

การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

นางสาวพิมพ์พันธ์ อุดทาพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF HEAVY METAL USING ZEOLITE SYNTHESIZED  
FROM SPENT SILICA-ALUMINA

Miss Pimonpan Uttapan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว
โดย	นางสาวพิมพ์พันธ์ อุดทาพันธ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากกรกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร. สุวิสา มหาสันทนะ)

พิมพ์พันธ์ อุดทาพันธ์ : การกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว. (REMOVAL OF HEAVY METAL USING ZEOLITE SYNTHESIZED FROM SPENT SILICA - ALUMINA) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร. เพ็ชรพร เขาวงกัจเจริญ, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รศ.ดร. ดาว์ลัย วิวรรณเดชะ, 154 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ทำการทดลองแบบที่ละเท โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่จะมีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ค่าพีเอช และระยะเวลาสัมผัส ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเท่ากับ 30, 30 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเท่ากับ 5, 4 และ 5 ตามลำดับ และระยะเวลาสัมผัสในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงสำหรับกากโซดาไลต์ เท่ากับ 60 นาที ส่วนซีโอไลต์เอ ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที ซึ่งกากโซดาไลต์สามารถกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงได้มากกว่าซีโอไลต์เอ โดยปริมาณสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงที่ถูกกำจัดมีค่าเท่ากับ 306.12, 223.88 และ 58.48 มิลลิกรัมต่อกรัม และพบว่าในการกำจัดสังกะสี และทองแดง ด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ส่วนผลการทดลองแบบคอลัมน์ พบว่าความสามารถในการกำจัดสังกะสี ตะกั่วและทองแดงของกากโซดาไลต์มีค่าใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอ โดยกากโซดาไลต์หนึ่งกรัมสามารถกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงได้เท่ากับ 351, 310.5 และ 351 มิลลิกรัม ตามลำดับ และพบว่าซีโอไลต์เอหนึ่งกรัม สามารถกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ได้เท่ากับ 310.5, 324 และ 310.5 มิลลิกรัม ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

# # 5270423921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : SPENT SILICA-ALUMINA / ZEOLITE / ADSORPTION PROCESS / HEAVY METAL

PIMONPAN UTTAPAN : REMOVAL OF HEAVY METAL USING ZEOLITE SYNTHESIZED FROM SPENT SILICA-ALUMINA. ADVISOR : ASSOC.PROF. PETCHPORN CHAWAKITCHAREON; Ph.D., CO-ADVISOR : ASSOC.PROF. DAWAN WIWATTANADATE; Ph.D., 154 pp.

This research was carried out in order to investigate the adsorption efficiency of zinc removal by using sodalite and Na-A zeolite synthesized from spent silica-alumina. The experiment was carried out by using sodalite and Na-A zeolite as an adsorbent for removal of zinc, lead and copper from aqueous solution. The batch experiment was utilized to study the influential factors on removal of heavy metal which are namely concentration of heavy metal, pH and concentration. The results indicated that the optimum condition of zinc, lead and copper adsorption was at the concentration of 30, 30 and 10 ppm, respectively. The optimum was at pH 5, 4 and 5, respectively and the optimum contact time at 60 minutes for sodalite and 30 minutes for Na-A zeolite. The sodalite had higher adsorption capacities than Na-A zeolite for zinc, lead and copper. The adsorption capacities were at 306.12 mg zinc/g, 223.88 mg lead/g and 58.48 mg copper/g, respectively. The adsorption isotherm of zinc, lead and copper was related to Langmuir adsorption isotherm. The results obtained from column experiment reported that the adsorption capacity of sodalite was similar to that of Na-A zeolite. The maximum adsorption capacity of sodalite was at 351 mg zinc/g, 310.5 mg lead/g and 351 mg copper/g, respectively. The maximum adsorption capacity of Na-A zeolite was at 310.5 mg zinc/g, 324 mg lead/g and 310.5 mg copper/g, respectively.

Department : Environmental Engineering

Field of Study : Environmental Engineering

Academic Year : 2010

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ให้คำปรึกษาแนะแนวทางหลักการในการดำเนินงานวิจัย และแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเอียร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ และ อาจารย์ ดร. สุวิสา มหาสันตนะ ที่ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะ จนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ห้องปฏิบัติการน้ำดี และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก ทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 14 (1/2554)

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฅ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ซิลิกา-อะลูมินาจากอุตสาหกรรมผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์.....	4
2.1.1 สารแอนทราควิโนน (Anthraquinone).....	6
2.2 ซีโอไลต์ (Zeolite).....	6
2.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์.....	6
2.2.2 ลักษณะสมบัติของซีโอไลต์.....	10
2.2.2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ.....	10
2.2.2.2 ลักษณะสมบัติทางเคมี.....	11
2.2.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	11
2.2.3.1 ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ.....	12
2.2.3.2 ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี.....	13
2.2.4 กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	14
2.2.4.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล.....	14
2.2.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไมโครเวฟ.....	15

	หน้า
2.2.5 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในปัจจุบัน.....	15
2.3 โลหะหนัก.....	17
2.3.1 สังกะสี (Zinc: Zn).....	17
2.3.2 ทองแดง (Copper: Cu).....	19
2.3.3 ตะกั่ว ( Lead : Pb ).....	19
2.3.4 การปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำเสีย.....	22
2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	22
2.4.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี.....	22
2.4.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางฟิสิกส์.....	24
2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption).....	25
2.5.1 ประเภทของการดูดซับ.....	26
2.5.2 กลไกของการดูดซับ.....	28
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	28
2.5.4 ประเภทของสารดูดซับ.....	30
2.5.5 สมดุลของการดูดซับ.....	30
2.5.6 การดูดซับแบบคอลัมน์.....	33
2.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมี.....	34
2.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิว.....	34
2.6.2 การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ.....	35
2.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	36
2.6.4 การวิเคราะห์หาพื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน.....	36
2.6.5 การวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว.....	36
2.6.6 การวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ( $pH_{PZC}$ ).....	38
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.7.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์.....	39
2.7.2 การใช้ซีโอไลต์กำจัดโลหะหนัก.....	43



<b>บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>47</b>
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	47
3.1.1 วัสดุอุปกรณ์.....	47
3.1.2 สารเคมี.....	49
3.2 แผนการทดลอง.....	50
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	51
3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ.....	51
3.3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี.....	53
3.3.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโลหะหนัก.....	54
3.3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น.....	54
3.3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของพีเอช.....	56
3.3.3.3 การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส.....	58
3.3.3.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนัก.....	60
3.3.4 การศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์.....	62
3.3.5 การศึกษาการชะไอออนโลหะหนักด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น.....	64
3.3.6 การประมาณค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	64
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....</b>	<b>65</b>
4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี.....	65
4.1.1 วิเคราะห์โครงสร้างผลึกในซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD).....	65
4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM).....	68
4.1.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface Area Analyzer).....	70
4.1.4 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลาง.....	71

	หน้า
4.1.5 การวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวของตัวกลาง.....	74
4.2 ผลการทดลองแบบทีละเท (Batch test).....	75
4.2.1 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	75
4.2.2 ผลของพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	82
4.2.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับ.....	89
4.2.4 ผลไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนัก.....	97
4.3 ผลการศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำ การทดลองแบบคอลัมน์.....	105
4.4 ผลการศึกษาการชะไอออนโลหะหนักด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น.....	111
4.5 ผลการประมาณค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	113
4.5.1 ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	113
4.5.2 ค่าพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	113
4.5.3 ค่าแรงที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	114
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>116</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	116
5.2 ความสำคัญและการนำไปใช้ประโยชน์.....	118
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	120
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>121</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>127</b>
ภาคผนวก ก. การคำนวณองค์ประกอบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	128
ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ.....	131
ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือ FTIR และ Surface Area Analyzer...	135
ภาคผนวก ง. ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักโดยการทดลองแบบคอลัมน์.....	141
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>154</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....	5
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....	5
ตารางที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของซีโอไลต์.....	10
ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ.....	11
ตารางที่ 2.5 ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่สามารถสังเคราะห์ได้.....	13
ตารางที่ 2.6 ระดับปกติและระดับที่เป็นพิษของโลหะหนักในเลือดและซีรัมในมนุษย์.....	18
ตารางที่ 2.7 ลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก.....	22
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวิเคราะห์.....	54
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นต่อความสามารถในการดูดซับ โลหะหนัก.....	56
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับ โลหะหนัก.....	58
ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับ โลหะหนัก.....	60
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนัก.....	62
ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนักแบบคอลัมน์.....	63
ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นผลึกของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว..	67
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของกากซิลิกา- อะลูมินากากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอ.....	70
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกากซิลิกา-อะลูมินา กากโซดาไลต์ และ ซีโอไลต์เอ.....	72
ตารางที่ 4.4 ค่า $pH_{pzc}$ และลักษณะประจุของตัวกลางในสารละลายพีเอชต่างๆ.....	75
ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....	76
ตารางที่ 4.6 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	77

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	79
ตารางที่ 4.8 ขนาดไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด.....	81
ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็น กรดต่างที่พีเอชต่างๆ.....	82
ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ ของกาก โซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	83
ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ ของกาก โซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	85
ตารางที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ ของ กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	86
ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัส ต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	90
ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัส ต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	91
ตารางที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัส ต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	93
ตารางที่ 4.16 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยโซดาไลต์และ ซีโอไลต์เอ.....	97
ตารางที่ 4.17 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.	99
ตารางที่ 4.18 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยโซดาไลต์และ ซีโอไลต์เอ.....	101
ตารางที่ 4.19 สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแลงเมียร์ของ สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง.....	103
ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ จากสมการของฟรุนดลิชและ แลงเมียร์.....	103

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เปรียบเทียบกับซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากวัตถุดิบอื่นๆ.....	105
ตารางที่ 4.22 ค่าที่ใช้ในการทดลองการดูดซับแบบคอลัมน์ (Column).....	106
ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักในคอลัมน์.....	110
ตารางที่ 4.24 การชะไอออนโลหะหนักสังกะสี ตะกั่วและทองแดงด้วยน้ำกลั่น และ สารละลายกรด.....	111
ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ.....	115
ตารางที่ ก-1 การคำนวณองค์ประกอบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ.....	129
ตารางที่ ก-2 ปริมาณน้ำหนักของสารตั้งต้นแต่ละชนิดในการสังเคราะห์สารทั้งหมด.....	130
ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ( $pH_{PZC}$ ) ของกากโซดาไลต์ ด้วยวิธีไทเทรตด้วยกรด- ด่าง น้ำปราศจากไอออนที่ผสมสารละลายโซเดียม คลอไรด์ เพื่อให้ได้ค่าความแรงไอออน 0.002 โมลต่อลิตร.....	133
ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ( $pH_{PZC}$ ) ของซีโอไลต์เอ ด้วย วิธีไทเทรตด้วยกรด- ด่าง น้ำปราศจากไอออนที่ผสมสารละลายโซเดียม คลอไรด์ เพื่อให้ได้ค่าความแรงไอออน 0.002 โมลต่อลิตร.....	134
ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอด้วยเครื่อง Surface area analysis.....	140
ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดสังกะสี ความเข้มข้น เริ่มต้น 27.057 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรขั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ ).....	142
ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองคอลัมน์ของซีโอไลต์เอในการกำจัดสังกะสี ความเข้มข้น เริ่มต้น 36.258 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรขั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ ).....	144
ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้น เริ่มต้น 33.377 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 4 ปริมาตรขั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ ).....	146

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองคอแลนของซีโอดีเอในการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 36.258 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 4 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ ).....	148
ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองคอแลนของกากโซดาไลต์ในการกำจัดทองแดง ความเข้มข้น เริ่มต้น 10.493 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้น ตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ ).....	150
ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองคอแลนของซีโอดีเอในการกำจัดทองแดง ความเข้มข้น เริ่มต้น 13.265 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้น ตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ ).....	152

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....	4
ภาพที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของสารแอนทราควิโนน.....	6
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทรงสี่หน้าของซิลิกอน [SiO <sub>4</sub> ] <sup>4-</sup> และอะลูมิเนียม [AlO <sub>4</sub> ] <sup>5-</sup> และการเชื่อมต่อกันในผลึกซีโอไลต์.....	7
ภาพที่ 2.4 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ).....	8
ภาพที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์.....	8
ภาพที่ 2.6 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์.....	9
ภาพที่ 2.7 การเกิดโครงสร้างของผลึกแบบต่างๆ.....	9
ภาพที่ 2.8 ทางเข้าสู่ร่างกายของสารตะกั่ว.....	21
ภาพที่ 2.9 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์ที่พีเอชต่างๆ.....	23
ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์.....	32
ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช .....	33
ภาพที่ 2.12 เส้นโค้งเบรททวูในการดูดซับแบบคอลัมน์.....	34
ภาพที่ 2.13 แผนภูมิระบบไมเคิลสันอินเทอร์เฟอริเตอร์.....	37
ภาพที่ 3.1 กระบอกเทพลอน.....	48
ภาพที่ 3.2 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven).....	48
ภาพที่ 3.3 เตาเผาไฟฟ้า (muffle furnace).....	49
ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมกากอะลูมินาและซิลิกา.....	51
ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว.....	52
ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....	55
ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....	57
ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก.....	59
ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก.....	61
ภาพที่ 3.10 ขนาดและการติดตั้งคอลัมน์.....	63

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.1 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วหลังทำการปรับปรุงเบื้องต้นโดยการบดและร่อนผ่าน ตะแกรงขนาด 200 เมช.....	66
ภาพที่ 4.2 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วหลังทำการปรับปรุงเบื้องต้นโดยเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง.....	66
ภาพที่ 4.3 ดิฟแฟรกโทแกรมของกากโซดาไลต์ที่กรองทิ้งหลังจากผสมด้วย สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์.....	66
ภาพที่ 4.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของสภาวะการทดลองที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงและซีโอไลต์เออ้างอิง (Ref).....	67
ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกากซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้วที่กำลังขยาย ก) 5,000 และ ข) 10,000 เท่า.....	69
ภาพที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกากโซดาไลต์ ที่ใช้แล้วที่กำลังขยาย ก) 5,000 และ ข) 10,000 เท่า.....	69
ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนของซีโอไลต์เอ ที่กำลังขยาย ก) 5,000 และ ข) 10,000 เท่า.....	69
ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์กากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยเครื่อง FTIR.....	73
ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์กากโซดาไลต์ด้วยเครื่อง FTIR.....	73
ภาพที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ซีโอไลต์เอด้วยเครื่อง FTIR.....	73
ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นของประจุที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	75
ภาพที่ 4.12 ความสามารถในการกำจัดสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	76
ภาพที่ 4.13 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	78
ภาพที่ 4.14 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	79
ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ความ เข้มข้นต่างๆ.....	80



ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.16 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็นกรดต่างที่พีเอชต่างๆ.....	83
ภาพที่ 4.17 ความสามารถในการกำจัดสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ.....	84
ภาพที่ 4.18 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ.....	85
ภาพที่ 4.19 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ.....	86
ภาพที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ.....	87
ภาพที่ 4.21 ความสามารถในการกำจัดสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ.....	90
ภาพที่ 4.22 ความสามารถในการกำจัดตะกั่วของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ.....	92
ภาพที่ 4.23 ความสามารถในการกำจัดทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ.....	93
ภาพที่ 4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ.....	94
ภาพที่ 4.25 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์ที่พีเอชต่างๆ.....	96
ภาพที่ 4.26 ไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีแบบฟรอนด์ลิชของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	98
ภาพที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	98
ภาพที่ 4.28 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบฟรอนด์ลิชของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	100
ภาพที่ 4.29 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	100
ภาพที่ 4.30 ไอโซเทอมการดูดซับทองแดงแบบฟรอนด์ลิชของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ...	102
ภาพที่ 4.31 ไอโซเทอมการดูดซับทองแดงแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ...	102
ภาพที่ 4.32 เส้นโค้งเบรคทูร์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีกับปริมาตรเบด (BV) ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	107

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.33 เส้นโค้งเบรคทอร์จระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับปริมาตรเบด (BV) ของกาก โซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	108
ภาพที่ 4.34 เส้นโค้งเบรคทอร์จระหว่างความเข้มข้นของทองแดงกับปริมาตรเบด (BV) ของ กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ.....	109
ภาพที่ ค-1 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์กากโซดาไลต์หลังผ่านการดูดซับสังกะสี.....	137
ภาพที่ ค-2 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์กากโซดาไลต์หลังผ่านการดูดซับตะกั่ว.....	137
ภาพที่ ค-3 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์กากโซดาไลต์หลังผ่านการดูดซับทองแดง.....	138
ภาพที่ ค-4 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซีโอไลต์เอหลังผ่านการดูดซับสังกะสี.....	138
ภาพที่ ค-5 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซีโอไลต์เอหลังผ่านการดูดซับตะกั่ว.....	139
ภาพที่ ค-6 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซีโอไลต์เอหลังผ่านการดูดซับทองแดง.....	139

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเพิ่มขึ้นของภาคอุตสาหกรรมทำให้ปริมาณของมลพิษถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นและในอุตสาหกรรมหลายประเภทพบว่ามีการใช้โลหะหนักในกระบวนการผลิตไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการผลิตสี อุตสาหกรรมทำเหมืองแร่ และอุตสาหกรรมฟอกย้อม เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้มีโอกาที่จะถูกปล่อยออกมากับน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม (Boonamnuayvitaya และคณะ, 2004) กระบวนการที่จะแยกโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำจึงเป็นกระบวนการที่สำคัญในการป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมและอันตรายที่จะมีต่อมนุษย์ (Kaewsarn, 2002)

กระบวนการที่จะลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำมีด้วยกันหลายวิธี เช่น กระบวนการทำให้ตกตะกอน กระบวนการทางกายภาพและเคมี ปฏิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ รวมทั้งการแยกโดยใช้เมมเบรน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีข้อจำกัดคือ ต้องมีการเติมสารเคมีอยู่ตลอดเวลาให้ต้นทุนในกระบวนการบำบัดสูง สารเคมีที่เติมลงไปยังอาจเกิดปัญหามลพิษ อีกทั้งยังอาจเกิดสารประกอบที่เป็นพิษและไม่สามารถแยกโลหะหนักออกจากน้ำได้อย่างสมบูรณ์ (Kadirvelu และคณะ, 2001) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องพัฒนากระบวนการใหม่ที่เหมาะสมในการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการที่เหมาะสมที่สามารถนำมาบำบัดน้ำเสียในปริมาณมากได้อย่างมีประสิทธิภาพก็คือ กระบวนการดูดซับ หรือ Adsorption (Wang และ Qin, 2005)

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพยายามนำกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น นำมาใช้ในการทำวัสดุปูพื้น (ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ, 2542) นำมาใช้ในการทำเป็นตัวทนไฟในเซรามิก (สาโรจน์ ปัสโชติพงษ์, 2545) และนำมาใช้ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (หฤษฎ์ ธิติพันธ์, 2546) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการนำกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านโยธาซึ่งหากสามารถนำกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ จะเป็นการเพิ่มทางเลือกในการจัดการของเสียได้ โดยเฉพาะนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์ ซึ่งมีผู้วิจัยพยายามสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเศษวัสดุต่างๆ อย่างหลากหลาย เช่น การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขานอ้อย (อนรรฆอร พันธุไพศาล, 2549) การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ็กซ์จากดินขาวธรรมชาติ (มนธวัล บุญส่งประเสริฐ, 2550) ดังนั้นการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาเป็นตัวดูดซับโลหะหนัก จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการจัดการของเสีย

ลักษณะสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของซีโอไลต์ คือโครงสร้างที่มีความพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวมากมีความสามารถในการดูดซับสูง และนอกจากนี้ซีโอไลต์ยังมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนด้วย จากคุณสมบัติต่างๆ เหล่านี้ทำให้ซีโอไลต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น ใช้ในการลดความกระด้างของน้ำ ใช้จับโลหะหรือสารกัมมันตรังสีในน้ำทิ้ง ใช้เป็นสารดูดความชื้นและก๊าซพิษ เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ จึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว และกากโซดาไลต์ที่เหลือทิ้งจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ในการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่จะมีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก ค่าพีเอช และระยะเวลาสัมผัส เพื่อให้ได้สภาวะการดูดซับที่เหมาะสมที่สุด ศึกษาสมมูลของกระบวนการดูดซับ และไอโซเทอมในการดูดซับ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาดูดซับแบบคอลัมน์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของซีโอไลต์สังเคราะห์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอสังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

1. ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ กากโซดาไลต์ที่เหลือทิ้งจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว
2. ศึกษาความสามารถของกากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอในการกำจัดโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch Test) และทดลองแบบคอลัมน์ (Column Test)

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยนำกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในจังหวัดระยอง (อ้างอิงวิธีการเตรียมจากงานวิจัยของรัชชา สามพิมพ์, 2553) และนำซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มาใช้เป็นวัสดุในการดูดซับโลหะหนักทั้งแบบทีละเทและแบบคอลัมน์ โดยทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในการทดลอง

โดยมีขอบเขตการศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ดังนี้

1. การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว
2. การศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เช่น วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์

ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) วิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET surface area analysis)

3. การทดลองแบบที่ละเท เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ได้แก่ ความเข้มข้นของโลหะหนัก พีเอช และระยะเวลาสัมผัส

4. การทดลองแบบคอลัมน์ เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง โดยใช้กากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

5. การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

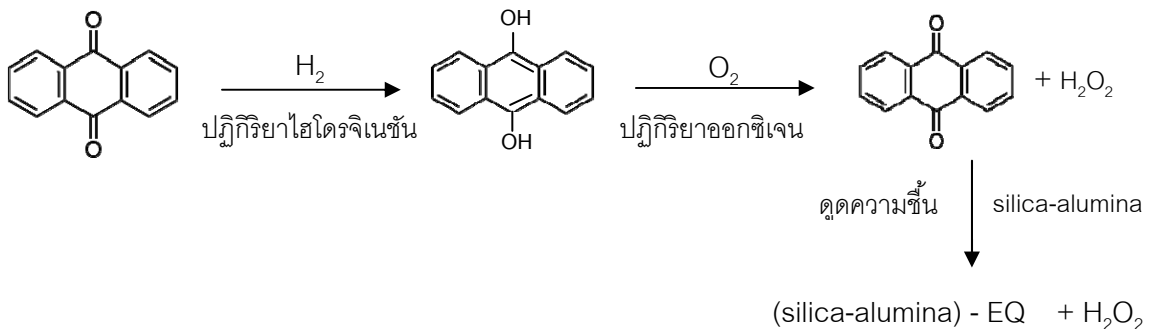
1. สามารถประยุกต์ใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอซึ่งสังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย

2. เป็นการเพิ่มทางเลือกในการจัดการและการใช้ประโยชน์จากกากของเสียประเภทกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ซิลิกา-อะลูมินาจากอุตสาหกรรมผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

กากซิลิกา-อะลูมินาเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมโพลีเมอร์ อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมยา ตลอดจนใช้ในการฟอกผลิตภัณฑ์ต่างๆ สารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน โดยมีสารเอทิลเตตระไฮโดรแอนทราควิโนน (Ethyl Tetrahydro Anthraquinone, EQ) เป็นสารตัวพา (Working Solution) ซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวของก๊าซทั้งสอง ในขณะที่สาร Working Solution (EQ) เมื่อใช้ครบ 1 รอบการทำงานจะเกิดความชื้นและมีสิ่งสกปรกปนเปื้อน จึงจำเป็นต้องใช้สารซิลิกา-อะลูมินาในการดูดความชื้นและสิ่งสกปรกออก ดังนั้นในกระบวนการนี้ทำให้เกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว โดยปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตดังนี้



ภาพที่ 2.1 กระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )

ฉะนั้นในกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์นี้ จะก่อให้เกิดของเสียประเภทสารประกอบซิลิกา-อะลูมินาเป็นจำนวนมาก โดยประมาณการได้ว่าจะเกิดซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเป็นจำนวนมากกว่า 100 ตันต่อปี ผู้ผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จึงต้องรับภาระค่าใช้จ่ายในการบำบัดกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วดังกล่าว

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ส่วนประกอบ	ปริมาณ	
	มิลลิกรัม/กรัม	ร้อยละ
อะลูมิเนียมออกไซด์	550-630	55.0-63.0
ซิลิกอนออกไซด์	120-160	12.0-16.0
เกลือละลายน้ำ	70-130	7.0-13.0
ความชื้น	100	10.0
เอทิลเตตระไฮโดรแอนทราควิโนน	23.08	2.31
เอทิลแอนทราควิโนน	9.85	0.99
เอทิลไดไฮดรอกซิลแอนทราควิโนน	6.61	0.66

ที่มา : ข้อมูลจากโรงงานผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อ้างถึงในไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ, 2542

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

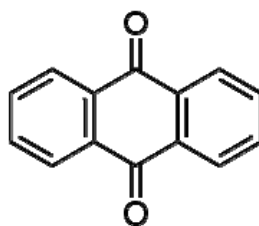
สารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			
	โรงงานอุตสาหกรรม อ้างถึงในไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ (2542)	เปรมฤดี กาญจนปิยะ (2544)	สุจิตรา กันยาลาศ (2545)	หฤษฎ์ ธิตินันท์ (2546)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55.0 - 63.0	88.67	67.27	67.94
CaO	-	0.71	0.46	0.21
Cl	-	Trace	Trace	0.04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	N.D.	N.D.	0.03
K <sub>2</sub> O	-	Trace	Trace	0.01
MgO	-	N.D.	N.D.	N.D.
Na <sub>2</sub> O	-	5.21	12.92	11.78
SiO <sub>2</sub>	12.0 – 16.0	4.12	16.12	17.32
SO <sub>3</sub>	-	1.29	3.23	2.68

หมายเหตุ : N.D. หมายถึงตรวจวิเคราะห์ไม่พบสารดังกล่าว (Not detected)

- หมายถึง ไม่มีข้อมูลการวิเคราะห์

### 2.1.1 สารแอนทราควิโนน (Anthraquinone) (สุจิตรา กัญยาวิลาศ, 2545)

สารแอนทราควิโนนมีสูตรทางเคมีทั่วไปคือ  $C_{14}H_{10}O_2$  ประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 80.76 ไฮโดรเจนร้อยละ 3.87 และออกซิเจนร้อยละ 15.37 โดยน้ำหนัก มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 208.21 กรัมต่อโมล มีค่าถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.438 ไม่ละลายน้ำแต่ละลายในแอลกอฮอล์และอีเทอร์ มีลักษณะเป็นผลึกรูปเข็มสีเหลือง มีจุดหลอมเหลว 286 องศาเซลเซียส จุดเดือด 379.8 องศาเซลเซียส มีค่า Oral rat  $LD_{50}$  เท่ากับ 15 กรัมต่อกิโลกรัม โดยทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่ผนังลำไส้หรือผิวหนังในกรณีกินหรือสัมผัสโดยตรง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วในทางการค้าสารแอนทราควิโนนจะถูกเตรียมได้โดยการออกซิไดซ์สารแอนทราซีน (Anthracene) ด้วยกรดโครมิก (Chromic) โดยสารแอนทราควิโนนบางชนิดถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตสีย้อมและเม็ดสี ใช้เป็นสารเติม (additive) ในการผลิตกระดาษ ใช้เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในการผลิตน้ำมันพืช ใช้เป็นตัวเร่งในการเคลือบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า และใช้เป็นสารไลนิก โดยมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.2



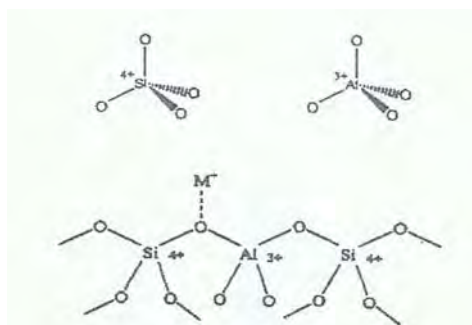
ภาพที่ 2.2 สูตรโครงสร้างของสารแอนทราควิโนน (สุจิตรา กัญยาวิลาศ, 2545)

## 2.2 ซีโอไลต์ (Zeolite)

### 2.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของซีโอไลต์

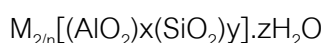
โครงสร้างของซีโอไลต์มีลักษณะเป็นโครงร่าง 3 มิติ หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอมสร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลาง ล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงร่างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุลดังภาพที่ 2.3 ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็ง มีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (1 อังสตรอมเท่ากับ  $1 \times 10^{-10}$  เมตร) (Szostak, 1989)





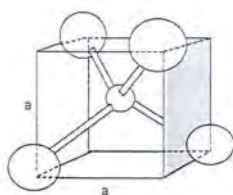
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทรงสี่หน้าของซิลิกอน  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  และอะลูมิเนียม  $[\text{AlO}_4]^{5-}$  และการเชื่อมต่อในผลึกซีโอไลต์ (Szostak, 1989)

นอกจากซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) และออกซิเจนแล้ว ในโครงสร้างโมเลกุลของซีโอไลต์ยังมีประจุบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม เกาะอยู่อย่างหลวมๆ และยังมีโมเลกุลของน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่องว่างในโครงผลึก ซึ่งสามารถกำจัดออกได้โดยให้ความร้อน ซีโอไลต์มีสูตรโมเลกุลทั่วไปดังนี้ (Szostak, 1989)

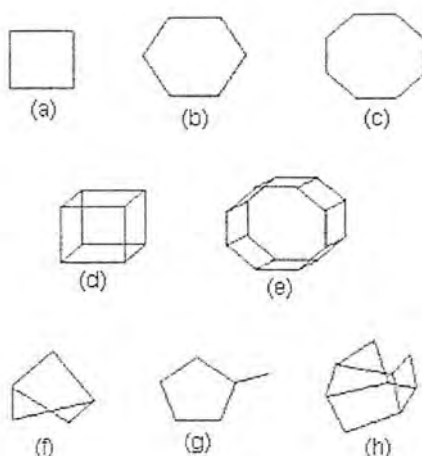


- โดยที่ n คือ จำนวนวาเลนซ์อิเล็กตรอนของไอออนบวก (M)  
 x,y คือ เป็นเลขจำนวนเต็ม (x/y มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ซึ่งมักใช้เป็นดัชนีตัวหนึ่งสำหรับแบ่งชนิดของซีโอไลต์)  
 z คือ เป็นจำนวนโมลของน้ำที่มีอยู่ในผลึกของซีโอไลต์  
 M คือ เป็นโลหะหมู่ I หรือหมู่ II ซึ่งมีประจุบวกเท่ากับ n เพื่อดุลประจุลบ ณ ตำแหน่งของอะตอมอะลูมิเนียม

หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ (primary units) ของซีโอไลต์คือ รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอน ( $\text{SiO}_4$ ) หรืออะลูมิเนียม ( $\text{AlO}_4$ ) ดังภาพที่ 2.4 และเมื่อหลายหน่วยของโครงสร้างปฐมภูมิจับตัวกันกลายเป็นหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary building units) เกิดเป็นรูปสี่เหลี่ยมต่างๆ เป็นวงเดี่ยว เช่น S4R, S6R หรือต่อเป็นวงคู่ เช่น D4R, D6R ดังภาพที่ 2.5 ตำแหน่งมุมแทนซิลิกอน หรืออะลูมิเนียม เส้นตรงแทนอะตอมของออกซิเจน



ภาพที่ 2.4 รูปทรงสี่หน้าของออกซิเจนโคออร์ดิเนตกับซิลิกอนหรืออะลูมิเนียม  
ในหน่วยย่อยของซีโอไลต์ (หน่วยโครงสร้างปฐมภูมิ) (เลิศ รักสันติชาติ, 2545)

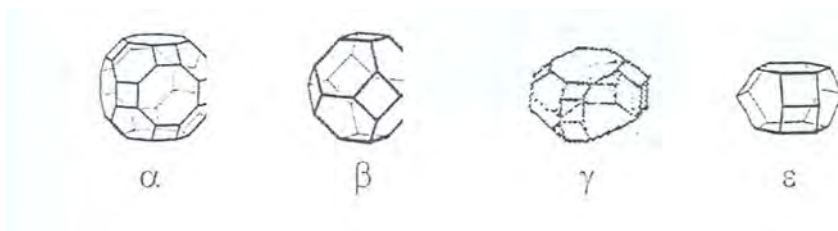


ภาพที่ 2.5 หน่วยโครงสร้างทุติยภูมิในโครงสร้างของซีโอไลต์ (Dyer, 1988)

- |                             |                            |
|-----------------------------|----------------------------|
| (a) single four ring (S4R)  | (b) single six ring        |
| (c) single eight ring (S8R) | (d) double four ring (D4R) |
| (e) double six ring (D6R)   | (f) complex 4-1            |
| (g) complex 5-1             | (h) complex 4-4-1          |

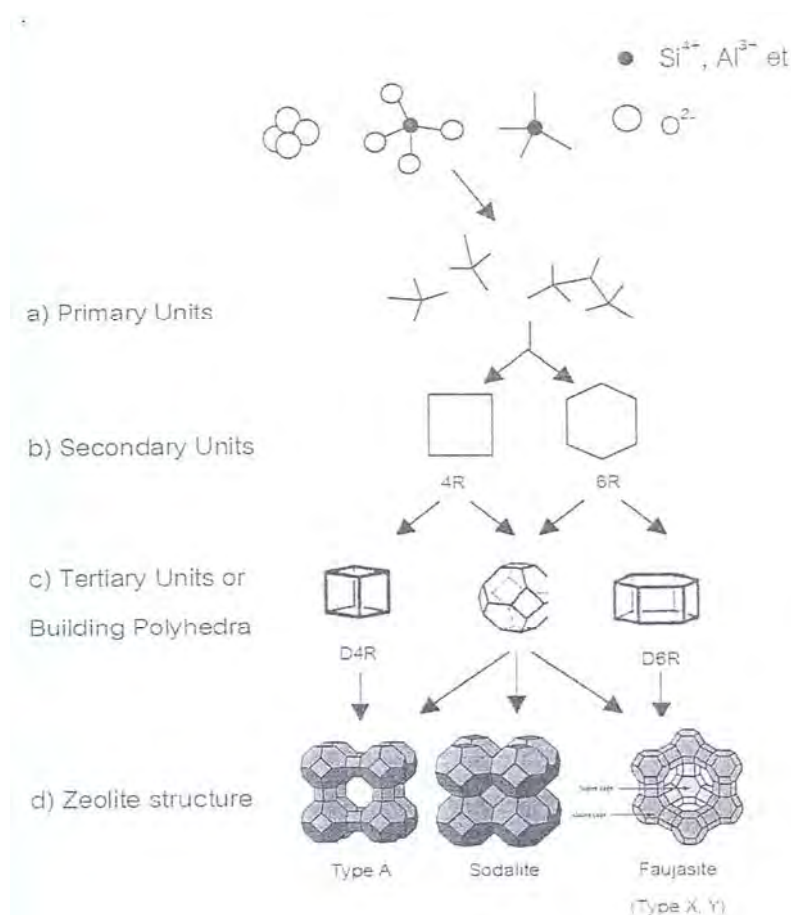
หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้า (polyhedral units) เป็นรูปทรงสมมาตรขนาดใหญ่ซึ่ง  
เกิดขึ้นจากโครงสร้างปฐมภูมิหลายโครงสร้างต่อกันเป็นรูปทรงที่สลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้นดังตัวอย่าง  
ในภาพที่ 2.6

- ทรงเหลี่ยมยี่สิบหกหน้า หรือ แอลฟา  $\alpha$  (truncated cuboctahedron)
- ทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ เบต้า  $\beta$  (truncated octahedron type)
- ทรงเหลี่ยมสิบแปดหน้า หรือ แกมมา  $\gamma$  (18-hedron)
- ทรงเหลี่ยมสิบเอ็ดหน้า หรือ แอพซึลลอน  $\epsilon$  (11-hedron)



ภาพที่ 2.6 หน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้าของซีโอไลต์ (เลิศ รักสันติชาติ, 2545)

เมื่อหน่วยโครงสร้างทุติยภูมิทั้งแบบวงเดี่ยวและวงคู่ และหน่วยโครงสร้างรูปทรงหลายหน้ามารวมกันจะเกิดเป็นโครงสร้างซีโอไลต์ ลักษณะโครงสร้างของซีโอไลต์จะประกอบด้วยโพรง (cavity) หรือช่องว่างซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3-10 อังสตรอมดังภาพที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างซีโอไลต์ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิดฟูจาไซต์ (Faujasite) ซึ่งเกิดจากทรงเหลี่ยมแปดหน้ามุมตัด หรือ  $\beta$  cage ที่มีโพรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 อังสตรอม เชื่อมต่อกันด้วยปริซึมทรงหกเหลี่ยม (hexagonal prism) เป็นโครงสร้างทรงลูกบาศก์ (cubic structure) ทำให้เกิดโพรงขนาดใหญ่หรือซูเปอร์เคจ (super cage) (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)



ภาพที่ 2.7 การเกิดโครงสร้างของผลึกแบบต่างๆ (Farrauto และ Bartholomew, 1997)

## 2.2.2 ลักษณะสมบัติของซีโอไลต์

ซีโอไลต์เป็นแร่อะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicates) ชนิดหนึ่งซึ่งมีอะลูมิเนียม (Al) หรือซิลิกา (Si) จับรวมตัวกับออกซิเจน 4 อะตอมในแบบเตตระฮีดรอน (Tetrahedron) เป็นหน่วยพื้นฐานเตตระฮีดรอนดังกล่าวเมื่อเชื่อมต่อกันในลักษณะวงแหวน 3 มิติ จะเกิดเป็นผลึกของแร่ซีโอไลต์ที่มีช่องว่าง (Channels) ภายในเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามตัวแร่ซีโอไลต์เองยังสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีกโดยใช้จำนวนเตตระฮีดรอนในแต่ละวง (Ring) เป็นตัวจำแนก ซึ่งมีอยู่ตั้งแต่ 4, 5, 6, 8 และ 12 หน่วย อนึ่งการเรียงต่อกันของจำนวนวงมาต่อกันมากเท่าไรก็ยิ่งเพิ่มศักยภาพในการยึดกักมากตามไปด้วย

### 2.2.2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพ

ซีโอไลต์มีค่าความหนาแน่นรวม (Bulk Density) เฉลี่ยประมาณ 2-2.3 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ยกเว้นชนิดที่มีแบเรียมอยู่มากๆ จะยิ่งโปร่งมากขึ้นไปอีก คือ 2.5-2.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร นอกจากนี้ซีโอไลต์มีโพรงภายในค่อนข้างมากจึงมีพื้นที่ผิวสูงไปด้วย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 750-880 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำนั้นก็สูงเช่นกัน แต่ขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์เป็นหลัก ปกติน้ำในโมเลกุลของซีโอไลต์จะระเหยออกไปเมื่ออบแห้งที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ถึงแม้จะสูญเสียน้ำไป แต่โครงสร้างของซีโอไลต์จะมีรูปร่างเหมือนเดิม และสามารถดูดซับน้ำ หรือสารอินทรีย์-อนินทรีย์ ตลอดจนจุลินทรีย์ต่างๆ เข้ามาแทนที่โมเลกุลของน้ำในผลึกได้ ดังสรุปลักษณะทั่วไปของซีโอไลต์ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะทั่วไปของซีโอไลต์ (Petuinkin, 1995 อ้างถึงในदनัย ลิมปदनัย, 2540)

คุณสมบัติ	ลักษณะมาตรฐาน
ลักษณะภายนอก	เป็นก้อนแน่น ไม่มีกลิ่น มีสีเดียวกับหิน
มีสารซีโอไลต์ (แยกโดยวิธี เอ็กซ์-เรย์)	ไม่น้อยกว่าร้อยละ 60
ความสามารถแลกเปลี่ยนไอออน	1.85 มิลลิอีควาเลนต์/กรัม
ความชื้น	ไม่เกินร้อยละ 9
อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินา	ไม่เกิน 6
ความหนาแน่นโดยประมาณ	1,390 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร
ความแข็งประมาณ	5-6
ขนาดช่องว่างโมเลกุลประมาณ	4-5 อังสตรอม
ปริมาณของช่องว่างโมเลกุลเกินกว่า	ร้อยละ 1.5
พื้นที่ในช่องว่างระหว่างโมเลกุลประมาณ	40 ตารางเมตร/กรัม
ทนความร้อน	650 องศาเซลเซียส

### 2.2.2.2 ลักษณะสมบัติทางเคมี

ซีโอไลต์มีสมบัติทางเคมีที่พึงประสงค์อยู่หลายด้าน เริ่มด้วยมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุอยู่ระหว่าง 100-300 มิลลิโมลต่อ 100 กรัม และค่าดังกล่าวอาจเพิ่มสูงขึ้น 600 มิลลิโมลต่อ 100 กรัม ในซีโอไลต์ที่เป็นสารสังเคราะห์ นอกจากนี้ตัวแร่ซีโอไลต์มีพื้นที่ผิวสูงมากจึงสามารถดูดซับธาตุต่างๆ ได้หลายชนิด อาทิเช่น โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) โซเดียม (Na) แบเรียม (Ba) ตลอดจนโลหะหนัก และสารกัมมันตรังสี เช่น ไทเทเนียม (Ti) รูบิเดียม (Rb) ตะกั่ว (Pb) ซีเซียม (Cs) เป็นต้น อีกทั้งสามารถแลกเปลี่ยนธาตุประจุบวกดังกล่าวได้อีกด้วย คุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งก็คือ แร่ชนิดนี้เมื่อกำจัดน้ำออก (Dehydration) สามารถดูดซับเอาโมเลกุลสารอินทรีย์-อนินทรีย์ได้อีกหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นสารพิษหรือก๊าซพิษตัวอย่าง เช่น แอลกอฮอล์ แอมโมเนีย ไนโตรสออกไซด์ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และอื่นๆ โดยโมเลกุลของสารเหล่านี้จะเข้าไปแทรกอยู่แทนที่โมเลกุลเดิมของน้ำนั่นเอง ลักษณะสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะสมบัติของซีโอไลต์ชนิดต่าง ๆ

ซีโอไลต์	ส่วนประกอบทางเคมี	อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา	ช่องว่างโมเลกุล (นาโนเมตร)
Analcime	$\text{Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.7-2.9	0.26
Chabazite	$2\text{Ca} \cdot 4\text{AlO}_2 \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	1.4-3.0	$0.31 \times 0.44$
Clinoptilolite	$\text{Na/K} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	4.0-5.1	$0.31 \times 0.79$
Erionite	$\text{Ca/Mg/2Na/2K} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	2.2	0.74
Laumkotite	$\text{Ca} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 4\text{SiO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.8-2.6	$0.46 \times 0.63$
Mordentite	$\text{Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	4.4-5.3	$0.67 \times 0.70$
Phiplippisite	$\text{K/Na} \cdot \text{AlO}_2 \cdot 2\text{SiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1.3-3.0	$0.28 \times 0.48$
Stellerite	$\text{Ca} \cdot 2\text{AlO}_2 \cdot 7\text{SiO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.8-4.4	$0.45 \times 0.59$

ที่มา : Petuinkin, 1995 อ้างถึงในदनัย ลิมปदनัย, 2540

### 2.2.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ (จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์, 2547)

ซีโอไลต์แบ่งตามการกำเนิดได้ 2 วิธี คือ ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ และซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี

**2.2.3.1 ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ** (mineral zeolite or natural occurring zeolite) ส่วนมากค้นพบจากการทำเหมืองแร่ ซีโอไลต์จากธรรมชาติเป็นกลุ่มผลึกอะลูมิเนียมซิลิเกตของโมโนหรือไดวาเลนต์เบส (mono or divalent bases) อาจมีการสูญเสียน้ำในผลึกบ้างบางส่วนหรือทั้งหมด โดยที่โครงสร้างจะไม่มีเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างซีโอไลต์จากธรรมชาติ ได้แก่ Faujasite, Erionite, Chabazite, offertite, Gmelinite, Mordenite และ Heulandite เป็นต้น โดยประเภทของซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติสามารถแบ่งได้ตาม Hydrological system ดังนี้

1. Saline, Alkaline Lakes ซีโอไลต์ชนิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามการเปลี่ยนแปลงของผิวโลก คือ arid region และ semiarid region การตกตะกอนในลักษณะนี้จะทำให้เกิดระบบ close resin และควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ clastic material และ basin edge

2. Saline, Alkaline Soils ภาวะภูมิอากาศเป็นตัวควบคุมการเกิดซีโอไลต์ชนิดนี้ การก่อตัวใน arid region และ semiarid region เกิดจากการระเหยของน้ำผิวดินที่เกิดจากโซเดียมคาร์บอเนต และโซเดียมไบคาร์บอเนต โดยน้ำฝนจะไหลซึมผ่านชั้นดิน แล้วจะละลายโซเดียมคาร์บอเนตและโซเดียมไบคาร์บอเนต ทำให้ค่าความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น และทำให้เกิดอะลูมิเนียมซิลิเกตในพื้นที่ดินขึ้น

3. Marine Sediments ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการตกตะกอนที่อยู่ในทะเลภายใต้ อุณหภูมิต่ำ และค่าความเป็นกรด-เบสที่เป็นกลาง

4. Open Hydrologic System ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำใต้ดินที่ไหลผ่าน porous pyroclastic ซึ่งทำปฏิกิริยากับ vitric ash

5. Hydrothermal System ซีโอไลต์ชนิดนี้เกิดจากระบบที่มีแอลคาไลน์กับ สารละลายกรดอ่อน การตกตะกอนถูกกำหนดจากปัจจัยของอุณหภูมิ ความสามารถในการเป็ยกได้ของแร่หิน และลักษณะของของไหลที่ไหลผ่าน ในส่วนที่ตื่นและเย็นที่สุดจะเกิดซีโอไลต์ชนิด mordenite และ clinoptilolite สำหรับในส่วนที่ลึกและร้อนกว่าจะเกิดซีโอไลต์ชนิด analcime และ laumontite

6. Burial Diagenetic System ซีโอไลต์ชนิดนี้จะอยู่ในตะกอนที่เกิดจากภูเขาไฟ (volcanolastic sediment)

7. Magmatic System ซีโอไลต์ชนิดนี้เป็นซีโอไลต์ที่ตกผลึกอยู่ระหว่างชั้นของหินแมกมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาของเหลวกับหินที่อยู่ล้อมรอบซีโอไลต์ ส่วนมากจะพบในหินอัคนี และอาจพบบ้างใน imerstitial และ globules

8. ซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟ เป็นซีโอไลต์ที่พบบนปากปล่องภูเขาไฟในประเทศเยอรมัน ช่องว่างภายในผลึกจะเต็มไปด้วย analcime, clinoptilolite, erionite, harmotone และ phillipsite

### 2.2.3.2 ซีโอไลต์ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี (synthetic zeolite)

เกิดจากการทำปฏิกิริยาของออกไซด์พื้นฐานต่างๆ เช่น  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$  และ  $K_2O$  ในระบบที่มีน้ำ การสังเคราะห์ทำได้ทั้งในลักษณะที่เป็นเจล เป็นรูปอนุ และลักษณะที่คล้ายเม็ดทราย ซึ่งเป็นประโยชน์ในการที่จะได้ซีโอไลต์ที่มีองค์ประกอบและโครงสร้างตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตัวอย่างซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและที่ได้จากการสังเคราะห์ ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ซีโอไลต์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและที่สามารถสังเคราะห์ได้ (Smith, 1976)

