

การดูดซับทองแดงในน้ำเสียดังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

ADSORPTION OF COPPER FROM SYNTHETIC WASTEWATER

BY RICE STRAW MODIFIED WITH CITRIC ACID

นางสาวจริยา      ประชุม

นางสาวสุภาภรณ์      ชนะโชติ

นางสาวอลิษา      ชุนอาจ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

ADSORPTION OF COPPER FROM SYNTHETIC WASTEWATER

BY RICE STRAW MODIFIED WITH CITRIC ACID

นางสาวจรรยา ประชุม

นางสาวสุภาภรณ์ ชนะโชติ

นางสาวอลิษา ขุนอาจ

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**ADSORPTION OF COPPER FROM SYNTHETIC WASTEWATER  
BY RICE STRAW MODIFIED WITH CITRIC ACID**

**JARIYA      PRACHUM  
SUPAPORN    CHANACHOT  
ALISA        KHUNART**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

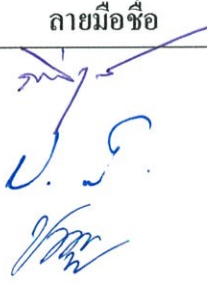
หัวข้อโครงการพิเศษ การดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

ADSORPTION OF COPPER FROM SYNTHETIC WASTEWATER BY RICE STRAW MODIFIED WITH CITRIC ACID

ชื่อนักศึกษา นางสาวจรรยา ประชุม 53051164  
นางสาวสุภาภรณ์ ชนะโชติ 53051286  
นางสาวอลิษา ชุนอาจ 53051305

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.กถินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
อ.ปัทมา ถิพหาวงศ์	
ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวจริยา	ประทุม
	นางสาวสุภาภรณ์	ชนะโชติ
	นางสาวอติษา	ขุนอาจ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเป็นตัวดูดซับ โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ใช้ปรับปรุง ระยะเวลาการสัมผัส อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบตัวดูดซับ จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และระยะเวลาในการดูดซับ จากนั้นจึงศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกซึ่งผลการทดลอง พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริกคือ ใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริก 0.4 มิลลิโมลาร์ ระยะเวลาสัมผัสนาน 120 นาที และอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 120 นาที pH ที่เหมาะสมในการดูดซับคือ 5 และใช้ระยะเวลาในการดูดซับ 10 นาที เนื่องจากสภาวะดังกล่าวทำให้ฟางข้าวมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดที่ 88.99 เปอร์เซ็นต์ และ พบว่า ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าฟางข้าวที่ไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

คำสำคัญ: ฟางข้าว, โลหะหนัก, ไอออนทองแดง, กรดซิตริก, การดูดซับ, AAS

<b>Title</b>	Adsorption of copper from synthetic wastewater by rice straw modified with citric acid
<b>Students</b>	Miss Jariya Prachum Miss Supaporn Chanachot Miss Alisa Khunart
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Environmental Chemistry
<b>Academic year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assist. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa

### **ABSTRACT**

This special project was aimed to study the adsorption of copper in synthetic wastewater using rice straw modified with citric acid. The experiments could be divided into 3 sections. The first section was studying of the suitable condition to modified rice straw. The studied factors were citric acid concentration, contact time, and incubation temperature. The second section was studying the suitable condition to adsorb copper. The studied factors were pH and contact time. The third section was comparing the adsorption efficiency of modified and unmodified rice straw. From the experiments, 0.4 mM citric acid, 120 minute contact time and 120°C incubation temperature for 120 minute were the suitable condition to modify. The contact time of 10 minute and pH 5 gave the best adsorption efficiency (88.99%). The copper adsorption of modified rice straw was higher than unmodified.

**Keyword :** Rice straw, Heavy metal, Copper ions, Citric acid, Adsorption, AAS

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ อาจารย์สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำ ซึ่งแนะนำจุดบกพร่อง ให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนวทางแก้ปัญหาต่างๆ รวมทั้งตรวจแก้โครงการพิเศษฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ อาจารย์กณีนุสคนธ์ สุวรรณรัตน์และอาจารย์ปัทมา ลีพทวงศ์ อาจารย์สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรรมการสอบโครงการพิเศษ ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนการตรวจสอบโครงการพิเศษให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุนการศึกษาและให้กำลังใจตลอดการทำโครงการพิเศษ

คณะผู้จัดทำโครงการพิเศษ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
สัญลักษณ์และคำย่อ	XI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	4
2.1 โลหะหนัก	4
2.1.1 ทองแดง	4
2.1.1.1 สมบัติของทองแดง	4
2.1.1.2 การนำทองแดงมาใช้ประโยชน์	5
2.1.1.3 การเข้าสู่ร่างกายและการสะสมของทองแดง	5
2.1.1.4 ความเป็นพิษของทองแดง	6
2.2 กรรมวิธีการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย	7
2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)	8
2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)	8
2.2.3 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)	9
2.2.4 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)	9
2.2.5 การระเหย (Evaporation)	9

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.6 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)	9
2.2.7 การแยกกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolysis Recovery)	10
2.2.8 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)	10
2.3 การดูดซับ	10
2.3.1 ประเภทสารดูดซับ	13
2.3.2 กลไกการดูดซับ	13
2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	14
2.4 ฟางข้าว (Rice straw)	15
2.4.1 เซลลูโลส	16
2.4.2 เฮมิเซลลูโลส	18
2.4.3 ลิกนิน	19
2.5 การปรับสภาพฟางข้าว	21
2.5.1 การปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment)	21
2.5.2 ชนิดของสารละลายเบสเจือจางที่นิยมใช้กัน	22
2.5.3 กรดซिटริก	23
2.5.4 การปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซिटริก	23
2.6 การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง AAS	24
2.6.1 หลักการ	24
2.6.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติ	25
2.6.3 ชนิดของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม	28
2.6.4 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS	28
2.6.5 กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame Atomization)	29
2.6.6 ขั้นตอนของการทำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS	30
2.6.7 ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects)	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.8 การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์	31
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>36</b>
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.1.1 สารเคมี	36
3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์	36
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	37
3.2 การเตรียมฟางข้าว	37
3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของทองแดงที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร	38
3.4 วิธีการทดลอง	38
3.4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงฟางข้าว ด้วยกรดซัลฟูริก	38
3.4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ	39
3.4.3 การศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุง ด้วยกรดซัลฟูริก	40
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>41</b>
4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซัลฟูริก	41
4.1.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสม	41
4.1.2 ผลการศึกษาช่วงระยะเวลาการสัมผัส	42
4.1.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิ	43
4.1.4 ผลการศึกษาวเวลาในการอบตัวดูดซับ	45
4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ	47
4.2.1 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสม	47
4.2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาการดูดซับ	48

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก	49
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	51
5.1 สรุปผลวิจัย	51
5.2 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก	56
ภาคผนวก ข	66
ภาคผนวก ค	74
ภาคผนวก ง	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในกรุงเทพมหานคร	7
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของขี้ถ้ำคัน แผ่นใบและกาบใบของฟางข้าว	16
2.3 สมบัติและองค์ประกอบต่างๆ ที่พบในพืช	21
ก-1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม	57
ก-2 ผลการศึกษาช่วงระยะเวลาการสัมผัส	58
ก-3 ผลการศึกษาอุณหภูมิ	60
ก-4 ผลการศึกษาเวลาในการอบตัวคูดซ์	61
ก-5 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสม	62
ก-6 ผลการศึกษาระยะเวลาการคูดซ์	63
ก-7 ผลการศึกษาการคูดซ์ของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริก	64
ก-8 ตารางข้อมูลชุดควบคุม	65
ค-1 ตารางช่วงความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	75
ง-1 ตารางมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานและนิคมอุตสาหกรรม	82

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กลไกการดูดซับทั้ง 4 ขั้นตอน	14
2.2 โครงสร้างหลักของฟางข้าว	15
2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส	16
2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	18
2.5 โครงสร้างของลิกนิน	19
2.6 โครงสร้างกรดซिटริก	23
2.7 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซिटริกในกระบวนการปรับสภาพฟางข้าว	24
2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง (Atomic Absorption Spectrometer)	25
2.9 Flame Atomization process	30
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซिटริก (มิลลิโมลาร์) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	41
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ฟางข้าวสัมผัสกับกรดซिटริกเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ (นาที่) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	43
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซिटริก ( $^{\circ}\text{C}$ ) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	44
4.4 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซिटริกในกระบวนการปรับปรุงฟางข้าว	45
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาอบฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซिटริก (นาที่) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	46
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	47
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับกับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	48
4.8 ลักษณะฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซिटริกกับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )	49

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค-2.1 ประสิทธิภาพการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ก่อนปรับปรุงด้วยกรดซิตริก	76
ค-3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและ pH ของการตกตะกอนของโลหะหนัก	77
ค-4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซิตริก (มิลลิโมลาร์) กับร้อยละ การดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95	78
ค-4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ฟางข้าวสัมผัสกับกรดซิตริกเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ (นาที่) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95	78
ค-4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก ( $^{\circ}\text{C}$ ) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95	79
ค-4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาอบฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก (นาที่) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95	79
ค-4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95	80
ค-4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับ (นาที่) กับร้อยละการดูดซับ ไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95	80

## สัญลักษณ์และคำย่อ

AAS	=	อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์
$\text{Cu}^{2+}$	=	ไอออนทองแดง
$\text{OH}^-$	=	ไฮดรอกไซด์ไอออน
g	=	กรัม
kg	=	กิโลกรัม
pH	=	ความเป็นกรด - ด่าง
$^{\circ}\text{C}$	=	องศาเซลเซียส
M	=	โมลาร์
S.D.	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
Ksp	=	ค่าคงที่การละลาย
mg	=	มิลลิกรัม
mL	=	มิลลิลิตร
mM	=	มิลลิโมลาร์
mol	=	โมล
$\text{Na}^+$	=	โซเดียมไอออน
$\text{cm}^2$	=	ตารางเซนติเมตร
mmol	=	มิลลิโมล

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันการปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำเสียกำลังเป็นปัญหาที่สำคัญระดับโลกที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งแวดล้อม เป็นอันตรายอย่างมากต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิต โดยทั่วไปการปนเปื้อนของโลหะหนักมักเกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมเหล็ก อุตสาหกรรมชุบโลหะ อุตสาหกรรมโรงพิมพ์และอุตสาหกรรมเหมืองแร่ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืช การทำสีย้อม เป็นต้น โดยอุตสาหกรรมเหล่านี้เมื่อปล่อยของเสียจะมีทองแดงซึ่งเป็นโลหะหนักปนเปื้อนออกมา (Zhu *et al.*, 2008) ซึ่งทองแดงเป็นโลหะหนักที่มีความหนาแน่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูงพบได้ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน หิน น้ำและอากาศ อาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น  $Cu_2O$ ,  $Cu_2S$ ,  $CuF$ ,  $CuSO_4$  และ  $CuFeS_2$  เป็นต้น ซึ่งเราอาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การอุปโภคและบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ทองแดงมีความจำเป็นต่อร่างกายสิ่งมีชีวิตถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกาย แต่ในทางกลับกันเมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกายคือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ ดับทำหน้าที่ยับยั้ง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกายหรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ซึ่งวิธีการกำจัดมีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน (Membrane separation) และการดูดซับ (Adsorption) (ศศิธร, 2551) แต่วิธีเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายในการบำบัดสูงและไม่สามารถกำจัดโลหะหนักได้อย่างสมบูรณ์ จึงหาวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำลง ซึ่งใช้วิธีการดูดซับด้วยวัสดุธรรมชาติโดยใช้ฟางข้าว

ฟางข้าว (rice straw) เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและยังประกอบไปด้วยลิกนิน เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ในฟางข้าวมีรูพรุนและเส้นใยเพื่อใช้ในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายได้ (นพวรรณ และคณะ, 2548)

อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะยังอยู่ในระดับต่ำ จึงมีการดัดแปลงทางเคมีเพื่อให้ความสามารถในการดูดซับได้มากขึ้น ซึ่งกรดซัลฟิวริกถือเป็นสารเคมีที่มีราคาถูกและใช้ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างกว้างขวาง (Zhu *et al.*, 2008) การปรับสภาพฟางข้าวด้วยกรด

ซิริทริกเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของฟางข้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยกรดซิริทริกจะเข้าไปเติมหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group : -COOH) ให้กับโครงสร้างของฟางข้าวซึ่งทำให้ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการจับกับไอออนทองแดงได้มากขึ้น (ศศิธร, 2551)

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการกำจัดทองแดงซึ่งเป็นโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย โดยใช้ฟางข้าวที่เป็นวัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ มีการใช้กรดซิริทริกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับให้มากขึ้นและยังเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิริทริกเพื่อดูดซับทองแดงออกจากตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงด้วยฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิริทริก
3. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิริทริกเป็นตัวดูดซับ

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิริทริกเพื่อดูดซับทองแดงออกจากตัวอย่างน้ำเสียสังเคราะห์
  - 1.1 ศึกษาความเข้มข้นของกรดซิริทริกที่เหมาะสมที่ใช้การปรับปรุงตัวดูดซับ โดยแปรค่าความเข้มข้นดังนี้คือ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิโมลาร์
  - 1.2 ศึกษาผลของช่วงระยะเวลาการสัมผัส โดยแปรค่าเวลาที่ใช้ ดังนี้คือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที
  - 1.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิ โดยแปรค่าอุณหภูมิ ดังนี้คือ 30, 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส
  - 1.4 ศึกษาเวลาในการอบตัวดูดซับ โดยแปรค่าเวลา ดังนี้คือ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงด้วยฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิริทริก

2.1 ศึกษาค่า pH ที่เหมาะสม โดยแปรค่า pH ดังนี้คือ 3, 4, 5, 6 และ 7

2.2 ศึกษาระยะเวลาการสัมผัสของตัวดูดซับ โดยแปรค่าเวลาดังนี้ 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที

3. ศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกโดยใช้สภาวะเดียวกัน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นการลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของฟางข้าวซึ่งเป็นมลพิษทางอากาศออกสู่สิ่งแวดล้อมได้และลดการสูญเสียของแหล่งทรัพยากรโดยเปล่าประโยชน์
2. สามารถนำวัสดุทางธรรมชาติที่มีราคาถูก หาง่าย นำกลับมาใช้ใหม่เพื่อประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด
3. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของทองแดง
4. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับศึกษาการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โลหะหนัก

#### นิยามและความหมาย

โลหะหนัก (Heavy metal) หมายถึง ธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะแอลคาไลน์ (Alkali) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นธาตุในตารางธาตุที่มีเลขอะตอม (Atomic number) อยู่ในช่วง 23 ถึง 92 อยู่ในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ (สุคเขต, 2555)

#### 2.1.1 ทองแดง (Cu)

##### 2.1.1.1 สมบัติของทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะสีแดงส้มอยู่ในหมู่ 1B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 29 น้ำหนักอะตอม 63.54 ค่าความถ่วงจำเพาะ 8.9 จุดหลอมเหลว 1,083 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,739 องศาเซลเซียส มีความเหนียวเป็นมันวาว มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดีมาก ทองแดงมีเลขออกซิเดชัน 2 ค่า คือ +1 และ +2

ทองแดงในธรรมชาติเป็นสินแร่ที่มีมากในธรรมชาติเช่นเดียวกับสังกะสีและพบว่ามักจะอยู่ปะปนอยู่กับแร่สังกะสี ในธรรมชาติพบทองแดงในรูปชัลโคไพไรต์ (Chalcopyrite,  $\text{CuFeS}_2$ ), ชัลโคไซต์ (Chalcocite,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ), มาลาไคต์ (Malachite,  $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$ ), อะซิวไรต์ (Azurite,  $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ) นอกจากนี้ยังพบในรูปของคูปไรต์ (Cuprite,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ) รูปแบบสารประกอบเคมีของทองแดงมีหลายรูปแบบทั้งอยู่ในรูปคลอไรด์, ซัลเฟต, ไนเตรต ซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ ส่วนสารประกอบที่อยู่ในรูปคาร์บอเนต, ไฮดรอกไซด์, ออกไซด์และซัลไฟด์จะไม่ละลายน้ำ ทองแดงในน้ำผิวดินปกติมีความเข้มข้นอยู่ที่ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในสภาพธรรมชาติแร่ทองแดงอยู่ในรูปซัลไฟด์เป็นจำนวนมากซึ่งแร่เหล่านี้จะสลายตัวได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาพกรดทำให้ทองแดงถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของไอออน ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุโลหะหนักทั่วไปทองแดงจึงจัดว่าเป็นพวกที่เคลื่อนที่ได้ดี แต่เมื่อหินหรือแร่ นั้นสลายสภาพมาเป็นดิน ทองแดงเป็นธาตุที่ทำปฏิกิริยากับแร่อินทรีย์สารในดินได้ง่ายจึงสามารถ

ตกตะกอนได้กับไอออนลบหลายชนิด เช่น ซัลไฟด์ คาร์บอเนตและไฮดรอกไซด์ ทองแดงจึงจัดเป็นพวกที่ค่อนข้างไม่เคลื่อนที่ในดิน รูปที่ละลายได้ของทองแดงที่พบมากที่สุดคือ  $\text{Cu}^{2+}$

ทองแดงและสารประกอบของทองแดงพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อมต่างๆ แต่พบมากในแหล่งน้ำคืบซึ่งชนิดของทองแดงที่เกิดขึ้นในน้ำขึ้นอยู่กับค่า pH และความเข้มข้นของคาร์บอเนตในน้ำและชนิดของไอออนลบที่ปรากฏอยู่ในน้ำ โดยทั่วไปในสารประกอบของทองแดงมักจะมีเลขออกซิเดชัน +1 และ +2 เรียกว่า คิวพลัส (Cuprous) และคิวพลิก (Cupric) ตามลำดับ  $\text{Cu}^+$  มีแนวโน้มจะเปลี่ยนรูปเป็น  $\text{Cu}^{2+}$  ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรมากกว่าเมื่อละลายอยู่ในน้ำ ดังสมการ



สารประกอบ  $\text{Cu}^{2+}$  ส่วนมากสามารถละลายน้ำได้ง่าย เป็นผลให้เกิดไอออนของทองแดงในรูปของ  $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})^{2+}$  หรือ  $\text{Cu}^{2+}$

#### 2.1.1.2 การนำทองแดงมาใช้ประโยชน์

มีการนำทองแดงมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก เช่น กวาร์ร้อยละ 50 ของทองแดงใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องมือที่ใช้สายไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์และเครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้า แผ่นพิมพ์วงจรไฟฟ้า อุตสาหกรรมชุบและเคลือบโลหะ การทำลวดตัวนำไฟฟ้า อุตสาหกรรมเครื่องประดับ อุตสาหกรรมท่อผ้า และผลิตภัณฑ์เซรามิก (สุคเขต, 2555)

#### 2.1.1.3 การเข้าสู่ร่างกายและการสะสมของทองแดง

ประมาณร้อยละ 30 ของทองแดงที่บริโภคจะถูกใช้ภายในร่างกาย การดูดซึมจะเกิดขึ้นบริเวณกระเพาะและลำไส้เล็กตอนต้น ทองแดงจะเคลื่อนจากลำไส้ลงสู่กระแสโลหิตหลังจากที่ย่อยแล้วภายใน 15 นาที ทองแดงที่บริโภคส่วนมากถูกขับออกทางอุจจาระและน้ำดี ส่วนน้อยที่ขับออกทางปัสสาวะ นอกจากนี้เมื่อได้รับวิตามินซีสูงจะทำให้การดูดซึมของทองแดงลดลงและทำให้ระดับเซรูโรพลาสมีน (Ceruloplasmin) ในพลาสมา (Plasma) ลดลงด้วย ทองแดงจะถูกเก็บไว้ในเนื้อเยื่อและสะสมไว้ที่ตับ ไต หัวใจและสมอง

การแพร่กระจายของทองแดงในสิ่งแวดล้อม ทองแดงที่เกิดการปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อมมักเกิดเนื่องจากการใช้ยากำจัดศัตรูพืช ยาฆ่าเชื้อราและจุลินทรีย์ ซึ่งจะมีผลต่อระบบนิเวศในแหล่งน้ำเป็นส่วนใหญ่

#### 2.1.1.4 ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดงนั้นถือเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับสิ่งมีชีวิต เป็นส่วนประกอบของ Haemoglobin และมีความสำคัญต่อกระบวนการหายใจของพืช แต่อย่างไรก็ตามปริมาณที่สิ่งมีชีวิตต้องการมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งถ้ามีปริมาณมากเกินไปในสิ่งแวดล้อมจะก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้

โลหะทองแดงแม้จะเป็นธาตุที่จำเป็นต่อสัตว์น้ำหลายชนิด เช่น พวก Molluscs และพวก Crustacean โดยเป็นส่วนประกอบของ Haemocyanin ในเลือดก็ตาม แต่ถ้ามีปริมาณทองแดงสูงเกินไปเล็กน้อยก็อาจเป็นพิษต่อสัตว์น้ำได้ ในหอยนางรมเมื่อสะสมโลหะทองแดงไว้มากจะทำให้เหงือกและเนื้อเยื่อส่วน Mantle มีสีเขียวผิดปกติ โลหะทองแดงในรูปของ  $\text{CuSO}_4$  อาจทำให้เกิดตะกอนกับของเสียที่เหงือกปลาขับออกมาและมีผลทำให้ปลาตายได้ เนื่องจากเกิดการแลกเปลี่ยนแก๊สผิดปกติและสารดังกล่าวยังทำลายเซลล์ที่อยู่ตามเหงือกปลาอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีผลต่อตัวอ่อนปลาด้วย

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดีแล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระหรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกายคือ คลื่นไส้ อาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กระบวนการภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ทำให้ตับทำหน้าที่บกพร่องไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ในร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกายหรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสั้นเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก (สุคเขต, 2555)

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะในกรุงเทพมหานคร

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)
โครเมียม	52.5
นิกเกิล	62
สังกะสี	145
ทองแดง	42
ไซยาไนด์	277

ที่มา : (ศศิธร, 2551)

จากข้อมูลความเป็นพิษปริมาณของทองแดงในน้ำเสียมีค่าเกินค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดมาก ซึ่งตามที่ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมฉบับที่ 3 พ.ศ. 2539 กำหนดมาตรฐานการควบคุมระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมให้มีปริมาณทองแดงในน้ำทิ้งไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2539) จะเห็นได้ว่า เมื่อปล่อยปริมาณทองแดงที่มีค่าเกินมาตรฐานลงสู่แหล่งน้ำโดยที่ไม่มีการบำบัดจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ รวมทั้งผลกระทบที่อาจเกิดแก่มนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นควรมีการบำบัดน้ำเสียที่ถูกต้องและเหมาะสมก่อนการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำต่อไป (ศศิธร, 2551)

