

การศึกษาเถ้าลอยที่ผ่านการคายซับแล้ว เพื่อการนำกลับมาดูดซับนิกเกิลใน  
ของเสียอันตราย

THE STUDY OF DESORBED FLY ASH FOR RECOVERY TO  
ADSORB NICKEL IN HAZARDOUS WASTE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาเฝ้าลอยที่ผ่านการคายซับแล้ว เพื่อนำกลับมาดูดซับนิกเกิลใน  
ของเสียอันตราย

THE STUDY OF DESORBED FLY ASH FOR RECOVERY TO  
ADSORB NICKEL IN HAZARDOUS WASTE



นางสาว กนิษฐา ภูมิน้อย

นางสาว กวิตา บุญยง

นาย จิรจิตติ ไพยรัตน์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ปีการศึกษา 2556

**THE STUDY OF DESORBED FLY ASH FOR RECOVERY TO  
ADSORB NICKEL IN HAZARDOUS WASTE**

**Miss Kanitha Phomnoi**

**Miss Kawita Boonyong**

**Mr. Jirakit Paiyarat**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN ENVIRONMENTAL RESOURCE CHEMISTRY  
FACULTY OF SCIENCE**

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG** วิชาการ  
**ACADEMIC YEAR 2013** ึ่งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาเฝ้ารอยที่ผ่านการคายซับแล้ว เพื่อการนำกลับมาดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย

The Study of Desorbed Fly Ash for Recovery to Adsorb Nickel in Hazardous Waste

ชื่อนักศึกษา นางสาวกนิษฐา ภูมิน้อย  
นางสาวविตา บุญยง  
นายจิรศักดิ์ ไพยรัตน์



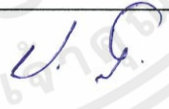

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชา เคมีสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สามารถ คงทวีเลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อาจารย์กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์	
ดร.ชวัลย์ ศรีวงษ์	
อาจารย์ปัทมา ลีพหาวงศ์	
ดร.สามารถ คงทวีเลิศ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หัวข้อโครงการพิเศษ** การศึกษาเถ้าลอยที่ผ่านการคายซับแล้ว เพื่อการนำกลับมาดูซับนิกเกิลในของเสียอันตราย

**ชื่อนักศึกษา** น.ศ. กนิษฐา ภูมิน้อย  
น.ศ. กวิตา บุญยง  
นาย จิรจิตต์ ไพยรัตน์

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์บัณฑิต

**สาขาวิชา** เคมีสิ่งแวดล้อม

**ปีการศึกษา** 2556

**อาจารย์ที่ปรึกษา** อาจารย์ ปัทมา ลีพหาวงศ์

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ดร. สามารถ คงทวีเลิศ

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการนำเถ้าลอยที่ผ่านการคายซับมาดูซับนิกเกิลในของเสียอันตราย โดยทำการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอยให้มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเพิ่มขึ้นด้วยการรีฟลักซ์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ แล้วนำมาทำการดูซับนิกเกิลในของเสียอันตราย จากนั้นนำเถ้าลอยมาทำการคายซับนิกเกิลด้วยวิธี Carrier-In-Pulp โดยใช้ผงเหล็กเป็นตัวพา จากนั้นนำเถ้าลอยที่ผ่านการคายซับในครั้งแรกมาดูซับนิกเกิลในของเสียอันตรายอีกครั้ง ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและสถานะที่เหมาะสมระหว่างการดูซับในครั้งแรกกับครั้งที่สอง จากการทดลองพบว่า การดูซับนิกเกิลในครั้งแรกและครั้งที่สองมีความแตกต่างกัน โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 94.99 และ 91.23 ตามลำดับ การดูซับทั้งสองครั้งมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่ค่าพีเอช 5 และมีระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมอยู่ที่ 30 นาที

**คำสำคัญ :** เถ้าลอย นิกเกิล ผงเหล็ก วิธี Carrier-In-Pulp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	The study of desorbed fly ash for recovery to adsorb nickel in hazardous waste
<b>Students</b>	Miss Kanitha Phomnoi Miss Kawita Boonyong Mr. Jirakit Paiyarat
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Environmental Resource Chemistry
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Mrs. Patthama Leelahawong
<b>Co Advisor</b>	Dr. Samat Kongtaweelit

### Abstract

This special project study about application of desorbed fly ash to adsorb nickel in hazardous waste. Mixed fly ash and sodium hydroxide were refluxed for treat fly ash and increase cation exchange capacity. Thereafter, fly ash was used to adsorbed nickel in hazardous waste and desorbed it by Carrier-In-Pulp method (ferro powder is carrier). The desorbed fly ash was reused under the same process. The efficiency and optimum condition in first adsorption and second adsorption was compared. The results show the differentiation of 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> adsorption that effective in removal nickel is 94.99 and 91.23%, respectively. Moreover, pH 5 and half hour was optimal condition of both adsorption.

**Keywords :** Fly ash    Nickel    Ferro powder    Carrier-In-Pulp method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากคณะผู้จัดทำได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ อ.ปัทมา ลิฬหาวงศ์ และ ดร.สามารถ คงทวีเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ติดตามตรวจสอบโครงการอย่างใกล้ชิด รวมถึง

ขอขอบพระคุณ อ.กถินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ และ ดร.ชวาลย์ ศรีวงษ์ คณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ ที่ได้ช่วยตรวจสอบเพิ่มความสมบูรณ์ให้โครงการพิเศษเล่มนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ธุรการ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ได้ให้การช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.) ที่ให้ความอนุเคราะห์ปล่อย รวมถึงบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด(มหาชน)หรือ GENCO ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำเสีย และ บริษัท Alchemy ที่ให้ความอนุเคราะห์ผงเหล็กมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมทั้งเพื่อนๆสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม ผู้ที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือในทุกๆด้าน ทางผู้จัดทำจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวนิษฐา ภูมิน้อย  
นางสาวविता บุญยง  
นายจิรกิตต์ ไพยรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 นิกเกิล	4
2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนัก	5
2.3 การดูดซับ	8
2.4 อุตสาหกรรมชุบโลหะ	12
2.5 ของเสียอันตราย	14
2.6 เถ้าลอย (Fly ash)	16
2.7 ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC)	19
2.8 การเก็บตัวอย่างน้ำและการเก็บรักษาสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนัก	21
2.9 Electronegativity (EN)	23
2.10 Atomic Absorption Spectrometer, AAS	24
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วัสดุ อุปกรณ์ และการดำเนินงานวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	33
3.2 ตัวอย่างและสารเคมี	34
3.3 การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอย	35
3.4 การศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย	36

## สารบัญ(ต่อ)

3.5 การศึกษาการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลด้วยวิธี Carrier-in-pulp โดยใช้ผงเหล็กเป็นตัวพา	37
3.6 การศึกษาการนำเถ้าลอยกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย	38
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย	
4.1 ผลการศึกษาปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอย	39
4.2 ผลการศึกษาปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล	41
4.3 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล	42
4.4 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล	43
4.5 ผลการศึกษาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล	44
4.6 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล	45
4.7 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล	46
4.8 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล	47
4.9 การนำเถ้าลอยกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตรายโดยศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม	48
4.10 การนำเถ้าลอยกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตรายโดยศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม	49
4.11 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับนิกเกิลและกราฟความสัมพันธ์ของการดูดซับนิกเกิล	50
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	52
5.2 ข้อเสนอแนะ	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าน้อยลิกไนท์	17
2.2 แสดงระดับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก	21
ค - 1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานนิกเกิลที่ใช้ศึกษาหาระยะเวลา สัมผัสที่เหมาะสมของการดูดซับนิกเกิลครั้งที่สอง	61
ค - 2 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของเถ้าน้อยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	62
ค - 3 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์เถ้าน้อยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง	62
ค - 4 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์เถ้าน้อยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง	63
ค - 5 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์เถ้าน้อยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง	63
ค - 6 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์เถ้าน้อยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง	64
ค - 7 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์เถ้าน้อยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง	64
ค - 8 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาปริมาณเถ้าน้อยที่ผ่านการปรับปรุง คุณภาพที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล	65
ค - 9 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการกำจัดนิกเกิล	66
ค - 10 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสในการกำจัด นิกเกิล	67
ค - 10 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสในการกำจัด นิกเกิล (ต่อ)	68
ค - 11 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการคาย ซับนิกเกิลออกจากเถ้าน้อยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล	69
ค - 11 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการคาย ซับนิกเกิลออกจากเถ้าน้อยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล (ต่อ)	70
ค - 12 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าน้อย	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเชิงนโยบายที่ต้องขอแจ้งข้อเท็จจริงเกี่ยวกับเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ค – 12 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ เหมาะสมในการคายซับนิกิตออกจากถ้ำลอย (ต่อ)	72
ค – 13 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการคายซับ นิกิตออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกิต	73
ค – 13 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการคายซับ นิกิตออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกิต (ต่อ)	74
ค – 14 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการคายซับนิกิต ออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกิต	75
ค – 14 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการคายซับนิกิต ออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกิต (ต่อ)	76
ค – 15 แสดงการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับนิกิต	77
ค – 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ใช้กับ ปริมาณนิกิตที่เหลือในของเสียอันตราย	78
ค - 17 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการดูดซับนิกิตครั้ง ที่สอง	79
ค - 18 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการดูดซับ นิกิตครั้งที่สอง	80
ค - 18 แสดงร้อยละการกำจัดนิกิตของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการดูดซับ นิกิตครั้งที่สอง (ต่อ)	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การจัดการของเสียอันตราย	15
2.2 ค่า EN ตามตารางธาตุ	23
2.3 กราฟแนวโน้มของค่า EN ตามหมู่และคาบ	23
2.4 การดูคลื่นแสง	25
2.5 ส่วนประกอบของเครื่อง AAS	25
2.6 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง AAS แบบลำแสงเดี่ยวและลำแสงคู่	28
4.1 แผนภูมิแท่งแสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	40
4.2 กราฟแสดงแนวโน้มของค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ	40
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณ Treated Fly Ash กับร้อยละการกำจัดนิกเกิล	41
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล	42
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล	43
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณผงเหล็กกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล	44
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ NaCl กับร้อยละการกำจัดนิกเกิล	45
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล (คายซับ)	46
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล (คายซับ)	47
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล	48
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล	49
4.12 (ก) ไอโซเทอมแบบ Langmuir (ข) ไอโซเทอมแบบ Freundlich	50
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ใช้กับปริมาณนิกเกิลที่เหลือในของเสียอันตราย	51
ค-1 กราฟมาตรฐานของสารละลายนิกเกิล	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากงานวิจัยเรื่อง Recovery of heavy metal from MSW molten fly ash by carrier-in-pulp method ; Fe powder as carrier ของ Richard Diaz Alorro และคณะ มีการนำผงเหล็กมาใช้ในการ คายซับ โลหะหนักออกจากเถ้าลอยในรูปของแข็ง เช่น ตะกั่ว เนื่องจากตะกั่วนี้มีค่า Electronegativity(EN) ที่สูงกว่าเหล็ก ดังนั้นตะกั่วจึงดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าเหล็ก ทำให้มีการ แลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น สุดท้ายตะกั่วจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแข็งและติดอยู่ที่ผิวของ ผงเหล็ก หลังจากนำเถ้าลอยไปผ่านกระบวนการคายซับแล้ว ผู้ทำการวิจัยจะนำเอาเถ้าลอยมาทำการ ดูดซับ โลหะหนักอีกครั้ง เพื่อทดสอบว่าเถ้าลอยจะสามารถนำกลับมาใช้เป็นตัวดูดซับ โลหะหนักได้ อีกหรือไม่

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1.2.1 เพื่อเพิ่มมูลค่าของเถ้าลอยโดยการใช้เป็นวัตถุดิบในการดูดซับนิกเกิลในของ เสียอันตราย

1.2.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตรายระหว่าง เถ้าลอยก่อนการคายซับและหลังผ่านการคายซับ

1.2.3 เปรียบเทียบสถานะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำเถ้าลอยมาดูดซับนิกเกิล ในของเสียอันตรายระหว่างเถ้าลอยก่อนการคายซับและหลังจากผ่านการคายซับ

1.2.4 ศึกษาการนำผงเหล็กมาใช้เป็นตัวพา (Carrier) ในกระบวนการคายซับ นิกเกิลออกจากเถ้าลอยตามวิธี Carrier-in-Pulp

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 นำเถ้าลอยจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.)มาทำการปรับปรุง คุณภาพ(Treat) ด้วยการรีฟลักซ์กับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์(NaOH) ที่มีความเข้มข้นและ เวลาในการ reflux ที่แตกต่างกัน

1.3.2 นำเถ้าลอยมาทำการหาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน ซึ่งจะทำได้ ทำให้ทราบค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงที่สุด

1.3.3 นำเถ้าลอยที่มีความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงที่สุดมาทำการดูดซับ นิกเกิลในของเสียอันตรายที่นำมาจากบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด(มหาชน)หรือ GENCO โดยศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมในการดูดซับจากปัจจัยต่างๆคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.4 นำถ้ำลอยมาทำการคายซับนิกเกิดด้วยเทคนิค Carrier-in-Pulp โดยใช้ผงเหล็กซึ่งนำมาจากบริษัท Alchemy เป็นตัวพา ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมในการคายซับจากปัจจัยต่างๆคือ ปริมาณผงเหล็ก ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์(NaCl) ค่าพีเอช และระยะเวลาสัมผัส

1.3.5 นำถ้ำลอยที่ผ่านการคายซับกลับมาดูดซับนิกเกิดอีกครั้ง ทำการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับจากปัจจัยต่างๆคือ ความเข้มข้นของถ้ำลอย ค่าพีเอช และระยะเวลาในการสัมผัส ว่ามีความแตกต่างจากการดูดซับในครั้งแรกหรือไม่

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นการนำถ้ำลอยมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดก่อนการนำไปแปรรูปหรือทำการฝังกลบ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียและช่วยประหยัดต้นทุนที่ใช้ในการกำจัดนิกเกิดในของเสียอันตราย

1.4.2 สามารถนำถ้ำลอยมาเป็นวัตถุดิบในการดูดซับนิกเกิดได้มากกว่าหนึ่งครั้ง

1.4.3 ช่วยลดความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมโดยการลดปริมาณนิกเกิดในของเสียอันตราย

1.4.4 สามารถเลือกใช้สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการดูดซับนิกเกิด ซึ่งจะช่วยให้ถ้ำลอยสามารถดูดซับนิกเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 นิกเกิล (กิตติพันธ์ บางยี่ขัน)

นิกเกิลจัดเป็นโลหะชนิดหนึ่ง ซึ่งโลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โปรท นิกเกิล เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทซึ่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง โลหะหนักส่วนใหญ่จะมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกันเช่น การนำไฟฟ้าและการนำความร้อนที่ดี มีความมันวาว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ สามารถรวมตัวกับสารอื่นได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเสถียรกว่าโลหะอิสระ

ความเป็นพิษของโลหะหนักเป็นผลมาจากการที่มนุษย์ได้รับสารเข้าสู่ร่างกาย แหล่งที่มาของโลหะหนักเหล่านี้เกิดจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม เมื่อโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยโลหะหนักเข้าสู่สิ่งแวดล้อมจะเกิดการปนเปื้อนขึ้นทั้งในดิน น้ำ อากาศ และสิ่งมีชีวิต

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีสีขาวเงิน มีความคล้ายคลึงกับเหล็กด้านความแข็งแรง และมีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีคล้ายทอง มีความเชื่อว่านิกเกิลมีปริมาณมากในบริเวณใจกลางของโลก

คุณสมบัติทั่วไปของนิกเกิล

เลขอะตอม	28
น้ำหนักอะตอม	58.69 g/mol
ระบบผลึก	FCC
ความหนาแน่นที่ 20 องศาเซลเซียส	8.91 g.cm <sup>-3</sup>
จุดหลอมเหลว	1,455 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	2,913 องศาเซลเซียส

#### 2.1.1 การใช้ประโยชน์ (ชุติมา เสพย์ธรรม, 2543)

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติต้านทานการเกิดออกซิเดชัน และต้านทานการกัดกร่อนสูง มีความเหนียวและอ่อนตัวมากสามารถขึ้นรูปที่อุณหภูมิต่ำได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถละลายกับโลหะอื่นได้ง่ายและให้สารละลายที่มีความเหนียว การใช้งานโลหะนิกเกิลส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าไร้สนิมและเหล็กกล้าผสม ใช้เคลือบผิวเหล็ก นอกจากนั้นยังใช้ในงานที่ต้องการการกัดกร่อนสูง ๆ ซึ่งตัวอย่างการนำโลหะนิกเกิลไปใช้ประโยชน์มีดังนี้

1. ใช้ทำมาตรฐาน ประตุน้ำ ท่อสำหรับอุปกรณ์ส่งถ่ายความร้อน และวัสดุกรองในอุตสาหกรรมเคมีและการกลั่นน้ำมัน
2. ใช้ทำโลหะผสมชนิดพิเศษ (Superalloy) ซึ่งต้านทานความเค้นและทนการกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูงสำหรับอุตสาหกรรมอากาศยาน โดยใช้เป็นวัสดุในการผลิตอุปกรณ์รักษาระดับความดันอากาศ ชิ้นส่วนต่างๆ และเครื่องยนต์ของเครื่องบินไอพ่น
3. ใช้เคลือบผิวอุปกรณ์ระดับยนต์ต่างๆ รวมถึงเครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น เตาไฟฟ้า หม้อหุงข้าว เตาปิ้งขนมปัง เครื่องเป่าผม ซ่อมล้อจักรยาน ถาด และอุปกรณ์การทำอาหาร เป็นต้น
4. ใช้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หลอดสูญญากาศ หลอดโทรทัศน์ และใช้ทำขั้วแอโนด แคโทด กริด และลวดยึดในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยอาศัยคุณสมบัติการยึดดึง การต้านแรง และคุณลักษณะการปล่อยอิเล็กตรอน
5. จากคุณสมบัติที่สามารถดูดซับแม่เหล็กของนิเกิลจึงใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น เครื่องแปลงกำลังสำหรับพลังงานอัลตราโซนิก อุปกรณ์การสำรวจใต้น้ำในอุตสาหกรรมการเดินเรือ อุปกรณ์ทำความสะอาดชิ้นงานก่อนเคลือบผิวในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ
6. ในการก่อสร้างมีการใช้นิเกิลในรูปเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อทำอุปกรณ์ประดับอาคาร เนื่องจากนิเกิลมีคุณสมบัติต้านทานการกัดกร่อน แข็งแรง และให้ความสวยงาม

### 2.1.2 ความเป็นพิษ

เมื่อนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมตามกระดูกสันหลัง สมอง ปอด และหัวใจ ทั้งยังไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ต่างๆ อาการของผู้ที่ได้รับนิเกิลมีดังนี้ ปวดหัว มึนงง คลื่นไส้ อาเจียน แน่นหน้าอก ไอแห้ง หากได้รับในปริมาณมากอาจมีเลือดออกในปอดได้ นอกจากนี้ยังพบว่านิเกิลมีคุณสมบัติเป็นสารชักนำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง คนที่ประกอบอาชีพที่มีความเกี่ยวข้องกับนิเกิลมีโอกาสเป็นมะเร็งในช่องจมูกและโพรงจมูกมากกว่าคนปกติประมาณ 150 เท่า

## 2.2 วิธีการกำจัดโลหะหนัก (ชุตินา เสดพยัชรธรรม, 2543)

กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมีหลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นกับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน กระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสภาพของสารที่อยู่ในรูปสารละลาย (Soluble) ให้เปลี่ยนเป็นสารที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (Insoluble) โดยการเติมสารเคมีผสมลงไปลงในน้ำเสีย การตกตะกอนโลหะหนักมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธีคือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation) และการตกตะกอนซัลไฟด์ (Sulfide Precipitation)

#### 1. การตกตะกอนไฮดรอกไซด์

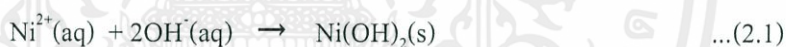
การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ทำได้โดยการเติมสารเคมีเช่น ปูนขาว (CaO) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้



การตกตะกอนไฮดรอกไซด์มีข้อจำกัดคือ จะต้องมีความเหมาะสมในการตกตะกอน

ตัวอย่างการตกตะกอนนิเกิลไฮดรอกไซด์

ที่ pH ต่ำกว่า 9 นิเกิลจะละลายน้ำได้ดีโดยอยู่ในรูป Ni<sup>2+</sup> ถ้า pH เพิ่มขึ้นที่ประมาณ 10-11 เป็นต้นไป นิเกิลไอออนจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์กลายเป็น Ni(OH)<sub>2</sub> ที่ไม่ละลายน้ำ ดังสมการที่ 2.1



สารเคมีที่ใช้ตกตะกอนนิเกิลใช้ได้ทั้ง NaOH และปูนขาว ในการบำบัดนิเกิลจะมีสารรบกวนคือ ไซยาไนด์ไอออน(CN<sup>-</sup>) ซึ่งจะรวมตัวกับนิเกิลไอออนและเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้เช่น Ni(CN)<sub>4</sub><sup>2-</sup>(aq) ในระบบที่นำนิเกิลกลับมาใช้ใหม่อาจมีตะกอนนิเกิลคาร์บอเนต นิเกิลซัลเฟตเกิดขึ้นด้วย ในทางปฏิบัติจะเติมปูนขาวให้สารละลายมี pH 11.5 แล้วจึงตามด้วยการตกตะกอน

#### 2. การตกตะกอนซัลไฟด์

การตกตะกอนซัลไฟด์ทำได้โดยการเติมสารเคมีเช่น โซเดียมซัลไฟด์ (Na<sub>2</sub>S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้



ข้อดีของการตกตะกอนซัลไฟด์คือ โลหะซัลไฟด์นั้นมีการละลายได้น้อยกว่าโลหะไฮดรอกไซด์

แต่การตกตะกอนซัลไฟด์นั้นข้อจำกัดคือ การเกิดกลิ่นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) ซึ่งเกิดจากการค้าไม่ว่ากรณี

### 2.2.2 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนใช้หลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะถูกดูดซับโดยเรซิน (Resin) ได้ไม่เท่ากัน ซึ่งสารแลกเปลี่ยนไอออนนี้มีทั้งแบบที่ได้จากธรรมชาติและแบบที่สังเคราะห์ขึ้น หมู่ฟังก์ชันที่ติดอยู่ที่เรซินจะถูกทำให้สมดุลด้วยประจุตรงกันข้าม ไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้เป็นไอออนที่จะเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในสารละลาย ถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนบวกจะเรียกว่า Cation Exchanger ส่วนถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนลบจะเรียกว่า Anion Exchanger วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ จะต้องทำการกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเรซินเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด ข้อจำกัดอีกอย่างหนึ่งคือ เรซินมีราคาแพง เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีกโดยการนำไปล้างด้วยกรด แต่ประสิทธิภาพจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ จนใช้ไม่ได้ในที่สุด

### 2.2.3 การออสโมซิสย้อนกลับ (Reverse Osmosis)

เป็นการแยกโลหะหนักโดยอาศัยความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำจาก Cellulose และ Polyamide ตัวทำละลายจะผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกเอาสารที่ต้องการจะบำบัดออกและทำให้เข้มข้นขึ้น วิธีนี้ต้องใช้ความดันสูงกว่า 100 atm ดังนั้นแผ่นเมมเบรนที่ใช้จะต้องมีความทนทานต่อแรงดันสูง และต้องมีการปรับพีเอชในเบื้องต้นเพื่อแยกสารที่เป็นตัวออกซิไดส์แรงๆ ออก อีกทั้งต้องมีการกรองเอาสารแขวนลอยออกก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน

### 2.2.4 การระเหย (Evaporation)

การระเหยน้ำออกเป็นวิธีง่ายๆ ที่จะทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งแบบระเหยที่บรรยากาศ (Atmospheric Evaporation) และระเหยภายใต้สุญญากาศ (Vacuum Evaporation) วิธีนี้ได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น และมีข้อเสียคือ ต้องใช้ต้นทุนในการบำบัดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.5 Electrodialysis

