

การดูดซับสังกะสี และตะกั่ว
ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี

ADSORPTION OF ZINC AND LEAD IN SYNTHETIC WASTEWATER
BY CHEMICALLY MODIFIED POMELO PEEL

ประสิทธิ์ชัย สุขสาร
วิชวุธ ชุ่มบุตร
ศิริเชษฐ์ เครือเพชร

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การดูดซับสังกะสี และตะกั่ว
ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี
ADSORPTION OF ZINC AND LEAD IN SYNTHETIC WASTEWATER
BY CHEMICALLY MODIFIED POMELO PEEL

ประสิทธิ์ชัย	สุขसार
วิชวุธ	ยิ้มมุด
สิริเชษฐ์	เกรือเพ็ชร

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**ADSORPTION OF ZINC AND LEAD IN SYNTHETIC WASTEWATER
BY CHEMICALLY MODIFIED POMELO PEEL**

**PRASITTICHAIR SUKSAN
WITCHAWUD YIMMUD
SIRISHAT KRUAPETCH**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MINGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

โครงการพิเศษ	การดูดซับสังกะสีและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี		
	Adsorption of Zinc and Lead in Synthetic Wastewater by Chemically Modified Pomelo Peel		
นักศึกษา	ประสิทธิ์ชัย สุขสาร	รหัสนักศึกษา	53051208
	วิชวุธ ยิ้มมุด	รหัสนักศึกษา	53051257
	สิริเชษฐ์ เครือเพชร	รหัสนักศึกษา	53051274
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์		

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ. กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
อ. ปัทมา ลิฬหาวงศ์	
ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์	

อธิการบดีของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การดูดซับสังกะสีและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี	
นักศึกษา	ประสิทธิ์ชัย	สุขसार
	วิหุทธ	ยัมมุด
	สิริเชษฐ์	เครือเพชร
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	คณะ วิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา	2556	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. ชมพูนุท	ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

จุดมุ่งหมายของโครงการพิเศษนี้เพื่อศึกษา และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพด้วย CaCl_2 1.5 M, 0.5 M NaOH และเมทานอล 95% โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี และตะกั่ว ที่ความเข้มข้น 50 ppm เพื่อนำมาศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับ และศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่โครงการพิเศษนี้พบว่า pH และระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสีคือ pH 6 และ 40 นาที ตามลำดับ ส่วน pH และระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วคือ pH 4 และ 60 นาที ตามลำดับเมื่อใช้สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับของสังกะสีและตะกั่ว ของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเท่ากับ 92.33% และ 81.51% ตามลำดับ และเมื่อใช้เปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของสังกะสี และตะกั่วเท่ากับ 60.99% และ 54.64% ตามลำดับ การนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่พบว่าไม่เหมาะสม เนื่องจากประสิทธิภาพของการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ลดลงเหลือ 44.15% และ 42.81% ตามลำดับ

คำสำคัญ : การดูดซับ, สังกะสี, ตะกั่ว, เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ

Special Project Title	Adsorption of Zinc and Lead in Synthetic Wastewater by Chemically Modified Pomelo Peel		
Name	Prasittichai	Suksan	
	Witchawud	Yimmud	
	Sirishat	Kruapetch	
Degree	Bachelor of Science		
Major Program	Environmental Chemistry	Faculty	Science
Academic Year	2013		
Advisor	Asst.Prof.Dr.Chompoonut	Chaiyaraksa	

Abstract

The aims of this special project were to study and compare the adsorption efficiency of pomelo peel which was unmodified and modified with CaCl_2 1.5 M, NaOH 0.5 M and methanol 95%. 50 ppm Zn and Pb contaminated wastewaters were synthesized and used to observe the optimum conditions for adsorption. The study of possibility to reuse adsorbent was included in this project. The optimum pH and time for Zn adsorption was at pH 6 and 40 min. The optimum condition for Pb adsorption was at pH 4 and 60 min. By using these optimum conditions and using modified pomelo peel, the adsorption efficiency of Zn and Pb were 92.33% and 81.51%, respectively. But when using unmodified pomelo peel, the adsorption efficiency of Zn and Pb were only 60.99% and 54.64%, respectively. The reuse of adsorbent was not recommended since the adsorption efficiencies were reduced to 44.15% (for Zn) and 42.81% (for Pb).

Keywords : Adsorption, Zinc, Lead, Modified Pomelo Peel

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ผู้นำเสนอโครงการพิเศษขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์ ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่กรุณาให้คำแนะนำ ติดตามผลการทำงานและตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องโครงการพิเศษนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ อาจารย์กัลลีนสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และอาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์ ที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางการแก้ไข รวมถึงตรวจสอบและติชมผลงานทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี เจ้าหน้าที่ธุรการภาคเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ และช่วยอำนวยความสะดวกต่างๆจนทำให้โครงการพิเศษนี้ประสบความสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่และบุคคลในครอบครัวที่ให้ความรักความเข้าใจและเป็นกำลังใจในการทำงาน รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ ในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยให้กำลังใจและให้คำปรึกษาที่ดีตลอดการทำโครงการพิเศษฉบับนี้

คณะผู้จัดทำสำนึกในพระคุณทุกท่านและถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความกรุณาให้กำลังใจให้คำปรึกษาคำแนะนำที่ดีและอดทนกับโครงการพิเศษมาโดยตลอด

ประสิทธิ์ชัย สุขसार

วิษุทธิ์ ยิ้มมุด

สิริเชษฐ์ เกื้อเพ็ชร

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	X
นิยามศัพท์	XIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 โลหะหนัก	4
2.1.1 สังกะสี	4
2.1.2 ตะกั่ว	5
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย	6
2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี	6
2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน	7
2.2.3 การออสโมซิสย้อนกลับ	7
2.2.4 การระเหย	8
2.2.5 การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง	8
2.2.6 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า	9
2.2.7 การดูดซับ	9

สารบัญ (ต่อ)

2.3 กระบวนการดูดซับ	10
2.3.1 หลักการดูดซับ	10
2.3.2 ประเภทของการดูดซับ	10
2.3.3 กลไกของกระบวนการดูดซับ	11
2.3.4 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล	11
2.3.5 ประเภทของตัวดูดซับ	12
2.3.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ	13
2.3.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับหรือไอโซเทอมของการดูดซับ	14
2.4 องค์ประกอบทางเคมีของพืช	17
2.4.1 เซลลูโลส	17
2.4.2 เฮมิเซลลูโลส	19
2.4.3 ลิกนิน	20
2.4.1 เพกติน	21
2.5 สัมไอ	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	27
3.1.1 สารเคมี	27
3.1.2 อุปกรณ์	27
3.2 วิธีการทดลอง	28
3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ	28
3.2.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ	28
3.2.3 การศึกษาหุ้ฟงักชันของสารองค์ประกอบในเปลือกส้มโอที่ปรับปรุง คุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ	29

สารบัญ (ต่อ)

3.2.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว	29
3.2.5 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถ ในการดูดซับ	30
3.2.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ	30
3.2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ระหว่าง ตัวดูดซับที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้รับการ ปรับปรุงคุณภาพ	31
3.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ	31
3.2.9 การศึกษาประสิทธิภาพการนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่	32
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ	33
4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ	35
4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักสังกะสี และตะกั่ว	37
4.4 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ	39
4.5 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ	40
4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ระหว่างตัวดูดซับ ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	43
4.7 การศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ	44
4.8 การศึกษาประสิทธิภาพการนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่	45
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	48

สารบัญ (ต่อ)

บรรณานุกรม	49
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก อะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรสโกปี	52
ภาคผนวก ข ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	57
ภาคผนวก ค ตารางแสดงผลการทดลอง	61
ภาคผนวก ง ตารางแสดงการหาค่าไอโซเทอม	65
ภาคผนวก จ กราฟแสดงการหาค่าไอโซเทอม	67
ภาคผนวก ฉ การวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS	69
ภาคผนวก ช การเตรียมสารละลาย	77
ภาคผนวก ซ การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	78
ภาคผนวก ฌ การสร้างกราฟสารละลายมาตรฐาน	79

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1	การแลกเปลี่ยนไอออน	7
รูปที่ 2.2	การออสโมซิสย้อนกลับ	8
รูปที่ 2.3	การทำงานของระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง	9
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์	15
รูปที่ 2.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ mX ฟรุนดิช	16
รูปที่ 2.6	โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์พืช	17
รูปที่ 2.7	โครงสร้างของเซลล์ลูโลส	18
รูปที่ 2.8	โครงสร้างของเฮมิเซลล์ลูโลส	19
รูปที่ 2.9	โครงสร้างของลิกนิน	20
รูปที่ 2.10	โครงสร้างทางเคมีของเพคติน	21
รูปที่ 2.11	ส่วนประกอบของผลส้ม	23
รูปที่ 4.1	(ก) พื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการดูดซับ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope	34
	(ข) พื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการดูดซับ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope	34
รูปที่ 4.2	(ก) หมู่ฟังก์ชันของเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการดูดซับเมื่อ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	35
	(ข) หมู่ฟังก์ชันของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการดูดซับเมื่อ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	36
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH	37
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาการดูดซับของเปลือกส้มโอ ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่ว	39
รูปที่ 4.7 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสีแบบ Langmuir	40
รูปที่ 4.8 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสีแบบ Freundlich	41
รูปที่ 4.9 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบ Langmuir	41
รูปที่ 4.10 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบ Freundlich	42
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับสังกะสี และตะกั่วระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ	43
รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคายซับของสังกะสี และตะกั่วระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ	44
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่ระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ	45
รูปที่ ก.1 องค์ประกอบของเครื่องอะตอมมิกแอ็บซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	53
รูปที่ ก.2 กระบวนการเกิดอะตอมอิสระในเปลวไฟ	54
รูปที่ ก.3 เครื่องมือวิเคราะห์แบบ cold vapor atomic absorption ใช้หาปริมาณปรอท	55
รูปที่ จ.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับสังกะสี	66
รูปที่ จ.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับสังกะสี	67
รูปที่ จ.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับตะกั่ว	68
รูปที่ จ.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับตะกั่ว	68

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	ค่า R^2 ไอโซเทอมแบบ Freundlich และ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	42
ตารางที่ ข.1	ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม	57
ตารางที่ ค.1	การหาปริมาณสัณกะสีที่เหลือจากการดูดซับกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	61
ตารางที่ ค.2	การหาปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	61
ตารางที่ ค.3	การหาปริมาณสัณกะสีที่เหลือจากการดูดซับกับระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	62
ตารางที่ ค.4	การหาปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับกับระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ค่าเฉลี่ย เปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	62
ตารางที่ ค.5	การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แสดงการหาปริมาณสัณกะสีที่เหลือจากการดูดซับกับค่าสารละลายสัณกะสี ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	63
ตารางที่ ค.6	การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แสดงการหาปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับกับค่าสารละลายสัณกะสี ที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	63

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ ค.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับการดูดซับการศึกษาประสิทธิภาพ	64
การคายซับ และการนำกลับมาใช้ใหม่ แสดงการหาปริมาณโลหะหนักที่เหลือ	
จากการดูดซับโลหะหนักสังกะสี ของเปลือกส้มโอทั้งสองชนิด ค่าเฉลี่ย	
เปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอทั้งสองชนิด	
ตารางที่ ค.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับการดูดซับ การศึกษาประสิทธิภาพ	64
การคายซับ และการนำกลับมาใช้ใหม่ แสดงการหาปริมาณโลหะหนักที่เหลือ	
จากการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว ของเปลือกส้มโอทั้งสองชนิด ค่าเฉลี่ย	
เปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอทั้งสองชนิด	
ตารางที่ ง.1 การหาไอโซเทอร์มแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุง	65
คุณภาพกับสังกะสี	
ตารางที่ ง.2 การหาไอโซเทอร์มแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุง	65
คุณภาพกับสังกะสี	
ตารางที่ ง.3 การหาไอโซเทอร์มแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุง	66
คุณภาพกับตะกั่ว	
ตารางที่ ง.4 การหาไอโซเทอร์มแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุง	66
คุณภาพกับตะกั่ว	
ตารางที่ ฉ.1 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับร้อยละการดูดซับสังกะสีของ	69
เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	
ตารางที่ ฉ.2 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับร้อยละการดูดซับตะกั่วของ	70
เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	
ตารางที่ ฉ.3 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา (นาที่) กับร้อยละการดูดซับ	71
สังกะสีของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	
ตารางที่ ฉ.4 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา (นาที่) กับร้อยละการดูดซับ	72
ตะกั่วของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ น.5 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับร้อยละการดูดซับสังกะสี ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	73
ตารางที่ น.6 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับร้อยละการดูดซับตะกั่ว ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	73
ตารางที่ น.7 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการดูดซับสังกะสี ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอ ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	74
ตารางที่ น.8 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการคายซับสังกะสี ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอ ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	74
ตารางที่ น.9 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการดูดซับตะกั่ว ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอ ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	75
ตารางที่ น.10 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการคายซับตะกั่ว ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอ ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ	75
ตารางที่ น.11 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการนำกลับมาใช้ใหม่ ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอ ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพในการดูดซับสังกะสี	76
ตารางที่ น.12 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการนำกลับมาใช้ใหม่ ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอ ที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพในการดูดซับตะกั่ว	76

นิยามศัพท์

ศัพท์ต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้ในโครงการพิเศษนี้

mg/l	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/g	มิลลิกรัมต่อกรัม
mg	มิลลิกรัม
g	กรัม
°C	องศาเซลเซียส
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
N	นอร์มัล
M	โมลาร์
ppm	Part Per Million
Zn	สังกะสี
Pb	ตะกั่ว
q_e	ปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
X	ปริมาณของตัวถูกดูดซับ
m	ปริมาณตัวดูดซับ
C_e	ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล
k	ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
n	ค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ การพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม ทำให้มีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมเกินขีดจำกัด โดยทั่วไปการปนเปื้อนของโลหะหนักมักเกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงชุบ โรงงานผลิตรถยนต์ โรงงานแบตเตอรี่ เป็นต้น ซึ่งสังกะสีและตะกั่ว เป็นโลหะหนักที่เป็นสารที่คงตัวและไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดินและดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมสูง ดังนั้นการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียจะช่วยลดการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งวิธีในการบำบัดโลหะหนักมีอยู่หลายวิธีด้วยกันเช่น การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เป็นต้น (ชุดิมา, 2543) ซึ่งแต่ละวิธีมีกระบวนการบำบัดที่ซับซ้อนเสียค่าใช้จ่ายสูงจึงจำเป็นต้องหาวิธีการบำบัดใหม่ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักสูง ค่าใช้จ่ายน้อย ต้นทุนต่ำวิธีการบำบัดที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่งคือการดูดซับ (Adsorption) เนื่องจากเสียค่าใช้จ่ายต่ำและมีกระบวนการในการบำบัดที่ไม่ซับซ้อน โดยใช้ตัวกลางในการดูดซับจากวัสดุจากธรรมชาติ

ส้มโอเป็นพืชทางเศรษฐกิจ และเปลือกส้มโอเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวกลางในการดูดซับ เปลือกส้มโอประกอบไปด้วยเพคติน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ในเปลือกส้มโอมีรูพรุนและเส้นใยเพื่อใช้ในการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักที่อยู่ในรูปสารละลายได้ (Ning-chuan, 2012)

ในโครงการพิเศษนี้จึงเลือกบำบัดสังกะสีและตะกั่ว โดยการใช้ตัวกลางในการดูดซับจากวัสดุธรรมชาติคือ เปลือกส้มโอที่นำมาปรับปรุงคุณภาพ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีและตะกั่วของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักสังกะสีและตะกั่ว เพื่อให้กระบวนการบำบัดเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดและสามารถพัฒนาให้ใช้ได้กับการดูดซับโลหะหนักอื่นๆ หรือน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการนำวัสดุที่ได้จากธรรมชาติมาใช้ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
3. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับตะกั่วและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพเป็นตัวกลางในการดูดซับ
4. เพื่อศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ
5. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวกลางในการดูดซับคือเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ
6. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการคายซับโลหะหนัก
7. เพื่อศึกษาการนำตัวกลางกลับมาใช้ใหม่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมและปรับปรุงคุณภาพของเปลือกส้มโอโดยใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคลอไรด์ และเอทานอล
2. สังเคราะห์น้ำเสียปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่ว
3. ศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ โดยใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscopy (SEM)
4. ศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ โดยใช้เครื่องมือ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
5. ศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับสังกะสีและตะกั่ว โดยกำหนดปัจจัยต่างๆ ดังนี้ ค่า pH ในช่วง 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ระยะเวลาในการสัมผัสในช่วง 0, 20, 40, 60 และ 80 นาที ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ในช่วง 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm และศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ
6. ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสีและตะกั่ว โดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ
7. ศึกษาการคายซับของสังกะสีและตะกั่ว และการนำกลับมาใช้ใหม่จากเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ
8. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการช่วยลดปริมาณของเสียจำพวกเปลือกส้มโอ ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้และนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดเป็นประโยชน์สูงสุด
2. เป็นแนวทางสำหรับนำไปใช้ในบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักจำพวกสังกะสี และตะกั่ว
3. เป็นการลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย
4. เป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้สำหรับศึกษาการดูดซับน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักชนิดอื่นต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก (ชุตินา, 2543)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความถ่วงจำเพาะมากกว่า 4 ขึ้นไปส่วนใหญ่เป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม Transition metals กลุ่มธาตุที่มีเลขอะตอมอยู่ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบ 5-7 ในตารางธาตุ ได้แก่ ทองแดง เงิน ทองคำ ทองคำขาว สังกะสี ตะกั่ว ดีบุก โครเมียม ทังสเตนแคดเมียม พรอท บิสมัท พลวง ไททาเนียม แทนทาลัม โคบอลต์ ยูเรเนียม นิกเกิล แมงกานีส โมลิบดีนัม และเบอรินัมเนียม เป็นต้น โลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนสมบัติด้านเคมีที่สำคัญคือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ

โลหะหนักเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต เป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในดินตะกอนที่อยู่ในน้ำ รวมถึงการสะสมอยู่ในสัตว์น้ำ โลหะหนักเป็นวัตถุพิษที่ถูกนำมาใช้ในหลายภาคส่วน เช่น ในด้านอุตสาหกรรมการเกษตร โลหะหนักเป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงและปุ๋ย ขณะเดียวกันทางการแพทย์ใช้โลหะหนัก เป็นส่วนผสมของยาอุปกรณ์ทางการแพทย์และเครื่องสำอางน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตเหล่านี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญให้เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตในการดำรงชีพ

2.1.1 สังกะสี (นันทนา และคณะ, 2538)

สังกะสีเป็นธาตุโลหะมีเลขอะตอม 30 มีสีขาวปนน้ำเงินจัดเป็นโลหะอ่อนแต่มี ductility ต่ำที่อุณหภูมิบรรยากาศถ้าเผาให้ร้อน 100-150°C สังกะสีจะมีค่า ductility สูงสามารถรีดเป็นแผ่นหรือเป็นเส้นได้ง่ายมีคุณสมบัติสามารถทนต่อการกัดกร่อน (Corrosion) ในบรรยากาศธรรมดาได้ดี แต่ไม่ทนต่อกรดและด่าง

ประเภทของแร่สังกะสี แร่สังกะสีที่พบในแหล่งต่างๆ ของโลก จำแนกตามสภาพการเกิดทางธรณีวิทยาได้ 2 ประเภท คือ

2.1.2.1 แร่สังกะสีปฐมภูมิ (Primary Zinc) หมายถึงแร่สังกะสีที่เกิดขึ้นมาและยังไม่มีผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติ ได้แก่ แร่สฟาเลอไรต์ (Sphalerite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซัลไฟด์

(Sulphide) มักพบเป็นส่วนใหญ่ในแหล่งต่างๆของโลก นอกจากนี้ยังมีแร่สังกะสีซิงไคต์ (Zincite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีออกไซด์ (Oxide) พบแหล่งใหญ่ในรัฐนิวเจอร์ซีย์ สหรัฐอเมริกา

2.2.2.2 แร่สังกะสีทุติยภูมิ (Secondary Zinc) หมายถึง แร่สังกะสีที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางธรรมชาติแล้ว ได้แก่ แร่เฮมิมอร์ไฟต์ (Hemimorphite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีซิลิเกต (Silicate), แร่สมิทซอไนต์ (Smithsonite) และแร่ไฮโดรซิงไคต์ (Hydrozincite) ซึ่งเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต (Carbonate) แร่สังกะสีที่พบในประเทศไทยพบที่แหล่งผาแดง อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ส่วนใหญ่เป็นแร่สังกะสีซิลิเกตและบางส่วนเป็นแร่สังกะสีคาร์บอเนต

ความเป็นพิษ สังกะสีในรูปธาตุไม่ปรากฏความเป็นพิษ หากอยู่ในรูปสารประกอบมีความเป็นพิษอยู่หลายชนิดแต่จัดอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถถูกขจัดออกจากร่างกายได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าได้รับสารในปริมาณมากการสัมผัสกับผิวหนังเป็นเวลานานสามารถทำให้เกิดผิวหนังอักเสบอย่างรุนแรง การได้รับฝุ่นหรือควันปริมาณมากสามารถทำให้เกิดการรบกวนระบบทางเดินหายใจอย่างชัดเจน การไอแสบคอปวดกล้ามเนื้อ และอาการคลื่นไส้ตามด้วยไข้และอาการหนาวสั่น การได้รับสารนี้อย่างมากอาจทำให้เกิดอาการหลอดเลือดอักเสบ หรือปอดบวม โดยผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินการได้รับสารเป็นเวลานานสามารถก่อให้เกิดความผิดปกติของเอนไซม์ในตับแบบชั่วคราว อาจเกิดอาการท้องร่วงเป็นแผลในกระเพาะอาหารและเลือดออกในทางเดินอาหารด้วย