ชื่อ	รูปแบบผลึก	องค์ประกอบทางเคมี
A	isometric	$Na_{12}Al_{12}Si_{12}O_{48} \cdot 27H_2O$
Cancrinite	hexagonal	$Na_6Al_6Si_6O_{24} \cdot 2H_2O$
Charbazite	rhombohedral	$(Ca,Na)_2Al_4Si_8O_{24} \cdot 13H_2O$
Erionite	hexagonal	$(Ca,K_2,Na_2)_4Al_8Si_{26}O_{72} \cdot 27H_2O$
Faujasite	isometric	$Na_{13}Ca_{11}Mg_9K_2Al_{55}Si_{37}O_{364} \cdot 235H_2O$
X	isometric	$Na_{86}Al_{86}Si_{106}O_{384} \cdot 264H_2O$
Y	isometric	$Na_{56}Al_{56}Si_{136}O_{384} \cdot 250H_2O$
Gemlinite	hexagonal	$(Na, etc)_8Al_6Si_{16}O_{48} \cdot 24H_2O$
L	hexagonal	$K_9Al_9Si_{127}O_{72} \cdot 22H_2O$
Mazzite	hexagonal	$K_{2.5}Mg_{2.1}Ca_{1.4}Na_{0.3}Al_{10}Si_{26}O_{72} \cdot 28H_2O$
Mordenite	orthorombic	$Na_8Al_8Si_{40}O_{90} \cdot 24H_2O$
Offretite	hexagonal	$KCaMgAl_{15}Si_{13}O_{30} \cdot 15H_2O$
Sodalite	isometric	$Na_6Al_6Si_6O_{24} \cdot 2NaCl$
ZK-5	isometric	$Na_{30}Al_{30}Si_{66}O_{192} \cdot 98H_2O$

องค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ ประกอบด้วย

1. **อะลูมิเนียม** การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในการทดลองโดยทั่วไปจะใช้สารประกอบของโลหะอะลูมิเนียม (metal aluminates) เป็นสารตั้งต้น ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้กัน คือ ไฮเดรียมอะลูมิเนียม หรือบางครั้งอาจใช้แหล่งแร่อะลูมิเนียมตามธรรมชาติ เช่น แก้ว เฟลด์สปาร์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ( $Al(OH)_3$ ) และอะลูมิเนียมอัลคอกไซด์ ( $AlO(OH)$ )

2. **ซิลิกอน** โดยทั่วไปจะใช้สารละลายของซิลิกา เช่น ซิลิกาไฮลเจล โดยมีซิลิการ้อยละ 30 โดยน้ำหนัก บางครั้งอาจใช้ซิลิกาเจล แก้ว ทราแยแร่ เป็นต้น

3. **ไอออนบวก** ได้แก่ ไอออนของโลหะหมู่หนึ่งและหมู่สองที่อยู่ในรูปของไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังสามารถได้จากสารประกอบออกไซด์ และเกลือชนิดอื่นๆ ของโลหะหมู่หนึ่ง และหมู่สอง

4. **สารเคมีอื่นๆ** เช่น สารประกอบอินทรีย์ (organic compounds) ที่แตกตัวให้ไอออนบวก ซึ่งเรียกว่า สารโครงสร้าง (template) โดยใส่ในเจลเพื่อช่วยในการตกผลึกของซีโอไลต์ เช่น เตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เตตระโพรพิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

## 2.2.4 กระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์

### 2.2.4.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal process) โดยใช้สารประกอบอะลูมินา เช่น โซเดียมอะลูมิเนต (sodium aluminates) หรือโซเดียมซัลเฟต (aluminum sulfate) และซิลิกา เช่น โซเดียมวอเตอร์กลาส (sodium water glass) สารละลายซิลิกา (silica solution) ทำปฏิกิริยากับเบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ หรือควอเตอร์นารีแอมโมเนียมแคทไอออน (Quaternary ammonium cations :  $\text{NR}_4^+$ ) เกิดเป็นเจลที่มีลักษณะเป็นสารเนื้อเดียวกันซึ่งอยู่ในสภาพสารละลายด่างอิ่มตัววดยิ่ง (an alkaline supersaturated solution) และแปลงสภาพเป็นโครงสร้างรูพรุนของผลึกอะลูมิโนซิลิเกต (microporous crystalline aluminosilicate) ภายในเวลาที่กำหนด อุณหภูมิการเกิดผลึกจะอยู่ในช่วงประมาณ 150 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่านั้น และความดันเท่ากับความดันของไอน้ำอิ่มตัวในขณะนั้น บางครั้งในระบบอาจเกิดเป็นผลึกซีโอไลต์มากกว่าหนึ่งชนิด ซึ่งเรียกกระบวนการทางเคมีนี้ว่ากระบวนการซีโอไลไทเซชัน (zeolitization) ปัจจัยสำคัญในการเกิดซีโอไลไทเซชันได้เป็นซีโอไลต์ที่ต้องการได้แก่ ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก (aging period) และกลไกการเกิดผลึก (mechanism of crystallization)

ระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก คือช่วงเวลาและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นภายหลังการเตรียมเจล โดยที่อุณหภูมิของเจลมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดผลึก สิ่งหนึ่งที่สำคัญในช่วงระยะเวลาการปล่อยให้ตกผลึก คือการละลายหรือดีโพลีเมอไรเซชัน (depolymerization) ของซิลิกาด้วยเบส ซึ่งการละลายดังกล่าวเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของซิลิกาผลิตภัณฑ์เริ่มแรกที่ได้อยู่ในรูปของโมโนเมอร์ซิลิเกตแอนไอออน (monomeric silicate anions) หลังจากนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นโอลิโกเมอร์ (oligomeric species) โดยผ่านกระบวนการโพลีเมอไรเซชัน แบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างโอลิโกเมอร์ซิลิเกตกับโมโนเมอร์ แอมโมเนียม



ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ ) เกิดเป็นโครงสร้างอะลูมิโนซิลิเกต (Breck, 1974 อ้างถึงในเรวัตินอนุวัฒน์, 2544)

#### 2.2.4.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไมโครเวฟ

การสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไมโครเวฟ (microwave process) เป็นวิธีการสังเคราะห์ซีโอไลต์อีกรูปแบบหนึ่งที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ซึ่งในขั้นตอนการเกิดซีโอไลต์จะคล้ายคลึงกับการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal process) แต่วิธีการนี้มีความต่างกันในรูปแบบของพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยการสังเคราะห์ซีโอไลต์ด้วยวิธีไมโครเวฟจะใช้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปกระตุ้นโมเลกุลให้เกิดความร้อนแทนการใช้ความร้อนจากตู้อบโดยไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากถึง 2,450 ล้านรอบต่อวินาที มีลักษณะคล้ายกับคลื่นวิทยุแต่มีความถี่ที่สั้นกว่าหัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟ คือตัวแมกนีตรอนที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นคลื่นไมโครเวฟ ระบบการทำงานของเตาไมโครเวฟ คลื่นไมโครเวฟจะพุ่งเข้าสู่สารจากทุกทิศทางโดยรอบของผนังเตาด้านในแล้วแผ่กระจายไปสู่สารเมื่อคลื่นไปกระทบสารทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นและเสียดสีกัน ก่อให้เกิดเป็นพลังงานความร้อนแก่สาร ทำให้ทุกโมเลกุลได้รับพลังงานอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอทั้งบริเวณที่เป็นพื้นผิวและบริเวณที่อยู่ภายใน ซึ่งจะสามารถลดความแปรผันของอุณหภูมิเนื่องจากการนำความร้อนและลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ได้ (Breck, 1974 อ้างถึงในเรวัตินอนุวัฒน์, 2544)

#### 2.2.5 การประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในปัจจุบัน (จรัส ลิ่มตระกูล, 2540)

จากลักษณะสมบัติที่สำคัญของซีโอไลต์จึงได้มีการนำซีโอไลต์ไปใช้งานในด้านต่างๆ ซึ่งการใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์ถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับโมเลกุลของสาร ซึ่งมีอยู่สามด้านหลักๆ ด้วยกัน ได้แก่ การเป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchanging) การเป็นตัวดูดซับ (adsorption) และการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis)

**2.2.5.1 สารลดความกระด้างของน้ำ (water softener)** เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นเกาะอยู่อย่างหลวมๆ จึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ โดยโลหะแอลคาไลน์ เช่น โซเดียม หรือโพแทสเซียมที่เกาะกับซีโอไลต์จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง นอกจากนี้ยังมีการนำซีโอไลต์มาใช้เป็นส่วนผสมในผงซักฟอกแทนฟอสเฟต เนื่องจากฟอสเฟตเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

**2.2.5.2 ตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange resin)** จากสมบัติการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของซีโอไลต์ จึงมีการนำซีโอไลต์ไปใช้ในเรซินเพื่อแลกเปลี่ยนประจุกับไอออนบวก

ต่างๆ ได้แก่  $Zn^{2+}$ ,  $Sn^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Hg^{2+}$  และ  $Ma^{2+}$  เป็นต้น โดยการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกของซีโอไลต์ขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของไอออนบวกที่ทำการแลกเปลี่ยนประจุกับซีโอไลต์ อุณหภูมิที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนประจุ ตัวทำละลาย และโครงสร้างของซีโอไลต์

**2.2.5.3 ตัวดูดซับ (adsorption)** เนื่องจากซีโอไลต์มีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่างอันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล และเนื่องจากซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำได้ดีและสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้เมื่อมีการให้ความร้อน จึงได้มีการนำซีโอไลต์มาใช้เป็นตัวดูดซับในกระบวนการทำสารให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) เมื่อซีโอไลต์สามารถดูดซับน้ำหรือไอในสารที่ต้องการทำให้บริสุทธิ์หรือสารที่ต้องการแยก และน้ำในซีโอไลต์จะระเหยออกเมื่อมีการให้ความร้อน นอกจากนี้ซีโอไลต์ยังใช้ในการดูดซับสารอื่น เช่น แก๊สไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย ซึ่งเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับเช่นเดียวกับการดูดซับน้ำ และซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำแต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

**2.2.5.4 ตัวเร่งปฏิกิริยาและตัวแยกโมเลกุล (catalysis and molecular sieve)** การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจัดว่าเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับซีโอไลต์อย่างมาก โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ในแต่ละปีประเทศไทยต้องนำเข้าตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมีกว่าพันล้านบาท และมากกว่าร้อยละ 80 ของตัวเร่งปฏิกิริยา คือซีโอไลต์ ด้วยเหตุที่ข้อดีของซีโอไลต์มีสถานะเป็นของแข็งที่มีจุดหลอมเหลวสูงทำให้คงทนกว่า และนำกลับมาใช้ใหม่ได้ง่ายกว่าสารเร่งปฏิกิริยาที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊สทำให้ไม่สิ้นเปลืองพลังงานและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สมบัติการเป็นตัวแยกโมเลกุล (molecular sieve) ของซีโอไลต์ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างที่อยู่ระหว่างโครงสร้างหน่วยย่อย และสามารถควบคุมขนาดของช่องนี้โดยควบคุมอุณหภูมิและไอออนประจุบวกที่อยู่ภายในหรืออยู่รอบๆ ช่องว่าง ทำให้ช่องว่างนี้ไวบางส่วนและนักเคมีสามารถเพิ่มหรือลดขนาดช่องว่างนี้ได้โดยการปรับปัจจัยสองประการดังกล่าว จึงมีการสังเคราะห์สารที่มีโครงสร้างคล้ายซีโอไลต์ และใช้สารกลุ่มนี้เป็นตัวแยกโมเลกุล และใช้สารดังกล่าวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งนอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานและลดขั้นตอนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีเร็วขึ้นแล้ว ยังสามารถสร้างมูลค่าของสารตั้งต้นให้ออกมาเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น เพิ่มค่าออกเทนของน้ำมัน โดยกำจัดองค์ประกอบที่เป็นสารโดยตรงหรือแยกสารไฮโดรคาร์บอนชนิดอิ่มตัวออกจากชนิดไม่อิ่มตัว เป็นต้น

**2.2.5.5 ประโยชน์อื่น ๆ** การใช้งานซีโอไลต์ในประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ใช้ในการเกษตรการเลี้ยงสัตว์ และการก่อสร้างในเชิงการเกษตรนั้นเป็นวิธีการที่เรียกว่าซีโอโพนิค (Zeoponic) หมายถึง การนำซีโอไลต์ธรรมชาติมาปรับเปลี่ยนองค์ประกอบบริเวณที่มีการแลกเปลี่ยนประจุใส่ประจุบวกที่เป็นสารอาหารของพืชลงไปแทน ทำให้โมเลกุลของซีโอไลต์

กลายเป็นแหล่งอาหารของพืช ซึ่งสารอาหารนั้นๆ จะค่อยๆ ถูกปลดปล่อยออกมาทำให้สารอาหารไม่ถูกชะล้างไปโดยง่าย เป็นการประหยัดสารอาหารได้

## 2.3 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 – 7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีลักษณะเป็นมันวาวสะท้อนแสงเหนียว และนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า

โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรมากกว่าโลหะอิสระได้หลายรูปโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งเป็นพิษหากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ประกอบกับความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้ U.S. EPA จึงได้กำหนดโลหะที่มีพิษที่ต้องกำจัดออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง 13 ชนิด ได้แก่ แบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิก แอนติโมนี เซเลเนียม เทลลูเรียม และปรอท ในจำนวนนี้ ปรอท แคดเมียม และตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษถาวรไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปตามกาลเวลาและยังสามารถสะสมอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต อีกทั้งปัจจุบันโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดออกจากน้ำเสีย ของเสีย รวมถึงกากตะกอนก่อนทิ้ง เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม

### 2.3.1 สังกะสี (Zinc: Zn)

#### 2.3.1.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี

สังกะสีเป็นโลหะที่แข็งสีขาวเงินอมฟ้า น้ำหนักอะตอม 65.38 เลขอะตอม 30 จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 7.14 ละลายได้ดีในกรดแก่และด่างแก่ เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริก คือ ไฮดรอกไซด์ของโลหะประเภทนี้ หากละลายในกรดจะทำให้เกิดแคทไอออน  $Zn^{2+}$  หากละลายในเบสจะทำให้เกิด  $Zn(OH)_2$  จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงพีเอชค่าหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุด และเมื่อพีเอชสูงขึ้นกว่าจุดต่ำสุดนี้แล้ว โลหะแอมโฟเทอริกจะละลายน้ำได้มากขึ้น การกำจัดสังกะสีออกจากน้ำโดยการตกตะกอนทางเคมีให้ปริมาณโลหะละลายเหลือต่ำกว่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดเป็นไปได้ยาก ยกเว้นหากมีกลไกอย่างอื่นร่วมด้วย (Corn, 1993)

### 2.3.1.2 การใช้ประโยชน์ของสังกะสี

ใช้ประโยชน์ในรูปของโลหะเจือ เช่นกับทองแดง (Cu) และอะลูมิเนียม (Al) ในการผลิตแผ่นโลหะเจือใช้เคลือบผิว (galvanizing) เหล็กกล้าเพื่อป้องกันการขึ้นสนิมของเหล็กกล้า ใช้เติมในยางและสีและใช้ในด้านอื่นๆ เช่น ชิ้นส่วนของรถยนต์ พิวต์ไฟฟ้า อะโนดของเซลล์ไฟฟ้า ถ่านไฟฉาย (dry cell) และเตรียมสารเคมีของสังกะสี

### 2.3.1.3 ความเป็นพิษของสังกะสี

สังกะสีเป็นกลุ่มโลหะหนักที่มีแนวโน้มจะเป็นพิษ ปกติสังกะสีจะมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าได้รับมากเกินไปจะทำให้เกิดอันตราย สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex-Compound) เมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) เข้าสู่สิ่งมีชีวิตผ่านทางห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โดยกระบวนการที่ความเข้มข้นในสิ่งมีชีวิต (Bio Accumulation) (Corn, 1993) รวมทั้งการสัมผัสกับโลหะโดยตรงจากการประกอบกิจกรรมในการดำรงชีวิตประจำวัน จึงปรากฏความเป็นพิษของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตทั้งพืชสัตว์และมนุษย์อยู่เสมอความเป็นพิษต่อพืชของสังกะสีขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ซึ่งจะทนทานต่อปริมาณสังกะสีได้แตกต่างกัน พืชที่ทนทานต่อสังกะสีได้มากเนื่องจากพืชสามารถนำสังกะสีไปรวมอยู่ในผนังเซลล์ เมื่อพืชที่ได้รับพิษจากสังกะสีจะสูญเสียคลอโรฟิลด์ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ปรากฏอาการแต่จะลดการดูดดึงของฟอสฟอรัสและ Chlorocis ส่วนระดับความเป็นพิษของสังกะสีและโลหะหนักชนิดอื่นๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ระดับปกติและระดับที่เป็นพิษของโลหะหนักในเลือดและซีรัมในมนุษย์ (อรอนพ หอมจันทร์, 2535)

ชนิดโลหะหนัก	ระดับปกติ	ระดับที่เป็นพิษ
เหล็ก	100 เปรอร์เซ็นต์ไมโครกรัม (b)	>350 เปรอร์เซ็นต์ไมโครกรัม (b)
แมงกานีส	0.01 – 0.025 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (s)	> 1.0 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (s)
สังกะสี	0.8 – 1.6 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (s)	> 2.0 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (s)
ทองแดง	0.8 – 1.5 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (s)	> 1.7 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร (s)
นิกเกิล	< 0.05 – 1.05 ไมโครกรัม/ลิตร (b)	-
ตะกั่ว	ผู้ใหญ่ : 20 – 30 เปรอร์เซ็นต์ไมโครกรัม (b) เด็ก : 15 – 25 เปรอร์เซ็นต์ไมโครกรัม (b)	> 60 เปรอร์เซ็นต์ไมโครกรัม (b) -
แคดเมียม	< 1.0 เปรอร์เซ็นต์ไมโครกรัม (b)	-

หมายเหตุ: (b) หมายถึง ระดับในเลือด (Whole Blood) (s) หมายถึง ซีรัม

## 2.3.2 ทองแดง (Copper: Cu)

### 2.3.2.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี

ทองแดงเป็นธาตุในหมู่ 1B ของตารางธาตุ เป็นโลหะแข็งสีเงินแบบโลหะ น้ำหนักอะตอม 63.546 เลขอะตอม 29 จุดเดือด 2563 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1085 องศาเซลเซียส และค่าความถ่วงจำเพาะ 8.96 ทองแดงที่พบในสภาวะแวดล้อมมีแหล่งกำเนิดมาจากโรงชุบโลหะ การหลอม เชื้อเพลิงหรือบัดกรีโลหะและมาจากภาชนะบรรจุอาหาร เป็นต้น

### 2.3.2.2 การใช้ประโยชน์ของทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่มีประโยชน์มากที่สุดและใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งรองจากเหล็ก ใช้ทำเส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าและเครื่องมือไฟฟ้าต่างๆ ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ใช้ในการผลิตหม้อต้มน้ำ กาน้ำ ถังน้ำ ท่อน้ำ และขดลวด กัดต้มน้ำร้อน เป็นต้น ใช้เคลือบผิวของโลหะ ใช้ทำโลหะเจือทองเหลือง (brass) คือโลหะเจือของทองแดง (ร้อยละ 70) และสังกะสี (ร้อยละ 30) ทองสัมฤทธิ์ (bronze) เป็นโลหะเจือของทองแดง (ซัยวัฒณ์ เจนวณิชย์, 2530)

### 2.3.2.3 ความเป็นพิษของทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่ร่างกายเราต้องการในปริมาณเล็กน้อย (trace element) เช่น จำเป็นสำหรับกระบวนการเผาผลาญอาหาร (metabolism) ผู้ใหญ่ต้องการทองแดง 2 มิลลิกรัมต่อวัน และร่างกายของคนเรามีทองแดงอยู่ 100 – 150 มิลลิกรัม ซึ่งทองแดงจำนวนนี้มีความเข้มข้นสูงสุดที่ตับและกระดูก โลหิตของเราก็มีทองแดงอยู่ด้วย เป็นที่ทราบกันว่าการสร้างฮีโมโกลบินต้องอาศัยทองแดง ถึงแม้ฮีโมโกลบินจะไม่มีทองแดงเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้การสังเคราะห์เอนไซม์หลายชนิดต้องอาศัยทองแดงด้วย ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทองแดงในปริมาณเล็กน้อยไม่เพียงแต่ไม่เป็นพิษ ยังเป็นสิ่งี่ร่างกายเราต้องการ แต่ถ้ามีในปริมาณสูงก็จะให้โทษและเป็นพิษได้ เช่น  $\text{CuSO}_4$  27 กรัม ทำให้ตายได้ ถ้ารับประทานปริมาณน้อยกว่านี้ก็จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และสั่นๆ ทองแดงเป็นธาตุจำเป็นสำหรับพืชด้วย เช่น จำเป็นสำหรับการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์ของพืช

## 2.3.3 ตะกั่ว (Lead : Pb)

### 2.3.3.1 ลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมี

ตะกั่วมีสัญลักษณ์ Pb มาจากภาษาละติน Plumbum มีเลขอะตอม 82 น้ำหนักอะตอม 207.19 เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มนุษย์รู้จักนำมาใช้ เริ่มตั้งแต่มนุษย์มีอารยธรรม และในปัจจุบันสารตะกั่วถูกนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางได้แก่ ใช้ทำแผ่นธาตุในแบตเตอรี่ ใช้หุ้มสายไฟฟ้าแรงสูงที่ฝังใต้ดินเพื่อกันความผุกร่อน ใช้ผสมกับโลหะอื่นเป็นโลหะผสม ใช้ในอุตสาหกรรมสีและสารปราบศัตรู เป็นต้น (ซัยวัฒณ์ เจนวณิชย์, 2530)

### 2.3.3.2 การใช้ประโยชน์ของตะกั่ว

ตะกั่วจัดเป็นโลหะหลักโลหะหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมและมีเพียงไม่กี่โลหะเท่านั้นที่มีปริมาณการใช้มากกว่าตะกั่ว โลหะเหล่านี้ ได้แก่ เหล็ก (Fe), ทองแดง (Cu), สังกะสี (Zn) และอะลูมิเนียม (Al) ทั่วโลกใช้ตะกั่วประมาณ 3 ล้านตันต่อปี (ประมาณการของปี 1970) และเฉพาะในสหรัฐอเมริกาก็ใช้มากถึง 1.25 ล้านตัน ส่วนในสหราชอาณาจักรใช้ประมาณ 0.5 ล้านตัน

ตะกั่วใช้ประโยชน์มากที่สุดในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่และใช้ในรูปของเตตระเอทิลเลดซึ่งใช้เติมใส่น้ำมันเพื่อเพิ่มเลขออกเทนของน้ำมัน ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ที่สำคัญของตะกั่ว เช่น ใช้ในการสังเคราะห์สารเตตระเอทิลเลด (tetraethyllead เขียนย่อว่า TEL) ซึ่งเป็นสารที่ใช้เติมใส่แก๊สโซลีนเพื่อเพิ่มเลขออกเทน (octane number) ของแก๊สโซลีน สาร TEL เตรียมจากเอทิลคลอไรด์ (ethyl chloride) และโลหะเจือของตะกั่ว ใช้ในแบตเตอรี่รถยนต์ที่ใช้ทั่วไปเป็นเซลล์กัลวานิกที่ใช้โลหะตะกั่วเป็นแอโนดและออกไซด์ของโลหะตะกั่ว ( $PbO_2$ ) เป็นคาโทด เนื่องจากอุตสาหกรรมแบตเตอรี่เป็นอุตสาหกรรมหลักชนิดหนึ่งประกอบกับแบตเตอรี่ มีอายุการใช้งานจำกัด อุตสาหกรรมแบตเตอรี่จึงเป็นแหล่งที่มีการใช้ตะกั่วในปริมาณมหาศาลแหล่งหนึ่ง นอกจากนี้มีการใช้งานอื่นๆ ได้แก่ ใช้งานบัดกรี ทำโลหะเจือ ใช้ในการทำท่อในอุตสาหกรรมเคมี เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดซัลฟูริก กระสุนปืน และเคยใช้ผสมกับสีทาบ้าน เป็นต้น

### 2.3.3.2 ความเป็นพิษของตะกั่ว

สารตะกั่วสามารถเข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้โดยกระบวนการธรรมชาติและเกิดจากการกระทำของมนุษย์ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ และการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ สามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง แสดงดังภาพที่ 2.8 คือ ระบบทางเดินหายใจ ระบบทางเดินอาหาร โดยตะกั่วปนเปื้อนในน้ำดื่มและอาหาร และทางผิวหนังหรือจากการสัมผัส เมื่อสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะไปจับกับเม็ดเลือดแดง นอกจากนั้นไปอยู่ที่เนื้อเยื่ออ่อน เช่น ตับ ไต หัวใจ และปอด ร้อยละ 90 ของสารตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกเก็บสะสมที่กระดูก สารตะกั่วที่ไม่ถูกดูดซึมไว้จะถูกขับถ่ายออกมากับอุจจาระ ส่วนที่ร่างกายดูดซึมเอาไว้จะขับถ่ายออกมาทางปัสสาวะ ร้อยละ 76 อุจจาระ ร้อยละ 16 ทางนมและเล็บริด ร้อยละ 8



### 2.3.4 การปนเปื้อนของโลหะหนักในน้ำเสีย

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีปริมาณการใช้และการผลิตมากขึ้น อุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เหมืองแร่ ชุบโลหะ ปิโตรเลียม สี ตลอดจนแบตเตอรี่ล้วนเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักในกระบวนการผลิต และก่อให้เกิดของเสียที่ถูกปนเปื้อนด้วยโลหะหนักดังกล่าวทั้งสิ้น โดยของเสียที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งเป็นฝุ่นละออง ไอ ตลอดจนน้ำเสีย โรงงานผลิตแคลเซียมผงแดงอินดัสทรีจำกัด (มหาชน) จังหวัดระยอง เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของอุตสาหกรรมที่ก่อให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก โดยลักษณะของน้ำเสีย แสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ลักษณะของน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

คุณลักษณะ	ค่าที่วัดได้
พีเอช	0.93
ความนำไฟฟ้า	19.06 ไมโครวินาที/เซนติเมตร
ปรอท	6.22 ส่วนในล้านส่วน
สังกะสี	269 ส่วนในล้านส่วน
แคดเมียม	4.24 ส่วนในล้านส่วน
ตะกั่ว	8.47 ส่วนในล้านส่วน
สารหนู	6.37 ส่วนในล้านส่วน

ที่มา : บริษัทผาแดงแอนด์อินดัสทรี จำกัด (มหาชน), 2542 อ้างถึงในวัฒนชัย อยู่ในวงศ์, 2546

## 2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณโลหะหนัก ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมออกจากน้ำเสีย โดยวิธีการกำจัดสามารถทำได้หลายวิธี สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีทางเคมีและวิธีทางฟิสิกส์

### 2.4.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี

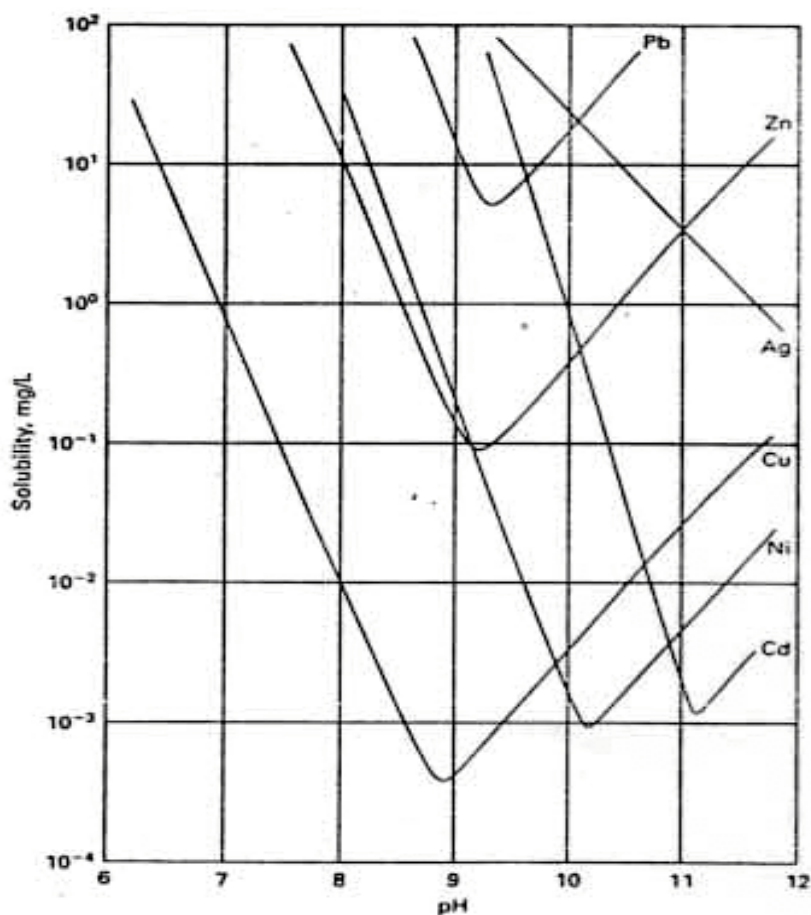
เป็นวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำเสียโดยเติมสารเคมีลงไป มักใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดโดยวิธีการอื่นได้ วิธีการบำบัดทางนี้ ได้แก่

**2.4.1.1 การปรับสภาพกรด-ด่าง (pH Adjustment)** เป็นการปรับสภาพกรด-ด่างของน้ำเสียให้ได้ค่ามาตรฐานน้ำเสีย (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของพีเอช ไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0) หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการบำบัดต่อไปหลักการทั่วไปถ้าน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นกรดก็จะปรับสารเคมีประเภทด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (Lime, CaOH<sub>2</sub>) เป็นต้น ถ้าตรงกันข้ามมีน้ำ



มีฤทธิ์เป็นด่าง จะปรับด้วยสารเคมีประเภทปูนขาว เป็นต้น ถ้าตรงกันข้ามน้ำมีฤทธิ์เป็นด่างจะปรับด้วยสารเคมีประเภทกรด เช่น กรดเกลือ (HCl) กรดกำมะถัน ( $H_2SO_4$ ) เป็นต้น

**2.4.1.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)** เป็นการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำให้ออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นตะกอนและน้ำหนักมากขึ้นจมตัวลง ตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้รวดเร็วขึ้น สารเคมีที่ใช้เติมมีหลายชนิด เช่น ปูนขาว โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต ( $NaCO_3$ ) โซเดียมซัลไฟด์ สารส้ม เพอริคลอไรด์ เพอริซัลเฟต เป็นต้น ทั้งนี้นิยมนำปูนขาวไปตกตะกอนโลหะหนักเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะตกตะกอนได้ดีที่พีเอชต่างๆ และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถจะละลายกลับมาได้อีก หากค่าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกผลึกดังภาพที่ 2.9 ส่วนตะกอนหรือสลัดจ์ (Sludge) ที่ได้จะมีส่วนประกอบของโลหะหนักที่ต้องนำไปกำจัดต่อ



ภาพที่ 2.9 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์ที่พีเอชต่างๆ (Bishop และคณะ, 1992)

**2.4.1.3 การดักจับโดยสารคีเลท (Chelation)** เป็นการอาศัยหลักการสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ สารคีเลทหรือโพลีเมอร์ที่เป็นตัวดักจับมีอิออนหรือโมเลกุลที่เรียกว่า ลิแกนด์ (Ligand) มีการดักจับเกิดพันธะโคเวเลนต์ ลิแกนด์จะต้องมีอย่างน้อย 2 อะตอมที่สามารถสร้างพันธะโคออร์ดิเนตกับโลหะในคราวเดียวกัน เช่น อะตอมของออกซิเจนไนโตรเจน เป็นต้น สารที่เป็นคีเลทิงเอเจนต์ (Chelating Agent) ได้แก่ 1,2 ไดอะมิโนเอเทน ( $H_2N-CH_2-CH_2$ ) ซึ่งหมู่เอมีน 2 หมู่จับกับอิออนของโลหะหนักแคดเมียม โคบอลต์ ทองแดง เหล็ก เป็นต้น

**2.4.1.4 การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Chemical Oxidation)** เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม โดยการใช้สารออกซิแดนต์ (Oxidant) ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำเสีย สารออกซิแดนต์มีหลายชนิด เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด่างทับทิม และคลอรีน เป็นต้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

**2.4.1.5 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)** หลักการคือ อิออนในน้ำเสียจะมาเกาะแลกเปลี่ยนกับอิออนเรซิน (Resin) ซึ่งมีทั้งชนิดอิออนลบและอิออนบวกโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของตัวกลาง เช่น การใช้เรซินที่มีอิออนลบกับน้ำเสียจากการชุบโลหะที่โลหะหนักประเภทประจุบวก เป็นต้น เรซินเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการล้างด้วยกรด

**2.4.1.6 การใช้ไฟฟ้า (Electrodialysis)** อุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นเซลล์ไฟฟ้า ภายในมีแผ่นเยื่อกรอง (Membrane) 2 ชนิด ทั้งที่เป็นเยื่อประจุลบและประจุบวก แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยาก ทำให้แยกโลหะหนักออกได้ ซึ่งยอมให้ประจุที่เหมือนกันไหลผ่าน แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยาก ทำให้แยกโลหะหนักออกได้ เช่น การแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากการชุบโลหะ การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม เป็นต้น (บุญจง ขาวสิทธิวงษ์, 2539)

## 2.4.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางฟิสิกส์ (บุญจง ขาวสิทธิวงษ์, 2539)

เป็นการนำหลักการทางฟิสิกส์ มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี

**2.4.2.1 การกรอง (Filtration)** การกรองน้ำอาศัยหลักการอัดน้ำเสียที่มีความดันสูงผ่านวัสดุกรอง ของแข็งที่ไม่สามารถเล็ดลอดช่องกรองได้จะถูกดักไว้การกรองมีหลายแบบ เช่น การกรองที่มีช่องกรองละเอียด (Microfiltration) การกรองที่มีช่องกรองละเอียดมาก (Ultrafiltration) และการกรองโดยวิธีออสโมซิสกับระบบกรองน้ำมักใช้ในการแยกสารแขวนลอยที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

**2.4.2.2 การทำให้แห้ง (Drying)** การทำให้น้ำเสียแห้งนี้อาจใช้แสงแดด หรือให้ความร้อนโดยตรง เพื่อระเหยน้ำออกไปจะได้ของแข็งเหลืออยู่ เช่น การตากตะกอนให้แห้งโดยใช้แสงแดด เป็นต้น

**2.4.2.3 การกลั่น (Distillation)** เป็นการแยกสารที่มีจุดเดือดไม่เท่ากันของสารที่รวมกันอยู่

**2.4.2.4 การดูดซับหรือการดูดติด (Adsorption)** เป็นปรากฏการณ์ที่โมเลกุลของของไหลหรือคอลลอยด์ (Adsorbate) เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนพื้นผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของไหลนั้น โดยสารดูดซับ (Adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และยังมีสารดูดซับหลายชนิด เช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) เบนโทไนต์ (Bentonite) และดินเหนียวกัมมันต์ (Activated Clay) แต่มักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์มากกว่าสารดูดซับอื่นๆ เพราะกำจัดกลิ่น สี และโลหะหนักในน้ำได้ดี

**2.4.2.5 การหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)** โดยอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง น้ำเสียจะถูกเหวี่ยงโดยหมุนด้วยความเร็วสูงของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะสูง จะถูกเหวี่ยงออกไปรอบนอก วิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง

**2.4.2.6 การแยกตัวทำละลาย (Solvent Extraction)** หลักการโดยใช้สารสกัด ซึ่งไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายสารที่อยู่ในน้ำเสียได้ จากนั้นจึงแยกสารสกัดที่มีสารถูกสกัดละลายอยู่ออกไป เช่น โดยวิธีกลั่น เป็นต้น วิธีนี้อาจได้สารละลายอยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

## 2.5 กระบวนการดูดซับ (Adsorption) (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545)

การดูดซับนั้นเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับ เรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) โดยกลไกการดูดซับเกิดเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้สารดูดซับ มีการนำเอาการดูดซับไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย ทั้งในอุตสาหกรรมและงานด้านสิ่งแวดล้อม

สำหรับแรงที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แรง คือ

### 1.แรงทางกายภาพ (Physical force) ประกอบด้วย

1) แรงวานเดอร์วาลส์ (Van der waal's force) อะตอมที่อยู่อย่างอิสระหรือโมเลกุลที่ไม่มีสภาพขั้วสามารถเกิดแรงดึงดูดอ่อนๆ ได้ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอย่างไม่เป็นระเบียบในอะตอมหรือโมเลกุลนั้น ทำให้มีความหนาแน่นของกลุ่มหมอกอิเล็กตรอนในแต่ละบริเวณที่อยู่ภายในอะตอมหรือโมเลกุลไม่เท่ากัน มีผลทำให้เกิดสภาพขั้วขึ้น และสามารถถูกดูดซับ

ด้วยตัวดูดซับได้ การดูดซับประเภทนี้มีพลังงานในการดูดซับต่ำ จึงเป็นการเกาะจับกันด้วยแรงอ่อนๆ ดังนั้นการคายการดูดซับ (Desorption) จะเกิดได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นข้อดีเพราะสามารถฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับได้ง่าย

2) แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วระหว่างสารที่ไม่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้วด้วยกัน หรือระหว่างสารที่มีขั้วกับสารที่ไม่มีขั้ว โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้ว เกิดจากการจัดเรียงโมเลกุล (orientation effect) ทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีประจุตรงกันข้าม

ข. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เกิดจากผลของการกระจาย (dispersion effect) ซึ่งเห็นผลจากการที่โมเลกุลไม่มีขั้วสามารถเปลี่ยนเป็นไดโพลโมเลกุลได้เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปอยู่ด้านใดด้านหนึ่งมากและเมื่อโมเลกุลที่ไม่มีขั้วที่มีลักษณะเช่นเดียวกันเข้ามา ก็จะทำให้เกิดแรงดึงดูดซึ่งกันและกัน ซึ่งแรงนี้มักจะเป็นแรงอ่อนๆ เช่น แรงดึงดูดระหว่างสารอินทรีย์และถ่านกัมมันต์

ค. แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว เป็นผลเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำ (induction effect) โดยโมเลกุลที่มีขั้วเข้ามาใกล้โมเลกุลที่ไม่มีขั้ว แล้วเหนี่ยวนำให้เกิดประจุที่ตรงกันข้าม ทำให้เกิดการดึงดูดซึ่งกันและกัน

## 2. แรงทางเคมี (chemical force)

เกิดจากการยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับตัวดูดซับแล้วเกิดการประกอบเชิงซ้อนใหม่ขึ้น เช่น การดูดซับระหว่างหมู่โลหะทรานซิชันกับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพันธะเคมีหรือแรงเคมีที่เกิดขึ้นนี้เกิดจากการใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน หรือเกิดจากการให้อิเล็กตรอน หรือการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกัน จึงมีผลทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวกันระหว่างไอออนของสารกับหมู่ฟังก์ชันของตัวดูดซับ ซึ่งจะมีค่ามากกว่าแรงทางกายภาพ และจากแรงทางเคมีนี้ จะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ (irreversible) ปฏิกิริยาการที่โมเลกุลของของเหลว หรือคอลลอยด์เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนพื้นผิวของของแข็ง โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็งและของเหลวนั้น สารที่เป็นของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของโมเลกุลหรือคอลลอยด์ เรียกว่า สารดูดซับ ส่วนโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่มาเกาะจับ เรียกว่า สารถูกดูดซับ

### 2.5.1 ประเภทของการดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ์, 2546)

1. การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของพลังงาน หรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrical attractive force) อย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่าแรงแวนเดอร์

วาล์ว เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับถูกทำให้เกาะติดแน่นอยู่กับโมเลกุลของสารดูดซับ โดยวิธีทางกายภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นหลายๆ ชั้นซ้อนทับกัน โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับอยู่เหนือชั้นที่เกิดก่อน โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพนี้ทำให้เกิดส่วนที่หนาและผันกลับได้ การผันกลับของการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับ ถ้าแรงดึงดูดนี้มีค่าน้อยการคายการดูดซับ (desorption) จะสามารถเกิดขึ้นได้

**2. การดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption or Chemisorption)** จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ และสารดูดซับเกิดเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่ที่ผิวสัมผัสของสารดูดซับทำให้ค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าของพลังงานพันธะเคมี จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมี ความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ ความแข็งแรงของแรงดึงดูด สามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 10-20 กิโลจูลต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูง โดยจะให้พลังงานประมาณ 40-400 กิโลจูลต่อโมล

#### ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยน หรือใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ กล่าวคือ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลายเป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ค่าที่สำคัญในการพิจารณา
4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลาพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกัน แต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้นด้วย

เนื่องจากการดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของการดูดซับ หากเป็นการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าใกล้เคียงกับความร้อนแฝงของการกลั่นตัวเป็นของเหลว ขณะที่การดูดซับทางเคมี ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบ

กับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะมีค่าน้อยกว่าความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีไม่มากนัก ทั้งนี้พบว่า การดูดซับที่เกิดขึ้น และใช้กันมากในอุตสาหกรรมนั้นเป็นการดูดซับทางกายภาพ

### 2.5.2 กลไกของการดูดซับ (วัตินชัย อยู่ในวงศ์, 2546)

ขั้นตอนการดูดซับ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) จะเคลื่อนที่จาก bulk solution ไปยังผิวหน้าของฟิล์มน้ำหรือโมเลกุลที่ล้อมรอบตัวดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นต้นหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายในขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน
4. การดูดซับ (Adsorption) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่โมเลกุลของสารจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารมายังสารดูดซับภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์ม เป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ (มันลิน ตันกุลเวศน์, 2542)

ในระหว่างที่มีการดูดซับเกิดขึ้น โมเลกุลของตัวถูกทำลายจะถูกกำจัดออกจากน้ำและไปเกาะติดอยู่บนสารดูดซับ โมเลกุลส่วนใหญ่จะเกาะจับอยู่ภายในโพรงของสารดูดซับและมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เกาะอยู่ที่ผิวภายนอก การถ่ายเทโมเลกุลจากน้ำไปหาสารดูดซับเกิดขึ้นได้จนถึงสมดุลจึงหยุด ณ จุดสมดุล ความเข้มข้นของโมเลกุลในน้ำจะเหลือน้อยมากเพราะโมเลกุลส่วนใหญ่เคลื่อนที่ไปเกาะจับอยู่บนสารดูดซับ สมดุลของการดูดซับของสารดูดซับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญซึ่งใช้ในการกำหนดขีดความสามารถของระบบดูดซับ เช่น ทำให้รู้ว่าระบบดูดซับสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากน้อยเพียงใด เป็นต้น

อย่างไรก็ตามยังมีสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องกล่าวถึงคือ จลนศาสตร์ของระบบซึ่งอธิบายถึงอัตราเร็วของการดูดซับนั่นคือ เมื่อรู้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้เท่าใด ยังต้องรู้อัตราเร็วของการดูดซับเพื่อให้รู้ว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ภายในเวลาเท่าใด จลนศาสตร์ของระบบจึงช่วย

กำหนดเวลากักน้ำ (หรือเวลาสัมผัส) ของถังสารดูดซับ ซึ่งเท่ากับเป็นการกำหนดขนาดของถังสารดูดซับ อัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดซับขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. **ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Adsorbate)** การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลงเนื่องจากการดูดซับ ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย โดยทั่วไปแล้วความสามารถในการละลายของสารประกอบอินทรีย์ในน้ำจะลดลงเมื่อความยาวของพันธะลูกโซ่ยาวขึ้น นอกจากนั้นขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย โดยขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

2. **ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ** ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุน ถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ

3. **อุณหภูมิ (Temperature)** การดูดซับเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (Exothermic) พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับจะลดลงแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะสูงขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าอุณหภูมิลดลงความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้นแต่อัตราเร็วในการดูดซับจะลดลง

4. **พีเอช (pH)** ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง และพีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวของไอออนของสารประกอบที่เป็นกรดหรือเป็นเบสในการดูดซับ

5. **ความปั่นป่วน (Mixing Speed)** อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งโมเลกุลของระบบซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ในระบบที่ของเหลวมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มของเหลวที่อยู่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ในกรณีนี้การแพร่ผ่านฟิล์มจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางกลับกันถ้าความปั่นป่วนของของเหลวในระบบสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลง ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

6. **เวลาสัมผัส (Contact Time)** เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพ

ในการกำจัดที่ดีที่สุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

#### 2.5.4 ประเภทของสารดูดซับ

สารที่มีอำนาจดูดโมเลกุลต่างๆ มาติดผิวได้ เรียกว่า แอ็ดซอร์พเบ้นท์ มีหลายชนิด อาจ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ (มันลิน ตัณฑุลเวศน์, 2542)

1) **สารอินทรีย์** เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ถ่านลอยลิกไนต์ ถ่านกระดูก (Bone Char) และแอ็คติเวตเต็ดซิลิกา (Activated Silica) เป็นต้น มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม มีข้อเสียคือสามารถจับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด การใช้ประโยชน์จึงมีจำกัด

2) **แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน** (Activated Carbon) เป็นสารดูดติดผิวที่ดีกว่าสารอินทรีย์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600 – 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม แอ็คติเวตเต็ดคาร์บอนที่ใช้และเสื่อมแล้ว สามารถนำไปทำรีเจนเนอเรชั่นและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่มีข้อเสียคือการทำรีเจนเนอเรชั่นต้องเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากไม่คุ้มทุนและต้องมีคาร์บอนบางส่วนสูญเสียไป เนื่องจากมันกลายเป็นผงละเอียดจนใช้การไม่ได้

3) **สารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีประจุบนพื้นผิว** สามารถดูดจับกับวัตถุอื่นๆ ที่มีประจุตรงกันข้ามทำให้เกิดการเกาะติดกันได้ ได้แก่ สารเรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ เป็นประเภทที่เรียกว่า Macroporous Resin หรือ Adsorbent Resin เช่น Styrene Divinylbenzene (SDVB) Resin และ Phenol-Formaldehyde (PF) Resin เป็นต้น มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งต่ำกว่าของแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน แต่มีข้อดีก็คือ สามารถคืนสภาพ (Regenerate) ได้ง่าย และรีเจนเนอเรชั่นมักเป็นสารราคาถูก เช่น เกลือแกง สำหรับประเทศไทยความเหมาะสมในการใช้เรซินดูดติดผิวมีมากกว่าแอ็คติเวตเต็ดคาร์บอน เมื่อคำนึงถึงข้อจำกัดในเรื่องการคืนสภาพ

#### 2.5.5 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

การดูดซับจากสารละลาย มีผลต่อความเข้มข้นของตัวทำละลายบนพื้นผิวของของแข็งในขณะที่เกิดการดูดซับขึ้นตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ มีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลาย เมื่ออัตราการคายสารออกสู่สภาวะคงที่ (equilibrium state) ซึ่งเรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ที่จุดสมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดซับ หรือในของเหลว สมดุลนี้จึงเป็นลักษณะเฉพาะของระบบทั้งหมด



