

การสกัดตะกั่วจากดินตะกอนก่อนการทำเสถียร



นายทิว คำปาน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1350-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EXTRACTION OF LEAD FROM CONTAMINATED SOIL BEFORE STABILIZATION

Mr. Tiew Khampan



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1350-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนก่อนการทำเสถียร
โดย	นายทิว คำปาน
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเขียว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โฉ่ห้วงศ์วัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ เกรอด)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ สุรี ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โฉ่ห้วงศ์วัฒน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เซาวกิจเจริญ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทิว คำปาน : การสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนก่อนการทำเสถียร (Extraction of Lead from Comtaminated Soil before Stabilization) อ.ที่ปรึกษา รศ. สุรี ชาวเธียร , อ.ที่ปรึกษาร่วม
ผศ. บุญยง โฉ่ห้วงศ์วัฒน์, 140 หน้า. ISBN 974-03-1350-7

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา เพื่อหาวิธีการบำบัด/กำจัดตะกั่วออกจากดินตะกอนที่ปนเปื้อนประมาณ 15,000 ตัน ในห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี ด้วยวิธีต่างๆ คือ การคัดแยกดินตะกอนด้วยไ้ตะเข้แบบเปียก การชะล้าง/สกัดด้วยสารละลายชนิดต่างๆ และการทำเสถียร/ก้อนแข็ง โดยดินตะกอนมีปริมาณตะกั่วเฉลี่ยเท่ากับ 75.37 ก./กก. และมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัด ตามวิธีการชะละลายของกระทรวงอุตสาหกรรม เท่ากับ 2.84 มก./ล. ซึ่งน้อยกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 5 มก./ล. ดังนั้นดินตะกอนที่นำมาศึกษานี้ จึงไม่ได้จัดเป็นของเสียอันตราย แต่อาจจัดเป็นดินตะกอนปนเปื้อน เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดสูงเกินกว่ามาตรฐานของกรมวิชาการเกษตร ซึ่งกำหนดไว้ที่ 55 มก./กก. สำหรับดินในพื้นที่การเกษตรทั่วไป ดังนั้นจึงต้องทำการบำบัดดินตะกอนดังกล่าวด้วยวิธีการที่เหมาะสม ผลการศึกษา พบว่า

1. การคัดแยกดินตะกอนด้วยไ้ตะเข้แบบเปียก สามารถคัดแยกได้ดินตะกอนที่มีตะกั่วถึง 107.5 ก./กก. ถึงร้อยละ 47.3 ซึ่งสามารถนำคืนสู่ขั้นตอนการผลิตหัวแร่ตะกั่วได้ ส่วนดินตะกอนสะอาดที่เหลืออีกร้อยละ 52.7 มีปริมาณตะกั่วลดลงเหลือ 46.2 ก./กก. ซึ่งต้องนำไปฝังกลบ เพื่อลดการแพร่กระจายของตะกั่วไปปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม
2. การล้างสกัดดินตะกอนด้วยสารละลายต่างๆ พบว่า กรดเกลือ 0.1 โมล/ลิตร มีความสามารถในการล้างสกัดตะกั่วได้ดีกว่าไซดาไฟ 0.1 โมล/ลิตร และน้ำประปา และเมื่อนำกรดเกลือไปหาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัด พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร อัตราส่วนกรดเกลือต่อดินตะกอนที่ 50:1 โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที และเวลาในการสกัดนาน 60 นาที สามารถสกัดตะกั่วได้ถึงร้อยละ 90 ส่วนน้ำสกัดที่เกิดขึ้น ซึ่งมีตะกั่วถึง 1,860 มก./ล. เมื่อนำไปทำการตกตะกอนเคมีด้วยไซดาไฟต่อด้วยไซเตียมซัลไฟด์ พบว่า ไม่สามารถลดปริมาณตะกั่วให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ ส่วนกากตะกอนที่เหลือจากการสกัดด้วยกรดเกลือ ต้องทำการล้างน้ำสะอาดถึง 2 ครั้ง เพื่อให้กากตะกอนที่ได้มีลักษณะเฉื่อย โดยน้ำทิ้งที่เกิดขึ้นยังมีตะกั่วอยู่ 18.60 และ 0.94 มก./ล. ตามลำดับ และพบว่าเมื่อนำน้ำทิ้งครั้งที่ 2 มาเติมไซเตียมซัลไฟด์ สามารถบำบัดให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรมได้ ส่วนกากตะกอนมีปริมาณตะกั่วสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานสำหรับดินเพื่อการเกษตร ที่กำหนดไว้ที่ 55 มก./กก. จึงจำเป็นต้องนำไปฝังกลบต่อ
3. การทำเสถียร/ก้อนแข็งดินตะกอนและกากตะกอน พบว่า เมื่อเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 จำนวน 7.5 เท่าและ 3.5 เท่า ของน้ำหนักของดินตะกอนและกากตะกอนตามลำดับ พบว่าปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของเสียอันตราย โดยก้อนแข็งมีปริมาตรเพิ่มขึ้น 12.85 เท่าและ 6.85 เท่า ของก้อนแข็งจากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 กับดินตะกอนและกากตะกอน ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการบำบัด/กำจัดดินตะกอนด้วยวิธีการฝังกลบโดยตรง การคัดแยกด้วยไ้ตะเข้แบบเปียกพร้อมฝังกลบ การสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลายพร้อมทั้งกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น การทำเสถียร/ก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 และการส่งดินตะกอนไปฝังกลบยังศูนย์บำบัดที่ได้รับอนุญาต พบว่า การคัดแยกด้วยไ้ตะเข้แบบเปียกมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีราคาบำบัดต่ำสุด เพียง 150 บาท

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

4170323421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : CONTAMINATED SOIL / SOIL WASHING / SOLIDIFICATION

TIEW KHAMPAN : EXTRACTION OF LEAD FROM CONTAMINATED SOIL BEFORE
STABILIZATION. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. SUREE KHAODHIAN,
THESIS CO-ADVISOR: ASSIST.PROF. BOONYONG LOHWONGWATANA,
140 pp. ISBN 974-03-1350-7

This research investigated the best method for disposition of Lead-contaminated sediment using gravity concentration, soil washing and solidification process. The sample sediment came from Huay Khai Ti, Thong Pha Phum, Kanchanaburi Province. The 15,000 tons of sediment has a lead concentration of 75.4 g/kg. Its leachate contained only 2.84 mg/l. of lead which lower than 5 mg/l standard. However, the sediment had lead concentration higher than the 55 mg./kg. standard for agricultural soil. So, a suitable treatment method should be explored.

1. The gravity concentration process divided sediment into 2 parts. One is the concentrate and another is tailing. The lead concentration in tailing was reduced to 46.2 g/kg which was about 52.7% of sediment. Therefore, it was not hazardous waste by TCLP test but it was over the 55 mg/kg limit of lead in agricultural soil. So, it should be disposed of in a landfill. The concentrate had lead about 107.5 g/kg, and a total volume of 47.3% of the sediment. The concentrate could be fed to flotation process to produce lead concentrate for a smelter because of its lead concentration close to natural ore.
2. The soil washing process, HCl was more suitable than NaOH or tap water. The best situation for lead extraction in sediment was at 0.2 N, 500 rpm, 60 min. and at a ratio of solution to soil of 50:1 by weight which removed lead of around 90%. After separation of liquid and solid, the solid waste was so low in pH and retained lead solution at its surface. So, it must be washed by tap water twice until meeting the hazardous waste standard before final disposal. The leaching and washing solution were treated by NaOH and Na₂S respectively. It was found that the NaOH precipitation for the leaching solution and 1st tap water solution could not remove lead meeting the effluent standard. The Na₂S precipitation for the 2nd tap water solution did remove lead meeting the effluent standard.
3. The sediment having high lead concentration and fine-grained soil was solidified process by Portland Cement Type I. It was found that the amount of cement around 7.5 times by weight of the sediment and 3.5 times by weight of tailing from leaching were suitable to prevent the solubility of lead from solidified products to below hazardous waste standard.

The most suitable method for treatment of the Lead-contaminated sediment was a gravity concentration method where its concentrate returns to the company's floatation process. And the cleaner tailing should be disposed of in a non-hazardous waste landfill. The total handling and disposal costs were about 150 bahts/tons.

Department/Program Environmental Engineering

Student's signature _____

Field of study Environmental Engineering

Advisor's signature _____

Academic year 2001

Co-advisor's signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ท่านรองศาสตราจารย์ สุวีร์ ชาวเขียว และผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โล่ห์วงศ์วัฒน์ ที่กรุณาช่วยเหลือและให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ คณาจารย์ทุกท่าน และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการต่างๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ และศูนย์เครื่องมือภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือในการศึกษา

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และมูลนิธิชิน โสภณพานิช ที่อนุเคราะห์ทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัทตะกั่วคอนซัลเตรท ประเทศไทย ที่อนุเคราะห์ดินตะกอนที่นำมาวิจัยในการศึกษา

ขอขอบคุณ กรมควบคุมมลพิษ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับปัญหาดินตะกอนปนเปื้อนด้วยสารตะกั่วในห้วยคลิตี อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

ขอขอบคุณ อาจารย์อุทิศ ทองกลิ้ง ที่อนุเคราะห์และให้ความรู้เกี่ยวกับการคัดแยกดินตะกอน ด้วยเครื่องมือโต๊ะเขย่าแบบเปียก พร้อมกับให้ความรู้เกี่ยวกับวิธีการแต่งแร่ด้วยเครื่องมือทางเหมืองแร่ต่างๆ

ขอขอบคุณ นายคมสิน วังยาว หลุมฝังกลบขยะราชาเทวะ และห้างหุ้นส่วนไพโรจน์ สมพงษ์พาณิชย์ ที่อนุเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับราคาค่าก่อสร้างหลุมฝังกลบ ราคาค่าก่อสร้างฐานรากสำหรับรองรับถังปฏิกรณ์ และราคาการก่อสร้างถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างดินตะกอนด้วยกรดเกลือและการตกตะกอนผลึกทางเคมี

ขอขอบคุณ นายประกฤษ ฉัตรแสงอุทัย ที่ช่วยให้คำปรึกษาในด้านการทำก่อนแข็งทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบคุณพระคุณ บิดา มารดา และทุกๆคนในครอบครัว ที่ได้อุปบรวงส่งสอน ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
2 วัตถุประสงค์และขอบเขตการวิจัย.....	4
3 ทบทวนเอกสาร.....	7
3.1 ตะกั่วและชนิดของตะกั่ว.....	7
3.2 หลักการในการชะล้างดินปนเปื้อนสารมลพิษ.....	7
3.2.1 การเตรียมดินปนเปื้อนสารมลพิษ.....	8
3.2.2 การชะล้างดินปนเปื้อนสารมลพิษ.....	8
3.2.3 การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง.....	11
3.3 การทำเสถียร/กักกันแข็งของเสียโดยใช้ปูนซีเมนต์.....	13
3.4 ค่ามาตรฐานดิน/ดินตะกอน ของเสียอันตราย และ.....	14
การประเมินคุณภาพของเสียอันตรายที่ผ่านการทำ เสถียร/กักกันแข็ง	
3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
4 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	23
4.1 แผนการวิจัย.....	23
4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	23
4.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	25
4.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	25
4.2 การดำเนินการวิจัย.....	26

4.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของ.....26	
ดินตะกอน	
4.2.2 การตัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอน.....30	
4.2.3 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอนปนเปื้อนด้วย.....30	
สารเคมี พร้อมทั้งกำจัดตะกั่วออกจากน้ำสกัด	
ด้วยการตกตะกอนทางเคมี	
4.2.4 การทำเสถียร/กักเก็บดินตะกอนชนิดต่างๆ ด้วย.....34	
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	
4.2.5 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....36	
5 ผลการทดลองและวิจารณ์.....37	
5.1 ลักษณะสมบัติของดินตะกอน.....37	
5.1.1 สมบัติทางกายภาพ.....37	
5.1.2 สมบัติทางเคมี.....38	
5.2 การตัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอนปนเปื้อน.....39	
5.3 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน การกำจัดน้ำทิ้ง และ.....45	
การจัดการกากตะกอนที่เหลือจากการล้างสกัด	
5.3.1 การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน.....45	
5.3.2 การบำบัดน้ำสกัดและน้ำทิ้ง.....51	
5.3.3 การบำบัด/กำจัดกากตะกอนหลังจากการล้าง.....56	
ด้วยสารละลายกรดเกลือ	
5.4 การทำเสถียร/กักเก็บดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์...62	
ชนิดที่ 1 ก่อนการฝังกลบในหลุมฝังกลบนิรภัย	
5.5 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น.....66	
5.5.1 กรณีการฝังกลบโดยตรง.....66	
5.5.2 กรณีทำการตัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก.....67	
5.5.3 กรณีการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วย.....68	
สารละลาย พร้อมการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น	

5.5.4	กรณีการทำเสถียร/ก้อนแข็งดินตะกอนด้วยปูน.....69	
	ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	
5.5.5	กรณีการส่งดินตะกอนไปบำบัดยังศูนย์บำบัดที่.....71	
	ได้รับอนุญาต	
6.	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....73	
	รายการอ้างอิง.....76	
	ภาคผนวก.....79	
	ภาคผนวก ก	หลักเกณฑ์การฝังกลบสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช้แล้ว.....80
		และหลักเกณฑ์การฝังกลบอย่างปลอดภัย
	ภาคผนวก ข	ภาพถ่ายการทดลอง.....105
	ภาคผนวก ค	ผลการวิเคราะห์การทดลอง.....115
	ภาคผนวก ง	รายละเอียดราคาค่าใช้จ่ายการกำจัด/บำบัด.....136
	ดินตะกอน	
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....140	

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	พื้นที่การปนเปื้อนตะกั่วในดินตะกอน ณ ต.ชะแล อ.ทองผาภูมิ.....3 จ. กาญจนบุรี (Pedall G., 1999)
รูปที่ 3.1	กระบวนการชะล้างดินโดยใช้ของเหลว (Guide to Conducting.....8 Treatability Studies under CERCLA : Soil Washing, 1991)
รูปที่ 3.2	แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่ว (II) เฮไลต์10 (Fergusson J.E. , 1990)
รูปที่ 3.3	แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่ว (II) ไฮดรอกซี.....11 (Fergusson J.E , 1990)
รูปที่ 3.4	ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์.....12 และซัลไฟด์ต่างๆ (Cullinane et al. , 1985)
รูปที่ 4.1	ตำแหน่งอ้างอิงของจุดเก็บตัวอย่างดินและน้ำ จากห้วยคลิตี้24 ของกรมควบคุมมลพิษ, 2542
รูปที่ 5.1	การกระจายขนาดคละของดินตะกอนจากห้วยคลิตี้.....38
รูปที่ 5.2	ตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่คัดแยกได้จากไ้ะเขย่าแบบเปียก.....40 (Wills, 1988)
รูปที่ 5.3	การกระจายขนาดอนุภาคของตะกอนตะกั่ว และดินตะกอนสะอาด41 ที่ได้จากการคัดแยกด้วยไ้ะเขย่าแบบเปียก เทียบกับการกระจาย ขนาดอนุภาคของดินตะกอน
รูปที่ 5.4	การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดเกลือ สำหรับการล้างตะกั่ว.....47 ออกจากดินตะกอน
รูปที่ 5.5	การหาความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน..49 โดยใช้สารละลายกรดเกลือที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร และอัตราส่วน สารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอน ที่ 25:1 โดยน้ำหนัก
รูปที่ 5.6	กลไกของการชะล้าง/สกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ที่อัตราส่วนของ.....50 กรดเกลือต่อดินตะกอนต่างๆ โดยคงที่ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที และความเข้มข้นของกรดเกลือที่ 0.2 โมล/ลิตร

- รูปที่ 5.7 ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดจากกากตะกอน ที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง.....57
ต่างๆ โดยใช้สภาวะเดียวกับการชะละลาย ของกระทรวงอุตสาหกรรม
- รูปที่ 5.8 ความหนาแน่นรวมของก้อนแข็งกากตะกอน ปริมาณตะกั่วของของผสม....59
และปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของก้อนแข็งเทียบกับกากตะกอน ที่สัดส่วน
ปูนซีเมนต์ต่างๆโดยคงที่ w/c เท่ากับ 0.5
- รูปที่ 5.9 ปริมาณตะกั่วและความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายของน้ำสกัดจากก้อนแข็ง.....60
กากตะกอน และกำลังรับแรงอัดที่ 7 และ 28 วันของก้อนแข็งกาก
ตะกอน
- รูปที่ 5.10 ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดจากดินตะกอน ที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง.....62
ต่างๆ โดยใช้สภาวะเดียวกับการชะละลาย ของกระทรวงอุตสาหกรรม
- รูปที่ 5.11 ความหนาแน่นรวมของก้อนแข็งดินตะกอน ปริมาณตะกั่วของของผสม.....64
และปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของก้อนแข็งเทียบกับดินตะกอน ที่สัดส่วนปูน
ซีเมนต์ต่างๆ โดยคงที่ค่า w/c เท่ากับ 0.5
- รูปที่ 5.12 ปริมาณตะกั่วและความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายของน้ำสกัดจากก้อนแข็ง.....65
ดินตะกอน และกำลังรับแรงอัดที่ 7 วันและ 28 วันของก้อนแข็งดิน
ตะกอน
- รูปที่ 5.13 รูปทั่วไปของหลุมฝังกลบสำหรับการฝังกลบ ในการประมาณราคา.....67
การฝังกลบ
- รูปที่ 5.14 รูปหน้าตัดของหลุมฝังกลบนิรภัย สำหรับฝังของเสียที่ทำเป็นก้อนแข็ง.....70

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักของ.....15 ดินประเทศไทย (กรมวิชาการเกษตร, 2542)
ตารางที่ 3.2	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักของ.....15 ดินประเทศแคนาดา (CCME, 1999)
ตารางที่ 3.3	ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักของ.....16 ดินประเทศออสเตรเลีย (NEPC, 2000)
ตารางที่ 3.4	เกณฑ์ความเข้มข้นของน้ำสกัดของเสียที่ถือว่าเป็นของเสียอันตราย.....16 (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540))
ตารางที่ 3.5	ประสิทธิภาพของการสกัดโลหะหนักด้วยสารละลายและการคัดแยก...18
ตารางที่ 5.1	สมบัติทางกายภาพต่างๆของดินตะกอนจากห้วยคลิตี้.....37
ตารางที่ 5.2	การกระจายของตะกั่วในแต่ละช่วงอนุภาคของดินตะกอน.....39
ตารางที่ 5.3	สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่คัดแยกได้จากดินตะกอน.....41
ตารางที่ 5.4	ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ใช้ในการคัดแยก และปริมาณตะกั่ว... 43 ทั้งหมดในน้ำที่ใช้ในการคัดแยกดินตะกอน
ตารางที่ 5.5	คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคัดแยกดินตะกอนสะอาด.....44
ตารางที่ 5.6	สรุปผลการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลายชนิด.....46 ชนิดต่างๆ
ตารางที่ 5.7	สภาพความเป็นกรด-ด่างของของผสมระหว่างดินตะกอนกับ.....47 สารละลายกรดเกลือ ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ
ตารางที่ 5.8	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด51 จากกากตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำประปา
ตารางที่ 5.9	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด.....52 และน้ำทิ้ง
ตารางที่ 5.10	สรุปค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ของ.....53 น้ำสกัด
ตารางที่ 5.11	สรุปผลการตกตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์.....54

ตารางที่ 5.12 สรุปราคาค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ.....71

ตารางที่ 5.13 ราคาค่าบำบัดดินตะกอนในกรณีต่างๆในราคาต่อตัน.....72



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหามลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันนับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องในภาคของภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรมและสังคมเมือง ทำให้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมทั้งทางด้านอากาศ น้ำและดิน เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปัญหามลพิษทางด้านน้ำและอากาศมีการป้องกัน ติดตามดูแล และแก้ไข จากหน่วยงานราชการทำหน้าที่รับผิดชอบอย่างต่อเนื่อง จะมีเพียงแต่มลพิษทางดิน (Soil Pollution) เท่านั้นที่ยังไม่ได้รับการสนใจจากหน่วยงานราชการเท่าที่ควร ซึ่งปัญหามลพิษในด้านต่างๆ ก็มีความสัมพันธ์ต่อกันด้วย จึงควรได้รับการเอาใจใส่จากหน่วยงานราชการเหมือนกัน

สาเหตุของการเกิดปัญหามลพิษทางดิน ได้แก่

1. ธรรมชาติ อันได้แก่ หินต้นกำเนิดของดิน มีปริมาณโลหะหนักที่เป็นพิษเจือปนอยู่ในปริมาณที่สูง อันอาจจะมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสัตว์เลี้ยง หรือ/และมีผลต่อการเจริญเติบโตและให้ผลของพืช
2. มนุษย์ เป็นสาเหตุสำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดปัญหามลพิษทางดิน อันเกิดจากการขยายตัวในภาคการผลิตของอุตสาหกรรมและการเกษตร และการขยายตัวของสังคมเมือง

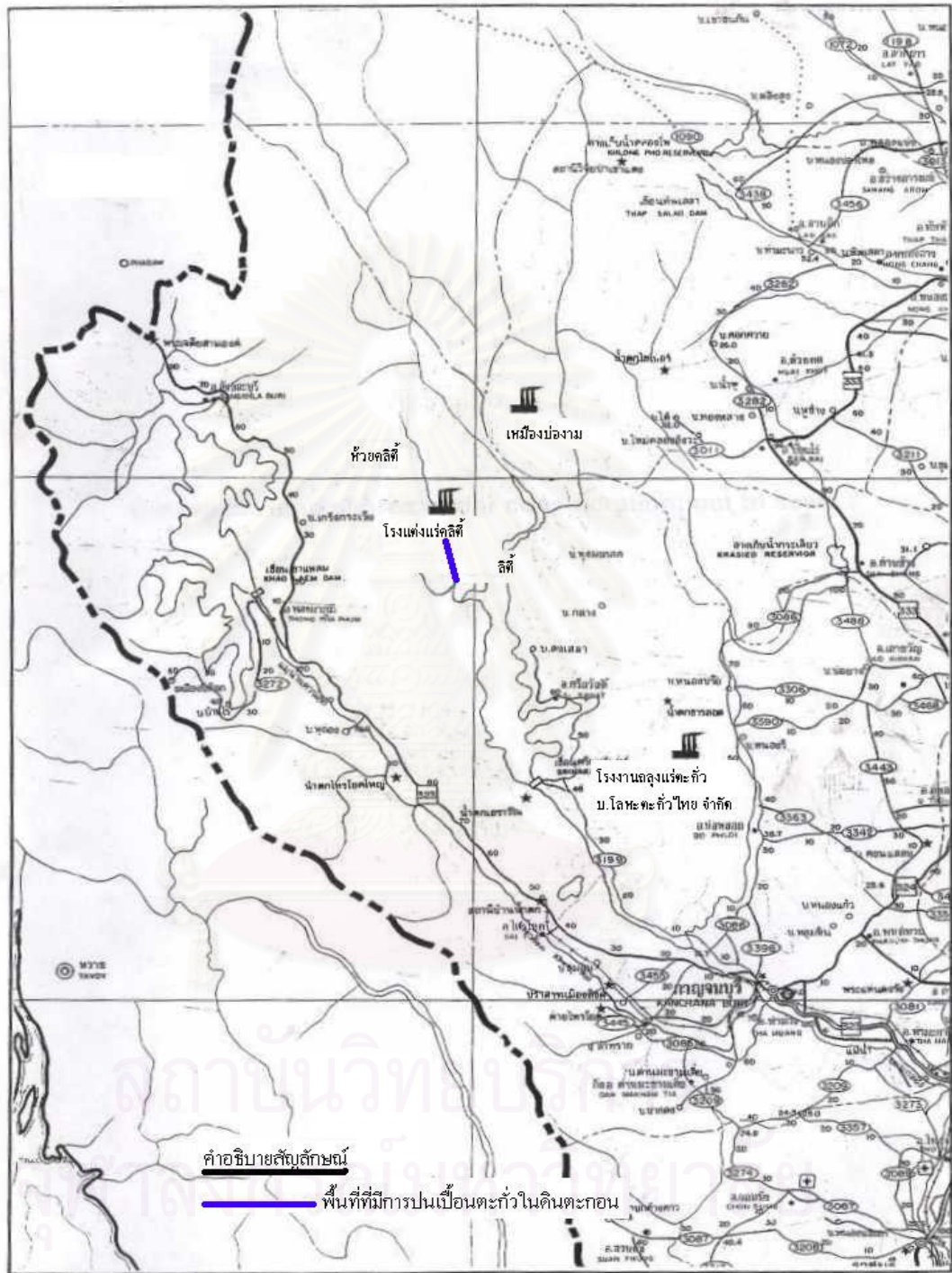
ในการศึกษานี้เป็นการศึกษากระบวนการบำบัด/แก้ไขปัญหาของดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่วจากอุตสาหกรรมแร่ตะกั่ว ก่อนที่จะส่งไปถลุง ณ โรงถลุงแร่ตะกั่ว เพื่อให้ได้ตะกั่วบริสุทธิ์ โดยเป็นตะกอนดินจากในลำห้วยคลิตี้ ที่บริเวณบ้านเสือโทน ตำบลชะแล อำเภอกงไกรลาศ จังหวัดกาญจนบุรี ตามที่เป็นข่าวในหน้าหนังสือพิมพ์ จนเกิดเป็นกรณีพิพาทระหว่างชาวบ้านหมู่บ้านคลิตี้ล่างกับโรงงานแร่ตะกั่ว ที่ตั้งอยู่บริเวณต้นน้ำของลำห้วย อันเนื่องจากปริมาณตะกั่วในดินตะกอนบริเวณท้องลำห้วยมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานสำหรับดินในพื้นที่เกษตรของประเทศแคนาดาที่กำหนดไว้ที่ 70 มก./กก.ดินแห้ง และประเทศออสเตรเลียที่กำหนดไว้ที่ 550 มก./กก.ดินแห้ง และสูงกว่าเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักของดินของประเทศไทยสำหรับพื้นที่การเกษตร ที่กำหนดไว้ที่ 55 มก./กก สำหรับดินตะกอนบริเวณพื้นที่ที่มีปัญหา พบว่ามีปริมาณตะกั่วในดินตะกอนอยู่ระหว่าง 320-85,718 มก./กก. โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 75,370 มก./กก ซึ่งมีค่าเกินเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวมาก และมีปริมาณดินตะกอนที่ปนเปื้อนตะกั่วอยู่ในบริเวณท้องลำห้วยและคั่งน้ำถึง 15,000 ตัน โดยบริเวณที่มีการปนเปื้อนตะกั่วในลำห้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.1

การศึกษานี้เป็นการใช้วิธีการคัดแยกดินตะกอนที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยวิธีต่างๆ เพื่อแยกตะกั่วออกจากดินตะกอน เช่นการอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะและการชะล้างดิน

ตะกอนด้วยกรด ด่าง หรือทำการบำบัดตะกอนตะกั่วโดยวิธีการทำเสถียร/ก้อนแข็ง ด้วยปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 สำหรับดินตะกอนสะอาดที่ได้หลังจากผ่านการคัดแยกแล้ว จะสามารถที่นำไปทิ้งหรือใช้ประโยชน์อื่น เช่น ใช้เป็นวัสดุผสมสำหรับผสมปูนฉาบหรือคอนกรีต ส่วนตะกอนตะกั่วที่ได้จากการคัดแยกสามารถนำไปผสมกับสินแร่เพื่อผลิตหัวแร่ตะกั่ว สำหรับนำไปถลุงผลิตเป็นตะกั่วบริสุทธิ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.1 พื้นที่การปนเปื้อนตะกั่วในดินตะกอน ณ ต.ชะแล อ.ทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี (Pedall G.,1999)

บทที่ 2

วัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย

2.1 วัตถุประสงค์

การศึกษาวิจัยกระบวนการบำบัดดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่วจากห้วยคลิตี้ ตำบลชะแล อำเภอลองพญาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี มีวัตถุประสงค์ดังนี้

- 2.1.1 เพื่อศึกษาวิธีการคัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่วโดยการใช้ไ้ตะเข้ยาแบบเปียก
- 2.1.2 เพื่อศึกษาหาสัดส่วนของตะกอนตะกั่วที่เกินเกณฑ์มาตรฐานของเสียอันตราย (ตะกั่วในน้ำสกัด > 5.0 มก./ล.) และ/หรือเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในดินตะกอนที่ยอมรับได้ คือ มีปริมาณตะกั่วในดินตะกอนไม่เกิน 55 มก./กก. กับดินตะกอนส่วนที่สะอาด
- 2.1.3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการชะล้างดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่วด้วยสารละลายกรดเกลือ โซดาไฟ และน้ำประปา
- 2.1.4 เพื่อศึกษาหาสัดส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างปริมาณดินตะกอน และดินตะกอนที่ผ่านการล้าง ที่มีปริมาณตะกั่วเกินเกณฑ์มาตรฐานของเสียอันตรายและ/หรือเกณฑ์มาตรฐานโลหะหนักในดินตะกอน ต่อวัสดุประสาน เพื่อทำเสถียร/ก้อนแข็ง
- 2.1.5 เพื่อศึกษาค่าใช้จ่ายรวมในการแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่ว รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการบำบัดและกำจัดดินตะกอน และสรุปเสนอวิธีการบำบัดและ/หรือกำจัดดินตะกอนที่เหมาะสม

2.2 จุดมุ่งหมาย

- 2.2.1 เพื่อพัฒนาวิธีการใหม่ที่สามารถนำไปใช้งานในภาคสนามได้จริงและประหยัดค่าใช้จ่าย
- 2.2.2 เพื่อเป็นแนวทางในการทำงานวิจัยสำหรับงานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกันในอนาคต

2.3 ขอบเขตการศึกษา

- 2.3.1 การศึกษานี้ดำเนินการในห้องปฏิบัติการและในสภาพอุณหภูมิห้อง
- 2.3.2 การศึกษานี้สมมุติฐานว่าไม่เกิดสภาวะมลพิษทางอากาศขณะทำการวิจัย
- 2.3.3 ดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่วที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่วจากบริเวณทำนน้ำของห้วยคลิตี้ โดยใช้วิธีการชั่งตวงจากบริเวณตลิ่งสองฝั่งลำห้วยและบริเวณท้องน้ำ
- 2.3.4 การหาสารละลายที่เหมาะสมในการชะล้างในเบื้องต้น จะใช้น้ำประปา สารละลายกรดเกลือความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และสารละลายโซดาไฟความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร ทั้งนี้ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25 :1 โดยน้ำหนัก และทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย ที่เวลา 30 นาที โดยทำการกวนล้างด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก แล้วจึงทำการเลือกสารละลายที่เหมาะสมจากปริมาณตะกั่วที่อยู่ในสารละลาย
- 2.3.5 นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2.3.4 มาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด โดยการแปรค่าความเข้มข้นที่ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.6 โมล/ลิตร ตามลำดับ โดยอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก โดยการกวนล้างจะใช้เครื่องกวนแม่เหล็กโดยปรับที่ความเร็วรอบสูงสุด แล้วเก็บตัวอย่างสารละลายเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่อยู่ในสารละลายที่เวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาที ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในสารละลายใช้วิธีมาตรฐาน US.EPA SW-846 Method 3005 และ Method 7420 สำหรับการเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสม พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับเวลา
- 2.3.6 การหาความเร็วรอบในการล้างดินตะกอนด้วยสารละลายที่เหมาะสมที่ได้ ได้ทำการศึกษาที่ความเร็วรอบที่ 100, 250 และ 500 รอบ/นาที โดยใช้อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก และใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากข้อ 2.3.5 แล้วทำการเก็บตัวอย่างสารละลาย เพื่อวิเคราะห์หาค่าตะกั่วที่เวลา 5, 10, 20, 30 และ 40 นาทีตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในสารละลายใช้วิธีมาตรฐาน US.EPA SW-846 Method 3005 และ Method 7420 สำหรับการเลือกความเร็วรอบที่เหมาะสมพิจารณาจากกราฟระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับเวลา

- 2.3.7 การหาอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอน ได้ใช้สัดส่วนที่ 25:1, 50:1, 100:1, 200:1 และ 400:1 โดยน้ำหนัก โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากข้อ 2.3.6 แล้วทำการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ตะกั่วที่ละลายอยู่ในสารละลายที่เวลา 5, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในสารละลาย ใช้วิธีมาตรฐาน US.EPA SW-846 Method 3005 และ Method 7420 สำหรับการเลือกอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่เหมาะสม พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าร้อยละการสกัดกับเวลา
- 2.3.8 การตกผลึกตะกอนตะกั่วจากน้ำสกัดที่เกิดจากการชะล้าง ด้วยสัดส่วนสารละลายที่เหมาะสมที่สุดในข้อ 2.3.7 ได้ใช้วิธีการตกผลึกตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์ โดยการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดไปที่ 9.0-9.5 และ/หรือทำการตกผลึกตะกอนตะกั่วซัลไฟด์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์ต่อ โดยจำนวนเท่าสมมูลกับตะกั่วในน้ำสกัดที่ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 และ 3.0 เท่า เพื่อให้มีปริมาณตะกั่วเหลืออยู่ในสารละลายไม่เกิน 0.2 มก./ล.
- 2.3.9 การทำเสถียร/ก้อนแข็งดินตะกอนหรือกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยใช้วิธีมาตรฐาน ASTM C109 แล้วจึงนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มาคูณด้วยค่าคงที่ สำหรับแปรค่าที่ได้จากก้อนแข็งรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นก้อนแข็งรูปทรงกระบอก ที่มีสัดส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง เท่ากับ 1.15
- 2.3.9.1 สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่อน้ำ (w/c) เท่ากับ 0.50 ทุกอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินตะกอนหรือกากตะกอน โดยไม่คำนึงถึงสภาพของผสมที่ได้ว่ามีลักษณะเป็นของแข็ง พลาสติก หรือของเหลว และค่าการไหลของของผสมที่ได้
- 2.3.9.2 ร้อยละของปูนซีเมนต์ต่อดินตะกอนหรือกากตะกอน ศึกษาที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำหนักดินตะกอนหรือกากตะกอน
- 2.3.9.3 การหาลำดับรับแรงอัดของดินตะกอนหรือกากตะกอนก่อนที่จะนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ใช้วิธีการหาด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D2166

บทที่ 3

ทบทวนเอกสาร

3.1 ตะกั่วและชนิดของตะกั่ว

ตะกั่ว (Lead) เป็นธาตุชนิดหนึ่งที่มีหลายไอโซโทป (Isotope) แต่ที่ปรากฏเป็นไอโซโทปที่เสถียร (Stable Isotope) มีเพียงชนิดเดียว คือ Pb-208 เป็นโลหะหนัก (Heavy Metal) สีเทา มีสีผงเป็นสีดำ มีความวาวแบบโลหะ ทึบแสง มีน้ำหนักอะตอม (Atomic Weight) 207.17 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 11.37 มีความอ่อนตัว เหนื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีเพราะเป็นของแข็งไม่ละลายน้ำ จะละลายในกรดไนตริกเข้มข้นร้อน และในกรดเกลือ กรดกำมะถันและกรดน้ำส้มที่เข้มข้นเดือด มีจุดเดือด 1,740 °C และจุดหลอมเหลวที่ 327.4 °C ส่วนแร่ตะกั่ว (Lead Ores) เป็นสารประกอบตะกั่วที่มีวาเลนซ์ +2 และ +4 โดยพบได้ในรูปต่างๆที่สำคัญ 3 แบบดังนี้

1. **กาลีนา (Galena)** มีสูตรทางเคมี PbS มีรูปผลึกแบบไอโซเมตริก (Isometric System) ซึ่งมีลักษณะคล้ายสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ สีและสีผงละเอียดเป็นสีเทาตะกั่ว มีความแข็ง 2.5 ความถ่วงจำเพาะ 7.4-7.6 และมีค่าสมดุผลการละลายน้ำ (Ksp) เท่ากับ 1.1×10^{-29}

2. **เซอร์ไซต์ (Cerussite)** มีสูตรทางเคมี PbCO₃ มีระบบผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic System) มีลักษณะคล้ายกลักไม้ขีดไฟ สีขาว สีเทา หรือไม่มีสี ความแข็ง 3-3.5 ความถ่วงจำเพาะ 6.55 มีความมันวาว แสงผ่านได้บ้างหรือทึบแสง และมีค่าสมดุผลการละลายน้ำ (Ksp) เท่ากับ 1.5×10^{-13}

3. **แองกลีไซต์ (Anglesite)** มีสูตรทางเคมี PbSO₄ มีระบบผลึกแบบออร์โธโรมบิก (Orthorhombic System) สีขาว สีเทา ไม่มีสีและสีเหลืองอ่อน ความแข็ง 3.0 ความถ่วงจำเพาะ 6.2-6.4 และมีค่าสมดุผลการละลายน้ำ (Ksp) เท่ากับ 1.8×10^{-8}

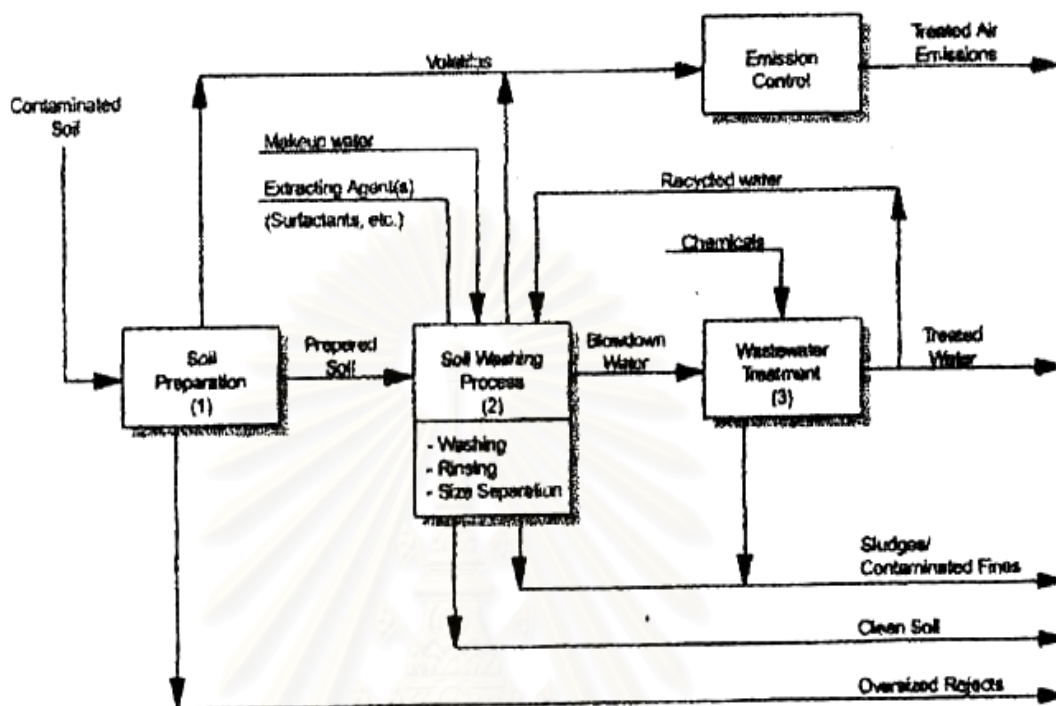
3.2 หลักการในการชะล้างดินปนเปื้อนสารมลพิษ