ประโยชน์ของแร่สังกะสีได้แก่การดูดเอาโลหะสังกะสีไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เคลือบแผ่นเหล็ก สังกะสีมุงหลังคา กระจกป้องกัน รังสี ในเปลือกในของถ่านไฟฉาย ใช้หล่อส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์ประกอบรถยนต์ เช่น คาร์บูเรเตอร์ นอกจากนี้ยังใช้ทำยารักษาโรคและเคมีภัณฑ์ต่างๆ

2.1.2 ตะกั่ว (ซีเวิร์ตน์ และคณะ, 2544)

ตะกั่วเป็นธาตุโลหะตัวที่ 5 ของหมู่ 4A ในตารางธาตุ มีสัญลักษณ์ทางเคมีว่า Pb มีเลขออกซิเดชัน 0, +2 และ +4 ตะกั่วมีสถานะออกซิเดชัน +2 ที่เสถียร สมบัติทางกายภาพของตะกั่วประกอบด้วย ความหนาแน่น 11.3 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร จุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส จุดเดือด 1,744 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าดี ออกไซด์ของตะกั่วอยู่ในรูป PbO , PbO_2 และ PbO_4 ซึ่ง Pb^{2+} จะเสถียรกว่า Pb^{4+} เกือบของตะกั่ว $2+$ โดยทั่วไปไม่ละลายน้ำ ยกเว้น อะซิเตตและไนเตรต เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวอย่างอิสระให้ไอออน Pb^{2+}

การแพร่กระจายและการสะสมของตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง ได้แก่ ทางเดินหายใจ ทั่วร่างกายหรือช่องของตะกั่วและฝุ่นขนาดเล็กกว่า 0.75 ไมครอน สามารถผ่านสู่ถุงลมในปอดและผ่านสู่กระแสเลือด ทางเดินอาหารเกิดจากการปนเปื้อนในอาหาร น้ำ โดยตะกั่วจะผ่านเข้าสู่กระเพาะอาหาร

และทางผิวหนัง ตะกั่วที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายระยะแรกมักอยู่ในสภาพ Lead diphosphate ซึ่งสามารถกระจายไปตามเนื้อเยื่ออ่อน (Soft tissue) เช่น สมอง ปอด ตับ ม้าม ไชกระดูก และเส้นผม เป็นต้น หลังจากนั้นบางส่วนเข้าไปสะสมที่กระดูกในสภาพ Lead phosphate ทั้งนี้ประมาณร้อยละ 30 ของตะกั่วในร่างกายจะสะสมอยู่ที่เนื้อเยื่ออ่อนและอีกร้อยละ 70 สะสมอยู่ที่กระดูก

ความเป็นพิษของตะกั่วแบ่งได้ 2 ประเภท คือ การได้รับพิษเฉียบพลัน ผู้ที่ได้รับสารตะกั่วในปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้น มักจะเกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน และปวดท้องอย่างรุนแรง รวมทั้งมีอาการทางประสาท ได้แก่ ความคิดสับสน การทำงานของร่างกายไม่ประสานงานกัน สูญเสียทักษะที่เคยทำได้บางอย่าง ชัก หดสติ และมีอาการทางสมอง (Acute lead encephalopathy) การได้รับพิษเรื้อรัง ในผู้ป่วยที่ได้รับสารตะกั่วที่มีปริมาณน้อยกว่าที่ก่อให้เกิดพิษเฉียบพลันเป็นระยะเวลานาน มักก่อให้เกิดอาการเป็นพิษเรื้อรัง ซึ่งมีอาการตามระบบต่างๆ ได้แก่ระบบประสาทส่วนกลางและส่วนรอบ (Central and Peripheral nervous system) ระบบทางเดินอาหาร, ระบบการสร้างเม็ดเลือด และระบบไต ปัจจุบันมีการนำตะกั่วมาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งทำให้มีอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบมีจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วมากที่สุด นอกจากนี้ยังมีการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า เป็นต้น

2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย (ชุดิมา, 2543)

กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมักมีหลายวิธีการพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับก่อนบำบัดความเหมาะสมได้แก่ คุณสมบัติของน้ำเสีย คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation)

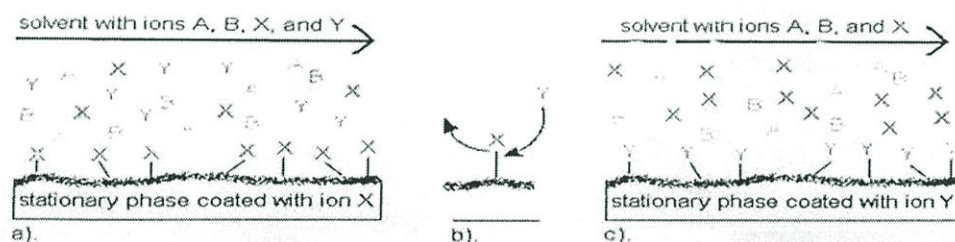
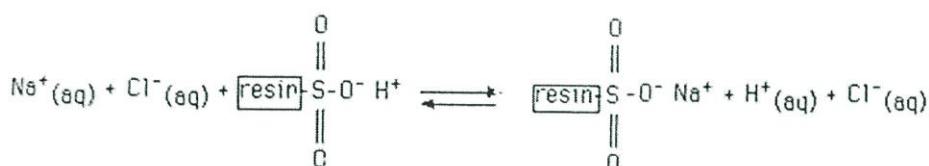
เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด การทำให้เกิดตะกอน (Precipitation) อาศัยหลักการเติมสารเคมีลงไปทำปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มตะกอนตกลงมา โดยทั่วไปสารแขวนลอยจะมีประจุลบ ดังนั้นสารเคมีที่เติมลงไปจึงเป็นประจุบวกเพื่อทำให้เป็นกลาง การแยกด้วยวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูงแต่ก็มีประสิทธิภาพสูงเช่นกัน ดังนั้นวิธีนี้จะเลือกใช้เมื่อเมื่อไม่สามารถแยกได้โดยกระบวนการทางชีวภาพหรือกายภาพ นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธีด้วยกันคือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนซัลไฟด์

การตกตะกอนส่วนใหญ่จะใช้สารละลายเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น เป็นตัวตกตะกอนโลหะหนัก ทั้งนี้เนื่องจากโลหะหนักส่วนใหญ่จะตกตะกอนไฮดรอก

ไซค์ได้ใน pH ที่เป็นเบสในการตกตะกอนโลหะหนักแต่ละชนิด จะต้องคำนึงถึง pH ที่เหมาะสมในการตกตะกอนของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสีย

2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

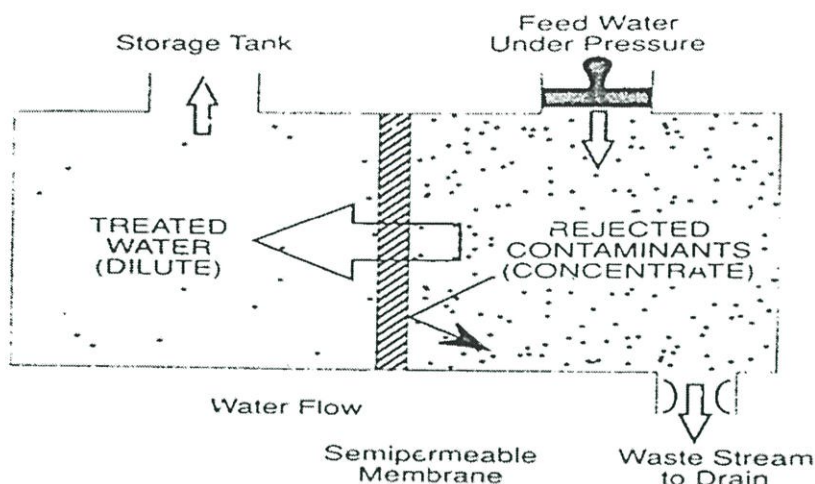
วิธีนี้จะอาศัยอนุภาคที่ยึดจับไอออนของโลหะหนักเพื่อแลกเปลี่ยนไอออนที่จับอยู่บนผิวอนุภาค อนุภาคนี้นักเรียกว่าเรซิน ซึ่งมีทั้งชนิดแคตไอออน (Cation exchange resin) และแอนไอออน (Anion exchange resin) การใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออนนี้ในการกำจัดโลหะหนักจะใช้เรซินชนิดแคตไอออน โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปโซเดียมเรซิน หรือไฮโดรเจนเรซิน เป็นต้น เรซินที่ใช้เป็นพวก Insoluble organic acid ในรูปของซัลโฟนิก หรือคาร์บอกซิลิกแอซิด วิธีการนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อย เนื่องจากเรซินมีความเฉพาะเจาะจง แต่จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ด้วยจะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซินเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด และจะต้องมีการล้างเรซินด้วยกรด เพื่อจะนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้



รูปที่ 2.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Rohm and Haas, 2008)

2.2.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse osmosis)

เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสีย โดยบังคับให้เกิดการย้อนกลับของปรากฏการณ์ออสโมซิส โดยการให้ความดันไฮดรอลิก (Hydraulic pressure) แก่สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงเพื่อให้เกิดการออสโมซิสจากสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน แยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น



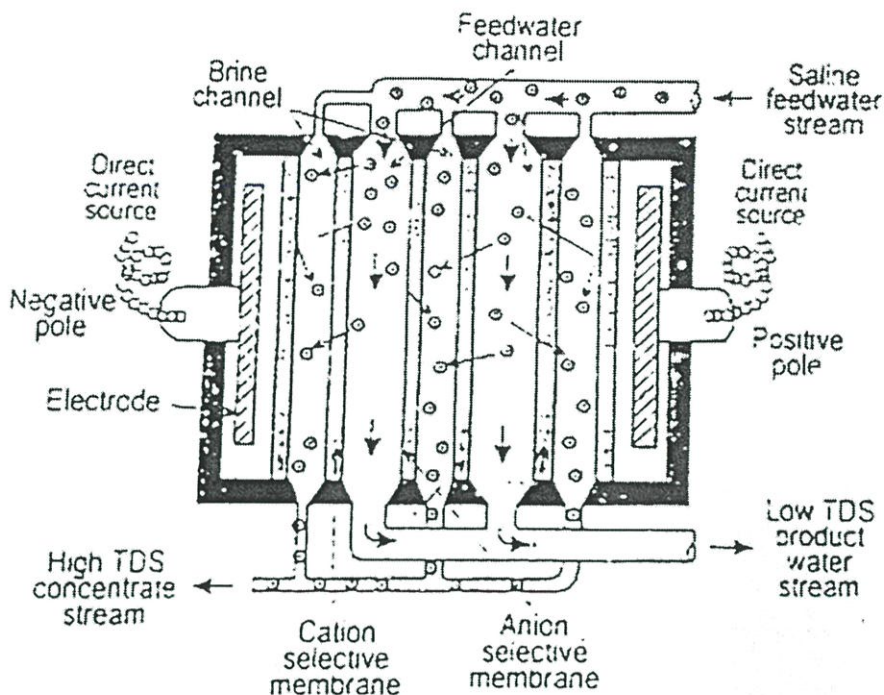
รูปที่ 2.2 การออสโมซิสย้อนกลับ (Bruce and Sharon, 2008)

2.2.4 การระเหย (Evaporation)

การระเหยนํ้าออกนี้เป็นวิธีการง่ายๆ ที่ใช้ในการทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ซึ่งวิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงๆ เท่านั้น และมีข้อเสียคือเป็นวิธีการที่ใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

2.2.5 การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นวิธีการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้ากระแสตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion selective membrane) กลไกของวิธีการนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีการนี้มีต้นทุนการก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดขนาดของไอออนที่ต้องการได้



รูปที่ 2.3 การทำงานของระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Buros, 1990)

2.2.6 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลาวิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูงแต่ไม่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

2.2.7 การดูดซับ (Adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หรือใช้สารทางชีวภาพเป็นทางเลือก ได้แก่ เทคโนโลยีดูดซับทางชีวภาพโดยใช้มวลชีวภาพธรรมชาติในการดูดซับ ทำให้ประหยัดงบประมาณในการกำจัดโลหะหนักและเป็นมิตรกับระบบนิเวศน์ อีกทั้งสารดูดซับทางชีวภาพสามารถนำกลับไปใช้ในการกำจัดได้อีก

2.3 กระบวนการดูดซับ (Adsorption)

เป็นวิธีการหนึ่งที่มีนิยมนำมาใช้กันมากในด้านการบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถกำจัดสารปนเปื้อนขนาดเล็กจนถึงขั้นโมเลกุล ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือกรองแบบธรรมดา การดูดซับเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สถานะใดๆ

2.3.1 หลักการดูดซับ (ชุดิมา, 2543)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้จับและติดที่ผิวของมันซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุมมีประสิทธิภาพดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพคือต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่น

2.3.2 ประเภทของการดูดซับ

การดูดซับที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

2.3.2.1 การดูดซับทางกายภาพ

เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander Waals forces) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้นซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะอยู่บนชั้น โมเลกุลของสารก่อนหน้านั้น จำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพ

ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของสารดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้

2.3.2.2 การดูดซับทางเคมี

เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้将有ความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (Irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพที่สามารถผันกลับเองได้ (Reversible) เนื่องจากการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต่ำ ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

2.3.3 กลไกของกระบวนการดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นกระบวนการที่พวกสารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กซึ่งละลายอยู่ในน้ำให้อยู่บนผิวของสารอีกชนิดหนึ่ง โดยที่สารละลายหรือสารแขวนลอยขนาดเล็กนี้เรียกว่า Adsorbate ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารที่ถูกดูดติดเรียกว่า Adsorbent การดูดติดผิวนี้จะเป็นการดูดติดแบบระหว่างสถานะ (Phase) ต่างๆทั้ง 3 สถานะคือ ของเหลว (Liquid) ก๊าซ (Gas) และของแข็ง (Solid) ซึ่งมีได้ทั้งแบบของเหลว-ของเหลว ก๊าซ-ของเหลว ก๊าซ-ของแข็ง และของเหลว-ของแข็ง โดยในที่นี้จะพิจารณาถึงเฉพาะแบบของเหลว-ของแข็ง (Liquid-Solid Interface) ในการดูดติดผิวโมเลกุลของสารละลายหรือสารแขวนลอยจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนตัวดูดซับโมเลกุลของสารส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่กับผิวภายในโพรงของตัวดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาตัวดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่กับตัวดูดซับโดยในการเกาะติดจะมี Driving Force อยู่ 2 แบบคือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.3.4 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

2.2.4.1 กลไกการดูดซับ (ชุตินา, 2543)

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างสารดูดซับเพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2.2.4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer) (ชุตินา, 2543)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลายมี 4 ขั้นตอน

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับ

4. การดูดซับ (Adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างตัวถูกละลายกับ active sites บนผิวตัวดูดซับ เกิดขึ้นเร็วมากและอาจดูดซับได้ด้วยแรงทางกายภาพและทางเคมีหรือทั้ง 2 แรงพร้อมกัน

2.3.5 ประเภทของตัวดูดซับ

2.3.5.1 สารอนินทรีย์

ได้แก่ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันด์ เป็นต้น สารธรรมชาติ มักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่ตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์นี้สามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้มีการใช้ประโยชน์จากตัวดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีข้อจำกัดมาก

2.3.5.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

อาจจัดเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์แต่เป็นตัวดูดซับที่ดีกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ จึงเป็นที่นิยมกันมากเนื่องจากเป็นถ่านที่ผ่านการกระตุ้นเพื่อให้มีความพรุนมากและมีพื้นที่ผิวภายในสูง โดยทั่วไปมีพื้นที่ประมาณ 450-1500 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนตั้งแต่ 10-1000 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากชิ้นส่วนของพืชและสัตว์จะมีแร่ธาตุที่เป็นอันตรายน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านหิน

2.3.5.3 ประเภทของสารอินทรีย์สังเคราะห์

ได้แก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange resin) สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งถือว่ามีความต่ำเมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์แต่สามารถปรับสภาพนำมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าและสารที่ใช้มีราคาถูก

2.3.6 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.3.6.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของการดูดซับ (Size and Surface Area)

มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับและพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางในการดูดซับเมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน แต่สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุน อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่สารภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

2.3.6.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Nature of Adsorption)

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารอย่างหนึ่ง คือความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผันกับอัตราการดูดซับ

2.3.6.3 อัตราการปั่นกววน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่การปั่นกววนของระบบ ถ้าน้ำมีการปั่นกววนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบด้วยสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีการปั่นกววนสูงทำให้ความหนาแน่นของชั้นฟิล์มลดลง โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของสารดูดซับ

2.3.6.4 ช่วงระยะเวลาการสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาการสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ

2.3.6.5 ค่า pH

ค่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากค่า pH ทำให้สารละลายทองแดงเกิดการตกตะกอนที่ pH 6 และ 7 ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูง เนื่องจากในสารละลายที่นำไปวัดด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectroscopy (AAS) อาจมีทองแดงเหลืออยู่ในสารละลายน้อยและประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงจะลดลงเมื่อสารละลายมีค่า pH ต่ำ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อการดูดซับ

2.3.6.6 อุณหภูมิ

ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic)

2.3.7 การศึกษาความสามารถในการดูดซับหรือไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ความสามารถในการดูดซับเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับที่ใช้กับความเข้มข้นของสารที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุลเพื่อคัดเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสมที่สุดโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์

2.3.7.1 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

เป็นไอโซเทอมที่เสนอโดยเออร์วิงแลงเมียร์ (Irving Langmuir) ในปี ค.ศ. 1916 ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) มีสมมติฐานคือโมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งที่แน่นอน (adsorption site) โดยในแต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของตัวถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้นในแต่ละตำแหน่งมีค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน

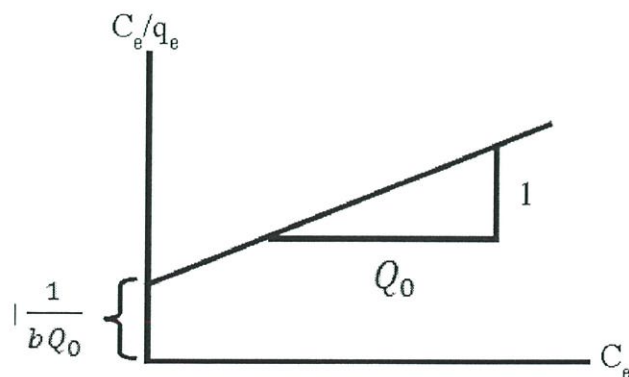
จากการศึกษาไอโซเทอมของแลงเมียร์ที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

$$q_e = \frac{X}{m} = \frac{Q_0 b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ q_e = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
 X = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ (mg)
 m = เป็นปริมาณตัวดูดซับ (g)
 C_e = เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
 Q_0 = เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับอิ่มตัวแบบชั้นเดียว
 b = เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

หรือ $\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b Q_0} + \frac{C_e}{Q_0} \quad \dots\dots\dots(2)$

เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{q_e}$ กับ C_e จะได้กราฟเส้นตรงมีจุดตัดแกนเป็น $\frac{1}{b Q_0}$ และมีความชันเท่ากับ $\frac{1}{Q_0}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{C_e}{X/m}$ และ C_e โดยอาศัยสมการการดูดซับของแลงเมียร์

(Cheremisinoff and Morresi, 1987)

2.3.7.2 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm)

เป็นไอโซเทอมที่เสนอโดยฟินเลย์ฟรอนด์ลิช (Findlay Freundlich) ใช้สำหรับการดูดซับบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ (Rough Surface) โดยแต่ละพื้นที่ผิวที่เกิดการดูดซับจะให้ค่าความร้อนของการดูดซับออกมาไม่คงที่และมีการรวมพื้นที่ผิวที่ให้ค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันเข้าด้วยกันข้อเสียของสมการฟรอนด์ลิชคือใช้อธิบายการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสูงๆ ได้ไม่ดี

จากการศึกษาไอโซเทอมของฟรอนด์ลิชที่สภาวะสมดุลสามารถแสดงความสัมพันธ์ของการดูดซับสารละลายบนผิวของแข็งได้ดังสมการ

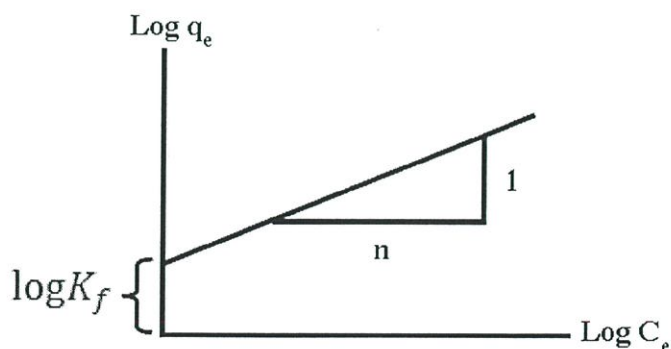
$$q_e = \frac{X}{m} = K_f C_e^{1/n} \dots\dots\dots(3)$$

เมื่อ	q_e	=	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับหนัก 1 กรัม
	X	=	เป็นปริมาณของตัวถูกดูดซับ (mg)
	m	=	เป็นปริมาณตัวดูดซับ (g)
	C_e	=	เป็นความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/L)
	K_f	=	เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ
	n	=	เป็นค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

จากสมการของฟรอนด์ลิชเมื่อใส่ลอการิทึม (Logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log \frac{X}{m} = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots(4)$$

