

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอน
EFFECT OF TEMPERATURE ON THE EXTRACTION OF
METAL CONTAMINATED IN THE SLUDGE



T117206



เลขหมู่
เลขทะเบียน 117206
วันเดือนปี 19 08 2554

b. 123415AX
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2553
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EFFECT OF TEMPERATURE ON THE EXTRACTION OF
METAL CONTAMINATED IN THE SLUDGE**



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

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า **ACADEMIC YEAR 2010** หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อการสกัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอน



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัด โลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอน
EFFECT OF TEMPERATURE ON THE EXTRACTION OF
METAL CONTAMINATED IN THE SLUDGE

ชื่อนักศึกษา กมลวรรณ สวายสุขวิชา
พิมพ์ขวัญ ลิมปโสภา
ศศิภรณ์ ทับทิมทอง

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม ประจำปีการศึกษา 2553

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ. ดร. สุวรรณิ จรรยาพูน	
ผศ. ดร. อุตาร์ตัน ฉาวชัยสิทธิ์	
ผศ. ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้สิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการสกัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในกากตะกอน
ชื่อนักศึกษา	กมลวรรณ สวดยุทธวิธา พิมพ์ขวัญ ลิมปโปสภา ศศิภรณ์ ทับทิมทอง
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ. ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและเวลาในการอบกากตะกอนที่มีต่อประสิทธิภาพการสกัดโลหะออกจากกากตะกอน ก่อนนำตะกอนไปใช้ ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติพบว่าตะกอนมีความเป็นกลาง ($\text{pH} = 6.53$) มีค่า CEC สูง ($18.23 \text{ meq}/100\text{g}$) และปริมาณสารอินทรีย์สูง (11.2%) กากตะกอนมีความชื้น 87.65% ในการศึกษาโลหะออกไซด์พบว่า CaO , SO_3 และ CuO มีปริมาณสูงสุด ในการทำการทดลองได้ทำการแปรผันค่าอุณหภูมิในการอบ คือ 60°C , 80°C และ 100°C และเวลาในการอบ (1 ชั่วโมง, 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง) โลหะจะถูกสกัดออกได้ดีที่สุดหลังจากอบที่ 60°C เพราะว่ายังอบนานยิ่งทำให้ความชื้นเหลือในตะกอนน้อยและยิ่งทำให้ ประสิทธิภาพในการสกัดโลหะออกมาได้มากขึ้น จากการสกัดลำดับชั้นพบว่าโลหะถูกสกัดออกมาได้มากที่สุดในรูปแบบออกซิไดซ์และรูปที่ยึดติดแน่นกับ โครงสร้างของซิลิเกต โลหะจะถูกสกัดออกจากกากตะกอนที่ทำการอบได้มากกว่าตะกอนที่ไม่ได้ออบ

คำสำคัญ : กากตะกอน, การสกัดแบบลำดับชั้น, ความชื้น, อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title Effect of Temperature on the Extraction of Metal
Contaminated in the sludge.

Students Miss Kamolwan Suaysukvicha
Miss Pimkhwan Limpasopa
Miss Sasiporn Tubtintong

Degree Bachelor of Science

Major Program Environmental Resource Chemistry

Academic Year 2010

Advisor Asst. Prof. Dr. Chompoonut Chaiyaraksa

ABSTRACT

The aim of this special project was to study the effect of sludge incubated temperature and time to the metal extracted efficiency. The sludge was characterised prior to using. The sludge was found to be neutral (pH = 6.53) with quite high CEC (18.23 meq/100g) and its organic matter (OM) was high (11.2 %). The moisture content of sludge was about 87.65%. Among metal oxide CaO, SO₃ and CuO were found most. In this experiments, incubated temperature (60°C, 80°C and 100°C) and time (1hr, 6hr, 12hr and 24 hr) were varied. Metals were extracted most after incubation at 60°C. The longer the incubation time, the lower of sludge moisture content, but the higher the metal extracted efficiency. From sequential extraction, metals in the form of oxidized and combined with silica were found to be extracted most. The metal extracted efficiency was higher when sludge was incubated

Keywords : Sludge, Sequential extraction, Moisture, Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องมาจากได้รับความร่วมมือและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่าย ทางผู้วิจัยโครงการพิเศษจึงขอกราบขอบพระคุณ

ผศ.ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมีทุกท่านที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำและความช่วยเหลือในการวิจัยโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด นิคมอุตสาหกรรม ลาดกระบัง ที่ให้ตัวอย่างกากตะกอนมาใช้ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทำโครงการพิเศษทำยนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และเพื่อนๆทุกคนที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาที่ดี

กมลวรรณ สวสุขวิชา
พิมพ์ขวัญ ลิ้มปัสภา
ศศิภรณ์ ทับทิมทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	IX
คำย่อและสัญลักษณ์	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความสำคัญของสถิติ	4
2.2 ประเภทของสถิติ	4
2.2.1 สถิติขั้นต้น	4
2.2.2 สถิติขั้นสอง	4
2.2.3 สถิติเคมี	4
2.2.4 สถิติย่อยแล้ว	5
2.3 วิธีการบำบัดและกำจัดสถิติ	5
2.3.1 การทำขึ้นสถิติ	7
2.3.1.1 ถังทำขึ้นด้วยแรงโน้มถ่วง	8
2.3.1.2 การลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือดีเอเอฟ	9
2.3.1.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง	10
2.3.2 การปรับเสถียรสถิติ	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงบนสื่อและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2.1 ดึงย่อยแอนแอโรบิก	11
2.3.2.2 ดึงย่อยแอโรบิก	14
2.3.2.3 การหมักทำปุ๋ย	15
2.3.2.4 การปรับเสถียรด้วยปูนขาว	16
2.3.3 การแยกน้ำจากสลัดจ์	16
2.3.3.1 ลานตากสลัดจ์	19
2.3.3.2 สายพานรีดน้ำ	20
2.3.3.3 เครื่องอัดกรอง	20
2.3.4 การกำจัดสลัดจ์	21
2.3.4.1 การนำไปทิ้ง	21
2.3.4.2 การนำสลัดจ์ไปใช้ประโยชน์	22
2.4 โลหะหนัก	22
2.5 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	26
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	28
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี	28
3.1.1 อุปกรณ์	28
3.1.2 สารเคมี	28
3.2 แหล่งที่มาของกากตะกอน	29
3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน	30
3.4 การทำการทดลอง	30
3.5 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	32
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การสกัดโลหะหนักออกจากสลัดจ์โดยใช้วิธีการสกัดลำดับชั้น ของ Tessier ที่อุณหภูมิ และระยะเวลาแตกต่างกันแตกต่างกัน	35
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	40
5.1 สรุปผลการทดลอง	40
5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	40
5.1.2 การศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่มีอุณหภูมิ ระยะเวลาในการอบที่แตกต่างกัน โดยการสกัดแบบลำดับชั้น	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
เอกสารอ้างอิง	42
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์กากตะกอน	44
ภาคผนวก ข วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับชั้น (Sequential extraction)	48
ภาคผนวก ค ผลการทดลอง	50
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ทางสถิติ	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อเสียของการทำขึ้นสลัดจ์	7
2.2 ข้อดีและข้อเสียของการปรับเสถียรสลัดจ์แต่ละวิธี	13
2.3 ข้อดีและข้อเสียของการแยกน้ำจากสลัดจ์ด้วยวิธีต่างๆ	18
2.4 ธาตุอาหารของปุ๋ยหมักและสลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน	22
3.1 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน	30
4.1 ค่าทางกายภาพที่วัดได้ของคุณสมบัติกากตะกอนต่างๆ	32
4.2 ตารางการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่า CEC (ศูนย์ฝึกรังสีวิศวกรรมเกษตร)	33
4.3 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของกากตะกอน	34
ค-1 ปริมาณนิกเกิลในตัวอย่างกากตะกอน	51
ค-2 ปริมาณตะกั่วในตัวอย่างกากตะกอน	52
ค-3 ปริมาณทองแดงในตัวอย่างกากตะกอน	53
ค-4 ปริมาณสังกะสีในตัวอย่างกากตะกอน	54
ค-5 ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างกากตะกอน	55
ค-6 ปริมาณโครเมียมในตัวอย่างกากตะกอน	56
ค-7 เปอร์เซ็นต์ความชื้น	57
ค-8 น้ำหนักกากตะกอนแห้ง	58
ค-9 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง	59
ค-10 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง	66
ค-11 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง	72
ค-12 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้น โดยไม่มีการอบกากตะกอน	78
ง-1 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดหลังจาก	82

กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ง-2 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณตะกั่วที่ถูกสกัดหลังจาก กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ	83
ง-3 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณทองแดงที่ถูกสกัดหลังจาก กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ	84
ง-4 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณสังกะสีที่ถูกสกัดหลังจาก กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ	85
ง-5 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณแคดเมียมที่ถูกสกัดหลังจาก กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ	86
ง-6 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณโครเมียมที่ถูกสกัดหลังจาก กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการและขั้นตอนการบำบัดและกำจัดสลัดจ์โดยทั่วไป	6
2.2 ภาพตัดของถังทำขึ้นด้วยแรงโน้มถ่วง	8
2.3 แผนภาพการไหลของถังทำขึ้นด้วยดีเอเอฟ	9
2.4 ภาพตัดของเครื่องหมุนเหวี่ยง	10
2.5 แผนภาพการไหลแสดงขั้นตอนการหมักทำปุ๋ย	15
2.6 ลักษณะของลานทรายตากสลัดจ์	19
2.7 การทำงานของเครื่องสายพานรีดน้ำ	20
2.8 การแยกน้ำจากสลัดจ์เครื่องอัดกรอง	21
3.1 จุดเก็บตัวอย่างกากตะกอน	29
3.2 ตัวอย่างกากตะกอน	29
3.3 การสกัดโลหะรูปแบบต่างๆ ออกจากสลัดจ์แบบเป็นลำดับขั้น	31
4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ได้จากการสกัดลำดับขั้นระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบกากตะกอน	35
ง-1 กราฟมาตรฐานของนิกเกิล	50
ง-2 กราฟมาตรฐานของตะกั่ว	50
ง-3 กราฟมาตรฐานของทองแดง	50
ง-4 กราฟมาตรฐานของสังกะสี	50
ง-5 กราฟมาตรฐานของแคดเมียม	50
ง-6 กราฟมาตรฐานของโครเมียม	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

AAS	เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชัน โฟโตมิเตอร์
CEC	ความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก
DI	น้ำปราศจากไอออน
hr	ชั่วโมง
kg	กิโลกรัม
M	โมลาร์
mg	มิลลิกรัม
min	นาที
ml	มิลลิลิตร
NH ₄ OH	แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
pH	ระดับความเป็นกรดต่าง
rpm	รอบต่อนาที
v/v	ปริมาตรต่อปริมาตร
w/w	น้ำหนักต่อน้ำหนัก
XRF	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโตรเมตรี
°c	องศาเซลเซียส
%	เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความจำเป็นและความสำคัญองงานวิจัย

ในสภาวะปัจจุบันอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วเพื่อรองรับการเจริญเติบโตของประเทศและมีกำลังการผลิตที่เพิ่มมากขึ้นด้วย เพื่อให้เพียงพอับความต้องการของจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้ว่าสิ่งที่ตามมาจากการขยายตัวของธุรกิจภาคอุตสาหกรรมทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น อากาศเสีย น้ำเน่าเสีย ขยะล้นเมือง และพวกกากของเสียต่างๆ เป็นต้น การบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีววิทยาที่นิยมใช้กันมากก็คือระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ซึ่งจะได้กากตะกอนน้ำเสียหรือที่เรียกว่าสลัดจ์ (Sludge) ออกมาเป็นจำนวนมากและจะต้องทำการบำบัดเสียก่อนที่จะนำไปกำจัดต่อไป

จากการสำรวจข้อมูลปริมาณการเกิดของเสียอันตรายของกรมควบคุมมลพิษพบว่า ปัญหาสำคัญที่กำลังเป็นที่วิตกกังวล คือ สารอันตรายและของเสียอันตราย มีแนวโน้มจะทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนรุนแรงมากขึ้น เพราะการนำเข้าสารอันตรายบางชนิดยังไม่มี การควบคุม จากการใช้สารอันตรายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดปัญหาของเสียอันตรายตามมา ข้อมูลปริมาณของเสียอันตรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอด ในปี 2542 มีปริมาณของเสียอันตรายรวม 1.6 ล้านตัน และเพิ่มขึ้นเป็น 1.86 ล้านตันในปี 2551 โดยภาคอุตสาหกรรมเป็นตัวการสำคัญที่สุด ของเสียที่เกิดขึ้นมีทั้งขยะอิเล็กทรอนิกส์ เคมีภัณฑ์เสื่อมสภาพ และจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันหล่อลื่น ยางรถยนต์ ส่งผลให้ในปี 2552 มีปริมาณของเสียอันตรายประมาณ 3.13 ล้านตัน เพิ่มสูงขึ้นจากปี 2550 ถึงร้อยละ 70 โดยเป็นของเสียอันตรายจากชุมชน 150.68 ล้านตัน และของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรมประมาณ 2.45 ล้านตัน โดยของเสียอันตรายส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 70 เกิดขึ้นในเขตกรุงเทพมหานคร ปริมณฑล และภาคตะวันออก (กรมควบคุมมลพิษ, 2552) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการสำรวจปัจจุบันนี้ยังมีมากขึ้นเรื่อยๆ และกากตะกอนหรือสลัดจ์ก็เป็นส่วนหนึ่งในการกำจัดของเสียอันตรายเช่นกันเพราะสลัดจ์ส่วนใหญ่ที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียนั้นมีการปนเปื้อนของโลหะหนักอยู่มากเนื่องจากปริมาณโลหะหนักในสลัดจ์นั้นมีทั้งที่บำบัดยากและง่ายรวมถึงในรูปที่มีการระเหยออกไปได้ จึงต้องมีการศึกษาของวิธีการบำบัดกากตะกอนทั้งทางกายภาพและทางเคมีรวมทั้งการพัฒนาการสกัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กากตะกอนน้ำเสียหรือสลัดจ์หมายถึงส่วนวัสดุที่เคลื่อนที่ไป หรือแขวนลอยไปหรือ ตกตะกอน โดยน้ำเป็นตัวการ (วีระพล, 2531) หรือ หมายถึงส่วนของวัสดุ ของแข็ง สารอินทรีย์หรือ สิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น ซากจุลินทรีย์ที่รวมตัวกัน ฯลฯ ที่ถูกพัดพาให้เคลื่อนตัว แขวนลอยหรือ ตกตะกอน โดยน้ำเป็นตัวการ (เสกสรรค์, 2543)

ตะกอนที่เกิดขึ้นจากระบบน้ำเสียในปัจจุบันมีปริมาณมาก จึงมีการนำเอากากตะกอนไปใช้ ประโยชน์ ในด้านการเกษตร การทำปุ๋ยคอก นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาการนำไปใช้เกี่ยวกับเซรามิก ได้อีกด้วย ทั้งนี้ทั้งนั้นกากตะกอนที่นำมาใช้ประโยชน์ต้องมีการบำบัดเสียก่อนซึ่งในปัจจุบัน สามารถทำได้หลายวิธีและมีการคิดค้นปรับปรุงวิธีพัฒนางานวิจัยอยู่ตลอด

ดังนั้นจึงเป็นที่มาของปัญหาสำหรับการทำรายงานการวิจัยในครั้งนี้คือ การวิเคราะห์โลหะหนักในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง แต่ในขั้นตอนการวิเคราะห์ต้องมีการอบ กากตะกอนให้แห้งเสียก่อน ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าเมื่อกากตะกอนที่อบให้แห้งที่อุณหภูมิที่ต่างกัน อาจจะส่งผลให้โลหะหนักในกากตะกอนยึดติดกับกากตะกอนแน่นมากขึ้นทำให้ไม่สามารถสกัด โลหะหนักออกจากกากตะกอน ได้หมด ในการวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งที่จะศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาและ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบกากตะกอนที่มีต่อความยากง่ายในการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการอบที่มีต่อความชื้นและรูปแบบของ โลหะหนักในกาก ตะกอน
2. ศึกษาประสิทธิภาพสูงสุดในการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอน โดยตัวแปรที่สนใจ คือ อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบกากตะกอนที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของกากตะกอนอันได้แก่ พีเอช สารอินทรีย์ ปริมาณ ออกไซด์ของ โลหะ
2. ศึกษาปริมาณโลหะหนักรูปแบบต่างๆ (ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง โครเมียม แคดเมียมและ นิกเกิล) ในกากตะกอนก่อนอบ
3. แปรผันค่าอุณหภูมิในการอบกากตะกอนดังนี้ คือ 60 °C, 80 °C และ 100 °C และแปรค่า เวลาในการอบกากตะกอนดังนี้ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง วัดค่าความชื้นหลังการอบ
4. สกัดโลหะออกจากกากตะกอนด้วยวิธีสกัดแบบลำดับขั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
5. จากผลการทดลองข้างต้น นำไปศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนักสูงสุด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสกัดโลหะหนักออกจากสัต์จันชนิดอื่นๆ ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของสลัดจ์

กากตะกอน หรือ สลัดจ์ (Sludge) หมายถึง ของแข็งที่แยกออกจากน้ำเสียหรือของแข็งส่วนเกินที่ได้จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพหรือทางเคมี ดังนั้น ลักษณะทางกายภาพและทางเคมี รวมถึงปริมาณของสลัดจ์ขึ้นอยู่กับกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยตรง

2.2 ประเภทของสลัดจ์

2.2.1 สลัดจ์ขั้นต้น (Primary sludge)

สลัดจ์ขั้นต้นเป็นสลัดจ์ที่เกิดจากของแข็งที่จมตัวได้และถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยตรงด้วยกระบวนการบำบัดขั้นต้น เช่น ถังตกตะกอน(ขั้นต้น) เป็นต้น สลัดจ์ขั้นต้นส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารอินทรีย์ (อนุภาคอินทรีย์) และประกอบด้วยสารอนินทรีย์ (กรวดทราย) อีกบางส่วน

2.2.2 สลัดจ์ขั้นสอง (Secondary sludge)

สลัดจ์ขั้นสองเป็นสลัดจ์ส่วนเกินที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการทางชีวภาพในบางกรณี เช่น ระบบเอส ระบบโปรยกรอง ระบบอาร์บีซี เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการดังกล่าว จุลินทรีย์ในระบบจะใช้สารอินทรีย์ (ในน้ำเสีย) เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานเพื่อสร้างเซลล์ใหม่ จึงทำให้จุลินทรีย์ในระบบเพิ่มขึ้น ดังนั้น จำเป็นต้องระบายจุลินทรีย์บางส่วนทิ้งบ้าง เพื่อคงความเข้มข้นจุลินทรีย์ในระบบให้คงที่หรือทำให้ระบบมีสถานะคงตัว (Steady state) จุลินทรีย์ที่ระบายทิ้งดังกล่าว เรียกว่า สลัดจ์ส่วนเกิน (Excess sludge) ดังนั้น สลัดจ์ขั้นสองจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทางชีวภาพจะประกอบด้วยเซลล์จุลินทรีย์เป็นหลัก

2.2.3 สลัดจ์เคมี (Chemical sludge)

สลัดจ์เคมีเป็นสลัดจ์ส่วนเกินที่เกิดจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำด้วยกระบวนการทางเคมี เช่น การกำจัดของแข็งแขวนลอยด้วยกระบวนการโคแอกกูเลชัน (coagulation) การกำจัดฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนผลึก (Precipitation) เป็นต้น ดังนั้นสลัดจ์เคมีย่อมประกอบด้วยสารประกอบระหว่างสารมลพิษที่ต้องการกำจัดกับสารเคมีที่เติมลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 สลัดจ์ย่อยแล้ว (Digested sludge)

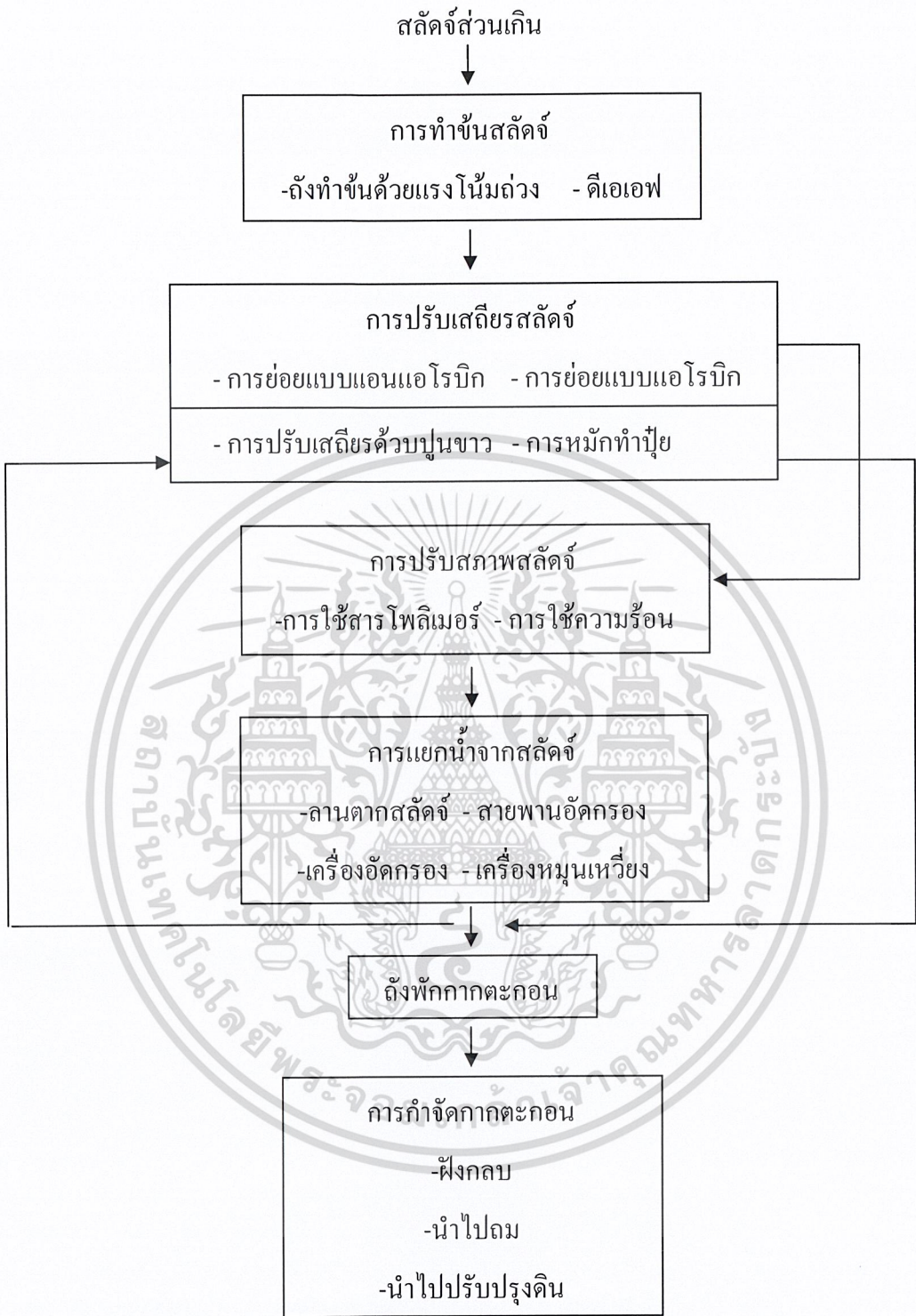
สลัดจ์ย่อยแล้วเป็นสลัดจ์ที่มีความคงตัว และไม่มีปัญหาการเน่าเหม็นเมื่อนำไปกำจัดในขั้นตอนสุดท้ายหรือนำไปใช้ประโยชน์ สลัดจ์ย่อยแล้วอาจเป็นสลัดจ์ขั้นต้นหรือสลัดจ์ขั้นสองที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรสลัดจ์แล้ว เช่น ถังย่อยสลัดจ์แเอโรบิก ถังย่อยสลัดจ์แอนแอโรบิก เป็นต้น หรืออาจเป็นสลัดจ์ขั้นสองในบางกรณี เช่น ระบบเอสแบบเติมอากาศช่วงเวลา เป็นต้น

2.3 วิธีการบำบัดและกำจัดสลัดจ์

สลัดจ์ส่วนเกินที่เกิดขึ้นจากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำจะต้องถูกบำบัดอย่างเหมาะสม เพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำสลัดจ์ไปกำจัดในขั้นตอนสุดท้ายหรือนำสลัดจ์ดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ต่อไป กระบวนการและขั้นตอนการบำบัดสลัดจ์ขึ้นอยู่กับประเภทหรือลักษณะทางกายภาพและเคมีของสลัดจ์ แต่โดยทั่วไปสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กระบวนการและขั้นตอนการบำบัดและกำจัดสลัดจ์โดยทั่วไป