หลักการในการชะล้างดินปนเปื้อนสารมลพิษมี 3 ขั้นตอนใหญ่ๆคือ

1. การเตรียมดิน เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินปนเปื้อน ที่นำมาชะล้าง รวมถึงการขจัดเศษไม้และใบไม้ออกจากดิน
2. การชะล้างดินปนเปื้อน เป็นขั้นตอนการขจัดสารปนเปื้อนออกจากดิน/ดินตะกอนด้วยวิธีทางกายภาพ เคมี หรือชีววิทยา หรือใช้วิธีทางดังกล่าวร่วมกัน และรวมถึงการคัดแยกดินออกจากของเหลวที่ใช้ชะล้างด้วย

3. การกำจัดสารปนเปื้อนออกจากน้ำทิ้ง ที่ผ่านการชะล้าง

จากขั้นตอนดังกล่าวสามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการชะล้างดินโดยใช้ของเหลว (Guide to Conducting Treatability Studies under CERCLA : Soil Washing. 1991)

3.2.1 การเตรียมดินปนเปื้อนสารมลพิษ

การเตรียมดินปนเปื้อนสารมลพิษเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากขั้นตอนหนึ่ง เพราะในขั้นตอนนี้ต้องทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับขั้นตอนต่างๆ อย่างเช่น การวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น การวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของโลหะหนักในแต่ละช่วงอนุภาค ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในดิน และค่าความเป็นกรด-ด่างของดิน เป็นต้น รวมถึงการกำจัดขยะ ใบไม้ และเศษไม้ออกจากดิน

3.2.2 การชะล้างดินปนเปื้อนสารมลพิษ

การชะล้างดินปนเปื้อนสารมลพิษ สามารถแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการใหญ่ๆ คือ

1.) กระบวนการทางกายภาพ 2.) กระบวนการทางเคมี และ 3.) กระบวนการทางชีววิทยา
ในที่นี้ขออธิบายเพียงกระบวนการทางกายภาพและเคมีเท่านั้น เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.2.1 กระบวนการทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่อาศัยความแตกต่างกันของคุณสมบัติทางกายภาพของดินและสารปนเปื้อน อย่างเช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า ความหนาแน่น และการติดแม่เหล็ก ในที่นี้ขออธิบายเพียงการคัดแยกที่ใช้ความแตกต่างของความหนาแน่นมา และใช้น้ำเป็นตัวกลาง ซึ่งเป็นวิธีที่ค่อนข้างประหยัดและสะดวกที่สุด

หลักการของการคัดแยกด้วยน้ำหรือของเหลวหนืด สามารถพิจารณาโดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า อนุภาคที่นำมาคัดแยกเป็นอนุภาคทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d และมีความหนาแน่น D_s ให้ตกลงไปในของเหลวหนืดที่มีความหนาแน่น D_f ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกภายใต้การตกแบบอิสระ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงกว่า 50 ไมครอน จะใช้สมการของ Stoke ในการคำนวณความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค ดังสมการที่ (1)

$$v = \frac{g d^2 (D_s - D_f)}{18 \eta} \quad (1)$$

เมื่อ g คือ ความโน้มถ่วงของโลก η คือ ความหนืดของของไหล และ v คือ ความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค

ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 เซนติเมตร จะใช้สมการของ Newton ในการคำนวณความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค ดังสมการที่ (2)

$$v = \frac{3 g d (D_s - D_f)}{D_f} \quad (2)$$

สมการของ Stoke และ Newton สามารถใช้อธิบายเกี่ยวกับการตะกอนของอนุภาคขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอน และใหญ่กว่า 0.5 เซนติเมตร แต่ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 50 ไมครอนถึง 0.5 เซนติเมตร ยังไม่มีทฤษฎีใดมาใช้ในการอธิบายการตกตะกอนที่ขนาดอนุภาคดังกล่าว จึงต้องใช้ผลการทดลองมาใช้อธิบายลักษณะการตกตะกอนดังกล่าว

สมการที่ (1) ซึ่งเป็นสมการของ Stoke สามารถที่จะลดรูปได้ ดังสมการที่ (3)

$$v = \frac{k_1 d^2 (D_s - D_f)}{18 \eta} \quad (3)$$

ส่วนสมการที่ (2) ซึ่งเป็นสมการของ Newton สามารถที่จะลดรูปได้ ดังสมการที่ (4)

$$v = \frac{k_2 (d (D_s - D_f))^{0.5}}{D_f} \quad (4)$$

เมื่อ k_1 และ k_2 คือ ค่าคงที่ และ $(D_s - D_f)$ คือ ค่าความหนาแน่นประสิทธิผล (effective density) ของอนุภาค โดย D_f คือ ความหนาแน่นของของเหลว

จากสมการที่ (3) และ (4) ที่แสดงอยู่ในรูปของความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคในของไหลหนืด ซึ่งมีความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคและความหนาแน่น จะเห็นได้ว่า

1. ถ้าอนุภาคสองชนิดที่มีความหนาแน่นเท่ากัน อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดเล็ก
2. ถ้าอนุภาคสองชนิดที่มีขนาดของอนุภาคเท่ากัน อนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงจะมีความเร็วในการตกตะกอนสูงกว่าอนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำ

เมื่อพิจารณาดินกับสารปนเปื้อนที่มีความหนาแน่น D_a และ D_b และมีขนาดของอนุภาค d_a และ d_b ตามลำดับ สามารถที่จะหาอัตราส่วนของการตะกอนแบบอิสระ (free-settling ratio, d_a/d_b) ได้ดังนี้

$$d_a/d_b = [(D_b - D_f)/(D_a - D_f)]^n \quad (5)$$

เมื่อ $n = 0.5$ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 50 ไมครอน และ $n = 1$ สำหรับอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 เซนติเมตร สำหรับ $n = 0.5-1$ จะใช้สำหรับอนุภาคที่มีระหว่างขนาด 50 ไมครอนถึง 0.5 เซนติเมตร

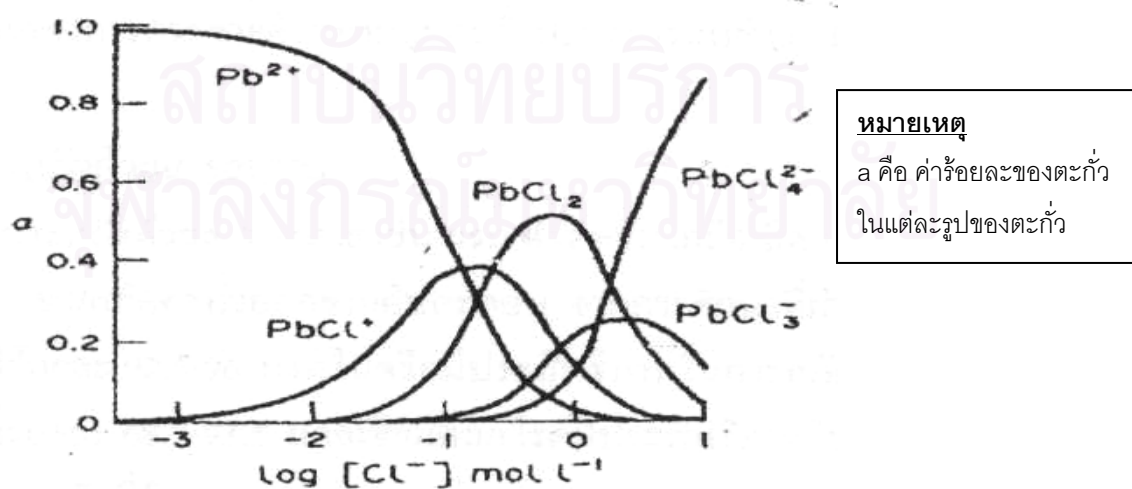
ส่วนการตกตะกอนแบบจมตัวขึ้นอยู่กับปริมาณดินปนเปื้อนที่อยู่ในของเหลว และใช้กฎของ Newton มาใช้คาดคะเนความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค ดังสมการ

$$V = k[d(D_s - D_p)]^{0.5} \quad (6)$$

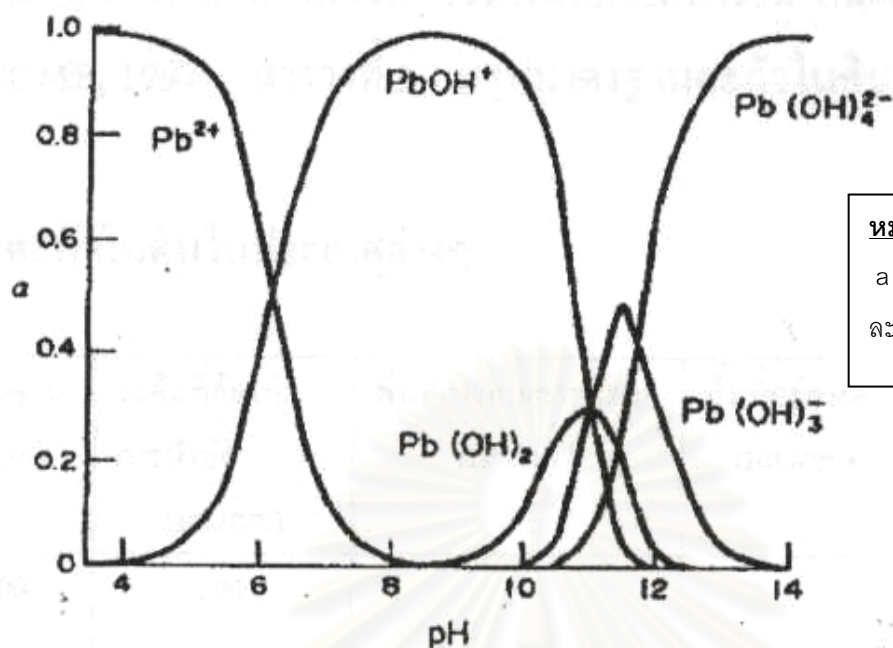
เมื่อ D_p คือ ความหนาแน่นของของผสมระหว่างของแข็งกับน้ำ และมีอัตราส่วนของการตะกอนแบบจมตัว (hinder-settling ratio, d_a/d_b) ดังนี้

$$d_a/d_b = (D_b - D_p)/(D_a - D_p) \quad (7)$$

3.2.2.2 กระบวนการทางเคมี เป็นวิธีการที่ใช้สารเคมีเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำให้แก่สารปนเปื้อน โดยปกติมักใช้ตัวทำละลาย กรด ด่าง และสารคีเลตต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำประปา สารละลายกรดเกลือและสารละลายโซดาไฟเป็นตัวทำละลายตะกั่วออกจากดินตะกอน และเมื่อใช้กรดเกลือหรือมีปริมาณคลอไรด์มากกว่า 0.1 โมล/ลิตร (Fergusson J.E, 1990) ต้องพิจารณาผลของการเกิดสารเชิงซ้อนของตะกั่วกับคลอไรด์ด้วย และส่วนไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการแตกตัวของโซดาไฟ ก็สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับตะกั่วได้เช่นเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่ว (II) เฮไลต์ (Fergusson J.E., 1990)



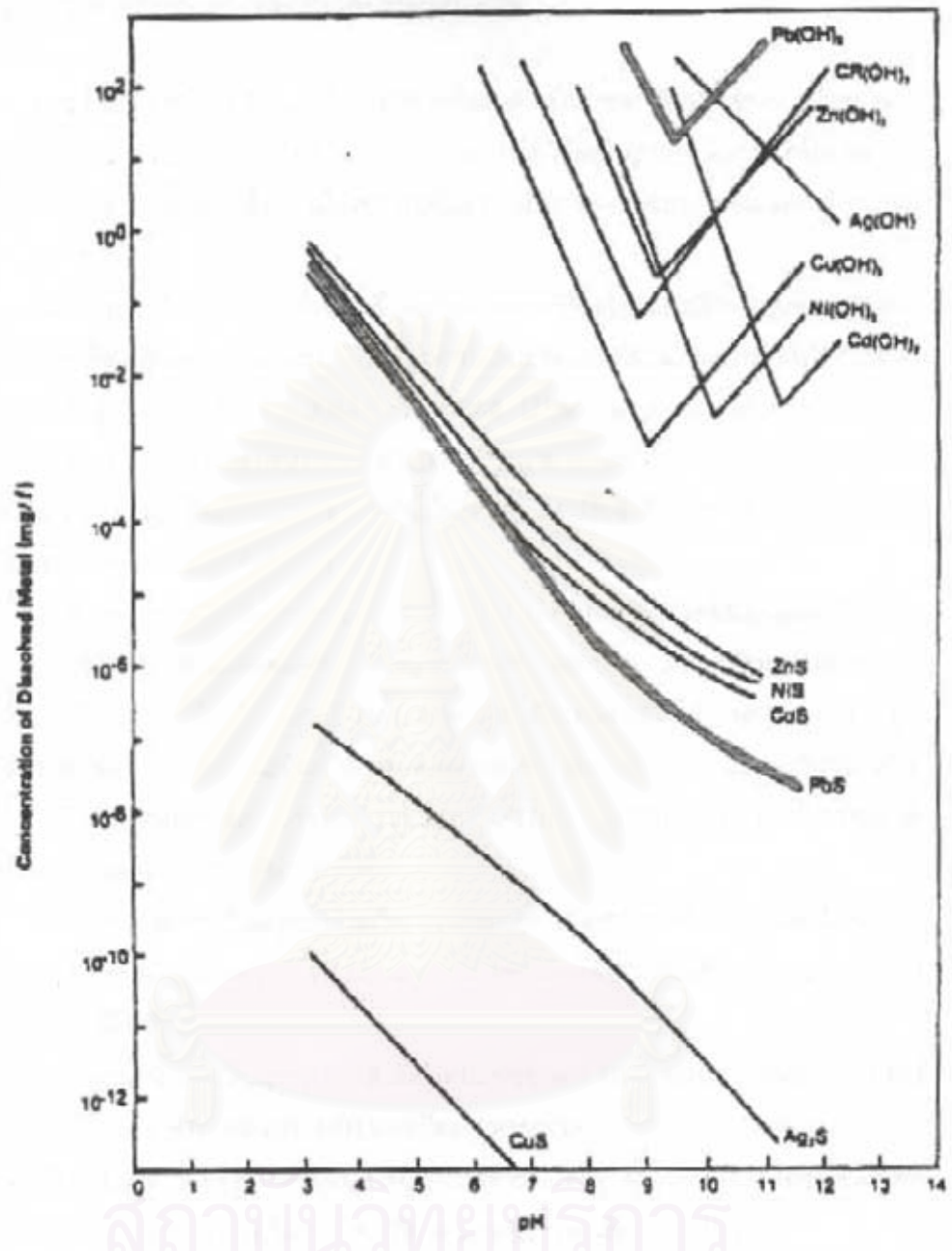
หมายเหตุ

a คือ ค่าร้อยละของตะกั่วในแต่ละรูปของกลุ่มตะกั่วไฮดรอกซี

รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการกระจายตัวของกลุ่มตะกั่ว(II) ไฮดรอกซี (Fergusson J.E., 1990)

3.2.3 การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้ง มีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ และการตกตะกอนทางเคมี สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี เนื่องจากเป็นวิธีที่สะดวกที่สุดและได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย โดยมักทำให้เกิดการตกตะกอนฝนิกในรูปของไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ ซึ่งเป็นรูปที่เสถียรตามธรรมชาติของโลหะ และต้องพิจารณาถึงระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่เหมาะสมในการตกตะกอนฝนิกของโลหะหนักแต่ละชนิดและแต่ละรูปด้วยซึ่งรูปที่ 3.4 แสดงระดับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการตกตะกอนฝนิกไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ของโลหะหนักแต่ละชนิด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.4 ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะหนักที่อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ต่างๆ (Cullinane et al., 1985)

3.3 การทำเสถียร/กักเก็บของเสียโดยใช้ปูนซีเมนต์

การทำเสถียร/กักเก็บของเสียโดยใช้ปูนซีเมนต์ เป็นการอาศัยสภาพความเป็นต่างของซีเมนต์ที่เกิดจากการไฮเดรชัน เป็นตัวตกตะกอนโลหะหนักให้อยู่ในรูปของโลหะหนักไฮดรอกไซด์ และกักไว้ภายในเนื้อก้อนแข็ง เนื่องจากระดับความเป็นกรด-ด่างของเนื้อซีเมนต์อยู่ประมาณ 12.8

ในการทำเสถียร/กักเก็บของเสียโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องรู้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์แต่ละชนิดเพื่อที่จะเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบสำคัญ 4 ชนิด คือ 1.) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3CaO-SiO_2) 2.) ไดแคลเซียมซิลิเกต (2CaO-SiO_2) 3.) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ($3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$) และ 4.) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ($4\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$) โดยส่วนประกอบเหล่านี้มีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ เช่น กำลังรับแรงอัดและเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ เป็นต้น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีขายในท้องตลาดมีด้วยกันทั้งหมด 5 ชนิดซึ่งมีคุณสมบัติต่างกัน คือ 1.) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เป็นปูนซีเมนต์ชนิดธรรมดา 2.) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 2 เป็นประเภทที่มีปริมาณอลูมินาต่ำและสามารถที่จะทนซัลเฟตได้ปานกลาง 3.) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 3 เป็นชนิดที่ทำให้กำลังรับแรงอัดได้สูงในระยะแรก 4.) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 4 เป็นชนิดที่ให้ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ และ 5.) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 5 เป็นชนิดที่สามารถทนซัลเฟตได้สูง

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะทำให้เกิดการไฮเดรชันของสารประกอบซิลิเกต และมีผลดังนี้

1. การก่อตัวของซิลิเกตเจลอยู่โดยรอบของเม็ดอนุภาคของของเสีย อันเกิดจากการละลายของแคลเซียมซิลิเกต
2. ในส่วนของรูพรุนของเม็ดอนุภาคของเสียมีการก่อตัวของผลผลิต (product) ที่หลากหลายอันเกิดจากการไฮเดรชัน ยกตัวอย่างเช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์
3. การเชื่อมประสานกันของเจลที่ห่อหุ้มเม็ดอนุภาคของของเสีย อันเกิดจากเส้นใยของซิลิเกตที่เกิดจากการไฮเดรชันทำให้เกิดการยึดเหนี่ยวอนุภาคของของเสียให้เข้าไว้ด้วยกัน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีการใช้อย่างแพร่หลายในการทำเสถียร/กักเก็บของเสีย โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความสามารถในการรับแรงอัดได้ดี มีอายุการใช้งานที่ดี และสามารถกักเก็บโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อนำของเสียมาผสมกับปูนซีเมนต์ ควรมีสภาพดังต่อไปนี้คือ

1. ความชื้นในของเสียหรือสลัดจ์โดยปกติจะเพียงพอต่อการเกิดไฮเดรชันของปูนซีเมนต์
2. ไม่ควรเกิดปฏิกิริยาระหว่างของเสียกับปูนซีเมนต์ เหมือนกับวัสดุมวลรวมที่ใช้ผสมในคอนกรีต

3. เนื่องจากเนื้อของคอนกรีตมีสภาพความเป็นกรด-ด่างที่สูง คือ ประมาณ 12.8 โลหะหนักที่ละลายอยู่ในก้อนแข็งตกตะกอนผนึกอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ ซีเมนต์เมตริกที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ไปห่อหุ้มโลหะไฮดรอกไซด์ไม่ให้ละลายออกมา อย่างไรก็ตามควรที่จะพิจารณาความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์บางตัวด้วย อย่างเช่น นิกเกิลสังกะสี และตะกั่ว ที่สามารถละลายน้ำได้เพิ่มขึ้นเมื่อระดับความเป็นกรด-ด่างสูงมาก ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่เกิดการไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ

4. สารอินทรีย์ เช่น ดินเหนียว และถ่าน มีผลต่อการก่อตัว และการบ่มก้อนแข็ง

สำหรับการผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำเป็นก้อนแข็ง ไม่จำเป็นต้องมีลักษณะเป็นของเหลวเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่สามารถมีลักษณะคล้ายดิน พลาสติก (อ่อนนุ่ม) จนถึงมีลักษณะเป็นคอนกรีต ขึ้นอยู่กับปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ (Jesse R. Conner and Steve L. Hoeffner, 1998)

3.4 ค่ามาตรฐานของดิน/ดินตะกอน ของเสียอันตราย และการประเมินคุณภาพของเสียอันตรายที่ผ่านการทำเสถียร/ก้อนแข็ง

การที่จะกำจัดตะกั่วออกจากดิน/ดินตะกอน จำเป็นต้องมีค่ามาตรฐานค่าหนึ่งเพื่อกำหนดขอบเขตการกำจัดตะกั่วออกจากดิน/ดินตะกอน ซึ่งค่ามาตรฐานนี้จำเป็นต้องกำหนดโดยหน่วยงานราชการที่รับผิดชอบและต้องมีผลบังคับใช้ทางกฎหมายด้วย ปัจจุบันค่ามาตรฐานการปนเปื้อนโลหะหนักในดิน/ดินตะกอนของประเทศไทยยังไม่มีหน่วยงานราชการใดเป็นผู้กำหนดขึ้น มีเพียงแต่กรมวิชาการเกษตรที่ทำการศึกษาหาระดับโลหะหนักพื้นฐานในพื้นที่การเกษตรของประเทศไทย และตั้งเป็นเกณฑ์พื้นฐานที่แนะนำสำหรับโลหะหนักในดินประเทศไทย เพื่อใช้สำหรับพื้นการเกษตรเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำเกณฑ์มาตรฐานของการปนเปื้อนโลหะหนักของประเทศแคนาดาและประเทศออสเตรเลีย มาใช้เทียบเคียง ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักของดินประเทศไทย
(กรมวิชาการเกษตร, 2542)

ธาตุ	ค่าต่ำสุด(มก./กก.)	ค่าสูงสุด(มก./กก.)	ระดับเกณฑ์มาตรฐาน (มก./กก.)
สารหนู	0.08	124	30
แคดเมียม	0.01	0.29	0.15
โคบอลต์	0.10	113	20
โครเมียม	0.14	295	80
ทองแดง	0.16	350	45
ปรอท	0.01	0.27	0.1
นิกเกิล	0.10	270	45
ตะกั่ว	0.10	550	55
สังกะสี	0.10	140	70

ตารางที่ 3.2 ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักของดินประเทศแคนาดา
(CCME, 1999)

ธาตุ	ลักษณะการใช้พื้นที่			
	การเกษตร (มก./กก.)	ที่อยู่อาศัย/ สวนสาธารณะ (มก./กก.)	การค้า (มก./กก.)	อุตสาหกรรม (มก./กก.)
สารหนู	12	12	12	12
แบเรียม	750	500	2000	2000
แคดเมียม	1.4	10	22	22
โครเมียม (ทั้งหมด)	64	64	87	87
โครเมียม (VI)	0.4	0.4	1.4	1.4
ทองแดง	63	63	91	91
ตะกั่ว	70	140	260	600
นิกเกิล	50	50	50	50
เทลลูเรียม	1	1	1	1
แวนาเดียม	130	130	130	130
สังกะสี	200	200	360	360

ตารางที่ 3.3 ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักของดินประเทศออสเตรเลีย
(NEPC, 2000)

ธาตุ	ลักษณะการใช้พื้นที่			
	ที่อยู่อาศัยที่มีบริเวณ (มก./กก.)	ที่อยู่อาศัยที่ไม่มีบริเวณ (ห้องพักอยู่อาศัย) (มก./กก.)	สวนสาธารณะ/ ที่พักผ่อนหย่อนใจ (มก./กก.)	การค้า/อุตสาหกรรม (มก./กก.)
สารหนู	100	400	200	500
แบริลเรียม	20	80	40	100
แคดเมียม	20	80	40	100
โครเมียม (III)	12%	48%	24%	60%
โครเมียม (VI)	100	400	200	500
โคบอลต์	100	400	200	500
ทองแดง	1000	4000	2000	5000
ตะกั่ว	<u>300</u>	<u>1200</u>	<u>600</u>	<u>1500</u>
แมงกานีส	1500	6000	3000	7500
เมทิล-เมอร์คิวรี	10	40	20	50
ปรอท (สารอินทรีย์)	600	2400	600	3000
สังกะสี	7000	28000	14000	35000

ส่วนค่ามาตรฐานสำหรับของเสียอันตราย ใช้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540 ว่าด้วยการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว โดยอาศัยลักษณะที่ระบุและ/หรือความเข้มข้นของปริมาณโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำสกัด ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ในงานวิจัยนี้เน้นเฉพาะปริมาณตะกั่วที่ละลายอยู่ในน้ำสกัดเท่านั้น

ตารางที่ 3.4 เกณฑ์ความเข้มข้นของน้ำสกัดของเสียที่ถือว่าเป็นของเสียอันตราย (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540))

สาร	ระดับความเข้มข้น(มก./ล.)	สาร	ระดับความเข้มข้น(มก./ล.)
อาร์เซนิก (As)	5.0	<u>ตะกั่ว (Pb)</u>	<u>5.0</u>
แบเรียม (Ba)	0.5	ปรอท (Hg)	0.2
แคดเมียม (Cd)	1.0	ซีลีเนียม (Se)	1.0
โครเมียม (Cr)	5.0	เงิน (Ag)	5.0

3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การตัดแยก และการชะ/สกัดโลหะหนักออกจากดิน

Assink และคณะ(1987) ได้ทำการศึกษาการบำบัดดินที่ปนเปื้อนโลหะหนักในประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งประสบปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักถึงร้อยละ 25-50 ของพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนทั่วประเทศเนเธอร์แลนด์ ในการเก็บดินตัวอย่างเพื่อการศึกษา พวกเขาได้ทำการเก็บตัวอย่างในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนในประเทศเนเธอร์แลนด์จำนวนเก้าแห่ง โดยการสุ่มเก็บตัวอย่างในพื้นที่ที่มีการปนเปื้อนแห่งละ 30 กิโลกรัม จากการศึกษาวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่ปนเปื้อนโลหะหนัก พบว่าดินส่วนใหญ่มีการกระจายตัวของอนุภาคดินที่มีขนาดดิน 60-2,000 ไมครอนอยู่ประมาณร้อยละ 75-92 ของดินทั้งหมด นอกจากนั้นจะเป็นดินที่มีขนาดเล็กกว่า 60 ไมครอน มีระดับความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 4.5-7.9 และมีระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในดินตัวอย่างดังนี้ ทองแดง 3.3-1,730 มก./กก. ตะกั่ว 11-1590 มก./กก. โครเมียม 8-12,400 มก./กก. แคดเมียม 0.1-43 มก./กก. สังกะสี 14-48,00 มก./กก. นิกเกิล 4.2-280 มก./กก. ดีบุก 68-430 มก./กก. อาร์เซนิก 73-205 มก./กก. และปรอท 101-3,500 มก./กก. ในการทดลองนี้พวกเขาใช้กรดเกลือ และกรดไตรอะเซติก (NTA) เป็นสารสกัด และใช้เจ็ตไซซิง (jet-sizing) เป็นเครื่องมือการตัดแยก ในการทดลองสกัดด้วยกรดเกลือจะใช้อัตราส่วนกรดต่อดินที่ 5:1 ระดับความเป็นกรด-ด่างที่หนึ่ง และมีการกวนสารละลายกับดินด้วยชุดเครื่องมือจาร์เทสต์เป็นระยะเวลา 30 นาที ส่วนการสกัดด้วย NTA มีอัตราส่วน NTA ต่อดินที่ 5:1 และมีระยะเวลาการสกัดที่ 1, 6 และ 24 ชม. นอกจากนี้พวกเขายังทำการศึกษาการสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยกรดซึ่งผ่านขั้นตอนการออกซิไดซ์ด้วย H_2O_2 , $KMnO_4$, $NaOCl$ อากาศ และความร้อน การสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยไฮเดียมไฮดรอกไซด์ การสกัดด้วย $NaOCl$ เพื่อให้เกิดการออกซิไดซ์และการเกิดรูปเชิงซ้อนกับอนุมูลอิสระของคลอไรด์ และวิธีการผสมการตัดแยกอย่างเป็ยกกับการสกัดด้วยกรดเกลือ จากผลการทดลองพบว่าความสามารถในการสกัดโลหะหนักออกจากดินด้วยกรดเกลือและ NTA และการตัดแยก แสดงในตารางที่ 3.8 และได้สรุปประสิทธิภาพจากผลการศึกษาที่ดีที่สุดโดยใช้วิธีตัดแยกร่วมกับการสกัดด้วยกรดเกลือพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากดินได้ร้อยละมากกว่าร้อยละ 90 ยกเว้นโครเมียม ปรอทและดีบุก และพวกเขาได้ให้ข้อเสนอแนะว่าวิธีการตัดแยกมีความเหมาะสมกับดินปนเปื้อนที่เป็นดินทราย

จากผลการศึกษาของ Assink และคณะ ทำให้ทราบว่า การตัดแยกมีความเหมาะสมแก่ดินปนเปื้อนที่เป็นดินทราย การสกัดด้วยกรดเกลือมีความเหมาะสมกับโลหะเกือบทุกชนิด และถ้ามีการใช้การตัดแยกร่วมกับการสกัดจะทำให้มีประสิทธิภาพรวมของระบบเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.5 ประสิทธิภาพของการสกัดโลหะหนักด้วยสารละลายและการตัดแยก

ชนิดของโลหะหนัก	ประสิทธิภาพ (ร้อยละ)		
	การสกัดด้วยกรดเกลือ	การสกัดด้วย NTA	การตัดแยกแบบเปียก
โครเมียม	1-20	4-9	88-94
แคดเมียม	65-96	35-96	77-86
ดีบุก	5	5	81
ตะกั่ว	28-93	26-88	51-86
ทองแดง	93	74	55
ปรอท	0	3-14	73-80
สังกะสี	80	43	62
อาร์เซนิก	14-95	3-87	70-97

Twin และคณะ (1987) ได้ทำการศึกษากการสกัดโลหะหนักออกจากดินเหนียว โดยเก็บตัวอย่างดินจากพื้นที่ทั้งหมด 6 แห่ง ซึ่งประสบปัญหาการปนเปื้อนด้วยทองแดง ตะกั่ว สังกะสี โครเมียมและนิกเกิล ในการศึกษาคุณสมบัติดินเบื้องต้นของดินตัวอย่าง พบว่าดินตัวอย่างมีระดับความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 6.8 - 8.0 และมีอนุภาคดินเหนียว (ขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน) ประมาณร้อยละ 29-50 ของปริมาณดินทั้งหมด ในการศึกษาครั้งนี้ พวกเขาใช้กรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.1 M เป็นสารสกัด เวลาที่ใช้สกัดอย่างน้อย 30 นาที ในขณะที่สกัดมีการกวนผสม สกัดที่อุณหภูมิห้อง และใช้อัตราส่วนสารสกัดต่อดินที่ 20:1 ผลการศึกษาพบว่า กรดเกลือมีความเหมาะสมในการสกัดทองแดง ตะกั่วและสังกะสี โดยมีประสิทธิภาพร้อยละ 90-99 กรดเกลือมีประสิทธิภาพในการสกัดนิกเกิลร้อยละ 80-90 แต่โครเมียมพบว่าไม่เหมาะสมที่จะใช้กรดเกลือในการสกัด เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการสกัดที่ค่อนข้างต่ำ คือ ร้อยละ 0-25 ส่วนการทดลองเพื่อแยกดินสะอาดออกจากสารละลายโดยใช้เครื่องมือไฮโดรไซโคลน(วิธีเหวี่ยงแยก)และวิธีการโคแอกกูเลชันโดยใช้ $Al_2(SO_4)_3$ และ $FeCl_3$ พบว่าไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากไม่สามารถแยกดินสะอาดออกจากสารละลาย พวกเขาให้ข้อเสนอแนะว่างานทดลองของพวกเขาสามารถขยายขนาดสเกลได้ โดยการเปลี่ยนจากเครื่องกวนเป็นถังกวนได้เมื่อใช้ในภาคสนาม ส่วนการตัดแยกดินสะอาดนั้นควรหาวิธีที่เหมาะสมต่อไป

จากการศึกษาของ Twin และคณะ ทำให้ทราบว่ากรดเกลือมีความเหมาะสมในการสกัดโลหะหนักเกือบทุกชนิดที่ศึกษา ยกเว้นโครเมียม และวิธีการตัดแยกดินสะอาดออกจากสารละลายด้วยวิธีเหวี่ยงแยกและวิธีโคแอกกูเลชัน ไม่มีความเหมาะสมสำหรับดินเหนียวที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

Hessling และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาการชะล้างดินในพื้นที่ที่ปนเปื้อนตะกั่วในพื้นที่ของโรงงานรีไซเคิลตะกั่ว ในการศึกษาครั้งนี้พวกเขาได้ใช้สารละลายทั้งหมด 3 ชนิด ดังนี้ น้ำประปา น้ำประปาผสมสารลดแรงตึงผิว (0.5 % โดยปริมาตร) และ น้ำประปาผสม EDTA ที่มีความเข้มข้นเป็น 3 เท่าในหน่วยโมลาร์ของปริมาณตะกั่วในดินตัวอย่าง จากผลของการศึกษาพบว่า น้ำประปาไม่สามารถที่จะสกัดตะกั่วออกจากดินที่ปนเปื้อนได้ ส่วนน้ำที่ผสมด้วยสารลดแรงตึงผิว และ EDTA พบว่ามีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงในการสกัดตะกั่วออกจากดินที่ปนเปื้อน แต่การศึกษาของพวกเขาครั้งนี้ไม่ได้ทำการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติเบื้องต้นของดิน และชนิดของตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน ดังนั้นพวกเขาจึงสรุปว่าการประยุกต์การชะล้างดินควรที่จะพิจารณาเป็นแต่ละกรณีไป

จากผลการการศึกษาของ Hessling และคณะ ทำให้ทราบว่าสารลดแรงตึงผิวประเภทแอนไอออนิกและ EDTA มีความเหมาะสมในการใช้เพื่อสกัดตะกั่วออกจากดิน

Elliot และคณะ (1989) ได้ทำการศึกษาการชะล้างดินที่ปนเปื้อนตะกั่วด้วยการทดลองแบบแบทช์ โดยใช้สาร EDTA เป็นสารที่ใช้สกัดตะกั่วออกจากดิน ในการศึกษาครั้งนี้พวกเขาได้ศึกษาผลของระดับความเป็นกรด-ด่าง ระดับความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ตลอดจนความสามารถในการนำไฟฟ้า เนื่องจากสารละลายของตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในดินในบริเวณพื้นที่ศึกษา ว่ามีผลกระทบต่อสกัดตะกั่วออกจากดินที่ปนเปื้อนหรือไม่ จากการทดลองพบว่าดินในพื้นที่ศึกษามีปริมาณโลหะหนักปนเปื้อน ดังนี้ ตะกั่ว 211,300 มก./กก. เหล็ก 66,900 มก./กก. ทองแดง 322 มก./กก. และสังกะสี 655 มก./กก. และพบว่าถ้าเพิ่มความเข้มข้นของ EDTA ในสารละลาย จะทำให้ปริมาณตะกั่วที่สกัดออกมาได้เพิ่มขึ้น ส่วนการที่จะนำตะกั่วกลับมาใหม่อีกครั้งด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้านั้น สมควรที่จะทำในสารละลายที่มีสภาพเป็นกรด (ต่ำกว่า 6) เนื่องจากประจุของตะกั่ว (Pb^{2+}) จะอยู่ในรูปอนุอนุมูลอิสระ แต่ถ้าทำการนำกลับมาใช้ด้วยวิธีการแยกด้วยไฟฟ้านั้นจะกระทำได้อย่างยาก เนื่องจากโลหะเชิงซ้อนของ EDTA จะมีสภาพเสถียรเมื่ออยู่ในระดับความเป็นกรด-ด่างที่ค่อนข้างสูง (มากกว่า 6) รวมทั้งตะกั่วจะอยู่ในรูปโลหะเชิงซ้อนของโพลีไฮดรอกไซด์ ซึ่งยากแก่การแยกด้วยไฟฟ้า

การศึกษาของ Elliot และคณะ พบว่าความเข้มข้นของสารสกัด (EDTA) มีผลต่อความสามารถในการสกัดโลหะหนักออกจากดิน และถ้าต้องการนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่ควรจะทำที่ระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่ำกว่า 6 โดยใช้วิธีการแยกด้วยไฟฟ้า

Allen และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาการล้างดินตะกอนด้วยคอลัมน์ ซึ่งปนเปื้อนด้วย ตะกั่วที่แตกต่าง 10 ชนิด อันได้แก่ โลหะตะกั่ว ดินที่ดูดซับตะกั่ว ตะกั่วคาร์บอเนต ตะกั่วคาร์บอเนตปกติ ตะกั่วซัลเฟต ตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วไดออกไซด์ ตะกั่วออกไซด์ ตะกั่วไดเมทิลไดไฮโอคาร์บาเมต และตะกั่วที่ใช้ผสมสี โดยนำมาผสมให้ดินมีความเข้มข้นตะกั่วประมาณ 5,000 มก./กก. ในส่วนการชะล้างใช้กรดและ EDAT เป็นสารที่ใช้ในการชะล้าง พบว่าที่ระดับความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 มีประสิทธิภาพการชะล้างมากที่สุด โดยมีร้อยละการสกัดเท่ากับ 79-106 สำหรับตะกั่วที่ปนเปื้อน 6 ชนิดดังนี้ คือ ตะกั่วไนเตรทที่ถูกดูดซับโดยดิน ตะกั่วคาร์บอเนต ตะกั่วคาร์บอเนตปกติ ตะกั่วซัลเฟต ตะกั่วออกไซด์ และตะกั่วไดออกไซด์ และมีร้อยละการสกัดเท่ากับ 0-16 สำหรับตะกั่วที่ปนเปื้อน 4 ชนิดที่เหลือ คือ ตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วที่ใช้ผสมสี ตะกั่วไดเมทิลไดไฮโอคาร์บาเมต และโลหะตะกั่ว และยังพบอีกว่าเมื่อเพิ่มจำนวนสัดส่วนโมลาร์ของ EDTA ต่อ ตะกั่ว สามารถเพิ่มความสามารถในการสกัดตะกั่วได้

การศึกษาของ Allen และคณะ ทำให้ทราบว่าชนิดของสารประกอบตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน มีความสำคัญต่อการชะล้างสกัดตะกั่วออกจากดิน

2. การบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนหนักทางเคมีและ/หรือการกรอง

Herbert (1971) ได้กล่าวถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการตกตะกอนหนักตะกั่วในรูปของ ตะกั่วไฮดรอกไซด์ ($Pb(OH)_2$) ว่าต้องใช้สารไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งเป็นประจุลบที่ได้มาจาก โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($NaOH$) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีดังนี้