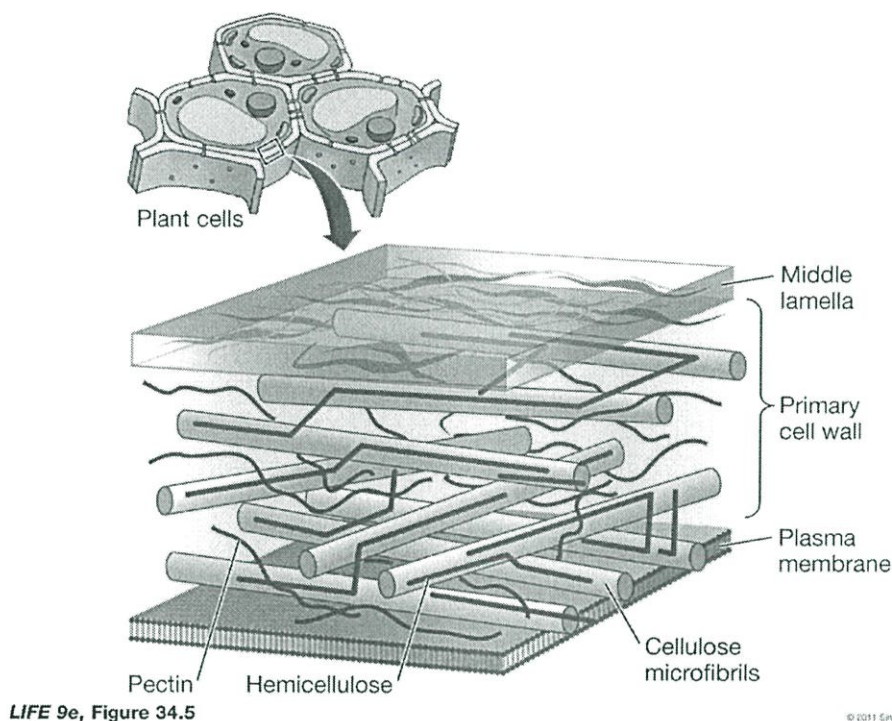
เมื่อพล็อตกราฟระหว่าง $\log X/m$ กับ $\log C_e$ ที่อุณหภูมิคงที่ จะได้กราฟเส้นตรงจุดตัดแกน Y สามารถนำมาหาค่า K ได้และความชันของกราฟเป็น $1/n$ ก็สามารถหาค่า n



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ และ $\log C_e$ โดยอาศัยสมการการดูดซับของ mX ฟรอนด์ลิช

(Cheremisinoff and Morresi, 1987)

2.4 องค์ประกอบทางเคมีของพืช



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและองค์ประกอบของเซลล์พืช (Michael, 2003)

วัสดุพืชในธรรมชาติจะประกอบด้วยสารเคมีอินทรีย์และสารเคมีอนินทรีย์อยู่ด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิกนิน สารประกอบฟีนอล กรดอะมิโน กรดไขมัน กรดนิวคลีอิก ฟอสเฟต ซัลเฟต ไนเตรต c]t แมกนีเซียม เป็นต้น จากองค์ประกอบพืชที่กล่าวมาส่วนใหญ่เป็นสารเคมีอินทรีย์ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ ลิกนิน(Lignin) และคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) สำหรับคาร์โบไฮเดรตถ้าแยกตามปริมาณที่เป็นองค์ประกอบในพืชจะพบว่าที่สำคัญได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) และเฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

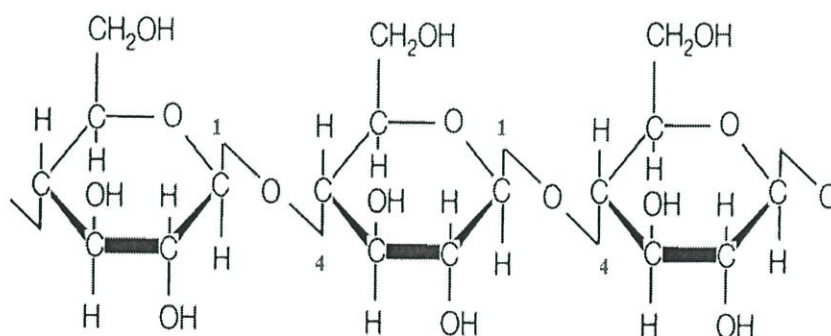
2.4.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมเลกุลที่ต่อกันเป็นโซ่ยาวของกลูโคส พบมากในพืช เพื่อทำหน้าที่เสริมโครงสร้างของลำต้นและกิ่งก้านของพืช ผักและผลไม้ให้แข็งแรง เป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์พืชและพบว่าสาร organic carbon ในโลกนี้มากกว่าครึ่งหนึ่งเป็นเซลลูโลส

เซลลูโลสประกอบด้วย D-glucose molecules ที่จัดเป็นเส้นยาวตรงเชื่อมต่อกันด้วย β -1,4-glycosidic bond ร่างกายคนเราไม่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้ แต่จะมีการขับถ่ายออกมาในลักษณะของกากเรียกว่าเส้นใยอาหาร ช่วยกระตุ้นให้ลำไส้ใหญ่ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ทำให้ขับถ่ายสะดวก พืชประเภทผัก ถั่ว และผลไม้ จัดเป็นแหล่งที่ให้เส้นใยอาหาร เพราะมีเซลลูโลสอยู่ปริมาณสูง เซลลูโลสเมื่อย่อยจะแตกตัวออกให้น้ำตาลเซลลูโลสเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ เพราะมีโมเลกุลใหญ่มาก ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,250-12,500 โมเลกุลพบมากที่สุดในพืชเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืช ในพืชผักผลไม้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับเนื้อเยื่อของพืช มีมากตามใบผัก ก้านผัก และเปลือกนอกของผลไม้ การรับประทานเซลลูโลสเป็นประโยชน์คือช่วยในการขับถ่ายได้โดยทำให้เป็นกากอาหารในลำไส้ทำหน้าที่กระตุ้นให้ลำไส้ใหญ่เกิดการขับถ่ายกากอาหารที่ไม่ย่อย และป้องกันท้องผูก เซลลูโลสเมื่อถูกย่อยจะแตกตัวออกให้น้ำตาลกลูโคสจำนวนมาก เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่มีรสหวาน มีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีสูตรโครงสร้างซับซ้อน มีสูตร $(C_6H_{10}O_5)_n$ ประกอบด้วยโมเลกุลของโมโนแซ็กคาไรด์ จำนวนมากมาย หลายพัน โมเลกุล

ชนิดของเซลลูโลสแบ่งตามความสามารถในการละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เป็น 3 ชนิด คือ

1. แอลฟา-เซลลูโลส (α -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ไม่ละลายในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5%
2. เบต้า-เซลลูโลส (β -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% ที่อุณหภูมิห้อง แต่สามารถตกตะกอนได้ง่ายในสารละลายที่มีสภาพที่เป็นกรด
3. แกมมา-เซลลูโลส (γ -cellulose) คือ เซลลูโลสที่ละลายได้ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 17.5% และสารละลายกรด แต่สามารถตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์



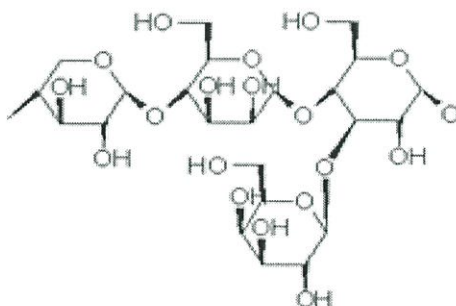
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของเซลลูโลส (ปรีชา, 2528)

2.4.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ประมาณ 200 โดยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบในเฮมิเซลลูโลสหลายชนิด กล่าวคือมีไซโลสมากที่สุดถึง 85–90% และส่วนที่เหลือเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 และ 6 กรดแมนนูโรนิก (Mannuronic acid) และกรดกาแลกตูโรนิก (Galacturonic acid) เป็นองค์ประกอบ เฮมิเซลลูโลสจะถูกละลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจางหรือเอนไซม์เพราะเฮมิเซลลูโลสไม่มีรูปร่างแน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสลับ จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย

โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสของพืชประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณ 1 ใน 3 ของน้ำหนักแห้ง โดยอยู่ร่วมกับเซลลูโลสและลิกนินทำให้เกิดเป็นผนังเซลล์พืชที่แข็งแรง เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลสอะราบิโนส และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส แมนโนส และกาแลกโตสองค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้าทั้งนี้ไม่ค่อยพบเฮมิเซลลูโลสที่มีไซโลสเพียงชนิดเดียวในธรรมชาติ จึงมักพบอยู่ร่วมกับน้ำตาลชนิดอื่นๆ และมีส่วนของลิกนินจับตัวกันอยู่อย่างหนาแน่นด้วยพันธะโควาเลนต์ โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสจะมีความเป็นกรด เนื่องจากมีหมู่ 4-เมทิล-แอลฟา-ดี-กลูโคส (4-methyl- α -D-glucose) จับอยู่กับออกซิเจนตำแหน่งที่ 2 ซึ่งการมีหมู่แทนที่ในตำแหน่งที่ 2 และ 3 ส่งผลให้สามารถสกัดเฮมิเซลลูโลสออกด้วยสารละลายเบส แต่ขั้นตอนของการสกัดเฮมิเซลลูโลสออกนั้นอาจต้องมีการกำจัดลิกนิน (Delignification) ร่วมด้วย

สมบัติของเฮมิเซลลูโลสส่วนใหญ่จะพบเฮมิเซลลูโลสในผนังเซลล์ชั้นนอกสุด และพบส่วนนี้อยู่ในผนังเซลล์ชั้นที่ 2 โดยจะถูกย่อยสลายและสกัดออกจากผนังเซลล์พืชได้ในภาวะที่ไม่รุนแรง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลมีโซ่กิ่งเป็นจำนวนมากคล้ายกับโครงสร้างของเพคติน โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสจะชอบน้ำทำให้เกิดการรวมตัวกับน้ำเกิดเป็นเจลได้ขณะที่เมื่อเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์จะไม่สามารถสกัดออกได้ด้วยน้ำแต่สามารถละลายได้ในเบส

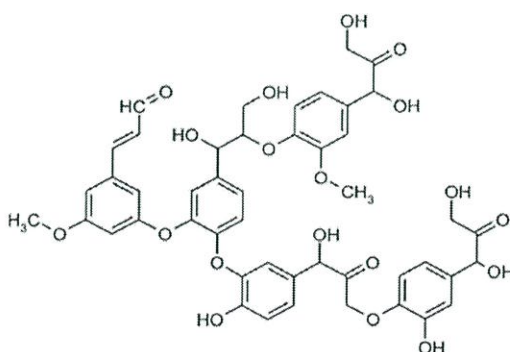


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส (ปรีชา, 2528)

2.4.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับเซลลูโลส และพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็นโครงสร้าง 3 มิติโดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วยพันธะอีเทอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุลทำให้ลิกนินทนทานต่อการย่อยสลายด้วยสารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ดังนั้นจึงต้องอาศัยสารเคมีในการแยกลิกนินออกจากพอลิแซ็กคาไรด์ โครงสร้างของลิกนินมีโครงสร้างที่เกิดจากหน่วยที่เหมือนกันซ้ำๆ ประกอบเป็นโมเลกุลที่ใหญ่มีการเชื่อมต่อกันของหน่วยย่อยคือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (Phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมธิลอยู่บนโมเลกุลลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้า และไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมทอกซี (Methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน

สมบัติของลิกนินลิกนินมีสมบัติที่สำคัญคือ การละลายในตัวทำละลาย โดยปกติลิกนินจะไม่ละลายน้ำและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงสามารถสกัดลิกนินได้ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีขั้วสูง ขณะที่บางส่วนในกลุ่มของอัลคาไลน์ลิกนิน (Alkaline lignin) สามารถละลายได้ในตัวทำละลายพวกไดออกเซน (Dioxane) ไพริดีน (Pyridine) และสารละลายเบสเจือจางได้นอกจากนี้เมื่อมีการเติมหมู่เมธิล (Methylation) และหมู่อะซิติก (Acetylation) แทนที่ตำแหน่งต่างๆ บนวงแหวนเบนซีนในโครงสร้างของลิกนินทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเลตได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุด 280 นาโนเมตร ทั้งนี้การเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ก็เป็นการเพิ่มหมู่ไฮดรอกซิลให้แก่โครงสร้างของลิกนินทำให้ลิกนินสามารถดูดกลืนแสงได้ด้วยการที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตามธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ลิกนินอยู่ร่วมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์ เชื่อมระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้การใช้ประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องมีการปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อน และป้องกันผลเสียที่เกิดจากลิกนิน รวมทั้งให้เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสอยู่ในสภาพที่เหมาะสมต่อการใช้ประโยชน์ต่อไป



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของลิกนิน (ปรีชา, 2528)

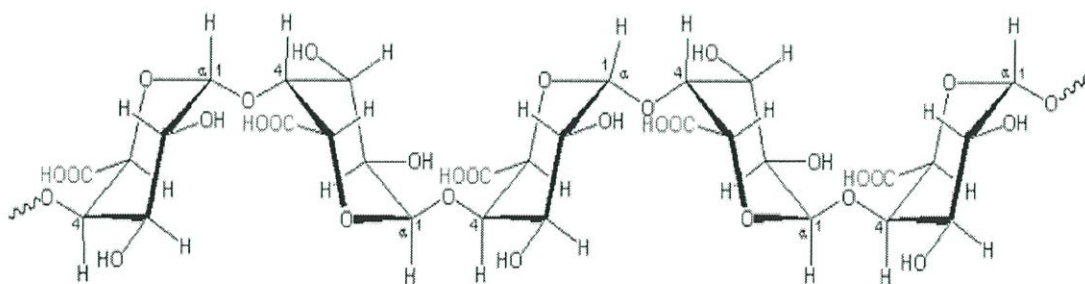
2.4.4 เพคติน (Pectin)

เพคติน (Pectin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภท Heteropolysaccharide มีหน่วยย่อยคือกรดกาแล็กทูโรนิก (D-galacturonic acid) ประมาณ 65% โดยน้ำหนัก และเมทิลกาแล็กทูโรเนต และน้ำตาลหลายชนิด เช่น Rhamnose, Galactose และ Arabinose พบตามธรรมชาติในผนังเซลล์ของพืช (Plant cell wall) และรอยต่อระหว่างผนังเซลล์ โดยรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส (Cellulose) ทำหน้าที่ยึดเกาะผนังเซลล์ให้ติดกันคล้ายเป็นซีเมนต์เพคตินที่พบในพืชประกอบด้วยสาร 4 ชนิด คือ โปรโทเพคติน (Protopectin) กรดเพกทินิก (Pectinic acid) เพคติน (Pectin) และกรดเพกติก (Pectic acid)

เพคตินมีผลต่อเนื้อสัมผัสของผักผลไม้สดและผลิตภัณฑ์จากผักผลไม้ เพคตินที่อยู่ในผลไม้ดิบหรือห่าม จะอยู่ในรูปของโปรโทเพกติน ซึ่งไม่ละลายน้ำ ระหว่างการสุกของผลไม้โปรโทเพกตินจะเปลี่ยนเป็นเพคติน ซึ่งละลายน้ำได้ ทำให้ผลไม้มีเนื้อสัมผัสนุ่มลง ความแน่นเนื้อลดลง ในผลไม้มีเอนไซม์ที่ย่อยเพคติน (Pectinase) ได้แก่ เพคตินเมทิลเอสเทอเรส (Pectin methyl esterase) เมื่อเซลล์แตกเอนไซม์นี้จะย่อยสลายเพคติน

การใช้เพคตินในอาหารเพคตินเป็นไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ใช้ในอาหารเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) เพคตินที่ผลิตเป็นการค้าสกัดได้จากเปลือกของผลไม้ตระกูลส้ม (Citrus) กากของแอปเปิ้ลที่คั้นน้ำแล้ว (Apple pomace) และหัวบีต (Beet)

โครงสร้างโมเลกุลของเพคตินเป็น Polysaccharide ประเภท Heteropolysaccharide โมเลกุลของเพคตินเป็นโพลิเมอร์ของ α -D-galacturonic acid ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (Glycosidic bond) ชนิดแอลฟา 1-4 ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลอิสระ (COOH) และหมู่คาร์บอกซิลที่รวมอยู่กับเมทิล (COOCH_3) ด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification)



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของเพคติน (Tamaki, 2007)

คุณสมบัติทางเคมีของเพคติน สารกลุ่มเพคตินเป็นโพลีแซ็กคาไรด์เชิงซ้อนในพืช พบในพืชชั้นสูงโดยปรากฏในชั้นระหว่างเซลล์หรือจุดเชื่อมต่อระหว่างผนังเซลล์ ทำให้เกิดช่องสำหรับอาหารและน้ำผ่านในผนังเซลล์ สารกลุ่มเพคตินเป็นสารเคลือบเส้นใยเซลลูโลสที่สำคัญและอาจเชื่อมต่อกับ

พันธุ์โควาเลนต์กับโพลิเมอร์อื่นๆ สารกลุ่มเพคตินจัดจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ โปรโตเพคติน กรดเพคติก และกรดเพคติก เพคตินมีอิทธิพลต่อการพัฒนาการการเจริญไปถึงการแก่ชรา และมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อเยื่อพืชและผลไม้

2.5 ส้มโอ (Pomelo)

ส้มโอ เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางในตระกูลเดียวกับส้ม มีชื่อสามัญในภาษาอังกฤษว่า Pomelo ซึ่งมีรากศัพท์มาจากภาษาดัตช์ Pampelmoose ซึ่งแปลตรงตัวว่า ส้มที่ถูกทำฟักทอง แหล่งกำเนิดอยู่ในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีชื่อวิทยาศาสตร์ คือ *Citrus grandis* (L.) Osbeck จัดอยู่ในวงศ์ Rutaceae เป็นไม้ผลเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของไทย นิยมปลูกทางภาคตะวันตกของประเทศ ส้มโอมีวิตามินและเกลือแร่มากมายเช่น วิตามินซี ฟอสฟอรัส แคลเซียม กรดอินทรีย์ โมโนเทอร์ปีน และในส้มโอมีสารที่ช่วยต้านมะเร็งได้ด้วย

ลักษณะภายนอกของส้มโอ ผลรูปทรงกลมหรือรูปแป้น เส้นผ่าศูนย์กลาง 11-17 เซนติเมตร บริเวณขั้วผลนูนขึ้นเป็นกระจุก ผลอ่อนมีสีเขียวพอแก่มีสีเขียวอมเหลือง เปลือกผลหนา 1-2 เซนติเมตร ผิวผลเรียบ มีต่อมน้ำมันมาก ข้างในมีเยื่อสีขาวหรือสีชมพู ลักษณะหยาบนุ่มรสหวานหรือขมเล็กน้อย เนื้อผลที่เป็นถุงน้ำ เปลือกผลมีรสขมเผื่อนปร่า หอมร้อน

สรรพคุณและประโยชน์ของส้มโอใบนั้นสามารถนำมาเป็นยาแก้ปวดข้อ แก้ท้องอืดแน่น แก้ปวดหัวโดยการตำและพอกบนศีรษะ ดอกสามารถแก้ปวดกระเพาะอาหาร แก้ปวดกระบังลม ขับเสมหะ ขับลมผลสามารถแก้มาสุรา ขับลมในลำไส้และกระเพาะอาหาร ทำให้เจริญอาหารเหมาะสำหรับสตรีมีครรภ์เบื่ออาหาร ปากไม่รื้อสอาหารเปลือกผลสามารถเป็นยาขับลม ช่วยขับเสมหะ แก้ไออัดแน่น หน้าอก ใจ จุกแน่น ปวดท้องน้อย ไล่เลื้อน หรือดื่มน้ำอาบแก้คัน ใช้ตำพอกฝีเม็ล็ดสามารถแก้ไล่เลื้อน แก้ปวดท้อง ลำไส้เล็กหัดตัวผิดปกติรากสามารถแก้หวัด แก้ไอ แก้ปวด ปวดท้องน้อยและกระเพาะอาหาร ไล่เลื้อน

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืชสกุลส้ม (ภาควิชาพืชสวน มหาวิทยาลัยแม่โจ้)

ส่วนของผลส้มจัดเป็นผลแบบ Berry ชนิด Hesperidium ซึ่งเจริญขึ้นมาจากส่วนของรังไข่โดยตรง มีจำนวนประมาณ 10 carpel อาจมากกว่าหรือน้อยกว่ากันเล็กน้อยเชื่อมติดกันเป็นวงกลมล้อมอยู่รอบแกนกลาง (Central axis) การพัฒนาของผนังรังไข่ (Ovary wall) ภายหลังการติดผลจนกระทั่งโตเต็มที่ ส่วนของผนังรังไข่จะเปลี่ยนไปเป็นPericarp ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ชั้นคือ

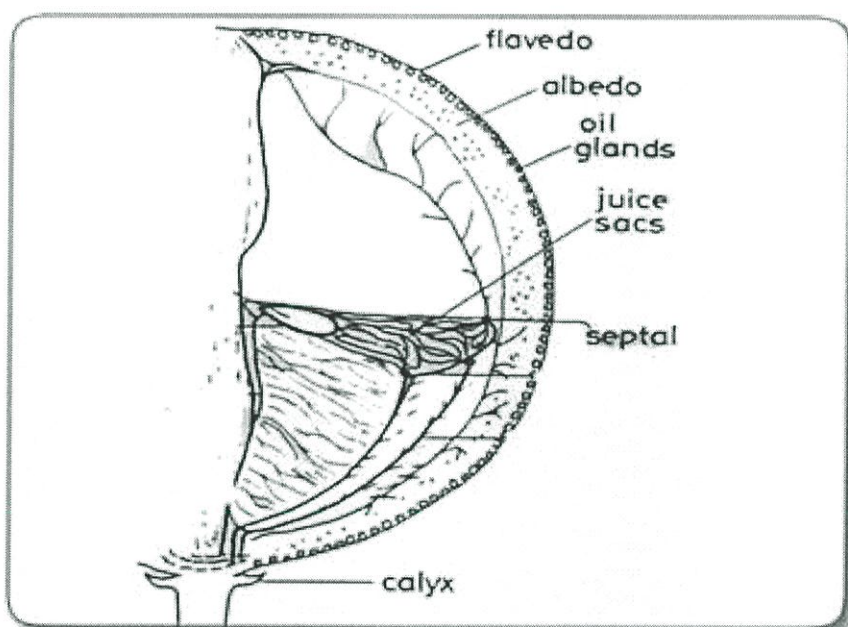
1. Exocarp เป็นชั้นนอกสุดของผลส้มมีชื่อเรียกพิเศษว่า ฟลาวิโด (Flavedo) นอกสุดเป็นชั้นของอีพิเดอมีส (Epidermis) ที่มีคิวติเคิล (Cuticle) หนามาก และมีต่อมน้ำมัน (Oil gland) อยู่เป็นจำนวน