ไม่ว่าจะเป็นตัวถูกละลาย สารดูดซับ ตัวทำละลาย ค่าพีเอช อุณหภูมิ และอื่นๆ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล โดยปกติจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การแสดงปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หลายภาพแบบที่นำมาใช้อธิบายถึงข้อมูลของการดูดซับ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาทฤษฎี และผลจากการทดลองซึ่งภาพแบบจำลองมีดังนี้

### 1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงเมียร์ ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ

- 1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
- 2) แต่ละบริเวณสามารถดูดซับได้เพียงชั้นเดียว
- 3) พื้นที่ของบริเวณที่ดูดซับมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- 4) พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

การดูดซับจากสารละลายโดยสารดูดซับ แสดงดังสมการของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการ

$$q = (q_m b C_e) / (1 + b C_e) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q$  เข้าสู่อินฟินิตี้  $q_m$  และ  $C_e$  เข้าใกล้ค่าอนันต์ (Infinity,  $\infty$ ) จะเขียนสมการได้เป็น

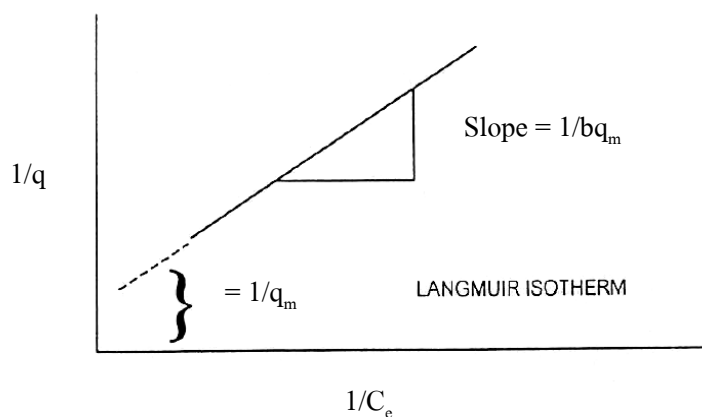
$$C_e/q = (1/bq_m) + (C_e/q_m) \quad (2.2)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/q$  กับ  $C_e$  ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชันเท่ากับ  $1/q_m$  และจุดตัดแกน  $y$  เท่ากับ  $1/bq_m$  และเมื่อหารด้วย  $C_e$  จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$\frac{1}{q} = \left( \frac{1}{q_m} \right) + \left( \frac{1}{C_e} \right) \left( \frac{1}{bq_m} \right) \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
- $q_m$  คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
- $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
- $b$  คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q$  กับ  $1/C_e$  จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ  $1/bq_m$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1/q_m$  แสดงได้ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (ธนพร คำขจร, 2552)

## 2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในในระบบของของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้

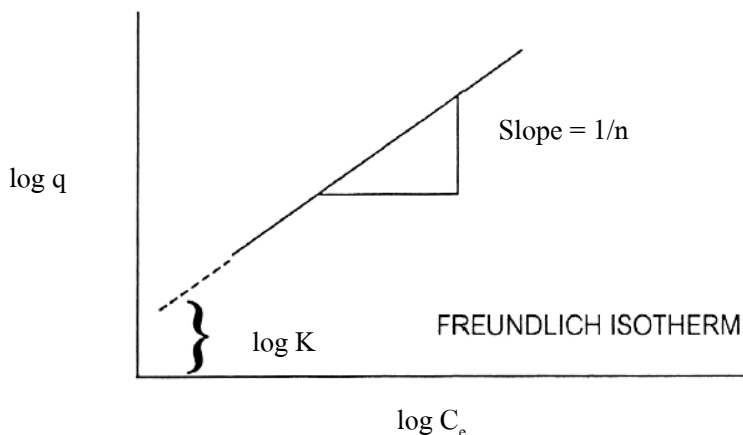
$$q/m = KC_e^{1/n} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูป Logarithmic ได้ดังนี้คือ

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.5)$$

- เมื่อ
- $q$  คือ ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือโมลต่อกรัม)
  - $C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือโมลต่อลิตร)
  - $K, 1/n$  คือ ค่าคงที่ของการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $\log q$  กับ  $\log C_e$  จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง มีค่าความชัน เท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\log K$  ของ  $\log q$  ที่  $\log C_e = 0$  ( $C_e = 1$ ) แสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดซับฟรอนด์ลิช (ธนพร คำขจร, 2552)

## 2.5.6 การดูดซับแบบคอลัมน์ (กรรณิการ์ รักกิจ, 2547)

ในการดูดซับโดยใช้คอลัมน์ ตัวกลางดูดซับจะถูกบรรจุในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวที่มีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับอย่างต่อเนื่อง

### 1. ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

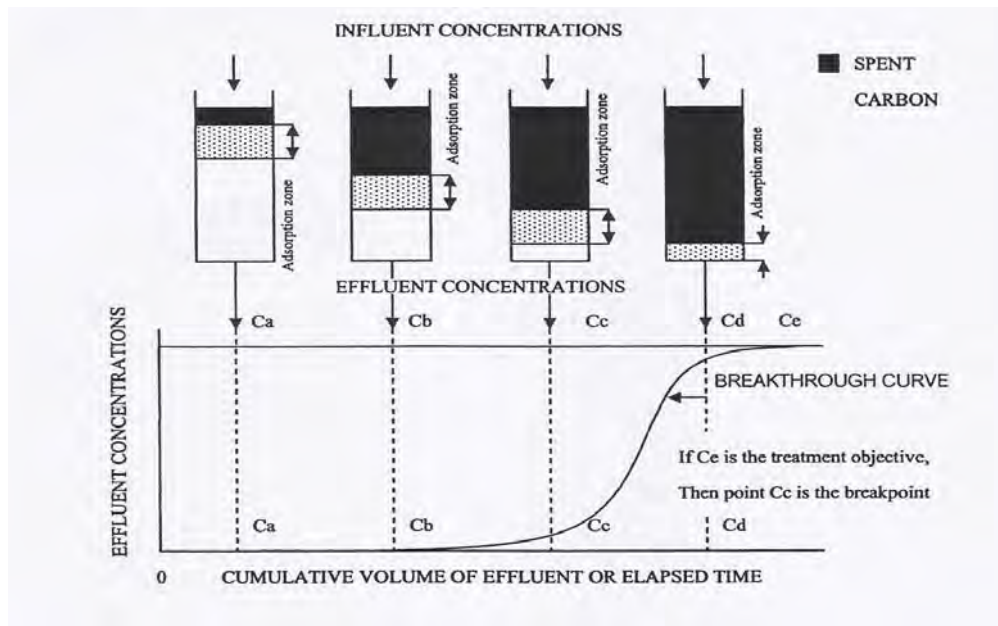
เมื่อน้ำที่มีสารที่ต้องการดูดซับปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของตัวดูดซับ ขอบเขตการถ่ายเทมวลเกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างต่อเนื่องและสารถูกดูดซับจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในชั้นบนของตัวดูดซับ จนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารถูกดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดซับเกิดขึ้นต่อไปในชั้นของตัวดูดซับที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนสภาพจากของเหลวมาอยู่ในสถานะที่ถูกดูดซับนี้เรียกว่า ขอบเขตการถ่ายเทมวล (MTZ, Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายเทมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของสารถูกดูดซับ และลักษณะของการดูดซับ

### 2. ลักษณะเบรคทรูจ์ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะเบรคทรูจ์เป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่อง ระหว่างความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังแสดงในภาพที่ 2.12 ซึ่งแสดงถึงรูปทั่วไปของเส้นโค้งเบรคทรูจ์ และแสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งเบรคทรูจ์กับปริมาณของชั้นตัวกลางดูดซับทั้งหมด สภาพ ชั้นของตัวกลางดูดซับที่ยังทำงานอยู่ (Active Zone) และชั้นของตัวกลางดูดซับที่ปราศจากสารถูกดูดซับ

จากภาพที่ 2.12 ความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) ไหลลงผ่านชั้นตัวกลางดูดซับที่อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง ลักษณะการดูดซับเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของระบบ แล้วบริเวณการดูดซับค่อยๆ เคลื่อนลงเกิดขึ้นที่ส่วนล่างของชั้น จนกระทั่งหมดสภาพการดูดซับที่ส่วนบนของชั้น ณ จุด  $C_c$  คือจุดที่การดูดซับเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ เรียกว่า จุดเริ่มหมดสภาพ (Break point)

และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นโค้งยกขึ้นสูง คือ การดูดซับค่อยๆ หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อีก เรียกเส้นโค้งนี้ว่า Breakthrough Curve จนถึงจุด  $C_d$  ซึ่งเป็นจุดที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Exhaustion Point) จะมีค่าในการใช้งานของสารดูดติดผิวจนจะหมดประสิทธิภาพ โดยเวลาจะนับจากการเริ่มต้นของการดูดติดผิวจนถึงจุดที่สารดูดติดผิวหรือถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพเรียกระยะเวลาช่วงนี้ว่า ระยะเวลาในการทำงาน (service time)



ภาพที่ 2.12 เส้นโค้งเบรกทรูจในการดูดซับแบบคอลัมน์ (Clark และ Lykins, 1989)

## 2.6 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมี

### 2.6.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิว (วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา, 2543)

การตรวจวัดลักษณะพื้นที่ผิวของสารดูดซับจะทำการหาโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ลำอิเล็กตรอนแทนลำแสง ซึ่งมีกำลังขยายสูง 10-300,000 เท่า สำหรับการทำงานนั้น อิเล็กตรอนจะถูกปล่อยจากต้นกำเนิด และถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (High voltage) ผ่านสนามไฟฟ้าในสุญญากาศ จะทำให้ความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนสั้นกว่าความยาวคลื่นของแสงมาก จากการที่อิเล็กตรอนมีประจุลบ และมีสนามแม่เหล็กอยู่รอบตัวในแนวตั้งฉาก ในขณะที่อิเล็กตรอนกำลังเคลื่อนที่นั้น เราสามารถที่จะบังคับอิเล็กตรอนให้เบี่ยงเบนได้ โดยอำนาจสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า มีประโยชน์ในการสร้างระบบเลนส์ให้เกิดกำลังขยายขึ้นภายในกล้อง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้ ใช้ในการศึกษาโครงสร้าง หรือองค์ประกอบต่างๆ ของวัตถุตัวอย่าง โดยทำให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปบนพื้นผิว โดยอุปกรณ์

ตรวจจับ ซึ่งอยู่ภายในจะจับเอาอิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาจากชิ้นงาน แล้วแสดงผลบนจอโทรทัศน์ ซึ่งสามารถที่จะบันทึกภาพได้ ซึ่งภาพ ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ชนิดนี้จะเป็นภาพสามมิติ นอกจากนี้ยังอาจตัดแปลงโดยต่อเติมอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อให้มีการแสดงผลในภาพแบบต่างๆ ได้ เช่น การวิเคราะห์ธาตุ การคำนวณ หามวลและปริมาตร กล้องจุลทรรศน์แบบนี้เหมาะสำหรับการเรียนการสอนและการวิจัยพื้นฐาน กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีระบบการทำงานเหมือนกับแบบส่องผ่าน แต่มีสิ่งที่แตกต่างคือระบบภาพและแสดงผล โดยภาพที่ได้จะถูกส่งสัญญาณเพื่อไปขยาย แล้วจึงแปลภาพบนจอซีอาร์ที (CRT) คอลัมน์ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนและคอนเดนเซอร์เลนส์ ถ้าอิเล็กตรอนที่ผ่านเลนส์ใกล้วัตถุไปตกลงบนตัวอย่างนั้นสามารถที่จะบังคับทิศทางเคลื่อนที่ไปบนผิวตัวอย่างได้ด้วย และมี scanning generator อยู่ระหว่างคอนเดนเซอร์เลนส์ตัวสุดท้ายกับเลนส์ใกล้วัตถุ

ถ้าอิเล็กตรอนนี้เป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ โดยจะถูกโฟกัสลงบนตัวอย่างทำให้เกิดการชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอะตอมของตัวอย่าง ส่งผลให้เกิดอิเล็กตรอนชุดที่สองที่เรียกว่า อิเล็กตรอนทุติยภูมิ และถูกรวบรวมโดยตัวเก็บอิเล็กตรอนซึ่งจะถูกนำไปขยายและแปลสัญญาณให้เกิดเป็นภาพบนจอซีอาร์ที (CRT) ซึ่งสามารถดูได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกไว้บนฟิล์ม ความสว่างของภาพขึ้นอยู่กับพื้นผิวของตัวอย่าง ถ้าพื้นผิวของตัวอย่างมีความราบเรียบภาพที่ได้จะสว่างน้อยกว่าพื้นผิวที่ขรุขระ

นอกจากนี้ที่เลนส์ใกล้วัตถุจะมีช่องรับแสงเช่นกันเพื่อช่วยเพิ่มความลึกของภาพและอาจติดตั้งและต่อเติมอุปกรณ์พิเศษเพื่อตรวจสอบตัวอย่างได้หลายภาพแบบ เพื่อบอกรายละเอียดของภาพร่างและองค์ประกอบของตัวอย่างในส่วนที่ลึกเกินกว่าที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิทำการตรวจสอบได้ และเพื่อหาปริมาณและคุณภาพของโมเลกุลของธาตุได้

### 2.6.2. การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบ

การหาปริมาณธาตุองค์ประกอบในสารตัวอย่าง สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ (X-ray Fluorescence Spectrometer, XRF) โดยใช้การวัดปริมาณรังสีเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) ที่ปลดปล่อยออกมาจากธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดในสารตัวอย่าง เมื่อรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray photon) จากหลอดรังสีเอกซ์ พุ่งเข้าชนสารตัวอย่างจะเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมภายในสารตัวอย่างหลุดออกจากอะตอมในภาพของโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในวงอิเล็กตรอนนั้น ซึ่งที่สภาวะนี้อะตอมจะไม่เสถียร อะตอมจะกลับสู่สภาวะที่เสถียรขึ้นโดยการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกเข้ามาแทนที่ช่องว่างดังกล่าว ซึ่งในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ทุติยภูมิ (Secondary X-ray photon) ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “ฟลูออเรสเซนซ์” (Fluorescence) พลังงานของรังสีเอกซ์

หุติยภูมิที่ปลดปล่อยออกมา จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นกับความแตกต่างของระดับพลังงานเริ่มต้นของอิเล็กตรอนวงนอกที่เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานกับระดับพลังงานของช่องว่างที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ปฐมภูมิ รังสีเอ็กซ์หุติยภูมิที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟลูออเรสเซนซ์จะเป็นรังสีเอ็กซ์ที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ดังนั้นเทคนิคการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกโทรมิเตอร์ จึงใช้ในการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารตัวอย่าง

### 2.6.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) เป็นเทคนิคที่อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอ็กซ์พลังงานสูงที่ทราบความยาวคลื่นไปกระทบชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงของอะตอมอนุภาคที่เป็นเป้าหมายออกมา ทำให้เกิดออร์บิทัลว่างขึ้น อะตอมจะมีเสถียรภาพต่ำลง อิเล็กตรอนในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าก็จะเข้ามาแทนที่ออร์บิทัลที่ว่างอยู่ การเข้ามาแทนที่จะเกิดการคายพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปความร้อน และรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเกิดการเลี้ยวเบนของรังสีที่มุมต่างๆ กัน โดยมีตัวดีเทคเตอร์เป็นตัวรับข้อมูล เนื่องจากสารประกอบและธาตุที่มีส่วนผสมหรือโครงสร้างต่างกันจะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนเป็นมุมที่มีองศาต่างกัน ข้อมูลที่ได้รับสามารถบ่งบอกชนิดของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และสามารถนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึกของสารตัวอย่างนั้นๆ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้ยังสามารถนำมาหาปริมาณคร่าวๆ ของปริมาณความเป็นผลึกได้

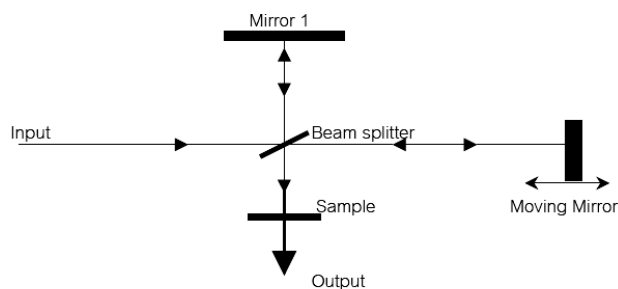
### 2.6.4 การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ขนาดรูพรุน และปริมาตรรูพรุน

โดยวิเคราะห์จากเครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface area and porosity analyzer) เป็นเครื่องมือที่ใช้เพื่อวิเคราะห์พื้นที่ผิว (surface area) ขนาดรูพรุน (pore diameter) และปริมาตรรูพรุน (pore volume) เทคนิคการวัดการดูดซับไนโตรเจน ( $N_2$  adsorption-desorption measurement) โดยอาศัยหลักการวิธีของ Brunauer Emmett-Teller (BET)

2.6.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันัลบนพื้นผิว (อรรถัย ลีลาพจนานพร , 2550, อ้างถึงใน ธนพร คำขจร, 2552)

การหาหมู่ฟังก์ชันัลของสารดูดซับ สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ซึ่งเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูงที่พัฒนามาจากเครื่องไออาร์สเปกโทรมิเตอร์ (IR Spectrometer) เพื่อให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น มีความสามารถในการแยกสูง และสภาพไวสูง สามารถวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีในปริมาณน้อยๆได้ แหล่งกำเนิดคลื่นอินฟราเรดของเครื่อง FTIR เป็นแท่งเซรามิกที่เผาด้วยขดลวดความร้อน ทำให้เกิดรังสีอินฟราเรด สู่กระจกเงาที่ทำด้วยโลหะขัดมัน สะท้อนคลื่นแสงสู่ส่วนสำคัญคือตัวแยกแสง (Beam Splitter) เพื่อแยกคลื่นแสงออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ส่วนหนึ่ง

จะผ่านทะลุออกไป อีกส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับสู่กระจกเงาที่เคลื่อนที่ได้ โดยมีแสงเลเซอร์ปรับระยะการเคลื่อนที่ของกระจก ให้มีระยะและทิศทางที่คลื่นแสงทั้งสองส่วนมารวมกันเป็นลำแสงเดี่ยวผ่านไปยังสารตัวอย่าง ซึ่งเรียกระบบนี้ว่า ไมเคิลสันอินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ (The Michelson Interferometer) ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 แผนภูมิระบบไมเคิลสันอินเทอร์ฟีรอมิเตอร์ (The Michelson Interferometer)

(อรทัย ลีลาพจนานพร, 2550 อ้างถึงในธนพร คำขจร, 2552)

คลื่นรังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้อยู่ระหว่างย่านที่มองเห็น (Visible region) กับย่านไมโครเวฟ ความยาวของคลื่นอินฟราเรดแบ่งเป็นช่วงๆ คือ ช่วงเลขคลื่น 4,000-12,800 ต่อเซนติเมตร (0.78-2.5 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดใกล้ (Near infrared region) ช่วงเลขคลื่น 200-4,000 ต่อเซนติเมตร (2.5-50 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดกลาง (Middle infrared region) ช่วงเลขคลื่น 10-200 ต่อเซนติเมตร (50-1,000 ไมโครเมตร) เป็นย่านอินฟราเรดไกล (Far infrared region) นักเคมีวิเคราะห์จะให้ความสนใจ และใช้ประโยชน์คลื่นรังสีอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มากกว่าช่วงอื่น

คลื่นอินฟราเรดในช่วง 200-4,000 ต่อเซนติเมตร ซึ่งจัดเป็นแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (Middle IR.) มีความถี่ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโควาเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นหรือการหมุนของพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสง แล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมา แสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือเลขคลื่นกับการส่งผ่านของแสง เรียกว่าอินฟราเรดสเปกตรัม (Infrared Spectrum –IR spectrum)

อินฟราเรดสเปกตรัมเป็นข้อมูลเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด ซึ่งแตกต่างจากสารชนิดอื่น โมเลกุลที่มีพันธะต่างชนิดกันจะมีความถี่ของการดูดกลืนคลื่นต่างกัน ทำให้ทราบข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้างของโมเลกุลของสารนั้นๆ ว่ามีหมู่ฟังก์ชันชนิดอะไรบ้าง ในตำแหน่งไหน เช่นสารกลุ่มแอลกอฮอล์ จะมีพีคของพันธะ O-H อยู่ที่ประมาณ 3,300-3,600 ต่อเซนติเมตร เป็นต้น

เมื่อพิจารณาในรายละเอียดที่ปรากฏพบว่าพีคในช่วง 1,350-4,000 ต่อเซนติเมตร จะเป็นช่วงความถี่ของแถบการดูดกลืนคลื่นแสงของพันธะในของหมู่ฟังก์ชันัลต่างๆ ที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งกำหนดเป็นย่านความถี่ของหมู่ฟังก์ชันัล (Group functional region) และในช่วงประมาณ 910-1,350 ต่อเซนติเมตร จะได้แถบการดูดกลืนคลื่นแสงที่มีลักษณะเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว เรียกว่า ย่านรอยพิมพ์นิ้วมือ (Finger print region)

การใช้เครื่อง FTIR วิเคราะห์ตัวอย่างใช้เวลาไม่นานมากและไม่สิ้นเปลืองสารเคมีจึงนิยมนำมาใช้ประโยชน์ในด้านวิเคราะห์ เพื่อการตรวจสอบสารในเชิงคุณภาพ หรือเพื่อการยืนยันสูตรโครงสร้างของสารตัวอย่าง โดยการพิจารณา เปรียบเทียบจากอินฟราเรด สเปคตรัมของสารประกอบมาตรฐานกับตัวอย่าง ที่วัดในตัวกลางชนิดเดียวกัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกัน พีคต่อพีค ถ้าตรงกันเหมือนกันย่อมแสดงว่าเป็นสารชนิดเดียวกัน เช่นการวิเคราะห์ชนิดหมึกพิมพ์บนแผ่นกระดาษ ชนิดเส้นใยของสิ่งทอ สารเคลือบผิวภาชนะบรรจุอาหาร ตัวอย่างโพลีเมอร์ แผ่นพลาสติก เป็นต้น

**2.6.6 การวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ( $pH_{PZC}$ )** (Soonglendsongpha, 2006 อ้างถึงในธนพร คำขจร, 2552)

การหาประจุบนพื้นผิวเพื่อหาค่าพีเอชที่ Point of Zero Charge ( $pH_{PZC}$ ) เป็นค่าพีเอชที่เปลี่ยนไป จนถึงพีเอชระดับหนึ่งที่จำนวนประจุลบและประจุบวกบนพื้นผิวสารดูดซับมีจำนวนเท่ากันนั่นก็คือ จำนวนประจุสุทธิ (net charge) ซึ่งหมายถึงผลต่างของประจุทั้ง 2 ชนิด เท่ากับศูนย์

การหาค่า  $pH_{PZC}$  ทำการวัดโดยวิธีไตเตรทด้วย กรด-ด่าง ในภาพของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้สมการดังนี้

$$[OH^-] + [Cl^-] + [\text{negative surface}] = [H^+] + [Na^+] + [\text{positive surface}]$$

หรือ

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= [\text{positive surface}] - [\text{negative surface}] \\ &= [C_A - C_B] - [H^+ - OH^-]\end{aligned}$$

เมื่อ	$\sigma_0$	=	ประจุบนพื้นผิว
	[positive surface]	=	ความเข้มข้นของประจุบวกบนพื้นผิว
	[negative surface]	=	ความเข้มข้นของประจุลบบนพื้นผิว
	$[H^+]$	=	$10^{-pH}$
	$[OH^-]$	=	$10^{pH-pK_w}$



$$\begin{aligned}
 [\text{Cl}^-] &= [\text{HCl}]_{\text{add}} + [\text{NaCl}]_{\text{add}} \\
 [\text{Na}^+] &= [\text{NaOH}]_{\text{add}} + [\text{NaCl}]_{\text{add}} \\
 [C_A - C_B] &= [\text{Cl}^-] - [\text{Na}^+] \\
 &= [\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}}
 \end{aligned}$$

เมื่อประจุบนพื้นผิวเป็นกลาง ประจุลบและประจุบวกบนพื้นผิวจะมีค่าเท่ากัน หมายความว่า บนพื้นผิวมีประจุเป็นศูนย์ ที่พีเอชนี้มีประจุเป็นศูนย์นี้ ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$[C_A - C_B] = [\text{H}^+ - \text{OH}^-]$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชของสารละลายที่ห่อหุ้มหรือล้อมรอบสารดูดซับโดย สารละลายมีค่าพีเอชที่สูงกว่าค่า  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  จะเกิดประจุลบบนพื้นผิวของสารดูดซับ และในทางตรงข้าม ถ้าสารละลายมีค่าพีเอช ที่ต่ำกว่าค่า  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  จะเกิดประจุบวกบนผิวของสารดูดซับ

โดยค่า  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  จะมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของตัวดูดซับ เช่น แมงกานีส ออกไซด์ มีค่า  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  เท่ากับ 2.4 (Eren, 2008) ดินเบาเคลือบแมงกานีสออกไซด์มีค่า  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  เท่ากับ 2.2 (Khraisheh และคณะ, 2004 อ้างถึงในธนพร คำขจร, 2552)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 การสังเคราะห์ซีโอไลต์

ปัจจุบันซีโอไลต์ได้ถูกใช้เป็นตัวดูดซับอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากซีโอไลต์ที่ใช้เป็นตัวดูดซับนั้นส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่มีราคาแพง และประเทศไทยยังต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก ดังนั้นจึงมีผู้วิจัยพยายามสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเศษวัสดุต่างๆ อย่างหลากหลาย เพื่อเป็นการเพิ่มทางเลือกในการจัดการของเสีย ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

Lin และ His (1995) พบว่า เมื่อผสมถ้ำล่อยกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 ถึง 4 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 70 ถึง 130 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดโซเดียมพี (Na-P) ได้ และที่อุณหภูมิ 130 ถึง 170 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด analcime ได้ สำหรับที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 ถึง 10 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 90 ถึง 200 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดไฮดรอกซีโซดาไลต์ (hydroxysodalite) ได้ และที่อุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส สามารถสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิด cancrinite ได้

Bergaut และ Singer (1996) สังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดพี, เอ็กซ์, ไฮดรอกซีโซดาไลต์ จากถ้ำล่อย โดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal treatment) ซึ่งใช้สารละลาย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการเตรียม พบว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยให้สมบูรณ์ต้องผ่านขั้นตอนการหลอมเหลวเถ้าลอยและของแข็งโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนที่จะผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal treatment และปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยกับโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 170 ถึง 180 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต มีสูตรโครงสร้างอย่างง่ายมีโครงสร้างเป็น  $\text{Na}_{15}\text{Si}_4\text{Al}_3\text{O}_{20}$  ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะเกิดเจลของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็นซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์และพีได้

**Querol และคณะ (1997)** ทำการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอย โดยสารละลายต่างที่ใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นระหว่าง 0.1 ถึง 1 โมลาร์ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ คือ 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ถึง 100 ชั่วโมง ตามลำดับ โดยมีความดันอยู่ในช่วงระหว่าง 0.48 ถึง 1.55 เมกะปาสคาล ซีโอไลต์ที่สามารถสังเคราะห์ได้จากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ NaP1, analcime, gmelinite และ nepheline hydrate ส่วนซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้จากสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ คือ phillipsite โดยระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ทั้งหมดนี้เป็นช่วงเวลาระหว่าง 24 ถึง 48 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อนำเถ้าลอยจากหลายๆ แหล่งในประเทศสเปน (จากการใช้ถ่านหินประเภทซับบิทูมินัส) มาใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ที่เกิดมากที่สุด คือ NaP1 และ analcime

**Lucio และ Edoardo (2003)** ศึกษาพบว่าซีโอไลต์เอบริสุทธิสามารถเกิดขึ้นได้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเวลาแค่ 1 ชั่วโมง โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ความดันบรรยากาศ ข้อดีของการสังเคราะห์โดยวิธีไมโครเวฟคือการลดปริมาณน้ำในซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้อีกทั้งลดเวลาในการสังเคราะห์ ซึ่งเป็นข้อดีในด้านของพลังงานที่ใช้ในการสังเคราะห์ลดลง แต่อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ด้วยวิธีไมโครเวฟมีข้อจำกัดจากการใช้เวลาในการให้ความร้อนที่ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่สมบูรณ์อีกทั้งเกิดเฟสปนเปื้อน เช่น เฟสของไฮดรอกซีโซดาไลต์ เนื่องจากเวลาที่สั้นเกินไปจะทำให้ขั้นตอนการเกิดผลึกตั้งต้นเกิดไม่สมบูรณ์ สำหรับในขั้นตอนการสังเคราะห์พบว่า การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟในขั้นตอนเดียวนั้นไม่เหมาะสม จึงพัฒนาการสังเคราะห์เป็นสามขั้นตอน คือ ขั้นที่หนึ่งเป็นการละลายสารตั้งต้นทั้งหมดโดยพยายามให้เป็นเนื้อเดียวกันมากที่สุดเพื่อพร้อมที่จะเกิดเป็นผลึกตั้งต้นในขั้นต่อไป เพราะฉะนั้นในขั้นตอนนี้จึงใช้คลื่นไมโครเวฟที่มากเกินไปให้เกิดการสั่นของโมเลกุลจนเกิดความร้อนเพียงพอที่จะละลายและผสมสารตั้งต้นจนเป็นเนื้อเดียวกัน ในขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสังเคราะห์ด้วยรีแอกเตอร์รูปทรงต่างกันพบว่ารีแอกเตอร์ทรงกระบอกสามารถสังเคราะห์ได้ดีกว่ารีแอกเตอร์ทรงกลม ในขั้นที่สองและขั้นที่สามเป็นการให้ความร้อนเพื่อให้เจลที่ได้จากขั้นที่หนึ่งเกิดผลึกตั้งต้นและสามารถ

เหนี่ยวนำให้ผลึกโตขึ้นเป็นซีโอไลต์ จากการทดลองพบว่าในขั้นที่หนึ่งการใช้กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 360 วัตต์ เป็นเวลา 50 นาที และในขั้นที่สองใช้กำลังไมโครเวฟเท่ากับ 900 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที จะให้ผลดีที่สุด ได้ค่าความเป็นผลึกร้อยละ 99 เมื่อเปรียบเทียบกับสารสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าผลึกที่ได้มีขนาด 1-4 ไมโครเมตร ซึ่งไม่ต่างกับการสังเคราะห์แบบไฮโดรเทอร์มัลแต่การสังเคราะห์แบบไมโครเวฟพบผลึกขนาด 0.1 ไมโครเมตร แสดงว่า ในการสังเคราะห์ได้ผ่านการเกิดผลึกตั้งต้นจริง แต่ผลึกเหล่านี้ไม่สามารถเหนี่ยวนำให้โตได้ จึงมีขนาดเล็กกว่าผลึกของโครงสร้างอื่นที่เกิดขึ้น

**Fernandes และ Malachinh (2005)** ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ็กซ์และซีโอไลต์เอ โดยนำเปลือกหอยมาปรับปรุงคุณภาพเบื้องต้น โดยการบดคัดขนาดเล็กลงกว่า 0.044 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาย่อยด้วยกรดเพื่อกำจัดโลหะอื่นๆ เช่น เหล็ก และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ จากนั้นชั่งน้ำหนักมา 2 กรัม ผสมกับโซเดียมอะลูมิเนต 0.95 กรัม และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 กรัม ใส่อบโตเครฟ อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำการแปรค่าเวลาการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 6 ถึง 12 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็น ล้างด้วยน้ำดีไอออไนเซชัน จนค่าความเป็นกรด-เบสเป็นกลาง สภาวะที่เหมาะสมคือ 12 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกที่เกิดขึ้น พบว่าเกิดซีโอไลต์เอร้อยละ 20.9 และพบซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ร้อยละ 71.9

**มนธวัล บุญส่งประเสริฐ (2550)** ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ็กซ์ จากดินขาวธรรมชาติโดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (Hydrothermal) ซึ่งได้ทำการปรับปรุงคุณภาพโดยบดและคัดขนาดด้วยตะแกรงขนาด 325 เมช และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นรีฟลักซ์กับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และหลอมเหลวดินขาวกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อปรับสภาพแล้ว จากนั้นทำการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมได้ดังนี้ อุณหภูมิไฮโดรเทอร์มัล คือ 90 องศาเซลเซียส เวลาที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ็กซ์ 48 ชั่วโมง อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่ดีที่สุด คือ 3.0 และอัตราส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่ออะลูมินาที่เหมาะสม คือ 12 ซึ่งร้อยละผลได้ของซีโอไลต์เอ็กซ์ที่เกิดขึ้นเท่ากับ 88.4 และซีโอไลต์เอ็กซ์ที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 395.30 และซีโอไลต์เอ็กซ์ใช้ในอุตสาหกรรมมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 473.37 และจากการทดลองการดูดซับคลอไรด์ในเฮกเซน มีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 30.24 และมีความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 293.3 มิลลิกรัมต่อกรัมของตัวดูดซับ

**Ivan และคณะ (2007)** ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ็กซ์จากดินขาวที่ผ่านการกำจัดอะลูมิเนียมด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อปรับให้อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินามีค่าสูงขึ้น โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ เวลา ความเร็วรอบในการกวน อัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินา และอัตราส่วนโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกา พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนของการเกิดเจล (Gel

formation Step) มีความเร็วที่ใช้ในการกววนเท่ากับ 450 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในขั้นตอนปล่อยให้ตกผลึก (Aging Step) สภาวะที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน และในขั้นตอนของการเกิดผลึก (Crystallization Step) สภาวะที่เหมาะสมคืออุณหภูมิเท่ากับ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยที่อัตราส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาเท่ากับ 3.2 และอัตราส่วนโซเดียมออกไซด์ต่อซิลิกาเท่ากับ 1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ็กซ์

Anuwattana และ Khummongkol (2009) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากของเสียอุตสาหกรรม 2 แหล่ง ได้แก่ กากของเสียจากโรงงานถลุงเหล็กซึ่งมีปริมาณซิลิกาสูง และกากของเสียจากโรงงานเคลือบอะลูมิเนียมซึ่งมีปริมาณอะลูมินาสูง นำมาปรับปรุงคุณสมบัติเบื้องต้นโดยการแช่กรดและเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดโลหะปนเปื้อนอื่นๆ และสารอินทรีย์ตามลำดับ จากนั้นนำมาสังเคราะห์เจลโดยผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ ทำการศึกษาโดยแปรค่าสัดส่วนความเข้มข้นต่อโมลาร์ของซิลิกาออกไซด์ต่อน้ำ เป็น 2.36 4.17 5.07 5.46 7.88 และ 35.47 ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอโดยนำมาเผาที่ 90 องศาเซลเซียส ทำการแปรค่าเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 1 ถึง 9 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำมาตั้งให้อุณหภูมิลดจนถึงอุณหภูมิห้อง ล้างด้วยน้ำดีไอออไนเซชันจนเป็นเบสอ่อนๆ ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 8 จึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลการทดลองปรากฏว่า สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เจลโดยแปรค่าสัดส่วนความเข้มข้นต่อโมลาร์ของซิลิกาออกไซด์ต่อน้ำ เป็น 4.17 และสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ โดยเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 3 ชั่วโมง

Hiroaki และ Sridhar (2009) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ หรือซีโอไลต์เอ็กซ์ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยนำแคลเซียมที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ ที่สภาพดังนี้ อุณหภูมิเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาสังเคราะห์ซีโอไลต์แต่ละชนิดโดยปรับอัตราส่วนต่อโมลาร์ดังนี้ สำหรับซีโอไลต์เอ อัตราส่วนเป็นดังนี้ สัดส่วนโมลาร์ของซิลิกาออกไซด์ต่อโมลาร์ของอะลูมินาออกไซด์ เท่ากับ 2 สัดส่วนโมลาร์ของน้ำต่อโมลาร์ของโซเดียมออกไซด์ เท่ากับ 40 และสัดส่วนโมลาร์ของโซเดียมออกไซด์ต่อโมลาร์ของซิลิกาออกไซด์ เท่ากับ 2.7 สำหรับซีโอไลต์เอ็กซ์ อัตราส่วนเป็นดังนี้ สัดส่วนโมลาร์ของซิลิกาออกไซด์ต่อโมลาร์ของอะลูมินาออกไซด์ เท่ากับ 1.9 สัดส่วนโมลาร์ของน้ำต่อโมลาร์ของโซเดียมออกไซด์ เท่ากับ 37 และสัดส่วนโมลาร์ของโซเดียมออกไซด์ต่อโมลาร์ของซิลิกาออกไซด์ เท่ากับ 23.3 นำแคลเซียม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมอะลูมิเนตและน้ำดีไอออไนเซชันมาผสมตามอัตราส่วนให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ทำการแปรค่าเวลาการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 2 ถึง 6 ชั่วโมง สำหรับซีโอไลต์เอเป็น

เวลา 3 ชั่วโมง และสำหรับซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อนำซีโอไลต์ทั้งสองชนิดมาทดสอบปรากฏว่า ซีโอไลต์เอวัดค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนประจุบวก เท่ากับ 317 มิลลิกรัมความแลกต่อ 100 กรัม พื้นที่ผิวเท่ากับ 171 ตารางเมตรต่อกรัม ซีโอไลต์เอ็กซ์วัดค่าความสามารถการแลกเปลี่ยนประจุบวก เท่ากับ 506 มิลลิกรัมความแลกต่อ 100 กรัม พื้นที่ผิวเท่ากับ 676 ตารางเมตรต่อกรัม

**ธัชชา สามพิมพ์ (2553)** ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากกากซิลิกา-อะลูมินา โดยปรับสภาพด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้สารตั้งต้นซิลิกา-อะลูมินาในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ โดยใช้องค์ประกอบเริ่มต้นตามสัดส่วนโดยโมลดังนี้  $\text{Al}_2\text{O}_3$  :1.926  $\text{SiO}_2$  :3.165  $\text{Na}_2\text{O}$  :128  $\text{H}_2\text{O}$  พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนปล่อยให้ตกผลึก (Aging Step) คือ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และในขั้นตอนของการเกิดผลึก (Crystallization Step) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมคือ ที่กำลังของเครื่องไมโครเวฟเท่ากับ 300 วัตต์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นอกจากนี้พบว่าซีโอไลต์เอจากสภาวะที่เหมาะสม มีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคลเซียมเท่ากับ 277.31 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมของซีโอไลต์แอนไฮดรัส ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานอุตสาหกรรม (มอก. 1422/2540) ซึ่งกำหนดไว้ที่ 270 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อกรัมของซีโอไลต์แอนไฮดรัส

## 2.7.2 การใช้ซีโอไลต์กำจัดโลหะหนัก

ปัจจุบันมีการศึกษาสมบัติและความสามารถต่างๆ ของซีโอไลต์กันมากขึ้น เนื่องจากลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของซีโอไลต์ คือ โครงสร้างที่มีความพรุนสูงทำให้มีพื้นที่ผิวมากมีความสามารถในการดูดซับสูง และมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนด้วย ดังนั้นจึงมีการนำซีโอไลต์มาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

**จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ (2547)** ได้ศึกษาการนำซีโอไลต์ชนิดพี ซึ่งสังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขาน้อยไปทดสอบความสามารถในการกำจัดตะกั่ว ( $\text{Pb}^{2+}$ ) แบบที่ละลาย เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกำจัด  $\text{Pb}^{2+}$  ในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณซีโอไลต์เพื่อทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ  $\text{Pb}^{2+}$  พบว่าที่พีเอช 5 และความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรมีเปอร์เซ็นต์ การกำจัด  $\text{Pb}^{2+}$  ดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมของการดูดซับ  $\text{Pb}^{2+}$  ที่สภาวะดังกล่าว เป็นไปตามสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงให้เห็นว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 94.07 และ 76.74 มิลลิกรัมต่อกรัมซีโอไลต์ ตามลำดับ

**กาญจนา คุณาทัย (2548)** ได้ศึกษาการนำซีโอไลต์พีสังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินไปทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ( $\text{Zn}^{2+}$ ) และทองแดง ( $\text{Cu}^{2+}$ ) พบว่าซีโอไลต์พี

สามารถกำจัด  $Zn^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ได้ประมาณ 80-99 เปอร์เซ็นต์ โดยขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างปริมาณซีโอไลต์พีและน้ำเสีย และระยะเวลาสัมผัส ซึ่งปริมาณซีโอไลต์พีที่มากขึ้นและเวลาสัมผัสนานขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดมากขึ้น โดยปริมาณซีโอไลต์พีที่ 60 มิลลิกรัม เป็นเวลา 180 นาที สามารถกำจัด  $Zn^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  ได้มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์

Chantawong (2001) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) โครเมียม ( $Cr^{3+}$ ) ทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) นิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) ตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) และสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) ในน้ำเสียด้วยดินขาว(Kaolin) ดินดำ(Ball clay) ไฮดรอกซีโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักพบว่า ไฮดรอกซีโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงกว่าดินขาวและดินดำ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะและความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่า โดยลำดับการดูดซับโลหะหนักของไฮดรอกซีโซดาไลต์เป็นดังนี้  $Pb^{2+} > Zn^{2+} = Ni^{2+} = Cu^{2+} > Cd^{3+}$  และลำดับการดูดซับของซีโอไลต์เอเป็นดังนี้  $Pb^{2+} > Cd^{3+} > Zn^{2+} > Ni^{2+} = Cu^{2+} > Cr^{3+}$  และจากผลการทดลองไอโซเทอมของการดูดซับที่สภาวะสมดุล เป็นไปตามสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช

Pitcher และคณะ (2004) ได้ศึกษาการใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำที่ไหลบนทางด่วน ซึ่งมีการปนเปื้อนโลหะหนักบนพื้นผิวถนน โดยทำการทดลองแบบที่ละเทเพื่อทดสอบความสามารถในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เปรียบเทียบกับน้ำเสียจริงโดยใช้ซีโอไลต์ ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วยซีโอไลต์ในน้ำเสียสังเคราะห์มีประสิทธิภาพมากกว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริง โดยมีร้อยละการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 42-89 และร้อยละการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงเท่ากับ 6-44 ตามลำดับ และความสามารถในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด เป็นดังนี้  $Pb^{2+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} = Cd$

Hui และคณะ (2005) ได้ศึกษาการนำซีโอไลต์ชนิด 4เอ ซึ่งสังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินไปทดสอบความสามารถในการกำจัดโลหะหนัก ( $Co^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  and  $Ni^{2+}$ ) โดยทำการทดลองแบบที่ละเท เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก ปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลาสัมผัส และพีเอชเริ่มต้นของสารละลาย ผลการศึกษาโคเนตติการดูดซับพบว่าความสามารถในการดูดซับ  $Co^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  เป็นไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 ส่วนความสามารถในการดูดซับ  $Ni^{2+}$  เป็นไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 1 และผลการทดลองไอโซเทอมของการดูดซับ พบว่าเป็นไปตามสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยความสามารถในการดูดซับเป็นดังนี้  $Cu^{2+} > Cr^{3+} > Zn^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+}$  และพบว่า การดูดซับขึ้นอยู่กับค่าพีเอชและความเข้มข้นของโลหะหนัก เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดซับโลหะหนักจะเพิ่มขึ้น และกลไกในการกำจัดโลหะหนักนี้เป็นกระบวนการดูดซับและกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

Purna Chandra Rao และคณะ (2006) ได้ศึกษาการกำจัดแคดเมียม ( $Cd^{2+}$ ) และสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) ด้วยซีโอไลต์ชนิด 4 เอ, ซีโอไลต์ชนิด 13 เอ็กซ์ และเบนโทไนต์ โดยทำการทดลองแบบทีละเท เพื่อศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ระยะเวลาสัมผัส พีเอช และปริมาณซีโอไลต์ พบว่าที่พีเอช 6 มีร้อยละการกำจัด  $Cd^{2+}$  ดีที่สุด และที่พีเอช 6.5 มีร้อยละการกำจัด  $Zn^{2+}$  ดีที่สุด ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมของการดูดซับที่สภาวะดังกล่าว เป็นไปตามสมการการดูดซับแบบฟรุนดลิช และพบว่าที่เวลา 90 นาที สามารถกำจัดโลหะหนักได้มากกว่าร้อยละ 70 โดยซีโอไลต์ชนิด 4 เอ มีประสิทธิภาพการกำจัด  $Cd^{2+}$  และ  $Zn^{2+}$  มากกว่าซีโอไลต์ชนิด 13 เอ็กซ์ และเบนโทไนต์

Qui และ Zheng (2009) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่ว ( $Pb^{2+}$ ) ทองแดง ( $Cu^{2+}$ ) นิกเกิล ( $Ni^{2+}$ ) โคบอลต์ ( $Co^{2+}$ ) และสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) ในน้ำเสียด้วยซีโอไลต์ชนิด cancrinite ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย ซึ่งผลการทดลองไอโซเทอมของการดูดซับที่สภาวะสมดุล เป็นไปตามสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ และพบว่าซีโอไลต์สามารถกำจัดโลหะหนัก  $Pb^{2+}$  (2.530 มิลลิโมล/กรัม)  $> Cu^{2+}$  (2.081 มิลลิโมล/กรัม)  $> Ni^{2+}$  (1.532 มิลลิโมล/กรัม)  $> Co^{2+}$  (1.242 มิลลิโมล/กรัม)  $> Zn^{2+}$  (1.154 มิลลิโมล/กรัม) แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดแตกต่างกัน เนื่องจากความหนาแน่นของประจุ ขนาดไอออนในสารละลาย สภาวะที่เหมาะสมแต่ละธาตุที่แตกต่างกัน

Ismail และคณะ (2010) ได้ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากซิลิกาฟุ้ง (fume silica) และโซเดียมอะลูมิเนต (sodium aluminate) โดยสภาวะที่เหมาะสมจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะต้องมีค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูง ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ในการทดลองนี้สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอโดยใช้สัดส่วนดังนี้  $1SiO_2 : 0.83Al_2O_3 : 150H_2O : 1.15Na_2O$  ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 วันในการเกิดผลึก ผลการทดลองพบว่าซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 497  $m^2/g$  มีปริมาตรรูพรุนเท่ากับ 0.16  $cm^3/g$  และเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่ามีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ จากข้อมูลที่ได้มานำไปศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักของแคดเมียม นิกเกิลและแคดเมียมด้วยซีโอไลต์เอ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ พีเอช ปริมาณซีโอไลต์และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสูงสุดอยู่ที่พีเอช 4 โดยมีร้อยละการกำจัด 100 และประสิทธิภาพในการกำจัดลดลงสำหรับผลึกที่ไม่เป็นซีโอไลต์เอหรือเป็นรูปร่างอสัณฐาน และการผสมระหว่างรูปร่างอสัณฐานกับซีโอไลต์เอ เนื่องจากมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนลดลง ส่งผลให้มีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนไอออนน้อยกว่า โดยขนาดรูพรุนของซีโอไลต์เอที่ใหญ่กว่า โลหะหนักจึงสามารถแพร่ผ่านเข้าไปในรูพรุนได้ ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นด้วย

