

การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยถ้ำลอย  
ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

REMOVAL OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL  
WASTEWATER BY TREATED FLY ASH



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-665-7

การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเถ้าลอย  
ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

REMOVAL OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL  
WASTEWATER BY TREATED FLY ASH



ชุตินา เสพย์ธรรม  
CHUTIMA SEPTHUM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีประยุกต์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-665-7

เลขที่.....  
ทะเบียน..... 35171  
เดือน, ปี 2 3 ส.ค. 2543

นี้ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

REMOVAL OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER BY  
TREATED FLY ASH



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED CHEMISTRY  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2000

ISBN 974-622-665-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



COPYRIGHT 2000

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิฉะนั้นผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเถ้าลอยที่ผ่านการ  
ปรับปรุงคุณภาพ

REMOVAL OF HEAVY METALS FROM INDUSTRIAL  
WASTEWATER BY TREATED FLY ASH

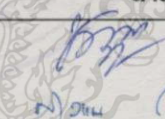

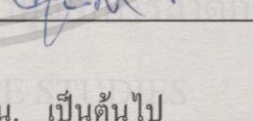
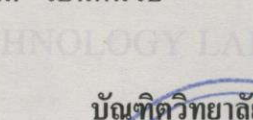
ชื่อนักศึกษา นางสาวศุติมา เสพย์ธรรม

รหัสประจำตัว 39065107

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีประยุกต์

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ดร.ชมพูนุท ไชยรักษ์	
ผศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์	
รศ.อรุณี กงศักดิ์ไพศาล	
ผศ.ดร.สุนทร พูนพิพัฒน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 23 ธันวาคม 2542 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ ห้อง 424 ห้องประชุม-สัมมนา

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส สัจจวรติสภ์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 15 เดือน ธันวาคม พ.ศ. ๒๕๔๒

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเถ้าลอยที่ผ่าน การปรับปรุงคุณภาพ
นักศึกษา	นางสาวชุตินา เสพย์ธรรม
รหัสประจำตัว	39065107
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีประยุกต์
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการนำ Fly Ash ซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยนำมารีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ และหาค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนจากนั้นนำ Fly Ash ที่ผ่านการรีฟลักซ์มาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

จากการศึกษาพบว่า Treated Fly Ash ที่ผ่านการรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ เวลา 24 ชั่วโมง มีค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงถึงเกือบ 200 meq/100g ซึ่งสูงกว่า Untreated Fly Ash ถึง 24 เท่า นอกจากนี้ยังพบว่า Treated Fly Ash ที่ได้มีลักษณะเป็นรูพรุน มีความเป็นผลึกมากขึ้น และเกิดการเปลี่ยนเฟสไปเป็น Zeolite Na-P และ Hydroxy-Sodalite มีปริมาณของ  $\text{Na}_2\text{O}$  ใน Treated Fly Ash เพิ่มขึ้นมากกว่า Untreated Fly Ash ถึง 6 เท่า

สำหรับการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ด้วย Treated Fly Ash พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักชนิดต่างๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ การกำจัดตะกั่ว มีปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร และเท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร สำหรับนิกเกิลและแคดเมียม และพบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดเท่ากับ 5 ระยะเวลาเขย่าประมาณ 30 นาที ส่วนค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักจะไม่ค่อยมีผลต่อการกำจัดตะกั่วและนิกเกิล แต่สำหรับแคดเมียมพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดก็จะสูงขึ้นด้วย เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก พบว่า Treated Fly Ash สามารถกำจัดตะกั่วได้สูงที่สุด รองลงมาคือ นิกเกิลและแคดเมียม ตามลำดับ

สำหรับผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะต่ำกว่าในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีแอนไอออนอยู่ในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง ส่วนผลของการกำจัดโลหะหนักเมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิด พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะรวมอีกชนิดหนึ่งเพิ่มขึ้น

Thesis Title	Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Treated Fly Ash
Student	Miss Chutima Septhum
Student ID.	39065107
Degree	Master of Science
Programme	Applied Chemistry
Year	2000
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr.Suwan Chaiyasith

### ABSTRACT

Fly ash, the most waste from Mea-Moh power plant, was refluxed with NaOH and determined for cation exchange capacity (CEC). Treated fly ash was used as the adsorbent for removing heavy metals i.e. Pb, Ni and Cd from wastewater.

The CEC of treated fly ash, which refluxed with 1.0 M NaOH 24 hrs, was increased (up to 200 meq/100g) 24 times more than untreated fly ash. The porosity and crystallinity of treated fly ash were also increased and convert into zeolite Na-P and hydroxy-sodalite.  $\text{Na}_2\text{O}$  in treated fly ash was increased 6 times of untreated fly ash.

The efficiency of removal heavy metals from wastewater depend on parameters as the following results: the optimum suspension density for removal of lead was 0.5 g/l and 1.25 g/l for nickel and cadmium. The optimum pH for heavy metals removal was 5 and contact time was 30 minutes. But the removal efficiency was not affected by initial concentration of Pb and Ni and it was found that increased when initial concentration increased for cadmium. By comparison between heavy metals, the removal efficiency of Pb was higher than Ni and Cd, respectively.

Efficiency of removal heavy metals in industrial wastewater was found lower than in synthesis wastewater. The efficiency of removal heavy metals was decreased when concentration of anion was increased. The removal of metal was decreased when concentration of another two metals was increased.

# กิตติกรรมประกาศ

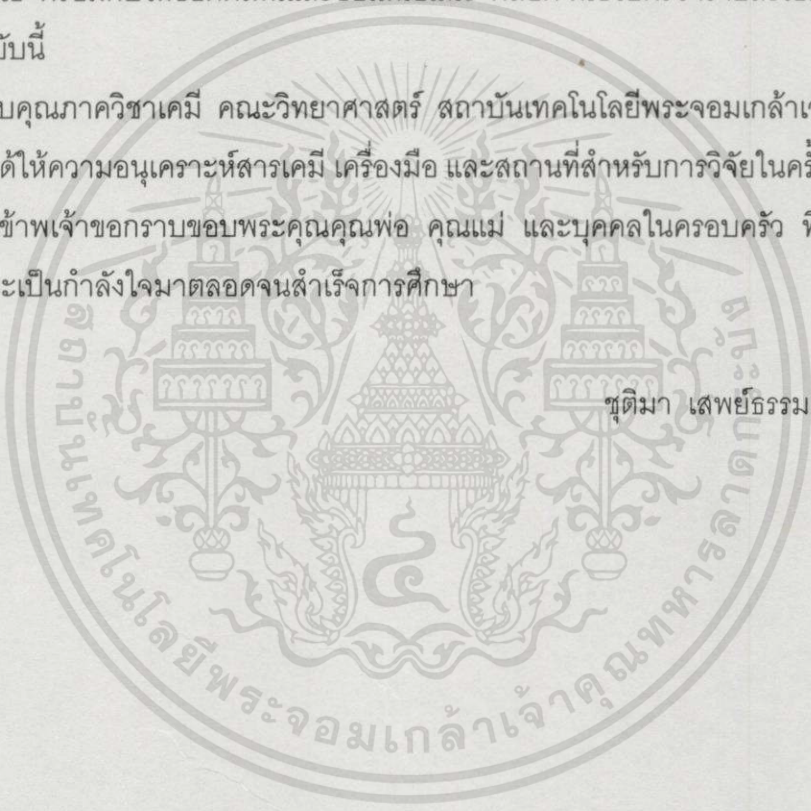
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาและแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่ดีในช่วงการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา จาก ผศ. ดร.สุวรรณ ไชยสิทธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.อรุณี คงศักดิ์ไพศาล และ ผศ.ดร. สุนทร พูนพิพัฒน์ ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่ายิ่งในการเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจรายละเอียดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือ และสถานที่สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัว ที่ให้ความรัก ความเข้าใจและเป็นกำลังใจมาตลอดจนสำเร็จการศึกษา

สุติมา เสพยัทธิธรรม



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	X
สารบัญรูป .....	XII
บทที่ 1 ความสำคัญ และที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 โลหะหนัก.....	5
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	9
2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation).....	9
2.2.1.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์.....	9
2.2.1.2 การตกตะกอนซัลไฟด์.....	10
2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange).....	10
2.2.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis).....	10
2.2.4 การระเหย (Evaporation).....	11
2.2.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis) .....	11
2.2.6 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery).....	11
2.2.7 การดูดซับ (Adsorption).....	11
2.3 การดูดซับ (Adsorption).....	12
2.3.1 หลักการ.....	12
2.3.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer).....	13

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.1 กลไกการดูดซับ (Faust and Aly, 1987).....	13
2.3.2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer).....	14
2.3.3 การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibria).....	15
2.3.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm).....	15
2.3.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ บี อี ที (Brunauer-Emmett-Teller, BET, Adsorption Isotherm)...	16
2.3.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)..	17
2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ.....	18
2.3.4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area).....	18
2.3.4.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Nature of Adsorbate).....	19
2.3.4.3 ความปั่นป่วน (Mixing Speed).....	19
2.3.4.4 เวลาสัมผัส (Contact Time).....	19
2.3.4.5 ค่าพีเอช (pH).....	19
2.3.4.6 อุณหภูมิ (Temperature).....	20
2.4 ความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC).....	20
2.5 เถ้าลอย (Fly Ash).....	21
2.5.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย.....	21
2.5.2 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย.....	22
2.5.3 ประโยชน์ของเถ้าลอย.....	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	28
3.2 ตัวอย่างและสารเคมี.....	29
3.3 การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของ Fly Ash.....	30

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	31
3.4.1 การหาขนาดของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	31
3.4.2 การศึกษาลักษณะรูปร่างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	31
3.4.3 การศึกษาความเป็นผลึกของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	31
3.4.4 การศึกษาโครงสร้างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash...	31
3.4.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	32
3.5 การศึกษากำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์.....	32
3.5.1 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	32
3.5.1.1 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่ว.....	33
3.5.1.2 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล.....	33
3.5.1.3 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม.....	33
3.5.1.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	33
3.5.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักต่างๆ กัน.....	34
3.5.2.1 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วต่างๆ กัน.....	34
3.5.2.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดนิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลต่างๆ กัน.....	34

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.2.3 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัด แคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมต่างๆ กัน.....	34
3.5.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการกำจัดโลหะหนัก.....	34
3.6 การศึกษาการคายออกจากผิว Treated Fly Ash ของโลหะหนัก.....	35
3.7 การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมโดยใช้ Treated Fly Ash.....	35
3.7.1 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม.....	35
3.7.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วย Treated Fly Ash.....	36
3.8 การศึกษาผลของแอนไอออนในการกำจัดโลหะหนัก.....	36
3.8.1 การกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$ .....	37
3.8.2 การกำจัดนิกเกิลเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$ .....	37
3.8.3 การกำจัดแคดเมียมเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$ .....	37
3.9 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิด.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	38
4.1 ผลการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของ Fly Ash.....	38
4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	39
4.2.1 การหาขนาดของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	39
4.2.2 ลักษณะรูปร่างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	40
4.2.3 ผลการศึกษาค่าความเป็นผลึกของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash .....	42
4.2.4 ผลการศึกษาคโครงสร้างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	45
4.2.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	47

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 ผลการศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์.....	47
4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัด โลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	47
4.3.1.1 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมใน การกำจัดตะกั่ว.....	48
4.3.1.2 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมใน การกำจัดนิกเกิล.....	48
4.3.1.3 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมใน การกำจัดแคดเมียม.....	50
4.3.1.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	51
4.3.2 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดโลหะหนัก ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักต่างๆ กัน.....	54
4.3.2.1 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัด ตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์.....	54
4.3.2.2 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัด นิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์.....	58
4.3.2.3 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัด แคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	62
4.3.3 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิในการกำจัดโลหะหนัก.....	67
4.4 ผลการศึกษาการคายออกจากผิว Treated Fly Ash ของตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	67
4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม.....	68
4.6 ผลการศึกษาผลของแอนไอออนต่อการกำจัดตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	69
4.6.1 ผลการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$ .....	69

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.2 ผลการกำจัดนิกเกิลเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$ .....	70
4.6.3 ผลการกำจัดแคดเมียมเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$ .....	71
4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิด.....	73
4.7.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของตะกั่วต่างๆ กัน.....	73
4.7.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของนิกเกิลต่างๆ กัน.....	74
4.7.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและตะกั่ว เมื่อมีความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ กัน.....	74
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม .....	79
ภาคผนวก ก สมบัติของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	83
ภาคผนวก ข ปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน.....	85
ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์.....	88
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	101
ประวัติผู้เขียน.....	104

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณของเสียอันตราย แยกตามประเภทและปี.....	2
2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ (Dean et al. 1972).....	8
2.2 องค์ประกอบและลักษณะของเถ้าลอยลิกไนต์ (วารสารณ์ คุณาวรรากิจ. 2537).....	22
3.1 สภาวะของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	32
3.2 โปรแกรมการย่อยน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเครื่อง Microwave Digester.....	36
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash.....	47
4.2 พารามิเตอร์ของสมการแลงมัวร์สำหรับการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และ แคดเมียม ด้วย Treated Fly Ash.....	52
4.3 ปริมาณโลหะหนักที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัด (%) ที่อุณหภูมิต่างๆ.....	67
4.4 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกจาก Treated Fly Ash.....	68
4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมจากโรงงาน 2 แห่ง ในกรุงเทพมหานคร.....	69
ก.1 แสดงความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของ Treated Fly Ash เมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน.....	83
ก.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ ก) Untreated Fly Ash และ ข) Treated Fly Ash.....	84
ก.3 แสดงข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม.....	84
ข.1 แสดงปริมาณตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน.....	85
ข.2 แสดงปริมาณนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน.....	86
ข.3 แสดงปริมาณแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน.....	87
ค.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	88
ค.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	89

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค.3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	90
ค.4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	91
ค.5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	92
ค.6 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	93
ค.7 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	94
ค.8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	95
ค.9 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	96
ค.10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ.....	97
ค.11 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลเมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ.....	98
ค.12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ.....	99
ค.13 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของตะกั่วต่างๆ.....	100
ค.14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของนิเกิลต่างๆ.....	100
ค.15 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและนิเกิล เมื่อมีความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ.....	100
ง.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	101
ง.2 ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล.....	102

# สารบัญรูป

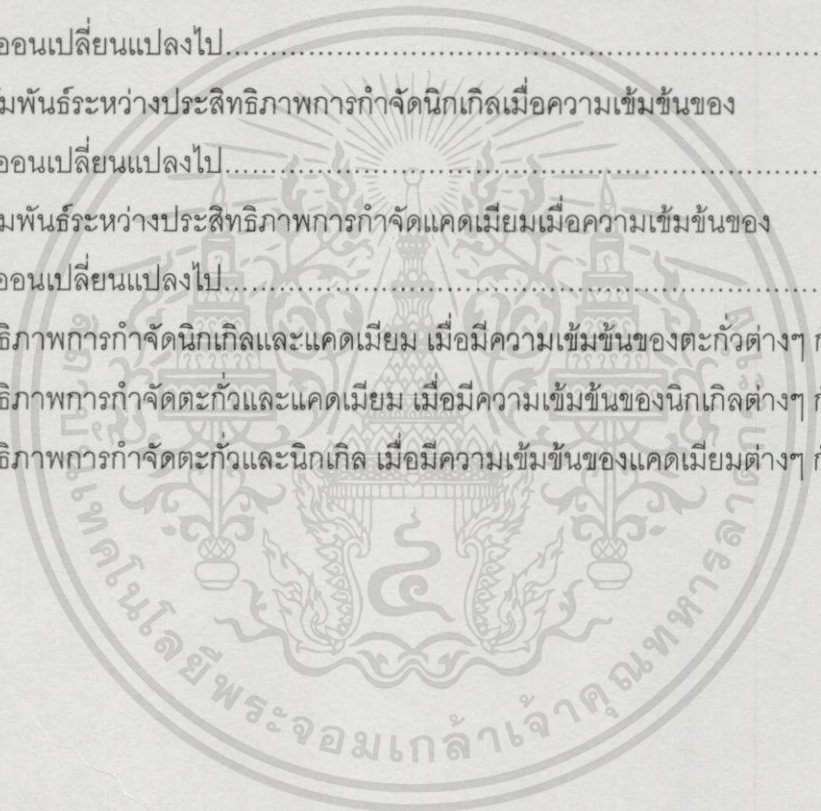
รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder. 1981).....	14
2.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน (Faust and Aly. 1987).....	15
2.3 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมแบบต่างๆ (Voice and Weber. 1983).....	18
3.1 ขั้นตอนการศึกษาการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย Treated Fly Ash.....	32
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับระยะเวลาใน การรีฟลักซ์เมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน.....	39
4.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ ก) Untreated Fly Ash ข) Treated Fly Ash.....	40
4.3 Scanning Electron Micrograph ของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash ก) Untreated Fly Ash ข) Treated Fly Ash 1.0 M NaOH 24 ชั่วโมง ค) Treated Fly Ash 3.5 M NaOH 24 ชั่วโมง ง) Treated Fly Ash 5.0 M NaOH 24 ชั่วโมง.....	41
4.4 XRD pattern ของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash ก) Untreated Fly Ash ข) Treated Fly Ash 1.0 M NaOH 24 ชั่วโมง ค) Treated Fly Ash 3.5 M NaOH 24 ชั่วโมง ง) Treated Fly Ash 5.0 M NaOH 24 ชั่วโมง.....	43
4.5 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash ก) Nujol ข) Untreated Fly Ash ค) Treated Fly Ash 1.0 M NaOH 24 ชั่วโมง ง) Treated Fly Ash 3.5 M NaOH 24 ชั่วโมง จ) Treated Fly Ash 5.0 M NaOH 24 ชั่วโมง.....	45
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับกับเวลาเมื่อใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน.....	49
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับกับเวลาเมื่อใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน.....	49
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับกับเวลาเมื่อใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน.....	50

# สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับกับปริมาณ Treated Fly Ash ที่สภาวะสมดุล.....	51
4.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของ Treated Fly Ash ในการดูดซับโลหะหนักใน น้ำเสียสังเคราะห์ ก) ตะกั่ว ข) นิกเกิล และ ค) แคดเมียม.....	53
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	54
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	55
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	56
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอชที่ความเข้มข้น เริ่มต้นของตะกั่วต่างๆ กัน.....	57
4.15 แสดงไดอะแกรมของ Lead Hydroxy Species ที่ค่าพีเอชต่างๆ (Fergusson, 1990)...	57
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	59
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	59
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	60
4.19 ความสัมพันธ์ ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลกับค่าพีเอชที่ความเข้มข้น เริ่มต้นของนิกเกิลต่างๆ กัน.....	61
4.20 แสดงไดอะแกรมของ Nickel Hydroxy Species ที่ค่าพีเอชต่างๆ.....	61
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	62
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับเวลา ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	63
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	64

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมกับค่าพีเอชที่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมต่างๆ กัน.....	65
4.25 แสดงไดอะแกรมของ Cadmium Hydroxy Species ที่ค่าพีเอชต่างๆ (Fergusson. 1990).....	65
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อความเข้มข้นของ แอนไอออนเปลี่ยนแปลงไป.....	70
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเมื่อความเข้มข้นของ แอนไอออนเปลี่ยนแปลงไป.....	71
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเมื่อความเข้มข้นของ แอนไอออนเปลี่ยนแปลงไป.....	72
4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของตะกั่วต่างๆ กัน.....	73
4.30 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของนิกเกิลต่างๆ กัน.....	74
4.31 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและนิกเกิล เมื่อมีความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ กัน.....	75



## บทที่ 1

# ความสำคัญ และที่มาของวิทยานิพนธ์

### 1.1 บทนำ

ปัจจุบันปัญหาโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล ฯลฯ ยังคงมีแนวโน้มว่าจะก่อให้เกิดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องมาจากการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม ซึ่งเป็นต้นเหตุที่ทำให้เกิดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยโลหะหนัก โดยโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณ นั้นและเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ทางห่วงโซ่อาหาร ทำให้เกิดภาวะที่ผิดปกติไปจากธรรมชาติ ซึ่งจากการศึกษาปริมาณของเสียที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั่วประเทศโดยบริษัท Engineering Science ซึ่งได้รายงานไว้ใน The National Hazardous Waste Management Plan (พ.ศ. 2532) ว่าในปี พ.ศ. 2544 จะมีของเสียอันตรายเกิดขึ้นประมาณ 2.8 ล้านตัน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 และของเสียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของกากตะกอนและของแข็งที่เป็นสารโลหะหนัก เนื่องจากประเทศไทยเราเป็นประเทศที่กำลังพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรม โดยโรงงานอุตสาหกรรมต่างชนิดกันก็จะปล่อยน้ำทิ้งที่มีกรปนเปื้อนของโลหะหนักแตกต่างกันไป น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังจากผ่านระบบบำบัดแล้วโลหะหนักก็จะเกิดการรวมตัวในรูปของตะกอน และจำเป็นต้องนำไปฝังกลบให้ถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป เพราะหากไม่มีการควบคุมหรือการจัดการที่ดีแล้วสารพิษเหล่านี้ก็จะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้ต่อไปอีกในอนาคต

กระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งที่ออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้นมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation) ขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) การใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรน (Membrane Filtration) การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis) และการสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery) เป็นต้น ซึ่งวิธีเหล่านี้สามารถกำจัดโลหะหนักได้ผลดี แต่ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุนตลอดจนใช้เทคโนโลยี รวมทั้งต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าสามารถนำของเสียที่เกิดขึ้นมาให้เกิดประโยชน์ได้ จะเป็นการช่วยจัดการกับของเสียเหล่านั้นอีกทางหนึ่ง

ซึ่งปัจจุบันโรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าประมาณวันละ 35,000 ตัน และพบว่าปริมาณเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินประมาณวันละ 7,000 ตัน (สมชัย กกกล้าแหง, 2538) เถ้าลอยกว่า 50% จะถูกกำจัดโดยวิธีฝังกลบ (Landfill) ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง และนำมาสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ

ตารางที่ 1.1 ปริมาณของเสียอันตราย แยกตามประเภทและปี

ประเภทของเสีย	ปริมาณของเสียอันตราย (ตัน/ปี)		
	2534	2539	2544
น้ำมัน	188,254	332,779	589,508
กากสารอินทรีย์เหลว	311	522	876
ตะกอนและของแข็งสารอินทรีย์	6,674	11,951	21,533
ตะกอนและของแข็งสารอนินทรีย์	19,163	31,850	53,696
ตะกอนและของแข็งโลหะหนัก	536,322	946,565	1,658,192
ตัวทำละลาย	36,163	66,532	124,306
ของเสียเป็นกรด	31,432	53,793	96,105
ของเสียเป็นด่าง	9,839	16,846	29,019
ผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน	25	52	107
พีซีบี (PCB)	*	*	*
กากสารอินทรีย์น้ำ	242	499	1037
น้ำเสียล้างอัดรูป	16,348	30,398	57,809
ขยะชุมชน	11,787	19,090	31,093
ขยะติดเชื้อ	76,078	123,219	200,699
รวม	932,638	1,634,104	2,813,980

\* = ของเสียที่ปนเปื้อนสาร PCB มีประมาณปีละ 2,468 ตัน และคาดว่าไม่มีกรนำเข้าสู่สาร PCB หลังจากปี พ.ศ. 2518

อ้างอิง : ข้อมูลจากการปรับปรุงค่าของ Engineering Science/USTDP Study 1989

คือ เกิดการชะล้าง (Leaching) ทำให้มีปัญหาปนเปื้อนกับน้ำใต้ดิน มีความพยายามที่จะนำเถ้าลอย (Fly Ash) ไปใช้ประโยชน์ในแง่ของการนำไปปรับปรุงดิน เพื่อใช้ในการเพาะปลูก แต่จากงานวิจัยของ Carlson and Adriano (1993) ก็พบว่ามีปัญหาเนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยยังคงมีสารพิษตกค้างในพืช แม้จะมีธาตุอาหารที่มีประโยชน์อยู่สูง สารพิษที่พบ ได้แก่ As , B , Ba , Cd , Cr , Pb , Hg , Mo , และ Se

ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการนำเอาเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการเผาลิกไนต์มาทำการปรับปรุงคุณภาพ แล้วจึงนำมาใช้ประโยชน์ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย 3 ชนิด คือ ตะกั่ว แคดเมียม และนิกเกิล

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อนำเถ้าลอย ซึ่งเป็นของเสียจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ กลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก
2. เพื่อปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอย ให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้ดีขึ้น
3. เพื่อศึกษาค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash
5. เพื่อศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก
6. เพื่อศึกษาผลของค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัสด ความเข้มข้นเริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก
7. เพื่อศึกษาการคายออกจากผิว Treated Fly Ash ของโลหะหนัก
8. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วย Treated Fly Ash
9. เพื่อศึกษาผลของแอนไอออนที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก
10. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก เมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิด

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

นำตัวอย่างเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง มาทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยการรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ระยะเวลาและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน วิเคราะห์ค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน สมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash นำ Treated Fly Ash ที่มีค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงที่สุดมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม และศึกษาปริมาณของ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ ค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัสด ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก และอุณหภูมิ

รวมทั้งการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรมด้วย Treated Fly Ash แล้ว และศึกษาการคายออกจากผิว Treated Fly Ash ของโลหะหนัก ตลอดจนทำการศึกษาผลของแอนไอออนชนิดต่างๆ ต่อประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนัก และการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิดในสภาวะละลาย

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการนำเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง กลับมาใช้ประโยชน์
2. ได้เถ้าลอยที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ดีขึ้น
3. ทราบปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดโลหะหนัก และอาจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำจัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักได้



## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียมปรอท นิกเกิล เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ สมบัติด้านเคมีที่สำคัญคือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรรกว่าโลหะอิสระ

โลหะหนักสามารถจัดแบ่งโดยอาศัยแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มโลหะที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงมาก ได้แก่ As, Au, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Sb, Sn, Te, และ Zn และกลุ่มโลหะที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงรองลงมา ได้แก่ Ba, Bi, Fe, Mo, Ti และ U (Culp and Culp, 1974)

ความเป็นพิษของกลุ่มโลหะหนักเหล่านี้ เป็นผลมาจากการที่มนุษย์ได้รับสารเหล่านี้ในปริมาณที่ต่างๆ กัน แล้วก่อให้เกิดอันตรายแก่ร่างกายนั่นเอง แหล่งที่มาสำคัญของโลหะหนักเหล่านี้ ก็คือ จากกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ จากนั้นจึงเกิดการปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในดิน น้ำ อากาศ และผลิตผลทางการเกษตร และเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ และมีผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

### แคดเมียม

#### การใช้ประโยชน์

แคดเมียมมีการนำมาใช้ในกระบวนการผลิตโลหะอัลลอยด์ เซรามิก อุตสาหกรรมการผลิตตรงควัตถุอินทรีย์ อุตสาหกรรมการเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า อุตสาหกรรมการพิมพ์ผ้า โดยจากการศึกษาอย่างละเอียดพบว่ากว่า 90% ของแคดเมียมนั้นถูกใช้ในกระบวนการการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า การผลิตตรงควัตถุ เป็น Plastic Stabilizers และในอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ขณะที่อีกประมาณ 10% ถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อราในสนามกอล์ฟ ใช้เป็นสารที่ทำให้ยางแข็งตัวในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ความเป็นพิษ

เมื่อร่างกายได้รับพิษเนื่องจากการสูดหรือหายใจเอาควันที่มีแคดเมียมเข้าไป อาการที่เกิดขึ้นคือ คอแห้ง ระคายคอ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ เมื่อได้รับแคดเมียมมากขึ้นจะมีอาการหายใจไม่ออก ไอ ถ้ายังคงได้รับแคดเมียมเข้าไปอีกก็อาจตายได้ ส่วนอาการที่เกิดจากการกินอาหารหรือน้ำที่มีแคดเมียมเจือปน คือ อาเจียนและท้องร่วง การได้รับพิษแบบเรื้อรังทำให้เกิดโรคอิไต-อิไต (Itai-Itai Disease) ทำให้ผู้ได้รับพิษเจ็บปวดทรมานมาก เพราะเกิดอาการกระดูกและไตพิการ ระยะแรกผู้ป่วยจะมีอาการปวดบริเวณสะโพก แขน และขา ส่วนในกรณีของผู้ป่วยที่ได้รับแคดเมียมสะสมมานานจะมีอาการรุนแรงมาก คือ เจ็บปวดทั่วร่างกาย แรงกดของน้ำหนักตัวที่มีต่อกระดูกสันหลังทำให้ร่างกายเตี้ยหรือค่อมลง กระดูกเปราะ ในระยะสุดท้ายผู้ป่วยจะสูญเสียแคลเซียมออกทางปัสสาวะมาก จนกระดูกผุกร่อนและเสียชีวิตไปในที่สุด

## เทคโนโลยีการกำจัด

เทคโนโลยีที่ใช้กำจัดแคดเมียมที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่ก็คือ เทคนิคการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ หรือตะกอนซัลไฟด์ และตะกอนคาร์บอเนต การแลกเปลี่ยนไอออน การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า และสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมสูงๆ อาจมีการใช้วิธีการระเหยแยกแคดเมียมกลับมาใช้อีกเป็นต้น

## ตะกั่ว

### การใช้ประโยชน์

ปัจจุบันมีการนำตะกั่วมาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้งานกันอย่างกว้างขวาง ซึ่งทำให้มีอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบมีจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วมากที่สุด รองลงมา คือ อุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่ใช้ตะกั่วเป็นสารเติมแต่ง (Additive) ในการผลิตแก๊สโซลีน นอกจากนี้ยังมีการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมการชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า อุตสาหกรรมการผลิตหลอดภาพโทรทัศน์ และอุตสาหกรรมการผลิตตรงควัดถู เป็นต้น

## ความเป็นพิษ

ตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศอาจแพร่กระจายสู่สิ่งมีชีวิตได้ 2 ทาง ทางตรงโดยการที่มนุษย์หรือสัตว์สูดหายใจหรือกินอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อนเข้าไป ส่วนทางอ้อมนั้นตะกั่วจะเข้ารบกวนหรือทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านตามห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาได้ช้ามาก ส่วนใหญ่จะถูกจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงหมุนเวียนไปตามกระแสเลือด กระจายไปทั่วร่างกายสู่เนื้อเยื่อส่วนต่างๆ โดยจะสะสมอยู่ในไตในความเข้มข้นที่สูงที่สุด รองลงมา คือ ตับ หลังจากนั้น

ชั่วระยะเวลาหนึ่งก็จะแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่ง โดยไปยึดเกาะอยู่ในกระดูกส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะกระจายไปอยู่ในผมและฟัน ตะกั่วเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะมีผลรบกวนและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตหลายระบบ คือ

- ระบบการสร้างเม็ดเลือด พิษตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจางโดยมีผลไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ฮีมี (Heme) ทำให้ระดับฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ลดลง

- ระบบประสาท ตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้าง่าย เป็นอัมพาต ช้อมือช้อเท้าตก วิงเวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ปวดหัว นอนไม่หลับ หงุดหงิด ตกใจง่าย มึนงง และอาการชัก

- ไต ตะกั่วจะทำความเสียหายแก่ท่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาลและฟอสเฟต ออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไตทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

นอกจากนี้ตะกั่วยังมีผลต่อการทำงานของตับ หัวใจและเส้นเลือด และเป็นสารชักนำทำให้เกิดโรคมะเร็งอีกด้วย

### เทคโนโลยีการกำจัด

เทคโนโลยีการกำจัดตะกั่ว ในกระบวนการกำจัดตะกั่วที่สามารถละลายน้ำได้นิยมกำจัดโดยใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีแล้วจึงกำจัดตะกอนต่อไป สารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนได้แก่ หินปูน หรือโซดาไฟ ซึ่งจะตกตะกอนในรูป Lead Hydroxide หรือ Lead Carbonate เป็นต้น นอกจากนี้ก็อาจมีการใช้ Alum, Ferrous และ Ferric Sulfate เป็นตัวที่ทำให้เกิดการตกตะกอนได้เช่นกัน รวมถึงการกำจัดด้วยเทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออนก็มีรายงานการใช้วิธีนี้

### นิกเกิล

#### การใช้ประโยชน์

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีความสำคัญมากในทางอุตสาหกรรม มีความแข็งแรงทนทานสูง ลีกร่อนได้ยาก และไม่เป็นสนิม จึงนิยมนำนิกเกิลมาใช้ประโยชน์ ในการชุบโลหะด้วยนิกเกิล ใช้เป็นส่วนผสมของอัลลอยด์ ซึ่งอัลลอยด์ของนิกเกิลมีหลายชนิด เช่น Nickel-Base Alloy, Nickel-Iron Alloys และ Nickel-Iron-Chromium Alloys เป็นต้น นอกจากนี้นิกเกิลยังมีประโยชน์ทางด้าน อุตสาหกรรมเซรามิกส์ การผลิตแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้โลหะนิกเกิลและแคดเมียม (Nickel-Cadmium battery) อีกด้วย

ตารางที่ 2.1 ชนิดของโลหะหนักที่พบในอุตสาหกรรมต่างๆ (Dean *et al.* 1972)

Type of Industries	Al	Ag	As	Cd	Cr	Cu	F	Fe	Hg	Mn	Pb	Ni	Sb	Sn	Zn
Pulp, paper mills, paperboard, building paper, board mills					•	•			•		•	•			•
Organic chemicals, petrochemicals	•		•	•	•		•	•	•		•			•	•
Alkalis, chlorine, inorganic chemicals	•		•	•	•		•	•	•		•			•	•
Fertilizers	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			•
Petroleum refining	•		•	•	•	•	•	•	•		•	•			•
Basic steel works, foundries			•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•
Basic non-ferrous metals-works, foundries	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•		•		•
Motor vehicles, aircraft-plating, finishing	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•				
Flat glass, cement, asbestos products, etc.					•										
Textile mill products					•										
Leather tanning, finishing					•										
Steam generation power plants					•										

Note : plastic material, meat products, dairy products, fruits and vegetables, grain milling, beet sugar, beverages and lives and livestock feedlot industries have no heavy metal discharge.