มาก ในขณะที่ผลยังอ่อนอยู่ ชั้นนี้จะมีคลอโรพลาสต์ แต่เมื่อผลสุกคลอโรพลาสต์จะเปลี่ยนไปเป็นโครโมพลาสต์และมีการสร้างเม็ดสีพวกคาโรทีนอยด์ (Carotenoids) ทำให้ผลมีสีตามลักษณะประจำพันธุ์

2. Mesocarp เป็นผนังชั้นกลางมีชื่อเรียกพิเศษว่า อัลบิโด (Albedo) เป็นเซลล์พวก Spongy parenchyma มีสีขาว ชั้นนี้อาจบางมาก เช่น ส้มเขียวหวาน และเพิ่มความหนามากขึ้น เช่น ส้มเกลี้ยง จนหนาเหมือนส้มโอและซิตรอน ชั้นนี้อาจติดกับชั้นของฟลาวิโดหรือติดกับส่วนเนื้อใน

3. Endocarp จัดเป็นชั้นในสุดของ Pericarp คือ Carpel membrane ของกลีบผล เซลล์ผนังด้านในของชั้นนี้เมื่อมีการพัฒนาของผล ส่วนนี้จะมีการแบ่งเซลล์และขยายตัวออกกลายเป็น Juice sac (ถุง) ทำหน้าที่เก็บสะสมน้ำ น้ำตาล และสารต่างๆ สำหรับชั้นของผนัง (Septum) ที่กั้นระหว่างกลีบนั้นเกิดจากผนังของ 2 กลีบที่อยู่ติดกัน

ในงานวิจัยเราจะนำส่วนของเปลือกส้มโอที่เป็นส่วนสีขาวมาใช้ในการงานวิจัยนี้ ซึ่งอยู่ในชั้นกลาง (Mesocarp)



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของผลส้ม (Roy and Goldschmidt, 1996)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชีวิรัตน์ และคณะ (2544) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับตะกั่วด้วยตัวดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยแครงซึ่งเป็นวัสดุที่เหลือใช้ในท้องถิ่น โดยทำการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อประเมินความสามารถในการดูดซับตะกั่ว ซึ่งดูดซับที่นำมาทำการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันของขนาดและสารที่ใช้ในการกระตุ้น โดยใช้เปลือกหอยแครงที่มีขนาด 8-16 และ 16-100 เมช กระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชูและกรดเกลือ พบว่าเปลือกหอยแครงขนาด 16-100 เมช ที่กระตุ้นด้วยน้ำส้มสายชูมีความสามารถในการดูดซับโดยใช้น้ำทิ้งที่มีตะกั่วได้ดีที่สุด ค่าคงที่ที่คำนวณจากสมการการดูดซับแบบ Freundlich มีค่าเท่ากับ 115.82 มิลลิกรัมตะกั่ว/กรัมเปลือกหอยแครง และในการทดสอบแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ของตัวดูดซับโดยใช้น้ำทิ้งที่มีตะกั่วปนเปื้อนจากห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งมีความเข้มข้น 15 มิลลิกรัม/ลิตร จากผลของการบำบัดน้ำทิ้งที่มีตะกั่วปนเปื้อนได้ 522 เท่าของปริมาตรบรรจุของคอลัมน์ โดยน้ำที่บำบัดแล้วจะมีความเข้มข้นของตะกั่วไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร

อรพิน (2553) ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีและทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบกะและแปรผันค่า pH ที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ระยะเวลาในการปั่นกวที่ 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 กรัม และความเข้มข้นของโลหะหนักที่ 25, 50, 75, 100, 150 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดสังกะสีคือที่ pH 6 ระยะเวลาในการปั่นกว 120 นาที ระยะเวลาในการสัมผัส 60 นาที เมื่อปริมาณของกากชาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดจะสูงขึ้น และถ้าความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดจะลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการดูดซับโลหะหนักทั้งสองโดยใช้กากชาสอดคล้องกับสมการการดูดซับของฟรุนดลิช

มณีรัตน์ และคณะ (2556) ทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ Cu^{2+} ในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วยเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับ Cu^{2+} ระหว่างเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงทางเคมี การนำเปลือกส้มโอที่คายซับแล้วนำมาดูดซับใหม่ การปรับปรุงเปลือกส้มโอทางเคมีนั้น ใช้สารเคมีดังนี้คือ NaOH และ CaCl_2 ในการปรับปรุงประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับทองแดง การดูดซับจะเกิดขึ้นที่สภาวะที่ pH เท่ากับ 5, เวลาสัมผัสที่ 20 นาที, ความเข้มข้นของ Cu^{2+} 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณน้ำหนักรวม 100 มิลลิกรัม เปอร์เซ็นต์ที่ดูดซับทองแดงของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงและไม่ปรับปรุงได้เท่ากับ

91.03% และ 85.33% ตามลำดับ ส่วนเปอร์เซ็นต์ที่ดูดซับทองแดงของเปลือกส้มโอที่คายซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่มีเปอร์เซ็นต์ที่ดูดซับทองแดงเท่ากับ 40.11% และเปอร์เซ็นต์การคายซับ เท่ากับ 55.10% ไอโซเทอมของการดูดซับทองแดงที่ปรับปรุงทางเคมีโดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี มีความสอดคล้องกับสมการ Freundlichซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.9248

Krishnan และคณะ (1988) ได้ทำการวิจัยโดยใช้ใบต้นรูปถั่ว (Caltail Leaves) และเส้นผมของคนในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ Cd, Hg และ Pb การวิจัยนี้เลือกใช้แบบการทดลองแบบกะโดยมีการแปรค่าความเข้มข้นของเสีย 1-100 มิลลิกรัม/ลิตร ใช้ปริมาณใบต้นรูปถั่วและเส้นผม 50-200 มิลลิกรัม โดยใบต้นรูปถั่วที่ใช้ในการทดลองนี้จะถูกตัดให้มีความยาว 5 ซม. และอบให้แห้งที่ 100 องศาเซลเซียส ส่วนเส้นผมที่ใช้จะถูกตัดให้มีความยาว 0.5 ซม. จากนั้นนำไปแช่ใน Ether นาน 30 นาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำจากการทดลองพบว่า ใบต้นรูปถั่วสามารถกำจัด Cd ได้ประมาณร้อยละ 21-73, Hg ได้ประมาณร้อยละ 43-54 และ Pb ได้ประมาณร้อยละ 50-68 ส่วนเส้นผมสามารถกำจัด Hg ได้เพียงอย่างเดียวโดยกำจัดได้ประมาณร้อยละ 74-83

Tan และคณะ (1988) ได้ทำการวิจัยโดยใช้กากใบชากำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ใบชาที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นใบชาที่เหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปการเกษตร นำมาบดและคัดขนาด 60-80 เมช นำไปต้มในน้ำร้อนเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปแช่ในกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 0.1M เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการทดลองแบบ Batch Operation ใช้ปริมาณกากใบชาตั้งแต่ 0-40 มิลลิกรัม/ลิตร กับน้ำเสียในความเข้มข้นต่างๆ และที่ระดับ pH ต่างกันเขย่านาน 4 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรอง แล้วนำไปวิเคราะห์สารตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีที่เหลืออยู่ในน้ำ ส่วนการวิจัยแบบคอลัมน์ บรรจุกากใบชา 1.87 กรัม โดยใช้ความเข้มข้นของน้ำเสียต่างๆ กันและที่อัตราไหลของน้ำเสียต่างๆ กันจากผลการทดลองแบบ Batch Operation พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากใบชาจะสามารถ กำจัด ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสีได้มากขึ้น และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ pH 6 และความสามารถในการดูดซับ ตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.38, 0.28 และ 0.18 มิลลิโมล/กรัมของใบชาตามลำดับ และผลการทดลองแบบคอลัมน์พบว่า โลหะหนักทั้ง 3 เมื่อมีความเข้มข้นในน้ำเสียเป็น 100 มิลลิกรัม/ลิตร ในปริมาณน้ำเสีย 100 มิลลิลิตรจะถูกกำจัดได้เกือบ 100% เมื่อใช้ใบชา 1.87 กรัมที่ระดับ pH เท่ากับ 6 และพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหล ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักทั้งสามชนิดจะลดลง

Freitas (2000) ได้ทำการศึกษาการนำมวลพืชจางต้นฮอลลิฮัต จากส่วนลำต้น ใบ และราก มาอบแห้งที่ 55 องศาเซลเซียส แล้วใช้เป็นตัวดูดซับโครเมียม นิกเกิล ทองแดง แคลเซียม และตะกั่ว จากสารละลายที่เตรียมจากสารละลายมาตรฐาน 1000 มิลลิกรัม/ลิตร โดยการเจือจางเป็น 10 มิลลิกรัม/ลิตร ทำการดูดซับที่อุณหภูมิปกติ และทำการตรวจวัดปริมาณโลหะด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ซึ่งพบว่า ในรากโลหะที่ถูกดูดซับได้มีลำดับดังนี้ คือ นิกเกิล แคลเซียม ตะกั่ว ทองแดง และโครเมียม ตามลำดับ ในลำต้น: นิกเกิล ตะกั่ว ทองแดง แคลเซียม และโครเมียม ตามลำดับ ในใบ: นิกเกิล แคลเซียม ทองแดง ตะกั่ว และโครเมียม ตามลำดับซึ่งโลหะที่ถูกดูดซับมากที่สุดในทุกส่วนของลำต้น คือ นิกเกิล (ราก ใบ และลำต้น ตามลำดับ) และข้อมูลจากการทดลองที่ผ่านมายังแสดงว่า ส่วนที่ดูดซับนิกเกิลมากที่สุดคือราก ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นว่า รากของต้นฮอลลิฮัตสามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับนิกเกิล ประสิทธิภาพในการปลดปล่อยโลหะออกจากมวลพืชนั้นสามารถทำได้ถึง 55-90% และผลจากการนำมวลพืชกลับมาใช้ใหม่ก็ให้ประสิทธิภาพที่น่าพอใจ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำพืชกลับมาใช้ใหม่

Ning-chuan และคณะ (2012) ได้ทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับ และกลไกในการดูดซับทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีด้วยเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพ โดยการนำเปลือกส้มมาปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl_2 ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ Infrared spectroscopy (IR), Scanning electron microscopy (SEM) และ N_2 adsorption techniques โดยจากการศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น pH ความเข้มข้นของโลหะหนัก ที่มีผลต่อการดูดซับทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีจากผลการทดลองสรุปว่า การดูดซับทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ด้วยเปลือกส้มที่ปรับปรุงคุณภาพ เป็นไปตามสมการของ Langmuir isotherm และพบว่า กลไกการดูดซับเป็นการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง ไอออนของทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี กับ ไอออนของแคลเซียมที่อยู่ในหมู่ฟังก์ชันของคาร์บอกซิลในพอลิเมอร์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานซิงค์ (Standard Zinc) ความเข้มข้น 1000 ppm (Lab Reagent, Carlo Erba)
2. สารละลายมาตรฐานเลด (Standard Lead) ความเข้มข้น 1000 ppm (Lab Reagent, Carlo Erba)
3. กรดไฮดรอกลอริก (HCl 0.1 mol/L, 0.05 mol/L) (เกรด RPE, บริษัท Carlo Erba, Italy)
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH 0.1 mol/L, 0.5 mol/L) (เกรด RPE, บริษัท Carlo Erba, Italy)
5. แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂ 1.5 mol/L) (Analytical grade, Ajax Finechem, Australia)
6. เมทานอล (Ethanol) (เกรด RPE บริษัท Carlo Erba, Italy)
7. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO₃) ความเข้มข้น 20% (Analytical grade, Merck)
8. เป็กติกสัมโอ
9. น้ำกลั่น

3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer รุ่น AAnalyst 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) รุ่น 1455 VP ยี่ห้อ LEO
3. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) รุ่น Spectrum GX ยี่ห้อ Perkin Elmer
4. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง (pH meter) รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort
5. ตู้อบ (Oven) รุ่น UM400 ยี่ห้อ Memmert
6. เครื่องเขย่าอัตโนมัติ รุ่น Orbital Shaker ยี่ห้อ Gallenkamp
7. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น Centaur 2 ยี่ห้อ Sanyo
8. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง รุ่น ED224S ยี่ห้อ Sartorius
9. เครื่องกรองสุญญากาศ รุ่น Aspirator A-3s ยี่ห้อ Eyla
10. กรวยกรองบุขนอร์
11. ถาดสเตนเลส
12. จุกยางแดง
13. ถุงมือ

14. กระบอกร่อนน้ำกลั่น
15. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42
16. Syring Filter 0.45 mm.
17. ตะแกรงร่อน (Sieved) 35 mesh มาตรฐาน ASTM E11
18. ขวดพลาสติก Polyethylene
19. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

หมายเหตุ อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองผ่านการแช่ HNO_3 20% เป็นเวลา 1 วันล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วเก็บไว้ในภาชนะปิดสนิท

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมตัวกลางในการดูดซับเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ

นำเปลือกส้มโอมัดเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปตากแดดจนแห้ง จากนั้นนำไปบดให้ละเอียดแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 35 mesh นำเปลือกส้มโอที่ได้ไปปรับปรุงคุณภาพด้วย สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1.5 mol/L ปริมาตร 250 มิลลิลิตร, สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.5 mol/L ปริมาตร 250 มิลลิลิตร และสารละลายเมทานอล 95% ปริมาตร 500 มิลลิลิตร แช่ทิ้งไว้ในสารละลายผสมเป็นเวลา 1 คืน จากนั้นนำไปล้างน้ำกลั่นให้ค่า pH เป็นกลาง แล้วนำมากรองลดความดันด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 42 และชุดกรองลดความดัน จากนั้นนำเปลือกส้มโอที่ผ่านการกรองลดความดันแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ (Ning-chuan, 2012)

หมายเหตุ : เปลือกส้มโอที่ใช้เป็นส่วนสีขาวจากการศึกษาเปลือกส้มโอส่วนสีเขียว สีขาว และส่วนผสม (สีเขียว และขาว) พบว่าเปลือกส้มโอส่วนสีขาว มีเปอร์เซ็นต์การดูดซับทองแดงได้ดีที่สุด (มณีนรัตน์ และคณะ, 2556)

3.2.2 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

นำเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) โดยตัวอย่างจะเป็นผงนำไปติดบน Stub โดยพยายามติดให้อนุภาคเรียงตัวในลักษณะชั้นเดียวไม่เกาะกลุ่มกันแล้วนำไปทำการเคลือบผิวด้วยทอง จากนั้นจึงนำเข้าเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) ทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพ

3.2.3 การศึกษาหาหมู่ฟังก์ชันสารองค์ประกอบในเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

นำตัวอย่างเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) มาบดให้มีความละเอียดด้วยโม่บดสาร เคมีโพแทสเซียมโบรไมด์ในโม่บดสาร โดยให้ตัวอย่างมีปริมาตรประมาณ 0.01 เปอร์เซ็นต์ ของโพแทสเซียมโบรไมด์ และบดผสมให้ละเอียดให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอใส่ตัวอย่างที่บดผสมแล้วลงในแม่พิมพ์ และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ที่ความดันประมาณ 15000 N ทิ้งไว้ 5 นาทีถอดตัวประกบแม่พิมพ์ออก แผ่นตัวอย่างจะติดอยู่ที่แม่พิมพ์ มีลักษณะเป็นวงกลมใส แล้วนำตัวอย่างใส่แผ่นฟิล์ม แล้วใส่ในเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ทำการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ จากค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด

3.2.4 การศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว

3.2.4.1 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว

ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ 0.1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่น้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี และตะกั่ว ที่มีความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่ผ่านการปรับ pH ของสารละลายให้เป็น 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N และ/หรือ กรดไฮโดรคลอริก 0.1 N นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 60 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm นำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 มิลลิเมตร ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และเจือจางสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.5 ppm แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือที่ค่า pH 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนักกับค่า pH (Ning-chuan, 20012)

3.2.4.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว

ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ 0.1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่น้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี และตะกั่ว ที่มีความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่ผ่านการปรับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N และ/หรือ กรดไฮโดรคลอริก 0.1 N นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นระยะเวลา 0, 20, 40, 60 และ 80 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm นำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 มิลลิเมตรทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และเจือจางสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.5 ppm

แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือที่เวลา 0, 20, 40, 60 และ 80 นาทีด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาที่ใช้ในการดูดซับ

3.2.5 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

ซึ่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ 0.1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรใส่น้ำเสียสังเคราะห์ของสังกะสี และตะกั่ว ที่มีความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่ผ่านการปรับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับของตะกั่ว และสังกะสีที่ได้จากข้อ 3.2.4.1 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N และ/หรือ กรดไฮโดรคลอริก 0.1 N นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm นำสารละลายตัวอย่างกรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 มิลลิเมตร ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และเจือจางสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.5 ppm แล้วนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือที่ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์

3.2.6 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับ

ซึ่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่น้ำเสียสังเคราะห์ของสังกะสี และตะกั่ว ที่มีความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรที่ผ่านการปรับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.1 ด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N และ/หรือ กรดไฮโดรคลอริก 0.1 N นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm นำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 มิลลิเมตร ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และเจือจางสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.5 ppm แล้ววิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือที่ปริมาณตัวดูดซับต่างๆ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เขียนกราฟลอการิทึมระหว่างความเข้มข้นของสังกะสี และตะกั่ว ที่เหลือในน้ำ (C) กับปริมาณโลหะที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (X/M)

3.2.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี และตะกั่วระหว่างตัวดูดซับที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพอย่างละ 0.1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ น้ำเสียดังเคราะห์ของสังกะสี และตะกั่วที่มีความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ที่ผ่านการปรับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N และ/หรือ กรดไฮโดรคลอริก 0.1 N นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm นำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วย Syring Filter ขนาด 0.45 มิลลิเมตร โดยเก็บเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และไม่ปรับปรุงคุณภาพที่ผ่านการดูดซับตะกั่ว และสังกะสีไว้ใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป ทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ครั้ง และเจือจางสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.5 ppm นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับโลหะหนักของสังกะสี และตะกั่ว ระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

3.2.8 การศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ (desorption)

นำเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักของสังกะสี และตะกั่ว จากการทดลองที่ 3.2.7 มาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเก็บไว้ในเคซิเคเตอร์ชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และไม่ปรับปรุงคุณภาพอย่างละ 0.1 กรัมใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรใส่สารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.05 M ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm นำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วย Syring Filter ขนาด 0.45 มิลลิเมตร โดยเก็บเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และไม่ปรับปรุงคุณภาพที่ผ่านการคายซับโลหะหนักของตะกั่ว และสังกะสีไว้ใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป ทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ครั้ง และเจือจางสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.5 ppm นำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เขียนกราฟแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การคายซับของสังกะสี และตะกั่ว ระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

3.2.9 การศึกษาประสิทธิภาพการนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่

นำเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพที่ได้จากข้อ 3.2.8 นำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งค่า pH ของน้ำที่ล้างมีค่าเท่ากับค่า pH ของน้ำกลั่น จากนั้นนำเปลือกส้มโอไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเก็บไว้ในเคซิเคเตอร์แล้วชั่งเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ และไม่ปรับปรุงคุณภาพ อย่างละ 0.1 กรัม ใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ของตะกั่วและสังกะสีที่มีความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรที่ผ่านการปรับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับของสังกะสี และตะกั่ว ที่ได้จากข้อ 3.2.4.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N และ/หรือ กรดไฮโดรคลอริก 0.1 N นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 120 รอบ/นาที เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมของตะกั่ว และสังกะสีที่ได้จากข้อ 3.2.4.2 จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงเครื่อง Centrifuge ที่ความเร็วรอบ 3000 rpm นำสารละลายตัวอย่างมากรองด้วย Syringe Filter ขนาด 0.45 มิลลิเมตร ทำการทดลองซ้ำอย่างละ 2 ครั้ง และเจือจางสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ให้มีความเข้มข้นประมาณ 0.5 ppm นำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือน้ำด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับระหว่างการดูดซับโลหะหนักในครั้งแรกและการดูดซับโลหะหนักหลังจากผ่านการคายซับ

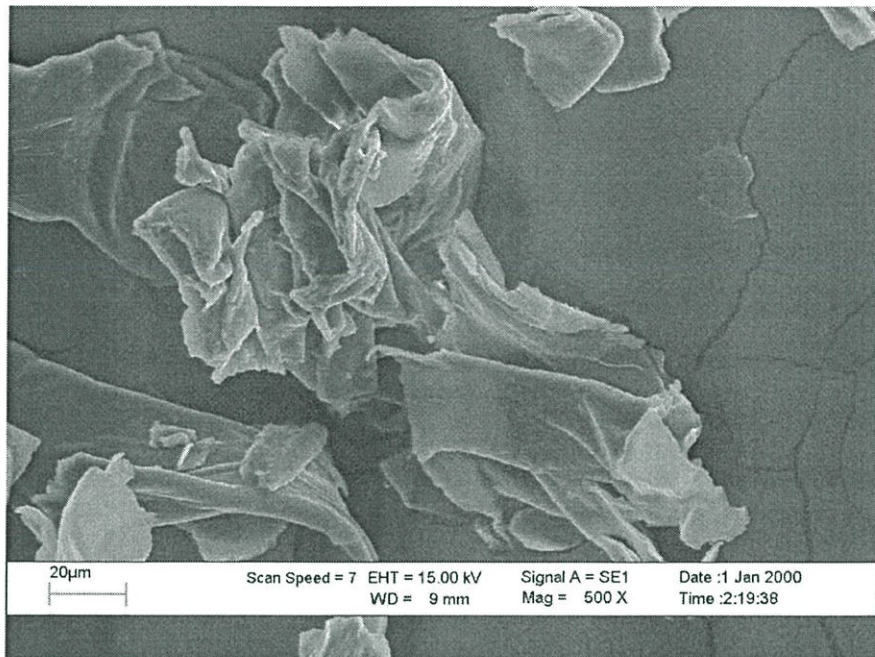
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