## 2.2 กรรมวิธีการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การแยกหรือทำลายสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำทิ้งให้มีปริมาณลดลงจนอยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษทางน้ำ การบำบัดน้ำเสียนั้นจะมีกระบวนการหรือขั้นตอนรวมทั้งระบบที่ใช้ในการบำบัดหลายระบบและหลายขั้นตอน (ศศิธร, 2551)

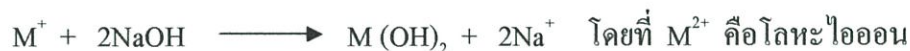
กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการทำโรงบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียและความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้ (หฤทัย, 2547)

### 2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว โดยทำการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเสียเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกันแต่วิธีที่นิยมใช้กันทั่วไปในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 แบบคือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

#### 1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

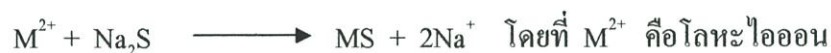
การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิม โดยเติมสารเคมีคือ ปูนขาว หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกิดปฏิกิริยาตามสมการดังนี้



การตกตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือโลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติ Amphoteric คือ ไม่สามารถตกตะกอนที่ pH ใด pH หนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วง pH กว้างโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ดีที่ pH 8 ถึง 11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้จะสามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่า pH เปลี่ยนแปลงไปจากค่า pH ที่ใช้ในการตกตะกอน

#### 2. การตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

การตกตะกอนซัลไฟด์ สารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ ( $Na_2S$ ) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $NaHS$ ) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ ( $FeS$ ) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



ข้อดีของการตกตะกอนซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนซัลไฟด์มีข้อจำกัดคือ เรื่องของกลิ่นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen Sulfide) ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันแก๊สที่เกิดขึ้นโดยบำบัดน้ำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

### 2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน สามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ เรซินมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามเป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มี

ประจุบวกจะเรียกว่า แคทไอออนเอกเซนเจอร์ (Cation Exchange) ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ เรียกว่า แอนไอออนเอกเซนเจอร์ (Anion Exchange) วิธีการนี้จะเหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องถูกกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การกำจัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.2.3 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบของโลหะต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวทำให้เกิดออกซิเดชัน ได้แก่ ออกซิเจน, โอโซน, คลอรีน, ไฮโปคลอไรต์, เปอร์แมงกานต, โครเมตและไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ เฟอร์ริกซัลเฟต, โซเดียมเมตาไบซัลเฟตและซัลเฟอร์ไดออกไซด์

### 2.2.4 รีเวิร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดัน แผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลสอะซีเตตและโพลีเอมีน ซึ่งจะให้เฉพาะสารบางชนิดผ่าน (Semipermeable Membrane) เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูง โดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องบำบัดขึ้นต้น โดยการปรับค่า pH แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออกและกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของเมมเบรน วิธีการนี้เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าและน้ำเสียจากการล้างภาพ

### 2.2.5 การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีง่ายๆ ที่ทำให้สารเคมีมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยทั้งที่บรรยากาศธรรมดา (Atmospheric Evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูง

### 2.2.6 อิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลาย ด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของกระบวนการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนกับการสกัดตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อ

ป้องกันแผ่นเมมเบรนอุดตัน ซึ่งวิธีการนี้ต้นทุนก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง แต่สามารถกำหนดไอออนที่ต้องการได้

### 2.2.7 การแยกกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดแก๊สออกซิเจนในขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีการนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่เป็นที่นิยมเพราะเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก (พอลตา, 2547)

### 2.2.8 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process)

กระบวนการทางชีววิทยาเป็นการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยปฏิกิริยาของการย่อยสลายสิ่งสกปรกที่อยู่ในน้ำด้วยจุลินทรีย์ โดยปกติแล้วในน้ำตามธรรมชาติหรือน้ำเสียจะมีจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ อาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งจุลินทรีย์ต่างๆ เหล่านี้สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้โดยอาศัยอาหารจากแหล่งน้ำหรือน้ำเสีย สิ่งสกปรกที่มีอยู่ในน้ำเสียโดยเฉพาะที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์จะกลายเป็นอาหารและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ซึ่งส่วนมากเป็นพวกแบคทีเรีย การบำบัดน้ำเสียวิธีนี้ค่อนข้างเป็นที่นิยม ตัวอย่างของกระบวนการในกลุ่มนี้คือ การบำบัดน้ำทิ้งแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) (ศศิธร, 2551)

## 2.3 การดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารดูดซับในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สมาเกาะติดบนพื้นผิว การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพและเคมี ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างพื้นผิว (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวของ 2 วัสดุภาค เช่น ของเหลวกับของเหลว แก๊สกับของเหลว แก๊สกับของแข็งหรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับบนของแข็งโดยเฉพาะอย่างยิ่งบนถ่านกัมมันต์ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย

กระบวนการดูดซับแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorptions)

## 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption)

การดูดซับทางกายภาพที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (แรงแวนเดอร์วาลส์) ซึ่งมีค่าน้อย โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) แต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับก่อนหน้า โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลสารถูกดูดซับหรือตัวถูกละลาย จำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดมีค่าน้อยการหลุดของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ง่าย (พอตา, 2547)

แรงที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับทางกายภาพมักเป็นแรงอ่อนๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของตัวดูดซับมีหลายชนิดดังนี้

### 1. แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force)

อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่อยู่ในสภาพไม่มีขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดสภาพมีขั้วขึ้นและสามารถดูดซับตัวถูกดูดซับด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับจะสามารถกระทำได้ง่าย ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถทำการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย แรงแวนเดอร์วาลส์จะมีแรงที่เกี่ยวข้อง 2 ชนิด ดังนี้

#### 1.1 แรงลอนดอน (London Force)

แรงลอนดอนเป็นแรงยึดเหนี่ยวชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แรงนี้จะมีสภาพขั้วเกิดขึ้นชั่วคราว เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมไม่อยู่นิ่ง ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียสเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนไม่สม่ำเสมอจึงเกิดเป็นขั้วขึ้นและโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียงถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วขึ้นเช่นกัน แล้วโมเลกุลเหล่านั้นก็จะเกิดแรงดึงดูดต่อกัน เรียกว่า “แรงลอนดอน” แรงลอนดอนจะมีมากหรือน้อยขึ้นกับมวลโมเลกุล จำนวนอิเล็กตรอน ขนาดและรูปร่าง

## 1.2 แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force)

แรงทางไฟฟ้าสถิตเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วเข้าด้วยกันหรือระหว่างสารที่ไม่มีขั้ว ซึ่งการเกาะจับกันของโมเลกุลชนิดต่างๆ เกิดได้ 3 รูปแบบ คือ

1.2.1 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว (Polar-Polar Molecule) ซึ่งเกิดจากผลของการจัดเรียงโมเลกุล (Orientation Effect) ที่มีขั้วสองโมเลกุล คือขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

1.2.2 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar Molecule) เกิดจากการกระจายตัว (Dispersion Effect) ซึ่งเป็นผลจากโมเลกุลที่ไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมากและเมื่อมีโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเดียวกันเข้ามาจะเกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกันและมักเป็นแรงที่อ่อน เช่น อินทรีย์สารและถ่านกัมมันต์ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์สารส่วนใหญ่เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว

1.2.3 แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Polar-Nonpolar Molecule) เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (Induction Effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาอยู่ใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้วแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงข้าม ซึ่งจะทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

## 2. พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond)

พันธะไฮโดรเจนเป็นพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของธาตุไฮโดรเจนกับอะตอมของธาตุอื่นที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity: EN) สูงๆ และมีขนาดเล็ก เช่น ออกซิเจน (O), ไนโตรเจน (N) และฟลูออรีน (F) โดยปกติแล้วไฮโดรเจนจะสร้างพันธะเพียง 1 พันธะแต่เมื่อไฮโดรเจนอยู่ใกล้กับสารทั้งสามข้างต้นแล้วจะเกิดพันธะกับสารดังกล่าว ซึ่งพันธะที่เกิดขึ้นจะมีขั้วมากจนทำให้ไฮโดรเจนมีความเป็นบวกเด่นชัด จึงดึงดูดอิเล็กตรอนที่ไม่สร้างพันธะ (Nonbonded Electron) ของอะตอมในอีกโมเลกุลหนึ่ง จึงดูเหมือนว่าไฮโดรเจนสามารถสร้างพันธะได้ 2 พันธะคือ พันธะโควาเลนต์ 1 พันธะและพันธะไฮโดรเจนอีก 1 พันธะ ถึงแม้ว่าพันธะไฮโดรเจนจะมีความแรงของพันธะเพียงร้อยละ 5 ถึง 10 ของพันธะโควาเลนต์ แต่เมื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นจะมีผลต่อคุณสมบัติทั้งทางด้านฟิสิกส์และทางด้านเคมีของโมเลกุลของสารที่เกิดขึ้น (ศศิธร, 2551)

## 2. การดูดซับทางเคมี (Chemisorptions)

เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับกับสารถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาแน่นของโมเลกุลเพียงชั้นเดียวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เอง เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบ

ใหม่ที่มีผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิสูงจะเกิดเร็วกว่าอุณหภูมิต่ำเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีจะเกิดอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูง

### 2.3.1 ประเภทสารดูดซับ

สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์และแอคทีเวเต็ดซิลิกา สารธรรมชาติเหล่านี้มักมีพื้นที่ผิวประมาณ 50 ถึง 200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่การสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสียคือ มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิดทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีจำกัดมาก

2. ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 ถึง 1000 ตารางเมตรต่อกรัม

3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ เช่น เรซินแลกเปลี่ยนประจุ สารเรซินมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

### 2.3.2 กลไกการดูดซับ

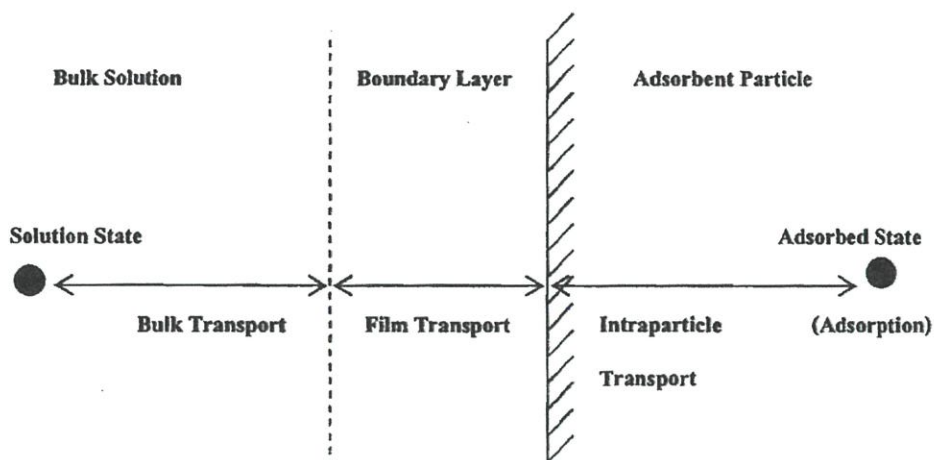
การดูดซับเป็นการเคลื่อนย้ายสารจากของเหลวและของแข็งหรือแก๊ส และการดูดซับของแข็งจะแสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีขั้นตอนการเกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเคลื่อนที่ผ่านสารละลาย (Bulk Solution Transport) ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่จากสารละลายสู่ขอบด้านนอกของน้ำที่ล้อมรอบตัวดูดซับ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นโดยการแพร่

ขั้นตอนที่ 2 การเคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film Diffusion Transport) ตัวถูกดูดซับจะแพร่ผ่านชั้นน้ำ (Hydrodynamic Boundary Layer) ที่อยู่ล้อมรอบตัวดูดซับไปยังผิวตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 การเคลื่อนที่ผ่านรูพรุน (Pore Transport and Intraparticle Transport) ตัวถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ผ่านช่องที่อยู่ภายในตัวดูดซับ ไปสู่บริเวณที่จะมีการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 4 การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกดูดซับกับ Active site บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดติดด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมีหรือทั้งสองแรงพร้อมกัน



รูปที่ 2.1 กลไกการดูดซับทั้ง 4 ขั้นตอน (สศิริ, 2551)

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

#### 1. ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ Film Diffusion และ Pore Diffusion ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบถ้ามีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนาแน่นมากเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้ Film Diffusion เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงทำให้ Pore Diffusion เป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 2. ขนาดของสารดูดซับ

อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ การลดขนาดของสารดูดซับให้เล็กลงทำให้อัตราเร็วในการดูดซับเร็วขึ้นกว่าสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่

#### 3. พื้นที่ผิวของสารดูดซับ

พื้นที่ผิวของสารดูดซับสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) ยกเว้นกรณีที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนสารดูดซับ

#### 4. ความสามารถในการละลายน้ำของสารดูดซับ

เมื่อเกิดการดูดซับโมเลกุลจะถูกดึงออกจากน้ำและเกาะติดบนผิวของของแข็ง สารที่ละลายน้ำได้หรือแตกตัวเป็นไอออนได้จะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง จึงเป็นสารที่ยากในการดูดซับ ดังนั้นสารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยจะสามารถเกาะติดบนผิวสารดูดซับได้ดี

#### 5. ขนาดของสารที่ถูกดูดซับ

ขนาดของสารหรือโมเลกุลมีความสำคัญมากต่อการดูดซับ โดยเฉพาะการดูดซับที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของสารดูดซับ

## 6. ค่า pH

ค่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่า pH มีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็น ไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ จึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับมาก

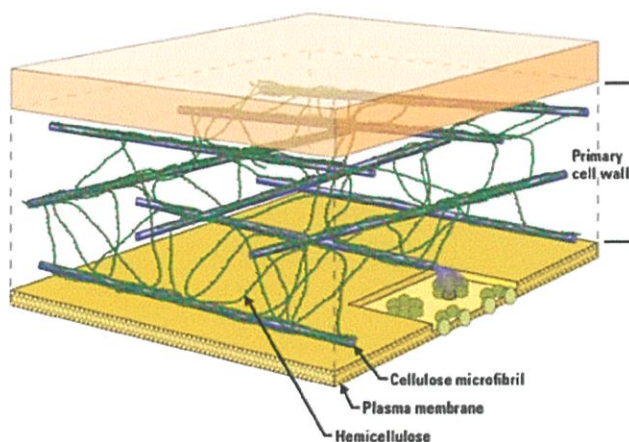
## 7. อุณหภูมิ

ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน พบว่า เมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลงและในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนช่วยทำให้ความหนาของฟิล์มน้ำลดลงการเคลื่อนย้ายสารถูกดูดซับจากสารละลายภายนอก (Bulk Solution) เคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น (ศศิธร, 2551)

## 2.4 ฟางข้าว (Rice Straw)

ฟางข้าวเป็นหนึ่งในจำนวนมากของวัสดุพืชและถูกผลิตทุกๆ ปีในปริมาณมากในประเทศที่พัฒนาแล้ว เส้นใยที่เหลือจากการเพาะปลูกจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์กระดาษหรือเป็นอาหารสัตว์ (พัชรลักษณ์, 2551)

ฟางข้าวจัดเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลซิก (lignocellulosic material) ชนิดหนึ่งซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) และลิกนิน (lignin) ในปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และสภาวะที่เจริญเติบโตของต้นข้าว การนำเอาส่วนประกอบในฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ จำเป็นต้องทราบถึงลักษณะ โครงสร้างและปริมาณส่วนประกอบเหล่านั้น เพื่อพิจารณาเลือกวิธีการผลิตที่เหมาะสม (นพวรรณ และคณะ, 2548)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างหลักของฟางข้าว (Toongpang, 2555)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของข้อลำต้น แผ่นใบและกาบใบของฟางข้าว

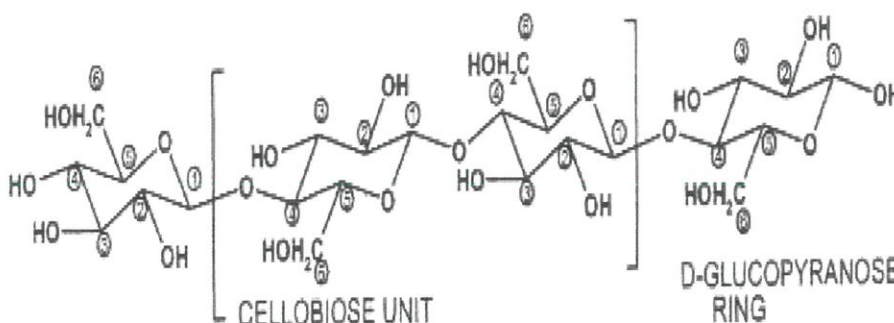
component (%w/w)	internodes		leaf sheaths		leaf blades	
	mean	range	mean	range	mean	range
crude protein	2.7	1.7-6.4	3.5	2.0-6.9	4.6	3.2-8.6
total ash	15	11-20	20	14-25	18	12-25
residual ash	8	6-13	14	6-20	14	8-20
hemicellulose	21	13-28	25	21-31	25	20-29
cellulose	47	38-51	39	33-49	31	27-35
lignin	5	4-6	4	4-6	6	4-8
IVOMD	42	34-54	45	39-55	44	31-59

ที่มา : (จริญ, 2551)

#### 2.4.1 เซลลูโลส

##### ความหมายของเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์สายยาวและมีมวลโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเบตา (1,4) ( $\beta$ -(1,4) glucosidic linkage) ประมาณ 10,000 หน่วย พบทั่วไปในธรรมชาติเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของผนังเซลล์พืชและมีการเรียงตัวอยู่ในรูปของผลึก



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเซลลูโลส (อังคณา, 2552)

##### โครงสร้างของเซลลูโลส

เซลลูโลสมีโครงสร้างเส้นใยเล็กๆ ที่เรียกว่าไฟบริล (fibril) ซึ่งมีลักษณะเป็นมัดยาวรวมกันอยู่อย่างแข็งแรงด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล การจัดเรียงตัวของโมเลกุลไฟบริลทำให้เซลลูโลสมีโครงสร้างหลายรูปแบบ โครงสร้างทางเคมีและกายภาพของเซลลูโลสเกิดจาก

ไฟบริลหรือโปรโตไฟบริลที่มีการเรียงตัวขนานและจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ซึ่งเมื่อตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นเป็นแผ่นบางๆ และเมื่อตัดขวางแผ่นบางๆ เหล่านี้ จะพบส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึกที่มีการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเรียงตัวขนานกันไป โดยบางส่วนอาจเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งบริเวณนี้ทำให้เซลลูโลสสลายตัวและแยกออกจากกันได้โดยการเข้าทำปฏิกิริยาของของเหลว เช่น กรดแก่ นอกจากนี้ยังอาจเกิดเป็นรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายด้วยแรงกล เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบและขีดจำกัดของความยืดหยุ่นของไมโครไฟบริล (อังคณา, 2552)

#### สมบัติทางเคมีของเซลลูโลส

เมื่อเซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารละลายบางชนิดจะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

1. ปฏิกิริยาที่ทำให้เซลลูโลสพองตัวและกระจายตัวออกโดยไม่ทำให้เซลลูโลสยาวขึ้นหรือเปลี่ยนโครงสร้างของเซลลูโลสในเส้นใย
2. ปฏิกิริยาที่ทำให้หมู่ไฮดรอกซิล (OH) เปลี่ยนเป็นหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ ได้ง่าย จึงทำให้อนุพันธ์ของเซลลูโลสต่างๆ เช่น วิสโคส (Viscose), เรยอน (Rayon), เซลโลเฟน (Cellophane), เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose Acetate), เซลลูโลสโพรพิโอเนต (Cellulose Propionate), เซลลูโลสไนเตรต (Cellulose Nitrate), เซลลูโลสอีเทอร์ (Cellulose Ether), เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose) และไซยาโนเอทิลเลตเซลลูโลส (Canoethylated Cellulose) เป็นต้น
3. ปฏิกิริยาที่ทำให้สายโซ่ของเซลลูโลสเปลี่ยนแปลงไปเพราะเสื่อมสภาพ ปฏิกิริยาทั้งสามชนิดดังกล่าวข้างต้น มักเกิดการกัดกร่อนร่วมกันเสมอ นอกจากนี้คุณสมบัติทั่วไปของเซลลูโลสคือ ทนต่อด่างแต่ไม่ทนต่อกรดเข้มข้น เผาไหม้ในอากาศโดยไม่มีกลิ่นและเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับไฮโดรเจนไอออนได้ดี

#### สมบัติทางกายภาพของเซลลูโลส

เซลลูโลสมีจุดหลอมเหลวเท่ากับ 260 ถึง 270 °C (สลายตัว) และสามารถสลายได้ในกรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริกเข้มข้นร้อยละ 65 ถึง 67 โดยน้ำหนักกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก กรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 83 โดยน้ำหนัก

ความเป็นผลึกของเซลลูโลส เซลลูโลสมีลักษณะการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล 2 แบบคือ

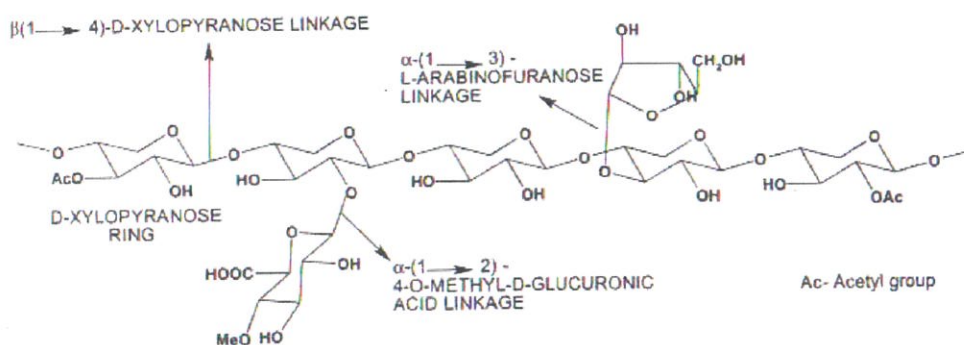
1. ลักษณะผลึก (Crytalline) มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ โซ่โมเลกุลอยู่รวมกันเป็นสายยาวขนานไปตามความยาวของเส้นใย