(หมายเหตุ - หน่วยกระบวนการที่เป็นเส้นประอาจจะมีหรือไม่มีก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะของสลัดจ์ เช่น ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินเข้มข้นมากกว่าร้อยละ 1 การทำขึ้นสลัดจ์อาจจะไม่มีความจำเป็น ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความคงตัวแล้วก็ไม่จำเป็นต้องปรับเสถียรสลัดจ์อีก ถ้าแยกน้ำจากสลัดจ์ด้วยลานตากสลัดจ์ ก็ไม่จำเป็นต้องมีการปรับสภาพสลัดจ์ก่อน เป็นต้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อแหล่งอื่นและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การทำชั้นสลัดจ์ (Sludge thickening)

การทำชั้นสลัดจ์เป็นขั้นตอนแรกของการบำบัดสลัดจ์ เพื่อเพิ่มความเข้มข้นสลัดจ์ ซึ่งทำให้มีปริมาตรรวมลดลงจนเหมาะสมสำหรับการบำบัดในขั้นตอนต่อไป เช่น การย่อยสลัดจ์ (Sludge digestion) การแยกน้ำจากสลัดจ์ (Sludge dewatering) เป็นต้น แต่ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความเข้มข้นสูงอยู่แล้ว (เช่น มากกว่าร้อยละ 1) สามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้ การทำชั้นสลัดจ์มีหลายวิธี ได้แก่ การทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity thickener) การลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือดีเอเอฟ (Dissolved Air Flotation, DAF) และการหมุนเหวี่ยง (Centrifugation)

(Metcalf & Eddy, 1991) กล่าวว่ากรณีที่ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำมีขนาดเล็ก (น้อยกว่า 4,000 ลบ.ม./วัน) อาจออกแบบให้ถังทำใสทำหน้าที่เป็นถังทำชั้นด้วยก็ได้ และกล่าวว่าถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความเข้มข้นอยู่แล้ว (มากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 1) อาจตัดหน่วยกระบวนการทำชั้นออกได้ (ไม่จำเป็นต้องก่อสร้างกระบวนการทำชั้นแยกต่างหาก) การทำชั้นสลัดจ์มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการทำชั้นสลัดจ์แต่ละวิธี

วิธีการทำชั้นสลัดจ์	ข้อดี	ข้อเสีย
1. ถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง	องค์ประกอบของเครื่องจักรง่ายไม่ซับซ้อน ควบคุมระบบง่าย ไม่ต้องการความดูแลเอาใจใส่มากนักค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานทำหน้าที่แทน ถังพักสลัดจ์ได้(ก่อนป้อนเข้ากระบวนการบำบัดต่อไป)	อาจมีปัญหาเรื่องกลิ่น ต้องการพื้นที่มากถ้าสลัดจ์ที่มีลักษณะที่ตกตะกอนยากจะทำให้ประสิทธิภาพการทำชั้นต่ำ
2. ดีเอเอฟ	องค์ประกอบของเครื่องจักรไม่ซับซ้อนมากนัก (เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องหมุนเหวี่ยง) ต้องการพื้นที่น้อย (เมื่อเปรียบเทียบกับ ถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง)	ต้องการพลังงานสูง ความเข้มข้นของสลัดจ์ไม่สูงมากนัก แต่ถ้าต้องการความเข้มข้นสลัดจ์สูงจำเป็นต้องใช้สารเคมีในการปรับสภาพสลัดจ์ก่อน

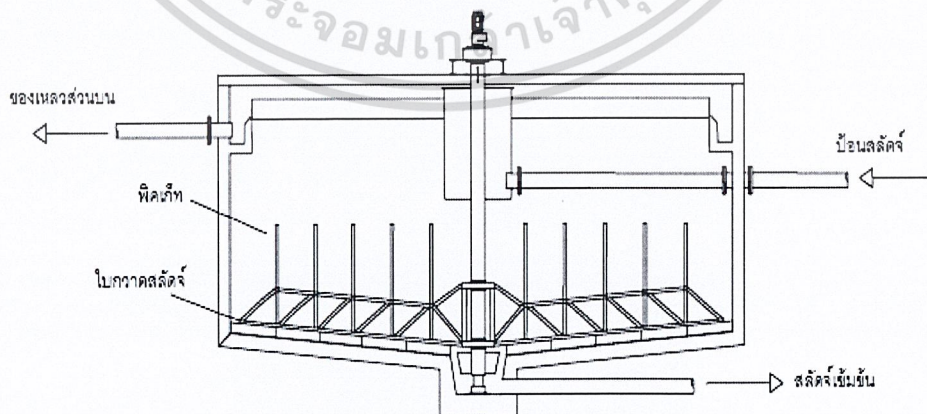
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 (ต่อ) ข้อดีและข้อเสียของการทำชั้นสลัดจ์แต่ละวิธี

วิธีการทำชั้นสลัดจ์	ข้อดี	ข้อเสีย
3. เครื่องหมุนเหวี่ยง	ต้องการพื้นที่น้อย เป็นระบบปิดและไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่น สามารถรองรับการแปรผันของปริมาณสลัดจ์ได้ที่มีความเข้มข้นสลัดจ์สูง	งบประมาณการลงทุนและค่าดำเนินการสูงควบคุมและบำรุงรักษายากต้องการบุคลากรที่มีความรู้ กวอดทรายในสลัดจ์อาจทำให้เครื่องหมุนเหวี่ยงเสียหายได้

โดยปกติการปรับสภาพสลัดจ์ก่อนการทำชั้น ไม่มีความจำเป็นมากนัก แต่อาจมีความจำเป็นในบางกรณี เช่น ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการทำชั้น เพิ่มขีดความสามารถในการรับอัตราการของแข็ง (solids loading rate) เป็นต้น โดยส่วนใหญ่นิยมปรับสภาพสลัดจ์ด้วยกระบวนการทางเคมีหรือการใช้สารโพลีเมอร์ ปริมาณสารปรับสภาพสลัดจ์ที่ใช้จะขึ้นอยู่กับวิธีการทำชั้นและลักษณะของสลัดจ์ซึ่งสามารถหาได้จากตารางทดลองในห้องปฏิบัติการ ปริมาณสารโพลีเมอร์ที่ใช้สำหรับการทำชั้นสลัดจ์โดยทั่วไปในต่างประเทศ

2.3.1.1 ถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity thickener) ถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วงคือถังตกตะกอนสลัดจ์นั่นเอง ซึ่งเป็นวิธีทำชั้นสลัดจ์ที่ไม่ต้องการเครื่องจักรมากนัก ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบและบำรุงรักษาระบบต่ำ และไม่ต้องบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญมากนัก โดยทั่วไปนิยมใช้ถังกลมมากกว่าถังสี่เหลี่ยม เนื่องจากมีกลไกของอุปกรณ์กวนและกวาดสลัดจ์ง่ายกว่า ถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วงมีรูปร่างคล้ายกับถังตกตะกอนดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ภาพตัดของถังทำชั้นด้วยแรงโน้มถ่วง

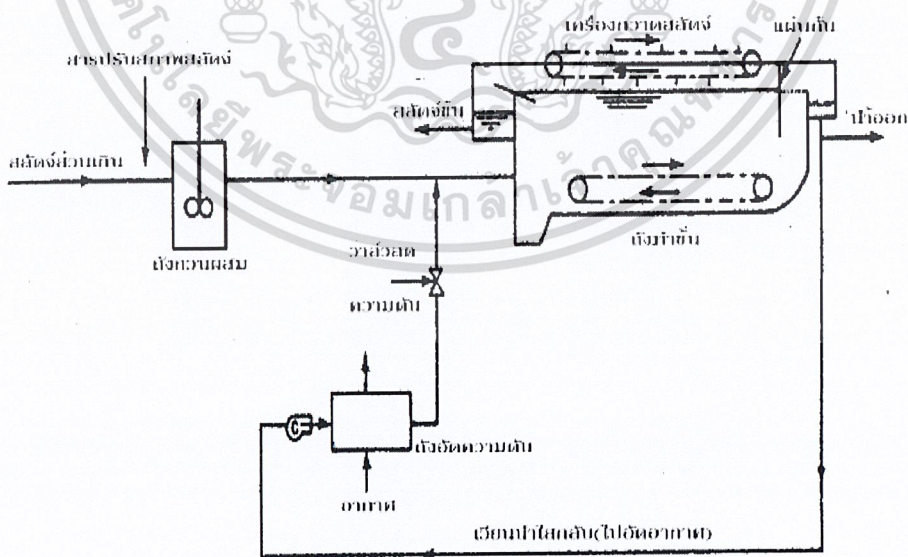
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่น้ำใสส่วนบนไหลล้นฝายที่อยู่ส่วนบนของถัง (ที่ขอบถัง) ส่วนสลัดจ์จะจมตัวลงสู่ก้นถัง และถูกระบายทิ้งต่อไป แต่อย่างไรก็ตามถังทำขึ้นด้วยแรงโน้มถ่วงมีข้อแตกต่างกับถังตกตะกอน บางประการ กล่าวคือ นอกจากถังทำขึ้นต้องมีใบกวาดสลัดจ์แล้ว จะต้องมียูปรกรณ์สำหรับการกวาด ชั้นสลัดจ์ด้วย (เป็นการกวาดเบาๆ) เพื่อเป็นการเปิดช่องระหว่างชั้นสลัดจ์ ซึ่งจะทำให้ น้ำและก๊าซที่ สะสมอยู่สามารถหลุดออกมาและลอยขึ้นสู่ผิวน้ำได้ จึงทำให้สลัดจ์สามารถจมตัวและอัดตัวได้แน่น ขึ้น การกวาดสลัดจ์กระทำโดยติดตั้งเสาในแนวตั้งกับแขนกวาดสลัดจ์ เรียกว่า “พิกเก็ต” (picket) ซึ่ง จะมีระยะห่างระหว่างพิกเก็ตประมาณ 15 - 46 เซนติเมตร และมีความสูงประมาณ 0.6 - 2.0 เมตร (WEF & ASCE, 1998c) นอกจากนี้ถังทำขึ้นมีความลาดมากกว่าถังตกตะกอนชั้นต้นและชั้นสอง อีกด้วยซึ่งจะทำให้การอัดตัวของสลัดจ์ดีขึ้น

2.3.1.2 การลอยตัวด้วยอากาศละลายหรือดีเอเอฟ (dissolved air floatation, DAF)

ดีเอเอฟเป็นวิธีทำขึ้นสลัดจ์ที่เหมาะสมกับสลัดจ์ส่วนเกินจากระบบเอเอสและสลัดจ์จาก ถังย่อยสลัดจ์แอโรบิกและไม่คุ้มค่าถ้าจะนำมาใช้กับสลัดจ์ชั้นต้น (เนื่องจากสลัดจ์ชั้นต้นสามารถ ตกตะกอนได้ดี ดังนั้นการใช้ถังทำขึ้นด้วยแรงโน้มถ่วงก็เพียงพอแล้ว) การทำขึ้นด้วยดีเอเอฟเป็น ระบบที่มีความต้องการเครื่องจักรที่ซับซ้อนและมีราคาแพงกว่าถังทำขึ้นด้วยแรงโน้มถ่วง รวมทั้งยัง ต้องการความดูแลเอาใจใส่สูงกว่าอีกด้วย แต่การทำขึ้นด้วยดีเอเอฟมีเวลากักสลัดจ์น้อยกว่าถังทำขึ้น ด้วยแรงโน้มถ่วงประมาณ 2 - 8 เท่าตัว (Qasim, S.R., 1985) ซึ่งหมายถึงมีความต้องการพื้นที่ สำหรับติดตั้งระบบน้อยกว่านั่นเอง ตัวอย่างแผนภาพการไหลการทำงานของระบบแสดงดังรูปที่

2.3



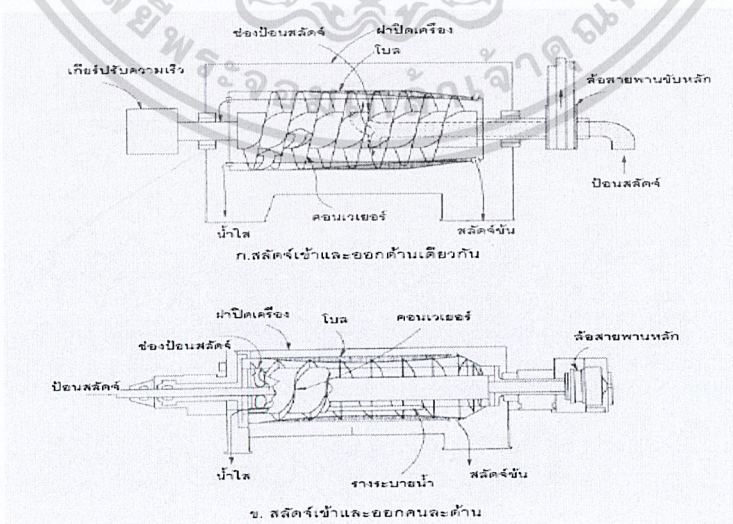
รูปที่ 2.3 แผนภาพการไหลของถังทำขึ้นด้วยดีเอเอฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงานของดีเอเฟอ กระทำโดยอัดอากาศให้ละลายน้ำอย่างอิมตัวในถังอัดความดัน และเมื่อถึงความดันค่าหนึ่ง น้ำที่มีอากาศละลายตัวอย่างอิมตัวสามารถผ่านวาล์วลดความดันไปผสมกับสลัดจ์ส่วนเกินก่อนที่จะถูกป้อนเข้าสู่ถังทำขึ้น ถังทำขึ้นดังกล่าวเป็นถังเปิด (ซึ่งมีความดันที่ผิว น้ำเท่ากับความดันบรรยากาศ) ดังนั้นจึงทำให้เกิดฟองอากาศขนาดเล็กจำนวนมากลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ (เมื่อความดันลดลง ทำให้อากาศละลายน้ำได้น้อยลง) ในขณะเดียวกันของแข็งแขวนลอยในน้ำ สลัดจ์จะเกาะติดกับฟองอากาศและลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำด้วย จึงทำให้เกิดเป็นชั้นสลัดจ์ขึ้นที่ผิวน้ำและมีความหนาประมาณ 15 - 30 เซนติเมตร ซึ่งชั้นสลัดจ์ขึ้นดังกล่าวถูกเครื่องกวาดผ้าใบ (skimmer) รวบรวมเข้าสู่บ่อพักสลัดจ์ต่อไป

2.3.1.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)

โดยทั่วไปเครื่องหมุนเหวี่ยงสามารถใช้ได้ทั้งในกระบวนการทำขึ้นและการแยกน้ำจากสลัดจ์ การหมุนเหวี่ยงเป็นวิธีที่มีการทำงานซับซ้อน ต้องการพลังงาน มีงบประมาณการลงทุน และงบประมาณการบำรุงรักษาสูง เครื่องหมุนเหวี่ยงเป็นการเพิ่มความแรงในการตกตะกอนสลัดจ์นั่นเอง ซึ่งมีค่าประมาณ 500 - 3,000 เท่าของความแรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (WEF & ASCE, 1998c) การทำขึ้นด้วยวิธีนี้เหมาะกับสลัดจ์จากระบบเอเอส แต่ไม่เหมาะกับสลัดจ์ขึ้นต้น เนื่องจากกรวดทรายในสลัดจ์ขึ้นต้นอาจทำให้เครื่องหมุนเหวี่ยงเสียหายได้และเป็นแนวทางที่ไม่คุ้มค่า เครื่องหมุนเหวี่ยงมีหลายประเภทแต่ประเภทที่ได้รับความนิยมมากที่สุด ได้แก่ โซลิด-โบล (solid bowl) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ โบลและคอนเวเยอร์ (conveyor) โดยที่โบลและคอนเวเยอร์หมุนด้วยความเร็วต่างกันเล็กน้อย (ประมาณ 1 - 20 รอบ/นาที) จึงทำให้คอนเวเยอร์สามารถดึงกากตะกอนออกมาที่ด้านหนึ่งของเครื่องหมุนเหวี่ยงได้ ส่วนน้ำจะถูกแยกออกจากสลัดจ์และไหลออกอีกด้านหนึ่งของเครื่องหมุนเหวี่ยงซึ่งจะถูกสูบกลับไปบำบัดใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 2.4 ภาพตัดของเครื่องหมุนเหวี่ยง ที่มา : คัดแปลงจาก WEF & ASCE, 1998c

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การปรับเสถียรสลัดจ์ (sludge stabilization)

การปรับเสถียรสลัดจ์เป็นขั้นตอนที่ทำให้สลัดจ์มีความคงตัว ซึ่งเป็นการลดเชื้อโรคและการป้องกันการเน่าเหม็นของสลัดจ์ ถ้าสลัดจ์ส่วนเกินมีความคงตัวอยู่แล้วก็สามารถข้ามขั้นตอนนี้ได้

การปรับเสถียรสลัดจ์ทำได้หลายวิธี กระทำได้ทั้งกระบวนการทางชีวภาพ เช่น การย่อยแอนแอโรบิก (anaerobic sludge digestion) การย่อยแบบแอโรบิก (aerobic sludge digestion) และการหมักทำปุ๋ย (composting) กระบวนการทางเคมี เช่น การปรับเสถียรด้วยปูนขาว และกระบวนการทางกายภาพ เช่น การปรับสภาพด้วยความร้อน แต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังตารางที่ 2.2 อย่างไรก็ตามวิธีที่มีงบประมาณในการควบคุมดำเนินระบบต่ำที่สุด ได้แก่ กระบวนการทางชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบบแอนแอโรบิกเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด และได้ก๊าซมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์อีกด้วย

2.3.2.1 ถังย่อยแอนแอโรบิก (anaerobic digester)

ถังย่อยแอนแอโรบิกไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนักในประเทศไทย เนื่องจากเกรงว่าถังย่อยแบบนี้ไม่สามารถบำบัดสลัดจ์ได้ แต่ความคิดดังกล่าวเป็นความเข้าใจที่คลาดเคลื่อนจากข้อเท็จจริง เนื่องจากประเทศไทยมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงตลอดปีทำให้ถังย่อยแบบนี้สามารถย่อยสลายได้เร็ว และมีประสิทธิภาพสูง (มันลิน, 2542) นอกจากนี้ยังมีข้อดีอีกหลายประการ เช่น สามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ประหยัดพลังงาน และมีงบประมาณในการดำเนินการต่ำ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม ถังย่อยแอนแอโรบิกจะมีค่าลงทุนค่อนข้างสูงและต้องการผู้ควบคุมระบบที่มีความเชี่ยวชาญสูง

หลักการทำงาน

ถังย่อยแอนแอโรบิกอาศัยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจนย่อยสลายอนุภาคอินทรีย์หรือเซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งมีปฏิกิริยาชีวเคมีซับซ้อน เนื่องจากมีจุลินทรีย์หลายชนิดที่ทำงานเฉพาะเจาะจงและเอื้อประโยชน์ซึ่งกันและกัน การทำงานเริ่มด้วยการป้อนสลัดจ์เข้าถังย่อยสลัดจ์และกักพักสลัดจ์ให้นานพอจนทำให้เกิดการย่อยสลัดจ์ สลัดจ์ที่ย่อยแล้วจะจมตัวและถูกระบายทิ้งที่ก้นถัง ส่วนของเหลวส่วนบนจะล้นออกที่ด้านบนของถัง ในบางกรณีอาจมีให้ความร้อนและการกวนผสมในถังด้วย เพื่อเพิ่มอัตราเร็วในการย่อยสลาย ซึ่งทำให้เวลากักพักสลัดจ์สั้นลง

ประเภทของถังย่อยแอนแอโรบิก

ถังย่อยแอนแอโรบิกสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือถังย่อยแบบปกติและแบบอัตราเร็ว

1. ถังย่อยแอนแอโรบิกแบบปกติ

ถังย่อยแอนแอโรบิกแบบปกติ ซึ่งประกอบด้วยถังใบเดียว ไม่มีการกวนผสม ไม่มีการให้ความร้อนและทำงานแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบตช์ จึงทำให้เกิดการแยกชั้นสลัดจ์และน้ำใสไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนบน สลัดจ์ดิบจะถูกป้อนเข้าส่วนบนของถัง ส่วนสลัดจ์ย่อยแล้วจะจมตัวลงสู่ก้นถังและถูกระบายทิ้งต่อไป

ถังย่อยแบบนี้มีอัตราการย่อยสลายต่ำ (เนื่องจากการกวนผสมและให้ความร้อน) จึงต้องการเวลากักพักสลัดจ์นาน แต่ในกรณีที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนซึ่งมีอุณหภูมิสูง (เช่น ประเทศไทยเป็นต้น) จะทำให้อัตราการย่อยสลายสูงขึ้นแม้ไม่ต้องมีการกวนผสมก็ตาม เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะช่วยให้มีการกวนผสมได้ด้วยตัวมันเอง

2. ถังย่อยแอนแอโรบิกแบบอัตราเร็ว

ถังย่อยแอนแอโรบิกแบบอัตราเร็ว โดยทั่วไปถังย่อยแบบนี้จะมีการกวนผสมและมีระบบเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งทำให้อัตราการย่อยสลายสลัดจ์เร็วกว่าถังย่อยแบบแรก จึงต้องการเวลากักพักสลัดจ์สั้นกว่าด้วย แต่ถังย่อยแบบนี้ต้องการพลังงานในการเดินระบบสูงกว่าเนื่องจากการกวนผสมและต้องให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิด้วย ถังย่อยแบบอัตราเร็วอาจประกอบด้วยถังเดียวหรือสองถังก็ได้ กรณีที่มีถังย่อยเพียงถังเดียวจำเป็นต้องหยุดการกวนผสมประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง เพื่อตกตะกอนสลัดจ์ทิ้งก่อนระบายทิ้งที่ก้นถังและเตรียมป้อนสลัดจ์ดิบเข้าถังอีกครั้ง กรณีที่มีถังย่อย 2 ถัง ถังแรกจะมีการกวนผสมตลอดเวลา ส่วนถังย่อยที่สองจะไม่มีกวนผสมและทำหน้าที่แยกชั้นสลัดจ์และน้ำใสส่วนบนนอกจากนี้การย่อยแบบอัตราเร็วสามารถแบ่งตามช่วงอุณหภูมิในถังย่อยได้อีก 2 แบบ ได้แก่ การย่อยช่วงเมโซฟิลิก (mesophilic range) และการย่อยช่วงเทอร์โมฟิลิก (thermophilic range) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 30 - 38 และ 50 - 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยปกติการย่อยในช่วงเทอร์โมฟิลิกมีอัตราการย่อยสลัดจ์และการฆ่าเชื้อโรคสูงกว่าการย่อยในช่วงเมโซฟิลิก นอกจากนี้ยังทำให้สลัดจ์ที่ย่อยแล้วสามารถแยกน้ำจากสลัดจ์ได้ง่ายกว่าอีกด้วย (WEF & ASCE, 1998c)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการปรับเสถียรสลัดจ์แต่ละวิธี

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
ถังย่อยแอนแอโรบิก	ต้องการพลังงานต่ำในการเดินระบบและยังได้พลังงานจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอีกด้วย มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายสูงถึงร้อยละ 40 - 60 ปริมาณของแข็งทั้งหมดโดยรวมลดลง สลัดจ์ที่ย่อยแล้วสามารถนำไปเป็นปุ๋ยในการเกษตรได้	ต้องการบุคลากรที่มีความรู้ในการเดินระบบเมื่อระบบล้มเหลว ต้องใช้เวลานานจึงจะทำให้ระบบกลับมามีประสิทธิภาพเหมือนเดิม น้ำใสส่วนบนระบบมีค่าบีโอดี สารแขวนลอย และแอมโมเนียสูงมีงบประมาณการลงทุนสูง อาจเกิดการระเบิดเนื่องจากก๊าซชีวภาพอาจมีปัญหาเรื่องกลิ่น
ถังย่อยแอนโรบิก	งบประมาณการลงทุนต่ำ (โดยเฉพาะระบบที่มีขนาดเล็ก) ควบคุมระบบง่าย น้ำใสส่วนบนมีค่าบีโอดี สารแขวนลอยและ แอมโมเนียต่ำ(เมื่อเปรียบเทียบกับถังย่อยแอนแอโรบิก)ไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่น ปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลง	ต้องการพลังงานสูงในการเติมอากาศประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ต่ำกว่าถังย่อยแบบแอนแอโรบิกทำให้สภาพต่างและพีเอชลดลง อาจทำให้เชื้อโรคฟุ้งกระจายในอากาศได้ (เนื่องจากการเติมอากาศ)
การหมักทำปุ๋ย	สามารถขายเพื่อใช้ในการเกษตรได้งบประมาณการลงทุนต่ำ	ต้องแยกน้ำจากสลัดจ์เพื่อให้มีความเข้มข้น ประมาณร้อยละ 18 - 30 ก่อนนำมาหมักต้องการพื้นที่มากมีความต้องการแรงงานสูง อาจมีปัญหาเรื่องกลิ่น อาจทำให้เชื้อโรคกระจายในอากาศได้