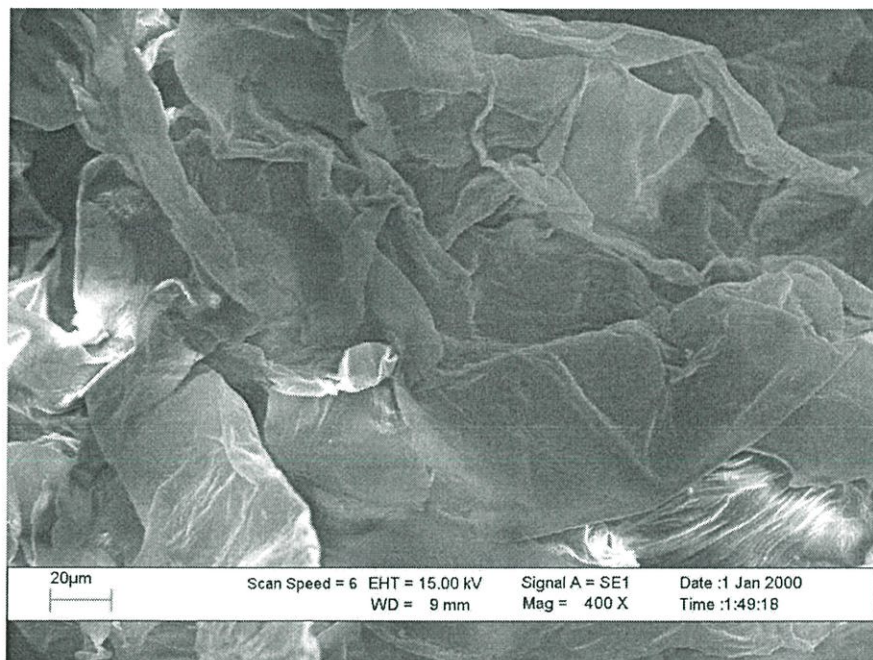
โครงการพิเศษเรื่อง การดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมีมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเหลือใช้อย่างเปลือกส้มโอ มาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยผ่านการปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl_2 จึงต้องทำการศึกษาโครงสร้างของตัวดูดซับหลังทำการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) หลังจากนั้นจะแบ่งการศึกษาออกเป็นส่วนๆ คือในขั้นแรกจะทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่วคือ ค่าความเป็นกรดค่าระยะเวลาในการสัมผัส ต่อมาศึกษาผลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ จากนั้นทำการศึกษาการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ การคายซับและการนำกลับมาใช้ใหม่ ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสังกะสี และตะกั่ว ระหว่างเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ชนิดใดสามารถดูดซับโลหะได้มากที่สุด ผลการทดลองทั้งหมดสามารถแสดงไว้เป็นหัวข้อต่างๆ ได้ดังนี้

4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

นำเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพผ่านการคัดขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาด 35 mesh นำไปฉาบผิวด้วยทองคำ ทำการศึกษาพื้นผิวของเปลือกส้มโอโดยการนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM) ผลการทดลองดังแสดงในรูป 4.1 (ก) และ 4.1 (ข)



(ก)



(ข)

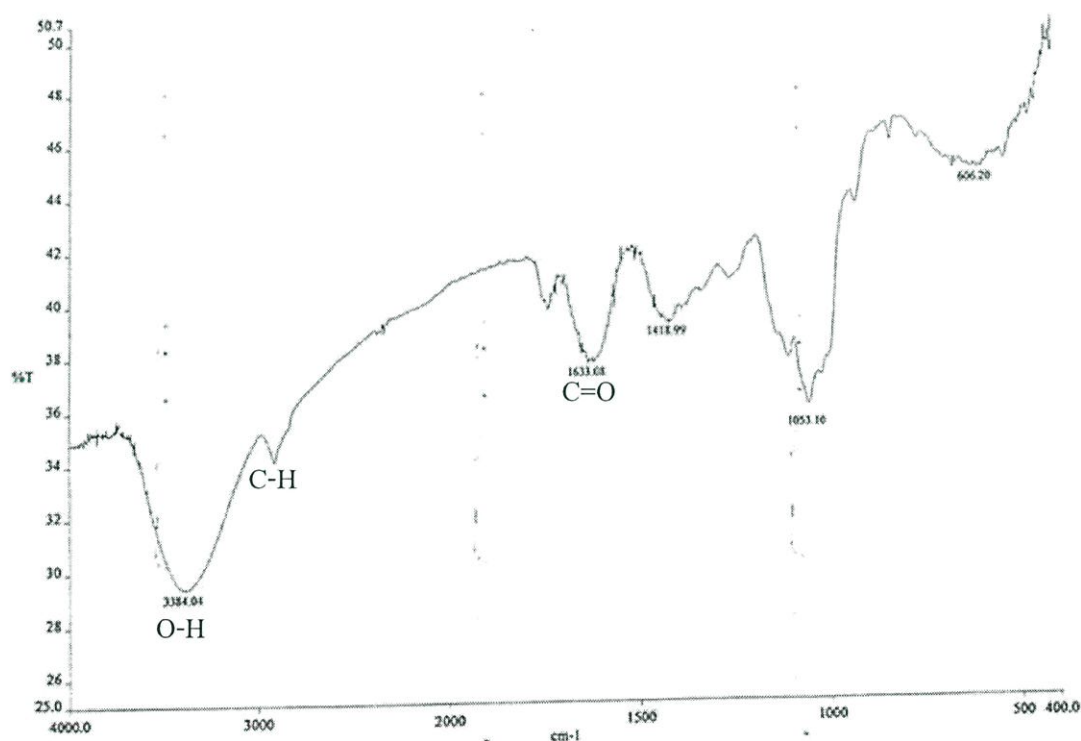
รูปที่ 4.1 (ก) พื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ก่อนการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

(ข) พื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning Electron Microscope (SEM)

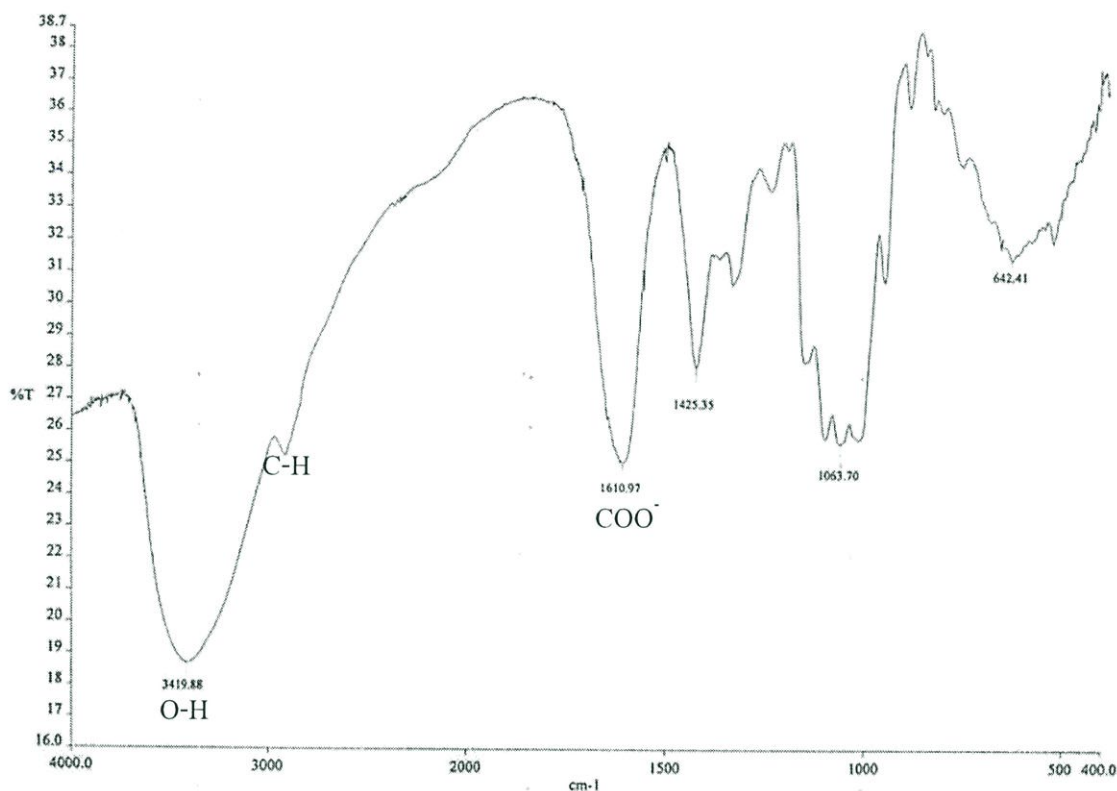
จากการศึกษาพื้นผิวของเปลือกส้มโอโดยนำไปส่องกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าโครงสร้างเส้นใยของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วมีพื้นผิวขรุขระ และมีรูพรุนมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ข) เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุง คือ NaOH กับ CaCl_2 สามารถเข้าไปปรับปรุงพื้นที่ผิวของเปลือกส้มโอให้เหมาะสมต่อการดูดซับโลหะหนักบริเวณพื้นที่ผิวได้มากขึ้น (Ning-chuan, 2009)

4.2 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารองค์ประกอบในเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

นำเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ และเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ มาศึกษาโดยใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป 4.2 (ก) และ 4.2 (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) หมู่ฟังก์ชันของเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการดูดซับเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

(ข) หมู่ฟังก์ชันของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพก่อนการดูดซับเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

จากการใช้ FTIR เพื่อศึกษาเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงและเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุง แสดงสเปกตรัมดังรูป 4.2 (ก) และ 4.2 (ข) พบว่าทั้งสองชนิดมีแถบความยาวคลื่นที่ 3384 cm⁻¹ นั่นคือหมู่ฟังก์ชัน O-H ในเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพกติน และลิกนิน แถบความยาวคลื่นที่ 2900 cm⁻¹ คือ C-H ซึ่งเป็นแถบการยืดของหมู่ methyl, methylene และ methoxy

รูปที่ 4.2 (ก) ที่แถบความยาวคลื่น 1633 cm⁻¹ แสดงให้เห็นว่าแถบการยืดนี้เป็นของหมู่ ester carbonyl (C=O) รูปที่ 4.2 (ข) พบว่าแถบความยาวคลื่น 1633 cm⁻¹ หายไปหลังการปรับปรุงด้วย NaOH และ CaCl₂ ที่แถบความยาวคลื่น 1610 cm⁻¹ แสดงให้เห็นว่า methyl esters ถูกไฮโดรไลส์ด้วย NaOH และหมู่เอสเทอร์จะถูกแปลงเป็นไอออน carboxylate (Ning-chuan, 2012) ดังแสดงในสมการ

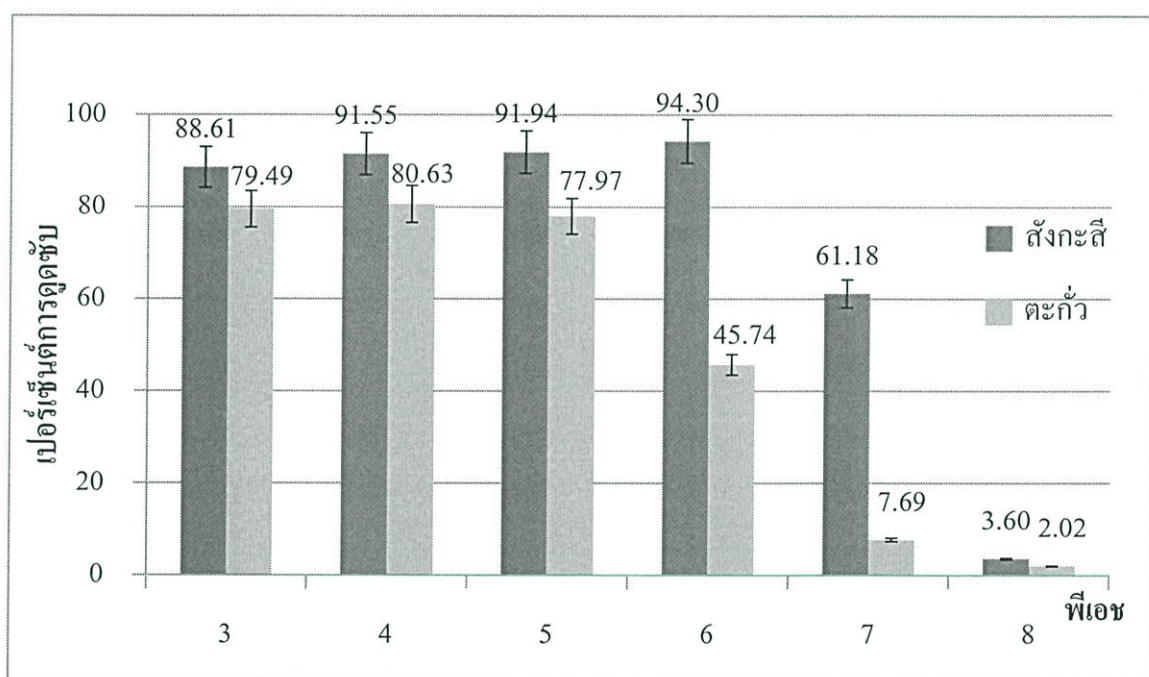


ซึ่งหมู่ Carboxylate เป็นประจุลบที่สามารถจับกับไอออนของสังกะสี และไอออนของตะกั่วด้วยแรงระหว่างประจุทำให้ประสิทธิภาพของการดูดซับเพิ่มขึ้น

4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว

4.3.1 การศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว

จากการทดลองเพื่อหาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี และตะกั่ว ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว 0.1 กรัมปรับค่า pH ให้ได้ 3, 4, 5, 6, 7, และ 8 นำไปเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและสังกะสีที่เหลืออยู่ ที่ค่า pH ต่างๆ นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH ดังรูปที่ 4.4



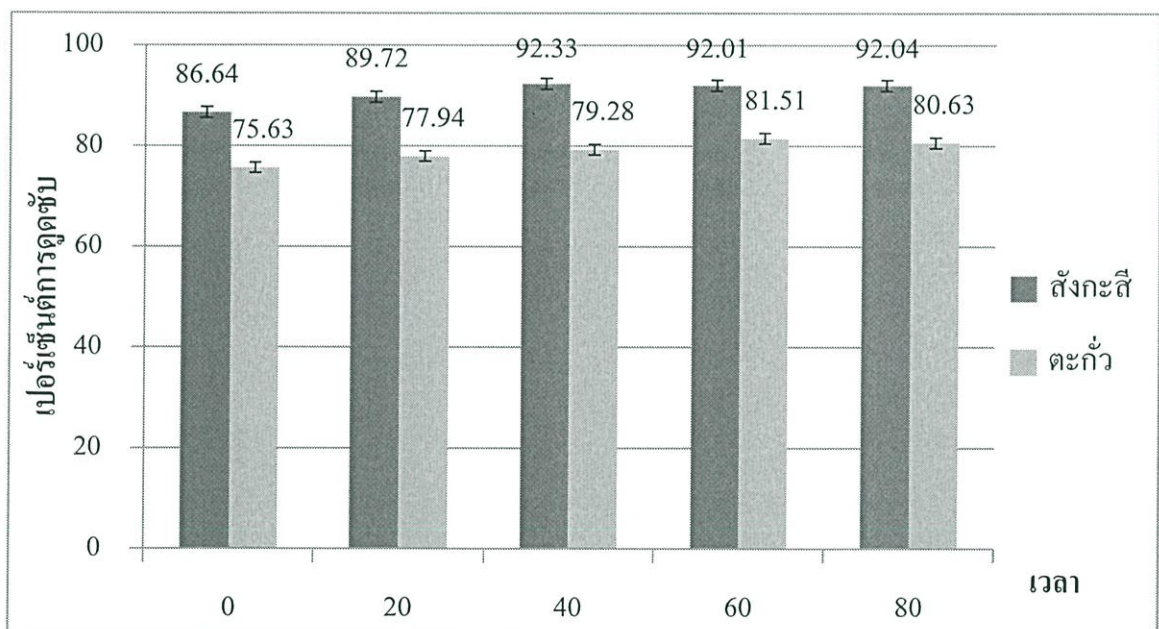
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับค่า pH

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการดูดซับสังกะสีจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อ pH เพิ่มขึ้นและดูดซับได้ดีที่สุดที่ค่า pH 6 และตะกั่วดูดซับได้ดีที่สุดที่ pH 4 โดยสังกะสีและตะกั่วดูดซับได้สูงสุด 94.30% และ 80.63% ตามลำดับ เนื่องจากที่ pH ต่ำ น้ำเสียสังเคราะห์จะเต็มไปด้วยไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะทำให้เกิดการขัดขวางการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ของเปลือกส้มโอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าต่ำ เมื่อ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะลดลง ทำให้สังกะสีและ ตะกั่วเข้า

ไปยึดเกาะบนพื้นผิวของเปลือกส้มโอได้มากขึ้น จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสี และ ตะกั่วเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นเมื่อ pH ของน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้นที่ ทำให้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลง

4.3.2 การศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว

จากการศึกษาเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับทำได้โดยใช้น้ำตัวอย่างสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสี และตะกั่ว ความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว 0.1 กรัม ปรับ pH ที่ได้จากข้อ 4.3.1 นำไปเขย่าด้วยความเร็ว 120 รอบ/นาที เป็นเวลา 0, 20, 40, 60 และ 80 นาที แล้ววิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและสังกะสีที่เหลืออยู่ที่เวลา 0, 20, 40, 60 และ 80 นาที นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาการดูดซับได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับระยะเวลาการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

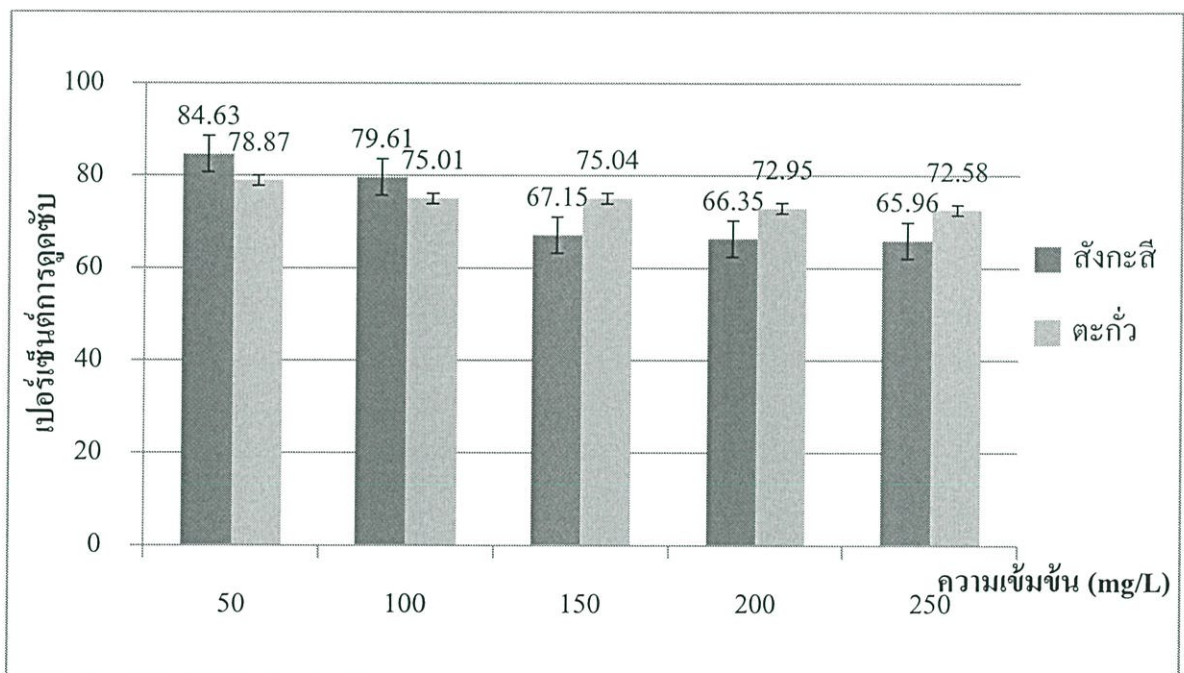
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการดูดตะกั่วด้วยเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วมีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 0 นาที จนถึงเวลา 60 นาที หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะเริ่มคงที่และค่อยๆ ลดลง และสังกะสีมีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 0 นาที จนถึงเวลา 40 นาที หลังจากนั้นเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะเริ่มคงที่และค่อยๆ ลดลงดังนั้นจึงทำการเลือกระยะเวลาการดูดซับโลหะตะกั่ว

และสังกะสีได้ดีที่สุดคือที่เวลา 40 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ดูดซับ 92.33% และ 81.51%ตามลำดับ

จากการดูดซับของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วที่เวลาต่างๆจะพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและเมื่อถึงจุดสูงสุดค่าการดูดซับที่ได้จะลดลง เนื่องจากเกิดการคายซับมากกว่าการดูดซับ (จตุพร, 2545) จึงเลือกใช้ระยะเวลาในการดูดซับดังกล่าวในการทดลองต่อไป

4.4 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ

จากการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อการดูดซับทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่วความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรต่อเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ 0.1 กรัมปรับค่า pH และนำไปเขย่าตามเวลาที่เหมาะสม แล้ววิเคราะห์ปริมาณสังกะสีและตะกั่วที่เหลืออยู่ที่ความเข้มข้นต่างๆ นำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับกับความเข้มข้นสารละลายสังกะสีและตะกั่ว แสดงได้ดัง รูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับความเข้มข้นของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่ว