การตกตะกอนหนัก $Pb(OH)_2$ จะต้องมีความเข้มข้นของสารไฮดรอกไซด์มากเพียงพอ ซึ่งจะมีค่าที่เหมาะสมช่วงหนึ่ง ถ้าความเข้มข้นของสารไฮดรอกไซด์ต่ำเกินไปตะกั่วไฮดรอกไซด์จะไม่เกิด และถ้าความเข้มข้นของสารไฮดรอกไซด์สูงเกินไป ประจุของตะกั่ว (Pb^{2+}) จะเกิดปฏิกิริยากับสารไฮดรอกไซด์เป็นรูปเชิงซ้อนของโพลีไฮดรอกไซด์ (polyhydroxide complex) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ดี และได้เสนอว่าช่วงระดับความเป็นกรด-ด่างที่ 8.5-9.0 เป็นระดับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการกำจัดตะกั่วออกไซด์ (PbO) ออกจากน้ำเสียโดยการทำให้ตกตะกอนหนักเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์

การศึกษาของ Herbert ทำให้ทราบว่าระดับความเป็นกรด-ด่าง ที่อยู่ในช่วง 8.5-9.0 มีความเหมาะสมแก่การตกตะกอนหนักตะกั่วให้อยู่ในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์

Zemansky (1974) ได้ศึกษาการลดลงของปริมาณตะกั่วในน้ำเสียในระหว่างที่ถูกนำมาผ่านกระบวนการบำบัดแบบธรรมดา (conventional treatment) ด้วยวิธีทางเคมี ผลปรากฏว่าเมื่อน้ำเสียผ่านมาถึงขั้นตกตะกอนผงึก จะสามารถลดปริมาณตะกั่วได้ประมาณร้อยละ 50 และเมื่อน้ำเสียผ่านต่อไปยังขั้นตอนของการกรอง ปรากฏว่าสามารถลดปริมาณตะกั่วได้ประมาณร้อยละ 80 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณบรรจุทุกน้ำเสีย (hydraulic loading) ปรากฏว่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจะลดลง

การศึกษาของ Zemansky ทำให้ทราบว่าเมื่อเพิ่มขั้นตอนการกรองหลังจากขั้นตอนการตกตะกอนผงึกจะทำให้ความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำทิ้ง (น้ำที่ออกจากระบบ) มีค่าน้อยกว่าที่ออกจากขั้นตอนการตกตะกอนผงึก

Siradectep (1981) ได้ศึกษาการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ที่มีความเข้มข้นตะกั่วอยู่ในช่วง 98.526-215.306 มก./ล. โดยการใช้ปูนขาวในการปรับระดับความเป็นกรด-ด่างแล้วปล่อยน้ำเสียที่ผ่านการปรับสภาพเข้าสู่ถังกวนช้า เพื่อให้เกิดการฟล็อกคูลเลชัน (flocculation) หลังจากนั้นจึงปล่อยให้เกิดการตกตะกอนผงึกในถังตกตะกอนผงึก ผลการศึกษาพบว่าระดับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม คือ ช่วง 8.5-9.0 สามารถลดปริมาณตะกั่วได้ร้อยละ 98.16-98.64 อย่างไรก็ตาม น้ำที่ผ่านการบำบัดโดยวิธีนี้ยังมีค่าความเข้มข้นของตะกั่วสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม (0.2 มก./ล.) เขาได้เสนอว่าควรใช้การกรองร่วมกับกระบวนการตกตะกอนผงึกทางเคมีในการลดปริมาณตะกั่วในน้ำเสีย

การศึกษาของ Siradectep ทำให้ทราบระดับความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม คือ อยู่ในช่วง 8.5-9.0 ในการโคแอกกูเลชันและประสิทธิภาพของปูนขาว เมื่อใช้เป็นสารโคแอกกูแลนต์ในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียก่อนการกรอง

3. การทำเสถียร/ก้อนแข็งของเสียอันตรายและดินตะกอนที่ปนเปื้อน

Rinehart และคณะ (1994) ได้ทำการศึกษาการทำเสถียร/ก้อนแข็ง (S/S) ดินปนเปื้อนแคดเมียมและตะกั่ว ในการศึกษาครั้งนี้ พวกเขาทำการเก็บดินตัวอย่างจากสถานที่ทั้งหมด 7 แห่งในประเทศสหรัฐฯ และพบว่าดินตัวอย่าง 5 ใน 7 แห่งเป็นดินที่มาจากพื้นที่ของกองทัพสหรัฐฯ จากการศึกษาวิเคราะห์ดินตัวอย่างเบื้องต้น พบว่าดินตัวอย่างเป็นดินเหนียวปนทราย กับดินทราย และจากการทดสอบการชะละลาย (TCLP) พบว่ามีปริมาณแคดเมียมและตะกั่วในน้ำสกัดเท่ากับ 4.6 มก./กก. และ 447.5 มก./กก. ตามลำดับ ในการทดลองทำเป็นก้อนแข็ง พวกเขาแบ่งดินออกเป็น 2 ส่วน โดยดินตัวอย่างส่วนแรกที่เป็นดินเหนียวปนทรายทำเป็นก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ในอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินปนเปื้อนที่ 0.2 โดยน้ำหนัก และดินตัวอย่างอีกส่วนหนึ่งที่

เป็นดินทรายได้ทำเป็นก้อนแข็งโดยใช้ปูนขาวและเถ้าตะกอนเบา และใช้อัตราส่วนปูนขาวต่อดินปนเปื้อนที่ 0.3 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนเถ้าตะกอนเบาต่อดินปนเปื้อนที่ 0.4 โดยน้ำหนัก เมื่อนำวัตถุก้อนแข็งที่ได้ไปทำการทดสอบการชะ (TCLP) พบว่า มีแคดเมียมและตะกั่วอยู่ในน้ำสกัดที่ 0.045 และน้อยกว่า 0.040 มก./ล. ตามลำดับ

จากการศึกษาของ Rinehart และคณะ ทำให้ทราบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนขาวและเถ้าตะกอนเบา มีความเหมาะสมที่นำมาทำก้อนแข็งดินประเภทดินเหนียวและดินทรายที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียมและตะกั่ว

Sanchez และคณะ (1999) ได้ทำการการชะละลายของตะกั่วจากดินและก้อนแข็งของดินที่บำบัดด้วยการทำเสถียร/ก้อนแข็ง โดยดินที่นำมาศึกษานี้เป็นดินที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่ว 49,935 มก./กก. และสังกะสี 2,100 มก./กก. และเป็นดินทรายปนดินเหนียว (Sandy Loam) สำหรับทำเสถียร/ก้อนแข็งดินได้นำดินไปทำการศึกษาที่ Rutgers, Department of Chemical and Biochemical Engineer, The State University Jersey, USA. และที่ LAEPSI, INSA of Lyon, France โดยที่ Rutgers ได้ทำการหล่อก้อนแข็งขนาด 15x20x10 ซม. ใช้สัดส่วนในการผสมที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 24.6 โดยน้ำหนัก น้ำร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก และดินร้อยละ 57.4 โดยน้ำหนัก แล้วทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน โดยใช้พลาสติกคลุมขณะบ่ม หลังจากครบเวลาบ่ม 28 วัน จึงทำการตัดก้อนแข็งเป็นขนาด 4x4x4 ซม. เพื่อนำไปวิเคราะห์ ส่วนที่ INSA ได้ทำการหล่อก้อนแข็งเป็นรูปทรงกระบอกขนาด ϕ 10 ซม. x 10 ซม. ใช้สัดส่วนในการผสมที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 26 โดยน้ำหนัก น้ำร้อยละ 22.2 โดยน้ำหนัก และดินร้อยละ 51.8 โดยน้ำหนัก แล้วทำการบ่มเป็นเวลา 3 เดือน ผลที่ได้พบว่า ตะกั่วที่ละลายออกจากดินมีค่าน้อยที่สุดที่ระดับความเป็นกรด-ต่างอยู่ระหว่าง 7-9 โดยมีความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำสกัดเท่ากับ 0.1 มก./ล. และมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดมากที่สุดที่ระดับความเป็นกรด-ต่างน้อยกว่า 3 โดยมีความเท่ากับ 60,000 มก./ล. โดยขึ้นอยู่กับปริมาณตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในดิน ส่วนการทำเสถียร/ก้อนแข็งพบว่ามีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดน้อยที่สุดเท่ากับ 0.01 มก./ล. ที่ระดับความเป็นกรด-ต่างระหว่าง 9-11 และมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดมากที่สุดที่ระดับความเป็นกรด-ต่างน้อยกว่า 3 โดยมีความเท่ากับ 10,000 มก./ล. โดยขึ้นอยู่กับปริมาณตะกั่วที่อยู่ในของผสม ส่วนสำหรับที่ระดับความเป็นกรด-ต่างที่ 5-8 และมากกว่า 12 พบว่าความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วมีค่าเหมือนกัน สำหรับดินและดินตะกอนที่บำบัดด้วยการทำเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์

บทที่ 4

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

4.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัย เพื่อหาแนวทางการบำบัด/กำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในดินตะกอนที่ห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จ.กาญจนบุรี และได้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการเหมืองแร่ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม ห้องปฏิบัติการปฐพีกลศาสตร์ ห้องปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี และห้องปฏิบัติการวัสดุการทาง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. ดินตะกอน

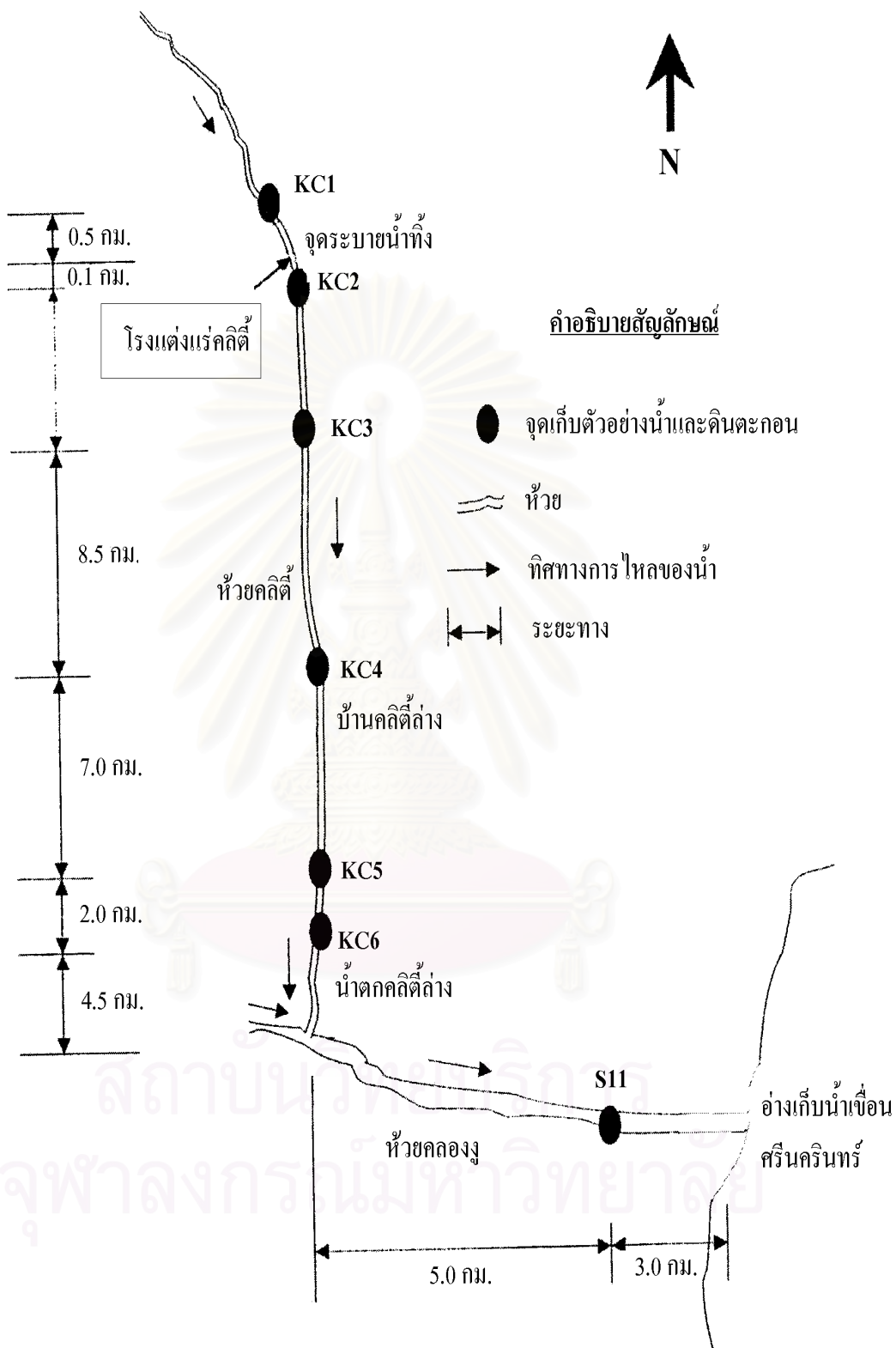
ดินตะกอนที่นำมาวิจัยนี้ เป็นดินตะกอนด้วยตะกั่วจากธรรมชาติและอุตสาหกรรมเหมืองแร่ บริเวณต้นน้ำของห้วยคลิตี้ โดยทำการเก็บตัวอย่างดินตะกอนดังกล่าวจำนวน 2 ครั้ง คือ เมื่อเดือนเมษายน พ.ศ.2542 และเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2543 ที่จุด KC2 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นจุดอ้างอิงในการเก็บดินตะกอนตัวอย่างของกรมควบคุมมลพิษ และทางโรงแต่งแร่คลิตี้ ซึ่งทางโรงแต่งแร่ได้ทำการขุดลอกดินตะกอนบริเวณท้องน้ำขึ้นมากองไว้บริเวณตลิ่งของลำห้วย เป็นจำนวนทั้งสิ้น 500 กิโลกรัมดินเปียก

2. สารเคมีที่ใช้ในการล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน

สารเคมีที่ต้องเป็นสารเคมีที่หาได้ง่ายตามท้องตลาด ในที่นี้ใช้สารเคมี 2 ชนิด ในการล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน คือ กรดเกลือ และโซดาไฟ และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับการใช้น้ำประปาในการชะล้างตะกั่วออกจากดิน

3. สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้ง/น้ำสกัด และตกตะกอนทางเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้ง/น้ำสกัด เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ คือ โซดาไฟ เนื่องจากสามารถหาได้ง่ายตามท้องถิ่นและราคาไม่แพง ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนฟล็อกซ์ไฟด์ของน้ำทิ้ง/น้ำสกัด คือ โซเดียมซัลไฟด์



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งอ้างอิงของจุดเก็บตัวอย่างดินตะกอนและน้ำ จากห้วยคลิตี้
ของทางกรมควบคุมมลพิษ , 2542

4. วัสดุประสาน

วัสดุประสานหรือวัสดุผสมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่ายตามร้านค้าก่อสร้างทั่วไป และง่ายแก่การนำไปใช้ เพื่อทำเสถียรและ/หรือเพิ่มกำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของดินตะกอน ให้เหมาะสมแก่การฝังกลบ

4.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. น้ำกลั่น
2. น้ำประปา
3. กรดเกลือ กรดทั่วไปและกรดห้องปฏิบัติการ
4. กรดไนตริก กรดทั่วไปและกรดห้องปฏิบัติการ
5. การซัลฟูริก กรดห้องปฏิบัติการ
6. โซดาไฟ กรดทั่วไป
7. โซเดียมซัลไฟด์ กรดทั่วไป

4.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ตาชั่งน้ำหนัก ที่มีความละเอียด 1 ตำแหน่งและ 4 ตำแหน่ง
2. เตาอบ (Drying Oven)
3. ชุดตะแกรงร่อนพร้อมอุปกรณ์
4. Watch Glass
5. ชุดเครื่องมือวัดระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย (pH meter)
6. เครื่องกวนแม่เหล็ก หรือ เครื่องเขย่าในแกนราบ
7. โต๊ะเขย่าแบบเปียก (Shaking Table)
8. Hot Plate หรือเครื่องกำเนิดความร้อนที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน
9. ชุดเครื่องมือจาร์เทส (Jar Test)
10. ชุดเครื่องกรองพร้อมปั๊ม
11. กระดาษกรอง Whatman No.41 GF/C GF/F และ $0.45 \mu\text{m}$ ขนาด ϕ 4.7 ซม.
12. เครื่องแก้ว
13. แบบหล่อมอร์ตันขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม.
14. Mold ขนาด $\phi 4'' \times 4.6''$ พร้อม collar สูง 2.5''
15. Rammer ขนาด ϕ 2.0''หนัก 5.5 ปอนด์
16. เครื่องดันวัสดุ (Jack)

17. เกรียงและไม้กระทุ้ง
18. ถาดเหล็กสำหรับผสมวัสดุ หรือวัสดุที่มีคุณสมบัติเทียบเท่า
19. เครื่องวัดกำลังอัดประลัย
20. เครื่องกวนแบบหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 ± 3 รอบ/นาที
21. ชุดเครื่องมือไตเตรท
22. Flame Atomic Absorption Spectrophotometer, FAAS

4.2 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนใหญ่ ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตะกอน
- ขั้นตอนที่ 2 การคัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอน
- ขั้นตอนที่ 3 การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลายต่างๆ อันได้แก่ สารละลายละลายกรดเกลือ สารละลายไฮโดรฟลูออริก และน้ำประปา พร้อมทั้งกำจัดตะกั่วออกจากน้ำทิ้งด้วยการตกตะกอนทางเคมีเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์และ/หรือซัลไฟด์
- ขั้นตอนที่ 4 การทำเสถียร/กักกันแข็งดินตะกอน และกากตะกอนที่ผ่านการล้างสกัด
- ขั้นตอนที่ 5 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น รวมทั้งราคาค่าฝังกลบวัสดุที่เหลือทิ้ง

4.2.1 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตะกอน

สำหรับของเสียที่มีลักษณะเป็นของแข็ง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับดิน (soil-like material) ดังนั้น วิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ จึงต้องใช้วิธีการวิเคราะห์ทางปฐพีกลศาสตร์ทั่วไป ในที่นี้ของเสีย คือ ดินตะกอนที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่ว ซึ่งเป็นดินอยู่แล้ว จึงทำการวิเคราะห์หาสมบัติทางกายภาพอย่างดินปกติได้เลย ส่วนสมบัติทางเคมีเนื่องจากยังไม่มีกระบวนการวิเคราะห์ที่แน่นอนตามกฎหมายของประเทศไทยขณะนี้ ประกอบกับเมื่อพิจารณาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการของภาควิชา ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ที่เห็นว่าเหมาะสมกับเครื่องมือ/อุปกรณ์ที่มีอยู่ในขณะนั้น โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ของพื้นที่ดินปนเปื้อนของประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์ (ANZECC, 1996)

4.2.1.1 สมบัติทางกายภาพของดินตะกอน

1. การกระจายขนาดอนุภาคของดินตะกอน (ASTM D422-98) มีวิธีการดังนี้

- 1) อบดินตะกอนตัวอย่างประมาณ 500 กรัมที่ 105 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม.
- 2) ชั่งตะแกรงหลายๆขนาดที่ใช้ โดยตาชั่งที่มีความละเอียด 1 ตำแหน่ง โดยตะแกรงชุดหนึ่งไม่ควรมีเกิน 7 ใบ ต้องมีตะแกรงเบอร์ 200 อยู่ด้วยทุกครั้ง
- 3) ในกรณีที่ตัวอย่างดินตะกอนเกาะกันเป็นก้อน ให้ทุบให้ดินแยกออกจากกันเป็นเม็ดอิสระด้วยส้อมนียง แต่ต้องระวังอย่างให้แรงมากจนเม็ดดินแตก
- 4) นำตัวอย่างดินตะกอนจากข้อ 1.) ใส่ลงในตะแกรงที่เรียงลำดับจากหยาบไปหาละเอียด โดยมีฝาปิดด้านบนและถาด (Pan) รองด้านล่าง รวมเป็นถาดของตะแกรงนำไปเข้าเครื่องเครื่อง (Sieve Shaker) เขย่าเป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาที
- 5) ชั่งน้ำหนักดินที่ค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงรวมทั้งน้ำหนักของตะแกรง แล้วนำไปคำนวณหา ค่า % F

การคำนวณผล

- 1) ร้อยละของดินที่ค้างบนตะแกรง = $\frac{\text{น.น. ดินในแต่ละตะแกรง}}{\text{น.น. ดินทั้งหมด}} \times 100$
- 2) ร้อยละค้างสะสม = ผลบวกสะสมของร้อยละสะสมของดินที่ค้างบนตะแกรงที่หยาบกว่า
- 3) ร้อยละของดินที่ผ่านตะแกรง (%F) = $100 - \text{ร้อยละค้างสะสม}$
- 4) เขียนกราฟระหว่าง %F กับขนาดอนุภาคดินตะกอน

2. ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) มีวิธีการดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักขวดที่ทราบความจุที่แน่นอน บนตาชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 2) เติมน้ำดินตะกอนให้เต็มขวด ชั่งน้ำหนักบนตาชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 3) คำนวณหาน้ำหนักรวม โดยการนำน้ำหนักที่ได้จากข้อ 2.) ลบออกจากน้ำหนักขวดจากข้อ 1.) แล้วหารด้วยปริมาตรของขวด

3. การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของดินตะกอน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักของขวดวัดความถ่วงจำเพาะ (Pycnometer) ด้วยตาชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 2) เติมน้ำดินตะกอนในขวดวัดความถ่วงจำเพาะ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง

- 3) เติมน้ำลงในขวดวัดความถ่วงจำเพาะ เช็ดขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 4) เทน้ำและดินตะกอนออก จากนั้นเติมน้ำให้เต็มขวด เช็ดขวดให้แห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักด้วยตาชั่งที่มีความละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 5) คำนวณหาความถ่วงจำเพาะ (S.G.) ของดินตะกอน

$$\text{ถ.พ. ของดินตะกอน} = (W_{bo} - W_b) / (W_{bw} - W_b - W_{bow} - W_{bo})$$

เมื่อ W_b = น้ำหนักของขวดวัดความถ่วงจำเพาะ (กรัม)

W_{bo} = น้ำหนักรวมของขวดวัดความถ่วงจำเพาะและดินตะกอน (กรัม)

W_{bow} = น้ำหนักรวมของขวดวัดความถ่วงจำเพาะ ดินตะกอนและน้ำ (กรัม)

W_{bw} = น้ำหนักรวมของขวดวัดความถ่วงจำเพาะและน้ำ (กรัม)

4. การทดลองหาความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอน (Method 103 ของข้อแนะนำสำหรับวิเคราะห์พื้นที่ดินปนเปื้อนประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์) มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักดินตะกอนแห้ง 20.0 ± 0.1 กรัม ใส่ในขวดชมพูหรือปิกเกอร์ขนาด 250 มล.
- 2) เติมน้ำกลั่นจำนวน 100 มล. ลงในขวดชมพูตามข้อ 1.)
- 3) นำขวดชมพูไปตั้งบนเครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมทั้งใส่แท่งกวนแม่เหล็ก หรือนำขวดชมพูไปเขย่าบนเครื่องเขย่าแบบหมุนในแนวราบ
- 4) เปิดเครื่องกวนและเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำไปวัดระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในขณะที่กำลังตกตะกอนอยู่ในขวดด้วยเครื่องวัดระดับความเป็นกรด-ด่าง ถ้าทำการวัดระดับความเป็นกรด-ด่างไม่ทันขณะที่ดินตะกอนกำลังตกตะกอน ให้ทำการกวนหรือเขย่าอีกครั้งโดยใช้เวลาประมาณ 2-3 วินาที เพื่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของดินในน้ำ

สมบัติทางเคมีของดินตะกอน

1. การวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วจากดินตะกอน (Method 201 ของข้อแนะนำสำหรับวิเคราะห์พื้นที่ดินปนเปื้อนประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์) มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ชั่งน้ำหนักดินตะกอนแห้ง 1 ± 0.02 กรัม ใส่ลงในขวดชมพูขนาด 125 หรือ 250 มล.
- 2) เติมน้ำกลั่นลงในขวดชมพูเล็กน้อย เพื่อให้ดินตะกอนขึ้น
- 3) เติมนิโตรเจนไดออกไซด์เข้มข้น 18 มล. และกรดไนตริก 6 มล. ลงในขวดชมพู
- 4) ครอบแผ่นแก้ว (watch glass) ที่ปากขวดชมพู

- 5) นำขูดชมพู่ไปตั้งบนแหล่งกำเนิดความร้อน ต้มให้กรดเดือดอ่อนๆ จนกระทั่งเหลือปริมาตร 5-10 มล. โดยจะต้องมั่นใจว่ากรดที่เหลืออยู่นั้นท่วมดินตะกอน
- 6) ยกขูดชมพู่ออกจากแหล่งความร้อน ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องประมาณ 15 นาที
- 7) ทำซ้ำในข้อ 3.) ถึง ข้อ 6.) หลังจากนั้นเติมน้ำกลั่นประมาณ 20 มล. เพื่อล้างด้านในของขูดชมพู่
- 8) กรองตะกอนด้วยกระดาษกรอง Whatman No.541 หรือกระดาษกรองที่มีคุณภาพที่เท่ากัน แล้วปรับปริมาตรของสารละลายที่ได้ไปที่ 50 มล. ด้วยน้ำกลั่น
- 9) นำสารละลายตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FAAS (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer)

การคำนวณปริมาณโลหะหนัก ใช้สมการดังต่อไปนี้

$$M (\text{ดินตะกอนแห้งในอากาศ}) = (C-B)/W \times 50$$

เมื่อ M = ความเข้มข้นของโลหะหนักในดิน (มก./กก. ดินตะกอนแห้งในอากาศ)

C = ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายที่สกัดได้ (มก./ล.)

B = ความเข้มข้นของโลหะหนักในสารละลายเปรียบเทียบ (มก./ล.)

W = น้ำหนักดินตะกอน (กรัม)

2. วิธีการทดสอบการชะละลาย (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6/2540) มีขั้นตอนดังนี้

- 1) บดดินตะกอนตัวอย่างให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 9.5 มม.
- 2) นำดินตะกอนจากข้อ 1.) จำนวน 100 กรัม ผสมกับน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) เป็นจำนวน 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนักดินตะกอน สำหรับน้ำสกัดหรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ได้จากการผสมระหว่างน้ำกลั่นกับสารละลายระหว่างกรดกำมะถันและกรดไนตริก (สัดส่วน 80:20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายคงที่เท่ากับ 5
- 3) เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 ± 3 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชม.
- 4) กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยกระดาษกรองที่มีขนาดรู 0.6-0.8 ไมครอน นำของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาของโลหะตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer)

4.2.2 การคัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอน

สำหรับการศึกษานี้ ได้ทำการคัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปี้ยก (Shaking Table) โดยอาศัยหลักการของความแตกต่างกันของค่าความถ่วงจำเพาะของตะกอนตะกั่วกับดินตะกอน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการคัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอน ว่ามีสัดส่วนตะกอนตะกั่วและดินตะกอนสะอาดต่อดินตะกอนเป็นจำนวนเท่าใด มีขั้นตอนดังนี้

1. เดินเครื่องโต๊ะเขย่าแบบเปี้ยก (Shaking Table) ตรวจสอบการเคลื่อนที่ของพื้นโต๊ะ ตรวจสอบวัดความยาวช่วงชักโดยการวางกระดาษแข็งแผ่นเรียบบนพื้นโต๊ะเขย่า ใช้ดินสอหรือปากกาวางบนกระดาษ ปากกาหรือดินสอจะมีการเคลื่อนไหวตามจังหวะการทำงานของพื้นโต๊ะ สามารถวัดความยาวของช่วงชักซึ่งจะขึ้นกับการปรับความเร็ว
2. ตรวจสอบวัดความลาดเอียงของพื้นโต๊ะเขย่า เดินเครื่องให้ส่วนประกอบของเครื่องทุกชิ้นส่วนทำงานตามปกติ
3. ทำการทดลองบ่อนดินตะกอนตัวอย่างด้วยอัตราการบ่อน 0.5-1 กก./นาที ทดลองปรับความยาวช่วงชัก ความเร็วของช่วงชัก ความลาดเอียงของโต๊ะ ปริมาณน้ำที่ใช้ ให้ดินตะกอนกระจายทั่วโต๊ะ สังเกตการแยกตัวของตะกอนตะกั่วและดินตะกอนเพื่อที่จะหาจุดที่โต๊ะทำการแยกดินตะกอนที่เหมาะสม
4. บ่อนดินตะกอนในตำแหน่งที่ทำการปรับตั้งในข้อ 3.) ทำการเก็บตะกอนตะกั่วและดินตะกอน นำเอาตะกอนตะกั่วและดินตะกอนที่แยกได้ไปทำการอบแห้งในเตาอบ ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชม.
5. นำตะกอนตะกั่วและดินตะกอนที่อบแห้งจากข้อ 4.) ไปทำการวิเคราะห์การกระจายขนาดคละความหนาแน่นรวม ความถ่วงจำเพาะ และนำไปย่อยสลายด้วยกรดเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS (Flame Atomic Absorption Spectrophotometer)

4.2.3 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารเคมี พร้อมทั้งกำจัดตะกั่วออกน้ำสกัดด้วยการตกนิกตะกอนทางเคมี

การทดลองนี้ เป็นการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม สำหรับการชะล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ด้วยการใช้น้ำสารละลายชนิดต่างๆ อันได้แก่ น้ำประปา สารละลายกรดเกลือ และสารละลายโซดาไฟ มาใช้ในการชะล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน และมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. การหาชนิดของสารละลาย ที่ใช้ในการชะสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ที่เหมาะสม
2. การหาความเข้มข้นของสารละลาย ที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 1.)
3. การหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการล้างดินตะกอน ที่ได้จากข้อ 2.)
4. การหาอัตราส่วนน้ำชะล้างต่อดินตะกอนที่ได้จากข้อ 2.) และเวลาที่เหมาะสม ในการชะล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน
5. การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำสกัด ด้วยการตกตะกอนผิวกะกัวไฮดรอกไซด์และ/หรือตะกัวซิลไฟต์ เพื่อให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม

รายละเอียดของขั้นตอนการทดลอง มีดังนี้

1. การหาชนิดของสารละลายที่เหมาะสมด้วยการชะล้างด้วยน้ำประปา สารละลายกรดเกลือ และสารละลายโซดาไฟ มีวิธีการดังนี้
 - 1) นำดินตะกอนตะกั่วผสมกับน้ำประปา ในอัตราส่วน 1:25 โดยน้ำหนัก ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จนได้ปริมาตร 500 มล.
 - 2) นำบีกเกอร์จากข้อ 1.) ไปทำการชะสกัดด้วยชุดเครื่องกวนแม่เหล็ก เป็นเวลา 30 นาที
 - 3) นำของผสมที่ผ่านการชะสกัดจากข้อ 2.) ไปกรองผ่านกระดาษกรองขนาดรู 0.45 ไมครอน เพื่อแยกดินตะกอนออกจากสารละลาย
 - 4) นำสารละลายที่แยกได้จากข้อ 3.) ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วละลายน้ำ ด้วยวิธีการย่อยสลายวิธีที่ 3005 ของ SW.846/1996 แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS
 - 5) ทำซ้ำในข้อ 1.) ถึงข้อ 4.) โดยการเปลี่ยนสารละลายจากน้ำประปาเป็นสารละลายกรดเกลือและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้น 0.10 M.ตามลำดับ
 - 6) นำผลการวิเคราะห์ตะกั่วละลายน้ำซึ่งถูกชะสกัดด้วยน้ำประปา สารละลายกรดเกลือและโซเดียมไฮดรอกไซด์ มาเปรียบเทียบเพื่อหาสารละลายที่เหมาะสมในการชะสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน

หมายเหตุ ในขั้นตอนนี้มีได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในดินตะกอน แต่จะไปหาปริมาณตะกั่วที่เหลืออยู่ในกากตะกอน หลังจากทราบสภาวะที่เหมาะสมในการชะล้างเมื่อทำการทดลองในหัวข้อที่ 4 เสร็จสิ้น ซึ่งจะทราบว่าสารละลายชนิดใด ความเข้มข้นของสารละลายเท่าใด ความเร็วรอบเท่าใด และอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนใด เหมาะสมที่สุด

2. การหาความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสม มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมชนิดของสารละลายที่เหมาะสม จากผลที่ได้จาก 1. ให้มีความเข้มข้น 0.10 M.
- 2) นำสารละลายเติมในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 500 มล. แล้วจึงเติมดินตะกอนลงไป ในสารละลายที่อยู่ในบีกเกอร์ ในอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก
- 3) ทำการกวนด้วยชุดกวนแม่เหล็ก โดยเริ่มจับเวลานับตั้งแต่เริ่มมีการหมุนของแม่เหล็ก ภายในบีกเกอร์ เมื่อครบ 5 นาที ทำการเก็บตัวอย่างของผสมภายในบีกเกอร์จำนวน 10 มล.
- 4) นำของผสมที่ได้จากข้อ 3.) ไปทำการกรองด้วยกระดาษกรองขนาดรู 0.45 ไมครอน เพื่อแยกสารละลายออกจากดินตะกอน
- 5) นำสารละลายที่แยกได้จากข้อ 4.) จำนวน 5 มล. ไปทำการย่อยสลายวิธีที่ 3005 ของ SW.846/1996 แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS
- 6) ทำซ้ำข้อ 2.) ถึง 5.) โดยการเก็บตัวอย่างของผสมที่ 10 20 30 และ 40 นาที ตามลำดับ
- 7) ทำซ้ำข้อ 1.) ถึง 6.) โดยการเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายไปที่ 0.20N. 0.30N. 0.40N และ 0.60 N.
- 8) นำผลของการล้างตะกั่วออกจากดินที่ได้ไปเขียนกราฟร้อยละการสกัดกับเวลา และพิจารณาจากเส้นกราฟว่า ความเข้มข้นใดเหมาะสมที่นำมาใช้สกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน

3. การหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการล้างดินตะกอน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมสารละลายที่เหมาะสมโดยใช้ความเข้มข้นที่ได้จากข้อ 2.
- 2) นำสารละลายเติมลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 500 มล. แล้วจึงเติมดินตะกอนลงไป ในสารละลายที่อยู่ในบีกเกอร์ ในอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก
- 3) นำบีกเกอร์จากข้อ 2.) ไปทำการสะกัดด้วยเครื่องกวน โดยตั้งความเร็วรอบที่ 100 รอบ/นาที
- 4) เริ่มทำการกวน และจับเวลาการกวนนับจากเปิดเครื่อง เมื่อครบ 5 นาที ทำการเก็บตัวอย่างของผสม จำนวน 10 มล. มาทำการกรองด้วยชุดเครื่องกรอง โดยใช้กระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน
- 5) นำสารละลายที่แยกได้จากข้อ 4.) จำนวน 5 มล. ไปทำการย่อยสลายวิธีที่ 3005 ของ US.EPA SW.846/1996 แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS
- 6) ทำซ้ำข้อ 4.) ถึงข้อ 5.) และทำการเก็บตัวอย่างของผสม ที่ 10 20 30 และ 40 นาที ตามลำดับ

- 7) ทำซ้ำข้อ 1.) ถึงข้อ 6.) โดยเปลี่ยนความเร็วรอบของการกวนไปที่ 250 และ 500 รอบ/นาที่ ตามลำดับ

4. การหาอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอน และเวลาที่ใช้ที่เหมาะสมในการล้างสกัด ตะกั่วออกจากดินตะกอน มีขั้นตอนดังนี้

- 1) เตรียมความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ ตามข้อมูลที่ได้จากข้อ 2.
- 2) นำสารละลายเติมลงในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร จำนวน 500 มล. แล้วจึงเติมดินตะกอนลงไป ในสารละลายที่อยู่ในบีกเกอร์ ในอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก
- 3) นำบีกเกอร์จากข้อ 2.) ที่บรรจุของผสมระหว่างสารละลายและดินตะกอน ไปทำการกวนด้วยเครื่องกวน
- 4) เปิดเครื่องกวน ปรับความเร็วรอบของการกวนไปที่ความเร็วที่ได้จากข้อ 3. จับเวลาการกวน เมื่อครบ 5 นาที ทำการเก็บตัวอย่างของผสม จำนวน 10 มล.
- 5) นำของผสมที่ได้จากข้อ 4.) ไปกรองด้วยชุดกรอง โดยใช้กระดาษกรองขนาดรู 0.45 ไมครอน แล้วจึงนำสารละลายที่กรองได้จำนวน 5 มล. ไปทำการย่อยสลายวิธีที่ 3005 ของ SW.846/1996 แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยเครื่อง FAAS
- 6) ทำการเก็บตัวอย่างของผสม ที่เวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที
- 7) ทำซ้ำข้อ 1) ถึงข้อ 6) โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนไปที่ 50:1, 100:1, 200:1 และ 400:1 ตามลำดับ
- 8) นำผลที่ได้ไปเขียนกราฟร้อยละการสกัดกับเวลา พิจารณาจากเส้นกราฟว่าที่อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนเส้นใด มีความเหมาะสมในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนมากที่สุด

5. การหาความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลืออยู่ในกากตะกอนหลังการชะละลาย และหลังการล้างกากตะกอนด้วยน้ำประปา มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ทำการชะล้างดินตะกอน ด้วยข้อมูลที่ได้จากข้อ 4.
- 2) เมื่อครบระยะเวลาการกวนตามข้อมูลที่ได้จากข้อ 4. นำของผสมที่ได้ไปทำการกรองด้วยกระดาษกรองขนาดรู 0.45 ไมครอน เพื่อแยกกากตะกอนออกจากสารละลาย
- 3) สารละลายที่ได้นำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในสารละลาย ส่วนกากตะกอนที่ได้จากแบ่งเป็น 3 ส่วน ฝั่งลมให้แห้ง

- 3.1) นำกากตะกอนส่วนหนึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วทั้งหมดด้วยวิธีที่ 201 ของข้อแนะนำสำหรับพื้นที่ดินปนเปื้อนประเทศออสเตรเลียและนิวซีแลนด์
- 3.2) นำกากตะกอนอีกส่วนหนึ่งไปทำการวิเคราะห์ว่าการชะละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540
- 3.3) นำกากตะกอนมาผสมกับน้ำประปา ที่อัตราส่วนน้ำประปาต่อกากตะกอน 25:1 โดยน้ำหนัก ทำการกวนด้วยเครื่องกวนที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที และระยะเวลาการกวนนาน 30 นาที หลังจากนั้นทำการกรองของผสมด้วยกระดาษกรองขนาด 0.45 ไมครอน เพื่อแยกกากตะกอนออกจากสารละลาย นำสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วทั้งหมดในสารละลาย พร้อมทั้งทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย

4.2.4 การทำเสถียร/กักกันแข็งดินตะกอนชนิดต่างๆ ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนใหญ่ ดังนี้

1. การหาจุด Optimum Water Content ความหนาแน่นรวมมากที่สุด กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนแต่ละชนิด (ASTM D698-98,2000 และ ASTM D2166-98,2000)

