ใช้ประมาณ 10-34 บาร์ เยื่อแผ่นนาโนสามารถกำจัดสีย้อมที่ความดัน 10 บาร์ อุณหภูมิ 45 และ 60 องศาเซลเซียสมากกว่าร้อยละ 97 และจะลดลงเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการกรองด้วยแผ่นนาโน ได้แก่ อัตราการไหลและลักษณะการไหล ความดันความเป็นกรดต่างและอุณหภูมิ

2.7.2 เทคโนโลยีการกำจัดสีทางเคมี (Chemical Technology)

1. การสร้างรวมตะกอน (Coagulation-flocculation) การกำจัดสีโดยการสร้างและรวมตะกอนเป็นการทำให้ตะกอนหรือสารแขวนลอยขนาดเล็ก (Colloid) รวมตัวกันเป็นตะกอนขนาดใหญ่ และสามารถตกตะกอน เนื่องจากอนุภาคของสารแขวนลอยมีประจุไฟฟ้าลบเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงทำลายประจุของอนุภาคหรือทำให้อนุภาค เป็นกลางโดยการเติมสารเคมีสร้างตะกอนเรียกว่ากระบวนการ สร้างตะกอน (Coagulation) หลังจากนั้นเกิดกระบวนการรวมกัน (Flocculation) ได้มากขึ้นโดยการเติมสารเคมีรวมตะกอน (Flocculants) ลงไปช่วยยึดหรือจับให้กลุ่มตะกอนที่รวมตัวกันเข้ามาจับเป็นกลุ่มตะกอนใหญ่ขึ้น เรียกว่า ฟล็อก (Floc) เมื่อ ตะกอนกลุ่มใหญ่ขึ้นก็มีน้ำหนักมากขึ้นก็จะสามารถตกตะกอน ออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งสารส้มมีคุณสมบัติทำหน้าที่เป็นทั้งสารสร้าง และรวมตะกอน

2. การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical Oxidation) กระบวนการออกซิเดชันทางเคมี ใช้สารเคมีเป็นปัจจัย สำคัญในการออกซิไดส์สารประกอบต่างๆ ในน้ำเสีย โดยสารเคมี ที่นิยมใช้เป็นตัวออกซิเดนต์อย่างแพร่หลาย ได้แก่ สารเคมีเฟนต์ัน (Fenton's reagent) และโอโซน (O_3)

กระบวนการเฟนต์ัน (Fenton process) กระบวนการเฟนต์ัน คือ การออกซิเดชันขั้นสูงโดยใช้สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ทำปฏิกิริยากับเฟอร์รัสไอออน ได้ไฮดรอกซิลเรดิคัล ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์สารอินทรีย์ ซึ่งไอออนบวกของเหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดย ไอศยอนอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยา เป็นตัวกลางสำคัญ ซึ่งอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลมีค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันสูงแสดงถึงความสามารถในการในการรับอิเล็กตรอน ถ้าตัวออกซิไดซ์ที่แรงจะรับอิเล็กตรอนได้ง่าย

มาก ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นสามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยากจนเปลี่ยนเป็นรูปคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดสีของโรงงานย้อมสิ่งทอ

กระบวนการไอโซนออกซิเดชัน (Ozone oxidation) การกำจัดสีด้วยโอโซนทำให้พันธะของโมเลกุลที่ทำให้เกิดสี (Chromophores) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลเล็กและสีหายไป โดยสามารถแยกสลายโมเลกุลของสีที่มีความยาวมากให้มีขนาดสั้นลง ทำให้สีของน้ำเสียลดลงซึ่งโอโซนเป็นตัวออกซิไดส์ที่รุนแรงมีประสิทธิภาพสูงในการทำลายสีในน้ำได้ประมาณ 20 เท่าของการละลายในน้ำของออกซิเจนสามารถกำจัดสีที่แท้จริง ทำลายโครงสร้างโมเลกุลแบบโครงสร้างแบบโซ่ของสารอินทรีย์

นอกจากนี้ยังมีกระบวนการกำจัดสีแบบไฟฟ้าเคมี (Electrochemical process) ซึ่งสามารถกำจัดสีรีแอกทีฟในน้ำเสียของ โรงงานฟอกย้อม โดยเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปฏิกริยาเคมีและพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ปฏิกริยารีดอกซ์ ซึ่งเกิดขึ้น โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารที่เกิดออกซิเดชันไปยัง สารที่เกิดรีดักชันผ่านตัวนำไฟฟ้าที่เหมาะสม ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปอ็อกซิเดชันของโลหะที่ก่อให้เกิดสี ทำให้เลข ออกซิเดชันของไอออนของโลหะเปลี่ยนไป และสามารถดูดซับกับสารแขวนลอยต่างๆ ที่อาจก่อให้เกิดสีด้วยตะกอนเบาในรูปของ ออกไซด์ที่ได้จากการแตกตัวของอิเล็กโตรดให้เกิดการตกตะกอนขึ้น

2.7.3 เทคโนโลยีทางชีวภาพ (Biological technology)

เทคโนโลยีทางกายภาพและเคมี เป็นการใส่สารเคมีในการกำจัดสี ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและตะกอน ทั้งยังเป็นการเพิ่มสารเคมีเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อม จึงมีการศึกษาการย่อยสลาย โครงสร้างของสีย้อมกลุ่มอะโซ (ประกอบด้วยหมู่ $-N=N-$ เกาะกับ วงอะโรมาติก) และแอนทราควิโนน (ประกอบด้วยหมู่ conjugated aromatics) โดยจุลินทรีย์จำพวกยีสต์ราและแบคทีเรียที่ย่อยบริเวณหมู่โครโมฟอร์และลดความเป็นพิษของสี นอกจากนี้ Marco et al (2006) ศึกษาการย่อยสีรีแอกทีฟกลุ่มไดอะโซโดยยีสต์ *Candida oleophila* ที่แยกได้จากน้ำทิ้งในโรงงานสกัดน้ำมันมะกอก พบว่าการย่อยเกิดได้ดีในช่วงการ เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในอัตราคงที่ (exponential growth phase) โดยการย่อยเกิดโดยเอนไซม์ที่มีกิจกรรมคล้ายกับเอนไซม์อะโซรีดักเตส (azoreductase) ที่พบในแบคทีเรียสามารถลดสีในน้ำทิ้งจากโรงงานฟอกย้อมได้

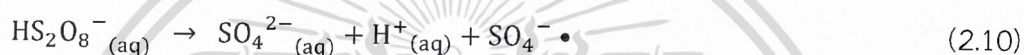
2.8 เปอร์ซัลเฟต (Persulfate)

2.8.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเปอร์ซัลเฟต

เปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (ซึ่งต่อไปนี้จะกล่าวว่าเปอร์ซัลเฟต) ซึ่งเป็นแอนไอออนที่แรง ($S_2O_8^{2-}$) เปอร์ซัลเฟตที่พบมากที่สุดคือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate), โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (Potassium persulfate) และโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (Sodium persulfate) สารเหล่านี้เป็นสารอินทรีย์ มีลักษณะเป็นของแข็ง และมีคุณสมบัติเป็นสารออกซิไดส์ที่รุนแรง สำหรับการทำให้ปฏิกริยาออกซิเดชันที่จุดกำเนิด (ISCO) โซเดียมเปอร์ซัลเฟตมักนิยมใช้กันมากที่สุด แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตมักจะถูกใช้น้อยกว่า เกลือแอมโมเนียมจะส่งผลให้เกิดการปนเปื้อนของแอมโมเนียมและไนเตรตในน้ำใต้ดิน โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตละลายได้น้อยและมีราคาแพงกว่าโซเดียมเปอร์ซัลเฟต การแบ่งแยกของเกลือทั้งสามชนิดถูกเปรียบเทียบกันแม้ว่าการละลายของเกลือทั้งสามชนิดจะมีความสามารถในการละลายที่แตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น การละลายของโซเดียม

โซเดียมเปอร์ซัลเฟตในน้ำจะแยกเปอร์ซัลเฟตแอนไอออนและโซเดียมแคทไอออนออกจากกัน กลือ ทั้งสามตัวนี้จะสลายตัวก่อนที่อุณหภูมิจะถึง 100 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านี้

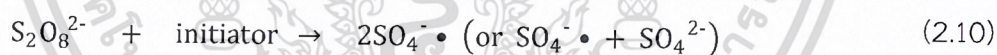
ในสารละลายที่เป็นของเหลว ที่อุณหภูมิห้อง และค่า pH ที่เป็นกลางเปอร์ซัลเฟตจะค่อนข้าง เสถียร เปอร์ซัลเฟตไอออนจะไฮโดรไลต์อย่างช้า ๆ และเมื่ออยู่ใน pH ที่เป็นกรดจะอยู่ในรูปของเปอร์ ออกซิโมโนซัลเฟต หรือไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง เปอร์ออกซิโมโนซัลเฟต และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ทั้งสองตัวนี้ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ได้อย่าง มาก ซึ่งมีประสิทธิภาพในการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu (2008) ที่กล่าวไว้ว่าสภาวะกรดมีปริมาณโปรตอนละลายในน้ำเป็นจำนวนมาก ซึ่งโปรตอนเข้าไปทำ ปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟตเกิดเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟตได้อย่างรวดเร็ว แสดงดังในสมการ (2.9) และ (2.10)



2.9 กระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน (Persulfate oxidation) (ปีนารี 2556)

เปอร์ซัลเฟตเป็นสารออกซิไดซ์ที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นสารออกซิ แตนที่ที่รุนแรงมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน (Standard oxidation-reduction potential : E°) เท่ากับ 2.01 โวลต์ เป็นสารที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเฉพาะกับสารบางชนิด มีความเสถียรในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ ห้องและราคาถูก

Oh et al. (2009) และ Liang et al. (2011) ได้อธิบายสมการการเกิดปฏิกิริยาของเปอร์ ซัลเฟต โดยแสดงดังสมการที่ 2.10 และ 2.11



ปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันสามารถเกิดได้แต่ใช้ระยะเวลาที่ยาวนาน ดังนั้นการเติม ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) จึงเป็นการส่งเสริมให้เปอร์ซัลเฟตแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟต ($\text{SO}_4^{\cdot -}$) ได้รวดเร็วขึ้น (Liang et al., 2008) การเร่งปฏิกิริยาเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชันสามารถทำได้ หลายวิธีเช่น การกระตุ้นด้วยความร้อน การเติมโลหะทรานซิชัน เช่น เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Fe^0) คอปเปอร์ไอออน (Cu^{2+}) ซิลเวอร์ไอออน (Ag^+) แมงกานีสไอออน (Mn^{2+}) เพอร์สไอออน (Fe^{2+}) และเพอริกไอออน การใช้แสง (photolysis) และการใช้คลื่นเสียง (sonochemical) เพอร์สไอออนสามารถ กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของเปอร์ซัลเฟตได้เร็วกว่ากระตุ้นปฏิกิริยาออกซิเดชันของเปอร์ แมงกานีส (Zhao et al., 2010) นอกจากนี้เพอร์สไอออนและเพอริกไอออนทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง โมเลกุลของออกซิเจนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โอโซนและน้ำจันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Rao et al., 1995; Xu and Li., 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเกลือเปอร์ซัลเฟต

ชื่อทางเคมี	Ammonium peroxydisulfate	Potassium peroxydisulfate	Sodium peroxydisulfate
ลักษณะทางกายภาพ	ผลึก(โมโนคลินิก)	ผลึก(ไตรคลินิก)	ผลึก(โมโนคลินิก)
จุดหลอมเหลว	≈120 °C	≈100 °C	>180 °C
จุดเดือด	-	-	-
สูตรเคมี	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	K ₂ S ₂ O ₈	Na ₂ S ₂ O ₈
น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	228.2	270.3	238.1
ความหนาแน่นผลึกที่ 20°C (g/cc)	1.98	2.48	2.59
สี	สีขาวนวล	สีขาว	สีขาว
กลิ่น	ไม่มีกลิ่น	ไม่มีกลิ่น	ไม่มีกลิ่น
ชื่อทางเคมี	Ammonium peroxydisulfate	Potassium peroxydisulfate	Sodium peroxydisulfate
ความหนาแน่นของช่องว่าง(g/cc)	1.05	1.30	1.12
การละลาย(1g/100g) ที่ 25°C ในน้ำ	85	6	73
การละลาย(1g/100g) ที่ 50°C ในน้ำ	116	17	86