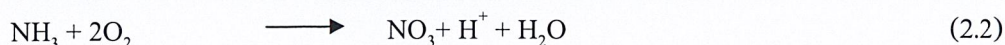
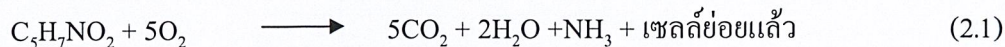
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ข้อดีและข้อเสียของการปรับเสถียรสลัดจ์แต่ละวิธี

กระบวนการ	ข้อดี	ข้อเสีย
การหมักทำปุ๋ย	สามารถขายเพื่อใช้ในการเกษตร ได้งบประมาณการลงทุนต่ำ	ต้องแยกน้ำจากสลัดจ์เพื่อให้มี ความเข้มข้น ประมาณร้อยละ 18 - 30 ก่อนนำมาหมักต้องการ พื้นที่มากมีความต้องการแรงงาน สูง อาจมีปัญหาเรื่องกลิ่น อาจทำ ให้เชื้อโรคระบาดในอากาศได้
การปรับเสถียรด้วย ปูนขาว	ควบคุมระบบง่าย งบประมาณการ ลงทุนต่ำ เหมาะสมที่สุดในการ แก้ปัญหาในกรณีกระบวนการหลัก ชำรุดหรือไม่สามารถเดินระบบได้	มีข้อจำกัดในการนำสลัดจ์หลัง ปรับเสถียรไป ใช้ประโยชน์ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินระบบสูง ปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น ถ้าพีเอชต่ำ(เมื่อนำไปทิ้ง) อาจทำ ให้มีปัญหา เรื่องกลิ่น

2.3.2.2 ถังย่อยแเอโรบิก (aerobic digester)

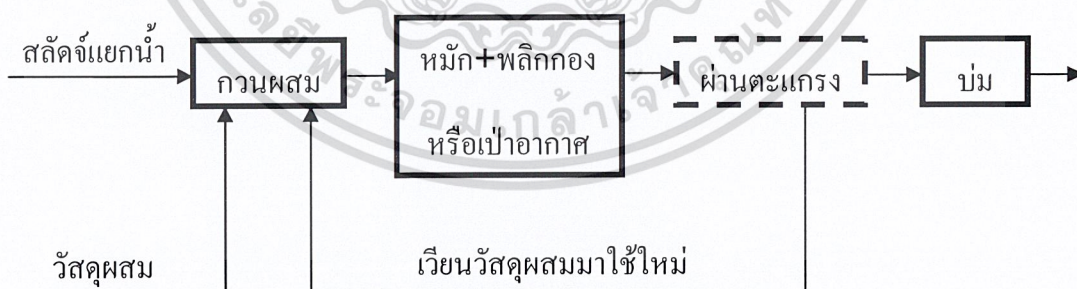
ถังย่อยแเอโรบิกมีหลักการคล้ายกับกระบวนการเอเอส เพียงแต่ถังย่อยแเอโรบิกมุ่งกำจัด
อนุภาคอินทรีย์หรือของแข็งระเหยง่ายเป็นหลัก ขั้นตอนแรกจุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่
ยังคงเหลืออยู่ในน้ำสลัดจ์ก่อน ต่อมาเมื่อสารอินทรีย์ในน้ำสลัดจ์หมด จุลินทรีย์จะย่อยสลายตัวเอง
เพื่อนำพลังงานสำรองที่สะสมไว้ในเซลล์มาใช้ต่อไป โดยส่วนใหญ่หมักป้อนสลัดจ์เข้าถังเป็นแบบไม่
ต่อเนื่องหรือควบคุมการทำงานเป็นแบบแบตช์ ดังนั้นไม่จำเป็นต้องก่อสร้างถังตกตะกอนเพิ่มอีก
ต่างหาก โดยที่ก่อนป้อนสลัดจ์เข้าถังย่อยในรอบใหม่จะต้องหยุดเติมอากาศประมาณ 1 - 2 ชั่วโมง
เพื่อปล่อยให้สลัดจ์ที่ย่อยแล้วจมตัวลงสู่ก้นถังและระบายทิ้งต่อไป ความต้องการออกซิเจนใน
กระบวนการย่อยสลัดจ์แบบแเอโรบิกสามารถแบ่งเป็น 2 กระบวนการหลักๆ ได้แก่ ความต้องการ
ออกซิเจนของจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลายตัวเองและความต้องการออกซิเจนใช้ในการเปลี่ยน
แอมโมเนียให้เป็นไนเตรตหรือเรียกว่าปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.3 การหมักทำปุ๋ย (composting)

การหมักทำปุ๋ยเป็นการย่อยสลายด้วยกระบวนการชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน โดยอาศัยแบคทีเรียและราเป็นหลักในการย่อยสลาย สัตว์ที่นำมาหมักเป็นปุ๋ยจำเป็นต้องแยกน้ำจากสัตว์ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 18 - 30 ก่อน และในขณะที่หมักอาจมีอุณหภูมิสูงถึง 50 - 70 องศาเซลเซียส ซึ่งจะมีผลต่อการฆ่าเชื้อโรคด้วย สัตว์ที่ผ่านการหมักแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อการเกษตรกรรมต่อไปหรือสามารถนำไปขายเพื่อเป็นวัตถุดิบในการทำปุ๋ยหรืออาหารสัตว์ได้ วิธีการปรับเสถียรสัตว์ด้วยวิธีนี้มีค่าลงทุนต่ำ แต่ต้องการพื้นที่ค่อนข้างสูงกว่าวิธีอื่นๆ โดยนำสัตว์ที่ผ่านการแยกน้ำแล้วมาผสมกับวัสดุผสมเพื่อลดความหนาแน่นของสัตว์ (หรือเพิ่มช่องว่างระหว่างของแข็ง) ซึ่งเป็นผลต่อการถ่ายเทออกซิเจนให้แก่จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสัตว์ วัสดุผสมมักใช้วัสดุที่ได้จากธรรมชาติ เช่น ขี้เลื่อย เศษไม้ เศษฟาง แกลบ (เปลือกข้าว) เป็นต้น หลังจากนั้นกองสัตว์ทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการหมัก และในระหว่างการหมักจะต้องเติมอากาศให้แก่จุลินทรีย์ด้วย โดยการเป่าอากาศด้วยเครื่องเป่าอากาศหรือการพลิกกลับกองเป็นครั้งคราวก็ได้ ในช่วงแรกของการหมักอาจทำให้มีอุณหภูมิสูงมาก (50 - 70 องศาเซลเซียส) ดังนั้นการเติมอากาศหรือพลิกกลับกองจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อป้องกันอุณหภูมิสูงเกินไปจนเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ที่มีหน้าที่ย่อยสลาย สำหรับสัตว์ที่ผ่านการย่อยแล้วก็นำมาผ่านตะแกรงเพื่อแยกวัสดุผสมที่มีขนาดใหญ่และนำกลับไปใช้ใหม่ต่อไป (อย่างไรก็ตามสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้ แต่ต้องหาวัสดุผสมมาทดแทนด้วย) ต่อจากนั้นนำสัตว์ที่ผ่านตะแกรงแล้วบ่มไว้อีกระยะหนึ่ง เพื่อทำให้สัตว์คงตัวโดยสมบูรณ์ก่อนนำไปใช้ประโยชน์ ขั้นตอนการหมักทำปุ๋ยแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนภาพการไหลแสดงขั้นตอนการหมักทำปุ๋ย
(หน่วยกระบวนการที่เป็นเส้นประอาจไม่จำเป็นต้องมีก็ได้)

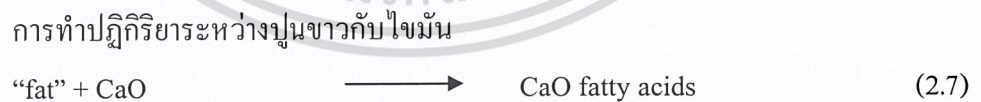
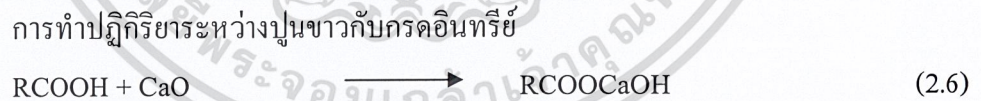
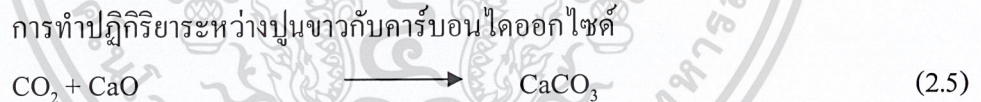
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.4 การปรับเสถียรด้วยปูนขาว (lime stabilization)

การปรับเสถียรด้วยปูนขาวเป็นการทำให้สลัดจ์มีค่าพีเอชสูงถึงระดับหนึ่งและนานเพียงพอเพื่อหยุดยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในสลัดจ์ เป็นผลให้สลัดจ์มีความคงตัวไม่เน่าเหม็น โดยทั่วไปมักปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 12 และคงค่าพีเอชดังกล่าวไว้คงที่เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แต่ถ้าปรับให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 12.5 สามารถคงค่าพีเอชดังกล่าวเพียง 0.5 ชั่วโมง เท่านั้น

จากข้อมูลของประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่ากระบวนการนี้มีใช้ทั้งในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ แต่นิยมใช้กับโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดเล็กมากกว่า ส่วนโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดใหญ่มักใช้เป็นกระบวนการสำรองเมื่อกระบวนการหลักหยุดระบบหรือช่วงที่มีปริมาณสลัดจ์มากกว่าปกติ (เกินความสามารถของกระบวนการหลัก)

สารเคมีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ปูนขาว เนื่องจากมีราคาถูก การเติมปูนขาวเพื่อปรับเสถียรสลัดจ์จะเกิดปฏิกิริยามากมายและยังไม่เป็นที่เข้าใจกันมากนักในปัจจุบัน แต่จะมีปริมาณปูนขาวส่วนหนึ่งสูญเสียไปเนื่องจากทำปฏิกิริยาเคมีกับสารต่างๆในน้ำสลัดจ์ด้วย เช่น แคลเซียมฟอสเฟอรัส คาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ ไขมัน เป็นต้น (WEF & ASCE, 1998c) ซึ่งสามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 2.3 ถึง 2.7



2.3.3 การแยกน้ำจากสลัดจ์ (sludge dewatering)

การแยกน้ำจากสลัดจ์เป็นการเพิ่มความเข้มข้นและลดปริมาตรของสลัดจ์ก่อนนำไปกำจัดในขั้นสุดท้าย ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อความสะดวกในการขนย้ายและลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เช่น การขนส่ง ลดขนาดของพื้นที่สำหรับฝังกลบ เป็นต้น การแยกน้ำจากสลัดจ์มีหลายวิธี ได้แก่ ลานตากสลัดจ์ (sludge drying bed) สายพานรีดน้ำ (belt press) เครื่องอัดกรอง (filter press) และเครื่องหมุนเหวี่ยง ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันดังตารางที่ 2.3

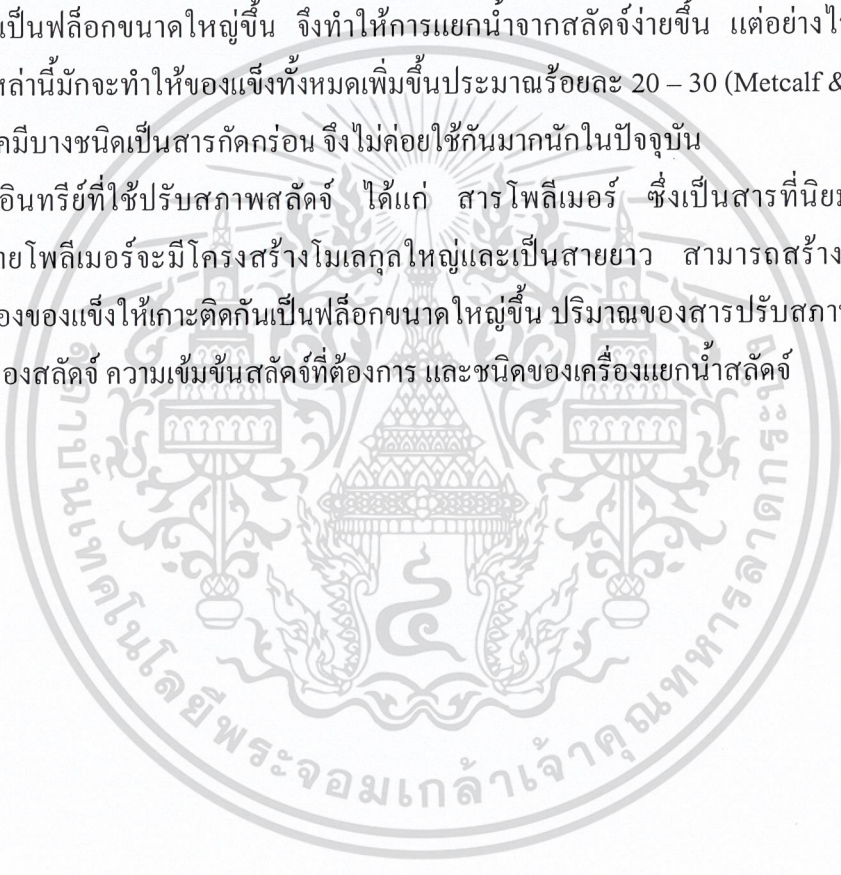
ลานตากสลัดจ์เป็นวิธีที่อาศัยหลักการตามธรรมชาติมากที่สุดและใช้เครื่องจักรน้อยที่สุด แต่ต้องการพื้นที่มากที่สุด ประสิทธิภาพการแยกน้ำจากสลัดจ์ด้วยวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิอากาศ

ส่วนวิธีอื่นๆ เป็นวิธีแบบเครื่องกล ซึ่งมีความต้องการเครื่องจักรมาก ทำให้การลงทุนและค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบสูงกว่า แต่เป็นวิธีที่ต้องการพื้นที่น้อย

การปรับสภาพสลัดจ์ก่อนแยกน้ำเป็นปัจจัยสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำจากสลัดจ์ด้วยวิธีเครื่องกล การปรับสภาพสลัดจ์ที่นิยมมากที่สุด คือ กระบวนการทางเคมี เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีค่าลงทุนถูกกว่าวิธีทางกายภาพอื่น ๆ โดยทั่วไปการปรับสภาพด้วยสารเคมี สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด ได้แก่ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

สารอนินทรีย์ที่ใช้ในการปรับสภาพสลัดจ์ ได้แก่ เฟอร์ริกคลอไรด์ เฟอร์ริซัลเฟต สารส้ม และปูนขาว เนื่องจากสารเคมีเหล่านี้จะไปทำลายประจุลบของอนุภาคของแข็ง ทำให้อนุภาคของของแข็งจับตัวกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ขึ้น จึงทำให้การแยกน้ำจากสลัดจ์ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีเหล่านี้มักจะทำให้ของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 20 – 30 (Metcalf & Eddy, 1991) และสารเคมีบางชนิดเป็นสารกัดกร่อน จึงไม่ค่อยใช้กันมากนักในปัจจุบัน

ส่วนสารอินทรีย์ที่ใช้ปรับสภาพสลัดจ์ ได้แก่ สารโพลีเมอร์ ซึ่งเป็นสารที่นิยมใช้กันทั่วไป สารละลายโพลีเมอร์จะมีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และเป็นสายยาว สามารถสร้างสะพานเชื่อมอนุภาคของของแข็งให้เกาะติดกันเป็นฟล็อกขนาดใหญ่ขึ้น ปริมาณของสารปรับสภาพสลัดจ์ขึ้นอยู่กับชนิดของสลัดจ์ ความเข้มข้นสลัดจ์ที่ต้องการ และชนิดของเครื่องแยกน้ำสลัดจ์



ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อเสียของการแยกน้ำจากสลัดจ์ด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการรีดน้ำสลัดจ์	ข้อดี	ข้อเสีย
ลานตากสลัดจ์	งบประมาณการลงทุนต่ำ ไม่ต้องการการดูแลเอาใจใส่มากนัก ต้องการพลังงานน้อยที่สุด ไม่ต้องปรับสภาพสลัดจ์ก่อนได้สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นสูงเป็นระบบที่ยืดหยุ่น สามารถรับการแปรผันของปริมาณสลัดจ์ได้สูง	ต้องการพื้นที่มากเหมาะกับสลัดจ์ย่อยแล้วหรือมีความคงตัว ภูมิอากาศมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบต้องการแรงงานสูง อาจมีปัญหาเรื่องกลิ่นและทัศนียภาพ
สายพานรีดน้ำ	ต้องการพลังงานในการเดินระบบต่ำ งบประมาณการลงทุนต่ำ เครื่องจักรไม่มีความซับซ้อน และง่ายในการดำเนินการระบบ	ลักษณะของสลัดจ์มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบระบบไม่ยืดหยุ่น รับปริมาณสลัดจ์ได้อย่างจำกัดต้องปรับสภาพสลัดจ์ก่อนแยกน้ำจากสลัดจ์
เครื่องอัดกรอง	ได้สลัดจ์ที่มีความเข้มข้นสูง น้ำใสที่ผ่านการกรองมีความเข้มข้นของของแข็งต่ำ	งบประมาณการลงทุนสูง ทำงานเป็นแบบแบตช์ต้องการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในเดินระบบ ต้องปรับสภาพสลัดจ์ก่อนแยกน้ำจากสลัดจ์
เครื่องหมุนเหวี่ยง	งบประมาณการลงทุนสูงไม่มีปัญหาเรื่องกลิ่น เนื่องจากเป็นระบบปิด	ต้องการการบำรุงรักษาสูงต้องการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในการเดินระบบกวรดทรายในสลัดจ์ทำให้ความเสียหายเครื่องหมุนเหวี่ยงน้ำใสมีความเข้มข้นของของแข็งสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.1 ลานตากสลัดจ์ (sludge drying bed)

ลานตากสลัดจ์เป็นวิธีที่ง่ายไม่ซับซ้อน ต้องการเครื่องจักรน้อย และค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบต่ำ เหมาะกับโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำขนาดเล็กและสลัดจ์ค่อนข้างคงตัว แต่การแยกน้ำสลัดจ์ด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับภูมิอากาศ ซึ่งมีข้อจำกัดในกรณีที่เป็นฤดูฝน นอกเสียจากมีการทำหลังคาปกคลุม รูปร่างของลานตากสลัดจ์แสดงดังรูปที่ 2.6

หลักการทำงาน คือ ลานตากสลัดจ์ทำให้เกิดการแยกน้ำได้ 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกน้ำจากสลัดจ์ส่วนหนึ่งซึมผ่านชั้นทรายและถูกรวบรวมด้วยระบบท่อที่วางอยู่ใต้ลานตากสลัดจ์ ส่วนสลัดจ์ชั้นจะติดค้างอยู่บนผิวหน้าชั้นทราย ซึ่งในขั้นตอนที่ 2 น้ำส่วนหนึ่งถูกแยกโดยการระเหยเข้าสู่บรรยากาศ โดยทั่วไปต้องใช้เวลาตากในขั้นตอนนี้ 10 - 15 วัน หลังจากนั้นจึงขุดลอกกากตะกอนและนำไปกำจัดต่อไป

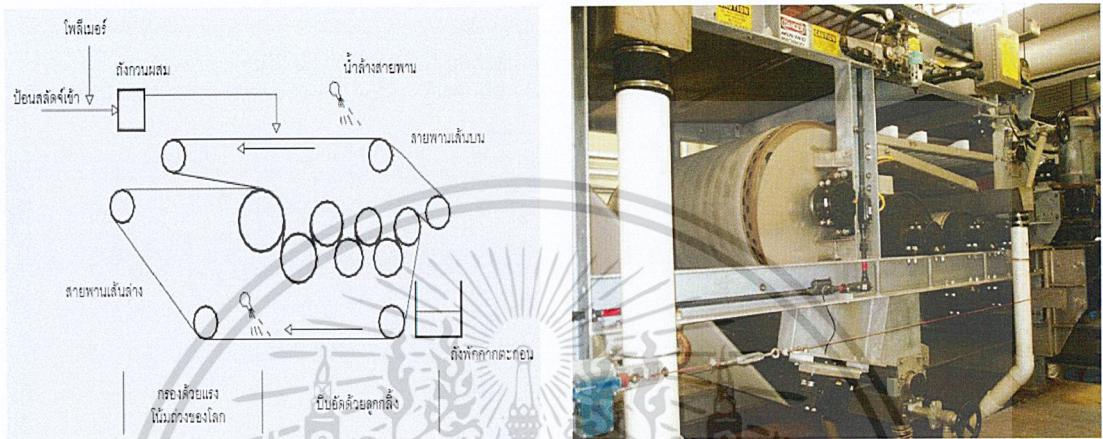


รูปที่ 2.6 ลักษณะของลานทรายตากสลัดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 สายพานรีดน้ำ (belt press)

สายพานรีดน้ำเป็นการแยกน้ำจากสลัดจ์แบบใช้เครื่องกลดัดตัวอย่างรูปที่ 2.7 แต่เป็นวิธีที่มีเครื่องจักรและความต้องการพลังงานน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการแยกน้ำจากสลัดจ์ด้วยเครื่องกลอื่น ๆ และไม่ต้องอาศัยบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญมากนักในการควบคุมระบบ นอกจากนี้การทำงานของสายพานรีดน้ำสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 2.7 การทำงานของเครื่องสายพานรีดน้ำ (filter belt dewatering press)

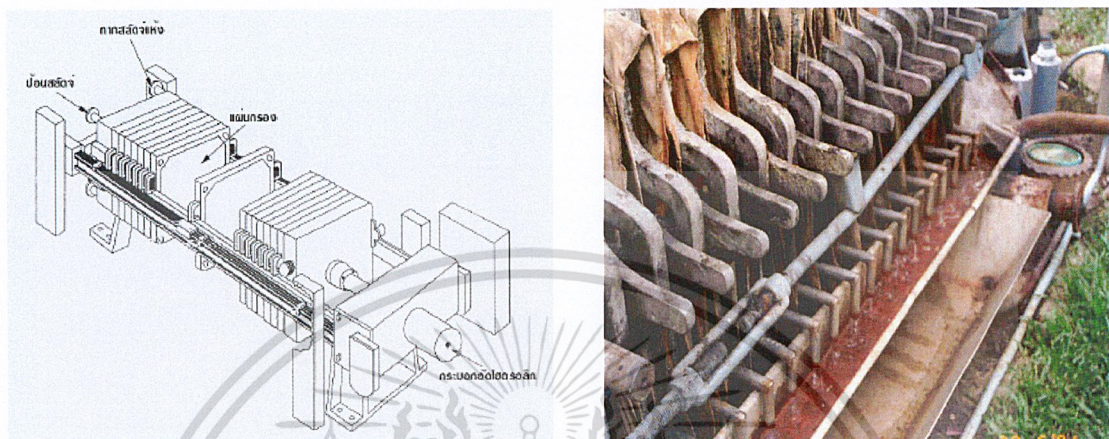
หลักการการทำงานของสายพานรีดน้ำ คือ จะประกอบไปด้วยสายพาน 2 เส้น โดยมีลูกกลิ้ง (baring) เป็นฐานรองรับและถูกขับเคลื่อนให้หมุนวนในทิศตรงข้ามกัน (ตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา) ซึ่งมีบางช่วงที่สายพานทั้งสองประกบกัน เมื่อสลัดจ์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วถูกป้อนเข้าที่ช่วงแรกของสายพาน น้ำบางส่วนจะถูกแยกออกมาโดยการซึมผ่านสายพานด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก และเมื่อสลัดจ์ขึ้นถูกลำเลียงเข้าช่วงที่สายพานทั้ง 2 เส้นประกบกันด้วยลูกกลิ้งบีบอัด จึงทำให้น้ำอีกส่วนหนึ่งถูกแยกและซึมผ่านสายพานได้เพิ่มขึ้น เมื่อสายพานทั้ง 2 เส้นถอยห่างออกจากกัน จึงทำให้กากตะกอนหลุดออกและถูกระบายทิ้งต่อไป หลังจากนั้นสายพานจะวนกลับไปปรับสลัดจ์อีก แต่ต้องมีหัวฉีดน้ำแรงดันสูงเพื่อล้างสายพานทั้งสองเส้นก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันของสายพาน

2.3.3.3 เครื่องอัดกรอง (filter press)