เป็นวิธีการแยกไอออนออกจากน้ำเสียด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้แผ่นเมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Ion Selective Membrane) กลไกของวิธีนี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้ แต่มีข้อเสียคือ ต้นทุนในการบำบัดสูง

### 2.2.6 Electrodialytic Recovery

เป็นการใช้เทคนิคทางไฟฟ้าเคมีเพื่อลดปริมาณไอออนของโลหะในน้ำเสียให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด ส่วนขั้วแอโนดจะเกิดแก๊สออกซิเจนอยู่ตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูง แต่มีข้อเสียคือ เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าเป็นอย่างมาก

### 2.2.7 การดูดซับ

เป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ ข้อดีของการดูดซับคือ มีต้นทุนในการดำเนินการต่ำ เนื่องจากใช้พลังงานน้อย และวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้มีราคาไม่แพง นอกจากนี้ ตัวดูดซับที่ผ่านการใช้งานสามารถล้างและนำกลับมาใช้ในระบบใหม่ได้ (Regenerate)

## 2.3 การดูดซับ (มหาวิทยาลัยเชียงใหม่)

การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะติดบนผิวของตัวดูดซับ (Adsorbent) ซึ่งเป็นของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) การดูดซับมีความสามารถในการกำจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิดเช่น สี กลิ่น BOD COD ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม ให้ประสิทธิภาพที่ดี ระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ต้องการพื้นที่น้อย และไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวน

การดูดซับที่สำคัญมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบคือ การดูดซับทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้พื้นผิวของตัวดูดซับและยึดติดกับพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวโมเลกุลแบบอ่อนๆ เกิดจากการรวมกันของ 2 แรงคือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลที่มีความแข็งแรงน้อยที่สุดในแรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับกับ โมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayers) แต่ละชั้นของ โมเลกุลจะติดอยู่บนชั้น โมเลกุลก่อนหน้า จำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำและมีพลังงานต่ำที่ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล การดูดซับทางกายภาพสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ขึ้นกับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับ หากแรงมีพลังงานต่ำก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ง่ายขึ้น

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับและสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้มีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยาเคมี การดูดซับทางเคมีมักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงเพราะปฏิกิริยาจะเกิดได้อย่างรวดเร็วและจะให้พลังงานสูงที่ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล

สารที่มีความสามารถในการดูดซับอาจแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. ประเภทสารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียว แมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น หากเป็นสารจากธรรมชาติมักมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตร/กรัม หากเป็นสารสังเคราะห์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก ข้อเสียของสารดูดซับประเภทนี้คือ จับโมเลกุลหรือคอลลอยด์ได้เพียงไม่กี่ชนิด
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 600-1,000 ตารางเมตร/กรัม
3. ประเภทสารอนินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออนชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตร/กรัม

2.3.1 กลไกการดูดซับ มี 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลาย เข้าสู่ตัวดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โมเลกุลจะต้องแทรกตัวผ่านของเหลวเหล่านี้เข้าไป
2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลาย แทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของสารดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายติดติดที่ผิวของสารดูดซับ เป็นกระบวนการที่เกิดรวดเร็วมากเมื่อเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจึงไม่มีผลต่อกระบวนการนี้

### 2.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับสารมี 3 ขั้นตอนคือ

การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกส่งไปยังผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆที่ห่อหุ้มสารดูดซับไว้

การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวเข้าไปยังผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับผิวชั้นตอนหนึ่ง

การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับและทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน การขนส่งภายในอนุภาคจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับผิวชั้นตอนหนึ่งในสภาพที่ระบบปั่นป่วนเพียงพอ

### 2.3.3 การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibria)

#### 2.3.3.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 Irving Langmuir ได้เสนอไอโซเทอมโดยมีสมมติฐานว่า 1) ใช้ในการดูดซับแบบชั้นเดียว 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนและตำแหน่งที่ถูกดูดซับที่แน่นอน 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะสามารถดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งมีค่าพลังงานความร้อนที่คงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน จากการศึกษาสามารถสรุปความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q_e = Q^{\circ} b C_e / (1 + b C_e) \quad \dots(2.4)$$

เมื่อ  $q_e$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (mg/g)

$Q^{\circ}$  คือ ปริมาณของตัวถูกละลายอิ่มตัวเมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (mg/l)

$C_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่สภาวะสมดุล (mg/l)

$b$  คือ ค่าคงที่แลงเมียร์ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ

$$\text{หรือ } C_e/q_e = 1/bQ^{\circ} + C_e/Q^{\circ} \quad \dots(2.5)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง มีจุดตัดแกน  $C_e/q_e$  เป็น

$1/bQ^{\circ}$  และมีความชันเท่ากับ  $1/Q^{\circ}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich)

ในปี ค.ศ.1880-1941 นักฟิสิกส์-เคมีชาวเยอรมัน Herbert Max Finlay Freundlich ได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณของสารที่ถูกดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายดังต่อไปนี้

$$q_e = X/m = kfCe^{1/n} \quad \dots(2.6)$$

เมื่อ  $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือหลังการดูดซับที่จุดสมดุล (mg/l)  
 $X/m$  คือ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ (mg/g)  
 $kf$  และ  $n$  คือ ค่าคงที่ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากสมการที่ 2.6 เมื่อนำมาใส่ลอการิทึม (logarithm) จะได้สมการ

$$\log q_e = \log X/m = \log kf + (1/n) \log C_e \quad \dots(2.7)$$

เมื่อพลอตกราฟระหว่าง  $\log X/m$  กับ  $\log C_e$  ที่อุณหภูมิต่างๆ จะได้กราฟเส้นตรง จุดตัดแกนสามารถนำมาหาค่า  $kf$  ได้ ความชันของกราฟเป็น  $1/n$

### 2.3.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

#### 1. ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดซับของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับไม่มีรูพรุน อัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ ส่วนสารดูดซับที่มีรูพรุนจะมีอัตราการเคลื่อนเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนซึ่งถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film Transport ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ แต่หากเป็นการเคลื่อนที่ภายในอนุภาค อัตราการดูดซับจะแปรผกผันกับเส้นผ่าศูนย์กลางของสารดูดซับ

#### 2. ลักษณะของสารที่ถูกดูดซับ (Nature of Adsorbate)

คุณสมบัติการละลายน้ำได้ของตัวถูกละลายเป็นสิ่งสำคัญต่อการดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายลดลง นั่นคือ ตัวถูกละลายถูกแยกออกจากตัวทำละลายได้มาก นอกจากนี้ขนาดโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่อการดูดซับ โดยแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

#### 3. ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (Pore Diffusion) ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนน้อย ชั้นฟิล์มซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลที่จะเข้าไปหาตัวดูดซับ ในทางตรงกันข้ามหากน้ำมีความปั่นป่วนสูง ความหนาของชั้นฟิล์มจะมีความหนาน้อยทำให้โมเลกุลเคลื่อนเข้าหาสารดูดซับได้เร็วขึ้น

#### 4. เวลาสัมผัส (Contact Time)

ระยะเวลาสัมผัสจะต้องเหมาะสมต่อการดูดซับเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้จะขึ้นกับตัวดูดซับและตัวที่ถูกดูดซับ ระยะเวลาสัมผัสนี้จะต้องทำการทดลองในห้องปฏิบัติการก่อนที่จะนำไปใช้จริง

#### 5. ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่ง เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวของตัวดูดซับได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสาร ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

#### 6. อุณหภูมิ (Temperature)

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) เมื่ออุณหภูมิลดลงจะทำให้ความสามารถในการดูดซับนั้นเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง

### 2.4 อุตสาหกรรมชุบโลหะ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

การชุบผิวโลหะด้วยไฟฟ้า หมายถึง การนำเอาชิ้นงานหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้มาเคลือบผิวด้วยโลหะโดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งมีหลักการง่ายๆคือ นำชิ้นงานที่จะชุบมาต่อกับขั้วลบของแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ส่วนโลหะที่ใช้เคลือบผิวจะต่อกับขั้วบวกซึ่งเรียกว่า ตัวล่อ จากนั้นนำชิ้นงานและตัวล่อมาจุ่มลงในน้ำยาชุบแล้วปรับกระแสไฟฟ้าและแรงเคลื่อนให้เหมาะสม ไอออนของโลหะที่ใช้เคลือบจะเคลื่อนที่ไปเคลือบบนผิวชิ้นงาน ขั้นตอนหลักในการชุบโลหะมี 4 ขั้นตอนได้แก่

#### 2.4.1 ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานเป็นขั้นตอนการทำให้ผิวชิ้นงานเรียบและเป็นการทำความสะอาดผิวเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมเช่น ไขมัน น้ำมัน ออกไซด์ต่างๆ เป็นต้น ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานมีดังนี้

##### 1. ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมผิวชิ้นงาน ชิ้นงานก่อนที่จะนำมาทำการชุบจะมีผิวหยาบ ขรุขระ มีรอยขีดข่วนหรือเป็นสนิม การขัดจนผิวหน้าของชิ้นงานเรียบจะทำให้คุณภาพชิ้นงานหลังการชุบดี มีความเรียบสม่ำเสมอ การเกาะติดของโลหะจะแน่น เครื่องมือในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยงานขัดหมุนด้วยไฟฟ้า ล้อขัด สายพานขัด และกระดาษทราย ในขั้นตอนนี้จะเกิดฝุ่นละอองเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงต้องมีพัดลมสำหรับเป่าไล่ฝุ่น และพัดลมดูดอากาศที่มีการนำไปใช้

## 2. ขั้นตอนการล้างไขมันด้วยด่าง

ขั้นตอนนี้เป็นการทำความสะอาดชิ้นงาน โดยวิธีจุ่มหรือสเปรย์ชิ้นงานด้วยด่างเช่น โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซลโฟสเฟต Anionic Surfactant และ Nonionic Surfactant ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-15 นาที ยกเว้นการใช้สเปรย์ด้วย Surfactant จะทำที่อุณหภูมิ 64-74 องศาเซลเซียส

## 3. ขั้นตอนการล้างสนิมด้วยกรด

เป็นขั้นตอนในการกำจัดสนิมและฟิล์มออกไซด์ต่างๆออกจากผิวชิ้นงาน ส่วนใหญ่จะใช้กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริกซึ่งมีความรุนแรงในการกำจัดสนิมสูง ความเข้มข้นของกรดที่ใช้จะแตกต่างกันไปตามประเภทและความสกปรกของชิ้นงาน โดยทั่วไปใช้ความเข้มข้น 5-15%

### 2.4.2 ขั้นตอนการชุบโลหะ

เป็นขั้นตอนการชุบผิวชิ้นงานด้วยโลหะ โดยการใช้ไฟฟ้า โลหะที่ใช้ชุบผิวนั้นจะขึ้นกับความต้องการของลูกค้าและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ตัวอย่างเช่น นิกเกิล โครเมียม และทองแดง ภายในบ่อชุบโลหะจะประกอบด้วยขั้วแอโนด (ขั้วลบ) และขั้วแคโทด (ขั้วบวก) และสารเคมีต่างๆ

#### 1. ขั้นตอนการชุบนิกเกิล

การชุบนิกเกิลมีอยู่หลายแบบด้วยกันคือ นิกเกิลเงา นิกเกิลดำ นิกเกิลกึ่งเงา ซาตินนิกเกิล และนิกเกิลดำ ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้ระยะเวลาที่นานที่สุดคือ 20 นาทีถึง 1 ชั่วโมง โดยที่สภาวะมาตรฐานจะใช้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 45-65 องศาเซลเซียส ค่า pH อยู่ที่ 3.5-4.5 สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนนี้ประกอบด้วยโลหะนิกเกิล สารละลายนิกเกิลคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 40-60 กรัมต่อลิตร สารละลายนิกเกิลซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 250-300 กรัมต่อลิตร สารละลายกรดบอริกที่มีความเข้มข้น 35-45 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำยาพื้น น้ำยาเงา และน้ำกลั่น ในการปฏิบัติจริงโรงงานจะใช้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 31-65 องศาเซลเซียส ค่า pH อยู่ที่ 3.5-5.6 สารละลายนิกเกิลคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 18-75 กรัมต่อลิตร สารละลายนิกเกิลซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 250-345 กรัมต่อลิตร

#### 2. ขั้นตอนการชุบโครเมียม

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาในการทำสั้นที่สุดคือ 10-20 วินาที โดยที่สภาวะมาตรฐานจะใช้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 40-50 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วยสารละลายกรดโครมิก ความเข้มข้น 126-250 กรัมต่อลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริก 2.5 กรัมต่อลิตร ในขั้นตอนนี้จะมีความเข้มข้นของ Chromium hexavalent ion อยู่ในช่วง 126-190 กรัมต่อลิตร

### 3. ขั้นตอนการชุบฮาร์ดโครม

มีหลักการคล้ายกับการชุบโครเมียม แต่จะมีชั้นของโครเมียมหนาตั้งแต่ 25 ไมโครเมตร หรือ 0.025 มิลลิเมตรขึ้นไป ผิวของชิ้นงานที่ทำการชุบจะมีความแข็งแรง ทนต่อความร้อน การเสียดสี ทนต่อปฏิกิริยาเคมี และมีความผิวดำ โดยที่สภาวะมาตรฐานจะใช้อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 50-52 องศาเซลเซียส และมีความเข้มข้นของกรดโครมิก 250 กรัมต่อลิตร มีความเข้มข้นของ Chromium hexavalent ion อยู่ในช่วง 176-260 กรัมต่อลิตร

### 4. ขั้นตอนการชุบทองแดง

การชุบทองแดงมีวัตถุประสงค์เพื่อเคลือบผิวชิ้นแรกของโลหะเดิมก่อนที่จะนำไปชุบโลหะอื่นๆ การชุบทองแดงสามารถแบ่งได้ตามสภาพน้ำยาชุบ ได้แก่

การชุบทองแดงแบบค้าง อุณหภูมิที่ใช้ในการชุบจะอยู่ระหว่าง 41-60 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนนี้ประกอบด้วย คอปเปอร์ไซยาไนด์ 15 กรัมต่อลิตร โซเดียมไซยาไนด์ 23 กรัมต่อลิตรหรือโพแทสเซียมไซยาไนด์ โซเดียมคาร์บอเนต 15 กรัมต่อลิตร

การชุบทองแดงแบบกรด มีอุณหภูมิในการชุบที่ 25 องศาเซลเซียส สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วยคอปเปอร์ซัลเฟต 188 กรัมต่อลิตร กรดซัลฟิวริก 75 กรัมต่อลิตร และน้ำยาเงา

#### 2.4.3 ขั้นตอนการล้าง

เป็นการใช้น้ำสะอาดในการล้างวัตถุชุบ การล้างมีอยู่ 2 แบบคือ การจุ่มล้างและการตัดกรด ขั้นตอนการล้างนี้มีอยู่ในทุกส่วนของขั้นตอนการชุบ ได้แก่

- การล้างหลังจากการขัด
- การล้างหลังจากการล้างไขมันด้วยด่าง
- การล้างหลังจากการกำจัดสนิมด้วยกรด
- การล้างหลังจากการชุบนิกเกิล
- การล้างหลังจากการชุบโครเมียม

#### 2.4.4 ขั้นตอนการอบแห้ง

นำชิ้นงานไปอบแห้ง เตาอบงานมีหลายแบบ ได้แก่ แบบใช้ลมร้อน โดยใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง แบบใช้ความร้อนโดยใช้พลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม โรงงานขนาดเล็กบางแห่งใช้การผึ่งแดดเพื่อทำให้ชิ้นงานแห้ง

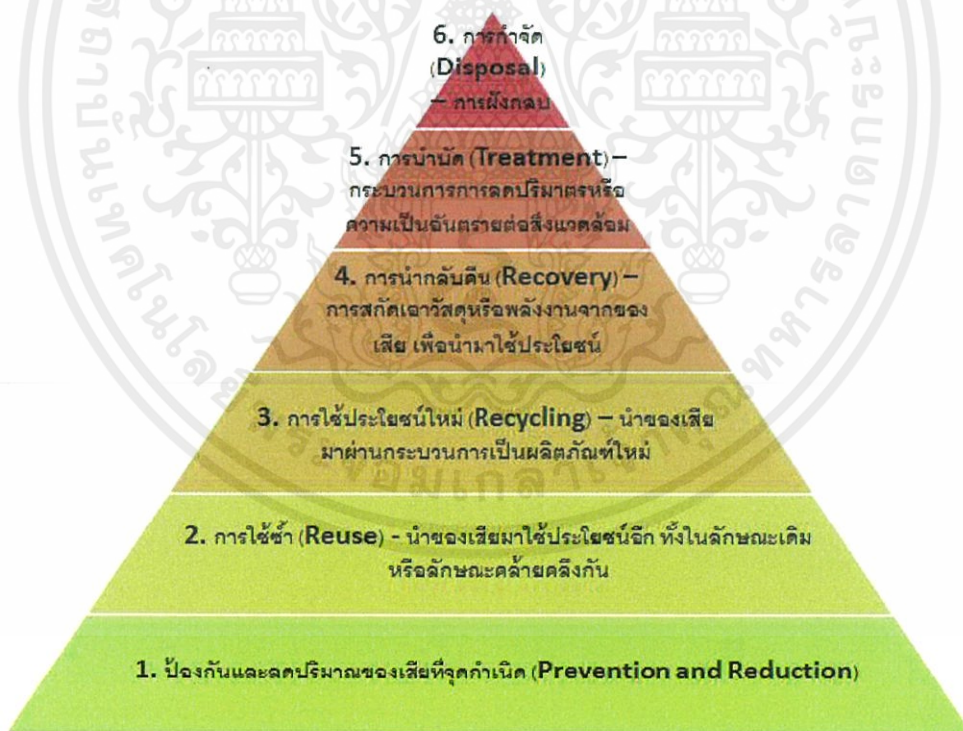
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ของเสียอันตราย (จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

ของเสียอันตรายหรือขยะอันตราย (Hazardous Waste) หมายถึง เศษสิ่งของที่ไม่ใช้แล้ว หรือเสื่อมสภาพ รวมถึงภาชนะบรรจุภัณฑ์ต่างๆ ที่ปนเปื้อนสารอันตราย ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการจัดการของเสียอันตราย มี 3 กลุ่มใหญ่ คือผู้ก่อกำเนิด (Waste Generator) ผู้ขนส่ง (Waste Transporter) ผู้รับบำบัดกำจัด (Waste Processor) ซึ่งแต่ละกลุ่มมีหน้าที่ความรับผิดชอบเพื่อให้การดำเนินการจัดการของเสียอันตรายเป็นไปอย่างถูกต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย ความปลอดภัยของประชาชน และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ลักษณะของของเสียอันตรายโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1. ความไวในการติดไฟ (Ignitibility)
2. การเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย (Reactivity)
3. การกัดกร่อน (Corrosivity)
4. ความเป็นพิษ (Toxicity)
5. การถูกชะล้างได้ (Leachability)
6. การทำให้เกิดโรค (Pathogenicity)



รูปที่ 2.1 การจัดการของเสียอันตราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(กรมควบคุมมลพิษ) การจัดการของเสียอันตรายเริ่มจากการใช้หลักการ 3Rs ได้แก่ Reduce, Reuse และ Recycle โดยให้ความสำคัญต่อการป้องกันและลดปริมาณกาก ณ จุดกำเนิด ซึ่งผู้ก่อกำเนิดสามารถดำเนินการได้โดยอาศัยการวิเคราะห์จุดกำเนิด ปริมาณ และความเป็นอันตรายของกาก เพื่อหามาตรการรวมถึงการลดความเป็นอันตรายด้วย

นอกจากการลดหรือการใช้ประโยชน์จากของเสียอันตรายแล้ว การกำจัดของเสียอันตรายก็เป็นสิ่งที่จะต้องดำเนินการด้วย คือ การเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง (Incineration) เป็นการทำลายเชื้อโรคและสารพิษในของเสียอันตรายโดยใช้เตาเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,000-1,200 องศาเซลเซียส โดยมีการติดตั้งระบบควบคุมคุณภาพอากาศให้ได้ตามมาตรฐาน วิธีนี้สามารถลดปริมาณของเสียที่จะต้องนำไปฝังกลบได้กว่าร้อยละ 90 แต่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง และการฝังกลบแบบปลอดภัย (Secured Landfill) เป็นกระบวนการกำจัดขั้นสุดท้าย โดยนำของเสียอันตรายที่ผ่านการปรับเสถียรแล้ว รวมถึงเถ้าที่เหลือจากการเผาไหม้ของเสียอันตราย ไปฝังในหลุมฝังกลบที่มีการออกแบบเป็นพิเศษ เช่น มีวัสดุกันซึม 2 ชั้น (Double liners) มีการติดตั้งบ่อสังเกตการณ์เพื่อติดตามตรวจสอบการรั่วไหลของสารพิษ เป็นต้น

## 2.6 เถ้าลอย (Fly ash) (ชุติมา เสพชัยธรรม, 2543)

เถ้าลอยเป็นของเสียที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินเพื่อเป็นเชื้อเพลิงสำหรับต้มน้ำในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า, โรงงานผลิตกระดาษ และโรงงานอื่นๆที่ต้องการไอน้ำในกระบวนการผลิต โครงสร้างของเถ้าลอยสามารถแบ่งออกเป็นโครงสร้างอินทรีย์ (Organic structure) และอนินทรีย์ (Inorganic compound หรือ Mineral matter) ในโครงสร้างอินทรีย์ของเถ้ามีคาร์บอนประมาณ 70-79 ส่วน ไฮโดรเจน 3-5 ส่วน ออกซิเจน 1-2 ส่วน กำมะถันและไนโตรเจน 1-2 ส่วน โครงสร้างอนินทรีย์จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนั้นยังมีลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม ไทटेเนียม โซเดียม และโพแทสเซียมอีกด้วย

เมื่อนำถ่านหินลิกไนต์บดเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ในที่ที่มีอากาศเพียงพอ จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผา (800-1,200 องศาเซลเซียส) จะช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเปลี่ยนแปลงสภาพแร่ในรูปออกไซด์ของโลหะหลายชนิด เถ้าลิกไนต์ที่เหลือจากการเผาไหม้ประกอบด้วย

1. เถ้าหนัก (Bottom ash หรือ wet ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาป อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนให้ตกลงสู่กันเตาและหลอมติดกันเป็นก้อนขนาดใหญ่เรียกว่า Slag

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เถ้าลอย (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash หรือ Dry ash) ได้จากการเผาถ่านหินจนมีลักษณะเป็นควันละเอียดลอยอยู่ในบรรยากาศ สามารถดักจับได้ด้วยเครื่องดักจับที่ทำงานด้วยหลักการไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitator) เถ้าที่ถูกดักจับได้จะมีขนาดเล็กและเบา

### 2.6.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าที่ได้จากการเผาไหม้ใหม่ใหม่จะมีสีส้มแดง เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาอมแดง เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น มีลักษณะละเอียด จากการวิเคราะห์เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยาย 100 เท่าพบว่า รูปร่างของเถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลมและมีขนาดตั้งแต่ 0.03-0.42 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.23-2.48

### 2.6.2 สมบัติทางเคมีของเถ้าลอย

ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าลอยนั้น เป็นการยากมากที่จะแบ่งชนิดของธาตุต่างๆ โดยวิธีทางกายภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาธาตุโดยอาศัยวิธีทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ จากการวิจัยของ วราภรณ์ คุณาวนากิจ โดยวิธี X-ray Fluorescence Spectroscopy สรุปได้ว่าเถ้าลอยมีองค์ประกอบดังนี้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนท์

องค์ประกอบ	% by weight
SiO <sub>2</sub>	40.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.00
CaO	11.20
MgO	3.10
SO <sub>3</sub>	2.80
Na <sub>2</sub> O	2.60
K <sub>2</sub> O	1.00
Loss on ignition	0.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.6.3 การดูดซับบนเถ้าลอย