Ibrahim และคณะ (2010) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก ทองแดง แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล และสังกะสี โดยใช้ซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์ที่สังเคราะห์จากดินขาวราคาถูก โดยทำการทดลองแบบที่ละเท ใช้ความเข้มข้นของโลหะหนักเท่ากับ 100-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ค่า  $K_d$  ในการอธิบายถึงประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก และใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ฟรุนดลิชและดูบินิน-คากาเนอร์-เรดส์เควิช (DKR) ในการอธิบายลักษณะการดูดซับ โดยความสามารถในการดูดซับเป็นดังนี้  $Pb^{2+} > Cu^{3+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$  ซึ่งลำดับการดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดของไอออนของโลหะหนัก

Jamil และคณะ (2010) ได้ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์ที่สังเคราะห์จากดินขาว เพื่อนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักแต่ละชนิด ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี และนิกเกิล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และโลหะหนักผสมของโลหะหนักข้างต้นที่ความเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และปรับพีเอชเป็น  $7.5 \pm 0.2$  และทำการทดลองโดยใช้ระยะเวลาสัมผัสและปริมาณที่ต่างกัน ผลการทดลองพบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี อยู่ที่ 30 นาที ส่วนระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล อยู่ที่ 60 นาที ของซีโอไลต์ทั้งสองชนิด ปริมาณที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักทั้งหมดเท่ากับ 0.8 กรัมสำหรับซีโอไลต์เอ็กซ์ ส่วนซีโอไลต์เอมีแนวโน้มในการกำจัดโลหะหนักเช่นเดียวกัน ยกเว้นตะกั่ว โดยพบว่าปริมาณที่เหมาะสมเท่ากับ 0.4 กรัม ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากเป็นรูปทรงแบนหน้าและมีขนาดโมเลกุลเล็กเป็นนาโนเมตรจากการตัดขนาดก่อนการเตรียมซีโอไลต์

Nibou และคณะ (2010) ได้ศึกษาการกำจัดสังกะสี ( $Zn^{2+}$ ) ด้วยซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์ ซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีแบบไฮโดรเทอร์มัลโดยใช้อะลูมิเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (aluminium isopropoxide) เป็นแหล่งอะลูมินา โดยทำการทดลองแบบที่ละเท เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดสังกะสี ได้แก่ พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น อัตราส่วนของของแข็งต่อของเหลว และอุณหภูมิ และใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแบบแลงเมียร์ในการอธิบายลักษณะการดูดซับ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงที่สุดที่ความเข้มข้นต่ำที่สุด เมื่อวิเคราะห์เทอร์โมไดนามิก ผลค่าความร้อนของการดูดซับเป็นการคายความร้อนเนื่องจากค่าความร้อนจะมีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างภายในของซีโอไลต์ โดยค่าความร้อนนั้นสามารถบอกถึงกระบวนการดูดซับได้ ผลการศึกษาโคเนตติคและอัตราการดูดซับ เป็นไปตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 2 พารามิเตอร์ที่เหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดสังกะสีในโรงงานอุตสาหกรรมได้



## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองนำกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาปรับสภาพ เพื่อกำจัดโลหะหนักโดยทำการทดลองแบบทีละเทและแบบคอลัมน์ ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) รุ่น JSM-5410LV บริษัท JEOL
2. เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) บริษัท Rigaku D/MAX-220 Ultima<sup>+</sup>
3. เครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer Emmett-Teller adsorption, BET) บริษัท Quantachrome รุ่น Autosorb-1, Thermo Finnigan / Sorptomatic 1990
4. เครื่องฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) รุ่น Spectrum One บริษัท Perkin Elmer
5. เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS) รุ่น AA 280 FS บริษัท Varian
6. เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น UB-10 บริษัท DENVER INSTRUMENT
7. เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น A 200 S บริษัท Sartorius analytic
8. เครื่องเขย่าแบบวง (orbital shaker) รุ่น HS 501 digital บริษัท Kika Labortechnik
9. เครื่องบดสาร (tube mill)
10. กระดาษกรองวัตแมน (Whatman) เบอร์ 1 และ 42
11. ตะแกรงคัดขนาด 200 เมช
12. โถดูดความชื้น (desiccators)
13. คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร
14. ป้อน้ำ รุ่น CX1-51-PPC-K บริษัท N-feeder

15. เครื่องแก้ว
16. ชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก (stirring bar)
17. ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)
18. ชุดออโตเคลฟ (autoclave) ทำจากเทฟลอน
19. เตาเผาไฟฟ้า (muffle furnace)



ภาพที่ 3.1 กระบอกเทฟลอน



ภาพที่ 3.2 ตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven)



ภาพที่ 3.3 เตาเผาไฟฟ้า (muffle furnace)

### 3.1.2 สารเคมี

1. วัตถุดิบ: กากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วจากกระบวนการดูดซับความชื้นในกระบวนการผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรม
2. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง เป็นสารเคมีเกรดเชิงวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียด ดังนี้
  - โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) บริษัท MERCK, Germany
  - กรดไนตริก (HNO<sub>3</sub>) บริษัท CARLO ERBA
  - กรดไฮโดรคลอริก (HCl) บริษัท CARLO ERBA
  - น้ำดีไอออไนเซชัน
  - สารละลายมาตรฐานสังกะสีซัลเฟต (ZnSO<sub>4</sub>) บริษัท Ajax Finechem
  - สารละลายมาตรฐานเลดไนเตรท (Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) บริษัท Ajax Finechem
  - สารละลายมาตรฐานคอปเปอร์ไนเตรท (Cu(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) บริษัท Ajax Finechem
  - สารวอเตอร์กลาส (water glass) จากโรงงานผลิตวอเตอร์กลาส

### 3.2 แผนการทดลอง

#### การวิจัยครั้งนี้แบ่งเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

##### 3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

###### 3.2.1.1 การเตรียมกากซีลิกา-อะลูมินา

###### 3.2.1.3 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากกากซีลิกา-อะลูมินา

##### 3.2.2 การศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและทางกายภาพที่สำคัญของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

#### ลักษณะสมบัติทางกายภาพ

- 1) วิเคราะห์การเกิดรูพรongผลึกโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
- 2) วิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยเครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer Emmett-Teller adsorption, BET)
- 3) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)

#### ลักษณะสมบัติทางเคมี

- 1) วิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกโดยใช้เครื่องวิเคราะห์เอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)
- 2) วิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวของตัวกลาง (Surface charge density) ด้วยวิธีไตเตรทด้วยกรด-ด่าง

3.2.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ได้แก่ ความเข้มข้นของโลหะหนัก พีเอช และระยะเวลาสัมผัส โดยทำการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

3.2.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนัก (สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง)

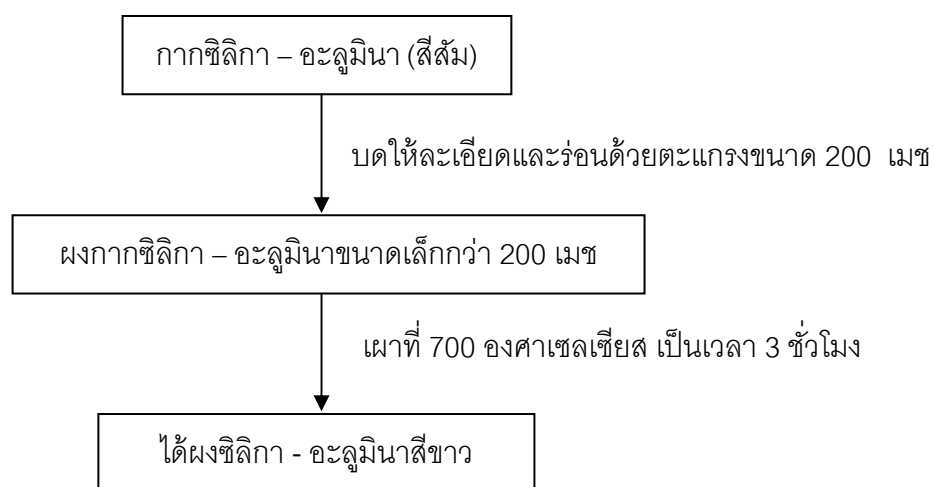
3.2.5 การศึกษาประสิทธิภาพของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอในการดูดซับโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์ (Column Test)

### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

##### 3.3.1.1 การกำจัดมลทินอินทรีย์จากกากซีลีกา-อะลูมินา

การเตรียมกากซีลีกา-อะลูมินาอ้างอิงจากงานวิจัยของ ธัชชา สามพิมพ์, 2553 โดยนำกากซีลีกา-อะลูมินามาทำการบดด้วยเครื่องบด (Tube Mill) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช เเผที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence : XRF)



ภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมกากอะลูมินาและซีลีกา (ธัชชา สามพิมพ์, 2553)

##### 3.3.1.2 การสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

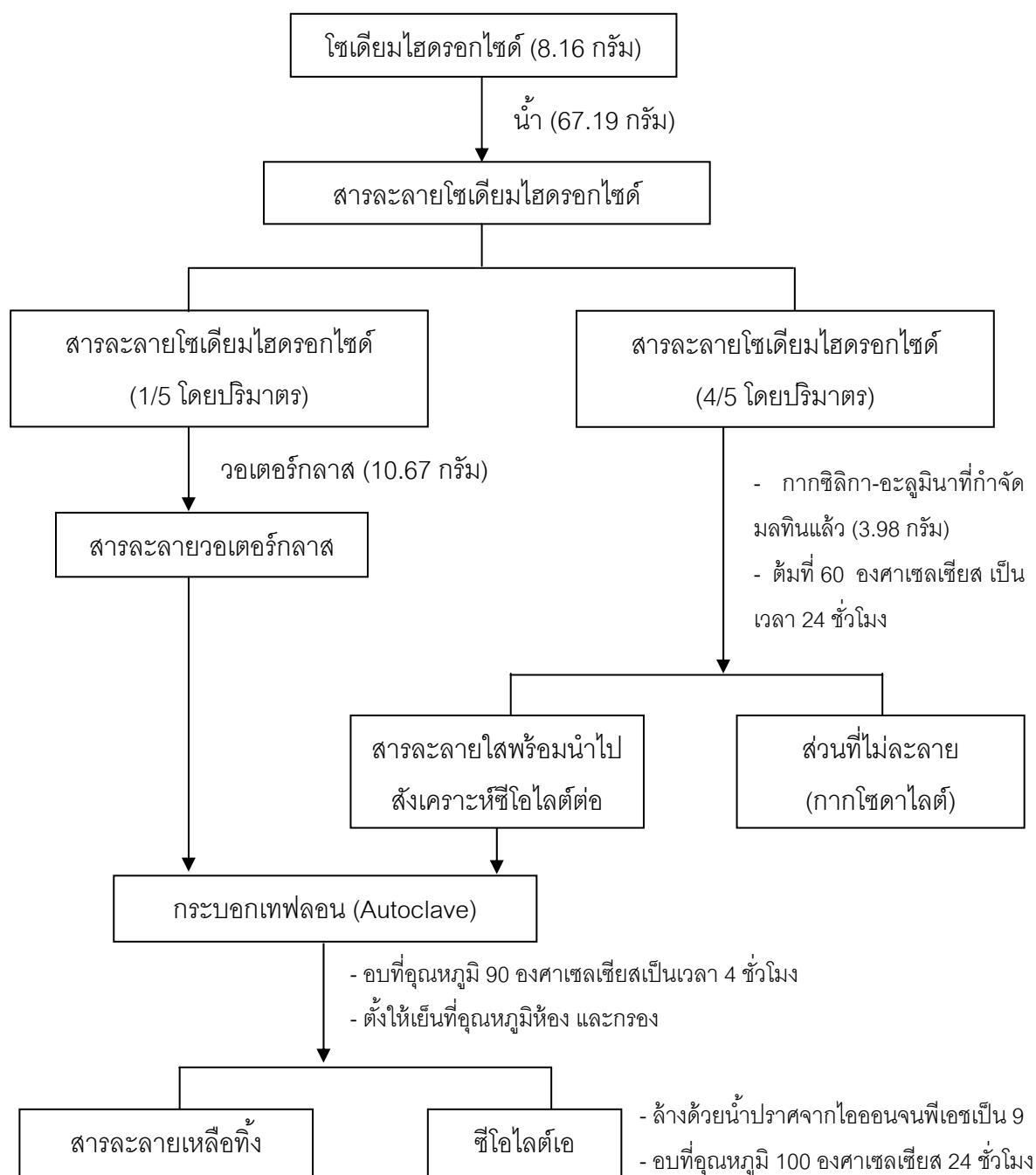
1) ทำการชั่งสารตามสัดส่วนดังนี้ กากซีลีกา-อะลูมินาที่ผ่านการบด คัดขนาด และอบแห้ง : โซเดียมไฮดรอกไซด์ : วอเตอร์กลาส : น้ำ เท่ากับ 3.98 : 8.16 : 10.67 : 67.19 กรัม ตามลำดับ (ธัชชา สามพิมพ์, 2553)

2) ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.16 กรัม ในน้ำ 67.19 กรัม แล้วแบ่งออกเป็น 5 ส่วน และละลายกากซีลีกา-อะลูมินา ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แบ่งออกมา 4 ส่วน คนด้วยแท่งแม่เหล็ก ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามลำดับ จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรองวัดแมน และนำสารละลายไปสังเคราะห์ซีโอไลต์เอต่อ

3) ละลายวอเตอร์กลาสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่แบ่งออกมา 1 ส่วน และนำสารละลายที่ได้มาผสมกัน คนด้วยแท่งแม่เหล็กให้ผสมกันอย่างรวดเร็ว เป็นเวลา 10 นาที ใส่ในออตoclave (กระบอกเทฟลอน) นำเข้าตู้อบไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง (ธัชชา สามพิมพ์, 2553)

4) นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้อุณหภูมิลดลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง ล้างด้วยน้ำดีไอออนในเซชันจนค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 9

5) นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสังเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)



ภาพที่ 3.5 ขั้นตอนสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ (รัชชา สามพิมพ์, 2553)

### 3.3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

#### 3.3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิว

- นำกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.3.2.2 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ

- นำกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ วิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer Emmett-Teller adsorption: BET) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.3.2.3 การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก

- นำกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันโตมิเตอร์ (XRD) ณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก (Crystallinity) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าความเป็นผลึก} = \frac{\text{ผลรวมพื้นที่ใต้กราฟที่ } 2\theta \text{ ที่ } (7.2, 10.2, 24.0, 27.2, 29.9) \text{ ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้} \times 100}{\text{ผลรวมพื้นที่ใต้กราฟที่ } 2\theta \text{ ที่ } (7.2, 10.2, 24.0, 27.2, 29.9) \text{ ของซีโอไลต์เอจากสภาวะดีที่สุด}}$$

#### 3.3.2.4 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันัลบนพื้นผิว

- นำกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ วิเคราะห์ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ณ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 3.3.2.5 การวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวของตัวกลาง

- นำกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ วิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวของตัวกลาง (Surface charge density) ด้วยวิธีไทเทรตด้วยกรด-ด่าง

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ต่างๆ และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)
การวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ	เครื่องตรวจสอบพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer Emmett-Teller adsorption, BET)
การวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก	เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชันโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD)
การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิว	เครื่องฟูเรียร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR)
การวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวของตัวกลาง	ด้วยวิธีไตเตรทด้วยกรด-ด่าง

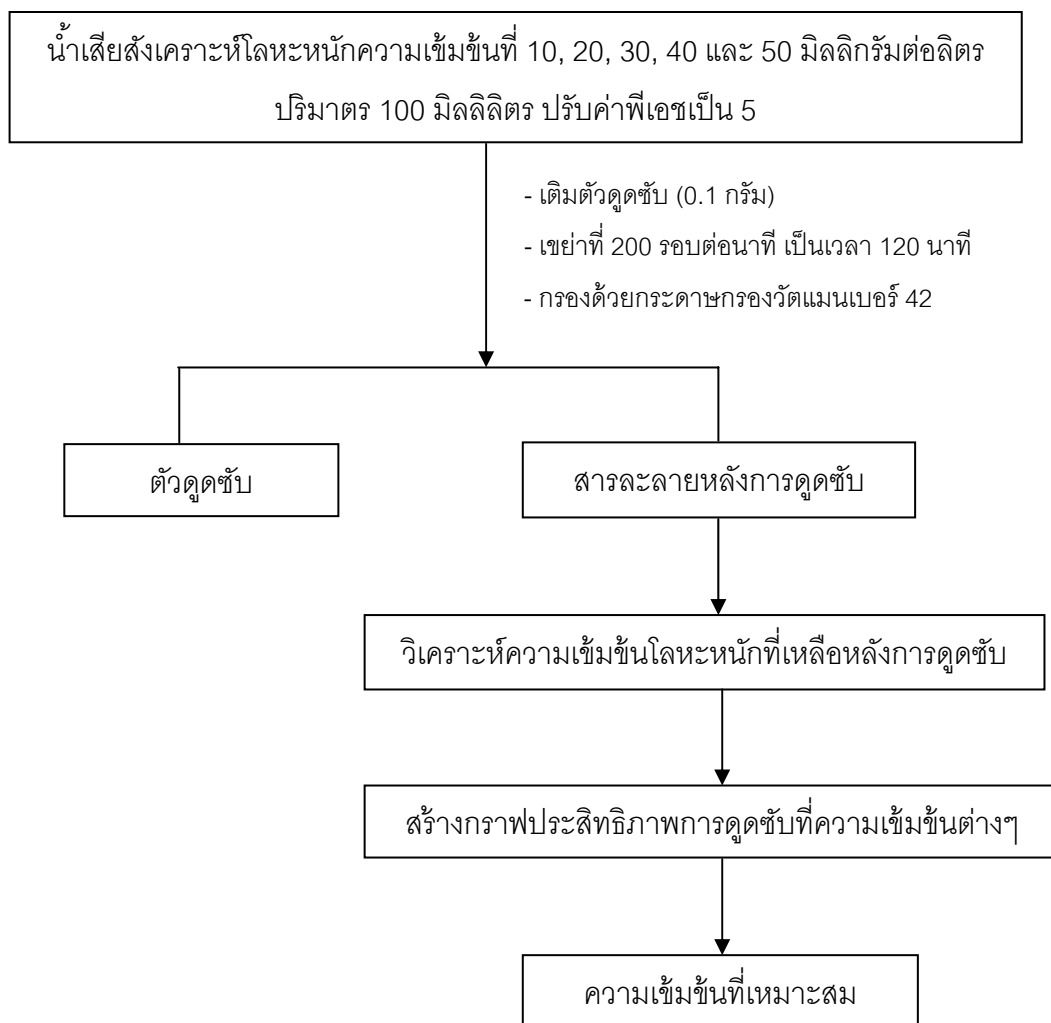
### 3.3.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

#### 3.3.3.1 การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้น

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้เท่ากับ 5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล หรือกรดไนตริก 1 นอร์มัล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2) เติมตัวดูดซับที่เตรียมไว้ ปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 นาที
- 4) แยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมนเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าพีเอชของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้ เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS)



- 6) ทำการทดลองโดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ โลหะหนักสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu)
- 7) นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับโลหะหนัก



ภาพที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของความเข้มข้นต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก

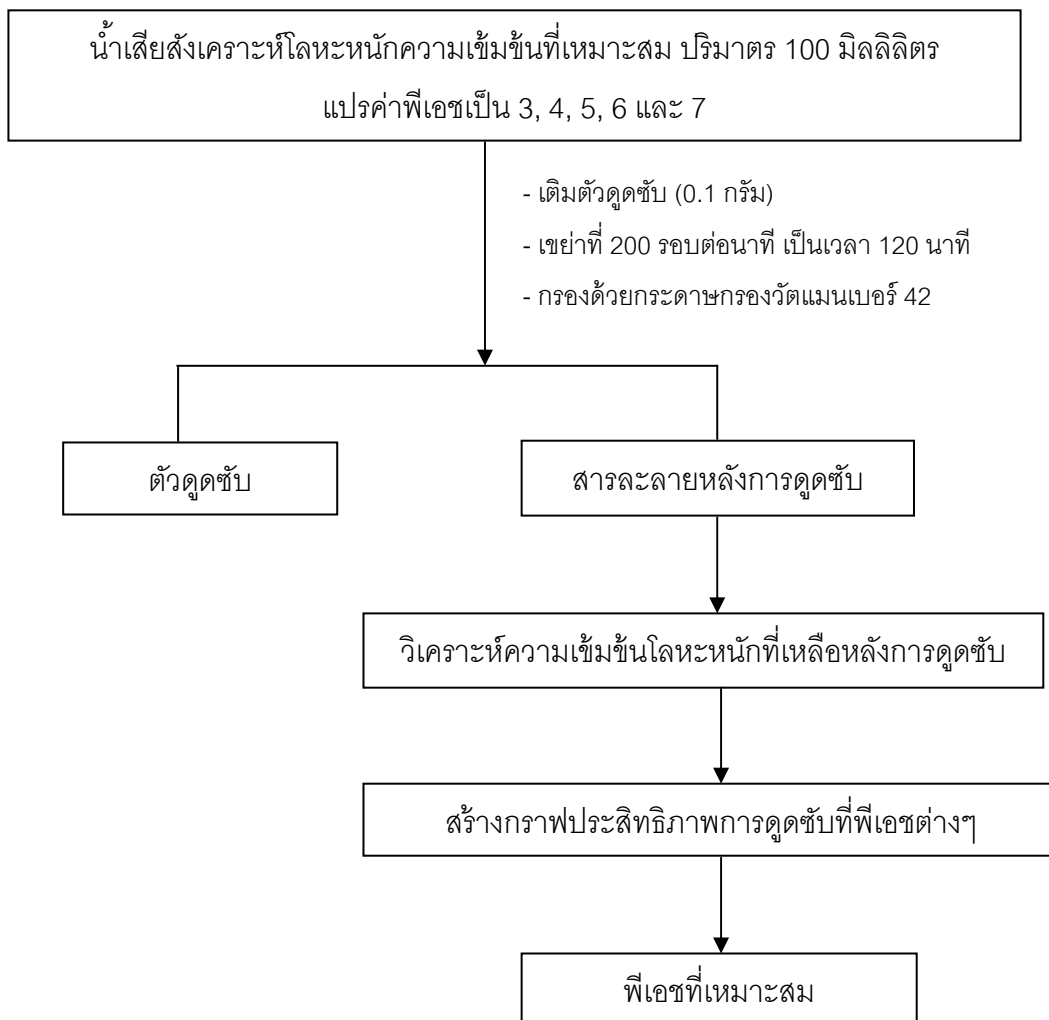
ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณสารดูดซับ	0.1 กรัม (1 กรัมต่อลิตร)
	ปริมาตรสารละลายโลหะหนัก	ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
	เวลา	120 นาที
	จำนวนรอบในการปั่นกววน	200 รอบต่อนาที
	พีเอช	เท่ากับ 5
ตัวแปรอิสระ	ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก	10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร
	ชนิดของสารดูดซับ	- กากโซดาไลต์ - ซีโอไลต์เอ
	ชนิดของโลหะหนัก	- สังกะสี - ตะกั่ว - ทองแดง
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่	-

### 3.3.3.2 การศึกษาอิทธิพลของพีเอช

- 1) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 3.3.3.1 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
- 2) เติมตัวดูดซับที่เตรียมไว้ ปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ
- 3) ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 7 ตามลำดับ โดยการปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล หรือกรดไนตริก 1 นอร์มัล
- 4) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 นาที
- 5) แยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมนเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าพีเอชของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้ เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร
- 6) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS)

7) ทำการทดลองโดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่างเป็นสารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ โลหะหนักสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu)

8) นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟหาค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับโลหะหนัก



ภาพที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก

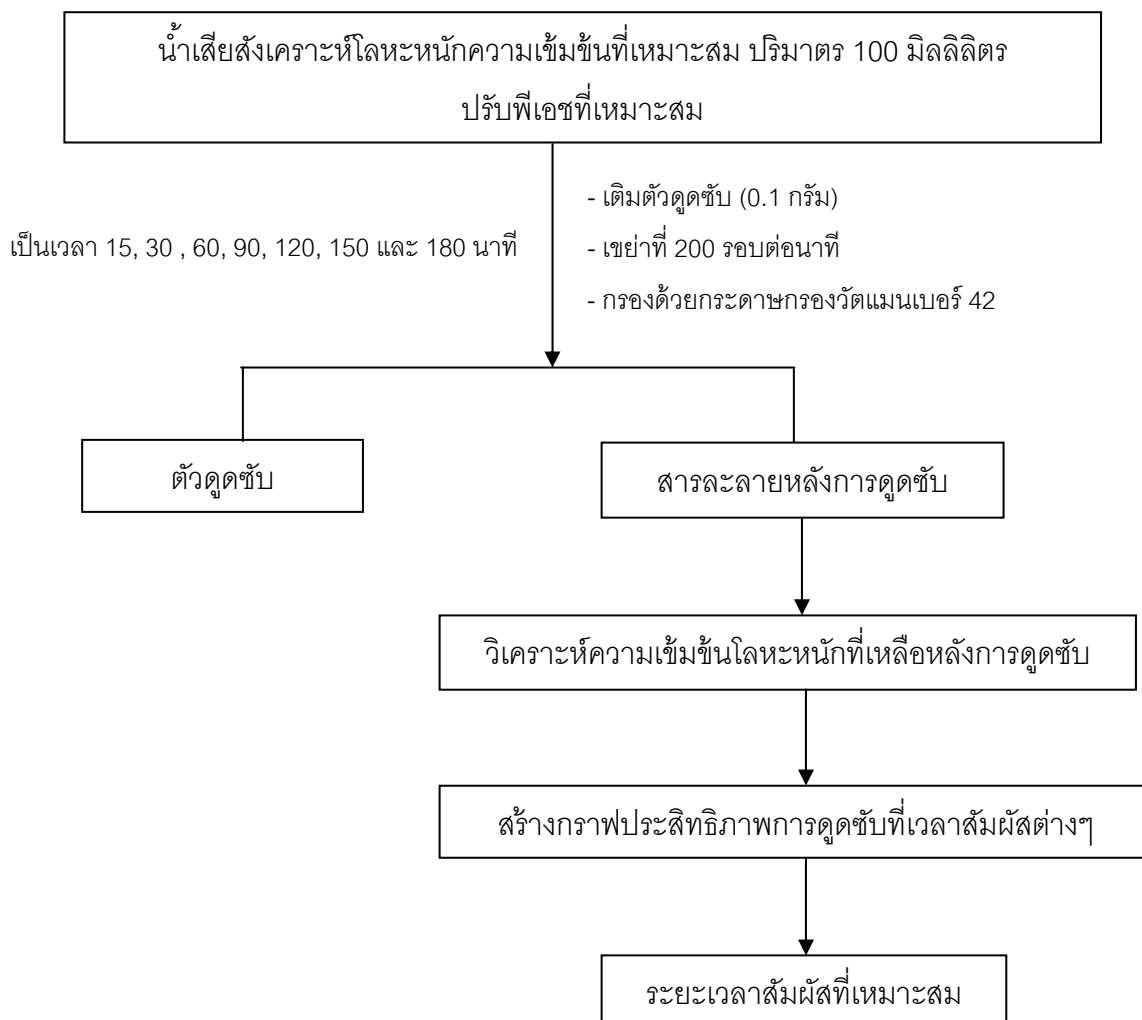
ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณสารดูดซับ	0.1 กรัม (1 กรัมต่อลิตร)
	ปริมาตรสารละลายโลหะหนัก	ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
	เวลา	120 นาที
	จำนวนรอบในการปั่นกววน	200 รอบต่อนาที
	ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก	ที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.1
ตัวแปรอิสระ	พีเอช	พีเอชเท่ากับ 3, 4, 5, 6 และ 7
	ชนิดของสารดูดซับ	- กากโซดาไลต์ - ซีโอไลต์เอ
	ชนิดของโลหะหนัก	- สังกะสี - ตะกั่ว - ทองแดง
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่	-

### 3.3.3.3 การศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัส

- 1) นำน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการข้อ 3.3.3.1 ปรับค่าพีเอช ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.2 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล หรือกรดไนตริก 1 นอร์มัล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
- 2) เติมตัวดูดซับที่เตรียมไว้ ปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ
- 3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 15, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที ตามลำดับ
- 4) แยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมนเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าพีเอช ของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้ เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร
- 5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS)

6) ทำการทดลองโดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่าง เป็นสารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ โลหะหนักสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu)

7) นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างกราฟหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก



ภาพที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาเพื่อหาเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาผลของเวลาสัมผัสต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณสารดูดซับ	0.1 กรัม (1 กรัมต่อลิตร)
	ปริมาตรสารละลายโลหะหนัก	ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
	พีเอช	ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.2
	ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก	ที่เหมาะสมจากข้อ 3.3.3.1
	จำนวนรอบในการปั่นกวน	200 รอบต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	เวลา	15, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที
	ชนิดของสารดูดซับ	- กากโซดาไลต์ - ซีโอไลต์เอ
	ชนิดของโลหะหนัก	- สังกะสี - ตะกั่ว - ทองแดง
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่	-

### 3.3.3.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนัก

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.1 ปรับพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.2 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล หรือกรดไนตริก 1 นอร์มัล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

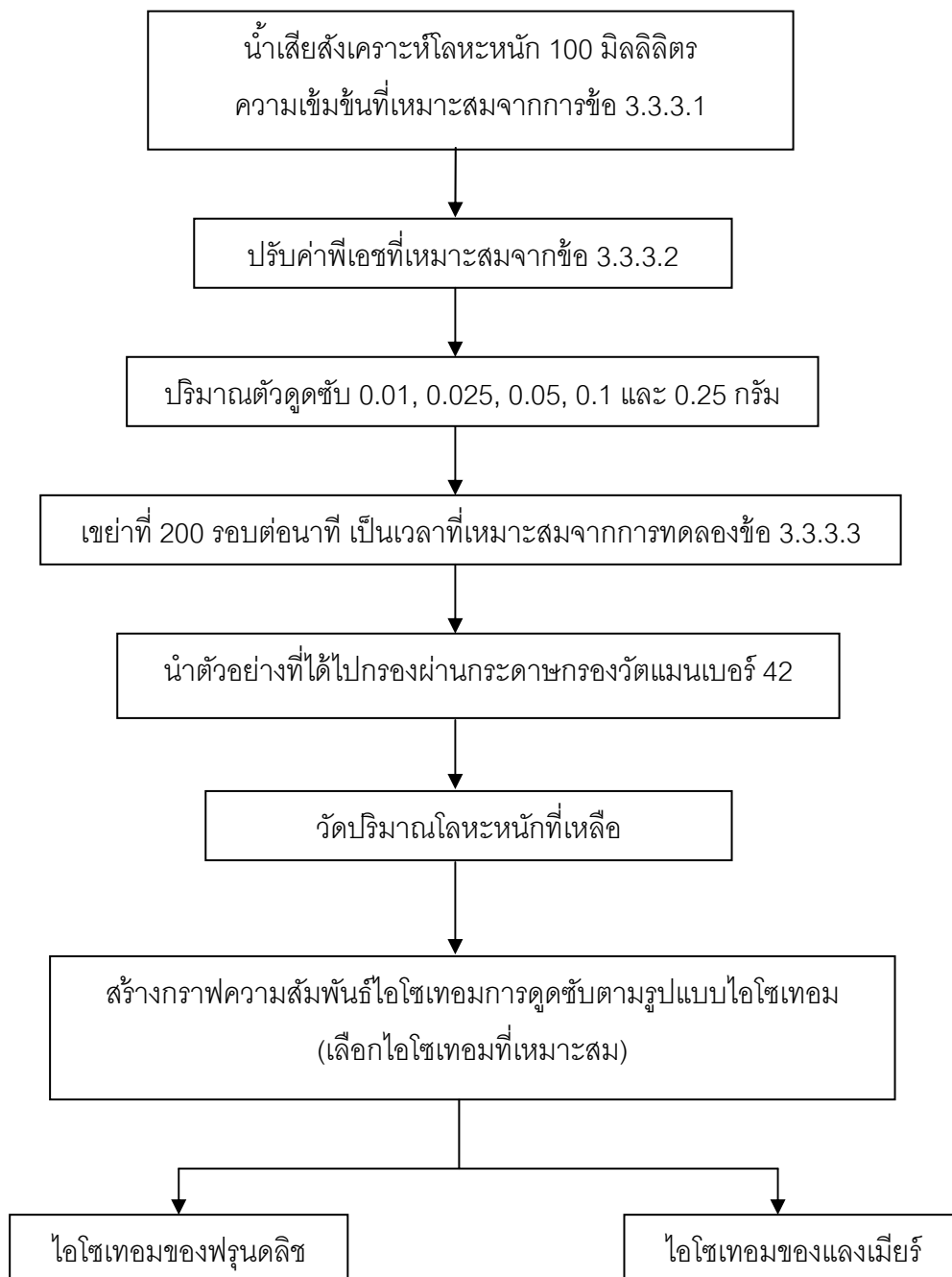
2) เติมตัวดูดซับที่เตรียมไว้ ปริมาณ 0.01, 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.25 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ

3) นำขวดแต่ละใบไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบ/นาที เป็นเวลาสัมผัสที่เหมาะสมที่สุดจากข้อ 3.3.3.3

4) แยกตัวดูดซับออกโดยกรองผ่านกระดาษกรองวัดแมนเบอร์ 42 นำสารละลายที่กรองได้มาวัดค่าพีเอช ของน้ำเสียหลังเขย่า บันทึกค่าไว้ เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่าง ประมาณ 50 มิลลิลิตร

5) นำสารละลายที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลืออยู่ด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS)

- 6) ทำการทดลองโดยเปลี่ยนน้ำตัวอย่าง เป็นสารละลายโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ โลหะหนักสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu)
- 7) นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับตามรูปแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ โดยเลือกสมการที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุด



ภาพที่ 3.9 ขั้นตอนการทดลองหาไอโซเทอม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก

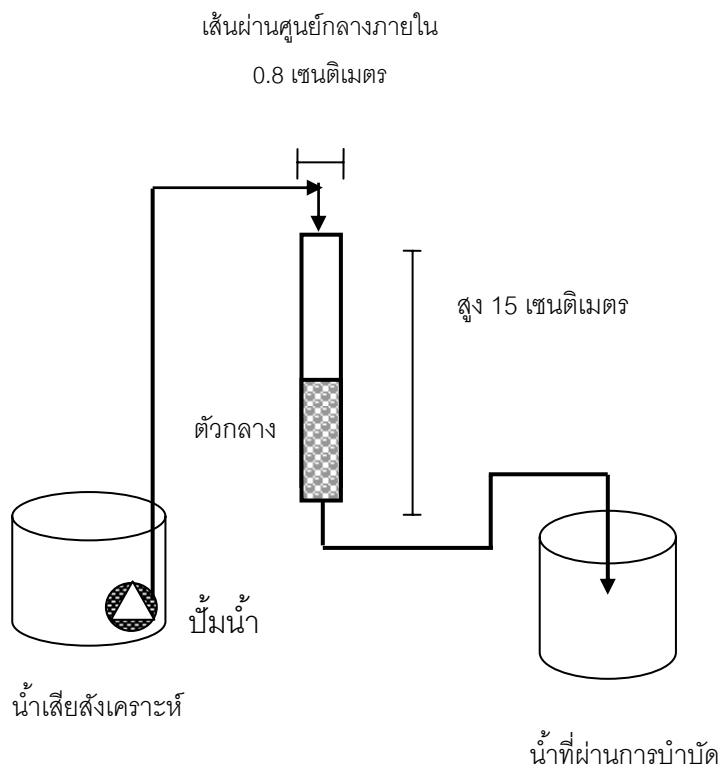
ตารางที่ 3.5 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาไอโซโทมการดูดซับโลหะหนัก

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	จำนวนรอบในการปั่นกววน	200 รอบต่อนาที
	ปริมาตรสารละลายโลหะหนัก	ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
	เวลา	ที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.3
	ความเข้มข้นของโลหะหนัก	ที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.1
	พีเอช	ที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.2
ตัวแปรอิสระ	ปริมาณสารดูดซับ	0.01, 0.025, 0.05, 0.1 และ 0.25 กรัม
	ชนิดของสารดูดซับ	- กากโซดาไลต์ - ซีโอไลต์เอ
	ชนิดของโลหะหนัก	- สังกะสี - ตะกั่ว - ทองแดง
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่	-

### 3.3.4 การศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนัก โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

- เตรียมคอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร
- เตรียมตัวกลางดูดซับ โดยพิจารณาปัจจัยในการดูดซับและผลการทดลองไอโซโทมการดูดซับที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และบรรจุตัวกลางลงในคอลัมน์ในปริมาณที่เหมาะสม
- เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.1 และปรับพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.2 ด้วยสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล หรือกรดไนตริก 1 นอร์มัล
- ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์แบบต่อเนื่อง โดยควบคุมอัตราการไหลประมาณ 3 มิลลิลิตรต่อนาที หรือตามความเหมาะสมที่ทำให้น้ำเสียไหลอย่างต่อเนื่อง โดยให้ไหลผ่านคอลัมน์แบบไหลลง (down flow)
- เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์แล้วทุก 15 นาที จนกว่าค่าความเข้มข้นที่บำบัดได้ใกล้เคียงกับความเข้มข้นเริ่มต้น หรือถึงจุดเบรคทูร์จ และนำน้ำเสียที่เก็บได้มาวัดค่าพีเอช
- นำน้ำตัวอย่างไปตรวจปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่เหลือโดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS)
- นำค่าที่ได้ไปสร้างกราฟเส้นโค้งเบรคทูร์จ (Breakthrough curve)





ภาพที่ 3.10 ขนาดและการติดตั้งคอลัมน์

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนักแบบคอลัมน์

ชนิดตัวแปร	ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรควบคุม	อุณหภูมิ	25±2 องศาเซลเซียส
	ปริมาณสารดูดซับ	ที่เหมาะสมจากการทดลองแบบที่ละเท
	พีเอช	ที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.2
	ความเข้มข้นของโลหะหนัก	ที่เหมาะสมจากการทดลองข้อ 3.3.3.1
	อัตราการไหล	3 มิลลิลิตรต่อนาที
ตัวแปรอิสระ	เวลา	เก็บตัวอย่างจนถึงเบรคทูร์จ์
	ชนิดของสารดูดซับ	- กากโซดาไลต์ - ซีโอไลต์เอ
	ชนิดของโลหะหนัก	- สังกะสี - ตะกั่ว - ทองแดง
ตัวแปรตาม	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เหลืออยู่	-

### 3.3.5 การศึกษาการชะไอออนโลหะหนักด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น

เพื่อทดสอบความเสถียรของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ดูดซับโลหะหนักสังกะสี ทองแดงและตะกั่วแล้ว โดยทำการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 โดยใช้วิธีการ Waste Extraction Test (WET) มีวิธีการดังต่อไปนี้

- 1) นำกระดาศกรงที่มีตัวดูดซับกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ผ่านการดูดซับแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้ง
- 2) นำตัวดูดซับกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่แห้ง ปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3) เติมสารละลายกรดซิตริก (Citric acid) ซึ่งเตรียมจากกรดซิตริกเกรดเชิงวิเคราะห์ (Analytical grade citric acid) ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 5 ด้วยสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 4 นอร์มัล ใส่ลงในขวดแต่ละใบ
- 4) เขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยอัตราเขย่า 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- 5) นำตัวอย่างที่ได้ไปผ่านกระดาศกรงวัตแมนเบอร์ 42 เก็บน้ำใส่ไว้ในขวดเก็บตัวอย่างประมาณ 50 มิลลิลิตร
- 6) นำตัวอย่างไปตรวจปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่ถูกชะออก โดยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrometer, AAS)
- 7) ทำซ้ำตั้งแต่ข้อ 1) ถึง 6) แต่เปลี่ยนจากสารละลายกรดเป็นน้ำกลั่น

### 3.3.6 การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

ประมาณการค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ โดยคิดจาก

1. ค่าวัตถุดิบทางตรง ได้แก่ กากซิลิกา – อะลูมินา
2. ค่าวัตถุดิบทางอ้อม ได้แก่ สารเคมีและวัสดุสิ้นเปลือง
3. ค่าดำเนินการผลิต ได้แก่ ค่าไฟฟ้า

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วและกากโซดาไลต์ที่เหลือทิ้งจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์ การศึกษาแบ่งออกเป็น 5 ส่วน คือ การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว กากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอสังเคราะห์ การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักของซีโอไลต์เอสังเคราะห์และกากโซดาไลต์โดยใช้การทดลองแบบคอลัมน์ และการศึกษาการชะละลายของโลหะหนัก

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี

##### 4.1.1 ผลวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของซีโอไลต์ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD)

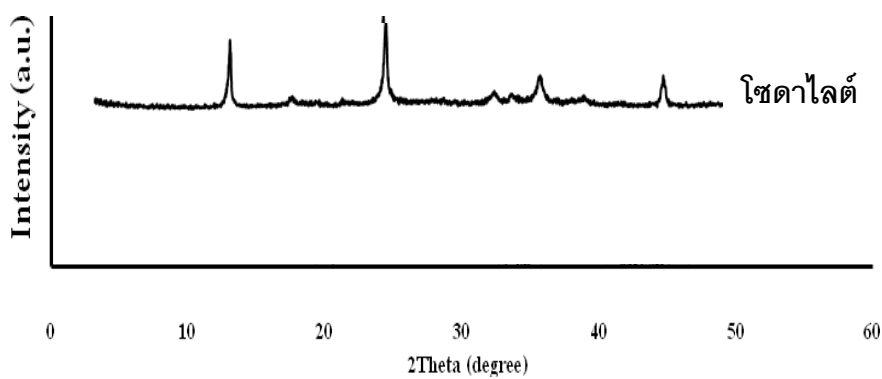
กากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่นำมาศึกษาเป็นกากของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของโรงงานผลิตไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในจังหวัดระยอง มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลแดง จากนั้นนำกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาปรับปรุงเบื้องต้นโดยการบดด้วยเครื่องบด (Tube Mill) ทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช ดังภาพที่ 4.1 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าลักษณะเปลี่ยนไปเป็นผงสีขาว ดังภาพที่ 4.2 และจากนั้นนำกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่ผ่านการปรับปรุงแล้วมาสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ตามสัดส่วนที่เหมาะสมจากงานวิจัยของธัชชา สามพิมพ์ (2553) และทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกากซิลิกา-อะลูมินาที่ผ่านการละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่ากากที่กรองได้ เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) จะได้ดิฟแฟรกโทแกรม ดังภาพที่ 4.3 ซึ่งตรงกับโครงสร้างผลึกโซดาไลต์ โดยคุณสมบัติมีองค์ประกอบเป็นซีโอไลต์ชนิดหนึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกได้ และจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากงานวิจัยของธัชชา สามพิมพ์ (2553) คือที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เมื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer : XRD) จะได้ดิฟแฟรกโทแกรม ดังภาพที่ 4.4 พบว่าเป็นโครงสร้างผลึกซีโอไลต์เอ ซึ่งตรงกับซีโอไลต์เอจากงานวิจัยของธัชชา สามพิมพ์ (2553)



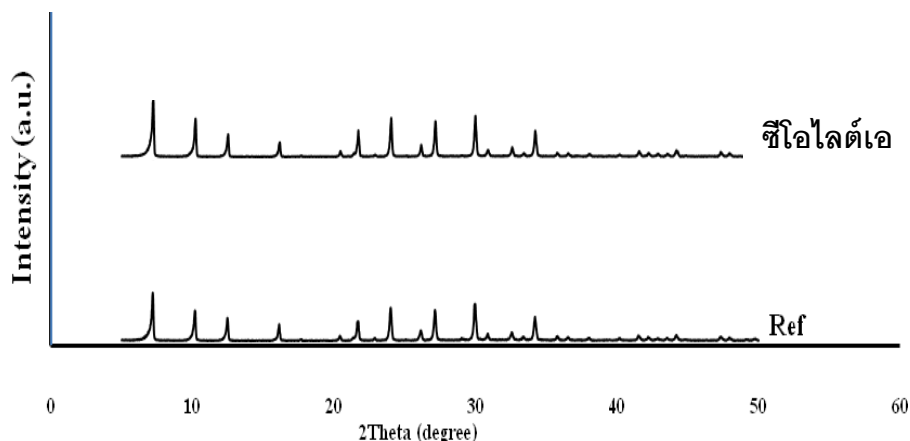
ภาพที่ 4.1 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วหลังทำการปรับปรุงเบื้องต้นโดยการบดและ  
ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 200 เมช



ภาพที่ 4.2 ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วหลังทำการปรับปรุงเบื้องต้นโดยเผา  
ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.3 ดิฟแฟรกโทแกรมของกากโซดาไลต์ที่กรองทิ้งหลังจากผสมด้วย  
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์



ภาพที่ 4.4 ดิฟแฟรกโทแกรมของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และซีโอไลต์เออ้างอิงจากงานวิจัยของรัชชา สามพิมพ์ (2553)

วิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก (Crystallinity) ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าความเป็นผลึก} = \frac{\text{ผลรวมพื้นที่ใต้กราฟที่ } 2\theta \text{ ที่ } (7.2, 10.2, 24.0, 27.2, 29.9) \text{ ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้} \times 100}{\text{ผลรวมพื้นที่ใต้กราฟที่ } 2\theta \text{ ที่ } (7.2, 10.2, 24.0, 27.2, 29.9) \text{ ของซีโอไลต์เอจากสภาวะที่ดีที่สุด}}$$

จากโครงสร้างผลึกของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ นำมาคำนวณค่าความเป็นผลึก โดยคิดจากตำแหน่ง  $2\theta$  ของซีโอไลต์เอที่มีปรากฏพีคสูงสุดห้าอันดับแรก ได้แก่ ที่ตำแหน่ง 7.2, 10.2, 24.0, 27.2, 29.9 ของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ และนำมาเทียบกับซีโอไลต์เอจากสภาวะที่ดีที่สุด คือ การสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัลที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในงานวิจัยของรัชชา สามพิมพ์ (2553) ผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึก แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความเป็นผลึกของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

Characteristic peak $2\theta$	Intensity for sample		
	ซีโอไลต์เอ (รัชชา, 2553)	ซีโอไลต์เอในงานวิจัยนี้	ซีโอไลต์เอทางการค้า
7.2	16698	11322	-
10.2	9312	7784	-
24.0	8116	7157	-
27.2	7459	6328	-
29.9	8676	7768	-
ค่าความเป็นผลึก	100 %	80.30 %	86.05 %

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าความเป็นผลึกของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าความเป็นผลึกน้อยกว่าซีโอไลต์เอในงานวิจัยของรัชชา สามพิมพ์ (2553) และซีโอไลต์เอทางการค้า (Hui และคณะ, 2005) แสดงว่าซีโอไลต์เอที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์น้อยกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนการเกิดผลึกนั้นต้องการเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกและโตเป็นผลึกที่สมบูรณ์ แต่ในงานวิจัยนี้อาจใช้เวลาและอุณหภูมิไม่เหมาะสม ทำให้ไม่เพียงพอต่อการเกิดผลึก อันเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต่างจากงานวิจัยของรัชชา สามพิมพ์ (2553) ได้แก่ กระจกเทฟลอน และเตาไฟฟ้า