### ความเป็นพิษ

กลไกการออกฤทธิ์ คือการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เมื่อนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมตามกระดูกสันหลัง สมอง ปอด และหัวใจ อาการของผู้ได้รับพิษมีดังนี้ ปวดหัว มีนงง คลื่นไส้ และอาเจียน แน่นหน้าอก ไอแห้ง ถ้าหากมีอาการรุนแรงมากอาจมีเลือดออกในปอด

นอกจากนี้ยังพบว่านิกเกิลมีคุณสมบัติเป็นสารชักนำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง คนงานที่ประกอบอาชีพเกี่ยวข้องกับการใช้นิกเกิล มีโอกาสเป็นมะเร็งในช่องจมูกและโพรงจมูกสูงกว่าคนปกติประมาณ 150 เท่า

## เทคโนโลยีการกำจัด

วิธีที่นิยมใช้ในการกำจัดนิกเกิล คือการทำให้เกิดตะกอนในรูปของไฮดรอกไซด์ และคาร์บอเนต โดยสารเคมีที่นิยมใช้ในการตกตะกอนได้แก่ ปูนขาว และโซเดียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ยังมีวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) ซึ่งวิธีนี้มีประโยชน์คือ สามารถนำนิกเกิลกลับมาใช้ใหม่ได้ และวิธีการระเหย รวมทั้งวิธีการออสโมซิสย้อนกลับ เป็นต้น

## 2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

### 2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน กระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพของสารต่างๆ ที่ละลายอยู่ในรูปสารละลาย (Soluble) ให้เป็นสารที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (Insoluble) โดยวิธีการเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสียให้ทั่วถึง ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี 2 วิธีด้วยกัน คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

#### 2.2.1.1 การตกตะกอนไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ทำได้โดยการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เป็นต้น โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้



การตกตะกอนไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ การตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ จะต้องมีค่าพีเอชที่เหมาะสม

### 2.2.1.2 การตกตะกอนซัลไฟด์

การตกตะกอนซัลไฟด์ มักจะใช้สารเคมีในการตกตะกอนคือ โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{NaHS}$ ) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ ( $\text{FeS}$ ) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



ข้อดีของการตกตะกอนซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนซัลไฟด์ มีข้อจำกัด คือ เรื่องของกลิ่นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งเกิดจากไอออนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันแก๊สที่เกิดขึ้น โดยบำบัดนำเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะระบายน้ำทิ้ง

### 2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนจะมีทั้งแบบที่ได้อาจธรรมชาติและชนิดสังเคราะห์ จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงกันข้าม ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย ถ้าการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวก จะเรียกว่า แคทไอออนเอกเชนเจอร์ (Cation Exchanger) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า แอนไอออนเอกเชนเจอร์ (Anion Exchanger) วิธีนี้จะเหมาะสำหรับกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดกับชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่จะต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเข้าเรซิน เพื่อจะทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงสุด

พบว่าวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายสูง เพราะเรซินมีราคาแพง เรซินที่ใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีกโดยการล้างด้วยกรด แต่ประสิทธิภาพของเรซินจะค่อยๆ ลดลงจนใช้ไม่ได้ในที่สุด

### 2.2.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยสารเซลลูโลส อะซีเตด และโพลีเอมีด ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้ความดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้ต้องทนต่อแรงดันสูงและต้องมีการ

บำบัดขั้นต้นโดยการปรับค่าพีเอช แยกสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงออก และการกรองสารแขวนลอยออกก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมการชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า น้ำเสียจากการล้างภาพ

#### 2.2.4 การระเหย (Evaporation)

วิธีการระเหยน้ำออกนี้เป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้ในการทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศ (Atmospheric Evaporation) และการระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่วิธีนี้มีข้อเสียคือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

#### 2.2.5 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นวิธีการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของวิธีนี้เป็น การแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย และน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

#### 2.2.6 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นโลหะสูง แต่วิธีนี้มักไม่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

#### 2.2.7 การดูดซับ (Adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) พวกถ่านที่ใช้กันมี 2 ลักษณะ คือ แบบคาร์บอนเป็นเม็ด (Granular Carbon) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 0.1 มิลลิเมตร และแบบคาร์บอนเป็นผง (Powder Carbon) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่า 200 เมช ซึ่งทำจากเมล็ดของแอลมอนด์ เปลือกถั่ว กะลามะพร้าว ไม้อื่นๆ หรือถ่านทั่วไป โดยถูกนำมาเผาที่อุณหภูมิสูง

เพื่อให้ได้พื้นที่ผิวของคาร์บอนมากๆ โดยทั่วไปผ่านกัมมันต์ ที่นำมาใช้มีขนาดพื้นที่ผิวดั้งแต่ 500-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม

## 2.3 การดูดซับ (Adsorption)

### 2.3.1 หลักการ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการบำบัดทั้งน้ำดีและน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ที่อยู่ในของเหลวหรือ แก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น ดิน กลิ้น ใยดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดี และระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือต้องการพื้นที่น้อย ไม่มีกลิ่นที่น่ารังเกียจ

การดูดซับที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) (Eckenfelder, 1981) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้ และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากกิริยา (Action) ของแรงวันเดอร์วาลส์ (van der Waals Force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิดคือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) (Faust and Aly, 1987) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นแบบหลายชั้น (Multilayers) ซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่บนชั้นโมเลกุลก่อนหน้านั้น โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพ ขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรง

ดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดซับทางเคมี เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบทางเคมี ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับแบบกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (Irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (Reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ

ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล (Voice and Weber, 1983)

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 3 ประเภท

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และแอกติเวต-เดดซิลิกา สารธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม แต่สารสังเคราะห์อาจมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก อย่างไรก็ตามมีข้อเสีย คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากสารดูดซับประเภทสารอนินทรีย์มีขีดจำกัดมาก
2. ถ่านกัมมันต์ เป็นสารดูดซับที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ประมาณ 600-1000 ตารางเมตรต่อกรัม
3. ประเภทสารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อจำกัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม

## 2.3.2 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

### 2.3.2.1 กลไกการดูดซับ (Faust and Aly, 1987)

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) ปฏิกิริยาพื้นผิวเป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดที่ผิวของสารดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละเลยได้

### 2.3.2.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

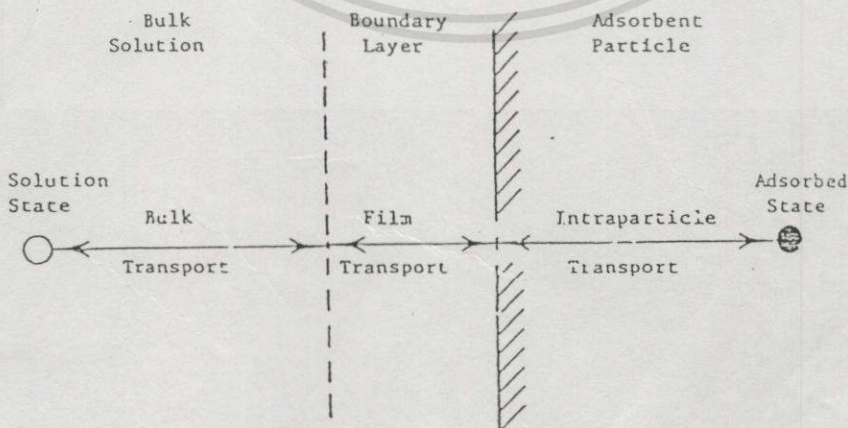
อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารจากสารละลาย มี 3 ขั้นตอน คือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

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

3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังสารดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยผ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

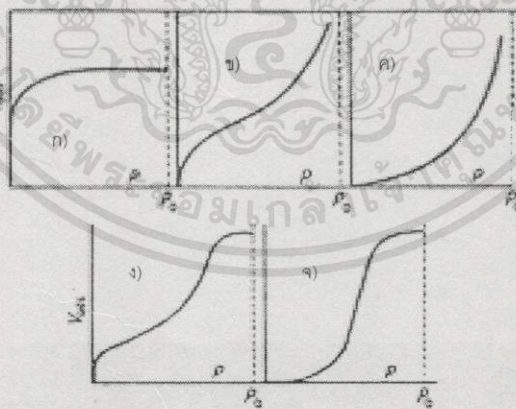
ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

### 2.3.3 การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibria)

สามารถอธิบายปรากฏการณ์กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นว่า ณ จุดสมดุลของการดูดซับ สมรรถนะของตัวดูดซับ (Adsorption Capacity) สามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับความเข้มข้น ของตัวถูกดูดซับในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ โดยเรียกความสัมพันธ์นี้ว่าไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับ มี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งจากไอโซเทอมรูปที่ 2.2 ก) เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนในรูปที่ 2.2 ข) ถึง จ) เป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น

มีทฤษฎีหลากหลายทฤษฎีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแสดงไอโซเทอมการดูดซับ ในปัจจุบันยังไม่ มีทฤษฎีไหนที่จะอธิบายสมการ และกลไกการดูดซับได้อย่างถูกต้อง ในที่นี้จะนำเสนอสมการทั่วไป สำหรับไอโซเทอมการดูดซับ ดังนี้



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน (Faust and Aly, 1987)

#### 2.3.3.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

มีสมมติฐานพื้นฐานที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model ดังนี้

1) เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) เท่านั้น

2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ถือทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง แก้ไข และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เอนทาลปีของการดูดซับมีค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ โมเลกุล
- 4) พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots(2.1)$$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) อย่างสมบูรณ์

$C_e$  = ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

$b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ (2.1) สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{b X_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad \dots(2.2)$$

หรือ

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{b X_m C_e} \quad \dots(2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/X$  กับ  $1/C_e$  ข้อมูลสมดุลการดูดซับดังแสดงในรูปที่ 2.3 ก) และเราสามารถหาค่าคงที่  $b$  และ  $X_m$  ได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ

### 2.3.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ บี อี ที (Brunauer-Emmett-Teller, BET, Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ใช้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ
- 2) เอนทาลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- 4) ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับชั้นต่อไป

สมการการดูดซับแบบ บี อี ที แสดงในสมการที่ (2.4)

$$X = \frac{X_m B C_e}{(C_s - C_e)[1 + (B - 1)(C_e / C_s)]} \quad \dots(2.4)$$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นขึ้นเดี่ยว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

$C_s$  = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

$B$  = ค่าคงที่ของพลังงานของการดูดซับ

สมการที่ (2.4) สามารถจัดเรียงเป็นแบบเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{(C_s - C_e)X} = \frac{1}{X_m B} + \frac{(B - 1)}{X_m B} \left( \frac{C_e}{C_s} \right) \quad \dots(2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e / (C_s - C_e) X$  กับ  $C_e / C_s$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $(B - 1) / (X_m B)$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1 / X_m B$  กราฟของสมการการดูดซับแบบเบทแสดงในรูปที่ 2.3 ข)

### 2.3.3.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว มีสมการดังนี้

$$\frac{x}{m} = K C_e^{1/n} \quad \dots(2.6)$$

เมื่อ  $x$  = จำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม

$m$  = น้ำหนักของสารดูดซับ มีหน่วยเป็นกรัม

$C_e$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

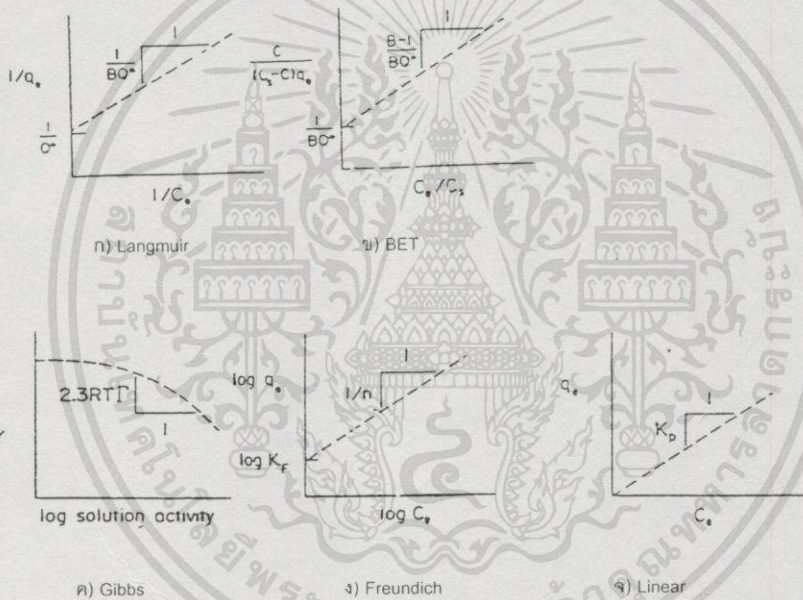
$K, 1/n$  = ค่าคงที่ของระบบ

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots(2.7)$$

พลอตกราฟระหว่าง  $\log(x/m)$  กับ  $\log C_e$  จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ง) ค่า  $1/n$  ที่ได้จากการดูระดับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดซับที่ดี

สมการ Freundlich มีประโยชน์มากที่สุดสำหรับการละลายที่เจือจาง ปกติจะใช้กับการดูดซับสิ่งเจือปนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon)



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมแบบต่างๆ (Voice and Weber, 1983)

2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.3.4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption Capacity) อัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาค เป็นตัวควบคุมอัตราการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ

#### 2.3.4.2 ลักษณะของสารถูกดูดซับ (Nature of Adsorbate)

สิ่งที่สำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายจากสารละลายอย่างหนึ่ง คือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรง เป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 2.3.4.3 ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับอัตราการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ซึ่งแล้วแต่ความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์ม เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้ามีความปั่นป่วนสูงทำให้ ความหนาของชั้นฟิล์มจะลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 2.3.4.4 เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุด ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง

#### 2.3.4.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรงค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

### 2.3.4.6 อุณหภูมิ (Temperature)

ในกรณีการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) พบว่าเมื่ออุณหภูมิลดลง ความสามารถในการดูดซับจะสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้า อุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้น จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (Endothermic)

กระบวนการดูดซับเป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยตัวดูดซับที่ใช้ เช่น อลูมินา ซิลิกา และถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้ดี แต่มีราคาค่อนข้างแพง จึงได้มีการศึกษาสารชนิดอื่นๆ เป็นตัวดูดซับแทน

ในงานวิจัยนี้ได้นำถ่านลอย ซึ่งเป็นของเสียจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า จังหวัดลำปาง และมีองค์ประกอบคล้ายกับตัวดูดซับที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก มาใช้แทนสารดูดซับดังกล่าว

## 2.4 ความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC)

ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) หมายถึง ปริมาณของประจุบวกของธาตุต่างๆ ซึ่งอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ของสาร โดยคิดเทียบจากน้ำหนักของสาร 100 กรัม หน่วยของ CEC คือ มิลลิอิควิวาเลนต์ต่อสาร 100 กรัม (meq/100g)

การวิเคราะห์หาค่า CEC ของสารสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมแพร่หลายคือ การทำให้อิ่มตัวด้วยประจุบวก เช่น การใช้ 1 N Ammonium Acetate pH 7, 1 N Sodium Acetate pH 8.2 และ 0.5 N Barium Chloride + 0.2 N Triethanolamine pH 8.0 ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีที่นำไปใช้ในการทดลอง คือ วิธีการทำให้อิ่มตัวด้วย 1 N Ammonium Acetate ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) เนื่องจากเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยหลักการสำคัญแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการชะ (Leaching Step) ทำให้ตัวอย่างอิ่มตัวด้วย  $\text{NH}_4^+$  โดยการชะตัวอย่างด้วย 1 N Ammonium Acetate ( $\text{NH}_4\text{OAc}$ ) pH 7 เพื่อให้  $\text{NH}_4^+$  เข้าไปแทนที่ประจุบวกต่างๆ เช่น  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  และ  $\text{Na}^+$  ที่อยู่ที่ผิวของอนุภาคให้ออกมาใน Leachate

2. ขั้นตอนการล้าง (Washing Step) ทำการล้างตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วย  $\text{NH}_4^+$  โดยใช้ แอลกอฮอล์

3. ขั้นตอนการแทนที่ (Replacing Step) ทำการแทนที่  $\text{NH}_4^+$  ที่ถูกดูดซับด้วยสารละลาย 10% Acidified NaCl

4. ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analyzing Step) วิเคราะห์  $\text{NH}_4^+$  ที่ถูกแทนที่ออกมาใน Leachate ค่าที่ได้จะมีค่าเท่ากับปริมาณประจุบวกที่สารตัวอย่างสามารถดูดซับและ

แลกเปลี่ยนได้ ซึ่งได้แก่ CEC ของสารตัวอย่างนั่นเอง

## 2.5 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยเป็นของเสียที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหิน ซึ่งในการทดลองนี้เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง จากการจำแนกถ่านหินตาม Rank ( Rank เป็นการกำหนดชั้นของถ่านหินโดยวิธีมาตรฐานของอเมริกา, American Society for Testing Material: ASTM D388) พบว่าถ่านหินในเหมืองแม่เมาะนี้เป็นลิกไนต์ และบางส่วนเป็นซับฮูมินัส (วราภรณ์ วราคุณากิจ. 2538) ซึ่งถ้าจะแบ่งโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินตามสมบัติทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็นโครงสร้างอินทรีย์ (Organic Structure) และส่วนที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุ (Inorganic Compound หรือ Mineral Matter) โดยโครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 70-79 ส่วน ไฮโดรเจน 3-5 ส่วน ออกซิเจน 1-2 ส่วน กำมะถันและไนโตรเจน 1-2 ส่วน และสำหรับส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุ จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก และนอกจากนั้นยังมีอะลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม ดิเดเนียม โซเดียม และโปแตสเซียม

ถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ที่มีอากาศเพียงพอ จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีเปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุ ในรูปของออกไซด์ของโลหะหลายชนิดที่ซับซ้อน เถ้าลิกไนต์ที่เหลืออยู่ประกอบด้วย

1. เถ้าหนัก (Bottom Ash หรือ Wet Ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาบ อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา บางส่วนของเถ้าจะปะทะกับผนังเตาและหลอมติดกันรวมตัวเป็นก้อนขนาดใหญ่ เรียก Slag เมื่อน้ำหนักรวมกันมากขึ้นจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

2. เถ้าลอย (Fly Ash หรือ Pulverized Fuel Ash หรือ Dry Ash) เป็นเถ้าที่มีขนาดเล็กและเบาสามารถแยกออกโดยใช้เครื่องดักฝุ่น (Electrostatic Precipitator)

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเถ้าลอยแต่ละแหล่งจะไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับธรรมชาติแหล่งกำเนิด ความละเอียดของการบด (Degree of Pulverized) และขบวนการที่เผา

### 2.5.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าที่ได้จากการเผาไหม้จะมีสีเทาอมแดง เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น มีลักษณะละเอียด จากการวิเคราะห์เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 100 เท่า พบว่ารูปร่างของเถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลม และมีขนาดตั้งแต่ 0.03-0.42 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.23-2.48

## 2.5.2 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

จากการวิเคราะห์หาธาตุของเถ้าลอยลิกไนต์โดยวิธี X-ray Fluorescence Spectroscopy ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบและลักษณะของเถ้าลอยลิกไนต์ (วารสารณ์ คุณาวารากิจ. 2537)

องค์ประกอบ	% โดยน้ำหนัก
SiO <sub>2</sub>	40.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.0
CaO	11.2
MgO	2.8
SO <sub>3</sub>	3.1
Na <sub>2</sub> O	1.0
K <sub>2</sub> O	2.6
loss on ignition	0.64

## 2.5.3 ประโยชน์ของเถ้าลอย

- เป็นส่วนผสมในคอนกรีต (Concrete Additive)
- เป็นวัสดุน้ำหนักเบา (Light Weight Aggregate)
- นำมาเป็นส่วนผสมเพื่อทำพื้นทางหรือรองพื้นทาง
- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์
- นำมาเป็นตัวเติม (Filler) ในการทำคอนกรีตผสมยางมะตอย
- นำมาทำบล็อคอนกรีต

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Panday *et. al.* (1985) ศึกษาการกำจัดทองแดงในน้ำโดยการดูดซับด้วยเถ้าลอยทำการทดลองโดยใช้เถ้าลอย 1.0 กรัมต่อสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 50 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของคอปเปอร์ซัลเฟตและค่าพีเอชต่างๆ กัน พบว่าความสามารถในการกำจัดทองแดงลดลงจาก 100% ถึง 89.96% ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นจาก  $1.0 \times 10^{-4}$  โมลาร์ เป็น  $2.0 \times 10^{-4}$  โมลาร์ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และพีเอชเท่ากับ 6.5 และจากการศึกษาผลของอุณหภูมิ พบว่าค่าความจุของการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 1.2547 ถึง 1.5341 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นขบวนการ Endothermic

Yadava *et. al.* (1987) ศึกษาการใช้ถ่านลอยลิกไนต์ในการกำจัดแคดเมียม โดยในการทดลองได้ใช้ถ่านลอยปริมาณ 1 กรัม ต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือโดยใช้ Dithizone Method ผลการศึกษาพบว่า ปฏิกิริยาจะเกิดได้ดีเมื่อพีเอชเท่ากับ 8.5 เวลาที่เข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นลดลงจาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 84 เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์

ค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสูงมาก กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าพีเอชจาก 4 เป็นค่าพีเอช 8.5 ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตรจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 11.85 เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์ และยังพบว่าการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับจะลดลงเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 10 นอกจากนี้ในการศึกษาผลของอุณหภูมิในการกำจัดแคดเมียมด้วย Fly Ash พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลงจาก 96.07 ถึง 83.78 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้ Yadava *et. al.* (1989) ยังได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยใช้ถ่านลอย โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดคือ ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นอุณหภูมิ และพีเอช พบว่าสามารถกำจัดตะกั่วได้ถึง 88.1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วอยู่ในช่วง 2 ถึง 6 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และค่าพีเอช 6.4 ซึ่งทำการทดลองโดยใช้ถ่านลอย 1.0 กรัมต่อ น้ำเสีย 50 มิลลิลิตร และพบว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมคือ 110 นาที โดยระยะเวลาสัมผัสจะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตะกั่วและอุณหภูมิของน้ำ ความจุของการดูดซับจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส และที่ความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 3.0 ถึง 6.4 และการกำจัดตะกั่วด้วยถ่านลอยจะลดลงเมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นถึง 8.0 จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าถ่านลอยสามารถนำมาใช้ในการลดปริมาณตะกั่วในน้ำและน้ำเสียต่ำลงถึงค่าที่กำหนดในมาตรฐานน้ำทิ้งได้

De and Lal (1990) ศึกษาการดูดซับของเหล็กบนถ่านลอย โดยนำตัวอย่างถ่านลอยจากโรงไฟฟ้า Talkatora Power Station, Lucknow มาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 50-125 เมช และล้างด้วยกรดไนตริก 0.05 โมลาร์ จากนั้นนำมากรองและล้างด้วยน้ำกลั่นอีกสองครั้งและอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส โดยในการศึกษาการดูดซับจะทำแบบคอลัมน์ ขนาดของคอลัมน์ที่ใช้มีความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะโดยทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยาว 50 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.5 เซนติเมตร และใช้อัตราการไหลของสารละลายเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่า

1. ผลของความยาวคอลัมน์ เมื่อทำการบรรจุถ้ำลอยที่มีความยาวมากขึ้นความสามารถในการกำจัดเหล็กก็จะดีขึ้นและจะคงที่ที่ความยาวในการบรรจุคอลัมน์เท่ากับ 6 เซนติเมตร แต่ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กด้วย กล่าวคือ ถ้าความเข้มข้นต่ำๆ การบรรจุคอลัมน์สั้นก็จะสามารถกำจัดได้ดี แต่ถ้าความเข้มข้นสูงก็จำเป็นต้องใช้การบรรจุคอลัมน์ที่มีขนาดยาวขึ้น

2. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็ก ศึกษาความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเหล็กในช่วง 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึง 28 มิลลิกรัมต่อลิตร ผ่านคอลัมน์ที่มีถ้ำลอยบรรจุอยู่ 6 เซนติเมตรและค่าพีเอชเท่ากับ  $3.5 \pm 0.5$  พบว่าความสามารถในการกำจัดลดลงเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้น

3. ผลของพีเอช ศึกษาพีเอชของสารละลายในช่วง 3.0-6.0 พบว่าความสามารถในการกำจัดเหล็กได้สูงสุดคือพีเอชเท่ากับ 4.1 โดยกำจัดได้ 88.70 เปอร์เซ็นต์

Gupta *et. al.* (1987) ศึกษาความสามารถของถ้ำลอยในการกำจัด Omega Chrome Red Me ในน้ำเสียจากโรงงานเส้นใย โดยนำถ้ำลอยจาก Obera Thermal Power Plant ประเทศอินเดีย มาผ่านตะแกรงร้อนที่มีขนาด 53 , 75 และ 125 ไมครอน ทำการทดลองโดยใช้อัตราส่วนของถ้ำลอยลิกไนต์ 1.0 กรัม ต่อสารละลายสี 50 มิลลิลิตร เขย่าด้วย Shaking Thermostat ที่ความเร็ว 125 รอบต่อนาที และแยกสารละลายโดยการเซนตริฟิว และนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ พบว่าการกำจัดสีลดลงจาก 99 ถึง 69% เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 5 ถึง 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลคือ 120 นาที และสำหรับในสภาวะที่เหมาะสมต่อการกำจัดสี (Chrome Dye) คือตัวดูดซับมีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตัวดูดซับมีขนาดอนุภาค 53 ไมครอน อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และพีเอชเท่ากับ 4.2

Diamadopoulos *et. al.* (1993) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ถ้ำลอยกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำตัวอย่าง โดยในการทดลองจะใช้ถ้ำลอย 1 กรัม ในการกำจัดอาร์เซนิกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 4 , 7 และ 10 จากการทดลองพบว่าความสามารถกำจัดอาร์เซนิกในน้ำขึ้นอยู่กับเวลา กล่าวคือ ที่ 20 ชั่วโมงแรกของการทดลองจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ และที่พีเอชเท่ากับ 4 ประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มมากที่สุด คือ 30 มิลลิกรัมอาร์เซนิกต่อถ้ำลอย 1 กรัม และมีประสิทธิภาพเท่ากับ 3 และ 4 เท่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 10 และ 7 ตามลำดับ

สำหรับผลการทดลองการคายออกจากผิว (Desorption) ถ้าล้อย พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4 จะมีการคายออกจากผิวต่ำที่สุดคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 และ 10 จะมีการคายออกจากผิวเท่ากับ 8 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Weng and Huang (1994) ศึกษากระบวนการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนัก โดยใช้ถ้ำล้อยในการดูดซับ และการทำให้คงรูปด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Cement Fixation) ผลการศึกษาพบว่าถ้ำล้อยเป็นสารดูดซับที่มีประสิทธิภาพสำหรับสังกะสีและแคดเมียมในน้ำเสียที่เจือจาง โดยความสามารถในการดูดซับสังกะสีและแคดเมียม เท่ากับ 0.27 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

เมื่อทดลองผสมปูนซีเมนต์กับถ้ำล้อยในอัตราส่วน 90:10 แล้วทดสอบกำลังกดอัดของคอนกรีต พบว่าต้องใช้เวลา 56 วัน จึงจะมีกำลังกดอัดเท่ากับปูนซีเมนต์ล้วนๆ และจากการทดสอบการชะละลายของโลหะตามมาตรฐานของสหรัฐอเมริกา (Environmental Protection Agency-Extraction Procedure, USEPA-EP) แสดงว่ามีการปนเปื้อนของโลหะหนักต่ำกว่ามาตรฐานน้ำดื่มและสามารถสรุปผลการทดลองจากการหา Compressive Strength และ Leaching Test แล้วเสนอว่าสามารถใช้ถ้ำล้อยเป็น Secondary Construction Materials ได้

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าถ้ำล้อยมีความสามารถในการกำจัดโลหะโดยวิธีการดูดซับได้ผลดีพอสมควร และองค์ประกอบส่วนใหญ่ของถ้ำล้อย คือ  $\text{SiO}_2$  (40-65%) และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (25-40%) โดยมีองค์ประกอบย่อยเป็น  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (5-10%) และออกไซด์ของ Mg, Ca, P, Ti ฯลฯ อีกปริมาณเล็กน้อย ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เหมือนกับองค์ประกอบของแก้วที่ได้จากการหลอม (Fussion) ระหว่างกระบวนการสันดาบของถ่านหิน หรืออีกนัยหนึ่งคือ ถ้ำถ่านหินนี้สามารถจัดเป็น Aluminosilicate Glass ที่มีสิ่งเจือปนอยู่ และซีถ้ำเหล่านี้มีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับองค์ประกอบทางเคมีของ Volcanic Glass ซึ่งเกิดจากซีถ้ำภูเขาไฟในธรรมชาติ และเป็นที่ยอมรับกันดีว่า Volcanic Glass นี้สามารถเปลี่ยนเป็นวัสดุที่มีสมบัติคล้ายซีโอไลต์ได้ง่าย เมื่อทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายต่าง (Alkali Reagent) จึงได้มีความพยายามที่จะสังเคราะห์ซีโอไลต์และวัสดุอื่นที่มีสมบัติคล้ายซีโอไลต์ จากถ้ำล้อยเพื่อใช้กำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม แต่พบว่าซีโอไลต์เป็นสารที่มีสมบัติในการดูดซับโมเลกุลของสารหรือโลหะต่างๆ ได้ดีกว่าถ้ำล้อยทั่วไป (Henmi. 1987)

Henmi (1987) ศึกษาการสังเคราะห์ Hydroxysodalite (Zeolite) โดยใช้ถ้ำล้อยขนาด 44  $\mu\text{m}$  จำนวน 20 กรัม รีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.5 โมลาร์ 160 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำเพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไป และอบให้แห้ง แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วย X-ray powder diffraction จาก XRD pattern พบว่า