การดูดซับบนเถ้าลอยมี 2 แบบคือ การดูดซับทางกายภาพ ซึ่งเกิดบริเวณพื้นผิวและภายในรูพรุนการดูดซับอีกแบบเป็นการดูดซับทางเคมี บนพื้นผิวของเถ้าลอยจะมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลในรูปของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  พื้นผิวของซิลิกามีความดึงดูดต่อไอออนของโลหะหนัก ไอออนกลางของซิลิเกต ( $\text{Si}^{4+}$ ) มีความดึงดูดต่ออิเล็กตรอนสูง อะตอมออกซิเจนที่ทำพันธะกับซิลิกอนมีความเป็นเบสต่ำ จึงทำให้พื้นผิวของซิลิกาเป็นกรดอ่อน อะตอมออกซิเจนบนพื้นผิวซิลิกาเป็นอิสระในการทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดรูปแบบของซิลานอล ( $\text{SiOH}$ ) ความเป็นกรดของหมู่ซิลานอลขึ้นกับประจุบนพื้นผิวของซิลิกา พื้นผิวของซิลิกามีประจุเป็นบวกที่พีเอชต่ำๆ และเป็นประจุลบที่พีเอชสูงๆ อะลูมินาและเหล็กก็มีประจุในแนวโน้มนี้อีกด้วย ที่พีเอชมากกว่า 6.9 บนพื้นผิวของเถ้าลอยจะมีประจุเป็นลบ สมการที่ 2.8 และ 2.9 แสดงกลไกการดูดซับโลหะหนักทางเคมีของเถ้าลอย



### 2.6.4 ประโยชน์ของเถ้าลอย

การนำเถ้าลอยมาใช้ประโยชน์นั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ คุณภาพทางกายภาพและเคมีของเถ้าลอย ในยุคของการใช้งานแรกๆ นั้นจะมีการคัดเลือกเถ้าลอยตามคุณสมบัติที่เข้าเกณฑ์มาตรฐาน ASTM C 618 สำหรับปัจจุบันสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้กำหนดมาตรฐาน มอก.2135-2545 เป็นมาตรฐานของประเทศไทย ในปัจจุบันเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะถือได้ว่ามีคุณภาพสูงและเป็นที่ยอมรับมากที่สุดในประเทศไทย การใช้งานในปัจจุบันมี (ข้างหุ่นส่วนจำกัด แกรนด์ไมเทส บริษัทลีสท์ลิงส์ จำกัด) ดังต่อไปนี้

- เป็นส่วนผสมในคอนกรีต (Concrete Additive)
- นำมาทำบล็อคอนกรีต
- เป็นวัสดุน้ำหนักเบา (Light Weight Aggregate)
- เป็นส่วนผสมเพื่อทำพื้นทางหรือรองพื้นทาง
- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 ความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) (สถาบันวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์)

ความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) หมายถึง ปริมาณของประจุบวกของธาตุต่างๆ ซึ่งอยู่ในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ โดยคิดเทียบจากน้ำหนักของสาร 100 กรัม หน่วยของค่า CEC คือ มิลลิกรัมสมมูลต่อสาร 100 กรัม (meq/100g) หรือเซนติโมลต่อน้ำหนักของสาร 1 กิโลกรัม (cmol/kg)

ประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้จำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ พวกที่มีฤทธิ์เป็นเบส (The basic cation or exchangeable bases) เช่น  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{Mg}^{2+}$   $\text{K}^+$   $\text{Na}^+$  และพวกที่มีฤทธิ์เป็นกรด (The acidic cations) เช่น  $\text{H}^+$  ,  $\text{Al}^{3+}$

การหาค่า CEC จำแนกได้เป็น 4 ประเภทคือ

### 1. Summation method

ประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ถูกแทนที่ด้วยสารละลายเกลืออิมิตัว ค่า CEC หาได้จากผลรวมของประจุบวกที่มีทั้งหมดในสารละลายที่ใช้ชะล้าง (Leachate) โดยวิเคราะห์ประจุบวกทุกชนิดและนำมารวมกัน

### 2. Direct displacement method

ทำให้อนุภาคเกิดการแลกเปลี่ยนจนอิมิตัว แยกเอาอนุภาคมาทำการแทนที่โดยตรงด้วยสารละลายเกลือชนิดอื่น เมื่อทำการสกัดจะได้ประจุบวกที่อิมิตัว ค่า CEC หาได้จากผลต่างของประจุบวกที่ใช้ก่อนและหลังการสกัด

### 3. Displacement after washing method

ทำให้ดินอิมิตัวด้วยประจุบวกที่เป็นดัดชนี ทำการล้างดินให้ปราศจากเกลือที่อิมิตัว ประจุบวกจะถูกแทนที่และทำการวิเคราะห์หาปริมาณ

### 4. Radio-active tracer method

เมื่อทำให้อนุภาคอิมิตัวด้วยประจุบวก นำสารละลายมาเจือจางและ Label ด้วยไอโซโทป ซึ่งเป็นสารกัมมันตรังสีของประจุบวกที่อิมิตัว ความเข้มข้นของประจุบวกที่เป็นดัดชนีในสารละลายสามารถหาได้จากการวัดปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาจากสารละลาย

## ปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกความเข้มข้นของไอออนที่แลกเปลี่ยน หากมีปริมาณมากจะทำให้เกิดการไล่ประจุที่มีอยู่เดิมออก ค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ มาสู่สารละลายได้ดีกว่ากรณีที่มีปริมาณน้อย ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จำนวนของประจุ ประจุบวกหนึ่งมีความสามารถในการเกิดพันธะกับบริเวณที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ต่ำกว่าประจุบวกสอง ประจุบวกสาม ตามลำดับ

3. ขนาดของไอออน ไอออนที่มีขนาดของรัศมี (Ionic radius) ต่ำจะสามารถเกิดพันธะได้แข็งแรงกว่าไอออนที่มีขนาดรัศมีใหญ่กว่า

4. ปริมาณการอิ่มตัว (Degree of saturation) ปริมาณการอิ่มตัวของประจุบวกบางชนิดบนผิวอนุภาคมีอิทธิพลต่อความยากง่ายที่ประจุบวกนั้นจะถูกไล่ที่ออกมาเช่น เมื่อ  $\text{Ca}^{2+}$  ถูกดูดซับอยู่น้อยเท่าไร ความยากที่จะไล่  $\text{Ca}^{2+}$  ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งต่างจาก  $\text{Na}^+$  ถ้ามี  $\text{Na}^+$  ถูกดูดซับอยู่น้อยเท่าไร ความยากที่จะไล่  $\text{Na}^+$  ยิ่งน้อยลงเท่านั้น ส่วนประจุบวกบางชนิดเช่น  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  ความยากง่ายในการไล่ที่จะไม่ขึ้นกับปริมาณการอิ่มตัว

5. ประจุบวกอื่นๆที่อยู่ร่วมกันบนผิวอนุภาค (Complementary exchangeable cations) ประจุบวกที่อยู่บนผิวอนุภาคร่วมกับประจุบวกที่ต้องการไล่ อาจมีผลต่อการไล่ที่เช่น ถ้า  $\text{K}^+$  อยู่ร่วมกับ  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$  จะส่งผลให้  $\text{K}^+$  ถูกไล่ที่ได้ง่าย แต่ถ้า  $\text{K}^+$  อยู่ร่วมกับ  $\text{Ca}^{2+}$   $\text{K}^+$  จะถูกไล่ที่ได้ยาก

อำนาจการไล่ที่ (Replacement power) คือ  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{H}^+$  >  $\text{NH}_4^+$  >  $\text{Ca}^{2+}$  >  $\text{Mg}^{2+}$  >  $\text{K}^+$  >  $\text{Na}^+$  >  $\text{Li}^+$

ในการวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีแอมโมเนียมอะซิเตด โดยใช้แอมโมเนียมอะซิเตด 1 นอร์มัล พีเอช 7 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทำให้อิ่มตัวและการชะ (Saturation and leaching step) เป็นการทำให้อนุภาคอิ่มตัวด้วย  $\text{NH}_4^+$  โดยการแช่อนุภาคด้วย  $\text{NH}_4\text{OAc}$  เพื่อให้  $\text{NH}_4^+$  เข้าไปแทนที่ประจุบวกในอนุภาค ทำการปั่นเหวี่ยง ทิ้งสารละลาย และใส่  $\text{NH}_4\text{OAc}$  จนกว่าอนุภาคจะอิ่มตัวเต็มที่

ขั้นตอนที่ 2 การล้าง (Washing) เป็นการล้างอนุภาคด้วย Ethanol 95% เพื่อไล่  $\text{NH}_4^+$  ส่วนเกินออกให้หมด

ขั้นตอนที่ 3 การแทนที่ (Replacing step) ใช้ Acidified NaCl เพื่อให้  $\text{Na}^+$  เข้าไปแทนที่  $\text{NH}_4^+$

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ (Analyzing step) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณ  $\text{NH}_4^+$  ที่ถูกไล่ที่ออกมาโดยการกลั่นดักจับแอมโมเนียด้วยกรดบอริก จะได้เกลือแอมโมเนียมบอเรต ทำการไทเทรตหาปริมาณโดยใช้กรดซัลฟิวริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ระดับความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก

ระดับ	CEC (cmol/kg)
ต่ำมาก	<3.0
ต่ำ	3.0-5.0
ค่อนข้างต่ำ	5.0-10.0
ปานกลาง	10.0-15.0
ค่อนข้างสูง	15.0-20.0
สูง	20.0-30.0
สูงมาก	>30.0

## 2.8 การเก็บตัวอย่างน้ำและการเก็บรักษาสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2553)

การเก็บตัวอย่างน้ำเป็นกิจกรรมหนึ่งของการติดตามตรวจสอบและการจัดการคุณภาพน้ำ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แสดงถึงสถานภาพของมลพิษของแหล่งน้ำ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการจัดลำดับความสำคัญของพื้นที่ที่ต้องได้รับการแก้ไข การเก็บน้ำที่ถูกต้องจะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ได้ข้อมูลที่มีคุณภาพ ถูกต้อง แม่นยำ เป็นที่ยอมรับ สามารถนำไปใช้ประกอบการวางแผนจัดการคุณภาพน้ำ และการตัดสินใจดำเนินการป้องกัน แก้ไขปัญหามลพิษทางน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเก็บตัวอย่างน้ำแบ่งออกเป็น 2 วิธีได้แก่

### 1. การเก็บตัวอย่างแบบจ้วง (Grab sampling)

เป็นการเก็บตัวอย่างครั้งเดียว ที่จุดเดียว ในเวลาใดเวลาหนึ่งแล้วนำมาวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์จะเป็นตัวแทนของจุดที่เก็บตัวอย่างในเวลาทีเก็บตัวอย่างเท่านั้น การเก็บตัวอย่างด้วยวิธีนี้จะทำให้เห็นความผันแปรของคุณภาพน้ำในจุดต่างๆ ได้อย่างชัดเจน การเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับบริเวณที่น้ำไหลให้เก็บที่กึ่งกลางความกว้างและความลึกของลำน้ำ ส่วนในน้ำนิ่งให้เก็บกึ่งกลางความลึกของจุดเก็บน้ำนั้นๆ

### 2. การเก็บตัวอย่างแบบผสมรวม (Composite sampling)

เป็นการเก็บตัวอย่าง ณ จุดเดียวกัน แต่ต่างเวลากัน แล้วนำมาผสมรวมกัน การเก็บตัวอย่างน้ำแบบนี้จะทำให้ทราบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำในกรณีที่แหล่งน้ำนั้นมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา หรือเป็นการเก็บตัวอย่าง ณ เวลาเดียวกัน แต่หลายจุด แล้วนำมาผสมรวมกัน ซึ่งใช้ในกรณีที่แหล่งน้ำมีความแตกต่างกันในแนวหน้าตัดทั้งความยาวและความลึกของแหล่งน้ำ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บตัวอย่างจะประกอบด้วยเครื่องมือเก็บตัวอย่างน้ำ เชือกสำหรับผูกติดเครื่องมือเก็บตัวอย่างน้ำในกรณีเก็บในบริเวณน้ำลึก กรวยหรือกระบอกสำหรับใช้กรอกตัวอย่างน้ำจากเครื่องมือเก็บตัวอย่างน้ำลงขวดภาชนะบรรจุ โดยภาชนะที่ใช้บรรจุตัวอย่างน้ำสำหรับการวิเคราะห์โลหะหนักนั้นจะใช้ขวดพลาสติก HDPE หรือแก้วที่กลั้วด้วยกรดไนตริก โดยก่อนทำการเก็บตัวอย่างจะต้องกลั้วภาชนะบรรจุด้วยตัวอย่างน้ำ 2-3 ครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีสารแปลกปลอมอื่นๆปนเปื้อนอยู่ในภาชนะ ในระหว่างเก็บตัวอย่างจะต้องใส่ถุงมือเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก

#### การเก็บรักษาตัวอย่างน้ำ

1. ตรวจวัดค่าพีเอชและอุณหภูมิทันทีหลังจากเก็บตัวอย่าง

2. รักษาสภาพตัวอย่างน้ำ (Preservation) เพื่อไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของตัวอย่างน้ำในระหว่างที่ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์ สำหรับการรักษาสภาพของตัวอย่างน้ำที่จะนำไปทำการวิเคราะห์โลหะหนักทำได้โดยการเติมกรดไนตริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตรต่อตัวอย่างน้ำ 1 ลิตร เพื่อปรับค่าพีเอชให้มีค่าต่ำกว่า 2 หลังจากนั้นให้ปิดฝาให้สนิทแล้วพลิกขวดไปมาประมาณ 10 ครั้ง เพื่อให้สารละลายผสมกัน นำตัวอย่างน้ำไปเก็บที่อุณหภูมิห้องหรือแช่ในอุณหภูมิ 2-6 องศาเซลเซียส ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างน้ำได้คือ 6 เดือน

### 2.9 Electronegativity (EN) (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

Electronegativity (EN) หมายถึง ค่าที่แสดงความสามารถในการดึงดูดอิเล็กตรอนคู่ที่เกิดพันธะที่จะรวมกันเป็นโมเลกุล ธาตุที่มีค่า Electronegativity สูงจะมีความสามารถในการดึงดูดหรือรับอิเล็กตรอนได้ดี ซึ่งได้แก่ ธาตุอโลหะ ส่วนธาตุที่มีค่า Electronegativity ต่ำจะมีความสามารถในการดึงดูดหรือรับอิเล็กตรอนได้ไม่ดี ซึ่งได้แก่ ธาตุโลหะเช่น โมเลกุลของ HCl เนื่องจากคลอรีนมีค่า Electronegativity ที่สูงกว่าไฮโดรเจนดังนั้นคลอรีนจึงดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

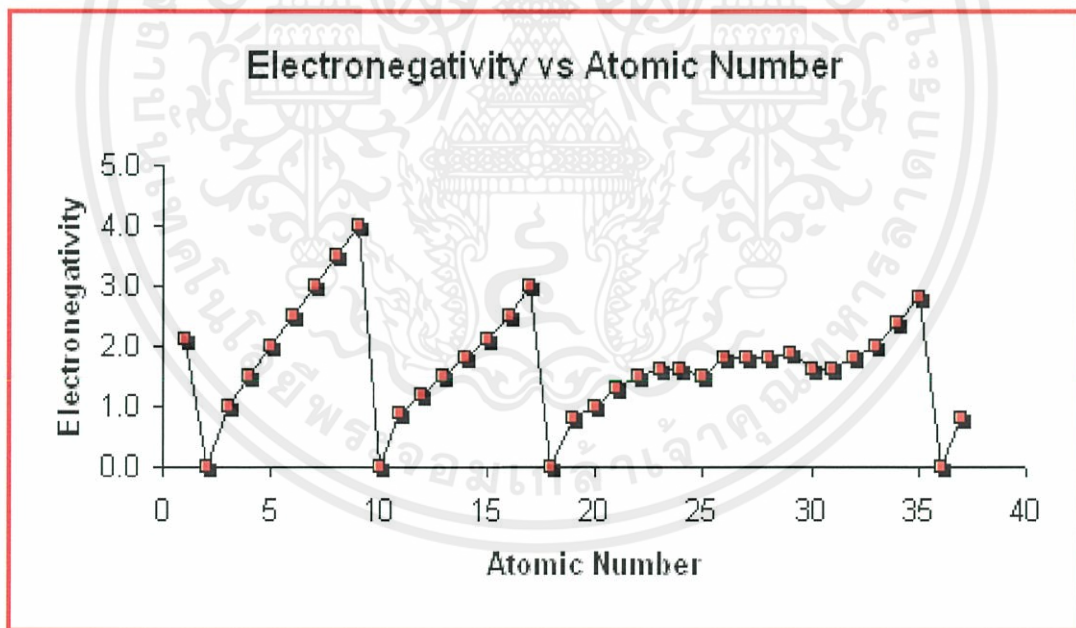
**CHEMIX - PERIODIC TABLE**

Graphics Close

Atomic number     First ionization potential V     Electron configuration  
 Name     Specific heat capacity  $Jg^{-1}K^{-1}$      Oxidation states  
 Relative atomic mass u     Electrical conductivity  $\times 10^6 \Omega m^{-1} cm^{-1}$      Phase  $20^\circ C$   
 Melting point  $^\circ C$      Thermal conductivity  $Wcm^{-1}K^{-1}$      Crystal structure  $18/MIII4$   
 Boiling point  $^\circ C$      Electronegativity Pauling  
 Density  $g/cm^3$      Heat of fusion  $kJ/mol$     13/IIIA 14/IVA 15/VA 16/ VIA 17/VIIA He  
 Covalent radius  $\times 10^{-10} m$      Heat of vaporization  $kJ/mol$     2.040 2.550 3.040 3.440 3.980  
 Atomic radius  $\times 10^{-10} m$      Acid-base properties    B C N O F Ne  
 Atomic volume  $cm^3/mol$      Number of stable isotopes    1.610 1.900 2.190 2.580 3.160

H	2/IIA																	He					
0.980	1.570																						
Li	Be	B	C	N	O	F	Ne																
0.930	1.310	1.610	1.900	2.190	2.580	3.160																	
Na	Mg	3/IIIB	4/IVB	5/VB	6/VIB	7/VIIB	8/III	9/IIII	10/VIII	11/IB	12/IIIB	Al	Si	P	S	Cl	Ar						
0.820	1.000	1.360	1.540	1.630	1.660	1.550	1.830	1.880	1.910	1.900	1.650	1.810	2.010	2.180	2.550	2.960							
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
0.820	0.950	1.220	1.330	1.600	2.160	1.900	2.200	2.280	2.200	1.930	1.690	1.780	1.960	2.050	2.100	2.660							
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
0.790	0.890	1.100	1.300	1.500	2.360	1.900	2.200	2.280	2.540	2.000	2.040	2.300	2.020	2.000	2.200								
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						
0.700	0.900	1.100																					
Fr	Ra	Ac	1.120	1.130	1.140	1.130	1.170	1.200	1.200	1.200	1.220	1.230	1.240	1.250	1.110	1.270							
Lanthanides ->			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
Actinides ->			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr							

รูปที่ 2.2 ค่า EN ตามตารางธาตุ



รูปที่ 2.3 กราฟแนวโน้มของค่า EN ตามหมู่และคาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### แนวโน้มค่า Electronegativity ตามคาบ

ปัจจัยที่มีผลคือเลขอะตอมหรือประจุบวกในนิวเคลียส ธาตุที่มีประจุบวกในนิวเคลียสมากจะมีค่า EN สูง ดังนั้นธาตุที่อยู่คาบเดียวกันจะมีค่า EN เพิ่มขึ้นจากซ้ายไปขวา เพราะประจุบวกที่นิวเคลียสจะส่งแรงดึงดูดกระทำต่ออิเล็กตรอนได้มาก

### แนวโน้มค่า Electronegativity ตามหมู่

ปัจจัยที่มีผลคือขนาดอะตอมซึ่งเป็นผลมาจากจำนวนระดับพลังงาน ธาตุที่มีจำนวนระดับพลังงานน้อย หรือขนาดอะตอมเล็ก จะมีค่า EN สูงกว่าธาตุที่ขนาดอะตอมใหญ่ในหมู่เดียวกัน เพราะอะตอมที่มีขนาดใหญ่ นิวเคลียสจะส่งแรงดึงดูดออกไปที่เวเลนซ์อิเล็กตรอนได้น้อย ดังนั้นธาตุที่อยู่ในหมู่เดียวกันจะมีค่า EN ลดลงจากบนลงล่าง

## 2.10 Atomic Absorption Spectrometer, AAS (ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์)

เทคนิค Atomic Absorption Spectrometer เป็นเทคนิควิเคราะห์ธาตุเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง มีความไว และมีความจำเพาะ หลักการของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer เป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมเสรีของธาตุดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะต่อชนิดของธาตุ เนื่องจากธาตุต่างๆมีระดับพลังงานที่แตกต่างกัน จึงทำให้มีการดูดกลืนแสงที่ต่างกัน เช่น อะตอมของนิกเกิลจะดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 232.0 นาโนเมตร แสงที่มีความยาวคลื่นนี้เป็นแสงที่มีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของนิกเกิลอะตอมเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปเป็นสถานะกระตุ้น ในการทำให้อะตอมของธาตุเกิดเป็นอะตอมเสรีได้นั้น ต้องมีการดูดกลืนพลังงานต่างๆเข้าไป เช่น พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น พลังงานเหล่านี้จะทำให้เกิดกระบวนการแตกตัว (Dissociation) หรือเปลี่ยนเป็นไอ (Vaporization) หรืออาจแตกตัวเป็นอะตอม หรือทำให้อะตอมอยู่ในสถานะกระตุ้น หรืออาจกลายเป็นไอออนก็ได้

หลักการวิเคราะห์ของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer มีอยู่ว่า เมื่อสารตัวอย่างที่เป็นของเหลวถูกดูดเข้าไปสู่เปลวไฟ ความร้อนจะทำให้ของเหลวเปลี่ยนสถานะไปเป็นแก๊ส และเกิดโมเลกุลของสารตามลำดับ(MA) เมื่อโมเลกุลได้รับความร้อนที่เหมาะสม โมเลกุลจะแตกตัวออกเป็นอะตอมอิสระ ( $M^0$  และ  $A^0$ ) เมื่อมีการปล่อยพลังงานแสงที่มีความยาวคลื่นจำเพาะต่ออะตอมนั้นๆผ่านอะตอมอิสระจนทำให้อะตอมอิสระเปลี่ยนไปอยู่ในสภาวะกระตุ้น ( $M^*$  และ  $A^*$ ) พลังงานแสงเหล่านี้ก็จะถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วน โดยตรงกับจำนวนอะตอมอิสระ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \log I_0/I = knb = \epsilon bc \quad \dots(2.10)$$

เมื่อ A คือ ค่าการดูดกลืนแสง

$I_0$  คือ ปริมาณแสงที่เข้าไปในตัวอย่าง

I คือ ปริมาณแสงที่เหลือออกจากตัวอย่าง

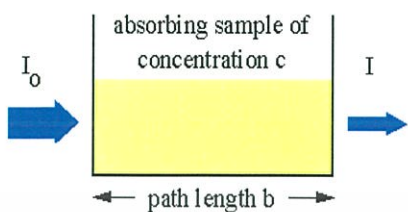
k คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

n คือ จำนวนอะตอมอิสระที่มีพลังงานต่ำ

b คือ ความกว้างของเปลวไฟที่แสงผ่าน (ซม.)