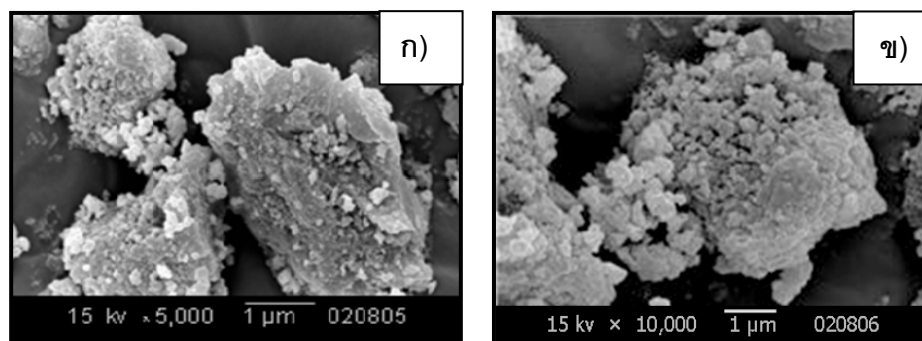
และจากกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ เมื่อนำกากของเสียซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมาทำการปรับปรุงเบื้องต้นเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ ส่งผลให้น้ำหนักหายไปประมาณร้อยละ 26 เมื่อเทียบกับกากของเสียเริ่มต้น และเมื่อนำกากที่ผ่านการปรับปรุงเบื้องต้นมาสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ พบว่าเกิดกากโซดาไลต์ที่ไม่ละลาย ต้องทำการกรองออกเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกากหลังการปรับปรุงหรือคิดเป็นน้ำหนักประมาณ 2 กรัม ส่วนซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ คิดเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกากหลังการปรับปรุงหรือคิดเป็นน้ำหนักประมาณ 3 กรัม เมื่อคำนวณอัตราการเกิดซีโอไลต์เอ (yield) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ต่อ น้ำหนักของกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว คำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{อัตราการเกิดซีโอไลต์เอ} &= \frac{\text{น้ำหนักของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์}}{\text{น้ำหนักของกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว}} \\ &= \frac{3 \text{ กรัม}}{4 \text{ กรัม}} \\ &= 0.75 \end{aligned}$$

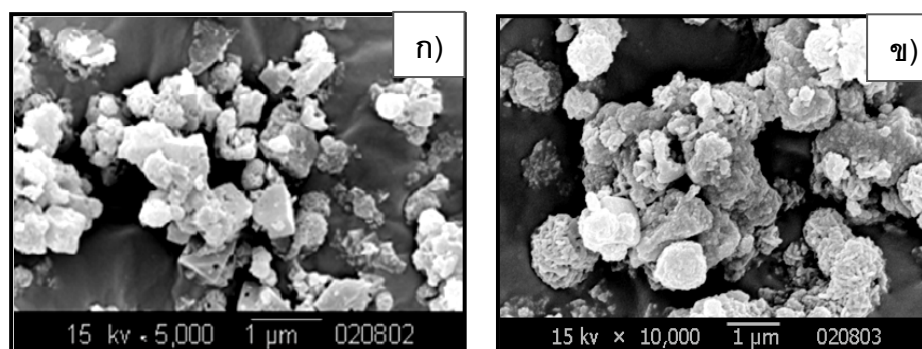
#### 4.1.2 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)

จากการวิเคราะห์โครงสร้างภายนอกของกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 และ 10,000 เท่า พบว่ามีลักษณะเป็นรูปทรงที่แตกต่างกันออกไป ไม่แน่นอน มีพื้นที่ผิวค่อนข้างแน่น ไม่กระจายตัวและไม่มีรูพรุนเกิดขึ้น ดังภาพที่ 4.5 สำหรับลักษณะโครงสร้างภายนอกของกากโซดาไลต์เปลี่ยนแปลงไปจากกากซิลิกา-อะลูมินา ดังภาพที่ 4.6 คือมีรูพรุนเป็นโพรงเล็กเกิดขึ้นเห็นได้ชัดเจน และมีลักษณะเป็นรูปทรงมากขึ้น ทำให้มีโอกาสที่จะจับและเกิดกระบวนการดูดซับกับโลหะหนักได้มากขึ้น และสำหรับซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้ ดังภาพที่ 4.7 พบว่าเกิดโครงสร้างเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ของซีโอไลต์เอ ผลึกที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นรูปทรง

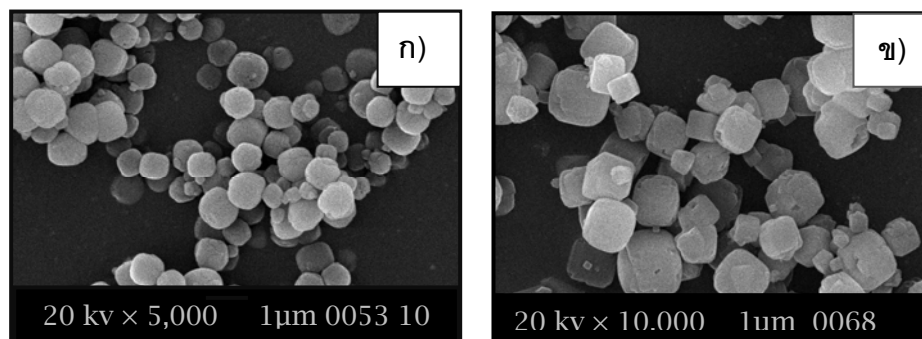
สีเหลืองมุกบาศก์ชัดเจนและมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยตามทฤษฎีซีโอไลต์เอจะมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ การวิเคราะห์วิธีนี้สามารถบ่งบอกลักษณะซีโอไลต์เอที่เกิดขึ้นได้ว่ามีความสมบูรณ์ตามทฤษฎีหรือไม่ โดยเมื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าเกิดโครงสร้างทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร และลักษณะเหลี่ยมมุมที่ปรากฏชัดเจน ทำให้ได้ซีโอไลต์เอที่มีความสมบูรณ์ เป็นคุณสมบัติที่ดีต่อการเกิดกระบวนการดูดซับโลหะหนัก



ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วที่กำลังขยาย ก) 5,000 และ ข) 10,000 เท่า



ภาพที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกากโซดาไลต์ที่กำลังขยาย ก) 5,000 และ ข) 10,000 เท่า



ภาพที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของซีโอไลต์เอที่กำลังขยาย ก) 5,000 และ ข) 10,000 เท่า

#### 4.1.3 วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ด้วยเครื่องวิเคราะห์ ปริมาณพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET surface Area Analyzer)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนด้วยเครื่อง Specific Surface Area Analysis ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) โดยอาศัยเทคนิคการแทนที่พื้นที่ผิว หรือ รูพรุนด้วยแก๊สไนโตรเจน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของกากซิลิกา-อะลูมินา กากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอ

ลักษณะทางกายภาพ	กากซิลิกา-อะลูมินา (ผุสดี, 2546)	กาก โซดาไลต์	ซีโอไลต์เอ	ซีโอไลต์เอทางการค้า (Hui และคณะ,2005)
พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	0.049	109.64	28.596	71.41
ปริมาตรรูพรุน (ลบ.ซม./กรัม)	0.013	0.213	0.0545	-
ขนาดรูพรุน(นาโนเมตร)	0.121	7.783	7.627	-

จากตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสังเคราะห์ คือพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน พบว่าพื้นที่ผิวของกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีค่าเท่ากับ 0.049 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.013 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 0.121 นาโนเมตร ส่วนกากโซดาไลต์พื้นที่ผิวมีค่า 109.64 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.213 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 7.782 นาโนเมตร และซีโอไลต์เอพื้นที่ผิวมีค่า 28.59 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรรูพรุน 0.054 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดรูพรุน 7.626 นาโนเมตร ทั้งนี้พบว่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอทางการค้า มีค่าสูงกว่าซีโอไลต์เอเท่ากับ 4 เท่า และ 2.5 เท่า ตามลำดับ แสดงว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอทางการค้า มีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าซีโอไลต์เอ ขณะที่ขนาดรูพรุนของกากโซดาไลต์มีค่าใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอ จากผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ พบว่ามีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว โดยพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่เพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นเพราะการถูกกระตุ้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดการย่อยของกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ซึ่งทำให้เกิดรูพรุนขึ้นที่ผิวของซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว และทำให้เกิดโครงสร้างเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งจะไปเพิ่มพื้นที่ผิวและทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซับได้ดีขึ้น โดยโครงสร้างของซีโอไลต์มี



ลักษณะเป็นโครงร่าง 3 มิติ หน่วยย่อยของซีโอไลต์ประกอบด้วยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) หนึ่งอะตอม และออกซิเจนสี่อะตอม สร้างพันธะกันเป็นรูปสามเหลี่ยมสี่หน้า (tetrahedral) โดยอะตอมของซิลิกอน (หรืออะลูมิเนียม) อยู่ตรงกลางล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มุมทั้งสี่ ซึ่งโครงสร้างสามเหลี่ยมสี่หน้านี้จะเชื่อมต่อกันที่มุม (ใช้ออกซิเจนร่วมกัน) ก่อให้เกิดเป็นโครงร่างที่ใหญ่ขึ้นและเกิดเป็นช่องว่างระหว่างโมเลกุล ทำให้ซีโอไลต์เป็นผลึกแข็งมีรูพรุนและช่องว่างหรือโพรงที่ต่อเชื่อมกันอย่างเป็นระเบียบในสามมิติขนาดตั้งแต่ 2-10 อังสตรอม (Szostak, 1989)

เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Hiroaki และ Sridhar (2009) ซึ่งศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัล โดยนำแคลเซียมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง มาสังเคราะห์ซีโอไลต์เอโดยปรับอัตราส่วนต่อโมลเป็นดังนี้ สัดส่วนโมลของซิลิกอนออกไซด์ต่อโมลของอะลูมิเนียมออกไซด์ เท่ากับ 2 สัดส่วนโมลของน้ำต่อโมลของโซเดียมออกไซด์ เท่ากับ 40 และสัดส่วนโมลของโซเดียมออกไซด์ต่อโมลของซิลิกอนออกไซด์ เท่ากับ 2.7 จากนั้นนำแคลเซียม สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมอะลูมิเนตและน้ำดีไอออนในเซชันมาผสมตามอัตราส่วนให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อนำซีโอไลต์เอมาทดสอบปรากฏว่าซีโอไลต์เอ มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 171 ตารางเมตรต่อกรัม พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจากแคลเซียมที่ผ่านการเผาแต่มีค่าลดลงจากแคลเซียมที่ละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 นอร์มัล ที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแคลเซียมที่ผ่านการเผามีพื้นที่ผิวเท่ากับ 159 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนประมาณ 3.9 นาโนเมตร ส่วนแคลเซียมในขั้นตอนการละลาย พบว่ามีพื้นที่ผิวเท่ากับ 486 ตารางเมตรต่อกรัม และมีขนาดรูพรุนประมาณ 5-20 นาโนเมตร เนื่องจากโครงร่างส่วนใหญ่เป็นมิโซพอร์ ทำให้มีพื้นที่ผิวมากกว่า จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมที่มีรูพรุน จะมีพื้นที่ผิวสูง เมื่อละลายด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นการละลายซิลิกาในแคลเซียม และจากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของซีโอไลต์เอทางการค้ากับซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ขึ้น พบว่าซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์มีพื้นที่ผิวมากกว่า เนื่องจากโมเลกุลของไนโตรเจนที่แทนที่พื้นที่ผิว ซึ่งมีขนาดโมเลกุลเท่ากับ 0.375-0.378 นาโนเมตรไม่สามารถเข้าไปแทนที่ในซีโอไลต์เอได้ เนื่องจากมีรูพรุนเล็กกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวน้อยกว่า

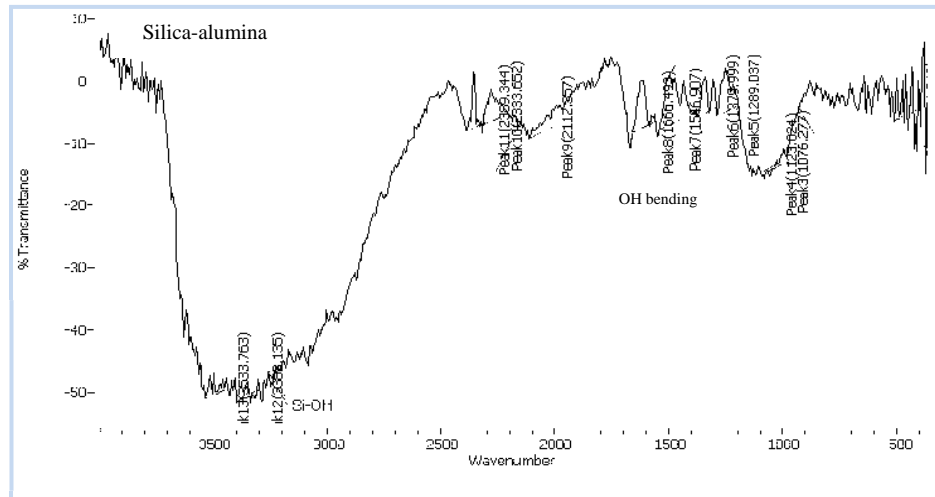
#### 4.1.4 หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวของตัวกลาง

จากการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR) ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3 และภาพที่ 4.8-4.10 ซึ่งจากการวิเคราะห์ที่ได้จะเห็นได้ว่า IR สเปกตรัมของกาก

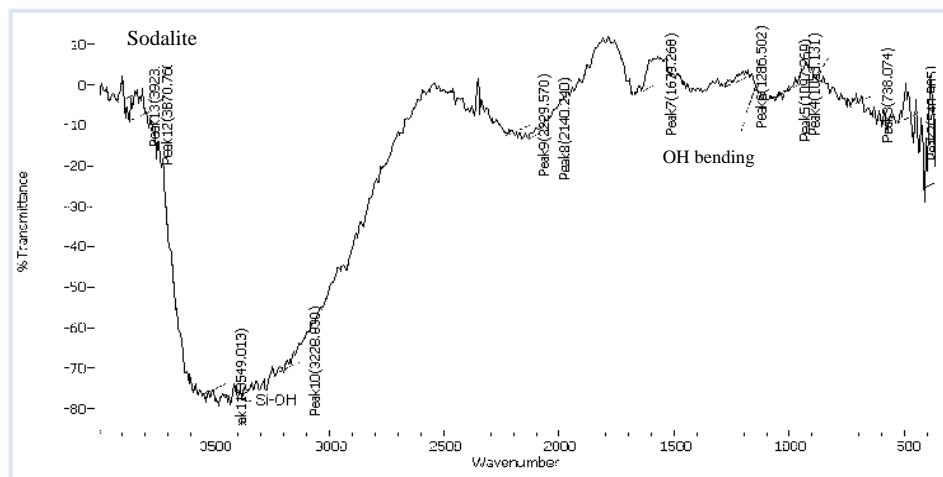
ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ มีแถบที่แสดงลักษณะเฉพาะ เช่น ในกรณี กากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ปรากฏแถบที่ความยาวคลื่นประมาณ 1650-1690  $\text{cm}^{-1}$  (พันธะไฮโดรเจนใน OH-bending) และที่ช่วงความยาวคลื่นประมาณ 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$  (พันธะไฮโดรเจนใน SiO-H, แถบกว้าง) อนึ่งสเปกตรัมของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอได้ให้ผลในการทำงานของตัวเองกัน ซึ่งผลการวิเคราะห์ลักษณะกราฟและช่วงความยาวคลื่นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussaro (2007) โดยทำการทดสอบหาหมู่ฟังก์ชันของซีโอไลต์เอสังเคราะห์จากกากอะลูมินา โดยสังเคราะห์ซีโอไลต์เอที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่า IR สเปกตรัมของซีโอไลต์เอ ปรากฏแถบที่ความยาวคลื่นประมาณ 447  $\text{cm}^{-1}$  (Si-O-Si bending), 595  $\text{cm}^{-1}$  (double ring), 711  $\text{cm}^{-1}$  (Symmetric Si-O stretching), 1007  $\text{cm}^{-1}$  (Asymmetric Si-O stretching), 1652  $\text{cm}^{-1}$  (OH bending) และ 3434  $\text{cm}^{-1}$  (OH stretching) ซึ่งแถบที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของซีโอไลต์เอ เป็นการแสดงโครงสร้างภายนอกและภายใน การทดลองในขั้นตอนนี้ จะพิจารณาคุณลักษณะพีคของช่วงความยาวคลื่นที่เป็นกลุ่มซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกัน โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงเป็นตัวเทียบแทนค่าความเข้มข้น แต่การวิเคราะห์นี้เป็นเพียงการศึกษาลักษณะของพีค ยังไม่สามารถบอกเป็นปริมาณความเข้มข้นได้ว่ามากน้อยเท่าไร

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของกากซิลิกา-อะลูมินา กากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอ

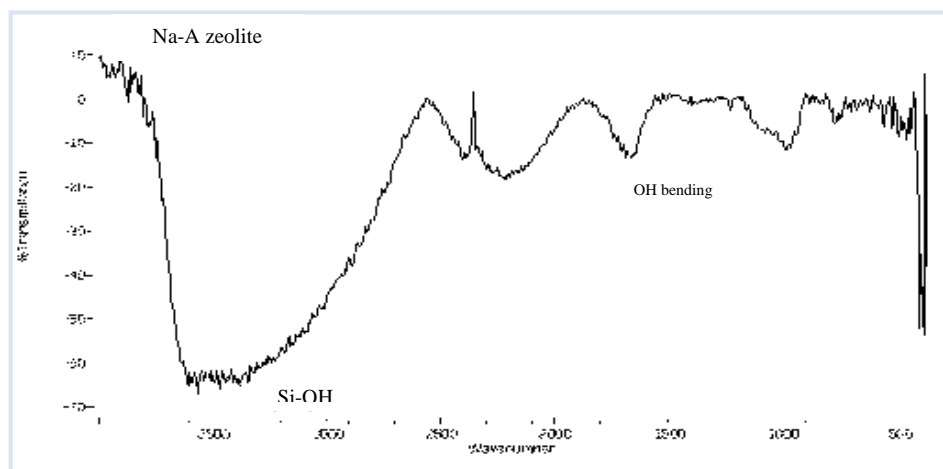
กากซิลิกา-อะลูมินา		กากโซดาไลต์		ซีโอไลต์เอ		
ค่าความยาวคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่	ค่าความยาวคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่	ค่าความยาวคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ )	หมู่	อ้างอิง
1666.439	OH-bending	1679.268	OH-bending	1692.00	OH-bending	Hussaro, 2007
3388.135	Si-OH	3549.013	Si-OH	3545.00	Si-OH	Hussaro, 2007



ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์กากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วด้วยเครื่อง FTIR



ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์กากโซดาไลต์ด้วยเครื่อง FTIR



ภาพที่ 4.10 ผลการวิเคราะห์ซีโอไลต์แอดด้วยเครื่อง FTIR

จากภาพที่ 4.8 ถึง 4.10 จะเห็นได้ว่ามีหมู่ Si-OH ซึ่งได้มาจากกาทซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เพราะจากการหาค่าองค์ประกอบของกาทซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว พบว่ามี Si เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย ส่วนหมู่ OH bending ได้มาจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เนื่องจากเป็นองค์ประกอบหลักในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ และจากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของกาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค พบว่าหมู่ฟังก์ชันไม่มีความแตกต่างกับกาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ยังไม่ผ่านการดูดซับ ซึ่งลักษณะของกราฟใกล้เคียงกันมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FTIR ที่ไม่สามารถตรวจหาพันธะของสารประกอบโลหะหนัก ซึ่งเป็นรูปผลึกแบบสมมาตรได้ (ณัฐ ดิลกเกียรติ, 2546)

#### 4.1.5 การวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวของตัวกลาง (Surface charge density)

เป็นการนำตัวกลางมาศึกษาลักษณะของค่าประจุบนตัวกลางในช่วงพีเอชต่างๆ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก จ และสามารถคำนวณค่าประจุได้จากสมการดังนี้

$$\text{ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิว (C/m}^2\text{)} = \frac{\{[\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}} - [\text{H}^+] + [\text{OH}^-]\} \times 96500}{w \times A}$$

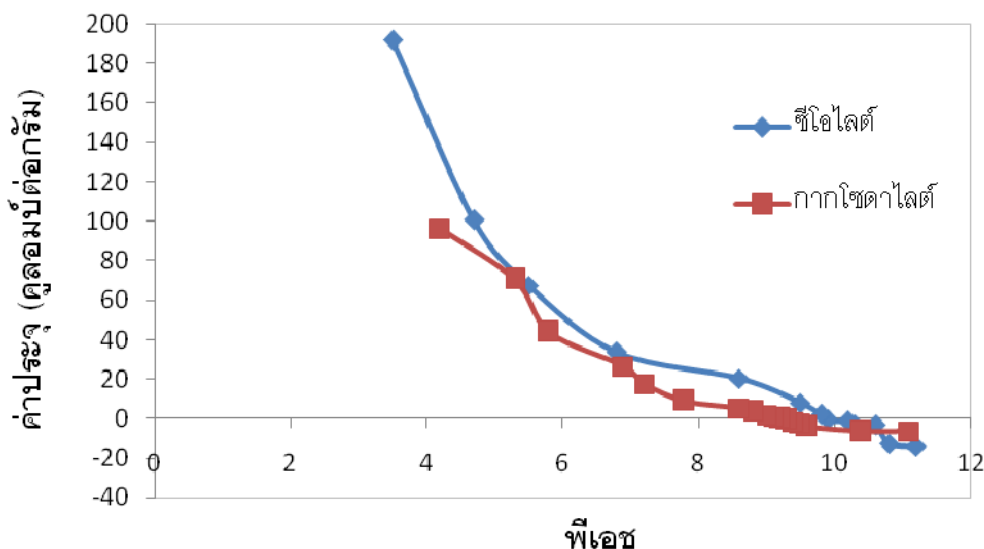
เมื่อ

$\text{C/m}^2$  = หน่วยของความหนาแน่นประจุเป็น คูลอมบ์ต่อตารางเมตร

w = น้ำหนักของตัวกลาง (กรัม)

A = พื้นที่ผิวของตัวกลาง (ตารางเมตรต่อกรัม)

จากผลการวิเคราะห์หาลักษณะประจุบนพื้นผิวของกาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ พบว่ากาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีค่า  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  เท่ากับ 9.0 และ 9.8 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.11 โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเท่ากับ 1.84 และ 2.13 คูลอมบ์ต่อกรัม ตามลำดับ รายละเอียดในภาคผนวก ข ซึ่งจะส่งผลต่อประจุบนพื้นผิวของตัวกลาง จากผลการทดลอง พบว่าทั้งกาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีลักษณะประจุเป็นบวกที่พีเอช 3 ถึง 7 แสดงดังตารางที่ 4.4 ดังนั้นหากนำกาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอไปทำการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก มีความเป็นไปได้ว่ากาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอจะเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบวกกับโลหะหนัก กาทโซดาไลต์และซีโอไลต์เอจึงสามารถกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ได้



ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นของประจุที่ค่าพีเอชต่างๆ

ตารางที่ 4.4 ค่า  $pH_{pzc}$  และลักษณะประจุของตัวกลางในสารละลายพีเอชต่างๆ

ตัวกลาง	$pH_{pzc}$	ประจุบนพื้นผิว				
		พีเอช 3	พีเอช 4	พีเอช 5	พีเอช 6	พีเอช 7
กากโซดาไลต์	9.0	+	+	+	+	+
ซีโอไลต์เอ	9.8	+	+	+	+	+

#### 4.2 ผลการทดลองแบบทีละเท (Batch test)

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้น พีเอช ระยะเวลาสัมผัส และทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ โดยทำการทดลองแบบทีละเท

##### 4.2.1 ผลของความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

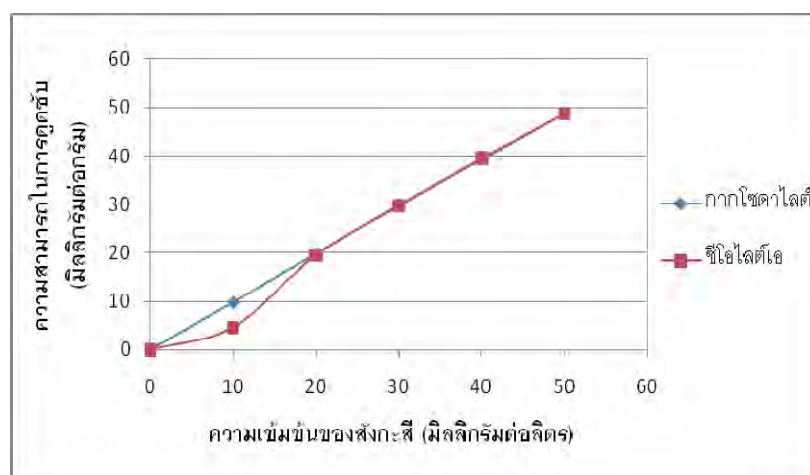
เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ของโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ดังนี้ 10, 20, 30 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้ได้เท่ากับ 5 เติมกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอปริมาณ 0.1 กรัม เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง เพื่อแยกซีโอไลต์ออก และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม จากผลการทดลอง

พบว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 และภาพที่ 4.12 ถึง 4.14

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
10	8.1	N.D.	9.8	> 98	8.8	N.D.	4.6	> 96
20	8.2	N.D.	19.8	> 99	8.7	N.D.	19.5	> 97
30	7.9	N.D.	29.9	> 99	8.2	N.D.	29.7	> 98
40	8.1	N.D.	39.3	> 98	7.9	N.D.	39.5	> 98
50	7.3	1.2	48.7	97	7.8	1.3	48.7	97

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 1 mg/l)



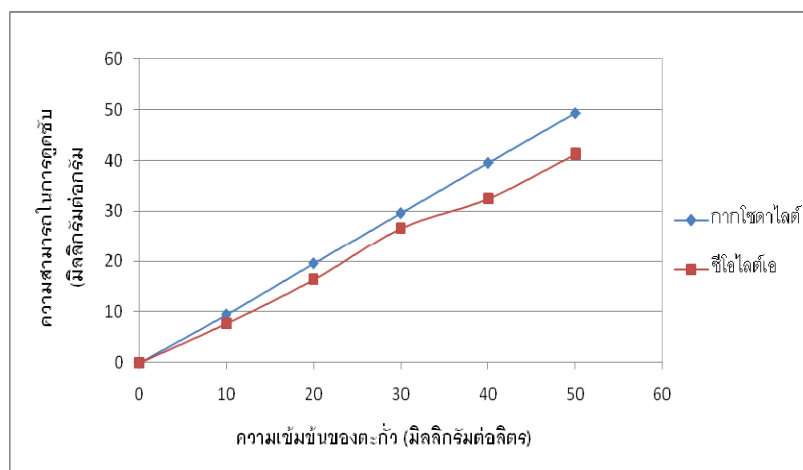
ภาพที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.12 การทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสม พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับสังกะสีเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของความเข้มข้นเริ่มต้น จะมีค่าลดลง โดยร้อยละการกำจัดสังกะสีของทั้งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีค่าลดลงจากร้อยละ 98 เหลือร้อยละ 97 เนื่องจากปริมาณตัวกลางที่ใช้ยังคงเท่าเดิม จึงมีขีดจำกัดในการดูดซับสังกะสีที่มีอยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ และจากการทดลองพบว่ากากโซดาไลต์มีความสามารถในการกำจัดสังกะสีใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nibou และคณะ (2010) โดยศึกษาผลของความเข้มข้นที่มีผลต่อการดูดซับสังกะสีด้วยซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากสารละลายอะลูมิเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (aluminium isopropoxide) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แปรค่าความเข้มข้นเป็น 10-300 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ในการดูดซับน้อยลง โดยประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีสูงสุดอยู่ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 95 แต่จากลักษณะของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม พบว่ามีความเข้มข้นสังกะสีอยู่ในช่วง 80-100 มิลลิกรัมต่อลิตร หากพิจารณาถึงลักษณะของน้ำเสีย จึงเลือกความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมเป็น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
10	9.1	N.D.	9.5	> 95	9.8	2.2	7.7	77
20	9.2	N.D.	19.6	> 98	9.7	3.5	16.4	82
30	8.5	N.D.	29.6	> 98	9.6	3.4	26.6	88
40	8.6	N.D.	39.5	> 98	9.5	7.4	32.5	81
50	8.3	N.D.	49.3	> 98	9.2	8.7	41.3	81

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 0.8 mg/l)



ภาพที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของกากช็อคโกแลตและซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

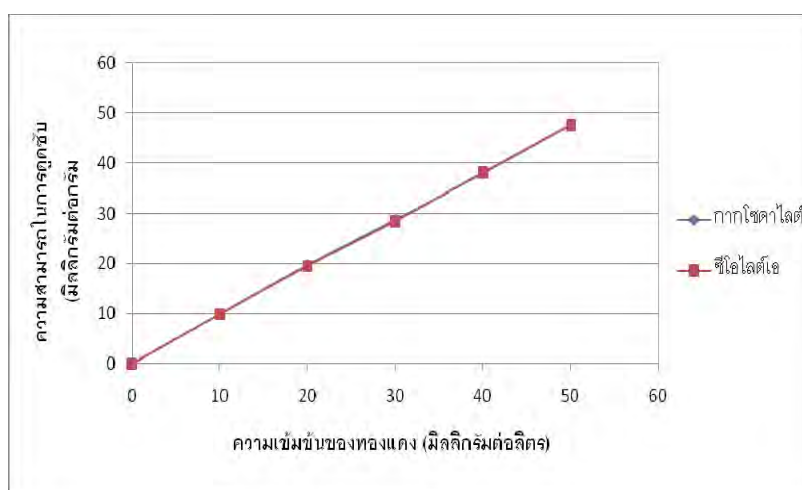
จากตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.13 การทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสม พบว่า เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของกากช็อคโกแลตและซีโอไลต์เอ เมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของความเข้มข้นเริ่มต้น จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจนคงที่ โดยร้อยละการกำจัดตะกั่วของกากช็อคโกแลตมีค่ามากกว่าร้อยละ 98 ส่วนร้อยละการกำจัดตะกั่วของซีโอไลต์เอมีค่าเท่ากับร้อยละ 88 ซึ่งกากช็อคโกแลตมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าซีโอไลต์เอ โดยในงานวิจัยของ Ibrahim และคณะ (2010) ได้ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วด้วยซีโอไลต์เอสังเคราะห์จากดินขาวในประเทศอียิปต์ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง โดยแปรค่าความเข้มข้นของตะกั่วเป็น 100-400 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น โดยกลไกการกำจัดโลหะหนักเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และการดูดซับ ซึ่งในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน ไอออนของโลหะหนักจะไม่มีการเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนของซีโอไลต์เพียงอย่างเดียว แต่จะมีการแทนที่ประจุบวกของโซเดียม การแพร่ผ่านรูพรุนอย่างรวดเร็ว เมื่อไอออนของโลหะหนักมีขนาดเล็กกว่า ในงานวิจัยนี้เป็นการกำจัดไอออนโลหะหนัก โดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนในไมโครพอร์สของซีโอไลต์เอ



ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา - อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
10	8.6	N.D.	9.8	> 98	9.0	N.D.	9.8	> 98
20	8.7	N.D.	19.7	> 98	8.8	0.5	19.5	98
30	8.1	1.2	28.7	96	8.3	1.6	28.4	95
40	8.3	2.0	37.9	95	8.2	1.9	38.1	95
50	8.2	2.4	47.6	95	8.5	2.5	47.5	94

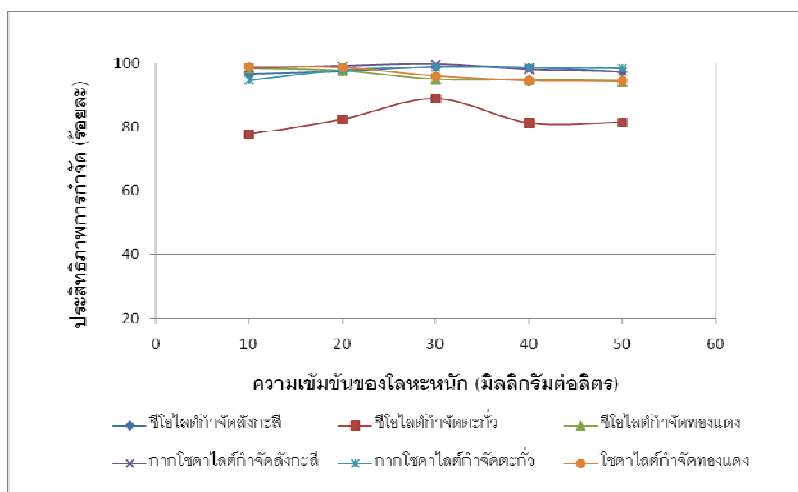
หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 0.5 mg/l)



ภาพที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.14 การทดลองหาความเข้มข้นที่เหมาะสม พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของทองแดงเพิ่มขึ้นจาก 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความสามารถในการดูดซับทองแดงเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของ

ความเข้มข้นเริ่มต้น จะมีค่าลดลง โดยร้อยละการกำจัดทองแดงของกากโซดาไลต์มีค่าลดลงจากร้อยละ 98 เหลือร้อยละ 95 ส่วนร้อยละการกำจัดทองแดงของซีโอไลต์เอมีค่าลดลงจากร้อยละ 98 เหลือร้อยละ 94 และพบว่ากากโซดาไลต์มีความสามารถในการกำจัดทองแดงได้ดีกว่าซีโอไลต์เอ ซึ่งในงานวิจัยของ Ismail และคณะ (2010) ศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดทองแดงด้วยซีโอไลต์เอสังเคราะห์จากซิลิกาฟูม (Fumed silica) และโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium aluminate) ทำการทดลองโดยแปรค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 50-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า เมื่อความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 50-300 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 300-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงจะลดลงจากร้อยละ 98 เหลือร้อยละ 20 ดังนั้นความเข้มข้นเริ่มต้นที่เหมาะสมคือที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากภาพที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ความเข้มข้นต่างๆ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอจะลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงจาก 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกากโซดาไลต์มี ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากกว่าร้อยละ 99 ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มี ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 98 ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และมี ประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมากกว่าร้อยละ 98 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน ซีโอไลต์เอ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากกว่าร้อยละ 98 ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อ ลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 88 ที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ

มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมากกว่าร้อยละ 98 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ทั้งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีได้ดีกว่าตะกั่ว และทองแดง ที่ความเข้มข้นเดียวกัน และพบว่ากากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งสังกะสี ตะกั่วและทองแดงสูงกว่าซีโอไลต์เอ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติพื้นฐานของพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ที่ได้วิเคราะห์เบื้องต้น

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ประสิทธิภาพการกำจัดของโซดาไลต์และซีโอไลต์เอจะลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอคงที่ แต่ความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออน บวกลดลง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง ซึ่งจะพบว่าในระยะแรกโลหะหนักจะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณรูพรุน ซึ่งมีอยู่บริเวณผิวของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โลหะหนักเหล่านั้นก็จะจับตัวอยู่ได้เพียงแค่ว่าบริเวณผิวของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเท่านั้น โดยมีลักษณะการจับตัวเป็นชั้นๆ ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งจับตัวกันไม่แน่นหรือไม่แข็งแรงมากนัก จึงมีโอกาสที่จะหลุดออกจากผิวของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอได้ง่าย ดังนั้นที่ความเข้มข้นต่ำๆ กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอจึงมีประสิทธิภาพในการดูดซับสังกะสีได้ดีกว่า จากงานวิจัยของ Ismail และคณะ (2010) ได้ศึกษาการกำจัดโลหะหนักแคดเมียม ตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โดยใช้ซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพในการกำจัดเป็นดังนี้  $Pb^{2+} > Cd^{3+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$  และพบว่า การกำจัด โลหะหนักเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งไอออนของโลหะหนัก แต่ชนิดมีความสามารถในการเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนได้ต่างกัน ขึ้นอยู่กับขนาดของไอออน ถ้ามีขนาดเล็กกว่า การแพร่ผ่านจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่า โดยขนาดไอออนของโลหะหนักแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ขนาดไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด

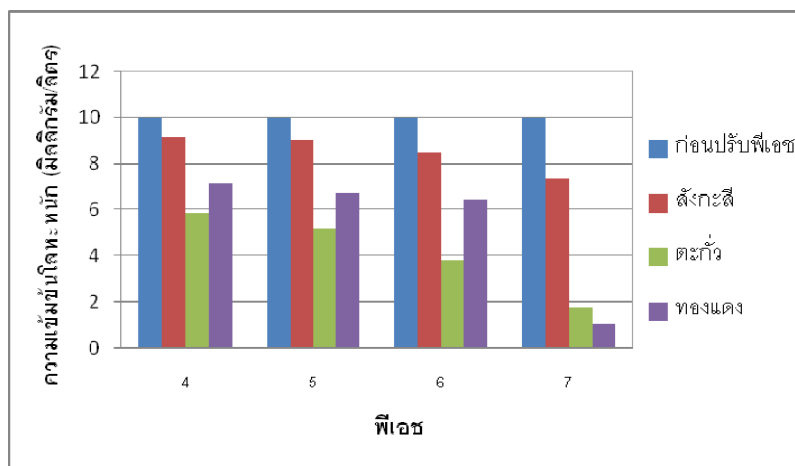
ชนิดของโลหะหนัก	ขนาดไอออนของโลหะหนัก (นาโนเมตร)
สังกะสี	0.074
ตะกั่ว	0.119
ทองแดง	0.073
แคดเมียม	0.065
นิกเกิล	0.049

#### 4.2.2 ผลของพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

จากการศึกษาของ Reed, Robertson และ Jamil (1995) อ้างถึงในจุพาทิพย์ (2547) พบว่าโลหะหนักจะมีการตกตะกอนในรูปของออกไซด์ ในช่วงพีเอช 5.5 และจะตกตะกอนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงพีเอช 12-12.5 แล้วจะกลับมาละลายใหม่ ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาถึงการดูดซับ ผู้วิจัยจึงทำการทดลองปรับค่าพีเอชต่างๆ ตั้งแต่ 4-7 แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที แล้วทำการกรองตะกอนที่เกิดขึ้นออก หลังจากนั้นจึงนำไปวัดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังการตกตะกอน เพื่อหาพีเอชที่เหมาะสมในการศึกษาถึงการดูดซับ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.16

ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าความเป็นกรดต่างที่พีเอชต่างๆ (ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

โลหะหนัก	พีเอช	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นหลังปรับพีเอช (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ตกตะกอน (ร้อยละ)
สังกะสี	4	10.0	9.177	8.23
	5	10.0	9.049	9.51
	6	10.0	8.521	14.79
	7	10.0	7.365	26.35
ตะกั่ว	4	10.0	5.849	41.51
	5	10.0	5.212	47.88
	6	10.0	3.811	61.89
	7	10.0	1.732	82.68
ทองแดง	4	10.0	7.169	28.31
	5	10.0	6.738	32.62
	6	10.0	6.453	35.47
	7	10.0	1.031	89.69



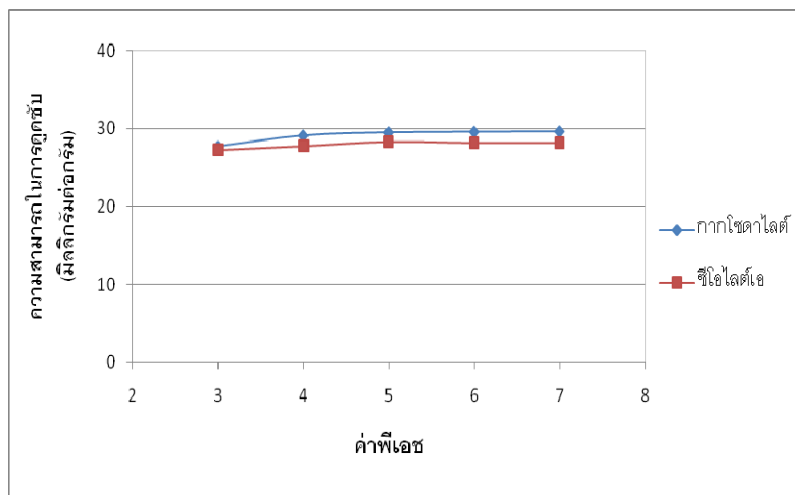
ภาพที่ 4.16 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เหลืออยู่หลังจากปรับค่าพีเอช

หลังจากนั้นจึงทำการทดลองตามแผนการทดลองต่อไป โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลอง ที่พีเอช 3-7 และทำการเติมกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วปริมาณ 0.1 กรัม และนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.10 ถึง 4.12 และภาพที่ 4.17 ถึง 4.20

ตารางที่ 4.10 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ ของกาก โซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา - อะลูมินาที่ใช้แล้ว

พีเอช เริ่มต้น	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
3	6.8	2.4	27.7	92	8.2	2.7	27.3	90
4	7.1	N.D.	29.1	> 96	8.4	2.2	27.3	91
5	7.2	N.D.	29.5	> 98	8.7	1.7	28.3	93
6	7.5	N.D.	29.6	> 98	8.8	1.8	28.2	93
7	7.6	N.D.	29.6	> 98	8.9	1.8	28.2	93

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 1.0 mg/l)



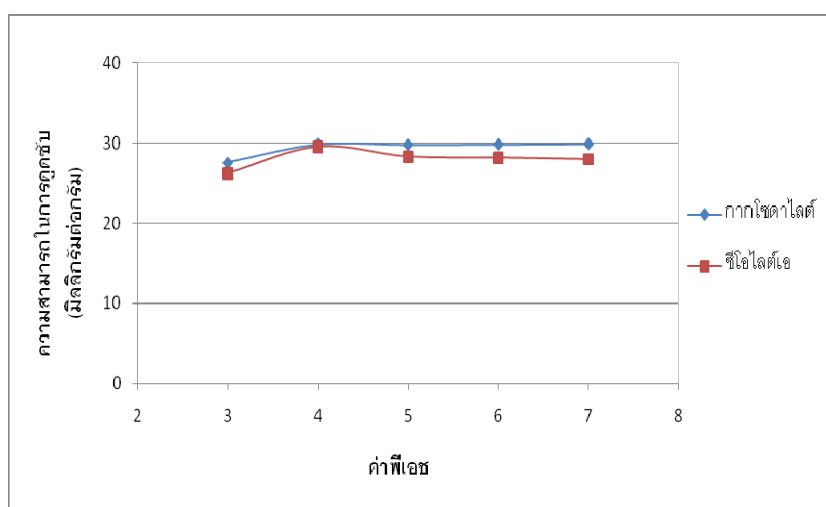
ภาพที่ 4.17 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ฟลักซ์ต่างๆ

จากตารางที่ 4.10 และภาพที่ 4.17 การทดลองหาฟลักซ์ที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ฟลักซ์ต่างๆ มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก พบว่าค่าความสามารถในการกำจัดเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามฟลักซ์ที่เพิ่มขึ้น จากฟลักซ์ 3-7 และประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของฟลักซ์เริ่มต้น จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากกว่าร้อยละ 98 ส่วนซีโอไลต์เอมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากกว่าร้อยละ 90 และพบว่ากากโซดาไลต์มีความสามารถในการกำจัดสังกะสีได้ดีกว่าซีโอไลต์เอ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Nibou และคณะ (2010) โดยศึกษาผลของฟลักซ์ที่มีต่อการกำจัดสังกะสีด้วยซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากสารละลายอะลูมิเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (aluminium isopropoxide) ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แปรค่าฟลักซ์เป็น 1-7 ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้น โดยเลือกฟลักซ์ที่เหมาะสมในการทดลองที่ฟลักซ์ 6 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะหนัก

ตารางที่ 4.11 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

พีเอชเริ่มต้น	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอชหลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอชหลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
3	4.4	2.5	27.5	90	4.8	3.8	26.19	85
4	6.7	N.D.	29.8	> 99	7.1	ND	29.54	> 98
5	7.1	N.D.	29.8	> 99	9.7	1.7	28.29	93
6	8.9	N.D.	29.8	> 99	10.1	1.8	28.16	92
7	9.8	N.D.	29.9	> 99	10.4	2.0	27.96	92

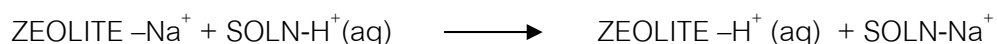
หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 0.8 mg/l)



ภาพที่ 4.18 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ

จากตารางที่ 4.11 และภาพที่ 4.18 การทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก พบว่าค่าความสามารถในการกำจัดเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น จากพีเอช 3-7 และประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของพีเอชเริ่มต้น จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพใน

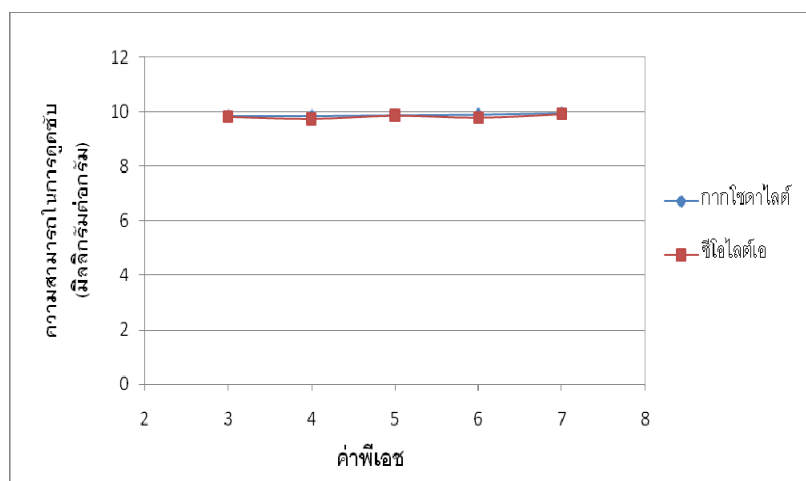
การกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 99 ส่วนซีโอไลต์เอมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเท่ากับร้อยละ 85-98 และพบว่ากากโซดาไลต์มีความสามารถในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าซีโอไลต์เอ ซึ่งผลการทดลองเป็นไปตามงานวิจัยของ Picher และคณะ (2004) โดยศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดตะกั่วด้วยซีโอไลต์ โดยพบว่าค่าพีเอชหลังจากมีการสัมผัสกับซีโอไลต์ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 8.5-9.0 (จากน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช 3.2 และน้ำเสียจริงที่พีเอช 7.1) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของซีโอไลต์และความเข้มข้นของโปรตอนด้วย เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนไอออนของไฮโดรเจน ดังสมการต่อไปนี้



ตารางที่ 4.12 ความสามารถในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอชต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

พีเอชเริ่มต้น	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอชหลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอชหลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
3	8.8	N.D.	9.9	> 98	8.7	N.D.	9.8	> 97
4	8.9	N.D.	9.9	> 98	9.0	N.D.	9.7	> 97
5	8.9	N.D.	9.9	> 98	9.6	N.D.	9.9	> 98
6	9.0	N.D.	9.9	> 98	9.7	N.D.	9.8	> 98
7	9.3	N.D.	9.9	> 99	10.0	N.D.	9.9	> 99