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.10.1 โชคเอื้อ ศรีสุชาติ (2549) ได้ศึกษาความสามารถในการลดสีน้ำเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษโดยใช้โซเดียมโบโรไฮไดรด์ โดยมีโซเดียมเมตาไบซัลไฟต์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการทำงานวิจัยได้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงาน 3 แห่ง ซึ่งมีกระบวนการต้มเยื่อแบบกราฟท์และกระบวนการฟอกเยื่อ ผลการทดลองสรุปได้ว่า น้ำเสียโรงงานที่ 1 ซึ่งมีวัตถุดิบคือไม้ไผ่ มีกระบวนการฟอกเยื่อ มีค่าพารามิเตอร์ คือ เวลาที่ใช้ในการกวน ค่าพีเอชที่เหมาะสม ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสม และ อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม เท่ากับ 120 นาที, 4.0, 0.10 โมลต่อลิตร, 1 ต่อ 2 โดยสามารถลดสีได้ 80 เปอร์เซ็นต์ และลดลิกนินได้ 95 เปอร์เซ็นต์ น้ำเสียโรงงานที่ 2 ซึ่งมีวัตถุดิบคือยูคา ลิปตัส มีกระบวนการฟอกเยื่อ มีค่าพารามิเตอร์ คือ เวลาที่ใช้ในการกวน ค่าพีเอชที่เหมาะสม ปริมาณ

โซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสม และ อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม เท่ากับ 300 นาที่, 6.0, 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร, 1 ต่อ 0.5 โดยสามารถลดสีได้ 28 เปอร์เซ็นต์ และลดลิกนินได้ 95 เปอร์เซ็นต์ น้ำเสียโรงงานที่ 3 ซึ่งวัตถุดิบคือ ยูคาลิปตัส มีค่าพารามิเตอร์ คือ เวลาที่ใช้ในการกวน ค่าพีเอชที่เหมาะสม ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสม และ อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม เท่ากับ 100 นาที่, 6.0, 0.04 มิลลิกรัมต่อลิตร, 1 ต่อ 1.5 โดยสามารถลดสีได้ 75 เปอร์เซ็นต์ และลดลิกนินได้ 36 เปอร์เซ็นต์ สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์(อัลคาไลน์ลิกนิน 2000 พีพีเอ็ม) มีค่าพารามิเตอร์ คือ เวลาที่ใช้ในการกวน ค่าพีเอชที่เหมาะสม ปริมาณโซเดียมโบโรไฮไดรด์ที่เหมาะสม และ อัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสม เท่ากับ 120 นาที่, 10 ถึง 12, 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร, 1 ต่อ 0.5 ตามลำดับ โดยสามารถลดสีได้ 74 เปอร์เซ็นต์ และลดลิกนินได้ 60 เปอร์เซ็นต์

2.10.2 จันทิมา และคณะ (2552) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตกล่องกระดาษที่มีค่าซีไอดีอยู่ในช่วง 125-172 มิลลิกรัม/ลิตร ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 554 นาโนเมตร อยู่ในช่วง 0.07-0.90 ด้วยปฏิกิริยาเฟนตันและทำการแยกตะกอนเฟนตันที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาด้วย พอลิเมอร์ชนิดโพลีเอทิลามีน (Polyethylamine) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพ การบำบัดที่ดีคือ ความเข้มข้น H_2O_2 ที่ 0.008-0.011 โมล/ลิตร ความเข้มข้น Fe^{2+} ที่ 0.20-0.27 กรัม/ลิตร ค่าพีเอชของการตกตะกอนเท่ากับ 8 และปริมาณพอลิเมอร์เท่ากับ 0.003 กรัม/ลิตร โดย ระบบให้ค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีและสีเท่ากับ 35-40% และ 90-95% ตามลำดับ นอกจากนี้ ยังพบว่า แสงมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเฟนตัน โดยสภาวะที่ไม่มีแสงจะทำให้ประสิทธิภาพการบำบัด ค่าซีไอดีและสีลดลงถึง 20% และ 3% ตามลำดับตะกอนที่ได้จากปฏิกิริยาเฟนตัน (Fe^{3+}) สามารถนำกลับมาใช้แทนสารตั้งต้นของเหล็ก Fe^{2+} ได้ถึง 20-40%

2.10.3 รสสุคนธ์ และศิวาพร (2554) น้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบยากต่อการบำบัด งานวิจัยนี้จึงศึกษาการลดลงของค่าซีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วย ปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตันบนตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิธพันธ์ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดลง ของซีไอดีในน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินา การทดลองทำโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor) จากผลการ ทดลอง พบว่า เมื่อทำปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก เคลือบบนตัวรองรับอะลูมินากับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (450 ppm : 10,000 ppm) ร้อยละ ของการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 45.9 ซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดลงของค่าซีไอดีมากที่สุดภายใน 30 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ และเมื่อทำ ปฏิกิริยาโฟโต-เฟนตัน โดยใช้อัตราส่วน ระหว่างปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเฟอร์รัสซัลเฟตกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (450 ppm : 10,000 ppm) จะเห็นได้ว่า ร้อยละของการลดลงของค่าซีไอดีเท่ากับ 24.09 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ สภาวะเดียวกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบวิวิธพันธ์ มีประสิทธิภาพในการลดลงของค่าซีไอดีในน้ำเสียมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาแบบเอกพันธ์

2.10.4 กัญญารัตน์ และเกษมสันต์ (2555) ศึกษาการบำบัดสารอินทรีย์ย่อยสลายยากในน้ำเสียผลการสังเคราะห์ที่มีค่า COD เท่ากับ 600 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยวิธีเฟนตันร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ทำการทดลองเปรียบเทียบการลดค่า COD ด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ปฏิกิริยาเฟนตันและปฏิกิริยาयर่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก ที่ pH3 สกัดส่วนโดยโมลเฟอร์รัสไอออนต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 1:1 ที่เวลา 60 นาที ผลใช้การทดลองพบว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับคลื่นเสียงอัลตรา

โซนิคมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถลดค่า COD เหลือ 488 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 23.75 เปอร์เซ็นต์ และ 384 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การศึกษาการบำบัด COD ด้วยปฏิกิริยาเพนตันร่วมกับคลื่นอัลตราโซนิคให้ผลการบำบัดดีกว่าปฏิกิริยาเพนตัน โดยให้อัตราส่วนโมลเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 1:1 ผลการบำบัดจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกและมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถบำบัดค่า COD ได้มากเหลือเพียง 72 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็น 88.75 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบการบำบัดทั้ง 4 วิธี พบว่าการใช้ปฏิกิริยาเพนตันร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิคเป็นวิธีที่ให้ผลการบำบัดดีที่สุด จากนั้นทำการศึกษาสัดส่วนโมลของเฟอร์รัสต่อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ 15 นาที pH3 สัดส่วนโดยโมลคือ 0.1:1, 0.5:1, 1:1, และ 2:1 ผลการบำบัดคือ ค่า COD มีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ปฏิกิริยาเพนตันที่สัดส่วน 2:1 สามารถลดค่า COD ได้มากที่สุด คือ 360 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อนำคลื่นเสียงอัลตราโซนิคร่วมกับปฏิกิริยาเพนตันในการบำบัด ที่สัดส่วน 1:1 สามารถลดค่า COD ได้มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 176 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถบำบัดได้ 43.75 เปอร์เซ็นต์ และ 72.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.10.5 Marco. et al. (2012) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษด้วยกระบวนการเพนตัน ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) และโฟโต-เพนตันจากแสงอาทิตย์ ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$) โดยปฏิกิริยาโฟโต-เพนตัน จากแสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการบำบัดที่มากกว่าปฏิกิริยาที่ไม่มีแสง ภายใต้สภาวะการทดลองเดียวกัน สามารถกำจัด DOC COD และฟีนอล ได้มากกว่า 90% โดยกระบวนการโฟโต-เพนตันจาก แสงอาทิตย์ ดำเนินการที่เหล็ก 5 mg/L สามารถกำจัด DOC ได้ถึง 90% ใช้พลังงานแสง 31 kJ/L และใช้ H_2O_2 50 mM และเมื่อทำการทดสอบ Respirometry และอัตราส่วน BOD5/COD ด้วย กระบวนการโฟโต-เพนตันจากแสงอาทิตย์ ดำเนินการโดยใช้ปริมาณเหล็ก 20 และ 50 mg/L แสดงให้เห็นว่ากระบวนการโฟโต-เพนตันจากแสงอาทิตย์สามารถย่อยสลาย DOC ได้ถึง 90%

2.10.6 Kazuaki. et al. (2013) การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการทำงานร่วมกันของปฏิกิริยา Sonocatalytic (โดยใช้อัลตราซาวนด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์) และปฏิกิริยาเพนตันทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลแรดคัล ($\text{OH}\cdot$) เพิ่มมากขึ้นจากเดิม โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นของกรด Dihydroxybenzoic (DHBA) 13 และ 115 μM ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที ของปฏิกิริยา Sonocatalytic และ Fenton ตามลำดับ ในขณะที่ความเข้มข้นของ DHBA เป็น 378 μM ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 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

2.10.7 สุกัญญา โปงรักษ์ (2558) ได้ศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีปริมาณความเข้มข้นของซีไอดีอยู่ประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ที่มีค่าพีเอชประมาณ 7-8 และค่าซีไอดีประมาณ 2,400-2,500 มิลลิกรัม/ลิตร ด้วยกระบวนการเพนตัน โฟโต-เพนตัน และโซโน-เพนตัน ศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดซีไอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ ปัจจัยต่างๆที่ศึกษาในกระบวนการเพนตัน ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.00-0.05 โมล อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:0-1:5 ค่าพีเอช 2-6 และไม่ทำการปรับพีเอช และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 0-50 นาที ส่วนปัจจัยการศึกษาในกระบวนการ

โฟโต-เพนตัน คือ ค่าความเข้มแสงต่อการเกิดปฏิกิริยา 0-500 ลักซ์ และระยะเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา 0-40 นาที และปัจจัยที่ได้ศึกษาในกระบวนการโซโน-เพนตัน คือ ระยะเวลาในการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงต่อการเกิดปฏิกิริยา 0-40 นาที โดยทำแบลงค์คือน้ำกลั่น และการทดลองทั้งหมดทำ 3 ซ้ำ จะเห็นได้ว่าปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.03 โมล อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน:ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 1:2 ค่าพีเอช 3 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 40 นาที ในกระบวนการเพนตัน ค่าความเข้มแสงต่อการเกิดปฏิกิริยา 200 ลักซ์ และระยะเวลาการฉายแสงในการเกิดปฏิกิริยา 10 นาที ในกระบวนการโฟโต-เพนตัน ระยะเวลาการให้คลื่นความถี่เหนือเสียงต่อการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ในกระบวนการโซโน-เพนตัน ทำให้มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีและสีเหมาะสมที่สุดโดยให้ประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และ 97 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อนำสภาวะที่เหมาะสมที่ได้ไปบำบัดกับน้ำเสียจริงจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษพบว่า กระบวนการโฟโต-เพนตัน มีความสามารถในการบำบัดซีโอดีและสีได้มากกว่ากระบวนการเพนตัน และกระบวนการโซโน-เพนตัน กล่าวคือกระบวนการโฟโต-เพนตัน บำบัดซีโอดีและสีได้ 95.07 และ 91.77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่เนื่องจากกระบวนการเพนตันในขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดการตกตะกอนโลหะหนักของเหล็ก จึงทดลองนำตะกอนโลหะหนักของเหล็กเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ใน กระบวนการผลิต พบว่าไม่มีความเหมาะสมที่จะนำกลับมาใช้ได้ เนื่องจากเหล็กที่ได้จากการตกตะกอนมาแล้วนั้น เมื่อนำกลับเอาไปเข้าทำปฏิกิริยาอีกครั้งไม่มีส่วนช่วยในการทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้น แต่กลับมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดลดลงทำให้ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียแล้วปล่อยลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติได้เนื่องจากมีค่าซีโอดีเกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้คือ 120 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 เครื่องกรองแบบลดความดันและกรวยบุชเนอร์
- 3.1.1.5 เตาให้ความร้อน (hot plate)
- 3.1.1.6 กระจกทรงขนาด 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, Switzerland
- 3.1.1.9 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827, Switzerland
- 3.1.1.10 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) ยี่ห้อ PG INSTRUMENTS รุ่น T60, USA
- 3.1.1.11 เครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) ยี่ห้อ NDI รุ่น 136H, USA
- 3.1.1.12 ตู้อบ ที่อุณหภูมิ 150 ± 2 องศาเซลเซียส รุ่น UN55, Germany