กากตะกอนที่ได้จากเครื่องอัดกรองมีความเข้มข้นสูงและน้ำที่ผ่านการกรองค่อนข้างใส แต่เป็นระบบที่มีเครื่องจักรมาก ราคาแพง ทำงานแบบแบตช์ อายุการใช้งานของผ้ากรองสั้น และจำเป็นต้องใช้แรงงานคนในการแกะกากตะกอนออกจากผ้ากรองอีกด้วยองค์ประกอบหลักของเครื่องอัดกรองประกอบด้วย แผ่นยึดผ้ากรองหลายอันเรียงกันบนแกนของเครื่อง ผ้ากรอง และเครื่องดันผ้ากรองดังรูปที่ 2.8 ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากป้อนสลัดจ์เข้าเครื่องอัดกรอง สลัดจ์จะเข้าไปในช่องว่างระหว่างผ้ากรองจนเต็มภายใต้ความดัน ขณะเดียวกันน้ำจะซึมผ่านผ้ากรอง ทำให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ก่อนใช้งานเพื่อการศึกษาก่อนเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างมากขึ้น และป้อนสลัดจ์ภายใต้แรงดันดังกล่าวไปเรื่อยๆจนกระทั่งไม่มีน้ำซึมผ่านผ้ากรองอีก จึงถอดแผ่นหรือเลื่อนแผ่นยึดผ้ากรองออกจากกันและแกะกากตะกอนออกจากแผ่นกรองด้วยแรงงานคน พร้อมทั้งล้างทำความสะอาดผ้ากรองและเตรียมป้อนสลัดจ์รอบใหม่



รูปที่ 2.8 การแยกน้ำจากสลัดจ์เครื่องอัดกรอง

2.3.4 การกำจัดสลัดจ์ (sludge disposal)

การกำจัดสลัดจ์ หรือ กากตะกอน เป็นการนำสลัดจ์ที่ผ่านการบำบัดในขั้นตอนต่าง ๆ ข้างต้นไปใช้ประโยชน์ เช่น ปรับสภาพดินสำหรับการเกษตร เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีกำจัดในหลายประเทศ (เยอรมัน ออสเตรเลีย อิตาลี ฯลฯ) หรือนำไปฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (sanitary landfill)

ปัจจัยสำคัญในการเลือกวิธีการกำจัดกากตะกอน

ปัจจัยทั่วไปในการเลือกกระบวนการกำจัดสลัดจ์ ได้แก่ ความเหมาะสมทั้งทางด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดได้แก่การยอมรับของประชาชนหรือชุมชน เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อความกล้าหาญหรือความสำเร็จต่อหลาย ๆ โครงการในอดีต แนวทางลดปัญหาดังกล่าวกระทำได้โดยให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการรับรู้ข้อมูลอย่างรอบด้านและอย่างตรงไปตรงมาตั้งแต่เริ่มแนวคิดโครงการ พร้อมทั้งให้ประชาชนมีส่วนร่วมในการตัดสินใจเลือกแนวทางที่เหมาะสมที่สุดด้วย

2.3.4.1 การนำไปทิ้ง

การนำไปทิ้งเป็นวิธีการกำจัดสลัดจ์ดิบหรือกากตะกอนที่คงตัวแล้วด้วยวิธีการฝังกลบแบบสุขาภิบาล การฝังกลบแบบสุขาภิบาลเป็นวิธีหนึ่งในการกำจัดขยะของชุมชนอยู่แล้ว ดังนั้นถ้าชุมชนใดมีหลุมฝังกลบขยะอยู่แล้วอาจเลือกกำจัดสลัดจ์ด้วยวิธีฝังกลบก็ได้ หรือถ้าชุมชนใดมีเตาเผาขยะอาจเลือกวิธีเผาสลัดจ์เพื่อลดปริมาตรก่อนนำไปฝังกลบ แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดด้วยวิธีนี้จะมีต้นทุนและค่าดำเนินการสูง นอกจากนี้การก่อสร้างหลุมฝังกลบขยะสุขาภิบาลและเตาเผาขยะชุมชน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็มีปัญหาในตัวของมันเอง เนื่องจากความไม่มั่นใจของประชาชนในชุมชนนั้นต่อผลกระทบสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้น

2.3.4.2 การนำสลัดจ์ไปใช้ประโยชน์

การนำสลัดจ์ไปใช้ประโยชน์ได้แก่การนำสลัดจ์ที่ผ่านการย่อยสลัดจ์แล้วไปกำจัดบนดิน หรือใช้ในการปรับปรุงดินเพื่อการเกษตร เนื่องจากสลัดจ์มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบและเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการ การเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารของปุ๋ยหมักกับธาตุอาหารในตะกอนแห้งแสดงดังตารางที่ 2.4 วิธีนี้จะมีค่าลงทุนต่ำกว่าวิธีการฝังกลบแบบสุขาภิบาล แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้อาจไม่เป็นที่ยอมรับมากนัก เนื่องจากความไม่มั่นใจต่อผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกล่าวคือ การปนเปื้อนเชื้อโรค โลหะหนัก สารประกอบอินทรีย์ต่อแหล่งน้ำผิวดินและใต้ดิน รวมทั้งการสะสมในดินและห่วงโซ่อาหารต่อไป

ตารางที่ 2.4 ธาตุอาหารของปุ๋ยหมักและสลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียชุมชน

รายการ	ธาตุอาหาร(ร้อยละ)		
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม
ปุ๋ยหมัก	1 ±0.4	0.35 ±0.26	-
สลัดจ์**	3.3	2.3	0.3

(กรมพัฒนาที่ดิน กองอนุรักษ์ดินและน้ำ)

** สลัดจ์ที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของประเทศสหรัฐอเมริกา (Metcalf & Eddy, 1991)

2.4 โลหะหนัก

ธาตุโลหะหนัก (heavy metal) หมายถึง โลหะธาตุที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5.0 ขึ้นไป โดยไม่รวมโลหะที่เป็นโลหะแอลคาไล (alkali) และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท (alkaline earth) ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นธาตุในตารางที่มีเลขเชิงอะตอม (atomic number) ในช่วง 23-92 อยู่ในคาบที่ 4-7 แหล่งของสารมลพิษสู่ดินมีได้หลายแหล่งคือ จากสารเคมีในการเกษตร (เช่น ปุ๋ยและสารฆ่าแมลง) โรงถลุงแร่ การเผาไหม้น้ำมัน โรงงานอุตสาหกรรม ของเหลือใช้จากโรงงานและจากชุมชน ตลอดจนการใช้ที่ดินเป็นที่ถมวัสดุเหลือใช้ แหล่งปนเปื้อนเหล่านี้ ทำให้เกิดการสะสมธาตุพิษต่างๆธาตุโลหะในรูปที่หนึ่งและสองถือเป็นรูปที่เคลื่อนที่ได้(mobile)ในดินสามารถถูกพืชนำไปใช้ได้ส่วนสามรูปหลังเป็นรูปที่หยุดเคลื่อนที่ (immobile) แต่เนื่องจากกระบวนการในดินมีลักษณะเป็นพลวัต (dynamic) ทำให้อาจมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่างๆที่กล่าวถึงได้อยู่ตลอดเวลา

ตะกั่ว (Lead)

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 82 และสัญลักษณ์คือ Pb (Plumbum) ตะกั่วเป็นธาตุโลหะ เนื้ออ่อนนุ่มสามารถยืดได้ เมื่อตัดใหม่ ๆ จะมีสีขาวอมน้ำเงิน แต่เมื่อถูกกับอากาศสีจะเปลี่ยนเป็นสีเทาตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีพิษ ใช้ทำวัสดุก่อสร้าง แบตเตอรี่ กระสุนปืน ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล เป็นต้น

การเกิดปฏิกิริยา

สินแร่ตะกั่วในธรรมชาติ เช่นกาไลนา เมื่อสลายตัวจะถูกออกซิไดส์อย่างช้าๆ ให้อยู่ในรูปคาร์บอเนตหรือถูกตรึงโดยแร่ดินเหนียว ออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม และอินทรีย์วัตถุ โดยทั่วไปตะกั่วอยู่ในรูป Pb^{2+} มากกว่า Pb^{4+} และมีนิสัยคล้ายกลุ่มโลหะแอลคาไลน์เอิร์ท ดังนั้นจึงสามารถเข้าแทนที่ K, Ba, Sr และ Ca ในแร่และในตำแหน่งที่ไอออนของธาตุเหล่านี้ถูกดูดซับ

การปนเปื้อน

การปนเปื้อนต่อสภาพแวดล้อมของตะกั่ว เกิดได้จากทั้งที่เป็นการปนเปื้อนจากสภาพเหตุการณ์ธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิดและการกระทำของมนุษย์ เช่น จากการถลุงแร่ จากควัน และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม และ จากไอเสียรถยนต์ ควันเป็นแหล่งแพร่กระจายตะกั่วที่สำคัญ ตะกั่วที่เป็นสารมลพิษจากควันโรงงานส่วนใหญ่อยู่ในรูปแร่ตะกั่ว เช่น PbS , PbO , $PbSO_4$ และ $PbO \cdot PbSO_4$ ขณะที่ตะกั่วในควันจากรถยนต์อยู่ในรูปเกลือไฮไลด์ เช่น $PbBr$, $PbBrCl$, $Pb(OH)Br$, $(PbO)_2PbBr_2$ การปนเปื้อนในดินเกิดได้จากการใช้ดินเป็นแหล่งทิ้งตะกอนน้ำโสโครก (sewage sludge) และอินทรีย์วัตถุเหลือใช้ (organic waste) ต่างๆ เช่น มูลสัตว์ สารประกอบทางเคมี เช่น ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช และวัสดุเหลือใช้จากครัวเรือน (domestic waste) เช่น การขุดและถลุงสินแร่กาไลนา อันเป็นสินแร่ตะกั่วที่รู้จักกันดีทำให้เกิดการปนเปื้อนได้

ทองแดง (copper)

ทองแดง คือธาตุที่มีเลขอะตอม 29 และสัญลักษณ์คือ Cu นิกเกิดอยู่ในตารางธาตุหมู่ 29 เป็นที่ทราบกันว่ามนุษย์ใช้ประโยชน์จากทองแดงมาไม่น้อยกว่า 10,000 ปี พบหลักฐานว่ามนุษย์สามารถหลอมสกัดทองแดงให้บริสุทธิ์ได้เมื่อประมาณ 5000 ปีก่อนคริสตกาล ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่มนุษย์จะรู้จักกับทองคำ

สังกะสี (Zinc)

สังกะสี (Zinc) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 30 และสัญลักษณ์คือ Zn สังกะสีอยู่ในตารางธาตุหมู่ 12 ชื่อในภาษาอังกฤษมาจากภาษาเยอรมันว่า Zink เป็นธาตุประเภทโลหะที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเคมีพอสมควรกับออกซิเจนและธาตุที่ไม่ใช่โลหะ สังกะสีเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดเจือจางจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนออกมา ประโยชน์ของสังกะสีในทางอุตสาหกรรมได้แก่ การชุบโลหะ การทำบรอนซ์ ยารักษาโรคผิวหนัง ภาชนะโลหะเคลือบ ในทางเกษตรใช้เป็นสารคลุกเมล็ดมาเชื้อรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ ห้ามการใช้นิติกรรมที่ผิดกฎหมายโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปฏิกิริยา

การสลายตัวของของแร่สังกะสีทำให้ได้สังกะสีในรูป Zn^{2+} ซึ่งเคลื่อนย้ายได้ในสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด แต่เมื่ออยู่ในดินก็จะถูกดูดซับโดยแร่และสารอินทรีย์ จึงพบการสะสมของสังกะสีได้

รูปของสังกะสีที่พบได้มากที่สุดคือรูป Zn^{2+} สังกะสีในรูปอื่นอาจปรากฏให้เห็นได้ชัดเจน ตัวอย่างต่อไปนี้

รูปแคตไอออน : Zn^{2+} , $ZnCl^+$, $ZnOH^+$, $ZnHCO_3^+$

รูปแอนไอออน : ZnO_2^- , ZnO_2^{2-} , $Zn(OH)_3^-$

สารประกอบ : $Zn(OH)_2$, ZnO , $Zn_3(PO_4)_2 \cdot H_2O$, $Zn_5(OH)_6(CO_3)_2$, $ZnCO_3$

ปัจจัยสำคัญที่ควบคุมสภาพเคลื่อนที่ได้ของสังกะสีนั้นคล้ายคลึงกับของทองแดงเป็นอย่างมาก แต่สังกะสีอยู่ในสภาพละลายได้ในปริมาณที่มากกว่าทองแดง ซึ่งพีเอชนับเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้สังกะสีละลายและถูกพืชดูดกินได้ การดูดซับสังกะสีของดินจะลดลงเป็นอย่างมากเมื่อพีเอชของดินต่ำกว่า 7 และสังกะสีจะเคลื่อนย้ายได้ดีถ้าเป็นเนื้อหยาบ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับธาตุโลหะอื่นๆ ในดินแล้ว จัดได้ว่าสังกะสีอยู่ในสภาพละลายได้ที่มากกว่าธาตุอื่น

นิเกิล (Nickel)

นิเกิล (Nickel) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 28 และสัญลักษณ์คือ Ni อยู่ในตารางธาตุหมู่ 28 นิเกิลเป็นโลหะที่มีความมันวาวสีขาวยเงิน มันอยู่กลุ่มเดียวกับเหล็กมีความแข็งแต่ตีเป็นแผ่นได้ในธรรมชาติจะทำปฏิกิริยาเคมีกับกำมะถันเกิดเป็นแร่มิลเลอร์ไรต์ (millerite) ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับสารหนู (arsenic) จะเกิดเป็นแร่นิกกอไลต์ (niccolite) แต่ถ้าทำปฏิกิริยาเคมีกับทั้งสารหนูและกำมะถันจะเป็นก้อนนิเกิลกลานซ์ (nickel glance)

2.5 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

การหาปริมาณโลหะหนัก นิยมใช้เทคนิคแบบเป็นลำดับขั้น เนื่องจากวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้ โดยศึกษาสมบัติทางเคมีของโลหะและแร่ธาตุในดินตะกอน ซึ่งการศึกษานี้จะทำให้เข้าใจเคมีของดินที่สัมพันธ์ระหว่างโลหะและชนิดของดินหรือกากตะกอน วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นจะเกี่ยวข้องกับการเลือกสารเคมีที่เหมาะสมในการสกัดแต่ละลำดับ (เพ็ญใจ, 2532)

ปริมาณของโลหะหนักที่ออกมาในแต่ละส่วนสามารถทำนายลักษณะของโลหะหนักที่เป็นพิษในสภาวะแวดล้อมต่างๆ ได้ การเคลื่อนที่ของโลหะหนักมักขึ้นกับพีเอช ศักย์รีดอกซ์และการเกิดสารเชิงซ้อนกับลิแกนด์ ดังนั้นการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นจึงมีความสำคัญในการศึกษาทางสิ่งแวดล้อม โดยการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาจากงานวิจัยหลายท่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ (รัตติกาล, 2542)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 1 : ส่วนที่ละลายน้ำได้ (deionized H₂O, pH 7)

ปกติน้ำบริสุทธิ์จะไม่ใช่ตัวสกัดที่ใช้กัน แต่มักใช้เป็นการสกัดในช่วงแรก เพื่อพิจารณาว่า โลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างนั้นสามารถละลายน้ำได้หรือไม่ เพื่อใช้เป็นข้อมูลที่มีประโยชน์ในการดูแลผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ขั้นที่ 2 : ส่วนที่แลกเปลี่ยนไอออนได้ (1.0 M NH₄OAc, pH 7)

ส่วนนี้ง่ายต่อการแลกเปลี่ยนต่อสิ่งแวดล้อม ผลของการแลกเปลี่ยนประจุบวกของโลหะที่จับกันอย่างหลวมๆ ด้วยแรงไฟฟ้าสถิตกับแร่ธาตุ ทั้งในสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ของตะกอน คุณสมบัติของสารสกัดในส่วนนี้คือ เป็นสารละลายที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่แตกตัวในน้ำได้ และสามารถละลายไอออนโลหะที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวของตัวอย่าง สารสกัดในส่วนนี้นิยมใช้สารที่เป็น neutral salt electrolytes และ buffered neutral solutions ซึ่ง MgCl₂ และ NH₄OAc นิยมใช้กันมากในส่วนนี้ เพราะไอออนที่มีประจุ +2 จะมีประสิทธิภาพในการสกัดได้ดีกว่า ยกเว้น NH₄⁺ ที่สามารถสกัดโลหะหนักได้ดีเท่ากับประจุ +2 และตัวอะซิเตตสามารถจับกับโลหะหนักได้เสถียรมากกว่าโลหะหนักที่จับกับคลอไรด์ไอออน

ขั้นที่ 3 : ส่วนที่ละลายได้ในกรด (0.11 M CH₃COOH, pH 3)

คุณสมบัติของสารในส่วนนี้ ต้องสามารถละลายโลหะที่เชื่อมอยู่กับคาร์บอเนตได้ ซึ่งสารละลายอะซิเตตถูกนำมาใช้ โดยทำให้อยู่ในสถานะเป็นกรดที่พีเอช 5 เพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำกรดอะซิติก 0.11 M พีเอช 3 มาใช้ในการสกัด โดยใช้อัตราส่วน สารตัวอย่างต่อสารที่ใช้สกัดเท่ากับ 1 : 25 กรัม : มล.

ขั้นที่ 4 : ส่วนที่ถูกรีดิวซ์ได้ (0.1 M NH₂OH.HCl in CH₃COOH 25 % v/v pH 2)

ในงานวิจัยนี้จะใช้การผสมของ reducing agent และกรดซึ่งปกติใช้สกัดโลหะปริมาณน้อยที่ยึดเกาะอยู่กับ Fe-oxidation หรือ Mn-oxide ในดินและตะกอน ซึ่งรูปของออกไซด์นี้เรียกว่า reducing phase โดยมีช่วงอยู่ระหว่าง amorphous และ crystalline ค่าพีเอชที่ได้ จะต้องปรับให้มีค่าน้อยกว่า 3 เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการรีดิวซ์ของ reducing agent HOAc-NH₂OH.HCl ไม่สามารถรีดิวซ์ปริมาณสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในตัวอย่างตะกอนได้แต่มีความเฉพาะเจาะจงกับพวกโลหะออกไซด์ ซึ่งในส่วนนี้ปกติจะนิยมใช้ hydroxylamine hydrochloride ใน acid เป็นการสกัด

ขั้นที่ 5 : ส่วนที่ถูกออกซิไดซ์ได้ (30% H₂O₂ acidified with HNO₃, pH 2/1.0 M NH₄OAc, pH 2)

การสกัดโลหะในดินและตะกอนที่เชื่อมอยู่กับสารอินทรีย์ด้วยกลไกหลายแบบ เช่น การดูดซับ การเกิดสารเชิงซ้อนและการเกิดคีเลตภายใต้การสกัดเป็นลำดับจะมีสารที่เป็นตัวออกซิไดซ์ เพื่อให้ละลายสารอินทรีย์หรือสารที่สามารถที่จะถูกออกซิไดซ์ได้ สาเหตุที่สารสกัดนี้ต้องรักษาสภาพให้เป็นกรดเพื่อป้องกันการตกตะกอนของโลหะไฮดรอกไซด์ เพราะอาจเกิดการดูดซับกลับไม่มากนักอีกขั้นหนึ่งคือใช้น้ำที่ผ่านการกรองแล้วเพื่อละลายตัวอย่างออกซิไดซ์ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้สารสกัดและ

สภาวะโดยใช้ 30% H_2O_2 ที่ถูกทำให้เป็นกรดด้วย HNO_3 ให้มีพีเอชเท่ากับ 2 และเติม 1.0 NH_4OAC พีเอช 2 หลังจากทำการสกัดด้วย 30% H_2O_2

ขั้นที่ 6 : ส่วนที่เหลือ (HF/HNO_3 , 2:3 v/v)

หลังจากที่สกัดบางส่วนออกไปแล้ว ของแข็งส่วนใหญ่จะเป็นแร่ปฐมภูมิ และทุติยภูมิ ในส่วนนี้จึงใช้สารสกัดที่มีความเป็นกรดแรง เพื่อละลายซิลิเกต และส่วนที่เหลืออื่นๆ ที่ไม่สามารถสกัดออกมาได้ด้วยสารสกัดที่มีความแรงอ่อน ส่วนที่เหลือจากส่วนที่ 5 สามารถถูกละลายได้ โดยการย่อยด้วย ไฮโดรเจนฟลูออไรด์ (HF) และ กรดไนตริก (HNO_3) ที่อัตราส่วน 2 : 3 v/v

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วรวิทย์ จันทรสุวรรณ (2547) วิเคราะห์ตามลำดับขั้นของ Tessier เพื่อจำแนกรูปแบบของโลหะหนักในตัวอย่างตะกอนท้องน้ำ โดยได้แบ่งวิธีสกัดตามลำดับขั้นออกเป็น 5 ขั้นตอนการสกัด คือ ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ ส่วนคาร์บอเนต ส่วนออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส ส่วนอินทรีย์ และ ส่วนกาก แต่มีรายงานว่าปัญหาที่พบคือประสิทธิภาพในการสกัดไม่คงที่ ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางธรณีเคมีของตะกอนดินท้องน้ำแต่ละแหล่งแตกต่างกัน ในการทดลองนี้ได้นำวิธีสกัดตามลำดับขั้นของ Tessier ปรับแปร สภาวะการสกัดบางอย่างเช่น เวลาที่ใช้ในการสกัด และการทำการสกัดซ้ำ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก จากการทดลองพบว่าเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการสกัดเป็น 1, 3, 5 และ 4 ชั่วโมง สำหรับส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ ส่วนคาร์บอเนต ส่วนออกไซด์ของเหล็กและแมงกานีส และส่วนอินทรีย์ ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบระหว่างวิธี การสกัดตามลำดับขั้นที่ได้ปรับแปรกับวิธีของ Tessier พบว่าวิธีที่ได้ปรับแปรให้ระยะเวลาในการสกัดสั้นกว่าซึ่งจะเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์โลหะหนักในตัวอย่างจำนวนมากๆ

SI Ji-tao *et al.* (2003) ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความสามารถในการสกัดโลหะในรูปที่พีชนำไปใช้ประโยชน์ได้ออกจากดิน โดยทำการเติม $Cd(NO_3)_2$, $Pb(NO_3)_2$ และ $Zn(NO_3)_2$ ในความเข้มข้น 30 มก/กก, 2000 มก/กก และ 300 มก/กก ตามลำดับ ลงในดิน Richfield, Teller และ Webster ซึ่งดินทั้ง 3 ชนิดนี้มีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ที่ต่างกัน ดิน Teller เป็นดินทรายมีสภาวะเป็นกรด ดิน Webster เป็นดินเหนียวสภาพเป็นกลางมีอินทรีย์วัตถุในดิน Richfield เป็นดินเหนียว เป็นกรดสูงกว่าและมีอินทรีย์วัตถุในดินต่ำกว่าดิน Webster ทำการทดลองโดยใช้อุณหภูมิ $35^\circ C$, $60^\circ C$ และ $105^\circ C$ กับดินทั้ง 3 ชนิด และสกัดปริมาณ Cd, Pb, Zn ในรูปที่พีชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยใช้ $0.1 \text{ mol/L } Ca(NO_3)_2$ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิส่งผลต่อปริมาณ

ของโลหะที่สกัดออกมาได้ในลักษณะแตกต่างกันไป แต่อาจสรุปได้ว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ $35^\circ C$ จะทำให้สกัดโลหะออกมาได้มากที่สุด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Zorpus et al. (2000) ได้ศึกษาถึงผลของความร้อนที่ความแตกต่างของ 4 อุณหภูมิที่มีผลต่อพฤติกรรมของโลหะหนักในกากตะกอนที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการบำบัดสลัดจ์ขั้นแรกจากระบบบำบัดน้ำเสีย Psittalias ซึ่งกากตะกอนน้ำเสียพบว่ามี โลหะหนักอย่างมีนัยสำคัญในรูปของ (โครเมียม คอปเปอร์ เหล็ก นิกเกิล ตะกั่ว และ สังกะสี) จากรูปแบบการกระจายของโลหะในตัวอย่างสลัดจ์ซึ่งอธิบายได้โดยการใช้วิธีการสกัดลำดับชั้นในรูปของสารอินทรีย์ และ รูปที่เหลื่อ ที่อุณหภูมิ 105, 250, 650, และ 900 องศาเซลเซียสซึ่งแสดงให้เห็นอย่างมีนัยสำคัญถึงการเปลี่ยนแปลงของโลหะถึงการเคลื่อนที่ได้เล็กน้อยตลอดจนการกำจัดโดยการกลายเป็นไอระเหย โดยการใช้การวิเคราะห์แบบลำดับชั้นพบว่าส่วนใหญ่ถูกกำจัดจากการเริ่มเคลื่อนที่จนในรูปอยู่ในรูปที่เสถียรและนอกจากนี้ยังมีการส่งผ่านในรูปของก๊าซอย่างได้มีนัยสำคัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