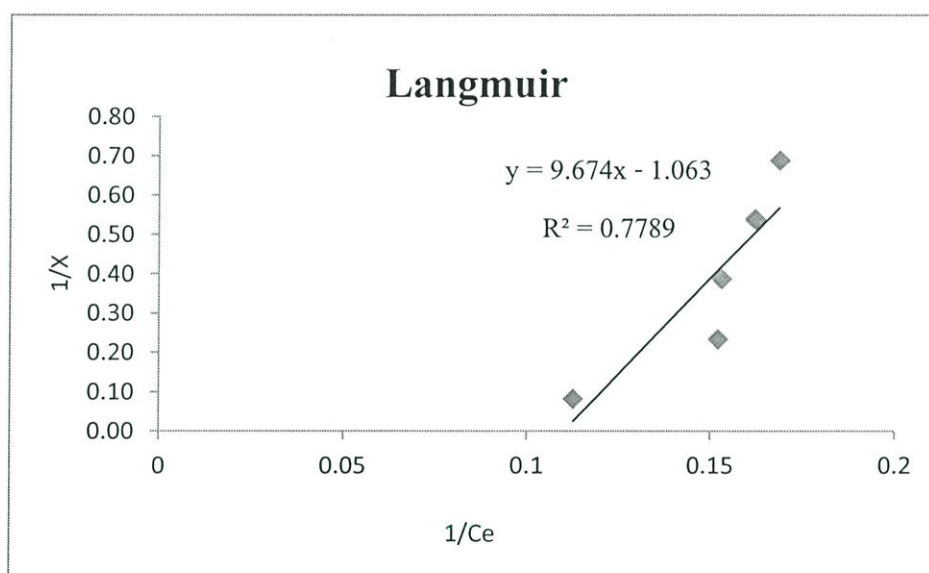
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสังกะสีและตะกั่วจะค่อยๆลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุง

คุณภาพแล้วสามารถดูดซับสังกะสีได้ 84.63%, 79.61%, 67.15%, 66.35% และ 65.96% ตามลำดับ และดูดซับตะกั่วได้ 78.87%, 75.01%, 75.04%, 72.95% และ 72.58% ตามลำดับ

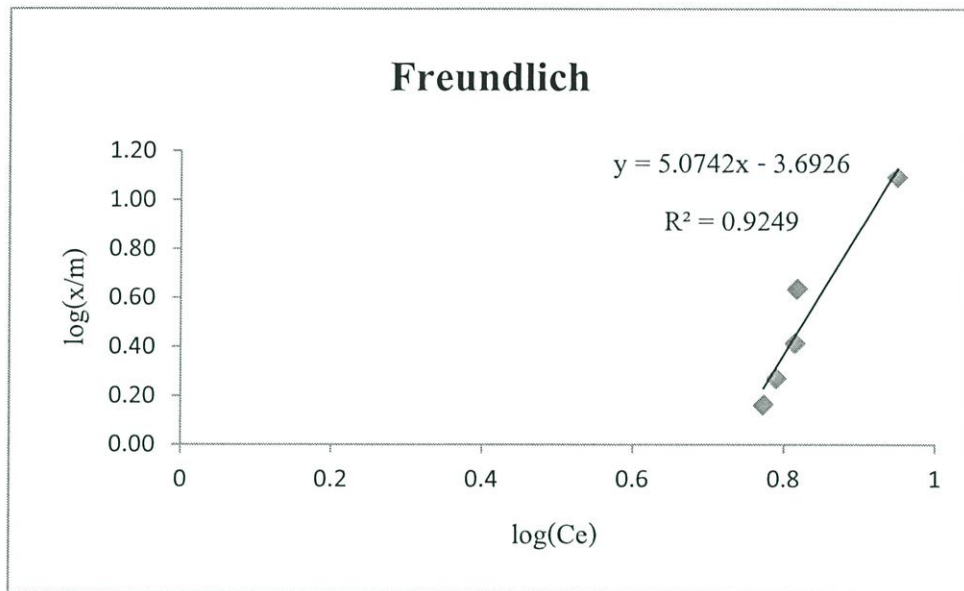
จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะหนักของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพแล้วจะต่ำลง เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นสูงขึ้น

4.5 การศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับ

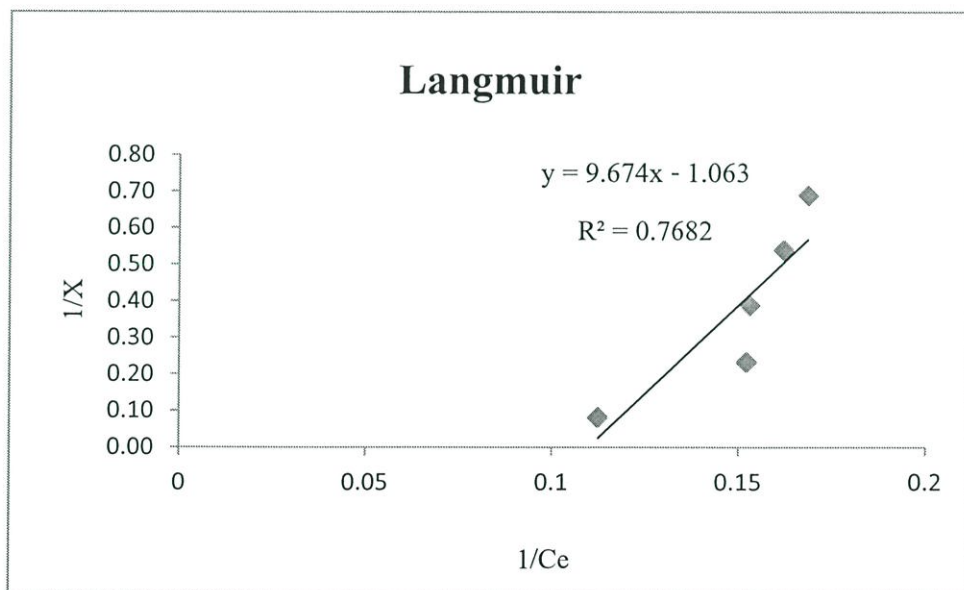
จากการศึกษาปริมาณของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับทำได้โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนสังกะสีและตะกั่วความเข้มข้น 50 ppm ปริมาตร 25 มิลลิตรต่อปริมาณเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 และ 0.9 กรัมปรับค่า pH และนำไปเขย่าตามเวลาที่เหมาะสม แล้ววิเคราะห์ปริมาณสังกะสีและตะกั่วที่เหลืออยู่ ที่ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกันสามารถนำมาคำนวณไอโซเทอมทั้งแบบ Langmuir และ แบบ Freundlich ดังรูปที่ 4.7 - 4.10 และ ตารางที่ 4.1



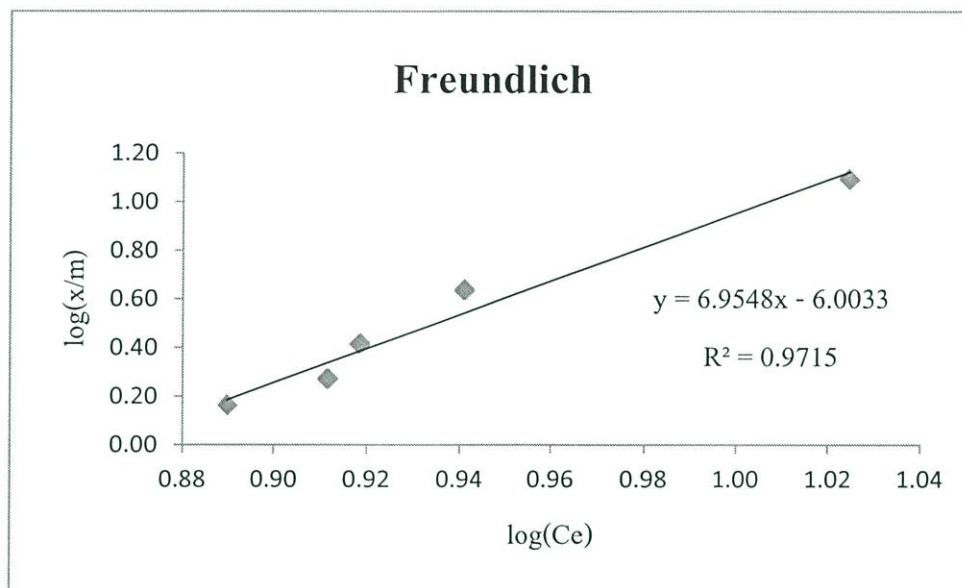
รูปที่ 4.7 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสีแบบ Langmuir



รูปที่ 4.8 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสีแบบ Freundlich



รูปที่ 4.9 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบ Langmuir



รูปที่ 4.10 รูปแบบไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วแบบ Freundlich

ตารางที่ 4.1 ค่า R^2 ไอโซเทอมแบบ Freundlich และ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ

ประเภทโลหะหนัก	R^2 สมการ Freundlich	R^2 สมการ Langmuir
สังกะสี	0.9249	0.7789
ตะกั่ว	0.9715	0.7682

จากตารางที่ 4.1 พบว่าเมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) ของการดูดซับสังกะสีและตะกั่ว สมการของ Freundlich มีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (R^2) เข้าใกล้ 1 มากกว่าสมการของ Langmuir ดังนั้นการดูดซับสังกะสีและตะกั่ว สอดคล้องกับแบบจำลองของ Freundlich ซึ่งเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer)

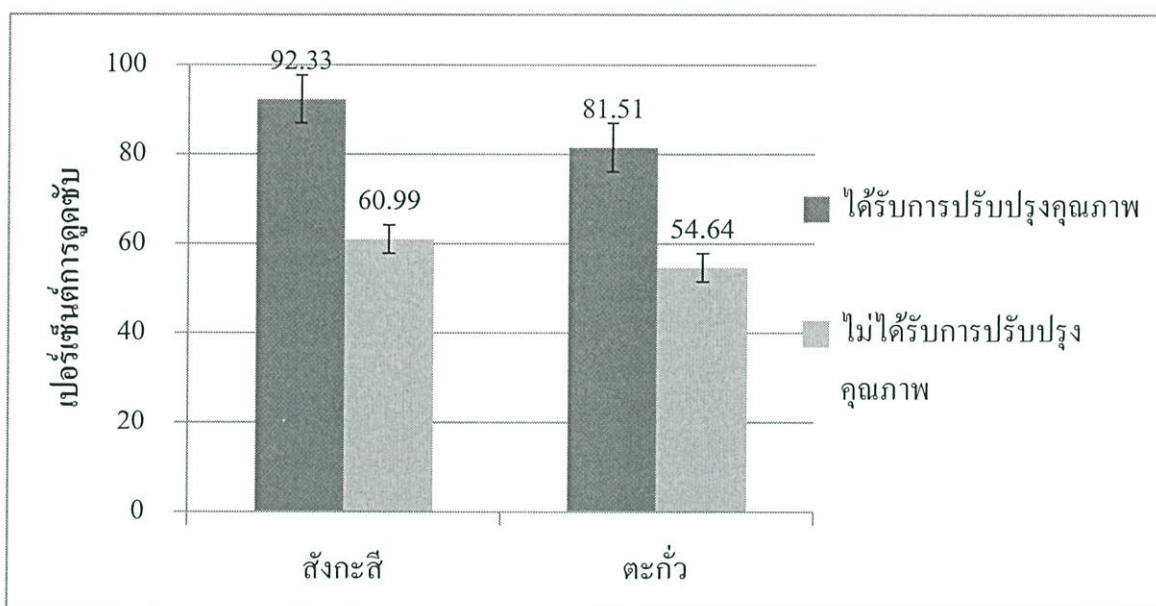
จากการดูดซับสังกะสีและตะกั่ว ตามสมการแบบจำลองของ Freundlich สามารถแสดงเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

สังกะสี $y = 5.0742x - 3.6926$ $R^2 = 0.9249$

ตะกั่ว $y = 6.9548x - 6.0033$ $R^2 = 0.9715$

4.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสี และตะกั่วระหว่างตัวดูดซับที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

จากการทดลองเพื่อกำจัดสังกะสีและตะกั่วออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพเป็นตัวดูดซับในปริมาณ 0.1 กรัมทำการทดลองในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับโลหะแต่ละชนิดเพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีและตะกั่วระหว่างเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์แสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการดูดซับสังกะสี และตะกั่วระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

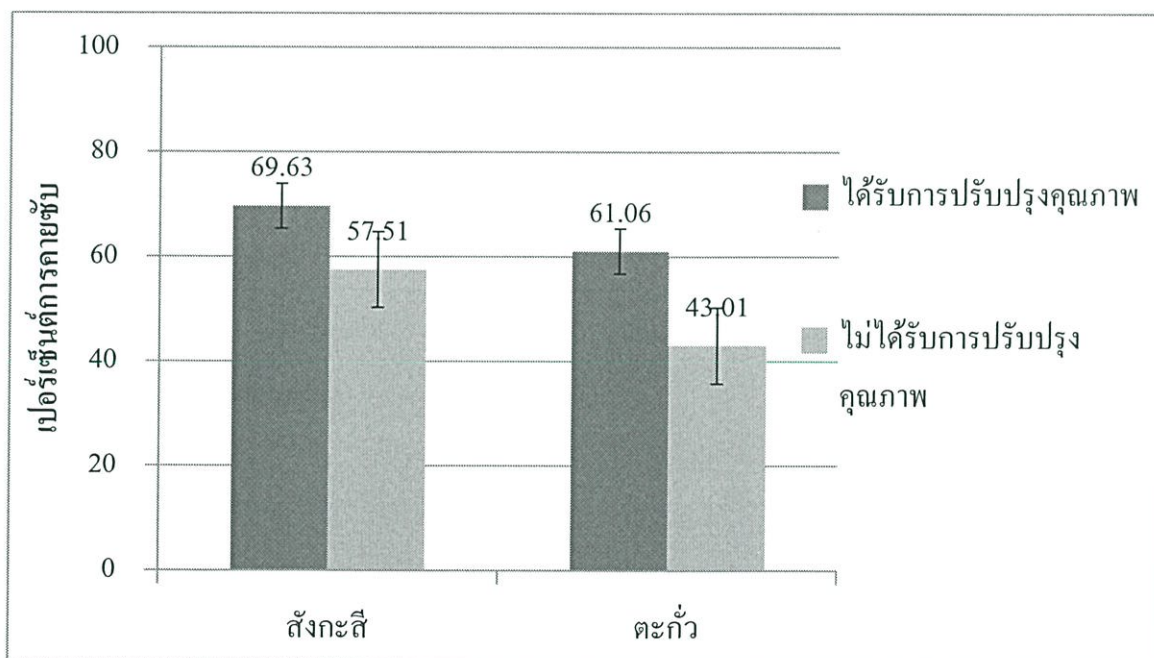
จากรูปที่ 4.11 พบว่าเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพสามารถดูดซับสังกะสี และตะกั่วได้ดีกว่าเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสีได้ 92.33% และ 60.99% ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกัน 31.34% และเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่วได้ 81.51% และ 54.64% ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกัน 26.28% สาเหตุที่ทำให้เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วดูดซับดีกว่าเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงจะมีพื้นผิวขรุขระ มีรูพรุนมากจะสามารถดูดซับโลหะหนัก

ได้ดี โดยการปรับปรุงด้วย NaOH จะไปทำปฏิกิริยากับ methyl ester ที่อยู่ในเปลือกส้มโอทำให้จำนวนลิแกนด์ของ Carboxylate เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการศึกษาหมู่ฟังก์ชัน (FTIR) ที่พบว่าหมู่ ester carbonyl (C=O) หายไปหลังการปรับปรุงและเกิดไอออน carboxylate (COO⁻) เพิ่มขึ้น ส่วน CaCl₂ จะไปลดการละลายของ pectin acid ที่อยู่ในเปลือกส้มโอทำให้ pectin acid ตกตะกอนมีผลให้จำนวนลิแกนด์เพิ่มขึ้นจึงสามารถจับกับไอออนโลหะได้มากขึ้น

สังกะสีดีกว่าตะกั่วเนื่องจากเนื่องจากขนาดอะตอมของสังกะสีรัศมีอะตอมมีขนาดเล็กกว่าขนาดอะตอมตะกั่วที่การที่ขนาดอะตอมไม่เท่ากันนั้นจะส่งผลให้การเข้าไปจับยึดและแทรกตามรูพรุนได้แตกต่างกัน

4.7 การศึกษาประสิทธิภาพการคายขับ (Desorption)

ทำการทดลองโดยนำเปลือกส้มโอทั้งแบบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ และไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ มาดูดซับโลหะสังกะสี และตะกั่ว โดยใช้สภาวะที่ดีที่สุดในการดูดซับ หลังจากนั้นนำเปลือกส้มโอที่ผ่านการดูดซับไปทำการคายขับ ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.05 M ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.12

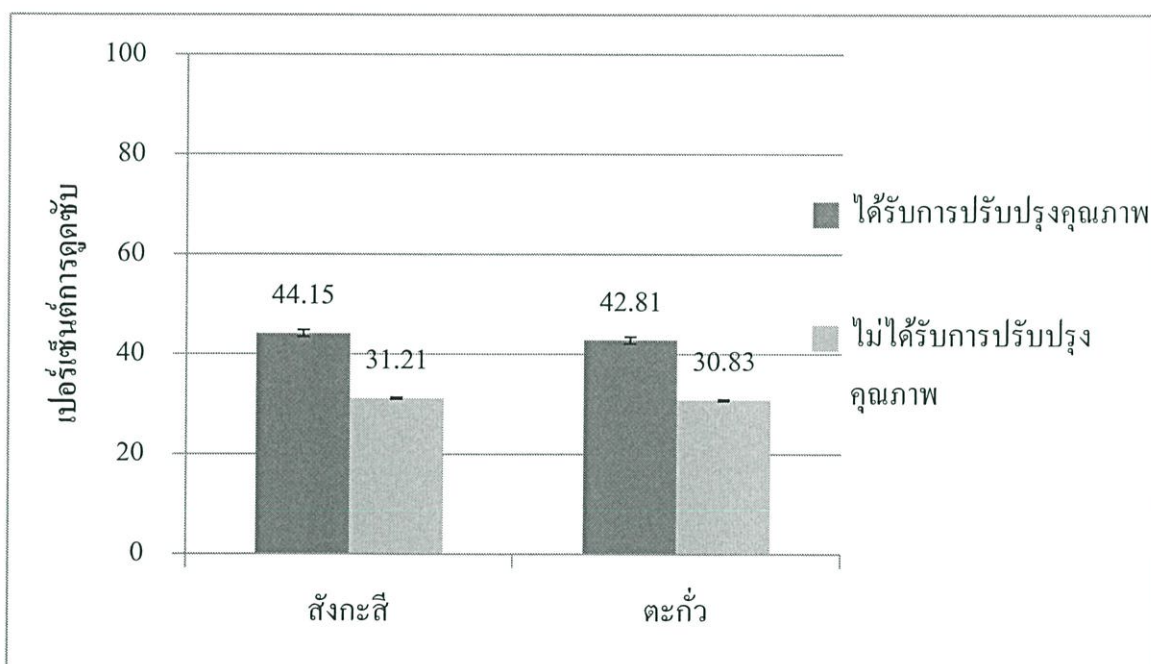


รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการคายขับของสังกะสี และตะกั่ว ระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

จากรูปที่ 4.12 เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ มีเปอร์เซ็นต์การคายซบของสังกะสีได้ 69.63% และ 57.51% ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกัน 12.12% และเปอร์เซ็นต์การคายซบของตะกั่วได้ 61.06% และ 43.01% ตามลำดับ ซึ่งมีความแตกต่างกัน 18.05% จะเห็นได้ว่าเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพมีประสิทธิภาพการคายซบดีกว่าเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ ซึ่งประสิทธิภาพการคายซบที่ดีกว่าเนื่องจากเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ มีการดูดซับโลหะไว้ที่พื้นผิวมาก การดูดซับอาจเกิดแบบหลายๆ ชั้น จึงทำให้การบีดเกาะที่พื้นผิวแบบหลวมๆ การคายซบจะเกิดขึ้นได้ง่าย

4.8 การศึกษาประสิทธิภาพการนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่

หลังจากทำการคายซบเปลือกส้มโอทั้งแบบที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ และแบบที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ นำเปลือกส้มโอทั้งสองแบบไปดูดซับสังกะสี และตะกั่วใหม่ ด้วยสถานะที่เหมาะสม ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนำเปลือกส้มโอกลับมาใช้ใหม่ระหว่างตัวดูดซับที่ปรับปรุงคุณภาพกับตัวดูดซับที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ

จากรูปที่ 4.13 เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพและเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสีได้ 44.15% และ 31.21% ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกัน 12.94% และเปอร์เซ็นต์การดูดซับตะกั่วได้ 42.81% และ 30.83% ตามลำดับซึ่งแตกต่างกัน 11.98% จะ

เห็นได้ว่าเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีกว่าเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ อาจเนื่องจากประสิทธิภาพการคายซบของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงดีกว่า จึงมีพื้นผิวและรูพรุนมากกว่าเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุง จึงสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ดีกว่า

สรุปได้ว่าเปลือกส้มโอที่ผ่านการคายซบแล้วนำกลับมาใช้ในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ประสิทธิภาพในการดูดซับลดลงครั้งหนึ่ง จึงอาจไม่คุ้มค่าที่จะนำกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการพิเศษนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนโดยใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ นั่นคือเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพด้วย NaOH และ CaCl_2 ผลการศึกษาทั้งหมดนั้นสรุปได้ดังนี้

1. ลักษณะพื้นผิวของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพ จะขรุขระ และมีรูพรุนมากกว่าเปลือกส้มโอที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ
2. หมู่ methyl esters ของเปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพถูกไฮโดรไลส์ด้วย NaOH และหมู่เอสเตอร์จะถูกแปลงเป็นไอออน carboxylate
3. จากการศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน โดยใช้เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพพบว่าการดูดซับดีที่สุดที่ pH 6 และ pH 4 ตามลำดับ
4. จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน โดยใช้เปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ พบว่าการดูดซับดีที่สุดที่ระยะเวลา 40 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ
5. เมื่อปริมาณความเข้มข้นของโลหะทั้งสองในน้ำเสียสังเคราะห์ เพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการดูดซับจะลดลง
6. การดูดซับสังกะสี และตะกั่วด้วยเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพเป็นไปตามสมการแบบจำลองของ Freundlich
7. จากการศึกษาประสิทธิภาพของการดูดซับสังกะสี และตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อน พบว่าเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพดูดซับได้ดีกว่า โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสูงสุด 92.33% และ 81.51% ตามลำดับ
8. จากการศึกษาประสิทธิภาพการคายซับสังกะสี และตะกั่ว พบว่าเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพคายซับได้ดีกว่า โดยมีเปอร์เซ็นต์การคายซับสูงสุด 69.63% และ 61.06% ตามลำดับ
9. เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงคุณภาพที่ผ่านการคายซับแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ประสิทธิภาพจะลดลงครั้งหนึ่งจึงอาจไม่คุ้มค่าที่จะนำกลับมาใช้ใหม่

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการประยุกต์ใช้น้ำเสียอุตสาหกรรมจริง

5.2.2 ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักโดยการสังเคราะห์น้ำเสียที่มีโลหะหนักรวมกันมากกว่า 1 ชนิด

5.2.3 ควรมีการศึกษาโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ธาตุ Electronic Documents System (EDS)

บรรณานุกรม

- ชีวรัตน์ ศิลปรัตน์ และคณะ. 2544. การดูดซับตะกั่วโดยพัฒนาตัวกลางดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยแครง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 4 – หน้า 17.
- ชุติมา เสพธรรม. 2543. การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 5 – หน้า 20.
- นันทนา อิทธิพลโกวิท. 2538. การกำจัดโลหะหนักของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดซัลโฟเอทิล และ ครอสส์ลิงก์-แซนเทคที่ทำจากผักตบชวา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. หน้า 33 - หน้า 34.
- ภาสกร สว่างวุฒิชัย และคณะ . 2543. การดูดซับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และขี้เถ้าลอย. วิทยานิพนธ์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 9 – หน้า 22
- มณีรัตน์ และคณะ . 2556 . การดูดซับทองแดงโดยใช้เปลือกส้มโอที่ปรับปรุงทางเคมี. วิทยานิพนธ์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 1 – หน้า 40
- แม่น อมรสิทธิ์ และ อมรเพชรสม. 2535. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ANNADURAI A, JUANG R S, LEE D J. 2002. Adsorption of heavy metals from water using banana and orange peels [J]. **Water SciTechnol**. Vol : 185 - 190.
- FENG Ning-chuan, GUO Xue-yi, LIANG Sha. 2009. Kinetic and thermodynamic studies on biosorption of Cu(II) by chemically modified orange peel. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**. Vol : 1365 - 1370.