2. ลักษณะกึ่งผลึก (Semi Crystalline) โม่เลกุลบางตอนเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ แต่บางตอนเปิดเป็นช่องว่างพันกันไปมาไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า รูปร่างอสัณฐาน (Amorphous) การเรียงตัวเป็นสายโซ่ของโม่เลกุลเซลลูโลส (ศศิธร, 2551)

### 2.4.2 เฮมิเซลลูโลส

#### ความหมายของเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโม่เลกุลต่ำและมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด กล่าวคือ มีไซโลสมากที่สุดถึง 85 ถึง 90% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม กรดแมนนูโรนิก (mannuronic acid) และกรดกาแลกตูโรนิก (galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจางหรือเอนไซม์ เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรงและมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างเซลลูโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (อังคณา, 2552)

#### โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

พืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลสและอะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนส และกาแลกโตส องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบตา (1,4) และพบในไม้เนื้อแข็งมากกว่าไม้เนื้ออ่อน ทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมี

ส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมธิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl- $\alpha$ -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกได้ง่ายด้วยสารละลายเบส แต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นอาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (delignification) ร่วมด้วย

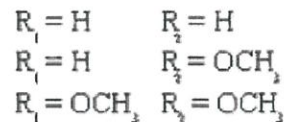
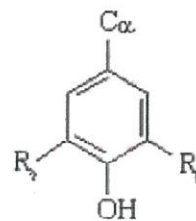
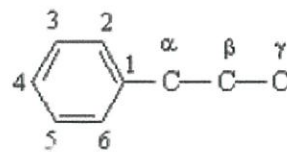
#### สมบัติของเฮมิเซลลูโลส

ส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุดและพบส่วนน้อยในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกย่อยสลายและสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพกติน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะชอบน้ำ ทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลได้ ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำ แต่สามารถละลายได้ในเบส

#### 2.4.3 ลิกนิน

##### ความหมายของลิกนิน

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลส และพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติ โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเทอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของลิกนิน (อังคณา, 2552)

## โครงสร้างของลิกนิน

ลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากหน่วยที่เหมือนกันซ้ำๆ ประกอบเป็นโมเลกุลที่ใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมทิลอยู่บนโมเลกุล ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้าและไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมทอกซี (methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน

## สมบัติของลิกนิน

ลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือ การละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูงขณะที่บางส่วนของกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (alkaline lignin) จะสามารถละลายได้ในตัวทำละลายจำพวก ไดออกเซน (dioxane), ไพริดีน (pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้ นอกจากนี้เมื่อมีการเติมหมู่เมทิล (methylation) และหมู่อะซีทิล (acetylation) แทนที่ตำแหน่งต่างๆ บนวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ตได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 280 นาโนเมตร ทั้งนี้การเติมไฮดรอกซิลหรือไฮดรอกซีที่เป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่โครงสร้างของลิกนิน ทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้ด้วยการที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้ลูลิตินทรีย์และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้การใช้ประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องใช้การปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อนและป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนิน รวมทั้งให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป (อังคณา, 2552)

ตารางที่ 2.3 สมบัติและองค์ประกอบต่างๆ ที่พบในพืช

องค์ประกอบ	หน่วยย่อย	พันธะ	แหล่งที่พบ	คุณสมบัติ
เซลลูโลส	กลูโคส	เบตา (1-4)	ผนังเซลล์ชั้นแรก	ไม่ละลายในน้ำ, แข็งแรง
เฮมิ-เซลลูโลส	ไซโลส, กลูโคส แมนโนส, กาแลกโตส	เบตา (1-4)	ผนังเซลล์ชั้นแรก ผนังเซลล์ชั้นสอง	ละลายในน้ำ
เพกทิน	กรดกาแลกตูโรนิก	แอลฟา (1-4)	มิดเซลลามลลา	เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับกรดได้, ละลายน้ำ, ดูดซับประจุบวกได้
ลิกนิน	สารอะโรมาติกที่มีหมู่เมทอกซิล, ไฮดรอกซิล และ ฟีนิลโพรเพน	แอลฟา (1-4) เบตา (1-4)	ผนังเซลล์ชั้นแรก มิดเซลลามลลา ผนังเซลล์ชั้นสอง ผนังเซลล์ชั้นสาม	ไม่ละลายในกรดและน้ำ

ที่มา : (หุทัย, 2547)

## 2.5 การปรับสภาพฟางข้าว

### 2.5.1 การปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment)

กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment) เป็นกระบวนการกำจัดสารประกอบจำพวกลิกนินที่ห่อหุ้มเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสออกไป เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้จะทำให้มีผลต่อขั้นตอนกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งถ้าไม่ทำการกำจัดลิกนินออกก็จะทำให้การย่อยสลายทำได้ยากหรืออาจทำให้เกิดสารอนุพันธ์ที่อาจมีผลต่อกระบวนการผลิตได้ โดยวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธี ดังนี้

#### 1. การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (physical pretreatment)

เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบและทำให้เส้นใยเซลลูโลสแตกออกเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น เช่น การบดและการใช้ความร้อน เป็นต้น

#### 2. การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี (Chemical pretreatment)

จะใช้สารละลายกรดเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส เพราะเฮมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลสหรือใช้สารละลายเบสเพื่อเพิ่มปริมาณการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

### 3. การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ (physico-chemical pretreatment)

เป็นการใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับการใช้สารเคมี เช่น การใช้สารละลายเบสเจือจางและความร้อนภายใต้ความดันสูงในการปรับสภาพ ซึ่งประสิทธิภาพการย่อยสลายนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเบสและความร้อนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อใช้ความร้อนภายใต้สภาวะความดันสูงเพียงอย่างเดียว พบว่า อัตราการย่อยสลายลดลงเมื่อความร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของน้ำตาลที่เกิดขึ้น เปลี่ยนเป็นสารประเภทเฟอร์ฟูรัล ฟอร์มัลดีไฮด์หรือกรดฟอร์มิก เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวขัดขวางขั้นตอนการย่อยสลาย

#### 2.5.2 ชนิดของสารละลายเบสเจือจางที่นิยมใช้กัน

1. โซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารเคมีที่นิยมใช้มากที่สุดสามารถกำจัดลิกนินได้ดี เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสแก่ ในบางครั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์ไม่ได้กำจัดลิกนินออกไปเพียงอย่างเดียว แต่จะทำลายเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกไปด้วย ดังนั้นการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับพืชชนิดนั้นๆ ผลผลิตที่ได้จึงจะมีประสิทธิภาพมากที่สุด

2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นสารเคมีที่นิยมใช้ไม่น้อยกว่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่เนื่องจากแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เป็นเบสอ่อน จึงต้องใช้เวลาในการกำจัดลิกนินนานกว่าเล็กน้อย แต่ปัญหาที่พบจากการใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์คือ กำจัดลิกนินออกไม่หมดและอาจมีกลิ่นของแก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายลิกนิน

3. โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารเคมีที่นิยมใช้น้อยที่สุด แต่เป็นสารที่กำจัดลิกนินได้ดีที่สุดโดยโซเดียมซัลไฟด์จะมีความจำเพาะเจาะจงกับลิกนินเท่านั้น โดยจะไม่มีผลต่อเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส เหตุผลที่นิยมใช้โซเดียมซัลไฟด์ค่อนข้างน้อย อาจเนื่องจากกลิ่นของแก๊สไข่เน่าที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายลิกนิน แต่อย่างไรก็ตามโซเดียมซัลไฟด์ยังคงใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องกำจัดลิกนินออกเท่านั้น เช่น อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษในหลายบริษัท เป็นต้น

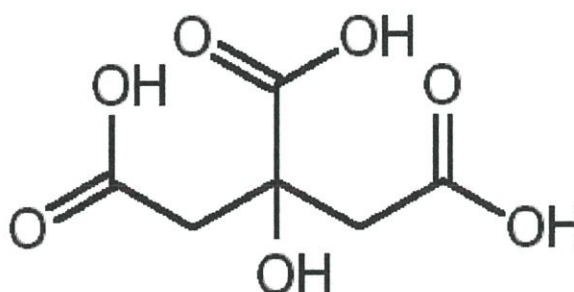
อย่างไรก็ตามการเลือกใช้สารเคมีดังกล่าวข้างต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพืชแต่ละชนิดที่นำมาใช้ โดยปัจจัยในการเลือกใช้สารเคมีอาจจะเลือกจากความแข็งของเนื้อไม้และคุณภาพในการแยกลิกนิน ดังนั้นกระบวนการปรับสภาพตัวอย่างจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการผลิตเซลลูโลสชีวเอทานอลทั้งในด้านคุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

### 4. การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

เป็นการใช้เอนไซม์เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างที่ซับซ้อนของเซลลูโลสให้อยู่ในรูปโซ่ตรงและช่วยลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสำหรับการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (ชัชนันท์ และคณะ, 2555)

### 2.5.3. กรดซิตริก

กรดซิตริกหรือกรดมะนาวมีชื่อทางเคมีทั่วไปว่า Citric acid monohydrate มีสูตรโมเลกุล  $C_6H_{10}O_8$  เป็นกรดอินทรีย์ มีลักษณะเป็นผง สีขาว ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 210.14 g/mol มีจุดเดือดเท่ากับ 135-153 และมีสูตรโครงสร้างตามรูป ดังนี้

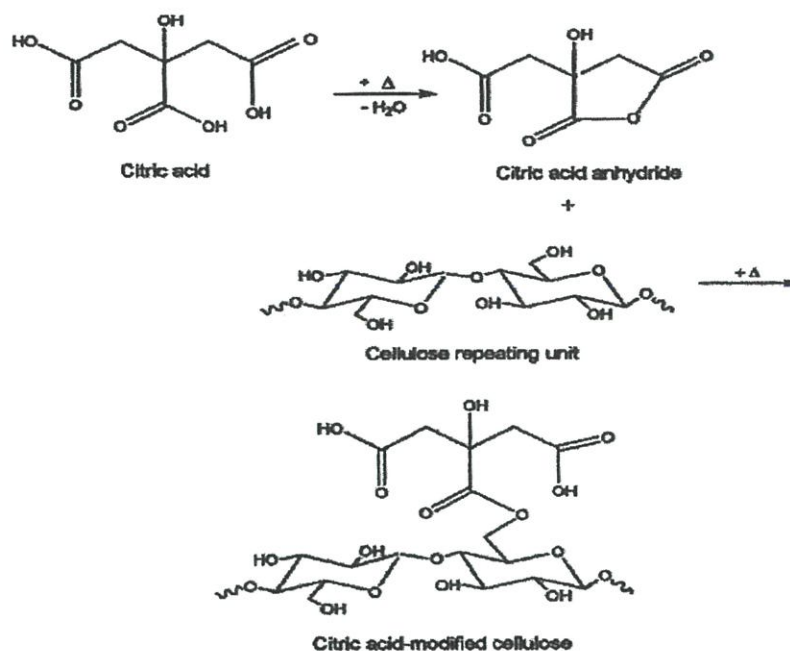


รูปที่ 2.6 โครงสร้างกรดซิตริก (ชุตินันท์, 2550)

Citrate ion ซึ่งมีสมบัติเป็นเกลือประเภทหนึ่งเรียกว่า citrates ซึ่งซีเตรตสามารถจับกับไอออนของโลหะเกิดเป็นสารประกอบโลหะได้จึงทำให้มีการนำ citrate มาใช้เป็นสารกันบูดในอาหารและใช้ลดความกระด้างของน้ำได้ (<http://www.mwit.ac.th/~teppode/rs4.pdf>)

### 2.5.4 การปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก

การปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริกเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของฟางข้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยการเติมหมู่ฟังก์ชันที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนโลหะหนักกับโครงสร้างของฟางข้าว ในที่นี้คือหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group:  $-COOH$ ) หมู่ฟังก์ชันนี้จะถูกเติมให้กับโครงสร้างฟางข้าวที่แช่ด้วยเบสคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เพื่อกำจัดสารประกอบที่อยู่ในโครงสร้างของฟางข้าวที่จะขัดขวางการทำปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซิตริก (ศศิธร, 2551)



รูปที่ 2.7 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซิตริกในกระบวนการปรับสภาพฟางข้าว  
(ศศิธร, 2551)

## 2.6 การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่อง AAS

### (Atomic Absorption Spectrometer)

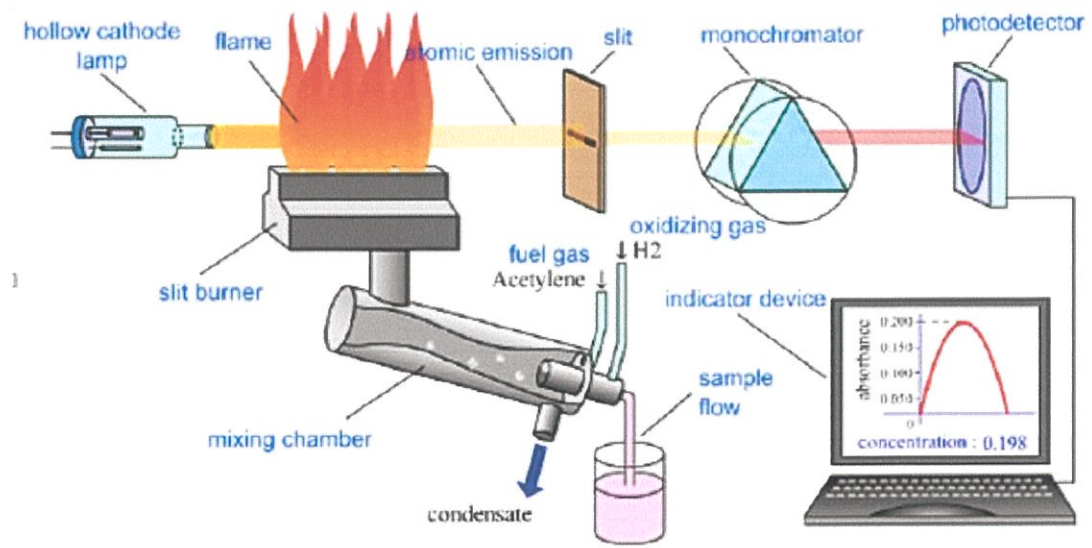
การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ธาตุอย่างหนึ่งซึ่งสามารถทำได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง เพราะเป็นเทคนิคที่สะดวก รวดเร็ว มีความเที่ยง ความแม่นยำ มีสภาพไวสูงและเป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโลหะหนักที่มีจำนวนน้อยๆ ในน้ำเสียได้และไม่ต้องผ่านกรรมวิธีหลายขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างน้ำก่อนการวิเคราะห์ประกอบกับค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ไม่สูงมากนัก ดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์โดยทั่วไปมักนิยมใช้เทคนิคนี้กันมาก ความสามารถของเทคนิคนี้สูงมาก เพราะสามารถใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้ถึง 67 ธาตุ ทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

#### 2.6.1 หลักการ

นำน้ำตัวอย่างที่เตรียมในรูปของสารละลายมาดูด (Aspirate) เข้าไปในเปลวไฟ Air-Acetylene ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะทำให้สารละลายตัวอย่างเกิดกระบวนการแตกตัว (dissociation) หรือเปลี่ยนให้เป็นไอ (Vaporization)

หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม (Atomization) อยู่ที่สภาวะพื้น อะตอมที่สภาวะพื้นจะเปลี่ยนสถานะไปสู่สภาวะกระตุ้นโดยการดูดกลืนแสงที่ผ่านมาจากแหล่งกำเนิดภายนอก (Hollow Cathode Lamp) ที่ความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับของพลังงานแตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานแตกต่างกัน ซึ่งธาตุแต่ละตัวจะดูดกลืนแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นต่างกัน

สำหรับการวัดตัวอย่างการดูดกลืนแสงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของธาตุที่มีอยู่ในสารละลายตัวอย่าง ซึ่งความเข้มข้นของธาตุในสารละลายตัวอย่างจะหาได้โดยการวัดเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน (ชนัญชิตา, 2550)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่อง (Atomic Absorption Spectrometer)

(Acuity Education, 2012)

### 2.6.2 องค์ประกอบและคุณสมบัติ

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมมีองค์ประกอบหลัก คือ มีหลอดไฟกำเนิดแสง (light source) มีเปลวไฟซึ่งทำหน้าที่เหมือนคิวเวทท์ มีตัวแยกแสง (monochromator) มีภาคขยายสัญญาณและภาคแสดงผล แต่เพื่อให้การวัดปริมาณธาตุมีความถูกต้องสูง จึงจำเป็นต้องมีระบบไมโครโพรเซสเซอร์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบการวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่น ระบบควบคุมอัตราการขยายสัญญาณอัตโนมัติ (automatic gain control) ระบบแก้การรบกวนจากพื้นหลัง (background correction) และโปรแกรมคำนวณต่างๆ

1. หลอดไฟกำเนิดแสง เพื่อให้การวัดมีความไว (sensitivity) มากที่สุด หลอดไฟกำเนิดแสงที่ดีควรปล่อยคลื่นแสงจำเพาะที่มีความเข้มและแคบมากออกมาอย่างสม่ำเสมอ หลอดไฟกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติดังกล่าวและนิยมใช้ทั่วไปคือ

1.1 หลอดฮอลโลว์แคโทด (hollow cathode lamp) ซึ่งประกอบด้วย ขั้วบวก (anode) ที่ทำจากทังสเตนและขั้วลบ (cathode) ซึ่งประกอบด้วยธาตุเดี่ยวหรือธาตุผสม (เมื่อต้องการใช้หลอด 1 อันสำหรับวิเคราะห์หลายๆ ธาตุ) ชนิดเดียวกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ขั้วทั้งสองบรรจุอยู่ในกระบอกแก้วปิดที่มีแก๊สเฉื่อยซึ่งอาจเป็นแก๊สนีออน แก๊สอาร์กอนหรือแก๊สฮีเลียมมีความดันประมาณ 1 ถึง 5 ทอร์ เมื่อขั้วทั้งสองได้รับความต่างศักย์ประมาณ 200 ถึง 400 โวลต์ แก๊สเฉื่อยจะแตกตัวเป็นไอออน (ionization) และเกิดกระแสอิเล็กตรอนระหว่างขั้วทั้งสองประมาณ 5 ถึง 10 มิลลิแอมแปร์ ความต่างศักย์ที่สูงจะทำให้อะตอมของแก๊สที่มีประจุบวก (gaseous cation) วิ่งชนแคโทดทำให้เกิดกลุ่มอะตอม (atomic cloud) ในสถานะกระตุ้น (excited state) เมื่อพลังงานลดลงจะปล่อยคลื่นแสงที่มีความจำเพาะสำหรับแต่ละธาตุออกมา อะตอมส่วนใหญ่จะกลับไปเกาะที่แคโทดและส่วนน้อยเกาะที่ผิวแก้ว อายุการใช้งานของหลอดอยู่ในช่วง 100 ถึง 300 ชั่วโมง หลอดที่ขั้วลบทำด้วยธาตุที่ระเหยง่ายตัวอย่างเช่น Na, As, Sb, Bi, Mg, Pb มีอายุการใช้งานสั้นกว่าธาตุที่ระเหยยาก การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วหลอดจะทำให้แสงที่ปล่อยออกมามีความเข้มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มมากเกินไปจะเกิดอะตอมอิสระพลังงานต่ำมากขึ้น ทำให้ดูดกลืนแสงที่ปล่อยออกมาจากอะตอมพลังงานสูงไว้เอง (self absorption) เป็นผลให้ความเข้มของแสงจากหลอดไฟกำเนิดแสงลดลง หลอดฮอลโลว์แคโทดแบ่งเป็น 2 ชนิดตามชนิดของแคโทด คือ

1.1.1 หลอดชนิดธาตุเดี่ยว (single element lamp) เป็นหลอดชนิดที่ขั้วลบประกอบด้วยธาตุที่เหมือนกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์เพียงธาตุเดียว

1.1.2 หลอดชนิดหลายธาตุ (multiple element lamp) เป็นหลอดชนิดที่สามารถใช้วิเคราะห์ธาตุได้มากกว่า 1 ชนิด เนื่องจากขั้วลบมีธาตุเป็นองค์ประกอบมากกว่า 1 ชนิด ตัวอย่างเช่น ประกอบด้วย Ca/Mg, Na/K, Cu/Pb/Zn หรือ Co/Cr/Cu/Fe/Mn ซึ่งมีข้อดีที่ราคาของหลอดถูกกว่าการซื้อหลอดชนิดธาตุเดี่ยวหลายๆ หลอด แต่มีข้อเสียตรงที่อายุการใช้งานจริงของแต่ละธาตุที่เป็นองค์ประกอบของขั้วลบจะน้อยกว่าหลอดชนิดธาตุเดี่ยว เพราะมีการเสื่อมสลายตลอดเวลาที่ใช้วิเคราะห์ธาตุอื่น ใช้เวลาอุ่นหลอด (warm-up time) นานกว่าและให้แสงที่เข้มน้อยกว่าหลอดชนิดธาตุเดี่ยวและยังอาจมีการรบกวนทางแสงจากธาตุอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของขั้วลบ

1.2 หลอดคายอิเล็กโทรดเลสดีสชาร์จ (electrodeless discharge lamp, EDL) ภายในหลอดแก้วบรรจุไว้ด้วยเกลือของธาตุที่ต้องการวิเคราะห์และขดลวดเหนี่ยวนำ (RF coil) ซึ่งพันอยู่บนแท่งเซรามิก เมื่อขดลวดได้รับกระแสไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำจะทำให้เกลือของธาตุดังกล่าวกลายเป็นไอและแตกตัวเป็นไอออน ขณะที่พลังงานลดลงจะปล่อยแสงที่สว่างและมีความยาวคลื่นที่จำเพาะสำหรับแต่ละธาตุออกมา หลังจากนั้นความต่างศักย์จะลดลงอยู่ในระดับที่เพียงพอต่อการรักษาความคงที่ของการแตกตัวของไอของธาตุและความเข้มของแสง ความต่างศักย์ที่สูงขึ้นจะทำให้แสงมีเข้มขึ้น แต่ความกว้างของความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมาจะกว้างขึ้นเป็นผลให้ความไวในการวิเคราะห์ลดลง

2. หลอดไฟกำเนิดแสงอ้างอิง (Reference light source) นิยมใช้หลอดไฮโดรเจน (hydrogen lamp) ซึ่งปล่อยแสงช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 280 นาโนเมตรหรือใช้หลอดดิวทีเรียม (deuterium lamp) ที่ปล่อยแสงช่วงความยาวคลื่น 190 ถึง 325 นาโนเมตร สำหรับเป็นลำแสงอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเล็ตและใช้หลอดทังสเตนฮาโลเจนเป็นลำแสงอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ในช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็น (visible light) สัญญาณของลำแสงที่ผ่านอะตอมอิสระออกมาจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงอยู่ตลอดเวลาที่วัด