1. กากตะกอนที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของบริษัท Global Utilities Services
2. พีเอชมิเตอร์ ยี่ห้อ Denver instrument model 250
3. เครื่องอะตอมมิกแอปซอพซันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Shimadzu AA-680
4. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด ยี่ห้อ Precisa 205A
5. เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ยี่ห้อ Bruker axs รุ่น SRS 3400
6. ตะแกรงร่อนขนาด 12 เมช
7. เครื่องเขย่าแนวนอน (Horizontal shaker) ยี่ห้อ Sanyo รุ่น CENTAUR2
8. เครื่องปั่นเหวี่ยงพร้อมหลอด ยี่ห้อ Sanyo รุ่น CENTAUR 2
9. ตู้อบเครื่องแก้วและสารเคมี
10. เครื่องกรองระบบสูญญากาศยี่ห้อ Buchi B-169 vacuum-system
11. กระดาษกรองใยแก้วขนาด 0.45 ไมโครเมตร
12. กระดาษกรองเมมเบรนขนาด 1 ไมโครเมตร
13. ขวดพลาสติกใสสารตัวอย่าง ขนาด 60 และ 100 มิลลิเมตร
14. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (Kjeldahl distillation apparatus)
15. สารละลายมาตรฐานของโลหะหนัก (Standard Metal Solution) เตรียมอนุกรมของสารละลายมาตรฐานของโลหะที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ตามความเหมาะสมโดยการเจือจางสารละลายสต็อกของโลหะด้วยน้ำกลั่น ซึ่งมีกรดไนตริกเข้มข้น 1.5 mL ต่อน้ำกลั่น 1L
16. แท่นให้ความร้อน (Hot plate) ยี่ห้อ Fisher Scientific รุ่น ISOTEM
17. เครื่องวัด pH (pH meter) ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น 250

3.1.2 สารเคมี

1. แอมโมเนียมอะซิเตต ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) (pH 7) 1.0 M A.R.Grade, บริษัท Apex, USA
2. ไฮดรอกซีเลทามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) A.R.Grade, บริษัท Italmar, Italy
3. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) A.R.Grade, บริษัท Italmar, Italy
4. ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) 95% A.R.Grade, บริษัท Apex, USA
5. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl) A.R.Grade, บริษัท Apex, USA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกระใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. แอมโมเนียมออกซาเลท (Ammonium oxalate) A.R.Grade, บริษัท Apex, USA
7. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) A.R.Grade , บริษัท Apex, USA
8. ซิลเวอร์ไนเตรท (AgNO_3) A.R.Grade , บริษัท Apex, USA
9. โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) A.R.Grade , บริษัท Apex, USA
10. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) A.R.Grade , บริษัท Apex, USA
11. บอริกแอซิดอินดิเคเตอร์ (HBO_3) A.R.Grade , บริษัท Apex, USA
12. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) A.R.Grade , บริษัท Italmar, Italy
13. กรดอะซิติก (CH_3COOH) A.R.Grade , บริษัท Italmar, Italy
14. กรดไนตริก (HNO_3) A.R.Grade , บริษัท Italmar, Italy

3.2 แหล่งที่มาของกากตะกอน

ตัวอย่างกากตะกอนน้ำเสียที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นประเภทกากตะกอนจากระบบตะกอนเร่งที่เก็บรวบรวมจากระบบบำบัดน้ำเสียของบริษัท โกบอลยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง 94 ถ.ฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง 10520 กรุงเทพมหานคร ได้ทำการเก็บตัวอย่างแบบ composite ในวันที่ 19 พฤศจิกายน พ.ศ.2553 โดยทำการเก็บตัวอย่างกากตะกอนในขั้นสุดท้ายของการรีดน้ำออกจากกากตะกอน โดยสุ่มกากตะกอนเป็นช่วงเวลาของการรีดน้ำออกซึ่งจะเก็บกากตะกอนทุกๆ 4 ชั่วโมง ครั้งละประมาณ 100 กรัม เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงแล้วนำกากตะกอนที่ได้มาแล้วทำการคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันหลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างของกากตะกอนที่ได้มาทำการทดลองต่อไป ซึ่งจุดเก็บตัวอย่างกากตะกอนและตัวอย่างกากตะกอนดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.1 จุดเก็บตัวอย่างกากตะกอนการศึกษาเท่านั้น รูปที่ 3.2 ตัวอย่างกากตะกอนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน

ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจากสภาพของกากตะกอนที่เก็บรวบรวมมาได้

ตารางที่ 3.1 วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน

พารามิเตอร์	วิธี/เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช
ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (CEC)	วิธีทำให้อิ่มตัวด้วยแอมโมเนีย
ปริมาณอินทรีย์สาร	วิธีการออกซิเดชันแบบเปียก
ปริมาณความชื้น	วิธีอบแห้ง-กราวิเมตริก
ปริมาณออกไซด์ของโลหะ	เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
ความเข้มข้นของโลหะหนัก	วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น

หมายเหตุ: ดูวิธีการทดลองในภาคผนวก ก

3.4 การทำการทดลอง

3.4.1 นำกากตะกอนที่ได้มาทำการหาค่าความชื้นที่อยู่ในกากตะกอนจำนวน 10 กรัมโดยการนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.4.2 นำกากตะกอนมาใหม่อีกจำนวน 1 กรัมเพื่อทำการวิเคราะห์ดังนี้

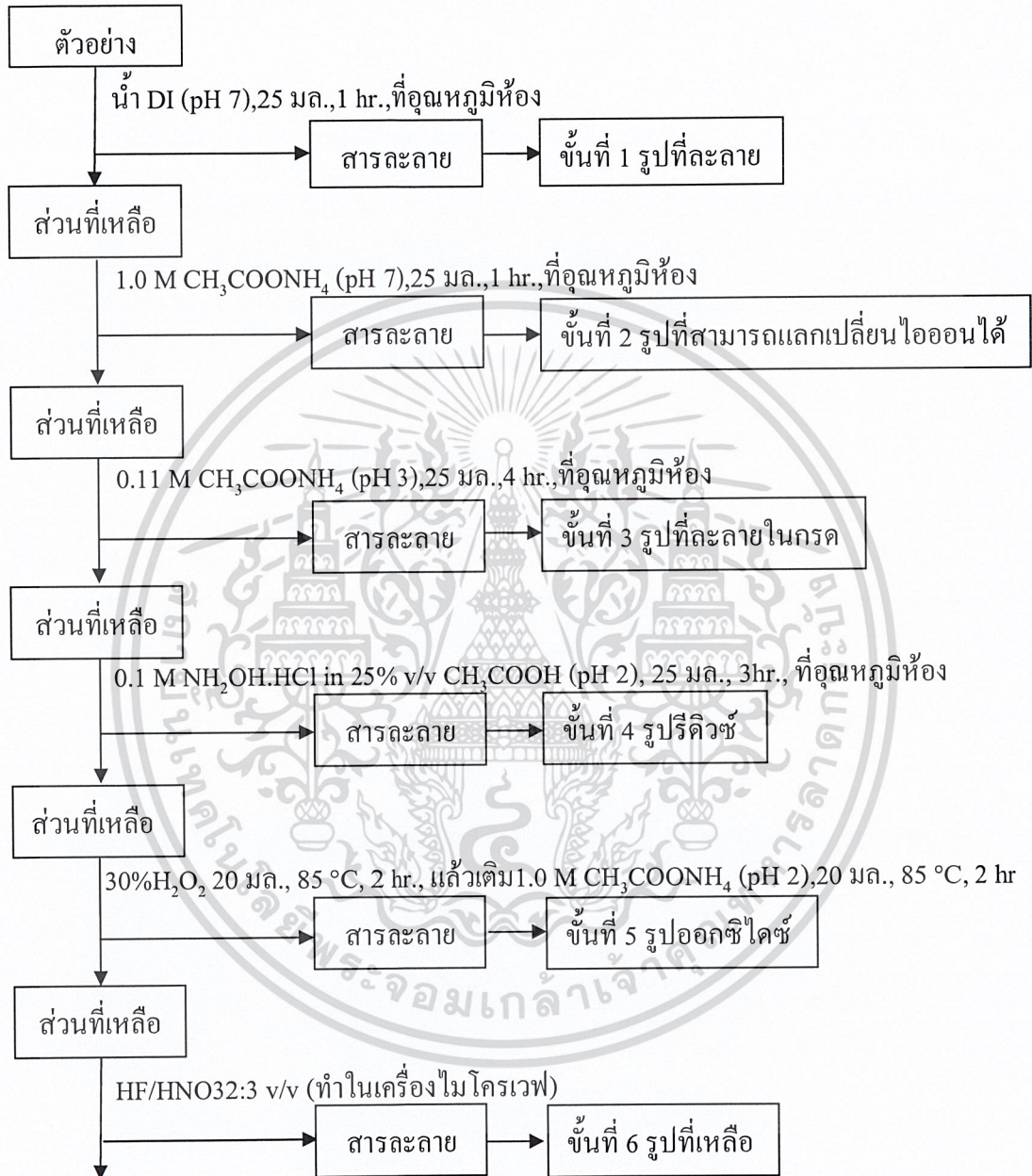
3.4.2.1 นำกากตะกอนจำนวน 1 กรัมมาทำการอบที่อุณหภูมิแตกต่างกัน คือ 60 °C, 80 °C และ 100 °C ที่เวลาแตกต่างกันคือ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับและทำการหาความชื้นของกากตะกอนหลังอบ

3.4.2.2 นำกากตะกอนที่ได้จากการอบมาทำการสกัดลำดับขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

นำตัวอย่างสลัดจ์มาทำการสกัดแบบเป็นลำดับขั้นเพื่อศึกษาสัดส่วนของโลหะรูปแบบต่างๆ ในสลัดจ์ซึ่งลำดับการสกัดแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การสกัดโลหะรูปแบบต่างๆ ออกจากสลัดจ์แบบเป็นลำดับขั้น
(ดูวิธีการทดลองในภาคผนวก ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน

ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน พบว่าค่า pH ของกากตะกอนมีค่าเป็นกลาง ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ค่า CEC ของศูนย์ฝึกวิศวกรรมการเกษตร ดังตารางที่ 4.2 อีกทั้งเปอร์เซ็นต์ปริมาณสารอินทรีย์ในกากตะกอนที่สูง จึงส่งผลให้ค่า CEC สูงขึ้นด้วย ด้านเปอร์เซ็นต์ความชื้น พบว่า กากตะกอนมีค่าความชื้นค่อนข้างสูง อุ้มน้ำได้มาก ทำให้มีลักษณะคล้ายดินเหนียว ด้านการวิเคราะห์ปริมาณโลหะออกไซด์ของกากตะกอนด้วยเครื่อง XRF พบว่า กากตะกอนมีเปอร์เซ็นต์แคลเซียมออกไซด์สูงสุด เท่ากับ 33.6 รองลงมาคือ เปอร์เซ็นต์ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ เท่ากับ 26.0 และปริมาณโลหะออกไซด์ของกากตะกอนที่มีค่าต่ำสุด คือ เปอร์เซ็นต์สทรองเนียมออกไซด์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.166 และจากด้านการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักพบว่า กากตะกอนมีปริมาณทองแดงสูงที่สุด รองลงมาปริมาณสังกะสี ปริมาณนิกเกิล ปริมาณโครเมียม ปริมาณตะกั่ว และปริมาณแคดเมียมตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ค่าทางกายภาพและทางเคมีที่วัดได้ของคุณสมบัติกากตะกอนต่างๆ

คุณสมบัติของกากตะกอน	ค่าที่วัดได้
พีเอช (pH)	6.53 ± 0.15
ความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) (meq/100g)	18.23 ± 0.26
ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)	(43.4 × 10 ⁻⁵) ± 0.46
%ปริมาณสารอินทรีย์ในกากตะกอน	11.2 ± 0.26
%ความชื้น	87.65 ± 0.58
%แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	33.6
%ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	26.0
%คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)	24.3
%เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	6.13
%ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	5.44
%แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.66

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ค่าทางกายภาพและทางเคมีที่วัดได้ของคุณสมบัติกากตะกอนต่างๆ

คุณสมบัติของกากตะกอน	ค่าทางกายภาพที่วัดได้
%เฮฟเนียมออกไซด์(HfO ₂)	0.724
%นิกเกิลออกไซด์ (NiO)	0.398
%บิสมัทออกไซด์(Bi ₂ O ₃)	0.279
%เลดออกไซด์	0.213
%สทรอนเซียมออกไซด์ (SrO)	0.166
ปริมาณทองแดง (mg/kg)	41,632.38 ± 15.38
ปริมาณสังกะสี (mg/kg)	2,747.861 ± 3.24
ปริมาณนิกเกิล (mg/kg)	216.317 ± 0.56
ปริมาณโครเมียม (mg/kg)	33.344 ± 0.27
ปริมาณตะกั่ว (mg/kg)	26.172 ± 0.16
ปริมาณแคดเมียม (mg/kg)	4.177 ± 0.02

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ค่า CEC (ศูนย์ฝึกวิศวกรรมการเกษตร, 2503)

ระดับ	CEC(meq/100g)
ต่ำมาก	น้อยกว่า3
ต่ำ	3-5
ค่อนข้างต่ำ	6-10
ปานกลาง	11-15
ค่อนข้างสูง	16-20
สูง	21-30
สูงมาก	มากกว่า30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

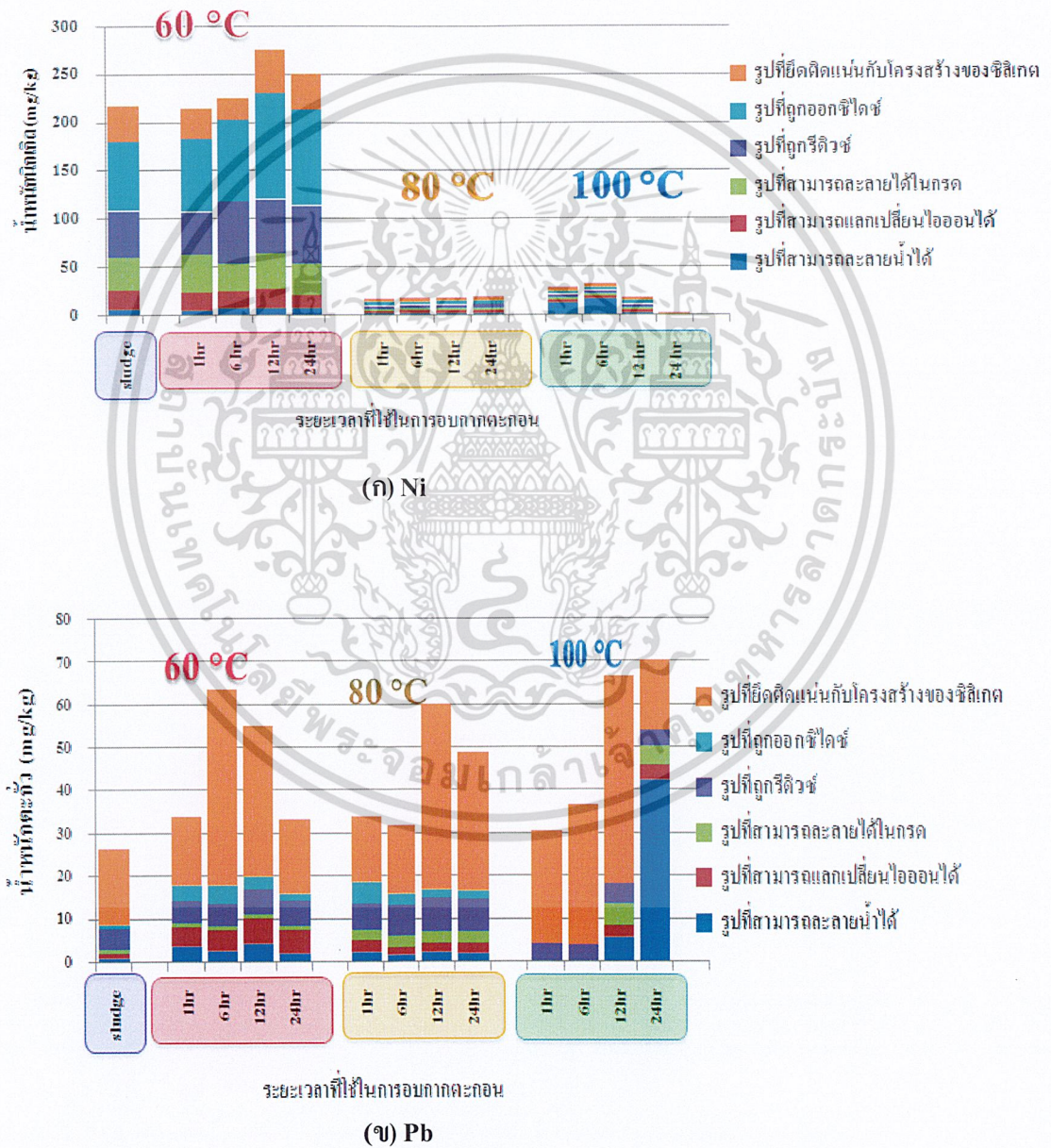
ตารางที่ 4.3 เปอร์เซ็นต์ความชื้นของกากตะกอนหลังทำการอบ

อุณหภูมิ(°C)	เวลา(hr)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น			
		1	2	3	เฉลี่ย
60	1	86.03	86.15	86.06	86.08
	6	85.18	85.20	85.17	85.18
	12	49.93	48.87	50.02	49.61
	24	43.40	42.25	43.32	42.99
80	1	69.26	68.95	69.24	69.15
	6	57.31	57.29	57.01	57.20
	12	26.87	26.78	26.91	26.85
	24	20.17	20.02	19.88	20.02
100	1	68.49	68.24	67.96	68.23
	6	52.98	52.74	52.86	52.86
	12	21.53	22.25	21.13	21.64
	24	15.51	16.23	15.14	15.63

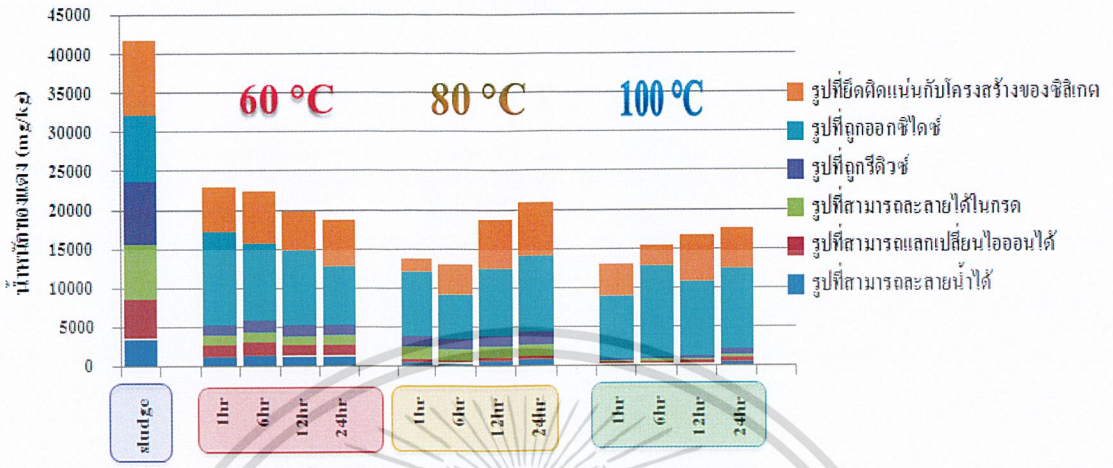
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสกัดโลหะหนักออกจากสลัดจ์โดยใช้วิธีการสกัดลำดับขั้นของ Tessier หลังอบกากตะกอนที่อุณหภูมิและระยะเวลาแตกต่างกัน

ในการทดลองนี้เป็นการใช้การสกัดลำดับขั้นของ Tessier โดยมีการทำการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C และ 100 °C ในระยะเวลาที่ 1 , 6 , 12 และ 24 ชั่วโมงตามลำดับ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดโลหะหนักที่ดีที่สุด ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปแบบที่ 4.1

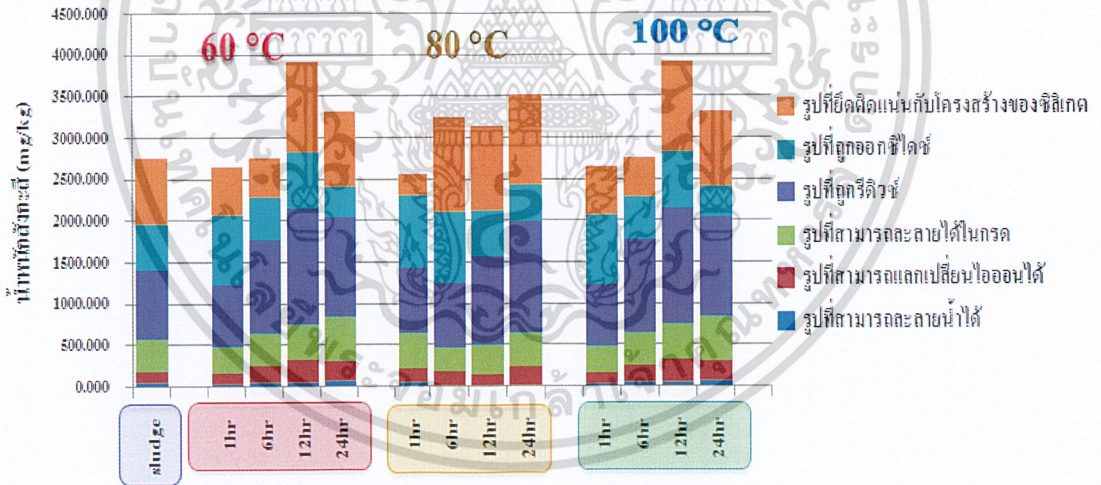


เอกสารนี้รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น ชนิดด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบกากตะกอน เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระยะเวลาที่ใช้ในการอบกักตะกอน

(ก) Cu



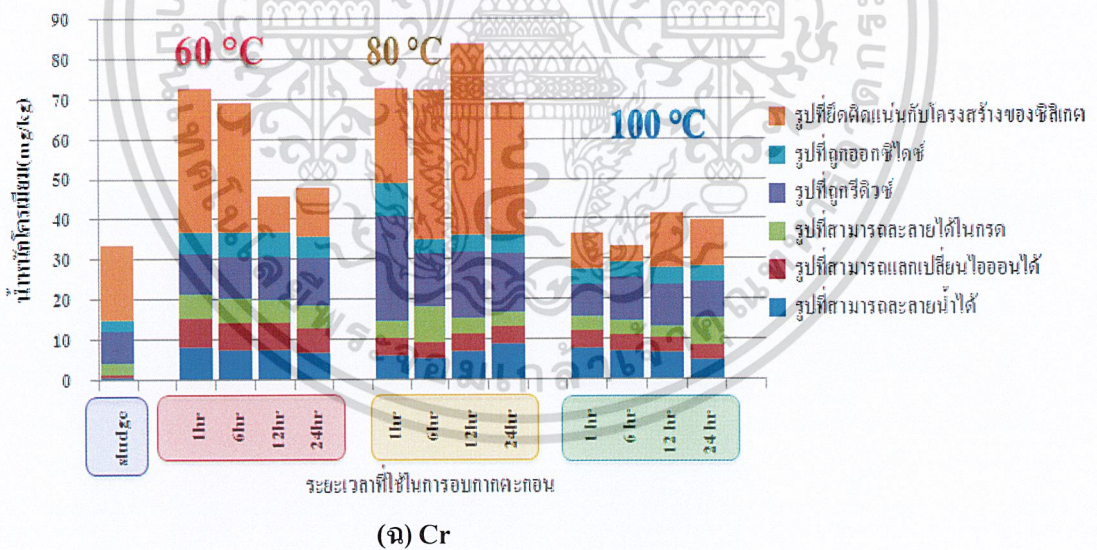
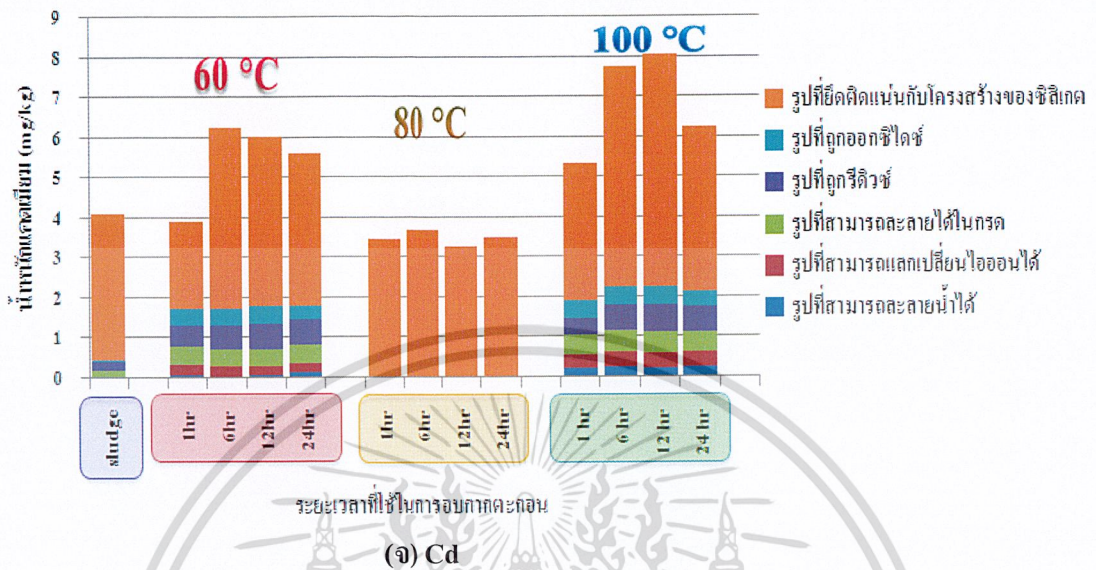
ระยะเวลาที่ใช้ในการอบกักตะกอน