FENG Ning-chuan, GUO Xue-yi. 2012. Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China** Vol 22 : 1224 - 1233

NingchuanFeng, XueyiGuo, Sha Liang, Yanshu Zhu, JianpingLiu. 2011 .Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by chemically modified orange peel. **Journal of Hazardous Materials** Vol. 185. Pages : 49 – 54

Sharma, Naresh L., N. C. Dhuldhoya, S.U. Merchant and U. C. Merchant. 2006. **An Overview on Pectins Times Food Processing Journal**. Pages : 44-51

Sha Liang, XueyiGuo, QinghuaTian. 2011 . **Adsorption of Pb^{2+} and Zn^{2+} from aqueous solutions by sulfured orange peel**. *Desalination* Vol 275. Pages : 212–216

กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม . ฉบับที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539. ออนไลน์. เข้าถึงได้จาก http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water04.html. เข้าถึงเมื่อ 11 มกราคม 2557.

Buros.1990[ออนไลน์].เข้าถึงได้จาก<http://www.unep.or.jp/ietc/publications/techpublications/techpub-8d/desalination.asp>. เข้าถึงเมื่อ 26 มีนาคม 2557

BruceandSharon . 2008 . [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://ianrpubs.unl.edu/pages/publicationD.jsp?publicationId=1109>. เข้าถึงเมื่อ 26 มีนาคม 2557

Hoffland Environmental Inc. 2012. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.quarkology.com/12-chemistry/94-hydroxide-precipitation>. เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2557.

Michael. 2003 เข้าถึงได้จาก <http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/f06pm/lect06.htm> เข้าถึงเมื่อ 25 มกราคม 2557

Rohm and Haas.2008. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก http://www.gewater.com/handbook/ext_treatment.jsp เข้าถึงเมื่อ 26 มีนาคม 2557

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

(Atomic Absorption Spectroscopy)

เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ได้รับความนิยมและใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความถูกต้องและความไวในการทดสอบสูงและใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ได้มากกว่า 60 ธาตุ (แม้น และอมร, 2535)

1. หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี เป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมอิสระของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานที่แตกต่างกันด้วย เช่น อะตอมของแคดเมียมดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 228.8 นาโนเมตร อะตอมของปรอทดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร แสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าวจะมีพลังงานพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมแคดเมียมและปรอทเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสภาวะพื้นไปสู่สภาวะเร้า ในการทำให้อะตอมของธาตุในสารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระนั้นต้องใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือไฟฟ้า เป็นต้น

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี จะอาศัยหลักการวัดปริมาณแสงที่ธาตุดูดกลืนเข้าไป เพื่อทำให้อะตอมอิสระที่อยู่ในสภาวะพื้นขึ้นไปอยู่ในสภาวะเร้าซึ่งปริมาณแสงที่ดูดกลืนเข้าไปจะแปรตามความเข้มข้นของสาร

2. องค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ 5 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ก.1

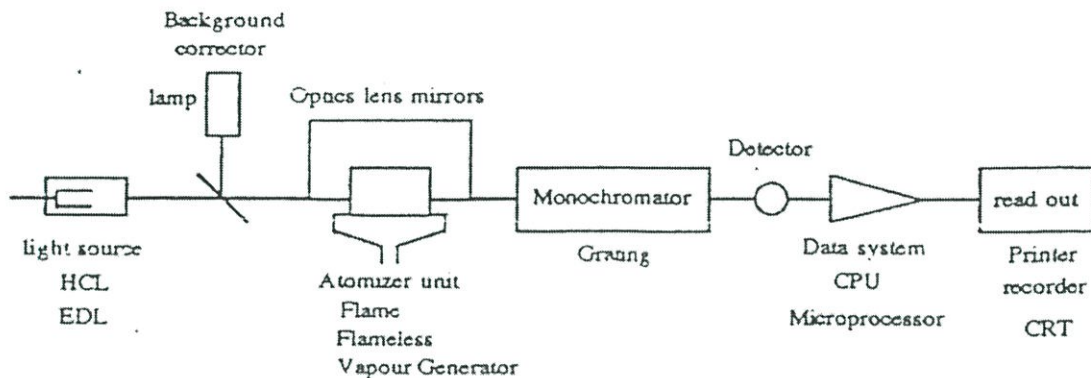
2.1 แหล่งกำเนิดแสง (light source) ส่วนใหญ่เป็น Hollow Cathode Lamp (HCL) และ Electrodeless Discharge Lamp (EDL) ซึ่งมีใช้เฉพาะบางธาตุเท่านั้น

2.2 ส่วนที่ทำให้เกิดอะตอมอิสระ (atomizer unit) เป็นส่วนที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟหรือไฟฟ้า เป็นต้น

2.3 ส่วนแยกแสง (monochromator) เป็นส่วนที่ใช้แยกแสงให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการอาจเป็นแผ่นกรองแสง (filter) เกรตติง (grating) หรือปริซึม (prism)

2.4 ส่วนวัดสัญญาณ (detector) ส่วนใหญ่เป็นหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (photomultiplier tube) ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปของพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า

2.5 ส่วนประมวลผลและอ่านผล (data system and readout unit) ทำหน้าที่แปลสัญญาณที่ได้รับจากส่วนวัดสัญญาณให้เป็นข้อมูลสื่อให้ผู้ใช้เข้าใจ



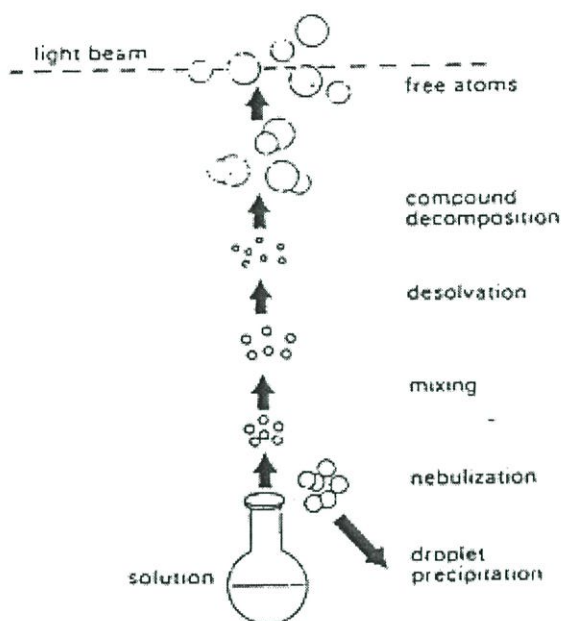
รูปที่ ก.1องค์ประกอบของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

(แม่น และอมร, 2535)

3. เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์วิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีสามารถทำได้หลายวิธี คือ

3.1. Flame atomization technique ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟ (flame) ซึ่งกระบวนการเกิดแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ ก.2

- 3.1.1 Nebulization การเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองเล็กๆด้วยnebulizer
- 3.1.2 Droplet precipitation ละอองเล็กๆรวมตัวกันแล้วไหลออกทางท่อน้ำทิ้ง
- 3.1.3 Mixingละอองเล็กๆของสารละลายผสมกับก๊าซเชื้อเพลิง(fuel)และออกซิเจน(oxidant) ใน spray chamber ของ nebulizer
- 3.1.4 Desolvationตัวทำละลายถูกกำจัดออกไป เกิดเป็นสารประกอบเล็กๆของสารประกอบ
- 3.1.5 Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟจะทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นออกไซด์ เป็นโมเลกุลและเป็นอะตอมอิสระ



รูปที่ ก.2 กระบวนการเกิดอะตอมอิสระในเปลวไฟ (แม้น และอมร, 2535)

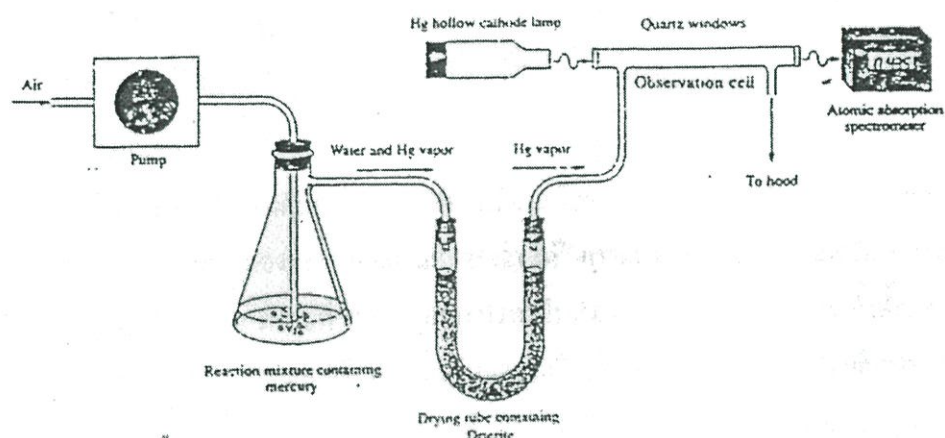
3.2. Flameless technique หรือ Non-Flame atomization technique ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (electrothermal atomizer หรือ graphite furnace) โดยจะตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาของการเผาให้เหมาะสมสำหรับธาตุแต่ละชนิด

3.3. Hydride generation technique การวิเคราะห์ธาตุบางชนิด เช่น As และ Se โดยวิธีดูดกลืนกลืนแสงแบบเปลวไฟจะมีขีดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (detection limit) อยู่ในระดับ 1 ppm ซึ่งยังไม่ต่ำเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ธาตุเหล่านี้ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม เพราะธาตุเหล่านี้เป็นพิษในระดับต่ำ จึงพัฒนาวิธีการตรวจวัดให้มีสภาพไวสูงขึ้นโดยการทำให้สารที่สนใจกลายเป็นโลหะไฮไดรด์ที่สามารถระเหยได้ ณ อุณหภูมิห้อง แล้วไล่ไอของโลหะไฮไดรด์ที่เกิดขึ้นเข้าไปในหลอดที่วางอยู่บนเปลวไฟ เมื่อให้ความร้อนไอของไฮไดรด์จะสลายตัวเป็นอะตอมของโลหะ

3.4. Coldvapor technique เหมาะกับธาตุที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่ายๆ เช่น Hg หลักการของวิธีนี้คือ ไอออนของปรอทจะถูกรีดิวซ์ด้วยสารละลายสแตนนัสคลอไรด์ (stannous chloride ; SnCl_2) ซึ่ง Hg^{2+} จะถูกรีดิวซ์ให้เป็น Hg^0 ดังสมการ



ไอปรอทที่เกิดขึ้นจะถูกก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน ไล่เข้าไปในเซลล์แล้วเกิดการดูดกลืนคลื่นแสง การมีไอน้ำในเซลล์จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไม่ถูกต้อง ซึ่งแก้ไขได้โดยให้ไอปรอทผ่านสารดูดความชื้นในปัจจุบันมีระบบ circular mode ทำให้ไอปรอทหมุนเวียนอยู่ในระบบที่ทำการวัด หลังจากวัดเสร็จแล้วจึงไล่ไอปรอทลงไปในขวดดักจับปรอท



รูปที่ ก.3 เครื่องมือวิเคราะห์แบบ cold vapor atomic absorption ใช้หาปริมาณปรอท
(แม้น และอมร, 2535)

4. สิ่งรบกวนต่อการวิเคราะห์

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีนั้นอาจเกิดข้อผิดพลาดได้จากสิ่งรบกวน ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 4 สาเหตุดังนี้ คือ

4.1. สิ่งรบกวนทางกายภาพ (physical effects) เป็นการรบกวนเนื่องจากสมบัติของสารละลายที่วิเคราะห์ เช่น ความหนืด แรงตึงผิว ความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งจะไปมีผลต่ออัตราการไหลของสารละลายเข้าสู่ nebulizer

4.2. สิ่งรบกวนทางเคมี (chemical effects) เกิดจากสมบัติทางเคมีของสารที่นำมาวิเคราะห์ เช่น สมบัติการแตกตัวเป็นอะตอมอิสระเมื่อมีสารอื่นปะปนอยู่รวมทั้งฟิเอชของสารละลายที่ทำการวิเคราะห์

4.3. การรบกวนเนื่องจากสเปกตรอล (spectral interferences) เกิดในกรณีที่สารตัวอย่างมีธาตุอื่นปนอยู่มาก ซึ่งสามารถดูดกลืนแสงและให้สเปกตรัมเกิดขึ้นเช่นเดียวกับธาตุที่จะวิเคราะห์

4.4. background absorption หรือ non-specific absorption effects ส่วนใหญ่เกิดขึ้นเมื่อใช้เปลวไฟที่อุณหภูมิต่ำๆ จึงมีสารที่อยู่ในรูปของโมเลกุลเหลืออยู่ในเปลวไฟ เช่น โมเลกุลของสาร น้ำและ

ของเหลวซึ่งสามารถดูดกลืนแสงในช่วงรังสีเหนือม่วง (UV) ได้ดี นอกจากนี้โมเลกุลของสารยังสามารถทำให้แสงจากหลอดฮาโลแคโทด (hallow cathode lamp) เกิดการกระเจิงได้ (scattering) ได้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2539)

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH Meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids)	-ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. -น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเลค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล.	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (Suspended Solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)
4. อุณหภูมิ (Temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (Sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Titrate

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและ
นิคมอุตสาหกรรม(พ.ศ. 2539) (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
7. ไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี Pyridine Barbituric Acid
8. น้ำมันและไขมัน (Fat, Oil and Grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภท ของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของ น้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (Phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4- Aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	Iodometric Method
12. สารที่ใช้ป้องกัน หรือกำจัดศัตรูพืช หรือสัตว์ (Pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	Gas-Chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วันที่ อุณหภูมิ 20 °C (Biochemical Oxygen Demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภท ของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	Azide Modification ที่ อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภท ของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและ
นิคมอุตสาหกรรม(พ.ศ. 2539) (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
15. ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล.หรืออาจแตกต่างกัน แล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำ ทิ้ง หรือ ประเภทของ โรงงาน อุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการ ควบคุมมลพิษ เห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	Potassium Dichromate Digestion
16. โลหะหนัก (Heavy Metal)		
1. สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
2. โครเมียมชนิด เฮกซะวาเลนต์ (Hexavalent Chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
3. โครเมียมชนิด ไตรวาเลนต์ (Trivalent Chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
4. ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
5. แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
6. แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
7. ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
8. นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
9. แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	

ตารางที่ ข.1 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทโรงงานอุตสาหกรรมและ
นิคมอุตสาหกรรม(พ.ศ. 2539) (ต่อ)

ดัชนีคุณภาพ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
10. อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	Atomic Absorption Spectrophotometry ชนิด Hydride Generation หรือวิธี Plasma Emission Spectroscopy ชนิด Inductively Coupled Plasma : ICP
11. เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	
12. ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	Atomic Absorption Cold Vapour Technique

ภาคผนวก ก

ตารางแสดงผลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 การหาปริมาณสังกะสีที่เหลือจากการดูดซับกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว

pH	ความเข้มข้นของ Zn^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุดควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
3	6.1	5.5	5.8	50.9	5.8	88.61	0.24
4	4.3	4.3	4.3	50.9	4.3	91.55	0.00
5	4.2	4.0	4.1	50.9	4.1	91.94	0.08
6	2.8	2.9	3.0	50.9	2.9	94.30	0.08
7	3.0	2.8	2.5	50.9	2.8	61.18	0.21
8	0.8	0.9	0.9	50.9	0.87	3.60	0.05

ตารางที่ ค.2 การหาปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับกับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว

pH	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุดควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์การดูดซับ	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
3	15.7	11.7	14.2	67.63	13.87	79.49	1.65
4	13.2	13.7	12.4	67.63	13.10	80.63	0.54
5	15.3	12.4	17.0	67.63	14.90	77.97	1.90
6	13.6	14.3	14.0	67.63	13.97	45.74	0.29
7	14.1	14.3	10.0	67.63	12.80	7.69	1.98
8	13.7	11.6	12.0	67.63	12.43	2.02	0.91

ตารางที่ ค.3 การหาปริมาณสังกะสีที่เหลือจากการดูดซับกับระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของ Zn^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุดควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	8.71	9.58	10.45	71.7	9.58	86.64	0.71
20	6.46	7.37	8.28	71.7	7.37	89.72	0.74
40	5.7	5.6	5.2	71.7	5.50	92.33	0.22
60	3.91	5.73	7.55	71.7	5.73	92.01	1.49
80	4.68	5.71	6.74	71.7	5.71	92.04	0.84

ตารางที่ ค.4 การหาปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับกับระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว

เวลา (นาท)	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุดควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
0	11.62	12.53	13.44	51.4	12.53	75.63	0.74
20	10.11	11.34	12.57	51.4	11.34	77.94	1.00
40	9.87	10.65	11.43	51.4	10.65	79.28	0.64
60	9.0	8.9	10.6	51.4	9.5	81.51	0.78
80	8.71	10.63	10.54	51.4	9.96	80.63	0.88

ตารางที่ ค.5 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแสดงการหาปริมาณสังกะสีที่เหลือจากการดูดซับกับค่าสารละลายสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว

ความเข้มข้น สารละลาย (mg/L)	ความเข้มข้นของ Zn^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุด ควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
50	10.2	10.6	9.5	65.7	10.10	84.63	0.45
100	26.8	27.8	27.6	134.4	27.40	79.61	0.43
150	53.1	52.2	56.4	164.4	53.90	67.15	1.81
200	85.2	81.2	88.0	252	84.80	66.35	2.79
250	98.5	102.5	112.5	307	104.50	65.96	5.89

ตารางที่ ค.6 การศึกษาความเข้มข้นของสารละลายที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับ แสดงการหาปริมาณตะกั่วที่เหลือจากการดูดซับกับค่าสารละลายสังกะสีที่ความเข้มข้นต่างๆ ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ในการดูดซับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้ว

ความเข้มข้น สารละลาย (mg/L)	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุด ควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซ็นต์ การดูดซับ	SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
50	14.8	13.6	14.9	68.3	14.43	78.87	0.59
100	39.4	32.8	34.4	142.2	35.53	75.01	2.81
150	55.8	47.4	54.3	194.1	52.50	75.04	3.66
200	60.8	66.8	59.6	250.0	62.40	72.95	3.15
250	76.0	82.5	87.0	298.5	81.83	72.58	4.52

ตารางที่ ค.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับการดูดซับ การศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ และการนำกลับมาใช้ใหม่ แสดงการหาปริมาณโลหะหนักที่เหลือจากการดูดซับ โลหะหนักสังกะสี ของ เปลือกส้มโอทั้งสองชนิด ค่าเฉลี่ย เปอร์เซนต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอ ทั้งสองชนิด