มีองค์ประกอบของ Sodalite หรือ Hydroxysodalite และ Infrared (IR) Spectroscopy พบว่า สอดคล้องกับ IR Spectrum ของ Sodalite คือมี IR Spectra ปรากฏที่  $3,400$  และ  $1,640 \text{ cm}^{-1}$  คือ เป็นการสั่นของ O-H stretching และ H-O-H bending ตามลำดับ

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์หาค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) พบว่าเพิ่มขึ้นจาก  $14 \text{ meq}/100\text{g}$  เป็น  $362 \text{ meq}/100\text{g}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแก้วลอยที่ผ่านการรีฟลักซ์ มีสมบัติใกล้เคียงกับ Sodalite ( $920 \text{ meq}/100\text{g}$ ) ซึ่งมีความสามารถดูดซับโลหะได้ดีขึ้นกว่าแก้วลอย

P.Primerano (1993) ทำการศึกษาการเปลี่ยนเฟสของแก้วลอยไปเป็นซีโอไลท์ โดยใช้ NaOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน พบว่าที่ความเข้มข้นของ NaOH  $0.5-2.5$  โมลาร์ เกิดเป็นซีโอไลท์ที่มีสัดส่วนของ Si/Al ต่ำ ( $2\pm 1$ ) ขณะที่ความเข้มข้นของเบสมากกว่า  $3.0$  โมลาร์ จะได้ซีโอไลท์ที่มีสัดส่วนของ Si/Al สูงขึ้น

Singer and Berhguat (1995) ศึกษาสมบัติการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของแก้วลอยที่ผ่านการรีฟลักซ์ ด้วย NaOH ทำการทดลองโดยใช้แก้วลอยที่มีขนาดน้อยกว่า  $25$  ไมครอน ในอัตราส่วนแก้วลอย  $20$  กรัมต่อ  $3.5 \text{ M NaOH}$   $160$  มิลลิลิตร ที่  $100$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา  $2-24$  ชั่วโมง จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออน และทำให้แห้ง พบว่าข้อมูลจาก X-ray Diffraction Pattern ยืนยันได้ว่าแก้วลอยสามารถเปลี่ยนเป็น Zeolite P หรือ Hydroxysodalite ได้ประมาณ  $50\%$  ซึ่งจะมีค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (CEC) เพิ่มขึ้นเป็น  $250-300 \text{ meq}/100\text{g}$  และจากการศึกษาการดูดซับโลหะหนักหลายๆ ชนิดพบว่าแก้วลอยที่ผ่านการรีฟลักซ์ ด้วย NaOH มีความเลือกจำเพาะ (Selectivity) กับโลหะชนิดต่างๆ ตามลำดับดังนี้  $\text{Pb}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cs}^+$

Amrhein *et. al.* (1996) ศึกษาการสังเคราะห์และสมบัติของซีโอไลท์จากแก้วลอย โดยใช้แก้วลอยทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์  $3.5$  โมลาร์ ในอัตราส่วนแก้วลอยต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ  $1$  ต่อ  $8$  พบว่า แก้วลอยที่ผ่านกระบวนการนี้มีค่า CEC เฉลี่ยเท่ากับ  $240 \text{ meq}/100\text{g}$  ในขณะที่แก้วลอยที่ไม่ได้ผ่านการรีฟลักซ์ มีค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนน้อยกว่า  $10 \text{ meq}/100\text{g}$  และค่า CEC สูงขึ้นถึง  $303 \text{ meq}/100\text{g}$  เมื่อแก้วลอยทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์  $3.0$  โมลาร์ เป็นเวลา  $72$  ชั่วโมง แต่พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น คือ  $150$  ,  $200$  และ  $250$  องศาเซลเซียส ค่า CEC ลดต่ำลง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $46 \text{ meq}/100\text{g}$

นอกจากนี้พบว่าการรีฟลักซ์ ถ้าวลอยด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ ที่ 100 องศาเซลเซียส จะได้ Zeolite Na-PI และ Zeolite P-C ขณะที่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 150-250 องศาเซลเซียส ผลิตกัณฑ์ที่ได้จะเป็น Zeolite X และ Pectolite และเมื่อใช้เบสเป็นโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ รีฟลักซ์ที่ 100 องศาเซลเซียส จะได้ Zeolite K-G (Potassium Chabazite) และยังพบว่าถ้าวลอยที่ผ่านการรีฟลักซ์นี้ มีสัมพรรคภาพ (Affinity) ต่อ  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  และ  $NH_4^+$  สูง จึงมีความพยายามที่จะใช้ผลิตกัณฑ์นี้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



### บทที่ 3

## วัสดุ อุปกรณ์ และการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องกลั่น Kjeldahl.Buchi รุ่น B-323
2. เครื่อง Scanning Electron Microscope Jeol รุ่น JSM 6400
3. เครื่อง Laser Particle Size Analyzer (MastersizerX) Malvern
4. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectrometer Nicolet รุ่น Impact400
5. เครื่อง X-ray Diffractometer Jeol รุ่น JTDX-8030
6. เครื่อง X-ray Fluorescence Spectrophotometer Fison รุ่น ARL8410
7. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer Shimudzu รุ่น AA-680
8. เครื่องเขย่า (Shaking Machine) Heto รุ่น Hetofrig CB60VS
9. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter) Metromh รุ่น 713 pH meter
10. เครื่อง Centrifuge Hettich รุ่น EBA 12
11. เตาแผ่นความร้อน (Hot plate)
12. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบละเอียด (Analytical balance) Precisa 205A
13. ขวดรูปชมพู่
14. Holder filter และ เมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
15. เตาอบ Memmert
16. Sieve ขนาด 230 เมช
17. Microwave Digester Unit Milestone รุ่น MLS-1200,  
พร้อม Rotor ชนิด MDR-1000/6/100/110 (PN 34134)
18. ปิเปต
19. บิวเรต
20. บีกเกอร์

### 3.2 ตัวอย่างและสารเคมี

1. ตัวอย่าง Fly Ash จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยเก็บตัวอย่างเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินจากใต้เครื่องดักจับฝุ่น (Electrostatic Precipitator) เมื่อเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2541 และทำการเก็บรักษาตัวอย่างโดยเก็บใส่ถุงพลาสติก ที่ปิดมิดชิดเพื่อป้องกันความชื้น
2. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท J.T. Baker
3. กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท BDH
4. แอลกอฮอล์, Analytical Reagent Grade ของบริษัท BDH
5. โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) Analytical Reagent Grade ของบริษัท FISONS
6. กรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) , Analytical Reagent Grade
7. กรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท BDH
8. Mixed Indicator: Bromocresol Green และ Methyl Red
9. น้ำกลั่น
10. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว นิกเกิลและแคดเมียม, Spectro Grade ของบริษัท Merck
11. นิกเกิลไนเตรต ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Carlo ERBA
12. แคดเมียมไนเตรต ( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Carlo ERBA
13. เลดไนเตรต ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Carlo ERBA
14. กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท J.T. Baker
15. กรดไฮโดรคลอริก ( $\text{HCl}$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Mallinckrodt
16. กรดไฮโดรฟลูออริก ( $\text{HF}$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Merck
17. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Merck
18. โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Merck
19. โซเดียมฟลูออไรด์ ( $\text{NaF}$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Carlo ERBA
20. โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Carlo ERBA
21. โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Carlo ERBA
22. โซเดียมไนเตรต ( $\text{NaNO}_3$ ) , Analytical Reagent Grade ของบริษัท Carlo ERBA

### 3.3 การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของ Fly Ash

นำตัวอย่าง Fly Ash มาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 230 เมช จะได้เถ้าลอยที่มีขนาดน้อยกว่า 63 ไมครอน มาทำการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอย โดยชั่ง Fly Ash 20 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 160 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ใส่แท่งแม่เหล็กคน วางบนเตาแผ่นให้ความร้อน ต่อคอนเดนเซอร์เข้ากับขวดรูปชมพู่ ทำการรีฟลักซ์ที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.5, 1.0, 2.0, 3.5, 4.0 และ 5.0 โมลาร์ และที่แต่ละความเข้มข้นใช้ระยะเวลาในการรีฟลักซ์เป็น 6, 15, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง หลังจากรีฟลักซ์เสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ให้ตะกอนนอนกัน เตาสารละลายทิ้งไป และล้างตะกอนที่เหลือด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้ง จะได้ตัวอย่างที่เรียกว่า Treated Fly Ash จากนั้นนำ Treated Fly Ash ที่ได้มาวิเคราะห์หาค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) โดยวิเคราะห์หาค่า CEC ด้วยวิธี Ammonium Acetate Method (Black, 1965) ทำการทดลองตามวิธีการดังนี้

#### วิธีการวิเคราะห์ค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (CEC)

1. ชั่งตัวอย่าง Fly Ash 5 กรัม ใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวขนาด 50 มิลลิลิตร เติม 1 N  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ลงไป 30 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
2. นำไปเซนตริฟิว 5 นาที รินสารละลายใส่ออกไป ตะกอน Fly Ash ที่เหลือนำไปเติม 1 N  $\text{NH}_4\text{OAc}$  30 มิลลิลิตร เขย่าและเซนตริฟิวเช่นเดียวกับการทำครั้งแรก ทำเช่นนี้ซ้ำอีกครั้ง
3. นำตะกอน Fly Ash ที่ยังเหลืออยู่ในหลอดเซนตริฟิวล้างด้วยแอลกอฮอล์ 3 ครั้ง แต่ละครั้งที่ล้างจะใช้แอลกอฮอล์ 30 มิลลิลิตร เขย่า 5 นาที แล้วเซนตริฟิวเพื่อรินสารละลายใส่ออกไป
4. ตะกอน Fly Ash ในหลอดเซนตริฟิวจะถูกนำไปเขย่ากับสารละลาย 10% acidified NaCl จำนวน 30 มิลลิลิตร เขย่า 5 นาที และเซนตริฟิวเก็บสารละลายใสในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ทำซ้ำ 3 ครั้ง สารละลายใสที่รินได้จะมีปริมาตรรวมกันได้ประมาณ 90 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยสารละลาย 10% acidified NaCl
5. ปิเปตสารละลายที่ได้จากข้อ 4 จำนวน 20 มิลลิลิตร ใส่ลงใน Kjeldahl Flask ของชุดกลั่น เติม 1 N NaOH ลงใน Kjeldahl Flask 2-3 มิลลิลิตร ในส่วนปลายก้านของคอนเดนเซอร์จะจุ่มอยู่ในสารละลาย 2% Mixed Indicator จำนวน 5 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุไว้ในขวดรูปชมพู่ กลั่นเป็นเวลา 2 นาที นำไปไทเทรตด้วย 0.1 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$  จนกระทั่งสีเขียวของสารละลายเปลี่ยนไปเป็นสีม่วงแดง บันทึกปริมาตรของกรดที่ใช้

จากนั้นนำไปคำนวณหาค่า CEC ของ Fly Ash ต่อไป จะต้องทำแปลงค์ด้วยทุกชุดของการกลั่น

#### การคำนวณหาค่า CEC

$$\text{CEC (meq/100g)} = \frac{(A - B) \times N \times 100}{X}$$

- A = ปริมาตรของกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มาตรฐานที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง
- B = ปริมาตรของกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มาตรฐานที่ใช้ไทเทรตแปลงค์
- N = ความเข้มข้นของกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มาตรฐาน (นอร์มัล)
- X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่าง

### 3.4 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

#### 3.4.1 การหาขนาดของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ศึกษาลักษณะการกระจายของอนุภาคและขนาดของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer (Mastersizer)

#### 3.4.2 การศึกษาลักษณะรูปร่างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ศึกษาลักษณะรูปร่างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope

#### 3.4.3 การศึกษาความเป็นผลึกของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ศึกษาลักษณะความเป็นผลึกของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash โดยใช้เครื่อง X-ray Diffractometer

#### 3.4.4 การศึกษาโครงสร้างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ศึกษาโครงสร้างของสารด้วยเทคนิคฟูริเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรเมตรี (FT-IR)

### 3.4.5 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence Spectrophotometry

## 3.5 การศึกษากำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

### 3.5.1 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

ศึกษาการดูดซับแบบ Batch สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 0.5, 1.25, 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยอัตราเร็วคงที่ที่เวลาต่างๆ กัน และทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี (AAS) โดยใช้วิธีการตาม Standard Methods for Water and Wastewater, 1995 โดยทำการศึกษากการดูดซับโลหะหนักตามขั้นตอนดังนี้

น้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนัก 50 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่  
ขนาด 250 มิลลิลิตร + Treated Fly Ash

- เขย่า
- เซนตริฟิวแยกสารละลายออก
- กรองสารละลายผ่านเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน

วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วย AAS

รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษากการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย Treated Fly Ash

ตารางที่ 3.1 สภาวะของเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์สำหรับวิเคราะห์ปริมาณ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

Element	Wavelength (nm)	Slit Width	Lamp Current (mA)	Flame
Pb	217.0	0.3	7	Acetylene : Air
Ni	232.0	0.15	5	Acetylene : Air
Cd	228.8	0.3	4	Acetylene : Air

### 3.5.1.1 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัด ตะกั่ว

ศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และแปรเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ในอัตราส่วน Treated Fly Ash ต่อน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 0.5, 1.25, 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองตามขั้นตอนการศึกษาดูดซับโลหะหนักตามรูปที่ 3.1 และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อกรัมของ Treated Fly Ash

### 3.5.1.2 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัด นิกเกิล

ศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิลโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และแปรเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ในอัตราส่วน Treated Fly Ash ต่อน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 0.5, 1.25, 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองตามขั้นตอนการศึกษาดูดซับโลหะหนักตามรูปที่ 3.1 และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับต่อกรัมของ Treated Fly Ash

### 3.5.1.3 การศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัด แคดเมียม

ศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และแปรเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ในอัตราส่วน Treated Fly Ash ต่อน้ำเสียสังเคราะห์เท่ากับ 0.5, 1.25, 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองตามขั้นตอนการศึกษาดูดซับโลหะหนักตามรูปที่ 3.1 และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคดเมียมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของ Treated Fly Ash

### 3.5.1.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม ด้วย Treated Fly Ash โดยใช้ความเข้มข้นของตะกั่วและนิกเกิลเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับแคดเมียม โดยใช้ปริมาณของ Treated Fly Ash ตั้งแต่ 0.5 ถึง 10.0 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองตามขั้นตอนการศึกษาดูดซับโลหะหนักตามรูปที่ 3.1 และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ไอโซเทอมการดูดซับตามชนิดของไอโซเทอมที่เหมาะสม

### 3.5.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักต่างๆ กัน

#### 3.5.2.1 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วต่างๆ กัน

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 2-5 ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะตะกั่วเท่ากับ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดสอบการดูดซับตามขั้นตอนในรูปที่ 3.1 ที่เวลาต่างๆ และใช้ปริมาณของ Treated Fly Ash ที่ได้จากการทดลองจากหัวข้อ 3.5.1.1

#### 3.5.2.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดนิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลต่างๆ กัน

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 2-5 ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะนิกเกิลเท่ากับ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดสอบการดูดซับตามขั้นตอนในรูปที่ 3.1 ที่เวลาต่างๆ และใช้ปริมาณของ Treated Fly Ash ที่ได้จากการทดลองจากหัวข้อ 3.5.1.2

#### 3.5.2.3 การศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดแคดเมียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมต่างๆ กัน

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยปรับค่าพีเอชของสารละลายด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 2-5 ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะแคดเมียมเท่ากับ 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดสอบการดูดซับตามขั้นตอนในรูปที่ 3.1 ที่เวลาต่างๆ และใช้ปริมาณของ Treated Fly Ash ที่ได้จากการทดลองจากหัวข้อ 3.5.1.3

### 3.5.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิในการกำจัดโลหะหนัก

ศึกษาผลของอุณหภูมิในการกำจัดตะกั่ว นิกเกิลและแคดเมียม โดยใช้ปริมาณของ Treated Fly Ash ที่ได้จากการศึกษาในหัวข้อ 3.5.1 และค่าพีเอชและเวลาที่เหมาะสมจากการศึกษาในหัวข้อ 3.5.2 โดยใช้ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและนิกเกิลเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับแคดเมียม โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส

### 3.6 การศึกษาการคายออกจากผิว Treated Fly Ash ของโลหะหนัก

เพื่อทดสอบความเสถียรของ Treated Fly Ash ที่ผ่านการดูดซับโลหะหนักแล้ว โดยเปรียบเทียบผลที่ได้กับข้อกำหนดในการทดสอบของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2531 ซึ่งได้กำหนดวิธีการทดสอบการชะละลายของของเสียอันตราย โดยใช้วิธีการสกัดสาร (Extraction Procedure) โดยทำการทดลองดังนี้

1. นำ Treated Fly Ash ที่ใช้ในกระบวนการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์มาอบแห้ง
2. นำ Treated Fly Ash จากข้อ 1 มาใส่น้ำกลั่นซึ่งปรับพีเอชด้วยกรดไฮโดรคลอริกอยู่ระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนน้ำหนัก 1 กรัม ของ Treated Fly Ash ต่อปริมาตรของสารละลาย 100 มิลลิลิตร
3. เขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง
4. เซนตริฟิวแยกสารละลาย และกรองสารละลายผ่านเมมเบรนขนาด 0.45 ไมครอน
5. นำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี

### 3.7 การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมโดยใช้ Treated Fly Ash

การกำจัดโลหะหนัก ในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 แห่ง ซึ่งน้ำทิ้งจากโรงงานทั้ง 2 แห่งเป็นโรงงานชุบโลหะ โดยที่น้ำทิ้งจากโรงงาน ก มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 2 ดังนั้นก่อนที่จะนำไปทดสอบการดูดซับด้วย Treated Fly Ash จะต้องทำการปรับค่าพีเอชด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ได้พีเอชเท่ากับ 5 สำหรับโรงงาน ข มีค่าพีเอชเท่ากับ 5 จึงไม่ต้องทำการปรับค่าพีเอช โดยนำน้ำทิ้งมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและหลังจากการทดสอบการดูดซับด้วย Treated Fly Ash ดังนี้

#### 3.7.1 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

ปิเปตน้ำตัวอย่างมา 5 มิลลิลิตร ใส่ใน Vessel แล้วเติมกรดไนตริก 65% 8 มิลลิลิตร กรดไฮโดรฟลูออริก 40% 2 มิลลิลิตร และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% 2 มิลลิลิตร ปิดฝา Vessel ให้สนิท นำเข้าเครื่อง Microwave Digester เปิดเครื่อง Microwave ทำงานตามโปรแกรมที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.2 (โดยใช้โปรแกรมในการย่อยตามคู่มือ Microwave Digester)

เมื่อเสร็จการทำงานตามโปรแกรม นำ Vessel ออกมาวางในตู้ควันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และ นำมาหล่อเย็นด้วยน้ำอีก 10 นาที เทสารละลายออกใส่ขวดวัดปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 3.2 โปรแกรมการย่อยน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเครื่อง Microwave Digester

Step	Time (hh:mm:ss)	Power (Watts)	Press	Temp1	Temp2
1	00:01:00	250	0	0	0
2	00:02:00	0	0	0	0
3	00:06:00	250	0	0	0
4	00:05:00	400	0	0	0
5	00:05:00	650	0	0	0
vent	00:05:00				

### 3.7.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วย Treated Fly Ash

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วและนิกเกิล โดยใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ในอัตราส่วน 0.5 และ 1.25 กรัมต่อลิตร สำหรับการกำจัดตะกั่วและนิกเกิลตามลำดับ ทำการทดสอบ การดูดซับโลหะหนักตามขั้นตอนในรูปที่ 3.1 นำส่วนสารละลายมาย่อยด้วยเครื่อง Microwave Digester และวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.7.1

### 3.8 การศึกษาผลของแอนไอออนในการกำจัดตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อมีแอนไอออน เนื่องจากในน้ำเสียโดยทั่วไปมักมีแอนไอออนปนอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งแอนไอออนเหล่านี้อาจมีผลกระทบต่อกรกำจัดโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash โดยในการศึกษาผลของแอนไอออนจะใช้สภาวะในการทดลอง คือ ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 เขย่าด้วยอัตราเร็วคงที่ที่ระยะเวลา 30 นาที เมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ ในรูปของเกลือโซเดียม 5 ชนิดด้วยกันคือ ซัลเฟต ฟลูออไรด์ คลอไรด์ ฟอสเฟต และไนเตรต ปนอยู่ในสารละลายโลหะหนัก โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อมีความเข้มข้นของแอนไอออนในปริมาณต่างๆ กัน กล่าวคือ เมื่อมีซัลเฟตไอออน  $2.08 \times 10^{-4}$  ถึง  $8.33 \times 10^{-4}$  โมลาร์ ฟลูออไรด์ไอออน  $1.05 \times 10^{-3}$  ถึง  $4.21 \times 10^{-3}$  โมลาร์ คลอไรด์ไอออน  $5.63 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.25 \times 10^{-3}$

โมลาร์ ฟอสเฟตไอออน  $2.11 \times 10^{-4}$  ถึง  $8.42 \times 10^{-4}$  โมลาร์ ไนเตรตไอออน  $3.23 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.29 \times 10^{-3}$  โมลาร์

### 3.8.1 การกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  และ  $NO_3^-$  ในรูปของเกลือโซเดียม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณ Treated Fly Ash เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร

### 3.8.2 การกำจัดนิกเกิลเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเมื่อมีแอนไอออน  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  และ  $NO_3^-$  ในรูปของเกลือโซเดียม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณ Treated Fly Ash เท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร

### 3.8.3 การกำจัดแคดเมียมเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเมื่อมีแอนไอออน  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  และ  $NO_3^-$  ในรูปของเกลือโซเดียม เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และใช้ปริมาณ Treated Fly Ash เท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร

## 3.9 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิด

เนื่องจากในน้ำเสียจริงโดยทั่วไปแล้วอาจมีโลหะหนักรวมกันอยู่มากกว่า 1 ชนิด ขึ้นอยู่กับน้ำเสียแต่ละประเภท ซึ่งอาจทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash ดังนั้นในการทดลองต่อไปนี้จะได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีโลหะหนักอยู่รวมกัน 2 ชนิด โดยจะใช้สภาวะในการทดลอง คือ ค่าพีเอชของสารละลายเท่ากับ 5 เขย่าด้วยอัตราเร็วคงที่ที่ระยะเวลา 30 นาที

ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิดในสารละลาย โดยแบ่งเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและแคดเมียม เมื่อมีตะกั่วรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม เมื่อมีนิกเกิลรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้น ตั้งแต่ 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและนิกเกิล เมื่อมีแคดเมียม รวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้น ตั้งแต่ 0 ถึง 8 มิลลิกรัมต่อลิตร

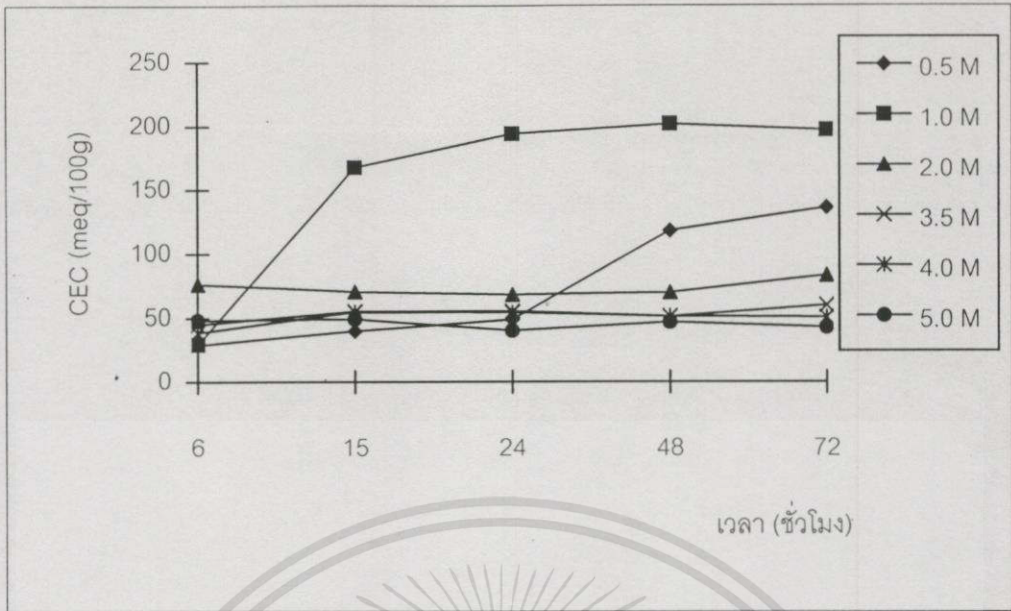
## ผลการทดลองและอภิปราย

### 4.1 ผลการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของ Fly Ash

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของ Fly Ash โดยการรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพิจารณา ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ ที่ทำให้ค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) มีค่าสูงที่สุด ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 และตารางที่ ก.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแปรเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของ Fly Ash โดยพบว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ ค่า CEC ของ Fly Ash ที่ผ่านการรีฟลักซ์ (ต่อไปจะเรียกว่า Treated Fly Ash) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์เพิ่มขึ้น ขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็น 1.0 โมลาร์ ค่า CEC ของ Treated Fly Ash ที่ได้จะเพิ่มขึ้นในอัตราคงที่จนมีค่าสูงถึงเกือบ 200 meq/100g ที่เวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นถึง 72 ชั่วโมงก็จะไม่ค่อยก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า CEC มากนัก และพบว่าค่า CEC ของ Treated Fly Ash ที่ได้จะมีค่า CEC สูงกว่าในกรณีที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น การรีฟลักซ์ที่เวลา 6-72 ชั่วโมง ก็จะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า CEC มากนัก กล่าวคือค่า CEC อยู่ในช่วง 76-83, 44-59, 38-50 และ 40-49 meq/100g เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 2.0, 3.5, 4.0 และ 5.0 โมลาร์ ตามลำดับ จากการทดลองตอนนี้สามารถสรุปได้ว่า Treated Fly Ash จะมีค่า CEC สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ Fly Ash ที่ไม่ได้รับรีฟลักซ์ (ต่อไปจะเรียกว่า Untreated Fly Ash) กล่าวคือค่า CEC ของ Untreated Fly Ash จะมีค่าเท่ากับ 8.4 meq/100g ซึ่ง Treated Fly Ash จะมีค่า CEC สูงกว่าถึงประมาณ 24 เท่า

Treated Fly Ash ที่ได้ซึ่งมีค่า CEC ที่สูงขึ้นนั้นจะเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงดิน เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่นำไปใช้ในการปรับปรุงดิน เช่น ซีโอไลท์ ซึ่งมีค่า CEC อยู่ในช่วง 200 ถึง 300 meq/100g และนอกจากนี้ยังสามารถนำ Treated Fly Ash ที่ได้ไปประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน หรือเป็นตัวดูดซับไอออน เช่น ใช้ในการกำจัดแอมโมเนีย และไอออนของโลหะหนักที่เป็นพิษในน้ำ (Booker *et.al.* 1996)

ในการทดลองหลังจากนี้จะใช้ Treated Fly Ash ที่ได้จากการรีฟลักซ์ ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในการทดสอบการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียต่อไป

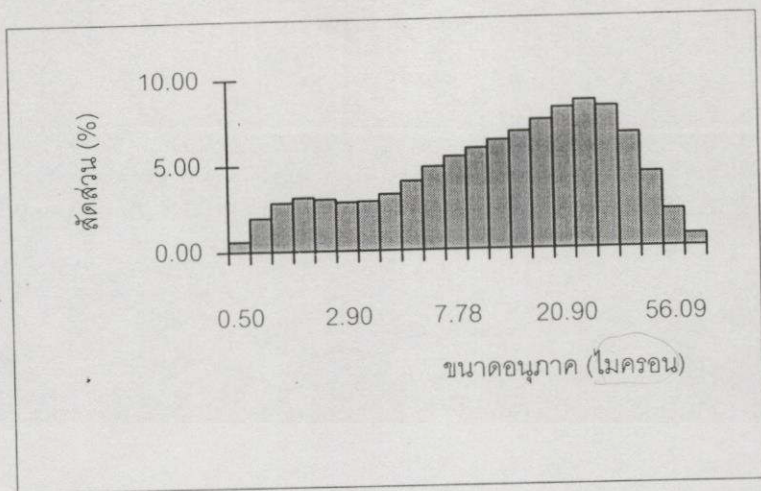


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุรแลกเปลี่ยนแคตไอออนกับระยะเวลาในการรีฟลักซ์เมื่อใช้ไฮโดรคลอริกแอซิด ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

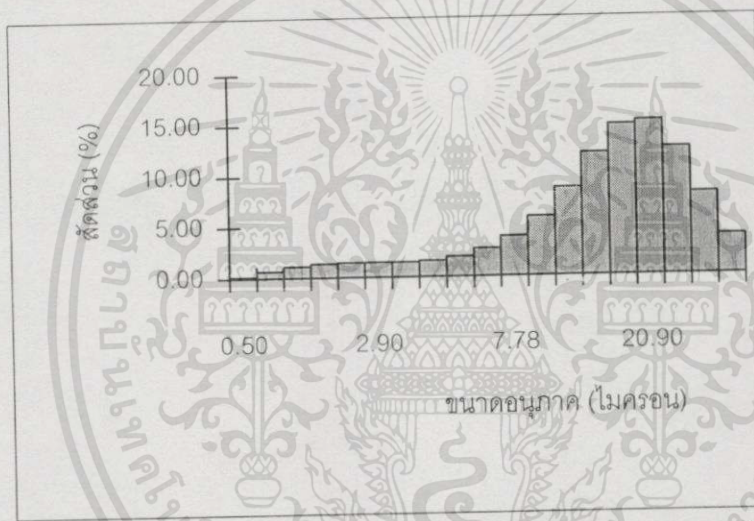
#### 4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

##### 4.2.1 การหาขนาดของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

จากการทดลองหาขนาดของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash จากหม้อต้มแม่เมาะด้วยเครื่อง Laser Particle Size Analyzer ดังแสดงผลในรูปที่ 4.2 ก) และตารางที่ ก.2 ก) พบว่าขนาดของ Untreated Fly Ash จะอยู่ในช่วง 10-60 ไมครอน เปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคของ Treated Fly Ash ที่ได้จากการรีฟลักซ์ด้วยไฮโดรคลอริกแอซิด 1.0 โมลาร์ เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 10-30 ไมครอน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ข) และตารางที่ ก.2 ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการรีฟลักซ์ Fly Ash ด้วยไฮโดรคลอริกแอซิดจะทำให้ขนาดอนุภาคของ Fly Ash มีอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้น ส่งผลให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้น (Faust and Aly, 1987)



ก)



ข)

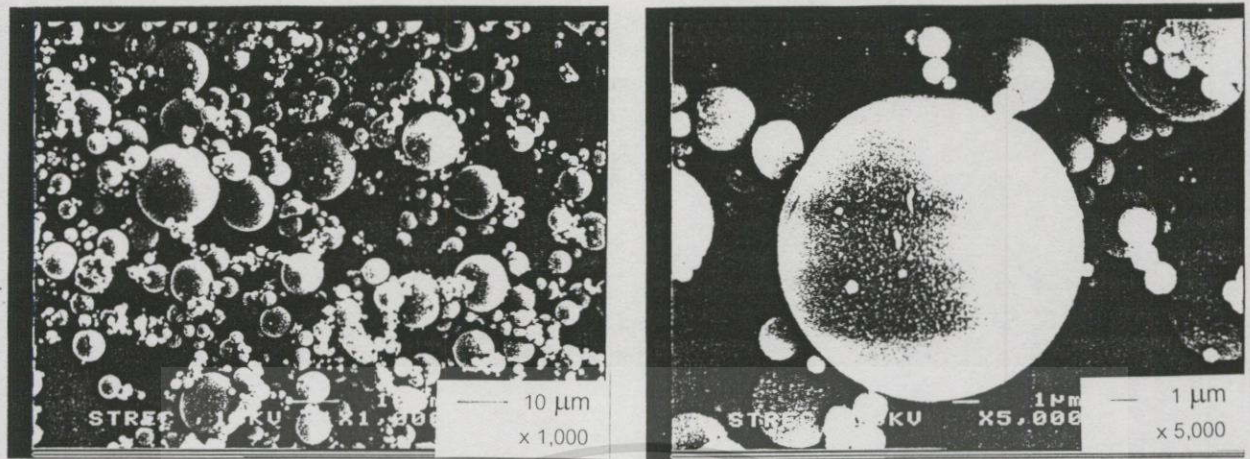
รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ ก) Untreated Fly Ash ข) Treated Fly Ash