3. ตัวสร้างอะตอม (atomizer) เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ (free atom) โดยใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟหรือใช้กระแสไฟฟ้า

4. ช่องแสง (slit) ใช้สำหรับปรับความกว้างของลำแสง (band width) ที่ตกกระทบตัวไวแสง การวิเคราะห์โดยทั่วไปนิยมใช้ช่องแสงกว้าง (slit width) 0.7 นาโนเมตร การใช้ช่องแสงที่แคบลงจะช่วยลดการรบกวนจากความยาวคลื่นแสงข้างเคียงอื่นๆ ได้ แต่ความเข้มของแสงน้อยลงเป็นผลให้มีการตอบสนองของตัวไวแสงไม่ดีเท่าที่ควร แต่ถ้าใช้ช่องแสงกว้างมากเกินไปการรบกวนจากคลื่นแสงข้างเคียงจะมีมากขึ้นและขีดจำกัดการวิเคราะห์ช่วงต่ำลดลง

5. ตัวแยกแสง (monochromator) นิยมใช้เกรตติงแยกแสงหลายความยาวคลื่นที่ผ่านออกมาจากเปลวไฟให้กลายเป็นลำแสงสีเดียว (monochromatic light) ที่มีความยาวคลื่นที่ต้องการ

6. ตัวไวแสง (photo sensor) เป็นหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ทิวบ์ เนื่องจากมีอัตราการขยายสูง สามารถวัดความเข้มของแสงปริมาณน้อยๆ ได้ดี

7. ภาควงจรขยายสัญญาณ (amplifier circuit) อาจประกอบด้วยวงจรถยายแบบล็อก (log amplifier) เพื่อเปลี่ยนสัญญาณจาก %T ให้เป็น A และวงจรถยายความแตกต่างของสัญญาณ (differential amplifier) และวงจรถยายแบบเส้นตรง (linear amplifier)

8. ภาคแสดงผล (read out device) อาจประกอบด้วยตัวเลขแสดงผล (digital display) เครื่องพิมพ์ผล (printer) จอภาพ (monitor) และเครื่องบันทึกผล (recorder)

9. แผงควบคุม อาจประกอบด้วยปุ่มและสวิตช์ควบคุมต่างๆ

### 2.6.3 ชนิดของเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม

เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามหลักการวัด คือ

1. ชนิดลำแสงเดี่ยว (single beam type) ประกอบด้วย หลอดไฟกำเนิดแสง หลอดไฟกำเนิดแสงอ้างอิง ตัวเผา ช่องแสง ตัวแยกแสง ตัวไวแสง ภาคขยายสัญญาณและภาคแสดงผลโดยมีข้อดีและข้อเสียเช่นเดียวกับเครื่องวัดการดูดกลืนแสงชนิดลำแสงเดี่ยวลำแสงอ้างอิง (reference beam) จากหลอดคิวที่เรียมจะตกกระทบตัวไวแสงสลับกับลำแสงวัด (measurement beam) จากหลอดฮอลโลว์แคโทด โดยการทำงานของตัวตัดแสง (chopper) การเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสอง จะแก้ความไม่คงที่ของการดูดกลืนแสงที่ไม่จำเพาะของเปลวไฟได้ แต่ไม่สามารถแก้ความไม่คงที่ของความเข้มของแสงจากหลอดฮอลโลว์แคโทดได้

2. ชนิดลำแสงคู่ (double beam type) สร้างขึ้นมาเพื่อแก้ความไม่คงที่ของหลอดไฟกำเนิดแสงโดยการแยกแสงจากหลอดไฟกำเนิดแสงออกเป็น 2 ลำแสงด้วยตัวตัดแสง (chopper) ที่มีกระแงาคิดอยู่ ลำแสงหนึ่งจะไปตกกระทบตัวไวแสงโดยไม่ผ่านเปลวไฟ ส่วนอีกลำแสงหนึ่งผ่านเปลวไฟก่อนตกกระทบตัวไวแสง สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากแสงที่ผ่านเปลวไฟถูกขยายเปรียบเทียบกับสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากลำแสงอ้างอิงตลอดเวลา ดังนั้นจึงสามารถแก้ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากความไม่คงที่ของหลอดไฟกำเนิดแสงได้และอาจเพิ่มหลอดไฟกำเนิดแสงอ้างอิงได้ เช่นเดียวกับชนิดลำแสงเดี่ยวเพื่อช่วยแก้การดูดกลืนที่ไม่จำเพาะของเปลวไฟ (ชูชาติ, 2544)

### 2.6.4 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี AAS

เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุนั้นสามารถทำได้หลายวิธี คือ

1. ใช้ Flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ (flame) ที่เหมาะสม

2. ใช้ Flameless Technique หรือ Non-flame Atomization Technique เทคนิคนี้ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างสลายตัวเป็นอะตอมได้ด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (electrothermal atomizer หรือ graphite furnace) โดยสามารถตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิของการเผา มีค่าต่างๆ กันและใช้เวลาต่างๆ กันได้

3. ใช้ Hydride Generation Technique เนื่องจากมีธาตุบางชนิดจะเปลี่ยนให้เป็นอะตอมโดยตรงด้วยเทคนิค Flame Atomization Technique และ Flameless Technique ไม่ได้จำเป็นต้องใช้วิธีทำให้แตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจนของธาตุเหล่านี้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านี้กลายเป็นไอได้ง่ายๆ ที่อุณหภูมิห้องด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ความร้อนจากเปลวไฟไฮโดรเจนทำให้ธาตุกลายเป็นอะตอมเสรีได้ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุ As, Se, Te, Ge, Bi, Sb

4. ใช้ Cold Vapor Generation Technique สำหรับเทคนิคนี้เหมาะที่จะใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่ายๆ ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์ปรอทที่มีปริมาณน้อย โดยเฉพาะองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ 5 ส่วน

1. แหล่งกำเนิดแสง (light source) ส่วนใหญ่เป็น hallow cathode lamp (HCL) และ eletrodeless discharge lamp (EDL) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น
2. ส่วนที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระ (atomizer unit) เป็นส่วนที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟหรือไฟฟ้า เป็นต้น
3. ส่วนแยกแสง (monochormator) เป็นส่วนที่ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ อาจเป็นแผ่นกรองแสง (filter) เกรตติง (grating) หรือปริซึม (prism)
4. ส่วนวัดสัญญาณ (detector) ส่วนใหญ่เป็นหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier tube) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า
5. ส่วนประมวลผลและอ่านผล (data system and readout unit) ทำหน้าที่แปลสัญญาณที่ได้รับจากส่วนวัดสัญญาณให้เป็นข้อมูลสื่อให้ผู้ใช้งานเข้าใจ

#### 2.6.5 กระบวนการทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยเปลวไฟ (Flame Atomization)

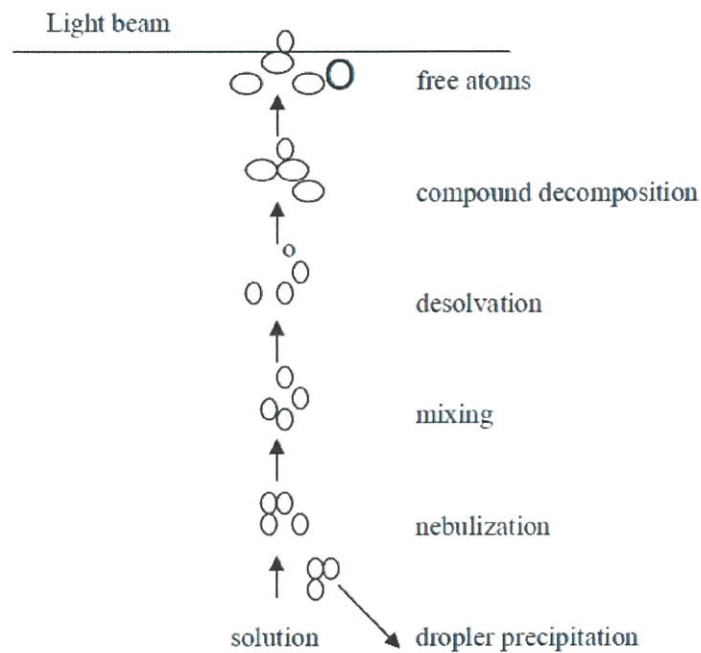
กระบวนการนี้สารตัวอย่างจะต้องเป็นสารละลายที่เข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน ไม่มีสารแขวนลอยอยู่ ตัวทำละลายจะเป็นน้ำหรือสารอินทรีย์ก็ได้กระบวนการ atomization มี 5 ขั้นตอนคือ

1. Nebulization เป็นกระบวนการที่เปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็กๆ (mist) ด้วยเครื่องเรียกว่า nebulizer
2. Droplet precipitation เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆ ของสารละลายรวมกันเป็นหยดสารละลายโต ไม่สามารถจะลอยอยู่ในอากาศได้ จึงตกลงมาแล้วออกไปทางท่อน้ำทิ้ง (drain)

3. Mixing เป็นกระบวนการที่ละอองเล็กๆ ของสารละลายเกิดผสมกับแก๊สเชื้อเพลิง (fuel) และออกซิเจนใน spray chamber ของ nebulizer

4. Desolvation เป็นกระบวนการที่ตัวทำละลายที่อยู่ในละอองเล็กนั้นถูกกำจัดไปทำให้เกิดเป็นอนุภาคเล็กๆ ของสารประกอบ กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นตอนล่างของเปลวไฟ

5. Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟ โดยที่พลังงานความร้อนจากเปลวไฟจะไปทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นออกไซด์เป็น โมเลกุลและเป็นอะตอม เสร็จบางครั้งอาจเกิดการกระตุ้นหรือเกิดการไอออไนเซชันต่อไปได้



รูปที่ 2.9 Flame Atomization process (ชนัญชิตา, 2550)

### 2.6.6 ขั้นตอนของการทำวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS

1. เตรียมสารตัวอย่างให้อยู่ในรูปสารละลายที่เหมาะสมและพร้อมที่จะใช้กับเครื่อง AAS

2. พิจารณาว่าจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาอะไรและเลือกวิธีการที่เหมาะสมทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์

3. จัดเครื่องมือให้พร้อมที่จะทำงานได้ เช่น คอมพิวเตอร์ ไมโครโพรเซสเซอร์ควบคุม มี software ที่เก็บข้อมูลของธาตุแต่ละชนิดไว้แล้ว เป็นเสมือน cook book ให้ผู้วิเคราะห์สามารถเลือกให้ได้ ซึ่งมี

ก. เลือก HCL ของธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ใส่เข้าไปในเครื่องและเลือกกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้

ข. จัดเครื่องให้มีสภาพที่เหมาะสมกับเทคนิคที่ใช้ เช่น ใช้ Flame หรือ flameless atomization การปรับอัตราการไหลของออกซิเจนที่ อากาศและเชื้อเพลิง เป็นต้น

ค. จัดความกว้างของช่องแสงเข้าออกจากโมโนโครเมเตอร์ (slit width) ให้เหมาะสม

#### 4. เลือกโปรแกรมการวัดผล การคำนวณ ตลอดจนการรายงานผลวิเคราะห์

#### 2.6.7 ผลกระทบของสิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์ (Interference Effects)

ถึงแม้ว่าเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างเฉพาะมาก ทั้งแหล่งกำเนิดและการดูดกลืนแสง แต่ก็มีโอกาสที่สเปกตรัมของธาตุอื่นที่ปนอยู่มารบกวนได้ทำให้ค่า absorbance วัดได้มากหรือน้อยกว่าปกติ สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลวิเคราะห์ผิดพลาดได้ ดังนั้นผู้วิเคราะห์ควรศึกษาก่อนว่า สารตัวอย่างเป็นอะไร จะละลายด้วยอะไร มีองค์ประกอบอะไรบ้างและจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะไร สิ่งเหล่านี้จะช่วยทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดพลาดน้อยที่สุด สิ่งรบกวนสามารถจำแนกได้ ดังนี้

1. Physical effects เป็นผลเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของสารละลายที่จะวิเคราะห์ซึ่งไปเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของสารละลายเข้าไปใน nebulizer ขนาดของหยดสารละลาย (drop size) ได้แก่ volatility ของตัวสารละลาย surface tension, viscosity ซึ่งสามารถแก้ไขได้คือ ทำให้อัตราการไหลช้าลง หรือเติม organic solvents หรือเตรียมสารละลายให้มี matrix อย่างเดียวกับสารตัวอย่าง

2. Chemical effects ได้แก่ แอนไอออน เช่น ฟอสเฟต, ซัลเฟต, อะลูมิเนียม, ซิลิกเกตหรือแอนไอออนที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบบางตัวทำให้ผลการหาปริมาณของพวก alkaline earth metals ได้น้อยกว่าปกติ เมื่อใช้ air-CH flame หรือ flame temperature ต่ำ เพราะมีการเกิดสารประกอบที่อยู่ตัวบางชนิดเรียกว่า refractory compound จึงทำให้การแตกตัวเป็นอะตอมของธาตุที่จะวิเคราะห์น้อยกว่าที่ควรจะเป็น

#### 2.6.8 การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค AAS นั้นอาจทำได้หลายวิธี แต่ละเทคนิคมีข้อดีข้อเสียและการใช้งานแตกต่างกันและอาจกล่าวได้ว่า กระบวนการทำให้สารเกิด atomization ไม่มีวิธีไหนเลยที่จัดว่าดีที่สุดดังนั้นห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ต้องเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการ โดยคำนึงถึงองค์ประกอบหลายๆ อย่าง เช่น ความรวดเร็วของการวิเคราะห์ ความยากง่าย ความเข้มข้น สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารที่จะวิเคราะห์ ตลอดจนทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งแต่ละเทคนิคมีหลักการทั่วไปดังนี้

### 1. Flame Techniques

เทคนิคนี้ใช้ Flame ทำให้เกิด atomization โดยทั่วไปแล้วเป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างกว้างขวางสารตัวอย่างควรจะต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้

- 1.1 สารตัวอย่างต้องเป็นสารละลายหรือของเหลว
- 1.2 สารตัวอย่างควรมีสารที่เป็นของแข็งละลายอยู่ไม่เกิน 5% มิฉะนั้นจะมีผลต่อการเกิด atomization
- 1.3 สารตัวอย่างควรจะสลายตัวได้ดีด้วยความร้อน
- 1.4 ควรมีความเข้มข้นอยู่ในช่วงที่เหมาะสม
- 1.5 สารละลายตัวอย่างจะต้องมีอย่างน้อย 1 mL.

เทคนิคนี้ผู้วิเคราะห์ไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญมากนัก ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่อยู่ที่การเตรียมสารตัวอย่างให้เป็นสารละลาย มีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง

### 2. Graphite Furnace

สารตัวอย่างที่จะใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ควรมีลักษณะดังนี้

- 2.1 สารตัวอย่างอาจเป็นของแข็งหรือของเหลวหรือของแข็งละลายในของเหลวซึ่งถ้าละลายเป็นเนื้อเดียวกันก็ยิ่งดี
- 2.2 สารตัวอย่างต้องสลายตัวด้วยความร้อนและทำให้สารเจือปนกับสารที่จะวิเคราะห์แยกออกจากกันได้
- 2.3 ควรจะต้องมีช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสม
- 2.4 สารตัวอย่างและสารมาตรฐานควรจะเปรียบเทียบกันได้
- 2.5 ปริมาตรของสารตัวอย่างที่ต้องใช้อาจเป็น 0.5  $\mu$ L.
- 2.6 วิธีนี้ให้ความแม่นยำและ sensitivity ในการวิเคราะห์ดี แต่ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องมีประสบการณ์และความชำนาญพอสมควร อัตราค่าวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ต้องใช้ graphite tube และเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์

### 3. Vapor Generation Techniques

สำหรับเทคนิคนี้จำเป็นต้องทำสารตัวอย่างให้มีลักษณะ ดังต่อไปนี้

- 3.1 สารตัวอย่างจำเป็นต้องย่อยให้อยู่ในสภาพที่เป็นกรดและมี oxidation state ที่เหมาะสม
- 3.2 ใช้วิเคราะห์ได้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น
- 3.3 ควรจะต้องปราศจากสิ่งรบกวนทางเคมี
- 3.4 ช่วงความเข้มข้นจะต้องพอเหมาะ
- 3.5 เป็นเทคนิคที่ให้ sensitivity สูงสำหรับธาตุที่สามารถวิเคราะห์ได้
- 3.6 ค่าใช้จ่ายขึ้นอยู่กับสารเคมีและเวลาที่ใช้ (ชนัญชิตา, 2550)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wing (1996) เส้นใยข้าวโพดได้ตอบสนองต่อปฏิกิริยาทางความร้อนกับกรดซิตริก (CA) ซึ่งอาจให้ผลผลิตผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ปฏิกิริยาตัวแปรที่ศึกษา พบว่า ระดับกรดซิตริก (0 ถึง 100 กรัม) เวลาปฏิกิริยา (0 ถึง 24 ชั่วโมง) pH (1.5 ถึง 8.3) และอุณหภูมิ (110 ถึง 140° C) ความชื้นและค่า pH ถูกพบว่าเป็นปัจจัยที่ถูกควบคุม ปฏิกิริยาประสิทธิภาพใกล้ 100% ได้รับความสำเร็จในขณะที่เกิดการเชื่อมโยงและการเพิ่มปริมาณ carboxyl กำลังการผลิตปริมาณ carboxyl (0.5 ถึง 3.6 mmol/g) และทองแดงถูกดูดซับ (0.1 ถึง 2.0 mmol/g) ที่ pH 4.5 สำหรับผลิตภัณฑ์เส้นใยข้าวโพดที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

Marshall and Wartelle (2000) ศึกษาการดูดซับโลหะทองแดงโดยใช้กรดซิตริกปรับปรุง วัสดุเหลือทิ้งจากเกษตร 12 ชนิด โดยสกัดด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และปรับปรุงด้วยกรดซิตริก จากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) จากสารละลาย พบว่า จากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรทั้งหมด 12 ชนิด เปลือกถั่วเหลืองสามารถดูดซับได้สูงที่สุด 1.44 มิลลิโมลต่อกรัม (mmol/g) และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีความหนาแน่นมากกว่า 0.6 กรัม ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ ) คือ ถั่วพีแคน (Pecan), วอลนัทดำ (Black Walnut) และ English Walnut จะมีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงได้ดี ส่วนวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีปริมาณของลิกนินน้อย หลังจากทำการปรับปรุงสภาพด้วยกรดซิตริกจะทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนมากขึ้นและพบว่า ปริมาณของลิกนินจะมีความสัมพันธ์แปรผกผันกับจำนวนของประจุลบที่เกิดขึ้น

หฤทัย (2547) ศึกษาการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์-รีฟิเคชันกับกรดซิตริก เพื่อใช้เป็นการแลกเปลี่ยนประจุโลหะชนิดบวกในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาของกากมันสำปะหลัง ได้แก่ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของกรดซิตริกและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาและทำการวิเคราะห์คุณสมบัติของกากมันสำปะหลังปรับปรุง ได้แก่ ปริมาณหมู่คาร์บอกซิลและความสามารถในการดูดซับประจุโลหะ โดยใช้ประจุแคลเซียมเป็นตัวแทนประจุโลหะชนิดบวก พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชัน คือ ใช้กรดซิตริกปริมาณ 1.25 กรัมต่อกรัมมัน

สำปะหลังแห้งทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จะได้กากมันสำปะหลังปรับสภาพที่มีปริมาณหมู่คาร์บอกซิลและมีความสามารถในการดูดซับประจุแคลเซียมเท่ากับ 3.91 และ 1.43 มิลลิโมลต่อกรัมกากมันสำปะหลังแห้งตามลำดับ

Zhu *et.al.* (2008) ศึกษาการดัดแปลงฟางถั่วเหลืองเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะหนักและนอกจากนี้ยังใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวดูดซับกำจัด  $\text{Cu}^{2+}$  ออกจากสารละลายฟางถั่วเหลืองที่ล้างด้วยน้ำหรือสารละลายด่างและปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดซับ คุณสมบัติทั้งทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับสามารถพิจารณาได้โดยใช้ Spectroscopy และเทคนิคการดูดซับไนโตรเจน โครงสร้างที่เป็นรูปพหุรวมถึงหมู่ carboxylic อิสระจำนวนมากในฟางถั่วเหลืองที่ปรับปรุงแล้ว ทำให้ตัวดูดซับรักษาปริมาณของ  $\text{Cu}^{2+}$  ไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 2 ไปจนถึง 6 และสูงสุดที่ pH 6 ปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  เพิ่มขึ้นและเปอร์เซ็นต์การดูดซับของ  $\text{Cu}^{2+}$  ลดลง เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของปริมาณ  $\text{Cu}^{2+}$  จาก 1 mM ถึง 20 mM ทั้งนี้ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir และ Freundlich พบว่า การดูดซับแบบ Freundlich ให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าโดยฟางถั่วเหลืองที่แช่เบสและปรับปรุงด้วยกรดซิตริกมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดจากลักษณะฟางถั่วเหลืองทุกรูปแบบ

Cao *et.al.* (2009) เซลลูโลสในเปลือกส้มเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพที่ถูกเตรียมเป็นพิเศษ โดยทำการปรับปรุงทางเคมีด้วยวิธีที่หลากหลาย เพื่อให้เข้าใจถึงกลไกการดูดซับทองแดงออกจากสารละลายคลอไรด์ ซึ่งตัวดูดซับทางชีวภาพต่างๆ รวมถึงเปลือกส้มดิบจะถูกใช้ในการวิเคราะห์หาธาตุที่เป็นองค์ประกอบด้วยเครื่อง FTIR การวัด pH ของการดูดซับ, อิทธิพลของ pH, ระยะเวลาสัมผัส, ความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงและอัตราส่วนของของแข็งกับของเหลวในการทดสอบการกำจัดทองแดง ซึ่งค่าการดูดซับสูงสุดของทองแดงอยู่ที่ 1.22 mol/kg โดยใช้เปลือกส้มโอที่ผ่านการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริก 0.6 mol/L ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากทำปฏิกิริยา Sponification กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 mol/L และเปรียบเทียบรูปแบบของไอโซเทอมที่แตกต่างกัน จะเห็นว่า การนำไอโซเทอมของ Langmuir และ Freundlich มาใช้ร่วมกันจะได้ข้อมูลการทดลองที่ดีที่สุด ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า การปรับปรุง