3.1.2 สารเคมี

- 3.1.2.1 โซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK
- 3.1.2.2 เพอร์ซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Unilab, Austratia
- 3.1.2.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK
- 3.1.2.4 กรดซัลฟูริก (Conc. H_2SO_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 (Ag_2SO_4) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK
- 3.1.2.7 1,10-พีแนนโทลิน ($\text{C}_{12}\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Panreac, E.U.
- 3.1.2.8 แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟตเฮกซะไฮเดรต ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท Loba Chemie, India
- 3.1.2.9 โคบอลคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) AR Grade บริษัท J.T.Baker, USA
- 3.1.2.10 โพแทสเซียมคลอโรแพลตตินेट (K_2PtCl_6) AR Grade
- 3.1.2.11 ไฮโดรคลอริก (HCl) AR Grade บริษัท Carlo Erba, UK
- 3.1.2.12 ลิกนิน, อัลคาไลน์ ($\text{C}_{30}\text{H}_{25}\text{ClN}_6$) บริษัท Aldrich Chemistry, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ (ซีไอดี 923.36 มิลลิกรัม/ลิตร)

ละลายลิกนิน 1 กรัม ด้วยน้ำกลั่นและเจือจางในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 ลูกบาศก์ เซนติเมตร จากนั้นนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของ ซีไอดี (ด้วยวิธี Closed Reflux, Titrimetric Method) และสี (ด้วยวิธี ADMI Tristimulus Filter Method และใช้เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตร โฟโตมิเตอร์)

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การบำบัดซีไอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออน

3.3.1.1 การศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน:เปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 6 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ เป็น 3 ด้วยกรดซัลฟูริก 6 โมลาร์
3. เติม $\text{Fe}^{2+}:\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ในอัตราส่วน 1: 0, 1: 1, 1: 2, 1: 3, 1: 4 และ 1: 5 แล้วนำไปปั่นกวนด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 50 นาที
4. ปรับค่าพีเอชเป็น 8 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ ตั้งทิ้งไว้ 60 นาที
5. กรองตะกอนเหล็กไฮดรอกไซด์ด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ
6. นำสารละลายส่วนใสไปวิเคราะห์ค่าซีไอดี และความเข้มข้นสี
7. ทดลองอัตราส่วนที่ทำการทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ
8. ทำการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ สำหรับอัตราส่วนที่วิเคราะห์แล้วสามารถลดค่า ซีไอดีและความเข้มข้นสีได้มากที่สุด

3.3.1.2 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 6 โมลาร์ และไม่ทำการปรับพีเอช 1 บีกเกอร์
3. เติม $\text{Fe}^{2+}:\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ในอัตราส่วน ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 แล้วนำไปปั่นกวนด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 50 นาที
4. ทำตามข้อ 4-8 ใน 3.3.1.1

3.3.1.3 การศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

1. เตรียมบีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร จำนวน 5 ใบ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมได้จากข้อ 3.2 ให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2. ปรับพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์แต่ละบีกเกอร์ ให้เป็นไปตามที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.2
3. เติม $\text{Fe}^{2+}:\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ในอัตราส่วน ที่เหมาะสมที่หาได้จากการทดลองในข้อ 3.3.1.1 แล้วนำไปปั่นกวนด้วย magnetic stirrer เป็นเวลา 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที
4. ทำตามข้อ 4-8 ใน 3.3.1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

3.3.2 การบำบัดซีโอดีและสีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออน โดยมีกระบวนการโซนิเคชันร่วมด้วย

3.3.2.1 การศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม

ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนต่อเปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.1.1 และพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลอง 3.3.1.2 แต่เปลี่ยนจากการใช้เครื่อง magnetic stirrer เป็นใช้เครื่อง ultrasonic bath



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

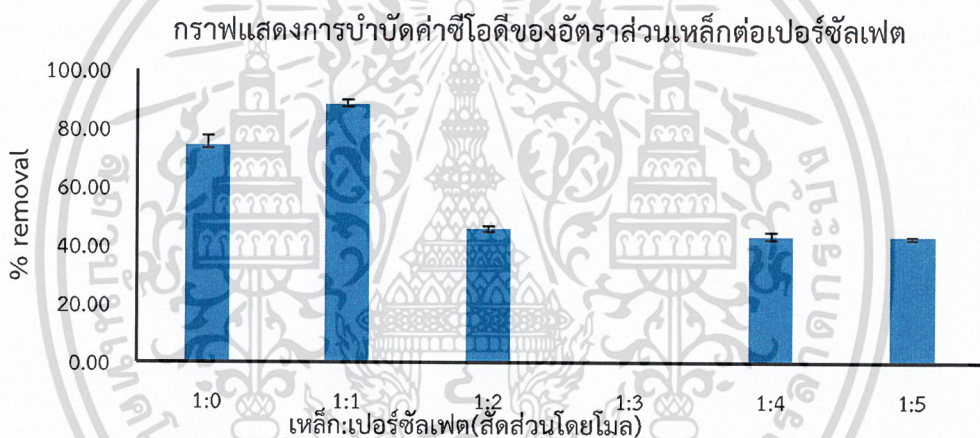
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ที่มีค่าพีเอชประมาณ 7-8 ซีไอดีประมาณ 800-900 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสีประมาณ 1,400-1,600 ADMI ซึ่งมีขั้นตอนการศึกษา คือการหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดด้วยเพอร์สไอออน/เปอร์ซัลเฟต และโซนิเคชัน โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออนต่อเปอร์ซัลเฟต พีเอช และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

4.1 การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน

4.1.1 การบำบัดด้วยเพอร์สไอออน/เปอร์ซัลเฟต

4.1.1.1 การศึกษาหาปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน/เปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสม



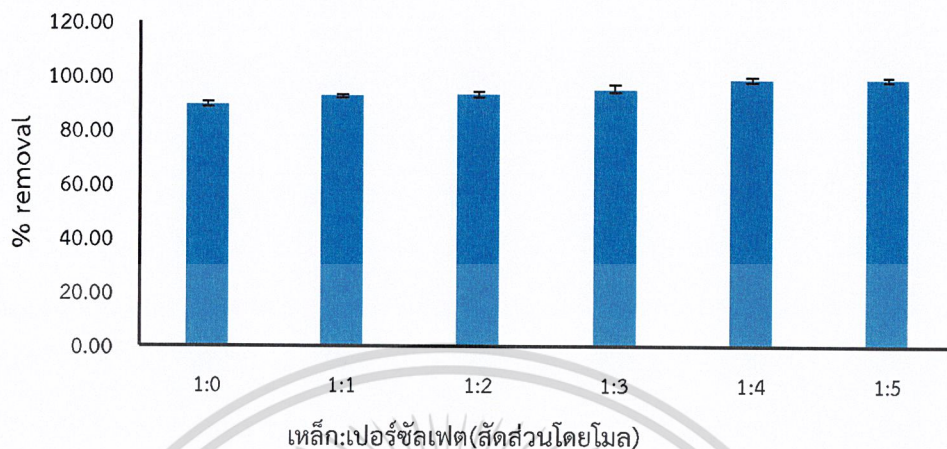
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีไอดีของอัตราส่วนเหล็กต่อเปอร์ซัลเฟต

จากการศึกษาผลของปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน/เปอร์ซัลเฟตที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน โดยทำการทดลองแปรผันค่าปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน/เปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วน 1: 0, 1: 1, 1: 2, 1: 3, 1: 4 และ 1: 5 โดยปรับพีเอชเป็น 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีค่าซีไอดี 923.36 มิลลิกรัม/ลิตร หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัดได้ 74.30 ± 3.31 , 88.49 ± 1.56 , 45.85 ± 0.90 , 0.00 , 43.25 ± 1.56 และ 43.25 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.1 การศึกษานี้พบว่าความเข้มข้นเพอร์สไอออน/เปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมคืออัตราส่วน 1: 1 แต่ที่อัตรา 1: 2, 1: 4, และ 1:5 จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ในการบำบัดที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในอัตรา 1:3 ที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดเป็น 0.00 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการวิเคราะห์ค่าซีไอดีนั้นต้องวิเคราะห์ที่ค่าพีเอชเป็นกรด (ไพทอริย, 2560) แต่

จากการทดลองพีเอชสุดท้ายก่อนนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอดีมีค่าพีเอชเป็นเบสจึงทำให้เปอร์เซ็นต์การบำบัดเป็นศูนย์

ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอื่น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการบำบัดค่าสีของอัตราส่วนเหล็กต่อเปอร์ซัลเฟต



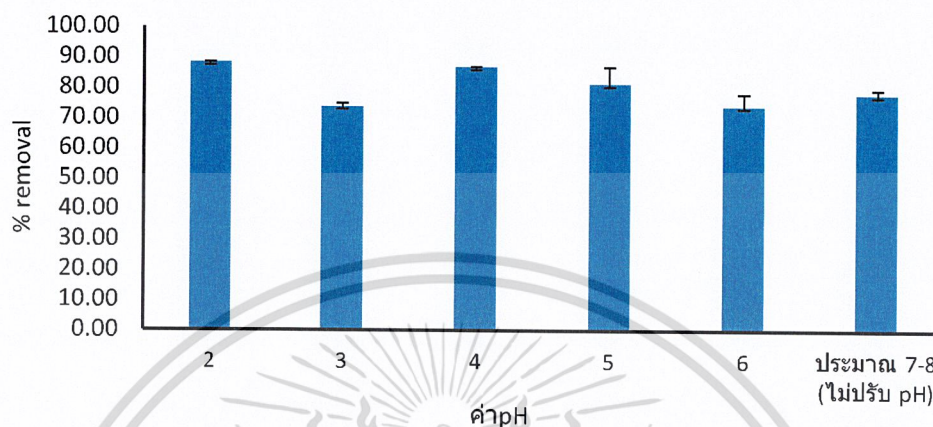
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าสีของอัตราส่วนเหล็กต่อเปอร์ซัลเฟต

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันค่าปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน/เปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วน 1: 0, 1: 1, 1: 2, 1: 3, 1: 4 และ 1: 5 โดยปรับพีเอชเป็น 3 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ 1,550.44 ADMI หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 89.45±0.95, 92.81±0.14, 93.18±1.20, 94.97±1.79, 98.86±0.77 และ 98.96±0.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อเติมเปอร์ซัลเฟต มีผลทำให้ค่าประสิทธิภาพในการกำจัดสีมีค่าสูงขึ้นมาก เนื่องจากเฟอร์รัสไอออนสามารถกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟต อนุมูลอิสระของซัลเฟตที่เกิดขึ้นจึงไปสลายพันธะคู่และพันธะเดี่ยวของโครงสร้างสารอินทรีย์ ทำให้ความเข้มสีลดลงได้

ดังนั้น อัตราส่วนโดยโมลของเฟอร์รัสไอออน/เปอร์ซัลเฟต ที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี สี และในแง่ของการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมี คือ 1: 1 ซึ่งสามารถลดปริมาณซีโอดีได้ 88.49±1.56 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงได้ 98.96±0.63 เปอร์เซ็นต์