#### 4.2.2 ผลการศึกษาลักษณะรูปร่างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

จาก Scanning Electron Micrograph ขนาด  $\times 1000$  และ  $\times 5000$  เท่าของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash พบว่ารูปร่างของ Untreated Fly Ash เป็นทรงกลม ที่มีพื้นผิวเรียบ ดังรูปที่ 4.3 ก) ในขณะที่ Treated Fly Ash ที่ได้จากการรีฟลักซ์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ จะมีพื้นผิวอนุภาคของมันจะมีความเป็นผลึกและรูพรุน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ข) สำหรับกรณีที่ใช้ความเข้มข้นของไฮเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น คือ 3.5 และ 5.0 โมลาร์ จาก Scanning Electron Micrograph พบว่า จะสามารถมองเห็นการเป็นผลึกได้ชัดเจนมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค) และ ง) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

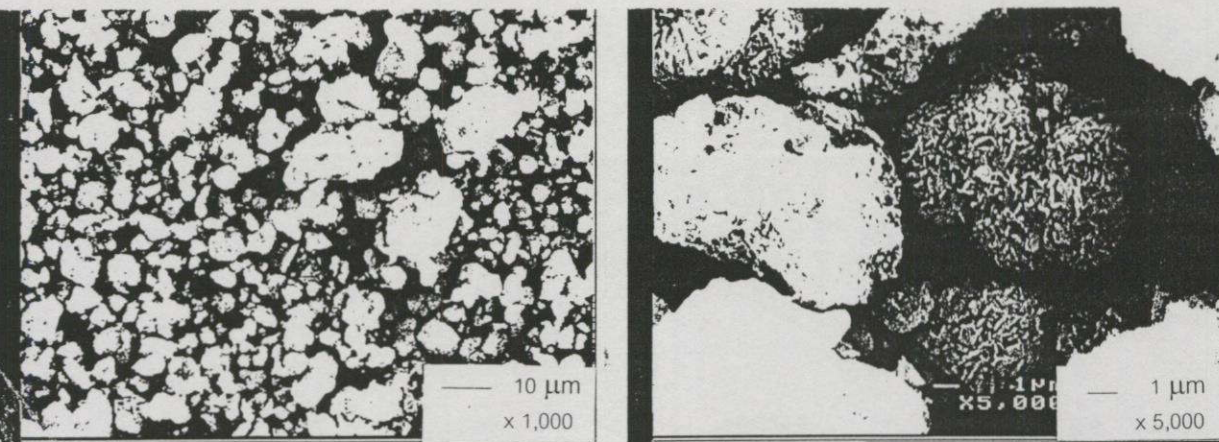
รูปที่ 4.3 Scanning Electron Micrograph ของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ก) Untreated Fly Ash

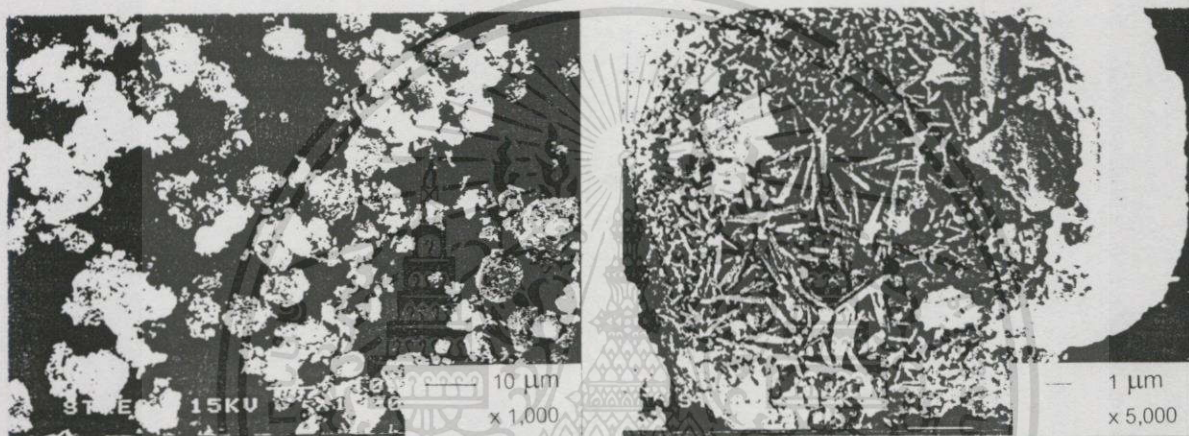
ข) Treated Fly Ash 1.0 M NaOH 24 ชั่วโมง

ค) Treated Fly Ash 3.5 M NaOH 24 ชั่วโมง

ง) Treated Fly Ash 5.0 M NaOH 24 ชั่วโมง



ค)



ง)

รูปที่ 4.3 (ต่อ)

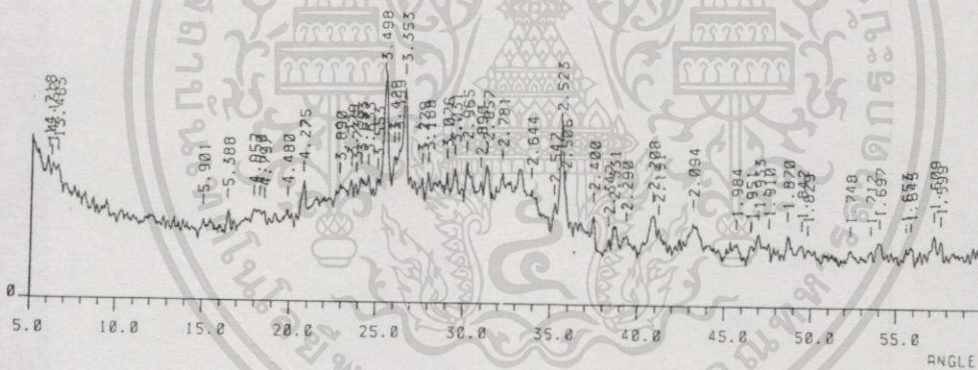
#### 4.2.3 ผลการศึกษาความเป็นผลึกของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

จากการศึกษาความเป็นผลึกของ Untreated Fly Ash โดยการวิเคราะห์ด้วย X-Ray Diffractometer (XRD) จะปรากฏ XRD pattern ซึ่งมีความเป็นผลึกน้อยและมีความเข้มต่ำมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ก) โดยจะปรากฏพีกที่มีความเข้มสูงๆ ที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 20.76, 25.95, 26.56 และ 35.56 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า Untreated Fly Ash มีองค์ประกอบหลักเป็นควอตซันเอง และเมื่อทำการรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน พบว่า Treated Fly Ash สามารถเปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสอื่นที่มีผลึกเป็นองค์ประกอบ โดยพบว่าเมื่อรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่เวลา 24 ชั่วโมง จะปรากฏ XRD pattern ที่มีความเข้มสูงขึ้นที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 12.40, 17.72, 21.60, 28.20, 33.20, 35.56 และ 45.86 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ข) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า Treated Fly Ash ที่ได้เปลี่ยนเฟสไปเป็นเฟสอื่นที่มีความเป็นผลึกสูงขึ้น นั่นคือเกิดเป็น Zeolite Na-P ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น  $\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{10}]\cdot 15\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ XRD pattern ของ Zeolite P จาก Breck.1974 จะปรากฏ XRD pattern ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  ตรงกัน ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการพาณิชย์โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

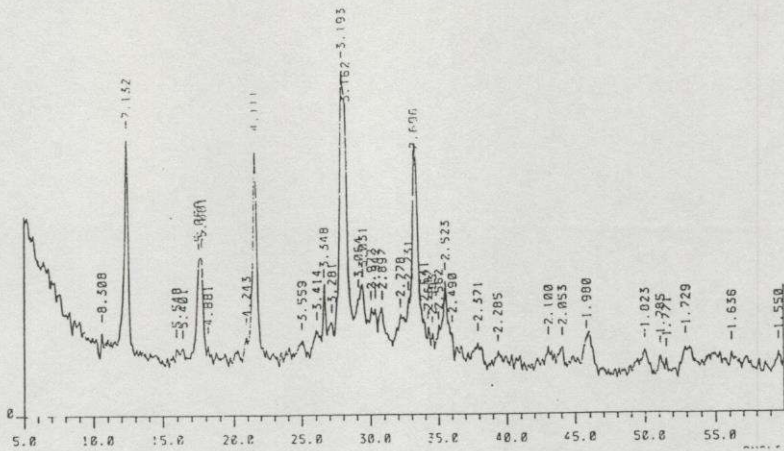
จะเป็นการยืนยันได้ว่าการรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ 24 ชั่วโมง จะได้ Zeolite Na-P และเมื่อทำการรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น คือ 3.5 และ 5.0 โมลาร์ ที่เวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเฟสใหม่ที่เกิดขึ้นจะให้ XRD pattern ที่แตกต่างออกไป คือจะปรากฏพิกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  เท่ากับ 6.08, 20.20, 24.28, 28.92, 31.88, 34.48 และ 42.64 ซึ่งสอดคล้องกับ XRD pattern ของ Zeolite Sodalite Octahydrate ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ค) และ 4.2 ง) ดังนั้นเราจึงสามารถสรุปได้ว่าจากการรีฟลักซ์ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นน้อยๆ เฟสใหม่ที่เกิดขึ้น คือ Zeolite Na-P และเมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 3.5 และ 5.0 โมลาร์ เฟสใหม่ที่เกิดขึ้นคือ Sodalite Hydrate ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น  $\text{Na}_6(\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{24}) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  เมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ Henmi. 1987 พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 3.5 โมลาร์ เวลา 24 ชั่วโมง เฟสใหม่ที่เกิดขึ้นจากการรีฟลักซ์ คือ Hydroxy-Sodalite เช่นกัน ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่าสอดคล้องกับข้อมูลที่พบจากการศึกษาการเตรียม Zeolite P (Breck. 1974) โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น Zeolite P ที่ได้จะเปลี่ยนเฟสไปเป็น Zeolite ที่เรียกว่า Sodalite Hydrate



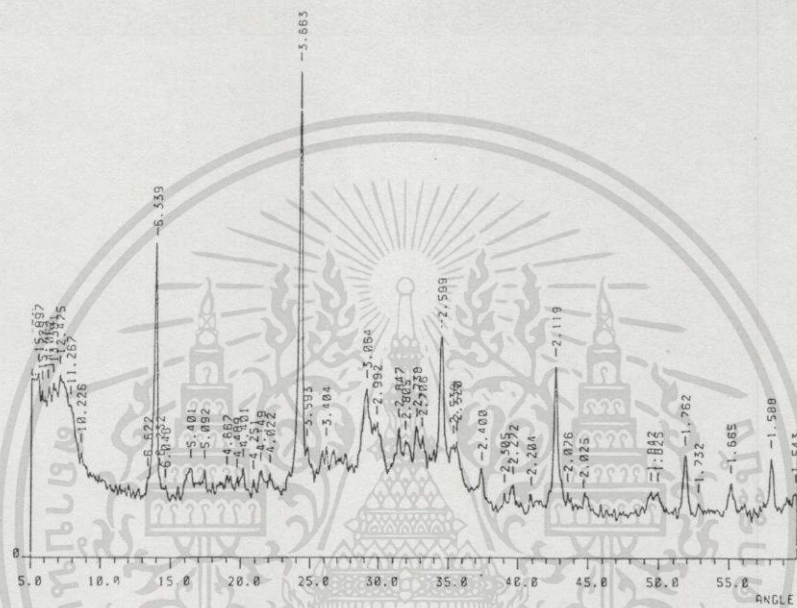
ก)

รูปที่ 4.4 XRD pattern ของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

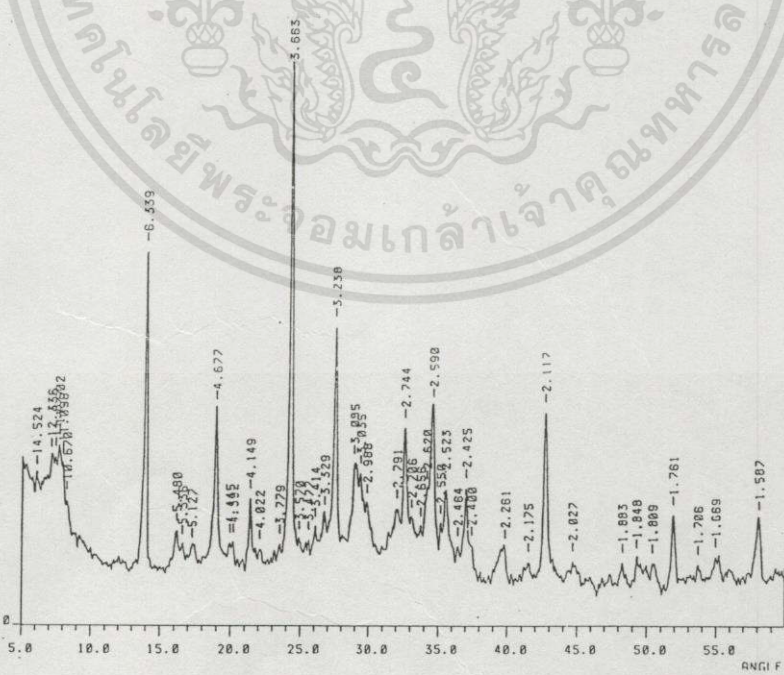
- ก) Untreated Fly Ash
- ข) Treated Fly Ash 1.0 M NaOH 24 ชั่วโมง
- ค) Treated Fly Ash 3.5 M NaOH 24 ชั่วโมง
- ง) Treated Fly Ash 5.0 M NaOH 24 ชั่วโมง



ข)



ค)



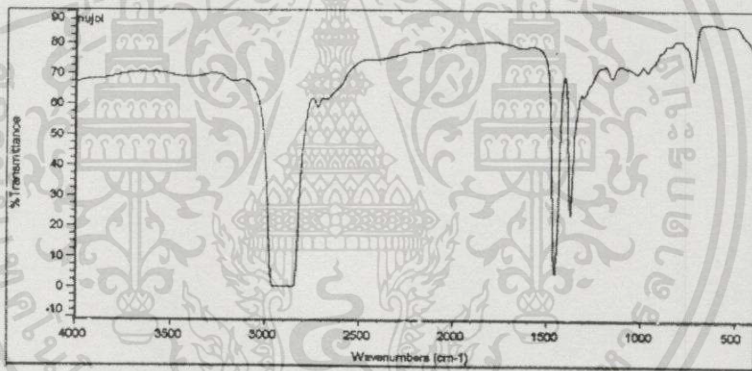
ง)

รูปที่ 4.4 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.4 ผลการศึกษาโครงสร้างของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

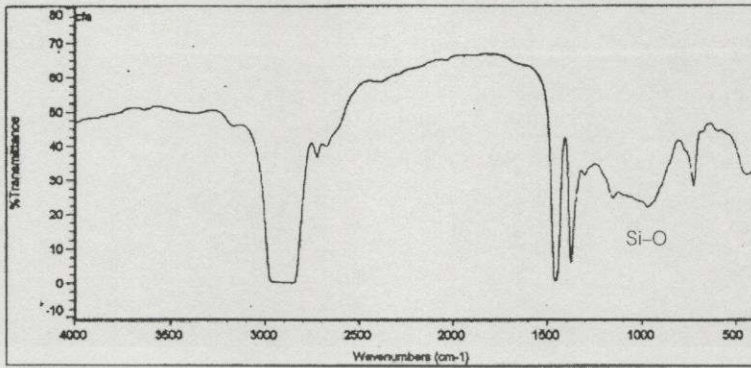
จากผลการศึกษาโครงสร้างของสารด้วยเทคนิคฟูริเออร์ทรานสฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโตรเมตรี (FT-IR) โดยใช้วิธีการเตรียมตัวอย่างด้วย Mull Technique สำหรับ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash ที่ได้จากการรีฟลักซ์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0, 3.5 และ 5.0 โมลาร์ เวลา 24 ชั่วโมง พบว่าสเปกตรัม FT-IR ของ Untreated Fly Ash แสดงในรูปที่ 4.5 ข) ให้แบนด์การดูดกลืนที่ช่วงเลขคลื่น  $1,000-1,100\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเกิดจากการสั่นของ Si-O Stretching แสดงว่า Untreated Fly Ash มีองค์ประกอบหลักเป็นซิลิเกต และจากสเปกตรัม FT-IR ของ Treated Fly Ash แสดงในรูปที่ 4.5 ค) ถึง จ) พบว่ามีองค์ประกอบของไฮดรอกซีโซดาไลท์ โดยมีแบนด์การดูดกลืนที่บริเวณ  $3,400$  และ  $1,640\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นแบนด์ของการสั่นของ O-H Stretching และการสั่นของ H-O-H Bending ตามลำดับ



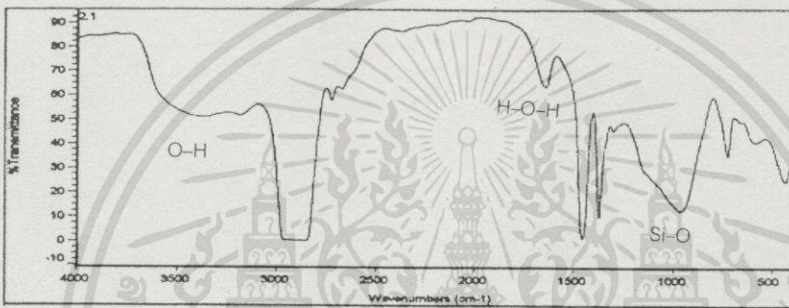
ก)

รูปที่ 4.5 แสดง FT-IR สเปกตรัมของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

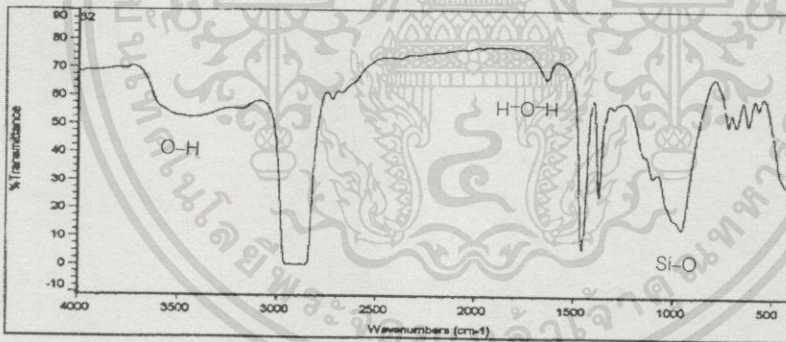
- ก) Nujol ข) Untreated Fly Ash ค) Treated Fly Ash 1.0 M NaOH 24 ชั่วโมง  
 ง) Treated Fly Ash 3.5 M NaOH 24 ชั่วโมง  
 จ) Treated Fly Ash 5.0 M NaOH 24 ชั่วโมง



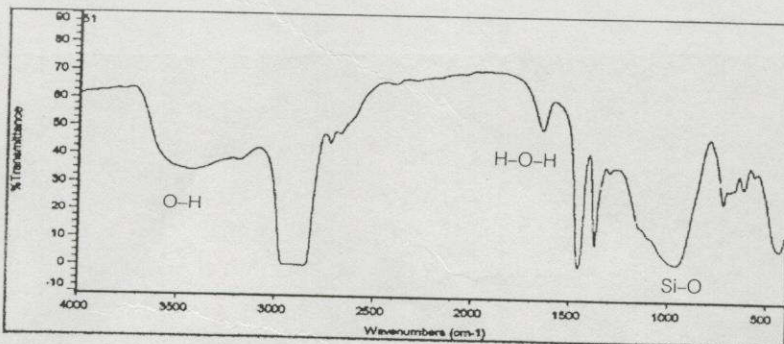
ก)



ค)



ง)



จ)

### รูปที่ 4.5 (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash โดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence Spectrometry ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าองค์ประกอบหลักของ Untreated Fly Ash ประกอบด้วย  $\text{SiO}_2$  38.16 % ขณะที่องค์ประกอบรองประกอบด้วย  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ , และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ในปริมาณ 21.11, 16.64, 11.72, 2.94 และ 1.65 % ตามลำดับ หลังจากทำการรีฟลักซ์แล้วองค์ประกอบของ Treated Fly Ash ที่ได้แปรเปลี่ยนไปมากคือ ปริมาณของ  $\text{Na}_2\text{O}$  เพิ่มสูงขึ้นจากต่ำลยที่ไม่ได้รีฟลักซ์ประมาณ 6 เท่า ในขณะที่องค์ประกอบอื่นๆ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก นั่นก็คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใส่เข้าไปจะไฮโดรไลซ์องค์ประกอบเดิมของ Untreated Fly Ash แล้วจึงเกิดการจัดเรียงตัวเป็นเฟสใหม่ที่มีความเป็นรูพรุนและมีความเป็นผลึกมากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการศึกษาลักษณะรูปร่างและความเป็นผลึกของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash ในหัวข้อ 4.2.2 และ 4.2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ตัวอย่าง	ปริมาณธาตุ (% โดยน้ำหนัก)					
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Untreated Fly Ash	38.16	21.11	16.64	2.94	1.65	11.78
Treated Fly Ash	38.12	23.08	13.92	2.09	9.93	8.72

#### 4.3 ผลการศึกษากำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

##### 4.3.1 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

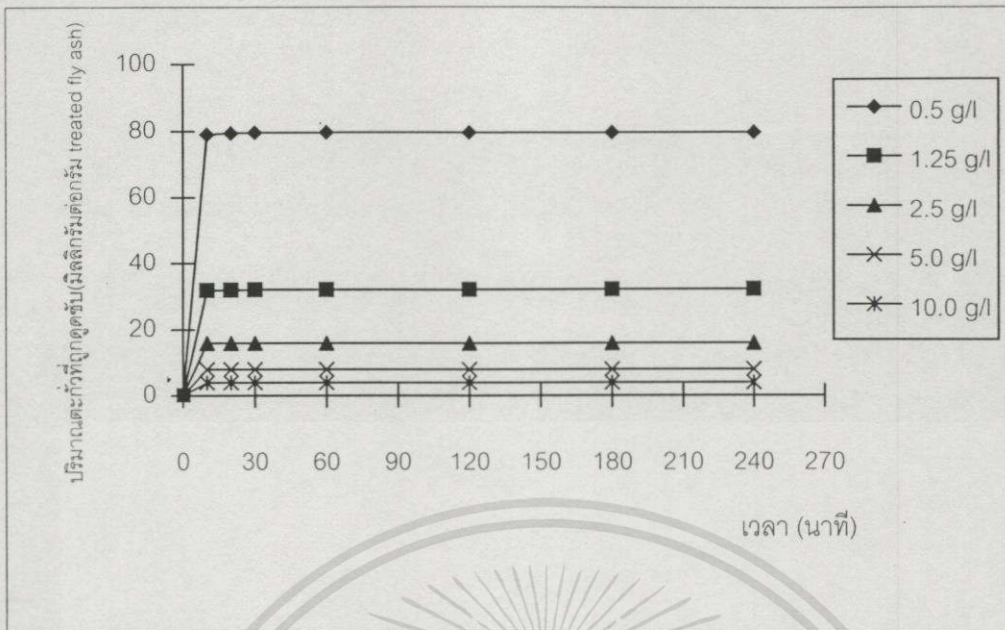
การศึกษากำจัดโลหะหนัก 3 ชนิด คือ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 0.5, 1.25, 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร สารละลายมีค่าพีเอชเท่ากับ 5 อนุกรม 25 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยอัตราเร็วคงที่ที่เวลาต่างๆ กัน ซึ่งความสามารถในการดูดซับจะแตกต่างกัน ของโลหะหนักแต่ละชนิดดังนี้

#### 4.3.1.1 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัด ตะกั่ว

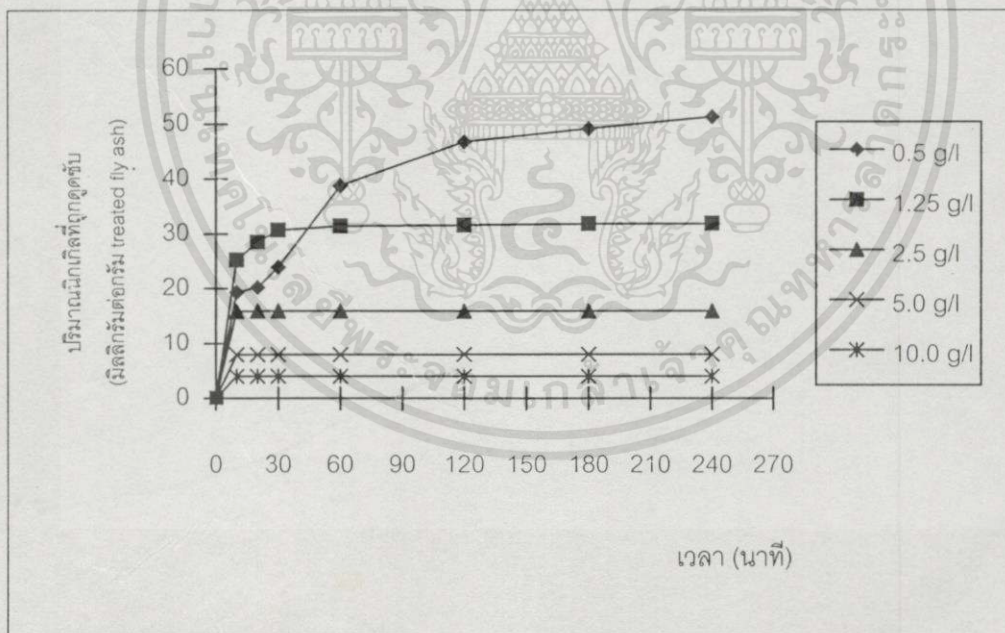
จากการศึกษาการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร การดูดซับจะเข้าสู่สมดุลและมีปริมาณการ ดูดซับตะกั่วเท่ากับ 79.49 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash และสำหรับที่ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 1.25, 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร เมื่อการดูดซับเข้าสู่สมดุลปริมาณการดูดซับ ตะกั่วลดต่ำลงมาเท่ากับ 31.94, 15.92, 7.97 และ 3.99 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash ตาม ลำดับ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.6 และตารางที่ ข.1 ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกใช้ปริมาณ Treated Fly Ash 0.5 กรัมต่อลิตร ในการกำจัดตะกั่ว เพื่อที่จะนำไปใช้ในการทดลองในหัวข้อ ต่อไป

#### 4.3.1.2 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัด นิกเกิล

จากการศึกษาการดูดซับนิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร มีปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น สำหรับที่ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 1.25 กรัมต่อ ลิตร การดูดซับจะเข้าสู่สมดุลและมีปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับเท่ากับ 31.45 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash และสำหรับที่ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อ ลิตร พบว่ามีปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุลลดลงเป็น 15.89, 7.99 และ 3.99 มิลลิกรัมต่อ กรัม Treated Fly Ash ตามลำดับ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.7 และตารางที่ ข.2 ดังนั้นจากผลการ ทดลองนี้จึงเลือกอัตราส่วน Treated Fly Ash เท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร ในการนำไปใช้ในการ ศึกษาในหัวข้อต่อไป



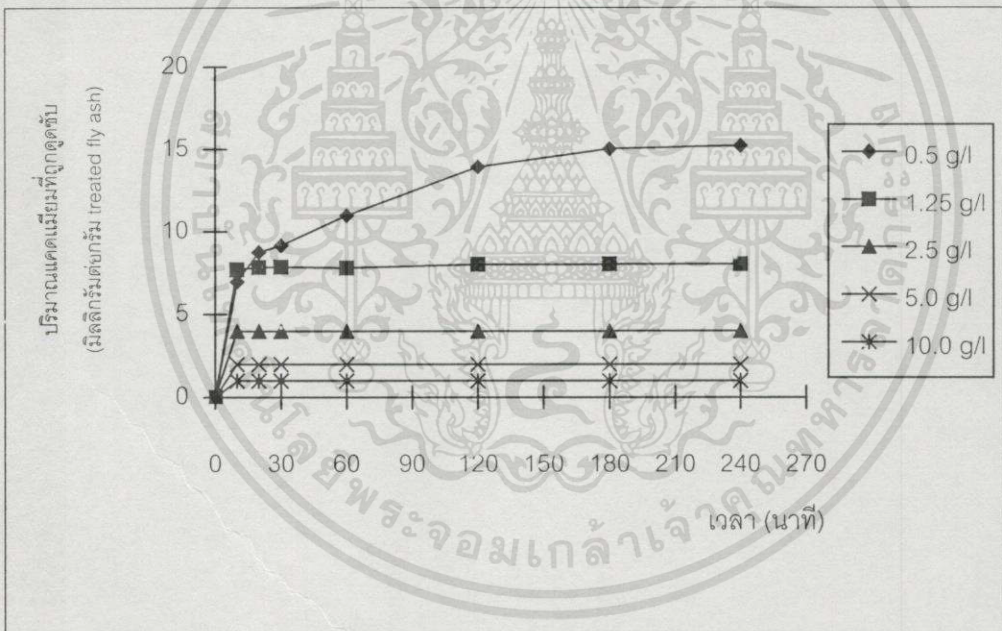
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับกับเวลาเมื่อใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณนิกเกิลที่ถูกดูดซับกับเวลาเมื่อใช้ปริมาณ treated fly ash ต่างๆ กัน

#### 4.3.1.3 ผลการศึกษาปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัด แคลเซียม

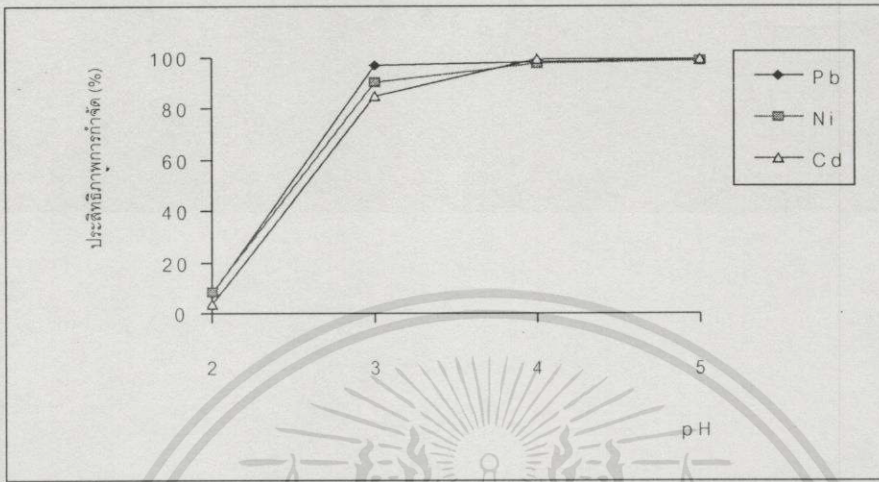
จากการศึกษาการดูดซับแคลเซียมที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าที่ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร มีปริมาณแคลเซียม ที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาที่ใช้ในการเขย่าเพิ่มขึ้น สำหรับที่ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร การดูดซับจะเข้าสู่สมดุลและมีปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับเท่ากับ 8.01 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash และสำหรับที่ปริมาณของ Treated Fly Ash เท่ากับ 2.5, 5.0 และ 10.0 กรัมต่อลิตร พบว่ามีปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุลลดลงเป็น 3.97, 1.97 และ 0.99 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash ตามลำดับ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.8 และตารางที่ ข.3 ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงเลือกอัตราส่วน Treated Fly Ash เท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร ในการนำไปใช้ในการศึกษาในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแคลเซียมที่ถูกดูดซับกับเวลาเมื่อใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน

เมื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคลเซียม พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิด ที่ค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 พบว่าที่พีเอช 2 ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดมีค่าต่ำกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับที่พีเอช 3 พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วจะมีค่าสูงที่สุด และรองลงมาเป็นนิกเกิล สำหรับแคลเซียมพบว่ามีค่าความ

สามารถในการดูดซับน้อยที่สุด ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.9 และสำหรับที่พีเอช 4 และ 5 พบว่าประสิทธิภาพการจำกัดโลหะหนักจะใกล้เคียงกันทุกชนิด



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการจำกัดตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน

#### 4.3.1.4 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

จากการศึกษานี้จะใช้ไอโซเทอมการดูดซับโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด คือ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม โดยใช้ Treated Fly Ash พบว่าสามารถพลอตกราฟความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงได้กับไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ โดยทำการทดสอบด้วยความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วและนิกเกิลเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับแคดเมียม ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และใช้ Treated Fly Ash ปริมาณตั้งแต่ 0.5 กรัมต่อลิตร ถึง 10.0 กรัมต่อลิตร

จากความสัมพันธ์สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ แสดงดังสมการที่ 4.1

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad \dots(4.1)$$

เมื่อ  $X$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัม

$X_m$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) อย่างสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $C_e$  = ความเข้มข้นตัวถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล  
หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร
- $b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/X$  กับ  $C_e$  และเราสามารถหาค่าคงที่  $b$  และ  $X_m$  ได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ ซึ่งสำหรับสมการการดูดซับของโลหะหนักแต่ละชนิดมีความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอัมแบบแลงมัวร์ดังต่อไปนี้

ตะกั่ว ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$C_e/X = 0.011C_e + 0.039 \quad \dots(4.2)$$

นิกเกิล ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$C_e/X = 0.018C_e + 0.025 \quad \dots(4.3)$$

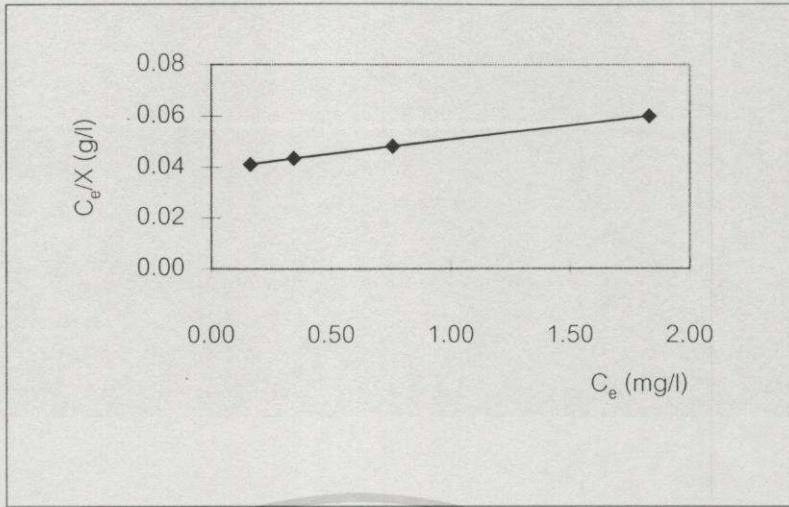
แคดเมียม ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$C_e/X = 0.069C_e + 0.119 \quad \dots(4.4)$$

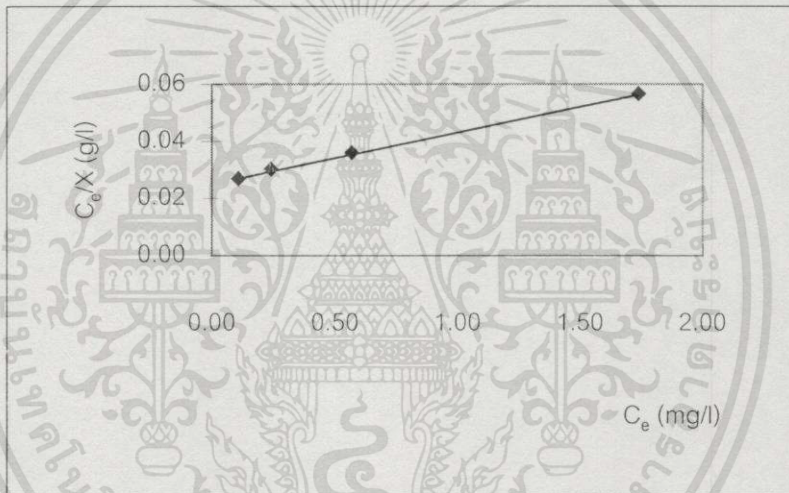
จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.2, 4.3 และ 4.4 จะสามารถหาค่า  $X_m$  และ  $b$  ในสมการที่ 4.1 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 จะพบว่าค่า  $X_m$  ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) อย่างสมบูรณ์ ของโลหะหนักแต่ละชนิด คือ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม เท่ากับ 89.28, 55.55 และ 14.33 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และสำหรับค่า  $b$  ซึ่งเป็นค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ มีค่าเท่ากับ 0.264, 0.704 และ 0.585 สำหรับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ของสมการแลงมัวร์สำหรับการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม ด้วย Treated Fly Ash

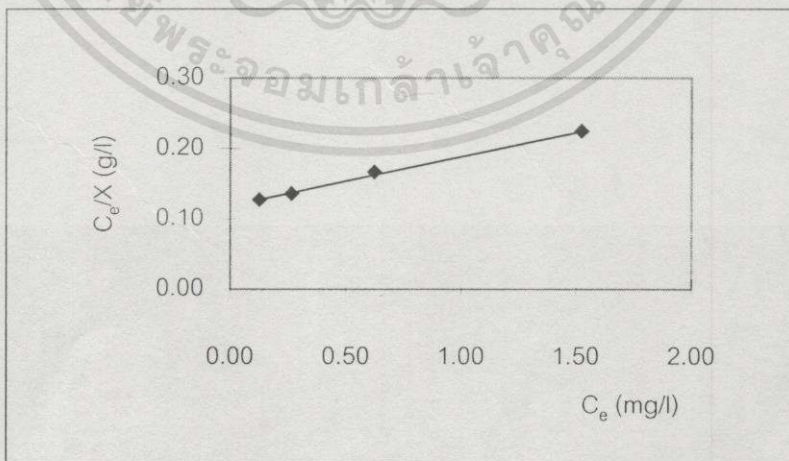
ชนิดโลหะหนัก	พารามิเตอร์ของสมการแลงมัวร์	
	$X_m$ (mg/g)	$b$
ตะกั่ว	89.28	0.264
นิกเกิล	55.55	0.704
แคดเมียม	14.33	0.585



น)



ข)



ค)

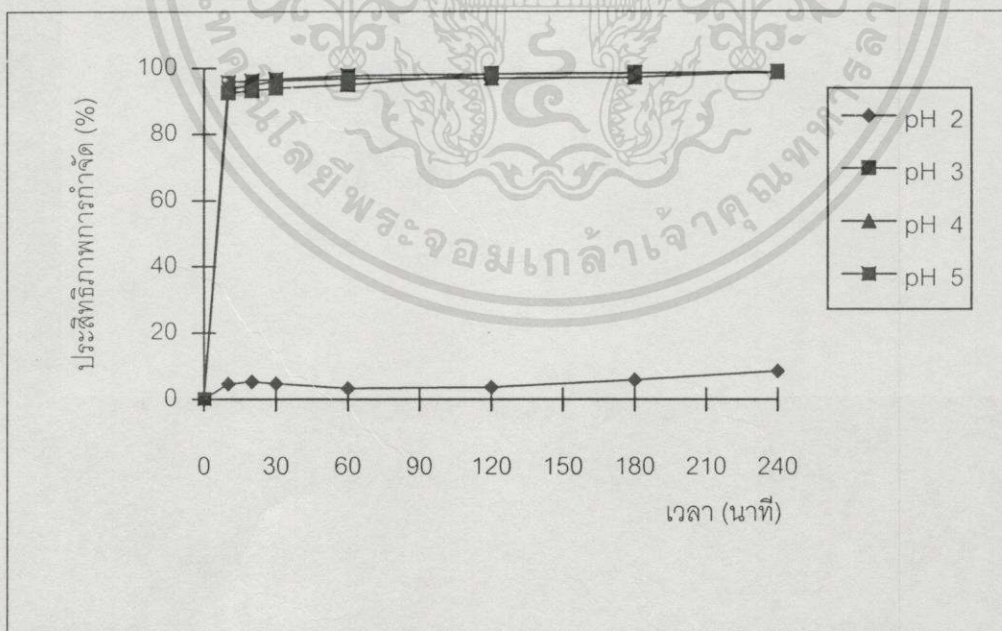
รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของ Treated Fly Ash ในการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ก) ตะกั่ว ข) นิกเกิล และ ค) แคดเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดโลหะหนักที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักต่างๆ กัน

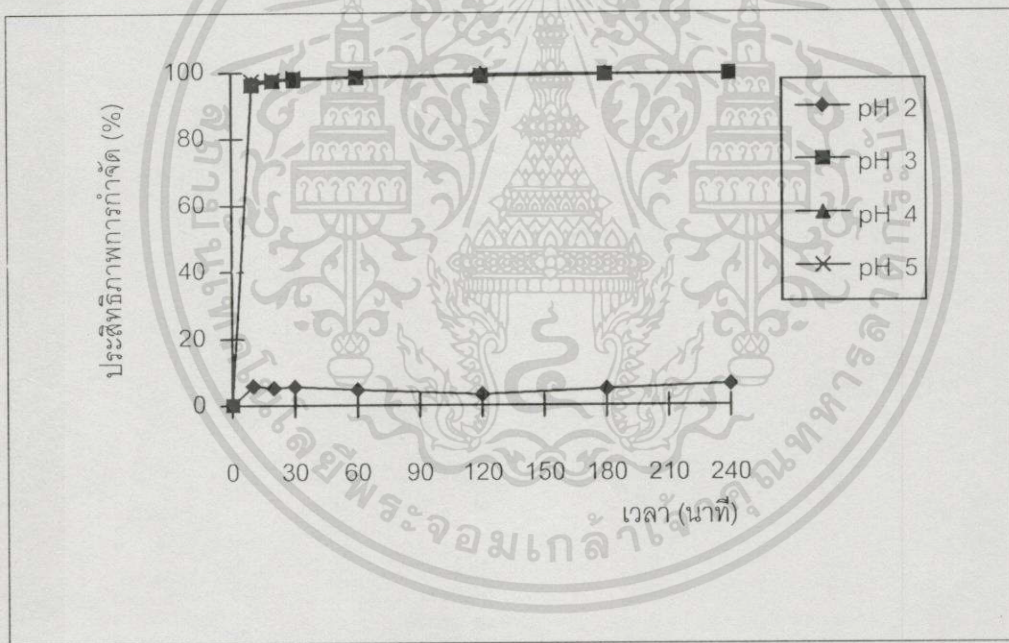
##### 4.3.2.1 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่ว โดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ที่สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด คือ 0.5 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วต่างๆ กัน คือ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสำหรับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลาต่างๆ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.11 และตารางที่ ค.1 โดยจากการทดสอบทางสถิติโดยวิธี ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว คือประสิทธิภาพในการกำจัดที่พีเอช 2 จะมีค่าอยู่ที่น้อยกว่าร้อยละ 10 และสำหรับพีเอช 3 การกำจัดจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 98.23 และสำหรับที่พีเอช 4 และ 5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วสูงสุดเป็นร้อยละ 98.88 และ 98.60 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

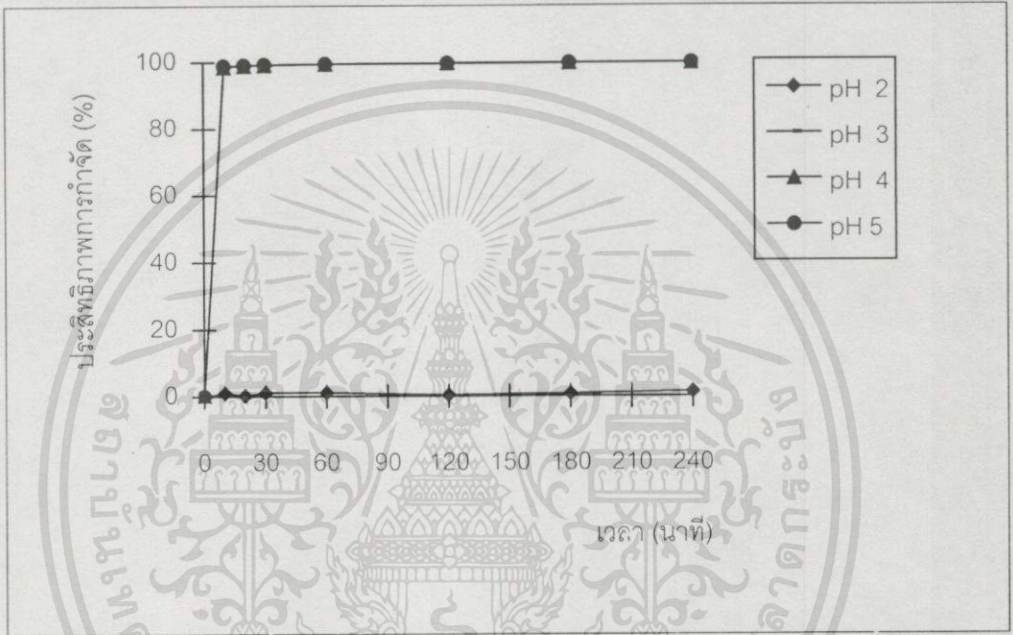
เมื่อใช้ Treated Fly Ash กำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณ Treated Fly Ash 0.5 กรัมต่อลิตร และปรับเปลี่ยนค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 ที่เวลาต่างๆ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่สภาวะต่างๆ ดังกราฟรูปที่ 4.12 และตารางที่ ค.2 และจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดก็จะสูงขึ้นด้วย เช่นเดียวกับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่พีเอช 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำกว่าร้อยละ 10 และประสิทธิภาพในการกำจัดเมื่อค่าพีเอช 3 และ 4 จะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที เท่ากับร้อยละ 98.28 และ 98.39 ตามลำดับ และที่พีเอช 5 การกำจัดเข้าสู่สมดุลที่เวลาการเขย่าเท่ากับ 30 นาที เท่ากับร้อยละ 98.26



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่ว กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น จากกราฟรูปที่ 4.13 และตารางที่ ค.3 โดยจากการทดสอบทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่าง

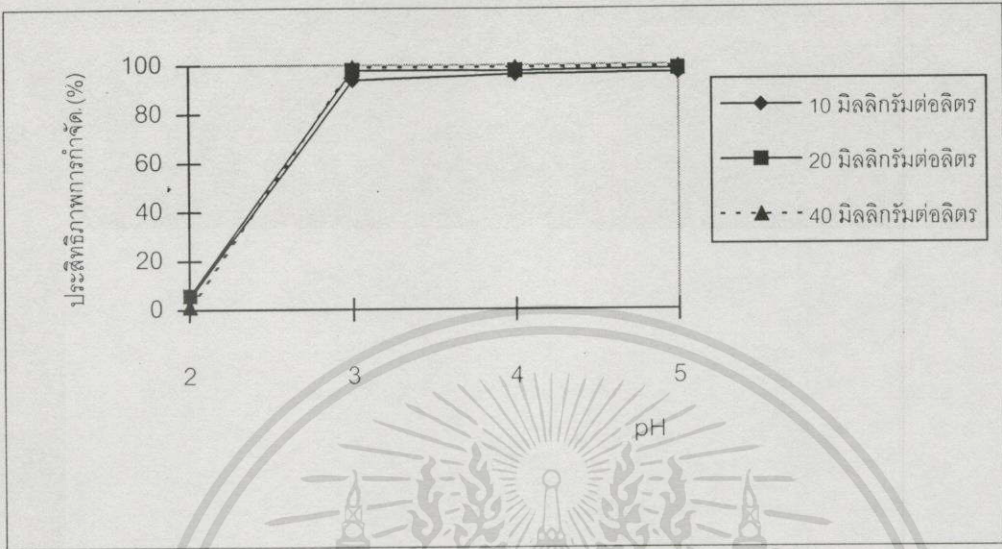
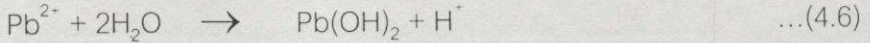
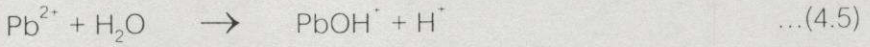
กันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าที่ค่าพีเอช 2 แม้จะเพิ่มระยะเวลาในการเขย่านานถึง 240 นาที ประสิทธิภาพในการกำจัดมีค่าต่ำเพียงร้อยละ 1.34 แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 3 ถึง 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจะสูงขึ้น ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดเข้าสู่สมดุลที่เวลาในการเขย่า 30 นาที มีค่าเท่ากับร้อยละ 99.12, 99.11 และ 99.82 สำหรับที่พีเอช 3, 4 และ 5 ตามลำดับ



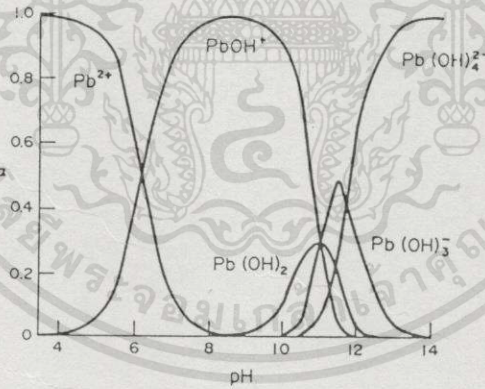
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กัน คือ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที พบว่าจะให้ผลที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ ที่แต่ละความเข้มข้น มีประสิทธิภาพการกำจัดไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ค่าพีเอช 2 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดเพียงเล็กน้อย แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 3, 4 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4.14

เมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วสูงขึ้นนั้น สามารถพิจารณาจากสมการการละลายน้ำ (Hydrolysis) ของตะกั่ว คือ



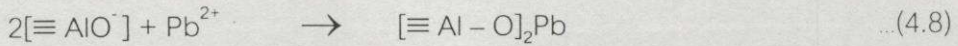
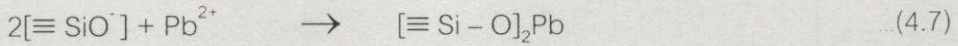
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิผลในการกำจัดตะกั่วกับค่าพีเอชที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วต่างๆ กัน



รูปที่ 4.15 แสดงไดอะแกรมของ Lead Hydroxy Species ที่ค่าพีเอชต่างๆ (Fergusson, 1990)

เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงการแตกตัวของตะกั่วในน้ำที่ค่าพีเอชต่างๆ ดังรูปที่ 4.15 พบว่าที่ค่าพีเอช 6 ปริมาณ  $\text{Pb}^{2+}$  จะลดลงและเปลี่ยนรูปเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ ( $\text{PbOH}^+$ ) ขึ้นมาแทน และเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 8.0  $\text{PbOH}^+$  ก็จะลดลงและเกิดตะกอน  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  ขึ้น นอกจากนี้การกำจัดตะกั่วยัง อาจเกิดการดูดซับเนื่องจากการปฏิกิริยาระหว่างตะกั่วกับ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ใน Treated Fly Ash ซึ่งการเกาะยึดกันของตะกั่วบนผิวของ Hydrated Silica และ Hydrated Alumina ดังสมการต่อไปนี้

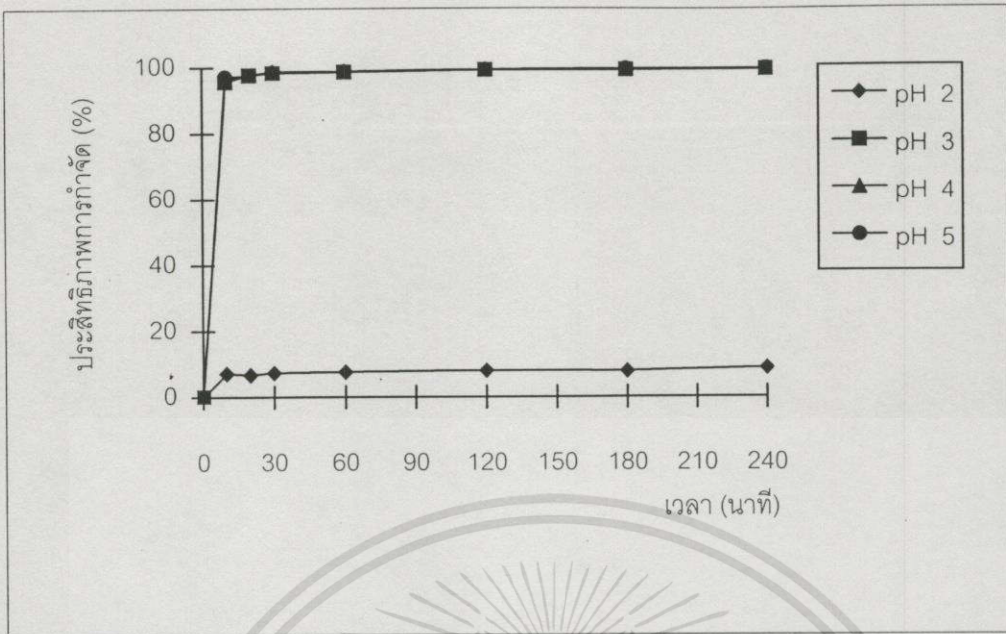
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



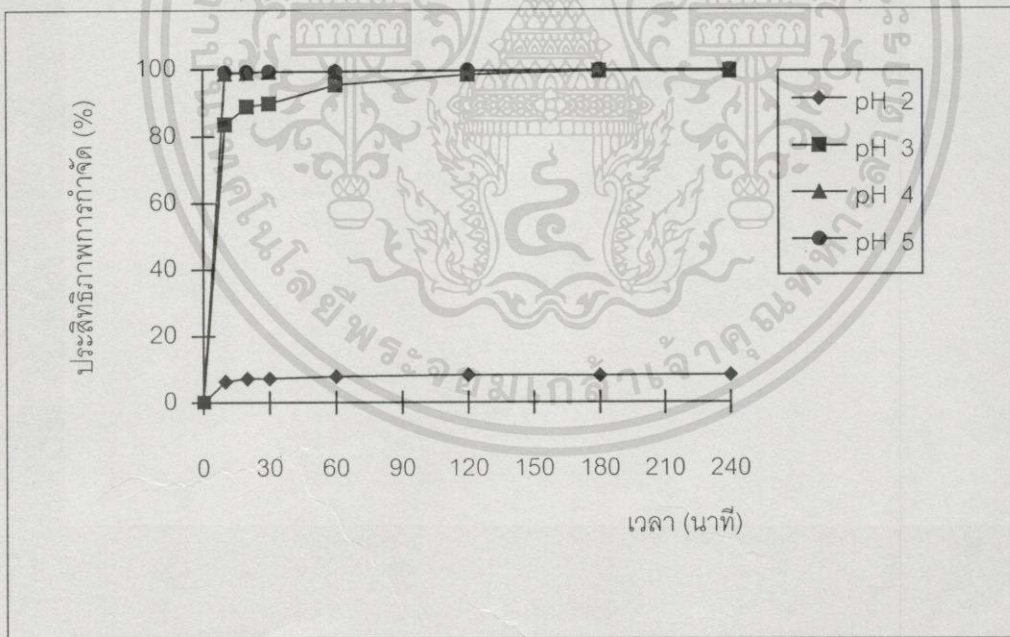
#### 4.3.2.2 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมพัทธ์ในการกำจัดนิกเกิล ในน้ำเสียสังเคราะห์

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล โดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ที่สามารถดูดซับนิกเกิลได้สูงสุด คือ 1.25 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของนิกเกิลต่างๆ กัน คือ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อใช้ Treated Fly Ash กำจัดนิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลาต่างๆ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.16 และตารางที่ ค.4 โดยจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 2 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเพียงร้อยละ 8.64 และประสิทธิภาพในการกำจัดที่พีเอช 3, 4 และ 5 จะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที คือเท่ากับร้อยละ 98.27, 98.72 และ 98.44 ตามลำดับ

เมื่อใช้ Treated Fly Ash กำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณ Treated Fly Ash 1.25 กรัมต่อลิตร และปรับเปลี่ยนค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 ที่เวลาต่างๆ ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่สภาวะต่างๆ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.17 และตารางที่ ค.5 โดยจากการทดสอบทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถสรุปได้ว่า ค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิล กล่าวคือเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดก็จะสูงขึ้นด้วย ทำนองเดียวกับการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่พีเอช 2 มีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 8.27 ที่เวลา 240 นาที ที่พีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงสมดุลที่เวลา 120 นาที คือร้อยละ 98.29 และสำหรับที่พีเอช 4 และ 5 ประสิทธิภาพการกำจัดจะเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 30 นาที เป็นร้อยละ 99.18 และ 99.26 ตามลำดับ

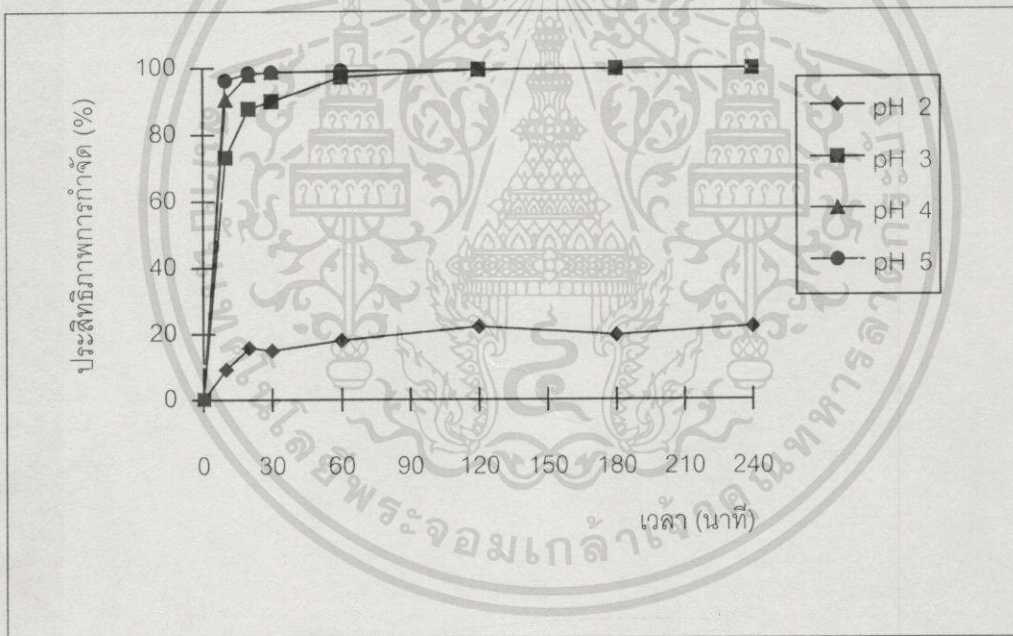


รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดที่เกิดขึ้นกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดที่เกิดขึ้นกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

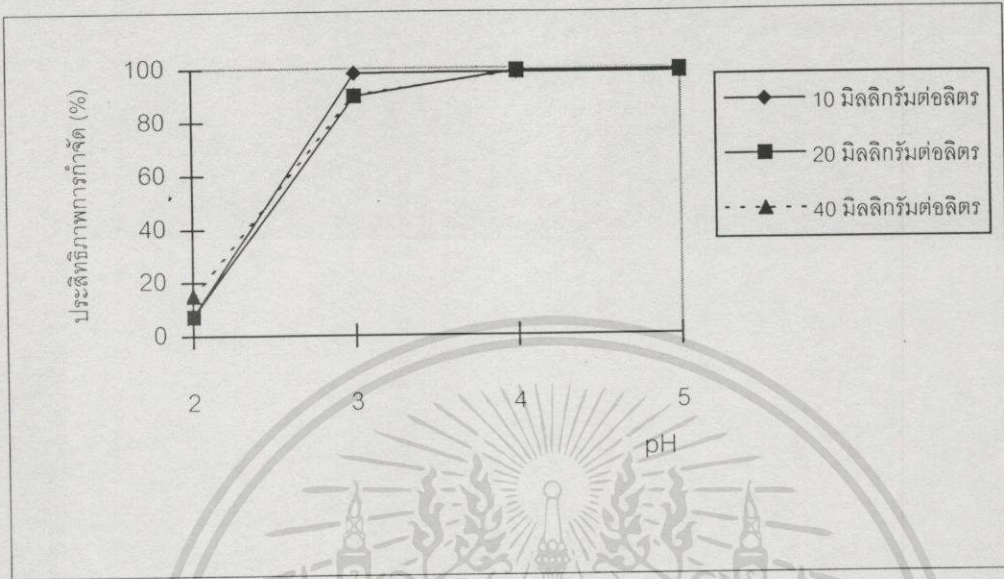
สำหรับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดนิกเกิล กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น ดังกราฟรูปที่ 4.18 และตารางที่ ค.6 โดยจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าที่พีเอช 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงร้อยละ 22.14 ที่เวลา 240 นาที เมื่อเวลาในการเขย่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 3 ถึง 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลจะสูงขึ้น ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดที่พีเอช 3 มีค่าสูงขึ้นจนถึงสมดุลที่เวลา 120 นาที เป็นร้อยละ 99.40 และที่พีเอช 4 และ 5 ระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลเร็วขึ้นคือ 30 นาที และมีประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 98.88 และ 98.67 ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

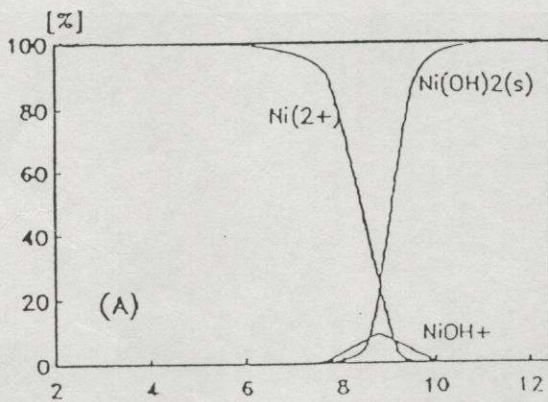
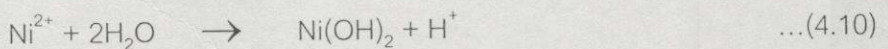
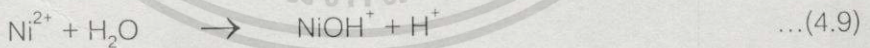
จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กัน คือ 10, 20 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที พบว่าจะให้ผลที่มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ ที่แต่ละความเข้มข้น มีประสิทธิภาพการกำจัดไปในทิศทางเดียวกัน โดยที่ค่าพีเอช 2 จะมี

ประสิทธิภาพการกำจัดเพียงเล็กน้อย คือไม่ถึงร้อยละ 20 แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 3, 4 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลกับค่าพีเอชที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของนิกเกิลต่างๆ กัน

การกำจัดนิกเกิลอาจเกิดจากกระบวนการตกตะกอน ร่วมกับการดูดซับที่ผิวของ Treated Fly Ash โดยเมื่อค่าพีเอชเป็นกรดจะอยู่ในรูปละลายน้ำทำให้ไม่สามารถดูดซับที่ผิวของ Treated Fly Ash ได้ เมื่อพีเอชสูงขึ้นมีนิกเกิลบางส่วนเปลี่ยนรูปเป็น  $NiOH^+$  ซึ่งไม่ละลายน้ำและสามารถถูกดูดซับได้และเมื่อพีเอชสูงขึ้นอีกนิกเกิลจะเปลี่ยนรูปเป็น  $Ni(OH)_2$  ดังสมการ ต่อไปนี้