(ง) Zn

รูปที่ 4.1 (ต่อ) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น

ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบกักตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



หมายเหตุ sludge คือ กากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

รูปที่ 4.1 (ต่อ) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ได้จากการสกัดลำดับขั้น

ระหว่างอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบกากตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าความชื้นหลังจากอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงยังสูงอยู่มาก คือมีค่า 85.18 % ซึ่งไม่ต่างกับการอบที่ 1 ชั่วโมงมากนัก แต่เมื่ออบเป็นเวลา 12 ชั่วโมงและ 24 ชั่วโมง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆจนเหลือ 42.99 %

จากรูปที่ 4.1 (ก) จะเห็นว่า เมื่ออบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำมาสกัดแบบลำดับขั้น จะสามารถสกัด Ni ออกมาได้มากที่สุดที่ปริมาณ 274.374 mg/kg ซึ่งมากกว่าปริมาณ Ni ที่สกัดได้จากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบ ซึ่งรูปของ Ni ที่สกัดออกมามากที่สุดคือรูปที่ถูกออกซิไดซ์ ผลการทดลองหลังการอบที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C แล้วนำไปสกัด พบว่าปริมาณ Ni ที่สกัดได้น้อยมาก

จากข้อมูลความชื้นดังตารางที่ 4.3 และปริมาณ Ni ที่สกัดได้ดังรูปที่ 4.1 (ก) ยังไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ ระหว่างปริมาณ Ni ที่สกัดได้กับค่าความชื้นได้ชัดเจนนัก

รูปที่ 4.1 (ข) เมื่ออบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปสกัด Pb จะพบว่าสามารถสกัด Pb ได้ในปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณ Pb ที่สกัดออกจากตะกอนหลังอบที่ 100 °C เป็นเวลา 12 และ 24 ชั่วโมง ซึ่งรูปของ Pb ที่สกัดออกมามากที่สุดคือรูปที่ยึดติดแน่นกับ โครงสร้างของซิลิเกต ผลการทดลองหลังการอบที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ที่เวลา 1, 6, 12, 24 ชั่วโมง แล้วนำไปสกัด Pb จะพบว่า Pb จะถูกสกัดออกมามากขึ้นเมื่อมีความชื้นในกากตะกอนลดลง ส่วนปริมาณ Pb ที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบจะน้อยกว่าตะกอนที่ผ่านการอบมาก

รูปที่ 4.1 (ค) เมื่ออบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1, 6, 12, 24 ชั่วโมง แล้วนำไปสกัด Cu พบว่า Cu จะถูกสกัดออกมได้น้อยลงเมื่อมีความชื้นเหลือในตะกอนมากขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้จะตรงข้ามกับผลการสกัด Cu หลังจากอบที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C แต่ทั้งนี้ Cu สามารถถูกสกัดออกมาได้สูงสุดหลังจากการนำไปอบที่ 60 °C เป็นเวลา 1-6 ชั่วโมง ซึ่งรูปของ Cu ที่สกัดออกมามากที่สุดคือรูปออกซิไดซ์ รองลงมาคือรูปที่ยึดติดแน่นกับ โครงสร้างของซิลิเกต และพบว่าปริมาณ Cu ที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบจะมากกว่ากากตะกอนที่ผ่านการอบแล้ว

รูปที่ 4.1 (ง) จะเห็นว่าผลการทดลองมีรูปแบบที่คล้ายกัน เมื่ออบด้วยอุณหภูมิทั้งสาม คือ เมื่ออบนานขึ้นความชื้นในตะกอนจะเหลือน้อยลงแต่ Zn ถูกสกัดออกจากกากตะกอนได้มากขึ้น หลังจากอบที่ 60 °C แล้วนำไปสกัดจะให้ปริมาณ Zn สูงที่สุด เท่ากับ 3897.95 mg/kg ซึ่งรูปของ Zn ที่สกัดออกมามากที่สุดคือรูปที่ถูกรีดิวซ์ และปริมาณ Zn ที่ถูกสกัดออกจากกากตะกอนที่ผ่านการอบจะมากกว่าตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบ

รูปที่ 4.1 (จ) จะเห็นว่าหลังจากอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 6 และ 12 ชั่วโมง แล้วนำไปสกัด Cd จะให้ปริมาณ Cd ออกมาสูงพอๆกัน ซึ่งถือว่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกากตะกอนที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิอื่นๆ ซึ่ง Cd ที่สกัดออกมามีส่วนมากจะอยู่ในรูปที่ยึดติดแน่นกับ โครงสร้างของซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะงานวิจัยที่สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนวิจัยและวิจัยพัฒนาของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และไม่อนุญาตให้นำไปใช้

และพบว่าปริมาณ Cd จะถูกสกัดออกมาจากกากตะกอนที่ผ่านการอบแล้วมากกว่ากากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบ

รูปที่ 4.1 (จ) จะเห็นว่าหลังจากอบที่อุณหภูมิ 80 °C แล้วนำไปสกัด Cr พบว่า Cr จะถูกสกัดออกมาได้มากกว่า เมื่อนำกากตะกอนไปอบที่อุณหภูมิอื่นๆ หลังจากอบที่อุณหภูมิ 60 °C แล้วนำไปสกัด Cr จะเห็นว่า Cr จะถูกสกัดออกมาได้น้อย ซึ่ง Cr ที่สกัดได้ส่วนมากจะอยู่ในรูปที่ยึดติดแน่นกับโครงสร้างของซิลิเกต และพบว่าปริมาณ Cr จะถูกสกัดออกมาจากกากตะกอนที่ผ่านการอบแล้วมากกว่ากากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า เมื่อใช้การอบที่อุณหภูมิ 60 °C แล้วนำไปสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนจะให้ผลการสกัดโลหะหนักที่ดีที่สุด ซึ่งโลหะหนักในรูปออกไซด์และรูปที่ยึดติดแน่นกับโครงสร้างของซิลิเกตจะถูกสกัดออกมาได้มากที่สุด เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบนานขึ้น จะทำให้ความชื้นในกากตะกอนลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเมื่อความชื้นน้อยลงจะส่งผลให้โลหะหนักถูกสกัดออกมาได้มากขึ้น และพบว่าผลการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ผ่านการอบแล้วจะให้ปริมาณโลหะหนักมากกว่ากากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

ผลจากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอน พบว่าค่า pH ของกากตะกอนมีค่าเป็นกลาง ค่าความจุในการแลกเปลี่ยนไอออน (CEC) มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ค่า CEC ของศูนย์ฝึกรักษาระบบการเกษตรดังตารางที่ 4.2 อีกทั้ง เปอร์เซ็นต์ ปริมาณสารอินทรีย์ในกากตะกอนที่สูง จึงส่งผลให้ค่า CEC สูงขึ้นด้วย ด้านเปอร์เซ็นต์ ความชื้น พบว่า กากตะกอนมีค่าความชื้นค่อนข้างสูง อุ้มน้ำได้มาก ทำให้มีลักษณะคล้ายดินเหนียว และจากการวิเคราะห์ปริมาณ โลหะออกไซด์ของกากตะกอนด้วยเครื่อง XRF พบว่า กากตะกอนมี เปอร์เซ็นต์ แคลเซียมออกไซด์ เปอร์เซ็นต์ ซัลเฟอร์ ไตรออกไซด์และ เปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ออกไซด์สูงมาก ที่สุดตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่มีอุณหภูมิและระยะเวลาในการอบที่แตกต่างกันโดยการสกัดแบบลำดับขั้น

ปริมาณ โลหะหนักจะถูกสกัดด้วยวิธีการสกัดแบบลำดับขั้น เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง กากตะกอนที่อบที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, และ 100 °C จะพบว่าหลังจากอบที่อุณหภูมิ 60 °C โลหะหนักจะถูกสกัดออกจากกากตะกอน ได้มากที่สุด และเมื่อเทียบกับเวลาในการอบคือ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง พบว่า เมื่ออบนานขึ้นค่าความชื้นที่เหลือในกากตะกอนจะลดลง และส่งผลให้โลหะหนักถูกสกัดออกจากกากตะกอนได้มากขึ้น ซึ่งโลหะหนักที่ถูกสกัดออกได้ด้วยวิธีแบบลำดับขั้นจะเป็นโลหะหนักในรูปออกซิไดซ์และรูปที่ยึดติดแน่นกับ โครงสร้างของซิลิเกตเป็นส่วนใหญ่และการสกัดโลหะหนักออกจากกากตะกอนที่ผ่านการอบจะมีปริมาณมากกว่ากากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 เพิ่มการทดลองหา %recovery โดยเติมโลหะในปริมาณที่ทราบแน่นอนลงไปก่อนแล้วจึงทำการสกัด
- 5.2.2 ในการทำการทดลองควรทำการวิเคราะห์โลหะหนักในกากตะกอนด้วยเครื่อง AAS ภายในวันเดียวกัน ที่มีอุณหภูมิของการอบกากตะกอนที่ 60, 80 และ 100 °C ของธาตุแต่ละตัว เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ได้มีค่าถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น
- 5.2.3 เนื่องจากออกไซด์ของ Si, Fe และ Al จะสามารถพบได้ในตัวอย่างดินเท่านั้น แต่ในการทดลองนี้ตัวอย่างที่ใช้เป็นกากตะกอน จึงทำให้ไม่พบออกไซด์ของโลหะดังกล่าว
- 5.2.4 กากตะกอนมีความสามารถในการสกัดโลหะหนักแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน ทำให้รูปแบบแนวโน้มของการสกัดโลหะหนักที่ได้ไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย. กระทรวงทรัพยากร ธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม [Online]. เข้าถึงได้จาก : http://infofile.pcd.go.th/mgt/Report_Thai2551.pdf?CFID=2906118&CFTOKEN=70929580. 2552

ชัญญา หาวารี. 2549. การประเมินศักยภาพการนำกากตะกอนอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ โดยการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัญชิตา สายชุมดี. การวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำเสียโดยการใช้เครื่อง AAS. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www2.diw.go.th/research/%E0%CD%A1%CA%D2%C3%E0%BC%C2%E1%BE%C3%E8%E0%A4%C3%D7%E8%CD%A7AAS.pdf>. 2554

จิตติมาวดี สุทธิคุณ, พนิดนันต์ นานาวิชิต และ ลานนา ใจทาหลี. 2548. การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักกับดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เพ็ญใจ สมพงษ์ชัยกุล. 2532. การวิเคราะห์รูปแบบของโลหะปริมาณน้อยในตะกอนใกล้ฝั่งโดยวิธีการสกัดตามลำดับขั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. วิศวกรรมการประปา. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รัตติกาล จันทิวาสน์. 2542. การปรับเสถียรของโลหะมีพิษในกากตะกอนจากโรงงานถลุงสังกะสี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีวิเคราะห์และเคมีอินทรีย์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิดล.

วีระพล เต็มสมบัติ. 2531. อุทกวิทยาประยุกต์. กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซนเตอร์.

วุฒิกมล ตั้งวิรุพห์, สายสุรีย์ ตันสมบุญ. 2544. การหาปริมาณและการกำจัดโลหะหนักออกจากตะกอนน้ำทิ้ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2549. วิธีการสกัดตามลำดับขั้นสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างตะกอนท้องน้ำจากแม่น้ำแควน้อยในเขตอำเภอเมืองจังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารได้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศูนย์ฝึกวิศวกรรมเกษตร. การวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน. [Online]. เข้าถึงได้จาก :
<http://118.175.21.24/wbi1/8.htm>. 2503
- เสกสรรค์ เทพพิทักษ์. 2543. การสะสมตะกอนในระบบรวบรวมน้ำเสียและระบบบำบัดน้ำเสีย
 จังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิต
 วิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานวิจัยและพัฒนากรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. การวิเคราะห์โลหะหนักใน
 เนื้อดิน. [Online]. เข้าถึงได้จาก: http://kromchol.rid.go.th/research/vijai_rid/index.html.
 2552
- American Society of Civil Engineers (ASCE) and Water Environment Federation (WEF). 1998.
Runoff Quality Management, ASCE,. Manuals and Report of Engineering Practice No.
 87, Reston, VA. WEF, Manual of Practice No. 23, Alexandria, VA. n.p.
- Kim, B. and McBride, M. B. “A test of sequential extractions for determining metal speciation in
 sewage sludge-amended soils”. **Environmental Pollution**. 144. 2006. pp 475-482
- Metcalf and Eddy .1991. “Treatment Disposal Reuse, G. Tchobanoglous and F.L. Burton
 (Eds.)”. **Wastewater Engineering**. pp. 1820. New York : McGraw-Hill.
- QASIM, S.R. 1985. “Wastewater treatment plants: planning, design and operation”. **Holt,
 Rinehart and Winston**, New York.
- SI Ji-tao, TIAN Bao-guo, WANG Hong-tao. “ Effect of incubation temperature and wet-dry cycle
 on the availabilities of Cd, Pb and Zn in soil”. **Journal of Environ Science**., 18.2006.
 pp 1119-1123.
- Zorpus, A. A . et. al. 2000. “Impact of thermal treatment on metal in sewage sludge from the
 Psittalias wastewater treatment plant, Athens, Greece”. **Journal of Hazardous Materials**.
 82. 2001. pp 291-298.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์กากตะกอน

ก-1 การวัดค่าพีเอช (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งกากตะกอนแห้ง 5 g ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่นลงไป 5 mL พร้อมบันทึกหมายเลขตัวอย่างกากตะกอน
2. กวนให้เข้ากันอย่างน้อย 5 วินาที และตั้งทิ้งไว้ 10 นาที
3. ขณะที่ตั้งสารละลายทิ้งไว้ ให้ทำการปรับเทียบเครื่องวัดพีเอชกับสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน 4 และ 7 (ปฏิบัติตามคู่มือการใช้เครื่องวัดพีเอช)
4. จุ่มอิเล็กโทรดลงในบีกเกอร์ที่บรรจุสารละลายกากตะกอนที่ครบตามเวลากวนโดยใช้การหมุนอิเล็กโทรดเบาๆ (ระวัง! อิเล็กโทรดกระแทกแตกได้) อ่านค่าพีเอช

ก-2 การหาความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวก (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งตัวอย่างกากตะกอน 10 g ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 125 mL เติมสารละลายโซเดียมอะซิเตท 1 N ลงไป 20 mL ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน ทิ้งไว้ค้างคืน
2. เขย่าสารละลายกากตะกอน 30 นาที โดยใช้เครื่องเขย่าๆ จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยง นาน 20 นาที แยกเอาส่วนใสทิ้ง
3. ล้างกากตะกอนออกด้วยสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตท 1 N ครั้งละ 30 mL นำไปปั่นเหวี่ยงแยกส่วนใสออกจนไม่มีแคลเซียมเหลืออยู่ (ทดสอบดูโดยนำส่วนใสที่ได้จากการล้างแต่ละครั้งประมาณ 10 mL ใส่ในหลอดทดลองหยดแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N แอมโมเนียมออกซาลาต 10 % และแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 50 % อย่างละ 2-3 หยด นำไปต้มให้เดือด ถ้าเกิดตะกอนหรือสารละลายขุ่น แสดงว่ามีแคลเซียมตกค้างอยู่)
4. ล้างตัวอย่างกากตะกอนต่อด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 1 N 4 ครั้ง และล้างด้วยสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 0.25 N อีก 1 ครั้ง จากนั้นล้างด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 7 ครั้ง ๆ ละ 30 mL โดยนำไปปั่นเหวี่ยงนานประมาณ 3-5 นาทีเพื่อแยกส่วนใสออกจนไม่มีคลอไรด์เหลืออยู่ (ทดสอบโดยใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรท 0.1 N 2-3 หยด ถ้ามีตะกอนขาวของ $AgCl$ แสดงว่ามีคลอไรด์เหลืออยู่)
5. นำสารละลายจากข้างต้นทิ้งไปนำตัวอย่างกากตะกอนที่ได้มาล้างด้วยโซเดียมคลอไรด์ 10 % เพื่อไล่แอมโมเนียมในกากตะกอน โดยล้างครั้งละ 30 mL ซ้ำ 3 ครั้ง นำไปปั่นเหวี่ยง เก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารส่วนใสไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำส่วนใสที่ได้จากสารละลายกากตะกอนมาใส่ในขวดวัดปริมาตร 100 mL ปรับปริมาตรรวมจนมีปริมาตร 100 mL ด้วยน้ำกลั่น
7. นำสารละลายกากตะกอนที่ได้ไปกลั่นเพื่อไล่แอมโมเนียออกมาโดยเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 40 % ลงไป 25 mL ใส่ใน Kjeldahl flask ที่ปลายคอนเดนเซอร์ (Condenser) จุ่มอยู่ในสารละลายกรดบอริกซึ่งใส่อินดิเคเตอร์ผสมไว้ 2-3 หยด กลั่นจนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียว
8. นำสารละลายที่ได้จากการกลั่นไปไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน 0.1 N จนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีม่วง
9. กลั่นแบลงค์และไทเทรตเช่นเดียวกับตัวอย่างกากตะกอน

การคำนวณ

$$\text{CEC} = [(A - B) N \times 100] / X \quad \text{มิลลิกรัมสมมูลต่อกากตะกอน} \dots\dots\dots (\text{ก.1})$$

A = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่างกากตะกอน (mL)

B = ปริมาตรของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐานที่ใช้ไทเทรตกับแบลงค์

N = ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกมาตรฐาน (นอร์มอล)

X = น้ำหนักเป็นกรัมของตัวอย่างกากตะกอน

ก-3 การวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สารโดยวิธี Walkley and Black (กองวิเคราะห์ดิน, 2535)

1. ชั่งตัวอย่างกากตะกอน 1 g ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL
2. เติมน้ำยาโพแทสเซียมไดโครเมท 1 N ลงไป 10 mL โดยใช้ปิเปต
3. เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นลงไป 15 mL เขย่าขวดแก้วเบา ๆ เป็นเวลา 1-2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้กากตะกอนและน้ำยาทำปฏิกิริยากันเป็นเวลา 30 นาที
4. เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50 mL ทิ้งไว้ให้เย็น
5. ไทเทรตสารละลายที่ได้ด้วยน้ำยาเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 N เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมทที่เหลือจากปฏิกิริยาจนกระทั่งสีของสารละลายกากตะกอนเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ
6. จดปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมทและเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้
7. ทำแบลงค์เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์กากตะกอน
8. คำนวณหาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนและอินทรีย์วัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณ

$$\% \text{ Organic carbon} = [(B-T)N/B] \times [100/77] \times 0.003 \times [100/X] \times 10 \dots\dots\dots (ก.2)$$

N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมท

B = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับแบลงค์

T = จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่างกากตะกอน

X = น้ำหนักกากตะกอน

$$\% \text{ Organic matter} = \% \text{ Organic carbon} \times 1.724 \dots\dots\dots (ก.3)$$

หรือ $\% \text{ Organic matter} = [(B-T)N/B] \times [100/77] \times [100/58] \times 0.003 \times [100/X] \times 10 \dots\dots\dots (ก.4)$

ก-4 การหาค่าความชื้น (นิตยสารวิทยาศาสตร์, 2545)

1. ชั่งกระชอนาฬิกาที่สะอาด
2. นำตัวอย่างกากตะกอนมาชั่ง 10 g ลงบนกระชอนาฬิกา จดบันทึกน้ำหนักเปียก
3. นำไปเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 105 – 110 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 12 ชั่วโมง ทำให้เย็นในเดซีเคเตอร์
4. นำมาชั่งน้ำหนักแห้ง
5. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความชื้น
 $\% \text{ ความชื้น} = [(\text{น้ำหนักเปียก} - \text{น้ำหนักแห้ง}) \times 100] / \text{น้ำหนักเปียก} \dots\dots\dots (ก.5)$
6. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง หาค่าเฉลี่ย

ก-5 การหาความเข้มข้นของโลหะหนักโดย Microwave digester (นิตยสารวิทยาศาสตร์, 2545)

1. เลือก Digestion program ให้เหมาะสมกับตัวอย่าง
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างลงใน Vessel ของ Rotor type ที่กำหนดให้ใช้ได้ ใน Program
3. ใส่กรดที่มีความเข้มข้น และปริมาณตามที่ระบุไว้ใน Program
4. ใส่ Vessel ใน Protective shield ปิดฝา ตามด้วย Adapter plate และ Special spring นำไปใส่ใน Polypropylene rotor body

หมายเหตุ ถ้าตัวอย่างไม่ครบทุก Vessel ให้วาง Vessel ที่มีสารให้สมดุลหรือใช้ Vessel เปล่าวางแทน

5. ไขให้แน่นด้วย Tension wrench (ด้ามสีดำ) เมื่อแน่นจะได้ยินเสียง “คลิก”
6. วาง Polypropylene rotor body ใน Microwave unit โดยสวมให้ตรงกับแกน
7. กำหนดค่าของ Time, Power, Pressure, Temp ตามที่กำหนดใน Program ที่เลือกไว้
8. กด Start เครื่องจะ Check และทำตาม Program

9. เมื่อสิ้นสุดการ Digest ตาม Program เครื่องจะแสดง Switch off microwave unit และ Exhaust module
10. เปิดเครื่อง Microwave unit และยก Rotor body ทำให้เย็นโดยใส่ใน Cooling bath ประมาณ 10 นาที
11. นำ Vessel ออก แล้วนำสารละลายที่ได้ไปกรอง
12. นำสารละลายที่กรองได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

วิธีการสกัดแบบเป็นลำดับขั้น (Sequential extraction)

ขั้นที่ 1 Water soluble

1. นำตัวอย่างดิน 1 g มาผสมกับน้ำ DI 25 mL ใส่ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS
5. นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 2 Exchangeable

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 1 มาเติม 1.0 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ pH 7 ปริมาตร 25 mL ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 mL แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 3 Acid soluble

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 2 มาเติม 0.11 M CH_3COOH pH 3 ปริมาตร 25 mL ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 mL แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่ 4 Reducible

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 3 มาเติม 0.1 M $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ pH 2 (ใน 25 % v/v CH_3COOH) ปริมาตร 25 mL ในขวดพลาสติก
2. นำไปเขย่า 3 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกส่วนใส นาน 5 นาที
3. นำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
4. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS
5. ล้างส่วนที่เหลือด้วยน้ำ DI 10 mL แล้วนำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 5 Oxidizable

1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 4 มาเติม H_2O_2 30 % pH 2 ปริมาตร 20 mL ในขวดรูปชมพู่
2. นำไปเขย่าด้วย Waterbath shaker 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85 °C แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
3. เติม 1.0 M $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ pH 2 ปริมาตร 20 mL
4. นำไปเขย่าด้วย Waterbath shaker 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 85 °C แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็น
5. กรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1
6. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS
7. นำของแข็งที่เหลือไปทำต่อในขั้นต่อไป

ขั้นที่ 6 Residual

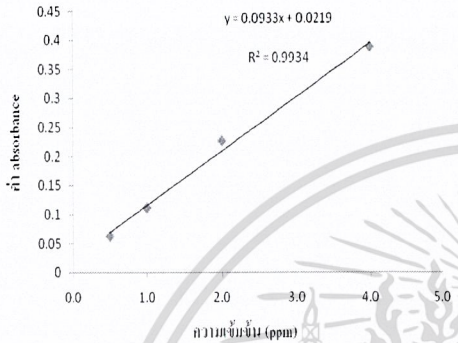
1. นำของแข็งที่เหลือจากขั้นที่ 5 ไปทำให้แห้ง โดยนำไปอบที่ 103-105 °C นาน 30 นาที
2. ชั่งน้ำหนักให้ได้ 2 g ใส่ Platinum crucible
3. นำไปย่อยด้วย HF/HNO_3 บนแท่นให้ความร้อนจนได้สารละลายใส
4. ปรับปริมาตรให้เป็น 25 mL ด้วยน้ำ DI
5. เก็บส่วนใสใส่ขวดพลาสติก แล้วนำไปเก็บไว้ที่ 4 °C เพื่อรอการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