เพื่อที่จะทราบว่า ดินตะกอนแต่ละชนิดมีความต้องการน้ำเท่าใด จึงต้องทำให้ดินตะกอนชนิดนั้นๆ อิ่มตัวด้วยน้ำ และอีกประการหนึ่ง คือ การเตรียมสภาพของดินตะกอนชนิดต่างๆ ที่มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ให้มีลักษณะแน่น ก่อนทำการวัดกำลังรับแรงอัดเพื่อใช้เปรียบเทียบกับดินตะกอนที่ผ่านกระบวนการเสถียร/กักกันแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มีวิธีการดังนี้

 - 1) ตากดินตะกอนตัวอย่างให้แห้ง แล้วนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 จำนวน 3 กก.
 - 2) หาปริมาณความชื้นของตัวอย่างดิน ตาม ASTM D698-98
 - 2.1) ชั่งน้ำหนักแบบสำหรับการบดอัด ($\phi 4 \times 4.6$ ") ด้วยตาชั่งที่มีความละเอียด 1 ตำแหน่ง
 - 2.2) ประมาณปริมาณความชื้นที่เหมาะสม โดยเลือกค่ามา 5 ค่า ให้เริ่มต้นที่ร้อยละ 4 แล้วเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทำการคำนวณหาปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงไปในแต่ละร้อยละความชื้น
 - 2.3) เริ่มต้นที่ความชื้นร้อยละ 4 ทำการผสมน้ำเข้าไปในตัวอย่างดิน คลุกเคล้าให้เข้ากันให้ทั่วจนได้ความชื้นสม่ำเสมอทั้งหมด จากนั้นนำตัวอย่างดินไปใส่ในแบบสำหรับบดอัดดินมาตรฐานที่ได้ทำการประกอบปลอก (Collar) และแผ่นรองเรียบรื้อแล้ว ให้ประมาณปริมาตรของ

ตัวอย่างดินที่ใส่ให้ได้จำนวน 3 ชั้นเท่าๆกัน ชั้นสุดท้ายให้เหลือพื้นที่ส่วนบนของแบบมาตรฐานเล็กน้อย

- 2.1) บดอัดดินแต่ละชั้นๆละ 25 ครั้งด้วย Rammer ขนาด ϕ 2" หน้า 5.5 ปอนด์ การบดอัดต้องให้ได้ความแน่นของดินในแต่ละชั้นสม่ำเสมอเท่ากันตลอด
 - 2.2) ถอดปลอก (Collar) ออกและใช้เหล็กปาด (Straightedge) ปาดตัวอย่างที่ด้านบนของแบบให้เรียบ ถอดแผ่นรองออก จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก โดยอ่านด้วยตาซึ่งที่มีความละเอียด 0.1 กก.
 - 2.3) ดันแท่งตัวอย่างออกจากแบบ แล้วผ่ากลางตามแนวตั้งเก็บตัวอย่างตามแนวฝ้าน้อยอย่างน้อย 100 กรัม เพื่อนำไปหาปริมาณความชื้น
 - 2.4) ทำซ้ำตามข้อ 4.) ถึง ข้อ 7.) โดยเพิ่มปริมาณน้ำจนกระทั่งครบปริมาณความชื้นที่ตั้งไว้ หรือจนกระทั่งน้ำหนักของตัวอย่างดินกับแบบมีน้ำหนักลดลง
 - 2.5) นำค่าปริมาณความชื้นและความหนาแน่นที่ได้ไปเขียนกราฟ เพื่อหาจุดปริมาณน้ำที่เหมาะสม (Optimum Water Content) และความหนาแน่นรวมมากที่สุด
- 3) ทำการเตรียมดินตะกอนตัวอย่างสำหรับทดสอบรับแรงอัด โดยผสมน้ำกับดินตะกอนให้มีปริมาณน้ำใกล้เคียงกับปริมาณน้ำที่เหมาะสม ทำการบดอัดดินตะกอนตามวิธี ASTM D698-98
 - 4) นำดินตะกอนตะกอนพร้อมแบบไปที่เครื่องดิน เพื่อดันก้อนดินตะกอนออกจากแบบ แล้วจึงนำก้อนดินตะกอนที่ได้ไปทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงอัดที่ได้คือ กำลังรับแรงอัดที่ได้จากดินเตรียมสภาพที่จุด OWC (ASTM D2166-98,2000)
 - 5) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนจากดินตะกอน เป็นดินตะกอนสะอาดและกากตะกอนที่ได้จากข้อ 4.2.3
2. การหาอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินตะกอนแต่ละชนิดที่เหมาะสม (ASTM C109-98) มีขั้นตอนดังนี้
- 1) ชั่งดินตะกอนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10 เทียบกับน้ำหนักดินตะกอน
 - 2) ผสมส่วนผสมทั้งหมดด้วยมือให้เข้ากัน เมื่อเข้ากันดีแล้ว กองของผสมที่ผสมกันแล้วเป็นรูปภูเขาและให้มีหลุมตรงกลาง เติมน้ำในหลุมจากด้านข้างลงในภายในหลุมใน

เวลา 30 วินาที โดยน้ำที่ใช้ต้องได้สัดส่วน $w/c = 0.5$ ทิ้งไว้ให้ซีเมนต์ด้วยน้ำ 30 วินาที ผสมด้วยเกรียงให้เข้ากันในเวลา 1 นาที 30 วินาที

- 3) เทส่วนผสมที่ได้ลงในแบบหล่อขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. ให้มีความหนาประมาณ 1 นิ้ว แล้วใช้ Temper กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้ง โดยครั้งแรกมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลัง ให้ใช้แรงกระทุ้งพอประมาณและเท่ากันตลอด
- 4) เทส่วนผสมแบบครั้งที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อยและใช้มือป้องขณะกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก เมื่อเสร็จให้ใช้เกรียงปาดส่วนผสมส่วนที่เกินออกไป
- 5) หลังจากหล่อแบบเสร็จ เก็บไว้ในที่ชื้นเป็นเวลา 48 ชม. เมื่อครบกำหนดจึงถอดแบบออกและบ่มก้อนตัวอย่างโดยใช้ผ้าชุมน้ำคลุมทับจนถึงเวลาทดสอบก้อนตัวอย่างที่ 7 วัน และ 28
- 6) เมื่อครบกำหนดเวลาที่ 7 วันและ 28 วัน นำก้อนตัวอย่างไปทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดบรลล์
- 7) นำเศษก้อนตัวอย่างที่นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดบรลล์ มาย่อยแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มม.
- 8) นำเศษก้อนตัวอย่างที่ผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มม. ไปทำการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540
- 9) ทำซ้ำในข้อ 1) ถึง 8) โดยเปลี่ยนจากดินตะกอนเป็นกากตะกอนที่ได้จากการล้างด้วยสารละลายที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด

4.2.5 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น เป็นการประเมินว่าวิธีการบำบัดวิธีใด มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากว่า บางวิธีการบำบัดสามารถกำจัดตะกั่วออกจากดินตะกอนได้สูงสุด แต่อาจมีข้อจำกัดคือ ค่าก่อสร้างระบบในการจัดการอาจมีราคาสูงที่สุด ในที่นี้ทำการประเมินราคาค่าใช้จ่ายเบื้องต้นของวิธีการบำบัด ดังต่อไปนี้ คือ

1. การฝังกลบโดยตรง
2. การคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก พร้อมทั้งฝังกลบดินตะกอนสะอาด
3. การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน พร้อมทั้งการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น
4. การทำเสถียร/ก้อนแข็งดินตะกอน ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1

บทที่ 5

ผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 ลักษณะสมบัติของดินตะกอน

ดินตะกอนที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นดินตะกอนที่นำมาจากหน่วยคลิตี้ บริเวณท้ายน้ำจากโรง
แต่งแร่คลิตี้ ซึ่งทางโรงแต่งแร่ได้ทำการขุดลอกดินตะกอนจากท้องน้ำและคั่งน้ำ แล้วนำมากองไว้
บริเวณตลิ่ง เพื่อรอการบำบัด/กำจัดด้วยวิธีการที่เหมาะสม

5.1.1 สมบัติทางกายภาพ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของดินตะกอน เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการบำบัด
ทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1 แสดงการกระจายขนาดอนุภาคละเอียดด้วยวิธี
มาตรฐาน ASTM D422

ตารางที่ 5.1 สมบัติทางกายภาพต่างๆของดินตะกอนจากหน่วยคลิตี้

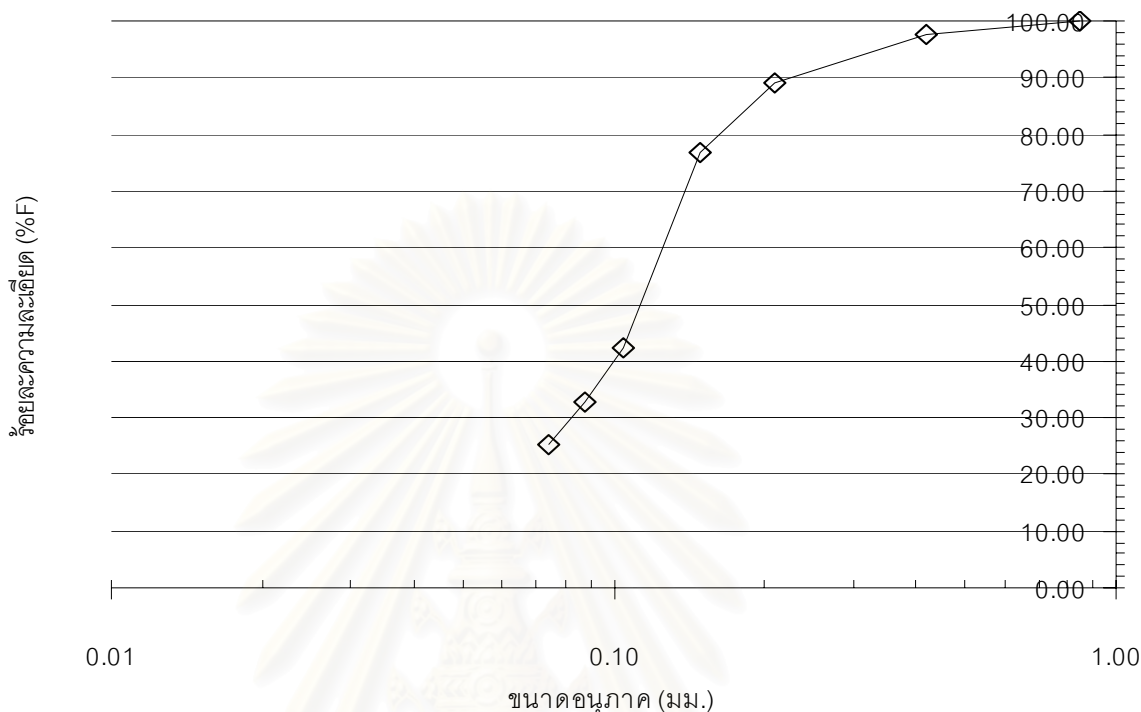
ชนิดของสมบัติทางกายภาพ	ค่า
1. การกระจายขนาดคลละ - อนุภาคเฉลี่ย , D_{50} (มม.) - สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ , Cu	0.12 มม. -
2. ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	1.32
3. ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	3.05
4. ความเป็นกรด-ด่างของดินตะกอน (pH-H ₂ O)	7.79

5.1.2 สมบัติทางเคมี

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินตะกอน เพื่อพิจารณาหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดิน
ตะกอน และจัดกลุ่มของดินตะกอนว่าจัดเป็นของเสียประเภทใด

ผลการวิเคราะห์ พบว่า ดินตะกอนที่นำมาศึกษามีปริมาณตะกั่วทั้งหมดโดยเฉลี่ยเท่ากับ
75.37 ก./กก. มีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดเท่ากับ 2.84 มก./ล. และค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้าย
ของน้ำสกัดเท่ากับ 7.23 จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีที่ระบุในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่
6/2540 แสดงให้เห็นว่าดินตะกอนนี้มีได้จัดเป็นของเสียอันตราย แต่จัดเป็นดินตะกอนที่ปนเปื้อน

ด้วยตะกั่วที่มีปริมาณค่อนข้างสูงกว่าระดับการปนเปื้อนในดินทั่วไปที่ปกติอยู่ในช่วง 0.10 ถึง 550 มก./กก. (กรมวิชาการเกษตร 2542)



รูปที่ 5.1 การกระจายขนาดคละของดินตะกอนจากห้วยคลิตี้

สำหรับการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของตะกั่วในแต่ละช่วงอนุภาคนั้น เพื่อใช้พิจารณาคัดแยกดินตะกอนบางส่วนไปทำการฝังกลบยังพื้นที่เดิม สำหรับดินตะกอนที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์พื้นฐาน คือ มีปริมาณตะกั่วทั้งหมดในดินตะกอนน้อยกว่า 55 มก./กก. และพิจารณาแนวโน้มของการกระจายตัวของตะกั่วในแต่ละช่วง ผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว ได้แสดงในตารางที่ 5.2 พบว่าไม่สามารถทำการคัดแยกดินตะกอนบางส่วนไปฝังกลบยังพื้นที่เดิมได้ หรือนำไปใช้เพื่อการเกษตรได้ เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วในแต่ละช่วงอนุภาคมีค่าสูงเกินกว่าเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ ที่กำหนดไว้ที่ 55 มก./กก. และมีแนวโน้มที่จะมีตะกั่วเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของดินตะกอนมีขนาดเล็กลง

จากข้อมูลข้างต้นสรุปได้ว่า ดินตะกอนจากห้วยคลิตี้จำเป็นต้องทำการบำบัด/กำจัดให้ถูกต้องเหมาะสมตามหลักวิชาการ และไม่สามารถทำการคัดแยกดินตะกอนบางส่วนไปทำการฝังกลบยังพื้นที่เดิมหรือนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านการเกษตรได้ เนื่องจากทุกช่วงอนุภาคของดินตะกอนมีปริมาณตะกั่วสูงเกินกว่าเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ทั้งสิ้น

ตารางที่ 5.2 การกระจายของตะกั่วในแต่ละช่วงอนุภาคของดินตะกอน

ช่วงอนุภาค (มม.)	ปริมาณตะกั่ว (ก./กก. ดินแห้ง)	ร้อยละปริมาณตะกั่ว
+0.420	80.8	5.0
-0.420 + 0.210	84.4	14.0
-0.210 + 0.149	54.1	13.3
-0.149 + 0.105	69.7	22.8
-0.105 + 0.088	54.4	5.2
-0.088 + 0.074	126.4	14.9
-0.074	79.8	25.4

5.2 การคัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอนปนเปื้อน

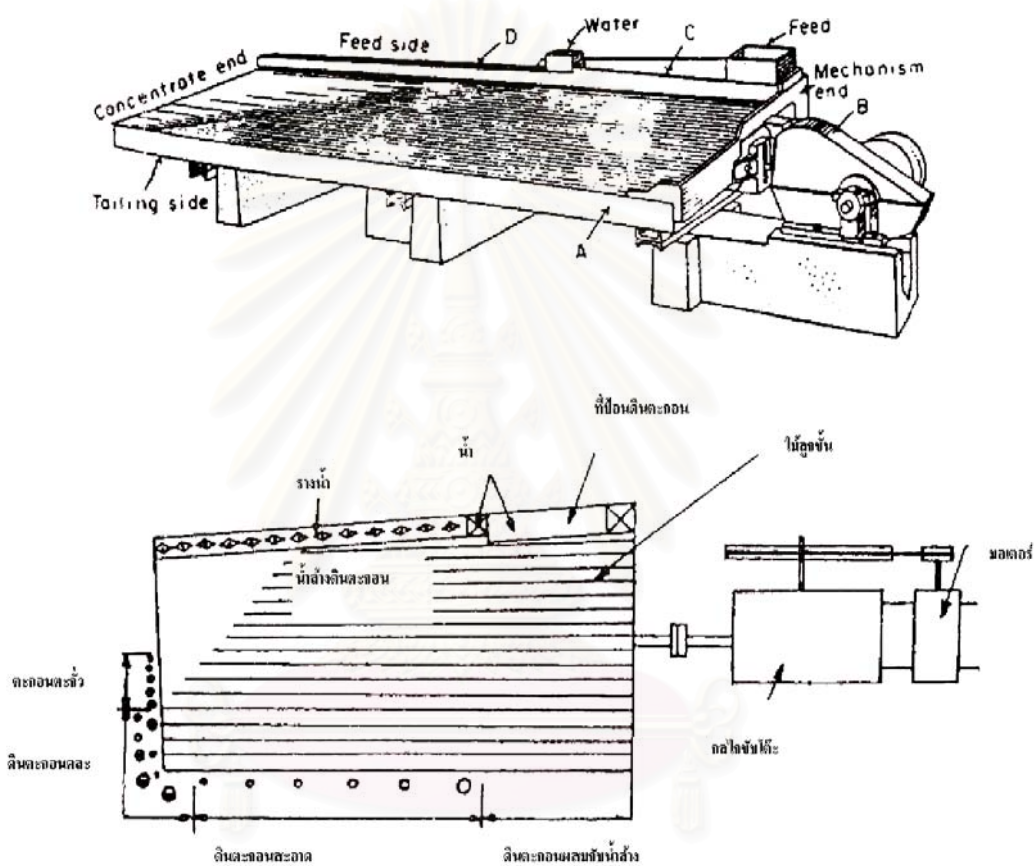
การคัดแยกตะกอนตะกั่วออกจากดินตะกอนปนเปื้อน โดยอาศัยความแตกต่างของความถ่วงจำเพาะ นับเป็นวิธีการที่เก่าแก่ที่สุดวิธีหนึ่งที่ใช้ในหลายวงการอุตสาหกรรม อันได้แก่ อุตสาหกรรมเหมืองแร่ อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ เป็นต้น เนื่องจากเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อนและประหยัด

สำหรับการคัดแยกโดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ 1) สารที่ต้องการคัดแยกต้องเป็นสารที่มีความสามารถละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลาย 2) ขนาดอนุภาคของสารที่นำมาคัดแยกควรมีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.83 ม.ม. ถึง 0.063 ม.ม. และ 3) ค่าพิกัดการแยกต้องไม่น้อยกว่า 1.25

เมื่อนำผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและข้อมูลชนิดของตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินตะกอนของกรมควบคุมมลพิษ พบว่า ดินตะกอนมีความเหมาะสมที่นำมาคัดแยกโดยอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง เพราะ 1) ขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 ม.ม. 2) มีค่าพิกัดการแยกเท่ากับ 3.67 และ 3) ค่าความสามารถในการละลายน้ำของตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินตะกอนเท่ากับ 0.11 มก./ล. โดยคำนวณจากความถ่วงจำเพาะและความสามารถในการละลายน้ำของแร่เซอร์ไซต์ที่ปนเปื้อนอยู่ในดินตะกอน

สำหรับการคัดแยกดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคัดแยกสามารถมีได้ 2 ถึง 3 ส่วน ขึ้นอยู่กับลักษณะการคัดแยกของดินตะกอนบนโต๊ะเขย่าแบบเปียก ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งแสดงตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่คัดแยกได้ อันได้แก่ ตะกอนตะกั่ว ดินตะกอนคละ และดินตะกอนสะอาด สำหรับคำนิยามของผลิตภัณฑ์ที่คัดแยกได้เพื่อให้เห็นความแตกต่างระหว่างดินตะกอนและผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยมีความหมายดังนี้ ตะกอนตะกั่ว คือ ดินตะกอนที่คัด

แยกได้จากโต๊ะเขย่าแบบเปียก ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะและปริมาณตะกั่วสูงกว่าดินตะกอนที่ป้อนสู่โต๊ะเขย่าแบบเปียก ดินตะกอนสะอาด คือ ดินตะกอนที่ตัดแยกได้จากโต๊ะเขย่าแบบเปียก ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะและปริมาณตะกั่วน้อยกว่าดินตะกอนที่ป้อนสู่โต๊ะเขย่าแบบเปียก และสุดท้ายดินตะกอนคละ คือ ดินตะกอนที่ตัดแยกได้จากโต๊ะเขย่าแบบเปียก ซึ่งมีความถ่วงจำเพาะและมีปริมาณตะกั่วอยู่ระหว่างดินตะกอนสะอาดกับตะกอนตะกั่ว



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของผลิตภัณฑ์ที่ตัดแยกได้จากโต๊ะเขย่าแบบเปียก (Wills, 1988)

ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้จากตัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก ต้องทำการอบให้แห้ง แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่วในตะกอนตะกั่วและดินตะกอนสะอาดว่ามีปริมาณเท่าใด แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดที่ได้จากผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด ตามวิธีที่ระบุไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540 เพื่อจำแนกชนิดของของเสีย โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3 ซึ่งทำการทดลองชุดละ 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 5.3 สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่คัดแยกได้จากดินตะกอน

	ดินตะกอน	ตะกอนตะกั่ว	ดินตะกอนสะอาด	ค่ามาตรฐาน
ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (ก./กก. ดินแห้ง)	75	107	46	0.055 ¹
ค่าความเป็นกรด-ด่างของผลิตภัณฑ์ (pH-H ₂ O)	7.79	8.22	7.97	-
ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัด (มก./ล.)	2.84	3.16	2.71	5.0 ²
ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด	7.23	7.65	8.00	-
ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	1.32	1.58	1.12	-
ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	3.05	3.32	2.74	-
ร้อยละการเก็บได้ของตะกั่ว ³	-	67.51	32.49	-
ร้อยละของปริมาณที่คัดแยกได้ ⁴	-	47.33	52.67	-
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (มม.)	0.12	0.12	0.12	-
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ (Cu)	-	-	-	-

หมายเหตุ

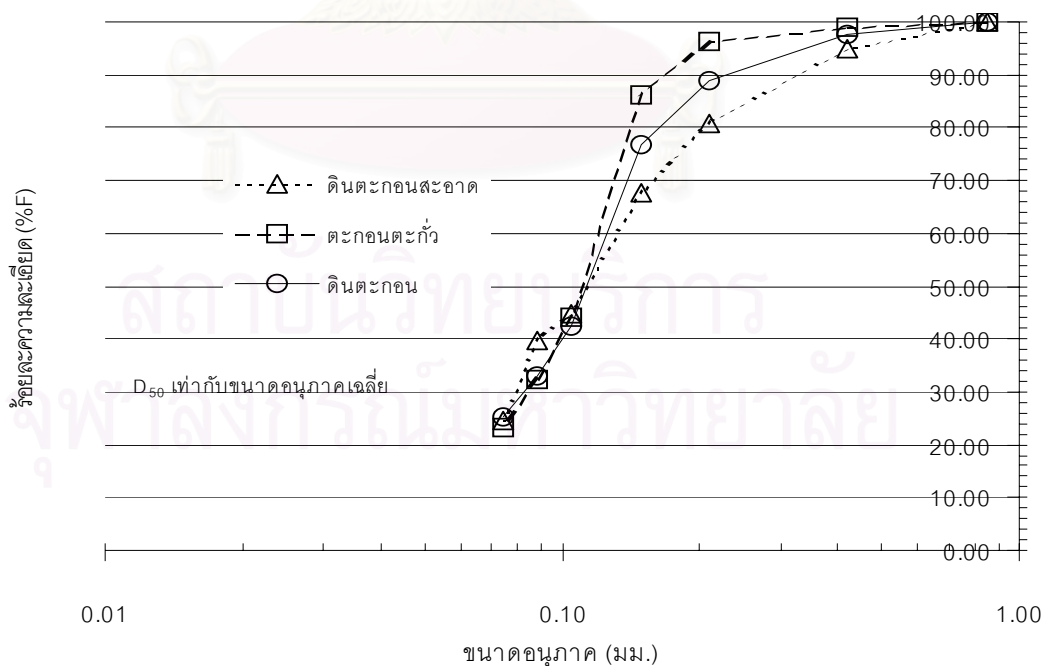
¹ ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย กรมวิชาการเกษตร

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 2542

² ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540

³ คำนวณจากผลคูณของน้ำหนักกับปริมาณตะกั่วในผลิตภัณฑ์หารด้วยผลคูณของน้ำหนักปริมาณตะกั่วของดินตะกอนที่ป้อน

⁴ คำนวณจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่คัดแยกได้จากโต๊ะเขย่าแบบเปียก เทียบกับน้ำหนักดินตะกอนที่ป้อน



รูปที่ 5.3 การกระจายขนาดอนุภาคของตะกอนตะกั่ว และดินตะกอนสะอาด ที่ได้จากการคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก เทียบกับการกระจายขนาดอนุภาคของดินตะกอน

จากข้อมูลในตารางที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่า ผลผลิตกัณฑ์ที่ได้จากการตัดแยกดินตะกอนด้วยไ้ตะเขย่าแบบเปียกมีด้วยกัน 2 ส่วน คือ ตะกอนตะกั่วและดินตะกอนสะอาด และเมื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วและความถ่วงจำเพาะของผลผลิตกัณฑ์ พบว่า ตะกอนตะกั่วมีปริมาณตะกั่วและความถ่วงจำเพาะเพิ่ม โดยมีปริมาณตะกั่วเพิ่มจาก 75 ก./กก. เป็น 107 ก./กก. หรือมีปริมาณตะกั่วเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 42.63 และความถ่วงจำเพาะมีค่าเพิ่มจาก 3.05 ตัน/ลบ.ม. เป็น 3.32 ตัน/ลบ.ม. ส่วนดินตะกอนสะอาดนั้นมีปริมาณตะกั่วและความถ่วงจำเพาะลดลง โดยมีปริมาณตะกั่วลดลงจาก 75 ก./กก. เป็น 42 ก./กก. หรือมีปริมาณตะกั่วลดลงถึงร้อยละ 38.66 และความถ่วงจำเพาะมีค่าลดลงจาก 3.05 ตัน/ลบ.ม. เป็น 2.74 ตัน/ลบ.ม.

สำหรับดินตะกอนสะอาด ที่คาดว่าเมื่อทำการคัดแยกแล้วจะมีปริมาณตะกั่วอยู่ในเกณฑ์พื้นฐานของโลหะหนักที่ยอมรับได้ในดินของประเทศไทย (กรมวิชาการเกษตร 2542) นั้น กลับยังมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดสูงกว่าเกณฑ์ดังกล่าว และมีไซของเสียอันตราย เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดน้อยกว่ามาตรฐานของเสียอันตรายที่กำหนดไว้ที่ 5 มก./ล. จึงจัดเป็นเพียงดินตะกอนปนเปื้อนด้วยตะกั่วเท่านั้น ส่วนตะกอนตะกั่วที่คัดแยกได้จากไ้ตะเขย่าแบบเปียก ก็จัดเป็นเพียงดินตะกอนปนเปื้อนด้วยเช่นกัน เพราะมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของเสียอันตราย

อีกประการหนึ่ง น้ำที่ใช้ในการคัดแยกดินตะกอนบนไ้ตะเขย่าแบบเปียกจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำด้วย เพื่อวิเคราะห์ว่ามีตะกอนตะกั่วบางส่วนได้ปะปนไปกับน้ำทิ้งหรือไม่ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ได้จากการคัดแยกตั้งไว้ในที่สงบปราศจากการรบกวน และทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวันเป็นเวลาต่อเนื่อง 14 วัน สำหรับน้ำตัวอย่างที่ทำการเก็บในแต่ละวัน ต้องนำมาทำการย่อยสลายตามวิธีมาตรฐาน US.EPA SW-846 Method 3050b โดยไม่มีการกรองน้ำตัวอย่างก่อนการย่อยสลาย สำหรับการย่อยสลายด้วยวิธีดังกล่าวก่อนการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่ว ก็เพื่อที่จะให้ตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด แล้วจึงทำการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยวิธีมาตรฐาน US.EPA SW-846 Method 7421 ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.4 พบว่า มีตะกั่วปนเปื้อนปะปนอยู่กับน้ำในระยะเวลา 5 วันแรก และมีปริมาณตะกั่วลดลงเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่สามารถตรวจวัดได้หลังจากวันที่ 5 ไปแล้ว โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างคงที่ประมาณ 7.8 สำหรับชุดการทดลองหาปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำแต่ละวัน จะทำการทดลอง 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชุดการทดลอง โดยใช้น้ำตัวอย่างๆละ 100 มล.

ตารางที่ 5.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำที่ใช้ในการตัดแยก และปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำ
ที่ใช้ในการตัดแยกดินตะกอน

วันที่	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (มก./ล.)	
	ค่าที่ได้	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ได้	ค่ามาตรฐาน
1	7.83	5.5-9.0	3.02	0.20
2	7.77	5.5-9.0	2.69	0.20
3	7.80	5.5-9.0	1.79	0.20
4	7.83	5.5-9.0	1.21	0.20
5	7.82	5.5-9.0	0.60	0.20
6	7.82	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
7	7.87	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
8	7.78	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
9	7.77	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
10	7.80	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
11	7.78	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
12	7.82	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
13	7.66	5.5-9.0	Not Detectable	0.20
14	7.82	5.5-9.0	Not Detectable	0.20

หมายเหตุ ค่ามาตรฐาน เป็นค่าที่ระบุในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2/2539

ดังนั้นการบำบัดน้ำที่ผ่านการตัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก สามารถทำได้โดยการปล่อยลงสู่ภาชนะกักเก็บหรือสร้างบ่อสำหรับเก็บกักน้ำที่ผ่านการใช้จากการตัดแยก และให้มีการตกตะกอนเองตามธรรมชาติ ก็เพียงพอสำหรับการจัดการกับตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำ แต่ต้องมีระยะเวลาการเก็บกักไม่น้อยกว่า 5 วัน และน้ำที่ได้หลังจากการกักเก็บเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 5 วันนั้น สามารถที่จะนำกลับมาใช้เพื่อตัดแยกดินตะกอนครั้งต่อไปได้อีก หรือปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

สำหรับการจัดการกับผลิตภัณฑ์ที่ตัดแยกได้จากโต๊ะเขย่าแบบเปียก อันได้แก่ ตะกอนตะกั่ว และดินตะกอนสะอาดนั้น เนื่องจากตะกอนตะกั่วมีปริมาณตะกั่วใกล้เคียงกับปริมาณตะกั่วในสินแร่ที่ป้อนสู่กระบวนการลอยแร่ เพื่อผลิตหัวแร่ตะกั่วคาร์บอนเนต ซึ่งโดยปกติสินแร่ที่ป้อนสู่กระบวนการลอยแร่จะมีปริมาณตะกั่วประมาณร้อยละ 15-25 โดยน้ำหนัก ส่วนตะกอนตะกั่วที่ตัดแยกได้มีค่าปริมาณตะกั่วประมาณร้อยละ 10.7 (107 ก./กก.) จึงควรที่จะนำไปผสมกับสินแร่ที่จะป้อนสู่กระบวนการผลิตหัวแร่ของโรงแต่งแร่คลิตี้ได้ ซึ่งเป็นการใช้ของเสียให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นจึงเหลือเพียงดินตะกอนสะอาดที่ต้องกำจัด ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 52.7 ของ

ปริมาณดินตะกอนทั้งหมด ด้วยวิธีการฝังกลบในพื้นที่ควบคุม เนื่องจาก 1) มีปริมาณตะกั่วเกินเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้ เช่น การถมที่และการเพาะปลูก 2) ต้องการควบคุมการแพร่กระจายของดินตะกอนออกสู่สิ่งแวดล้อม ให้อยู่ในพื้นที่จำกัด

เนื่องจากว่า ดินตะกอนสะอาดที่คัดแยกได้จากดินตะกอนยังมีปริมาณตะกั่วที่ค่อนข้างสูง จึงน่าที่จะทำการคัดแยกแยกซ้ำได้อีก โดยพบว่า เมื่อทำการคัดแยกซ้ำสามารถที่ลดปริมาณตะกั่วทั้งหมดในส่วนของดินตะกอนสะอาดที่คัดแยกซ้ำได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น คือ มีปริมาณตะกั่วทั้งหมดลดลงเพียง 2.5 ก./กก.เท่านั้น และมีร้อยละปริมาณที่คัดแยกได้ในส่วนของดินตะกอนสะอาดที่สูงมาก คือ มีถึงร้อยละ 89.22 ส่วนตะกอนตะกั่วที่ได้จากการคัดแยกซ้ำมีเนื่องจากมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณตะกั่วที่ป้อนสู่กระบวนการลอยแร่เพื่อผลิตหัวแร่ตะกั่วคาร์บอนเตนนั้น ซึ่งมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 ดังนั้นตะกอนตะกั่วที่ได้จากการคัดแยกซ้ำนี้ ถึงแม้ว่าจะคัดแยกให้มีปริมาณตะกั่วในส่วนของตะกอนตะกั่วสูงขึ้นก็ตาม แต่ก็ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์อันใดได้เลย นอกจากการฝังกลบในพื้นที่ควบคุม เช่นเดียวกับดินตะกอนสะอาด และดินตะกอนสะอาดที่ได้จากการคัดแยกซ้ำ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ดินตะกอนสะอาดนั้นไม่มีความเหมาะสมที่จะทำการคัดแยกซ้ำ อันจะมีแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.5 คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคัดแยกดินตะกอนสะอาด

	ดินตะกอน (ดินตะกอน สะอาด)	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคัดแยก		ค่ามาตรฐาน
		ตะกอนตะกั่ว	ดินตะกอนสะอาด	
ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (ก./กก. ดินแห้ง)	46.2	66.9	43.7	0.055 ¹
ค่าความเป็นกรด-ด่างของผลิตภัณฑ์ (pH-H ₂ O)	7.97	8.33	8.08	-
ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัด (ม.ก./ล.)	2.71	2.71	2.07	5.0 ²
ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด	8.00	7.30	7.29	-
ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	1.12	1.80	1.17	-
ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	2.74	3.62	2.53	-
ร้อยละการเก็บได้ของตะกั่ว ³	-	15.65	84.35	-
ร้อยละของปริมาณที่คัดแยกได้ ⁴	-	10.78	89.22	-

หมายเหตุ

¹ ระดับเกณฑ์พื้นฐานของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ 2542

² ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540

³ คำนวณจากผลคูณของน้ำหนักกับปริมาณตะกั่วในผลิตภัณฑ์หารด้วยผลคูณของน้ำหนักปริมาณตะกั่วของดินตะกอนที่ป้อน

⁴ คำนวณจากน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่คัดแยกได้จากโต๊ะเขย่าแบบเปียก เทียบกับน้ำหนักดินตะกอนที่ป้อน

สรุปได้ว่า การคัดแยกดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียกมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการบำบัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ถึงแม้ว่าไม่สามารถที่จะลดปริมาณตะกั่วทั้งหมดให้อยู่ในเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ ที่กำหนดปริมาณตะกั่วทั้งหมดไว้ไม่เกิน 55 มก./กก. แต่ก็สามารถคัดแยกดินตะกอนส่วนหนึ่งมาใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 47.3 ของปริมาณดินตะกอนทั้งหมด 15,000 ตัน โดยการนำเอาตะกอนตะกั่วที่คัดแยกได้ไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตหัวแร่ตะกั่วคาร์บอนเนต อันเป็นการเพิ่มมูลค่าแก่ของเสียและเป็นการกำจัดตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินตะกอนส่วนหนึ่งจากพื้นที่อย่างถาวร ส่วนดินตะกอนที่เหลือซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเช่น ตะกอนตะกั่วที่คัดแยกได้ เมื่อพิจารณาชนิดของเสียด้วยวิธีการชะละลายและปริมาณตะกั่วทั้งหมด พบว่า มีใช้จัดเป็นของเสียอันตราย แต่เป็นเพียงดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่ว เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดต่ำกว่าค่ามาตรฐานของเสียอันตรายที่กำหนดไว้ที่ 5 มก./ล. และมีค่าปริมาณตะกั่วทั้งหมดเกินกว่าปริมาณตะกั่วที่ระบุไว้ในเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ จึงต้องทำการฝังกลบโดยตรงยังพื้นที่ควบคุม เพื่อป้องกันมิให้เกิดการแพร่กระจายของตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อีก และเป็นการกำจัดพื้นที่การปนเปื้อนตะกั่ว ทำให้ง่ายแก่การควบคุม ดูแล และตรวจสอบ ของเจ้าหน้าที่หรือผู้มีหน้าที่รับผิดชอบ

5.3 การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน การกำจัดน้ำทิ้ง และการจัดการกับกากตะกอนที่เหลือจากการล้างสกัด

5.3.1 การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน

การล้างสกัดเป็นวิธีหนึ่งในการกำจัดโลหะหนักหรือสารอินทรีย์ที่เป็นอันตรายออกจากดินตะกอน ซึ่งวิธีนี้โดยปกติอาจใช้น้ำ สารลดแรงตึงผิว สารออกซิไดซ์ สารรีดิวซิงค์ สารละลายกรด หรือสารละลายด่าง แล้วแต่ความเหมาะสมของการกำจัดสารมลพิษแต่ละชนิดออกจากดินตะกอน ซึ่งในการศึกษานี้สารมลพิษที่กล่าวคือตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในดินตะกอน เพื่อให้ตะกั่วที่ละลายออกมาจากดินตะกอน และนำสารละลายที่ปนเปื้อนตะกั่วและตะกอนที่สะอาดแล้วไปตกตะกอนแยกออกจากกัน

สำหรับการทดลองขั้นตอนนี้ในแต่ละชุดการทดลอง ใช้ปริมาณสารละลายในการชะล้าง/สกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน จำนวน 500 มล. ต่อตัวอย่าง และทำการทดลองซ้ำ 3 ตัวอย่างต่อ 1 ชุดการทดลอง

ในการล้างสกัดแม้มีค่าออกจากสินแร่ด้วยวิธีการล้างสกัดด้วยสารละลายนั้น โดยปกติมักนิยมใช้สารละลายกรดหรือด่างมาใช้ในการล้างสกัด เนื่องจากแร่มีค่าในสินแร่มักจะเป็น

สารประกอบที่อยู่ในสภาพเสถียรตามธรรมชาติ และเป็นสารที่สามารถละลายได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ หรือสูงๆ ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้สารละลายกรดเกลือและสารละลายโซดาไฟ มาเป็นตัวแทนของสารละลายกรดและด่าง มาศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนเปรียบเทียบกับ การล้างสกัดด้วยน้ำประปา ซึ่งเป็นขั้นตอนของการเลือกชนิดของสารละลายที่จะนำมาใช้ในการล้างสกัดนี้หรือกล่าวได้ว่าเป็นขั้นตอนแรกของการหาสภาวะที่เหมาะสมในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน สำหรับในการศึกษาขั้นตอนนี้ใช้น้ำประปา สารละลายกรดเกลือและสารละลายโซดาไฟที่มีความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร เวลาการล้างสกัดเท่ากับ 30 นาที และอัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก พบว่าสารละลายกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร มีความเหมาะสมในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนได้ดีกว่าสารละลายโซดาไฟที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมล/ลิตร เมื่อเทียบกับการล้างสกัดด้วยน้ำประปา ดังแสดงในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลายชนิดต่างๆ