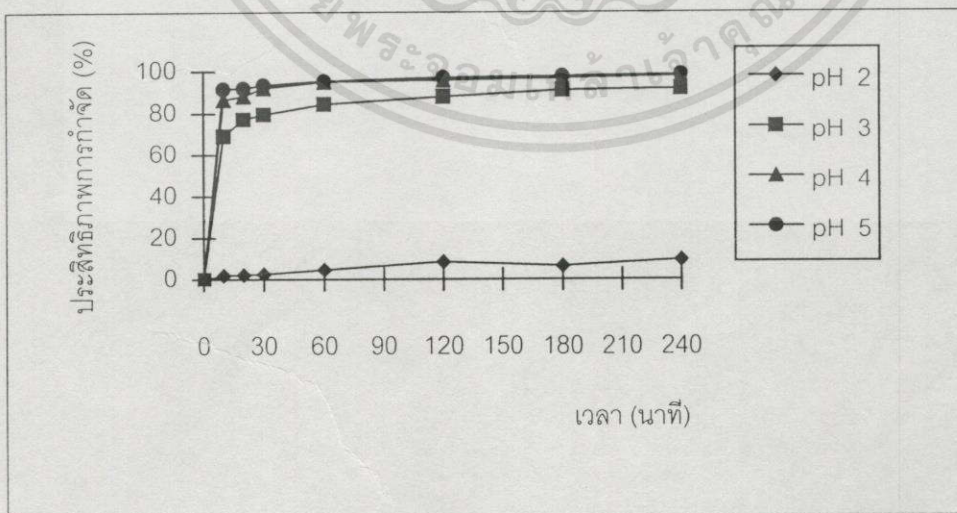


รูปที่ 4.20 แสดงไดอะแกรมของ Nickel Hydroxy Species ที่ค่าพีเอชต่างๆ

เมื่อพิจารณาจากกราฟการไฮโดรไลซิสของนิเกิลที่ค่าพีเอชต่างๆ ดังรูปที่ 4.20 พบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7 ปริมาณ  $Ni^{2+}$  จะลดลงโดยเปลี่ยนรูปไปเป็นนิเกิลไฮดรอกไซด์ ( $Ni(OH)^+$ ) และเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 9  $Ni(OH)^+$  ก็จะลดลงและเกิดตะกอน  $Ni(OH)_2$  นอกจากนี้พบว่าผลการกำจัดนิเกิลยังอาจเกิดจากการดูดซับบน  $Fe_2O_3$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ใน Treated Fly Ash

#### 4.3.2.3 ผลการศึกษาผลของค่าพีเอชและเวลาสัมผัสในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์

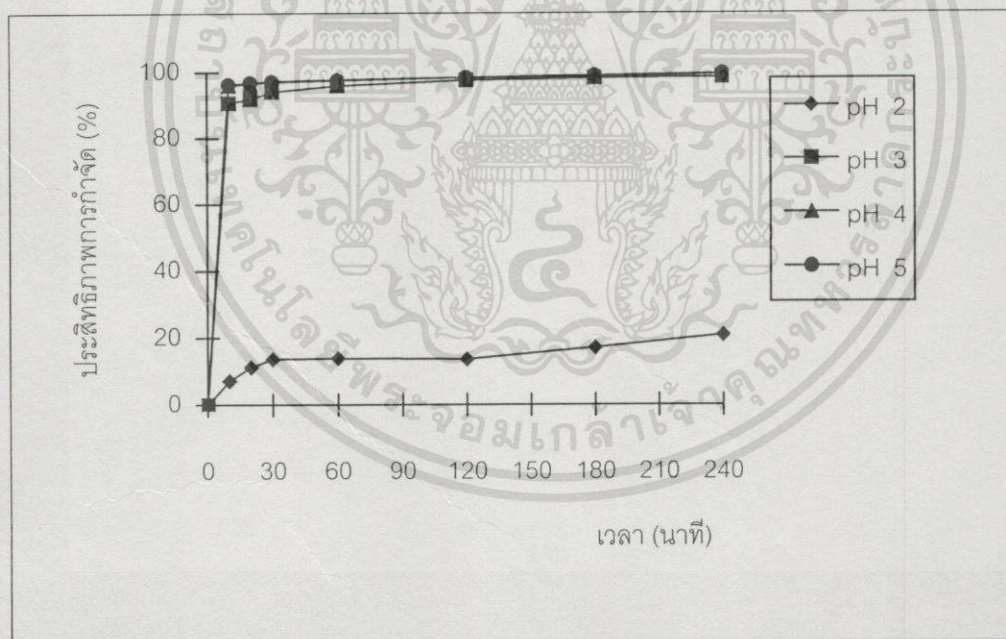
จากการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม โดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยใช้ปริมาณ Treated Fly Ash ที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้สูงสุดคือ 1.25 กรัมต่อลิตร ที่ความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ กัน คือ 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อใช้ Treated Fly Ash กำจัดแคดเมียมโดยมีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลาต่างๆ แสดงดังกราฟรูปที่ 4.21 และตารางที่ ค.7 โดยจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับที่พีเอช 2 ประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2 ถึง 10 ที่เวลาตั้งแต่ 10 ถึง 240 นาที และสำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดที่พีเอช 3 ประสิทธิภาพการกำจัดจะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 69.07 ถึง 91.92 ส่วนที่พีเอช 4 และ 5 จะเริ่มเข้าสู่สมดุลที่เวลาการเขย่า 120 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 95.83 และ 97.02 ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน

เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

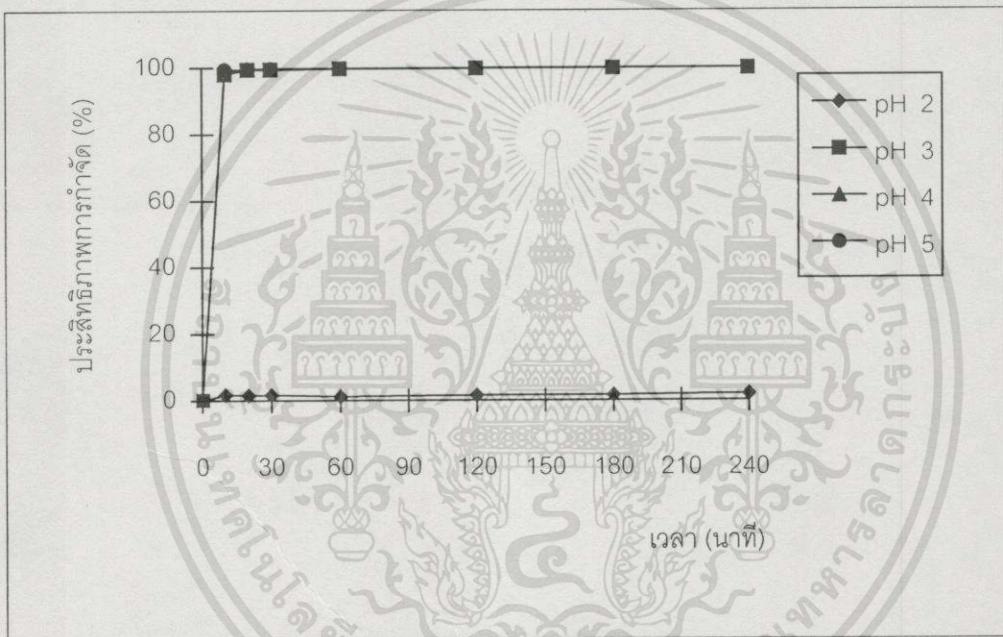
เมื่อใช้ Treated Fly Ash กำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ แคดเมียมเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ใช้ปริมาณ Treated Fly Ash 1.25 กรัมต่อลิตร และปรับ เปลี่ยนค่าพีเอชตั้งแต่ 2 ถึง 5 ที่เวลาต่างๆ ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมที่สภาวะต่างๆ แสดง ดังกราฟรูปที่ 4.22 และตารางที่ ค.8 โดยจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแตกต่างกันอย่างมีนัย สำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัด แคดเมียมอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถสรุปได้ว่า ค่าพีเอชของน้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการ กำจัดแคดเมียม กล่าวคือเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นประสิทธิภาพการกำจัดก็จะสูงขึ้นด้วย เช่นเดียวกับการ ทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยที่พีเอช 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัด จะเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.20 ถึง 20.85 ที่ระยะเวลาตั้งแต่ 10 ถึง 240 นาที และสำหรับที่พีเอช 3 การ กำจัดจะเข้าสู่สมดุลที่เวลาการเขย่าเท่ากับ 120 นาที คือเท่ากับร้อยละ 97.50 และสำหรับที่ค่าพี เอช 4 และ 5 มีประสิทธิภาพการกำจัดเข้าสู่สมดุลที่ระยะเวลา 120 นาที คือเท่ากับร้อยละ 98.38 และ 98.35 ตามลำดับ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับเวลา ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

สำหรับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำมี ผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดแคดเมียม กล่าวคือ ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจะเพิ่ม

ขึ้นเมื่อค่าพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.23 และตารางที่ ค.9 โดยจากการทดสอบทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ พบว่าค่าพีเอช 2, 3, 4 และ 5 มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อเปรียบเทียบค่าพีเอช 3, 4 และ 5 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าที่พีเอช 2 มีประสิทธิภาพในการกำจัดเพียงร้อยละ 1-2 แต่เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 3 ถึง 5 ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมจะสูงขึ้น ในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดที่พีเอช 3, 4 และ 5 จะถึงจุดสมมูลที่เวลา 30 นาที และมีประสิทธิภาพการกำจัดเท่ากับร้อยละ 99.28, 99.68 และ 99.53 ตามลำดับ

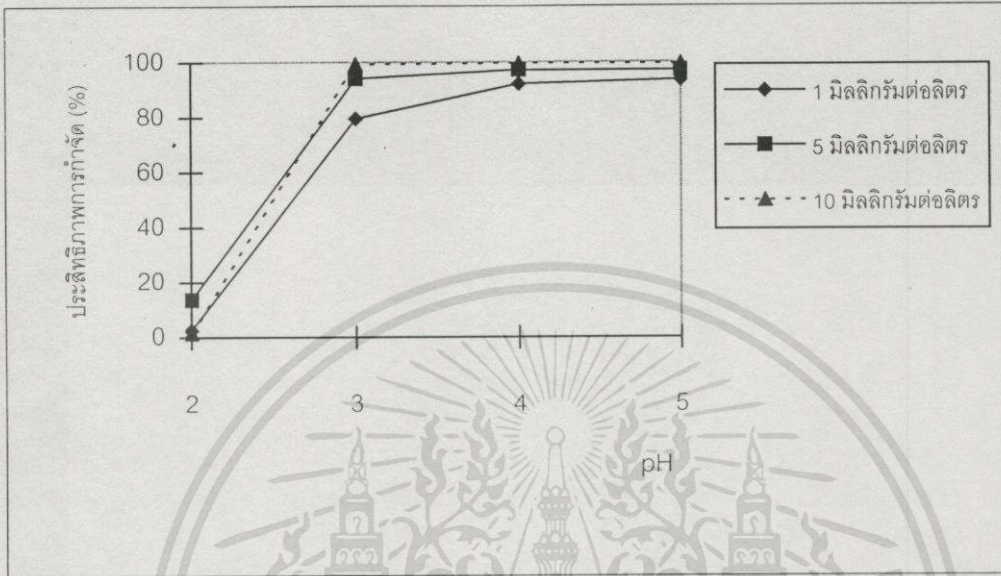


รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมกับเวลาที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพ การกำจัดแคดเมียม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ กัน คือ 1, 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่าจะมีประสิทธิภาพในการกำจัด แคดเมียมน้อยกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูง ทั้งนี้พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่าค่าความจุระดูดซับยังไม่ถึงจุดสมมูล ในขณะที่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นตัวดูดซับยังคงมีความสามารถที่จะดูดซับได้มากถึงจุดสมมูล ดังนั้นเมื่อคิดประสิทธิภาพการกำจัดเป็นเปอร์เซ็นต์จึงทำให้ที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นสูงกว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีกว่า เมื่อใช้ปริมาณของตัวดูดซับเท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดที่แต่ละค่าพีเอชก็ยังมีแนวโน้มไปในทิศ

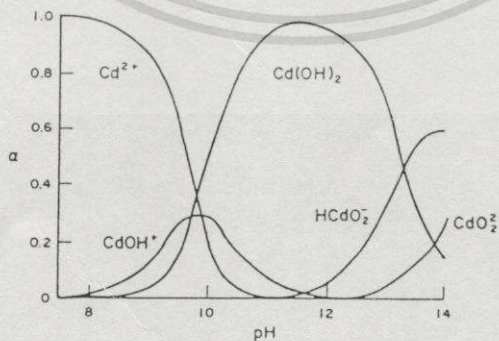
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเดียวกัน โดยที่ค่าพีเอช 2 จะมีประสิทธิภาพการกำจัดเพียงเล็กน้อย คือไม่ถึงร้อยละ 20 สำหรับทุกความเข้มข้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเกือบถึง 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 3, 4 และ 5 ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมกับค่าพีเอชที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมต่างๆ กัน

การกำจัดแคดเมียมพบว่าเมื่อค่าพีเอชสูงขึ้นสามารถกำจัดแคดเมียมได้ดีขึ้น อาจเนื่องจากการตกตะกอนของแคดเมียม โดยเมื่อพิจารณาการไฮโดรไลซิสของแคดเมียมดังรูปที่ 4.25

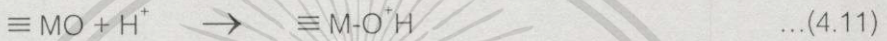


รูปที่ 4.25 แสดงไดอะแกรมของ Cadmium Hydroxy Species ที่ค่าพีเอชต่างๆ (Fergusson, 1990)

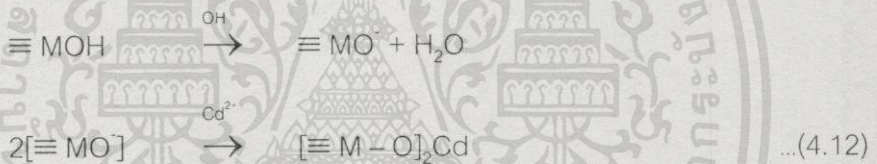
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป ทำให้แคดเมียมในสารละลายของโลหะ แคดเมียมจะสามารถอยู่ในรูปใดรูปหนึ่งได้หลายรูป โดยทั่วไปแคดเมียมที่อยู่ในสารละลายจะเป็น แคดเมียมในรูปไอออน  $(Cd^{2+})$  เมื่อค่าพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นแคดเมียมอาจเปลี่ยนรูปไปเป็น  $CdOH^+$ ,  $Cd(OH)_2$ ,  $Cd(OH)_3^-$  และ  $Cd(OH)_4^{2-}$  ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย

นอกจากนี้จากการศึกษาของ Yadava *et. al.* (1987) พบว่าการดูดซับของโลหะไฮดรอกไซด์จะขึ้นอยู่กับ การรับและให้โปรตอนของหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ซึ่งจะทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวของสารดูดซับ และประจุบนพื้นผิวจะดูดซับไอออนจากสารละลายเพื่อที่จะรักษาสสมดุลของประจุเอาไว้ ในสารละลายที่เป็นกรด จะเกิดการสร้างประจุบนพื้นผิวของสารดูดซับ (เมื่อ M แทนโลหะที่อยู่ในสารดูดซับ) ดังสมการต่อไปนี้



ในกรณีสารละลายที่เป็นด่าง ที่พื้นผิวของสารดูดซับจะเกิดการสร้างประจุดังนี้



ดังนั้นเมื่อสารละลายมีลักษณะ เป็นด่างจากสมการ (4.12) จะเห็นว่าในสารละลายต่างจะ ช่วยส่งเสริมให้เกิดการดูดซับที่ผิวของแคดเมียมบนพื้นผิวของโลหะออกไซด์ได้มากขึ้น ส่วนการเกิด ประจุบนพื้นผิวในกรณีที่สารละลายมีสภาวะเป็นกรดเมื่อพิจารณาจากสมการ (4.11) จะเห็นว่า การสร้างประจุของโลหะออกไซด์ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการดูดซับแคดเมียมในน้ำ ทำให้ ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมต่ำ

### 4.3.3 ผลการศึกษาผลของอุณหภูมิในการกำจัดโลหะหนัก

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับโลหะหนักพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักก็จะเพิ่มสูงขึ้น โดยที่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 ถึง 40 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 98.86 ถึง 99.53 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 98.93 ถึง 99.64 และประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 99.46 ถึง 99.81 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากผลการทดลองที่ได้แสดงว่าเกิดกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้นอาจเกิดจากการ Desolvation ของสปีชีส์ของโลหะที่ถูกดูดซับ การเปลี่ยนแปลงขนาดของรูพรุน และการเพิ่มขึ้นของอัตราการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle Diffusion) ของตัวถูกดูดซับ (Panday *et al.* 1985)

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักที่เหลือและประสิทธิภาพการกำจัด (%) ที่อุณหภูมิต่างๆ

ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ประสิทธิภาพ การกำจัด (%)
ตะกั่ว	40	25	0.457	98.86
		30	0.282	99.30
		40	0.188	99.53
นิกเกิล	40	25	0.426	98.93
		30	0.253	99.37
		40	0.144	99.64
แคดเมียม	10	25	0.054	99.46
		30	0.032	99.68
		40	0.019	99.81

### 4.4 ผลการศึกษาการคายออกจากผิว Treated Fly Ash ของตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

การทดสอบการคายออกจากผิว โดยการใช้กากตะกอนของ Treated Fly Ash หลังจากการดูดซับตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม จากการทดลองในหัวข้อ 4.3.2 แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ได้กับเกณฑ์มาตรฐานสารพิษ ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม (พ.ศ.2531)

ผลการทดลองหาปริมาณโลหะหนักทั้ง 3 ชนิด ที่คายออกจากผิวของ Treated Fly Ash แสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบผลกับเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แล้วพบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นว่าเป็นประโยชน์ในด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าทั้งตะกั่ว และแคดเมียมมีค่าการคายออกจากผิวไม่เกินค่ามาตรฐาน ส่วนนิกเกิลไม่ได้มีกำหนดไว้ในมาตรฐาน

ตารางที่ 4.4 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกจาก Treated Fly Ash

ชนิดของกากตะกอน	ความเข้มข้นเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เกณฑ์มาตรฐานสารมีพิษ กรมโรงงานอุตสาหกรรม (มิลลิกรัมต่อลิตร)
ตะกั่ว	10	0.126	มากกว่า 5
	20	0.142	
	40	0.246	
นิกเกิล	10	0.593	-
	20	0.677	
	40	0.760	
แคดเมียม	1	0.016	มากกว่า 1
	5	0.020	
	10	0.022	

อย่างไรก็ตามกากตะกอนที่เกิดขึ้นซึ่งมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ด้วย ควรนำไปทำลายฤทธิ์โดยกระบวนการ Solidification ต่อไป เพื่อป้องกันการชะละลายออกมาของโลหะหนักเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป ก่อนจะนำไปกำจัดให้ถูกต้องตามหลักวิชาการต่อไป

#### 4.5 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash ในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม

จากการศึกษาการกำจัดน้ำเสียจริงจากโรงงาน 2 แห่ง ในกรุงเทพมหานคร โดยใช้ระยะเวลาการเขย่า 30 นาที ค่าพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 5 และปริมาณ Treated Fly Ash ที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิล 1.25 กรัมต่อลิตร และ 0.5 กรัมต่อลิตร ในการกำจัดตะกั่ว แล้วทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของน้ำเสียตัวอย่างก่อนและหลังการเขย่า ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5 จะเห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลสำหรับโรงงาน ก เท่ากับร้อยละ 92.01 และประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลสำหรับโรงงาน ข เท่ากับร้อยละ 86.45 ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียจากโรงงาน ข เท่าร้อยละ 97.62 จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงลดลงพอสมควร เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากน้ำเสียจากโรงงานมีส่วนประกอบของสารเคมีชนิดอื่นๆ และอาจมีโลหะหนักชนิดอื่นปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้ Treated Fly Ash ดูดซับโลหะหนักหรือสารเคมีที่อาจมีปนอยู่ในน้ำเสีย มีผลทำให้ ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักที่เราสนใจมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลและตะกั่วในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมจากโรงงาน 2 แห่ง ในกรุงเทพมหานคร

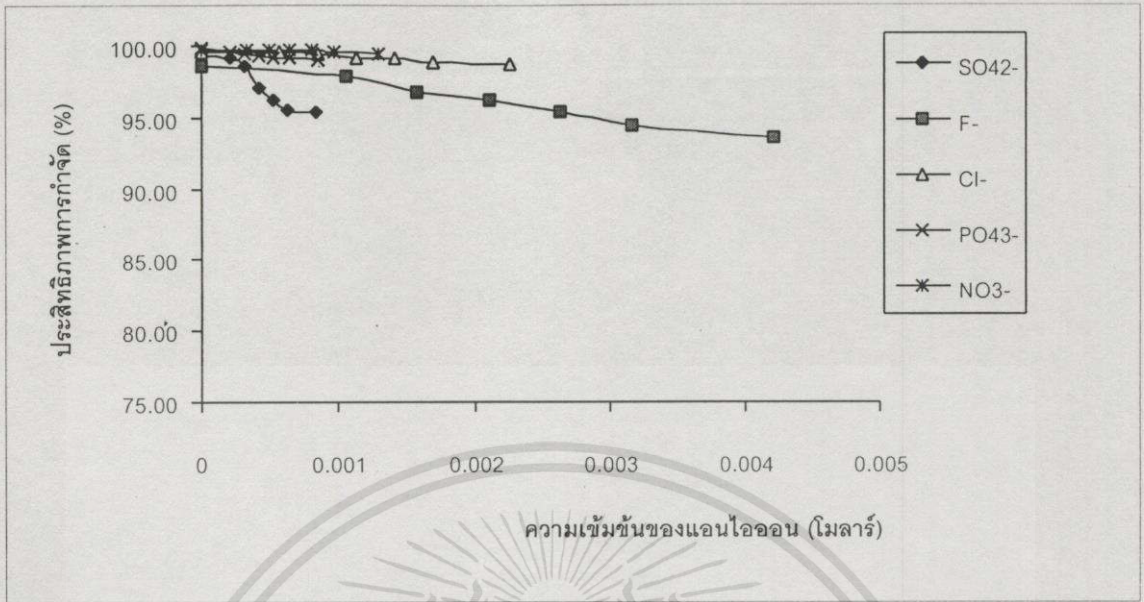
โรงงาน	ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพการ กำจัด (%)
		ก่อนการทดลอง	หลังการทดลอง	
ก	นิเกิล	37.33	2.98	92.01
ข	นิเกิล	41.53	5.63	86.45
	ตะกั่ว	8.56	0.20	97.62

#### 4.6 ผลการศึกษาผลของแอนไอออนต่อการกำจัดตะกั่ว นิเกิล และแคดเมียม

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก คือ ตะกั่ว นิเกิล และ แคดเมียม เมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ ในรูปของเกลือโซเดียม 5 ชนิดด้วยกันคือ ซัลเฟต ฟลูออไรด์ คลอไรด์ ฟอสเฟต และไนเตรต ปนอยู่ในสารละลายโลหะหนัก โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อมีความเข้มข้นของแอนไอออนในปริมาณต่างๆ กัน กล่าวคือ เมื่อมีซัลเฟตไอออน  $2.08 \times 10^{-4}$  ถึง  $8.33 \times 10^{-4}$  โมลาร์ ฟลูออไรด์ไอออน  $1.05 \times 10^{-3}$  ถึง  $4.21 \times 10^{-3}$  โมลาร์ คลอไรด์ไอออน  $5.63 \times 10^{-4}$  ถึง  $2.25 \times 10^{-3}$  โมลาร์ ฟอสเฟตไอออน  $2.11 \times 10^{-4}$  ถึง  $8.42 \times 10^{-4}$  โมลาร์ ไนเตรตไอออน  $3.23 \times 10^{-4}$  ถึง  $1.29 \times 10^{-3}$  โมลาร์ ซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

##### 4.6.1 ผลการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน $F^-$ , $SO_4^{2-}$ , $Cl^-$ , $PO_4^{3-}$ และ $NO_3^-$

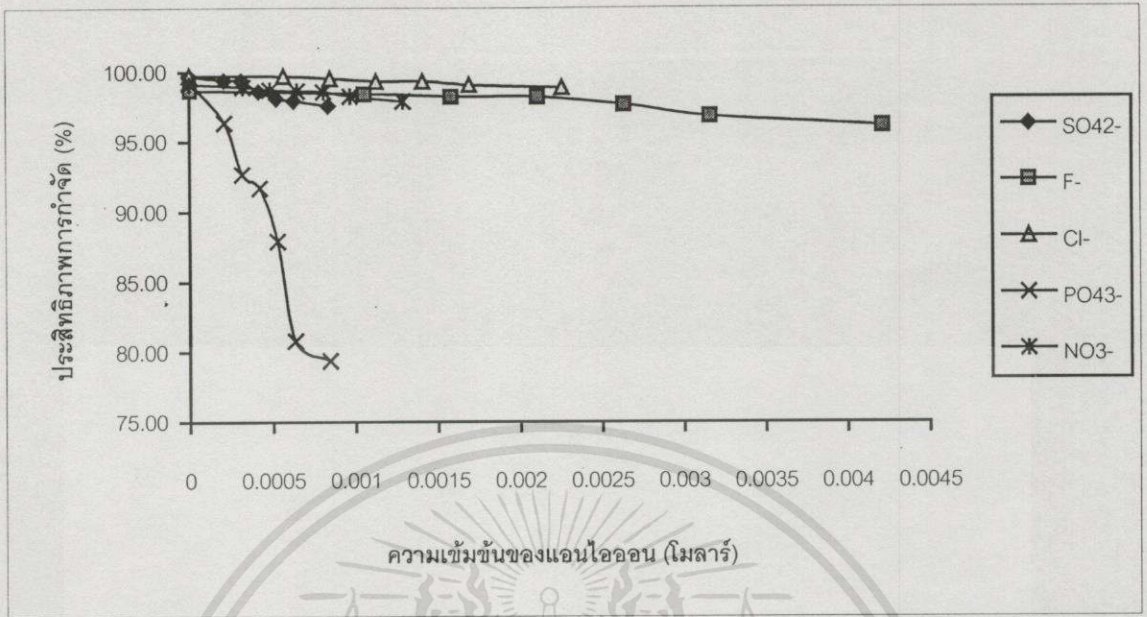
ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน คือ  $F^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  และ  $NO_3^-$  แสดงดังรูปที่ 4.26 และตารางที่ ค.10 กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของแอนไอออนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วมีแนวโน้มลดลง โดยที่  $Cl^-$ ,  $PO_4^{3-}$  และ  $NO_3^-$  มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วไม่มากนัก คือ มีประสิทธิภาพการกำจัดลดลง 99.62 ถึง 98.69 % , 91.91 ถึง 99.00 % และ 99.86 ถึง 99.42% ตามลำดับ ในขณะที่  $F^-$  ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วลดลงจาก 98.62 ถึง 93.55% และ  $SO_4^{2-}$  ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วลดลงจาก 99.34 ถึง 95.38%



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อความเข้มข้นของแอนไอออนเปลี่ยนแปลงไป

#### 4.6.2 ผลการกำจัดนิเกิลเมื่อมีแอนไอออน F<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

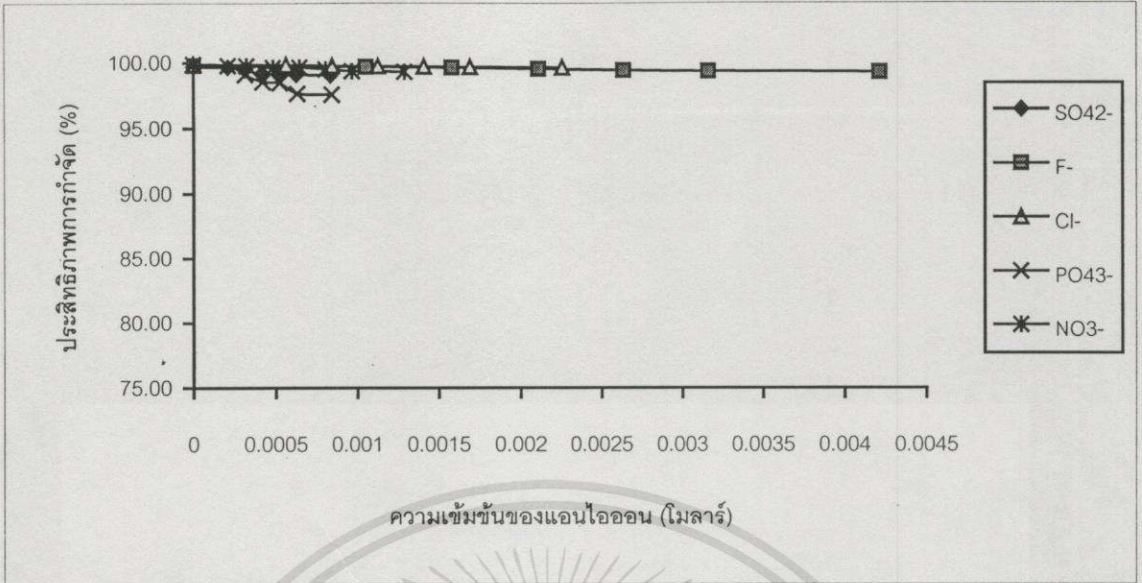
ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน คือ F<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> แสดงดังรูปที่ 4.27 และตารางที่ ค.12 กล่าวคือ มีแนวโน้มทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลลดลง ซึ่งสำหรับแอนไอออน 4 ชนิด คือ SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มีความแตกต่างกันไม่มากนัก และมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลไม่มากนัก แต่สำหรับ PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> จะเห็นว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลลดลงมากกว่าแอนไอออนชนิดอื่นๆ คือ ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลเหลือเพียง 79.40%



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลเมื่อความเข้มข้นของแอนไอออนเปลี่ยนแปลงไป

#### 4.6.3 ผลการกำจัดแคดเมียมเมื่อมีแอนไอออน F<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอนไอออน คือ F<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> แสดงดังรูปที่ 4.28 และตารางที่ ค.12 กล่าวคือ ผลของแอนไอออนทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมลดลง ในทำนองเดียวกับกรณีของการกำจัดนิกเกิล คือ สำหรับแอนไอออน SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> และ NO<sub>3</sub><sup>-</sup> มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมไม่มากนัก คือมีประสิทธิภาพการกำจัดเป็น 99.04, 99.27, 99.65 และ 99.31 ตามลำดับ และสำหรับ PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมลดลงมากที่สุด คือ 97.57%



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมเปลี่ยนแปลงไป

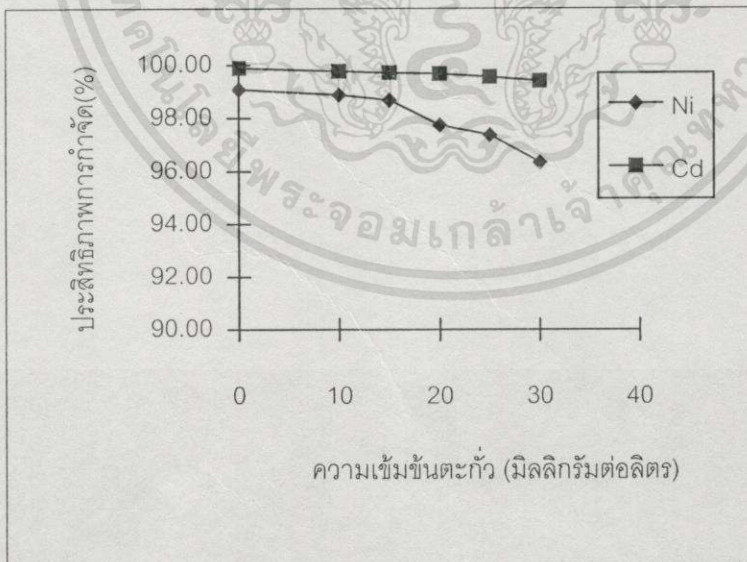
จากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีแอมโมเนียมอยู่ในระบบของการกำจัดโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash พบว่าทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักลดลง เนื่องจากพบว่าไอออนของโลหะสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมโมเนียม แล้วทำให้ประจุรวมมีค่าต่ำกว่าตอนที่โลหะอิสระ และอาจอยู่ในรูปที่ไม่มีประจุหรือมีประจุเป็นลบ ซึ่งแรงกระทำระหว่างไอออนของโลหะกับลิแกนด์อาจมีผลทำให้สารประกอบถูกดูดซับบนตัวดูดซับได้ไม่ดี โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นในรูปต่างๆ เช่น  $PbCl^+$ ,  $PbCl_2^0$ ,  $CdCl^+$  และ  $CdCl_2^0$  เป็นต้น ทั้งนี้การเกิดสารประกอบในการดูดซับขึ้นอยู่กับสมบัติของโลหะ ชนิดและปริมาณของลิแกนด์ สมบัติของพื้นผิวของตัวดูดซับ และค่าพีเอช