4.1.1.2 การศึกษาหาค่าพีเอชที่เหมาะสม

กราฟแสดงการบำบัดค่าซีโอดีของค่าพีเอชที่เหมาะสม

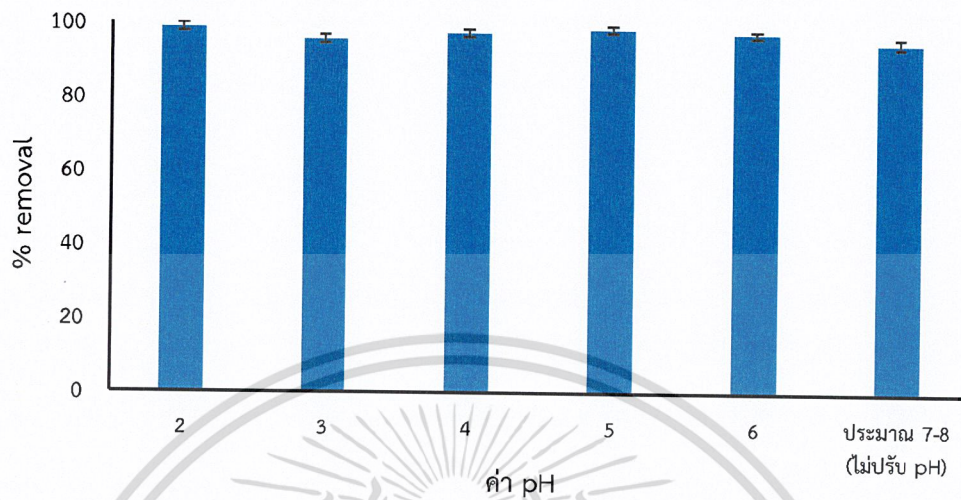


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีโอดีของค่าพีเอชที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลักษณะที่ได้นั้นได้ทำการทดลองแปรผันค่าพีเอชดังนี้ ไม่ทำการปรับพีเอช และ 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน/เปอร์ซัลเฟตที่หาได้จากการทดลองในข้อ 4.1.1.1 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 นาที พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีค่าซีโอดี 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัดได้ 78.06 ± 1.52 , 88.49 ± 0.00 , 73.93 ± 0.90 , 86.93 ± 0.00 , 81.47 ± 5.52 และ 74.16 ± 4.00 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าพีเอช 2 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้สูงที่สุด เนื่องจากเฟอร์รัสไอออน และ เปอร์ซัลเฟต จะมีเสถียรภาพมากขึ้นในสภาวะความเป็นกรด สภาวะกรดมีปริมาณโปรตอนละลายในน้ำเป็นจำนวนมากซึ่งโปรตอนเข้าไปทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟตเกิดเป็นอนุมูลอิสระของซัลเฟตได้อย่างรวดเร็ว ตามสมการ (2.9) และ (2.10) ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงการบำบัดค่าสีของค่าพีเอช

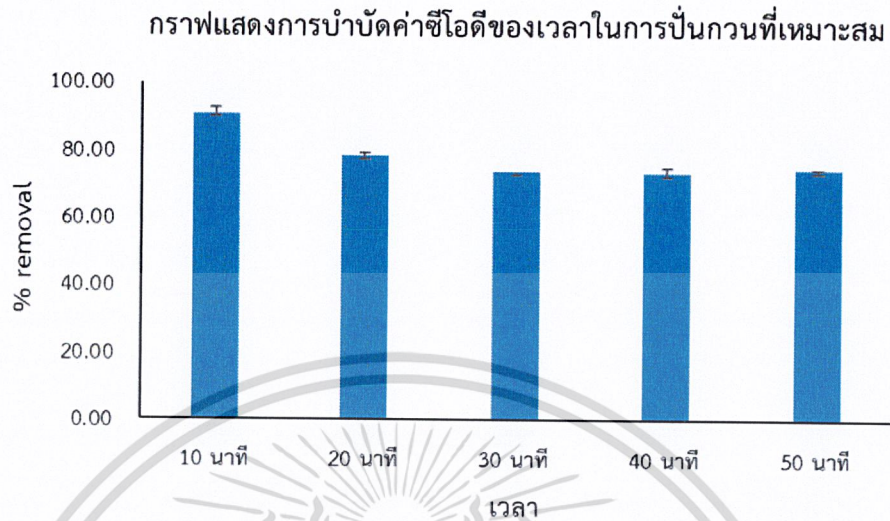


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าสีของค่าพีเอชที่เหมาะสม

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันค่าพีเอชดังนี้ คือ ไม่ทำการปรับพีเอช 2, 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ทำให้ค่าสีลดลงจากเริ่มต้นคือ 1,480.65 ADMI หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 94.76 ± 1.42 , 98.80 ± 1.29 , 95.64 ± 1.10 , 97.44 ± 0.90 , 98.53 ± 1.67 และ 97.35 ± 0.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูป 4.4 พบว่าการบำบัดสีที่พีเอช 2, 4, 5 และ 6 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีไม่ต่างกัน เนื่องจากปฏิกิริยาจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด แต่ในทางตรงกันข้ามหากมีพีเอชที่สูงขึ้นจะยิ่งทำให้เฟอร์รัสไอออนไม่เสถียร เปลี่ยนรูปเป็นเฟอร์ริกไอออนได้ง่าย ทำให้มีปริมาณของเฟอร์รัสไอออนที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ลดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดสีก็จะลดลง

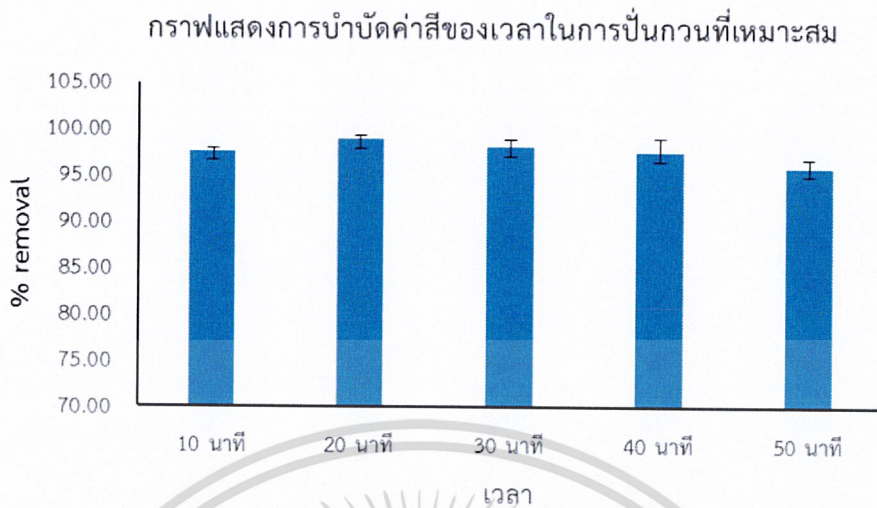
ดังนั้น ค่าพีเอชที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี สี คือพีเอช 2 ซึ่งสามารถลดปริมาณซีโอดีลงได้ 88.49 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงได้ 98.80 ± 1.29 เปอร์เซ็นต์

4.1.1.3 การศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีโอติของเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม

จากการศึกษาผลของเวลาที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินได้ทำการทดลองแปรผันเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน/เปอร์ซัลเฟตที่หาได้จากการทดลอง 4.1.1.1 และพีเอชที่หาได้จากการทดลอง 4.1.1.2 พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีค่าซีโอติ 847.00 มิลลิกรัม/ลิตร หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัดได้ 90.83 ± 1.04 , 78.35 ± 3.31 , 73.67 ± 1.10 , 73.41 ± 0.90 และ 74.45 ± 0.00 ตามลำดับ ดังรูป 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 10 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดดีที่สุด เนื่องจากเวลาที่อนุโมลอิสระซัลเฟตจับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น และหลังจากเวลาที่ 20-50 นาที ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์จะเริ่มคงที่และให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกัน

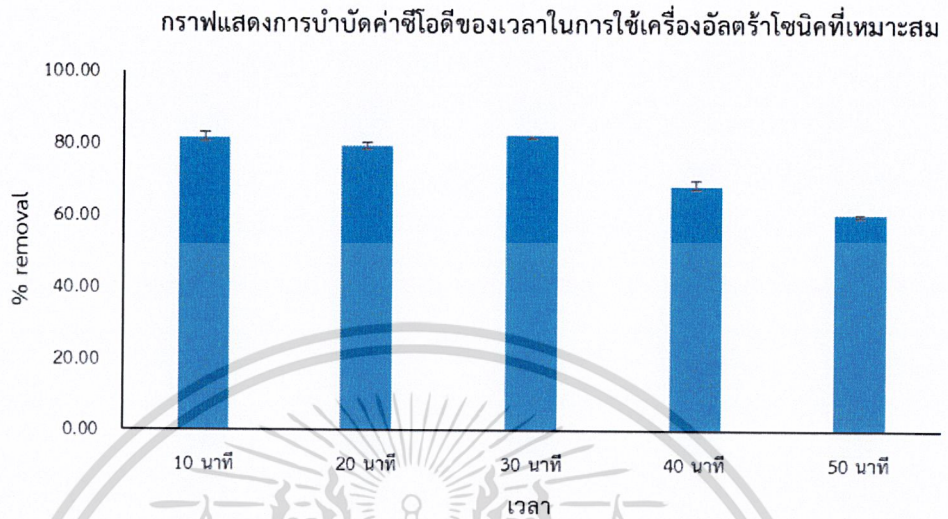


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าสีของเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ 1,471.41 ADMI หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 97.62 ± 0.31 , 98.95 ± 0.37 , 98.11 ± 0.69 , 97.58 ± 1.31 และ 95.96 ± 0.79 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.6 จากรูปพบว่าการปั่นกวนสารด้วยเพอร์สโอดอนและโซเดียมเปอร์ซัลเฟตสามารถเกิดปฏิกิริยากันเองได้เช่นกันทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดี และเมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจาก 10-30 นาที ก็จะมีความสามารถในการบำบัดสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และค่าสีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น จาก 40-50 นาที ก็จะสามารถบำบัดสีได้ลดลงจนไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

ดังนั้น ค่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี สี คือเวลาที่ 10 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณซีไอดีได้ 90.83 ± 1.04 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีลงได้ 98.95 ± 0.37 เปอร์เซ็นต์

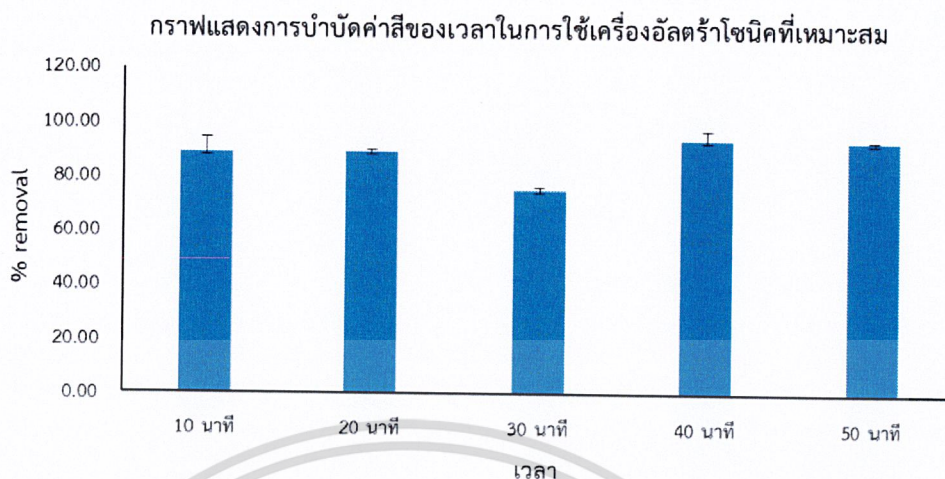
4.2 การศึกษาหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมโดยร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าซีโอดีในการใช้เครื่องอัลตราโซนิก

จากการศึกษาเวลามีต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลักษณะได้ทำการทดลองแปรผันเวลาในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ โดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน/เปอร์ซัลเฟตที่เหมาะสมจากการทดลอง 4.1.1.1 และพีเอชเหมาะสมจากการทดลอง 4.1.1.2 พบว่า น้ำเสียสังเคราะห์เริ่มต้นมีค่าซีโอดี 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัดได้ 81.47 ± 1.10 , 79.13 ± 2.21 , 82.25 ± 0.00 , 68.21 ± 2.21 และ 60.41 ± 2.21 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูป 4.7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 30 นาที จะมีความสามารถในการบำบัดที่ดีที่สุด เนื่องจากเวลาที่อนุโมลอิสระซัลเฟตจับตัวแล้วทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียมากขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น และหลังจากเวลาที่ 40-50 นาที ความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์จะเริ่มลดลงและให้ประสิทธิภาพในการบำบัดไม่แตกต่างกันเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพราะในสารละลายที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องเปอร์ซัลเฟตจะค่อนข้างเสถียร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