เซลลูโลสในเปลือกส้มด้วยวิธีทางเคมีให้ประสิทธิภาพและเป็นเทคโนโลยีที่คุ้มค่าสำหรับการกำจัดทองแดงออกจากสารละลาย

Nguyen and Nhung (2009) ศึกษาการปรับปรุงเซลลูโลสด้วยกรดซิดริกที่อุณหภูมิสูงเพื่อใช้ในการทดลองดูดซับโลหะหนัก เช่น  $Pb^{2+}$  และ  $Cd^{2+}$  เป็นต้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเซลลูโลสที่ปรับปรุงที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}C$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมงและมีมวลเซลลูโลสต่อกรดซิดริกเท่ากับ 1:3 จะมีค่าการดูดซับสูงสุดโดยค่าการดูดซับของเซลลูโลสที่ปรับปรุงจะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มความเข้มข้นของไอออนในตัวดูดซับ

อรพิน (2553) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบ Batch และแปรผันค่า pH ที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ระยะเวลาการปั่นกววนที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ระยะเวลาการสัมผัสที่ 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ปริมาณกากชาที่ 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 กรัมและความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 25, 50, 75, 100, 150, 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่ pH 5 ระยะเวลาในการปั่นกววน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 120 นาที สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดของทองแดงคือที่ pH 6 ระยะเวลาในการปั่นกววน 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของกากชาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้นและถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง

Guo *et.al.* (2011) ศึกษาการดูดซับ  $Pb^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  ออกจากสารละลายโดยใช้ sulfured orange peel (MOP) เป็นตัวดูดซับ มีการศึกษาผลของค่า pH, ระยะเวลาสัมผัสและความเข้มข้นของโลหะหนักในการทดลองแบบ Batch จลนศาสตร์ของการดูดซับทั้ง  $Pb^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ pseudo-second-order equation ความสามารถสูงสุดในการดูดซับจากสมการ Langmuir ของการกำจัด  $Pb^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  โดย sulfured orange peel อยู่ที่ 164 mg/g และ 80 mg/g ตามลำดับ สารละลายผสมของ  $Pb^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  ได้ศึกษาโดยการ packed column เพื่อให้เห็นประสิทธิภาพของการแยกและความเข้มข้นเริ่มต้นของ  $Pb^{2+}$  ที่ต่างจาก  $Zn^{2+}$  โดยใช้ sulfured orange peel (MOP) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ตัวดูดซับนี้มีประสิทธิภาพและมีต้นทุนที่ต่ำและสามารถแยก  $Pb^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  ออกจากสารละลายได้

## บทที่ 3

# วิธีการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1.1 สารเคมี

1. คอปเปอร์(II)ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) A.R. Grade (บริษัท Carlo Erba, USA)
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) A.R. Grade (บริษัท Carlo Erba, USA)
3. กรดซिटริก ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_8$ ) A.R. Grade (บริษัท Carlo Erba, USA)
4. กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) A.R. Grade (บริษัท Italmar, Italy)
5. เลด (II) ไนเตรต ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) A.R. Grade (บริษัท APS Ajax Finechem, USA)

#### 3.1.2 วัสดุและอุปกรณ์

1. บีกเกอร์
2. ปิเปต
3. ลูกยาง
4. กระจกตวง
5. ขวดวัดปริมาตร
6. กรวยแก้ว
7. หลอดหยด
8. แท่งแก้วคนสาร
9. ช้อนตักสาร
10. ขวดพลาสติก
11. ขวดรูปชมพู
12. ตะแกรงร่อน ขนาด 50 เมช ASTM E 11 บริษัท Endecotts Ltd. London England
13. ชุดกรองลดความดัน ประเทศ Germany
14. อลูมิเนียมฟรอยด์
15. ถาดอลูมิเนียม

16. พาราฟิล์ม

17. กระดาษกรอง Whatman (เบอร์ 2, 42) ยี่ห้อ Mancherey Nagel ประเทศ Germany

18. filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

19. ฟางข้าว

### 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น AAnalyst 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer

2. pH meter ยี่ห้อ Metrohm รุ่น 827

3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Sartorius รุ่น E02245

4. เครื่องเขย่า (Shaking machine) ยี่ห้อ Gallenkamp รุ่น Orbital shaker

5. เดซิเคเตอร์

6. เครื่องกรองลดความดัน ยี่ห้อ EYELA (Tokyo rikakikai co.,ltd.) รุ่น Aspirator A-35

7. ตู้อบสาร (Oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UM400 ประเทศ Germany

### 3.2 การเตรียมฟางข้าว

1. นำฟางข้าวมาตัดรากและใบออก แล้วนำมาตัดเป็นท่อนๆ ท่อนละ 10 เซนติเมตร และล้างด้วยน้ำเพื่อเอาเศษดินออก

2. นำไปอบแห้งในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

3. นำมาบดและกรองผ่านตะแกรง ขนาด 50 เมช ให้มีขนาดประมาณ 0.30 มิลลิเมตร

4. ชั่งน้ำหนักฟางข้าวที่ผ่านการบดและกรองมา 5 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วนำมาเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 M ปริมาตร 100 มิลลิลิตร

5. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

6. นำสารละลายมากรองลดความดัน โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 2 แล้วล้างด้วยน้ำกลั่นจนแน่ใจว่าไม่มีเบสเหลืออยู่ ซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยการหยดสารละลายฟีนอล์ฟทาลีน

7. นำฟางข้าวไปอบให้แห้งในตู้อบที่มีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

8. นำมาทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์

### 3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของทองแดงที่มีความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

1. ปิเปตสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟตเพนตะไฮเดรต ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) จาก stock เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร
2. เติมกรดไนตริกเจือจาง 20% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เพื่อรักษาสภาพสารละลายไม่ให้ถูกดูดซับจากภาชนะบรรจุและป้องกันการตกตะกอนของน้ำเสียสังเคราะห์
3. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีด จะได้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของทองแดง 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก

##### 3.4.1.1 การศึกษาความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เหมาะสม

1. ชั่งฟางข้าวที่ผ่านการแช่ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ใส่บีกเกอร์ ขนาด 30 มิลลิลิตร จำนวน 5 ขวด (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)
2. เติมกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เท่ากันทุกขวด ตามลำดับ แล้วปิดผนึกด้วยพาราฟิล์ม
3. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกไปทำให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาให้ทำการเพิ่มอุณหภูมิในเตาอบเป็น 120 องศาเซลเซียส และอบต่ออีก 90 นาที
5. นำฟางข้าวที่ผ่านการอบมาทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
6. นำฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยสารละลายกรดซิตริกมาล้างด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 300 มิลลิลิตร เพื่อล้างเอากรดซิตริกส่วนเกินออก โดยทดสอบการตกตะกอนกับสารละลายเลด (II) ไนเตรต ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ อัตราส่วนสารละลายกับ  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  เท่ากับ 10 : 10 มิลลิลิตร
7. นำฟางข้าวไปอบให้แห้งในตู้อบอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาทำให้เย็นในเดซิเคเตอร์
8. ชั่งฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริก 0.5 กรัม ใส่ในขวดชมพูพลาสติก ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

9. ปิเปตสารละลาย ( $\text{Cu}^{2+}$ ) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกที่มีฟางข้าว โดยปรับ pH เท่ากับ 6 ก่อน

10. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที

11. นำสารละลายมากรองลดความคั้นด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วกรองซ้ำด้วย filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

12. เก็บสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

13. นำฟางข้าวที่ผ่านการแช่ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกมาดูดซับสารละลายไอออนทองแดงเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มี pH เท่ากับ 6 เพื่อทำเป็นชุดควบคุม

#### 3.4.1.2 การศึกษาผลของระยะเวลาการสัมผัส

ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3.4.1.1 โดยใช้ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS แต่แปรผันระยะเวลาการสัมผัสของฟางข้าวกับกรดซัลฟิวริกเป็น 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

#### 3.4.1.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิ

ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3.4.1.2 โดยใช้ความเข้มข้นและระยะเวลาการสัมผัสของฟางข้าวกับกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม แต่แปรผันการเพิ่มอุณหภูมิในเตาอบเป็น 30, 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียสและอบต่ออีก 90 นาที (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

#### 3.4.1.4 การศึกษาผลของเวลาในการอบตัวดูดซับ

ทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3.4.1.3 โดยใช้ความเข้มข้นช่วงระยะเวลาการสัมผัสของฟางข้าวกับกรดซัลฟิวริกและอุณหภูมิในการอบฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกที่เหมาะสม แต่แปรผันระยะเวลาในการเพิ่มอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปรับปรุงเป็น 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

### 3.4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ

#### 3.4.2.1 การศึกษา pH ที่เหมาะสม

1. ชั่งฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกในสภาวะที่เหมาะสม 0.5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่พลาสติก ขนาด 250 มิลลิลิตร (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

2. ปิเปตสารละลาย ( $\text{Cu}^{2+}$ ) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่พลาสติกที่มีฟางข้าว โดยแปรผัน pH เป็น 3, 4, 5, 6 และ 7 ก่อน

3. นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที

4. กรองสารละลายด้วยเครื่องกรองลดความดันผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 แล้วกรองซ้ำด้วย filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร

5. เก็บสารละลายที่กรองได้ใส่ขวดพลาสติกเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

#### 3.4.2.2 การศึกษาผลของระยะเวลาการดูดซับ

ทำการทดลองซ้ำเหมือนกับข้อ 3.4.2.1 โดยใช้ค่า pH ที่เหมาะสม แต่เปลี่ยนระยะเวลาในการสัมผัสเป็น 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

#### 3.4.3 การศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

นำฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกมาดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดงเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยเลือกค่า pH และระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสม เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริก (ทำซ้ำ 3 ครั้ง)

## บทที่ 4

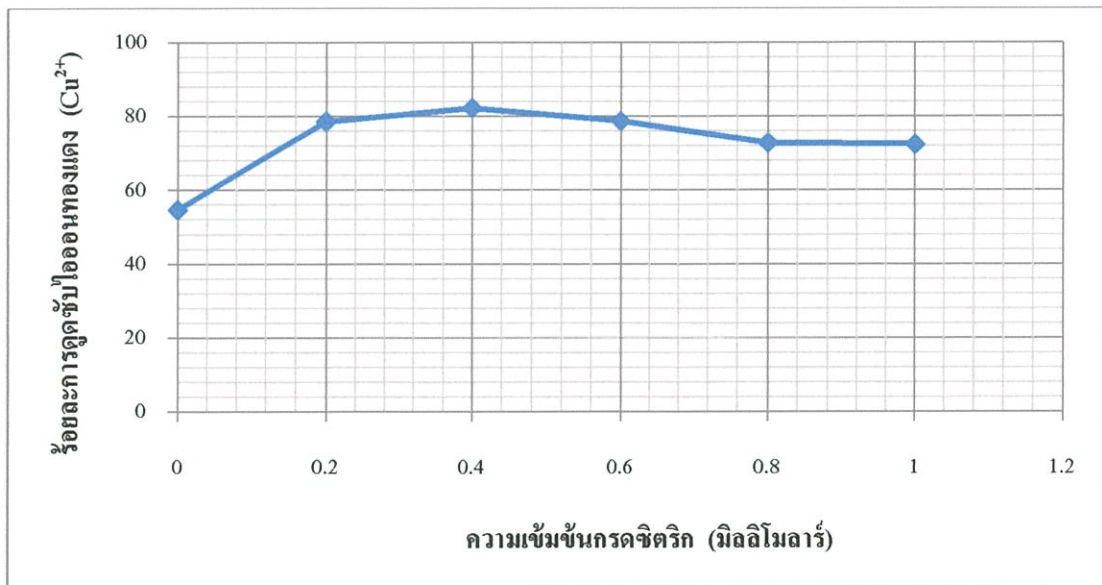
### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การทดลองนี้เป็นการศึกษาการนำของเกลือทิ้งทางการเกษตรคือ ฟางข้าวซึ่งได้นำมาปรับปรุงโครงสร้างด้วยกรดซิตริก เพื่อใช้ดูดซับ ไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ทั้งนี้ การปรับปรุงฟางข้าวคัดแปลงมาจากวิธีของ (Marshall and Wartelle, 2000) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับและศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

#### 4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก

##### 4.1.1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เหมาะสม

ในการศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวโดยการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นปรับปรุงต่อด้วยกรดซิตริก โดยแปรผันความเข้มข้นดังนี้คือ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิโมลาร์ แล้วนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับ pH เท่ากับ 6 และระยะเวลาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 60 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1

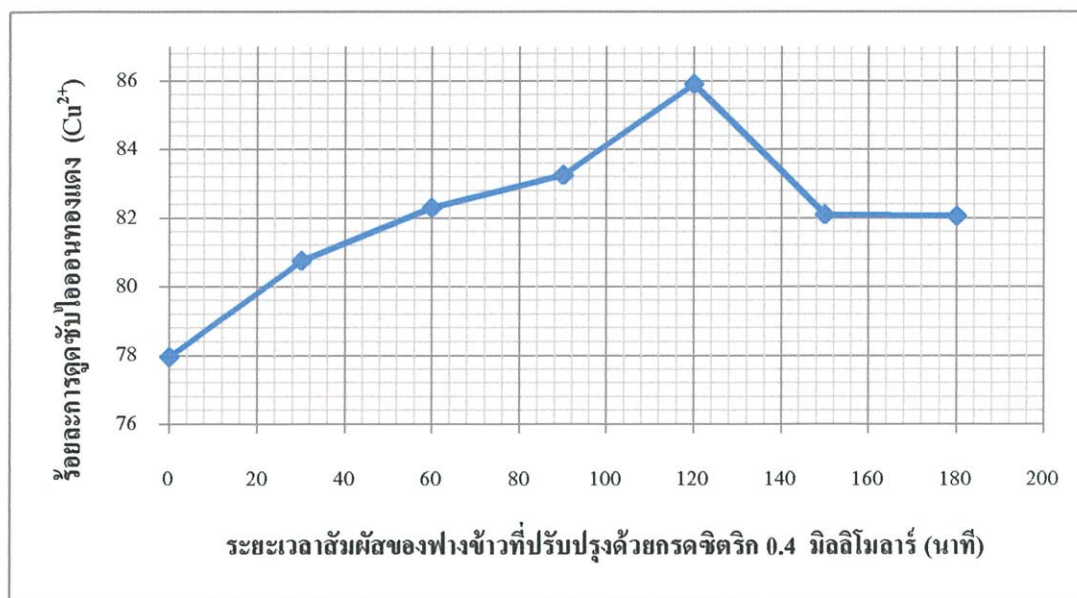


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซิตริก (มิลลิโมลาร์) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ฟางข้าวที่แช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ซึ่งไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกจะมีประสิทธิภาพการดูดซับเพียงร้อยละ 54.83 เนื่องจากการแช่ด้วยเบส เป็นการกำจัดสารประกอบที่อยู่ในโครงสร้างของฟางข้าวที่จะขัดขวางต่อการทำปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซัลฟิวริก (ศศิธร, 2551) หลังจากนั้นนำฟางข้าวที่แช่ด้วยเบสมาปรับปรุงต่อด้วยกรดซัลฟิวริกมีความเข้มข้นเริ่มต้น 0.2 มิลลิโมลาร์ กราฟมีลักษณะชันขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 78.69 ซึ่งมีร้อยละการดูดซับต่างกันถึง 23.86 จะเห็นได้ว่า กรดซัลฟิวริกมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของฟางข้าว เพราะการปรับสภาพด้วยกรดซัลฟิวริกเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของฟางข้าวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก โดยกรดซัลฟิวริกจะเข้าไปเติมหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group : COOH) ให้กับโครงสร้างของฟางข้าว ซึ่งทำให้ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการดักจับไอออนทองแดงได้มากขึ้น (ศศิธร, 2551) หลังจากนั้นกราฟจะสูงขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงและมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดถึงร้อยละ 82.31 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกเป็น 0.6 มิลลิโมลาร์จนถึง 1 มิลลิโมลาร์ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับลดลงและมีแนวโน้มคงที่อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากระดับความเข้มข้นที่สูงเกินกว่า 0.4 มิลลิโมลาร์ เป็นจุดที่เกินสมดุลในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างกรดซัลฟิวริกกับเซลลูโลสในฟางข้าว ซึ่งกรดซัลฟิวริกส่วนเกินเหล่านี้จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการล้างด้วยน้ำกลั่นหลังผ่านการปรับปรุงฟางข้าวก่อนที่จะนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ โดยผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาการดัดแปลงฟางถั่วเหลืองเพื่อใช้เป็นตัวดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสีย (Zhu *et al.*, 2008)

#### 4.1.2 ผลการศึกษาช่วงระยะเวลาการสัมผัส

ในการศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวโดยการแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นปรับปรุงต่อด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ โดยแปรผันระยะเวลาสัมผัสระหว่างฟางข้าวกับกรดซัลฟิวริก โดยให้ฟางข้าวมีระยะเวลาสัมผัสกับกรดซัลฟิวริกเป็น 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที จากนั้นนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 6 และมีระยะเวลาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 60 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2

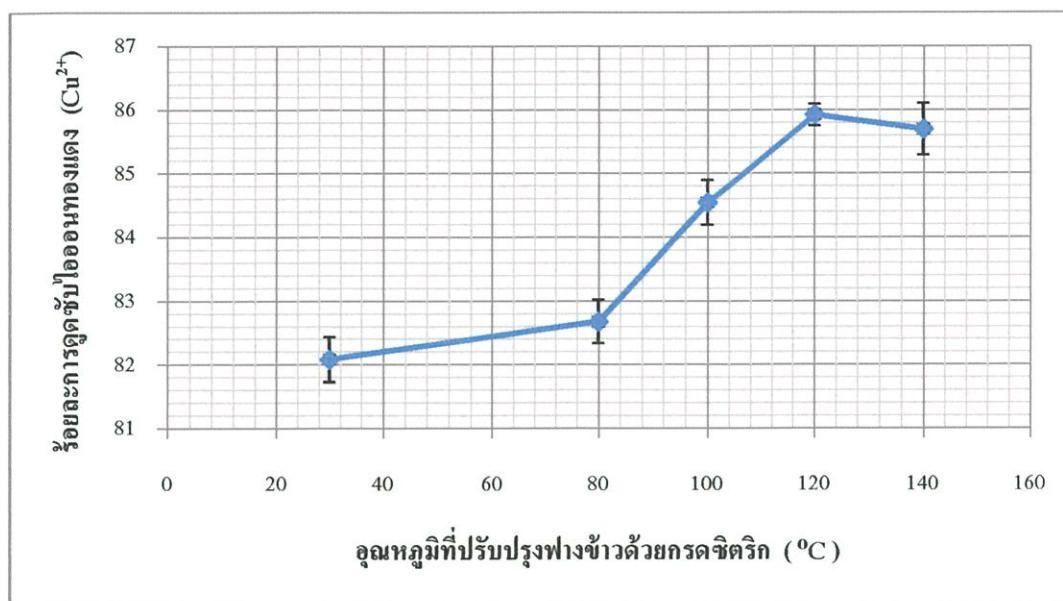


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ฟางข้าวสัมผัสกับกรดซิตริกเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ (นาทีก) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง (Cu<sup>2+</sup>)

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสจาก 0 นาทีไปถึง 120 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับจะสูงขึ้นเรื่อยๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และที่เวลา 120 นาทีเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดงสูงถึงร้อยละ 85.93 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาจลนศาสตร์และสมดุลของการดูดซับทองแดง (Cu<sup>2+</sup>) ด้วยการปรับปรุงทางเคมีของเซลลูโลสในเปลือกส้มที่ใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ (Cao *et al.*, 2011) หลังจากนั้นประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลงและคงที่อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่เวลา 180 นาที

#### 4.1.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิ

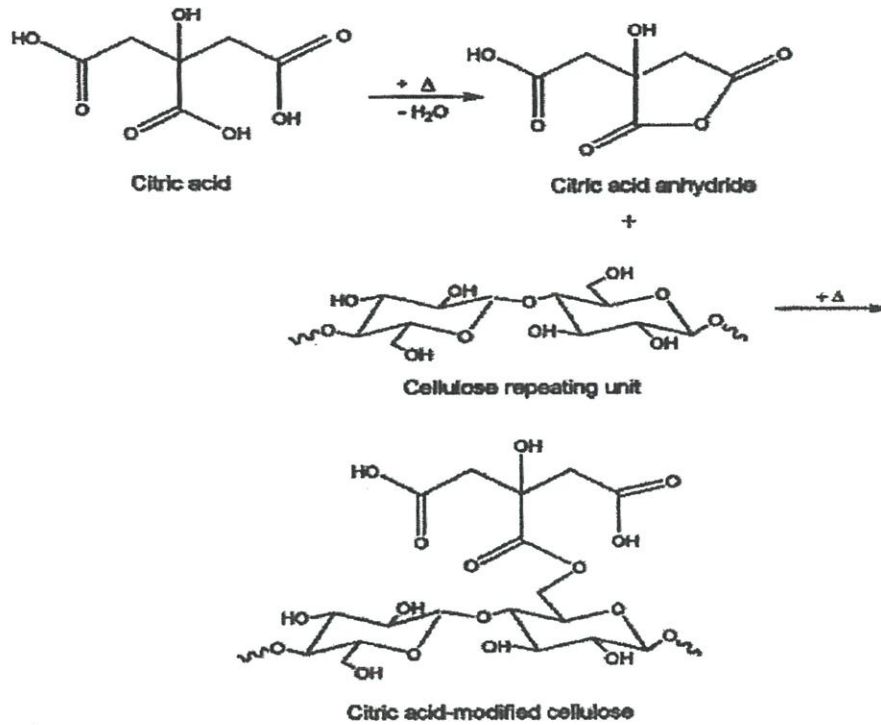
การศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวโดยแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์และปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ มีระยะเวลาสัมผัส 120 นาที จากนั้นได้แปรผันอุณหภูมิในการอบฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเป็น 30, 80, 100, 120 และ 140 องศาเซลเซียส แล้วนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 6 และระยะเวลาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 60 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก (°C) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง (Cu<sup>2+</sup>)

จากรูปที่ 4.3 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ไปเป็นอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 80 องศาเซลเซียสไปถึง 120 องศาเซลเซียส ความชันของกราฟจะมากขึ้นแสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับที่เพิ่มขึ้นมากและสูงสุดที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงถึงร้อยละ 85.93 เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา Esterification คือ 120 องศาเซลเซียส (Thanh and Nhung, 2009) หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 120 องศาเซลเซียสเป็น 140 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้เมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูงมากๆ จะมีผลกับพันธะ Crosslinking ที่ทำให้หมู่คาร์บอกซิลลดลง ความสามารถในการดูดซับไอออนจึงลดลงตามไปด้วย (Wing, 1996)