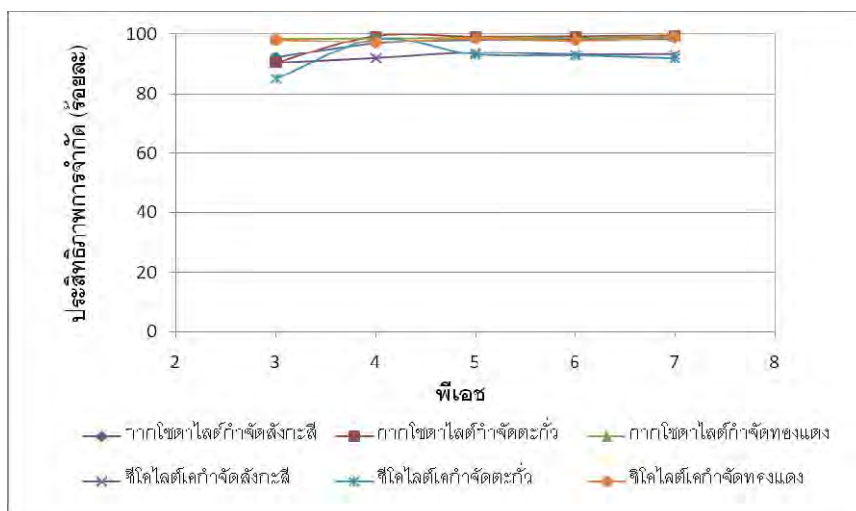
หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detect (Detection Limit = 0.5 mg/l)



ภาพที่ 4.19 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ



จากตารางที่ 4.12 และภาพที่ 4.19 การทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ กัน มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันมากนัก พบว่าค่าความสามารถในการกำจัดเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น จากพีเอช 3-7 และประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของพีเอชเริ่มต้น จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยกากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมากกว่าร้อยละ 98 ส่วนซีโอไลต์เอมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงเท่ากับร้อยละ 97-99 และพบว่ากากโซดาไลต์มีความสามารถในการกำจัดทองแดงใกล้เคียงกับซีโอไลต์เอ โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail และคณะ (2010) ได้ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดทองแดง แปรค่าพีเอชเป็น 2-8 เพื่อทดสอบความสามารถในการแลกเปลี่ยนของซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นในช่วง 2-4 และประสิทธิภาพการกำจัดทองแดงมีค่าคงที่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 4-8 ดังนั้นพีเอชที่เหมาะสมที่สุดคือพีเอช 4 โดยมีร้อยละการกำจัดมากกว่า 90



ภาพที่ 4.20 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ

จากภาพที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่พีเอชต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงของโซดาไลต์และซีโอไลต์เอจะเพิ่มขึ้น เมื่อปรับพีเอชให้สูงขึ้น โดยกากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากกว่าร้อยละ 98 ที่พีเอช 7 มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 99 ที่พีเอช 7 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมากกว่าร้อยละ 99 ที่พีเอช 7 ส่วนซีโอไลต์เอมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากกว่าร้อยละ 93 ที่พีเอช 5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมากกว่าร้อยละ 98 ที่พีเอช 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัด

ทองแดงมากกว่าร้อยละ 98 ที่พีเอช 5 นอกจากนี้ทั้งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้ดีกว่าทองแดงและสังกะสี ที่พีเอชค่าเดียวกัน และพบว่ากากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งสังกะสี ตะกั่วและทองแดงสูงกว่าซีโอไลต์เอ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติพื้นฐานของพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุน ที่ได้วิเคราะห์เบื้องต้น

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามลำดับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้น และพบว่าค่าพีเอชหลังจากที่สารละลายสัมผัสกับกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอนั้นจะสูงขึ้นไปเป็นพีเอชที่เกิดการตกตะกอน ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอในน้ำเสียสังเคราะห์จึงเกิดขึ้นโดยกระบวนการดูดซับควบคู่ไปกับกระบวนการตกตะกอน เมื่อส่วนผสมระหว่างน้ำเสียบกกับกากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอ มีค่าพีเอชในระดับที่เกิดการตกตะกอนของโลหะหนัก สำหรับการดูดซับโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นตามค่าพีเอชนั้น จึงเป็นการยืนยันว่าการดูดซับขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย โดยค่าพีเอชจะมีผลต่อประจุบริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ กล่าวคือเมื่อสารประกอบออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสัมผัสกับน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลายในสารละลาย โดยไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) จากโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบสารประกอบออกไซด์ จะเคลื่อนย้ายมาสู่ออกซิเจนที่ประกอบอยู่ตรงชั้นผิวของสารประกอบออกไซด์ ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่สามารถรับและให้ไฮโดรเจนไอออนได้ ดังนั้นพีเอชของสารละลายมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักด้วยสารประกอบออกไซด์ที่มีอยู่ในกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ โดยที่การดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดูดติดอยู่ที่ผิวของสารประกอบออกไซด์ในสารละลายที่มีค่าพีเอชสูงจะถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายและเป็นจำนวนมาก ในขณะที่สารละลายที่มีพีเอชต่ำจะเกิดการดูดซับโลหะหนักบนสารประกอบออกไซด์ได้ไม่มากนัก เนื่องจากในสารละลายที่มีพีเอชต่ำจะมีไฮโดรเจนไอออนอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้โลหะหนักในรูปไอออนอิสระในสารละลายที่เป็นกรดมีความสามารถในการดูดซับของออกไซด์ได้ต่ำ เพราะไฮโดรเจนไอออนที่มีอยู่เป็นจำนวนมากไปแข่งขันกับไอออนของโลหะหนักในการดูดซับที่ผิวของสารประกอบออกไซด์ จึงมีการดูดซับโลหะหนักเกิดขึ้นได้น้อย (ชฎาภรณ์ บุญแท้, 2545)

เมื่อพิจารณาจากการตกตะกอนของสังกะสี ตะกั่วและทองแดง ดังภาพที่ 4.16 พบว่าโลหะหนักสังกะสี ตะกั่วและทองแดงจะเริ่มตกตะกอนที่พีเอชประมาณ 6 และจะตกตะกอนมากขึ้นที่พีเอชมากกว่า 7 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ในน้ำเสียสังเคราะห์จึงไม่ใช่การดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่ส่วนหนึ่งเป็นเพราะการตกตะกอนร่วมด้วย โดยร้อยละการตกตะกอนของสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ที่พีเอช 7 เท่ากับร้อยละ 26, 82, และ 89 ตามลำดับ ดังนั้นการใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงนั้น ควรพิจารณาการตกตะกอนร่วมด้วย โดยนำร้อยละการกำจัดทั้งหมด มาลบกับค่าร้อยละการ

ตกตะกอนของโลหะหนักที่ได้จากการปรับพีเอชนั้น จากการคำนวณพบว่าที่พีเอช 5 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากที่สุด โดยร้อยละการกำจัดสังกะสีของกากโซดาไลต์เท่ากับร้อยละ 87 และซีโอไลต์เอเท่ากับร้อยละ 82 ดังนั้นจึงเลือกพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ที่พีเอช 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมากที่สุด โดยร้อยละการกำจัดตะกั่วของกากโซดาไลต์เท่ากับร้อยละ 58 และซีโอไลต์เอเท่ากับร้อยละ 50 และที่พีเอช 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดทองแดงมากที่สุดเช่นกัน โดยร้อยละการกำจัดทองแดงของกากโซดาไลต์เท่ากับร้อยละ 70 และซีโอไลต์เอเท่ากับร้อยละ 68 ดังนั้นจึงเลือกพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากเป็นช่วงที่โลหะหนักทั้งสามชนิดยังตกตะกอนไม่มากนัก โดยงานวิจัยของ Purna Chandra Rao และคณะ (2006) ได้ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยตัวดูดซับทั้งสามชนิด ได้แก่ ซีโอไลต์ 4 เอ, ซีโอไลต์ 13 เอ็กซ์ และเบนโทไนท์ พบว่าการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้น และพบว่าที่พีเอชต่ำ เช่น ที่พีเอช 1 ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีจะต่ำมาก เนื่องจากมีความเป็นกรดสูงทำให้ส่งผลต่อโครงสร้างของซีโอไลต์และดิน โดยในโครงสร้างของซีโอไลต์ประกอบด้วย Si-O-Al มีความกรดอ่อนกว่า Si-O-Si และสามารถจับกับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ได้ง่ายกว่า จึงส่งผลต่อโครงสร้างของซีโอไลต์ได้ ในกรณีที่ซีโอไลต์มีส่วนของซิลิกาต่ออะลูมินาต่ำ ได้แก่ ซีโอไลต์ 4 เอ และซีโอไลต์ 13 เอ็กซ์ จะทำถูกทำลายในสภาวะที่เป็นกรดที่พีเอชต่ำกว่า 5 และจะเกิดความรุนแรงมากที่พีเอชต่ำกว่า 3 ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักจะลดลง เมื่อพีเอชลดลง โดยซีโอไลต์ทั้งสองและดินจะเสถียรภาพที่พีเอชสูงกว่า 5 ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีสูงสุดที่พีเอช 6 และ 6.5 ตามลำดับ

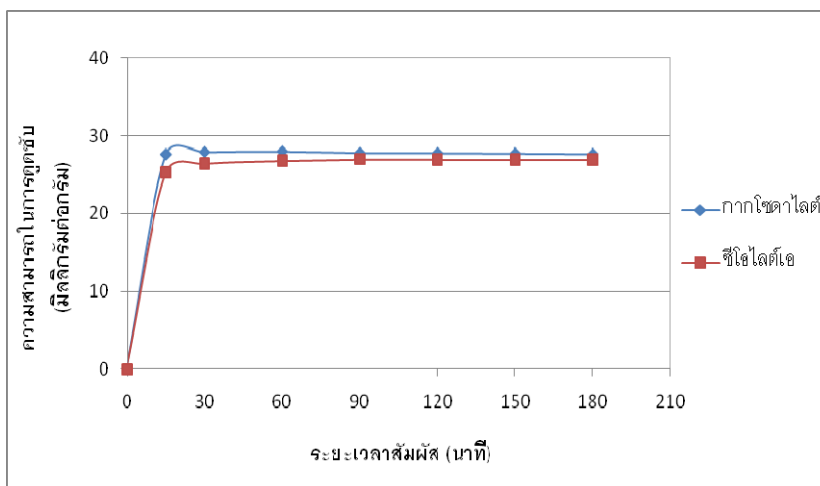
#### 4.2.3 ผลของระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นที่เหมาะสมของโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้ได้เท่ากับค่าที่ต้องการ เติมหากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอปริมาณ 0.1 กรัม เขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง เพื่อแยกซีโอไลต์ออก และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ได้ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม จากผลการทดลองพบว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ถึง 4.15 และภาพที่ 4.21 ถึง 4.24

ตารางที่ 4.13 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ระยะเวลาสัมผัส (นาท)	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอช หลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอช หลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
15	7.5	N.D.	27.6	> 98	9.3	1.7	25.3	94
30	7.5	N.D.	28.0	> 99	9.2	N.D.	26.4	> 98
60	7.4	N.D.	28.0	> 99	9.4	N.D.	26.8	> 99
90	7.3	N.D.	27.8	> 99	9.6	N.D.	27.0	> 99
120	7.4	N.D.	27.8	> 99	9.8	N.D.	27.0	> 99
150	7.6	N.D.	27.8	> 99	9.9	N.D.	27.0	> 99
180	7.7	N.D.	27.7	> 99	9.9	N.D.	27.0	> 99

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 1.0 mg/l)



ภาพที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

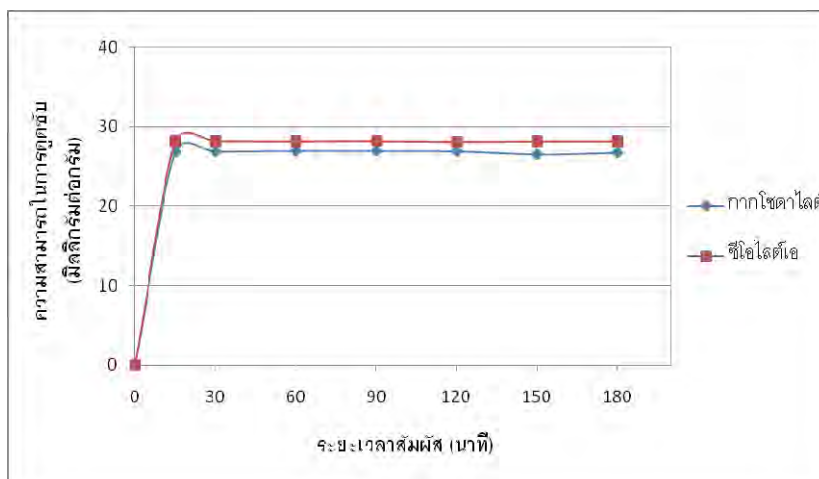
จากการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดซับสังกะสีของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.13 และภาพที่ 4.21 พบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัส

เพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการกำจัดเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงระยะเวลาสัมผัสหนึ่งจะเริ่มคงที่ โดยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีอัตราการดูดซับอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัส 15 นาที และหลังจากช่วงเวลาสัมผัส 60-180 นาที อัตราการกำจัดสังกะสีมีแนวโน้มคงที่ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของระยะเวลาสัมผัส จะมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยกากโซดาไลต์มีร้อยละการกำจัดสังกะสีมากกว่า 99 ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ส่วนซีโอไลต์เอมีร้อยละการกำจัดสังกะสีมากกว่า 98 ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และพบว่ากากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากกว่าซีโอไลต์เอ โดยงานวิจัยของ Nibou และคณะ (2010) ศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการกำจัดสังกะสีด้วยซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากสารละลายอะลูมิเนียมไอโซโพรพอกไซด์ (Aluminium isopropoxide) ทำการแปรค่าระยะเวลาสัมผัสที่ 15-180 นาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการดูดซับอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัส 30 นาที มีร้อยละการกำจัดมากกว่า 60 โดยระยะเวลาสัมผัสเริ่มคงที่เมื่อเวลา 80 นาที และเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที

ตารางที่ 4.14 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอช หลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอช หลังเขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
15	7.9	N.D.	26.88	> 98	8.3	N.D.	28.18	> 98
30	8.2	N.D.	26.92	> 98	8.9	N.D.	28.19	> 98
60	8.3	N.D.	27.01	> 99	9.3	N.D.	28.18	> 98
90	8.2	N.D.	26.99	> 99	9.3	N.D.	28.21	> 98
120	8.5	N.D.	26.96	> 99	9.3	N.D.	28.11	> 98
150	8.5	N.D.	26.57	> 97	9.2	N.D.	28.18	> 98
180	8.6	N.D.	26.78	> 98	9.1	N.D.	28.19	> 98

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 0.8 mg/l)



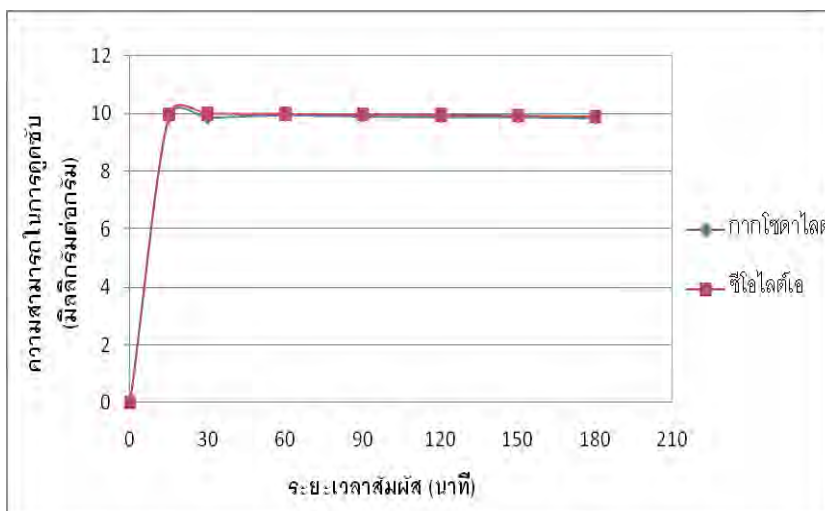
ภาพที่ 4.22 ความสามารถในการดูดซับตะกั่วของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ระยะเวลาสัมผัสด่างๆ

จากการศึกษาระยะเวลาสัมผัสดังกล่าวที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่วของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.14 และภาพที่ 4.22 พบว่าเมื่อระยะเวลาสัมผัสดเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการกำจัดเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสดที่เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงระยะเวลาสัมผัสดหนึ่งจะเริ่มคงที่ โดยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีอัตราการดูดซับอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัสด 15 นาที และหลังจากช่วงเวลาสัมผัสด 60-180 นาที อัตราการดูดซับตะกั่วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีแนวโน้มคงที่ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของระยะเวลาสัมผัสด จะมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยกากโซดาไลต์มีร้อยละการกำจัดตะกั่วมากกว่า 99 ที่ระยะเวลาสัมผัสด 60 นาที ส่วนซีโอไลต์เอมีร้อยละการกำจัดตะกั่วมากกว่า 98 ที่ระยะเวลาสัมผัสด 30 นาที และพบว่ากากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมากกว่าซีโอไลต์เอ ซึ่งในงานวิจัยของ Ismail และคณะ (2010) ศึกษาระยะเวลาสัมผัสดที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วด้วยซีโอไลต์เอสังเคราะห์จากซิลิกาฟุ้ง (Fumed silica) และโซเดียมอะลูมิเนต (Sodium aluminate) ทำการทดลองโดยที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ปรับพีเอชเป็น 7.5 ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และแปรค่าระยะเวลาสัมผัสดเป็น 5, 10, 20, 30, 60, 120 นาที จนถึง 24 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาสัมผัสดเพิ่มขึ้น จนถึงระยะเวลาสัมผัสดที่ 30 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วเริ่มคงที่ และประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วหลังจากเวลาสัมผัสดที่ 24 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้นเพียง 0.05-0.1 จากระยะเวลาสัมผัสดที่ 120 นาที เนื่องจากในระยะเวลาแรกของการดูดซับจำนวนของที่ว่างที่พื้นผิวของซีโอไลต์ยังว่างอยู่ จึงสามารถดูดซับตะกั่วได้ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปจำนวนพื้นที่ผิวที่สามารถดูดซับตะกั่วได้นั้นลดลง ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วลดลง

ตารางที่ 4.15 ความสามารถในการดูดซับทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว

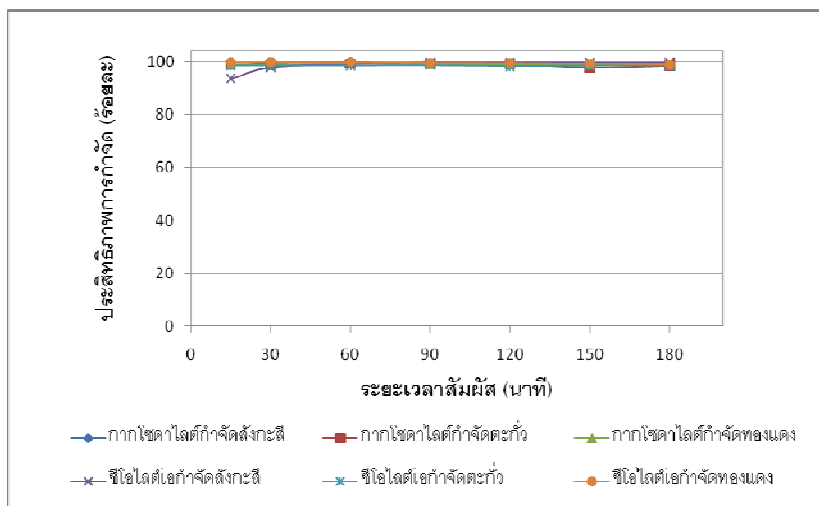
ระยะเวลาสัมผัส (นาที)	กากโซดาไลต์				ซีโอไลต์เอ			
	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด	พีเอช หลัง เขย่า	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)	ร้อยละการกำจัด
15	8.8	N.D.	9.8	> 98	8.3	N.D.	9.9	> 99
30	8.9	N.D.	9.9	> 98	8.5	N.D.	9.9	> 99
60	9.2	N.D.	9.9	> 99	8.6	N.D.	9.9	> 99
90	9.5	N.D.	9.9	> 99	8.7	N.D.	9.9	> 99
120	9.6	N.D.	9.9	> 99	8.7	N.D.	9.9	> 99
150	9.6	N.D.	9.9	> 99	8.8	N.D.	9.9	> 99
180	9.3	N.D.	9.8	> 98	8.9	N.D.	9.8	> 98

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 0.5 mg/l)



ภาพที่ 4.23 ความสามารถในการดูดซับทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสต่างๆ

จากการศึกษาระยะเวลาสัมผัสน้ำที่มีผลต่อการดูดซับของแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอในน้ำเสียสังเคราะห์ แสดงดังตารางที่ 4.15 และภาพที่ 4.23 พบว่าพบว่ามีระยะเวลาสัมผัสน้ำเพิ่มขึ้น ค่าความสามารถในการกำจัดเป็นมิลลิกรัมต่อกรัมตัวกลางจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาสัมผัสน้ำที่เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงระยะเวลาสัมผัสน้ำหนึ่งจะเริ่มคงที่ โดยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีอัตราการดูดซับอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัสน้ำ 15 นาที และหลังจากช่วงเวลาสัมผัสน้ำ 60-180 นาที อัตราการดูดซับของแดงเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและมีแนวโน้มเริ่มคงที่ขึ้นเรื่อยๆ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดเมื่อคิดเทียบประสิทธิภาพเป็นร้อยละของระยะเวลาสัมผัสน้ำ จะมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยกากโซดาไลต์มีร้อยละการกำจัดของแดงมากกว่า 99 ที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำ 60 นาที ส่วนซีโอไลต์เอมีร้อยละการกำจัดของแดงมากกว่า 99 ที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำ 30 นาที โดยกากโซดาไลต์มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแดงมากกว่าซีโอไลต์เอ และพบว่าค่าพีเอชจะสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาสัมผัสน้ำนานขึ้นเช่นเดียวกับการกำจัดสังกะสีและตะกั่ว ซึ่งจากการทดลองพบว่าเวลา 60 นาทีเพียงพอสำหรับการเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับ ในการศึกษาการดูดซับสังกะสี ตะกั่วและของแดงของกากโซดาไลต์ ส่วนซีโอไลต์เอระยะเวลาสัมผัสน้ำ 30 นาที เพียงพอสำหรับการเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดซับ ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำต่างๆ ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำต่างๆ

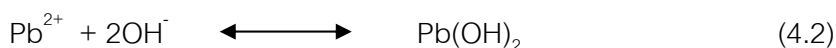
จากภาพที่ 4.24 พบว่าเมื่อใส่กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีสังกะสี ตะกั่วและของแดงละลายอยู่ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสังกะสี ตะกั่วและของแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสีย



ดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการสัมผัสกับกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ และค่อยๆ ซ้ำลงเมื่อเวลาการสัมผัสเพิ่มขึ้น และมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างคงที่ในที่สุด จะเห็นได้จากกราฟ ร้อยละการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีความชันในช่วงแรกขของระยะเวลาสัมผัส และในช่วง หลังจะมีความชันลดลงเรื่อยๆ จนมีลักษณะเป็นเส้นค่อนข้างสม่ำเสมอในที่สุด ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุกันระหว่างประจุของโซเดียมกับประจุของโลหะหนัก และอาจมีปริมาณสูงขึ้นในบางเวลา โดยอาจเกิดจากการผันกลับของการดูดซับเกิดขึ้นด้วย (จุฑาทิพย์ เพชรอินทร์, 2547)

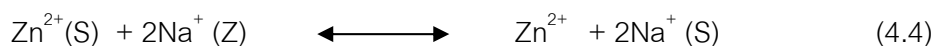
เมื่อเติมกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอลงไปในสารละลายสังกะสี ตะกั่วและทองแดง ในช่วงแรกจะทำให้พีเอชของสารละลายโลหะหนัก เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเทียบกับพีเอชของ สารละลายก่อนเติมกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ โดยพีเอชที่เปลี่ยนไปจะอยู่ในช่วงพีเอช 8-9 ทั้งนี้เนื่องมาจากกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ประกอบไปด้วยซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ประกอบกันเป็นผลึกของโลหะอัลคาไลด์หรืออัลคาไลด์เอิร์ท ซึ่งมี คุณสมบัติเป็นด่างเมื่อใส่ลงในสารละลาย จึงทำให้พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง พีเอช 8-9

จากการเตรียมสารละลายสังกะสี ตะกั่วและทองแดง โลหะหนักทั้งสามชนิดจะอยู่ ในรูปของสังกะสีไอออน ตะกั่วไอออน และทองแดงไอออน ให้ค่าพีเอชในสารละลายประมาณ 2-3 จากนั้นจะนำสารละลายโลหะหนักไปปรับพีเอชเท่ากับ 4-5 เพื่อนำมาใช้ในการทดลอง เนื่องจาก เป็นพีเอชที่เหมาะสม โดยให้ค่าร้อยละการกำจัดได้ดีที่สุด ซึ่งโดยปกติแล้วซีโอไลต์เอสามารถ สลายตัวในสารละลายกรดที่พีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3 (บงกช พิภูษณขนาดทนต์ และประภัตรา ศศินานนท์, 2538 อ้างถึงในจุฑาทิพย์ เพชรอินทร์, 2547) และเมื่อเติมกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ลงไปในสารละลายโลหะหนักจะทำให้พีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 8-9 ดังกล่าว ข้างต้น ทำให้โลหะหนักไอออนรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) เกิดเป็นโลหะหนักไฮดรอกไซด์ ดังสมการ 4.1-4.3 ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงพีเอชประมาณ 8-10.5 แสดงดังภาพที่ 4.25 และโลหะหนัก ไฮดรอกไซด์จะถูกดูดซับติดอยู่ที่ผิวของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

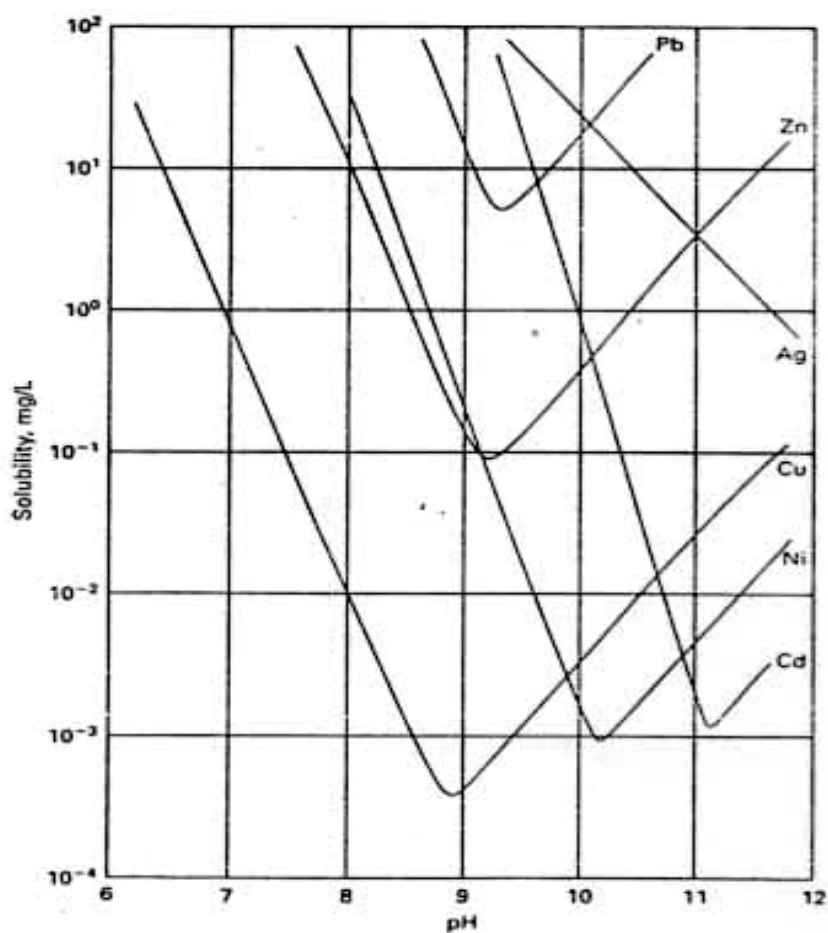


ค่าพีเอชเริ่มต้นของสารละลายสังกะสี ตะกั่วและทองแดงที่ทำกรปรับพีเอชเพื่อใช้ ในการทดลองจะมีค่าเท่ากับ 5 หลังจากทำปฏิกิริยาจนเข้าสู่สมดุลแล้วพีเอชจะมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่

ระหว่าง 8-9 ซึ่งในช่วงพีเอชนี้ จะมี  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  และ  $Cu^{2+}$  สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างประจุของไฮเดียมที่มีอยู่ในกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอกับประจุของโลหะหนักที่มีอยู่ในสารละลายได้โดยปฏิกิริยาการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างโลหะหนัก และไฮเดียม ได้ดังสมการที่ 4.4 ถึง 4.6



โดยที่ (S) และ (Z) คือ ประจุในสารละลายและประจุในซีโอไลต์เอ ตามลำดับ



ภาพที่ 4.25 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์ที่พีเอชต่างๆ

(Bishop และคณะ, 1992)

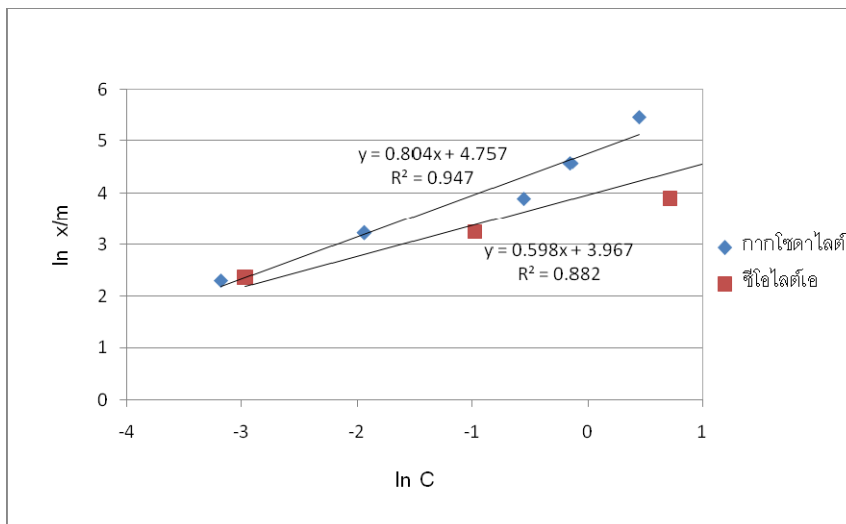
#### 4.2.4 ผลไอโซโทมการดูดซับโลหะหนัก

ในการทดลองนี้เป็นการทดลองแบบที่ละเท โดยใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นที่เหมาะสมจากการทดลองของสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ปรับพีเอชตามที่ต้องการ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมปริมาณกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเท่ากับ 0.01, 0.025, 0.05, 0.10 และ 0.25 กรัม เขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่เหมาะสมจากการทดลอง โดยซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว ใช้เวลาเขย่า 30 นาที ส่วนกากโซดาไลต์ใช้เวลาเขย่า 60 นาที จากนั้นแยกน้ำตัวอย่างโดยการกรอง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.16 ถึง 4.19 และภาพที่ 4.26 ถึง 4.31

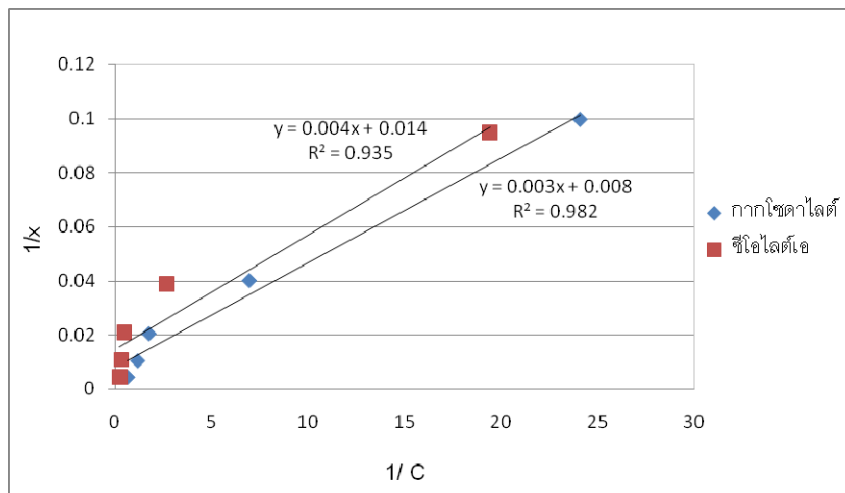
ตารางที่ 4.16 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

ชนิดตัวดูดซับ	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	x/m (มก./ก.)	ln C	ln x/m	1/C	1/X	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
กากโซดาไลต์	0.01	1.0	242.0	-0.06	5.49	1.065	0.004	96
	0.025	N.D.	97.93	-0.41	4.58	1.514	0.010	> 97
	0.05	N.D.	50.09	-2.34	3.91	10.36	0.019	> 99
	0.10	N.D.	25.10	-3.12	3.22	22.72	0.039	> 99
	0.25	N.D.	10.05	-4.46	2.31	86.96	0.099	> 99
ซีโอไลต์เอ	0.01	4.2	221.3	1.42	5.39	0.241	0.004	84
	0.025	2.9	93.19	1.09	4.53	0.334	0.010	89
	0.05	2.0	48.51	0.70	3.88	0.493	0.020	92
	0.10	N.D.	25.91	-0.98	3.25	2.678	0.038	> 98
	0.25	N.D.	10.49	-2.97	2.35	19.41	0.095	> 99

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 1.0 mg/l)



ภาพที่ 4.26 ไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีแบบฟรอนดลิชของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ



ภาพที่ 4.27 ไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

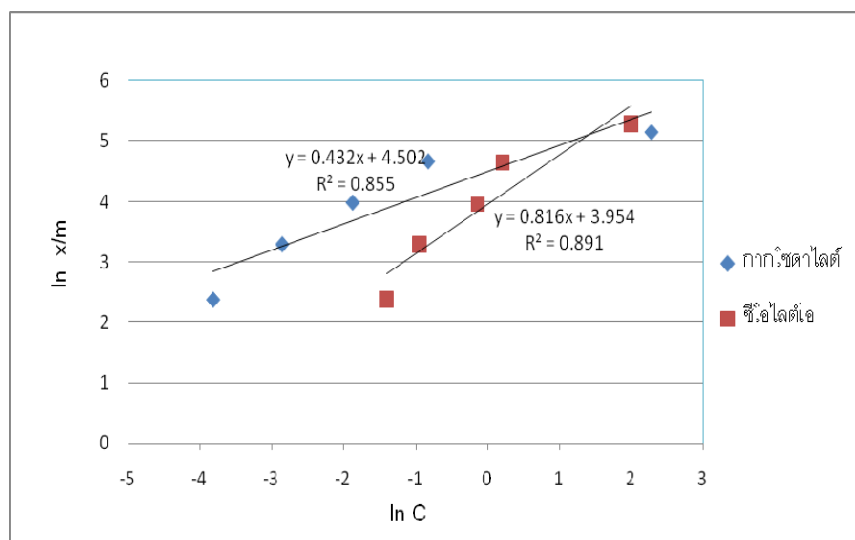
จากภาพที่ 4.26 และ 4.27 กราฟไอโซเทอมการดูดซับสังกะสีแบบฟรอนดลิชและแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ สามารถคำนวณหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ซึ่งสมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับสังกะสี ได้แก่ สมการแบบแลงเมียร์ และสมการแบบฟรอนดลิช เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหา  $R^2$  ของแต่ละสมการ พบว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์มากกว่าฟรอนดลิช เนื่องจากมีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.9 แสดงว่าการดูดซับของสังกะสีบนกากโซดาไลต์เป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ส่วนค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรอนดลิช แสดงดังในตารางที่ 4.20

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $X_{max}$ ) ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ซึ่งพบว่ากากโซดาไลต์ 1 กรัม สามารถกำจัดสังกะสีสูงสุดได้เท่ากับ 306.12 มิลลิกรัม ส่วนซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดสังกะสีสูงสุดได้เท่ากับ 223.88 มิลลิกรัม ซึ่งจะเห็นว่าตัวดูดซับในปริมาณที่เท่ากัน คือ 0.1 กรัม กากโซดาไลต์มีความสามารถในการดูดซับสังกะสีได้มากกว่าซีโอไลต์เอ

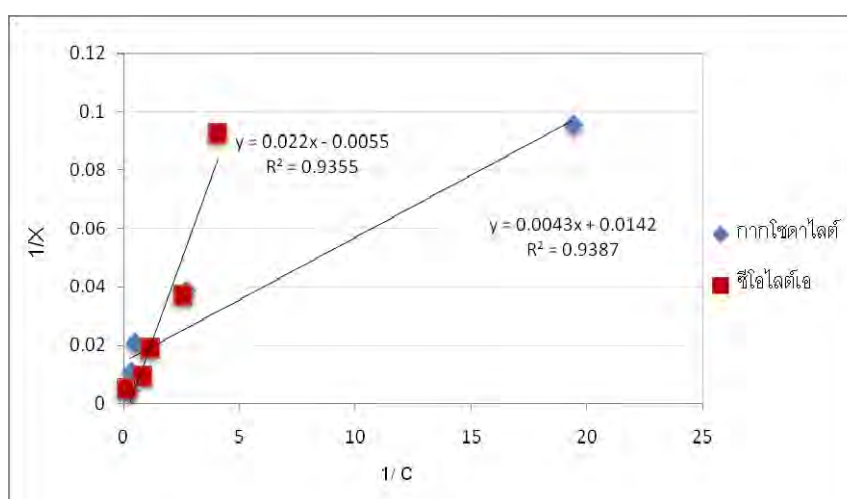
ตารางที่ 4.17 ปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

ชนิดตัวดูดซับ	ปริมาณ ถั่ว ดูดซับ (กรัม)	ความ เข้มข้น ที่เหลือ (มก./ล.)	x/m (มก./ก.)	ln C	ln x/m	1/C	1/X	ประสิทธิภาพ การกำจัด (ร้อยละ)
กาก โซดา ไลต์	0.01	9.8	171.0	2.28	5.14	0.102	0.006	63
	0.025	N.D.	105.7	-0.82	4.66	2.283	0.009	> 98
	0.05	N.D.	53.46	-1.88	3.98	6.536	0.019	> 99
	0.10	N.D.	26.83	-2.86	3.29	17.39	0.037	> 99
	0.25	N.D.	10.75	-3.82	2.37	45.45	0.093	> 99
ซีโอไลต์ เอ	0.01	6.4	207.9	1.85	5.34	0.156	0.005	76
	0.025	1.2	103.8	0.21	4.64	0.807	0.009	95
	0.05	0.9	52.64	-0.12	3.96	1.135	0.019	97
	0.10	N.D.	26.81	-0.94	3.29	2.567	0.037	> 98
	0.25	N.D.	10.78	-1.40	2.38	4.065	0.093	> 99

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 0.8 mg/l)



ภาพที่ 4.28 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบฟรุนดลิชของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ



ภาพที่ 4.29 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

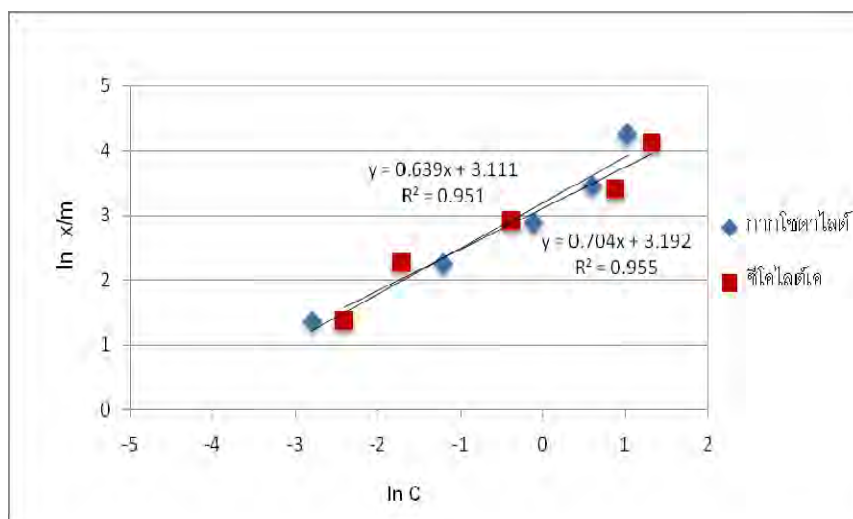
จากภาพที่ 4.28 และ 4.29 กราฟไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วแบบฟรุนดลิชและแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ สามารถคำนวณหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหา  $R^2$  ของแต่ละสมการ พบว่าค่า  $R^2$  ของสมการแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าการดูดซับของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์มากกว่าสมการแบบฟรุนดลิช และแสดงว่าการดูดซับของตะกั่วบนกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ค่าคงที่สมการแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช แสดงดังในตารางที่ 4.20

จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $X_{max}$ ) ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ซึ่งพบว่ากากโซดาไลต์ 1 กรัม สามารถกำจัดตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 223.88 มิลลิกรัม ส่วนซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดตะกั่วสูงสุดได้เท่ากับ 45.80 มิลลิกรัม ซึ่งจะเห็นว่าตัวดูดซับในปริมาณที่เท่ากัน คือ 0.1 กรัม กากโซดาไลต์มีความสามารถในการดูดซับตะกั่วได้มากกว่าซีโอไลต์เอ

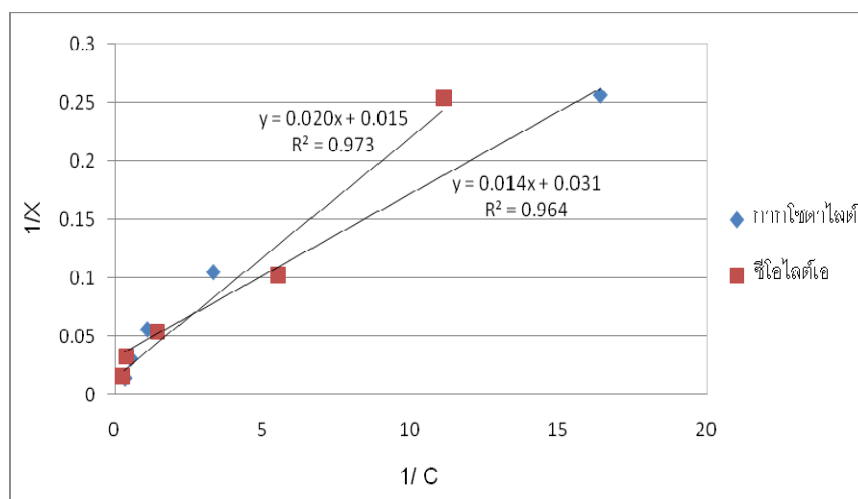
ตารางที่ 4.18 ปริมาณทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อถูกดูดซับด้วยโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

ชนิดตัวดูดซับ	ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)	ความเข้มข้นที่เหลือ (มก./ล.)	x/m (มก./ก.)	ln C	ln x/m	1/C	1/X	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
กากโซดาไลต์	0.01	2.8	70.20	1.02	4.25	0.358	0.014	71
	0.025	1.8	31.95	0.60	3.46	0.548	0.031	81
	0.05	0.9	17.83	-0.11	2.88	1.117	0.056	90
	0.10	N.D.	9.513	-1.20	2.25	3.344	0.105	> 96
	0.25	N.D.	3.900	-2.79	1.36	16.39	0.256	> 99
ซีโอไลต์เอ	0.01	3.8	61.69	1.32	4.12	0.266	0.016	62
	0.025	2.4	30.00	0.88	3.40	0.412	0.033	76
	0.05	0.9	17.99	-0.07	2.89	1.077	0.055	91
	0.1	N.D.	9.742	-1.71	2.27	5.524	0.102	> 98
	0.25	N.D.	3.933	-2.41	1.37	11.11	0.254	> 99

หมายเหตุ : N.D. เท่ากับ Not detected (Detection Limit = 0.5 mg/l)



ภาพที่ 4.30 ไอโซเทอมการดูดซับของแฉงแบบฟรูดลิชของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ



ภาพที่ 4.31 ไอโซเทอมการดูดซับของแฉงแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

จากภาพที่ 4.30 และ 4.31 กราฟไอโซเทอมการดูดซับของแฉงแบบฟรูดลิชและแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ สามารถคำนวณหาสมการที่เหมาะสมในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ซึ่งสมการที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของการดูดซับของแฉง ได้แก่ สมการแบบแลงเมียร์ และสมการแบบฟรูดลิช เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหา  $R^2$  ของแต่ละสมการ พบว่าค่า  $R^2$  ของสมการแลงเมียร์มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าการดูดซับของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์มากกว่าสมการแบบฟรูดลิช แสดงว่าการดูดซับของแฉงบนกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ส่วนค่าคงที่ของสมการแบบแลงเมียร์และฟรูดลิช แสดงดังในตารางที่ 4.20



จากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เมื่อทำการแทนค่าความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด ( $X_{max}$ ) ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ซึ่งพบว่ากากโซดาไลต์ 1 กรัม สามารถกำจัดทองแดงสูงสุดได้เท่ากับ 58.48 มิลลิกรัม ส่วนซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดทองแดงสูงสุดได้เท่ากับ 46.51 มิลลิกรัม ซึ่งจะเห็นว่าตัวดูดซับในปริมาณที่เท่ากัน คือ 0.1 กรัม กากโซดาไลต์มีความสามารถในการดูดซับทองแดงได้มากกว่าซีโอไลต์เอ

ตารางที่ 4.19 แสดงสมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแลงเมียร์ของสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง

ชนิดโลหะหนัก	ชนิดตัวดูดซับ	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช		ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	
		$\ln\left(\frac{X}{m}\right) = \left(\frac{1}{n}\right) (\log Ce) + (\ln K)$	$R^2$	$\frac{1}{X} = \frac{1}{Ce} \left(\frac{1}{bXm}\right) + \left(\frac{1}{Xm}\right)$	$R^2$
สังกะสี	กากโซดาไลต์	$y = 0.804x + 4.757$	0.947	$y = 0.003x + 0.008$	0.982
	ซีโอไลต์	$y = 0.598x + 3.967$	0.882	$y = 0.004x + 0.014$	0.935
ตะกั่ว	กากโซดาไลต์	$y = 0.432x + 4.502$	0.855	$y = 0.004x + 0.014$	0.938
	ซีโอไลต์	$y = 0.816x + 3.954$	0.891	$y = 0.022x - 0.005$	0.935
ทองแดง	กากโซดาไลต์	$y = 0.704x + 3.192$	0.955	$y = 0.014x + 0.031$	0.964
	ซีโอไลต์	$y = 0.639x + 3.111$	0.951	$y = 0.020x + 0.015$	0.973

ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ จากสมการของฟรุนดลิชและแลงเมียร์

ชนิดของโลหะหนัก	ชนิดตัวดูดซับ	สมการของฟรุนดลิช		สมการของแลงเมียร์		
		K (มก. /ก.)	1/n (ล. /ก.)	1/Xm	b	$X_{max}$ (มก. /ก.)
สังกะสี	กากโซดาไลต์	116.39	0.804	0.003	0.375	306.12
	ซีโอไลต์	52.82	0.598	0.004	0.286	223.88
ตะกั่ว	กากโซดาไลต์	90.19	0.432	0.004	0.285	223.88
	ซีโอไลต์	52.14	0.816	0.022	-4.400	45.80
ทองแดง	กากโซดาไลต์	24.33	0.704	0.014	0.451	58.48
	ซีโอไลต์	22.44	0.639	0.020	1.333	46.51