ชนิดสารละลาย	อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอน (Liquid/Solid= L/S)	เวลา (นาที)	ปริมาณตะกั่วที่อยู่ในสารละลาย (มก./ล.)	ค่าความเป็นกรด-ด่างขณะทำการล้างสกัด
น้ำประปา	25:1	30	6.56	7.54
HCl 0.1 โมล/ลิตร	25:1	30	546.67	1.06
NaOH 0.1 โมล/ลิตร	25:1	30	8.89	12.38

สำหรับเหตุที่ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก เป็นเพราะที่อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ระดับนี้จะไม่มีผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มข้นของสารสกัดต่อปริมาณสิ่งที่ต้องการสกัด เนื่องจากมีปริมาณของสารสกัดที่มากเกินไปต่อสิ่งที่ต้องการสกัด และอีกประการหนึ่งคือต้องการรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของของผสม (ดินตะกอนและสารละลาย) ให้คงที่ตลอดการล้างสกัด

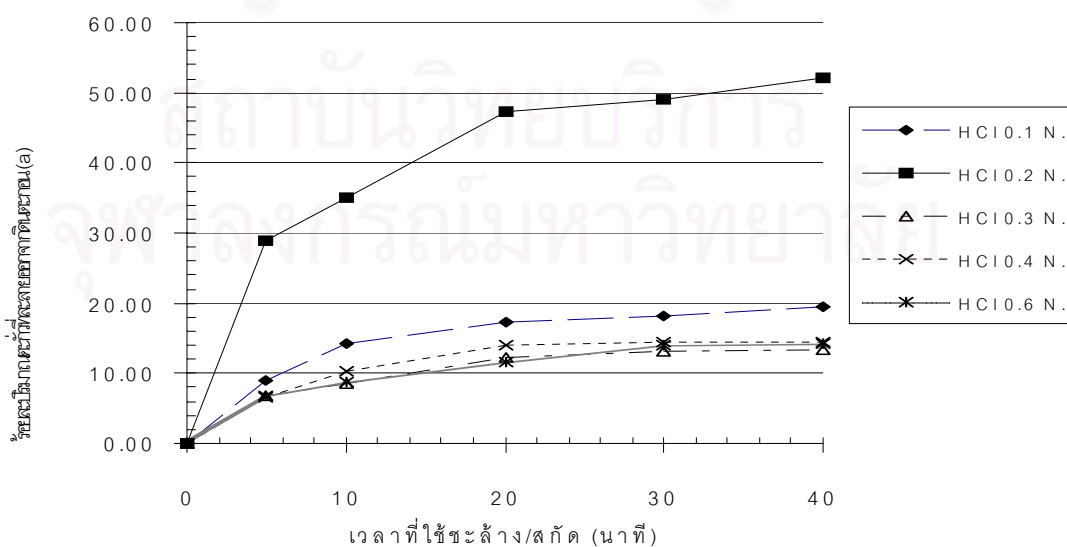
ในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลายโซดาไฟ ซึ่งมีระดับค่าความเป็นกรด-ด่างคงที่ตลอดการล้างสกัดเท่ากับ 12.38 นั้น ไม่มีการตกตะกอนของตะกั่วไฮดรอกไซด์ เนื่องจากที่ระดับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเกิน 12 จะไม่มีตะกั่วไฮดรอกไซด์ในรูป $Pb(OH)_2$ อยู่ในสารละลายจากผลของค่าเป็นกรด-ด่างของสารละลาย จึงไม่สามารถเกิดการตกตะกอนของตะกั่วไฮดรอกไซด์ในของผสมได้ (Fergusson J.E., 1990) แต่การที่ตะกั่วละลายออกมาจากดินตะกอนได้น้อยที่สภาวะความเป็นด่างสูงๆ จากการใส่สารละลายโซดาไฟที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.1 โมล/ลิตร เป็นสารสกัด เป็นเพราะเวลาที่ใช้ในการล้างสกัดสั้นเกินไปและอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ของตะกั่วที่อยู่ในดินตะกอนกับโซดาไฟเพื่อเปลี่ยนรูปของตะกั่วให้อยู่ในรูปตะกั่วไฮดรอกซีซึ่งละลายน้ำได้ดีนั้นดำเนินไปค่อนข้างช้า เมื่อเปรียบเทียบกับ การสกัดด้วยสารละลายกรดเกลือ จึงดูเหมือนว่าสารละลายโซดาไฟละลายตะกั่วออกจากดินตะกอนได้น้อย

เมื่อทราบว่าสารละลายกรดเกลือมีความเหมาะสมที่สุดในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนแล้ว ขั้นตอนต่อไปในการศึกษา คือ การหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดเกลือในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน เพื่อให้เหมาะสมและประหยัดที่สุด โดยทำการเลือกหาค่าความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือ ที่ความเข้มข้นที่ระหว่าง 0.1 โมล/ลิตร จนถึง 0.6 โมล/ลิตร แต่ยังคงใช้สภาวะการล้างสกัดเหมือนเดิม คือ อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 และใช้ความเร็วรอบในการกวนด้วยความเร็วสูงสุดของเครื่องกวนแม่เหล็ก โดยพบว่า สารละลายกรดเกลือที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร มีความเหมาะสมที่สุด ดังแสดงรูปที่ 5.4 และมีค่าความเป็นกรด-ด่างของของผสมคงที่ตลอดการล้างสกัด สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่างของของผสมขณะทำการล้างสกัดที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 สภาพความเป็นกรด-ด่างของของผสมระหว่างดินตะกอนกับสารละลายกรดเกลือที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ

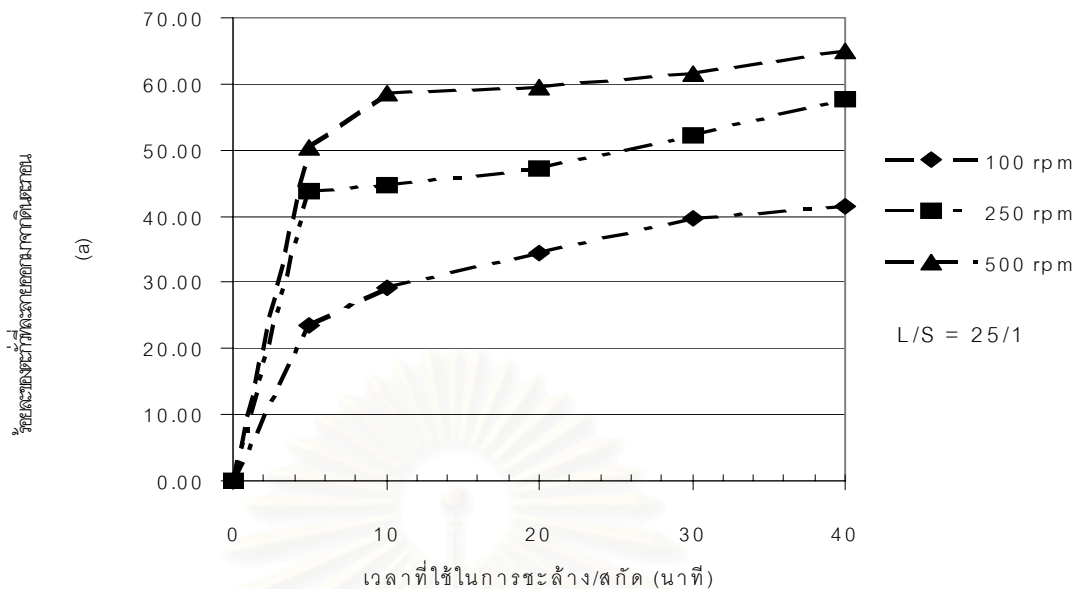
ความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือ	ค่าความเป็นกรด-ด่างขณะทำการล้างสกัด	
	สารละลายกรดเกลือ	ของผสมระหว่างกรดเกลือกับดินตะกอน
0.1 โมล/ลิตร	1.06	1.17
0.2 โมล/ลิตร	0.73	0.86
0.3 โมล/ลิตร	0.59	0.67
0.4 โมล/ลิตร	0.43	0.43
0.6 โมล/ลิตร	0.33	0.33



รูปที่ 5.4 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของกรดเกลือ สำหรับการล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน

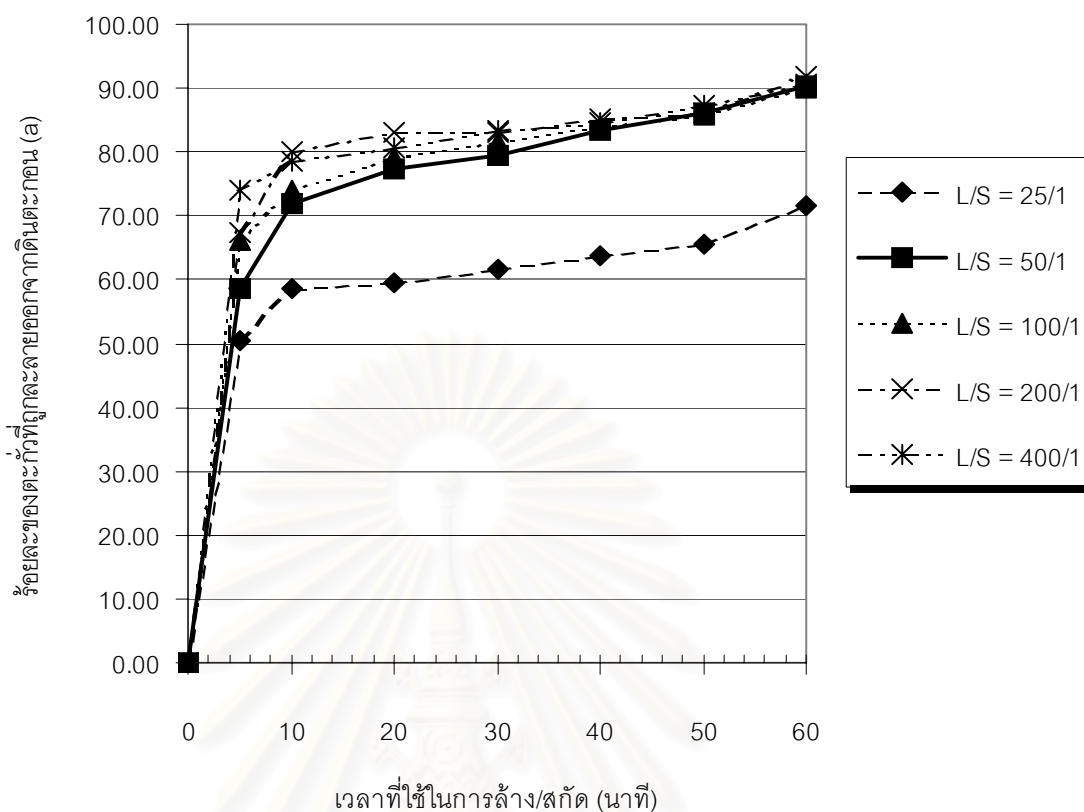
จากข้อมูลในตารางที่ 5.7 และรูปที่ 5.4 เห็นได้ว่าการล้างสกัดตะกั่วด้วยกรดเกลือมีความเหมาะสมที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร เป็นเพราะ 1) อิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำของสารละลายที่ใช้ล้างสกัด ทำให้ตะกั่วละลายออกมาอยู่ในรูปสารละลาย 2) การเกิดรูปเชิงซ้อนของตะกั่วที่ละลายน้ำกับคลอไรด์อิสระได้ผลิตภัณฑ์ตะกั่ว(II)เฮไลต์บางชนิดที่ละลายน้ำได้ดี จึงทำให้ตะกั่วละลายออกจากดินตะกอนได้มากขึ้น ส่วนการละลายของตะกั่วโดยใช้สารละลายกรดเกลือความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตรนั้น เกิดจากอิทธิพลของความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่านั้น เนื่องจากการเกิดรูปเชิงซ้อนของตะกั่ว(II)เฮไลต์นั้นจะต้องมีปริมาณของคลอไรด์ในสารละลายเกินกว่า 0.1 โมล/ลิตร (Fergusson J.E., 1990) และส่วนการที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือเกินกว่า 0.2 โมล/ลิตร ที่พบว่ามียอดละลายของตะกั่วที่ละลายออกจากดินตะกอนลดลง ทั้งที่ระดับความเป็นกรด-ด่างของของผสมขณะทำการล้างสกัดมีค่าน้อยกว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือเท่ากับ 0.2 โมล/ลิตร เป็นเพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือ ปริมาณของความเข้มข้นของคลอไรด์ในสารละลายก็เพิ่มขึ้นด้วย และจากการที่ความเข้มข้นของคลอไรด์เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือก็อาจทำให้เกิดรูปเชิงซ้อนของตะกั่ว(II)เฮไลต์รูปหนึ่งที่มีความสามารถในการละลายน้ำที่ไม่ดี ซึ่งก็คือ $PbCl_2$ (ความสามารถในการละลายน้ำเท่ากับ 0.99 ก./ล.) จึงเกิดการตกตะกอนของ $PbCl_2$ ขึ้นในของผสม อันมีผลทำให้มีปริมาณตะกั่วที่ละลายอยู่ในสารละลายมีปริมาณลดลง จากการตกตะกอนของ $PbCl_2$ ในของผสมขณะทำการล้างสกัดนั้น จึงเสมือนว่าไม่มีการละลายของตะกั่วออกจากดินตะกอน

หลังจากทราบความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายกรดเกลือแล้ว ขั้นตอนต่อมา คือ การหาความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการรบกวนล้างสกัด เนื่องจากความเร็วรอบเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลต่อการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ในการวิจัยนี้ศึกษาเฉพาะผลของความเร็วรอบที่ 100, 250 และ 500 รอบ/นาที โดยคงที่สัดส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก และความเข้มข้นของสารละลายกรดเกลือที่ 0.2 โมล/ลิตร สำหรับผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 5.5 โดยจะเห็นได้ว่า ความชันของเส้นกราฟระหว่างร้อยละของตะกั่วที่ละลายออกมาจากดินตะกอนกับเวลาที่ใช้ในการสกัดในระยะแรกที่ระยะเวลา 0-5 นาที มีความชันมากกว่าที่ระยะเวลา 5-40 นาที แสดงให้เห็นว่า ปฏิกริยาการล้างสกัดด้วยกรดเกลือความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตรดำเนินไปได้ดีในระยะแรกและลดลงในระยะหลัง และยังพบอีกว่าที่ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาทีสามารถทำการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนได้ดีที่สุดในการศึกษานี้ สำหรับเหตุว่าที่ไม่ทำการศึกษาที่ความเร็วรอบที่สูงกว่า 500 รอบ/นาที เพราะว่าที่ความเร็วรอบของการล้างสกัดสูงกว่า 500 รอบ/นาที จะต้องทำการเปลี่ยนภาชนะที่ใช้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อป้องกันการระลอกของของผสมขณะทำการรบกวนล้าง แล้วอีกประการหนึ่ง คือ การเปลี่ยนขนาดของภาชนะจะทำให้ค่าที่ได้ไม่สามารถเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากผลของภาชนะที่มีต่อการล้างสกัดที่มีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 5.5 การหาความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้สารละลายกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร และอัตราส่วนสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอนที่ 25 :1 โดยน้ำหนัก

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การหาอัตราส่วนของสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอนพร้อมทั้งเวลาการล้างสกัดที่เหมาะสมนั้น เพื่อหาอัตราส่วนของสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอนที่ประหยัดที่สุด ซึ่งหากใช้อัตราส่วนของสารละลายต่อดินตะกอนที่มากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างโครงสร้างของถังปฏิกรณ์ รวมถึงค่าใช้จ่ายก่อสร้างถังปฏิกรณ์สำหรับบำบัดตะกั่วจากน้ำทิ้ง สำหรับการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนของสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอนที่เหมาะสมนั้น ได้ใช้สารละลายกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร และความเร็วรอบคงที่ที่ 500 รอบ/นาที และทำการสุ่มหาอัตราส่วนของสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอน โดยเริ่มตั้งแต่ 25:1 จนถึง 400:1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าวครั้งละ 2 เท่าของอัตราส่วนแรก ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 5.6 ได้พบว่า อัตราส่วนของสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอน ที่ 50:1 มีความเหมาะสมที่สุดในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน เพราะที่เวลา 60 นาที อัตราการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ที่อัตราส่วนสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอน ที่ 50:1, 100:1, 200:1 และ 400:1 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ ประมาณร้อยละ 90



รูปที่ 5.6 กลไกของการชะล้าง/สกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ที่อัตราส่วนของกรดเกลือต่อดินตะกอนต่างๆ โดยคงที่ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที และความเข้มข้นของกรดเกลือที่ 0.2 โมล/ลิตร

สำหรับการศึกษานี้ เนื่องจากใช้อัตราส่วนสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอนที่มากเกินไปคือ ใช้อัตราส่วนสารละลายต่อกากตะกอนเกินกว่า 25:1 ดังนั้นการสกัดที่เวลา 60 นาที อาจเป็นระยะเวลาที่ดีที่สุดในการสกัด เพราะถ้าเพิ่มเวลาการสกัดเพิ่มขึ้นอัตราส่วนการล้างสกัดก็อาจเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังสังเกตได้จากความชันของการล้างสกัดที่เกือบเป็นเส้นราบที่เวลาการสกัดเกินกว่า 10 นาที

หลังจากที่ทราบชนิดของสารละลายที่เหมาะสม รวมถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนแล้ว ต้องทำการทดลองซ้ำที่สภาวะดังกล่าวเพื่อต้องการแยกน้ำสกัดออกจากกากตะกอนที่เหลือจากการล้างสกัด จะได้ทราบว่าน้ำสกัดมีปริมาณตะกั่วละลายน้ำทั้งหมดเท่าใดและยังสามารถทราบอีกว่ามีปริมาณกากตะกอนเหลืออยู่จากการล้างสกัดเป็นปริมาณเท่าใดเทียบกับดินตะกอนที่ป้อนสู่กระบวนการล้างสกัด จากการวิเคราะห์พบว่า กากตะกอนที่เหลือจากการล้างสกัดด้วยกรดเกลือในสภาวะที่เหมาะสมมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 61.65 ของดินตะกอนที่ป้อนสู่กระบวนการล้างสกัด และมีปริมาณตะกั่วที่ยังเหลืออยู่ในกากตะกอน

เท่ากับ 9.2 ก./กก. ส่วนน้ำสกัดพบว่าปริมาณตะกั่วทั้งหมดในสารละลายเท่ากับ 1,860 มก./ล. และจากการที่น้ำสกัดและกากตะกอนมีปริมาณตะกั่วค่อนข้างสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม และเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ ตามลำดับ ดังนั้นจึงต้องทำการบำบัดน้ำสกัดและกากตะกอนต่อไปให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานต่อไป โดยจะกล่าวในหัวข้อ 5.3.2 และ 5.3.3 ต่อไป

5.3.2 การบำบัดน้ำสกัดและน้ำทิ้ง

การศึกษาในส่วนนี้ เพื่อศึกษาวิธีการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำสกัดและน้ำทิ้ง โดยในขั้นนี้ น้ำสกัด หมายถึง สารละลายกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ที่ผ่านการใช้ในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนที่สภาวะที่เหมาะสม ส่วนน้ำทิ้ง คือ น้ำประปาที่ผ่านการใช้ในการล้างกากตะกอนที่ความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที อัตราส่วนน้ำประปาต่อกากตะกอนที่ 25:1 โดยน้ำหนัก และเวลาที่ใช้ล้างเท่ากับ 30 นาที น้ำทิ้งที่นำมาศึกษาวิธีการกำจัดตะกั่วนี้ คือ น้ำทิ้งจากการล้างกากตะกอนครั้งที่ 1 และ 2 ซึ่งมีปริมาณตะกั่วเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ที่ 0.2 มก./ล. สำหรับสาเหตุที่ต้องทำการล้างกากตะกอนเป็นจำนวนถึง 2 ครั้ง เนื่องจากต้องการล้างตะกั่วที่ละลายน้ำที่ยังเกาะอยู่ที่ผิวกากตะกอนออกให้หมดและต้องการปรับสภาพของกากตะกอนให้มีสภาพเป็นกากตะกอนเฉื่อย เนื่องจากกากตะกอนที่ได้จากการล้างสกัดด้วยกรดเกลือที่สภาวะที่เหมาะสมมีสภาพเป็นของเสียอันตราย เพราะว่ามีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดสูงกว่าค่ามาตรฐานของเสียอันตราย ที่กำหนดปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดที่ 5.0 มก./ล. ดังแสดงผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.8 และจากการล้างกากตะกอนด้วยน้ำประปาดังกล่าวทำให้มีตะกั่วปะปนอยู่ในน้ำทิ้งด้วย โดยได้แสดงปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่ปนเปื้อนในน้ำประปาของน้ำทิ้งครั้งที่ 1 และ 2 ในตารางที่ 5.9 ส่วนปริมาณตะกั่วทั้งหมดในสารละลายของน้ำสกัดก็แสดงในตารางที่ 5.9 ด้วยเช่นกัน พร้อมทั้งแสดงค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดและน้ำทิ้งในตารางดังกล่าวด้วย

ตารางที่ 5.8 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดจากกากตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยน้ำประปา

ชนิด	น้ำสกัด		
	ค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้าย	ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (มก./ล.)	
		ค่าที่ได้	ค่ามาตรฐาน
กากตะกอน	4.50	196.00	< 5.0
กากตะกอนที่ผ่านการล้าง ด้วยน้ำประปา ครั้งที่ 1	7.77	20.33	< 5.0
กากตะกอนที่ผ่านการล้าง ด้วยน้ำประปา ครั้งที่ 2	7.93	1.50	< 5.0
กากตะกอนที่ผ่านการล้าง ด้วยน้ำประปา ครั้งที่ 3	7.97	Not Detectable	< 5.0

หมายเหตุ ค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540

ตารางที่ 5.9 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด และน้ำทิ้ง

ชนิดของน้ำเสีย	ปริมาณตะกั่ว ทั้งหมด (มก./ล.)		ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย	
	ค่าที่ได้	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่ได้	ค่ามาตรฐาน
น้ำสกัด	1,860	< 0.2	0.78	5.5-9.0
น้ำทิ้ง ครั้งที่ 1	18.32	< 0.2	5.83	5.5-9.0
น้ำทิ้ง ครั้งที่ 2	0.94	< 0.2	6.99	5.5-9.0
น้ำทิ้ง ครั้งที่ 3	Not Detectable	< 0.2	7.27	5.5-9.0

หมายเหตุ ค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2/2539

ในการบำบัดตะกั่วออกจากน้ำสกัดและน้ำทิ้งนั้น โดยปกติวิธีที่นิยมคือการตกตะกอนในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ ในการตกตะกอนเคมีในรูปตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์หรือซัลไฟด์นั้นจะต้องทราบถึงความสามารถในการละลายที่ต่ำสุดของตะกั่วในรูปดังกล่าวว่าอยู่ในสภาวะใด เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าตะกั่วที่อยู่ในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์นั้นมีค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดที่ระดับความเป็นกรด-ด่างที่ 9.0-9.5 โดยมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดประมาณ 20 มก./กก. ส่วนค่าความสามารถในการละลายน้ำของตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์มีค่าประมาณ 10^{-5} มก./กก. แต่การปรับระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายด้วยการเติมโซดาไฟเพื่อให้ตกตะกอนอยู่ในรูปตะกั่วไฮดรอกไซด์ทำได้ง่ายและประหยัดกว่าการใช้โซเดียมซัลไฟด์ในการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมักทำการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์ด้วยการปรับระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย แล้วจึงตามด้วยการตกตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์

ในการศึกษานี้ใช้วิธีการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์ โดยการปรับระดับความเป็นกรด-ด่างที่ 9.0-9.5 สำหรับสารละลายที่มีปริมาณตะกั่วเกินกว่า 20 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าความสามารถในการละลายน้ำต่ำสุดของตะกั่วไฮดรอกไซด์ ส่วนสารละลายที่มีปริมาณตะกั่วในสารละลายน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 มก./ล. นั้นจะใช้การตกตะกอนผลึกในรูปตะกั่วซัลไฟด์ ดังนั้นในการศึกษานี้เพื่อให้มีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดและน้ำทิ้ง มีค่าปริมาณตะกั่วอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ที่กำหนดไว้ที่ 0.2 มก./ล. จึงอาจจำเป็นต้องทำการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์ร่วมกับการตกตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์

5.3.2.1 การตกผลึกตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์ ได้ทดลองเฉพาะกับน้ำสกัดเท่านั้น เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดมากกว่า 20 มก./ล. ดังแสดงปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำสกัดในตารางที่ 5.9 และการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์นั้นได้ใช้การปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดให้มีค่าอยู่ในช่วง 9.0-9.5 ด้วยการเติมสารละลายโซดาไฟ เพราะที่จุดนี้ตะกั่วไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นมีความสามารถในการละลายน้ำต่ำที่สุด (รูปที่ 3.4) สำหรับการทดลองนี้ได้ใช้น้ำสกัดสำหรับการทดลองตกผลึกตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์ที่ 0.5 ลิตร/ตัวอย่าง และทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้งต่อ 1 ชุดตัวอย่าง โดยผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากการตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ของน้ำสกัด

ค่าพารามิเตอร์	เริ่มต้น	สุดท้าย	ค่ามาตรฐาน
ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด	0.78	9.24	5.5-9.0
ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัด (มก./ล.)	1,860	4.63	< 0.2
ปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น (กรัม/ล.)	0	7.67	-

หมายเหตุ อ้างอิงประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2/2539

จากผลที่ได้ แสดงให้เห็นว่า การตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์สามารถบำบัดตะกั่วออกจากน้ำสกัดได้ถึงร้อยละ 99.75 ของปริมาณตะกั่วทั้งหมดที่มีอยู่ในน้ำสกัด แต่ก็ยังมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำสกัดสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ที่ 0.2 มก./ล. ดังนั้นน้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์แล้วจำเป็นต้องนำไปทำการตกตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์ต่ออีก เพื่อให้มีปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำสกัดมีค่าอยู่ในเกณฑ์ดังกล่าว

5.3.2.2 การตกตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์

ในขั้นตอนนี้ เป็นการศึกษาหาปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่เหมาะสมในการเติมลงไปใต้น้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์ และน้ำทิ้งที่เกิดจากการล้างกากตะกอนด้วยน้ำสะอาด เพื่อให้มีปริมาณตะกั่วเหลืออยู่น้อยกว่า 0.2 มก./ล. สำหรับศึกษานี้ใช้น้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์และน้ำทิ้งที่เกิดจากการล้างกากตะกอนด้วยน้ำสะอาด ตัวอย่างละ 0.5 ลิตร และทำการทดลองซ้ำชุดละ 3 ตัวอย่าง โดยผลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.11

ตารางที่ 5.11 สรุปผลการตกตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์ด้วยโซเดียมซัลไฟด์

	ปริมาณตะกั่วในสารละลาย (มก./ล.)			ค่าความเป็นกรด-ด่างของ สารละลาย			ปริมาณ ตะกอนที่ เกิดขึ้น (กรัม/ ล.)
	เริ่มต้น	สุดท้าย	ค่ามาตรฐาน	เริ่มต้น	สุดท้าย	ค่ามาตรฐาน	
น้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนผลึกตะกั่วไฮดรอกไซด์							
-ปริมาณ Na_2S 1.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	4.63	2.96	< 0.2	9.24	11.29	5.5-9	0.15
-ปริมาณ Na_2S 1.5 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	4.63	1.93	< 0.2	9.24	11.54	5.5-9	0.26
-ปริมาณ Na_2S 2.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	4.63	1.86	< 0.2	9.24	11.82	5.5-9	0.26
-ปริมาณ Na_2S 2.5 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	4.63	1.89	< 0.2	9.24	11.98	5.5-9	0.30
-ปริมาณ Na_2S 3.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	4.63	1.88	< 0.2	9.24	12.15	5.5-9	0.36
น้ำทิ้ง ครั้งที่ 1							
-ปริมาณ Na_2S 1.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	18.38	1.76	< 0.2	5.83	12.06	5.5-9	0.04
-ปริมาณ Na_2S 1.5 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	18.38	1.59	< 0.2	5.83	12.26	5.5-9	0.04
-ปริมาณ Na_2S 2.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	18.38	1.47	< 0.2	5.83	12.35	5.5-9	0.04
-ปริมาณ Na_2S 2.5 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	18.38	1.60	< 0.2	5.83	12.41	5.5-9	0.04
-ปริมาณ Na_2S 3.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	18.38	1.74	< 0.2	5.83	12.63	5.5-9	0.05
น้ำทิ้ง ครั้งที่ 2							
-ปริมาณ Na_2S 1.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	0.94	N.D.	< 0.2	6.99	10.65	5.5-9	0.03
-ปริมาณ Na_2S 1.5 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	0.94	N.D.	< 0.2	6.99	11.11	5.5-9	0.03
-ปริมาณ Na_2S 2.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	0.94	N.D.	< 0.2	6.99	11.15	5.5-9	0.03
-ปริมาณ Na_2S 2.5 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	0.94	N.D.	< 0.2	6.99	11.23	5.5-9	0.03
-ปริมาณ Na_2S 3.0 เท่าที่สมมูลกับ Pb^{2+}	0.94	N.D.	< 0.2	6.99	11.38	5.5-9	0.03

จากผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 5.11 ของน้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนไฮดรอกไซด์และน้ำทิ้ง พบว่า ระดับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ น้ำทิ้งครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดที่ดีที่สุดเท่ากับร้อยละ 59.8, 92.2 และ 100 ตามลำดับ

ในการกำจัดตะกั่วออกจากน้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนไฮดรอกไซด์นั้น พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์จำนวน 2 เท่าสมมูลกับตะกั่วในสารละลายมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากว่ามีปริมาณตะกั่วต่ำที่สุด แต่เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมซัลไฟด์เกินกว่าจำนวน 2 เท่าสมมูลกับตะกั่วในสารละลายกลับพบว่าปริมาณตะกั่วทั้งหมดในสารละลายที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยมากและใกล้เคียงกันเมื่อเทียบกับปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะผลของโลหะตัวอื่นที่ละลายออกมาจากดินตะกอนพร้อมตะกั่ว รวมถึงการเกิดรูปเชิงซ้อนของตะกั่ว(II)ไฮไลต์และตะกั่วไฮดรอกซีจากคลอไรด์และสภาพความเป็น

ค่าที่สูงของน้ำสกั๊ดที่ผ่านการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และเนื่องจากว่าหลังการบำบัดน้ำสกั๊ดด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์แล้ว น้ำสกั๊ดยังมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดสูงเกินกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องทำการบำบัดต่อไปด้วยวิธีการอื่น เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ การใช้เมมเบรน เป็นต้น เพื่อให้มีปริมาณตะกั่วอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานดังกล่าว

ส่วนน้ำทิ้งครั้งที่ 1 เมื่อทำการบำบัดด้วยการตกตะกอนผลึกตะกั่วซัลไฟด์ พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์จำนวน 2 เท่าสมมูลกับตะกั่วในสารละลายมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วต่ำที่สุด สำหรับการที่เลือกใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ที่ปริมาณ 2 เท่าสมมูลกับปริมาณตะกั่วในสารละลาย ทั้งที่ปริมาณตะกั่วในสารละลายจากการใช้โซเดียมซัลไฟด์ที่ 1.0 และ 1.5 เท่า มีประสิทธิภาพการกำจัดใกล้เคียงกันและแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แต่ที่เลือกใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์จำนวน 2 เท่า เพื่อให้มั่นใจว่ามีปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำทิ้งครั้งที่ 1 หลังจากการบำบัดด้วยการตกตะกอนซัลไฟด์มีปริมาณใกล้เคียงกับที่หาได้จากการทดลอง เพราะในโรงงานอาจมีปัจจัยอื่นทำให้ไม่เป็นไปตามผลที่ได้จากในห้องปฏิบัติการและอีกประการหนึ่งคือปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำทิ้งครั้งที่ 1 ก็มีปริมาณสูงด้วย สำหรับการพิจารณาปล่อยน้ำทิ้งครั้งที่ 1 หลังจากการบำบัดด้วยการตกตะกอนซัลไฟด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมนั้น พบว่า ไม่สามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม จึงจำเป็นต้องทำการบำบัดด้วยวิธีอื่นต่อไป จนกว่าจะมีปริมาณตะกั่วอยู่ในมาตรฐานดังกล่าว

สุดท้ายน้ำทิ้งครั้งที่ 2 ที่ผ่านการบำบัดด้วยการเติมโซเดียมซัลไฟด์ พบว่า การใช้ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์จำนวน 1 เท่าก็เพียงพอต่อการกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งครั้งที่ 2 เมื่อพิจารณาถึงการปล่อยน้ำทิ้งครั้งที่ 2 เมื่อผ่านการบำบัดแล้ว พบว่า ยังไม่สามารถปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้จำเป็นต้องทำการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้งครั้งที่ 2 ก่อน ซึ่งโดยปกติมักจะเติมกรดไนตริก เพื่อให้มีระดับความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้งครั้งที่ 2 อยู่ระหว่าง 5.5-9.0 และพบว่าต้องใช้กรดไนตริกจำนวน 0.014 มล. ในการปรับสภาพน้ำทิ้งครั้งที่ 2 จำนวน 1 ลิตร ในช่วงดังกล่าว

สำหรับตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนั้น การกำจัดด้วยวิธีการทำเสถียร/ก้อนแข็งนั้นไม่เหมาะสมนัก เนื่องจากตะกอนไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนั้น สามารถนำไปใช้เพื่อเป็นเชื้อถลุงสำหรับผลิตตะกั่วบริสุทธิ์ โดยการส่งไปยังโรงงานถลุงโลหะตะกั่วซึ่งอยู่ไม่ไกลจากโรงแต่งแร่มากนัก ดังนั้นการกำจัดตะกอนดังกล่าวด้วยการส่งไปเป็นเชื้อถลุงโลหะตะกั่ว เป็นการใช้ของเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยผลพลอยได้จากการกำจัดด้วยวิธีนี้คือโลหะตะกั่วบริสุทธิ์ ซึ่งมีมูลค่าสูงกว่าตะกอนดังกล่าว ซึ่งเป็นของเสียที่ไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจเลย

5.3.3 การบำบัด/กำจัดกากตะกอนหลังจากการล้างด้วยสารละลายกรดเกลือ

สำหรับกากตะกอนที่ได้จากการล้างด้วยน้ำประปาจนกลายเป็นของเสียเฉื่อย แต่ยังมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดสูงเกินกว่าเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ ที่กำหนดตะกั่วไว้ที่ 55 มก./กก. โดยกากตะกอนมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดเท่ากับ 9.2 ก./กก. จึงยังจัดเป็นดินตะกอนปนเปื้อนด้วยตะกั่ว และจะต้องทำการบำบัด/กำจัดให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ สำหรับปริมาณกากตะกอนที่ต้องกำจัดนั้นมีปริมาณถึง 9,277.5 ตัน หรือคิดเป็นร้อยละ 61.65 ของดินตะกอนปนเปื้อนทั้งหมด ซึ่งมีปริมาณถึง 15,000 ตัน

จากเหตุที่กากตะกอนดังกล่าว มีปริมาณตะกั่วทั้งหมดอยู่ในกากตะกอนที่ค่อนข้างสูง โดยมีความค่าตะกั่วเกินเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักที่ยอมรับได้ ดังนั้นการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตรจึงไม่เหมาะสม จึงเหลือเพียงแต่การนำไปฝังกลบยังหลุมฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1/2541 หรือการทำเสถียร/ก้อนแข็งแล้วฝังยังหลุมฝังกลบนิรภัย

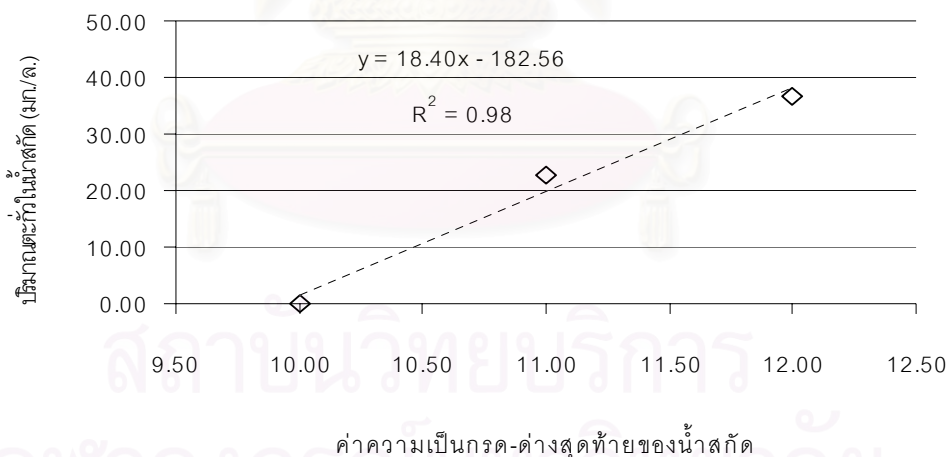
5.3.3.1 การฝังกลบกากตะกอนโดยตรง

สำหรับการฝังกลบกากตะกอนโดยตรงนั้น สามารถทำการฝังกลบในหลุมฝังกลบ ที่ก่อสร้างตามหลักเกณฑ์การฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1/2541 โดยขณะทำการฝังกลบต้องทำการบดอัดกากตะกอนให้แน่นพอควร เพื่อให้เครื่องจักรที่ใช้ในการฝังกลบสามารถทำงานบนหลุมฝังกลบที่มีกากตะกอนฝังอยู่ โดยไม่เกิดการจมตัวของเครื่องจักรในชั้นกากตะกอน สำหรับปริมาตรของกากตะกอนที่ต้องนำมาฝังกลบมีจำนวนเท่ากับ 5,100 ลบ.ม จากน้ำหนักกากตะกอน 9,277.5 ตัน

5.3.3.2 การทำเสถียร/ก้อนแข็งกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 ก่อนการฝังกลบยังหลุมฝังกลบนิรภัย

การทำเสถียร/ก้อนแข็งกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 นั้น มีจุดประสงค์ คือ 1) เพื่อให้กากตะกอนมีลักษณะเป็นเม็ดละเอียดมารวมกันเป็นก้อน เพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้าย 2) เพื่อให้กากตะกอนมีกำลังรับน้ำหนักดีขึ้น ลดการซึมน้ำ และลดพื้นที่ผิวของกากตะกอน 3) เพื่อลดโอกาสที่ตะกั่วสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมและละลายกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม และ 4) เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นแก่ประชาชนจากรูปร่างภายนอกที่ดูแข็งแรงน่าเชื่อถือ

การทำก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์นี้ เป็นการผลิตคอนกรีตชนิดหนึ่ง ซึ่งจะต้องมีค่าระดับความเป็นกรด-ด่างภายในเนื้อที่เป็นค่าสูง จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้น เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าตะกั่วที่ปนเปื้อนในกากตะกอนมีการละลายออกจากดินตะกอนที่อยู่ในสภาพที่เป็นค่าของก้อนคอนกรีตปกติหรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบกากตะกอนด้วยวิธีการชะละลายที่ระดับความเป็นกรด-ด่างที่ 10, 11 และ 12 โดยใช้สภาวะการชะละลายเหมือนกับวิธีการชะละลายของกระทรวงอุตสาหกรรม พบว่าที่ระดับความเป็นกรด-ด่างสูงเกินกว่า 10 ตะกั่วที่ปนเปื้อนอยู่ในกากตะกอนสามารถละลายออกมาได้เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดจากกากตะกอน ที่ระดับความเป็นกรด-ด่างต่างๆ