$\epsilon$  คือ Molar extinction coefficient

c คือ ความเข้มข้นในหน่วยโมลต่อลิตร



รูปที่ 2.4 การดูดกลืนแสง

### 2.10.1 เทคนิคต่างๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer

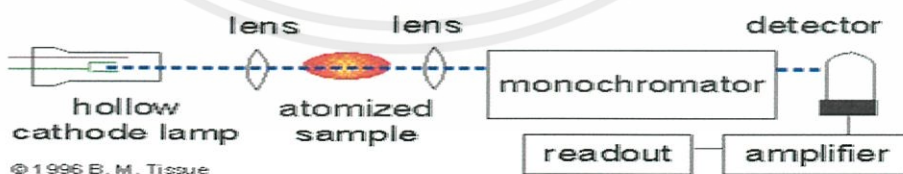
1. Flame Atomization Technique เป็นเทคนิคที่ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยเปลวไฟ

2. Flameless Technique หรือ Non-flame Atomization Technique เป็นเทคนิคที่ใช้กระบวนการทำให้สารตัวอย่างแตกตัวเป็นอะตอมด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า

3. Hydride Generation Technique เนื่องจากธาตุบางชนิดไม่สามารถเปลี่ยนเป็นอะตอมด้วยสองวิธีแรกได้ จึงจำเป็นต้องทำให้ธาตุแตกตัวในบรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจน เพื่อป้องกันการรวมตัวกับออกซิเจนของธาตุเหล่านี้ ดังนั้นจึงใช้วิธีทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนเป็นสารที่กลายเป็นไอได้ง่าย ด้วยการรีดิวซ์ให้เป็นไฮไดรด์ แล้วให้ไฮไดรด์นั้นผ่านเข้าไปในเปลวไฟไฮโดรเจน ธาตุเหล่านี้จึงจะกลายเป็นอะตอมอิสระ เทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์ As, Se, Te, Ge, Bi และ Sb เป็นต้น

4. Cold Vapor Generation Technique เหมาะที่จะใช้เป็นวิธีวิเคราะห์ธาตุบางชนิดที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่าย ได้แก่ การวิเคราะห์ปรอทปริมาณน้อย

### 2.10.2 องค์ประกอบของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของเครื่อง AAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.2.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

ทำหน้าที่ปล่อยสเปกตรัมเฉพาะของธาตุที่ต้องการวัด ธาตุที่อยู่ในแหล่งกำเนิดจะต้องเป็นธาตุเดียวกันกับธาตุที่จะทำการวิเคราะห์ แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 ประเภท คือ

1. Hollow Cathode Lamp (HCL) ประกอบด้วยขั้วบวก (Anode) ที่ทำจากหลอดทั้งสแตน และขั้วลบ (Cathode) ซึ่งประกอบด้วยธาตุเดี่ยวหรือธาตุผสม (ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์ธาตุหลายชนิดด้วยหลอดเดียว) ชนิดเดียวกับธาตุที่ต้องการวิเคราะห์ ภายในหลอดจะบรรจุแก๊สเฉื่อยที่ความดัน 1-5 ทอร์ เมื่อขั้วทั้งสองได้รับความต่างศักย์ประมาณ 200-400 โวลต์ แก๊สเฉื่อยจะแตกตัวเป็นไอออน ไอออนบวกจะไปชนกับแคโทด ทำให้เกิดอะตอมในสภาวะกระตุ้นขึ้น จากนั้นอะตอมเหล่านั้นปลดปล่อยพลังงานแสงที่มีความจำเพาะออกมาเพื่อกลับสู่สภาวะพื้น

2. Electrodeless Discharge Lamp (EDL) ภายในประกอบไปด้วยแก๊สของธาตุที่ต้องการจะวิเคราะห์ซึ่งบรรจุอยู่ในหลอดเซรามิกที่มีขดลวดเหนี่ยวนำพันรอบอยู่ เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและทำให้แก๊สเปลี่ยนสถานะไปเป็นไอ ต่อจากนั้นจึงแตกตัวเป็นไอออนเมื่อพลังงานลดลงจะเกิดการปลดปล่อยพลังงานแสงที่มีความจำเพาะออกมา

### 2.10.2.2 หลอดไฟกำเนิดแสงอ้างอิง (Reference light source)

นิยมใช้ Hydrogen lamp ซึ่งปล่อยแสงช่วงความยาวคลื่น 190-280 นาโนเมตร หรือใช้ Deuterium lamp ที่ปล่อยแสงช่วงความยาวคลื่น 190-325 นาโนเมตร สำหรับเป็นลำแสงอ้างอิง การวิเคราะห์ในช่วงแสง UV และใช้หลอดทั้งสแตนฮาโลเจนสำหรับการวิเคราะห์ในช่วง visible light สัญญาณของลำแสงที่ผ่านอะตอมอิสระออกมาจะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงอยู่ตลอดเวลาที่วัด ตัวรบกวนต่างๆที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ไม่จำเพาะ (Nonspecific absorption) และไม่คงที่ ทำให้ความเข้มของลำแสงอ้างอิงเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับการเปลี่ยนแปลงของลำแสงที่ผ่านอะตอมอิสระ(I) จึงทำให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องแม่นยำเพิ่มขึ้นการดูดกลืนแสงที่ไม่จำเพาะนิยมเรียกรวมๆว่า การดูดกลืนโดยพื้นหลัง (Background absorption)

### 2.10.2.3 ส่วนที่ทำให้ธาตุดลายเป็นอะตอมอิสระ (Atomizer)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ โดยใช้พลังงานความร้อนจากเปลวไฟหรือไฟฟ้า

### 2.10.2.4 Monochromator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น เป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกสเปกตรัมของแสงที่ต้องการออกจากสเปกตรัมของแสงที่ไม่ต้องการ

### 2.10.2.5 Detector

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ตัวตรวจวัดที่นิยมใช้คือ Photomultiplier tube (PMT) เพราะมีความไว สามารถตรวจวัดแสงที่มีกำลังต่ำได้ เนื่องจากสัญญาณที่ตรวจวัดได้จะมีค่าน้อย จึงต้องทำการขยายสัญญาณด้วย Amplifier circuit ก่อนที่จะส่งต่อไปยังเครื่องประมวลผล

### 2.10.2.6 เครื่องประมวลผลและอ่านผล (Data system and Read-out units)

### 2.10.3 ประเภทของเครื่อง Atomic Absorption Spectrometer

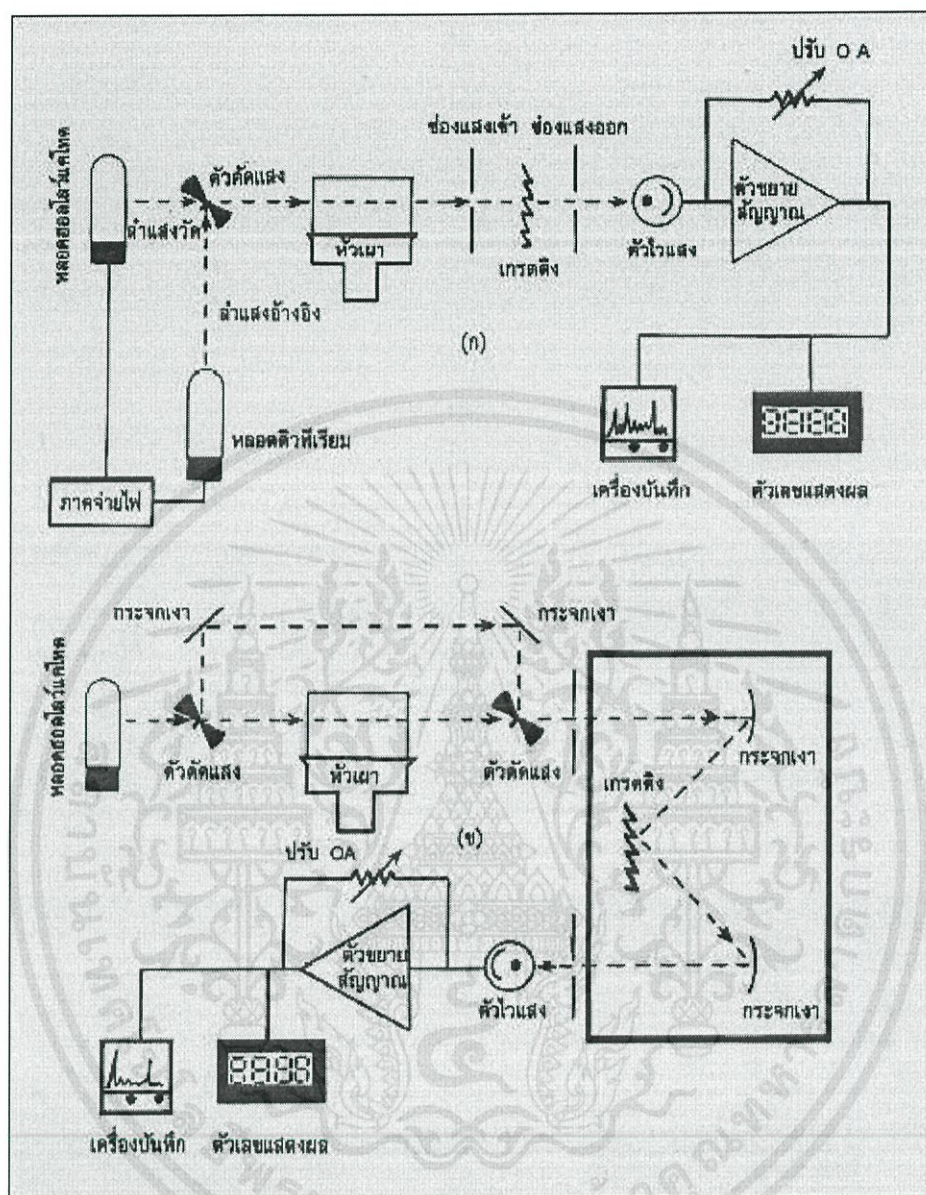
#### 1. ชนิดลำแสงเดี่ยว (Single beam type)

ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง หลอดกำเนิดลำแสงอ้างอิง Atomizer Monochromator Detector และเครื่องประมวลผลและอ่านผล ลำแสงอ้างอิงจะตกกระทบบนที่ PMT สลับกับลำแสงวัด (measurement beam) จากหลอดกำเนิดแสงด้วยการทำงานของตัวตัดแสง (chopper) การเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสอง จะแก้ความไม่คงที่ของการดูดกลืนแสงที่ไม่จำเพาะของเปลวไฟได้ แต่ไม่สามารถแก้ความไม่คงที่ของความเข้มแสงจากหลอดกำเนิดแสงได้

#### 2. ชนิดลำแสงคู่ (Double beam type)

สร้างขึ้นเพื่อแก้ปัญหาความไม่คงที่ของความเข้มแสงจากหลอดกำเนิดแสง โดยการแยกแสงจากหลอดกำเนิดแสงออกเป็น 2 ลำแสงด้วยตัวตัดแสง (chopper) ที่มีกระจกเงาติดอยู่ ลำแสงหนึ่งจะไปตกกระทบบนที่ PMT โดยไม่ผ่านเปลวไฟ ส่วนอีกลำแสงหนึ่งผ่านเปลวไฟก่อนตกกระทบบนที่ PMT สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากแสงที่ผ่านเปลวไฟจะถูกขยายเปรียบเทียบกับสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากลำแสงอ้างอิงตลอดเวลา ดังนั้นจึงสามารถแก้ความผิดพลาดอันเนื่องมาจากความไม่คงที่ของหลอดกำเนิดแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แผนผังส่วนประกอบของเครื่อง AAS แบบลำแสงเดี่ยวและลำแสงคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

X. Querol และคณะ (2002)

มีการเผาถ่านที่เกิดจากกระบวนการผลิตใน USA และ EU ปีละประมาณ 115 ล้านตัน บางส่วนของผลผลิตนี้จะกลายเป็นเถ้าลอย อุตสาหกรรมซีเมนต์และคอนกรีตมีความต้องการที่จะใช้เถ้าลอยมาเป็นวัตถุดิบเป็นอย่างมาก การสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอยอาจยังไม่แพร่หลายนัก แต่กลับเป็นวัตถุดิบที่มีความน่าสนใจในด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ซีโอไลต์อาจสามารถทำจากเถ้าลอยได้โดยกระบวนการที่ราคาถูกลงและรวดเร็ว การศึกษานี้จึงต้องการที่จะหาวิธีที่จะสังเคราะห์ซีโอไลต์จากเถ้าลอย รวมถึงการทดลองหาสภาวะที่จะทำให้มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของซีโอไลต์มากที่สุด(CEC) ซีโอไลต์สามารถใช้ในการกำจัดแอมโมเนียมจากน้ำเสียได้ แต่ถ้ามีความเข้มข้นของแคตไอออนอื่นมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแอมโมเนียมลดลง ซีโอไลต์ที่ได้มีค่า CEC ถึง 3meq/g ซึ่งอาจได้มาจากเถ้าลอย high-glass จากข้อมูลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าศักยภาพหลักของวัสดุชนิดนี้คือการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสีย การสังเคราะห์ซีโอไลต์ในบางวิธียังสามารถใช้เป็นสารดูดความชื้นสำหรับดูดซับโมเลกุลของน้ำจากแก๊สหรือเพื่อดักจับ  $SO_2$  และ  $NH_3$  จากไอน้ำได้

K.S. Hui และคณะ (2005)

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าเถ้าลอยมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับโลหะหนักผสมในสารละลายเทียบได้กับซีโอไลต์4A การดูดซับจะขึ้นกับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะและค่าพีเอชโดยทั่วไปในการทดสอบจะใช้ความเข้มข้นที่ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร การกำจัดโลหะหนักของเถ้าลอยที่ถูกทำให้เป็นซีโอไลต์4A เรียงลำดับได้ดังนี้  $Cu^{2+} > Cr^{3+} > Zn^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+}$  สำหรับเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ  $Cu^{2+} > Cr^{3+} > Zn^{2+} > Co^{2+}, Ni^{2+}$  และเถ้าลอยจากถ่านหิน  $Cu^{2+} > Cr^{3+} > Zn^{2+} > Ni^{2+} > Co^{2+}$  จลนศาสตร์ของการดูดซับ  $Ni^{2+}$  เป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 และไอออน เช่น  $Cu^{3+}, Cr^{3+}, Zn^{2+}, Co^{2+}$  เป็นปฏิกิริยาอันดับ 2 ผลของพีเอชของสารละลายมีนัยสำคัญในการปรับปรุงอัตราการดูดซับและความจุในการดูดซับไอออนโลหะได้ ไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมคือ Langmuir ความจุในการดูดซับของเถ้าลอยที่ทำให้เป็นซีโอไลต์มีค่าเหมือน Volfor100 (ชนิดของตัวดูดซับ) จะเห็นว่ากลไกการกำจัดไอออนโลหะหนักเป็นทั้งกระบวนการดูดซับและการแลกเปลี่ยนไอออน เถ้าลอยอาจเป็นทางเลือกสำหรับการเป็นตัวดูดซับที่มีราคาถูกเช่นเดียวกับ activated carbon และมันเทียบได้กับ zeolite ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนไอออนโลหะผสม นอกจากนี้ อัตราการดูดซับไอออนโลหะที่รวดเร็วโดยเฉพาะที่พีเอช 4 ทำให้เถ้าลอยกำจัดไอออนโลหะในคอลัมน์ด้วยเวลาสัมผัสระหว่างสารละลายโลหะและตัวดูดซับที่น้อยใช้

Heechan Cho และคณะ (2005)

ทำการศึกษาเกี่ยวกับการนำเถ้าลอยมาใช้เป็นตัวดูดซับไอออนของโลหะหนัก พบว่า สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม และทองแดงถูกดูดซับบนเถ้าลอยได้อย่างรวดเร็ว (ประมาณ 20 นาทีแรก) และการดูดซับสังกะสีจะเข้าสู่สมดุลในช่วง 2 ชั่วโมง ส่วนโลหะหนักอื่นๆจะเข้าสู่สมดุลในช่วง 3 ชั่วโมง เมื่อนำเถ้าลอยไปแช่ในน้ำจะมีค่าพีเอชเท่ากับ 10 ถึง 13 ซึ่งเป็นระดับพีเอชสูงสุดที่โลหะหนักจะตกตะกอนได้ นอกจากนี้เมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า 2.8 ผิวสัมผัสของเถ้าลอยจะมีประจุที่เป็นลบ การตกตะกอนของสังกะสีและแคดเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่พีเอชประมาณ 10 และร้อยละ 90 ของสังกะสีและแคดเมียมจะตกตะกอนเมื่อมีพีเอชมากกว่า 11 สำหรับตะกั่วการตกตะกอนจะเกิดขึ้นที่พีเอชประมาณ 8 และร้อยละ 99 จะตกตะกอนเมื่อมีพีเอชเท่ากับ 9 ในทางตรงกันข้าม ทองแดงจะตกตะกอนที่พีเอชต่ำๆ ระหว่างพีเอช 5 ถึง 8 จะมีอิทธิพลต่อการตกตะกอนเล็กน้อย เมื่อมีความเข้มข้นต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้เปอร์เซ็นต์การกำจัดสังกะสีร้อยละ 86 ถึง 98 การกำจัดตะกั่วร้อยละ 96 ถึง 99 การกำจัดแคดเมียมร้อยละ 51 ถึง 95 และการกำจัดทองแดงร้อยละ 60 ถึง 99 เมื่อมีความเข้มข้นต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ไอออนของโลหะหนักส่วนใหญ่จะถูกกำจัดมากกว่าร้อยละ 95 ที่พีเอชมากกว่า 8 จากการวิจัยพบว่าการดูดซับนี้เหมาะสมกับไอโซเทอมของ Freundlich อย่างไรก็ตามเมื่อมีการดูดซับที่มากขึ้นในพีเอชสูงๆ พื้นผิวของเถ้าลอยจะมีไอออนของโลหะหนักมาปกคลุมมากยิ่งขึ้น ทำให้อัตราการดูดซับลดลง จึงทำให้เส้นตรงในไอโซเทอมของ Freundlich มีเส้นตรง 2 เส้น การกำจัดโลหะหนักเช่น การกำจัดตะกั่วจะมากขึ้นเมื่อมีไอออนอื่นปนเปื้อนอยู่ ส่วนการกำจัดทองแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีไอออนอื่นปนอยู่ในปริมาณน้อย (50 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่จะกำจัดได้น้อยลงเมื่อไอออนอื่นมีปริมาณมาก (200 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่การกำจัดสังกะสีจะลดลงเมื่อมีไอออนอื่นปนอยู่ และการกำจัดแคดเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อมีไอออนของตะกั่วอยู่ ดังนั้นจึงเป็นผลดีเมื่อมีการผสมกันอยู่ระหว่างไอออนของตะกั่วและแคดเมียม เมื่อใช้น้ำเสียจริงพบว่า การกำจัดโลหะหนักขึ้นอยู่กับค่าพีเอช เมื่อพีเอชเป็นกลาง (6 ถึง 8) พบว่า การกำจัดโลหะหนักจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อใช้เถ้าลอยเพียงเล็กน้อย

Serpil Cetin และคณะ (2007)

การวิจัยนี้เกี่ยวกับการกำจัดสังกะสีและนิกเกิลจากสารละลายด้วยเถ้าลอยสรุปได้ดังนี้

1. การดูดซับโลหะหนักจะเข้าสู่สมดุลภายใน 1 ชั่วโมง
2. pH ที่ส่งผลให้การดูดซับมีค่าสูงสุดอยู่ระหว่าง 4 ถึง 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในการค้าหรือบริการอื่นได้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Langmuir isotherm ให้ร้อยละค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำกว่า Freundlich isotherm และให้ค่าสัมประสิทธิ์ Correlation ที่สูงกว่า

5. Freundlich isotherm สำหรับทั้งสังกะสีและนิกเกิลมีค่าคงที่  $R^2$  ใน Langmuir isotherm ให้ค่าที่ดีในการดูดซับ

6. ถ้ำลอยมีค่าความจุในการดูดซับที่น้อยกว่าแอคติเวเตจคาร์บอน แต่มีราคาที่ถูกกว่า

Richard Diaz Alorro และคณะ (2008)

ถ้ำลอยจากกระบวนการเผาขยะชุมชนมีองค์ประกอบของโลหะหนักหลายชนิดซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ วิธี Carrier-In-Pulp โดยใช้ผงเหล็กเป็นตัวพาพร้อมกับสารละลาย NaCl เป็นวิธีใหม่ในการนำโลหะหนักกลับมาใช้ การแยก Pb Zn Cu และ Cd จากถ้ำลอยให้ได้มากกว่า 80% สามารถทำได้ในหลายสภาวะ การเพิ่มผงเหล็กก็เป็นวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามผงเหล็กสามารถแยกโลหะหนักได้เพียงบางชนิดคือ Pb และ Cu แต่ไม่สามารถแยก Zn และ Cd ได้ ดังนั้น Zn และ Cd จะยังคงอยู่ในสารละลาย NaCl สำหรับสภาวะที่เหมาะสมจะใช้ NaCl 5 kmol/m<sup>3</sup> pH 5 ถึง 6 ผงเหล็กต่อถ้ำลอยเป็นอัตราส่วน 2 ต่อ 1 และใช้เวลาในการบำบัด 3 ชั่วโมง สามารถนำ Pb กลับมาใช้ได้มากถึงร้อยละ 96.3 และ Cu ได้มากถึงร้อยละ 95.6 จากการใช้วิธี CIP นี้สามารถทำให้ตะกั่วมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานได้

Deyi Wu และคณะ (2008)

ซีโอไลท์ที่ถูกสังเคราะห์จากถ้ำลอยมีประสิทธิภาพในการกำจัด Cr(III) ในสารละลายเช่นเดียวกับถ้ำลอยและตัวดูดซับอื่นๆ กลไกการกำจัดโครเมียมด้วยซีโอไลท์ประกอบด้วยการแลกเปลี่ยนไอออนและการตกตะกอน โครเมียมไฮดรอกไซด์ การกำจัดที่ดีจะขึ้นกับค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของถ้ำลอยและค่าความสามารถในการสะเทินกรดของซีโอไลท์ การที่ถ้ำลอยและซีโอไลท์ที่มีปริมาณแคลเซียมสูงจะส่งผลให้มีค่าความสามารถในการสะเทินกรดที่สูงตามไปด้วย ค่าพีเอชมีผลในการกำจัดโครเมียมเป็นอย่างมาก ในช่วงของการละลาย การกำจัดโครเมียมจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ที่พีเอชต่ำๆจะเกิดการปลดปล่อยไอออนบวกขนาดใหญ่ออกมา ( $\text{Na}^+$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  เป็นตัวหลัก) การที่ถ้ำลอยมีปริมาณแคลเซียมสูงสามารถป้องกันการแข่งขันระหว่างไอออนบวกขนาดใหญ่อื่นๆกับโครเมียมที่บริเวณประจุลบบนพื้นผิวของซีโอไลท์ได้ ในอีกทางหนึ่ง พีเอชที่เกินจากช่วงของการละลายจะทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมเข้าใกล้ 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากเกิดการตกตะกอนโครเมียมไฮดรอกไซด์บนพื้นผิวตัวดูดซับ สามารถสรุปได้ว่าการที่ซีโอไลท์และถ้ำลอยมีปริมาณแคลเซียมสูงจะสามารถนำมาเป็นตัวกำจัดโครเมียมได้

Richard Diaz Alorro และคณะ (2009)

ถ้ำลอยจากการเผาขยะชุมชนในหลุมฝังกลบประกอบด้วยตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และแคดเมียม ในการวิจัยนี้ต้องการที่จะลดความเป็นพิษและนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ วิธี CIP เป็นวิธีที่ใช้ในการนำโลหะหนักกลับมาโดยการใส่เม็ดแอกติเวเตจคาร์บอน และโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวชะ พบว่าสามารถนำโลหะหนักกลับมาใช้ได้มากกว่าร้อยละ 85 เมื่อมีโลหะหนักอยู่เพียงชนิดเดียว หากมีไอออนโลหะปนกันจะทำให้ประสิทธิภาพในการนำโลหะหนักกลับมาใช้ลดลง การเพิ่มจำนวนเม็ดแอกติเวเตจคาร์บอนและความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการนำตะกั่วกลับมาใช้ใหม่ได้ การนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่นั้นจะได้ผลดีที่พีเอชต่ำๆ จากการวิเคราะห์ได้สภาวะที่เหมาะสมคือ ใช้  $\text{NaCl } 5 \text{ kmol/m}^3$  เม็ดแอกติเวเตจคาร์บอน 10 กรัม พีเอช 5 ถึง 6 และใช้เวลาสัมผัส 3 ชม. ในสภาวะนี้จะสามารถนำทองแดงกลับมาใช้ได้ถึงร้อยละ 90 สังกะสีร้อยละ 57 แคดเมียมร้อยละ 54 ตะกั่วร้อยละ 40 จากการใช้วิธี CIP นี้ทำให้ตะกั่วมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานหลุมฝังกลบในญี่ปุ่น

Marisa Nascimento และคณะ (2009)