จากตารางค่าคงที่ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอในสมการของฟรอนดลิชและแลงเมียร์ พบว่ากากโซดาไลต์มีค่า  $X_{\max}$  สูงกว่าซีโอไลต์เอ ทั้งในการดูดซับสังกะสี ตะกั่วและทองแดง แสดงว่ากากโซดาไลต์มีความสามารถในการดูดซับดีกว่าซีโอไลต์เอ นอกจากนี้พบว่ากากโซดาไลต์มีค่า  $1/n$  สูงกว่าซีโอไลต์เอในการดูดซับสังกะสีและทองแดง ยกเว้นตะกั่ว แสดงว่า ค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดซับสังกะสีและทองแดงของกากโซดาไลต์ นั่นคือถ้าสารที่ถูกดูดซับมีความเข้มข้นสูง กากโซดาไลต์มีแนวโน้มในการดูดซับได้ดี และจากการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลการหาพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุนและขนาดรูพรุนของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ โดยพบว่ากากโซดาไลต์มีพื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และขนาดรูพรุนมากกว่าซีโอไลต์เอ ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงได้ดีกว่า จากงานวิจัยของ Ibrahim และคณะ (2010) ได้ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง สังกะสี และนิกเกิล ด้วยซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์สังเคราะห์จากดินขาว โดยใช้ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์และแบบฟรอนดลิชในการอธิบายกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้น เมื่อนำไปคำนวณเพื่อหา  $R^2$  ของสมการแลงเมียร์ พบว่าซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์มีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.96 แสดงว่าการดูดซับของโลหะหนักเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว โดยความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดเป็นดังนี้ ตะกั่ว > แคดเมียม > ทองแดง > สังกะสี > นิกเกิล ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของผลึกซีโอไลต์เอและซีโอไลต์เอ็กซ์ โดยซีโอไลต์เอมีขนาดเท่ากับ 4.5 อังสตรอม ส่วนซีโอไลต์เอ็กซ์เท่ากับ 7.4 อังสตรอม ดังนั้นซีโอไลต์เอ็กซ์จึงมีช่องว่างให้ออกอนของโลหะหนักผ่านได้มากกว่า และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้มากกว่า สำหรับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิช เมื่อพิจารณาว่า  $1/n$  พบว่าค่า  $1/n$  น้อยกว่า 1 ถ้าค่า  $n$  มาก จะเกิดการดูดซับได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่จะเกิดการดูดซับได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำๆ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชไม่สามารถทำนายถึงจุดอิ่มตัวของตัวดูดซับได้ ดังนั้นพื้นที่ผิวจึงสามารถดูดซับได้ไม่สิ้นสุด จึงกล่าวได้ว่าเป็นการดูดซับแบบหลายชั้น จากผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าลักษณะการดูดซับโลหะหนักสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนดลิชมากกว่าแลงเมียร์ ซึ่งเป็นการอธิบายพื้นที่การดูดซับที่แตกต่างกันของซีโอไลต์เอ็กซ์และซีโอไลต์เอ โดยลำดับความสามารถในการดูดซับของซีโอไลต์เอ็กซ์และซีโอไลต์เอ เป็นดังนี้ แคดเมียม > ตะกั่ว > ทองแดง > สังกะสี > นิกเกิล และเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเปรียบเทียบกับซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากวัตถุดิบอื่นๆ

ชนิด ตัวดูดซับ	ความสามารถในการดูดซับสูงสุด (มิลลิกรัมต่อกรัม)			งานวิจัย
	สังกะสี	ตะกั่ว	ทองแดง	
ซีโอไลต์ 4เอ ที่สังเคราะห์จาก เถ้าลอยถ่านหิน	30.80	-	50.45	Hui และคณะ (2005)
ซีโอไลต์แคนซิไนต์ที่สังเคราะห์ จากเถ้าลอย	75.45	441.31	132.25	Qiu และคณะ (2009)
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จาก อะลูมินาเนียมไฮดรอกไซด์	118.91	-	-	Nibou และคณะ (2010)
ซีโอไลต์เอ็กซ์ที่สังเคราะห์จาก อะลูมินาเนียมไฮดรอกไซด์	106.38	-	-	Nibou และคณะ (2010)
ซีโอไลต์เอ็กซ์ที่สังเคราะห์จาก ดินขาว	41.19	142.96	65.46	Ibrahim และคณะ (2010)
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากดิน ขาว	28.76	134.67	55.92	Ibrahim และคณะ (2010)
ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกาก ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	223.88	45.80	58.48	งานวิจัยนี้
โซดาไลต์ที่สังเคราะห์จากกาก ซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	306.12	223.88	46.51	งานวิจัยนี้

#### 4.3 ผลการศึกษาความสามารถการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการทดลองแบบคอลัมน์

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการใช้งานของกากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอ โดยใช้คอลัมน์แก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.8 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร บรรจุตัวกลางกากโซดาไลต์ และซีโอไลต์เอ โดยให้น้ำเสียสังเคราะห์ไหลจากด้านบนลงด้านล่าง (down flow) ด้วยเครื่องปั้มน้ำสำหรับเพิ่มความดัน ด้วยอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่พีเอช 5 สำหรับโลหะหนักสังกะสีและทองแดง ที่พีเอช 4 สำหรับตะกั่ว ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น และปริมาณตัวกลางดูดซับที่เหมาะสมจากการทดลองแบบที่ละเท ดังแสดงในตารางที่ 4.22 โดยทำการเก็บ

ตัวอย่างน้ำทุกๆ 15 นาที จนถึงจุดหมดสภาพ (Exhaustion point) คือ ความเข้มข้นที่ออกจากคอลัมน์ต่อความเข้มข้นที่เข้าคอลัมน์ (C/Co) เท่ากับ 0.95 หลังจากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งเบรคทวร์จ (Breakthrough curve) ระหว่างค่า C/Co กับค่าปริมาตรเบด (Bed volume) โดยคำนวณปริมาตรเบด ได้ตามสมการ 4.7 และปริมาตรของชั้นตัวกลางสามารถคำนวณ ได้ตามสมการ 4.8 ซึ่งค่าปริมาตรชั้นตัวกลาง ดังแสดงในตารางที่ 4.22

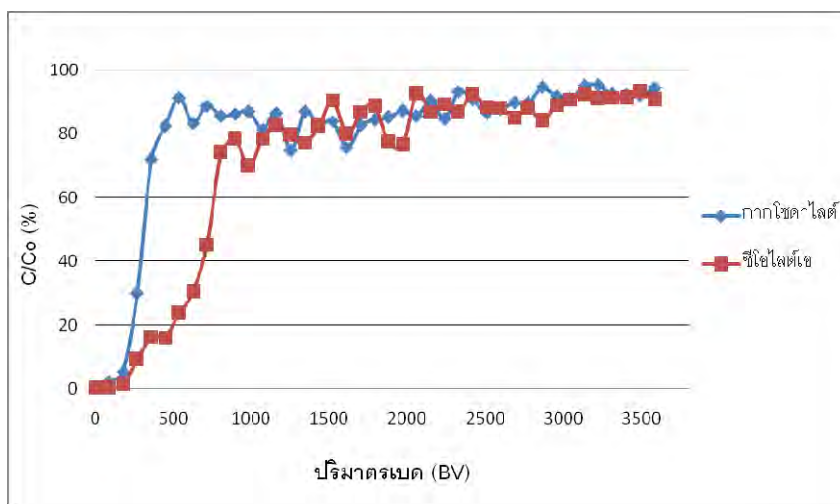
$$\text{ปริมาตรเบด} = \frac{\text{ปริมาตรของน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)}}{\text{ปริมาตรของชั้นตัวกลางดูดซับ (ลิตร)}} \quad (4.7)$$

$$\text{ปริมาตรของชั้นตัวกลาง (ลิตร)} = \frac{\pi r^2 h}{1000} \quad (4.8)$$

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าที่ใช้ในการทดลองการดูดซับแบบคอลัมน์ (Column)

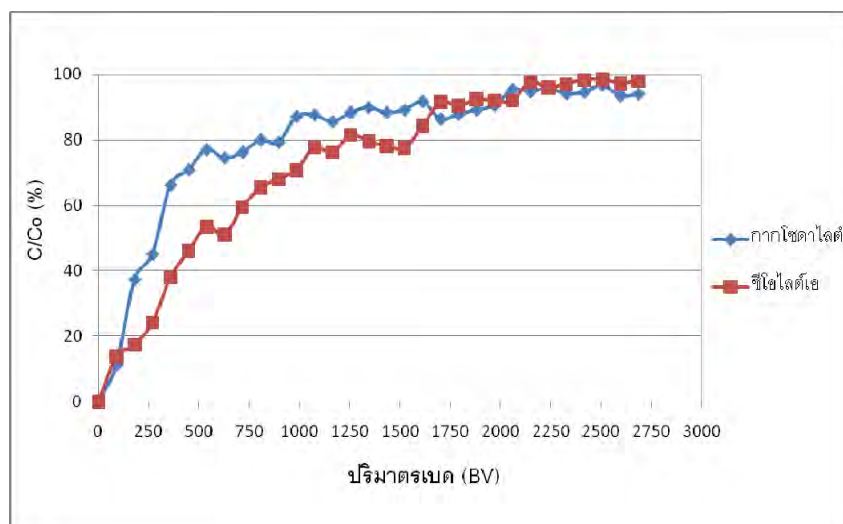
ชนิดตัวดูดซับ	สารถูกดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ความสูงชั้นตัวกลาง (ซม.)	ปริมาณตัวกลางที่ใช้ (กรัม)	ปริมาตรชั้นตัวกลาง (ลิตร)
กากโซดาไลต์	สังกะสี	30	1	0.1	0.503
	ตะกั่ว	30			
	ทองแดง	10			
ซีโอไลต์เอ	สังกะสี	30	1	0.1	0.503
	ตะกั่ว	30			
	ทองแดง	10			

ผลการทดลองเส้นโค้งเบรคทวร์จ (Breakthrough curve) ดังแสดงในภาพที่ 4.32 ถึง 4.34



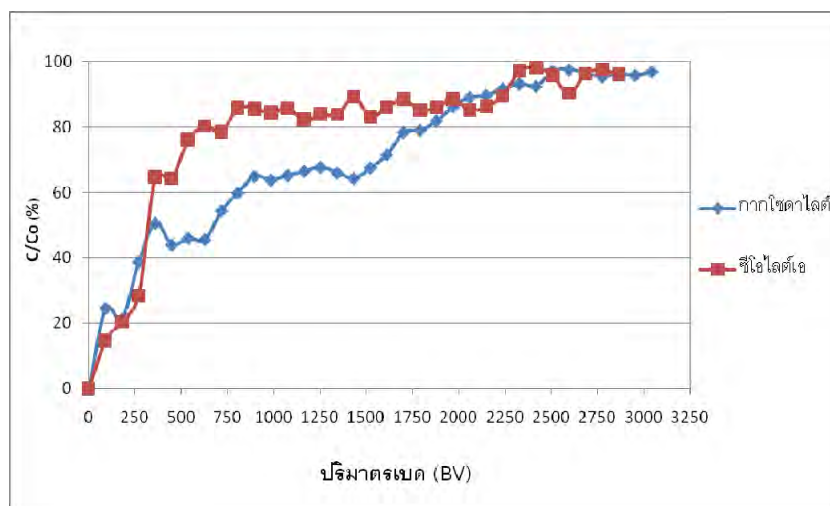
ภาพที่ 4.32 เส้นโค้งเบรคทรูจระหว่งความเข้มข้นของสังกะสีกับปริมาณรเบด (BV) ของกากชอคดอไลต์และซีโอไลต์เอ

จากภาพที่ 4.32 ผลการทดลองในคอลัมน์ พบว่าในช่วงแรกของการผ่านน้ำลงในคอลัมน์ น้ำที่ออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณโลหะหนักสังกะสีอยู่น้อย แต่เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นของโลหะหนักสังกะสีในน้ำเสียจะค่อยๆ สูงขึ้น และประสิทธิภาพของการดูดซับมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าตัวกลางดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์เริ่มหมดประสิทธิภาพของการดูดซับ จนถึงปริมาตรหนึ่งความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ ณ จุดนี้เรียกว่า จุดหมดสภาพ ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพในการดูดซับแล้ว ซึ่งกากชอคดอไลต์และซีโอไลต์เอสามารถบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักสังกะสีความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้จำนวน 1,170 และ 1,035 มิลลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 2,327 และ 2,059 ปริมาตรรเบด และพบว่ากากชอคดอไลต์และซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดสังกะสีได้สูงสุด 351.0 และ 310.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลดังในตารางที่ 4.23



ภาพที่ 4.33 เส้นโค้งเบรคทอร์จระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับปริมาณเบด (BV) ของกากโชดาไลต์และซีโอไลต์เอ

จากภาพที่ 4.33 ผลการทดลองในคอลัมน์ พบว่าในช่วงแรกของการผ่านน้ำลงในคอลัมน์ น้ำที่ออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณโลหะหนักตะกั่วอยู่น้อย แต่เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นของโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียจะค่อยๆ สูงขึ้น และประสิทธิภาพของการดูดซับมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าตัวกลางดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์เริ่มหมดประสิทธิภาพของการดูดซับ จนถึงปริมาณหนึ่งความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ ณ จุดนี้เรียกว่า จุดหมดสภาพ ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพในการดูดซับแล้ว ซึ่งกากโชดาไลต์และซีโอไลต์เอสามารถบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้จำนวน 1,035 และ 1,080 มิลลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 2,059 และ 2,148 ปริมาตรเบด และพบว่ากากโชดาไลต์และซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุด 310.5 และ 324.0 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลดังในตารางที่ 4.23



ภาพที่ 4.34 เส้นโค้งเบรคทูล์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงกับปริมาตรเบด (BV) ของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

จากภาพที่ 4.34 ผลการทดลองในคอลัมน์ พบว่าในช่วงแรกของการผ่านน้ำลงในคอลัมน์ น้ำที่ออกจากคอลัมน์จะมีปริมาณโลหะหนักทองแดงอยู่น้อย แต่เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นของโลหะหนักทองแดงในน้ำเสียจะค่อยๆ สูงขึ้น และประสิทธิภาพของการดูดซับมีแนวโน้มลดลง แสดงว่าตัวกลางดูดซับที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์เริ่มหมดประสิทธิภาพของการดูดซับ จนถึงปริมาตรหนึ่งความเข้มข้นของน้ำที่ผ่านคอลัมน์มีความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ ณ จุดนี้เรียกว่า จุดหมดสภาพ ซึ่งเป็นจุดที่ตัวดูดซับหมดประสิทธิภาพในการดูดซับแล้ว ซึ่งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสามารถบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักทองแดงความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้จำนวน 1,260 และ 1,170 มิลลิลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 2,506 และ 2,327 ปริมาตรเบด และพบว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดทองแดงได้สูงสุด 351.0 และ 310.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงผลดังในตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักในคอลัมน์

ชนิดตัวดูดซับ	สารถูกดูดซับ	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (ลิตร)	ปริมาตรน้ำไหลผ่าน/ปริมาตรของชั้นตัวกลาง (BV)	ความหนาแน่นของการดูดซับ (กรัม)
กากโซดาไลต์	สังกะสี	1.170	2,327	351.0
	ตะกั่ว	1.035	2,059	310.5
	ทองแดง	1.260	2,506	126.0
ซีโอไลต์เอ	สังกะสี	1.035	2,059	310.5
	ตะกั่ว	1.080	2,148	324.0
	ทองแดง	1.170	2,327	117.0

ในงานวิจัยต่างๆ ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักแบบคอลัมน์โดยออกแบบคอลัมน์ที่แตกต่างกันไป ซึ่งในงานวิจัยของณัฐ ดิลกเกียรติ (2546) ออกแบบคอลัมน์โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.42 เซนติเมตร สูง 90 เซนติเมตร มีปริมาตรระบอบ 407 มิลลิลิตร ใส่ตัวดูดซับ (ถ่านกัมมันต์) ปริมาณ 238 กรัม เต็มพอดีที่ 90 เซนติเมตร โดยมีจุดเก็บตัวอย่างที่ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร น้ำเสียสังเคราะห์ไหลจากด้านบนลงล่างความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลเท่ากับ 18 มิลลิลิตรต่อนาที ค่าภาระถึง 2.35 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ทำให้มีเวลาสัมผัสในคอลัมน์เท่ากับ 30 นาที โดยให้ของเหลวท่วมชั้นของตัวดูดซับตลอดเวลาและเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ปริมาณน้ำทิ้งต่างๆ ที่ตำแหน่ง 0, 30, 60 และ 90 เซนติเมตร จนถึงจุดหมดสภาพ ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของเฮกซะวาเลนท์โครเมียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาตรน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์เพิ่มขึ้น โดยน้ำเสียไหลจากบนลงล่าง แสดงให้เห็นว่าตัวดูดซับจะหมดสภาพจากส่วนบนก่อน จากนั้นค่อยๆ หมดจนถึงส่วนกลางและถึงส่วนล่างของคอลัมน์ในที่สุด จุดสูงสุดของเส้นกราฟคือจุดที่ความเข้มข้นน้ำเสียเข้าเท่ากับความเข้มข้นน้ำเสียออก คือ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือเรียกว่าจุดหมดสภาพของตัวดูดซับ และประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมของตัวดูดซับที่ระดับความสูงของชั้นตัวกลาง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร พบว่าจุดหมดสภาพที่ 30 เซนติเมตร อยู่ที่ 67 ลิตร หรือคิดเป็น 485.5 ปริมาตรเบด (BV) ความหนาแน่นของการดูดซับ 9.14 มิลลิกรัมต่อกรัม จุดหมดสภาพที่ 60 เซนติเมตร อยู่ที่ 144 ลิตร หรือคิดเป็น 521.7 ปริมาตรเบด (BV) ความหนาแน่นของการดูดซับ 8.54 มิลลิกรัมต่อกรัม และจุดหมดสภาพที่ 90 เซนติเมตร อยู่ที่ 275 ลิตร หรือคิดเป็น 664.3 ปริมาตรเบด (BV) ความหนาแน่นของการดูดซับ 11.59 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohan และ Sreelakshmi (2008) ออกแบบคอลัมน์โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 2.50 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร มี



ปริมาตรระบอบอก 245.43 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ตัวดูดซับ (แลกเปลี่ยนและแลกเปลี่ยนที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายฟอสเฟต) ปริมาณ 36 กรัม โดยมีจุดเก็บตัวอย่างที่ 10, 20 และ 30 เซนติเมตร น้ำเสียสังเคราะห์ไหลจากด้านบนลงล่างความเข้มข้นของโลหะหนักเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหลเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น เมื่อความสูงของตัวกลางดูดซับสูงขึ้นจาก 10-30 เซนติเมตร เนื่องจากระยะเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับขนาดของไอออน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน และการชะละลายไอออน โดยความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเป็นดังนี้ สังกะสี > แมงกานีส > ทองแดง > ตะกั่ว และพบว่าแลกเปลี่ยนที่ผ่านการกระตุ้นด้วยฟอสเฟตมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักมากกว่าแลกเปลี่ยน เนื่องจากมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะหนักมากกว่า

#### 4.4 ผลการศึกษาการชะไอออนโลหะหนักด้วยสารละลายกรดและน้ำกลั่น

การศึกษากการชะไอออนสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง โดยนำกระดาดากรองที่มีตัวดูดซับกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จนแห้ง ปริมาณ 0.1 กรัม มาทำการชะไอออนโลหะหนักด้วยน้ำกลั่นและสารละลายกรดที่มีพีเอชเท่ากับ 5 โดยสารละลายกรดเตรียมจากกรดซัลฟิวริกเกรดเชิงวิเคราะห์ ละลายในน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4 นอร์มัล ผลการทดลองแสดงดังในตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 การชะไอออนโลหะหนักสังกะสี ตะกั่วและทองแดงด้วยน้ำกลั่น และสารละลายกรด

ชนิดโลหะหนัก	ชนิดตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มก./ล.)	ชะด้วยน้ำกลั่น (มก./ล.)	พีเอชสุดท้าย	ชะด้วยสารละลายกรด (มก./ล.)	พีเอชสุดท้าย
สังกะสี	กากโซดาไลต์	30	3.2	8.5	10.9	5.3
	ซีโอไลต์เอ	30	3.3	8.6	13.1	5.8
ตะกั่ว	กากโซดาไลต์	30	3.6	9.7	9.0	5.3
	ซีโอไลต์เอ	30	3.4	9.8	7.3	5.9
ทองแดง	กากโซดาไลต์	10	1.5	9.3	2.7	5.4
	ซีโอไลต์เอ	10	0.9	9.2	1.1	6.0

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.24 พบว่าเมื่อชะกากากโซดาไลต์ด้วยน้ำกลั่น วัดความเข้มข้นสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ในน้ำชะได้เท่ากับ 3.189, 3.571 และ 1.553 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อชะซีโอไลต์เอด้วยน้ำกลั่น วัดความเข้มข้นสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ในน้ำชะได้เท่ากับ 3.313, 3.436 และ 0.859 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงว่ามีการชะละลายโลหะหนักออกจากกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เมื่อใช้น้ำกลั่นเป็นตัวชะละลาย ส่วนการชะด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 พบว่าโลหะหนักถูกชะออกมาได้มากกว่าการชะด้วยน้ำกลั่น ซึ่งการชะละลายออกจากกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอของสังกะสี และทองแดง พบว่ามีค่าไม่เกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมปี 2548 ที่กำหนดระดับสังกะสี และทองแดง ไว้ไม่เกิน 250 และ 25.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำไปกำจัดได้ด้วยวิธีการฝังกลบตามหลักวิชาการได้ ส่วนการชะออกจากกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอของตะกั่ว พบว่ามีค่าเกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมปี 2548 ที่กำหนดระดับตะกั่ว ไว้ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงถือได้ว่ากากตะกอนที่เกิดขึ้นจัดเป็นของเสียอันตราย ซึ่งควรมีการนำไปทำลายฤทธิ์โดยกระบวนการที่ทำให้เป็นก้อน (Solidification) ต่อไป โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนและการทำลายฤทธิ์เป็นกระบวนการที่ทำให้สารต่างๆ ถูกยึดไว้ และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางเคมีออกมาได้ ก่อนที่จะนำไปฝังกลบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกลไกการดูดซับของทั้งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอเป็นการดูดซับทางกายภาพ โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ และแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับอย่างรวดเร็ว ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนไอออนกันน้อยมาก จึงทำให้โลหะหนักหลุดออกมามาก ขณะที่งานวิจัยของจุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ (2547) ทำการชะไอออนตะกั่วด้วยน้ำกลั่น และสารละลายกรดพีเอช 5.8 โดยสารละลายกรดดังกล่าวมีส่วนผสมของน้ำกลั่นผสมกรดไฮโดรคลอริกในอัตราส่วนปริมาตรสารละลายเป็น 100 เท่า (มิลลิลิตร) ต่อน้ำหนักของซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขาน้อย พบว่าการทดสอบการชะด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิดด้วยน้ำกลั่น และสารละลายกรดพีเอช 5.8 วัดความเข้มข้นของตะกั่วในสารละลายหลังผ่านการชะละลายได้เท่ากับ 0 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าไม่มีการชะละลายของไอออนตะกั่วออกจากตัวดูดซับทั้งสองชนิด ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากกลไกการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นการดูดซับทางเคมี โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งเป็นการดูดซับที่ยึดโมเลกุลของตะกั่วในรูปของพันธะเคมีไว้ ทำให้ตะกั่วที่ถูกดูดซับไว้ไม่มีการเคลื่อนที่ในสารละลายของเหลว จึงไม่สามารถชะด้วยน้ำกลั่นหรือสารละลายกรดอ่อนได้

#### 4.5 ประเมินการค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

ค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ และต้นทุนในการใช้ซีโอไลต์เอกำจัดโลหะหนัก สังกะสี ตะกั่ว และทองแดงให้ได้ตามมาตรฐานโดยคิดจากค่าวัตถุดิบ ค่าพลังงานไฟฟ้า และ ค่าแรงงาน โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.5.1 ค่าวัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

1) กากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วไม่เสียค่าใช้จ่าย เพราะเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ แต่เสียค่าใช้จ่ายในการขนส่งจากจังหวัดระยองมายังกรุงเทพมหานคร คิดเป็นเงิน 200 บาท

2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้ประมาณ 2,500 กรัม ต่อกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว 1000 กรัม ซึ่งโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 ขวดขนาด 1000 กรัม ราคา 300 บาท ดังนั้นคิดเป็นเงินเท่ากับ 750 บาท

3) น้ำกลั่นใช้ประมาณ 20 ลิตร ราคาลิตรละ 4 บาท คิดเป็นเงินเท่ากับ 80 บาท

##### 4.5.2 ค่าพลังงานที่ใช้เบื้องต้นในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

1) ค่าไฟในการเผาซิลิกา-อะลูมินา : ใช้เตาเผาที่มีกำลังไฟฟ้า 4.7 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2554) จะทำการเผาที่ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการเผาซิลิกา-อะลูมินา 3 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 4.7 \times 3 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 29.13 \text{ บาท} \end{aligned}$$

2) ค่าไฟในขั้นตอนการละลายซิลิกา-อะลูมินา : ให้ความร้อนโดยใช้เครื่องกวนแบบ ให้ความร้อน ซึ่งมีกำลังไฟฟ้าของเครื่อง 456 วัตต์ หรือ 0.456 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2554) จะทำการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + \text{Ft}) \\ &= 0.456 \times 24 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 22.61 \text{ บาท} \end{aligned}$$

- 3) ในขั้นตอนการผสมสารตั้งต้น : ให้ความร้อนโดยใช้เครื่องกวนแบบให้ความร้อน ซึ่งมี กำลังไฟฟ้าของเครื่อง 456 วัตต์ หรือ 0.456 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงาน ไฟฟ้าต่อหน่วยสำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2554) จะทำการให้ความร้อนที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1/6 ชั่วโมง (10 นาที)

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + Ft) \\ &= 0.456 \times (1/6) \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 0.16 \text{ บาท} \end{aligned}$$

- 4) ค่าไฟในขั้นตอนการสังเคราะห์ด้วยตู้อบไฟฟ้า : ใช้ตู้อบไฟฟ้าซึ่งมีกำลังไฟฟ้าของ เครื่อง 432 วัตต์ หรือ 0.432 กิโลวัตต์ โดยที่ 1.8047 คือค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วย สำหรับกิจการขนาดเล็ก (ประเภทที่ 2) ที่ใช้ไฟฟ้าไม่เกิน 150 หน่วย (กิโลวัตต์ต่อ ชั่วโมง) ต่อเดือน (การไฟฟ้านครหลวง, 2554) จะทำการอบที่ 90 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 4 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{ราคาค่าไฟฟ้า} &= \text{KW-H} \times (1.8047 + Ft) \\ &= 0.432 \times 4 \times (1.8047 + 0.2612) \\ &= 3.57 \text{ บาท} \end{aligned}$$

#### 4.5.3 ค่าแรงที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

ค่าแรงที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ เช่น การร่อนกากซิลิกา-อะลูมินา ซึ่งการ สังเคราะห์ซีโอไลต์เอ 1000 กรัม ใช้เวลาในการเตรียมประมาณ 1 ชั่วโมง คิดค่าแรง 23.25 บาท ต่อชั่วโมง

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดเพื่อสังเคราะห์ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินา ที่ใช้แล้ว มีค่าเท่ากับ  $200.0 + 750.0 + 80.0 + 29.13 + 22.61 + 0.16 + 3.57 + 23.25$  เท่ากับ 1,108.72 บาท

จากรายละเอียดค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอปริมาณ 1000 กรัม ทำการ รวมค่าใช้จ่ายมีค่าเท่ากับ 1,108.72 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งจากงานวิจัยของจุฑาทิพย์ เพชรอินทร์ (2547) ศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขาน้อย โดยพบว่า ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินเท่ากับ 611.39 บาทต่อกิโลกรัม ซีโอไลต์จากเถ้าลอยขาน้อยเท่ากับ 512.22 บาทต่อกิโลกรัม และซีโอไลต์ทางการค้าเท่ากับ 1,770.0 บาทต่อกิโลกรัม จากการประเมินต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์ พบว่าการสังเคราะห์ ซีโอไลต์เอจากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วในงานวิจัยนี้มีต้นทุนต่ำกว่าซีโอไลต์ทางการค้า แต่มี

ต้นทุนสูงกว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและเถ้าลอยขาน้อย เนื่องจากมีการคิดค่าใช้จ่ายในการขนส่งวัตถุดิบรวมไปด้วย และราคาสารเคมีที่ใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใช้กรดในเชิงวิเคราะห์ ซึ่งมีราคาแพงกว่า ดังนั้นการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอจากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว จึงมีต้นทุนในการสังเคราะห์สูงกว่า แต่งานวิจัยนี้จากกระบวนการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ มีกากที่กรองได้ ซึ่งพบว่าเป็นซีโอไลต์ชนิดโซดาไลต์ โดยคุณสมบัติสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการแลกเปลี่ยนประจุบวกได้ ซึ่งการสังเคราะห์ซีโอไลต์ 1 ครั้ง จะได้ซีโอไลต์ 2 ชนิด จึงมีความเป็นไปได้ว่าการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากกากซีลิกา-อะลูมินานั้นมีความคุ้มค่าในการนำกากของเสียมาให้เกิดประโยชน์สูงสุด ถึงแม้ต้นทุนในการสังเคราะห์จะสูงก็ตาม ก็เป็นการลดปริมาณกากของเสียอุตสาหกรรมได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ซีโอไลต์ชนิดต่างๆ

ชนิดซีโอไลต์	ค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ (บาทต่อกิโลกรัม)	งานวิจัย
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน	611.39	จุฑาทิพย์ (2547)
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากเถ้าลอยขาน้อย	512.22	จุฑาทิพย์ (2547)
ซีโอไลต์สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว	1,108.72	งานวิจัยนี้
ซีโอไลต์ทางการค้า	1,770.0	Hui และคณะ (2005)

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตสารประกอบไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และกากโซดาไลต์ที่เหลือทิ้งจากการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ ผลจากการทดลองสามารถสรุปถึงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้และความเป็นไปได้ในการนำซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์ได้เพื่อนำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักในน้ำเสีย ได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

- 1) สภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มัล
  - สภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการสังเคราะห์ คือ การสังเคราะห์ในอโตเครฟด้วยตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยมีค่าความเป็นผลึกเท่ากับร้อยละ 80.30
- 2) พื้นที่ผิวของซีโอไลต์เอและกากโซดาไลต์ที่สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วเพิ่มขึ้นจากเดิมที่ยังไม่ผ่านการสังเคราะห์ คือเท่ากับ 0.049 ตารางเมตรต่อกรัม เป็น 28.59 ตารางเมตรต่อกรัม และ 109.64 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ปริมาตรรูพรุนเพิ่มขึ้นจากเดิม คือเท่ากับ 0.013 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม เป็น 0.054 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 0.213 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ และขนาดรูพรุนเพิ่มขึ้นจากเดิม คือเท่ากับ 0.121 นาโนเมตร เป็น 7.626 นาโนเมตร และ 7.782 นาโนเมตร ตามลำดับ
- 3) การศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงโดยใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วโดยทำการทดลองแบบที่ละเท
  - การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม
  - เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงเป็น 10, 20, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอมีค่าลดลง ดังนั้นความเข้มข้นของสังกะสีและตะกั่ว เท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงของทั้งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

- การหาพีเอชที่เหมาะสม

พีเอช 5 เป็นพีเอชที่เหมาะสมของการศึกษาความสามารถในการกำจัดสังกะสี และทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของทั้งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ และพีเอช 4 เป็นพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ของทั้งกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ เนื่องจากเป็นพีเอชที่โลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงยังตกตะกอนไม่มากนัก ถ้าเลือกพีเอชสูงกว่านี้จะเป็นการตกตะกอนของโลหะหนักมากกว่าการดูดซับ เพราะโลหะหนักแต่ละชนิดจะเริ่มตกตะกอนที่พีเอชประมาณ 6-7

- การหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ในการทดลองหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการเข้าสู่สมดุลของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง มีอัตราการกำจัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 15 นาทีแรก หลังจากนั้นอัตราการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง และค่อนข้างคงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที สำหรับซีโอไลต์ โดยมีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 99, 98 และ 99 ตามลำดับ ส่วนกากโซดาไลต์คงที่ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที โดยมีร้อยละการกำจัดเท่ากับ 99, 99 และ 99 ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที เป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของซีโอไลต์เอ และระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที เป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักของกากโซดาไลต์

- การทดสอบการไอโซเทอมการดูดซับของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับที่สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือน้ำเสียสังเคราะห์สังกะสี และตะกั่วความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ทองแดงความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชเท่ากับ 4 สำหรับตะกั่ว และพีเอชเท่ากับ 5 สำหรับสังกะสีและทองแดง ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที สำหรับซีโอไลต์เอ และระยะเวลาสัมผัส 60 นาที สำหรับกากโซดาไลต์ พบว่าในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอสอดคล้องกับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช โดยกากโซดาไลต์ 1 กรัม มีความสามารถในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงสูงสุดเท่ากับ 306.12, 223.88 และ 58.479 มิลลิกรัมตามลำดับ ส่วนซีโอไลต์เอ 1 กรัม มีความสามารถในการกำจัดสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงสูงสุดเท่ากับ 223.88, 45.80 และ 46.51 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังนั้นกากโซดาไลต์จึงมีความสามารถในการกำจัดโลหะหนักมากกว่าซีโอไลต์เอ

4) ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแบบคอลัมน์ด้วยกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ

- การกำจัดสังกะสีโดยใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดสังกะสีได้สูงสุด 351.0 และ 310.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 2,327 และ 2,059 ปริมาตรเบด ตามลำดับ

- การกำจัดตะกั่วโดยใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงสุด 310.5 และ 324.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 2,059 และ 2,148 ปริมาตรเบด ตามลำดับ

- การกำจัดทองแดงโดยใช้กากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ 1 กรัม สามารถกำจัดทองแดงได้สูงสุด 351.0 และ 310.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คิดเป็น 2,506 และ 2,327 ปริมาตรเบด ตามลำดับ

5) ผลการศึกษาการชะละลายของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ พบว่าเมื่อตัวดูดซับทั้งสองชนิดได้ผ่านการดูดซับสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง สามารถถูกชะออกมาได้ ไม่จะเป็นการชะด้วยน้ำกลั่น หรือการชะด้วยสารละลายกรดพีเอช 5 เนื่องจากการดูดซับของตัวดูดซับทั้งสองชนิดเป็นการดูดซับทั้งทางเคมีและทางกายภาพ แต่จะเป็นการดูดซับทางกายภาพมากกว่า ซึ่งการดูดซับดังกล่าวไม่มีการสร้างพันธะระหว่างตัวดูดซับกับสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง จึงทำให้โลหะหนักสามารถถูกชะออกมาบ้าง

6) ซีโอไลต์เอที่สังเคราะห์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้วมีค่าใช้จ่ายในการสังเคราะห์ (ค่าวัตถุดิบ ไฟฟ้า และแรงงาน) ประมาณ 1108.72 บาทต่อกิโลกรัม สูงกว่าซีโอไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยถ่านหิน และเถ้าลอยขานอ้อยที่มีราคา 611.39 และ 512.22 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แต่การนำไปใช้ประโยชน์จะมีมากกว่า จึงน่าสนใจที่จะพัฒนาในเชิงการค้า เพื่อนำไปใช้ในการดูดซับโลหะหนักที่มีประจุบวก

## 5.2 ความสำคัญและการนำไปใช้ประโยชน์

การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากกากซิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว นอกจากจะเป็นการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมที่เหลือทิ้งแล้ว ยังสามารถนำซีโอไลต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ได้ เนื่องจากซีโอไลต์มีลักษณะสมบัติที่สำคัญ คือ มีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งอาจใช้เป็นตัวกรองสารที่ต้องการ โดยโมเลกุลที่เล็กกว่าขนาดโพรงซีโอไลต์จะสามารถผ่านไปได้ ในขณะที่โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่จะไม่สามารถผ่านออกมา และโมเลกุลที่ต้องการซึ่งมีขนาดพอดีกับโพรงซีโอไลต์ก็จะถูกกักไว้ภายในโพรง แต่ในการประยุกต์ใช้ซีโอไลต์ในการกลั่นปิโตรเลียมให้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงและผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมอื่นๆ นั้น ปัจจัยสำคัญมิใช่เรื่องขนาดของโพรงซีโอไลต์อย่าง



เดียว แต่ยังมีสมบัติทางเคมีของอะตอมที่อยู่รอบๆ โครงสร้างผลึกที่มีส่วนทำให้เกิดผลที่ต้องการด้วย เช่น ในบางกรณีที่เราต้องการทำให้สารไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ (ในกระบวนการปิโตรเคมี) แตกออกกลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง เพื่อให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้นั้น การแตกออกของโมเลกุลใหญ่ๆ ก็เกิดจากการที่โมเลกุลทำปฏิกิริยากับอะตอมที่อยู่รอบๆ โพรงซีโอไลต์นั่นเอง โดยสรุปแล้ว การใช้ประโยชน์จากซีโอไลต์จะถูกกำหนดด้วยสมบัติพื้นฐานในระดับโมเลกุลของสาร ซึ่งมีอยู่สามด้านหลักๆ ด้วยกัน ได้แก่ เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) เป็นตัวดูดซับ (adsorption) และเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis)

### 1) การใช้ประโยชน์ซีโอไลต์เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุ

เนื่องจากประจุบวกของโลหะที่เกาะกับซีโอไลต์นั้นเกาะอยู่อย่างหลวมๆ มันจึงพร้อมที่จะแลกเปลี่ยนประจุกับโลหะอื่นเมื่ออยู่ในสารละลายได้ ด้วยหลักการนี้จึงสามารถประยุกต์ใช้กับการลดความกระด้างของน้ำ โดยโลหะอัลคาไล เช่น โซเดียม หรือ โพแทสเซียม ที่เกาะกับซีโอไลต์ จะแลกเปลี่ยนประจุกับแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งเป็นประจุของโลหะในน้ำที่เป็นตัวการทำให้น้ำกระด้าง และมีการนำซีโอไลต์มาใช้ลดความกระด้างของน้ำแทนฟอสเฟตในผงซักฟอก เนื่องจากฟอสเฟตนั้นถือว่าเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

ด้วยหลักการแลกเปลี่ยนประจุนี้ ทำให้สามารถใช้ซีโอไลต์ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย โดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกของแอมโมเนียกับโลหะโซเดียมที่อยู่ในโพรงของซีโอไลต์ รวมทั้งสามารถใช้กำจัดก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ ( $\text{NO}_x$ ) จากไอเสียเครื่องยนต์ให้กลายเป็นก๊าซไนโตรเจน และก๊าซออกซิเจนที่ปลอดภัย (อุปกรณ์นี้เรียกว่า คะตะไลติกคอนเวอร์เตอร์ ที่บังคับติดไว้ที่ท่อไอเสียของรถยนต์รุ่นใหม่ๆ ทุกคัน) และขจัดไอโซโทปกัมมันตรังสีของซีเซียมและสทอรอนเนียมจากกากนิวเคลียร์ได้อีกด้วย

### 2) การใช้ประโยชน์ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ

การใช้ซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับนั้น ใช้ทั้งในกระบวนการทำให้แห้ง (dehydration) การทำให้บริสุทธิ์ (purification) และการแยกสาร (separation) ซึ่งซีโอไลต์นั้นมีสมบัติในการเลือกทำปฏิกิริยาตามรูปร่าง อันเป็นหลักการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับระดับโมเลกุล โดยสามารถเลือกให้มีการเลือกดูดซับเฉพาะบางโมเลกุล ส่วนการทำให้แห้งนั้น เนื่องจากซีโอไลต์ที่มีประจุบวกสามารถดูดซับน้ำได้ดีเป็นพิเศษและสามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ กล่าวคือ เมื่อมีการให้ความร้อน น้ำก็จะระเหยออกไปหมด แต่เมื่อซีโอไลต์เหล่านี้สัมผัสกับไอน้ำอีกครั้ง ก็สามารถดูดซับน้ำได้อีก หรืออาจนำไปใช้ดูดซับสารอื่นแทน เช่น ก๊าซไอโอดีน ตะกั่ว หรือแอมโมเนีย แบบย้อนกลับได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังใช้ในการแยกก๊าซ ซึ่งโมเลกุลของก๊าซต่างชนิดจะมีความแตกต่าง

กันในเรื่องของปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตกับอิออนโลหะ ในทางกลับกัน ซีโอไลต์บางชนิดจะไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ แต่จะดูดซับเฉพาะโมเลกุลอินทรีย์เท่านั้น

### 3) การใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

มีการใช้งานซีโอไลต์ในประโยชน์ด้านอื่นๆ ได้อีก เช่น ใช้ในการเกษตร ลดการใช้ปุ๋ย สามารถเก็บกักปุ๋ยอยู่ในดินได้นาน พืชได้ใช้ประโยชน์จากปุ๋ยในดินได้อย่างเต็มที่ สามารถเก็บกักปุ๋ยได้มากกว่า 80% และสามารถดูดซับสารพิษตกค้างในดิน ลดความเป็นพิษให้ดินที่มีสาเหตุจากสารตกค้างของยาฆ่าหญ้าและยาฆ่าแมลง และช่วยทำให้ดินร่วนซุย ดินซึมน้ำได้ง่าย ระบายน้ำได้ดี และในการเลี้ยงสัตว์ ซีโอไลต์สามารถดูดซับสารพิษออกจากทั้งตัวอาหารสัตว์ และอวัยวะภายในระบบย่อยอาหาร นอกจากนั้นซีโอไลต์ยังมีผลในการกระตุ้นให้ระบบย่อยและดูดซึมอาหารของสัตว์เหล่านั้น ทำงานได้ดีขึ้นอีกด้วย และที่สำคัญยังช่วยลดกลิ่นเหม็นของมูลสัตว์ที่ขี้ถ่าย

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

1) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์จากวัสดุเหลือทิ้งอื่นๆ เช่น กากตะกอนของระบบผลิตน้ำประปา กากตะกอนกระดาษ กากตะกอนเตาหลอมเหล็ก และตะกอนอะลูมิเนียม เป็นต้น มาใช้เป็นวัตถุดิบ

2) ควรมีการศึกษาการสังเคราะห์ซีโอไลต์โดยการกระตุ้นด้วยสารละลายเบสชนิดอื่นๆ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) เป็นต้น เนื่องจากสารละลายเบสที่ใช้ในการสังเคราะห์ซีโอไลต์จะให้ซีโอไลต์ที่ต่างชนิดกัน

3) ควรนำไซตาไลต์และซีโอไลต์เอ ไปทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น แคดเมียม ปรอท โครเมียม เป็นต้น

4) ศึกษาวิธีการกำจัดตัวดูดซับที่ผ่านการดูดซับจนหมดสภาพแล้ว เนื่องจากการดูดซับเป็นการย้ายโลหะหนักที่อยู่ในน้ำเสียมาเกาะจับที่ผิวของตัวดูดซับ ซึ่งหากไม่มีการกำจัดที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการปนเปื้อนโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมได้

5) ควรศึกษาการฟื้นฟูสภาพกากไซตาไลต์และซีโอไลต์เอที่ใช้กำจัดโลหะหนัก เพื่อประโยชน์ในการนำกลับมาใช้ใหม่ และเป็นการลดต้นทุนการสังเคราะห์ซีโอไลต์

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กรรณิการั รั ก ก ก . 2547. การขจัดไอออนทองแดงออกจกน้้ำเสียโดยการดูดซับบนถ้ำนก้ำนมันต์.  
วิทยานัพนธ์ปรึญญามหาบัณชัต์, ภาควัชษาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- กาญจนา คุณาทัย. 2548. การผลิตซีโอไลต์จากถ้่าลอยและการใช้ประโยชน์เพื่อการบำบัดน้้ำเสีย.  
โครงการนุตสาหกรรรมสำรับปรึญญาตรี, ภาควัชษาวิทยาศาสตร์ลิ่งแวดล้่อม คณะ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- การไฟฟ้านครหลวง, ฝ่ายเศรษฐกัจพลังไฟฟ้้า. ค่าไฟฟ้้า. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:  
<http://www.mea.or.th/internet/Elecvalue/tarifftype2.htm> [2554, มีนาคม 17].
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจณ์. 2539. การบำบัดน้้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มันครการพิมพ์.
- จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษั กฤษดานุรักษั. 2547. การเร่งปรึฏกัรยาพื้นฐำนและการปรึะยุกต์.  
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- จุฑาทัพย์ เพชรอินทร์. 2547. การก้่าจัดตะกั่วในน้้ำเสียลิ่งเคราะห์โดยใช้ซีโอไลต์ที่ลิ่งเคราะห์จาก  
ถ้่าลอยถ้ำนหึนและจากถ้่าลอยขานอ้อย. วิทยานัพนธ์ปรึญญามหาบัณชัต์,  
สหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้่อม บัณชัต์วิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จรัรัตน์ ทองทาย. 2548. การดูดซับตะกั่วจากน้้ำเสียลิ่งเคราะห์โดยใช้ลึกาเจลเคลือบด้วยพลั  
เอทลึนไอมึน. วิทยานัพนธ์ปรึญญามหาบัณชัต์, ภาควัชษาวิศวกรรมลิ่งแวดล้่อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จำรัส ลั้มตระกูล. 2540. เคมีของซีโอไลต์. วารสารวิทยาศาสตร์ ปีที่51 ฉบับที่6 (พฤศจิกายน-  
ธันวาคม 2540) : 420-423.
- ชฎาภรณ์ บุญแท้. 2545. การดูดซับโลหะหนักบางชนิดจากน้้ำเสียด้วยดินเบา. วิทยานัพนธ์  
ปรึญญามหาบัณชัต์, สหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้่อม บัณชัต์วิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยวัฒน์ เจนวาณัชย์. 2530. หลักเคมี 2 : ฤษฏู โครงสร้าง ปรึฏกัรยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:  
โอเดียน- สโตร.
- ณัฐ ดิลกเกียรตึ. 2546. ตัวดูดซับที่ผลิตจากดินค้ำผสมกะลามาะพร้าวหรือกะลาปาล์มเพื่อการดูด  
ซับเฮกซะวาเลนทึโครเมียมในน้้ำเสียลิ่งเคราะห์. วิทยานัพนธ์ปรึญญามหาบัณชัต์,  
ภาควัชษาวิศวกรรมลิ่งแวดล้่อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- दन्य लिमपदन्य. 2540. ซีโอไลท์ธรรมชาติ: สารมหัศจรรย์. วารสารวิชาการ APHEIL. พ.ศ. 2540; 37-43.
- ธนพร คำขจร. 2552. การกำจัดสีย้อมและสารลดแรงตึงผิวด้วยเศษแก้วเคลือบแมงกานีสออกไซด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัชชา สามพิมพ์. 2553. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากกากชิลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุญจ ขาวสิทธิวงษ์. 2539. น้ำทิ้งอุตสาหกรรม. ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม ก.ค.-ก.ย.2539; 6(3): 73 - 88.
- เปรมฤดี กาญจนปิยะ. 2545. การศึกษาการผลิตปูนซีเมนต์อลูมินาสูงจากกากชิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ผุสดี แพทย์นุเคราะห์. 2546. การนำชิลิกา-อะลูมินาและขาน้อยที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มนธวัล บุญส่งประเสริฐ. 2550. การสังเคราะห์ซีโอไลต์ Na-X จากดินขาวธรรมชาติ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันทุลเวศน์. 2542. เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2 พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัทแซนอี.68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียร์ จำกัด.
- เรวดี อนุวัฒนา. 2544. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากตะกอนที่ได้จากโรงงานหล่อหลอมโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ. 2542. การนำชิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เลิศ รักสันติชาติ. 2545. การฟื้นฟูสภาพซีโอไลต์ชนิดเอ็กซ์ที่ใช้แล้วสำหรับดูดซับเอทีลินไคคอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- วัฒน์ชัย อยู่ในวงศ์. 2546. การใช้ซีโอไลต์กำจัดแคดเมียม ตะกั่ว ปรอท และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- วีระศักดิ์ อุดมกิจเดชา. 2543. เครื่องมือวิจัยทางวัสดุศาสตร์: ทฤษฎีและหลักการทำงานเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สาโรจน์ ปัทมาพิงษ์. 2545. การนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เป็นตัวทนไฟในการทำเซรามิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุจิตรา กัญญาวิลาส. 2545. การทำตะกอนนิเกิลไฮดรอกไซด์ให้เป็นก้อนด้วยการใช้ซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้ว ปูนขาว และปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- หฤษฎ์ ธิติพันธ์. 2546. การนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรรถนพ หอมจันทร์. 2535. ความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิดจากกากตะกอนบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อคละน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อนรรฆอร พันธุ์ไพศาล. 2549. การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยถ่านหินและจากเถ้าลอยขาน้อยเพื่อกำจัดตะกั่วในน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2521. พระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520. เล่ม 95. ตอนที่ 66. ราชกิจจานุเบกษา. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2540. มาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม 1422-2540 (พ.ศ. 2540). กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมซีโอไลต์สำหรับอุตสาหกรรมสารซักฟอก.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2548. ประกาศกระทรวงเรื่องการจัดตั้งปฏิภนหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (พ.ศ. 2548), กรุงเทพมหานคร: กระทรวงอุตสาหกรรม.