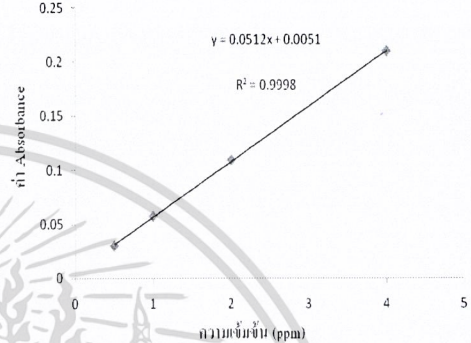
ภาคผนวก ค

ผลการทดลอง

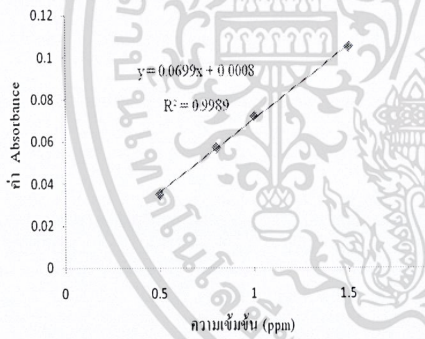
1. กราฟมาตรฐานของโลหะหนัก



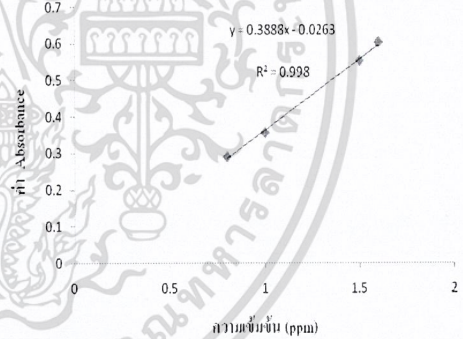
รูปที่ ง-1 กราฟมาตรฐานของนิกเกิล



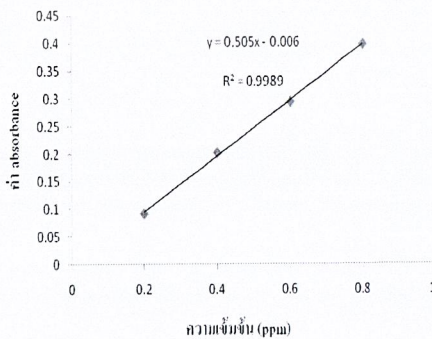
รูปที่ ง-2 กราฟมาตรฐานของตะกั่ว



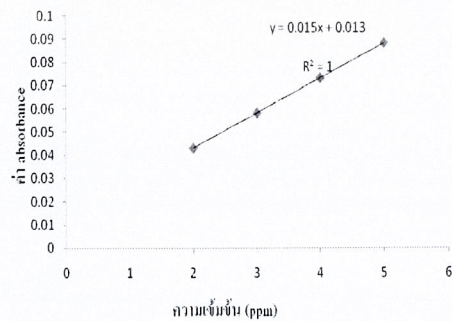
รูปที่ ง-3 กราฟมาตรฐานของทองแดง



รูปที่ ง-4 กราฟมาตรฐานของสังกะสี



รูปที่ ง-5 กราฟมาตรฐานของแคดเมียม



รูปที่ ง-6 กราฟมาตรฐานของโครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ปริมาณโลหะหนักในตัวอย่างกากตะกอน

ตารางที่ ค-1 ปริมาณนิกเกิลในตัวอย่างกากตะกอน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าดูดกลืน แสง (Abs)	ความเข้มข้นจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้นสุทธิ (mg/kg)
0.5	1	0.062	0.429	8.446
	2	0.062	0.429	8.446
	3	0.061	0.419	8.249
1	1	0.111	0.954	18.782
	2	0.111	0.954	18.782
	3	0.110	0.944	18.586
2	1	0.226	2.187	43.058
	2	0.226	2.187	43.058
	3	0.225	2.176	42.841
4	1	0.388	3.923	77.237
	2	0.387	3.913	77.040
	3	0.388	3.923	77.237

หมายเหตุ

สมการกราฟมาตรฐาน $y = 0.0933x + 0.0219$

เมื่อ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง

$x =$ ค่าความเข้มข้นของนิกเกิล (mg/L)

น้ำหนักตัวอย่างกากตะกอนเท่ากับ 1.2698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ปริมาณตะกั่วในตัวอย่างกากตะกอน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าดูดกลืน แสง (Abs)	ความเข้มข้นจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้นสุทธิ (mg/kg)
0.5	1	0.03	0.49	9.57
	2	0.03	0.49	9.57
	3	0.03	0.51	9.94
1	1	0.06	1.01	19.94
	2	0.06	1.03	20.34
	3	0.06	1.05	20.71
2	1	0.11	2.03	39.95
	2	0.11	2.05	40.32
	3	0.11	2.03	39.95
4	1	0.21	3.98	78.40
	2	0.21	3.98	78.40
	3	0.21	3.96	78.00

หมายเหตุ

สมการกราฟมาตรฐาน $y = 0.0512x + 0.0051$

เมื่อ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง

$x =$ ค่าความเข้มข้นของตะกั่ว (mg/L)

น้ำหนักตัวอย่างกากตะกอนเท่ากับ 1.2698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 ปริมาณทองแดงในตัวอย่างกากตะกอน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าดูดกลืน แสง (Abs)	ความเข้มข้นจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้นสุทธิ (mg/kg)
0.5	1	0.035	0.489	9.628
	2	0.035	0.489	9.628
	3	0.034	0.475	9.352
0.8	1	0.057	0.804	15.829
	2	0.057	0.804	15.829
	3	0.058	0.818	16.105
1	1	0.072	1.018	20.043
	2	0.072	1.018	20.043
	3	0.073	1.032	20.318
1.5	1	0.105	1.490	29.335
	2	0.105	1.490	29.335
	3	0.104	1.476	29.060

หมายเหตุ

สมการกราฟมาตรฐาน $y = 0.0699x + 0.0008$

เมื่อ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง

$x =$ ค่าความเข้มข้นของทองแดง (mg/L)

น้ำหนักตัวอย่างกากตะกอนเท่ากับ 1.2698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-4 ปริมาณสังกะสีในตัวอย่างกากตะกอน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าดูดกลืน แสง (Abs)	ความเข้มข้นจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้นสุทธิ (mg/kg)
0.8	1	0.290	0.813	16.006
	2	0.290	0.813	16.006
	3	0.291	0.816	16.066
1	1	0.356	0.983	19.353
	2	0.356	0.983	19.353
	3	0.357	0.985	19.393
1.5	1	0.552	1.487	29.276
	2	0.553	1.489	29.316
	3	0.552	1.487	29.276
1.6	1	0.602	1.615	31.796
	2	0.602	1.615	31.796
	3	0.601	1.613	31.757

หมายเหตุ

สมการกราฟมาตรฐาน $y = 0.3888x - 0.0263$

เมื่อ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง

$x =$ ค่าความเข้มข้นของสังกะสี (mg/L)

น้ำหนักตัวอย่างกากตะกอนเท่ากับ 1.2698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-5 ปริมาณแคดเมียมในตัวอย่างกาคตะกอน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าดูดกลืน แสง (Abs)	ความเข้มข้นจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้นสุทธิ (mg/kg)
0.2	1	0.092	0.194	3.819
	2	0.092	0.194	3.819
	3	0.091	0.192	3.780
0.4	1	0.202	0.411	8.092
	2	0.201	0.409	8.052
	3	0.202	0.411	8.092
0.6	1	0.294	0.594	11.695
	2	0.294	0.594	11.695
	3	0.295	0.596	11.734
0.8	1	0.398	0.800	15.751
	2	0.399	0.801	15.770
	3	0.398	0.800	15.751

หมายเหตุ

สมการกราฟมาตรฐาน $y = 0.5050x - 0.0060$

เมื่อ $y =$ ค่าการดูดกลืนแสง

$x =$ ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (mg/L)

น้ำหนักตัวอย่างกาคตะกอนเท่ากับ 1.2698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-6 ปริมาณโครเมียมในตัวอย่างกากตะกอน

ความเข้มข้น (mg/L)	ครั้งที่	ค่าดูดกลืน แสง (Abs)	ความเข้มข้นจากกราฟ (mg/L)	ความเข้มข้นสุทธิ (mg/kg)
2	1	0.043	2.000	39.376
	2	0.043	2.000	39.376
	3	0.044	2.060	40.558
3	1	0.058	3.000	59.064
	2	0.058	3.000	59.064
	3	0.057	2.930	57.686
4	1	0.073	4.000	78.753
	2	0.072	3.930	77.374
	3	0.073	4.000	78.753
5	1	0.088	5.000	98.441
	2	0.088	5.000	98.441
	3	0.089	5.060	99.622

หมายเหตุ

สมการกราฟมาตรฐาน $y = 0.015x + 0.013$

เมื่อ y = ค่าการดูดกลืนแสง

x = ค่าความเข้มข้นของโครเมียม (mg/L)

น้ำหนักตัวอย่างกากตะกอนเท่ากับ 1.2698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เปอร์เซ็นต์ความชื้น

ตารางที่ ค-7 เปอร์เซ็นต์ความชื้น

อุณหภูมิ (°C)	ครั้งที่	น้ำหนัก ฟลอยด์ (กรัม)	น้ำหนักตัวอย่าง กากตะกอน ก่อนอบ (กรัม)	น้ำหนักตัวอย่าง กากตะกอน + ฟลอยด์หลังอบ (กรัม)	% ความชื้น
105 (°C)	1	0.8146	10.0626	2.0844	87.38
	2	0.8234	10.0623	2.0254	88.00
	3	0.7865	10.0626	2.0123	87.81
เฉลี่ย		0.808	10.063	2.041	87.73

หมายเหตุ

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความชื้น (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักกากตะกอนก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักกากตะกอนหลังอบ (g)}}{\text{น้ำหนักกากตะกอนก่อนอบ (g)}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปริมาณน้ำหนักกากตะกอนแห้ง

ตารางที่ ค-8 น้ำหนักกากตะกอนแห้ง

อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (hr)	น้ำหนักกากตะกอน (กรัม)			น้ำหนักกากตะกอนแห้ง (กรัม)			น้ำหนักกาก ตะกอนแห้ง เฉลี่ย (กรัม)
		ครั้งที่			ครั้งที่			
		1	2	3	1	2	3	
60	1	7.924	7.953	7.946	1.265	1.269	1.263	1.269
	6	7.967	7.909	7.966	1.270	1.266	1.265	1.267
	12	7.925	7.988	7.922	1.265	1.268	1.265	1.266
	24	7.920	7.959	7.952	1.264	1.261	1.266	1.264
80	1	8.216	8.212	8.214	1.223	1.227	1.226	1.225
	6	8.213	8.216	8.211	1.222	1.227	1.228	1.226
	12	8.219	8.211	8.216	1.223	1.226	1.227	1.225
	24	8.212	8.210	8.215	1.223	1.230	1.227	1.227
100	1	8.156	8.155	8.154	1.257	1.254	1.259	1.257
	6	8.157	8.151	8.155	1.256	1.259	1.251	1.255
	12	8.158	8.160	8.153	1.255	1.260	1.259	1.258
	24	8.159	8.151	8.135	1.259	1.251	1.256	1.255

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการสกัดลำดับชั้นที่อุณหภูมิและระยะเวลาแตกต่างกัน

ตารางที่ ค-9 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับชั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
นิกเกิล	1	0.195	0.213	0.212	3.839	4.194	4.174	0.331	0.371	0.329	6.517	7.304	6.477
	2	0.959	0.993	0.887	18.881	19.550	17.463	0.954	0.926	1.094	18.782	18.231	21.539
	3	2.017	1.961	2.024	39.711	38.608	39.849	1.905	1.773	2.004	37.506	34.907	39.455
	4	2.661	2.112	2.024	52.390	41.581	39.849	2.830	2.829	2.835	55.757	55.698	55.816
	5	3.876	3.864	3.856	76.311	76.075	75.917	5.540	5.600	5.650	109.072	110.254	111.356
	6	1.576	1.707	1.694	31.029	25.732	37.289	2.305	2.242	2.282	45.381	44.141	44.928

ตารางที่ ก-9 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกล้างโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
นิกเกิล	1	0.321	0.305	0.323	6.320	6.005	6.359	0.318	0.372	0.283	6.261	7.324	5.572
	2	0.899	1.009	0.754	17.700	19.865	14.845	0.636	0.684	0.781	12.522	13.467	15.376
	3	1.418	1.585	1.577	27.918	31.206	31.048	1.548	1.793	1.801	30.477	35.301	35.458
	4	3.270	3.220	3.251	64.380	63.396	64.006	2.911	2.836	2.859	57.312	63.711	56.288
	5	4.340	4.356	4.258	85.447	85.762	83.832	5.020	5.074	5.002	98.834	99.898	98.480
	6	1.111	1.055	1.083	21.874	20.771	21.322	1.736	1.712	1.791	34.179	33.706	43.137

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
ตะกั่ว	1	0.179	0.183	0.182	3.528	3.608	3.577	0.133	0.130	0.124	2.624	2.565	2.437
	2	0.215	0.220	0.226	4.238	4.325	4.452	0.226	0.253	0.236	4.447	4.989	4.645
	3	0.043	0.060	0.052	0.847	1.181	1.024	0.046	0.051	0.042	0.906	1.004	0.827
	4	0.258	0.263	0.273	5.080	5.178	5.375	0.265	0.257	0.271	5.217	5.060	5.335
	5	0.182	0.182	0.191	3.578	3.583	3.766	0.216	0.222	0.219	4.247	4.377	4.316
	6	0.678	0.968	0.825	13.349	19.058	16.243	2.506	2.281	2.235	49.338	44.909	44.003
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	1	0.223	0.208	0.219	4.400	4.094	4.313	0.082	0.090	0.092	1.621	1.775	1.814
	2	0.283	0.284	0.282	5.564	5.599	5.551	0.271	0.269	0.269	5.335	5.291	5.292
	3	0.036	0.073	0.043	0.709	1.437	0.847	0.051	0.066	0.065	1.004	1.299	1.280
	4	0.309	0.319	0.266	6.084	6.281	5.237	0.292	0.293	0.281	5.749	5.769	5.532
	5	0.161	0.155	0.155	3.178	3.050	3.054	0.088	0.087	0.087	1.725	1.710	1.721
	6	1.746	1.785	1.843	34.375	35.143	36.285	0.886	0.905	0.869	17.444	17.818	17.109

ตารางที่ ก-9 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
ทองแดง	ชั้น	1	60.600	59.600	60.400	1193.101	1173.413	1189.164	66.000	66.600	66.400	1299.417	1311.230	1307.292
		2	70.000	68.000	69.000	1378.170	1338.794	1358.482	80.600	81.400	82.000	1586.864	1602.615	1614.427
		3	67.000	67.600	66.000	1319.105	1330.918	1299.417	66.000	65.600	66.800	1299.417	1291.542	1315.168
		4	68.400	68.400	67.000	1346.669	1346.669	1319.105	75.400	75.600	75.600	1484.486	1488.423	1488.423
		5	612.400	607.400	612.600	12057.017	11958.576	12060.954	508.000	503.600	504.000	10001.575	9914.947	9922.822
		6	288.600	288.000	288.000	5681.997	5670.184	5676.091	335.700	337.200	339.000	6609.309	6638.841	6674.279
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
		1	64.200	64.200	63.800	1263.979	1263.979	1256.103	62.000	60.200	61.200	1220.665	1185.226	1204.914
		2	69.000	66.200	66.000	1358.482	1303.355	1299.417	70.800	70.400	69.400	1393.920	1386.045	1366.357
		3	60.800	60.400	60.800	1197.039	1189.164	1197.039	62.400	62.000	62.600	1228.540	1220.665	1232.478
		4	71.000	69.200	70.200	1397.858	1362.419	1382.107	66.000	67.000	68.000	1299.417	1319.105	1338.794
5	490.000	492.400	489.600	9647.189	9694.440	9639.313	390.000	380.000	380.000	7678.375	7481.493	7481.493		
6	246.900	248.100	244.200	4861.002	4884.628	4807.844	303.000	302.400	304.200	5965.506	5953.693	5989.132		

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกลบออกโดยวิธีการสกัดลำดับชั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
สังกะสี	ชั้น	1	2.116	2.093	2.129	41.660	41.207	41.916	2.875	2.726	2.924	56.603	53.670	57.568
		2	6.080	6.030	5.825	119.704	118.719	114.683	10.458	10.183	10.462	205.899	200.484	205.977
		3	17.059	16.923	17.071	335.860	333.182	336.096	19.834	19.707	19.578	390.495	387.994	385.454
		4	38.423	37.029	35.170	756.477	729.032	692.432	56.836	56.318	56.206	1118.995	1108.797	1106.592
		5	44.270	42.881	42.099	871.594	844.247	828.851	26.560	27.002	26.541	522.917	531.619	522.543
		6	30.138	29.908	28.928	593.361	588.833	569.539	23.599	23.720	23.309	464.620	467.003	458.911
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
		1	3.112	3.234	3.125	61.269	63.671	61.525	3.285	3.403	3.226	64.676	66.999	63.514
		2	13.754	13.567	12.965	270.791	267.109	255.257	12.122	11.761	11.479	238.660	231.552	226.000
		3	22.645	21.927	21.614	445.838	431.702	425.539	27.582	27.768	27.843	543.038	546.700	548.177
		4	70.584	70.136	69.600	1389.668	1380.847	1370.295	61.323	60.650	60.210	1207.336	1194.086	1185.423
5	35.139	34.492	34.951	691.822	679.083	688.120	18.888	18.628	18.498	371.870	366.751	364.191		
6	54.997	52.759	55.353	1082.789	1038.727	1089.798	46.707	45.552	44.563	919.574	896.834	877.363		

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
แคดเมียม	1	0.007	0.003	0.002	0.138	0.059	0.039	0.002	0.002	0.002	0.039	0.039	0.039
	2	0.013	0.013	0.014	0.256	0.256	0.276	0.013	0.012	0.014	0.256	0.236	0.276
	3	0.022	0.023	0.023	0.433	0.453	0.453	0.021	0.021	0.022	0.413	0.413	0.433
	4	0.030	0.026	0.027	0.591	0.512	0.532	0.031	0.030	0.031	0.610	0.591	0.610
	5	0.022	0.018	0.022	0.433	0.354	0.433	0.022	0.021	0.019	0.433	0.413	0.374
	6	0.086	0.118	0.129	1.693	2.323	2.540	0.263	0.207	0.217	5.178	4.075	4.272
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	1	0.001	0.001	0.009	0.020	0.020	0.177	0.008	0.008	0.007	0.158	0.158	0.138
	2	0.011	0.011	0.012	0.217	0.217	0.236	0.012	0.012	0.010	0.236	0.236	0.197
	3	0.020	0.022	0.022	0.394	0.433	0.433	0.021	0.023	0.026	0.413	0.453	0.512
	4	0.032	0.035	0.033	0.630	0.689	0.650	0.030	0.033	0.031	0.591	0.650	0.610
	5	0.022	0.020	0.022	0.433	0.394	0.433	0.022	0.015	0.015	0.433	0.295	0.295
	6	0.193	0.205	0.245	3.800	4.036	4.824	0.194	0.198	0.190	3.819	3.898	3.741

ตารางที่ ค-9 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ ระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
โครเมียม	1	0.432	0.388	0.412	8.505	7.639	8.112	0.351	0.378	0.365	6.911	7.442	7.186
	2	0.369	0.347	0.335	7.265	6.832	6.596	0.348	0.354	0.337	6.851	6.970	6.635
	3	0.296	0.309	0.324	5.828	6.084	6.379	0.332	0.306	0.318	6.536	6.025	6.261
	4	0.538	0.507	0.495	10.592	9.982	9.746	0.498	0.533	0.549	9.805	10.494	10.809
	5	0.275	0.252	0.326	5.414	4.961	6.418	0.321	0.328	0.293	6.320	6.458	5.769
	6	1.877	1.619	1.967	36.955	31.875	38.727	1.775	1.599	1.527	34.946	31.481	30.064
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	1	0.347	0.368	0.377	6.832	7.245	7.422	0.302	0.360	0.336	5.946	7.088	6.615
	2	0.362	0.335	0.340	7.127	6.596	6.694	0.312	0.292	0.324	6.143	5.749	6.379
	3	0.288	0.299	0.298	5.670	5.887	5.867	0.286	0.273	0.289	5.631	5.375	5.690
	4	0.579	0.517	0.556	11.399	10.179	10.947	0.682	0.577	0.555	13.427	11.360	10.927
5	0.310	0.320	0.284	6.103	6.300	5.591	0.283	0.312	0.253	5.572	6.143	4.981	
6	0.460	0.497	0.449	9.057	9.785	8.840	0.736	0.577	0.539	14.490	11.360	10.612	

ตารางที่ ค-10 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
นิกเกิล	1	0.060	0.068	0.055	1.299	1.339	1.083	0.056	0.135	0.088	1.103	2.658	1.733
	2	0.107	0.111	0.109	2.107	2.185	2.146	0.117	0.115	0.117	2.304	2.264	2.304
	3	0.129	0.130	0.126	2.540	2.559	2.481	0.136	0.138	0.139	2.678	2.717	2.737
	4	0.148	0.153	0.153	2.914	3.012	3.012	0.156	0.156	0.157	3.071	3.071	3.091
	5	0.162	0.167	0.167	3.189	3.288	3.288	0.167	0.168	0.168	3.288	3.308	3.308
	6	0.173	0.176	0.177	3.406	3.465	3.485	0.177	0.178	0.175	3.485	3.504	3.445
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	1	0.097	0.095	0.099	1.910	1.870	1.949	0.100	0.106	0.105	1.969	2.087	2.067
	2	0.123	0.120	0.122	2.422	2.363	2.402	0.126	0.126	0.130	2.481	2.481	2.559
	3	0.140	0.139	0.142	2.756	2.737	2.796	0.143	0.146	0.148	2.815	2.874	2.914
	4	0.157	0.160	0.161	3.091	3.150	3.170	0.163	0.162	0.164	3.209	3.189	3.229
5	0.171	0.172	0.168	3.367	3.386	3.308	0.168	0.173	0.175	3.308	3.406	3.445	
6	0.182	0.180	0.179	3.583	3.544	3.524	0.184	0.182	0.185	3.623	3.583	3.642	

ตารางที่ ค-10 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
ตะกั่ว	1	0.126	0.119	0.092	2.481	2.343	1.811	0.074	0.071	0.088	1.457	1.398	1.733	
	2	0.129	0.127	0.116	2.540	2.500	2.284	0.069	0.099	0.088	1.358	1.949	1.733	
	3	0.136	0.120	0.121	2.678	2.363	2.382	0.125	0.134	0.128	2.461	2.638	2.520	
	4	0.251	0.359	0.326	4.942	7.068	6.418	0.326	0.405	0.393	6.418	7.974	7.737	
	5	0.253	0.274	0.270	4.981	5.395	5.316	0.111	0.130	0.130	2.185	2.559	2.559	
	6	0.720	0.805	0.795	14.175	15.849	15.652	0.789	0.823	0.839	15.534	16.203	16.518	
		ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
		1	0.113	0.089	0.095	2.225	1.752	1.870	0.090	0.085	0.091	1.772	1.673	1.792
		2	0.110	0.103	0.115	2.166	2.028	2.264	0.110	0.117	0.118	2.205	2.304	2.323
		3	0.139	0.139	0.137	2.737	2.737	2.697	0.146	0.140	0.151	2.874	2.756	2.973
		4	0.404	0.384	0.396	7.954	7.560	7.797	0.373	0.379	0.376	7.344	7.462	7.403
		5	0.133	0.113	0.104	2.619	2.225	2.048	0.106	0.100	0.100	2.087	1.969	1.969
		6	2.187	2.225	2.160	43.058	43.806	42.526	1.682	1.568	1.719	33.115	30.871	33.844