โดยใช้สภาวะเดียวกับการชะละลาย ของกระทรวงอุตสาหกรรม

แต่จากการที่ทราบว่าตะกั่วที่ปนเปื้อนในกากตะกอนสามารถละลายได้ที่สภาวะความเป็นค่าในรูปที่ 5.7 ก็มีใช่เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าการทำก้อนแข็งของกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์จะไม่เหมาะสม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำนั้น มีใช้ว่าจะทำให้ระดับ

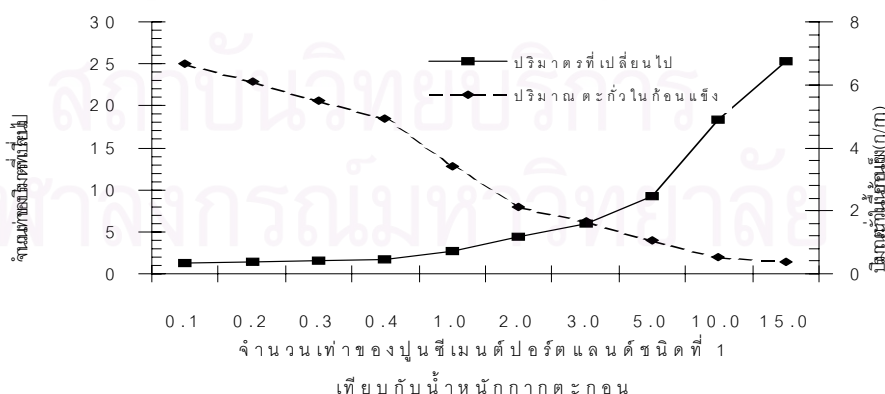
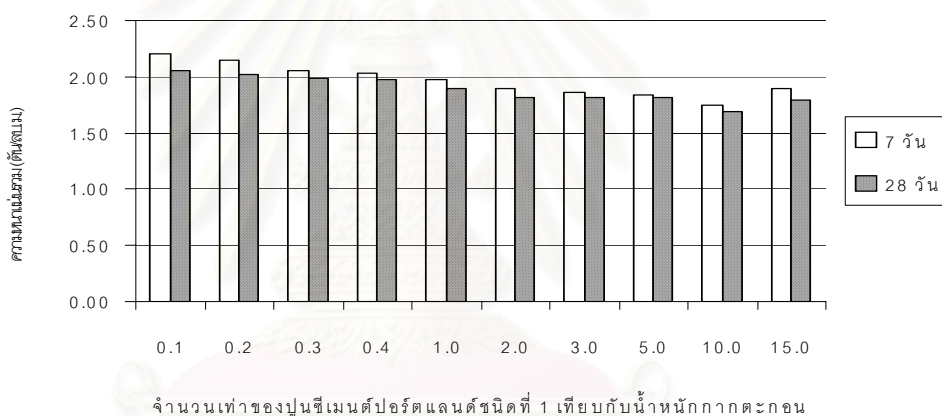
ความเป็นกรด-ต่างภายในก้อนแข็งเป็นต่างสูงๆและเกิด Macroencapsulation ของกากตะกอน ด้วยซีเมนต์เฟลสเท่านั้น แต่ยังมี การแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง C-S-H กับตะกั่วที่ละลายออกมา จากกากตะกอนและการตกตะกอนในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์ภายในเนื้อซีเมนต์เฟลส ดังนั้นจึง ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการทำก้อนแข็งของกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 จะ ล้มเหลวหรือไม่ เนื่องจากการละลายของตะกั่วภายใต้สภาวะที่เป็นต่างสูงๆ

การศึกษานี้ได้ทำก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยเลือกใช้การผลิตของ ผสมเสร็จใหม่ให้มีลักษณะ Cement-like Material เนื่องจากกากตะกอนที่นำมาศึกษานี้ต้องผ่าน กระบวนการแยกน้ำ ซึ่งยังจะต้องมีความชื้นในกากตะกอนที่ยังสูง ดังนั้นวิธีการทดสอบกำลังรับ แรงอัดของก้อนแข็งจากการผลิตของผสมเสร็จใหม่ลักษณะนี้สามารถใช้วิธีมาตรฐาน ASTM C109 หรือ ASTM D1633 แต่เนื่องจากว่าเครื่องมือสำหรับหล่อแบบก้อนแข็งเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D1633 อ้างอิงถึง ASTM D1632 สำหรับของผสมที่มีลักษณะ Soil-like Material และ Cement-like Material ไม่มีที่ห้องปฏิบัติการที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการศึกษานี้จึงเลือกใช้วิธีการหล่อก้อนแข็งด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM C109 แทน และ เนื่องจากการทำเป็นก้อนแข็งให้ของผสมเสร็จใหม่มีลักษณะ Cement-like Material จำเป็นต้องหา ปริมาณน้ำอิ่มตัวของกากตะกอนก่อนการผสม เพื่อที่จะนำปริมาณน้ำที่ได้นี้ไปบวกเพิ่มกับปริมาณ น้ำที่ใช้สำหรับผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ให้มีค่า w/c คงที่ตามที่กำหนดไว้ พบว่า ปริมาณน้ำที่ทำให้กากตะกอนอิ่มตัวด้วยน้ำเท่ากับร้อยละ 16.01 ด้วยวิธี Standard Proctor

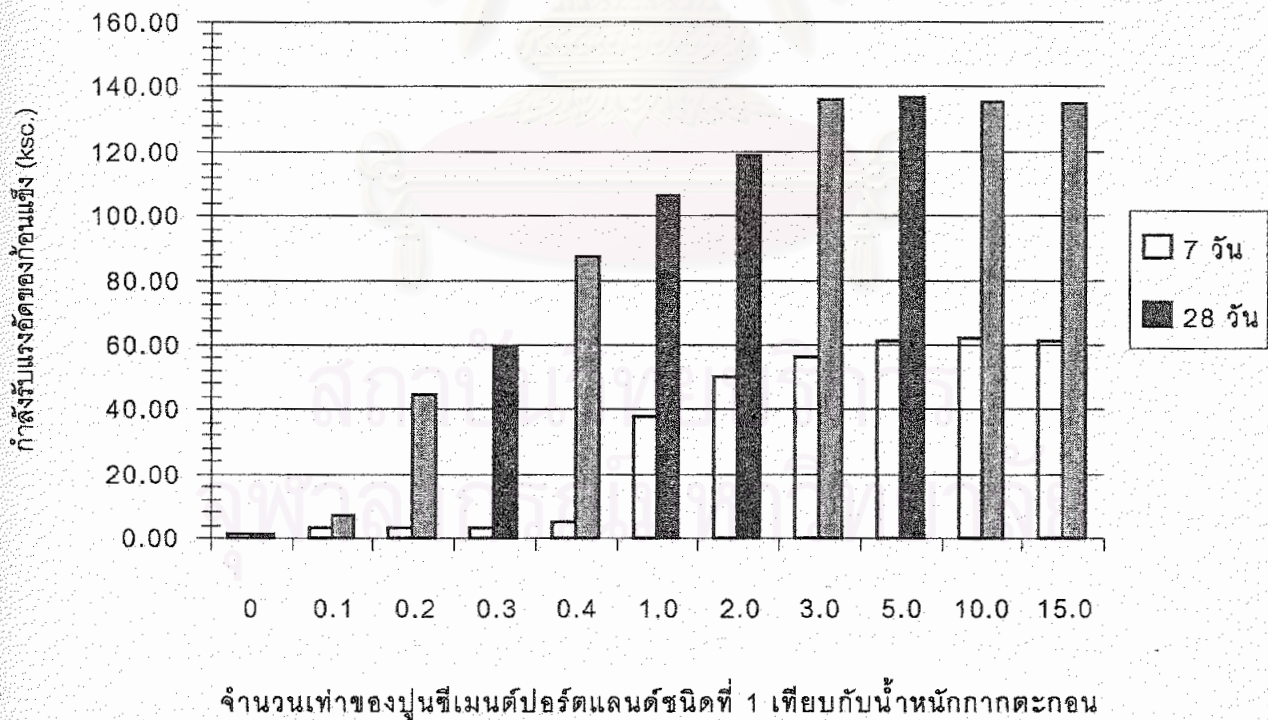
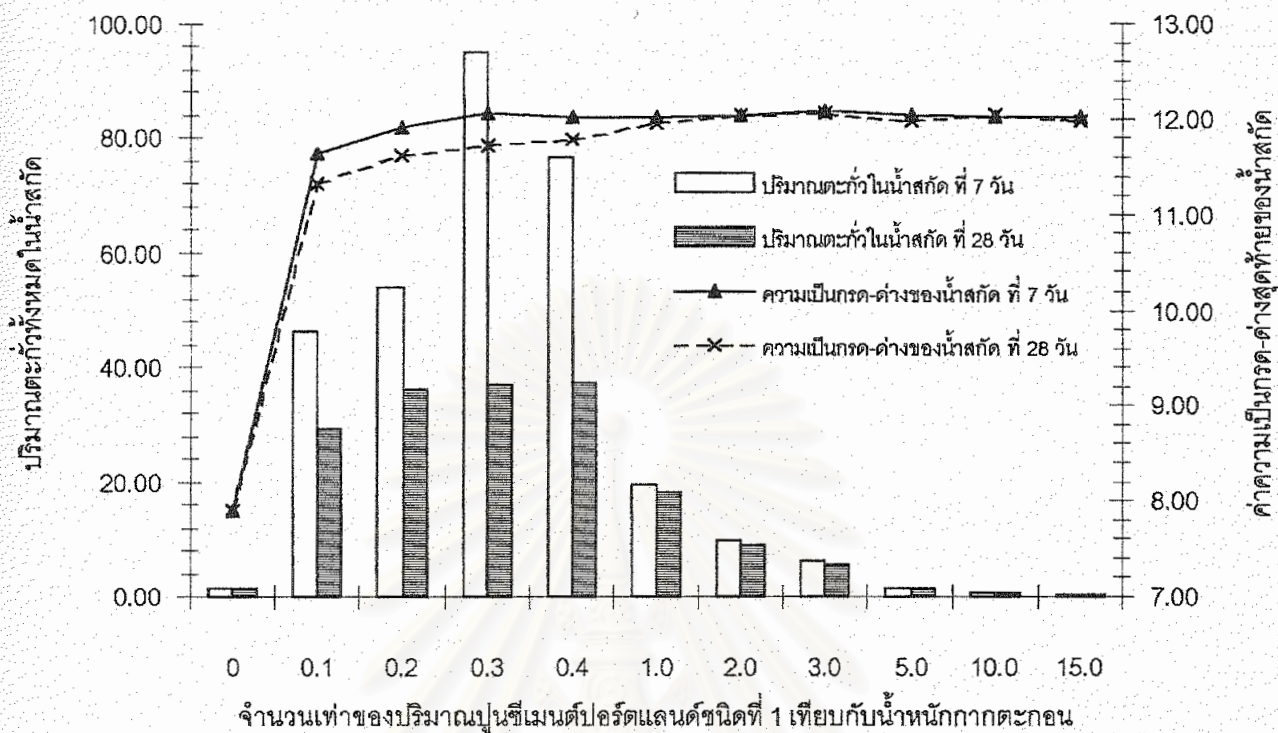
จากการที่กำหนดค่า w/c ให้คงที่ที่ 0.5 สำหรับทุกสัดส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ผลการศึกษพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ปริมาณตะกั่วในก้อนแข็งจะ ลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์และน้ำ และทำให้ปริมาตรของก้อนแข็งเมื่อเปรียบเทียบกับ ปริมาตรของกากตะกอนก่อนการทำก้อนแข็งมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนความหนาแน่นรวมของก้อน แข็งก็มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ด้วย ที่เป็นเช่นนี้เป็นเพราะมีปริมาณเนื้อ ซีเมนต์เฟลสเพิ่มขึ้นในก้อนแข็ง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.8 และจากการที่ก้อนแข็งของ กากตะกอนต้องมีการวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดและกำลังรับแรงอัด ให้เป็นไปตาม ประการศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540 โดยแสดงผลการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวในรูปที่ 5.9 พบว่า การเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในช่วงแรก คือ ที่จำนวนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิด ที่ 1 น้อยกว่า 0.3 เท่าเทียบกับน้ำหนักกากตะกอน ปูนซีเมนต์ที่เติมลงไปจะไปทำให้ตะกั่วที่อยู่ใน กากตะกอนชะละลายออกมาสู่น้ำสกัดมากขึ้น อาจเป็นเพราะค่าความเป็นกรด-ต่างที่สูงของก้อน แข็ง เหมือนกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดจากกากตะกอนด้วยวิธีการชะละลายที่ สภาวะความเป็นต่าง ดังแสดงในรูปที่ 5.7 แต่หลังจากเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เกินกว่า 0.3 เท่าเทียบกับน้ำหนักกากตะกอนแล้วมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดลดลงจนมีปริมาณ

ตะกั่วในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของเสียอันตรายเมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 3.5 เท่าเทียบกับน้ำหนักกากตะกอน เป็นเพราะการเจือจางของปริมาณตะกั่วในก้อนแข็งตามการเพิ่มขึ้นของเนื้อซีเมนต์เฟลสที่เพิ่มขึ้น การยึดจับตะกั่วด้วยซีเมนต์เฟลส รวมทั้งการตกตะกอนตะกั่วในรูปไฮดรอกไซด์จากความเป็นกรด-ด่างที่สูงในก้อนแข็ง อย่างไรก็ตามอย่างหนึ่งหรือทั้งหมดรวมกัน

สำหรับผลกระทบของตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินตะกอนต่อกำลังรับแรงอัดนั้น พบว่า ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มากกว่าหรือเท่ากับ 5 เท่าเทียบกับน้ำหนักกากตะกอนจะไม่มีผลกระทบจากตะกั่วต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็ง และที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มากกว่าหรือเท่ากับ 3 เท่าเทียบกับน้ำหนักของกากตะกอนจะไม่มีผลกระทบจากตะกั่วต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็ง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.8 ความหนาแน่นรวมของก้อนแข็งกากตะกอน ปริมาณตะกั่วของของผสมและปริมาณที่เพิ่มขึ้นของก้อนแข็งเทียบกับกากตะกอน ที่สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่างๆ โดยคงที่ค่า w/c เท่ากับ 0.5



รูปที่ 5.9 ปริมาณตะกั่วและความดันกรด-ต่างสุดท้ายของน้ำสกัดจากก้อนแข็งอากาศระกอน และกำลังรับแรงอัดที่ 7 และ 28 วันของก้อนแข็งอากาศระกอน

จากการนำปูนซีเมนต์มาผสมกับกากตะกอนเพื่อผลิตเป็นก้อนแข็ง ทำให้ปริมาตรของของเสียมีค่าเพิ่มขึ้นแน่นอน สำหรับการศึกษานี้ พบว่า ที่สภาวะที่เหมาะสมในการทำก้อนแข็งจากกากตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 คือ การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 จำนวน 3.5 เท่าของกากตะกอน จะทำให้ปริมาตรของเสียเพิ่มขึ้นถึง 6.85 เท่า สำหรับการพิจารณาความเหมาะสมในการทำกากตะกอนให้เป็นก้อนแข็งนั้น อาจจะยังไม่มีที่เหมาะสมในขณะนี้ เนื่องจากกากตะกอนเองก็มีไซของเสียอันตรายตามข้อกำหนดและกฎหมายที่บังคับใช้อยู่ขณะนี้ และการทำกากตะกอนเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ก็ทำให้มีปริมาตรเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งต้องใช้พื้นที่ของหลุมฝังกลบเป็นปริมาณมาก ดังนั้นการฝังกลบกากตะกอนในหลุมฝังกลบจึงมีความเหมาะสมมากกว่าการเป็นก้อนแข็ง

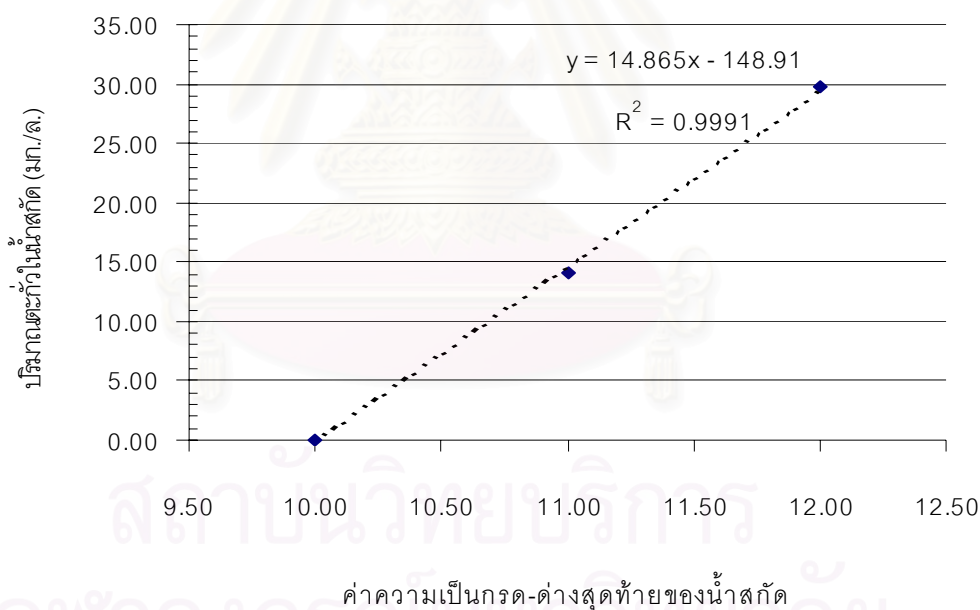
สรุปการล้างสกัดดินตะกอนด้วยสารละลาย พร้อมทั้งกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น พบว่า สารละลายกรดเกลือมีความเหมาะสมในการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนได้ดีกว่า สารละลายโซดาไฟและน้ำประปา และมีสภาวะที่เหมาะสมในการล้างสกัดที่ ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร เวลาที่ใช้ในการล้างสกัดเท่ากับ 60 นาที ความเร็วรอบในการล้างสกัดที่ 500 รอบ/นาที และอัตราส่วนสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอนที่ 50:1 โดยมีประสิทธิภาพในการล้างสกัดตะกั่วได้ถึงประมาณร้อยละ 90

ในส่วนของการบำบัดน้ำสกัดและน้ำทิ้งที่เกิดขึ้น พบว่า การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดด้วยการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างสูง แต่ไม่สามารถลดปริมาณตะกั่วทั้งหมดในสารละลายของน้ำสกัดและน้ำทิ้งครั้งที่ 1 ให้อยู่ในเกณฑ์น้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมได้ จึงยังต้องมีการบำบัดน้ำสกัดและน้ำทิ้งครั้งที่ 1 หลังจากการตกตะกอนรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ด้วยวิธีการอื่นต่อไป ส่วนน้ำทิ้งครั้งที่ 2 นั้นพบว่าสามารถกำจัดตะกั่วออกจากสารละลายให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรมได้ แต่การปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมนั้นต้องทำการปรับระดับความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งเสียก่อน

สุดท้ายการกำจัด/บำบัดกากตะกอนที่ได้จากการล้างสกัด พบว่า การทำให้กากตะกอนเป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 นั้น ไม่มีความเหมาะสม เนื่องจากทำให้มีปริมาตรของเสียเพิ่มขึ้นจากปริมาตรของกากตะกอนที่ต้องกำจัดถึง 6.85 เท่า ดังนั้นการฝังกลบกากตะกอนโดยตรงในหลุมฝังกลบก็เพียงพอแล้ว

5.4 การทำเสถียร/ก้อนแข็งดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ก่อนการฝังกลบในหลุมฝังกลบนิรภัย

จากการที่ดินตะกอนที่ปนเปื้อนในห้วยคลิตี้มีปริมาณความชื้นที่ค่อนข้างสูง ดังนั้นการทำเสถียร/ก้อนแข็งโดยให้ของผสมเสร็จใหม่มีลักษณะ Cement-like Material จึงมีเหมาะสมมากที่สุดในการทำก้อนแข็งด้วยด้วยปูนซีเมนต์นี้ เป็นการผลิตคอนกรีตชนิดหนึ่ง ซึ่งจะต้องมีค่าระดับความเป็นกรด-ด่างภายในเนื้อที่เป็นต่างสูง จากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินตะกอนสามารถละลายออกจากดินตะกอนได้ที่ในสภาพที่เป็นต่างของก้อนคอนกรีตปกติหรือไม่ จึงได้ทำการทดสอบการละลายของตะกั่วในดินตะกอนด้วยวิธีการชะละลายที่ระดับความเป็นกรด-ด่างที่ 10, 11 และ 12 โดยใช้สภาวะการชะละลายเหมือนกับวิธีการชะละลาย ของกระทรวงอุตสาหกรรม พบว่าปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด ดังแสดงในรูปที่ 5.10 จึงสรุปได้ว่าตะกั่วในดินตะกอนสามารถละลายได้ออกจากดินตะกอนได้ที่ความเป็นกรด-ด่างสูงๆ



รูปที่ 5.10 ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดจากดินตะกอน ที่ระดับความเป็นกรด-ด่างต่างๆ

โดยใช้สภาวะเดียวกับการชะละลาย ของกระทรวงอุตสาหกรรม

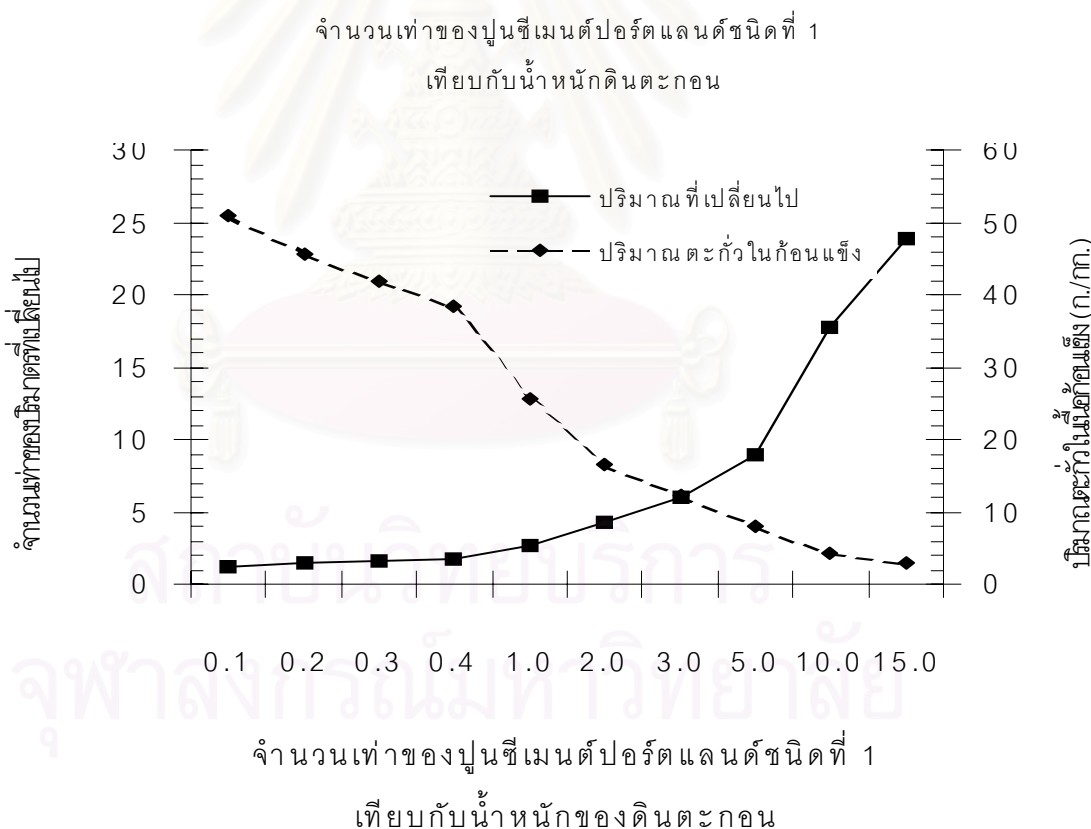
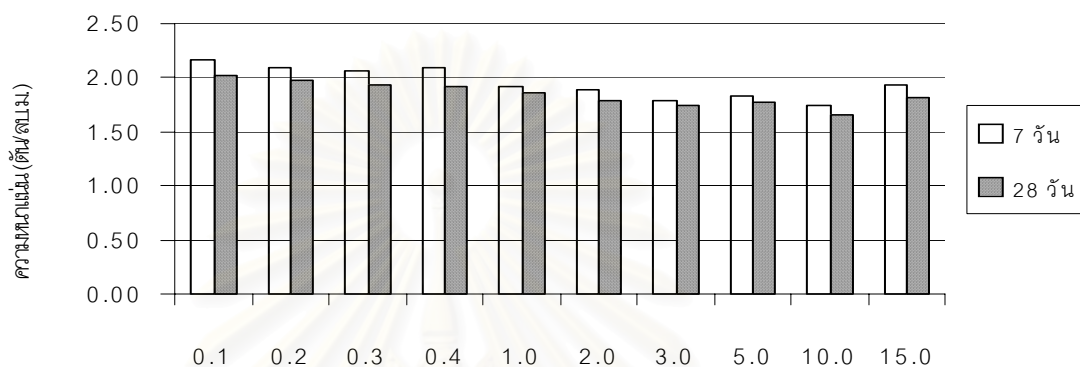
ถึงแม้ว่าจะทราบว่าตะกั่วที่ปนเปื้อนในดินตะกอนสามารถละลายได้ที่สภาวะความเป็นกรด-ด่างสูงในรูปที่ 5.10 ก็มีใช่เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าการทำก้อนแข็งดินตะกอนจะไม่เหมาะสม เนื่องจากเกิดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำนั้นมิใช่จะทำให้ระดับความเป็น

กรด-ต่างภายในก้อนแข็งเป็นต่างสูงๆและเกิด Macroencapsulation ของดินตะกอนด้วยซีเมนต์เพลสเท่านั้น แต่ยังสามารถมีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่าง C-S-H กับตะกั่วที่ละลายออกมาจากดินตะกอนและการตกตะกอนในรูปของตะกั่วไฮดรอกไซด์ภายในเนื้อซีเมนต์เพลส ดังนั้นจึงยังไม่สามารถสรุปได้ว่าการทำก้อนแข็งดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 จะล้มเหลวเนื่องจากการละลายของตะกั่วภายใต้สภาวะที่เป็นต่างสูงๆ

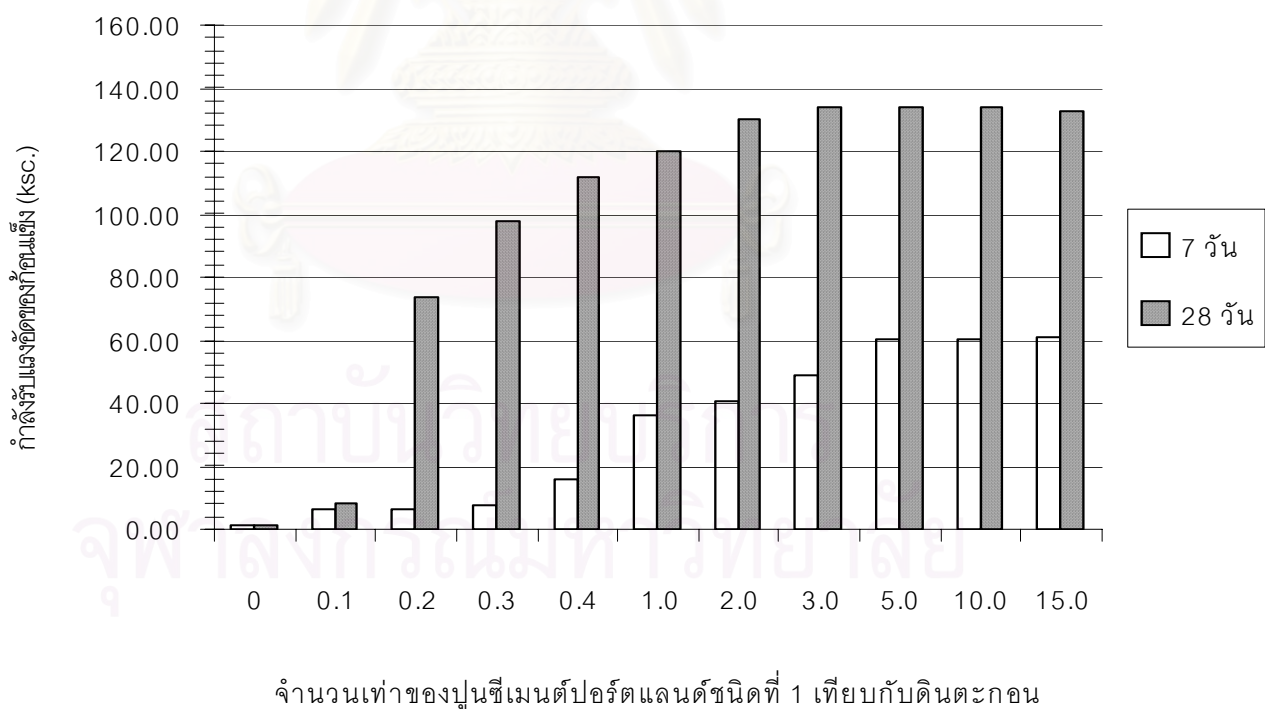
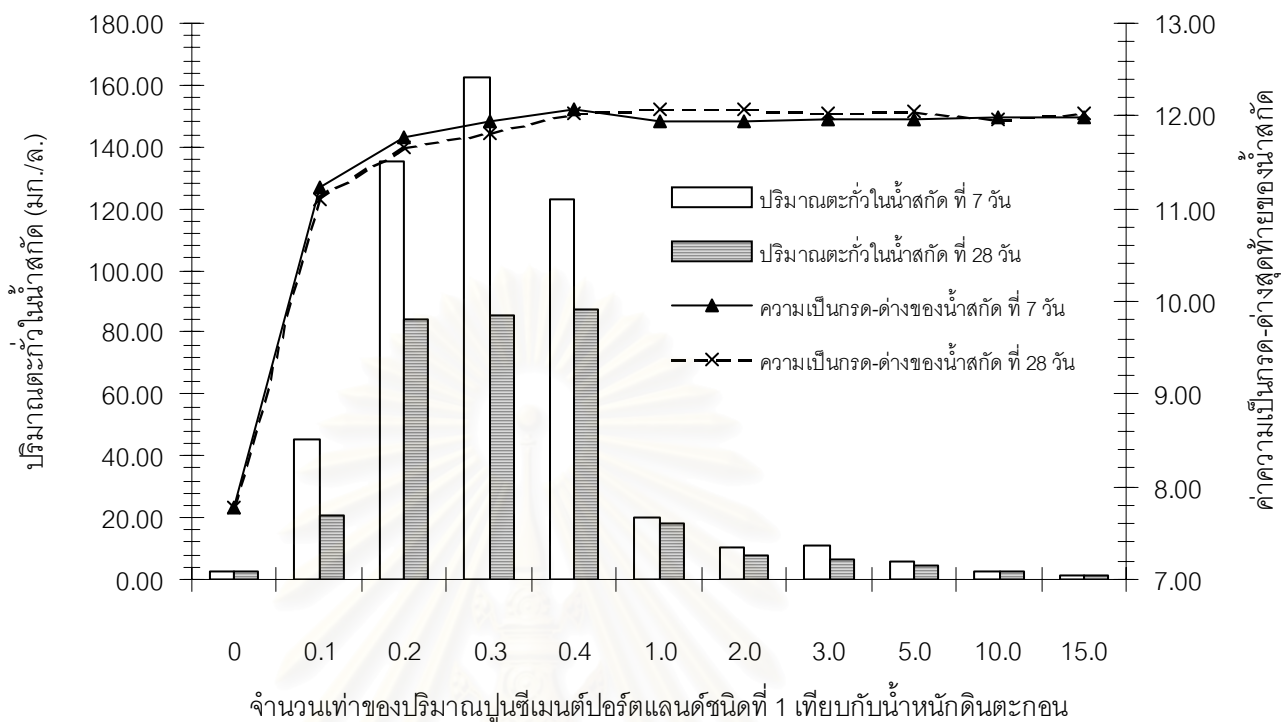
สำหรับการศึกษานี้ได้ทำดินตะกอนให้เป็นก้อนแข็งโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยคงที่ w/c เท่ากับ 0.5 และใช้วิธีการหล่อก้อนแข็งด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM C109 ขั้นตอนแรกคือการหาปริมาณน้ำที่ทำให้ดินตะกอนอัดตัวด้วยวิธี Standard Proctor พบว่า ปริมาณน้ำที่ทำให้ดินตะกอนอัดตัวเท่ากับร้อยละ 21.4 การหาปริมาณน้ำอัดตัวนี้เพื่อบวกเพิ่มกับปริมาณน้ำที่ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ให้มีค่า w/c คงที่เท่ากับ 0.5 สำหรับทุกสัดส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 แล้วจึงทำการหล่อก้อนแข็งสำหรับดินตะกอนที่สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ปริมาณตะกั่วในก้อนแข็งจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์และน้ำ ส่วนปริมาตรของก้อนแข็งก็มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรดินตะกอนก่อนการทำก้อนแข็ง แต่ความหนาแน่นรวมของก้อนแข็งกลับมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์เป็นเพราะมีปริมาณเนื้อซีเมนต์เพลสเพิ่มขึ้นในก้อนแข็งและความถ่วงจำเพาะของซีเมนต์เพลสก็มีค่าน้อยกว่าความถ่วงจำเพาะของดินตะกอน ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.11

5.11 สำหรับก้อนแข็งจากดินตะกอนนั้นจะต้องมีคุณสมบัติเป็นไปตามคุณสมบัติของก้อนแข็งที่ระบุในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540 จึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หากำลังรับแรงอัดและปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำสกัด พร้อมทั้งความหนาแน่นของก้อนแข็ง ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 5.11 และ 5.12 พบว่า การเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ในช่วงแรก คือที่จำนวนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 น้อยกว่า 0.3 เท่าเทียบกับน้ำหนักดินตะกอน ปูนซีเมนต์ที่เติมลงไปจะไปทำให้ตะกั่วที่อยู่ในดินตะกอนจะละลายออกมาสู่น้ำสกัดมากขึ้น อาจเป็นเพราะค่าความเป็นกรด-ต่างที่สูงของก้อนแข็งเหมือนเช่นการเพิ่มขึ้นของตะกั่วในน้ำสกัดจากดินตะกอนที่สภาวะความเป็นกรด-ต่างสูงๆ ในรูปที่ 5.10 แต่หลังจากเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เกินกว่า 0.3 เท่าเทียบกับน้ำหนักดินตะกอนแล้วจึงมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดลดลงตามลำดับจนมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของเสียอันตรายที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 7.5 เท่าเทียบกับน้ำหนักดินตะกอน อันเนื่องการเจือจางของปริมาณตะกั่วในก้อนแข็ง และการยึดจับตะกั่วด้วยซีเมนต์เพลส รวมทั้งการตกตะกอนตะกั่วในรูปไฮดรอกไซด์จากความเป็นกรด-ต่างที่สูงในก้อนแข็ง อย่างไรก็ดีอย่างหนึ่งหรือทั้งหมดร่วมกัน

สำหรับกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งนั้นพบว่าตะกั่วในดินตะกอนส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักของก้อนแข็ง คือ เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 5 เท่าเทียบกับน้ำหนักดินตะกอน ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และที่ระยะเวลาบ่มที่ 28 วัน ตะกั่วจะมีผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของก้อนแข็ง เมื่อใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยกว่า 3 เท่าเทียบกับน้ำหนักดินตะกอน



รูปที่ 5.11 ความหนาแน่นรวมของก้อนแข็งดินตะกอน ปริมาณตะกั่วของของผสมและปริมาตรที่เพิ่มขึ้นของก้อนแข็งเทียบกับดินตะกอน ที่สัดส่วนปูนซีเมนต์ต่างๆ โดยคงที่ค่า w/c เท่ากับ 0.5



รูปที่ 5.12 ปริมาณตะกั่วและความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายของน้ำสกัดจากก้อนแข็งดินตะกอน และกำลังรับแรงอัดที่ 7 และ 28 วันของก้อนแข็งดินตะกอน

สรุปการทำการก่อนแข็งดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มีสภาวะที่เหมาะสมคือที่ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 จำนวน 7.5 เท่าของน้ำหนักดินตะกอน ทำให้ก่อนแข็งมีปริมาตรมากกว่าปริมาตรของดินตะกอนที่ต้องทำการบำบัดถึง 12.85 เท่า และต้องนำก้อนแข็งหรือของผสมเสร็จใหม่ไปทำการฝังกลบยังหลุมฝังกลบนิรภัยต่อไป

5.5 การประเมินค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

ในขั้นตอนของการประเมินค่าใช้จ่ายนี้ ได้ประเมินราคาค่าฝังกลบดินตะกอนโดยตรง ราคาค่าใช้จ่ายในการตัดแยกและฝังกลบดินตะกอนสะอาด ค่าใช้จ่ายในการสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยกรดเกลือพร้อมทั้งกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น และการทำเสถียร/ก้อนแข็งพร้อมฝังกลบก้อนแข็งในหลุมฝังกลบนิรภัย สำหรับระยะเวลาการบำบัด/กำจัดดินตะกอนตะกั่วให้เสร็จสิ้นภายในระยะเวลา 1 ปี

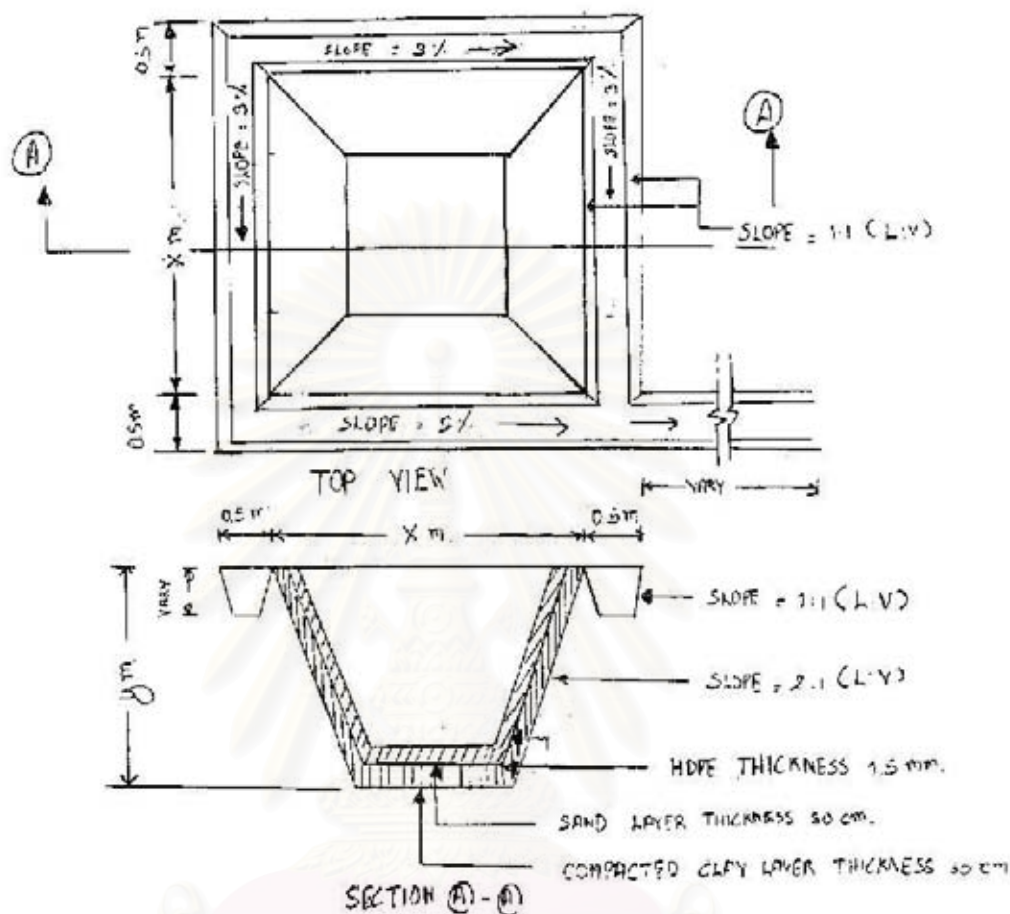
สำหรับรายละเอียดและค่าใช้จ่ายในการบำบัดดินตะกอนด้วยวิธีต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

5.5.1 กรณีการฝังกลบโดยตรง

การฝังกลบดินตะกอนที่ปนเปื้อนโดยตรงนั้น อย่างแรกที่ต้องพิจารณาคือปริมาตรของดินตะกอนที่ต้องฝังในหลุม พบว่า ดินตะกอนปนเปื้อนจำนวน 15,000 ตันมีปริมาตรของดินตะกอนที่ต้องทำการฝังกลบเท่ากับ 8,250 ลบ.ม. ซึ่งปริมาตรนี้จะต้องนำไปรวมกับปริมาตรดินที่ต้องขุดสำหรับวางชั้นดินเหนียวบดอัดและชั้นทรายระบายน้ำรวมกันอีก 90 ซม. ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการประเมินราคาคร่าวๆ จะใช้การคำนวณพื้นที่การขุดหลุมฝังกลบมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความลาดเอียงของหลุมเท่ากับ 2:1 (ราบ:ฉาก) เพื่อป้องกันการพังทลายของผนังปากหลุมฝังกลบ และรอบนอกหลุมฝังกลบจะมีทางระบายน้ำสำหรับระบายน้ำ ที่ปริมาณน้ำฝนสูงสุดที่คาบ 25 ปี โดยให้มีขนาดของทางระบายน้ำฝนกว้าง 50 ซม. ลึก 50 ซม.