ชนิดตัว ดูดซับ	พารามิเตอร์	ความเข้มข้นของ Zn^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุด ควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซนต์ การดูดซับ	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
ปรับปรุง คุณภาพ	ดูดซับ	5.7	5.6	5.2	71.7	5.50	92.33	0.22
	คายซับ	45.1	46.2	45.8	71.7	45.70	69.03	0.45
	ใช้ใหม่	28.4	28.9	28.9	51.4	28.73	44.15	0.24
ไม่ได้ ปรับปรุง คุณภาพ	ดูดซับ	27.9	27.1	28.9	71.7	27.97	60.99	0.74
	คายซับ	25.4	24.2	25.8	71.7	25.13	57.51	0.68
	ใช้ใหม่	35.1	35.3	35.8	51.4	35.40	31.21	0.29

ตารางที่ ค.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับการดูดซับ การศึกษาประสิทธิภาพการคายซับ และการนำกลับมาใช้ใหม่ แสดงการหาปริมาณโลหะหนักที่เหลือจากการดูดซับ โลหะหนักตะกั่ว ของ เปลือกส้มโอทั้งสองชนิด ค่าเฉลี่ย เปอร์เซนต์ในการดูดซับและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเปลือกส้มโอ ทั้งสองชนิด

ชนิดตัว ดูดซับ	พารามิเตอร์	ความเข้มข้นของ Pb^{2+} ที่เหลือ (mg/L)			ชุด ควบคุม	เฉลี่ย	เปอร์เซนต์ การดูดซับ	SD
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3				
ปรับปรุง คุณภาพ	ดูดซับ	9.0	8.9	10.6	51.4	9.50	81.51	0.78
	คายซับ	25.6	25.1	26.0	51.4	25.57	61.06	0.37
	ใช้ใหม่	29.6	29.2	29.8	51.8	29.53	42.81	0.25
ไม่ได้ ปรับปรุง คุณภาพ	ดูดซับ	22.4	23.8	23.7	51.4	23.30	54.64	0.64
	คายซับ	12.1	12.3	12.0	51.4	12.13	43.01	0.12
	ใช้ใหม่	35.8	35.9	35.6	51.8	35.77	30.83	0.12

ภาคผนวก ง

ตารางแสดงการหาค่าไอโซเทอม

ตารางที่ ง.1 การหาไอโซเทอมแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ สังกะสี

X (mg/g)	Ce (mg/L)	1/X	1/Ce
12.3430	8.90	0.0810	0.1124
4.3083	6.57	0.2321	0.1522
2.5870	6.53	0.3865	0.1531
1.8607	6.17	0.5374	0.1621
1.4539	5.93	0.6878	0.1686

ตารางที่ ง.2 การหาไอโซเทอมแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ สังกะสี

x/m (mg/g)	Ce (mg/L)	log(x/m)	log(Ce)
12.3430	8.90	1.0914	0.9494
4.3083	6.57	0.6343	0.8176
2.5870	6.53	0.4128	0.8149
1.8607	6.17	0.2697	0.7903
1.4539	5.93	0.1625	0.7731

ตารางที่ ง.3 การหาไอโซเทอมแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ ตะกั่ว

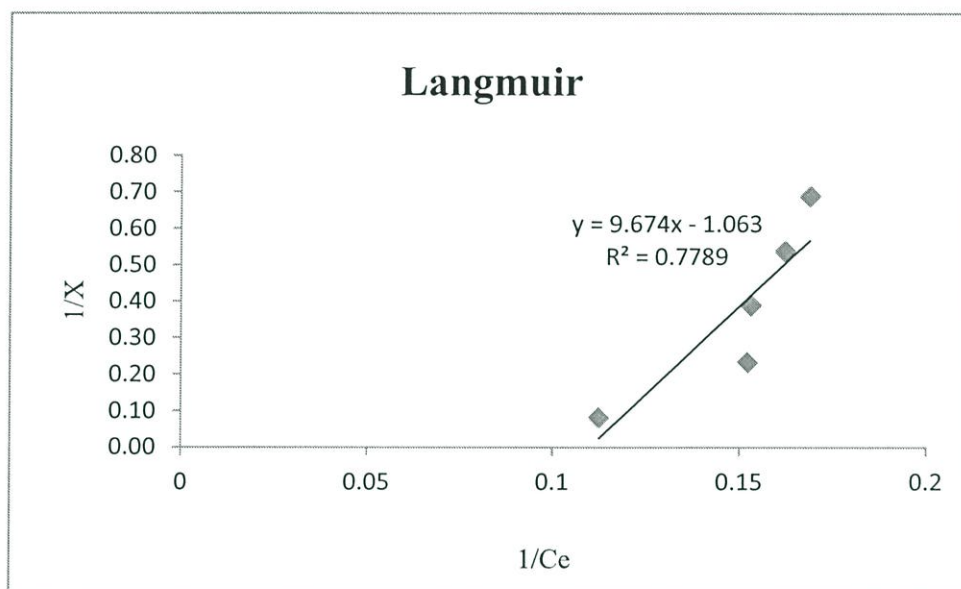
X (mg/g)	Ce (mg/L)	1/X	1/Ce
10.0550	10.58	0.0995	0.0945
3.5057	8.73	0.2852	0.1145
2.1254	8.29	0.4705	0.1206
1.5229	8.16	0.6566	0.1225
1.1956	7.76	0.8364	0.1289

ตารางที่ ง.4 การหาไอโซเทอมแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ ตะกั่ว

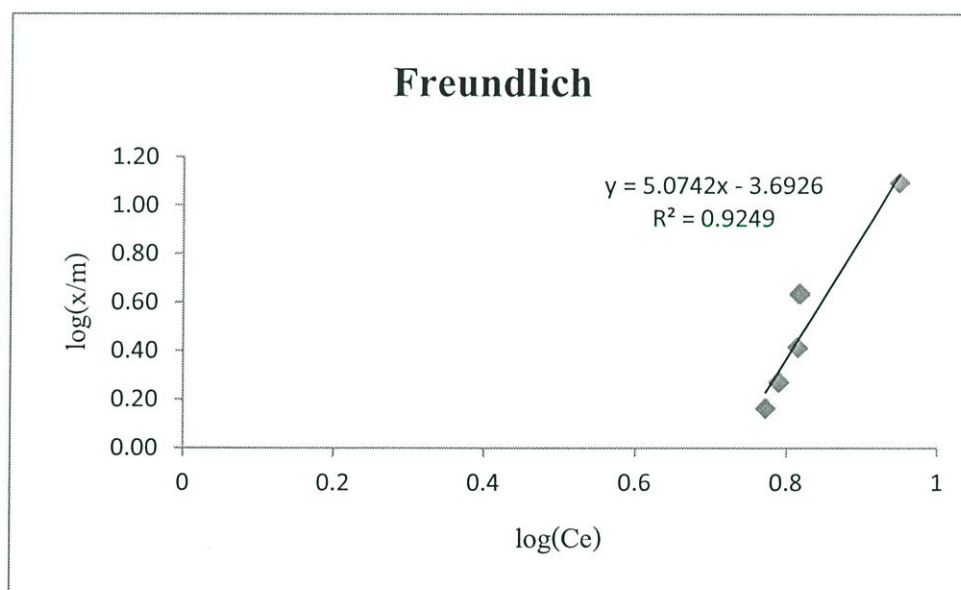
x/m (mg/g)	Ce (mg/L)	log(x/m)	log(Ce)
10.0550	10.58	1.0024	1.0245
3.5057	8.73	0.5448	0.9410
2.1254	8.29	0.3274	0.9186
1.5229	8.16	0.1827	0.9117
1.1956	7.76	0.0776	0.8899

ภาคผนวก จ

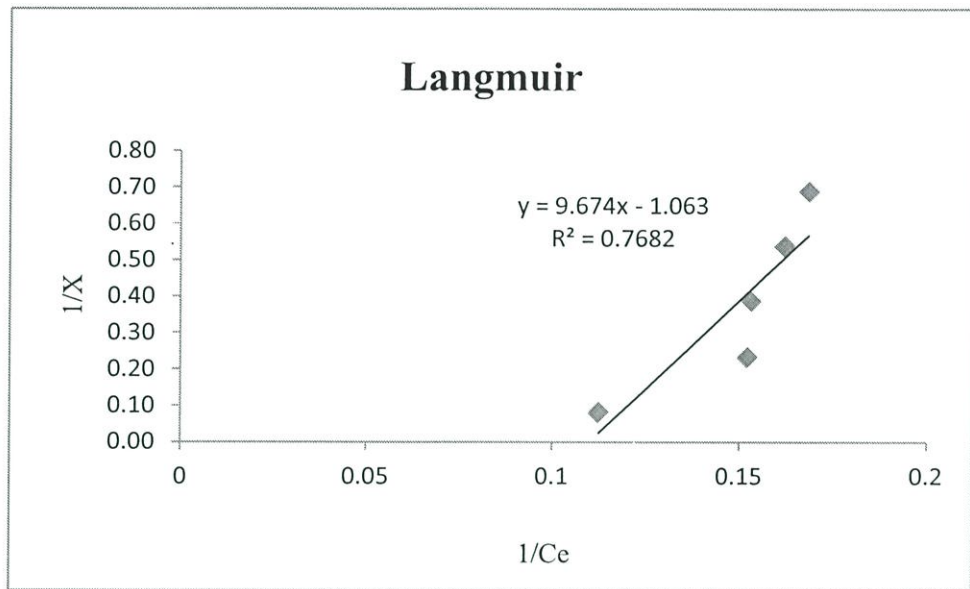
กราฟแสดงการหาค่าไอโซเทอม



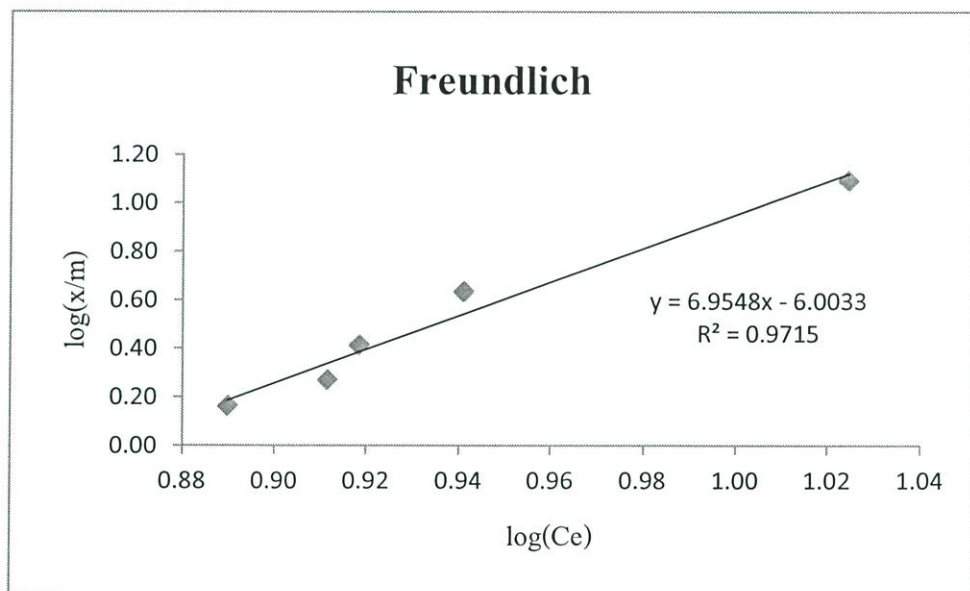
รูปที่ จ.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ
 สังกะสี



รูปที่ จ.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ
 สังกะสี



รูปที่ จ.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Langmuir ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ ตะกั่ว



รูปที่ จ.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ Freundlich ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับ ตะกั่ว

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS

ตารางที่ จ.1 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับร้อยละการดูดซับสังกะสีของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
3.00	3	87.8733	.95824	.55324	85.4929	90.2537	86.79	88.61
4.00	3	91.5500	1.00000	.57735	89.0659	94.0341	90.55	92.55
5.00	3	91.9400	1.00000	.57735	89.4559	94.4241	90.94	92.94
6.00	3	94.3000	1.00000	.57735	91.8159	96.7841	93.30	95.30
7.00	3	60.8467	.57735	.33333	59.4124	62.2809	60.18	61.18
8.00	3	3.6000	1.00000	.57735	1.1159	6.0841	2.60	4.60
Total	18	71.6850	33.43542	7.88080	55.0580	88.3120	2.60	95.30

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	18994.261	5	3798.852	4340.250	.000
Within Groups	10.503	12	.875		
Total	19004.764	17			

ตารางที่ ๓.2 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับร้อยละการดูดซับตะกั่วของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
3.00	3	79.4900	1.00000	.57735	77.0059	81.9741	78.49	80.49
4.00	3	80.6200	2.01502	1.16337	75.6144	85.6256	78.60	82.63
5.00	3	77.7600	2.12280	1.22560	72.4867	83.0333	75.54	79.77
6.00	3	45.8400	1.98189	1.14425	40.9167	50.7633	43.91	47.87
7.00	3	7.6900	1.00000	.57735	5.2059	10.1741	6.69	8.69
8.00	3	2.0333	1.00007	.57739	-.4510	4.5176	1.04	3.04
Total	18	48.9056	34.35776	8.09820	31.8198	65.9913	1.04	82.63

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	20036.754	5	4007.351	1551.770	.000
Within Groups	30.989	12	2.582		
Total	20067.743	17			

ตารางที่ จ.3 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา (นาที) กับร้อยละการดูดซับสังกะสีของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
.00	3	86.6400	2.00000	1.15470	81.6717	91.6083	84.64	88.64
20.00	3	89.7200	.89000	.51384	87.5091	91.9309	88.83	90.61
40.00	3	92.3300	1.11000	.64086	89.5726	95.0874	91.22	93.44
60.00	3	92.0100	1.01000	.58312	89.5010	94.5190	91.00	93.02
80.00	3	92.0400	.97000	.56003	89.6304	94.4496	91.07	93.01
Total	15	90.5480	2.48512	.64166	89.1718	91.9242	84.64	93.44

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	70.491	4	17.623	11.035	.001
Within Groups	15.970	10	1.597		
Total	86.462	14			

ตารางที่ ๓.4 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลา (นาที) กับร้อยละการดูดซับตะกั่วของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
.00	3	75.6300	.91000	.52539	73.3694	77.8906	74.72	76.54
20.00	3	77.9400	2.02000	1.16625	72.9220	82.9580	75.92	79.96
40.00	3	79.2133	.88189	.50916	77.0226	81.4041	78.30	80.06
60.00	3	81.5100	1.09000	.62931	78.8023	84.2177	80.42	82.60
80.00	3	80.6300	1.09000	.62931	77.9223	83.3377	79.54	81.72
Total	15	78.9847	2.39896	.61941	77.6562	80.3132	74.72	82.60

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	64.446	4	16.111	9.992	.002
Within Groups	16.125	10	1.612		
Total	80.570	14			

ตารางที่ จ.5 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับร้อยละการดูดซับสังกะสีของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
50.00	3	84.6367	1.00002	.57736	82.1525	87.1208	83.64	85.64
100.00	3	79.8633	1.02378	.59108	77.3201	82.4066	78.99	80.99
150.00	3	67.3633	2.00852	1.15962	62.3739	72.3528	65.47	69.47
200.00	3	66.4700	1.00539	.58046	63.9725	68.9675	65.53	67.53
250.00	3	65.7133	1.02256	.59038	63.1731	68.2535	64.59	66.59
Total	15	72.8093	8.21936	2.12223	68.2576	77.3611	64.59	85.64

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	929.532	4	232.383	142.764	.000
Within Groups	16.277	10	1.628		
Total	945.809	14			

ตารางที่ จ.6 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับร้อยละการดูดซับตะกั่วของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
50.00	3	78.6500	1.01799	.58774	76.1212	81.1788	77.54	79.54
100.00	3	75.4433	1.06810	.61667	72.7900	78.0966	74.66	76.66
150.00	3	75.3333	2.01607	1.16398	70.3251	80.3415	73.48	77.48
200.00	3	72.4633	1.08519	.62653	69.7676	75.1591	71.22	73.22
250.00	3	72.5133	2.00083	1.15518	67.5430	77.4837	70.48	74.48
Total	15	74.8807	2.69095	.69480	73.3905	76.3709	70.48	79.54

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	78.531	4	19.633	8.594	.003
Within Groups	22.845	10	2.285		
Total	101.377	14			

ตารางที่ จ.7 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการดูดซับสังกะสีของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	44.1467	.54501	.31466	42.7928	45.5005	43.76	44.77
2.00	3	31.2100	.63498	.36661	29.6326	32.7874	30.49	31.69
Total	6	37.6783	7.10544	2.90078	30.2216	45.1350	30.49	44.77

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	251.036	1	251.036	717.007	.000
Within Groups	1.400	4	.350		
Total	252.436	5			

ตารางที่ จ.8 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการคายซับสังกะสีของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	69.0300	.79221	.45738	67.0620	70.9980	68.33	69.89
2.00	3	57.5100	3.03857	1.75432	49.9618	65.0582	54.26	60.28
Total	6	63.2700	6.61493	2.70053	56.3281	70.2119	54.26	69.89

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	199.066	1	199.066	40.376	.003
Within Groups	19.721	4	4.930		
Total	218.787	5			

ตารางที่ ๙ ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการดูดซับตะกั่วของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
3.00	3	81.5100	1.85599	1.07156	76.8995	86.1205	79.37	82.68
4.00	3	54.6433	1.51596	.87524	50.8775	58.4092	53.67	56.39
Total	6	68.0767	14.79333	6.03935	52.5520	83.6013	53.67	82.68

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1082.727	1	1082.727	377.071	.000
Within Groups	11.486	4	2.871		
Total	1094.212	5			

ตารางที่ ๑๐ ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการคายซับตะกั่วของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพ

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
3.00	3	61.0633	2.40816	1.39035	55.0811	67.0455	58.98	63.70
4.00	3	43.0100	1.75496	1.01323	38.6504	47.3696	41.08	44.51
Total	6	52.0367	10.06621	4.10951	41.4728	62.6005	41.08	63.70

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	488.884	1	488.884	110.120	.000
Within Groups	17.758	4	4.440		
Total	506.643	5			

ตารางที่ จ.11 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพในการดูดซับสังกะสี

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
1.00	3	92.3300	.37041	.21385	91.4099	93.2501	92.05	92.75
2.00	3	61.0300	1.26361	.72954	57.8910	64.1690	59.69	62.20
Total	6	76.6800	17.16393	7.00715	58.6676	94.6924	59.69	92.75

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1469.535	1	1469.535	1695.063	.000
Within Groups	3.468	4	.867		
Total	1473.003	5			

ตารางที่ จ.12 ANOVA ความสัมพันธ์ระหว่างการเปรียบเทียบการนำกลับมาใช้ใหม่ของเปลือกส้มโอที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพกับเปลือกส้มโอที่ไม่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพในการดูดซับตะกั่ว

	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
3.00	3	42.8100	.58103	.33546	41.3666	44.2534	42.25	43.41
4.00	3	30.8300	.20075	.11590	30.3313	31.3287	30.64	31.04
Total	6	36.8200	6.57322	2.68351	29.9218	43.7182	30.64	43.41

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	215.281	1	215.281	1139.352	.000
Within Groups	.756	4	.189		
Total	216.036	5			

ภาคผนวก ข

การเตรียมสารละลาย

1. การเตรียมกรดไนตริก 20%
 ปิเปตไนตริก 70% ปริมาตร 14.28 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
2. การเตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1.5 M
 ชั่ง CaCl_2 83.25 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่นถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
3. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M
 ชั่ง NaOH 10 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่นถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
4. การเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 N
 ชั่ง NaOH 4 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ ละลายด้วยน้ำกลั่นถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
5. การเตรียมสารละลายไฮโดรคลอริก 0.1 N
 ปิเปตสารละลายกรด HCl 37% ปริมาตร 9.9 มิลลิลิตร ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
6. การเตรียมสารละลายไฮโดรคลอริก 0.05 N
 ปิเปตสารละลายกรด HCl 37% ปริมาตร 4.95 มิลลิลิตร ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ภาคผนวก ข

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี 1000 ppm
ชั่ง $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 4.3973 กรัมใส่ลงในปิកเกอร์ละลายด้วยน้ำกลั่นถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรเติมกรด HNO_3 20% ปริมาตร 25 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
2. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 1000 ppm
ชั่ง $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 1.5984 กรัมใส่ลงในปิกเกอร์ละลายด้วยน้ำกลั่นถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรเติมกรด HNO_3 20% ปริมาตร 25 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
3. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี 50 ppm
ปิเปตสารละลายสังกะสี 1000 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
4. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 50 ppm
ปิเปตสารละลายตะกั่ว 1000 ppm ปริมาตร 25 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 500 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
5. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสีความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm
ปิเปตน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี 1000 ppm ปริมาตร 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร
6. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50, 100, 150, 200 และ 250 ppm
ปิเปตน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว 1000 ppm ปริมาตร 50, 100, 150, 200 และ 250 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตรปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตร

ภาคผนวก ฅ

การสร้างกราฟสารละลายมาตรฐาน

1. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายซิงค์ (Zn^{2+})

ปีเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์ 1000 ppm ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัด ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์เข้มข้น 100 ppm ปีเปตสารละลายมาตรฐานซิงค์ 100 ppm ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัด ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์เข้มข้น 10 ppm ปีเปตสารละลายซิงค์มาตรฐาน 10 ppm ปริมาตร 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ใส่ขวดวัด ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานซิงค์เข้มข้น 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 ppm นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 213.4 นาโนเมตร

2. การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายเลด (Pb^{2+})

ปีเปตสารละลายมาตรฐานเลด 1000 ppm ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัด ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานเลดเข้มข้น 100 ppm ปีเปตสารละลายมาตรฐานเลด 100 ppm ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดวัด ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานเลดเข้มข้น 10 ppm ปีเปตสารละลายมาตรฐาน 10 ppm ปริมาตร 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70 ใส่ขวดวัด ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนถึงขีดบอกปริมาตรจะได้สารละลายมาตรฐานเลดเข้มข้น 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ppm นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง AAS ที่ความยาวคลื่น 217 นาโนเมตร