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของการดูดซับด้วยการสังเคราะห์ zeolite จากถ้ำลอยในบราซิล ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ไอออนบวกของโลหะหนักบางตัว (Zn Cu Mn และ Pb) โดยใช้ความเข้มข้นในช่วง 100-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความจุในการดูดซับจะขึ้นกับปัจจัยด้านอุณหภูมิและเวลาในการสังเคราะห์ zeolite เป็นอย่างมาก โดยยิ่งใช้เวลาและอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความจุในการดูดซับเพิ่มขึ้น จากผลการทดลองสรุปได้ว่าการปรับปรุงคุณภาพของถ้ำลอยด้วยการใช้น้ำที่อุณหภูมิสูงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถเพิ่มความจุในการดูดซับได้มากถึง 2 ถึง 25 เท่าเมื่อเทียบกับถ้ำลอยที่ไม่ผ่านกระบวนการนี้ การแลกเปลี่ยนไอออนนี้สามารถใช้ไอโซเทอมของ Langmuir Freundlich และ Dubinin-Kaganer-Radusshkevich ในการอธิบาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไอออนบวกในสารละลายเพิ่มขึ้น จากการวิจัยพบว่าการดูดซับของ  $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn}$

Maria Visa และคณะ (2010)

การใช้ NaOH ในการรีฟลักซ์ถ้ำลอยจะทำให้เกิดปฏิกิริยา ดังต่อไปนี้



เมื่ออยู่บนพื้นผิวของถ้ำลอยจะทำให้เกิดการปรับปรุงในบริเวณ active sites ขึ้นใหม่

เอกสารนี้เป็น (Si-O) และ (Al-O) ซึ่งจะยอมให้โลหะมาเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารเชิงซ้อน ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้  $2(\text{Si-O}) + \text{M}^{2+} \rightarrow (\text{Si-O})_2\text{M}$  ของเอกสารทุกครั้งที่มีการ... (2.12)



## บทที่ 3

# วัสดุ อุปกรณ์ และการดำเนินงานวิจัย

### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Atomic Absorption spectrometer ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AAS-200
2. เครื่องวัดพีเอช รุ่น C860 ยี่ห้อ Consort
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AUX 220
4. เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Gallenkamp
5. เครื่องกลั่น Kjeldahl ยี่ห้อ Buchi
6. เครื่อง centrifuge ยี่ห้อ Sanyo
7. ตู้อบ ยี่ห้อ Fisher Scientific
8. Hotplate และเครื่องปั่นแม่เหล็ก(Magnetic stirrer)
9. ชุด condenser
10. ขวดกั่นกลม
11. เตาหลอม
12. หลอด centrifuge
13. Kjeldahl flask
14. เครื่องแก้วต่างๆ
15. กระดาษกรอง Whatman No.47
16. Filter กรอง 0.45 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ตัวอย่างและสารเคมี

1. ตัวอย่างถั่วลันเตา นำมาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(กฟผ.)
2. ตัวอย่างน้ำเสีย นำมาจากบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด(มหาชน)หรือ GENCO
3. ผงเหล็ก นำมาจากบริษัท Alchemy
4. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
5. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
6. กรดอะซิติก (Acetic acid,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
7. เอทิลแอลกอฮอล์ ร้อยละ 95 (Ethyl alcohol,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
8. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
9. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
10. กรดบอริก (Boric acid,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
11. โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green) ยี่ห้อ Acros เกรดอินดิเคเตอร์
12. เมทิลเรด (Methyl red) ยี่ห้อ Fisher Scientific เกรด General purpose
13. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ยี่ห้อ Carlo Erba เกรดวิเคราะห์
14. กรดไนตริก (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) ยี่ห้อ Loba Chemie เกรดวิเคราะห์
15. น้ำกลั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอย

นำตัวอย่างเถ้าลอยมาผ่านตะแกรงร่อนขนาด 230 mesh จะได้เถ้าลอยที่มีขนาดน้อยกว่า 63 ไมครอน จากนั้นชั่งเถ้าลอย 20 กรัมมาใส่ในขวดก้นกลม เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ กันคือ 0.25 0.5 1 2 และ 3 โมลาร์ในปริมาณ 160 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน วางบนเตาหลุมให้ความร้อน ต่อ condenser เข้ากับขวดก้นกลม ทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 12 24 และ 36 ชั่วโมง หลังจากรีฟลักซ์เสร็จแล้วให้ทิ้งไว้จนตะกอนนอนก้น เติมน้ำละลายทิ้ง ล้างตะกอนที่เหลือด้วยน้ำกลั่น นำไปอบแห้ง เรียกเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพว่า Treated Fly Ash จากนั้นนำเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาทำการวิเคราะห์หาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC) ด้วยวิธี Ammonium Acetate Method (Black, 1965)

#### 3.3.1 วิธีการวิเคราะห์ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC)

1. ชั่งตัวอย่างเถ้าลอย 5 กรัมใส่ลงในหลอดเซนตริฟิวขนาด 50 มิลลิลิตร เติมนอร์มัล  $\text{NH}_4\text{OAc}$  ลงไป 30 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
2. นำไปเซนตริฟิว 5 นาที รินสารละลายใส่ทิ้งไป นำตะกอนเถ้าลอยที่มามี เติมนอร์มัล  $\text{NH}_4\text{OAc}$  30 มิลลิลิตร เขย่า 5 นาทีและเซนตริฟิวเช่นเดียวกับการทำในครั้งแรก ทำเช่นนี้ซ้ำอีกครั้ง
3. นำตะกอนเถ้าลอยมาล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 30 มิลลิลิตร เขย่า 5 นาทีและเซนตริฟิวอีก 5 นาที รินสารละลายใส่ทิ้งไป ทำเช่นนี้ทั้งหมด 3 ครั้ง
4. นำตะกอนเถ้าลอยมาล้างด้วย acidified NaCl ร้อยละ 10 30 มิลลิลิตร เขย่า 5 นาทีและเซนตริฟิวอีก 5 นาที เก็บสารละลายใส่ไว้ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ทำเช่นนี้ทั้งหมด 3 ครั้ง จะได้สารละลายใส่ที่มีปริมาตรประมาณ 90 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตรด้วย acidified NaCl ร้อยละ 10
5. เติมนอร์มัล NaOH 5-25 มิลลิลิตร นำหลอดกลั่นเจดดาห์ (Kjedahl Flask) เติมนอร์มัล NaOH 5-25 มิลลิลิตร นำหลอดกลั่นเจดดาห์ไปใส่ในเครื่องกลั่นเจดดาห์ ปลายก้านของ condenser จะต้องจุ่มอยู่ในขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายกรดบอริกร้อยละ 3 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรและอินดิเคเตอร์ผสม 5 หยดซึ่งมีสีม่วงแดง ทำการกลั่นแอมโมเนีย จะได้สารละลายสีเขียว นำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตกับ 0.1 นอร์มัล  $\text{H}_2\text{SO}_4$  จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วงแดง บันทึกปริมาตรกรดที่ใช้
6. ทำแบลคค์โดยใช้ acidified NaCl ร้อยละ 10 ทำการกลั่นเหมือนขั้นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การคำนวณหาค่า CEC

$$\text{CEC (มิลลิกรัมสมมูลย์/100 กรัม)} = \frac{(A-B) \times N \times 100}{X} \quad \dots(3.1)$$

โดยที่	A	คือ	ปริมาตรของกรด $\text{H}_2\text{SO}_4$ มาตรฐานที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง
	B	คือ	ปริมาตรของกรด $\text{H}_2\text{SO}_4$ มาตรฐานที่ใช้ไทเทรตแบลงค์
	N	คือ	ความเข้มข้นของกรด $\text{H}_2\text{SO}_4$ มาตรฐาน (นอร์มัล)
	X	คือ	น้ำหนักของตัวอย่างในหน่วยกรัม

### 3.4 การศึกษาการนำเถ้าลอยมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย

#### 3.4.1 การศึกษาปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายโดยปรับเปลี่ยนปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคโทไอออนสูงที่สุดให้เท่ากับ 0.5 1 2 5 และ 10 กรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2 เขย่าด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 15 นาที กรองเอาเถ้าลอยออก นำน้ำเสียไปย่อยกับกรดไนตริก วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

#### 3.4.2 การศึกษาผลของค่าพีเอชในการกำจัดนิกเกิล

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายโดยปรับค่าพีเอชของสารละลายด้วยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วง 2-5 นั่นคือ 2 3 4 และ 5 แล้วใช้ปริมาณเถ้าลอยที่มีความเหมาะสมที่สุดตามที่ในการทดลอง 3.4.1 ในการดูดซับนิกเกิล เขย่าด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 15 นาที กรองเอาเถ้าลอยออก นำน้ำเสียไปย่อยกับกรดไนตริก วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

#### 3.4.3 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสในการกำจัดนิกเกิล

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายโดยทำการใส่เถ้าลอยตามปริมาณที่หาได้จากการทดลอง 3.4.1 ลงในน้ำเสียที่ได้หาค่าพีเอชที่เหมาะสมแล้วในการทดลอง 3.4.2 นำไปเขย่าตามระยะเวลาต่างๆดังนี้ 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 1 ชั่วโมง 30 นาที 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง กรองเอาเถ้าลอยออก นำน้ำเสียไปย่อยกับกรดไนตริก วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าพระยา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับนิกเกิล

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตรายด้วยถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพทำโดยนำถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพปริมาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 กรัมต่อลิตร มาใส่ลงในน้ำเสียที่ถูกรับให้มีค่าพีเอชที่เหมาะสมที่สุด และทำการเขย่าโดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่สุด กรองเอาถ้ำลอยออก นำน้ำเสียไปย่อยกับกรดไนตริก วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS ทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับตามชนิดที่เหมาะสม

## 3.5 การศึกษาการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลด้วยวิธี Carrier-in-pulp โดยใช้ผงเหล็กเป็นตัวพา (Richard Diaz Alorro, 2008)

### 3.5.1 การศึกษาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

ศึกษาประสิทธิภาพในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยโดยปรับเปลี่ยนปริมาณผงเหล็กให้มีอัตราส่วนระหว่างผงเหล็กต่อถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลแล้วให้เท่ากับ 0.25 ต่อ 1 0.5 ต่อ 1 1 ต่อ 1 1.5 ต่อ 1 2 ต่อ 1 2.5 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 แล้วใส่ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 25 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก 15 นาที แท่งแม่เหล็กจะดึงเอาผงเหล็กออก กรองเอาถ้ำลอยออกมาทำการย่อยกับกรดไนตริก จากนั้นจึงกรองถ้ำลอยออกจากสารละลาย วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

### 3.5.2 การศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

ศึกษาประสิทธิภาพในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ให้มีค่า 0.25 0.5 1 2 3 4 และ 5 โมลาร์ ในปริมาณ 25 มิลลิลิตร แล้วใช้ปริมาณผงเหล็กที่มีความเหมาะสมที่สุดตามที่ในการทดลอง 3.5.1 ใส่ถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียแล้วลงไป นำไปปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที กรองเอาถ้ำลอยออกมาทำการย่อยกับกรดไนตริก จากนั้นจึงกรองถ้ำลอยออกจากสารละลาย วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3 การศึกษาผลของระยะเวลาสัมผัสในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

ศึกษาประสิทธิภาพในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอย โดยทำการใส่ผงเหล็กตามปริมาณที่หาได้จากการทดลอง 3.5.1 ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นเหมาะสมตามการทดลอง 3.5.2 ในปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใส่ถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียแล้วลงไป นำไปปั่นกวนตามระยะเวลาต่างๆดังนี้ 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 1 ชั่วโมง 30 นาที 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง กรองเอาถ้ำลอยออกมาทำการย่อยกับกรดไนตริก จากนั้นจึงกรองถ้ำลอยออกจากสารละลาย วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

3.5.4 การศึกษาผลของค่าพีเอชในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

ศึกษาประสิทธิภาพในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยโดยปรับค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นตามการทดลอง 3.5.2 ด้วยกรดไนตริกและ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในช่วง 2 ถึง 14 นั่นคือ 2 4 6 8 10 12 และ 14 แล้วใช้ปริมาณผงเหล็กที่มีความเหมาะสมที่สุดตามการทดลอง 3.5.1 ใส่ถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลในน้ำเสียแล้วลงไป นำไปปั่นกวนตามระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดตามการทดลอง 3.5.3 กรองเอาถ้ำลอยออกมาทำการย่อยกับกรดไนตริก จากนั้นจึงกรองถ้ำลอยออกจากสารละลาย วัดปริมาณนิกเกิลที่เหลืออยู่ด้วยเครื่อง AAS

### 3.6 การศึกษาการนำถ้ำลอยกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย

นำถ้ำลอยที่ผ่านกระบวนการคายซับนิกเกิลมาทำการดูดซับนิกเกิลอีกครั้ง โดยหาทั้งค่าพีเอชและระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมตามการทดลองข้างต้น นำมาเปรียบเทียบกับผลการดูดซับนิกเกิลครั้งแรกว่ามีประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมแตกต่างกันหรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

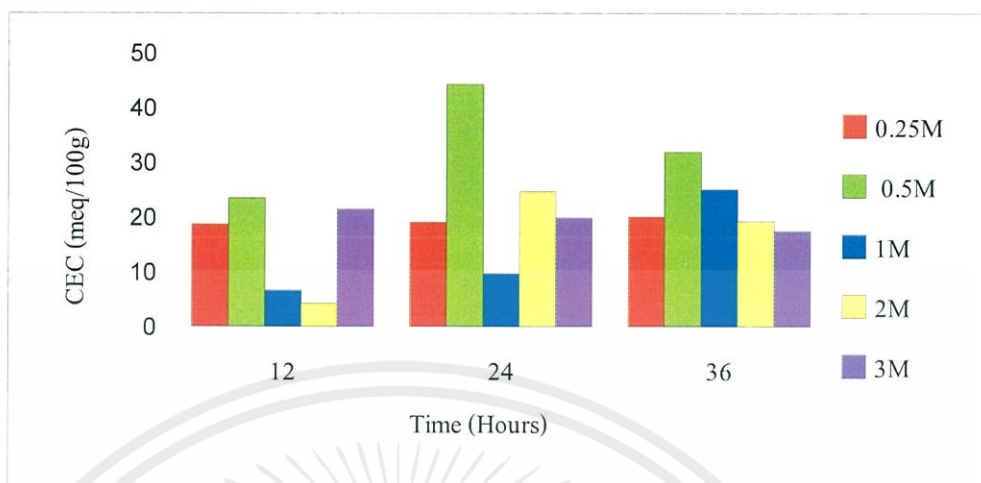
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปราย

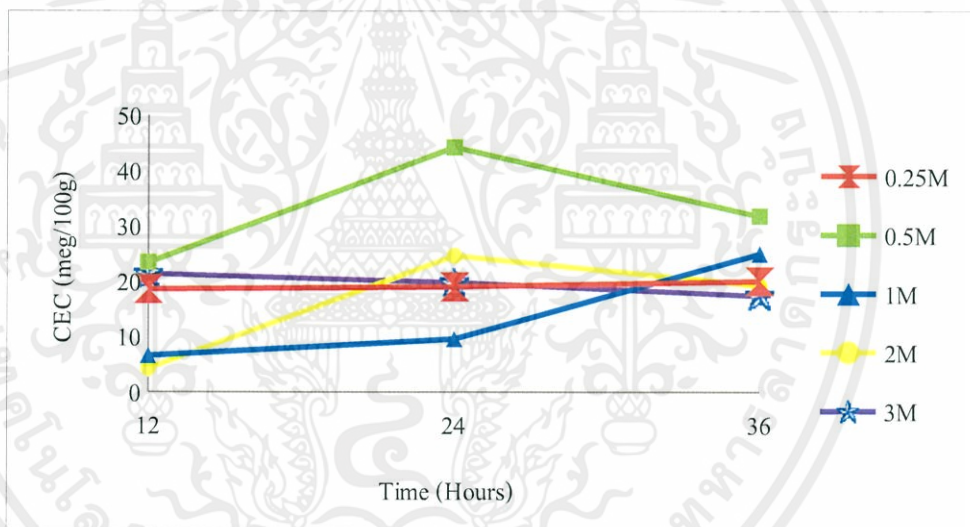
#### 4.1 ผลการศึกษาปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอย

จากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าลอยโดยการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 0.5 1 2 และ 3 โมลาร์ เป็นเวลา 12 24 และ 36 ชั่วโมง เถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ (Treated Fly Ash) จะมีสีเทา แตกต่างจากเถ้าลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่มีสีดำ หลังจากนั้นจึงนำเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมาหาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (Cation Exchange Capacity หรือ CEC) จากผลการทดลอง เมื่อทำการรีฟลักซ์เป็นเวลาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง จะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมากนัก กล่าวคือมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนอยู่ในช่วง 18.6 ถึง 20 23.4 ถึง 44.2 6.6 ถึง 25 4.2 ถึง 24.6 และ 17.4 ถึง 21.4 มิลลิกรัมสมมูลย์ /100 กรัม เมื่อใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 0.25 0.5 1 2 และ 3 โมลาร์ ตามลำดับ จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะสังเกตว่าเมื่อใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ในการรีฟลักซ์ ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนมีความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ส่วนความเข้มข้นที่ 0.5 และ 2 โมลาร์ ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงสุดจะอยู่ที่เวลา 24 ชั่วโมง ความเข้มข้นที่ 3 โมลาร์นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อรีฟลักซ์นานขึ้น และความเข้มข้นที่ 1 โมลาร์ ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนจะสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อทำการรีฟลักซ์ 48 ชั่วโมง ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนจะมีค่าลดลงเท่ากับ 20.6 มิลลิกรัมสมมูลย์/100 กรัม เถ้าลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพนั้นมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 1.8 มิลลิกรัมสมมูลย์/100 กรัม ส่วนเถ้าลอยที่ทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงสุดคือ เถ้าลอยที่รีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งมีความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 44.2 มิลลิกรัมสมมูลย์/100 กรัม ดังนั้นเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจึงมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนมากกว่าเถ้าลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพถึง 24.56 เท่า เถ้าลอยที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนสูงที่สุดเหมาะสมในการนำมาทำการดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

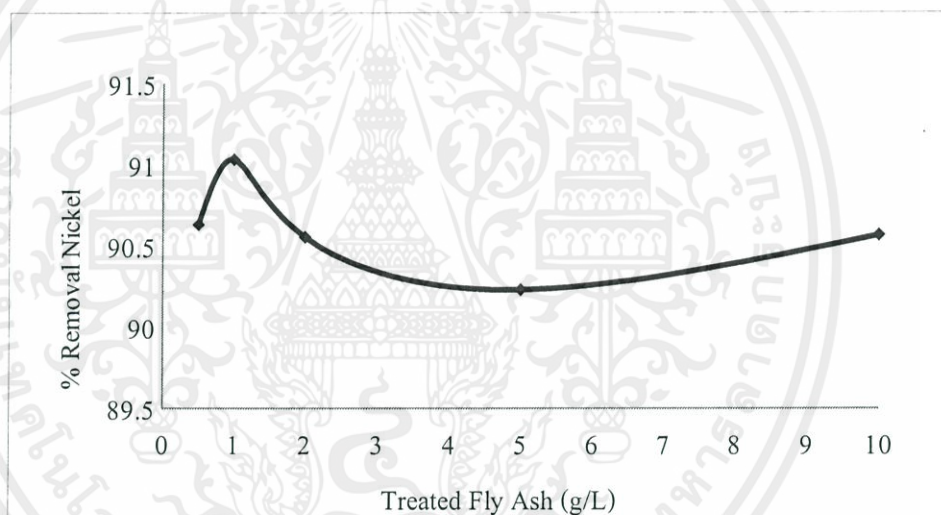


รูปที่ 4.2 แนวโน้มของค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลการศึกษาปริมาณแถั่วลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล

การศึกษาการดูดซับนิกเกิล โดยการปรับเปลี่ยนปริมาณแถั่วลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพให้เท่ากับ 0.5 1 2 5 และ 10 กรัมต่อลิตร ที่พีเอช 2 เขย่าด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 15 นาที จากรูปที่ 4.3 จะสังเกตว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลจะลดลงเมื่อใช้ปริมาณแถั่วลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเท่ากับ 2 กรัมต่อลิตร เมื่อทำการพิจารณาแล้วจึงสรุปได้ว่า ปริมาณแถั่วลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร โดยสามารถทำการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 34.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือเพียง 3.09 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 91.03

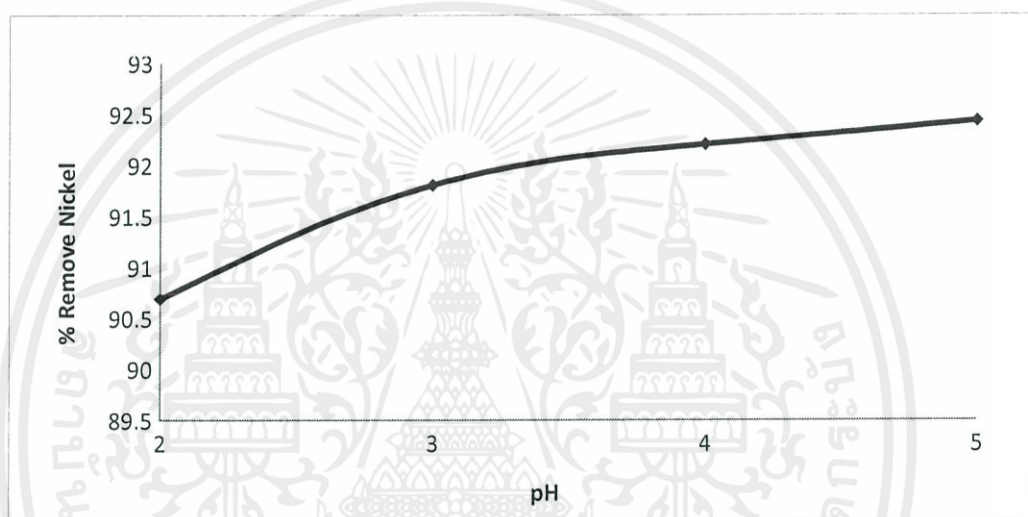


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ของปริมาณ Treated Fly Ash กับร้อยละการกำจัดนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

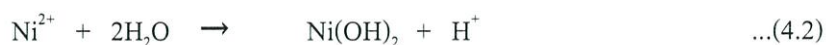
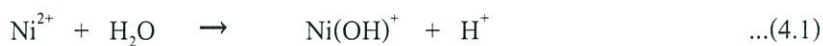
### 4.3 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล

การศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล โดยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 2 3 4 และ 5 จากรูปที่ 4.4 จะสังเกตว่า กราฟนั้นมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่ดีขึ้นเรื่อยๆ จึงสรุปได้ว่า พีเอช 5 เป็นค่าพีเอชที่เหมาะสม โดยสามารถทำการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 34.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือเพียง 2.6 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 92.43