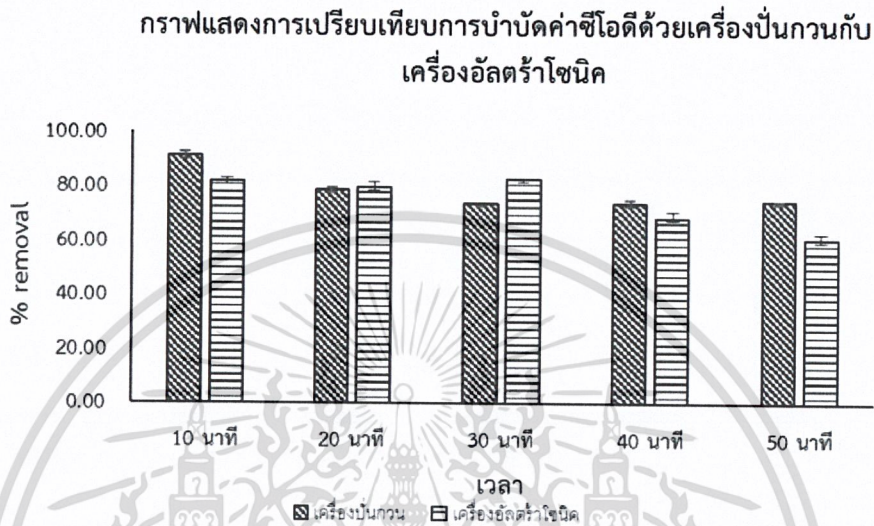


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การบำบัดค่าสีของเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิก

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแปรผันเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้ คือ 10, 20, 30, 40 และ 50 นาที ตามลำดับ ทำให้สีลดลงจากเริ่มต้นคือ 1,488.38 ADMI หลังการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 88.92±1.51, 89.09±0.68, 75.14±1.11, 93.87±3.21 และ 93.39±0.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.8 จากรูปพบว่าการใช้กระบวนการโซนิเคชันร่วมด้วยเพอร์สไดออกไซด์และโซเดียมเปอร์ซัลเฟตสามารถเกิดปฏิกิริยากันเองได้เช่นกันทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีที่ดี และเมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นจาก 40-50 นาที ก็จะมีความสามารถในการบำบัดสีเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

ดังนั้น การหาเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมโดยร่วมกับกระบวนการโซนิเคชันทั้งในแง่ของประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดี สี คือเวลาที่ 30 นาที ซึ่งสามารถลดปริมาณซีไอดีลงได้ 82.25±0.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดปริมาณสีได้ 93.87±3.21 เปอร์เซ็นต์

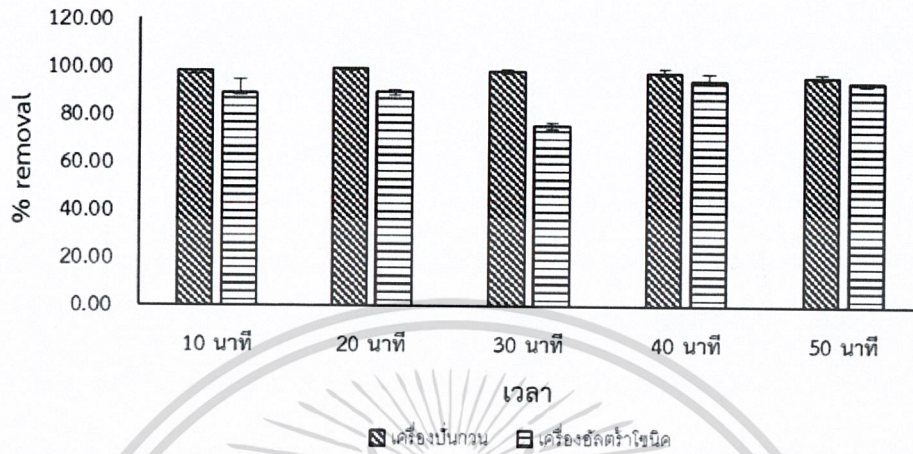
4.3 ศึกษาการเปรียบเทียบการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนกับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเปรียบเทียบการบำบัดด้วยเครื่องปั่นกวนกับเครื่องอัลตราโซนิค

จากการศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน:เปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วน 1: 1 พีเอช 2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที จากรูปที่ 4.9 มีค่า เปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดีได้ 90.83 ± 1.04 เปอร์เซ็นต์ ดังรูป 4.9 เป็นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนร่วมกับกระบวนการโซนิเคชันโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์สไอออน:เปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วน 1: 1 พีเอช 2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที มีค่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดซีไอดีอยู่ที่ 82.25 ± 0.00 เปอร์เซ็นต์

กราฟแสดงการเปรียบเทียบการบำบัดค่าสีด้วยเครื่องปั่นกวนกับ
เครื่องอัลตราโซนิค



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์การเปรียบเทียบการบำบัดด้วยเครื่องปั่นกวนกับเครื่องอัลตราโซนิค

ส่วนการบำบัดสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์ซอไอออนโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์ซอไอออน:เปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วน 1: 1 พีเอช 2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที จากรูปที่ 4.10 มีค่าเปอร์เซ็นต์การบำบัดสี 98.95 ± 0.37 เปอร์เซ็นต์ ดังรูป 4.10 เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ดีกว่า การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิควินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์ซอไอออนร่วมกับกระบวนการโซนิเคชันโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นโดยใช้ปริมาณความเข้มข้นเพอร์ซอไอออน:เปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วน 1: 1 พีเอช 2 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 40 นาที คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การบำบัดสีได้ 93.87 ± 3.21 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน โดยการหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออน พิเอช และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ยังศึกษาถึงระยะเวลาในการใช้คลื่นความถี่เหนือเสียงที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียในกระบวนการโซนิเคชัน ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินมีค่าพีเอช ประมาณ 7-8 ค่าซีโอดีประมาณ 923.36 มิลลิกรัม/ลิตร และค่าสีประมาณ 1,550.44 ADMI

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน คืออัตราส่วนโดยโมลของเพอร์สไอออน/โซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่ 1: 1 พีเอช 2 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่ 10 นาที พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีได้ 90.83 เปอร์เซ็นต์ และสามารถบำบัดสีได้ 97.62 เปอร์เซ็นต์

การศึกษาการบำบัดด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนโดยร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน พบว่าระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสม คือ 30 นาที พบว่าสามารถบำบัดซีโอดีได้ 82.25 เปอร์เซ็นต์ และบำบัดสีได้ 75.14 เปอร์เซ็นต์

การศึกษาการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน ด้วยกระบวนการเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออน สามารถบำบัดได้ดีกว่า การบำบัดด้วยเปอร์ซัลเฟต/เพอร์สไอออนโดยร่วมกับกระบวนการโซนิเคชัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เมื่อทำการใช้เครื่อง pH meter เสร็จแล้วควรล้างด้วยกรดไนตริกเจือจางทุกครั้ง

5.2.2 ควรล้างเครื่องแก้วด้วยน้ำกลั่นทุกครั้งก่อนทำการทดลอง

5.2.3 ในการเตรียมสารเพอร์สไอออนและโซเดียมเปอร์ซัลเฟตควรเตรียมในรูปแบบสารละลาย เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทดลอง

5.2.4 ในการทดลองควรทำชุดควบคุมเพื่อเป็นการแสดงความถูกต้องในการทดลอง

บรรณานุกรม

กัญญารัตน์ หงส์ประภาวงศ์, เกษมสันต์ ทองอยู่. 2555. “การบำบัดซีไอดีจากน้ำเสียยางสังเคราะห์ด้วยวิธีการเฟ้นต้นร่วมกับคลื่นเสียงอัลตราโซนิก.” ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กรมคุ้มครองสิทธิและเสรีภาพ. 2557. คู่มือการใช้ลดปริมาณกระดาษ. [Online]. Available : <http://www.ns.mahidol.ac.th/english/th/green/doc/knowledge/คู่มือการใช้กระดาษ.pdf>

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2550. อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ. [Online]. Available : www2.dede.go.th/km.../04%20อุตสาหกรรมกระดาษ/กระดาษ.pdf

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2561. ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อและโรงงานผลิตกระดาษ พ.ศ. 2561. [Online]. Available : http://www.diw.go.th/hawk/news/T_0031.PDF

ปิ่นนารี บังพรม และตุลวิทย์ สถาปนจารุ. 2556. “การย่อยสลายสีข้อมรีแอกทีฟแบล็คไฟท์ (RB5) ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยกระบวนการเปอร์ซัลเฟตออกซิเดชัน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม , มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิมพ์ชนก เต็งเจริญ. 2546. “การกำจัดสีของน้ำทิ้งในการผลิตลิกนินโดยราไวต์รอต.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพฑูรย์ หมายมั่นสมสุข. 2555. การวิเคราะห์น้ำและน้ำเสียเบื้องต้น. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. [Online]. Available : www2.diw.go.th/Research/เอกสารเผยแพร่/A15-COD-w.pdf

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2561. บทที่ 33 รายละเอียดข้อมูลสารเคมีชีวภาพประเภทลิกนิน (Lignin).[Online]. Available : http://asp.plastics.or.th:8001/files/article_file/20181016080740u.pdf

วนิดา ชูอักษร. 2555. “เทคโนโลยีการกำจัดสีในน้ำเสียอุตสาหกรรม.” วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 17(1) : 181-191.

สุกัญญา โป่งรักษ์. 2558. “การบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเยื่อกระดาษ ด้วยกระบวนการเฟ้นต้นโฟโต-เฟ้นต้น และโซโน-เฟ้นต้น” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

ลาดกระบัง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ได้รับอนุญาตให้คัดลอกและเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ยังไม่ได้ออกหน่วยเครื่องมือ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2556. ADMI มาตรฐานการวัดสีใหม่ในน้ำทิ้ง.

[Online]. Available : <http://ced.sci.psu.ac.th/km/km/testing-km/admi>

- D.H.H.C. Van, J.M.K. Timmer, T. Robbertsen and J. Leenders 1995. Use of nanofiltration for concentration and demineralization in the dairy industry: Model for mass transport. **Journal of Membrane Science**. 104, 205-218.
- H. Yacubowicz And J. Yacubowicz 2005. Nanofiltration : Properties nano and uses. **Filtration + Separation**, 42, 16-21.
- O.H. Duygu and L.J. Van 2010. Removal of Color from Fruit Candy Waste by Activated Carbon Adsorption. **Journal of Food Engineering**. 101, 106-112.
- R.C. Bansal and M. Goyal. 2005. Activated Carbon Adsorption. CRC Press.
- S. Hong & M. Elimelech. 1997. Chemical and physical aspects of natural organic matter (NOM) fouling of nanofiltration membranes. **Journal of Membrane Science**. 132, 159-181.
- Wu, C. 2008. Effects of operational parameters on the decolorization of C.I. Reactive Red 198 in UV/TiO₂ based systems. **Dye and Pigment**. 77, 31-38
- Y. Avsar, U. Kurt and T. Gonullu. 2007. Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. 148, 340-345.
- Y. Segura, R. Molina, F. Martinez, J.A. Melero. 2009. Integrated heterogeneous sono-photo Fenton processes for the degradation of phenolic aqueous solutions. **Ultrasonics Sonochemistry**. 16, 417-424



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์น้ำเสีย

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

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) : ควรใช้หลอดแก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต (borosilicate culture tubes) ขนาด 16×100 มิลลิเมตร ที่มีฝาเกลียวชนิดทีเอฟอี (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 ชั่วโมงที่ 150 องศาเซลเซียส จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหาย
- 4) ไมโครปิเปต (Micro pipette) ขนาด 1-5 มิลลิลิตร
- 5) กระจกนูนกรด
- 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 ทั้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
- 2) สารละลายกรดซัลฟูริก (Sulfuric acid reagent) : เติมสารละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 22 กรัม ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2.5 ลิตร แล้วทิ้งไว้ 1-2 วัน เพื่อให้ซิลเวอร์ซัลเฟตละลาย
- 3) สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ (Ferriin indicator solution) : ละลาย 1, 10 พีแวนโทโรไลนโมโนไฮเดรต 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 : นำสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตมา 1.5 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร และเติมซัลฟูริกเข้มข้น 3.5 มิลลิลิตร ทั้งให้เย็น จากนั้นเติมสารละลายเฟอร์โรอิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับภาควิชาชีววิทยาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ก.2 การวิเคราะห์สี (ADMI Tristimulus Filter Method)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร
- 2) หลอดฉีดยา
- 3) เครื่องแก้วต่างๆ