สำหรับลักษณะของหลุมฝังกลบที่ใช้ประมาณราคาค่าใช้จ่ายแสดงในรูปที่ 5.13 โดยกำหนดให้มีความลึกของหลุมฝังกลบเท่ากับ 6 เมตร จะได้หลุมฝังกลบขนาดความกว้างของปากบ่อเท่ากับ 56.5 x 56.5 เมตร ความกว้างของก้นหลุมเท่ากับ 32.5 x 32.5 เมตร และสำหรับการวางชั้นดินเหนียวบดอัดที่หนา 60 ซม. ต้องทำการบดอัดทุกความหนา 15 ซม. และต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ของ Standard Proctor ในระหว่างการฝังกลบดินตะกอนต้องทำการบดอัดดินตะกอนให้แน่นพอควรโดยทำการบดอัดดินตะกอนเป็นชั้นๆจนกว่าจะเต็มหลุมฝังกลบ ซึ่งแต่ละชั้น

ของการบดอัดมีความหนาเท่ากับ 0.5 เมตร เพื่อให้ดินตะกอนมีความสามารถรับน้ำหนักของเครื่องจักรขณะทำการฝังกลบดินตะกอนลงสู่หลุมฝังกลบได้



รูปที่ 5.13 รูปทั่วไปของหลุมฝังกลบสำหรับการฝังกลบ ในการประมาณราคาการฝังกลบ

สำหรับราคาค่าใช้จ่ายในการฝังกลบเอง มีราคาค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 7,757,300บาท หรือเท่ากับ 520 บาท/ตัน

5.5.2 กรณีทำการตัดแยกด้วยไถะเขย่าแบบเปียก

การตัดแยกด้วยไถะเขย่าแบบเปียก ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้มีด้วยกัน 2 ส่วน คือ ตะกอนตะกั่ว และดินตะกอนสะอาด โดยดินตะกอนสะอาดจะมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 52.7 ของดินตะกอนทั้งหมด หรือเท่ากับน้ำหนัก 7,900.5 ตัน ที่ต้องนำไปฝังยังหลุมฝังกลบสำหรับวัสดุที่ไม่ใช้แล้วหรือ

สิ่งปฏิภูมิตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2541 ส่วนตะกอนตะกั่วนั้นจะส่งไปเป็นวัสดุดิบสำหรับการผลิตหัวแร่ตะกั่ว โดยตีราคาตะกอนตะกั่วไว้ที่ 1,000 บาท/ตัน

สำหรับการก่อสร้างหลุมฝังกลบในพื้นที่สำหรับการฝังกลบดินตะกอนสะอาदनั้นจะใช้ลักษณะเดียวกับการก่อสร้างหลุมฝังกลบในข้อ 5.5.1 เพียงแต่ปรับขนาดของหลุมฝังกลบตามปริมาตรของของเสียที่จะฝัง ในกรณีนี้มีดินตะกอนสะอาดที่ต้องฝังจำนวน 7,900.5 ตัน หรือเท่ากับปริมาตร 4,181 ลบ.ม. พบว่าต้องทำการก่อสร้างหลุมฝังกลบขนาดปากหลุมกว้างเท่ากับ 48 x 48 เมตร ก้นหลุมมีขนาดกว้างเท่ากับ 24 x 24 เมตร และลึก 6 เมตร และมีทางระบายน้ำฝนขนาดกว้าง 0.5 เมตร ลึก 0.5 เมตร และมีความชัน 3 % รอบหลุมฝังกลบ โดยมีค่าใช้จ่ายหลังหักค่าตะกอนตะกั่วเป็นจำนวนเงินเท่ากับ 2,264,100 บาท หรือมีค่าใช้จ่ายต่อตันเท่ากับ 150 บาท

5.5.3 กรณีการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลาย พร้อมการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น

การประเมินราคาค่าใช้จ่ายในส่วนนี้ เป็นการประเมินค่าใช้จ่ายของการก่อสร้างระบบและดำเนินการของระบบล้างสกัดดินตะกอนด้วยสารละลายกรดเกลือ และการบำบัดน้ำทิ้งที่เกิดขึ้น ด้วยการตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ รวมทั้งการจัดการกากตะกอนที่เกิดจากการล้าง

ในการก่อสร้างหลุมฝังกลบกากตะกอนในพื้นที่นั้นคำนวณจากลักษณะการก่อสร้างหลุมฝังกลบในข้อ 5.5.1 โดยเปลี่ยนแปลงขนาดหลุมตามปริมาตรของกากตะกอนที่นำมาฝัง แต่คงที่ระดับความลึกของการขุดที่ 6 เมตร ปริมาตรของกากตะกอนที่นำมาฝังนั้นมีจำนวนเท่ากับ 5,100 ลบ.ม. โดยต้องทำการขุดหลุมให้มีขนาดปากหลุมเท่ากับ 51 x 51 เมตร ขนาดก้นหลุมเท่ากับ 27 x 27 เมตร และลึก 6.0 เมตร ส่วนการกำจัดตะกอนเคมีจำนวน 5,824 ตัน ที่เกิดการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีนั้นจะส่งไปเป็นเชื้อถลุงโลหะตะกั่วบริสุทธิ์ในจังหวัดกาญจนบุรี โดยมีระยะทางการขนส่งประมาณ 80 กิโลเมตรนับจากโรงแต่งแร่คลิตี้ถึงโรงงานถลุงโลหะตะกั่ว โดยมีราคาค่าขนส่งเท่ากับ 1.2 บาท/กิโลเมตร/ตัน

ส่วนการล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลายกรดเกลือ และการตกตะกอนผลึกในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ จำเป็นต้องสร้างถังปฏิกรณ์และต้องเลือกใช้วัสดุสำหรับการก่อสร้างถังปฏิกรณ์ที่ทนต่อการกัดกร่อนได้ โดยเลือกใช้ Stainless Steel 316L ซึ่งสามารถทนต่อการกัดกร่อนด้วยกรดเกลือได้ถึง 10 โมล/ลิตร มาเป็นวัสดุสำหรับก่อสร้างถังปฏิกรณ์ และมีจำนวนถังปฏิกรณ์เป็นจำนวนทั้งสิ้น 40 ถัง โดยมีถังสำหรับการสกัดตะกั่วเป็นจำนวน 20 ถัง ซึ่งมีความสามารถในการจัดการดินตะกอนได้ชั่วโมงละ 200 กิโลกรัม นอกนั้นเป็นถังปฏิกรณ์สำหรับ

การตกตะกอนเคมีในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ โดยมีกำหนดเวลาการบำบัดให้แล้วเสร็จภายในระยะเวลา 8 เดือน

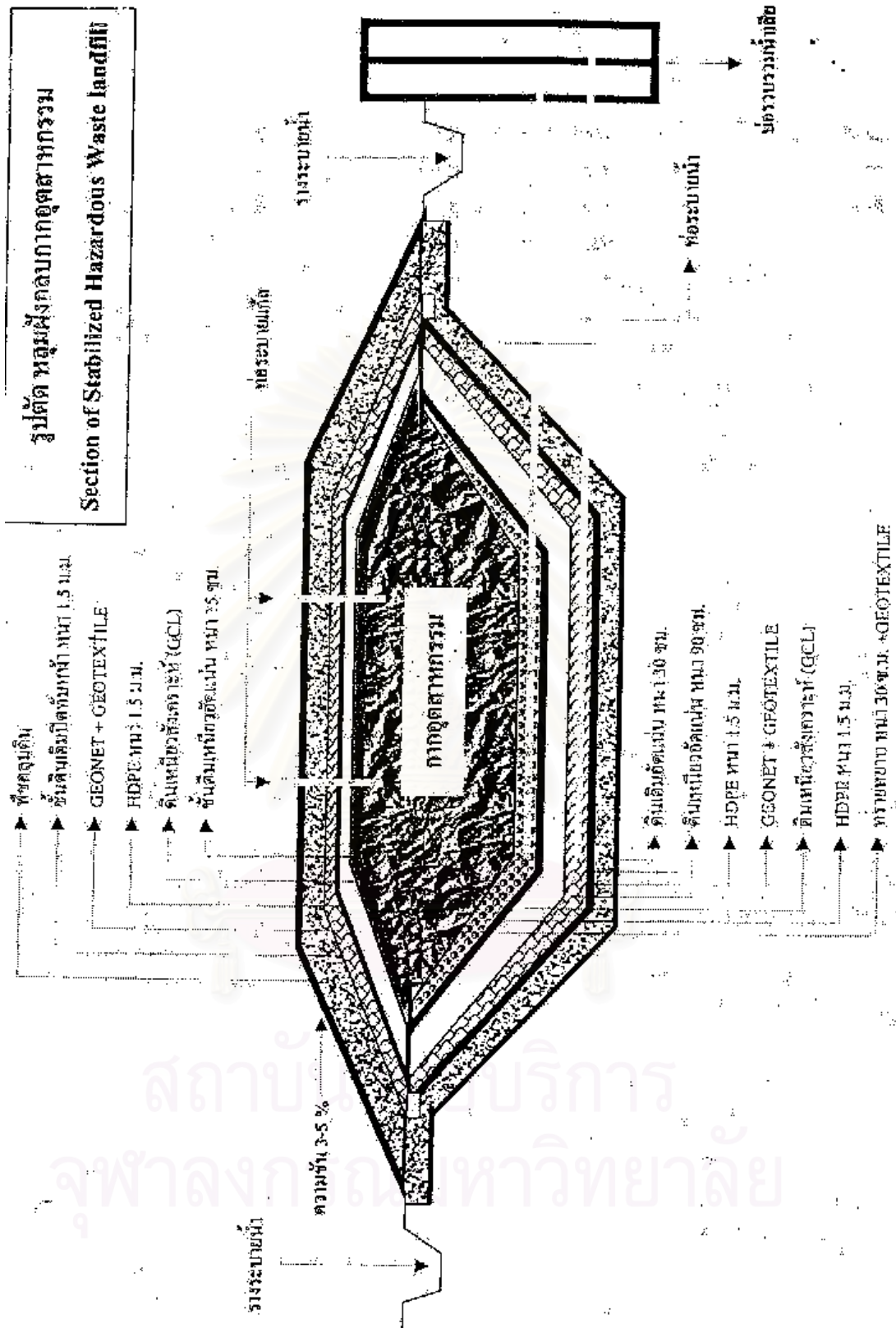
ราคาค่าใช้จ่ายรวมของการบำบัดด้วยวิธีการล้างสกัดด้วยสารละลายกรดเกลือ พร้อมทั้งกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น มีราคาค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 71,218,500 บาท หรือมีราคาค่าใช้จ่ายต่อตันเท่ากับ 4,750 บาท

5.5.4 กรณีการทำเสถียร/กักกันแข็งดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1

ในการทำเสถียร/กักกันแข็งดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 โดยคงที่ w/c ที่ 0.5 พบว่า ปริมาตรของกักกันแข็งที่เกิดขึ้นมีปริมาตรเพิ่มขึ้นถึง 12.85 เท่าของปริมาตรดินตะกอนจำนวน 15,000 ตัน หรือมีปริมาตรที่ต้องฝังลงในหลุมฝังกลบนิรภัยเท่ากับ 105,907 ลบ.ม. และมีน้ำหนักของกักกันแข็งทั้งหมดเท่ากับ 211,814 ตัน โดยคือน้ำหนักของกักกันแข็งที่ 2 ตัน/ลบ.ม.

สำหรับการก่อสร้างหลุมฝังกลบนิรภัยเพื่อฝังกลบกักกันแข็งในพื้นที่ปนเปื้อนนั้น มีลักษณะการก่อสร้างหลุมฝังกลบนิรภัยดังแสดงในรูปที่ 5.14 สำหรับการประเมินค่าก่อสร้างหลุมฝังกลบนิรภัยจะคิดพื้นที่การขุดหลุมเพื่อก่อสร้างหลุมฝังกลบเป็นรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส และมีความลึก 6 เมตร ซึ่งรวมความหนาของชั้นกันซึมและระบายน้ำหนา 1.8 เมตร มีความชันของผนังหลุมเท่ากับ 2:1 (ราบ:ฉาก) และมีทางระบายน้ำฝนสูงสุดที่คาบ 25 ปีขนาดกว้าง 0.5 เมตร ลึก 0.5 เมตร โดยมีความชันของทางระบายน้ำเท่ากับ 3% อยู่โดยรอบหลุมฝังกลบนิรภัย สำหรับปริมาตรของเสียเท่ากับ 105,907 ลบ.ม. นั้นต้องทำการก่อสร้างหลุมฝังกลบขนาดปากหลุมเท่ากับ 164 x 164 เมตร ก้นหลุมขนาด 140 x 140 เมตร ลึก 6 เมตร โดยมีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้นเท่ากับ 297,587,200 บาท หรือเท่ากับ 19,840 บาท/ตัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.14 รูปหน้าตัดของหลุมฝังกลบนิรภัย สำหรับฝังของเสียที่เป็นก้อนแข็ง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

5.5.5 กรณีการส่งดินตะกอนไปบำบัดยังศูนย์บำบัดที่ได้อนุญาต

ในกรณีที่ส่งดินตะกอนที่ปนเปื้อนไปฝังกลบยังศูนย์บำบัดที่ได้รับอนุญาตนั้น ทำการพิจารณาจากบริษัทที่ได้รับอนุญาตทำการฝังกลบของเสียที่ไม่ใช่ของเสียอันตรายจำนวน 2 บริษัท คือ บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด และ บริษัท Better World Green จำกัด สำหรับบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) ต้องคิดราคาค่าขนส่งจากโรงแต่งแร่ไปยังศูนย์แสมดำเพื่อทำการบำบัดก่อน เป็นระยะทาง 250 กิโลเมตร โดยคิดค่าใช้จ่ายที่ 2.75 บาท/ตัน/กิโลเมตร แล้วจึงทำการส่งต่อไปยังศูนย์ราชบุรี โดยคิดอัตราค่าขนส่งคงที่เท่ากับ 228 บาท/ตัน เพื่อทำการฝังกลบที่ศูนย์ราชบุรี โดยคิดอัตราค่าฝังกลบตันละ 874 บาท และส่วนการส่งดินตะกอนไปฝังกลบยังศูนย์ฝังกลับของบริษัท Better World Green นั้น ซึ่งมีศูนย์บำบัดอยู่ที่สระบุรี ต้องคิดราคาค่าขนส่งจากโรงแต่งแร่ไปยังสระบุรีมีระยะทางประมาณ 400 กิโลเมตร โดยคิดราคาค่าขนส่งเท่ากับ 1.2 บาท/ตัน/กิโลเมตร แล้วจึงนำไปรวมกับราคาค่าฝังกลบดินตะกอนอีกตันละ 3,000 บาท

สำหรับราคาค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการฝังกลบดินตะกอนยังศูนย์บำบัดของทั้งสองบริษัทได้แสดงในตารางที่ 5.12

ตารางที่ 5.12 สรุปราคาค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ

	ราคาค่าใช้จ่ายทั้งหมด (บาท)	ราคาค่าใช้จ่ายต่อตัน (บาท)
กรณีฝังกลบที่ GENCO	26,842,500	1,790
กรณีฝังกลบที่ Better World Green	52,200,000	3,480

จากการประเมินราคาเบื้องต้นสำหรับ 5 กรณีที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อหาวิธีการบำบัดที่เหมาะสมที่สุดทางด้านเศรษฐศาสตร์ ได้ทำการสรุปราคาสำหรับวิธีการบำบัดด้วยวิธีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5.13 ซึ่งเห็นได้ว่า วิธีที่ดีที่สุดในการคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียกมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีราคาค่าใช้จ่ายต่อตันน้อยที่สุด

ตารางที่ 5.13 ราคาค่าบริการบำบัดดินตะกอนในกรณีต่างๆในราคาต่อตัน

วิธีการบำบัด	ราคาค่าใช้จ่ายต่อตัน (บาท)
การฝังกลบโดยตรงในพื้นที่ปนเปื้อน	520
การคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก	150
การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลาย พร้อมทั้งกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น	4,750
การทำเสถียร/กักกันแข็งดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 พร้อมฝังกลบในหลุมฝังกลบนิรภัย	19,840
การส่งดินตะกอนไปฝังกลบที่ GENCO	1,790
การส่งดินตะกอนไปฝังกลบที่ Better World Green	3,480



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้ เป็นการหาวิธีการบำบัดดินตะกอนที่ปนเปื้อนด้วยตะกั่ว จากห้วยคลิตี้ ซึ่งประสบปัญหาการปนเปื้อนตะกั่วในดินตะกอนในท้องน้ำและท้องคุ้งของลำห้วยคลิตี้ บริเวณท้ายน้ำนับจากโรงแต่งแร่คลิตี้ จนถึงหมู่บ้านเสือโทน อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี

ผลการศึกษาสรุปได้ว่า

1. ดินตะกอน จากห้วยคลิตี้ ที่นำศึกษามีปริมาณตะกั่วทั้งหมดเฉลี่ยเท่ากับ 75.37 ก./กก. และมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดเท่ากับ 2.84 มก./ล. ตามวิธีที่ระบุไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540 ดังนั้นดินตะกอนนี้จึงมิได้จัดเป็นของเสียอันตราย เนื่องจากมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดน้อยกว่า 5.0 มก./ล. แต่จัดเป็นดินตะกอนปนเปื้อนด้วยตะกั่ว เพราะว่ามีปริมาณตะกั่วทั้งหมดสูงเกินกว่าเกณฑ์พื้นฐานโลหะหนักในดินของประเทศไทย (กรมวิชาการเกษตร ,2542) ที่ระบุว่า ปริมาณตะกั่วไว้ที่ 55 มก./กก. และจากวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวของตะกั่วในแต่ละช่วงอนุภาคของดินตะกอน พบว่ามีปริมาณตะกั่วสูงเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดไว้ที่ 55 มก./กก. ทั้งสิ้น ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการคัดแยกดินตะกอนบางส่วนออกไปเพื่อทำการฝังกลบหรือนำไปใช้เพื่อใช้ในด้านเกษตรกรรมได้ จึงจำเป็นต้องทำการบำบัด/กำจัดดินตะกอนเหล่านี้ ให้ถูกต้องตามหลักวิชาการ
2. การคัดแยกดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก สามารถทำการคัดแยกดินตะกอนบางส่วน (ตะกอนตะกั่ว) เพื่อนำกลับไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตหัวแร่ตะกั่วคาร์บอนेट ซึ่งสามารถกำจัดดินตะกอนได้ถึงร้อยละ 47.3 ของปริมาณดินตะกอนทั้งหมด ส่วนดินตะกอนที่เหลือ เนื่องจากไม่สามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตหัวแร่ตะกั่วได้ และมีปริมาณตะกั่วทั้งหมดสูงถึง 46.23 ก./กก. ซึ่งสูงกว่าเกณฑ์พื้นฐาน ที่กำหนดไว้ที่ 55 มก./กก. จึงไม่สามารถนำไปใช้ด้านเกษตรกรรมได้ และเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องฝังดินตะกอนส่วนนี้ไว้ในหลุมฝังกลบ
3. การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน พบว่า
 - 3.1 สารละลายกรดเกลือที่ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร มีความเหมาะสมในการสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนได้ดีกว่า สารละลายโซดาไฟที่ความเข้มข้น 0.1 โมล/ลิตร และน้ำประปา
 - 3.2 สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลายกรดเกลือ คือ ที่ความเข้มข้น 0.2 โมล/ลิตร ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที อัตราส่วนสารละลาย

กรดเกลือต่อดินตะกอนที่ 50:1 โดยน้ำหนัก และเวลาที่ใช้ในการสกัดเท่ากับ 60 นาที โดยมีร้อยละการสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนได้เท่ากับร้อยละ 90

4. ในการทำเสถียร/ก้อนแข็งดินตะกอน ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 พบว่า ปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 ที่เหมาะสมสำหรับการทำเป็นก้อนแข็งดินตะกอนและกากตะกอน คือ ที่ 7.5 เท่าและ 3.5 เท่าเทียบกับน้ำหนักดินตะกอนและกากตะกอน ตามลำดับ
5. การคิดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นด้วยวิธีการบำบัดต่าง ๆ ดินตะกอน พบว่า การคัดแยกดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียกมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีราคาค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด คือ 150 บาท/ตัน ส่วนการฝังกลบโดยตรงมีราคาของลงมา คือ 520 บาท/ตัน ถัดไปคือการส่งไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO) มีราคาค่าฝังกลบตันละ 1,790 บาท การส่งไปฝังกลบที่หลุมฝังกลบของบริษัท Better World Green จำกัดมีราคาค่าฝังกลบตันละ 3,480 บาท การล้างสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยสารละลาย พร้อมทั้งกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น มีราคาค่าบำบัดตันละ 4,750 บาท และสุดท้ายการทำเสถียร/ก้อนแข็งดินตะกอนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 มีราคาค่าบำบัดตันละ 19,840 บาท

ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาวิธีการคัดแยกตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยวิธีทางกายภาพวิธีอื่น อันได้แก่ การคัดแยกด้วยไฟฟ้า หรือการลอยแร่ ควบคู่กับการคัดแยกดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก เพื่อแยกดินตะกอนสะอาดออกดินตะกอนปนเปื้อนอีกที
2. ควรศึกษาสารเคมีเติมแต่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมการสกัดโลหะมาใช้ในการล้างสกัด เพื่อลดต้นทุนการก่อสร้างถึงปฏิกรณ์ให้มีจำนวนน้อยลงและมีอัตราการสกัดเพิ่มขึ้น
3. ควรศึกษาการแยกตะกั่วออกจากสารละลายที่ใช้ในการล้างสกัด เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสีย แทนที่จะทำการตกตะกอนทางเคมีก่อนการทำเสถียร/ก้อนแข็ง แล้วจึงนำไปฝังกลบยังหลุมฝังกลบนิรภัย
4. ควรศึกษาหาวิธีการบำบัดตะกั่วออกจากน้ำทิ้ง ที่มีประสิทธิภาพดีกว่าการตกตะกอนผลึกในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ ซึ่งมีข้อเสียในเรื่องค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงในการกำจัดตะกั่วให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์และซัลไฟด์ และกลิ่นที่เกิดจากก๊าซไข่เน่าที่เกิดจากการกำจัดตะกั่วให้อยู่ในรูปซัลไฟด์
5. ควรศึกษากลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดจากปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ว่าได้ไปทำปฏิกิริยากับตะกั่วในก้อนแข็งอย่างไร เกิดเป็นสารประกอบตัวใด เพื่อใช้อธิบายลักษณะการชะละลายของตะกั่วในน้ำสกัด ให้ถูกต้องยิ่งขึ้น

- ควรศึกษาว่าการเกิด Carbonation Attack ของก้อนแข็งที่ได้จากปูนซีเมนต์ ว่ามีส่วนช่วยในการยึดจับตะกั่วในก้อนแข็งหรือไม่ เพราะว่าจากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า การชะละลายก้อนแข็งของปูนซีเมนต์กับดินตะกอนปนเปื้อนตะกั่ว มีปริมาณตะกั่วอยู่ในน้ำสกัดน้อยที่สุด ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 9-11 และการเกิด Carbonation Attack นี้จะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของก้อนแข็งมีค่าอยู่ในช่วงดังกล่าว เนื่องจากจากเปลี่ยนรูปของปูนขาวในเนื้อปูนซีเมนต์ไปเป็นหินปูน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ควบคุมมลพิษ, กรม. เอกสารการเก็บข้อมูลตะกั่วในห้วยคลิตี พ.ศ.2542.
- พรสวรรค์ มหาโชคเลิศวัฒนา. การกำจัดตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแบตเตอรี่โดยวิธีตกตะกอนทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2529.
- วรการ ไม้เรียงและคณะ. ปฐพีกลศาสตร์: ทฤษฎีและปฏิบัติการ. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน, มิถุนายน 2525.
- วิชาการเกษตร, กรม. เอกสารวิชาการ : “ระดับเกณฑ์พื้นฐาน” ของการปนเปื้อนของโลหะหนักในดินประเทศไทย พ.ศ. 2542.
- วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี โรงพิมพ์ ห้างฯป.สัมพันธ์พาณิชย์, 2529.
- อรนุช ตฤณานนทกุล. การลดปริมาณตะกั่วและแคดเมียมโดยระบบกรองโดยตรงหลังเติมสารส้ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 2542.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว : กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, 2540.

ภาษาอังกฤษ

- Allen P.D. and Bhumik V.H.. Washing of Various Lead Compound from Contaminatd Soil Column. Journal of Environmental Engineering. November 1998.
- ANZECC. Guidelines for the Laboratory analysis of contaminated soils, August 1996.
- Assink J.W. and Rulkens. W.H. Cleaning Soils Contaminated with Heavy Metals. Environmental Technology. Proceeding of the Second European Conference on Environmental Technology, Amsterdam, The Netherland, June 22-26, 1987.
- CCME. Recommended Canadian Soil Quality Guidelines. 1999.
- Cline S.R. Soil Washing Fluid Efficiencies for the Treatment of Lead and Organically Contaminated Soil. Proceeding of the 48 th Annual Purdue University Industrial Waste Conferere. West Lafayette , Indiana 1993.

- Cullinane, M.J., jr., Jones, K.w., and Malone, P.G. Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, USEPA, Washington, D.C., June 1986.
- Elliott H.A., Brown G.A, Shields G.A., and Lynn J.H. . Restoration of Pb-polluted soils by EDTA extraction. 7th International Conference on heavy Metals in the Environment. Vol. II, 1989.
- Elliott H.A., Linn J.H., and Shields G.A.. Role of Fe in extractive decontaminated of Pb-polluted soils. Hazardous Waste & Hazardous Materials ,6(1989): 223-229.
- Fergusson J.E. . The Heavy Elements: Chemistry, Environmental Impact and Health Effects. Pergamon Press, 1990.
- Jackson P.J. and Sheiham I.. Calculation of Lead Solubility in Water. Technical Report TR152. Water Research Center, 1980.
- Keowpita K. Study of alternative filter media for removal lead from wastewater after chemical treatment. M.S. Thesis, Mahidol University, 1985.
- NEPC. National Environmental Protection (Assessment of Site Contamination) Measure : Guideline on Investigation Levels for Soil and Groundwater, December 1999.
- Neville A.M.. Properties of Concrete. Longman Group UK Ltd, 1981.
- NSW EPA. Environmental Guideline: Assessment, Classification & Management of Liquid & Non Liquid Waste. Web www.epa.nsw.gov.au.
- Pedall G. Lead-Contaminated Sediment at Huay Khil Ti, Thong Pha Phum, Kanchanburi. investigation, Risk assessment and Proposal for Cleanup., 1999.
- Raymond N. Yong. Geoenvironmental Engineering : Contaminated Soils, Pollutant Fate, and Mitigation. CRC Press LLC, 2001.
- Reed B.E, Moore R.E, and Cline S.R. Soil Flushing of a Sandy Loam Comtaminated with Pb(II), PbSO₄(s), PbCO₃(s), or Pb-Naphthalene: Column Result. Journal of Soil Contamination, 4(3):1995.
- Sanchez F., Barna B., Garrabrants A., Kosson D.S, and Moszkowicz P. Environmental assesment of a cement-base solidification soil comtaminated with lead. Chemical Engineering Scinece , 5(2000): 113-128
- Siradechathep J. Lead removal from wet cell battery factory wastewater by chemical treatment. M.S. Thesis, Mahidol University, 1981.

- Terry L. Rinehart , Ernest R. Blatchley , III and R. Mark Bricka . Investigation of Heavy Metal mobilization in Solidified/Stabilized Waste using Innovation Technique. Proceeding of the 48 th Annual Purdue University Industrial Waste Conferere. West Lafayette , Indiana 1993.
- Twin B.J.W, Senden M.M.G.and Tels M. Cleaning Soils Contaminated with Heavy Metals. Environmental Technology. Proceeding of the Second European Conference on Environmental Technology, Amsterdam, The Netherland, June 22-26, 1987.
- Wills B.A. Mineral Processing Technology. PERGAMON PRESS, 1988.
- Wiles C.C. and Mashni C.I. The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materails. Lewis Publishers 1995.
- Zemansky GM. Removing of trace metals during conventional water treatment. Journal of AWWA. 66(1974): 606-609

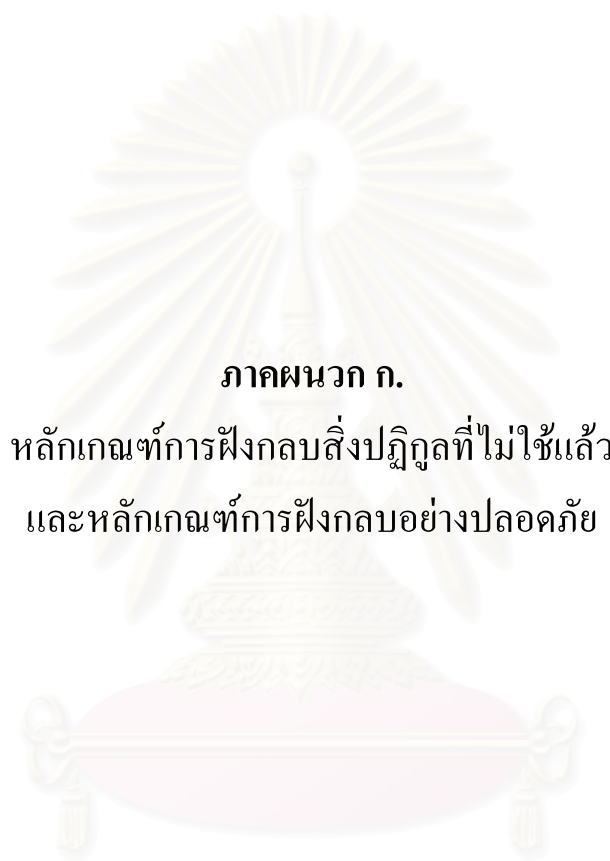


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.

หลักเกณฑ์การฟังกลบสิ่งปฏิภูทที่ไม่ใช่แล้ว
และหลักเกณฑ์การฟังกลบอย่างปลอดคัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลักเกณฑ์การฝังกลบสิ่งปฏิกูลไม่ใช่แล้ว ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ.2541)

1. ข้อกำหนดทั่วไป

ผู้ประกอบการใดที่จะดำเนินการฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (ของเสียอุตสาหกรรมไม่อันตราย) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 1 (พ.ศ.2541) จะต้องเตรียมรายละเอียดข้อมูลและปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ ดังต่อไปนี้

- (1) แผนผังหรือภาพถ่ายทางอากาศแสดงที่ตั้งและอาณาเขตของสถานที่ฝังกลบ และการใช้ที่ดินโดยรอบในรัศมี 500 เมตร โดยใช้มาตรฐานที่เหมาะสม
- (2) แผนภูมิแสดงขั้นตอนการฝังกลบ แหล่งกำเนิด ประเภท องค์ประกอบ และปริมาณของเสียอุตสาหกรรมไม่อันตรายที่จะนำเข้ามากำจัด และประมาณการปริมาณในอนาคต
- (3) สถานที่ฝังกลบและประเภทของวัสดุกลบทับมีอายุการใช้งานไม่ต่ำกว่า 5 ปี
- (4) เขตของการระบายน้ำทิ้ง (Zone of discharge) จะต้องไม่เกิน 100 เมตร จากขอบเขตของพื้นที่ที่หลุมฝังกลบของเสียหรือขอบเขตของสถานที่ฝังกลบแล้ว แต่ระยะใดใกล้กว่ากัน (รูปที่ 1)
- (5) สภาพทางธรณีวิทยาควรเป็นชั้นดินหรือชั้นหินตามธรรมชาติ ซึ่งอัตราการซึมผ่านของน้ำน้อยถึงน้อยมาก ($K \leq 1 \times 10^{-5}$ ซม./วินาที) ความหนาของชั้นดินหรือชั้นหินไม่น้อยกว่า 3 เมตร และมีการแผ่กระจายกว้างกว่าพื้นที่ฝังกลบของเสียไม่น้อยกว่าด้านละ 50 เมตร
- (6) สภาพทางอุทกวิทยา ให้สำรวจ อธิบายสภาพอุทกธรณีวิทยาของสถานที่ฝังกลบ ทิศทางของไหลของน้ำบาดาล คุณภาพน้ำ และระดับน้ำสูงสุดของน้ำใต้ดิน และน้ำผิวดินก่อนเริ่มโครงการ ลักษณะภูมิประเทศ ชั้นหินอุ้มน้ำ แหล่งน้ำสาธารณะ และของเอกชนภายในรัศมี 500 เมตร
- (7) สภาพทางธรณีวิทยาเทคนิค ให้สำรวจและอธิบายสภาพชั้นดิน น้ำใต้ดิน วิเคราะห์ฐานรากที่รองรับภาระและแรงกดลงจากการฝังกลบ สภาพการทรุดตัวภายหลังการฝังกลบ
- (8) ระดับก้นบ่อฝังกลบ จะต้องอยู่สูงกว่าระดับน้ำใต้ดินสูงสุดไม่น้อยกว่า 1 เมตร

2. ข้อกำหนดในการออกแบบ

- (1) จัดวางผังบริเวณแสดงรายละเอียดการใช้พื้นที่ขององค์ประกอบต่างๆ แผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วนไม่เกินกว่า 1:2,500 แสดงเส้นชั้นความสูง ความลาดเอียง ภาพตัดขวาง
- (2) ออกแบบองค์ประกอบต่างๆที่จำเป็นของสถานที่ผังกลบตามความเหมาะสมของขนาดพื้นที่ที่มีอยู่ เช่น บริเวณพื้นที่จัดเตรียมเป็นบ่อฝังกลบ ระบบถนนภายในและระบบจราจร อาคาร สำนักงานอาคารเครื่องชั่งน้ำหนักรถบรรทุก บ้านพักเจ้าหน้าที่ โรงซ่อมบำรุง พื้นที่จอดรถ พื้นที่ล้างรถบรรทุก เป็นต้น
- (3) ระบบป้องกันการปนเปื้อนมลพิษ

(3.1) ระบบกันซึม

วัสดุกันซึมต้องสร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเหมาะสมทนต่อการกัดกร่อนที่จะต้องสัมผัสกับน้ำชะของเสีย ทนความเสียหายจากการสัมผัสกับของเสีย ทนความดันชลศาสตร์ วัสดุกันซึมนี้ต้องติดตั้งบนพื้นหรือสภาพทางธรณีที่สามารถรองรับแรงกดดันจากน้ำหนักของเสีย และต้องติดตั้งให้ครอบคลุมดิน โดยรอบทั้งหมดที่จะต้องสัมผัสกับของเสีย หรือน้ำชะของเสีย วัสดุกันซึมเหล่านี้ให้ใช้ดินเหนียวบดอัดร่วมกับวัสดุสังเคราะห์ประเภทแผ่น โพลีเอททิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยทั่วไป การปูวัสดุกันซึมที่ผนังและก้นบ่อฝังกลบเป็นดังนี้

การใช้แผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียวร่วมกับดินเหนียวที่มีอัตราการไหลซึมต่ำกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} ซม./วินาที (Single geosynthetic liner with 1×10^{-7} cm/s low permeable soil) ประกอบด้วยชั้นแผ่นวัสดุสังเคราะห์ประเภท HDPE หนา 1.5 มม. ขึ้นไป ด้านบนของแผ่นวัสดุสังเคราะห์จะมีระบบรวบรวมและสูบน้ำชะของเสีย ส่วนชั้นล่างของวัสดุสังเคราะห์เป็นดินเหนียวบดอัดหนา 60 ซม. มีอัตราการซึมของน้ำอึดตัว น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1×10^{-7} ซม./วินาที หรือดินเหนียวสังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่า

(3.2) ท่อรวบรวมและสูบน้ำชะของเสีย

การออกแบบหลุมฝังกลบที่มีชั้นวัสดุกันซึมเพื่อป้องกันการไหลซึมของน้ำชะของเสียไปปนเปื้อนชั้นน้ำใต้ดิน ท่อรวบรวมและสูบน้ำชะของเสียต้องสร้างจากวัสดุที่มีความทนทานทางเคมีจากน้ำชะของเสีย และแข็งแรงพอที่จะป้องกันการพังทลายภายใต้แรงดันที่เกิดจากการกองทับของของเสียวัสดุกลบทับและเครื่องจักรที่ใช้ในการฝังกลบ ท่อรวบรวมน้ำชะของเสียนี้จะต้องอยู่เหนือชั้นวัสดุ