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล

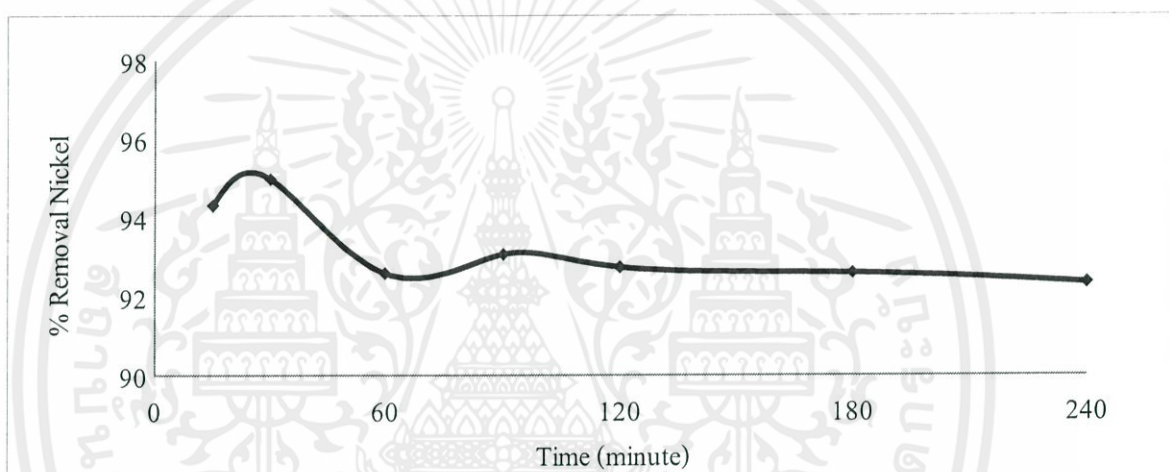
เมื่อสารละลายมีพีเอชเท่ากับ 7 ปริมาณ  $\text{Ni}^{2+}$  จะลดลงโดยเปลี่ยนรูปไปเป็น  $\text{NiOH}^+$  และเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 9  $\text{NiOH}^+$  จะเปลี่ยนรูปไปเป็นตะกอน  $\text{Ni}(\text{OH})_2$  ดังนั้นหากทำการปรับค่าพีเอชให้เป็นเบสจะทำให้เกิดการตกตะกอนร่วมกับการดูดซับบนเม็ดลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ นอกจากนี้ การที่มีไอออนของนิกเกิลน้อยลงยังส่งผลให้การดูดซับมีประสิทธิภาพลดลงอีกด้วย ผู้ทำการทดลองจึงเลือกที่จะปรับเปลี่ยนค่าพีเอชให้สูงสุดแค่ว่าพีเอช 5 เท่านั้น (ชุตินาเสพยัชรธรรม, 2543)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล

การศึกษาคัดค้านิกเกิลโดยการปรับเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัส นำถั่วลยในอัตราส่วน 1 กรัมต่อลิตรไปเขย่าตามระยะเวลาต่างๆดังนี้ 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 1 ชั่วโมง 30 นาที 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ที่พีเอช 5 จากรูปที่ 4.5 จะสังเกตว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลจะลดลงที่เวลา 60 นาที สรุปได้ว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมอยู่ที่ 30 นาที โดยสามารถทำการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 34.5 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เหลือเพียง 1.73 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 95

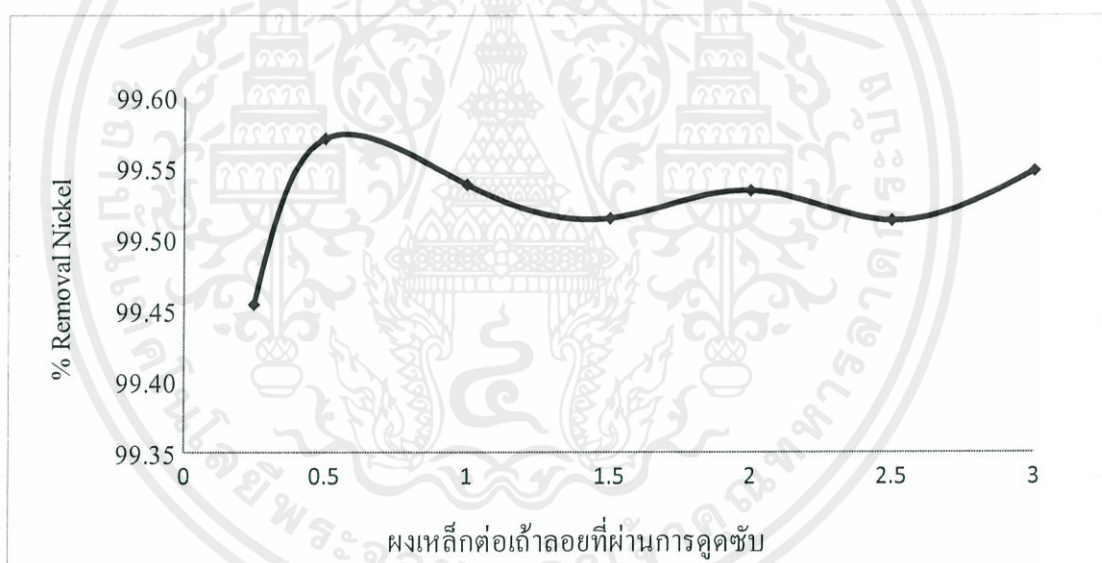


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 ผลการศึกษาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการคายชั้นนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดชั้นนิกเกิล

การศึกษาคายชั้นนิกเกิลออกจากถ้ำลอยโดยปรับเปลี่ยนปริมาณผงเหล็กให้มีอัตราส่วนระหว่างผงเหล็กต่อถ้ำลอยที่ผ่านการดูดชั้นนิกเกิลแล้วเท่ากับ 0.25 ต่อ 1 0.5 ต่อ 1 1 ต่อ 1 1.5 ต่อ 1 2 ต่อ 1 2.5 ต่อ 1 และ 3 ต่อ 1 แล้วใส่ลงในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 2 โมลาร์ ปริมาณ 25 มิลลิลิตร นำไปปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก 15 นาที จากรูปที่ 4.6 จะสังเกตเห็นประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลนั้นไม่ค่อยมีความแตกต่างกัน กล่าวคืออยู่ในช่วงร้อยละ 99.45 ถึง 99.57 เมื่อทำการพิจารณาแล้วจึงสรุปได้ว่า ควรใช้อัตราส่วนผงเหล็กต่อถ้ำลอยที่ผ่านดูดชั้นเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 โดยสามารถทำการคายชั้นนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 32.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้เหลือเพียง 0.14 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 99.57

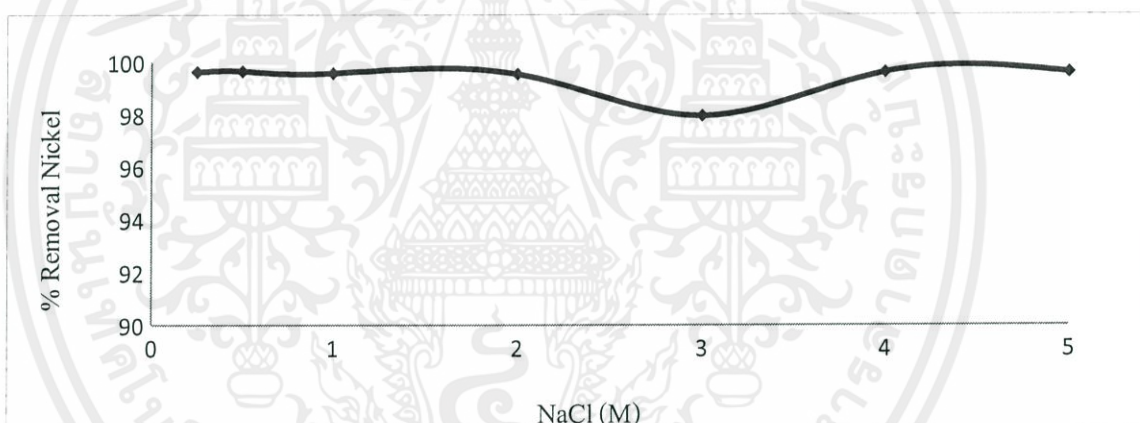


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของปริมาณผงเหล็กกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 ผลการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

การศึกษาคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ให้มีค่า 0.25 0.5 1 2 3 4 และ 5 โมลาร์ในปริมาณ 25 มิลลิลิตร ใช้อัตราส่วนผงเหล็ก:เถ้าลอยที่ผ่านดูดซับเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 นำไปปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก 15 นาที จากรูปที่ 4.7 จะสังเกตได้ว่า ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลลดลงอย่างเห็นได้ชัด ความเข้มข้นนอกจากนั้นจะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน เมื่อทำการพิจารณาแล้วจึงสรุปได้ว่า ควรใช้ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ โดยสามารถทำการคายซับนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 32.5 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เหลือเพียง 0.11 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 99.67

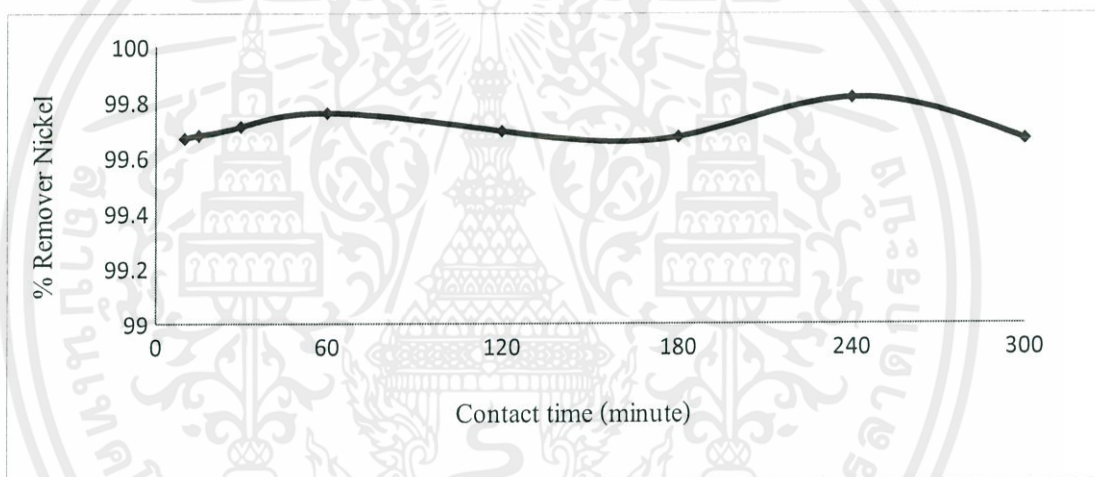


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ NaCl กับร้อยละการกำจัดนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.7 ผลการศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

การศึกษาคายซับนิกเกิลออกจากเถ้าลอยโดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสให้เป็น 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 1 ชั่วโมง 30 นาที 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 5 ชั่วโมง ใช้อัตราส่วนผงเหลือต่อเถ้าลอยที่ผ่านดูดซับเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 และใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ จากรูปที่ 4.8 จะสังเกตว่า ที่ 4 ชั่วโมงมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลมากที่สุด จึงสรุปได้ว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมอยู่ที่ 4 ชั่วโมง โดยสามารถทำการคายซับนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 32.5 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เหลือเพียง 0.0602 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 99.82

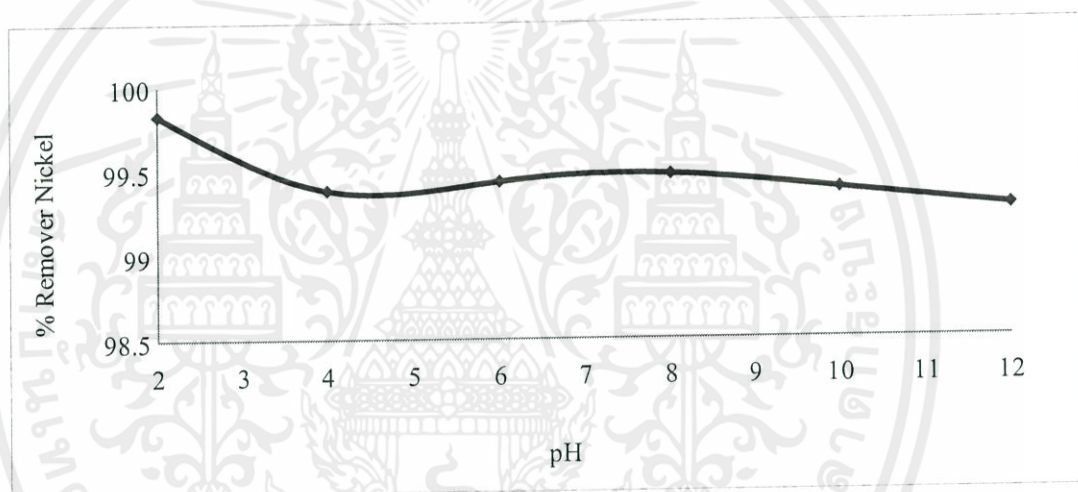


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล (คายซับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8 ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการคายชั้นนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

การศึกษาคายชั้นนิกเกิลออกจากถ้ำลอยโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชให้เป็น 2 4 6 8 10 และ 12 ใช้อัตราส่วนผงเหล็กต่อถ้ำลอยที่ผ่านดูดซับเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 ใช้โซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ นำไปปั่นกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก 4 ชั่วโมง จากรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า หลังจากปรับพีเอชเป็น 4 เป็นต้นไป ประสิทธิภาพในการกำจัดจะลดลงในระดับที่ใกล้เคียงกัน จึงสรุปได้ว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 2 โดยสามารถทำการคายชั้นนิกเกิลที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 32.5 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เหลือเพียง 0.056 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 99.83

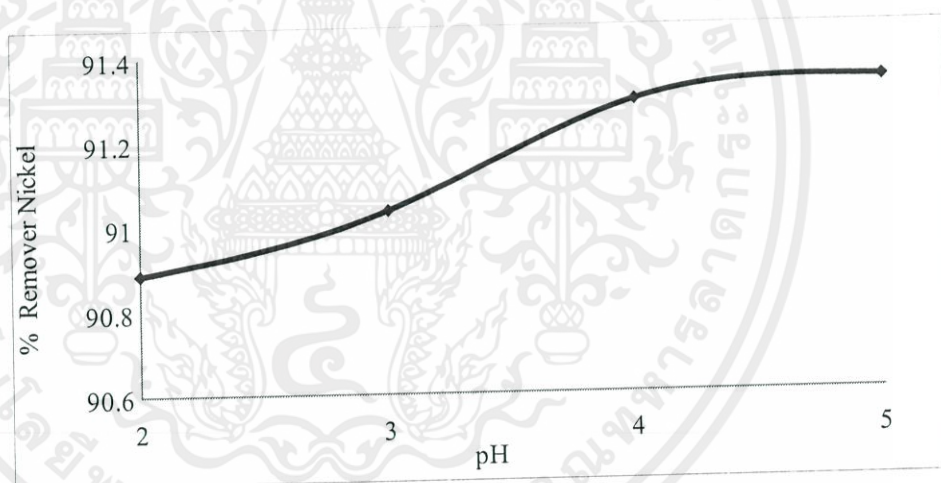


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล (คายชั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9 การนำเอาผลย้อนกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย โดยศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม

การศึกษากการดูดซับนิกเกิลโดยเอาผลย้อนกลับผ่านการคายซับมาแล้วด้วยการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเป็น 2 3 4 และ 5 จากรูปที่ 4.10 จะสังเกตว่า กราฟนั้นมีแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลที่ดีขึ้นเรื่อยๆเช่นเดียวกับในการดูดซับครั้งแรก จึงสรุปได้ว่า พีเอช 5 เป็นค่าพีเอชที่เหมาะสม โดยสามารถทำการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 34.5 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เหลือเพียง 2.99 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 91.33 เมื่อเทียบกับการดูดซับนิกเกิลในครั้งแรกแล้ว ค่าพีเอชที่เหมาะสมเป็น 5 เหมือนกัน สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น กล่าวคือ ในการดูดซับครั้งแรกมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 92.43 ส่วนการดูดซับครั้งที่สองมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 91.33

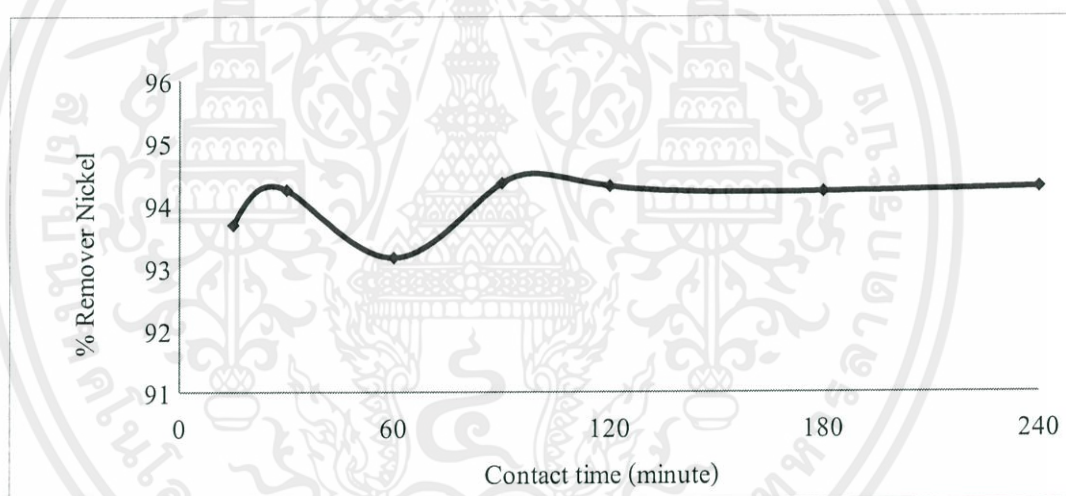


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ของค่าพีเอชกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.10 การนำเอาถ้อยกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย โดยศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

การศึกษาการดูดซับนิกเกิล โดยเอาถ้อยที่ผ่านการคายซับมาแล้วด้วยการปรับเปลี่ยนระยะเวลาสัมผัสตามระยะเวลาต่างๆดังนี้ 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 1 ชั่วโมง 30 นาที 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ที่พีเอช 5 จากรูปที่ 4.11 จะสรุปได้ว่า ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมอยู่ที่ 30 นาที โดยสามารถทำการกำจัดนิกเกิลในของเสียอันตรายที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 34.5 มิลลิกรัมต่อลิตรให้เหลือเพียง 1.99 มิลลิกรัมต่อลิตรได้ มีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลถึงร้อยละ 94.23 ซึ่งเมื่อเทียบกับการดูดซับนิกเกิลในครั้งแรกแล้ว มีระยะเวลาสัมผัสเหมือนกันและมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลต่างจากครั้งแรกเล็กน้อย กล่าวคือ ในการดูดซับครั้งแรกมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 95 ส่วนการดูดซับครั้งที่สองมีประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลร้อยละ 94.23

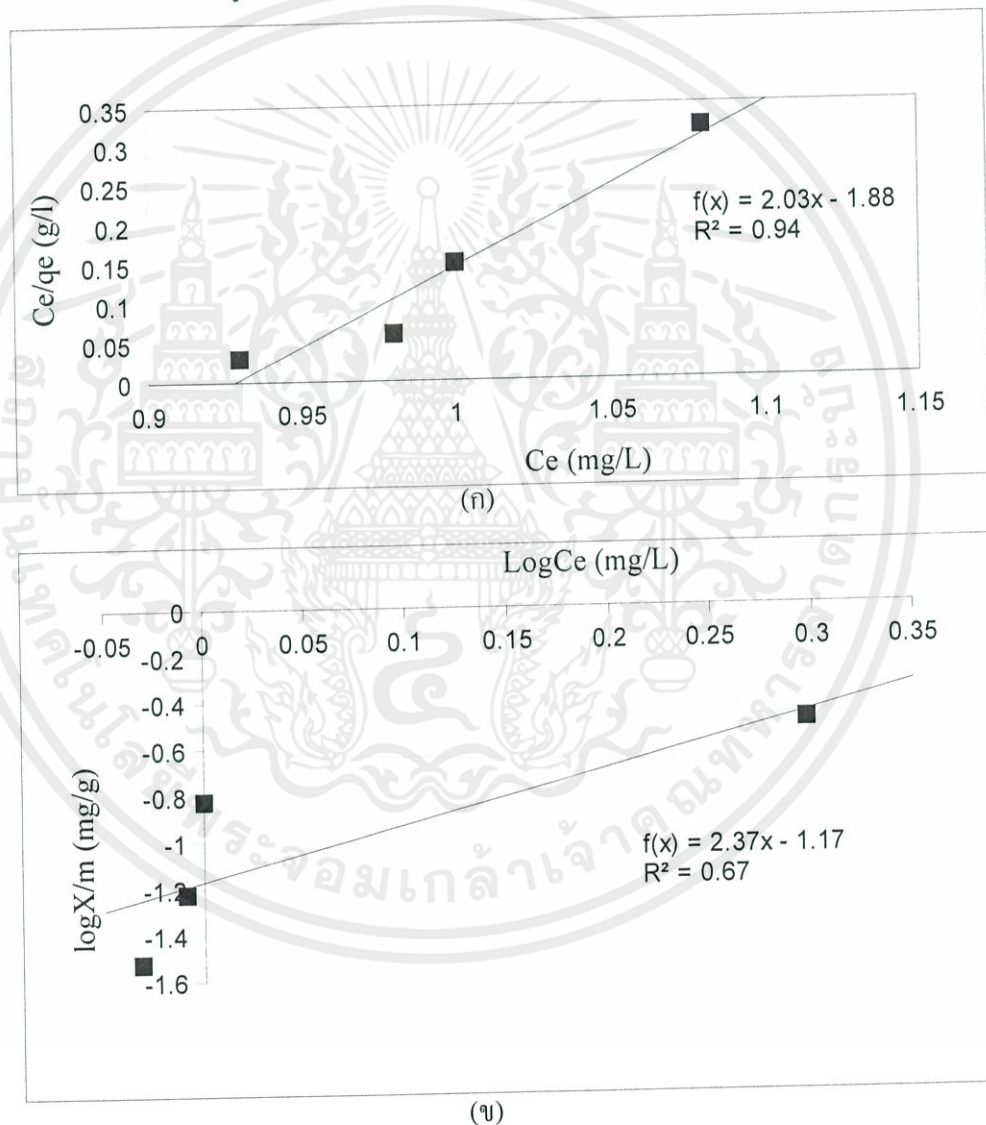


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาสัมผัสกับร้อยละการกำจัดนิกเกิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.11 ผลการศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับนิกเกิลและกราฟความสัมพันธ์ของการดูดซับ

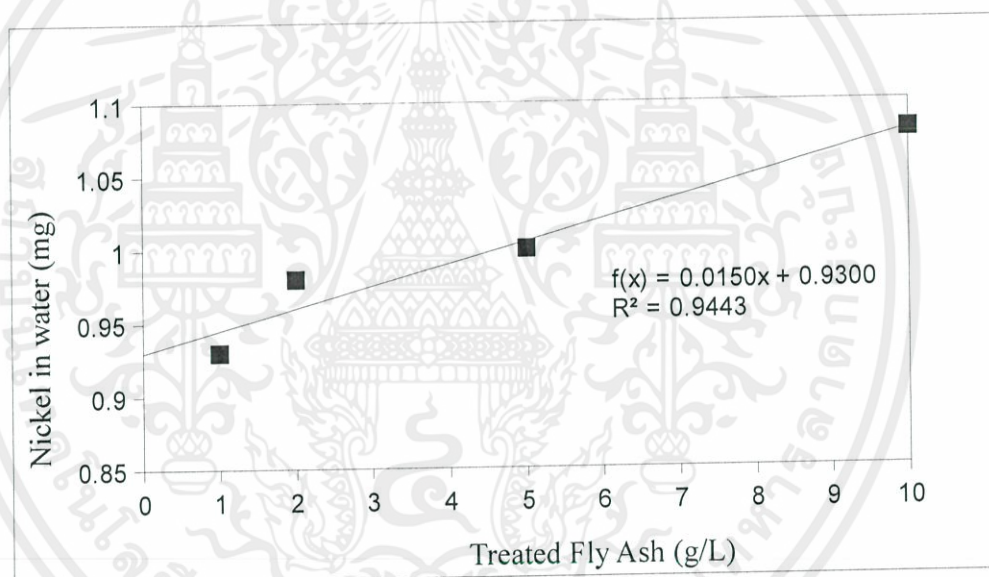
ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตรายด้วยถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ทำโดยนำถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ ปริมาณตั้งแต่ 0.5 ถึง 2 กรัมต่อลิตร มาใส่ลงในน้ำเสียที่ถูกปรับให้มีพีเอช 5 และทำการเขย่าโดยใช้เวลา 30 นาที ทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์กับไอโซเทอมการดูดซับ 2 ชนิดได้แก่ Langmuir และ Freundlich