ขั้นตอนการวิเคราะห์

- 1) นำน้ำตัวอย่างที่จะทำการวัดสีมาวัดค่าทรานส์มิตแตนซ์ (%T) ของแต่ละความยาวคลื่นจากตาราง ก-1 ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แล้วคำนวณหาค่าสีในหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI) จากโปรแกรมการคำนวณ
- ตารางที่ ก-1 การวัดหาค่าทรานส์มิตแตนซ์ (%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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสาร

ข.1 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร

สารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ชั่งลิกนิน = 1.0000 กรัม

สารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ชั่งลิกนิน = $(1 \times 1,000) / 1,000$ กรัม = 1.0000 กรัม

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

ข.2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน เจือจาง 5 เท่า

น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร เจือจาง 5 เท่า = $1,000 / 5 = 200$ มิลลิกรัม/ลิตร

ดังนั้น นำน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน เข้มข้น 1,000 มิลลิกรัม/ลิตร มา 200 มิลลิกรัม/ลิตร ปรับในขวด ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเจือจาง 5 เท่า

ข.3 การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ (MW. = 40)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร เนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมล = 6×40 กรัม

ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร เนื้อสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมล = $(6 \times 40 \times 100) / 1000$ กรัม
= 24 กรัม

ดังนั้น ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 24 กรัม แล้วปรับปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์

ข.4 การเตรียมสารละลายกรดซัลฟูริก 6 โมลาร์ (MW. = 98)

ในสารละลาย 1,000 มิลลิลิตร ต้องการให้มีเนื้อกรดซัลฟูริก 6 โมล = 6×98 กรัม

ในสารละลาย 100 มิลลิลิตร เนื้อสารกรดซัลฟูริก 6 โมล = $(6 \times 98 \times 100) / 1000$ มิลลิลิตร
= 58.8 มิลลิลิตร

ดังนั้น ตวงซัลฟูริกเข้มข้นมา 58.8 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรครบ 1000 มิลลิลิตร จะได้สารละลาย กรดซัลฟูริก 6 โมลาร์

ข.5 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 $n = g / \text{MW}$

ดังนั้น $n = 0.2009 / 55.845$ โมล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 0.0036 โมล ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ เฟอร์รัสไอออน 0.0036 โมล ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต = 1.000 กรัม รังที่มีการนำไปใช้
เฟอร์รัสไอออน 0.001 โมล ใช้เฟอร์รัสซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต = $(1.000 \times 0.001) / 0.0036$ กรัม

$$= 0.2778 \text{ กรัม}$$

สารละลายในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร มีเฟอร์สไอออน = 0.001 โมล

$$\begin{aligned} \text{สารละลายในบีกเกอร์ 1,000 มิลลิลิตร มีเฟอร์สไอออน} &= (0.001 \times 1,000) / 100 \text{ โมล} \\ &= 0.01 \text{ โมล/ลิตร} \end{aligned}$$

ดังนั้นเฟอร์สไอออน 0.01 โมล/ลิตร จะต้องชั่งเฟอร์สซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตมา 0.2778 กรัม

ตารางที่ ข-1 ปริมาณเฟอร์สซัลเฟตเฮปตะไฮเดรตที่ใช้

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

ข.6 การเตรียมโซเดียมเปอร์ซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$)

โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 238.09 กรัม มีเปอร์ซัลเฟต = 192.1292 กรัม

โซเดียมเปอร์ซัลเฟต 1 กรัม มีเปอร์ซัลเฟต = $(192.1292 \times 1.0000) / 238.09$ กรัม
= 0.8070 กรัม

จาก $n = g/MW$

ดังนั้น $n = 0.8070 / 192.1292$ โมล
= 0.0042 โมล

เปอร์ซัลเฟต 0.0042 โมล ใช้โซเดียมเปอร์ซัลเฟต = 1.000 กรัม

เปอร์ซัลเฟต 0.005 โมล ใช้โซเดียมเปอร์ซัลเฟต = $(1.000 \times 0.005) / 0.0042$ กรัม
= 1.1905 กรัม

สารละลายในบีกเกอร์ 100 มิลลิลิตร มีเปอร์ซัลเฟต = 0.001 โมล

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

ดังนั้น เปอร์ซัลเฟต 0.01 โมล/ลิตร จะต้องชั่งโซเดียมเปอร์ซัลเฟตมา 1.1905 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ปริมาณโซเดียมเปอร์ซัลเฟตที่ใช้

ความเข้มข้นของเปอร์ซัลเฟต (โมล/ลิตร)	ปริมาณโซเดียมเปอร์ซัลเฟต (กรัม)
0.01	1.1905
0.02	2.3810
0.03	3.5714
0.04	4.7619
0.05	5.9524



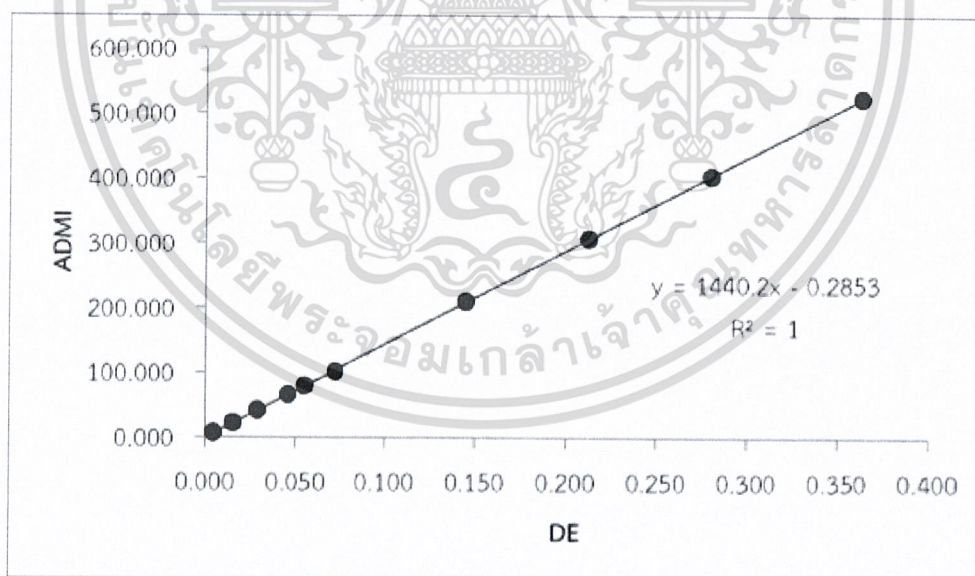
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณผลการทดลอง

ง.1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นซีโอดีในน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินก่อนการบำบัด

- ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.00 - 1.55 = 1.55 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 1.55 - 3.15 = 1.60 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 3.15 - 4.75 = 1.60 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 1.583 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$[\text{FAS}] = \frac{\text{ml} (\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ 0.1 M}) \times 0.1}{\text{ml}(\text{FAS})} = \frac{1.5 \times 0.1}{1.583} = 0.095$$

- แบลงค์

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.00 - 1.60 = 1.60 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 1.60 - 3.15 = 1.55 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 3.15 - 4.70 = 1.55 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 1.567 \text{ มิลลิลิตร}$$

- น้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินเจือจางความเข้มข้นลง 5 เท่า

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.00 - 0.75 = 0.75 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 0.75 - 1.50 = 0.75 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 1.50 - 2.25 = 0.75 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 0.75 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\begin{aligned} \text{ซีโอดี} &= \frac{(A-B) \times N \times 8000}{V_{\text{sample}}} = \frac{(1.567 - 0.75) \times 0.095 \times 8000}{2.5} \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 248.368 \times 5 \text{ มิลลิลิตร} \\ &= 1241.84 \text{ มิลลิลิตร} \end{aligned}$$

ง.2 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออนที่เหมาะสม

- ความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.00 - 1.55 = 1.55 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 1.55 - 3.15 = 1.60 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 3.15 - 4.75 = 1.60 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 1.583 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$[\text{FAS}] = \frac{\text{ml} (\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \text{ 0.1 M}) \times 0.1}{\text{ml}(\text{FAS})} = \frac{1.5 \times 0.1}{1.583} = 0.095$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- แบลงค์

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.00 - 1.60 = 1.60 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 1.60 - 3.15 = 1.55 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 3.15 - 4.70 = 1.55 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{เฉลี่ย} = 1.567 \text{ มิลลิลิตร}$$

- ปริมาณความเข้มข้นเฟอร์รัสไอออน 0.005 โมล

$$\text{ครั้งที่ 1} = 0.00 - 1.50 = 1.50 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 2} = 1.50 - 2.95 = 1.45 \text{ มิลลิลิตร}$$

$$\text{ครั้งที่ 3} = 2.95 - 4.40 = 1.45 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น ตัดครั้งที่ 1 ออก ใช้ครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ปริมาตร 1.45 มิลลิลิตร

$$\begin{aligned} \text{ซีโอดี} &= \frac{(A-B) \times N \times 8000}{V_{\text{sample}}} = \frac{(1.567 - 1.45) \times 0.095 \times 8000}{2.5} = 35.568 \times 8 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร} \\ &= 284.54 \text{ มิลลิกรัม/ลิตร} \end{aligned}$$

หมายเหตุ คูณ 8 เนื่องจากน้ำลิกนินเจือจาง 8 เท่า

$$\begin{aligned} \% \text{การบำบัดซีโอดี} &= \frac{\text{COD}_{\text{ก่อนบำบัด}} - \text{COD}_{\text{หลังบำบัด}}}{\text{COD}_{\text{ก่อนบำบัด}}} \times 100 = \frac{1241.84 - 284.54}{1241.84} \times 100 \\ &= 77.09 \end{aligned}$$

หมายเหตุ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ภาพประกอบการทดลอง

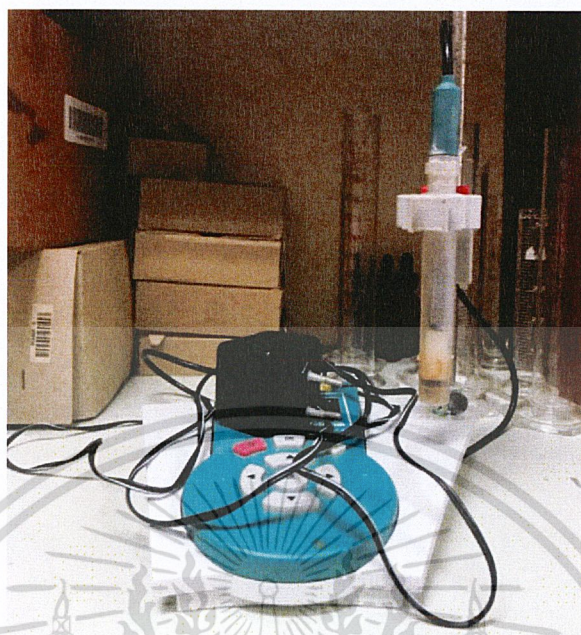


รูปที่ จ-1 เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)



รูปที่ จ-2 เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

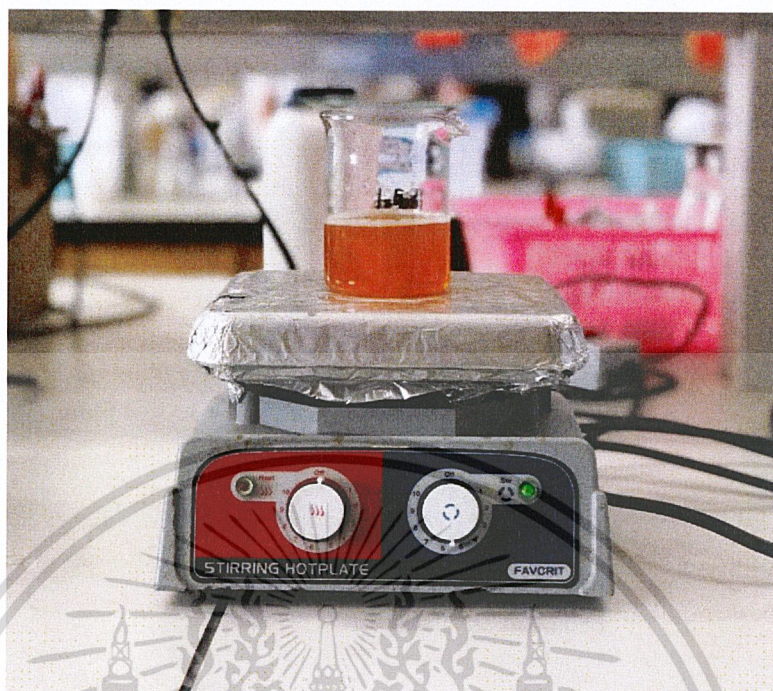


รูปที่ จ-3 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)