## 4.7 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิด

จากการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักเมื่อมีโลหะหนัก 2 ชนิดในสารละลาย โดยแบ่งเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและแคดเมียม เมื่อมีตะกั่วรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม เมื่อมีนิกเกิลรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้น ตั้งแต่ 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและนิกเกิล เมื่อมีแคดเมียมรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้น ตั้งแต่ 0 ถึง 8 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ผลการทดลอง ดังนี้

### 4.7.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของตะกั่วต่างๆ กัน

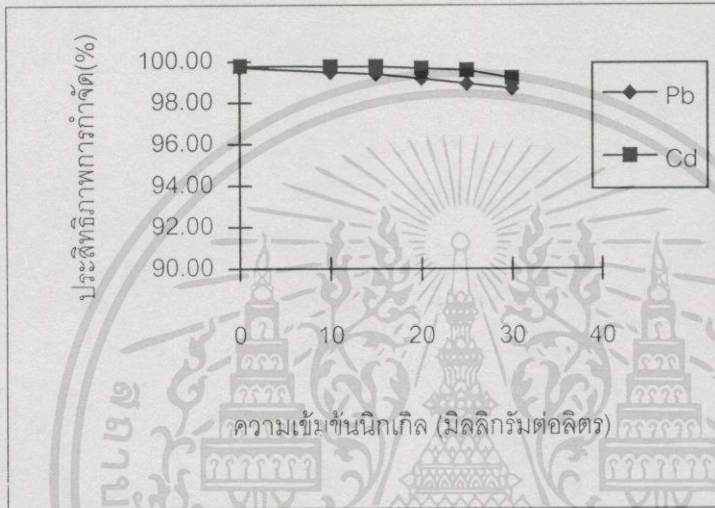
ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและแคดเมียมเมื่อมีตะกั่วรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้น 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.29 และตารางที่ ค.13 กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลลดลงมากกว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม คือ ลดลงจากร้อยละ 99.09 ถึง 96.33 และจากร้อยละ 99.89 ถึง 99.40 ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของตะกั่วต่างๆ กัน

#### 4.7.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของนิกเกิลต่างๆ กัน

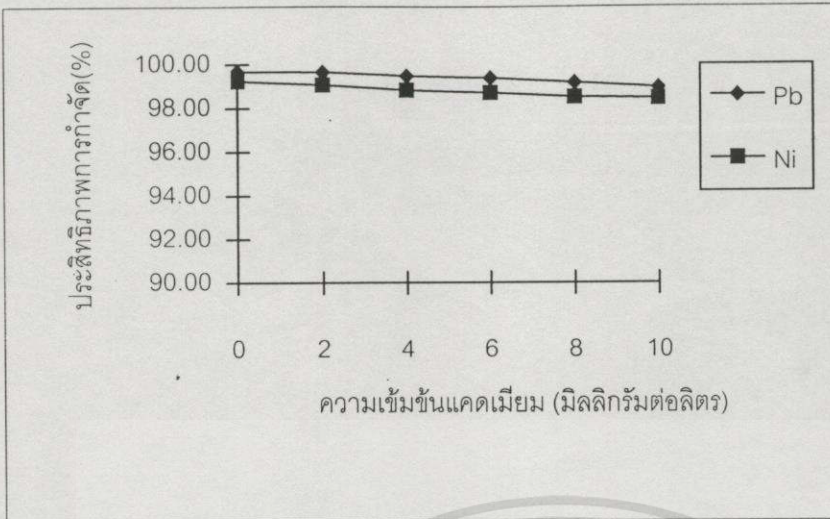
ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียมเมื่อนิกเกิลรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้น 0 ถึง 30 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของนิกเกิลเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.30 และตารางที่ ค.14 กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วลดลงมากกว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม คือ ลดลงจากร้อยละ 99.69 ถึง 98.68 และจากร้อยละ 99.79 ถึง 99.19 ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคดเมียม เมื่อมีความเข้มข้นของนิกเกิลต่างๆ กัน

#### 4.7.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและตะกั่ว เมื่อมีความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ กัน

ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลและตะกั่วเมื่อมีแคดเมียมรวมอยู่ด้วยที่ความเข้มข้น 0 ถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.31 และตารางที่ ค.15 กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วลดลงจากร้อยละ 99.68 ถึง 98.95 และประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลจะลดลงจากร้อยละ 99.23 ถึง 98.45



รูปที่ 4.31 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและนิกเกิล เมื่อมีความเข้มข้นของแคดเมียมต่างๆ กัน

จากผลการทดลองการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash เมื่อมีโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ 2 ชนิด พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักอีกชนิดหนึ่งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณ Treated Fly Ash ที่ใช้ในการดูดซับเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับการดูดซับโลหะหนักที่มีเพียงชนิดเดียว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของโลหะหนัก อาจเป็นสาเหตุให้พื้นที่ผิวบนตัวดูดซับมีไม่เพียงพอที่จะดูดซับโลหะหนักที่มีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นถ้าจะนำ Treated Fly Ash มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักหลายชนิดในน้ำเสีย อาจจำเป็นต้องทำการหาปริมาณของ Treated Fly Ash ที่มีความเหมาะสมใหม่ เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดได้ดีที่สุด

## สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพตัวอย่าง Fly Ash จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยการรีฟลักซ์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนมีค่าสูงที่สุดเมื่อทำการรีฟลักซ์ด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1.0 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยมีค่าสูงถึงเกือบ 200 meq/100g และสำหรับ Untreated Fly Ash มีค่าความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนประมาณ 8.4 meq/100g และเมื่อนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีพบว่า Treated Fly Ash มีสมบัติเปลี่ยนแปลงไปจาก Untreated Fly Ash คือ มีการกระจายอนุภาคอยู่ในช่วงที่แคบลง ลักษณะรูปร่างของ Treated Fly Ash มีความเป็นรูพรุนมากกว่า Untreated Fly Ash และจากการศึกษาความเป็นผลึกพบว่า Untreated Fly Ash เป็นของแข็งที่มีความเป็นผลึกฐานมากกว่า Treated Fly Ash และสำหรับ Treated Fly Ash นั้นจะมีความเป็นผลึกมากขึ้น และจาก XRD pattern ของ Treated Fly Ash จะสังเกตเห็นว่าเกิดการจัดเรียงตัวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และเป็นสารที่มีสมบัติเป็นไฮดรอกซีโซดาไลต์ นอกจากนี้จาก FT-IR Spectra ยังสามารถยืนยันได้ว่า Treated Fly Ash มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบของไฮดรอกซีโซดาไลต์ สำหรับสมบัติทางเคมีพบว่าทั้ง Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash มีองค์ประกอบของธาตุไม่แตกต่างกันมากนัก ยกเว้นปริมาณของ  $\text{Na}_2\text{O}$  ใน Treated Fly Ash ซึ่งมีเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 6 เท่าของ Untreated Fly Ash

สำหรับผลการทดลองการศึกษากำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ 3 ชนิด คือ ตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม โดยใช้ Treated Fly Ash เมื่อทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ คือ ปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสม ผลของค่าพีเอช ระยะเวลาสัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก และอุณหภูมิ สามารถสรุปได้ดังนี้

กรณีการกำจัดตะกั่ว พบว่าปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วเท่ากับ 0.5 กรัมต่อลิตร โดยที่สามารถดูดซับตะกั่วเท่ากับ 79.49 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash และประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.60 และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 การกำจัดตะกั่วจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที เท่ากับร้อยละ 98.26 ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40

มิลลิกรัมต่อลิตร จะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที เท่ากับร้อยละ 99.82 และพบว่าที่แต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วจะไม่แตกต่างกันมากนัก

กรณีการกำจัดนิเกิล พบว่าปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดนิเกิลเท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร โดยที่สามารถดูดซับนิเกิลเท่ากับ 31.45 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash และประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 98.44 ที่ระยะเวลา 30 นาที และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 การกำจัดนิเกิลจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที เท่ากับร้อยละ 99.26 ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที เท่ากับร้อยละ 98.67 และพบว่าที่แต่ละความเข้มข้นเริ่มต้นประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลจะไม่แตกต่างกันมากนัก

กรณีการกำจัดแคดเมียม พบว่าปริมาณ Treated Fly Ash ที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียมเท่ากับ 1.25 กรัมต่อลิตร โดยที่สามารถดูดซับแคดเมียมเท่ากับ 8.01 มิลลิกรัมต่อกรัม Treated Fly Ash และประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 จะมีค่าเท่ากับร้อยละ 97.02 และที่ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 การกำจัดแคดเมียมจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 120 นาที เท่ากับร้อยละ 98.35 ส่วนที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 30 นาที เท่ากับร้อยละ 99.53 และพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียมสูงขึ้น

นอกจากนี้พบว่าโลหะหนักทั้ง ตะกั่ว นิเกิลและแคดเมียม จะถูกดูดซับได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash จะเกิดกระบวนการดูดความร้อน (Endothermic) และพบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash จะสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงที่สุด รองลงมาคือ นิเกิล และแคดเมียม ตามลำดับ

จากการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก เพื่อทดสอบเสถียรภาพของตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ละลายกลับมามีค่าไม่สูงเกินกว่าที่กำหนดในมาตรฐาน แต่อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดการชะละลายเมื่อสภาวะแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงไปควรนำกากตะกอนที่ได้ไปทำลายฤทธิ์ เช่น การทำ Stabilization หรือ Solidification ก่อนจะนำไปทำการกำจัดที่ถูกต้องต่อไป

จากการทดสอบกับการนำ Treated Fly Ash มาใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรม พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดลดลงจากประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากในน้ำเสียจริง มีทั้งแคดไอออนและแอนไอออนชนิดอื่นซึ่งเป็นตัวรบกวน ในการกำจัด

สำหรับการศึกษาลของแอนไอออนในการกำจัดโลหะหนัก เมื่อมีแอนไอออนชนิดต่างๆ อยู่ในระบบที่ค่าความเข้มข้นต่างๆ กัน พบว่าเมื่อมีความเข้มข้นของแอนไอออนสูงขึ้น มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักแต่ละชนิดมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อันเป็นผลมาจากการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับแอนไอออนที่มีประจุ ทำให้เกิดการดูดซับบนผิวของ Treated Fly Ash ลดลง

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักด้วย Treated Fly Ash เมื่อมีโลหะหนักในน้ำเสีย 2 ชนิด พบว่ามีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักลดลง จากที่มีโลหะหนักในน้ำเสียเพียงชนิดเดียว ทั้งนี้พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักรวมอีกชนิดหนึ่งมีเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดลดลงเป็นลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

- ควรศึกษาการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ เช่น โครเมียม อาร์เซนิก และสารอินทรีย์นอกเหนือจากงานวิจัยนี้
- กากตะกอนที่ได้จากการกำจัดโลหะหนักควรนำไปกำจัดโดยกระบวนการ Solidification หรือ Fixation เพื่อไม่ให้เกิดการละลายกลับออกมาสู่สิ่งแวดล้อม
- ควรศึกษาการกำจัดโลหะหนักแบบคอลัมน์ เพื่อความสะดวกในการที่จะนำไปใช้กับการบำบัดน้ำเสียในระบบจริง

## บรรณานุกรม

- กัลยา วานิชย์บัญชา. 2539. **หลักสถิติ**. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิमितยงสกุล. 2537. "การประยุกต์ใช้เถ้าลอยแม่เมาะเป็นวัสดุผสมซีเมนต์ในการลดการหดตัวแบบอโดจีเนียส." **วารสาร กฟผ.** 5(2) : 36-42.
- สร้อยดาว วินิจนันท์รัตน์ และคณะ. 2539. "การใช้เถ้าลอยลิกไนต์ในการกำจัดสี." **วารสาร กฟผ.** 5(4) : 54-57.
- วราภรณ์ คุณาวานากิจ. 2537. "คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะ." **วารสาร กฟผ.** 3(1) : 55-59.
- วราภรณ์ คุณาวานากิจ. 2538. "ถ่านหินลิกไนต์แม่เมาะ." **วารสาร กฟผ.** 4(3) : 56-61.
- วราภรณ์ คุณาวานากิจ. 2538. "ถ่านหิน." **วารสาร กฟผ.** 4(3) : 31-37.
- สมชัย กกกำแหง. 2539. "ศักยภาพการนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะไปใช้ประโยชน์" **วารสาร กฟผ.** 5(2) : 48-57.
- สมชัย กกกำแหง. 2537. "การใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นส่วนผสมสำคัญในงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่ปากมูล." **วารสาร กฟผ.** 3(2) : 11-27.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 25 (พ.ศ.2531) ออกความตามในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 เรื่องหน้าที่ของผู้ได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม.
- Amrhein, C., Haghnia, G.H., Kim, T. S.; Mosher, P. A., Gagajena, R. C., Amanios, T., Torre, L. D. L. 1996. "Synthesis and Properties of Zeolites from Coal Fly Ash." **Environ.Sci.Technol.** 30 : 735-742.
- APHA, AWWA and WPCF. 1995. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 19<sup>th</sup> ed.
- Baes, A. U., Umali, S. J. P., and Mercado, R. L. 1996. "Ion Exchange and Adsorption of Some Heavy Metals in a Modified Coconut Coir Cation Exchanger." **Wat. Sci. Tech.** 34(11) : 193-200.
- Basta, N.T. and Tabatabai, M.A. 1992. "Effect of Cropping Systems on Adsorption of Metals by Soils : II. Effect of pH." **Soil Science.** 153(3) : 195-204.
- Black, C. A. 1965. **Methods of Soil Analysis Part II.** American Society of Agronomy Monograph No. 9. Medison, Wisconsin, U.S.A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Booker, N. A., Cooney, E.L., and Priestley, A.J. 1996. "Ammonia Removal from Sewage Using Natural Australian Zeolite." *Wat. Sci. Tech.* 34(9) : 17-24.
- Catalfamo, P., Corigliano, F., Primerrano, P., and Pasquale, S. D. 1993. "Study of Pre-Crystallization Stage of Hydrothermally Treated Amorphous Aluminosilicate Through the Composition of the Aqueous Phase." *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* 89(1) : 171-175.
- Carlson, C. L. and Adriano, D. C. 1993. "Environmental Impacts of Coal Combustion Residues." *J. Environ. Sci. Technol.* 22 : 227-247.
- Christensen, T. H. 1984. "Cadmium Soil Sorption at Low Concentrations: I. Effect of Time, Cadmium Load, pH, and Calcium." *Water, Air, and, Soil Pollution.* 21 : 105-114.
- Culp, G. L and Culp, R. L. 1974. *New Concepts in Water Purification.* New York : Litton Education Publishing, Inc.
- De, A. K. and Lal, M. M. 1990. "Removal of Iron from Water by Coal Fly Ash." *J. Environ. Sci. Health.* A25(6) : 665-677.
- Dean, J. G., Bosqui, F. L. and Lanouette, K. H. 1972. "Removing Heavy Metals from Wastewater." *Environ. Sci. Technol.* 6 : 518-521.
- Diamadopoulos, E., Ioannidis, S. and Sakellaropoulos, G. P. 1993. "As(V) Removal from Aqueous Solutions by Fly Ash." *Wat. Res.* 12 : 1773-1777.
- Eckenfelder, W. W. 1981. *Application of Adsorption to Wastewater Treatment.* Boston : Enviro Press, Inc.
- Faust, S. D. and Aly, O. M. 1987. *Adsorption Processes for Water Treatment.* Stoneham : Butterworth.
- Gupta, G. S., Prasad, G., Panday, K. K., and Singh, V. N. 1988. "Removal of Chrome Dye from Aqueous Solutions by Fly Ash." *Water, Air, and Soil Pollution.* 37 : 13-24.
- Hass, C. N. and Vamos, R. J. 1995. *Hazardous and Industrial Waste Treatment.* USA : Prentice-Hall, Inc.
- Henmi, T. 1987. "Synthesis of Hydroxy-Sodalite ("Zeolite") from Waste Coal Ash ." *Soil Sci. Plant Nutr.* 33 : 517-521.

- Panday, K. K., Prasad, G., and Singh, V. N. 1985. "Copper(II) Removal from Aqueous Solutions by Fly Ash." *Wat.Res.*19(7) : 869-873.
- Rai, D. and Szelemczka, R. W. 1990. "Aqueous Behavior of Chromium in Coal Fly Ash." *J. Environ. Qual.* 19 : 378-382.
- Rizzo, J. L. 1971. "Granular Carbon for Wastewater Treatment." *Water&Sewage Works.* 118 : 238-240.
- Sharma, R. K. De, A. K., and Ray, P. K. 1990. "Use of Fly Ash as an Ion Exchanger in Water Filtration Studies for the Removal of Heavy Metals." *J. Environ. Sci. Health.* A25(6) : 637-651.
- Singer, A. and Bergaut, V. 1995. "Cation Exchange Properties of Hydrothermally Treated Coal Fly Ash." *Environ.Sci.Technol.* 29 : 1748-1753.
- Tchobanoglous, G and Burton, F.L. 1991. *Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse.* 3<sup>rd</sup> ed. Singapore : McGraw-Hill.
- Theis, T. L. and Wirth, J. L. 1977. "Sorptive Behavior of Trace Metals on Fly Ash in Aqueous System." *Environ.Sci.Technol.* 11(2) : 1096-1100.
- Ure, A. M. and Davidson, C. M. 1995. *Chemical Speciation in the Environment.* London : Chapman & Hall.
- Voice, T. C. and Weber, W.J., Jr. 1983. "Sorption of Hydrophobic Compounds by Sediments, Soils and Suspended Solids-I" *Wat. Res.* 17 : 1433-1441.
- Weber, W. J., Jr. 1972. *Physico-Chemical Processes for Water Quality Control.* Michigan : John Wiley&Sons.
- Weng, C. H. and Huang, C. P. 1994. "Treatment of Metal Industrial Wastewater by Fly Ash and Cement Fixation." *J. Environ. Eng.* 120(6) : 1470-1487.
- Wild, A. 1993. *Soils and the Environment : An Introduction.* Victoria : Cambridge University Press.
- Yadava, K. P., Tyagi, B. S., Panday, K. K., Singh, V. N. 1987. "Fly Ash for the Treatment of Cd(II) Rich Effluents." *Environ. Tech. Letters.* 8 : 225-234.
- Yadava, K. P., Tyagi, B. S., Panday, K. K., Singh, V. N. 1989. "Fly Ash for the Treatment of Water Enriched in Lead" *J. Environ. Sci. Health.* 24(7) : 783.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก สมบัติของ Untreated Fly Ash และ Treated Fly Ash

ตารางที่ ก.1 แสดงความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของ Treated Fly Ash เมื่อความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ กัน

ระยะเวลาในการรีฟลักซ์ (ชั่วโมง)	ความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (meq/100g)														
	0.5 M NaOH					1.0 M NaOH					2.0 M NaOH				
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD
6	29.21	28.35	29.21	28.92	0.38	29.21	30.07	29.21	29.49	0.38	74.73	77.31	76.45	76.16	0.95
15	40.37	39.51	40.37	40.09	0.38	164.07	170.94	138.36	167.79	2.48	70.44	71.30	70.44	70.72	0.38
24	49.82	48.10	48.96	48.96	0.57	196.71	195.85	190.70	194.42	2.48	67.86	67.86	68.72	68.15	0.38
48	119.4	118.54	116.82	118.26	0.95	202.72	201.87	201.87	202.15	0.38	69.58	71.30	68.72	69.87	0.95
72	137.44	136.58	135.72	136.58	0.57	198.43	199.29	194.13	197.28	2.09	83.32	82.89	82.46	82.89	0.29

ตารางที่ ก.1 (ต่อ)

ระยะเวลาในการรีฟลักซ์ (ชั่วโมง)	ความจุการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (meq/100g)														
	3.5 M NaOH					4.0 M NaOH					5.0 M NaOH				
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD
6	43.81	44.67	46.39	44.95	0.95	39.51	37.80	38.66	38.66	0.57	48.10	48.96	47.25	48.10	0.57
15	55.84	55.84	54.98	55.55	0.38	53.26	56.69	54.98	54.98	1.14	49.82	48.96	49.82	49.54	0.38
24	55.84	55.84	54.98	55.55	0.38	54.98	54.12	54.12	54.40	0.38	41.23	40.37	39.51	40.37	0.57
48	50.68	50.68	52.40	51.25	0.76	50.68	51.54	52.4	51.54	0.57	47.25	46.39	47.25	46.96	0.38
72	59.27	59.27	60.99	59.84	0.76	51.54	50.68	49.82	50.68	0.57	43.81	42.95	42.09	42.95	0.57

ตารางที่ ก.2 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคของ ก) Untreated Fly Ash และ ข) Treated Fly Ash

ก) Untreated Fly Ash

Size (Lo)	Result In %	Size (Hi)	Result Below %
0.50	0.62	1.32	0.62
1.32	1.96	1.60	2.58
1.60	2.84	1.95	5.41
1.95	3.13	2.38	8.55
2.38	3.02	2.90	11.57
2.90	2.83	3.53	14.41
3.53	2.87	4.30	17.28
4.30	3.28	5.24	20.56
5.24	4.02	6.39	24.59
6.39	4.82	7.78	29.40
7.78	5.40	9.84	34.80
9.84	5.86	11.55	40.66
11.55	6.30	14.08	46.96
14.08	6.81	17.15	53.77
17.15	7.45	20.90	61.23
20.90	8.14	25.46	69.36
25.46	8.56	31.01	77.93
31.01	8.20	37.79	86.12
37.79	6.65	46.03	92.77
46.03	4.35	56.09	97.12
56.09	2.16	68.33	99.29
68.33	0.71	83.26	99.99

ข) Treated Fly Ash

Size (Lo)	Result In %	Size (Hi)	Result Below %
0.50	0.15	1.32	0.15
1.32	0.70	1.60	0.86
1.60	1.14	1.95	2.00
1.95	1.39	2.38	3.39
2.38	1.48	2.90	4.87
2.90	1.48	3.53	6.34
3.53	1.48	4.30	7.82
4.30	1.60	5.24	9.42
5.24	1.96	6.39	11.39
6.39	2.71	7.78	14.09
7.78	3.91	9.48	18.00
9.48	5.82	11.55	23.82
11.55	8.65	14.08	32.47
14.08	12.01	17.15	44.48
17.15	14.81	20.90	59.29
20.90	15.18	25.46	74.47
25.46	12.49	31.01	86.96
31.01	8.04	37.79	95.00
37.79	3.85	46.03	98.85

ตารางที่ ก.3 แสดงข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของตะกั่ว นิกเกิล และแคดเมียม

ตะกั่ว			นิกเกิล			แคดเมียม		
$C_e$ (mg/l)	$C_e/X$ (g/l)	$r^2$	$C_e$ (mg/l)	$C_e/X$ (g/l)	$r^2$	$C_e$ (mg/l)	$C_e/X$ (g/l)	$r^2$
1.831	0.060	0.9994	1.738	0.057	0.9992	1.524	0.225	0.9972
0.758	0.048		0.568	0.036		0.624	0.166	
0.345	0.044		0.241	0.030		0.265	0.136	
0.164	0.041		0.108	0.027		0.126	0.128	

ภาคผนวก ข ปริมาณโลหะหนักที่เหลือในน้ำเสียส่งเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ต่าง ๆ กัน  
 ตารางที่ ข.1 แสดงปริมาณตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียส่งเคราะห์เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ต่าง ๆ กัน

เวลา (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)														
	0.5 กรัมต่อลิตร				1.25 กรัมต่อลิตร				2.5 กรัมต่อลิตร						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD
10	0.338	0.359	0.338	0.345	0.009	0.213	0.224	0.234	0.224	0.007	0.216	0.24	0.212	0.223	0.012
20	0.273	0.291	0.317	0.294	0.016	0.224	0.236	0.190	0.217	0.018	0.154	0.162	0.158	0.158	0.003
30	0.246	0.296	0.221	0.254	0.028	0.199	0.120	0.152	0.157	0.028	0.135	0.138	0.141	0.138	0.002
60	0.201	0.224	0.218	0.214	0.009	0.160	0.116	0.100	0.125	0.023	0.125	0.127	0.119	0.124	0.003
120	0.209	0.238	0.206	0.218	0.014	0.069	0.031	0.039	0.046	0.015	0.12	0.104	0.111	0.112	0.006
180	0.141	0.112	0.119	0.124	0.011	0.045	0.035	0.031	0.037	0.005	0.16	0.12	0.102	0.127	0.022
240	0.114	0.113	0.096	0.108	0.008	0.038	0.032	0.029	0.033	0.003	0.13	0.11	0.1	0.113	0.011

ตารางที่ ข.1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)														
	5.0 กรัมต่อลิตร				10.0 กรัมต่อลิตร				10.0 กรัมต่อลิตร						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD
10	0.235	0.254	0.269	0.253	0.012	0.178	0.179	0.164	0.174	0.006	0.178	0.179	0.164	0.174	0.006
20	0.154	0.189	0.156	0.166	0.015	0.146	0.193	0.168	0.169	0.016	0.146	0.193	0.168	0.169	0.016
30	0.17	0.166	0.112	0.149	0.025	0.144	0.14	0.145	0.143	0.002	0.144	0.14	0.145	0.143	0.002
60	0.132	0.148	0.126	0.135	0.008	0.154	0.146	0.138	0.146	0.005	0.154	0.146	0.138	0.146	0.005
120	0.187	0.21	0.182	0.193	0.011	0.177	0.159	0.167	0.174	0.010	0.177	0.159	0.167	0.174	0.010
180	0.142	0.154	0.148	0.148	0.004	0.095	0.102	0.128	0.108	0.013	0.095	0.102	0.128	0.108	0.013
240	0.119	0.113	0.124	0.119	0.004	0.097	0.094	0.109	0.100	0.006	0.097	0.094	0.109	0.100	0.006

ตารางที่ ข.2 แสดงปริมาณนิกเกิลที่เหลือในน้ำเสียซึ่งควรห้เมื่อปรับเปลี่ยนปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน

เวลา (นาที)	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)														
	0.5 กรัมต่อลิตร				1.25 กรัมต่อลิตร				2.5 กรัมต่อลิตร						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD
10	30.42	30.48	30.6	30.500	0.067	8.324	8.653	8.807	8.595	0.180	0.864	0.957	0.924	0.915	0.034
20	29.94	30.02	30.12	30.027	0.062	4.593	4.499	4.509	4.534	0.040	0.625	0.612	0.677	0.638	0.026
30	28.14	28.06	28.28	28.160	0.080	1.830	1.896	1.689	1.738	0.061	0.458	0.496	0.482	0.479	0.014
60	20.50	20.66	21.06	20.740	0.213	0.780	0.890	0.750	0.807	0.056	0.246	0.271	0.203	0.240	0.025
120	16.66	16.81	16.76	16.743	0.056	0.560	0.590	0.530	0.560	0.020	0.175	0.149	0.198	0.174	0.017
180	15.65	15.97	15.07	15.563	0.329	0.293	0.214	0.324	0.277	0.042	0.057	0.051	0.057	0.055	0.003
240	14.73	14.24	14.58	14.517	0.184	0.260	0.210	0.230	0.233	0.018	0.037	0.034	0.04	0.037	0.002

ตารางที่ ข.2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)											
	5.0 กรัมต่อลิตร				10.0 กรัมต่อลิตร							
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD		
10	0.469	0.432	0.462	0.454	0.015	0.276	0.225	0.240	0.247	0.019		
20	0.337	0.344	0.376	0.352	0.016	0.156	0.166	0.106	0.143	0.024		
30	0.228	0.238	0.256	0.241	0.010	0.098	0.103	0.124	0.108	0.010		
60	0.183	0.198	0.134	0.172	0.005	0.086	0.067	0.054	0.069	0.011		
120	0.065	0.089	0.067	0.074	0.010	0.014	0.085	0.069	0.056	0.028		
180	0.046	0.059	0.057	0.054	0.025	0.021	0.042	0.034	0.032	0.008		
240	0.057	0.064	0.076	0.066	0.007	0.012	0.021	0.015	0.016	0.003		

ตารางที่ ข.3 แสดงปริมาณแคดเมียมที่เหลือในน้ำเสี้ยวสังเคราะห์เมื่อปรับปริมาณ Treated Fly Ash ต่างๆ กัน

เวลา (นาที)	ปริมาณแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)														
	0.5 กรัมต่อลิตร				1.25 กรัมต่อลิตร				2.5 กรัมต่อลิตร						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD
10	6.471	6.510	6.597	6.526	0.047	0.416	0.435	0.433	0.428	0.008	0.125	0.134	0.142	0.134	0.006
20	5.652	5.604	5.673	5.643	0.026	0.249	0.249	0.254	0.251	0.002	0.062	0.068	0.054	0.061	0.005
30	5.344	5.448	5.512	5.435	0.060	0.238	0.235	0.242	0.238	0.002	0.043	0.049	0.057	0.050	0.005
60	4.426	4.528	4.598	4.517	0.061	0.077	0.079	0.074	0.077	0.002	0.020	0.020	0.023	0.021	0.001
120	3.005	3.044	3.105	3.051	0.036	0.037	0.031	0.033	0.034	0.002	0.021	0.023	0.020	0.021	0.001
180	2.546	2.642	2.324	2.504	0.120	0.021	0.024	0.027	0.024	0.002	0.013	0.010	0.012	0.012	0.001
240	2.564	2.374	2.275	2.404	0.106	0.022	0.017	0.016	0.018	0.002	0.012	0.013	0.011	0.012	0.001

ตารางที่ ข.3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	ปริมาณแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)														
	5.0 กรัมต่อลิตร				10.0 กรัมต่อลิตร				10.0 กรัมต่อลิตร						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD
10	0.026	0.028	0.024	0.026	0.001	0.021	0.019	0.019	0.020	0.001	0.019	0.019	0.019	0.018	0.001
20	0.023	0.027	0.019	0.023	0.003	0.018	0.017	0.019	0.018	0.001	0.017	0.017	0.019	0.018	0.001
30	0.019	0.017	0.015	0.017	0.001	0.013	0.014	0.012	0.013	0.001	0.014	0.014	0.012	0.013	0.001
60	0.012	0.011	0.013	0.012	0.001	0.005	0.007	0.008	0.005	0.001	0.005	0.007	0.003	0.005	0.001
120	0.009	0.006	0.006	0.007	0.001	0.004	0.006	0.005	0.005	0.001	0.004	0.006	0.005	0.005	0.001
180	0.002	0.004	0.003	0.003	0.001	0.003	0.004	0.003	0.003	0.000	0.003	0.004	0.003	0.003	0.000
240	0.001	0.002	0.002	0.002	0.000	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000	0.002	0.003	0.002	0.002	0.000

### ภาคผนวก ค ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ค.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2					pH 3						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	10.71	10.60	10.73	10.68	0.047	4.64	0.820	0.720	0.760	0.767	0.036	92.48
20	10.56	10.65	10.62	10.61	0.016	5.27	0.670	0.710	0.720	0.700	0.020	93.14
30	10.58	10.82	10.62	10.67	0.077	4.70	0.650	0.580	0.630	0.620	0.027	93.92
60	10.99	10.58	10.93	10.83	0.134	3.27	0.560	0.450	0.520	0.510	0.040	95.00
120	10.79	10.67	10.90	10.79	0.077	3.69	0.227	0.152	0.163	0.181	0.031	98.23
180	10.56	10.45	10.61	10.54	0.056	5.89	0.143	0.158	0.150	0.150	0.005	98.53
240	10.1	10.25	10.36	10.24	0.052	8.60	0.120	0.096	0.138	0.118	0.015	98.84

### ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4					pH 5						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	0.610	0.620	0.640	0.623	0.011	93.84	0.420	0.410	0.430	0.420	0.007	95.81
20	0.520	0.580	0.470	0.523	0.038	94.83	0.390	0.350	0.380	0.373	0.016	96.27
30	0.350	0.420	0.390	0.387	0.024	96.18	0.310	0.340	0.320	0.323	0.011	96.77
60	0.320	0.310	0.340	0.323	0.011	96.81	0.210	0.240	0.220	0.223	0.011	97.77
120	0.310	0.350	0.280	0.313	0.024	96.90	0.190	0.180	0.160	0.177	0.011	98.24
180	0.250	0.270	0.340	0.287	0.036	97.17	0.150	0.160	0.140	0.150	0.007	98.50
240	0.120	0.115	0.104	0.113	0.006	98.88	0.150	0.130	0.140	0.140	0.007	98.60

ตารางที่ ค.2 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2					pH 3						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	20.72	21.03	21.23	20.99	0.18	5.86	0.75	0.86	0.78	0.797	0.04	96.08
20	21.04	20.9	21.44	21.13	0.21	5.26	0.51	0.69	0.52	0.573	0.08	97.18
30	20.96	21.04	21.07	21.02	0.04	5.72	0.31	0.43	0.56	0.433	0.08	97.87
60	21.17	21.33	21.25	21.25	0.05	4.71	0.26	0.34	0.45	0.350	0.07	98.28
120	21.4	21.47	21.87	21.58	0.19	3.23	0.18	0.28	0.35	0.270	0.06	98.67
180	20.64	21.67	21.32	21.21	0.38	4.89	0.151	0.199	0.203	0.184	0.02	99.09
240	20.08	20.98	21.56	20.87	0.53	6.40	0.137	0.107	0.181	0.142	0.03	99.30

ตารางที่ ค.2 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4					pH 5						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	0.56	0.75	0.65	0.653	0.064	96.78	0.56	0.54	0.51	0.537	0.018	97.36
20	0.48	0.52	0.6	0.533	0.044	97.37	0.42	0.48	0.46	0.453	0.022	97.77
30	0.38	0.49	0.57	0.480	0.067	97.64	0.35	0.34	0.37	0.353	0.011	98.26
60	0.24	0.31	0.43	0.327	0.069	98.39	0.29	0.27	0.25	0.270	0.013	98.67
120	0.129	0.117	0.122	0.123	0.004	99.40	0.21	0.23	0.19	0.210	0.013	98.97
180	0.123	0.108	0.121	0.117	0.006	99.42	0.16	0.15	0.17	0.160	0.007	99.21
240	0.122	0.11	0.115	0.116	0.004	99.43	0.15	0.14	0.13	0.140	0.007	99.31

ตารางที่ ค.3 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกัวในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2						pH 3					
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
	10	41.22	40.44	41.48	41.05	0.404	1.09	0.598	0.576	0.524	0.566	0.028
20	41.33	41.58	41.20	41.37	0.140	0.31	0.452	0.428	0.457	0.446	0.012	98.90
30	40.79	41.12	41.17	41.03	0.158	1.14	0.324	0.345	0.367	0.356	0.004	99.12
60	40.79	41.09	41.20	41.03	0.158	1.14	0.224	0.221	0.231	0.225	0.016	99.44
120	41.31	41.41	41.28	41.33	0.051	0.40	0.148	0.167	0.194	0.170	0.006	99.58
180	41.23	41.32	41.01	41.19	0.118	0.76	0.131	0.142	0.146	0.140	0.006	99.66
240	40.95	40.86	41.02	40.94	0.056	1.34	0.111	0.127	0.124	0.121	0.006	99.70

ตารางที่ ค.3 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4						pH 5					
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
	10	0.570	0.650	0.540	0.587	0.042	98.54	0.450	0.480	0.490	0.473	0.02
20	0.390	0.410	0.450	0.417	0.022	98.96	0.360	0.370	0.390	0.373	0.01	99.07
30	0.380	0.340	0.350	0.357	0.016	99.11	0.290	0.270	0.310	0.290	0.01	99.28
60	0.240	0.210	0.230	0.227	0.011	99.44	0.250	0.230	0.240	0.240	0.01	99.40
120	0.190	0.150	0.180	0.173	0.016	99.57	0.210	0.220	0.190	0.207	0.01	99.49
180	0.150	0.120	0.160	0.143	0.016	99.64	0.150	0.140	0.170	0.153	0.01	99.62
240	0.130	0.150	0.140	0.140	0.007	99.65	0.160	0.140	0.130	0.143	0.01	99.64

ตารางที่ ค.4 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2					pH 3						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	10.79	10.6	10.66	10.68	0.071	7.10	0.416	0.456	0.467	0.45	0.020	95.57
20	10.77	10.68	10.75	10.73	0.036	6.67	0.215	0.268	0.22	0.23	0.022	97.67
30	10.67	10.54	10.79	10.67	0.084	7.25	0.15	0.169	0.205	0.17	0.020	98.27
60	10.66	10.61	10.62	10.63	0.020	7.57	0.125	0.154	0.152	0.14	0.012	98.57
120	10.7	10.48	10.58	10.59	0.076	7.94	0.086	0.099	0.064	0.08	0.013	99.18
180	10.68	10.58	10.55	10.60	0.051	7.80	0.073	0.071	0.086	0.08	0.006	99.24
240	10.71	10.49	10.32	10.51	0.136	8.64	0.064	0.059	0.062	0.06	0.002	99.39

ตารางที่ ค.4 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4					pH 5						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	0.312	0.327	0.354	0.331	0.015	96.64	0.298	0.281	0.274	0.284	0.009	97.13
20	0.233	0.241	0.213	0.229	0.011	97.68	0.254	0.241	0.235	0.243	0.007	97.54
30	0.124	0.132	0.122	0.126	0.004	98.72	0.164	0.152	0.148	0.155	0.006	98.44
60	0.119	0.124	0.114	0.119	0.003	98.79	0.129	0.124	0.123	0.125	0.002	98.73
120	0.074	0.065	0.058	0.066	0.006	99.33	0.087	0.072	0.075	0.078	0.006	99.21
180	0.049	0.048	0.045	0.047	0.002	99.52	0.048	0.035	0.045	0.043	0.005	99.57
240	0.037	0.031	0.03	0.033	0.003	99.67	0.037	0.034	0.029	0.033	0.003	99.66

ตารางที่ ค.5 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2						pH 3					
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)
10	18.92	19.06	18.76	18.91	0.102	6.37	3.510	3.210	3.220	3.313	0.131	83.53
20	18.77	18.87	18.57	18.74	0.111	7.24	2.390	2.210	2.140	2.247	0.096	88.83
30	18.63	18.74	18.86	18.74	0.078	7.21	1.600	2.390	2.200	2.063	0.309	89.74
60	18.69	18.65	18.54	18.63	0.058	7.79	0.940	0.930	0.950	0.940	0.007	95.33
120	18.68	18.36	18.52	18.52	0.107	8.32	0.320	0.340	0.370	0.343	0.018	98.29
180	18.49	18.63	18.59	18.57	0.053	8.07	0.146	0.139	0.111	0.132	0.014	99.34
240	18.45	18.48	18.66	18.53	0.087	8.27	0.120	0.160	0.140	0.140	0.013	99.30

ตารางที่ ค.5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4						pH 5					
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)
10	0.264	0.247	0.259	0.257	0.006	98.72	0.198	0.187	0.185	0.190	0.005	99.05
20	0.217	0.213	0.201	0.210	0.006	98.95	0.175	0.168	0.183	0.175	0.005	99.13
30	0.184	0.149	0.158	0.164	0.014	99.18	0.148	0.151	0.146	0.148	0.002	99.26
60	0.160	0.140	0.130	0.143	0.011	99.28	0.156	0.137	0.142	0.145	0.007	99.28
120	0.120	0.130	0.110	0.120	0.007	99.40	0.092	0.085	0.078	0.085	0.005	99.58
180	0.029	0.100	0.120	0.140	0.036	99.30	0.064	0.059	0.062	0.062	0.002	99.69
240	0.023	0.130	0.120	0.150	0.045	99.25	0.038	0.031	0.021	0.030	0.006	99.85

ตารางที่ ค.6 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2					pH 3						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	36.42	36.46	36.18	36.35	0.12	9.16	10.71	10.85	10.59	10.72	0.089	73.30
20	33.98	33.36	33.78	33.71	0.23	15.78	5.022	4.862	4.828	4.904	0.079	87.78
30	34.40	33.90	33.76	34.02	0.25	14.99	4.052	3.985	3.936	3.991	0.041	90.05
60	32.90	32.68	32.84	32.81	0.08	18.02	1.138	1.134	1.164	1.145	0.012	97.15
120	31.24	31.18	31.06	31.16	0.07	22.14	0.260	0.240	0.223	0.241	0.013	99.40
180	32.28	32.32	31.92	32.17	0.17	19.61	0.150	0.170	0.171	0.164	0.009	99.59
240	31.24	31.20	31.04	31.16	0.08	22.14	0.148	0.155	0.148	0.150	0.003	99.63

ตารางที่ ค.6 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4					pH 5						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	3.541	3.784	3.804	3.710	0.112	90.63	1.521	1.54	1.48	1.514	0.022	96.18
20	0.841	0.772	0.753	0.789	0.035	98.01	0.65	0.62	0.61	0.627	0.016	98.42
30	0.46	0.49	0.38	0.443	0.042	98.88	0.51	0.54	0.53	0.527	0.011	98.67
60	0.45	0.36	0.51	0.440	0.053	98.89	0.35	0.31	0.34	0.333	0.016	99.16
120	0.223	0.227	0.185	0.212	0.018	99.47	0.25	0.23	0.27	0.250	0.013	99.37
180	0.14	0.15	0.18	0.157	0.016	99.60	0.18	0.17	0.16	0.170	0.007	99.57
240	0.12	0.13	0.15	0.133	0.011	99.66	0.15	0.14	0.16	0.150	0.007	99.62

ตารางที่ ค.7 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2				pH 3							
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)
10	1.316	1.339	1.312	1.322	0.011	2.05	0.326	0.315	0.324	0.322	0.004	69.07
20	1.309	1.332	1.318	1.320	0.008	2.25	0.258	0.214	0.235	0.236	0.015	77.34
30	1.328	1.320	1.299	1.316	0.011	2.54	0.214	0.213	0.209	0.212	0.002	79.62
60	1.274	1.279	1.291	1.281	0.006	5.09	0.168	0.154	0.162	0.161	0.005	84.49
120	1.327	1.310	1.343	1.327	0.011	1.73	0.121	0.12	0.132	0.124	0.005	88.04
180	1.267	1.298	1.254	1.273	0.017	5.70	0.094	0.095	0.091	0.093	0.002	91.03
240	1.223	1.198	1.201	1.207	0.010	10.57	0.087	0.081	0.084	0.084	0.002	91.92

ตารางที่ ค.7 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4				pH 5							
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพกำจัด (%)
10	0.147	0.145	0.142	0.145	0.002	86.60	0.098	0.095	0.091	0.095	0.002	91.70
20	0.124	0.126	0.127	0.126	0.001	88.36	0.095	0.087	0.089	0.090	0.003	92.08
30	0.087	0.085	0.083	0.085	0.001	92.13	0.073	0.075	0.072	0.073	0.001	93.57
60	0.056	0.054	0.051	0.054	0.002	95.03	0.054	0.052	0.051	0.052	0.001	95.41
120	0.048	0.045	0.042	0.045	0.002	95.83	0.032	0.036	0.034	0.034	0.001	97.02
180	0.031	0.035	0.037	0.034	0.002	96.82	0.03	0.029	0.021	0.027	0.004	97.66
240	0.021	0.024	0.026	0.024	0.002	97.81	0.019	0.016	0.017	0.017	0.001	98.48

ตารางที่ ค.8 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2					pH 3						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	5.348	5.016	5.366	5.243	0.152	7.20	0.457	0.510	0.497	0.488	0.021	90.70
20	5.002	5.018	5.026	5.015	0.009	11.23	0.400	0.465	0.421	0.429	0.024	91.83
30	4.842	4.882	4.904	4.876	0.023	13.70	0.300	0.321	0.316	0.312	0.008	94.05
60	4.836	4.854	4.896	4.862	0.023	13.95	0.200	0.234	0.215	0.216	0.012	95.88
120	4.880	4.912	4.848	4.880	0.021	13.63	0.100	0.152	0.142	0.131	0.021	97.50
180	4.640	4.845	4.564	4.683	0.108	17.12	0.090	0.098	0.094	0.094	0.003	98.21
240	4.432	4.420	4.564	4.472	0.061	20.85	0.080	0.084	0.082	0.082	0.001	98.44

ตารางที่ ค.8 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4					pH 5						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	0.200	0.213	0.214	0.209	0.006	95.94	0.190	0.195	0.185	0.190	0.003	96.22
20	0.180	0.184	0.175	0.180	0.003	96.51	0.160	0.162	0.159	0.160	0.001	96.81
30	0.150	0.152	0.124	0.142	0.012	97.24	0.140	0.146	0.142	0.143	0.002	97.16
60	0.120	0.115	0.121	0.119	0.002	97.70	0.120	0.125	0.131	0.125	0.004	97.50
120	0.080	0.084	0.086	0.083	0.002	98.38	0.080	0.084	0.085	0.083	0.002	98.35
180	0.060	0.065	0.067	0.064	0.003	98.76	0.050	0.052	0.056	0.053	0.002	98.95
240	0.030	0.032	0.034	0.032	0.001	99.38	0.020	0.024	0.029	0.024	0.003	99.52

ตารางที่ ค.9 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ค่าพีเอชต่างๆ กัน ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2					pH 3						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	10.01	10.02	9.875	9.968	0.062	1.69	0.193	0.208	0.214	0.205	0.008	97.95
20	9.872	10.03	10.04	9.981	0.072	1.57	0.071	0.072	0.071	0.071	0.000	99.29
30	10.02	9.864	10.05	9.978	0.076	1.60	0.075	0.071	0.07	0.072	0.002	99.28
60	10.02	10.05	10.01	10.027	0.016	1.12	0.037	0.035	0.031	0.034	0.002	99.66
120	9.795	10.12	10.04	9.985	0.127	1.53	0.027	0.03	0.023	0.027	0.002	99.73
180	10.05	9.853	10.05	9.984	0.088	1.54	0.023	0.025	0.02	0.023	0.002	99.77
240	10.03	9.868	9.943	9.947	0.055	1.90	0.025	0.019	0.017	0.020	0.003	99.80

ตารางที่ ค.9 (ต่อ)

เวลา (นาที)	pH 4					pH 5						
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
10	0.053	0.056	0.058	0.056	0.002	99.45	0.065	0.063	0.059	0.062	0.002	99.37
20	0.051	0.042	0.051	0.048	0.004	99.52	0.059	0.055	0.052	0.055	0.002	99.44
30	0.031	0.035	0.03	0.032	0.002	99.68	0.048	0.045	0.047	0.047	0.001	99.53
60	0.03	0.025	0.024	0.026	0.002	99.74	0.032	0.031	0.035	0.033	0.002	99.67
120	0.026	0.019	0.021	0.022	0.003	99.78	0.025	0.026	0.021	0.024	0.002	99.76
180	0.021	0.024	0.022	0.022	0.001	99.78	0.023	0.021	0.02	0.021	0.001	99.78
240	0.014	0.016	0.017	0.016	0.001	99.84	0.013	0.015	0.017	0.015	0.001	99.85

ตารางที่ ค.10 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วเมื่อมีแอมโมเนียมชนิดต่าง

ความเข้มข้นแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>				F				Cl									
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0	0.280	0.250	0.260	0.263	0.011	99.34	0.570	0.560	0.520	0.550	0.020	98.62	0.140	0.150	0.170	0.153	0.011	99.62
20	0.350	0.320	0.340	0.337	0.011	99.16	0.870	0.850	0.790	0.837	0.031	97.90	0.180	0.190	0.170	0.180	0.007	99.55
30	0.560	0.510	0.530	0.533	0.018	98.67	1.320	1.220	1.250	1.263	0.038	96.83	0.230	0.250	0.240	0.240	0.007	99.40
40	1.200	1.160	1.240	1.200	0.027	97.00	1.560	1.460	1.510	1.510	0.033	96.21	0.310	0.300	0.320	0.310	0.007	99.23
50	1.520	1.510	1.490	1.507	0.011	96.23	1.960	1.860	1.740	1.850	0.073	95.36	0.350	0.340	0.360	0.350	0.007	99.13
60	1.800	1.780	1.740	1.773	0.022	96.57	2.340	2.210	2.150	2.233	0.071	94.40	0.420	0.450	0.430	0.433	0.011	98.92
80	1.900	1.850	1.790	1.847	0.038	95.38	2.720	2.580	2.430	2.570	0.100	93.55	0.510	0.520	0.540	0.523	0.011	98.69

ตารางที่ ค.10 (ต่อ)

ความเข้มข้นแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>				NO <sub>3</sub>				ประสิทธิภาพการกำจัด (%)			
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0	0.020	0.053	0.037	0.037	0.011	99.91	0.099	0.152	0.136	0.129	0.020	99.68
20	0.129	0.202	0.218	0.183	0.036	99.53	0.076	0.153	0.084	0.104	0.032	99.74
30	0.231	0.239	0.271	0.247	0.016	99.37	0.093	0.154	0.120	0.122	0.021	99.69
40	0.318	0.120	0.216	0.218	0.067	99.44	0.085	0.127	0.159	0.124	0.026	96.69
50	0.319	0.317	0.273	0.303	0.020	99.22	0.115	0.149	0.140	0.135	0.013	99.66
60	0.290	0.287	0.354	0.310	0.029	99.20	0.124	0.164	0.180	0.156	0.021	99.61
80	0.381	0.379	0.406	0.389	0.012	99.00	0.231	0.224	0.246	0.234	0.008	99.42

ตารางที่ ค.11 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลเมื่อมีแอมโมเนียมชนิดต่างๆ

ความเข้มข้นแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>						F						CI					
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
	0	0.133	0.13	0.128	0.130	0.002	99.67	0.527	0.53	0.54	0.532	0.005	98.66	0.106	0.112	0.114	0.111	0.003
20	0.233	0.25	0.241	0.241	0.006	99.40	0.627	0.63	0.624	0.627	0.002	98.42	0.104	0.126	0.124	0.118	0.009	99.70
30	0.257	0.251	0.253	0.254	0.002	99.37	0.702	0.713	0.709	0.708	0.004	98.21	0.187	0.184	0.189	0.187	0.002	99.53
40	0.58	0.56	0.54	0.560	0.013	98.60	0.716	0.725	0.729	0.723	0.005	98.18	0.28	0.26	0.27	0.270	0.007	99.32
50	0.74	0.75	0.79	0.760	0.020	98.10	0.946	0.952	0.934	0.944	0.007	97.62	0.25	0.29	0.26	0.267	0.016	99.33
60	0.81	0.82	0.84	0.823	0.011	97.94	1.231	1.326	1.267	1.275	0.034	96.79	0.36	0.37	0.384	0.371	0.008	99.07
80	0.97	0.96	0.98	0.970	0.007	97.58	1.524	1.56	1.54	1.541	0.012	96.11	0.45	0.43	0.48	0.453	0.018	98.86

ตารางที่ ค.11 (ต่อ)

ความเข้มข้นแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>						NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
	0	0.296	0.308	0.286	0.297	0.008	99.26	0.38	0.365	0.314	0.353	0.026
20	1.406	1.451	1.53	1.462	0.045	96.35	0.444	0.415	0.443	0.434	0.013	98.90
30	2.919	2.924	2.973	2.939	0.023	92.66	0.521	0.492	0.535	0.516	0.016	98.70
40	3.294	3.302	3.388	3.328	0.040	91.69	0.559	0.556	0.525	0.547	0.014	98.62
50	4.829	4.785	4.898	4.837	0.040	87.92	0.653	0.523	0.517	0.564	0.059	98.57
60	7.591	7.755	7.698	7.681	0.060	80.82	0.737	0.652	0.678	0.689	0.032	98.26
80	7.832	8.35	8.564	8.249	0.278	79.40	0.821	0.834	0.846	0.834	0.008	97.89

ตารางที่ ค.12 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมเมื่อมีแอมโมเนียมชนิดต่างๆ

ความเข้มข้นแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>						F						Cl														
	No. 1			No. 2			No. 3			No. 1			No. 2			No. 3			No. 1			No. 2			No. 3		
	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD			
0	0.030	0.031	0.001	99.69	0.031	0.001	0.021	0.019	0.021	0.019	0.001	99.79	0.015	0.016	0.001	0.015	0.014	0.001	0.015	0.014	0.001	99.848	0.015	0.001			
20	0.035	0.033	0.001	99.66	0.034	0.001	0.030	0.031	0.031	0.031	0.001	99.69	0.016	0.018	0.001	0.016	0.019	0.001	0.018	0.019	0.001	99.821	0.018	0.001			
30	0.056	0.053	0.002	99.47	0.053	0.002	0.038	0.035	0.037	0.037	0.001	99.63	0.021	0.024	0.002	0.021	0.025	0.002	0.023	0.025	0.002	99.763	0.023	0.002			
40	0.082	0.081	0.001	99.19	0.081	0.001	0.049	0.045	0.043	0.046	0.002	99.54	0.025	0.026	0.001	0.025	0.028	0.001	0.026	0.028	0.001	99.733	0.026	0.001			
50	0.089	0.086	0.001	99.13	0.087	0.001	0.058	0.059	0.057	0.058	0.001	99.42	0.028	0.029	0.001	0.028	0.027	0.001	0.028	0.027	0.001	99.716	0.028	0.001			
60	0.091	0.092	0.001	99.08	0.092	0.001	0.069	0.065	0.067	0.067	0.001	99.33	0.03	0.032	0.001	0.03	0.034	0.001	0.032	0.034	0.001	99.675	0.032	0.001			
80	0.098	0.097	0.001	99.04	0.095	0.001	0.075	0.072	0.073	0.073	0.001	99.27	0.034	0.035	0.001	0.034	0.036	0.001	0.035	0.036	0.001	99.645	0.035	0.001			

ตารางที่ ค.12 (ต่อ)

ความเข้มข้นแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>						NO <sub>3</sub>															
	No. 1			No. 2			No. 3			No. 1			No. 2			No. 3						
	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	เฉลี่ย	SD							
0	0.011	0.015	0.002	99.87	0.013	0.002	0.011	0.013	0.014	0.013	0.001	99.87	0.015	0.014	0.001	0.015	0.014	0.001	0.013	0.014	0.001	99.87
20	0.015	0.027	0.004	99.79	0.020	0.004	0.015	0.024	0.031	0.023	0.006	99.76	0.016	0.020	0.004	0.016	0.024	0.004	0.023	0.031	0.006	99.76
30	0.096	0.093	0.003	99.09	0.087	0.003	0.035	0.038	0.034	0.036	0.002	99.64	0.03	0.034	0.003	0.03	0.034	0.003	0.036	0.034	0.002	99.64
40	0.145	0.149	0.002	98.52	0.15	0.002	0.037	0.029	0.034	0.033	0.003	99.66	0.04	0.043	0.004	0.04	0.043	0.004	0.047	0.051	0.003	99.52
50	0.161	0.153	0.004	98.46	0.155	0.004	0.048	0.043	0.051	0.047	0.003	99.37	0.062	0.059	0.004	0.062	0.064	0.002	0.062	0.064	0.002	99.37
60	0.215	0.234	0.014	97.65	0.235	0.014	0.062	0.059	0.064	0.062	0.002	99.31	0.065	0.068	0.005	0.065	0.071	0.002	0.068	0.071	0.002	99.31
80	0.251	0.243	0.005	97.57	0.243	0.005	0.065	0.068	0.071	0.068	0.002	99.31	0.065	0.068	0.005	0.065	0.071	0.002	0.068	0.071	0.002	99.31

ตารางที่ ค.13 แสดงประสิทธิภาพการจัดนิยามเกิดและแคตเมียมที่เหลือน้อยเมื่อมีความเข้มข้นของตะกั่วต่าง ๆ

ความเข้มข้นตะกั่ว (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณนิยามเกิดที่เหลือน้อย			ปริมาณแคตเมียมที่เหลือน้อย								
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0	0.368	0.354	0.373	0.365	0.007	99.09	0.010	0.011	0.013	0.011	0.001	99.89
10	0.416	0.426	0.502	0.448	0.036	98.88	0.018	0.026	0.023	0.022	0.003	99.78
15	0.537	0.510	0.548	0.532	0.014	98.67	0.028	0.029	0.030	0.029	0.001	99.71
20	0.930	0.878	0.905	0.904	0.018	97.74	0.032	0.034	0.031	0.032	0.001	99.68
25	1.035	1.045	1.091	1.057	0.023	97.36	0.045	0.043	0.047	0.045	0.001	99.55
30	1.481	1.479	1.449	1.470	0.014	96.33	0.057	0.058	0.065	0.060	0.003	99.40

ตารางที่ ค.14 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและแคตเมียมที่เหลือน้อยเมื่อมีความเข้มข้นของนิยามเกิดต่าง ๆ

ความเข้มข้นนิยามเกิด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือน้อย			ปริมาณแคตเมียมที่เหลือน้อย								
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0	0.124	0.126	0.125	0.125	0.001	99.69	0.281	0.311	0.328	0.307	0.017	99.79
10	0.203	0.215	0.221	0.213	0.007	99.47	0.353	0.400	0.367	0.373	0.018	99.75
15	0.234	0.253	0.254	0.247	0.009	99.38	0.471	0.463	0.468	0.467	0.003	99.75
20	0.340	0.321	0.331	0.331	0.006	99.18	0.537	0.488	0.526	0.517	0.019	99.67
25	0.460	0.425	0.421	0.435	0.016	98.92	0.601	0.618	0.566	0.595	0.019	99.58
30	0.520	0.489	0.578	0.529	0.033	98.68	0.639	0.629	0.598	0.622	0.016	99.19

ตารางที่ ค.15 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและนิยามเกิดที่เหลือน้อยเมื่อมีความเข้มข้นของแคตเมียมต่าง ๆ

ความเข้มข้นแคตเมียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณตะกั่วที่เหลือน้อย			ปริมาณนิยามเกิดที่เหลือน้อย								
	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)	No. 1	No. 2	No. 3	เฉลี่ย	SD	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)
0	0.130	0.132	0.124	0.129	0.003	99.68	0.281	0.311	0.328	0.307	0.017	99.23
10	0.150	0.145	0.135	0.143	0.006	99.64	0.353	0.400	0.367	0.373	0.018	99.07
15	0.210	0.197	0.221	0.209	0.008	99.48	0.471	0.463	0.468	0.467	0.003	98.83
20	0.260	0.230	0.250	0.247	0.011	99.38	0.537	0.488	0.526	0.517	0.019	98.71
25	0.340	0.324	0.319	0.328	0.008	99.18	0.601	0.618	0.566	0.595	0.019	98.51
30	0.420	0.416	0.431	0.422	0.006	98.95	0.639	0.629	0.598	0.622	0.016	98.45

## ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตัวอย่างวิธีการทดสอบทางสถิติโดยวิธี Analysis of Variance, ANOVA โดยทำการทดสอบผลของค่าพีเอชต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนัก ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ ง.1 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่ค่าพีเอชต่างๆ เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลา (นาที)	pH 2	pH 3	pH 4	pH 5
10	9.16	73.30	90.63	96.18
20	15.78	87.78	98.01	98.42
30	14.99	90.05	98.88	98.67
60	18.02	97.15	98.89	99.16
120	22.14	99.40	99.47	99.37
180	19.61	99.59	99.60	99.57
240	22.14	99.63	99.66	99.62

### วิธีทำ

มีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ

ปัจจัยที่ 1 ค่าพีเอช มี 4 ค่า คือ  $k = 4$

ปัจจัยที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัด มี 7 ครั้งที่เวลาต่างๆ กัน คือ  $b = 7$

จำนวนตัวอย่าง =  $n = kb = 4(7) = 28$  ตัวอย่าง

การคำนวณ  $T_{pH2} = 9.16 + 15.78 + \dots + 22.14 = 121.84$

$$T_{pH3} = 73.30 + 87.78 + \dots + 99.63 = 646.89$$

$$T_{pH4} = 90.63 + 98.01 + \dots + 99.66 = 685.14$$

$$T_{pH5} = 96.18 + 98.42 + \dots + 99.62 = 691.00$$

$$B_{10} = 9.16 + 73.30 + 90.63 + 96.18 = 269.27$$

$$B_{20} = 15.78 + 87.78 + 98.01 + 98.42 = 299.98$$

$$B_{30} = 14.99 + 90.05 + 98.88 + 98.67 = 302.60$$

$$B_{60} = 18.02 + 97.15 + 98.89 + 99.16 = 313.22$$

$$B_{120} = 22.14 + 99.40 + 99.47 + 99.37 = 320.37$$

$$B_{180} = 19.61 + 99.59 + 99.60 + 99.57 = 318.37$$

$$\begin{aligned}
 B_{240} &= 22.14 + 99.63 + 99.66 + 99.62 = 321.05 \\
 T &= \sum \sum X_{ij} = \sum T_j = \sum B_i = 2,144.87 \\
 CM &= T^2/n = (2144.87)^2/28 = 164,811.02 \\
 \sum \sum X_{ij}^2 &= (9.16)^2 + (15.78)^2 + \dots + (99.57)^2 + (99.62)^2 = 197,938.79 \\
 SST &= \sum \sum X_{ij}^2 - CM \\
 &= 197,938.79 - 164,811.02 = 33,636.24 \\
 SSTrt &= \sum T_j^2/b - CM \\
 &= (121.84)^2/7 + (646.89)^2/7 + (658.14)^2/7 + (691.00)^2/7 - 164,811.02 \\
 &= 32,870.54 \\
 MSTrt &= SSTrt/(k-1) = 32,870.54/3 = 10,956.85 \\
 SSB &= \sum B_i^2/k - CM \\
 &= (269.27)^2/4 + (299.98)^2/4 + \dots + (321.05)^2/4 - 164,811.02 = 508.48 \\
 MSB &= SSB/(b-1) = 508.48/6 = 84.78 \\
 SSE &= SST - SSTrt - SSB \\
 &= 33,636.24 - 32,870.54 - 508.48 = 257.23 \\
 MSE &= SSE/(k-1)(b-1) = 257.23/4(6) = 14.29
 \end{aligned}$$

### ตารางที่ ง.2 ANOVA สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

แหล่งความแปรปรวน	DF	S.S	M.S	F
ระหว่างค่าพีเอช	4-1 = 3	32,870.54	10,956.85	766.75
ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัด	7-1 = 6	508.47	84.78	
ภายในค่าพีเอชและ ประสิทธิภาพการกำจัด	(4-1)(7-1) = 18	257.23	14.29	
ผลรวม	4(7)-1 = 27	33,636.24		

### สมมติฐานสำหรับการทดสอบ

$H_0$  : ค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักไม่แตกต่างกัน

$H_1$  : มีค่าพีเอชอย่างน้อย 1 ค่า ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแตกต่างจากค่าพีเอชอื่นๆ

## สถิติทดสอบ

$$F = \text{MSTrt} / \text{MSE} = 766.75$$

## เขตปฏิเสธ

จะปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0$  ถ้า  $F > F_{.95,3,18}$  โดยที่  $F_{.95,3,18} = 3.16$  จึงสามารถปฏิเสธ  $H_0$  ได้

นั่นคือ มีค่าพีเอชอย่างน้อย 1 ค่า ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแตกต่างจากค่าพีเอชอื่นๆ



## ประวัติผู้เขียน

นางสาวชุตินา เสพย์ธรรม เกิดเมื่อวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2517 ที่จังหวัดนครศรีธรรมราช สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี) จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา 2538 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2539