รูปที่ 4.12 (ก) ไอโซเทอมแบบ Langmuir (ข) ไอโซเทอมแบบ Freundlich

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 4.12 ก. ซึ่งเป็นไอโซเทอมแบบ Langmuir เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในสารละลายที่สภาวะสมดุล/ ปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับกับ  $C_e$  ได้สมการเส้นตรงซึ่งมีค่า Coefficient of determination ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9433 ส่วนรูป ข. ซึ่งเป็นไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log X/m$  คือ  $\log$  ของปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับกับ  $\log C_e$  ได้สมการเส้นตรงซึ่งมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.67 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการดูดซับนิกเกิลเกิดด้วยเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ เป็นการดูดซับแบบไอโซเทอมของ Langmuir เนื่องจากมีค่า  $R^2$  ที่เข้าใกล้ 1 มากกว่า จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้เป็นการดูดซับแบบกายภาพ โดยมีการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer)



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ใช้กับปริมาณนิกเกิลที่เหลือในของเสียนัตรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเถ้าลอยที่ผ่านการคายซับลแล้ว เพื่อการนำกลับมาดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตราย เริ่มต้นจากการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพเถ้าลอยจากการไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย โดยวิธีการรีฟลักซ์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นและเวลาต่าง ๆ กัน พบว่าค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่มีค่าสูงสุดคือ การรีฟลักซ์เถ้าลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนถึง 44.2 มิลลิกรัมสมมูลย์ / 100 กรัม เรียกว่า เถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ เมื่อเทียบกับเถ้าลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงซึ่งมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนเท่ากับ 1.8 มิลลิกรัมสมมูลย์/100 กรัม ทำให้ทราบว่า การปรับปรุงคุณภาพนี้สามารถทำให้ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นได้จริง การที่เถ้าลอยมีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนที่สูงนั้นจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลเพิ่มขึ้นได้ นอกจากนี้ลักษณะภายนอกระหว่างเถ้าลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพกับเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีความแตกต่างกัน ที่เห็นเด่นชัดคือสีของเถ้าลอย เถ้าลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีสีดำ ส่วนเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะมีสีเทา

การนำเถ้าลอยมาทำการดูดซับนิกเกิลจากของเสียอันตรายที่นำมาจากบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด(มหาชน) หรือ GENCO ซึ่งเป็นน้ำจากการชุบโลหะที่มีความเข้มข้นของนิกเกิลเท่ากับ 34.5 มิลลิกรัมต่อลิตรและมีโลหะหนักอื่น ๆ ผสมอยู่หลายชนิด เมื่อทำการศึกษาปัจจัยต่างๆคือ ปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสม ผลของค่าพีเอช และระยะเวลาสัมผัส สามารถสรุปได้ดังนี้ ปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่เหมาะสมเท่ากับ 1 กรัมต่อลิตร ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือ พีเอช 5 และใช้เวลาสัมผัสเท่ากับ 30 นาที ซึ่งสามารถกำจัดนิกเกิลออกจากของเสียอันตรายได้ถึงร้อยละ 94.99 ทำให้ของเสียอันตรายมีปริมาณนิกเกิลเหลืออยู่ 1.73 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังมีปริมาณนิกเกิลเกินค่ามาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่กำหนดไว้ว่าปริมาณนิกเกิลของน้ำทิ้งจะต้องไม่สูงกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงต้องทำการกำจัดนิกเกิลจนมีปริมาณตามที่กำหนดเสียก่อนที่จะปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ จากการสังเกตลักษณะของเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ผ่านการดูดซับแล้วพบว่าเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพมีขนาดใหญ่อขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการดูดซับโลหะหนักในของเสียอันตราย

สำหรับการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิลในของเสียอันตรายแล้ว นั้น ทางผู้ทำการวิจัยได้เลือกวิธีการ Carrier-In-Pulp โดยใช้ผงเหล็กซึ่งได้รับมาจากบริษัท Alchemy เป็นตัวพา นำถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพและผงเหล็กมาใส่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ นิกเกิลในถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพจะถูกคายออกมาและจับอยู่กับผงเหล็ก แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ สามารถคายซับโลหะหนักได้เพียงบางชนิดเท่านั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จากค่า electronegativity สำหรับนิกเกิลที่มีค่า electronegativity เท่ากับ 1.91 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่า electronegativity ของเหล็กซึ่งเท่ากับ 1.83 ดังนั้นนิกเกิลจึงดึงคู่อิเล็กตรอนได้ดีกว่าเหล็ก ทำให้มีการแลกเปลี่ยนไอออนเกิดขึ้น สุดท้ายนิกเกิลจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของแข็งและติดอยู่ที่ผิวของผงเหล็ก ดังสมการ



เมื่อทำการศึกษาปัจจัยต่างๆคือ ปริมาณผงเหล็ก ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม ผลของค่าพีเอช และระยะเวลาสัมผัส สรุปได้ดังนี้ ปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมอยู่ในอัตราส่วนปริมาณผงเหล็กต่อปริมาณถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพเท่ากับ 0.5 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสมเท่ากับ 0.5 โมลาร์ ค่าพีเอชที่เหมาะสมคือพีเอช 2 ใช้เวลาสัมผัส 4 ชั่วโมง ในสภาวะนี้มีประสิทธิภาพในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพได้ถึงร้อยละ 99.83

ในส่วนของการนำถ้ำลอยที่ผ่านการคายซับนิกเกิลแล้วมาทำการดูดซับนิกเกิลอีกครั้ง ผู้ทำการวิจัยได้ทำการศึกษาค่าพีเอช และเวลาสัมผัสที่เหมาะสม พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมนั้นยังคงอยู่ที่พีเอช 5 และมีระยะเวลาสัมผัส 30 นาที ซึ่งเหมือนกับค่าพีเอชและระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการดูดซับครั้งแรก นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลออกจากของเสียอันตรายก็มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นั่นคือ ในการดูดซับครั้งที่สองมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลเท่ากับร้อยละ 91.23 เมื่อเทียบกับครั้งแรก (ร้อยละ 94.99) แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการดูดซับมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อย จึงสรุปได้ว่า ควรทำการนำถ้ำลอยกลับมาใช้ดูดซับนิกเกิลใหม่ เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่ไม่แตกต่างจากในครั้งแรกมากนัก

เมื่อทำการพลอตกราฟความสัมพันธ์เพื่อหาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสม สามารถสรุปได้ว่าไอโซเทอมที่เหมาะสมเป็นไอโซเทอมของ Langmuir ซึ่งมีค่า Coefficient of determination ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9433 จึงสรุปได้ว่าในการทดลองนี้เป็นการดูดซับแบบกายภาพ โดยมีการดูดซับเพียงชั้นเดียว (Monolayer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลด้วยวัสดุดูดซับที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพชนิดอื่นๆ เช่น กากโยมะพร้าว ฟางข้าว ถ่านกัมมันต์ เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับถ้ำลอย

5.2.2 เนื่องจากวิธี Carrier-in-pulp โดยใช้ผงเหล็กเป็นตัวพาสามารถคายซับโลหะหนักจากถ้ำลอยได้เพียงบางชนิดเท่านั้น จึงควรมีการศึกษาวิธีคายซับอื่นๆที่สามารถคายซับโลหะหนักได้หลายชนิดกว่าวิธีดังกล่าว และควรเป็นวิธีที่สามารถแยกโลหะหนักแต่ละชนิดออกจากกันได้ เพื่อนำโลหะหนักเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้

5.2.3 ควรทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยถ้ำลอยในของเสียอันตรายที่ค่าความเข้มข้นต่าง ๆ กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- X Querol, N Moreno, J.C Umaña, A Alastuey, E Hernández, A López-Soler and F Plana. 2002. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. **Journal of Coal Geology**. 50:413–423.
- K.S. Hui, C.Y.H. Chao and S.C. Kot. 2005. Removal of mixed heavy metal ions in wastewater by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**. 127:89–101.
- Heechan Cho, Dalyoung Oh and Kwanho Kim. 2005. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash. **Journal of Hazardous Materials**. 127:187–195.
- Serpil Cetin and Erol Pehlivan. 2007. The use of fly ash as a low cost, environmentally friendly alternative to activated carbon for the removal of heavy metals from aqueous solutions. **Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**. 298:83–87.
- Richard Diaz Alorro, Shinichi Mitani, Naoki Hiroyoshi, Mayumi Ito and Masami Tsunekawa. 2008. Recovery of heavy metals from MSW molten fly ash by carrier-in-pulp method: Fe powder as carrier. **Journal of Minerals Engineering**. 21:1094–1101.
- Deyi Wu, Yanming Sui, Shengbing He, Xinze Wang, Chunjie Li and Hainan Kong. 2008. Removal of trivalent chromium from aqueous solution by zeolite synthesized from coal fly ash. **Journal of Hazardous Materials**. 155:415–423.
- Richard Diaz Alorro, Naoki Hiroyoshi, Mayumi Ito, and Masami Tsunekawa. 2009. Recovery of heavy metals from MSW molten fly ash by CIP method. **Journal of Hydrometallurgy**.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 97:8–14.  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Marisa Nascimentoa, Paulo Sérgio Moreira Soaresb and Vicente Paulo de Souza. 2009.

Adsorption of heavy metal cations using coal fly ash modified by hydrothermal method. **Journal of Fuel**. 88:1714–1719.

Maria Visa, Cristina Bogatu and Anca Duta. 2010. Simultaneous adsorption of dyes and heavy metals from multicomponent solutions using fly ash. **Journal of Applied Surface Science**. 256:5486–5491.

S. Mohan, R. Gandhimathi. 2009. Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. **Journal of Hazardous Materials** 169:351-359.

ชุตินา เสงษ์ธรรม.(2543). การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กิตติพันธ์ บายีชัน. (ม.ป.ป.). โลหะกับการพัฒนาประเทศ. เข้าถึงได้จาก: [www.dpim.go.th/service/download?articleid=3269&F=4833](http://www.dpim.go.th/service/download?articleid=3269&F=4833) (วันที่ค้นข้อมูล: 10 สิงหาคม 2556).

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. (ม.ป.ป.). ทฤษฎีการดูดซับ. เข้าถึงได้จาก: [http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk\\_ch1.pdf](http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2551/chem0451sk_ch1.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล: 10 สิงหาคม 2556).

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. (ม.ป.ป.). หลักปฏิบัติเพื่อการป้องกันมลพิษ สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขาขุบโลหะ. เข้าถึงได้จาก: [http://oaep.diw.go.th/ctu/pdf/COP\\_Electroplating\\_th.pdf](http://oaep.diw.go.th/ctu/pdf/COP_Electroplating_th.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล: 10 สิงหาคม 2556).

กรมควบคุมมลพิษ. 2553. วิธีปฏิบัติสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำสำหรับแหล่งน้ำ. เข้าถึงได้จาก: [http://infofile.pcd.go.th/water/Water\\_CollNat\\_Manual.pdfCFID=14964743&CFTOKEN=77662754](http://infofile.pcd.go.th/water/Water_CollNat_Manual.pdfCFID=14964743&CFTOKEN=77662754) (วันที่ค้นข้อมูล: 11 สิงหาคม 2556).

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. อิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity : EN). (ม.ป.ป.). เข้าถึงได้จาก: [http://www.neutron.rmutphysi.cs.com/news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=443&Itemid=3](http://www.neutron.rmutphysi.cs.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=443&Itemid=3) (วันที่ค้นข้อมูล: 11 สิงหาคม 2556).

ห้างหุ้นส่วนจำกัด แกรนด์ไมเดส บริษัทลัสทีลิ่งส์ จำกัด. (ม.ป.ป.). ทางเลือกการใช้เถ้าลอย. เข้าถึงได้จาก: <http://www.g-midas.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=538967484&Ntype=2> (วันที่ค้นข้อมูล: 11 สิงหาคม 2556).

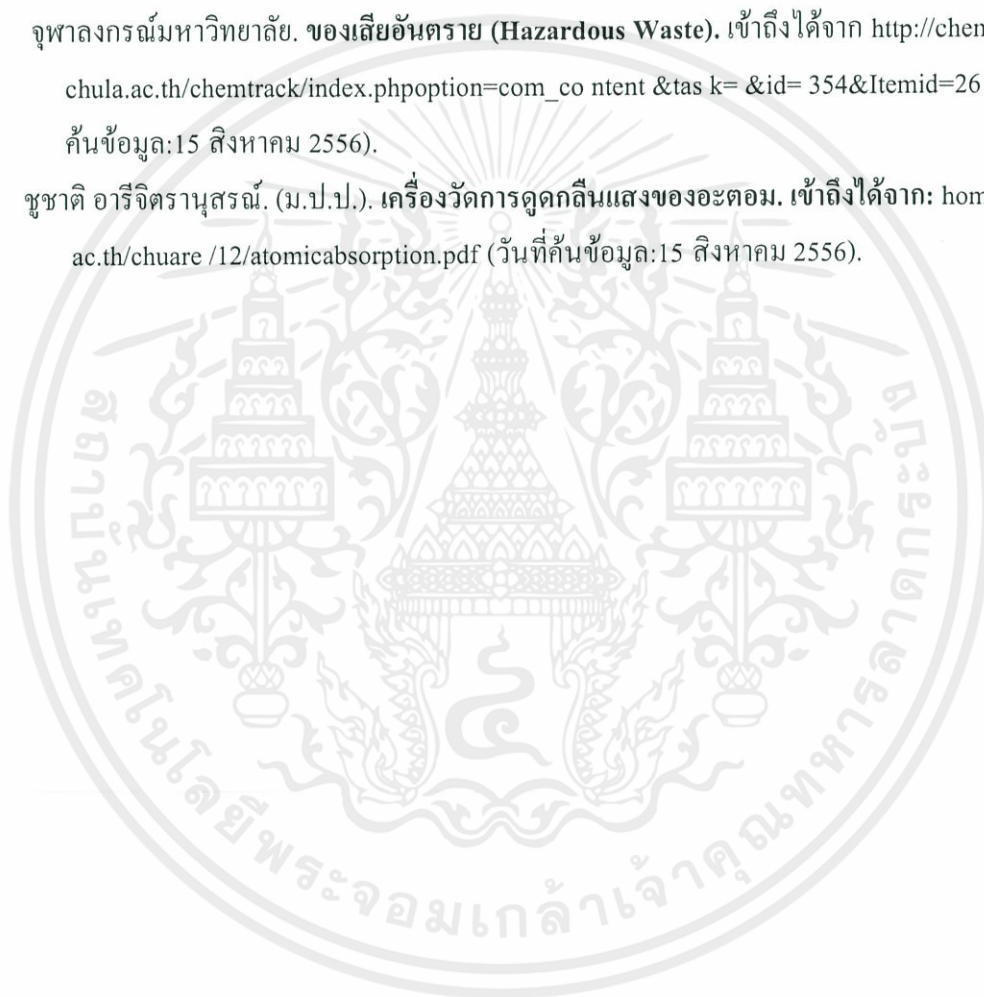
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ก่อนจะนำมาใช้เผยแพร่เพื่อการศึกษานาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์. ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (cation exchange capacity : CEC). 2554. เข้าถึงได้จาก: <http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/650-ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก?groupid=178> (วันที่ค้นข้อมูล:15 สิงหาคม 2556).

กรมควบคุมมลพิษ. การจัดการของเสียอันตราย. (ม.ป.ป.). เข้าถึงได้จาก: [www2.diw.go.th/iwmb/form/การจัดการของเสียอันตราย.doc](http://www2.diw.go.th/iwmb/form/การจัดการของเสียอันตราย.doc) (วันที่ค้นข้อมูล:15 สิงหาคม 2556).

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. ของเสียอันตราย (Hazardous Waste). เข้าถึงได้จาก [http://chemsafe.chula.ac.th/chemtrack/index.php?option=com\\_content&task=view&id=354&Itemid=26](http://chemsafe.chula.ac.th/chemtrack/index.php?option=com_content&task=view&id=354&Itemid=26) (วันที่ค้นข้อมูล:15 สิงหาคม 2556).

ชูชาติ อารีจิตรานุสรณ์. (ม.ป.ป.). เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม. เข้าถึงได้จาก: [home.kku.ac.th/chuare/12/atomicabsorption.pdf](http://home.kku.ac.th/chuare/12/atomicabsorption.pdf) (วันที่ค้นข้อมูล:15 สิงหาคม 2556).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสาร

1. สารละลายแอมโมเนียมอะซิเตต ( $\text{CH}_3\text{COO-NH}_4$ ) 1 นอร์มัล พีเอช 7
  - 1.1 ตวงกรดอะซิติก (glacial acetic acid) ร้อยละ 99.5 114 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร
  - 1.2 เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น (conc.  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) ลงไป 136 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1,980 มิลลิลิตร
  - 1.3 ปรับพีเอชของสารละลายให้ได้พีเอช 7 ด้วยกรดอะซิติกหรือแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 2 ลิตร
2. สารละลายกรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) ร้อยละ 3
 

ละลายกรดบอริก ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) 30 กรัมในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรจนมีปริมาตร 1 ลิตร
3. อินดิเคเตอร์ผสม (mixed indicator)
 

ละลายโบรโมกรีน 0.22 กรัม และเมธิลเรด 0.075 กรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 จำนวน 96 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นไฮดรอกไซด์ 0.1 N ลงไป 3.5 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชา
4. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ (Acidified, NaCl 10%)
  - 4.1 ละลายโซเดียมคลอไรด์ 100 กรัม ในน้ำกลั่น
  - 4.2 เติมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.435 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตร 1 ลิตร
5. สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล
 

ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 กรัมในน้ำกลั่น ทำให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร
6. สารละลายกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์มัล ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
  - 5.1 เจือจางกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 4.9 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตร 1 ลิตร
  - 5.2 นำไปเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์
7. สารละลายมาตรฐานนิกเกิล 4 โมลาร์ (ตัวอย่างการเตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิล)
 

นำสารละลายมาตรฐานนิกเกิล 100 พีพีเอ็ม 4 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร
8. สารละลายโซเดียมคลอไรด์ 0.5 โมลาร์ (สำหรับการคายซบนิกเกิล)
 

ละลายโซเดียมคลอไรด์ 29.25 กรัมในน้ำกลั่น ทำให้มีปริมาตรเป็น 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณ

1. การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์มัล ( $H_2SO_4$ )

1.1 การหาน้ำหนักสาร

นอร์มอล (Normality, N) คือ จำนวนกรัมสมมูลของสารละลาย 1 ลิตร

จำนวนกรัมสมมูล = น้ำหนักสาร(กรัม)/น้ำหนักสมมูล (กรัมสมมูล)

น้ำหนักสมมูล (กรัมสมมูล) = น้ำหนักสูตรของสาร (กรัม/โมล) / n

สำหรับปฏิกิริยา กรด - เบส n คือ จำนวนไฮโดรเจนในโมเลกุลของกรดที่สามารถให้ หรือ จำนวนไฮโดรเจนที่เบสสามารถทำปฏิกิริยาได้

น้ำหนักสมมูลของ  $H_2SO_4 = 98$  (กรัม/โมล) / 2

= 49 กรัมสมมูล

1.1 นอร์มัล = น้ำหนักสาร / 49 กรัมสมมูล

1.1 นอร์มัล  $\times$  49 กรัมสมมูล = 4.9 กรัม

เพราะฉะนั้น จะได้น้ำหนักของกรดซัลฟิวริก 4.9 กรัม

1.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของกรดซัลฟิวริก 0.1 นอร์มัล

ไทเทรตกรดซัลฟิวริก 50 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล

จากสูตร  $C_1V_1 = C_2V_2$

$C_1$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์

$C_2$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายกรดซัลฟิวริก

$V_1$  คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์

$V_2$  คือ ปริมาตรของสารละลายกรดซัลฟิวริก

จากการไทเทรต ใช้สารละลายมาตรฐานปฐมภูมิโซเดียมไฮดรอกไซด์ไป 10 มิลลิลิตร

$C_1V_1 = C_2V_2$

1 นอร์มัล  $\times$  10 มิลลิลิตร =  $C_2 \times$  50 มิลลิลิตร

$\frac{1 \text{ นอร์มัล} \times 10 \text{ มิลลิลิตร}}{50 \text{ มิลลิลิตร}} = 0.2 \text{ นอร์มัล}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากปฏิกิริยาจะเห็นว่า NaOH 2 โมล จะทำปฏิกิริยาพอดีกับ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1 โมล  
ดังนั้น  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.2 นอร์มัล จะเท่ากับ 0.2 นอร์มัล/2 เป็น  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เข้มข้น 0.1 นอร์มัล

2. การหาค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออน (Cation Exchange Capacity, CEC)

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

A คือ ปริมาตรของกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มาตรฐานที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง

B คือ ปริมาตรของกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มาตรฐานที่ใช้ไทเทรตแบลงค์

N คือ ความเข้มข้นของกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  มาตรฐาน (นอร์มัล)

X คือ น้ำหนักของตัวอย่างในหน่วยกรัม

จากการทดลอง ใช้ปริมาตรของกรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ไป 22.4 มิลลิลิตร ในแบลงค์ใช้ปริมาตร  
กรด  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ไป 0.3 มิลลิลิตร ใช้ตัวอย่าง 5 กรัม

$$\begin{aligned} \text{CEC (มิลลิกรัมสมมูลย์/100 กรัม)} &= \frac{(22.4 - 0.3 \text{ มิลลิลิตร}) \times 0.1 \text{ นอร์มัล} \times 100}{5 \text{ กรัม}} \\ &= 44.2 \text{ มิลลิกรัมสมมูลย์/100 กรัม} \end{aligned}$$

3. การคำนวณร้อยละการกำจัดนิกเกิล

$$\text{ร้อยละการกำจัดนิกเกิล} = \frac{\text{ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัด}}{\text{ปริมาณนิกเกิลในตัวอย่าง}} \times 100$$

จากการหาค่าพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับนิกเกิลครั้งแรก ที่พีเอช 5 มีนิกเกิลเหลือ  
ในตัวอย่าง 2.5980 มิลลิกรัมต่อลิตร ในตัวอย่างของเสียอันตรายที่ความเข้มข้นของนิกเกิล  
เริ่มต้น 34.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ร้อยละ 92.4690

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละการกำจัดนิกเกิล} &= \frac{2.5980 - 34.5 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}}{34.5 \text{ มิลลิกรัมต่อลิตร}} \times 100 \\ &= \text{ร้อยละ } 92.4690 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

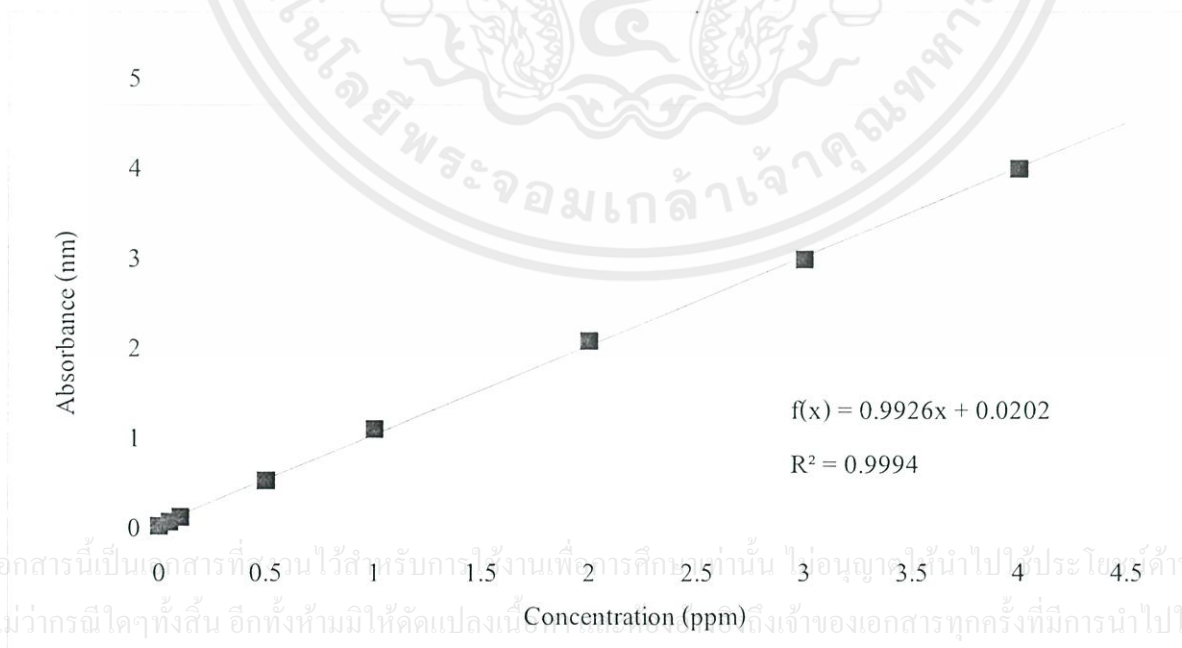
## ภาคผนวก ค

## ตัวอย่างกราฟมาตรฐานของสารละลายนิกเกิลที่วิเคราะห์โดย AAS

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานนิกเกิลที่ใช้ศึกษาหาระยะเวลา  
สัมผัสที่เหมาะสมของการดูดซับนิกเกิลครั้งที่สอง