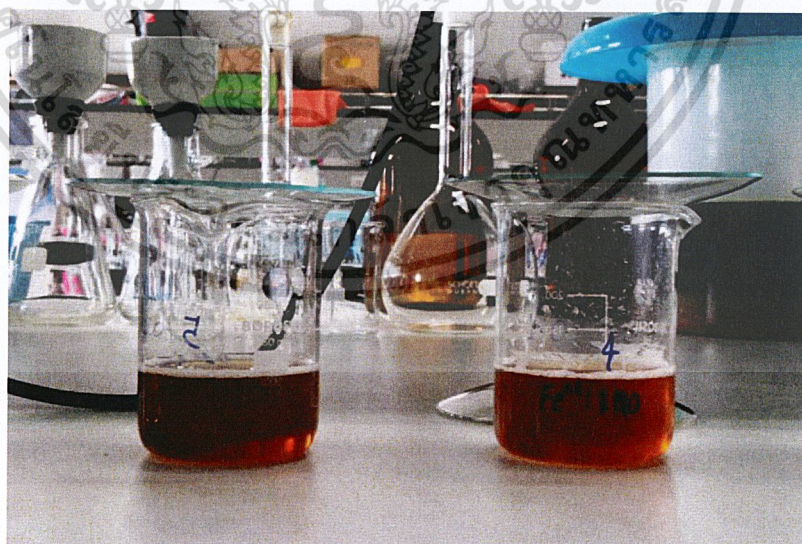


รูปที่ จ-4 เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง (Digital Balance)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-5 เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน (Hotplate and Magnetic Stirrer)



รูปที่ จ-6 การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนินที่เจือจาง 5 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ-7 ทำการตกตะกอนเหล็กไอออนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH)
จากนั้นทิ้งให้เหล็กไอออนตะกอนเป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ จ-8 ทำการกรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศแล้วนำส่วนใสไปใช้ในการหาค่าซีไอทีและค่าสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ
ตารางผลการทดลองทั้งหมด

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $\text{Fe}^{2+}:\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ครั้งที่1 (ซีไอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	3.30	4.85	1.55		-	-
	4.85	6.35	1.50	1.55		
	6.35	7.95	1.60			
KHP	7.95	8.75	0.80		-	-
	8.75	9.55	0.80	0.78		
	9.55	10.30	0.75			
1:0	13.60	14.95	1.35		259.20	71.92
	14.95	16.30	1.35	1.37		
	16.30	17.70	1.40			
1:1	17.70	18.95	1.25		106.56	88.49
	18.95	20.15	1.20	1.22		
	20.15	21.35	1.20			
1:2	21.35	22.29	0.94		509.76	44.81
	22.29	23.23	0.94	0.94		
	23.23	24.17	0.94			
1:3	24.17	24.72	0.55		1100.16	0.00
	0.00	0.70	0.70	0.53		
	0.70	1.05	0.35			
1:4	1.05	1.97	0.92		538.56	41.69
	1.97	2.89	0.92	0.92		
	2.89	3.81	0.92			
1:5	3.81	4.74	0.93		524.16	43.25
	4.74	5.67	0.93	0.93		
	5.67	6.60	0.93			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-2 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $\text{Fe}^{2+}:\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ ครั้งที่2 (ซีไอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	2.30	3.85	1.55		-	-
	3.85	5.40	1.55	1.55		
	-	-	-			
KHP	5.40	6.20	0.80		-	-
	6.20	6.95	0.75	0.78		
	6.95	7.75	0.80			
1:0	10.00	11.40	1.40		216.00	76.61
	11.40	12.80	1.40	1.40		
	12.80	14.20	1.40			
1:1	14.20	15.40	1.20		92.16	88.49
	15.40	16.65	1.25	1.23		
	16.65	17.90	1.25			
1:2	17.90	18.85	0.95		495.39	44.81
	18.85	19.80	0.95	0.95		
	19.80	20.75	0.95			
1:3	20.75	21.35	0.60		1042.56	0.00
	21.35	21.90	0.55	0.57		
	21.90	22.45	0.55			
1:4	22.45	23.39	0.94		509.76	41.69
	23.39	24.33	0.94	0.94		
	12.30	13.24	0.94			
1:5	13.24	14.17	0.93		524.16	43.25
	14.17	15.10	0.93	0.93		
	15.10	16.03	0.93			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

ค่าลิกนิน เท่ากับ 923.36 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๓-3 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$ ครั้งที่ 3 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	0.00	1.60	1.60	1.57	-	-
	1.60	3.15	1.55			
	3.15	4.70	1.55			
KHP	4.70	5.50	0.80	0.78	-	-
	5.50	6.30	0.80			
	6.30	7.05	0.75			
1:0	7.05	8.40	1.35	1.35	316.80	65.69
	8.40	9.75	1.35			
	9.75	11.10	1.35			
1:1	11.10	12.35	1.25	1.23	120.96	90.05
	12.35	13.55	1.20			
	13.55	14.80	1.25			
1:2	14.80	15.77	0.97	0.97	495.36	46.37
	15.77	16.74	0.97			
	16.74	17.71	0.97			
1:3	17.71	18.26	0.55	0.57	1071.36	0.00
	18.26	18.81	0.55			
	18.81	19.41	0.60			
1:4	19.41	20.36	0.95	0.95	524.16	43.25
	20.36	21.31	0.95			
	21.31	22.26	0.95			
1:5	22.26	23.21	0.95	0.95	524.16	43.25
	23.21	24.16	0.95			
	11.00	11.95	0.95			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

ค่าลิกนิน เท่ากับ 923.36 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-4 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสมครั้งที่1 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	0.00	1.55	1.55		-	-
	1.55	3.15	1.60	1.60		
	1.60	4.80	1.65			
KHP	4.80	5.75	0.95		-	-
	5.75	6.55	0.80	0.82		
	6.55	7.40	0.85			
ไม่ปรับ pH	10.30	11.60	1.30		43.20	85.37
	11.60	12.85	1.25	1.25		
	12.85	14.05	1.20			
pH 2	14.05	15.35	1.30		14.40	88.49
	15.35	16.65	1.30	1.27		
	16.65	17.85	1.20			
pH 3	17.85	19.00	1.15		158.40	72.89
	19.00	20.15	1.15	1.17		
	20.15	21.35	1.20			
pH 4	21.35	22.55	1.15		187.20	69.77
	22.55	23.70	1.15	1.15		
	23.70	24.85	1.15			
pH 5	10.00	11.15	1.15		230.40	65.09
	11.15	12.30	1.15	1.12		
	12.30	13.35	1.05			
pH 6	13.35	14.45	1.10		230.40	65.09
	14.45	15.65	1.20	1.17		
	15.65	16.85	1.20			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

ค่าลิกนิน เท่ากับ 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-5 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสมครั้งที่2 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	4.90	6.50	1.60	1.57	-	-
	6.50	8.00	1.50			
	8.00	9.60	1.60			
KHP	9.60	10.35	0.75	0.80	-	-
	10.35	11.15	0.80			
	11.15	12.00	0.85			
ไม่ปรับ pH	14.45	15.50	1.05	1.18	100.80	79.13
	15.50	16.70	1.20			
	16.70	18.00	1.30			
pH 2	18.00	19.25	1.25	1.25	0.00	90.05
	19.25	20.50	1.25			
	20.50	21.75	1.25			
pH 3	21.75	23.00	1.25	1.15	144.00	74.45
	23.00	23.65	0.65			
	12.00	13.05	1.05			
pH 4	13.05	14.25	1.20	1.23	28.80	86.93
	14.25	15.45	1.20			
	15.45	16.75	1.30			
pH 5	16.75	17.95	1.20	1.17	115.20	77.57
	17.95	19.00	1.05			
	19.00	20.25	1.25			
pH 6	20.25	21.40	1.15	1.13	172.80	71.33
	21.40	22.40	1.00			
	22.40	23.65	1.25			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

ค่าลิกนิน เท่ากับ 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร

ในกรณีพีเอช2 มีค่าซีโอดีเป็น 0.00 มิลลิกรัม/ลิตร เนื่องจากนำค่าเบลนด์มาลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-6 ผลการทดลองการศึกษาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสมครั้งที่3 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	0.00	1.45	1.45	1.48	-	-
	1.45	2.90	1.45			
	2.90	4.40	1.50			
KHP	4.40	5.10	0.70	0.70	-	-
	5.10	5.80	0.70			
	5.80	6.50	0.70			
ไม่ปรับ pH	8.60	9.65	1.05	1.12	120.60	76.99
	9.65	10.85	1.20			
	10.85	11.95	1.10			
pH 2	11.95	13.10	1.15	1.15	14.40	88.49
	13.10	14.25	1.15			
	14.25	15.40	1.15			
pH 3	15.40	16.45	1.05	1.06	144.00	74.45
	16.45	17.45	1.00			
	17.45	18.57	1.12			
pH 4	18.57	19.80	1.23	1.14	28.80	86.93
	19.80	20.90	1.10			
	20.90	22.00	1.10			
pH 5	22.00	23.20	1.20	1.13	43.20	85.37
	23.20	24.35	1.15			
	11.00	12.05	1.05			
pH 6	12.05	13.25	1.20	1.12	120.60	76.99
	13.25	14.35	1.10			
	14.35	15.40	1.05			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

ค่าลิกนิน เท่ากับ 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑-7 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมครั้งที่1 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	6.35	8.00	1.65			
	8.00	9.60	1.60	1.65	-	-
	9.60	11.30	1.70			
KHP	11.30	12.10	0.80			
	12.10	12.95	0.85	0.82	-	-
	12.95	13.75	0.80			
10 นาที	19.75	20.90	1.15		203.00	69.77
	20.90	22.15	1.25	1.20		
	22.15	22.85	0.70			
20 นาที	22.85	24.15	1.30		102.20	80.69
	21.00	22.30	1.30	1.27		
	22.30	23.50	1.20			
30 นาที	23.50	24.70	1.20		159.80	74.45
	6.00	7.25	1.25	1.23		
	7.25	8.50	1.25			
40 นาที	8.50	9.65	1.15		174.20	72.89
	9.65	10.95	1.30	1.22		
	10.95	12.15	1.20			
50 นาที	12.15	13.35	1.20		159.80	74.45
	13.35	14.55	1.20	1.23		
	14.55	15.85	1.30			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

ค่าลิกนิน เท่ากับ 847.00 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-8 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมครั้งที่2 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	5.00	6.55	1.55		-	-
	6.55	8.15	1.60	1.55		
	8.15	9.65	1.50			
KHP	9.65	10.00	0.35		-	-
	10.00	11.30	1.30	0.85		
	11.30	12.15	0.85			
10 นาที	17.55	18.78	1.23		15.80	90.05
	18.78	20.01	1.23	1.23		
	20.01	21.24	1.23			
20 นาที	21.24	22.27	1.05		303.80	58.85
	22.27	23.27	1.00	1.03		
	23.27	24.32	1.05			
30 นาที	14.80	16.00	1.20		87.80	82.25
	16.00	17.20	1.20	1.18		
	17.20	18.35	1.15			
40 นาที	18.35	19.50	1.15		159.80	74.45
	19.50	20.60	1.10	1.13		
	20.60	21.75	1.15			
50 นาที	21.75	22.90	1.15		159.80	74.45
	22.90	24.00	1.10	1.13		
	-	-	-			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

ค่าลิกนิน เท่ากับ 847.00 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑-9 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสมครั้งที่3 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	4.95	6.40	1.45	1.53	-	-
	6.40	8.00	1.60			
	8.00	9.55	1.55			
KHP	9.55	10.30	0.75	0.77	-	-
	10.30	11.05	0.75			
	11.05	11.85	0.80			
10 นาที	17.35	18.60	1.25	1.22	1.40	91.61
	18.60	19.80	1.20			
	19.80	21.00	1.20			
20 นาที	21.00	22.15	1.15	1.12	145.40	76.01
	22.15	23.30	1.15			
	13.00	14.05	1.05			
30 นาที	14.05	15.15	1.10	1.10	174.20	72.89
	15.15	16.30	1.15			
	16.30	17.35	1.05			
40 นาที	17.35	18.40	1.05	1.10	174.20	72.89
	18.40	19.45	1.05			
	19.45	20.65	1.20			
50 นาที	20.65	21.75	1.10	1.13	131.00	77.57
	21.75	22.90	1.15			
	22.90	24.05	1.15			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