## ภาษาอังกฤษ

- Anuwattana, R., and Khummongkol, P. 2009. Conventional hydrothermal synthesis of Na A zeolite from cupola slag and aluminum sludge. Journal of Hazardous Materials 166 : 227-232.
- Bergaut, V., and Singer, A. 1996. High capacity cation exchanger by hydrothermal Zeolitization of coal fly ash. Appl. Clay Sci 10: 369-378.
- Bishop, P., and Cheng, K.Y. 1992. Metal distribution in solidified / stabilized waste forms after leaching. J.Hazardous & Hazardous Management 9:163-171.
- Boonamnuyvitaya, V., Chaiya, C., Tanthapanichakoon, W., and Jarudilokkul, S. 2004. Removal of heavy metals by adsorbent prepared from pyrolyzed coffee residues and clay. Separation and Purification Technology 35(1): 11-22.
- Chantawong, V. 2003. Synthesis of zeolites from Thai Clay for treatment of wastewater contaminated with heavy metals. The Degree of doctor of philosophy in Environmental Technology Department of Energy and Environment King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Clark, R.M., and Lykins, B.W., Jr. 1989. Granular activated carbon design operation and cost . Michigan:Lewis.
- Corn, M. 1993. Hazardous Materials. San Diego : Academic Press.
- Dyer A. 1988. An Introduction to Zeolite Molecular Sieves. New York : John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Farrauto, R.J., and Bartholomew, C.H. 1997. Fundamentals of industrial catalytic process. London ; Blackie Academic & Professional.
- Fernandes Machado, N.R.C., and Malachinh Miotto, D.M. 2005. Synthesis of Na-A and Na-X zeolites from oil shale ash. Fuel 84 : 2289-2294.
- Hiroaki, A. and Sridhar, K. 2009. Synthesis of Na-a and/ or Na-X zeolite/porous carbon composites from carbonized rice husk. Journal of solid State Chemistry 82 :1749-1753.
- Hui, K.S., Chao, C.Y.H., and Kot, S.C. 2005. Removal of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash. Journal of Hazardous Materials 127: 89–101.

- Hussaro, K., 2007. Synthesis of zeolite from aluminium etching by-product: The effect of reaction temperature on crystallinity and its CO<sub>2</sub> adsorption property. Thesis for doctoral dissertation, Department of Environmental Technology, The joint graduate school of Energy and Environment, King mongkut's university of Technology Thonburi.
- Ibrahim, H.S., Jamil, T.S., and Hegazy, E.Z. 2010. Application of zeolite prepared from Egyptian kaolin for removal of heavy metals: II. Isotherm models. Journal of Hazardous Materials. 182: 842–847.
- Ismaila, A.A., Mohameda, R.M., Ibrahima, I.A., Kinib, G., and Koopmanb, B. Synthesis, optimization and characterization of zeolite A and its ion-exchange properties. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 366 : 80-87.
- Ivan, C., Fernando, G.C., and Jose, C. 2007. Synthesis of X-type Zeolite from Dealuminated Kaolin by Reaction with Sulfuric Acid at High Temperature. Ind. Eng. Chem. Res 46 : 1029-1038.
- Jamil, T.S., Ibrahim, H.S., Abd El-Maksoud, I.H., and El-Wakeel, S.T. 2010. Application of zeolite prepared from Egyptian kaolin for removal of heavy metals: I. Optimum conditions. Journal of Desalination. 258: 34–40.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K., and Namasivayam, C. 2001. Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. Bioresource Technology 76(1): 63-65.
- Kaewsarn, P. 2002. Biosorption of copper (II) from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine algae *Padina sp.* Chemosphere 47(10): 1081-1085.
- Lenihan, John, Fletcher and Welliam, W. 1977. Environmental and Mar Val.6: The chemical Environment. London: Blackie.
- Lin, C.F., and His, H.C. 1995. Resource recovery of waste fly ash: Synthesis of zeolite like materials. Environ. Sci. Technol 29 (4): 1109-1117.
- Lucio, B., and Edoardo, P. 2003. Microwave assisted crystallization of zeolite A from dense gels. Journal of crystal Growth 247: 555-562.
- Mohan, S., and Sreelakshmi, G. 2008. Fixed bed column study for heavy metal removal using phosphate treated rice husk. Journal of Hazardous Materials, 153, 75–82.

- Nibou, D., Mekatel, H., Amokrane, S., Barkat, M., and TrarM, i. 2010. Adsorption of  $Zn^{2+}$  ions onto NaA and NaX zeolites: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. Journal of Hazardous Materials, 173, 637–646.
- Pitcher, S.K. 2004. Heavy metal removal from motorway stormwater using zeolite. Science of the Total Environment. 334-335: 161-166.
- Purna Chandra Rao, G., Satyavenia, S., Ramesha, A., Seshaiaha, K., Murthyb, K.S.N., and Choudary, N.V. 2006. Sorption of cadmium and zinc from aqueous solutions by zeolite 4A, zeolite 13X and bentonite. Journal of Environmental Management 81: 265–272.
- Qiu, W., and Zheng, Y. 2009. Removal of lead, copper, nickel, cobalt, and zinc from water by a cancrinite type zeolite synthesized from fly ash. Journal of Chemical Engineering 145: 483-488.
- Querol, X., Alastuey, A., Lopez-Soler, A., and Plana, F. 1997. A fast method for recycling fly ash: Microwave-assisted zeolite synthesis. Environ. Sci. Technol 31(9): 2527-2533.
- Sampim, T., Chawakitchareon, P., and Nuntasri, D. 2010. Utilization of alumina-silica waste as for synthesis of zeolite NaA. The Proceedings of The 4<sup>th</sup> International Workshop and Conference on Earth Resources Technology, Phuket, Thailand on May 11-13, 2010.
- Smith, J.V. 1976. Zeolite Chemistry and Catalysis. J.A. Rabo Ed. ACS Monograph 171.
- Szostak, R. 1989. Molecular sieves principles of synthesis and identification. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Wang, X.S., and Qin, Y. 2005. Equilibrium sorption isotherms for of  $Cu^{2+}$  on rice bran. Process Biochemistry 40(2): 677-680.



ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การคำนวณองค์ประกอบในการสังเคราะห์ซีไอไลต์เอ

### การคำนวณองค์ประกอบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ

ซีโอไลต์เอต้องมีองค์ประกอบต่อโมลดังนี้  $1\text{Al}_2\text{O}_3 : 1.926\text{SiO}_2 : 3.165\text{Na}_2\text{O} : 128\text{H}_2\text{O}$

ตารางที่ ก-1 แสดงการคำนวณองค์ประกอบในการสังเคราะห์ซีโอไลต์เอ (รัชชา สามพิมพ์, 2553)

สาร	น้ำหนักสาร (กรัม)	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%SiO <sub>2</sub>	%Na <sub>2</sub> O	%H <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
ซีลิกา-อะลูมินา	125.87	74.68	14.68	4.13	-	1	0.31	0.08	-
วอเตอร์กลาส	258.00	-	37.51	10.92	51.48	-	1.616	0.45	7.37
โซเดียมไฮดรอกไซด์	337.28	-	-	50	50	-	-	2.64	2.64
น้ำ	2123.82	-	-	-	100	-	-	-	117.99
						1	1.926	3.17	128

#### 1. หาปริมาณกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้

ต้องการ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1 mol x 94 g/mol = 94 กรัม

มี Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 74.68 กรัม จากกากซีลิกา-อะลูมินา 100 กรัม

ต้องการ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 94.00 กรัม ต้องใช้กากซีลิกา-อะลูมินา =  $[100 \times 94/74.68] = 125.87$  กรัม

- จะมี SiO<sub>2</sub> =  $[14.68 \times 125.87 / 100 \times 60] = 0.31$  โมล

- จะมี Na<sub>2</sub>O =  $[4.13 \times 125.87 / 100 \times 62] = 0.08$  โมล

#### 2. หาปริมาณวอเตอร์กลาสที่ใช้

ต้องการ SiO<sub>2</sub> (1.926-0.31) = 1.616 mol x 60 g/mol = 96.96 กรัม

มี SiO<sub>2</sub> 37.51 กรัม จากวอเตอร์กลาส 100 กรัม

ต้องการ SiO<sub>2</sub> 96.96 กรัม ต้องใช้วอเตอร์กลาส =  $[100 \times 96.96/37.58] = 258.00$  กรัม

- จะมี Na<sub>2</sub>O = 0.45 โมล  $[10.92 \times 258.00 / 100 \times 62]$

- จะมี H<sub>2</sub>O = 7.37 โมล  $[51.48 \times 258.00 / 100 \times 18]$

## 3. หาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้

ต้องการ  $\text{Na}_2\text{O}$   $(3.165-0.37-0.08) = 2.72 \text{ mol} \times 62 \text{ g/mol} = 168.64 \text{ กรัม}$

มี  $\text{Na}_2\text{O}$  50.00 กรัม จากโซเดียมไฮดรอกไซด์ 100.00 กรัม

ต้องการ  $\text{Na}_2\text{O}$  168.64 กรัม ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์  $= [100 \times 168.64/50.00] = 337.28 \text{ กรัม}$

- จะมีน้ำ = 2.72 โมล

## 4. หาปริมาณน้ำที่ใช้

ต้องการน้ำ  $(128-6.01-2.72) = 117.99 \text{ mol} \times 18 \text{ g/mol} = 2123.82 \text{ กรัม}$

ตารางที่ ก-2 แสดงปริมาณน้ำหนักของสารตั้งต้นแต่ละชนิดในการสังเคราะห์สารทั้งหมด 90 กรัม

สาร	น้ำหนักสาร จากการคำนวณ (กรัม)	น้ำหนักสารในการ สังเคราะห์ 90 กรัม
กากซิลิกา-อะลูมินา	125.87	3.98
วอเตอร์กลาส	258.00	8.16
โซเดียมไฮดรอกไซด์	337.28	10.67
น้ำ	2123.82	67.19
น้ำหนักรวม	2844.97	90

ดังนั้นในการสังเคราะห์สารปริมาณ 90 กรัมจะต้องใช้สารตั้งต้นดังต่อไปนี้

- กากซิลิกา-อะลูมินา = 3.98 กรัม

- วอเตอร์กลาส = 8.16 กรัม

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ = 10.67 กรัม

- น้ำ = 67.19 กรัม

ภาคผนวก ข  
ผลการวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

## ผลการวิเคราะห์หาประจุบนพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

**หลักการ** ไตเตรทด้วยกรด-เบส Punyapalakul Patiparn, 2004 อ้างถึงในจรัรัตน์ ทองทนาย, 2548

### ขั้นตอนในการวิเคราะห์

1. เตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.025 โมลต่อลิตร และเตรียมสารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.01 โมลต่อลิตร
2. ชั่งตัวกลางหนัก 0.1 กรัม ลงในขวดเขย่า
3. เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริก X มิลลิลิตร ลงในขวดเขย่าที่เตรียมน้ำปราศจากไอออนผสมกับสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งคำนวณให้มรปริมาตรน้ำในขวดเขย่าทั้งหมด 25 มิลลิลิตร และมีค่าความแรงไอออน 0.002 โมลต่อลิตร
4. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 2-3 โดยเพิ่มปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแน่ใจว่าพีเอชของสารละลายทั้งหมดในขวดเขย่าลดลงจนมีค่าประมาณ 3
5. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 2-4 โดยเปลี่ยนปริมาณจากสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เป็นสารละลายไฮดรอกไซด์ โดยเพิ่มปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแน่ใจว่าพีเอชของสารละลายทั้งหมดในขวดเขย่าเพิ่มขึ้นจนอยู่ประมาณ 10
6. นำขวดทั้งหมดไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
7. วัดพีเอชของสารละลายในแต่ละขวด
8. คำนวณค่าประจุบนพื้นผิวดังกล่าวจากสูตรต่อไปนี้

$$\text{ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิว (C/m}^2\text{)} = \frac{\{[\text{HCl}]_{\text{add}} - [\text{NaOH}]_{\text{add}} - [\text{H}^+] + [\text{OH}^-]\} \times 96500}{w \times A}$$

เมื่อ  $[\text{HCl}]_{\text{add}}$  = ความเข้มข้นของไฮโดรคลอริกที่เติมลงไป (โมลต่อลิตร)

$[\text{NaOH}]_{\text{add}}$  = ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เติมลงไป (โมลต่อลิตร)

$[\text{H}^+]$  = ความเข้มข้นของโปรตอน (โมลต่อลิตร) คำนวณจาก  $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$

$[\text{OH}^-]$  = ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (โมลต่อลิตร) คำนวณจาก

$$\text{pOH} = -\log [\text{OH}^-] \text{ และ } \text{pOH} = 14 - \text{pH}$$

w = น้ำหนักของตัวกลาง (กรัม)

A = พื้นที่ผิวของตัวกลาง (ตารางเมตรต่อกรัม)

ตารางที่ ข-1 ผลการวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) ของกากโซดาไลต์ ด้วยวิธีไทเทรตด้วยกรด- ด่าง นำปราศจากไอออนที่ผสมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อให้ได้ค่าความแรงไอออน 0.002 โมลต่อลิตร

ปริมาณ NaOH (ml)	NaOH ที่เติม (M)	ค่า pH	$\text{H}^+$ (M)	$\text{OH}^-$ (M)	ค่าประจุ ( $\text{C}/\text{m}^2$ )	ปริมาณ HCl (ml)	HCl ที่เติม (M)	ค่า pH	$\text{H}^+$ (M)	$\text{OH}^-$ (M)	ค่าประจุ ( $\text{C}/\text{m}^2$ )
0	0	9.2	6.309E-10	1.58E-05	0.139	0	0	9.2	6.309E-10	1.584E-05	0.139
0.1	0.0001	9.3	5.011E-10	2E-05	-0.704	0.1	0.0001	9.1	7.943E-10	1.258E-05	0.990
0.2	0.0002	9.4	3.981E-10	2.51E-05	-1.539	0.2	0.0002	9.0	0.000000001	0.00001	1.848
0.3	0.0003	9.5	3.162E-10	3.16E-05	-2.362	0.4	0.0004	8.8	1.584E-09	6.309E-06	3.576
0.5	0.0005	9.6	2.511E-10	3.98E-05	-4.050	0.6	0.0006	8.6	2.511E-09	3.981E-06	5.315
1	0.001	10.4	3.981E-11	0.000251	-6.590	1	0.001	7.8	1.584E-08	6.309E-07	8.806
2	0.002	11.1	7.943E-12	0.001259	-6.522	2	0.002	7.2	6.309E-08	1.584E-07	17.603
						3	0.003	6.9	1.258E-07	7.943E-08	26.403
						5	0.005	5.8	1.584E-06	6.309E-09	43.992
						8	0.008	5.3	5.011E-06	1.995E-09	70.365
						11	0.011	4.2	6.309E-05	1.584E-10	96.258

ตารางที่ ข-2 ผลการวิเคราะห์หาค่า Point of Zero Charge ( $\text{pH}_{\text{PZC}}$ ) ของซีไอไลต์เอ ด้วยวิธีไทเทรตด้วยกรด- ด่าง นำปราศจากไอออนที่ผสมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เพื่อให้ได้ค่าความแรงไอออน 0.002 โมลต่อลิตร

ปริมาณ NaOH (ml)	NaOH ที่เติม (M)	ค่า pH	$\text{H}^+$ (M)	$\text{OH}^-$ (M)	ค่าประจุ ( $\text{C}/\text{m}^2$ )	ปริมาณ HCl (ml)	HCl ที่เติม (M)	ค่า pH	$\text{H}^+$ (M)	$\text{OH}^-$ (M)	ค่าประจุ ( $\text{C}/\text{m}^2$ )
0	0	9.8	1.584E-10	6.31E-05	2.129	0	0	9.8	1.584E-10	6.309E-05	2.129
0.1	0.0001	9.9	1.258E-10	7.94E-05	-0.694	0.2	0.0002	9.5	3.162E-10	3.162E-05	7.816
0.2	0.0002	10.2	6.309E-11	0.000158	-1.400	0.6	0.0006	8.6	2.511E-09	3.981E-06	20.381
0.3	0.0003	10.3	5.011E-11	0.0002	-3.390	1	0.001	6.8	1.584E-07	6.309E-08	33.742
0.5	0.0005	10.6	2.511E-11	0.000398	-3.438	2	0.002	5.5	3.162E-06	3.162E-09	67.384
1	0.001	10.8	1.584E-11	0.000631	-12.453	3	0.003	4.7	1.995E-05	5.011E-10	100.563
2	0.002	11.2	6.309E-12	0.001585	-14.008	6	0.006	3.5	0.000316	3.162E-11	191.8024



ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือ FTIR และ Surface Area Analyzer

## การเตรียมตัวกลางเพื่อวิเคราะห์ FTIR

**หลักการ :** วิเคราะห์โดยใช้ตัวกลางผสมกับ KBr ตาม Ghoul, Bacquet และ Morcellet, 2003  
อ้างถึงในจรัรัตน์ ทองทวย, 2548

### ขั้นตอนในการวิเคราะห์

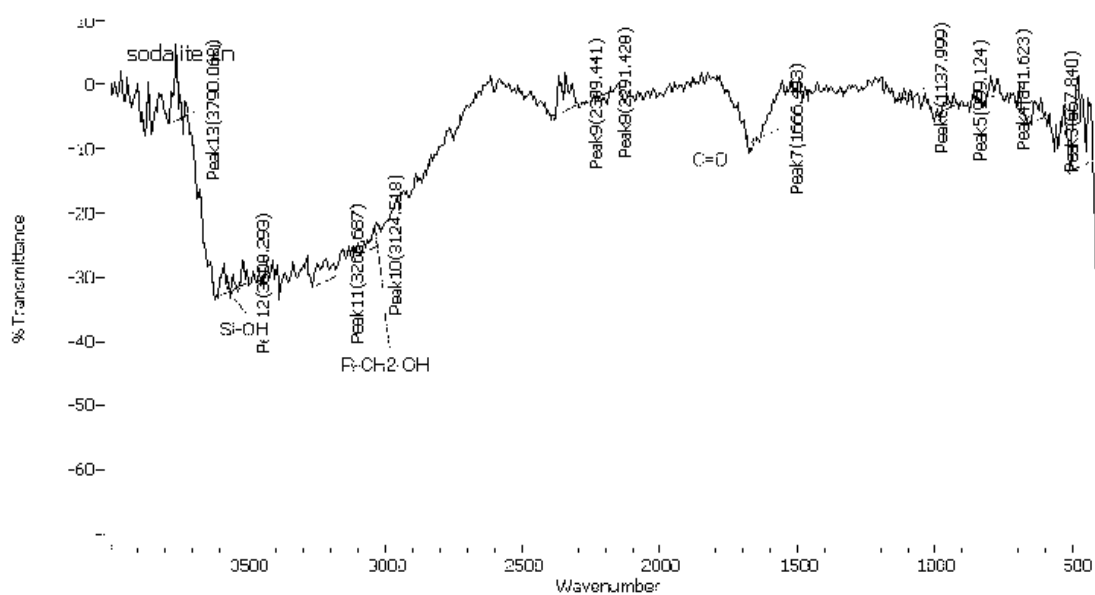
การทดลองนี้เป็นการวิเคราะห์หาลักษณะของหมู่ฟังก์ชันบนตัวกลางด้วยการแสดงผลเป็นพีคช่วงความยาวคลื่นต่างๆ กัน โดย

#### การเตรียมตัวอย่าง

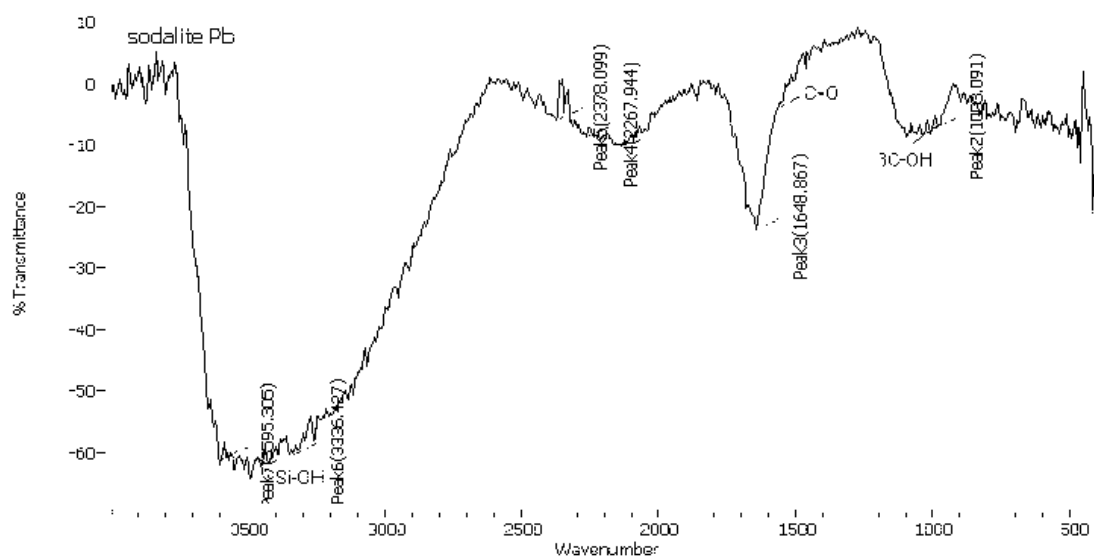
1. ใช้อัตราส่วน ตัวอย่าง : KBr = 1: 50 เท่า
2. นำตัวอย่างที่จะวิเคราะห์และ KBr มาบดให้ละเอียด
3. นำไปอบที่ 150 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที
4. นำไปชั่งให้ได้ปริมาณที่ต้องการ แล้วผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน
5. นำไปอบที่ 150 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที เพื่อเตรียมไปวิเคราะห์

#### การทดลอง

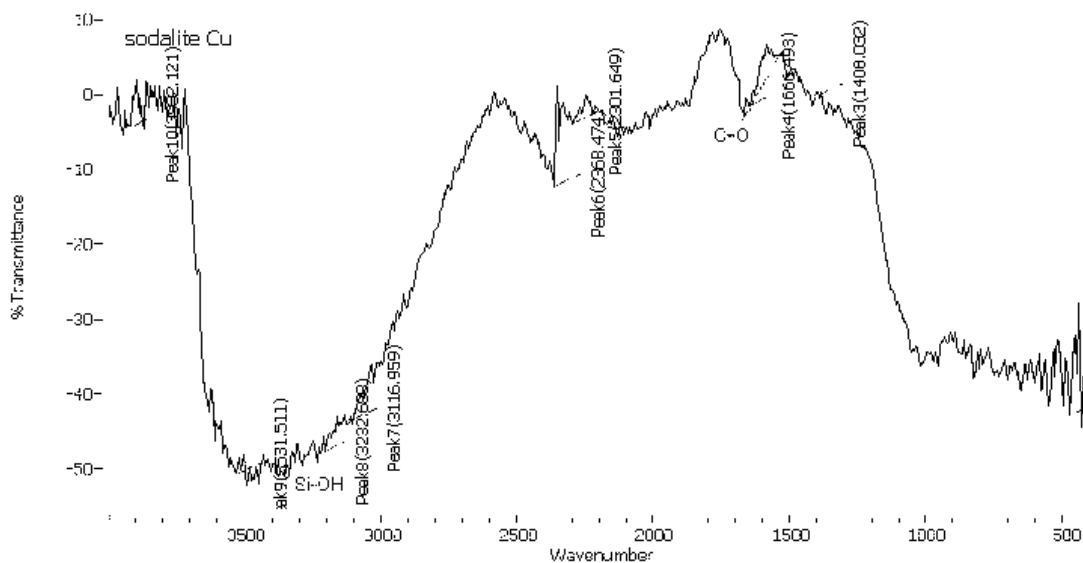
1. ใช้ KBr บดละเอียด เป็นสารสอบเทียบ (Blank) โดยจะใส่ในหัวบรรจุตัวอย่างของเครื่องตัวอย่างโดยอัดให้แน่นและปาดให้เรียบ ใส่ไว้ในที่วางตัวอย่างตำแหน่งที่ 1 เพื่อเป็นเครื่องแปลค่าเป็น Background
2. นำตัวอย่างที่เตรียมไว้มาใส่ในหัวบรรจุตัวอย่างของเครื่องตัวอย่าง โดยอัดให้แน่นและปาดให้เรียบ วางในตำแหน่งถัดจากตำแหน่งที่ 1 ออกไปเรื่อยๆ ตามจำนวนตัวอย่างที่มีอยู่
3. ทำการ Scan ตัวอย่างตามวิธีใช้เครื่อง FTIR



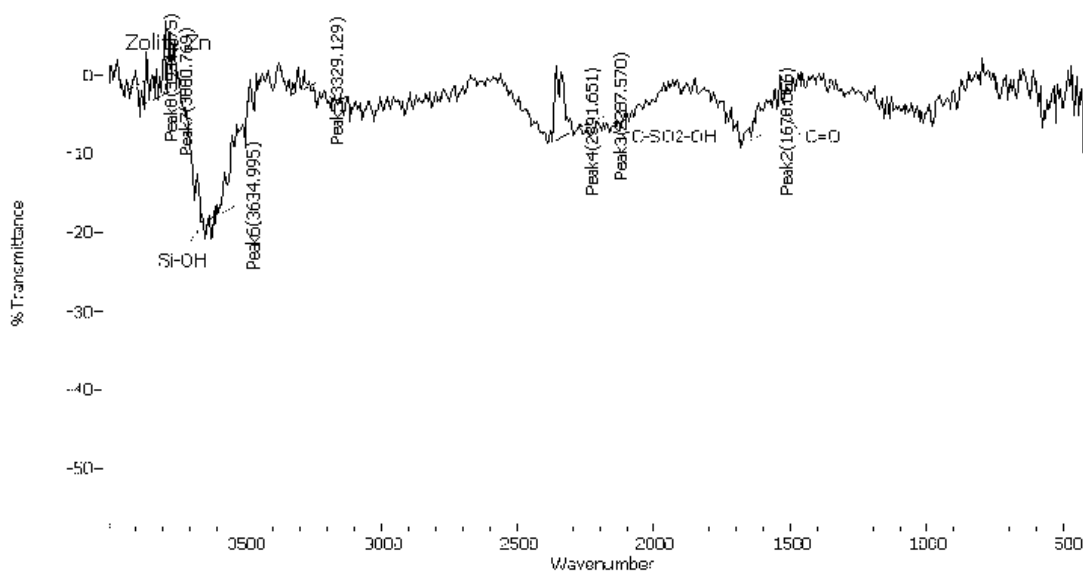
ภาพที่ ค-1 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์กากโซดาไลต์หลังผ่านการดูดซับสังกะสี



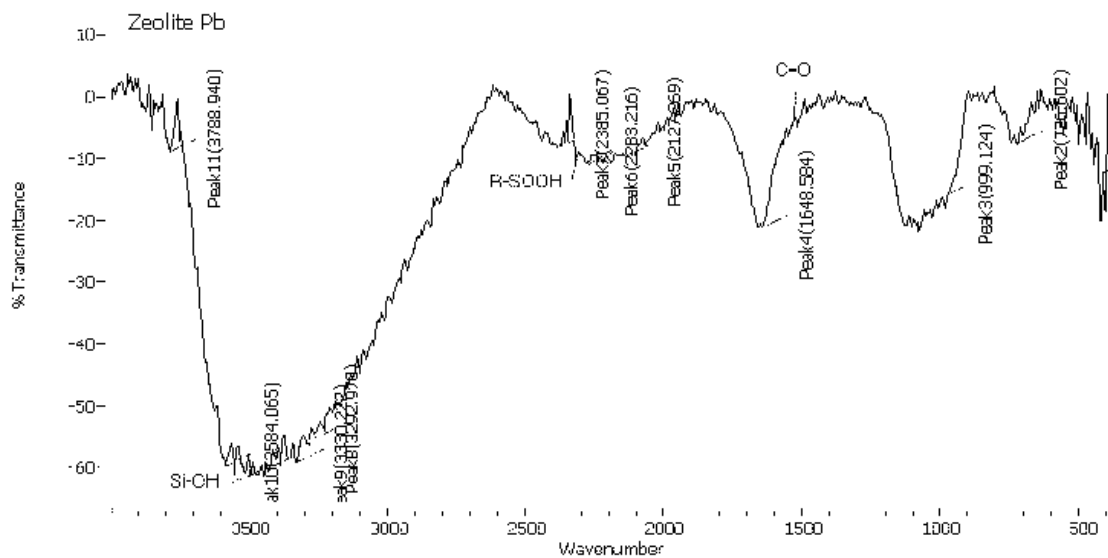
ภาพที่ ค-2 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์กากโซดาไลต์หลังผ่านการดูดซับตะกั่ว



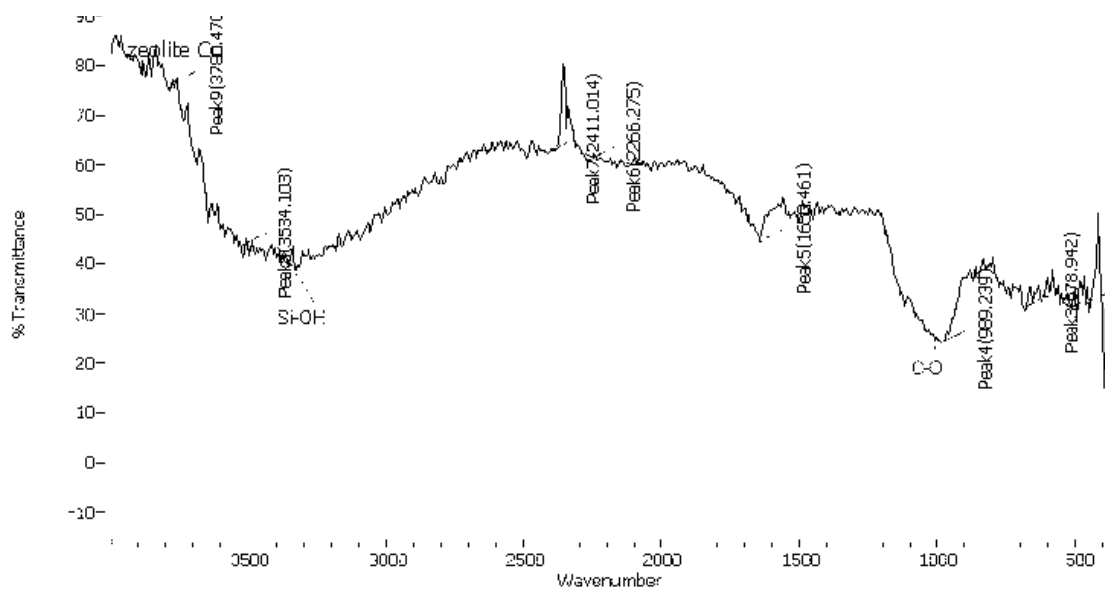
ภาพที่ ค-3 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์กากโซดาไลต์หลังผ่านการดูดซับทองแดง



ภาพที่ ค-4 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซีโอไลต์เอหลังจากการดูดซับสังกะสี



ภาพที่ ค-5 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซีโอไลต์เอหลังจากการดูดซับตะกั่ว



ภาพที่ ค-6 ผลจาก FTIR ในการวิเคราะห์ซีโอไลต์เอหลังจากการดูดซับทองแดง

**ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอ**  
**ด้วยเครื่อง Surface area analysis**

ตารางที่ ค-1 ผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของกากโซดาไลต์และซีโอไลต์เอด้วยเครื่อง Surface area analysis

ตัวอย่าง	วิเคราะห์วันที่ 24/12/2553	วิเคราะห์วันที่ 27/12/2553
	กากโซดาไลต์	ซีโอไลต์เอ
พารามิเตอร์		
Surface Area	109.6438 m <sup>2</sup> /g	26.8881 m <sup>2</sup> /g
Pore Volume	0.213337 cm <sup>3</sup> /g	0.054524 cm <sup>3</sup> /g
Pore Size	7.78292 nm	7.62670 nm

หมายเหตุ : วิเคราะห์ที่ศูนย์วิจัยภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ผลการทดลองการดูดซับโลหะหนักโดยการทดลองแบบคอลัมน์

ตารางที่ ง-1 ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดสังกะสี ความเข้มข้นเริ่มต้น 27.057 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ปริมาตรเบด (BV) ( $V_F/V_R$ )
0	0	0	0	0
15	0.68	0.025	45	89.52
30	1.41	0.052	90	179.05
45	8.09	0.299	135	268.57
60	19.44	0.718	180	358.09
75	22.30	0.824	225	447.62
90	24.72	0.913	270	537.15
105	22.56	0.833	315	626.67
120	24.03	0.888	360	716.19
135	23.17	0.856	405	805.72
150	23.33	0.862	450	895.24
165	23.51	0.869	495	984.77
180	22.04	0.814	540	1074.29
195	23.42	0.865	585	1163.82
210	20.22	0.747	630	1253.34
225	23.51	0.868	675	1342.87
240	22.38	0.827	720	1432.39
255	22.73	0.840	765	1521.91
270	20.48	0.757	810	1611.44
285	22.38	0.827	855	1700.97
300	22.82	0.843	900	1790.49
315	23.08	0.853	945	1880.02
330	23.59	0.872	990	1969.54
345	23.16	0.856	1035	2059.07
360	24.46	0.904	1080	2148.59



ตารางที่ ง-1 (ต่อ) ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดสังกะสี ความเข้มข้นเริ่มต้น 27.057 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ปริมาตรเบด (BV) ( $V_F/V_R$ )
375	22.91	0.846	1125	2238.11
390	25.24	0.933	1170	2327.64
405	24.55	0.907	1215	2417.16
420	23.42	0.865	1260	2506.69
435	23.77	0.878	1305	2596.21
450	24.29	0.897	1350	2685.73
465	24.29	0.897	1395	2775.26
480	25.59	0.945	1440	2864.79
495	24.81	0.917	1485	2954.31
510	24.60	0.909	1530	3043.84
525	25.76	0.952	1575	3133.36
540	25.76	0.952	1620	3222.89
555	24.98	0.923	1665	3312.41
570	24.89	0.920	1710	3401.94
585	24.95	0.922	1755	3491.46
600	25.50	0.942	1800	3580.99

ตารางที่ ง-2 ผลการทดลองคอลัมน์ของซีโอดีเอในการกำจัดสังกะสี ความเข้มข้นเริ่มต้น 36.258 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ปริมาตรเบด (BV) ( $V_F/V_R$ )
0	0	0	0	0
15	0.023	0.000634	45	89.52
30	0.557	0.015362	90	179.05
45	3.325	0.091704	135	268.57
60	5.934	0.16366	180	358.09
75	5.852	0.161399	225	447.62
90	8.582	0.236693	270	537.15
105	11.034	0.304319	315	626.67
120	16.455	0.453831	360	716.19
135	26.913	0.742264	405	805.72
150	28.421	0.783855	450	895.24
165	25.353	0.699239	495	984.77
180	28.474	0.785316	540	1074.29
195	30.043	0.82859	585	1163.82
210	28.84	0.795411	630	1253.34
225	27.988	0.771912	675	1342.87
240	29.891	0.824397	720	1432.39
255	32.797	0.904545	765	1521.91
270	28.979	0.799244	810	1611.44
285	31.467	0.867864	855	1700.97
300	32.142	0.88648	900	1790.49

ตารางที่ ง-2 (ต่อ) ผลการทดลองคอลัมน์ของซีโอดีเอในการกำจัดสังกะสี ความเข้มข้นเริ่มต้น 36.258 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ค่า Bed volume (BV) ( $V_F/V_R$ )
315	28.04	0.773347	945	1880.02
330	27.69	0.763694	990	1969.54
345	33.584	0.926251	1035	2059.07
360	31.464	0.867781	1080	2148.59
375	32.39	0.89332	1125	2238.11
390	31.401	0.866043	1170	2327.64
405	33.541	0.925065	1215	2417.16
420	32.072	0.88455	1260	2506.69
435	32.002	0.882619	1305	2596.21
450	30.863	0.851205	1350	2685.73
465	31.952	0.88124	1395	2775.26
480	30.481	0.84067	1440	2864.79
495	32.281	0.890314	1485	2954.31
510	32.908	0.907607	1530	3043.84
525	33.459	0.922803	1575	3133.36
540	32.968	0.909261	1620	3222.89
555	33.141	0.914033	1665	3312.41
570	33.047	0.91144	1710	3401.94
585	33.782	0.931712	1755	3491.46
600	32.843	0.905814	1800	3580.99

ตารางที่ ง-3 ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 33.377 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 4 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ค่า Bed volume (BV) ( $V_F/V_R$ )
0	0	0	0	0
15	3.809	0.114121	45	89.52
30	12.489	0.37418	90	179.05
45	15.085	0.451958	135	268.57
60	22.113	0.662522	180	358.09
75	23.671	0.709201	225	447.62
90	25.746	0.77137	270	537.15
105	24.888	0.745663	315	626.67
120	25.47	0.7631	360	716.19
135	26.72	0.800551	405	805.72
150	26.477	0.793271	450	895.24
165	29.115	0.872307	495	984.77
180	29.266	0.876831	540	1074.29
195	28.593	0.856668	585	1163.82
210	29.509	0.884112	630	1253.34
225	30.02	0.899422	675	1342.87
240	29.515	0.884292	720	1432.39
255	29.78	0.892231	765	1521.91
270	30.651	0.918327	810	1611.44
285	28.865	0.864817	855	1700.97
300	29.343	0.879138	900	1790.49

ตารางที่ ง-3 (ต่อ) ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 33.377 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที ที่พีเอช 4 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มิลลิลิตร ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ปริมาตรเบด (BV) ( $V_F/V_R$ )
315	29.778	0.892171	945	1880.02
330	30.231	0.905743	990	1969.54
345	31.844	0.95407	1035	2059.07
360	31.672	0.948917	1080	2148.59
375	31.98	0.958145	1125	2238.11
390	31.436	0.941846	1170	2327.64
405	31.612	0.947119	1215	2417.16
420	32.335	0.968781	1260	2506.69
435	31.212	0.935135	1305	2596.21
450	31.406	0.940947	1350	2685.73

ตารางที่ ง-4 ผลการทดลองคอลัมน์ของซีโอดีเอในการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 36.258 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 4 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ปริมาตรเบด (BV) ( $V_F/V_R$ )
0	0	0	0	0
15	4.57	0.136921	45	89.52
30	5.801	0.173802	90	179.05
45	8.07	0.241783	135	268.57
60	12.667	0.379513	180	358.09
75	15.359	0.460167	225	447.62
90	17.856	0.534979	270	537.15
105	17.031	0.510262	315	626.67
120	19.822	0.593882	360	716.19
135	21.847	0.654553	405	805.72
150	22.74	0.681307	450	895.24
165	23.63	0.707973	495	984.77
180	25.942	0.777242	540	1074.29
195	25.374	0.760224	585	1163.82
210	27.205	0.815082	630	1253.34
225	26.553	0.795548	675	1342.87
240	26.062	0.780837	720	1432.39
255	25.882	0.775444	765	1521.91
270	28.082	0.841358	810	1611.44
285	30.571	0.91593	855	1700.97
300	30.186	0.904395	900	1790.49

ตารางที่ ง-4 (ต่อ) ผลการทดลองคอลัมน์ของซีโอไลต์เอในการกำจัดตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้น 36.258 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 4 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ค่า Bed volume (BV) ( $V_F/V_R$ )
315	30.849	0.924259	945	1880.02
330	30.71	0.920095	990	1969.54
345	30.711	0.920125	1035	2059.07
360	32.624	0.97744	1080	2148.59
375	32.029	0.959613	1125	2238.11
390	32.437	0.971837	1170	2327.64
405	32.801	0.982743	1215	2417.16
420	32.859	0.98448	1260	2506.69
435	32.476	0.973005	1305	2596.21
450	32.701	0.979747	1350	2685.73

ตารางที่ ง-5 ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดทองแดง ความเข้มข้นเริ่มต้น 10.493 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ปริมาตรเบด (BV) ( $V_F/V_R$ )
0	0	0	0	0
15	2.569	0.24483	45	89.52
30	2.23	0.212523	90	179.05
45	4.062	0.387115	135	268.57
60	5.312	0.506242	180	358.09
75	4.617	0.440008	225	447.62
90	4.827	0.460021	270	537.15
105	4.779	0.455446	315	626.67
120	5.707	0.543886	360	716.19
135	6.279	0.598399	405	805.72
150	6.814	0.649385	450	895.24
165	6.696	0.63814	495	984.77
180	6.842	0.652054	540	1074.29
195	6.974	0.664634	585	1163.82
210	7.104	0.677023	630	1253.34
225	6.918	0.659297	675	1342.87
240	6.746	0.642905	720	1432.39
255	7.091	0.675784	765	1521.91
270	7.509	0.71562	810	1611.44
285	8.224	0.783761	855	1700.97
300	8.285	0.789574	900	1790.49



ตารางที่ ง-5 (ต่อ) ผลการทดลองคอลัมน์ของกากโซดาไลต์ในการกำจัดทองแดง ความเข้มข้นเริ่มต้น 10.493 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรขั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ปริมาตรเบด (BV) ( $V_F/V_R$ )
315	8.596	0.819213	945	1880.02
330	9.044	0.861908	990	1969.54
345	9.344	0.890498	1035	2059.07
360	9.416	0.89736	1080	2148.59
375	9.626	0.917373	1125	2238.11
390	9.785	0.932526	1170	2327.64
405	9.706	0.924998	1215	2417.16
420	10.187	0.970838	1260	2506.69
435	10.243	0.976175	1305	2596.21
450	10.111	0.963595	1350	2685.73
465	10.007	0.953683	1395	2775.26
480	10.092	0.961784	1440	2864.79
495	10.055	0.958258	1485	2954.31
510	10.172	0.969408	1530	3043.84

ตารางที่ ง-6 ผลการทดลองคอลัมน์ของซีโอไลต์เอในการกำจัดทองแดง ความเข้มข้นเริ่มต้น 13.265 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ค่า Bed volume (BV) ( $V_F/V_R$ )
0	0	0	0	0
15	1.944	0.146551	45	89.52
30	2.709	0.204222	90	179.05
45	3.751	0.282774	135	268.57
60	8.575	0.646438	180	358.09
75	8.53	0.643046	225	447.62
90	10.087	0.760422	270	537.15
105	10.649	0.802789	315	626.67
120	10.413	0.784998	360	716.19
135	11.391	0.858726	405	805.72
150	11.356	0.856087	450	895.24
165	11.202	0.844478	495	984.77
180	11.364	0.856691	540	1074.29
195	10.914	0.822767	585	1163.82
210	11.13	0.83905	630	1253.34
225	11.111	0.837618	675	1342.87
240	11.838	0.892424	720	1432.39
255	11.026	0.83121	765	1521.91
270	11.406	0.859857	810	1611.44
285	11.736	0.884734	855	1700.97
300	11.291	0.851187	900	1790.49

ตารางที่ ง-6 (ต่อ) ผลการทดลองคอลัมน์ของซีโอดีเอในการกำจัดทองแดง ความเข้มข้นเริ่มต้น 13.265 มก./ล. อัตราการไหล 3 มล./นาที ที่พีเอช 5 ปริมาตรชั้นตัวกลาง 0.503 มล. ( $V_R$ )

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (มิลลิกรัม/ลิตร)	$C/C_0$	ปริมาตรน้ำที่ไหลผ่าน (มิลลิลิตร) ( $V_F$ )	ค่า Bed volume (BV) ( $V_F/V_R$ )
315	11.406	0.859857	945	1880.02
330	11.736	0.884734	990	1969.54
345	11.291	0.851187	1035	2059.07
360	11.433	0.861892	1080	2148.59
375	11.87	0.894836	1125	2238.11
390	12.88	0.970976	1170	2327.64
405	13.022	0.981681	1215	2417.16
420	12.705	0.957784	1260	2506.69
435	11.968	0.902224	1305	2596.21
450	12.771	0.962759	1350	2685.73
465	12.926	0.974444	1395	2775.26
480	12.738	0.960271	1440	2864.79

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิมลพันธ์ อุดทาพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 17 เดือนกันยายน พ.ศ.2529 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อใน หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2552

### การเผยแพร่วิทยานิพนธ์

- [1] พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์ เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช “การกำจัดโลหะหนัก โดยใช้กากโซดาไลต์” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการด้านเหมืองแร่โลหการและปิโตรเลียม ครั้งที่ 9 เรื่องการสำรวจและการใช้ทรัพยากรธรณีเพื่อสิ่งแวดล้อมที่ดี วันที่ 13-14 มกราคม 2554 โรงแรมมณเฑียร ริเวอร์ไซด์ กรุงเทพฯ.
- [2] พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์ เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช “การกำจัดสังกะสี โดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว” เอกสารประกอบการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 20 วันที่ 2-3 กุมภาพันธ์ 2554 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา จังหวัดนครปฐม : หน้า 67.
- [3] พิมลพันธ์ อุดทาพันธ์ เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ และ ดาวัลย์ วิวรรณนะเดช “การกำจัดตะกั่วโดยใช้ซีโอไลต์สังเคราะห์จากกากซีลิกา-อะลูมินาที่ใช้แล้ว” เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมและการจัดการสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 3. 14-15 มีนาคม 2554 ณ อาคารมหามกุฏ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย : หน้า 48.
- [4] Pimonpan Uttapan Petchporn Chawakitchareon and Dawan Wiwattanadate. “Sorption of Copper from Aqueous Solution by using Sodalite”. Proceedings of the 10<sup>th</sup> Conference on the National Environmental, BP Samila Beach and Resort Hotel, Songkhla, Thailand. 23-25 March, 2011: 24 R1-09.