Standard ID	Entered Conc.	Calculated Conc.
H <sub>2</sub> O	0.00	0.000
1	0.05	0.046
2	0.10	0.102
3	0.50	0.507
4	1.00	1.080
5	2.00	2.058
6	3.00	2.966
7	4.00	3.973

รูปที่ ก-1 กราฟมาตรฐานของสารละลายนิกเกิล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 0.5 วนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 3 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงนี้ Concentration (ppm) ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก - 2 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของเถ้าลอยที่ไม่ผ่านการปรับปรุง

คุณภาพ

ความเข้มข้นของ NaOH	0 hour		
	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC
0 โมลาร์	1.2	0.3	1.8
	1.2	0.3	1.8
	1.2	0.3	1.8
ค่าเฉลี่ย	1.2	0.3	1.8
S.D.	0	0	0
M	mL	mL	meq/100g

ตารางที่ ก - 3 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์เถ้าลอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.25 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง

ความเข้มข้นของ NaOH	12 hours			24 hours			36 hours		
	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC
0.25 โมลาร์	9.6	0.3	18.6	9.9	0.3	19.2	10.3	0.3	20.0
	9.6	0.3	18.6	9.8	0.3	19.0	10.3	0.3	20.0
	9.5	0.3	18.4	9.8	0.3	19.0	10.3	0.3	20.0
ค่าเฉลี่ย	9.5667	0.3000	18.5333	9.8333	0.3000	19.0667	10.3000	0.3000	20.0000
S.D.	0.0577	0.0000	0.1155	0.0577	0.0000	0.1155	0.0000	0.0000	0.0000
M	mL	mL	meq/100g	mL	mL	meq/100g	mL	mL	meq/100g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 4 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของการรีฟลักซ์เฝ้าลอยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ NaOH	12 hours			24 hours			36 hours		
	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC
0.5 โมลาร์	12.0	0.3	23.4	22.4	0.3	44.2	16.3	0.3	32.0
	12.0	0.3	23.4	22.4	0.3	44.2	16.2	0.3	31.8
	12.0	0.3	23.4	22.4	0.3	44.2	16.2	0.3	31.8
ค่าเฉลี่ย	12.0000	0.3000	23.4000	22.4000	0.3000	44.2000	16.2333	0.3000	31.8667
S.D.	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0577	0.0000	0.1155
M	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g

ตารางที่ ค - 5 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนของการรีฟลักซ์เฝ้าลอยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.0 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ NaOH	12 hours			24 hours			36 hours		
	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC
1.0 โมลาร์	3.7	0.4	6.6	5.2	0.4	9.6	12.8	0.3	25.0
	3.7	0.4	6.6	5.2	0.4	9.6	12.8	0.3	25.0
	3.7	0.4	6.6	5.2	0.4	9.6	12.8	0.3	25.0
ค่าเฉลี่ย	3.7000	0.4000	6.6000	5.2000	0.4000	9.6	12.8000	0.3000	25.0000
S.D.	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
M	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไปใช้

ตารางที่ ก - 6 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์ได้ล่อยด้วยสารละลาย  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.0 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ NaOH	12			24			36		
	hours			hours			hours		
	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC
2.0 โมลาร์	2.5	0.4	4.2	12.6	0.3	24.6	9.9	0.3	19.6
	2.5	0.4	4.2	12.6	0.3	24.6	9.9	0.3	19.6
	2.5	0.4	4.2	12.6	0.3	24.6	9.9	0.3	19.6
ค่าเฉลี่ย	2.5000	0.4000	4.2000	12.6000	0.3000	24.6000	9.9000	0.3000	19.6000
S.D.	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
M	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g

ตารางที่ ก - 7 แสดงค่าความจุในการแลกเปลี่ยนแคทไอออนของการรีฟลักซ์ได้ล่อยด้วยสารละลาย  
โซเดียมไฮดรอกไซด์ 3.0 โมลาร์ที่ 12 24 และ 36 ชั่วโมง

ความเข้มข้น ของ NaOH	12			24			36		
	hours			hours			hours		
	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC	ปริมาตร H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Blank	CEC
3.0 โมลาร์	11.0	0.3	21.4	10.2	0.3	19.8	9.0	0.3	17.4
	11.0	0.3	21.4	10.2	0.3	19.8	9.0	0.3	17.4
	11.1	0.3	21.6	10.1	0.3	19.6	9.0	0.3	17.4
ค่าเฉลี่ย	11.0333	0.3000	21.4667	10.1667	0.3000	19.7333	9.0000	0.3000	17.4000
S.D.	0.0577	0.0000	0.1155	0.0577	0.0000	0.1155	0.0000	0.0000	0.0000
M	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g	mL	mL	meq/ 100g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีนำไปใช้

ตารางที่ ค - 8 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาปริมาณแฉะลอยที่ผ่านการปรับปรุง  
คุณภาพที่เหมาะสมในการกำจัดนิกเกิล

ปริมาณแฉะลอย ต่อน้ำเสีย	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
0.5 กรัมต่อลิตร	3.2580	31.2420	90.5565
	3.1900	31.3100	90.7536
	3.2470	31.2530	90.5884
ค่าเฉลี่ย	3.2317	31.2683	90.6329
S.D.	0.0365	0.0365	0.1058
1 กรัมต่อลิตร	3.0930	31.4070	91.0348
	3.1110	31.3890	90.9826
	3.0770	31.4230	91.0812
ค่าเฉลี่ย	3.0937	31.4063	91.0329
S.D.	0.0170	0.0170	0.0493
2 กรัมต่อลิตร	3.2860	31.2140	90.4754
	3.3390	31.1610	90.3217
	3.2100	31.2900	90.6957
ค่าเฉลี่ย	3.2783	31.2217	90.4976
S.D.	0.0648	0.0648	0.1879
5 กรัมต่อลิตร	3.5030	30.9970	89.8464
	3.2850	31.2150	90.4783
	3.3240	31.1760	90.3652
ค่าเฉลี่ย	3.3707	31.1293	90.2300
S.D.	0.1163	0.1163	0.3370
10 กรัมต่อลิตร	3.2930	31.2070	90.4551
	3.2460	31.2540	90.5913
	3.2240	31.2760	90.6551
ค่าเฉลี่ย	3.2543	31.2457	90.5671
S.D.	0.0352	0.0352	0.1022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก - 9 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการกำจัดนิกเกิล

พีเอช	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
2	3.1680	31.3320	90.8174
	3.2290	31.2710	90.6406
	3.2400	31.2600	90.6087
ค่าเฉลี่ย	3.2120	31.2880	90.6890
S.D.	0.0390	0.0390	0.1120
3	2.7680	31.7320	91.9768
	2.8320	31.6680	91.7913
	2.8790	31.6210	91.6551
ค่าเฉลี่ย	2.8260	31.6740	91.8080
S.D.	0.0560	0.0560	0.1610
4	2.7610	31.7390	91.9971
	2.6420	31.8580	92.3420
	2.6660	31.8340	92.2725
ค่าเฉลี่ย	2.6900	31.8100	92.2040
S.D.	0.0630	0.0630	0.1820
5	2.5480	31.9520	92.6145
	2.6100	31.8900	92.4348
	2.6370	31.8630	92.3565
ค่าเฉลี่ย	2.5980	31.9020	92.4690
S.D.	0.0460	0.0460	0.1320

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก – 10 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการกำจัด  
นิกเกิล

ระยะเวลาสัมพัทธ์	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
15 นาที	1.9310	32.5690	94.4029
	1.9610	32.5390	94.3159
	1.9850	32.5150	94.2464
ค่าเฉลี่ย	1.9590	32.5410	94.3220
S.D.	0.0270	0.0270	0.0780
30 นาที	1.9680	32.5320	94.2957
	1.9520	32.5480	94.3420
	1.9560	32.5440	94.3304
ค่าเฉลี่ย	1.9590	32.5410	94.3227
S.D.	0.0080	0.0080	0.0240
1 ชั่วโมง	2.8770	31.6230	91.6609
	2.3790	32.1210	93.1043
	2.4090	32.0910	93.0174
ค่าเฉลี่ย	2.5550	31.9450	92.5940
S.D.	0.2790	0.2790	0.8090
1 ชั่วโมง 30 นาที	2.1620	32.3380	93.7333
	2.4840	32.0160	92.8000
	2.5170	31.9830	92.7043
ค่าเฉลี่ย	2.3880	32.1120	93.0790
S.D.	0.1960	0.1960	0.5680
2 ชั่วโมง	2.5190	31.9810	92.6986
	2.4770	32.0230	92.8203
	2.5070	31.9930	92.7333
ค่าเฉลี่ย	2.5010	31.9990	92.7510
S.D.	0.0220	0.0220	0.0630

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค – 10 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการกำจัด  
นิกเกิล (ต่อ)

ระยะเวลาสัมพัทธ์	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
3 ชั่วโมง	2.4970	32.0030	92.7623
	2.5670	31.9330	92.5594
	2.5870	31.9130	92.5014
ค่าเฉลี่ย	2.5500	31.9500	92.6080
S.D.	0.0470	0.0470	0.1370
4 ชั่วโมง	2.5960	31.9040	92.4754
	2.6450	31.8550	92.3333
	2.6710	31.8290	92.2580
ค่าเฉลี่ย	2.6370	31.8630	92.3560
S.D.	0.0380	0.0380	0.1100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค – 11 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการคาย  
 ชั้นนิกเกิลออกจากเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

Fe powder: Treated Fly Ash	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
0.25	0.1680	32.3730	99.4837
	0.1880	32.3530	99.4223
	0.1770	32.3640	99.4561
ค่าเฉลี่ย	0.1777	32.3633	99.4540
S.D.	0.0100	0.0100	0.0308
0.5	0.1435	32.3975	99.5590
	0.1365	32.4045	99.5805
	0.1390	32.4020	99.5728
ค่าเฉลี่ย	0.1397	32.4013	99.5708
S.D.	0.0035	0.0035	0.0109
1.0	0.1505	32.3905	99.5375
	0.1510	32.3900	99.5360
	0.1495	32.3915	99.5406
ค่าเฉลี่ย	0.1503	32.3907	99.5380
S.D.	0.0008	0.0008	0.0023
1.5	0.1540	32.3870	99.5268
	0.1570	32.3840	99.5175
	0.1630	32.3780	99.4991
ค่าเฉลี่ย	0.1580	32.3830	99.5145
S.D.	0.0046	0.0046	0.0141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค – 11 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาปริมาณผงเหล็กที่เหมาะสมในการคาย  
 ชับนิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล (ต่อ)

Fe powder: Treated Fly Ash	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
2.0	0.1505	32.3905	99.5375
	0.1520	32.3890	99.5329
	0.1525	32.3885	99.5314
ค่าเฉลี่ย	0.1517	32.3893	99.5339
S.D.	0.0010	0.0010	0.0032
2.5	0.1575	32.3835	99.5160
	0.1575	32.3835	99.5160
	0.1605	32.3805	99.5068
ค่าเฉลี่ย	0.1585	32.3825	99.5129
S.D.	0.0017	0.0017	0.0053
3.0	0.1455	32.3955	99.5529
	0.1480	32.3930	99.5452
	0.1480	32.3930	99.5452
ค่าเฉลี่ย	0.1472	32.3938	99.5478
S.D.	0.0014	0.0014	0.0044

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 12 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่  
เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอย

NaCl (โมลาร์)	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
0.25	0.1160	32.4250	99.6435
	0.1190	32.4220	99.6343
	0.1200	32.4210	99.6312
ค่าเฉลี่ย	0.1183	32.4227	99.6364
S.D.	0.0021	0.0021	0.0064
0.5	0.1055	32.4355	99.6758
	0.1095	32.4315	99.6635
	0.1085	32.4325	99.6666
ค่าเฉลี่ย	0.1078	32.4332	99.6686
S.D.	0.0021	0.0021	0.0064
1	0.1320	32.4090	99.5944
	0.1355	32.4055	99.5836
	0.1325	32.4085	99.5928
ค่าเฉลี่ย	0.1333	32.4077	99.5903
S.D.	0.0019	0.0019	0.0058
2	0.1460	32.3950	99.5513
	0.1435	32.3975	99.5590
	0.1455	32.3955	99.5529
ค่าเฉลี่ย	0.1450	32.3960	99.5544
S.D.	0.0013	0.0013	0.0041

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค – 12 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่  
เหมาะสมในการคายซับนิกเกิลออกจากถ้ำลอย (ต่อ)

NaCl (โมลาร์)	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
3	0.1560	32.3850	99.5206
	1.6620	30.8790	94.8926
	0.1665	32.3745	99.4883
ค่าเฉลี่ย	0.6615	31.8795	97.9672
S.D.	0.8665	0.8665	2.6627
4	0.1185	32.4225	99.6358
	0.1220	32.4190	99.6251
	0.1220	32.4190	99.6251
ค่าเฉลี่ย	0.1208	32.4202	99.6287
S.D.	0.0020	0.0020	0.0062
5	0.1225	32.4185	99.6236
	0.1265	32.4145	99.6113
	0.1245	32.4165	99.6174
ค่าเฉลี่ย	0.1245	32.4165	99.6174
S.D.	0.0020	0.0020	0.0061

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก – 13 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการคายชั้น  
นิกเกิลออกจากเต้าลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

ระยะเวลาสัมพัทธ์	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
10 นาที	0.1085	32.4325	99.6662
	0.1070	32.4340	99.6708
	0.1080	32.4330	99.6677
ค่าเฉลี่ย	0.1078	32.4332	99.6682
S.D.	0.0008	0.0008	0.0024
15 นาที	0.1150	32.4260	99.6462
	0.0990	32.4420	99.6954
	0.0990	32.4420	99.6954
ค่าเฉลี่ย	0.1043	32.4367	99.6790
S.D.	0.0092	0.0092	0.0284
30 นาที	0.0960	32.4450	99.7046
	0.0920	32.4490	99.7169
	0.0945	32.4465	99.7092
ค่าเฉลี่ย	0.0942	32.4468	99.7103
S.D.	0.0020	0.0020	0.0062
1 ชั่วโมง	0.0800	32.4610	99.7538
	0.0760	32.4650	99.7662
	0.0785	32.4625	99.7585
ค่าเฉลี่ย	0.0782	32.4628	99.7595
S.D.	0.0020	0.0020	0.0062

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค – 13 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการคายชั้น  
นิกเกิลออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล (ต่อ)

ระยะเวลาสัมพัทธ์	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
2 ชั่วโมง	0.0970	32.4440	99.7015
	0.0995	32.4415	99.6938
	0.1010	32.4400	99.6892
ค่าเฉลี่ย	0.0992	32.4418	99.6949
S.D.	0.0020	0.0020	0.0062
3 ชั่วโมง	0.1055	32.4355	99.6754
	0.1060	32.4350	99.6738
	0.1060	32.4350	99.6738
ค่าเฉลี่ย	0.1058	32.4352	99.6744
S.D.	0.0003	0.0003	0.0009
ชั่วโมง 4	0.0605	32.4805	99.8141
	0.0600	32.4810	99.8156
	0.0600	32.4810	99.8156
ค่าเฉลี่ย	0.0602	32.4808	99.8151
S.D.	0.0003	0.0003	0.0009
5 ชั่วโมง	0.1075	32.4335	99.6692
	0.1090	32.4320	99.6646
	0.1085	32.4325	99.6662
ค่าเฉลี่ย	0.1083	32.4327	99.6667
S.D.	0.0008	0.0008	0.0024

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 14 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการคายชั้นนิกเกิล  
ออกจากเด็ลลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล

พีเอช	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
2	0.0580	32.4830	99.8215
	0.0530	32.4880	99.8369
	0.0580	32.4830	99.8215
ค่าเฉลี่ย	0.0563	32.4847	99.8267
S.D.	0.0029	0.0029	0.0089
4	0.2020	32.3390	99.3792
	0.2010	32.3400	99.3823
	0.2000	32.3410	99.3854
ค่าเฉลี่ย	0.2010	32.3400	99.3823
S.D.	0.0010	0.0010	0.0031
6	0.1850	32.3560	99.4315
	0.1860	32.3550	99.4284
	0.1840	32.3570	99.4346
ค่าเฉลี่ย	0.1850	32.3560	99.4315
S.D.	0.0010	0.0010	0.0031
8	0.1750	32.3660	99.4622
	0.1730	32.3680	99.4684
	0.1700	32.3710	99.4776
ค่าเฉลี่ย	0.1727	32.3683	99.4694
S.D.	0.0025	0.0025	0.0077

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 14 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการคายซับนิกเกิล  
ออกจากถ้ำลอยที่ผ่านการดูดซับนิกเกิล (ต่อ)

พีเอช	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
10	0.1960	32.3450	99.3977
	0.2040	32.3370	99.3731
	0.2050	32.3360	99.3700
ค่าเฉลี่ย	0.2017	32.3393	99.3803
S.D.	0.0049	0.0049	0.0152
12	0.2320	32.3090	99.2871
	0.2410	32.3000	99.2594
	0.2360	32.3050	99.2748
ค่าเฉลี่ย	0.2363	32.3047	99.2737
S.D.	0.0045	0.0045	0.0139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก – 15 แสดงการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับนิกเกิล

ปริมาณแก๊สต่อเนื้อเยื่อ	Ce	qe	Ce/qe	Log Ce	Log Ce/qe
0.5 กรัมต่อลิตร	1.4980	66.0040	0.0227	0.1755	-1.6441
	1.5045	65.9910	0.0228	0.1774	-1.6421
	1.5105	65.9790	0.0229	0.1791	-1.6403
ค่าเฉลี่ย	1.5043	65.9913	0.0228	0.1773	-1.6421
S.D.	0.0063	0.0125	0.0001	-2.2040	-4.0041
1 กรัมต่อลิตร	0.9250	33.5750	0.0276	-0.0339	-1.5599
	0.9265	33.5735	0.0276	-0.0332	-1.5592
	0.9305	33.5695	0.0277	-0.0313	-1.5572
ค่าเฉลี่ย	0.9273	33.5727	0.0276	-0.0328	-1.5587
S.D.	0.0028	0.0028	0.0001	-2.5462	-4.0603
2 กรัมต่อลิตร	0.9725	16.7638	0.0580	-0.0121	-1.2365
	0.9765	16.7618	0.0583	-0.0103	-1.2346
	0.9780	16.7610	0.0583	-0.0097	-1.2340
ค่าเฉลี่ย	0.9757	16.7622	0.0582	-0.0107	-1.2350
S.D.	0.0028	0.0014	0.0002	-2.5462	-3.7581
5 กรัมต่อลิตร	0.9945	6.7011	0.1484	-0.0024	-0.8285
	0.9995	6.7001	0.1492	-0.0002	-0.8263
	0.9995	6.7001	0.1492	-0.0002	-0.8263
ค่าเฉลี่ย	0.9978	6.7004	0.1489	-0.0009	-0.8270
S.D.	0.0029	0.0006	0.0004	-2.5396	-3.3530
10 กรัมต่อลิตร	1.0745	3.3426	0.3215	0.0312	-0.4929
	1.0810	3.3419	0.3235	0.0338	-0.4902
	1.0855	3.3415	0.3249	0.0356	-0.4883
ค่าเฉลี่ย	1.0803	3.3420	0.3233	0.0336	-0.4904
S.D.	0.0055	0.0006	0.0017	-2.2573	-2.7675

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค - 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเถ้าลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพที่ใช้กับ ปริมาณนิกเกิลที่เหลือในของเสียอันตราย

ปริมาณเถ้าลอยต่อน้ำเสีย	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือในหน่วยมิลลิกรัมต่อกรัม
0.5 กรัมต่อลิตร	1.4980
	1.5045
	1.5105
ค่าเฉลี่ย	1.5043
S.D.	0.0063
1 กรัมต่อลิตร	0.9250
	0.9265
	0.9305
ค่าเฉลี่ย	0.9273
S.D.	0.0028
2 กรัมต่อลิตร	0.9725
	0.9765
	0.9780
ค่าเฉลี่ย	0.9757
S.D.	0.0028
5 กรัมต่อลิตร	0.9945
	0.9995
	0.9995
ค่าเฉลี่ย	0.9978
S.D.	0.0029
10 กรัมต่อลิตร	1.0745
	1.0810
	1.0855
ค่าเฉลี่ย	1.0803
S.D.	0.0055

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-17 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของค่าพีเอชในการดูดซับนิกเกิลครั้งที่สอง

พีเอช	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่ถูกกำจัดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
2	3.0420	31.4580	91.1826
	3.0400	31.4600	91.1884
	3.3500	31.1500	90.2899
ค่าเฉลี่ย	3.1440	31.3560	90.8870
S.D.	0.1784	0.1784	0.5171
3	3.0870	31.4130	91.0522
	3.1070	31.3930	90.9942
	3.0850	31.4150	91.0580
ค่าเฉลี่ย	3.0930	31.4070	91.0348
S.D.	0.0122	0.0122	0.0353
4	3.0040	31.4960	91.2928
	3.0120	31.4880	91.2696
	2.9980	31.5020	91.3101
ค่าเฉลี่ย	3.0047	31.4953	91.2908
S.D.	0.0070	0.0070	0.0204
5	2.9780	31.5220	91.3681
	2.9810	31.5190	91.3594
	3.0070	31.4930	91.2841
ค่าเฉลี่ย	2.9887	31.5113	91.3372
S.D.	0.0159	0.0159	0.0462

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-18 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิลของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการดูดซับ  
นิกเกิลครั้งที่สอง

ระยะเวลาสัมพัทธ์	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร	ร้อยละการกำจัด
15 นาที	2.1977	32.3023	93.6299
	2.2480	32.2520	93.4841
	2.0980	32.4020	93.9188
ค่าเฉลี่ย	2.1812	32.3188	93.6776
S.D.	0.0763	0.0763	0.2213
30 นาที	1.9860	32.5140	94.2435
	1.9740	32.5260	94.2783
	2.0080	32.4920	94.1797
ค่าเฉลี่ย	1.9893	32.5107	94.2338
S.D.	0.0172	0.0172	0.0500
1 ชั่วโมง	2.4090	32.0910	93.0174
	2.5022	31.9978	92.7472
	2.1677	32.3323	93.7168
ค่าเฉลี่ย	2.3596	32.1404	93.1605
S.D.	0.1726	0.1726	0.5004
1 ชั่วโมง 30 นาที	1.9310	32.5690	94.4029
	1.9610	32.5390	94.3159
	1.9650	32.5350	94.3043
ค่าเฉลี่ย	1.9523	32.5477	94.3411
S.D.	0.0186	0.0186	0.0539
2 ชั่วโมง	1.9450	32.5550	94.3623
	1.9530	32.5470	94.3391
	1.9560	32.5440	94.3304
ค่าเฉลี่ย	1.9513	32.5487	94.3440
S.D.	0.0057	0.0057	0.0165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-18 แสดงร้อยละการกำจัดนิกเกิดของการศึกษาผลของระยะเวลาสัมพัทธ์ในการดูฉบับ  
นิกเกิดครั้งที่สอง (ต่อ)

3 ชั่วโมง	1.9320	32.5680	94.4000
	1.8740	32.6260	94.5681
	2.1890	32.3110	93.6551
ค่าเฉลี่ย	1.9983	32.5017	94.2077
S.D.	0.1676	0.1676	0.4859
4 ชั่วโมง	1.9920	32.5080	94.2261
	1.9720	32.5280	94.2841
	1.9530	32.5470	94.3391
ค่าเฉลี่ย	1.9723	32.5277	94.2831
S.D.	0.0195	0.0195	0.0565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้