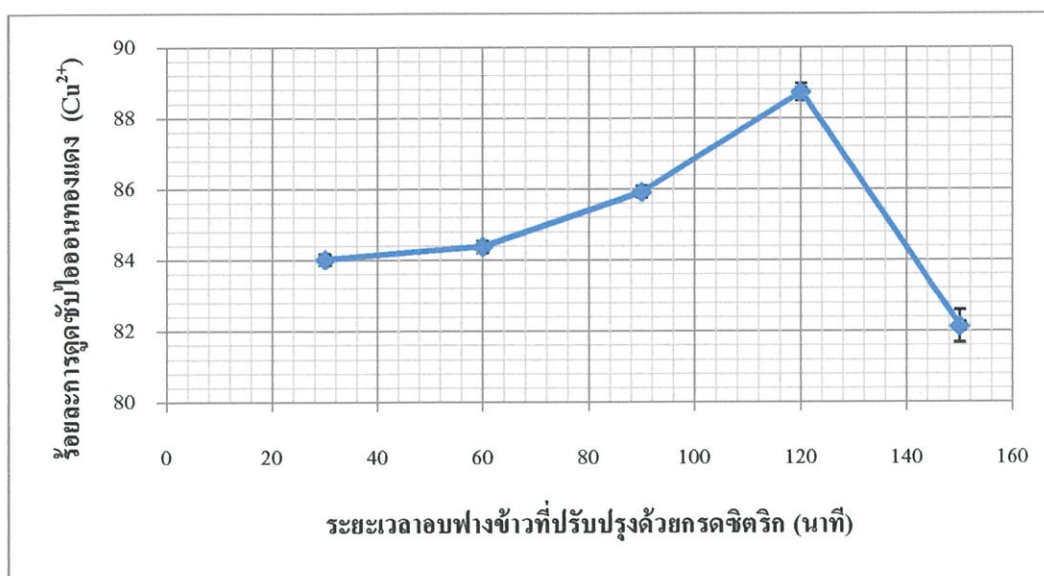
ในรูปที่ 4.4 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสกับกรดซิตริก เมื่อกรดซิตริกได้รับความร้อนจะเกิดปฏิกิริยาสูญเสียน้ำกลายเป็นซิตริกแอนไฮไดรด์ซึ่งจะขาดอิเล็กตรอนทำให้อยู่ในสถานะที่ไม่เสถียร จึงสามารถรับอิเล็กตรอนจากหมู่ไฮดรอกซิลของฟางข้าวได้ ทำให้เกิดพันธะเอสเทอร์ขึ้น ได้ฟางข้าวที่เป็นอนุพันธ์ของกรดซิตริกที่มีหมู่คาร์บอกซิลอิสระซึ่งสามารถดูดซับประจุของไอออนโลหะได้



รูปที่ 4.4 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างเซลลูโลสและกรดซิตริกในกระบวนการปรับปรุงฟางข้าว  
(ศศิธร, 2551)

#### 4.1.4 ผลการศึกษาเวลาในการอบตัวดูดซับ

การศึกษาหาการปรับสภาพฟางข้าวโดยแช่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์และปรับปรุงต่อด้วยกรดซิตริก เข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ มีระยะเวลาสัมพัทธ์ 120 นาทีและมีอุณหภูมิในการอบ 120 องศาเซลเซียส จากนั้นแปรผันระยะเวลาในการอบฟางข้าวที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยกำหนดเวลาดังนี้คือ 30, 60, 90, 120 และ 150 นาที แล้วนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) pH เท่ากับ 6 และระยะเวลาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 60 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดัง รูปที่ 4.5



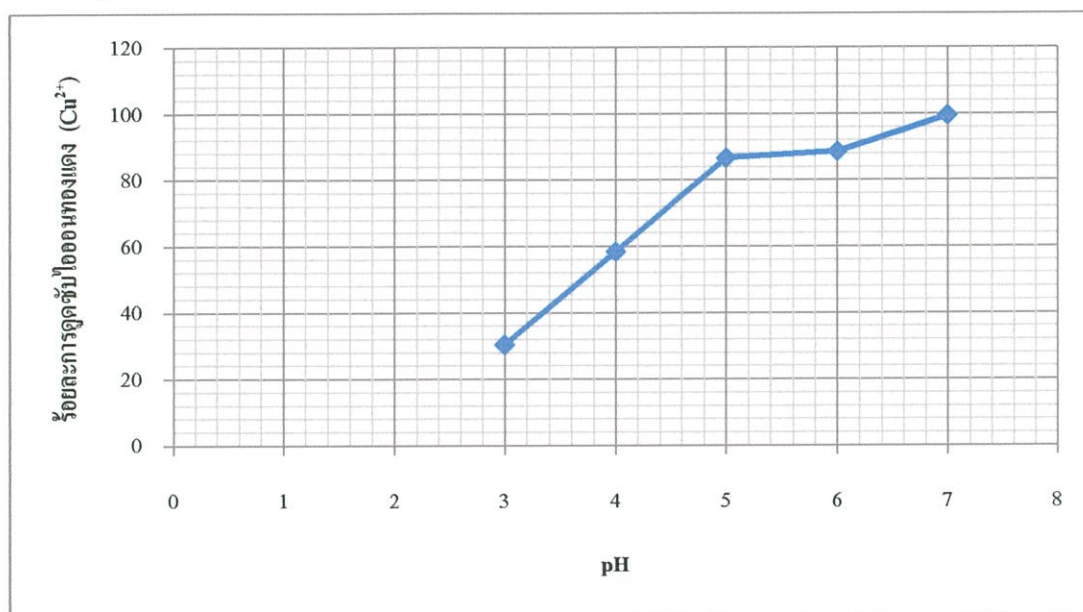
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาอบฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก (นาที) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง (Cu<sup>2+</sup>)

จากรูปที่ 4.5 พบว่า เมื่อระยะเวลาในการอบเพิ่มขึ้นจาก 30 นาทีไปจนถึง 120 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เนื่องจากความสามารถในการดูดซับทองแดงไอออนจะขึ้นอยู่กับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาด้วย เมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นปริมาณของหมู่คาร์บอกซิลและความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงจะเพิ่มขึ้นด้วย (हत्य, 2547) เมื่อเพิ่มเวลาอบถึง 150 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับกลับลดลง เพราะอิทธิพลของพันธะ Crosslinking ที่ทำให้หมู่คาร์บอกซิลลดลง ความสามารถในการดูดซับไอออนจึงลดลงตามไปด้วย (Wing, 1996) และที่เวลาอบ 120 นาที จะเห็นได้ว่า มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดถึงร้อยละ 88.75

## 4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ

### 4.2.1 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสม

จากการศึกษาค่า pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้อัตราส่วนฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซัลฟิวริกต่อน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 0.5 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร แปรผัน pH ดังนี้คือ 3, 4, 5, 6 และ 7 ระยะเวลาการดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเวลา 60 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.6



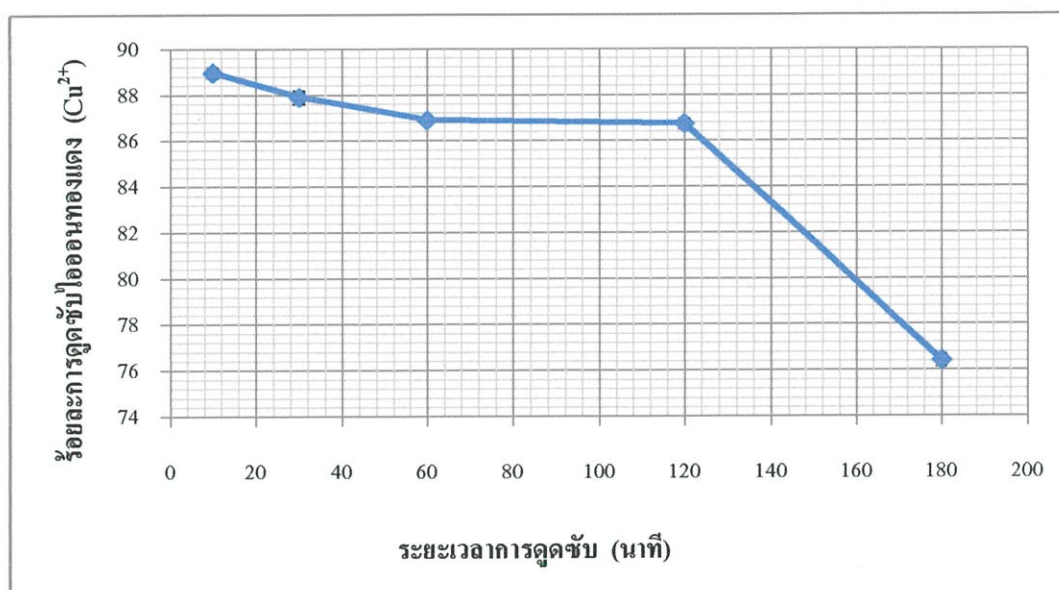
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )

จากรูปที่ 4.6 พบว่า เมื่อ pH สูงขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จะเห็นว่า ที่ pH 3 ประสิทธิภาพการดูดซับจะต่ำสุดเพียงร้อยละ 30.58 เพราะเมื่อ pH ลดลงไฮโดรเจนไอออนในระบบจะเพิ่มมากขึ้น ไฮโดรเจนไอออนส่วนหนึ่งจะถูกดึงดูดกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบของฟางข้าว ทำให้ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ลดลง (หฤทัย, 2547) แต่เมื่อ pH ในสารละลายเพิ่มสูงขึ้นจะมีไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น แสดงว่า ระบบประกอบด้วยฟางข้าว ไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) และไฮดรอกไซด์ไอออน ซึ่งฟางข้าวที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุลบจะทำหน้าที่ในการดูดซับหรือจับกับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่มีประจุบวกเพียงอย่างเดียว จะไม่มีผลกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่มีประจุลบเหมือนกัน แต่ในขณะเดียวกันความสามารถในการดูดซับจะลดลงที่ pH สูงมากๆ (หฤทัย, 2547) เนื่องจากสารละลายจะอยู่ในรูปของ  $\text{Cu}^{2+}$  เพียงเล็กน้อย แต่จะอยู่ในรูปของ  $\text{Cu}(\text{OH})^+$  และ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  เป็นส่วนมาก

(Zhu *et al.*, 2008) และเมื่อคำนวณช่วงการตกตะกอนของ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  ที่เกิดขึ้น พบว่า ที่ pH มากกว่า 5 จะเกิดตะกอนของ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  เนื่องจากผลคูณของไอออน  $[\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^-]$  มีค่ามากกว่า  $K_{sp}$  ของ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  แสดงในภาคผนวก ข (รชค, 2553) ดังนั้น pH 5 จึงเป็น pH ที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ซึ่งให้ประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 86.77

#### 4.2.2 ผลการศึกษาระยะเวลาการดูดซับ

จากการศึกษาระยะเวลาการดูดซับที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดง เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้อัตราส่วนฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกต่อน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 0.5 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ 50 มิลลิตร ปรับ pH เท่ากับ 5 เนื่องจากเป็น pH ที่เหมาะสม จากนั้นได้แปรผันระยะเวลาการดูดซับเป็น 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7



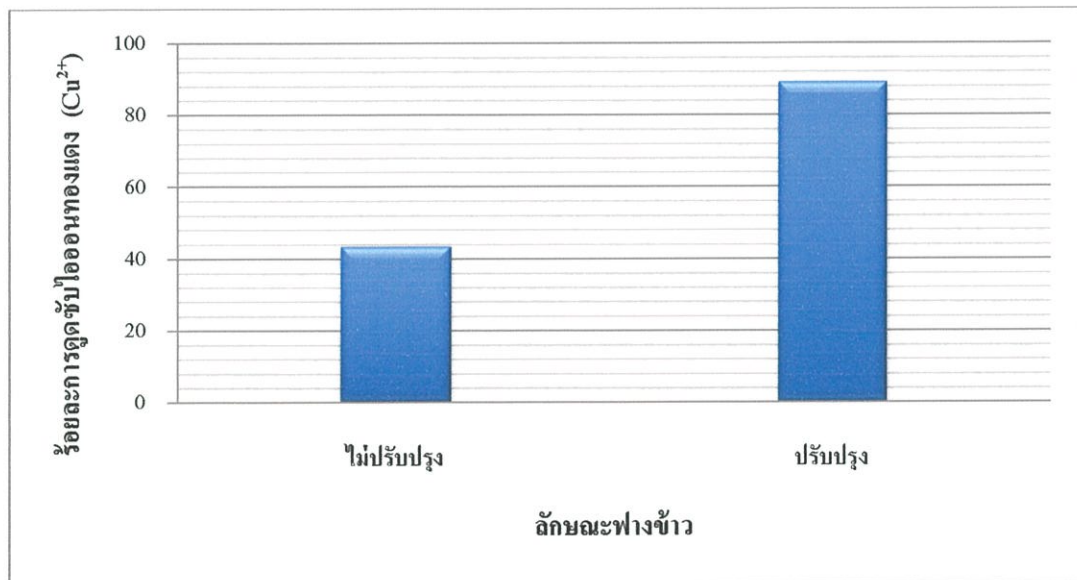
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับ (นาที) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ )

จากรูปที่ 4.7 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการดูดซับ ความสามารถในการดูดซับของฟางข้าวจะลดลงเรื่อยๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) จากสารละลายโดยใช้ฟางข้าวเหลือง (Rice straw) ที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก (Zhu *et al.*, 2008) และการศึกษาการดูดซับทองแดงทางชีวภาพออกจากสารละลายด้วยกากองุ่น (Grape waste) (ภาณุมาศ, 2548) ซึ่งการดูดซับในช่วงแรกจะมาก เนื่องจากพื้นผิววัสดุดูดซับยังมีอยู่มาก ทำให้อัตราการดูดซับมากกว่าการคาย แต่เมื่อเวลาผ่านไป Active site จะลดลง เพราะมีไอออนของโลหะหนักเข้าไปเกาะยึดอยู่ ทำให้เกิด

การคายซับมากกว่าการดูดซับ (ศศิธร, 2551) ดังนั้นระยะเวลาการดูดซับที่เหมาะสมคือ 10 นาที เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดร้อยละ 88.99

#### 4.3 การศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

นำฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกมาดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีไอออนทองแดงเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 50 มิลลิตร เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับฟางข้าวที่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกที่ความเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ มีระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ใช้อุณหภูมิในการอบ 120 องศาเซลเซียสและใช้เวลาอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 120 นาที แล้วนำไปดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่สภาวะเดียวกันคือ pH เท่ากับ 5 และระยะเวลาการดูดซับที่ 10 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ลักษณะฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกกับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง (Cu<sup>2+</sup>)

จากรูปที่ 4.8 พบว่า ฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และปรับปรุงด้วยกรดซิตริก พบว่า จะมีประสิทธิภาพการดูดซับเพียงร้อยละ 43.28 เนื่องจากตัวดูดซับที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับปรุงทางเคมีจะขาดความจำเพาะเจาะจงในการดูดซับจึงมีความสามารถในการดูดซับที่ต่ำ (Guo *et al.*, 2011) หลังจากทำการแช่ฟางข้าวด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์และปรับปรุงด้วยกรดซิตริกจะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดถึงร้อยละ 88.99 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นภายในโครงสร้างของเซลลูโลส โดยกรดซิตริกมีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับของฟางข้าว เพราะเป็นการปรับปรุงโครงสร้างของฟางข้าว โดยกรดซิตริก

จะเข้าไปเติมหมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group : -COOH) ให้กับโครงสร้างของฟางข้าว ทำให้ฟางข้าวมีประสิทธิภาพในการดักจับกับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ได้มากขึ้น (ศศิธร, 2551)

## บทที่ 5

### สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก ปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของกรดซิตริก ระยะเวลาการสัมผัส อุณหภูมิและเวลาในการอบตัวดูดซับ 2) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ มีปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่ ค่า pH และระยะเวลาในการดูดซับ 3) การศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก ซึ่งได้สรุปผลการวิเคราะห์ดังนี้

##### 5.1.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริก

5.1.1.1 การศึกษาความเข้มข้นของกรดซิตริกที่เหมาะสม พบว่า ความเข้มข้นของกรดซิตริก 0.4 มิลลิโมลาร์ จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดร้อยละ 82.31

5.1.1.2 การศึกษาระยะเวลาการสัมผัสของฟางข้าวกับกรดซิตริก พบว่า ระยะเวลาดำเนินการ 120 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 85.93

5.1.1.3 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบคือ 120 องศาเซลเซียส จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 85.93

5.1.1.4 การศึกษาเวลาในการอบตัวดูดซับ พบว่า เวลาในการอบตัวดูดซับที่เหมาะสมคือ 120 นาที จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับร้อยละ 88.75

##### 5.1.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการดูดซับ

5.1.2.1 การศึกษา pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแปรผันค่า pH 3 ถึง 7 พบว่า pH 5 เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงซึ่งให้ประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 86.77

5.1.2.2 การศึกษาระยะเวลาในการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 5 พบว่าระยะเวลาในการดูดซับที่เหมาะสมคือ 10 นาที ซึ่งให้ประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 88.99

### 5.1.3 การศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

การศึกษาการนำฟางข้าวที่ไม่ผ่านการปรับปรุงด้วยกรดซิตริกมาดูดซับน้ำเสียสังเคราะห์ที่มี ไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5 พบว่า มีประสิทธิภาพการดูดซับเพียงร้อยละ 43.28 แต่เมื่อปรับปรุงฟางข้าวด้วยกรดซิตริกโดยเลือกสภาวะที่เหมาะสมมาดูดซับ ไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่สภาวะเดียวกัน พบว่า ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 88.99

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟางข้าวก่อนปรับปรุง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนินและส่วนประกอบอื่นๆในฟางข้าว

5.2.2 ควรศึกษาโครงสร้างและพื้นผิวของฟางข้าวก่อนและหลังการดูดซับไอออนทองแดง และหลังการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

5.2.3 ควรศึกษาการแปรผันความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ไอออนทองแดงและปริมาณของตัวดูดซับเพื่อใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในรูปแบบต่างๆ

5.2.4 ควรนำน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมาทำการดูดซับด้วยฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัด

5.2.5 ควรนำฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกไปประยุกต์ใช้กับโลหะหนักตัวอื่นๆ ในน้ำเสียอุตสาหกรรม

5.2.6 ควรศึกษาการคายซับ เพื่อนำฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกที่ใช้ในการดูดซับ ไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์กลับมาใช้ใหม่

## เอกสารอ้างอิง

- จรัญ ประจันบาล. 2551. การหาค่าที่เหมาะสมเพื่อการผลิตเอนไซม์เบต้า-กลูคาเนสจากเชื้อรา *Aspergillus terreus* ASKU 10 ด้วยการหมักแบบแห้งและการใช้ฟางข้าวหมักร่วมกับเชื้อส่งเสริมการเติบโตเพื่อการเพาะปลูกข้าวโพดฝักอ่อน. ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2551.
- ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. 2544. เครื่องมือวิทยาศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 3. จังหวัดขอนแก่น.
- ชัชพันธ์ นีวาสวงษ์และเฉลิม เรื่องวิริยะชัย. 2555. การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย (Production of Cellulosic Ethanol in Thailand). วารสารวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 4:1073-1088.
- นงเยาว์ จโนภาส. 2546. การใช้ประโยชน์จากกากแคลเซียมคาร์ไบด์ในการตกตะกอนโลหะหนัก. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2546.
- นพวรรณ ขจรกิริติกุล, ปรีชาต บรรลิจิตกุลและวรรณวรงค์ ชูประเสริฐ. 2548. การดูดซับ ไอออนโลหะตะกั่วในน้ำทิ้งโดยใช้ฟางข้าว. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2548.
- พัชรลักษณ์ พรหมถาวร. 2551. นวัตกรรมการผลิตเซลลูโลสรูปทรงกลมที่มีรูพรุนจากเชื้อฟางข้าว และซังข้าวโพด. ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2551.
- พอลดา ประสานนาม. 2547. การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้การแลกเปลี่ยนไอออน ที่ผลิตจาก Hydroxyethyl cellulose. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ.2547.
- ภาณุมาศ พรหมเทศ. 2548. การดูดซับทองแดงทางชีวภาพออกจากสารละลายด้วยกากองุ่น. รายงานการวิจัย. 1:28-29.
- รชต ตามา. 2553. การดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฟางข้าว. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี พ.ศ.2553.

- ศศิธร นามโครต. 2551. การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับสารละลายโลหะหนักด้วยเปลือกกล้วย  
เหลืองดัดแปร. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัย  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2551.
- สุดเขต ไชโย. 2555. การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ทองแดงและปรอทปริมาณน้อยโดยสทริปปิงโวล  
แทมเมตรี. ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัย  
ศรีนครินทรวิโรฒ พ.ศ.2555.
- หฤทัย ศิระวงษ์. 2547. การเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับประจุโลหะของกากมันสำปะหลังโดยการ  
ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันกับกรดซิตริก. ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชา  
เทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ พ.ศ.2547.
- อังคณา ทองคำ. 2552. การผลิตไซลิทอลจากผลพลอยได้อุตสาหกรรมโดยการหมัก. ปรินญา  
วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ.2552.
- อรพิน โทนเดี้ยว. 2553. การบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานผลิตโลหะโดยใช้  
กากชา. ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัย  
เกษตรศาสตร์ พ.ศ.2551.
- Cao, Q., Cao, X., Li, X., Lu, D., Luo, F., and Shao, W., 2008. Kinetics and equilibrium of Cu(II)  
adsorption onto chemically modified orange peel cellulose biosorbents. 95: 145–152
- Guo, X., Liang, S. and Tian, Q., 2011. Adsorption of Pb<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> from aqueous solution by  
sulfured orange peel. 275: 212-216.
- Marshall, W.E. and Wartelle, L.H., 2000. Citric acid modified agricultural by-product as copper  
ion adsorbent. Advances in Environmental Research. 4: 1-7.
- Thanh, N. and Nhung, H., 2009. Cellulose modified with citric acid and its absorption of Pb<sup>2+</sup> and  
Cd<sup>2+</sup> ion. 135: 1-10.
- Wing, R. E. 1996. Corn fiber citrate: preparation and ion-exchange properties. Industrial  
Crops and Products. 5: 301-305.
- Zhu, B., Fan, T. and Zhang, D., 2008. Adsorption of copper ions from aqueous solution by citric  
acid modified soybean straw. 153: 300-308.