ค่าลิกนิน เท่ากับ 847.00 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 10 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสมครั้งที่ 1 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	0.00	1.75	1.75	1.55	-	-
	1.75	3.25	1.50			
	3.25	4.85	1.60			
KHP	4.85	5.65	0.80	0.83	-	-
	5.65	6.50	0.85			
	6.50	7.35	0.85			
10 นาที	10.85	12.00	1.15	1.15	115.20	80.69
	12.00	13.15	1.15			
	13.15	14.30	1.15			
20 นาที	14.30	15.50	1.20	1.17	86.40	77.57
	15.50	16.70	1.20			
	16.70	17.90	1.10			
30 นาที	17.90	19.10	1.20	1.18	72.00	80.69
	19.10	20.30	1.20			
	20.30	21.45	1.15			
40 นาที	21.45	22.55	1.10	1.10	187.20	82.25
	22.55	23.65	1.10			
	0.00	1.10	1.10			
50 นาที	1.10	2.20	1.10	1.08	216.00	69.77
	2.20	3.30	1.10			
	3.30	4.35	1.05			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

ค่าลิกนิน เท่ากับ 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11-11 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสมครั้งที่ 2 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	0.00	1.60	1.60			
	1.60	3.15	1.55	1.55	-	-
	3.15	4.65	1.50			
KHP	4.65	5.45	0.80			
	5.45	6.20	0.75	0.77	-	-
	6.20	6.95	0.75			
10 นาที	12.80	13.90	1.10			
	13.90	15.10	1.20	1.17	86.40	82.25
	15.10	16.30	1.20			
20 นาที	16.30	17.45	1.15			
	17.45	18.55	1.10	1.15	115.20	80.69
	18.55	19.75	1.20			
30 นาที	19.75	20.95	1.20			
	20.95	22.15	1.20	1.20	43.20	77.57
	22.15	23.35	1.20			
40 นาที	0.00	1.15	1.15			
	1.15	2.20	1.05	1.08	216.00	85.37
	2.20	3.25	1.05			
50 นาที	3.25	4.30	1.05			
	4.30	5.35	1.05	1.05	259.20	66.65
	5.35	6.40	1.05			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

ค่าลิกนิน เท่ากับ 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12-12 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสมครั้งที่ 3 (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	0.00	1.60	1.60		-	-
	1.60	3.15	1.55	1.57		
	3.15	4.70	1.55			
KHP	4.70	5.55	0.85		-	-
	5.55	6.30	0.75	0.78		
	6.30	7.05	0.75			
10 นาที	10.55	11.75	1.20		72.00	77.57
	11.75	12.95	1.20	1.20		
	12.95	14.15	1.20			
20 นาที	14.15	15.25	1.10		144.00	82.25
	15.25	16.40	1.15	1.15		
	16.40	17.60	1.20			
30 นาที	17.60	18.80	1.20		72.00	74.45
	18.80	20.00	1.20	1.20		
	20.00	21.20	1.20			
40 นาที	21.20	22.30	1.10		244.80	82.25
	22.30	23.40	1.10	1.08		
	0.00	1.05	1.05			
50 นาที	1.05	2.10	1.05		288.00	63.53
	2.10	3.15	1.05	1.05		
	3.15	4.20	1.05			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

ค่าลิกนิน เท่ากับ 831.20 มิลลิกรัม/ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-13 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	0.00	1.60	1.60	1.57	-	-
	1.60	3.15	1.55			
	3.15	4.70	1.55			
KHP	4.70	5.70	1.00	0.85	-	-
	5.70	6.55	0.85			
	6.55	7.40	0.85			
ปั่นกวาน 10 นาที	7.40	8.75	1.35	1.30	388.80	-
	8.75	10.05	1.30			
	10.05	11.30	1.25			
pH 2	11.30	12.55	1.25	1.25	460.80	-
	12.55	13.80	1.25			
	13.80	15.05	1.25			
อัตรา 1:1	15.05	16.30	1.25	1.26	446.40	-
	16.30	17.55	1.25			
	17.55	18.82	1.27			
อัลตราโซ นิก 30 นาที	18.82	20.55	1.25	1.25	460.80	-
	20.55	20.07	1.25			
	20.07	21.32	1.25			
อัลตราโซ นิก 30 นาที	21.32	22.54	1.22	1.22	504.00	-
	14.00	15.22	1.22			
	15.22	16.45	1.23			
อัลตราโซ นิก 30 นาที	16.45	17.70	1.25	1.25	460.80	-
	17.70	18.95	1.25			
	18.95	20.20	1.25			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.090

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สูงสี่ยอกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-14 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม (ซีโอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณการไทเทรต				ปริมาณซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)	เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	ใช้ไป	เฉลี่ย		
Blank	4.70	5.65	0.95			
	5.65	7.15	1.50	1.50	-	-
	7.15	8.65	1.50			
KHP	8.65	9.45	0.80			
	9.45	10.25	0.80	0.82	-	-
	10.25	11.10	0.85			
ปั่นกวาน 10 นาที	11.10	12.30	1.20			
	12.30	13.55	1.25	1.22	430.00	-
	13.55	14.75	1.20			
ปั่นกวาน 10 นาที	14.75	15.95	1.20			
	15.95	17.10	1.15	1.20	460.00	-
	17.10	18.35	1.25			
อัตรา 1:1	18.35	19.65	1.30			
	19.65	20.85	1.20	1.25	384.00	-
	20.85	22.10	1.25			
อัตรา 1:1	5.00	6.20	1.20			
	6.20	7.45	1.25	1.27	353.28	-
	7.45	8.80	1.35			
pH 2	8.80	10.00	1.20			
	10.00	11.20	1.20	1.20	460.80	-
	11.20	12.40	1.20			
pH 2	12.40	13.60	1.20			
	13.60	14.80	1.20	1.20	460.80	-
	14.80	16.00	1.20			

หมายเหตุ ค่า FAS เท่ากับ 0.096

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-15 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$

(ค่าซีไออดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณซีไออดี (มิลลิกรัม/ลิตร)			เฉลี่ย	ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่า SD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
1:0	259.2	216	316.8	237.60	30.55	74.30	3.31
1:1	106.56	92.16	120.96	106.56	14.40	88.49	1.56
1:2	509.76	495.36	495.36	500.16	8.31	45.85	0.90
1:3	1100.16	1042.56	1071.36	1071.36	28.80	0.00	-
1:4	538.56	509.76	524.16	524.16	14.40	43.25	1.56
1:5	524.16	524.16	524.16	524.16	1.39	43.25	0.00

ตารางที่ ข-16 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสม (ค่าซีไออดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณซีไออดี (มิลลิกรัม/ลิตร)			เฉลี่ย	ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่า SD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
ไม่ปรับ pH	43.20	100.80	120.60	110.70	14.00	78.06	1.52
pH 2	14.40	0.00	14.40	14.40	0.00	88.49	0.00
pH 3	158.40	144.00	144.00	148.80	8.31	73.93	0.90
pH 4	187.20	28.80	28.80	28.80	0.00	86.93	0.00
pH 5	230.40	115.20	43.20	79.20	50.91	81.47	5.52
pH 6	230.40	172.80	120.60	146.70	36.91	74.16	4.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติโดยไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่มีการแก้ไข ฟังชั่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-17 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการปั่นกวนที่เหมาะสม (ค่าซีไอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)			เฉลี่ย	ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่า SD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
10 นาที	203.00	15.80	1.40	8.20	10.18	90.83	1.04
20 นาที	102.20	303.80	145.40	123.80	30.55	78.35	3.31
30 นาที	159.80	87.80	174.20	167.00	10.18	73.67	1.10
40 นาที	174.20	159.80	174.20	169.40	8.31	73.41	0.90
50 นาที	159.80	159.80	131.00	159.80	0.00	74.45	0.00

ตารางที่ ฉ-18 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิกที่เหมาะสม (ค่าซีไอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)			เฉลี่ย	ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่าSD
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3				
10 นาที	115.20	86.40	72.00	79.20	10.18	81.47	1.10
20 นาที	86.40	115.20	144.00	100.80	20.36	79.13	2.21
30 นาที	72.00	43.20	72.00	72.00	0.00	82.25	0.00
40 นาที	187.20	216.00	244.80	201.60	20.36	68.21	2.21
50 นาที	216.00	259.20	288.00	273.60	20.36	60.41	2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-19 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม (ซีไอดี)

ตัวอย่าง	ปริมาณซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)				เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1:1	446.40	384.00	353.28	368.64	-
pH 2	460.80	460.80	460.80	460.80	-
ปั่นกวาน 10 นาที	388.80	430.00	460.00	445.00	-
อัลตราโซนิก 30 นาที	460.80	460.80	504.00	460.80	-

ตารางที่ ฉ-20 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าอัตราส่วนโดยโมลที่เหมาะสมของ $Fe^{2+}:S_2O_8^{2-}$ (สี่)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ADMI)				ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่า SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
1:0	153.12	221.53	174.03	163.58	14.79	89.45	0.95
1:1	113.96	110.53	110.03	111.51	2.14	92.81	0.14
1:2	122.41	84.58	110.03	105.67	19.29	93.18	1.20
1:3	70.70	53.78	109.63	78.04	28.64	94.97	1.79
1:4	26.42	8.98	281.23	17.70	12.33	98.86	0.77
1:5	23.34	8.98	281.23	16.16	10.15	98.96	0.63

หมายเหตุ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน 1,550.44 ADMI

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-21 ผลการทดลองการศึกษาหาค่าพีเอช(pH)ที่เหมาะสม (สี)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ADMI)				ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่า SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
ไม่ปรับ	98.24	81.24	53.24	77.57	22.72	94.76	1.53
pH 2	-10.76	5.24	30.24	17.74	17.68	98.80	1.19
pH 3	59.24	84.24	50.24	64.57	17.62	95.64	1.19
pH 4	21.24	45.24	47.24	37.91	14.47	97.44	0.98
pH 5	-20.76	11.24	32.24	21.74	14.85	98.53	1.00
pH 6	27.24	45.24	45.24	39.24	10.39	97.35	0.70

หมายเหตุ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน 1,480.65 ADMI

ตารางที่ ฉ-22 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการขึ้นกวนที่เหมาะสม (สี)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้น (ADMI)				ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่า SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
10 นาที	31.41	-37.90	38.49	34.95	5.01	97.62	0.34
20 นาที	21.80	9.89	14.65	15.45	6.00	98.95	0.41
30 นาที	35.60	146.05	20.07	27.84	10.98	98.11	0.75
40 นาที	35.60	56.71	14.65	35.65	21.03	97.58	1.43
50 นาที	50.58	-42.22	68.39	59.49	12.59	95.96	0.86

หมายเหตุ ความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน 1,471.41 ADMI

เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ฉ-23 ผลการทดลองการศึกษาหาเวลาในการใช้เครื่องอัลตราโซนิคที่เหมาะสม (สี)

ตัวอย่าง	ความเข้มสี (ADMI)				ค่า SD	เปอร์เซ็นต์การบำบัด	ค่า SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย			
10 นาที	31.62	181.91	147.81	164.86	24.11	88.92	5.52
20 นาที	46.06	154.75	170.05	162.40	10.82	89.09	0.73
30 นาที	68.01	357.39	382.51	369.95	17.76	75.14	1.19
40 นาที	54.90	127.68	231.52	91.29	51.46	93.87	3.46
50 นาที	-26.63	101.16	95.47	98.32	4.02	93.39	0.27

หมายเหตุ ความเข้มสีของน้ำเสียสังเคราะห์ลิกนิน 1,488.38 ADMI
เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

ตารางที่ ฉ-24 ผลการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นแทนน้ำเสียสังเคราะห์ในแต่ละสภาวะที่เหมาะสม (สี)

ตัวอย่าง	ความเข้มสี (ADMI)				เปอร์เซ็นต์การบำบัด
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
1:1	50.97	332.94	50.97	50.97	-
pH 2	122.95	116.38	122.95	120.76	-
ปั่นกวาน 10 นาที	130.00	92.06	130.00	130.00	-
อัลตราโซนิค 30 นาที	303.60	139.66	86.40	113.03	-

หมายเหตุ เส้นคาดสีดำ เป็นการตัดข้อมูลที่สงสัยออกโดยการทดสอบ Q-test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้