ตารางที่ ก-10 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
ทองแดง	ชั้น	1	20.600	17.000	20.800	405.576	334.698	409.513	15.400	14.800	13.600	296.885	291.384	267.759
		2	16.200	15.400	15.600	312.307	303.197	307.135	16.400	18.600	17.800	316.163	366.199	350.449
		3	85.600	83.000	83.600	1650.216	1634.116	1645.928	76.400	73.600	73.400	1472.856	1449.047	1445.109
		4	67.800	67.400	67.200	1307.064	1326.981	1323.043	67.200	65.600	65.600	1295.497	1291.542	1291.542
		5	421.600	422.400	424.800	8127.699	8316.270	8363.522	288.400	290.400	290.400	5559.840	5717.436	5717.436
		6	86.700	88.500	90.000	1671.422	1742.400	1771.933	200.400	199.200	198.600	3863.356	3921.877	3910.065
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
		1	31.600	29.400	30.800	609.192	578.831	606.395	38.800	39.600	38.200	763.900	779.650	752.087
		2	12.600	13.600	13.600	242.906	267.759	267.759	21.800	21.200	19.200	429.201	417.389	378.012
		3	77.000	78.000	78.400	1484.423	1535.675	1543.550	74.200	74.600	74.800	1460.860	1468.735	1472.673
		4	64.800	67.400	66.800	1249.229	1326.981	1315.168	85.400	84.000	84.200	1681.367	1653.804	1657.741
	5	443.200	439.200	439.600	8544.109	8647.031	8654.906	490.400	488.800	497.200	9655.064	9623.563	9788.943	
	6	323.700	326.100	329.100	6373.051	6420.302	6479.367	345.600	344.100	345.600	6804.221	6774.689	6804.221	

ตารางที่ ค-10 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
สังกะสี	ชั้น	1	2.993	2.905	2.948	58.927	57.194	58.041	0.820	0.813	0.879	16.144	16.006	17.306
		2	8.005	7.948	7.956	157.604	156.481	156.639	8.648	8.676	8.628	170.263	170.814	169.869
		3	21.740	21.577	21.546	428.020	424.811	424.201	14.364	14.513	14.643	282.800	285.734	288.293
		4	39.797	39.282	38.844	783.529	773.390	764.766	39.267	38.768	38.442	773.094	763.270	756.851
		5	44.803	45.025	45.136	882.088	886.458	888.644	44.857	44.349	44.396	883.151	873.149	874.075
		6	13.219	12.575	12.060	260.258	247.578	237.439	57.913	57.145	56.240	1140.199	1125.079	1107.261
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
		1	1.287	1.253	1.165	25.339	24.669	22.937	1.038	1.051	1.049	20.436	20.692	20.653
		2	6.525	6.511	6.376	128.465	128.189	125.532	11.012	10.961	11.081	216.806	215.802	218.164
		3	17.595	17.730	17.841	346.413	349.071	351.256	20.674	20.613	20.684	407.033	405.832	407.229
		4	54.525	53.364	53.118	1073.496	1050.638	1045.795	67.697	66.706	68.004	1332.828	1313.317	1338.872
	5	28.799	28.985	28.762	566.999	570.661	566.270	23.249	23.539	23.535	457.730	463.439	463.360	
	6	52.226	50.932	51.598	1028.233	1002.756	1015.869	54.514	54.446	53.864	1073.279	1071.940	1060.482	

ตารางที่ ค-10 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
แคดเมียม	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	6	0.148	0.182	0.199	2.914	3.583	3.918	0.177	0.198	0.187	3.485	3.898	3.682
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	6	0.167	0.179	0.156	3.288	3.524	3.071	0.190	0.178	0.164	3.741	3.504	3.229

ตารางที่ ค-10 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
โครเมียม	1	0.310	0.277	0.268	6.103	5.454	5.276	0.262	0.239	0.243	5.158	4.705	4.784	
	2	0.236	0.230	0.226	4.646	4.528	4.450	0.196	0.228	0.215	3.859	4.489	4.233	
	3	0.212	0.212	0.214	4.174	4.174	4.213	0.385	0.493	0.461	7.580	9.706	9.076	
	4	1.195	1.124	1.108	23.527	22.129	33.627	0.669	0.666	0.727	13.171	13.112	14.313	
	5	0.413	0.410	0.427	8.131	8.072	8.407	0.134	0.219	0.199	2.638	4.312	3.918	
	6	1.030	1.294	1.315	20.279	25.476	25.890	1.835	2.028	1.837	36.128	39.928	36.167	
		ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
		1	0.320	0.384	0.359	6.300	7.560	7.068	0.401	0.490	0.405	7.895	9.647	7.974
		2	0.220	0.199	0.220	4.331	3.918	4.331	0.219	0.210	0.223	4.312	4.135	4.390
		3	0.196	0.214	0.207	3.859	4.213	4.075	0.207	0.188	0.187	4.075	3.701	3.682
		4	0.835	0.855	0.819	16.440	16.833	16.125	0.764	0.689	0.777	15.042	13.565	15.298
		5	0.220	0.237	0.207	4.331	4.666	4.075	0.213	0.249	0.250	4.194	4.902	4.922
		6	2.402	2.436	2.432	47.291	47.960	47.882	1.626	1.683	1.730	32.013	33.135	34.060

ตารางที่ ค-11 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
นิกเกิล	1	0.659	0.685	0.547	12.974	13.486	10.769	0.762	0.845	0.881	15.002	16.636	17.345	
	2	0.107	0.111	0.109	2.107	2.185	2.146	0.117	0.115	0.117	2.304	2.264	2.304	
	3	0.129	0.130	0.126	2.540	2.559	2.481	0.136	0.138	0.139	2.678	2.717	2.737	
	4	0.148	0.153	0.153	2.914	3.012	3.012	0.156	0.156	0.157	3.071	3.071	3.091	
	5	0.162	0.167	0.167	3.189	3.288	3.288	0.167	0.168	0.168	3.288	3.308	3.308	
	6	0.173	0.176	0.177	3.406	3.465	3.485	0.177	0.178	0.175	3.485	3.504	3.445	
		ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
		1	0.097	0.095	0.099	1.910	1.870	1.949	0.100	0.106	0.105	0.100	0.106	0.105
		2	0.123	0.120	0.122	2.422	2.363	2.402	0.126	0.126	0.130	0.126	0.126	0.130
		3	0.140	0.139	0.142	2.756	2.737	2.796	0.143	0.146	0.148	0.143	0.146	0.148
		4	0.157	0.160	0.161	3.091	3.150	3.170	0.163	0.162	0.164	0.163	0.162	0.164
		5	0.171	0.172	0.168	3.367	3.386	3.308	0.168	0.173	0.175	0.168	0.173	0.175
		6	0.182	0.180	0.179	3.583	3.544	3.524	0.184	0.182	0.185	0.184	0.182	0.185

ตารางที่ ค-11 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
ตะกั่ว	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	3	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	4	0.182	0.229	0.224	3.583	4.509	4.410	0.193	0.182	0.204	3.800	3.583	4.016
	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	6	1.158	1.377	1.483	22.799	27.111	29.198	1.530	1.633	1.835	30.123	32.151	36.128
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	1	0.322	0.311	0.211	6.340	6.123	4.154	2.186	2.156	2.111	43.038	42.448	41.562
	2	0.111	0.121	0.152	2.185	2.382	2.993	0.196	0.156	0.163	3.859	3.071	3.209
	3	0.332	0.233	0.256	6.536	4.587	5.040	0.252	0.229	0.224	4.961	4.509	4.410
	4	0.218	0.229	0.260	4.292	4.509	5.119	0.191	0.190	0.198	3.760	3.741	3.898
	5	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	6	2.474	2.485	2.445	48.708	48.925	48.138	0.882	0.764	0.814	17.365	15.042	16.026

ตารางที่ ค-11 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
ทองแดง	ชั้น	1	5.200	5.600	5.400	102.378	110.254	106.316	6.200	8.400	8.200	122.066	165.380	161.443
		2	12.200	13.400	12.600	240.195	263.821	248.071	14.400	14.200	14.200	283.509	279.572	279.572
		3	15.000	13.000	13.800	295.322	255.946	271.696	12.200	11.800	11.800	240.195	232.320	232.320
		4	7.600	7.200	7.400	149.630	141.755	145.692	10.400	10.600	11.800	204.757	208.694	232.320
		5	406.400	403.200	414.000	8001.260	7938.258	8150.890	601.600	600.800	598.400	11844.385	11828.634	11781.383
		6	212.000	212.000	211.200	4173.886	4173.886	4158.135	130.600	132.600	132.500	2571.271	2610.647	2608.679
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
		1	9.800	10.000	10.100	192.944	196.881	198.850	24.600	23.200	22.000	484.328	456.765	433.139
		2	20.800	20.600	20.400	409.513	405.576	401.638	25.200	26.000	27.000	496.141	511.892	531.580
		3	9.400	10.000	9.600	185.069	196.881	189.006	15.200	15.400	15.400	299.260	303.197	303.197
		4	12.800	12.800	11.800	252.008	252.008	232.320	35.200	36.200	38.200	693.023	712.711	752.087
	5	496.000	488.800	483.600	9765.317	9623.563	9521.184	522.000	523.200	534.400	10277.209	10300.835	10521.342	
	6	299.600	301.400	292.800	5898.567	5934.005	5764.687	263.200	265.000	264.000	5181.918	5217.357	5197.669	

ตารางที่ ก-11 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกล้างโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
สังกะสี	2	6.080	6.030	5.825	119.704	118.719	114.683	10.458	10.183	10.462	205.899	200.484	205.977	
	3	17.059	16.923	17.071	335.860	333.182	336.096	19.834	19.707	19.578	390.495	387.994	385.454	
	4	38.423	37.029	35.170	756.477	729.032	692.432	56.836	56.318	56.206	1118.995	1108.797	1106.592	
	5	44.270	42.881	42.099	871.594	844.247	828.851	26.560	27.002	26.541	522.917	531.619	522.543	
	6	30.138	29.908	28.928	593.361	588.833	569.539	23.599	23.720	23.309	464.620	467.003	458.911	
	ชั้น	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
			ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
		1	3.112	3.234	3.125	61.269	63.671	61.525	3.285	3.403	3.226	64.676	66.999	63.514
		2	13.754	13.567	12.965	270.791	267.109	255.257	12.122	11.761	11.479	238.660	231.552	226.000
		3	22.645	21.927	21.614	445.838	431.702	425.539	27.582	27.768	27.843	543.038	546.700	548.177
		4	70.584	70.136	69.600	1389.668	1380.847	1370.295	61.323	60.650	60.210	1207.336	1194.086	1185.423
		5	35.139	34.492	34.951	691.822	679.083	688.120	18.888	18.628	18.498	371.870	366.751	364.191
	6	54.997	52.759	55.353	1082.789	1038.727	1089.798	46.707	45.552	44.563	919.574	896.834	877.363	

ตารางที่ ค-11 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
แคดเมียม	ชั้น	2	0.016	0.017	0.016	0.315	0.335	0.315	0.019	0.018	0.018	0.374	0.354	0.354
		3	0.025	0.024	0.025	0.492	0.473	0.492	0.027	0.026	0.027	0.532	0.512	0.532
		4	0.020	0.021	0.022	0.394	0.413	0.433	0.034	0.034	0.033	0.669	0.669	0.650
		5	0.023	0.024	0.025	0.453	0.473	0.492	0.024	0.022	0.021	0.473	0.433	0.413
		6	0.164	0.170	0.185	3.229	3.347	3.642	0.299	0.280	0.257	5.887	5.513	5.060
		ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
	ครั้งที่1		ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	
	1		0.012	0.012	0.013	0.236	0.236	0.256	0.014	0.014	0.014	0.276	0.276	0.276
	2		0.017	0.017	0.018	0.335	0.335	0.354	0.019	0.019	0.019	0.374	0.374	0.374
	3		0.028	0.026	0.028	0.551	0.512	0.551	0.025	0.025	0.026	0.492	0.492	0.512
	4		0.034	0.034	0.037	0.669	0.669	0.728	0.034	0.030	0.032	0.669	0.591	0.630
5	0.022	0.022	0.022	0.433	0.433	0.433	0.019	0.020	0.019	0.374	0.394	0.374		
6	0.256	0.347	0.282	5.040	6.832	5.552	0.213	0.206	0.206	4.194	4.056	4.056		

ตารางที่ ค-11 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสและระยะเวลาที่ 1, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)			ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		1 ชั่วโมง			1 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง			6 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
โครเมียม	1	0.375	0.373	0.385	7.383	7.344	7.580	0.353	0.353	0.337	6.950	6.950	6.635
	2	0.235	0.222	0.216	4.627	4.371	4.253	0.218	0.201	0.201	4.292	3.957	3.957
	3	0.180	0.177	0.178	3.544	3.485	3.504	0.173	0.165	0.169	3.406	3.249	3.327
	4	0.394	0.412	0.433	7.757	8.112	8.525	0.615	0.524	0.519	12.108	10.317	10.218
	5	0.186	0.206	0.199	3.662	4.056	3.918	0.223	0.174	0.228	4.390	3.426	4.489
	6	0.482	0.499	0.369	9.490	9.824	7.265	0.236	0.175	0.179	4.646	3.445	3.524
	ชั้น	12 ชั่วโมง			12 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง			24 ชั่วโมง		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
	1	0.313	0.350	0.301	6.162	6.891	5.926	0.225	0.243	0.238	4.430	4.784	4.686
	2	0.209	0.178	0.176	4.115	3.504	3.465	0.183	0.175	0.179	3.603	3.445	3.524
	3	0.157	0.146	0.152	3.091	2.874	2.993	0.446	0.315	0.316	8.781	6.202	6.221
	4	0.461	0.532	0.580	9.076	10.474	11.439	0.465	0.430	0.471	9.155	8.466	9.273
	5	0.208	0.211	0.225	4.095	4.154	4.430	0.193	0.203	0.197	3.800	3.997	3.879
	6	0.705	0.703	0.727	13.880	13.841	14.313	0.599	0.588	0.543	11.793	11.577	10.691

ตารางที่ ค-12 ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับชั้น โดยไม่มีการอบกากตะกอน

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		กากตะกอนที่ไม่ได้อบ			กากตะกอนที่ไม่ได้อบ		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
นิกเกิล	1	0.187	0.275	0.543	3.117	4.583	9.050
	2	1.003	0.928	1.653	16.717	15.467	27.550
	3	2.054	2.018	2.220	34.233	33.633	37.000
	4	2.314	2.284	3.871	38.567	38.067	64.517
	5	4.373	4.249	4.417	72.883	70.817	73.617
	6	2.048	2.288	2.212	34.133	38.133	36.867
ตะกั่ว	1	0.024	0.038	0.048	0.400	0.633	0.800
	2	0.072	0.048	0.053	1.200	0.800	0.883
	3	0.072	0.076	0.081	1.200	1.267	1.350
	4	0.282	0.301	0.280	4.700	5.017	4.667
	5	0.074	0.059	0.055	1.233	0.983	0.917
	6	0.902	1.178	1.068	15.033	19.633	17.800

ตารางที่ ค-12 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับขั้น โดยไม่มีการอบกากตะกอน

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		กากตะกอนที่ไม่ได้อบ			กากตะกอนที่ไม่ได้อบ		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
ทองแดง	1	200.560	205.35	213.87	3342.667	3422.500	3564.500
	2	300.870	304.560	308.080	5014.500	5076.000	5134.667
	3	400.870	423.240	418.540	6681.167	7054.000	6975.667
	4	487.890	494.540	489.870	8131.500	8242.333	8164.500
	5	509.580	511.240	523.670	8493.000	8520.667	8727.833
	6	555.890	567.890	577.320	9264.833	9464.833	9622.000
สังกะสี	1	3.598	3.571	3.553	59.967	59.517	59.217
	2	6.851	6.860	6.867	114.183	114.333	114.450
	3	23.604	23.699	23.512	393.400	394.983	391.867
	4	51.112	50.032	50.045	851.867	833.867	834.083
	5	32.884	32.861	32.847	548.067	547.683	547.450
	6	49.725	44.439	48.555	828.750	740.650	809.250

ตารางที่ ค-12 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักแต่ละชนิดที่ถูกสกัดโดยวิธีการสกัดลำดับชั้นโดยไม่มีการอบกากตะกอน

โลหะหนัก	ชั้น	ความเข้มข้น (mg/L)			ความเข้มข้น (mg/kg)		
		กากตะกอนที่ไม่ได้อบ			กากตะกอนที่ไม่ได้อบ		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
แคดเมียม	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	3	0.010	0.011	0.012	0.167	0.183	0.200
	4	0.015	0.015	0.015	0.250	0.250	0.250
	5	0.001	0.003	0.001	0.017	0.050	0.017
	6	0.185	0.269	0.204	3.083	4.483	3.400
โครเมียม	1	0.033	0.029	0.031	0.550	0.483	0.350
	2	0.046	0.031	0.031	0.767	0.517	0.350
	3	0.059	0.217	0.223	0.983	3.617	3.717
	4	0.479	0.472	0.461	7.983	7.867	7.683
	5	0.210	0.189	0.170	3.500	3.150	2.833
	6	0.978	1.118	1.225	16.300	18.633	20.417

หมายเหตุ ND คือ ไม่สามารถตรวจพบได้

ตัวอย่างการคำนวณ

หาความเข้มข้นในตัวอย่กาทะกอน (Mg/kg)

$$\text{Mg/kg} = \frac{C \times V}{W}$$

C = ความเข้มข้นที่ได้ (mg/L)

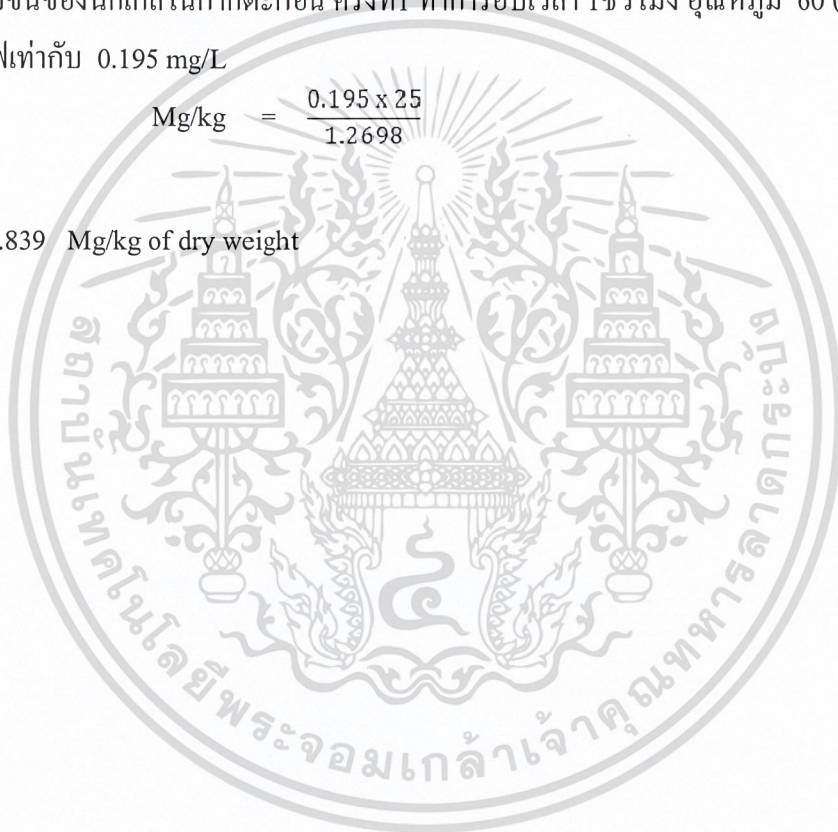
V = ปริมาตรสุดท้ายที่ปรับหลังจากการสกัด(ml)

W = น้ำหนักแห้ง (g)

ความเข้มข้นของนิกเกิลในกากตะกอน ครั้งที่1 ทำการอบเวลา 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 (°C) ซึ่งค่าที่ได้จากกราฟเท่ากับ 0.195 mg/L

$$\text{Mg/kg} = \frac{0.195 \times 25}{1.2698}$$

เท่ากับ 3.839 Mg/kg of dry weight



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ทางสถิตินี้ใช้โปรแกรม Minitab 15

ตารางที่ ง-1 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณนิกเกิลที่ถูกสกัดหลังจาก
กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

ระยะเวลาที่ใช้ อบกากตะกอน	ANOVA		
	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 60 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 80 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 100 °C
1 hr	0.671	0.000	0.000
6 hr	0.000	0.000	0.000
12 hr	0.009	0.000	0.000
24 hr	0.002	0.000	0.000

จากตารางที่ ง-1 พบว่าเมื่ออบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำไปสกัด
นิกเกิล จะให้ปริมาณนิกเกิลไม่แตกต่างกับปริมาณนิกเกิลที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่าน
การอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งผลจะตรงกันข้ามกับการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C ที่
ระยะเวลาอื่นๆ และการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 80 °C และ 100 °C ในทุกระยะเวลา ซึ่งปริมาณ
นิกเกิลที่สกัดได้มีความแตกต่างกับปริมาณนิกเกิลที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่
ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณตะกั่วที่ถูกสกัดหลังจาก
กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

ระยะเวลาที่ใช้ อบกากตะกอน	ANOVA		
	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 60 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 80 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 100 °C
1 hr	0.013	0.002	0.113
6 hr	0.000	0.008	0.005
12 hr	0.000	0.000	0.000
24 hr	0.000	0.000	0.000

จากตารางที่ ง-2 พบว่าเมื่ออบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำไปสกัด
ตะกั่ว จะให้ปริมาณตะกั่วไม่แตกต่างกับปริมาณตะกั่วที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการ
อบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งผลจะตรงกันข้ามกับการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะเวลา
อื่นๆ และการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C ในทุกระยะเวลา ซึ่งปริมาณตะกั่วที่สกัด
ได้มีความแตกต่างกับปริมาณตะกั่วที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ
0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณทองแดงที่ถูกสกัดหลังจาก
 กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

ระยะเวลาที่ใช้ อบกากตะกอน	ANOVA		
	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 60 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 80 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 100 °C
1 hr	0.000	0.000	0.000
6 hr	0.000	0.000	0.000
12 hr	0.000	0.000	0.000
24 hr	0.000	0.000	0.000

จากตารางที่ ง-3 เมื่ออบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C, 80 °C, และ 100 °C เป็นเวลา 1, 6, 12, 24 ชั่วโมงแล้วนำไปสกัดทองแดง พบว่าปริมาณทองแดงที่สกัดได้มีความแตกต่างกับปริมาณทองแดงที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-4 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณสังกะสีที่ถูกสกัดหลังจาก
กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

ระยะเวลาที่ใช้ อบกากตะกอน	ANOVA		
	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 60 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 80 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 100 °C
1 hr	0.071	0.000	0.071
6 hr	0.902	0.000	0.902
12 hr	0.000	0.000	0.000
24 hr	0.000	0.000	0.000

จากตารางที่ ง-4 พบว่าเมื่ออบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 100 °C เป็นเวลา 1 และ 6 ชั่วโมงแล้วนำไปสกัดสังกะสี จะให้ปริมาณสังกะสีไม่แตกต่างกับปริมาณสังกะสีที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งผลจะตรงกันข้ามกับการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60°C และ 100 °C ที่ระยะเวลาอื่นๆ และการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 80 °C ในทุกระยะเวลา ซึ่งปริมาณสังกะสีที่สกัดได้มีความแตกต่างกับปริมาณสังกะสีที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-5 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณแคดเมียมที่ถูกสกัดหลังจาก
กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

ระยะเวลาที่ใช้ อบกากตะกอน	ANOVA		
	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 60 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 80 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 100 °C
1 hr	0.414	0.094	0.001
6 hr	0.004	0.023	0.000
12 hr	0.008	0.003	0.002
24 hr	0.000	0.013	0.000

จากตารางที่ ง-5 พบว่าเมื่ออบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้ว
นำไปสกัดแคดเมียม จะให้ปริมาณแคดเมียมไม่แตกต่างกับปริมาณแคดเมียมที่สกัดออกจากกาก
ตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งผลจะตรงกันข้ามกับการอบกากตะกอนที่
อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C ที่ระยะเวลาอื่นๆ และการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 100 °C ในทุกระยะ
เวลา ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่สกัดได้มีความแตกต่างกับปริมาณแคดเมียมที่สกัดออกจากกากตะกอน
ที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-6 ค่าทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($p < 0.05$) ของปริมาณ โครเมียมที่ถูกสกัดหลังจาก กากตะกอนที่ผ่านการอบและกากตะกอนที่ไม่ผ่านการอบ

ระยะเวลาที่ใช้ อบกากตะกอน	ANOVA		
	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 60 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 80 °C	กากตะกอนที่ไม่ได้อบ กับกากตะกอนที่อบที่ อุณหภูมิ 100 °C
1 hr	0.000	0.001	0.010
6 hr	0.000	0.000	0.865
12 hr	0.000	0.000	0.000
24 hr	0.001	0.000	0.005

จากตารางที่ ง-6 พบว่าเมื่ออบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมงแล้วนำไปสกัด โครเมียม จะให้ปริมาณ โครเมียม ไม่แตกต่างกับปริมาณ โครเมียมที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งผลจะตรงกันข้ามกับการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะเวลาอื่นๆ และการอบกากตะกอนที่อุณหภูมิ 60 °C และ 80 °C ในทุกระยะเวลา ซึ่งปริมาณ โครเมียมที่สกัดได้มีความแตกต่างกับปริมาณ โครเมียมที่สกัดออกจากกากตะกอนที่ไม่ได้ผ่านการอบที่ระดับนัยสำคัญ 0.05