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2539. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www2.diw.go.th/PIC/download/info/water1.pdf> (วันที่สืบค้นข้อมูล 3 กันยายน 2556).
- ชนัญฐิศา สายชุมดี. 2550. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www2.diw.go.th/research/file.asp> (วันที่สืบค้นข้อมูล 23 สิงหาคม 2556).
- ชุตินันท์ รัตนกาญจน์. 2550. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.mwit.ac.th/~teppode/rs4.pdf> (วันที่สืบค้นข้อมูล 15 กันยายน 2556).
- บทความวิชาการ. 2555. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/43896> (วันที่สืบค้นข้อมูล 27 กันยายน 2556).
- Acuity Education. 2012. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.quarkology.com/12-chemistry/94-chemical-monitoring/94C-ions.html> (วันที่สืบค้นข้อมูล 12 ตุลาคม 2556).
- Hoffland Environmental Inc. 2012. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.hofflandenv.com/hydroxide-precipitation> (วันที่สืบค้นข้อมูล 1 ตุลาคม 2556).

ภาคผนวก ก

ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง

ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

ก-1 ผลการศึกษาความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่เหมาะสม

ขวดที่	ความเข้มข้นของ กรดซัลฟูริกที่ใช้ ปรับปรุ้ง (M)	ค่าการดูดซับ ที่วัดได้จาก เครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย ร้อยละ การดูดซับ	น้ำหนักฟาง ข้าว (g)	pH สารละลาย เริ่มต้น	ปรับ pH ของสารละลาย Cu <sup>2+</sup>	
								pH	อุณหภูมิ (°C)
1	0.2	0.212	0.07	78.99	78.69	0.500	2.59	6.02	31.0
2		0.220		78.20		0.500	2.63	6.02	31.0
3		0.213		78.89		0.501	2.67	6.03	30.8
1	0.4	0.171	0.40	82.03	82.31	0.503	2.67	6.02	30.5
2		0.164		82.77		0.503	2.61	6.01	30.6
3		0.170		82.14		0.501	2.67	6.01	30.8
1	0.6	0.224	0.89	77.80	78.83	0.503	2.68	6.01	30.6
2		0.208		79.39		0.501	2.65	6.05	30.8
3		0.209		79.29		0.502	2.65	6.01	30.4
1	0.8	0.278	0.41	72.45	72.91	0.501	2.68	6.01	30.8
2		0.272		73.04		0.500	2.67	6.02	30.8
3		0.270		73.24		0.501	2.65	6.02	30.8
1	1.0	0.280	0.44	73.01	72.53	0.502	2.66	6.01	30.6
2		0.286		72.44		0.502	2.64	6.01	30.4
3		0.289		72.15		0.502	2.67	6.01	30.3

1	ฟางข้าวที่สกัดด้วย	0.468	0.55	54.90	54.83	0.502	2.65	6.01	30.4
2	โซเดียมไฮดรอก	0.473		53.41		0.502	2.67	6.02	30.3
3	ไซค์ที่ไม่ปรับปรุง ด้วยกรดซัลฟริก	0.465		55.19		0.503	2.67	6.05	30.6

### ก-2 ผลการศึกษาช่วงระยะเวลาการสัมผัส

ขวดที่	ระยะเวลาการสัมผัสของฟางข้าวที่ปรับปรุง (นาท)	ค่าการดูดซับที่วัดได้จากเครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละการดูดซับ	ค่าเฉลี่ยร้อยละการดูดซับ	น้ำหนักฟางข้าว (g)	pH สารละลายเริ่มต้น	ปรับ pH ของสารละลาย $\text{Cu}^{2+}$	
								pH	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	0	0.211	0.74	77.83	77.97	0.500	2.65	6.02	30.0
2		0.216		77.30		0.501	2.66	6.03	29.8
3		0.202		78.77		0.501	2.63	6.00	29.9
1	30	0.181	0.66	80.98	80.77	0.502	2.65	6.01	30.1
2		0.178		81.29		0.502	2.64	6.02	29.4
3		0.190		80.03		0.502	2.64	5.99	29.5
1	60	0.171	0.40	82.03	82.31	0.502	2.65	6.00	29.5
2		0.164		82.77		0.501	2.66	6.03	29.3
3		0.170		82.14		0.502	2.64	6.01	29.2

1	90	0.157	0.37	83.50	83.26	0.500	2.64	6.02	29.4
2		0.152		84.03		0.501	2.64	6.03	29.7
3		0.169		82.24		0.502	2.66	6.04	29.3
1	120	0.144	0.17	85.83	85.93	0.502	2.65	6.02	29.6
2		0.144		85.83		0.502	2.65	6.03	30.0
3		0.141		86.13		0.502	2.66	6.02	29.7
1	150	0.171	0.53	82.03	82.10	0.501	2.65	6.00	29.7
2		0.175		81.61		0.502	2.65	6.02	30.0
3		0.165		82.66		0.503	2.64	6.01	29.7
1	180	0.165	0.52	82.66	82.07	0.500	2.65	6.00	29.5
2		0.174		81.72		0.502	2.64	6.03	29.9
3		0.173		81.82		0.502	2.65	5.99	29.9

## ก-3 ผลการศึกษาอุณหภูมิ

ขวดที่	อุณหภูมิที่ใช้ในการ ปรับปรุ้งฟางข้าว (°C)	ค่าการดูดซับ ที่วัดได้จาก เครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย ร้อยละ การดูดซับ	น้ำหนักฟาง ข้าว (g)	pH สารละลาย เริ่มต้น	ปรับ pH ของสารละลาย Cu <sup>2+</sup>	
								pH	อุณหภูมิ (°C)
1	Room temperature (30)	0.183	0.36	82.00	82.10	0.500	2.63	6.04	29.1
2		0.178		82.49		0.501	2.65	6.03	29.1
3		0.185		81.80		0.501	2.65	6.02	29.0
1	80	0.172	0.34	83.08	82.69	0.501	2.67	5.99	29.0
2		0.178		82.49		0.501	2.64	6.02	29.1
3		0.178		82.49		0.500	2.65	6.02	28.7
1	100	0.154	0.36	84.85	84.55	0.500	2.65	6.03	29.0
2		0.156		84.65		0.501	2.64	6.00	29.0
3		0.161		84.16		0.501	2.65	6.01	29.0
1	120	0.144	0.17	85.83	85.93	0.501	2.63	6.01	28.5
2		0.144		85.83		0.502	2.63	6.02	29.0
3		0.141		86.13		0.502	2.65	6.01	29.1
1	140	0.150	0.41	85.24	85.70	0.501	2.65	6.02	29.0
2		0.144		85.83		0.500	2.65	6.02	28.7
3		0.142		86.03		0.501	2.60	6.03	28.6

## ก-4 ผลการศึกษาเวลาในการอบตัวดูดซับ

ขวดที่	เวลาที่ใช้อบฟางข้าว ที่ปรับปรุง (นาที)	ค่าการดูดซับ ที่วัดได้จาก เครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย ร้อยละ การดูดซับ	น้ำหนักฟาง ข้าว (g)	pH สารละลาย เริ่มต้น	ปรับ pH ของสารละลาย $\text{Cu}^{2+}$	
								pH	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	30	0.147	0.16	84.00	84.03	0.500	2.66	6.00	30.4
2		0.145		84.21		0.500	2.66	6.02	30.4
3		0.148		83.89		0.501	2.68	6.02	30.5
1	60	0.142	0.17	84.54	84.39	0.503	2.65	6.04	30.5
2		0.143		84.43		0.503	2.65	6.00	30.3
3		0.145		84.21		0.501	2.65	6.03	30.4
1	90	0.144	0.17	84.76	85.93	0.503	2.68	6.00	30.4
2		0.144		84.43		0.501	2.66	6.04	30.6
3		0.141		85.52		0.502	2.67	6.03	30.6
1	120	0.115	0.24	88.97	88.75	0.501	2.67	6.03	30.7
2		0.120		88.78		0.500	2.67	6.03	30.5
3		0.117		88.49		0.501	2.68	6.01	30.4
1	150	0.160	0.46	82.58	82.14	0.502	2.65	6.01	30.6
2		0.178		80.62		0.502	2.66	6.02	30.6
3		0.154		83.23		0.502	2.65	6.03	30.5

## ก-5 ผลการศึกษา pH ที่เหมาะสม

ขวดที่	pH	ค่าการดูดซับที่ วัดได้จากเครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย ร้อยละ การดูดซับ	น้ำหนักฟาง ข้าว (g)	pH สารละลาย เริ่มต้น	ปรับ pH ของสารละลาย $\text{Cu}^{2+}$	
								pH	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	3	0.688	2.35	32.22	30.58	0.500	2.64	3.00	30.8
2		0.732		27.88		0.503	2.63	3.01	31.5
3		0.694		31.63		0.501	2.63	3.00	31.9
1	4	0.422	1.14	58.42	58.59	0.502	2.63	4.00	31.4
2		0.408		59.80		0.503	2.63	4.01	31.5
3		0.431		57.54		0.501	2.63	4.02	31.7
1	5	0.136	0.21	86.60	86.77	0.503	2.64	5.00	31.5
2		0.132		87.00		0.502	2.63	5.00	31.1
3		0.135		86.70		0.500	2.64	5.00	31.3
1	6	0.115	0.24	88.97	88.75	0.501	2.62	6.01	32.0
2		0.120		88.49		0.500	2.63	6.02	31.9
3		0.117		88.78		0.502	2.64	6.00	31.2
1	7	0.007	0.25	99.33	99.62	0.500	2.64	7.00	31.5
2		0.002		99.81		0.500	2.64	7.02	32.1
3		0.003		99.71		0.501	2.65	7.01	31.9

## ก-6 ผลการศึกษาระยะเวลาการดูดซับ

ขวดที่	ระยะเวลาสัมพัทธ์ (นาที)	ค่าการดูดซับ ที่วัดได้จาก เครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย ร้อยละ การดูดซับ	น้ำหนักฟาง ข้าว (g)	pH สารละลาย เริ่มต้น	ปรับ pH ของสารละลาย $\text{Cu}^{2+}$	
								pH	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	10	0.112	0.21	89.12	88.99	0.501	2.65	4.98	29.6
2		0.115		88.83		0.500	2.65	5.00	29.8
3		0.113		89.02		0.502	2.66	5.02	29.8
1	30	0.123	0.27	88.05	87.92	0.503	2.66	5.00	29.2
2		0.123		88.05		0.502	2.65	5.04	29.4
3		0.127		87.67		0.501	2.66	5.03	29.5
1	60	0.136	0.07	86.79	86.89	0.503	2.65	5.02	29.7
2		0.133		87.08		0.501	2.63	5.04	29.8
3		0.135		86.89		0.502	2.66	5.01	29.5
1	120	0.136	0.21	86.60	86.70	0.501	2.66	5.00	29.0
2		0.132		87.00		0.503	2.66	5.02	29.5
3		0.135		86.70		0.502	2.65	5.04	29.5
1	180	0.243	0.25	76.40	76.69	0.502	2.68	5.00	29.1
2		0.245		76.20		0.501	2.65	5.01	29.5
3		0.240		76.69		0.503	2.66	5.03	29.2

ก-7 ผลการศึกษาการดูดซับของฟางข้าวที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

ขวดที่	ลักษณะฟางข้าว	ค่าการดูดซับ ที่วัดได้จาก เครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย ร้อยละ การดูดซับ	น้ำหนักฟาง ข้าว (g)	pH สารละลาย เริ่มต้น	ปรับ pH ของสารละลาย $\text{Cu}^{2+}$	
								pH	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	ปรับปรุงด้วย กรดซิตริก	0.112	0.21	89.12	88.99	0.501	2.65	4.98	29.6
2		0.115		88.83		0.500	2.65	5.00	29.8
3		0.113		89.02		0.502	2.66	5.02	29.8
1	ไม่ปรับปรุงด้วย กรดซิตริก	0.578	0.15	43.44	43.28	0.503	2.65	5.00	29.2
2		0.580		43.25		0.502	2.63	5.02	29.4
3		0.581		43.15		0.501	2.66	5.04	29.5

ก-8 ตารางข้อมูลชุดควบคุม

ขวดที่	pH	ค่าการดูดซับ ที่วัดได้จาก เครื่อง AAS	ค่า SD	ร้อยละ การดูดซับ	ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ	ปรับ pH ของสารละลาย $\text{Cu}^{2+}$	
						pH	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	3	0.920	0.28	8.78	8.87	3.05	30.9
2		0.916		9.17		3.01	30.7
1	4	0.901	0.56	10.66	10.80	4.01	30.7
2		0.840		11.45		4.04	30.6
1	5	0.840	0.14	16.71	16.39	5.00	30.9
2		0.838		16.91		5.00	30.7
1	6	0.735	0.47	29.50	53.15	6.03	31.8
2		0.728		30.17		6.01	31.6
1	7	0.008	0	93.23	99.23	7.04	31.7
2		0.008		93.23		7.02	32.1

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

### ข-1 การคำนวณการตกตะกอนของสารประกอบ (Cu(OH)<sub>2</sub>) ตั้งแต่ pH 2-7

การศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับไอออนทองแดง (Cu<sup>2+</sup>) ในการทดลองได้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ทำการปรับ pH ซึ่งเมื่อถึง pH ที่ค่าๆ หนึ่งจะเกิดการตกตะกอนซึ่งตะกอนที่เกิดขึ้นคือ ตะกอนของสารประกอบ (Cu(OH)<sub>2</sub>) ดังนั้นจะต้องมีการศึกษาว่าที่ pH เท่าใด จะเกิดการตกตะกอนของ (Cu<sup>2+</sup>) เป็น (Cu(OH)<sub>2</sub>) โดยสามารถหาได้จากการคำนวณค่าของผลคูณไอออนเปรียบเทียบกับค่า K<sub>sp</sub> ซึ่งเป็นค่าคงที่ผลคูณสารละลาย

ถ้าค่าผลคูณไอออนมีค่ามากกว่าค่า K<sub>sp</sub> แสดงว่า เกิดการตกตะกอนขึ้น

ถ้าค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่าค่า K<sub>sp</sub> แสดงว่า ไม่เกิดการตกตะกอน

ถ้าค่าผลคูณไอออนมีค่าเท่ากับค่า K<sub>sp</sub> แสดงว่า สารละลายอิ่มตัวพอดี

การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH ต่างๆ

ไอออนในที่นี้คือ Cu<sup>2+</sup> และ OH<sup>-</sup>

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



กำหนดค่าคงที่ผลคูณสารละลาย (K<sub>sp</sub>) ของ Cu(OH)<sub>2</sub> เท่ากับ  $2.2 \times 10^{-20}$  โมลาร์

#### 1. การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 2

โดย	[Cu <sup>2+</sup> ]	=	7.8 × 10 <sup>-4</sup>
	[OH]	=	10 <sup>-12</sup>
จาก	K <sub>sp</sub>	=	[Cu <sup>2+</sup> ][OH] <sup>2</sup>
ดังนั้น	2.2 × 10 <sup>-20</sup>	=	(7.8 × 10 <sup>-4</sup> ) × (10 <sup>-12</sup> ) <sup>2</sup>
		=	7.8 × 10 <sup>-28</sup>

เพราะฉะนั้นจะเห็นว่าค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่า K<sub>sp</sub>

สรุปผล pH 2 ไม่เกิดการตกตะกอนของ Cu(OH)<sub>2</sub>

### 2. การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 3

$$\begin{aligned}
 \text{โดย} \quad [Cu^{2+}] &= 7.8 \times 10^{-4} \\
 [OH] &= 10^{-11} \\
 \text{จาก} \quad K_{sp} &= [Cu^{2+}][OH^-]^2 \\
 \text{ดังนั้น} \quad 2.2 \times 10^{-20} &= (7.8 \times 10^{-4}) \times (10^{-11})^2 \\
 &= 7.8 \times 10^{-26}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นว่าค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่า  $K_{sp}$

สรุปผล pH 3 ไม่เกิดตะกอนของ  $Cu(OH)_2$

### 3. การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 4

$$\begin{aligned}
 \text{โดย} \quad [Cu^{2+}] &= 7.8 \times 10^{-4} \\
 [OH] &= 10^{-10} \\
 \text{จาก} \quad K_{sp} &= [Cu^{2+}][OH^-]^2 \\
 \text{ดังนั้น} \quad 2.2 \times 10^{-20} &= (7.8 \times 10^{-4}) \times (10^{-10})^2 \\
 &= 7.8 \times 10^{-24}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นว่าค่าผลคูณไอออนมีค่าน้อยกว่า  $K_{sp}$

สรุปผล pH 4 ไม่เกิดตะกอนของ  $Cu(OH)_2$

### 4. การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 5

$$\begin{aligned}
 \text{โดย} \quad [Cu^{2+}] &= 7.8 \times 10^{-4} \\
 [OH] &= 10^{-9} \\
 \text{จาก} \quad K_{sp} &= [Cu^{2+}][OH^-]^2 \\
 \text{ดังนั้น} \quad 2.2 \times 10^{-20} &= (7.8 \times 10^{-4}) \times (10^{-9})^2 \\
 &= 7.8 \times 10^{-22}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นว่าค่าผลคูณไอออนมีค่าเท่ากับค่า  $K_{sp}$

สรุปผล pH 5 สารละลายอิ่มตัวพอดี

### 5. การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 6

$$\begin{array}{lcl}
 \text{โดย} & [\text{Cu}^{2+}] & = 7.8 \times 10^{-4} \\
 & [\text{OH}] & = 10^{-8} \\
 \text{จาก} & K_{sp} & = [\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^{-}]^2 \\
 \text{ดังนั้น} & 2.2 \times 10^{-20} & = (7.8 \times 10^{-4}) \times (10^{-8})^2 \\
 & & = 7.8 \times 10^{-20}
 \end{array}$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นว่าค่าผลคูณไอออนมีค่ามากกว่า  $K_{sp}$

สรุปผล pH 6 เกิดการตกตะกอนของ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$

### 6. การคำนวณผลคูณของไอออนที่ pH มีค่าเท่ากับ 7

$$\begin{array}{lcl}
 \text{โดย} & [\text{Cu}^{2+}] & = 7.8 \times 10^{-4} \\
 & [\text{OH}] & = 10^{-7} \\
 \text{จาก} & K_{sp} & = [\text{Cu}^{2+}][\text{OH}^{-}]^2 \\
 \text{ดังนั้น} & 2.2 \times 10^{-20} & = (7.8 \times 10^{-4}) \times (10^{-7})^2 \\
 & & = 7.8 \times 10^{-18}
 \end{array}$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นว่าค่าผลคูณไอออนมีค่ามากกว่า  $K_{sp}$

สรุปผล pH 7 เกิดการตกตะกอนของ  $\text{Cu}(\text{OH})_2$

## ข-2 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

### น้ำเสียสังเคราะห์ของทองแดง

ตัวอย่างการคำนวณการเตรียมสารละลาย Stock ( $\text{Cu}^{2+}$ ) เข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

หาปริมาณ  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ที่ใช้

น้ำหนักโมเลกุล  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 249.5$

ปริมาตรที่ใช้คำนวณจาก

$\text{Cu}^{2+}$  มีมวลอะตอม 63.5 g จากสารตั้งต้น  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  มวลโมเลกุล 249.5 g

ต้องการ  $\text{Cu}^{2+}$  เข้มข้น 1000 mg/L ต้องชั่ง  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{249.5 \text{ g} \cdot 1000 \text{ mg} / \text{L}}{63.5 \text{ g}}$   
 $= 3929.1339 \text{ mg}$  หรือ 3.9291 g

ดังนั้นการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ของทองแดงความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยชั่ง  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ประมาณ 3.93 กรัม ละลายในน้ำกลั่น จากนั้นเติมกรดไนตริกที่ความเข้มข้น 20% ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เพื่อรักษาสภาพสารละลายแล้วจึงปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร

### ข-3 การเตรียมสารละลาย

#### 2.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \frac{g}{mW} &= \frac{cv}{1000} \\ g &= \frac{0.1M * 1000mL}{1000} * 40 \text{ g/mol} \\ &= 4 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้นเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์จำนวน 4 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร

#### 2.2 สารละลายกรดซิตริก ( $C_6H_{10}O_8$ ) ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์

เตรียมสารละลายกรดซิตริกเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 1 ลิตร

$$\begin{aligned} \text{จากกรดซิตริก} \quad 1 \text{ mM} &= 210 \text{ g/L} \\ \text{จากสูตร} \quad \frac{g}{mW} &= \frac{cv}{1000} \\ g &= \frac{1mM * 1000mL}{1000} * 210 \text{ g/mol} \\ &= 210 \text{ mg หรือ } 0.21 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้นเตรียมสารละลายกรดซิตริกเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ โดยชั่งกรดซิตริก 0.21 กรัม ละลายลงในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร แล้วทำการเจือจางให้ได้ความเข้มข้นต่างๆ ดังนี้คือ 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 มิลลิโมลาร์

#### 2.3 สารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (0.1M $HNO_3$ )

เตรียมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากกรดไนตริกเข้มข้น 65%

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad C &= \frac{\% * 10 * D}{M} && \text{เมื่อ } C \text{ คือ ความเข้มข้น mol/L} \\ &= \frac{65\% * 10 * 2.2 \text{ g/ml}}{63 \text{ g/mol}} && D \text{ คือ ความหนาแน่น} \\ &= 22.6984 \text{ M} && M \text{ คือ มวลโมเลกุล g/mol} \end{aligned}$$

จะได้ว่า กรดไนตริก 65% เข้มข้น 22.6984 โมลาร์ คำนวณปริมาตรที่ใช้

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad C_1V_1 &= C_2V_2 \\ 22.6984 \text{ M} * V &= 0.1 \text{ M} * 1000 \text{ mL} \end{aligned}$$

$$V = \frac{0.1M * 1000mL}{22.6984M}$$

$$= 4.4056 \text{ mL}$$

ดังนั้นเตรียมสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยเจือจางจากสารละลายกรดไนตริก 65% มาประมาณ 4.4 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร

#### 2.4 สารละลายกรดไนตริก HNO<sub>3</sub> เจือจาง 20%

เตรียมสารละลายกรดไนตริกเจือจาง 20% โดยเตรียมจากสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 65% จำนวนจาก

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad C_1V_1 &= C_2V_2 \\ 65\% * V &= 20\% * 1000 \text{ mL} \\ V &= \frac{20\% * 1000mL}{65\%} \\ &= 307.6923 \text{ mL} \end{aligned}$$

ดังนั้นเตรียมสารละลายกรดไนตริกเจือจาง 20% โดยเตรียมจากสารละลายกรดไนตริก 65% มาประมาณ 307.7 มิลลิลิตร เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร

#### 2.5 สารละลายเลดไนเตรต Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์

การเตรียมสารละลาย Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> สำหรับทดสอบปริมาณ citric acid ที่มากเกินไปในฟางข้าว

$$\begin{aligned} \text{จาก Pb(NO}_3)_2 \quad \text{มวลโมเลกุล} &= 331.2 \text{ g/mol} \\ \text{ต้องการ Pb(NO}_3)_2 \quad \text{เข้มข้น} &= 0.1 \text{ M} \\ \text{จาก} \quad \frac{g}{mW} &= \frac{cv}{1000} \\ g &= \frac{0.1 \text{ mol/L} * 100mL}{1000mL * 1L} * 331.2 \text{ g/mol} \\ &= 3.312 \text{ g} \end{aligned}$$

ดังนั้นเตรียมสารละลาย Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> เข้มข้น 0.1 โมลาร์ โดยชั่งมาประมาณ 3.312 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนถึงขีดในขวดปริมาตรขนาด 1 ลิตร

## ข-4 การเตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงในการวัดความเข้มข้นด้วยเครื่อง

### Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

#### อุปกรณ์และสารเคมี

1. สารมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. น้ำกลั่น
3. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
4. ปิเปตขนาด 1, 2, 5 และ 10 มิลลิลิตร
5. จุกยาง
6. บีกเกอร์

#### วิธีการเตรียมสารมาตรฐานทองแดง

1. ปิเปตสารมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 1 มิลลิลิตร ทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. เตรียมสารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 มิลลิลิตรตามลำดับ เจือจางด้วยน้ำกลั่นในขวดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร

3. เก็บสารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 และ 1.4 มิลลิกรัมต่อลิตรไว้ในขวดพลาสติก เพื่อใช้เป็นสารละลายมาตรฐานในการวัดหาความเข้มข้นที่แน่นอนด้วยเครื่อง AAS ต่อไป

ภาคผนวก ค

ข้อมูลน้ำเสียอุตสาหกรรมและการปรับปรุงวัสดุคูลซ์

### ค-1 ตารางช่วงความเข้มข้นของมลสารในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

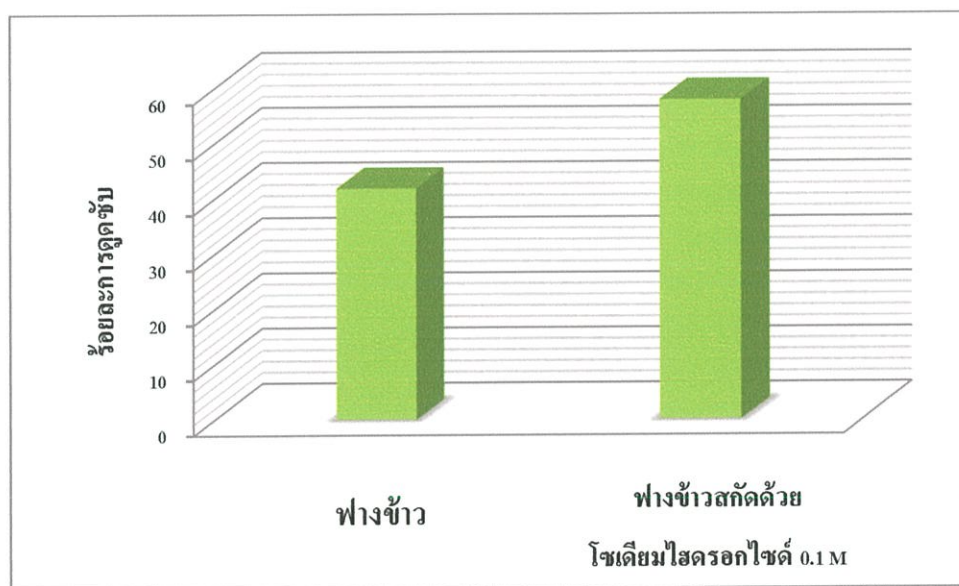
มลสาร	ความเข้มข้น มก./ล.
Cyanide	1 - 150
Chromium	0.25 - 2,600
Copper	0.74 - 75
Nickel	0.07 - 125
Zinc	0.12 - 140
Lead	0.45 - 20
Tin	1.0 - 20
Iron	0.17 - 300

ที่มา : (นงเยาว์, 2546)

จากตารางความเข้มข้นของทองแดงในน้ำเสียอุตสาหกรรมชุบโลหะมีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.74-75 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยอ้างอิงความเข้มข้นของทองแดงที่ปนเปื้อนอยู่ในระดับกลางคือ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อใช้หาเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริกเป็นตัวดูดซับ

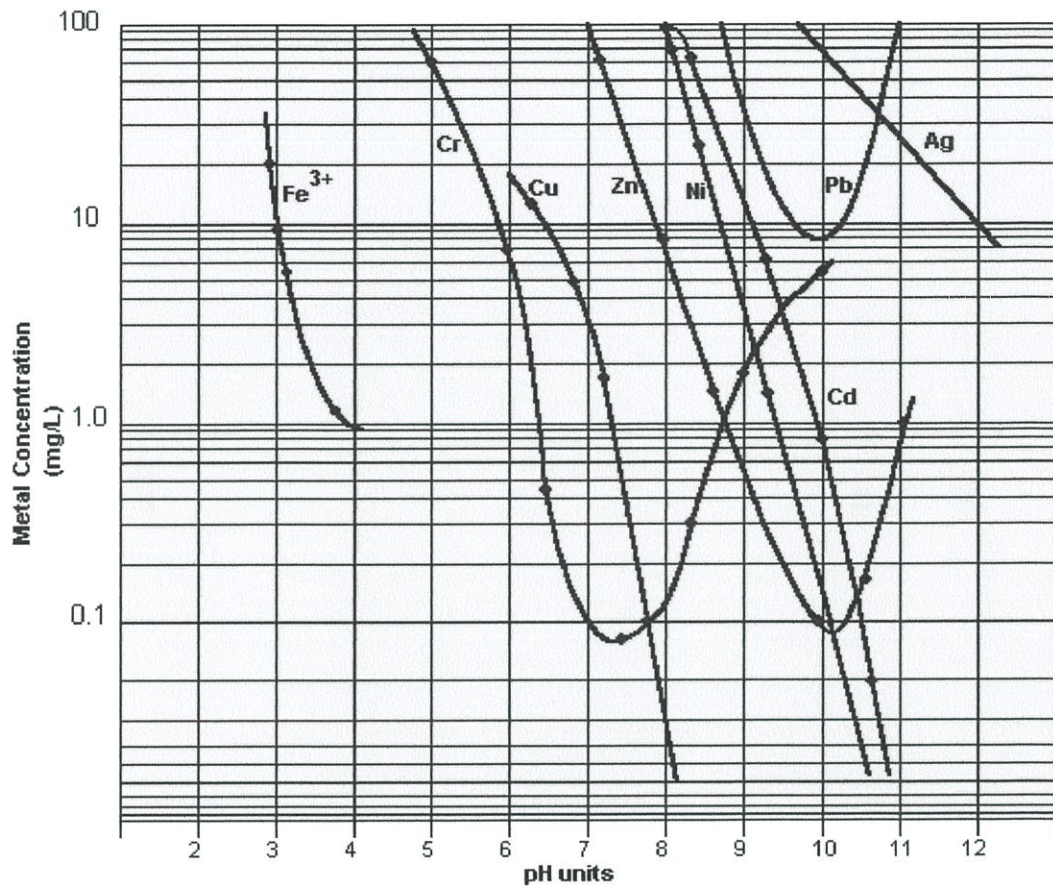
## ค-2 การศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

ในการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ มีผลทำให้ฟางข้าวสามารถดูดซับไอออนโลหะหนักได้มากขึ้น เพราะเมื่อผ่านการปรับสภาพหมู่ฟังก์ชันเดิมของเซลลูโลสคือ  $-CH_2OH-$  ได้ถูกเปลี่ยนเป็น  $-CH_2ONa-$  ซึ่งเป็น reactive group ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างประจุโซเดียมที่  $-CH_2ONa-$  และประจุของโลหะหนักได้ดีขึ้นทำให้ดูดซับโลหะหนักได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น ฟางข้าวกลับดูดซับไอออนโลหะหนักได้น้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นสูง ประจุ  $Na^+$  จะเกิดการผลัดกันเอง ทำให้  $Na^+$  ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยทำให้  $-CH_2ONa-$  เกิดขึ้นน้อยและดูดซับไอออนของโลหะหนักได้น้อยลง (นพวรรณ และคณะ, 2548)



รูปที่ ค-2.1 ประสิทธิภาพการปรับสภาพฟางข้าวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 โมลาร์ ก่อนปรับปรุงด้วยกรดซิตริก

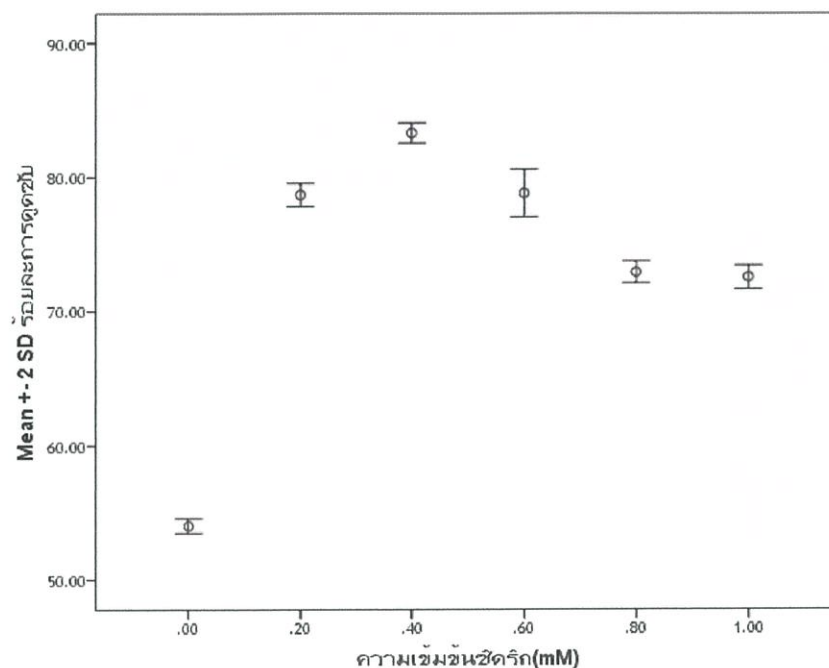
ค-3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและ pH ของการตกตะกอนของโลหะหนัก



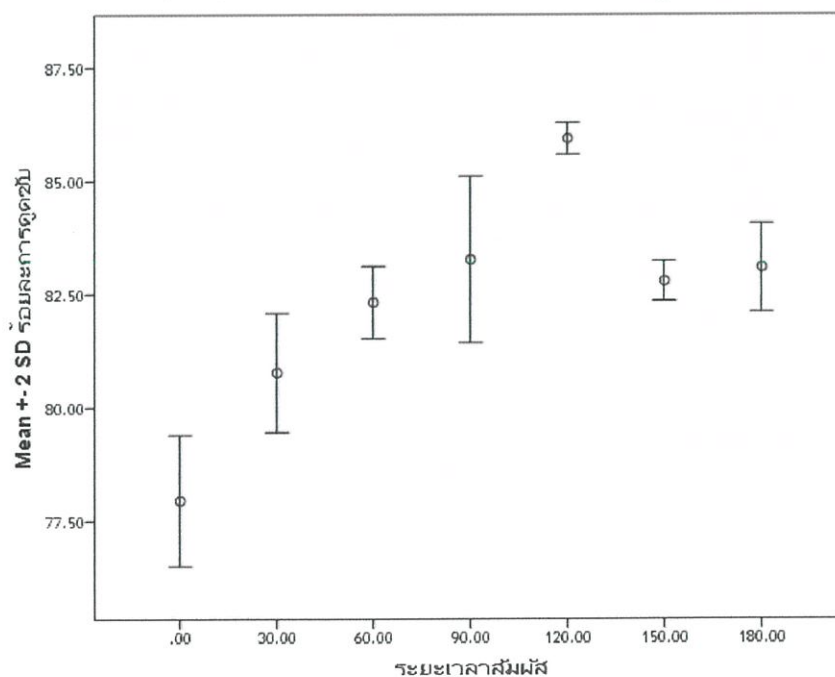
ที่มา : (Hoffland Environmental Inc, 2012)

จากกราฟจะเห็นได้ว่า เมื่อ pH มีค่าสูงขึ้นโลหะหนักจะสามารถตกตะกอนได้มากขึ้น ซึ่งในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนของทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิตริก โดยอ้างอิงข้อมูลการตกตะกอนของโลหะทองแดงจากกราฟ

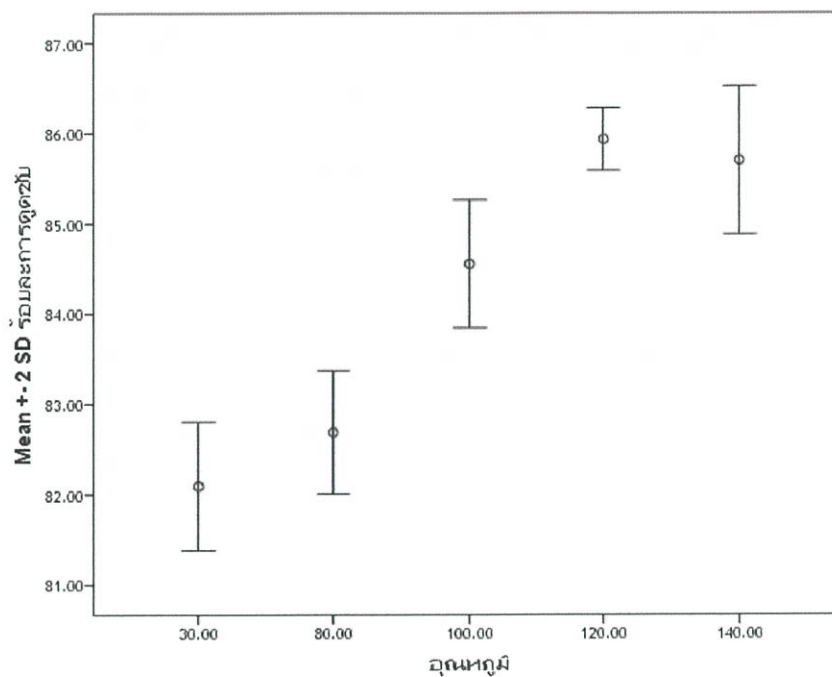
ค-4 การหาค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์โดยใช้ One-Way ANOVA จากโปรแกรม SPSS ในการคำนวณ



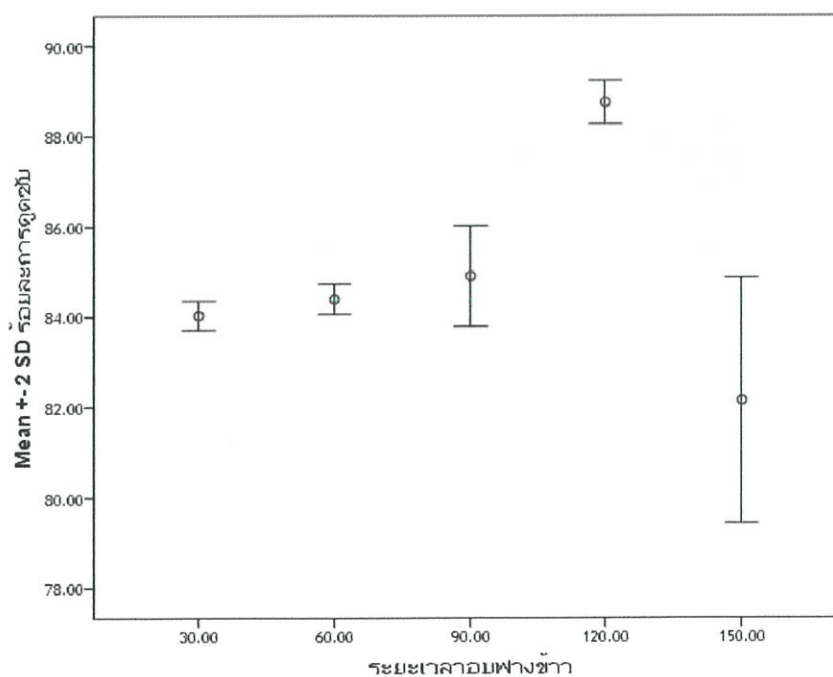
รูปที่ ค-4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซีดริก (มิลลิโมลาร์) กับร้อยละการดูดซับไอออน ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ทองแดงที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95



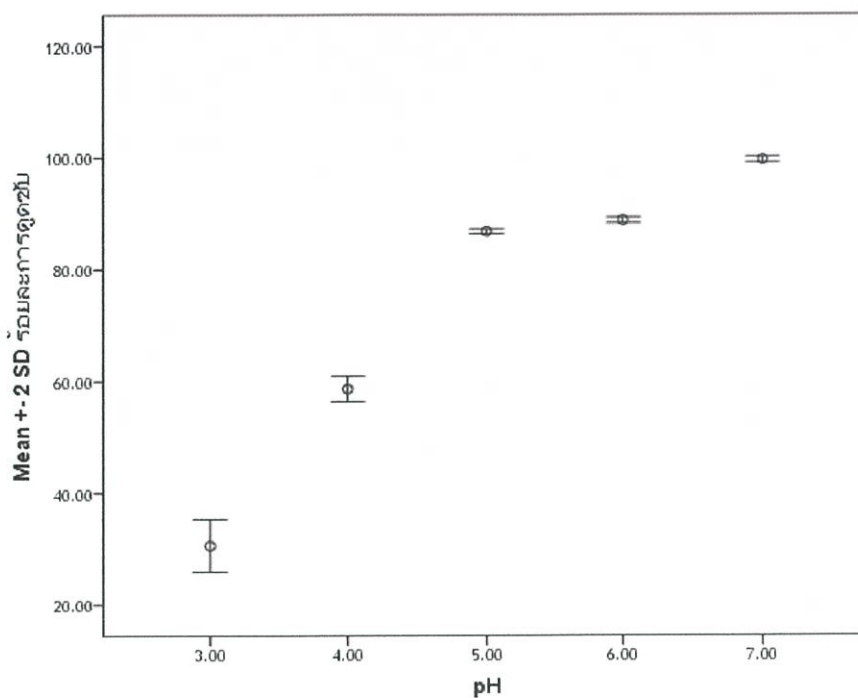
รูปที่ ค-4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ฟางข้าวสัมผัสกับกรดซีดริกเข้มข้น 0.4 มิลลิโมลาร์ (นาทื) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95



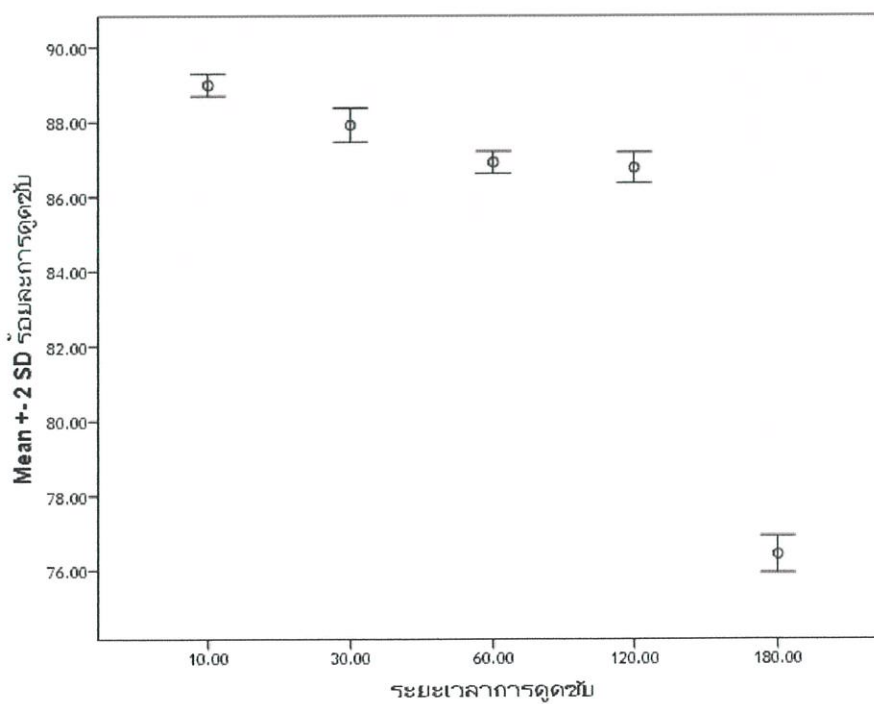
รูปที่ ค-4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับปรุงฟางข้าวด้วย กรดซिटริก (°C) กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95



รูปที่ ค-4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาอบฟางข้าวที่ปรับปรุงด้วยกรดซิทริก (นาทื) กับร้อยละ การดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95



รูปที่ ค-4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง pH กับร้อยละการดูดซับไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกัน  
อย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95



รูปที่ ค-4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการดูดซับกับ (นาที) ร้อยละการดูดซับ  
ไอออนทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญร้อยละ 95

ภาคผนวก ง

มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

### ง-1 ตารางมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานและนิคมอุตสาหกรรม

มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม		
ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH Value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าที่ดื้อเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	-ไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัม/ลิตร หรืออาจแตกต่างกันเล็กน้อย ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่ เกิน 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร -น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำ กร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มิลลิกรัม/ลิตรหรือลง สู่ทะเลค่าที่ดื้อเอสในน้ำทิ้งจะมีค่า มากกว่าค่าที่ดื้อเอสที่มีอยู่ในแหล่ง น้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/ลิตรหรืออาจ แตกต่างกันเล็กน้อยประเภทของ แหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภท ของโรงงานอุตสาหกรรมหรือ ประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย ตามที่คณะกรรมการควบคุม มลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มิลลิกรัม/ลิตร	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำ การเก็บตัวอย่างน้ำ

5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H <sub>2</sub> S)	ไม่เกิน 1.00 มิลลิกรัม/ลิตร	Titrate
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร	กลั่นและตามวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตรหรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มิลลิกรัม/ลิตร	สกัดตัวทำละลายแล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วัน ที่อุณหภูมิ 20 °C) (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มิลลิกรัม/ลิตรหรือแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มิลลิกรัม/ลิตร	Azide Modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มิลลิกรัม/ลิตรหรืออาจแตกต่างกันแต่แต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุม	Kjeldahl

	มลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มิลลิกรัม/ลิตร	
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตรหรืออาจแตกต่างกันในแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มิลลิกรัม/ลิตร	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		
16.1 สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Direct Aspiration หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
16.2 โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.3 โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.4 ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.5 แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.6 แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.7 ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.8 นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.9 แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.10 อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.11 เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.25 มิลลิกรัม/ลิตร	
16.12 ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.02 มิลลิกรัม/ลิตร	

ที่มา : (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2539)