กันซึมโดยจะประกอบด้วยท่อ PVC หรือ HDPE ขนาด ϕ ไม่น้อยกว่า 4 นิ้ว เจาะรู หุ้มด้วยแผ่นกรองใยสังเคราะห์และวางในชั้นกรวดหรือทรายที่มีค่าอัตราการซึม ผ่านของน้ำ (หรือค่าความนำทางชลศาสตร์) ไม่น้อยกว่า 1×10^{-3} ซม./วินาที และมีความหนาไม่น้อยกว่า 30 ซม. ระยะห่างและความลาดเอียงของท่อรวบรวมน้ำชะ ของเสียนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าแรงดันน้ำชะของเสียที่ยอมให้เกิดขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วจะไม่เกิน 30 ซม. นอกจากนี้การออกแบบท่อรวบรวมน้ำชะของเสียจะต้องมีวิธีการทดสอบการอุดตันและวิธีทำความสะอาดท่อ (รูปที่ 3)

(3.3) ระบบรวบรวมและบำบัดน้ำชะของเสีย

(ก) การบำบัดน้ำชะของเสียในสถานที่ฝังกลบ จะต้องออกแบบควบคุม และบำบัดน้ำชะของเสีย ซึ่งรับมาจากท่อรวบรวมน้ำชะของเสียของ หลุมฝังกลบ สำหรับระบบบำบัดน้ำชะของเสีย จะต้องออกแบบใช้ เกณฑ์อย่างต่ำ ดังนี้

- ใช้วัสดุกันซึมป้องกันไม่ให้น้ำชะของเสียปนเปื้อนกับดินหรือซึม ลงดินได้ประเภทแผ่นวัสดุสังเคราะห์ชั้นเดียวหนาไม่น้อยกว่า 1.5 มม. กับดินที่มีอัตราการไหลซึมไม่มากกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที หนา 60 ซม.
- ปริมาตรของบ่อรวบรวมและบำบัดน้ำชะของเสียให้คำนวณถึง ปริมาณน้ำฝนที่ตกลงบนหลุมฝังกลบด้วย และมีระยะเพื่อ (Free Board) อย่างน้อย 60 ซม.
- คุณภาพน้ำทิ้งระบายสู่ภายนอกสถานที่ฝังกลบต้องอยู่ในเกณฑ์ มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม พรบ.โรงงาน พ.ศ.2535

(ข) การบำบัดน้ำชะของเสียภายนอกสถานที่ฝังกลบ จะต้องทำการ ออกแบบบ่อพักน้ำชะของเสีย หรือถังเก็บน้ำชะของเสีย (ตาม ข้อกำหนดในข้อ ก.) ก่อนที่จะขนส่งไปบำบัดภายนอกสถานที่ฝัง กลบ

- ถังรวบรวมน้ำชะของเสียเหนือพื้นดิน จะต้องเป็นถังที่ทนทานต่อ การกัดกร่อนของเหลวที่บรรจุ และต้องมีระบบเก็บกักฉุกเฉิน รวมทั้งการตรวจสอบเพื่อป้องกันการรั่วไหลออกจากถังเก็บ
- ถังรวบรวมน้ำชะของเสียใต้ดิน จะต้องเป็นถังผนังภายในและ ภายนอกมีระบบป้องกันการกัดกร่อน มีระบบเก็บกักฉุกเฉินและ การตรวจสอบรอยรั่วอย่างต่อเนื่อง โดยใช้แบบถังผนังสองชั้น

พร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดระดับน้ำระบบเตือนภัยและการปิดวาล์ว
อัตโนมัติ

(4) ระบบระบายก๊าซ (รูปที่ 4 และ 5)

สถานที่ฝังกลบจะออกแบบและติดตั้งระบบตรวจสอบ และระบายก๊าซจากหลุมฝังกลบ ส่วนใหญ่ได้แก่ ก๊าซมีเทนเพื่อป้องกันการระเบิดและไฟไหม้ และเพื่อป้องกันกลิ่นเหม็นรบกวน ระบบระบายก๊าซในสถานที่ฝังกลบจะต้องออกแบบเพื่อป้องกันความเข้มข้นของก๊าซมีเทน

- 1) มีค่าไม่เกินจุดระเบิดขั้นต่ำ (5% ของก๊าซมีเทน) ในบริเวณภายในหรือภายนอกของสถานที่ฝังกลบ
 - 2) มีค่าไม่เกินร้อยละ 25 ของจุดระเบิดขั้นต่ำ (1.25% ของก๊าซมีเทน) ภายในอาคารทั้งในและนอกสถานที่ฝังกลบ
 - 3) ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นที่รังเกียจในหรือนอกอาณาเขตสถานที่ฝังกลบ
- การควบคุมการระบายก๊าซจากบ่อฝังกลบของเสีย แบ่งออกเป็น 2 วิธี
- ก) การวางท่อหรือบ่อระบายก๊าซในแนวนอนหรือแนวตั้งของบ่อฝังกลบ เพื่อลดแรงดันของก๊าซและระบายสู่บรรยากาศโดยธรรมชาติเรียกว่า Passive control การวางตำแหน่งระยะห่างของบ่อหรือท่อในแนวตั้ง โดยทั่วไปใช้ระยะประมาณ 30-40 เมตร
 - ข) การวางท่อในแนวตั้งและติดตั้งอุปกรณ์ดูดก๊าซจากบ่อฝังกลบ เรียกว่า Active Control โดยมีจุดมุ่งหมายจะนำก๊าซที่เกิดขึ้นไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิง ในกรณีที่มีปริมาณก๊าซเกิดขึ้นมากหรือใช้กำจัดก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการเผาไหม้ (Flaring) ทั้งที่ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ จะต้องอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพอากาศ

กรณีของเสียอุตสาหกรรมไม่อันตรายที่ย่อยสลายได้ยากหรือไม่เกิดการเน่าเสียได้ง่าย เช่น พลาสติก ยาง ท่อนไม้ แก้ว เศษวัสดุก่อสร้าง เป็นต้น ไม่ต้องมีระบบระบายอากาศ

(5) ระบบจัดการน้ำฝนในสถานที่ฝังกลบ

ระบบจัดการน้ำฝนจะรวมถึงบ่อพักน้ำและทางระบายน้ำ ในการออกแบบอย่างน้อยที่สุดต้องสามารถป้องกันการระบายน้ำฝนสูงสุดจากเหตุการณ์พายุฝนในคาบ 25 ปี ไหลลงไปสู่พื้นที่ที่ฝังกลบที่ยังไม่ปิด (ต้องสามารถรวบรวมและควบคุมปริมาณน้ำท่าจากเหตุการณ์พายุฝนในคาบ 25 ปี ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง) และต้องป้องกันไม่ให้น้ำฝนผสมกับน้ำชะของเสีย

(6) พื้นที่กันชน (Buffer zone)

จะต้องออกแบบพื้นที่ถนนโดยรอบอาณาเขตของสถานที่ฝังกลบ มีระยะห่างจากแนวเขตที่ดินไม่น้อยกว่า 25 เมตร เพื่อใช้ประโยชน์พื้นที่สำหรับถนน ระบายน้ำ การปลูกต้นไม้สลับแนวโดยเลือกพันธุ์ไม้ที่เหมาะสมในท้องถิ่นเพื่อปิดกั้นทางสายตา และลดปัญหากลิ่นสู่ภายนอก (รูปที่ 6)

(7) การออกแบบการปิดทับหลุมฝังกลบ

- 1) ในการออกแบบชั้นของเสียเหนือระดับพื้นดิน โดยเฉพาะความสูงของชั้นของเสียต้องคำนึงถึงด้านทัศนียภาพของสถานที่ ความมั่นคงแข็งแรงและความปลอดภัยในการปฏิบัติงานด้วย
- 2) การออกแบบความลาดชันด้านข้างชั้นสุดท้าย ความลาดชันด้านข้างของหน่วยกำจัดเหนือดินจะไม่ชันมากกว่า 3 ต่อ 1 ในแนวราบต่อแนวตั้งและต้องมีการระบายน้ำเพื่อควบคุมการกัดกร่อนของวัสดุปกคลุมชั้นสุดท้าย
- 3) การออกแบบการปิดทับชั้นสุดท้าย

การปิดทับชั้นสุดท้าย หรือชั้นปกคลุมหลุมฝังกลบ ซึ่งต้องมีการดำเนินการ เป็นการป้องกันไม่ให้น้ำฝนไหลซึมเข้าหลุมฝังกลบ หลังจากการฝังกลบกากของเสียเต็มแล้ว โดยเรียงลำดับจากด้านล่างขึ้นบนตามลำดับ

1. ชั้นดินเหนียว ที่มีค่าอัตราการซึมผ่านของน้ำน้อยกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที ($K \leq 1 \times 10^{-7}$ ซม./วินาที) หนาไม่น้อยกว่า 45 ซม.
2. ชั้นวัสดุกันซึมสังเคราะห์ (HDPE) ที่หนาไม่ต่ำกว่า 1.0 มม. ปิดคลุมขอบบ่อหลุมฝังกลบ
3. ชั้นทราย ที่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ดีไม่ต่ำกว่า 1.0×10^{-3} ซม./วินาที หนาไม่น้อยกว่า 30 ซม.
4. ชั้นดินธรรมดา ที่เหมาะสมต่อการปลูกพืช หนาไม่น้อยกว่า 60 ซม. และปลูกพืชคลุมดินชนิดรากสั้น หรือวัสดุอื่นๆที่สามารถป้องกันการกัดเซาะพังทลายของชั้นปกคลุมหลุมฝังกลบได้ถาวร

3. ระบบตรวจสอบการรั่วไหลของหลุมฝังกลบ

- (1) ผู้ประกอบการจะต้องทำการสุ่มตัวอย่างและวิเคราะห์น้ำจากบ่อดิตตามตรวจสอบ (รูปที่ 7) น้ำผิวดิน น้ำชะของเสีย และน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียปีละ 2 ครั้งเป็นอย่างน้อย โดยอยู่ในช่วงต้นฤดูฝน และฤดูแล้ง และจัดทำรายงานที่พร้อมจะให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องตรวจสอบได้ตลอดเวลา
- (2) การติดตามตรวจสอบน้ำใต้ดิน จะต้องติดตั้งบ่อดิตตามตรวจสอบเพื่อตรวจวัดการรั่วไหลของน้ำชะของเสีย ที่อาจมีต่อชั้นหินอุ้มน้ำบนสุดภายในเขตระบายทิ้งอย่างน้อย 3 บ่อ ตั้งอยู่ในทิศทางลาดเอียงลง (Downgradient) ของการไหลน้ำใต้ดิน 2 บ่อ และในทิศทางลาดเอียงขึ้น (Upgradient) ของการไหลของน้ำใต้ดิน 1 บ่อ ระยะของบ่อเฝ้าตรวจจะห่างกันไม่เกิน 150 เมตร ในทิศทางลาดเอียงลงของการไหลน้ำใต้ดิน และไม่เกิน 40 เมตร ในทิศทางลาดเอียงขึ้นของการไหลของน้ำใต้ดิน
- (3) การติดตามตรวจสอบน้ำผิวดิน จะทำการตรวจสอบน้ำผิวดินที่อาจจะได้รับผลกระทบจากการระบายสิ่งปนเปื้อนในลำน้ำนิ่ง จะกำหนดจุดตรวจไม่น้อยกว่า 1 จุด ในบริเวณที่ใกล้สถานที่ฝังกลบ สำหรับในลำน้ำที่ไหลจะตรวจเหนือน้ำและท้ายน้ำของสถานที่ฝังกลบ
- (4) การสุ่มตัวอย่างน้ำชะของเสียและน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำทิ้ง จุดการสุ่มตัวอย่างน้ำชะของเสียจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ลักษณะที่เป็นตัวแทนของน้ำชะของเสียก่อนที่ลักษณะสมบัติของน้ำชะของเสีย สำหรับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียให้สุ่มตัวอย่างจากจุดที่ระบายน้ำทิ้งสู่ภายนอกสถานที่ฝังกลบของเสีย
- (5) ความถี่การสุ่มตัวอย่างตามปกติและข้อกำหนด จะต้องมีการสุ่มตัวอย่างวิเคราะห์และคุณภาพน้ำก่อนเริ่มโครงการ ทั้งน้ำใต้ดินและน้ำผิวดินตามดัชนีที่กำหนด หลังจากการดำเนินการสถานที่ฝังกลบแล้วจะสุ่มตัวอย่างและวิเคราะห์คุณภาพน้ำของน้ำชะของเสีย น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย น้ำใต้ดิน และน้ำผิวดิน
- (6) การประเมินผลและปฏิบัติการแก้ไข ถ้าความเข้มข้นของดัชนีคุณภาพสูงกว่าคุณภาพน้ำก่อนเริ่มโครงการ หรือสูงเกินกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำของทางราชการที่เกี่ยวข้อง จะต้องตรวจสอบและค้นหาสาเหตุ รวมทั้งมาตรการแก้ไขโดยเร็วที่สุด พร้อมทั้งจัดทำรายละเอียดของปัญหาและสรุปผลการแก้ไขไว้ทุกครั้ง มาตรฐานคุณภาพน้ำของทางราชการที่เกี่ยวข้อง มีดังนี้

น้ำใต้ดิน	มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม ออกตามความใน พรบ.น้ำบาดาล
น้ำผิวดิน	มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ตามประกาศคณะ กรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ
น้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย	มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตาม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ออกตามความใน พรบ. โรงงาน พ.ศ.2535

(7) ดัชนีคุณภาพน้ำ การเฝ้าตรวจคุณภาพน้ำจะตรวจทั้งดัชนีคุณภาพในสนามและใน
ห้องปฏิบัติการ โดยจะต้องตรวจสอบ

(ก) ดัชนีคุณภาพน้ำใต้ดิน

ดัชนีคุณภาพในสนาม ได้แก่ ระดับน้ำสถิตในบ่อนก่อนการสูดออก
ความนำไฟฟ้าจำเพาะ ความเป็นกรด-ด่าง ความขุ่น อุณหภูมิ สี

ดัชนีคุณภาพในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ปริมาณสารทั้งหมด (Total
Solids) คลอไรด์ ซัลเฟต ฟลูออไรด์ ไนเตรท ความกระด้างทั้งหมด ความ
กระด้างถาวร (Non Carbonate Hardness) ซีโอดี เหล็ก แมงกานีส
แมกนีเซียม อาร์เซนิก โซดาไนต์ ทองแดง สังกะสี โครเมียมเฮกซะวาเลนต์
ตะกั่ว นิกเกิล แคดเมียมปรอท โคลิฟอร์มทั้งหมด ฟิคัลโคลิฟอร์ม

(ข) ดัชนีคุณภาพน้ำผิวดิน

ดัชนีคุณภาพในสนาม ได้แก่ ความนำไฟฟ้าจำเพาะ ความเป็นกรด-
ด่าง ออกซิเจนละลายน้ำ ความขุ่น อุณหภูมิ สี

ดัชนีคุณภาพในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ สารแขวนลอย สารละลาย
ทั้งหมด (Total Dissolve Solids) บีโอดี ซีโอดี แอมโมเนีย ไนเตรท อาร์เซนิก
โซดาไนต์ ฟีนอล ทองแดง นิกเกิล สังกะสี แคดเมียม โครเมียมเฮกซะวา
เลนต์ ตะกั่ว ปรอท โคลิฟอร์มทั้งหมด ฟิคัลโคลิฟอร์ม

(ค) ดัชนีคุณภาพน้ำชะของเสียและน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย

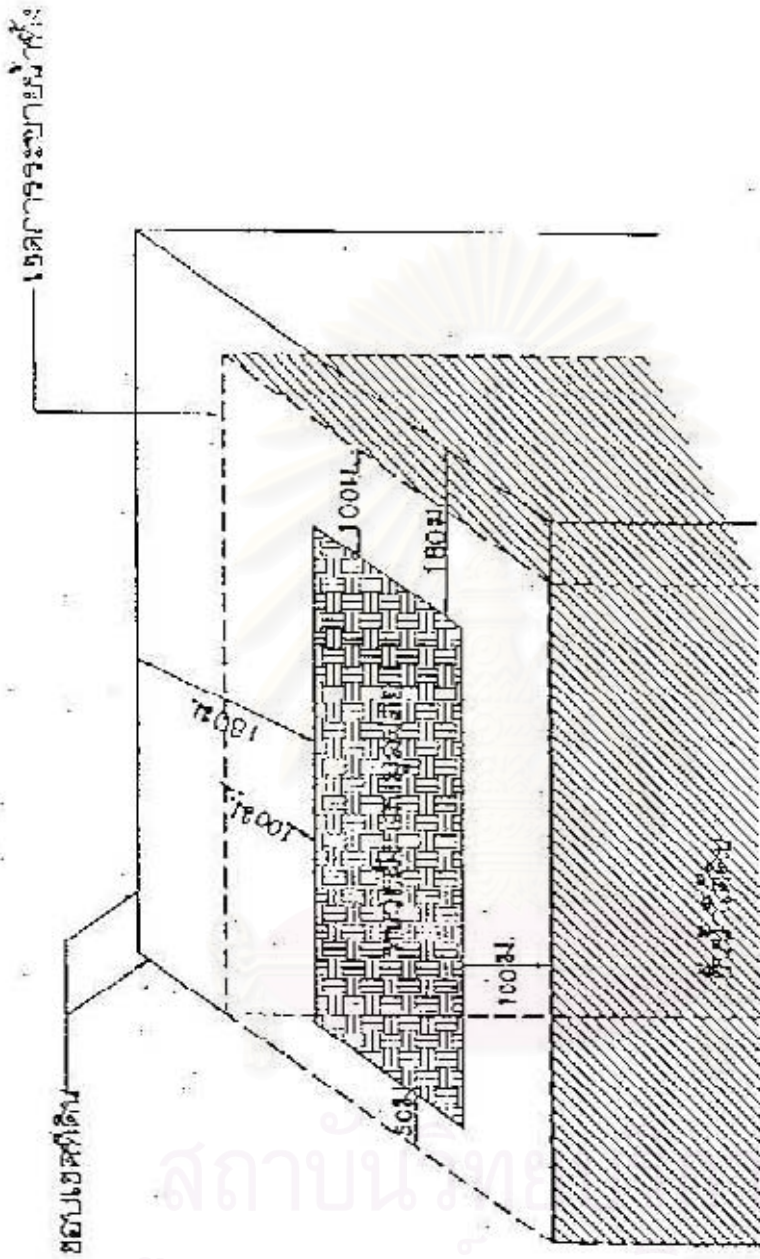
ดัชนีคุณภาพในสนาม ได้แก่ ความนำไฟฟ้าจำเพาะ ความเป็นกรด-
ด่าง อุณหภูมิ สี

ดัชนีคุณภาพในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ สารแขวนลอย สารละลาย
ทั้งหมด ความเป็นกรด-ด่างทั้งหมด คลอไรด์ ซัลเฟต บีโอดี ซีโอดี ไนเตร
ท แอมโมเนีย ฟอสเฟตทั้งหมด อาร์เซนิก โซดาไนต์ ฟีนอล ทองแดง
นิกเกิล สังกะสี แคดเมียม โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ ตะกั่ว ปรอท แมงกานีส
โซเดียม

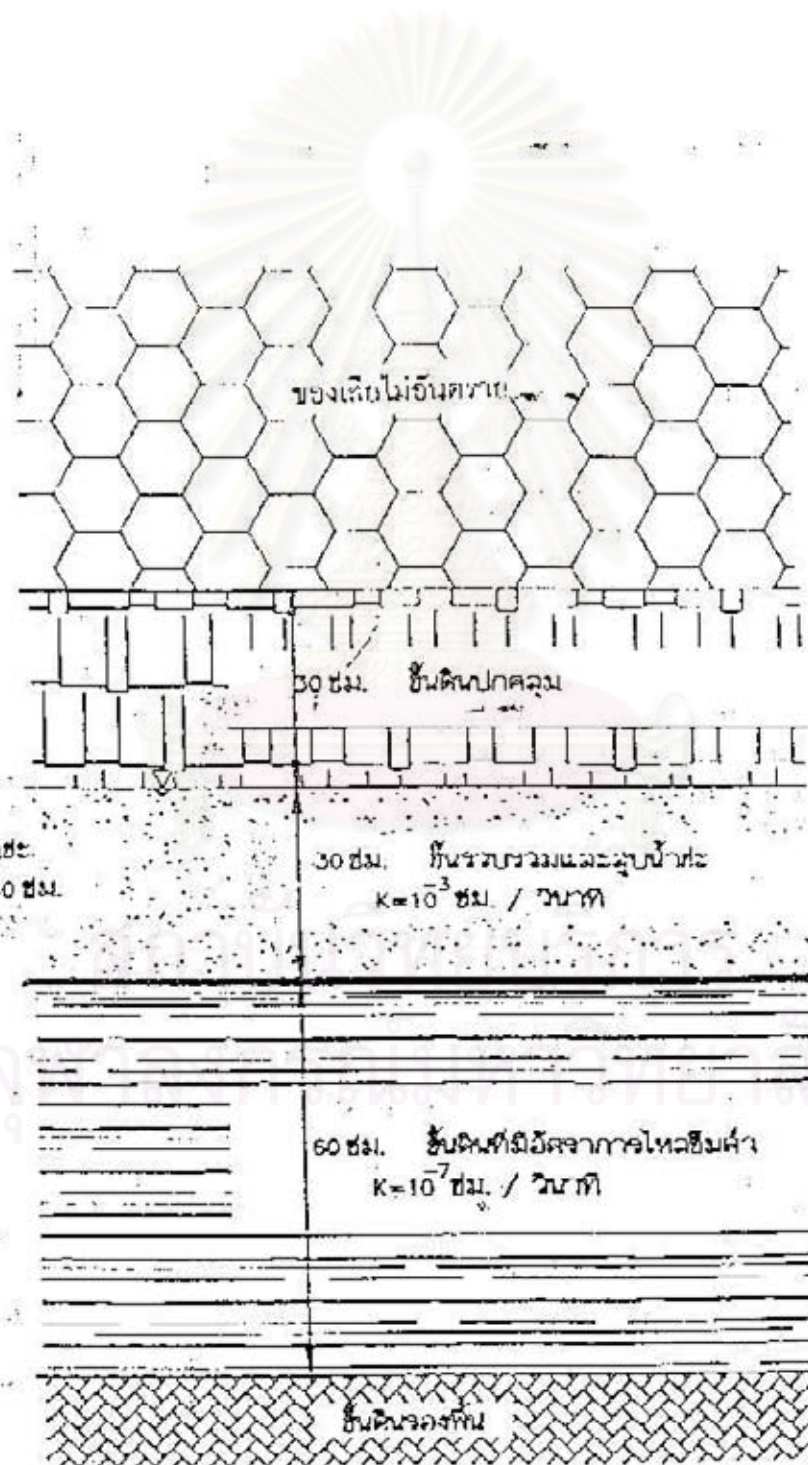
- (8) การติดตามตรวจสอบก๊าซสำหรับสถานที่ฝังกลบที่รับของเสียประเภทสารอินทรีย์
- (ก) ตำแหน่งจุดตรวจสอบก๊าซ -ภายนอกอาคารในบริเวณแนวอาณาเขตทั้ง 4 ด้านของสถานที่ฝังกลบอย่างน้อย 4 จุด และภายในอาคารของสถานที่ฝังกลบอย่างน้อย 1 จุด
 - (ข) ทำการสุ่มตัวอย่างตรวจวัดก๊าซอย่างน้อยปีละ 2 ครั้ง
 - (ค) ทำการตรวจวัดก๊าซมีเทน โดยค่าที่ตรวจวัดได้ต้องไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้ในข้อ (4) ระบบระบายก๊าซ

4. การดูแลระยะยาว

- (1) ช่วงเวลาดูแลระยะยาว จะต้องติดตามตรวจสอบและดูแลความมั่นคงและประสิทธิภาพของการปิดทับชั้นสุดท้ายกับส่วนประกอบอื่นของสถานที่ต่อไปอีกไม่น้อยกว่า 10 ปี นับจากวันปิดเป็นทางการ
- (2) ช่วงเวลาการดูแลระยะยาวอาจลดลงได้ ถ้าสถานที่ฝังกลบนั้นดำเนินการสอดคล้องตามมาตรฐาน มีระบบควบคุมน้ำชะของเสียและแผ่นวัสดุกันซึม มีการปิดด้วยวัสดุกลบทับชั้นสุดท้ายที่เหมาะสม มีการปลูกพืชปกคลุม และมีการติดตั้งระบบติดตามตรวจสอบ และถ้าภายในระยะเวลา 10 ปี หลังการปิดคุณภาพน้ำในระบบติดตามตรวจสอบไม่เกินค่ามาตรฐาน นอกจากนี้จะต้องไม่มีการกัดเซาะชั้นปกคลุมให้เสียหาย และการยุบตัวของของเสียสิ้นสุดลงแล้ว
- (3) การตัดแปลงแผนการติดตามตรวจสอบน้ำใต้ดิน อาจมีการตัดแปลงแก้ไขแผนการติดตามตรวจสอบน้ำใต้ดินเพื่อยกเลิกดัชนีคุณภาพตัวในตัวหนึ่งที่ระบุตามข้อกำหนดการติดตามตรวจสอบคุณภาพน้ำและน้ำชะของเสีย ถ้าการสุ่มตัวอย่างและวิเคราะห์น้ำชะของเสียและน้ำใต้ดินอย่างสม่ำเสมอสำหรับดัชนีคุณภาพน้ำ ปรากฏว่าไม่พบดัชนีคุณภาพในน้ำชะของเสียหรือบ่อน้ำใต้ดินหรือจุดน้ำผิวดินในระยะเวลาการฝังกลบ
- (4) การทดแทนเครื่องมือการติดตามตรวจสอบ ถ้าอุปกรณ์ใดๆตามแผนการติดตามตรวจสอบเกิดความเสียหาย จะต้องหามาทดแทนภายใน 60 วัน



รูปที่ 1 เขตของการระบายน้ำทิ้ง (ZONE OF DISCHARGE)

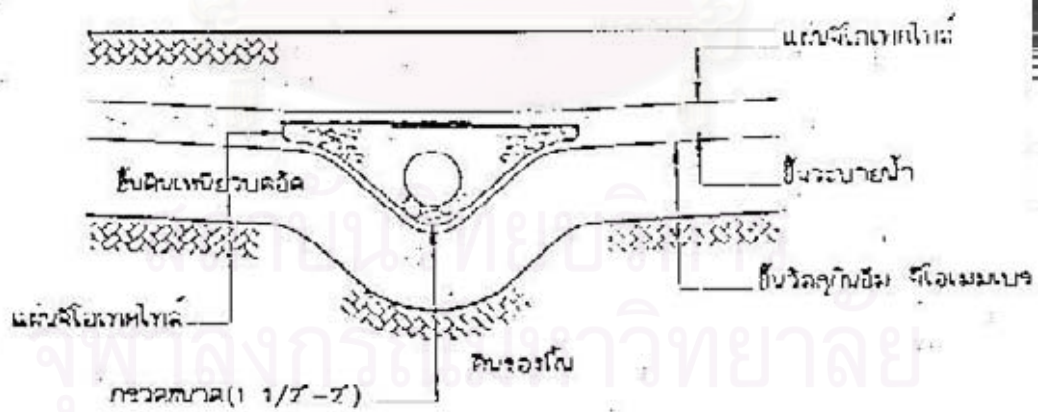


แนวสันน้ำหยาบ
 สูงสุด = 30 ซม.

1.5 ม.ป.ค.

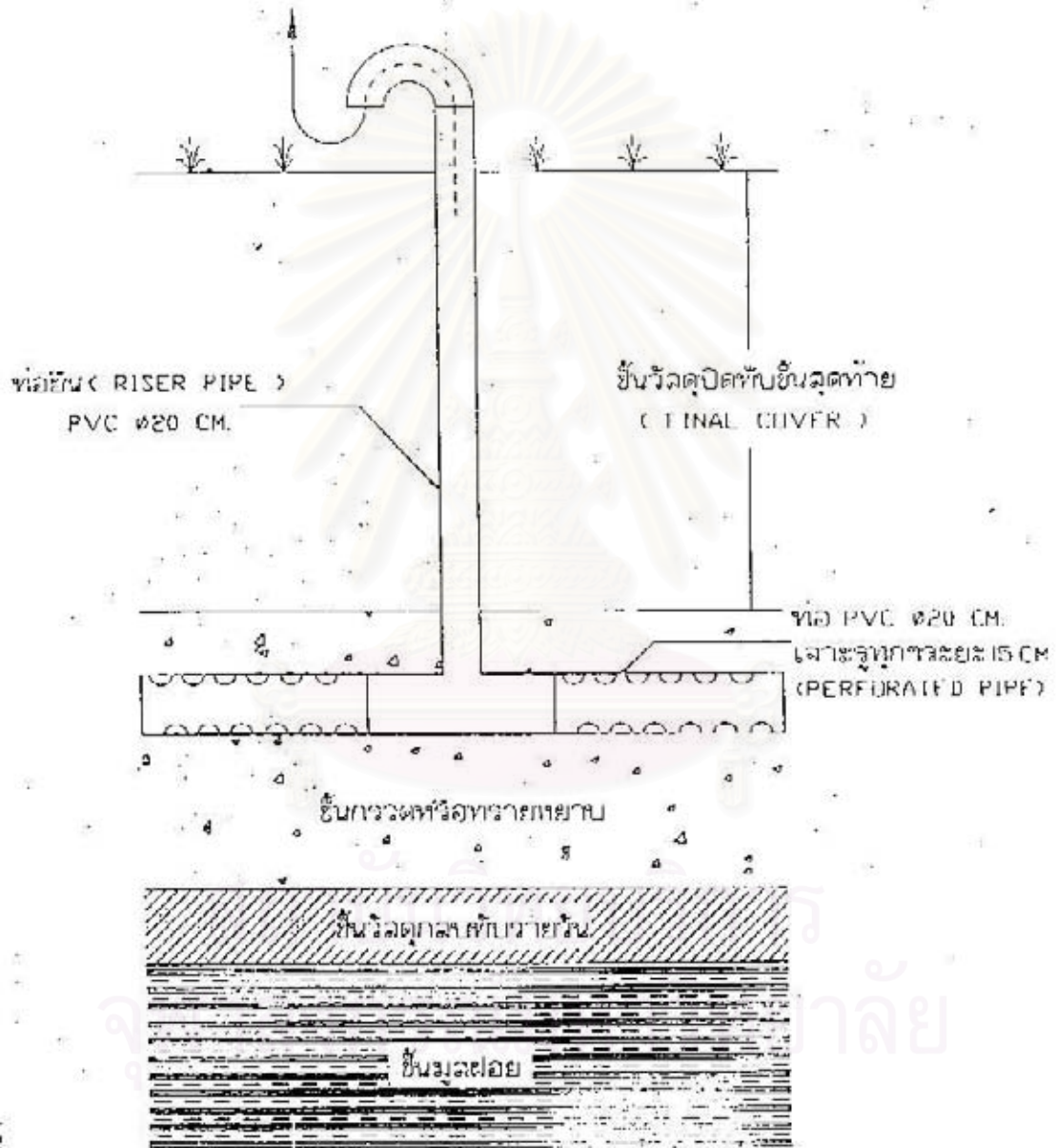


ทศกรรรมน้ำชะ

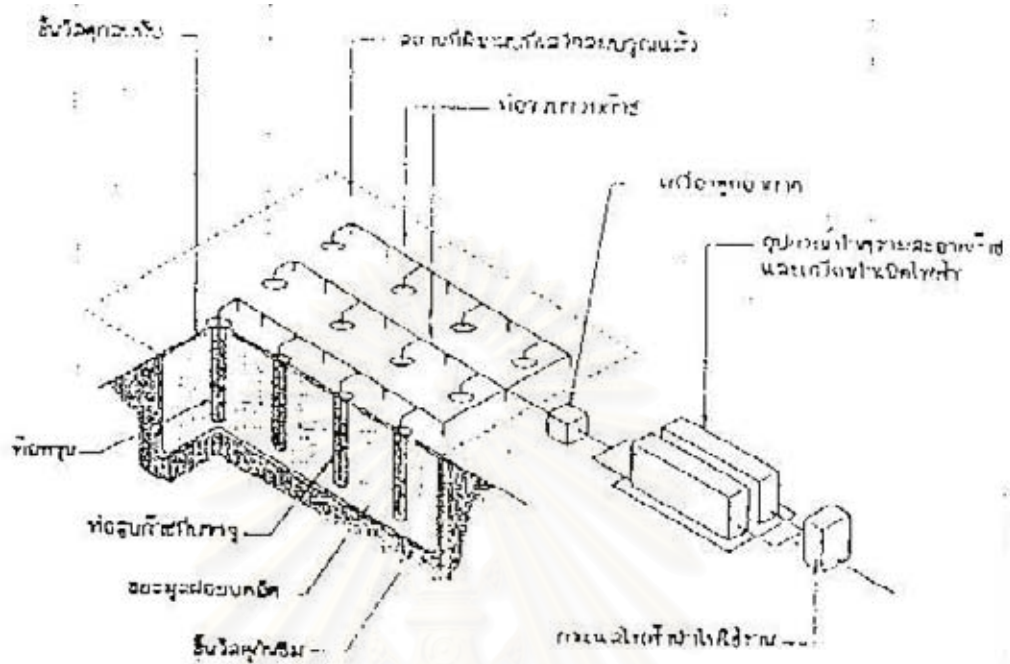


รูปที่ 3 รายละเอียดของทำจบบรรณน้ำชะ

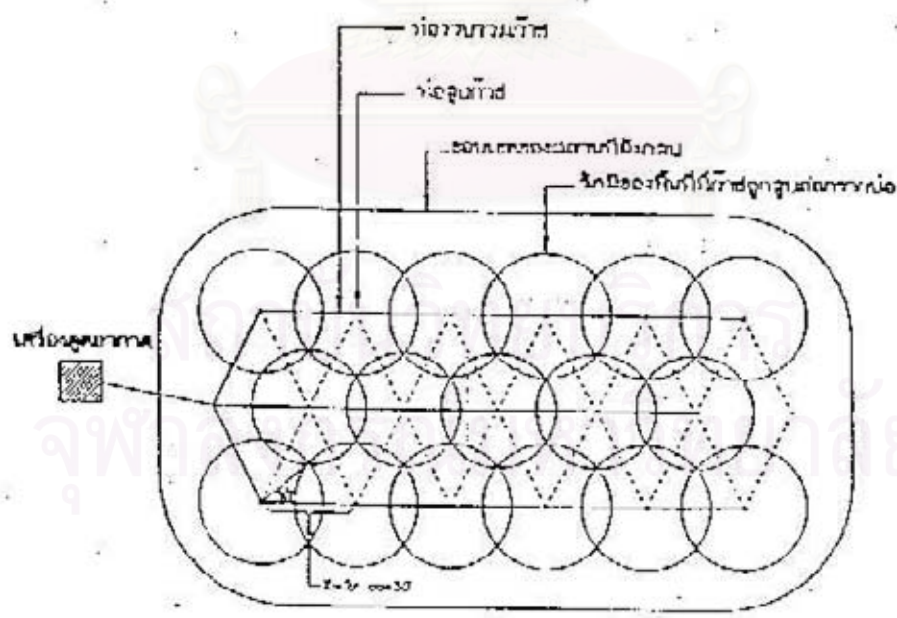
ระบายน้ำที่ขุดออกสู่อากาศหรือระบายลงไปในใต้ดินหรือโยนทิ้ง



รูปที่ 4 ตัวอย่างท่อระบายน้ำจากสถานที่ฝังกลบ



ระบบการนำน้ำจากสถานที่ฝังกลบไปใช้ประโยชน์ โดยใช้บ่อเก็บน้ำผิวดิน



รูปที่ 5 ลักษณะการวางท่อระบายน้ำแบบสายกรงสี่เหลี่ยมทำในดินที่มีชั้นดิน

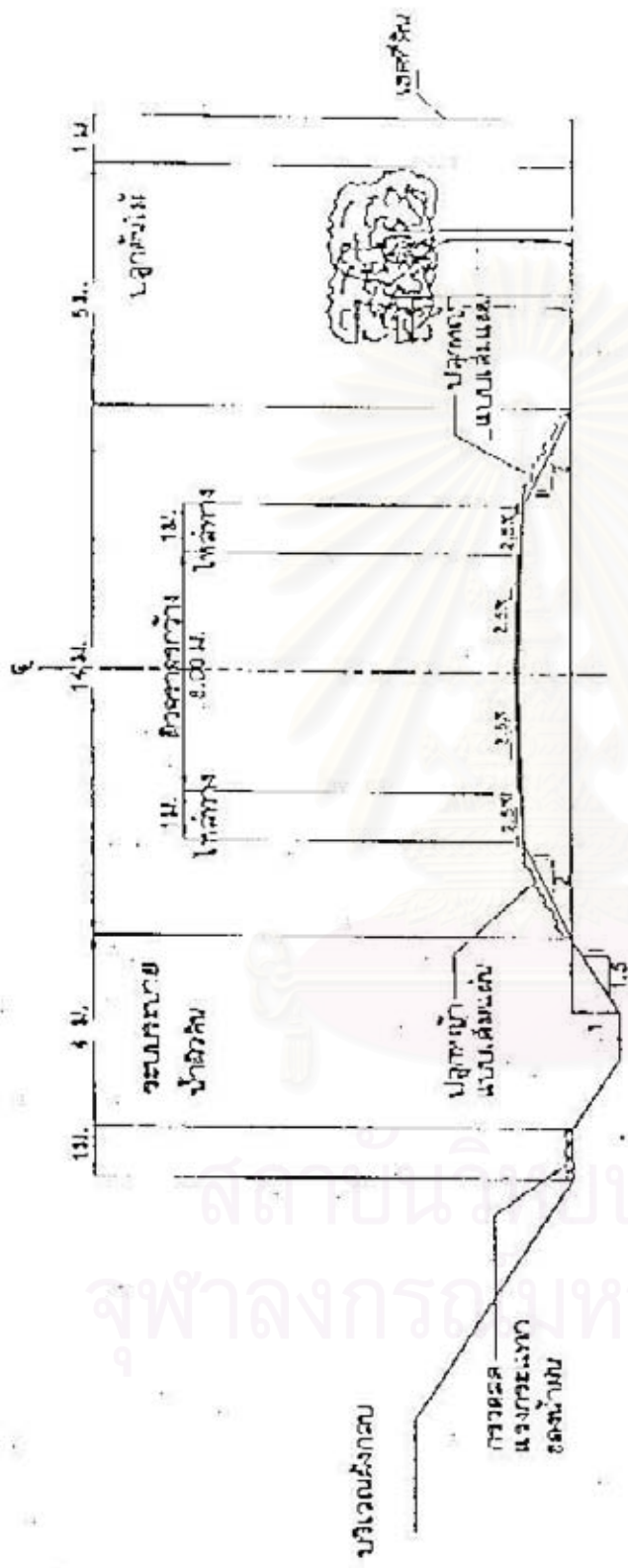
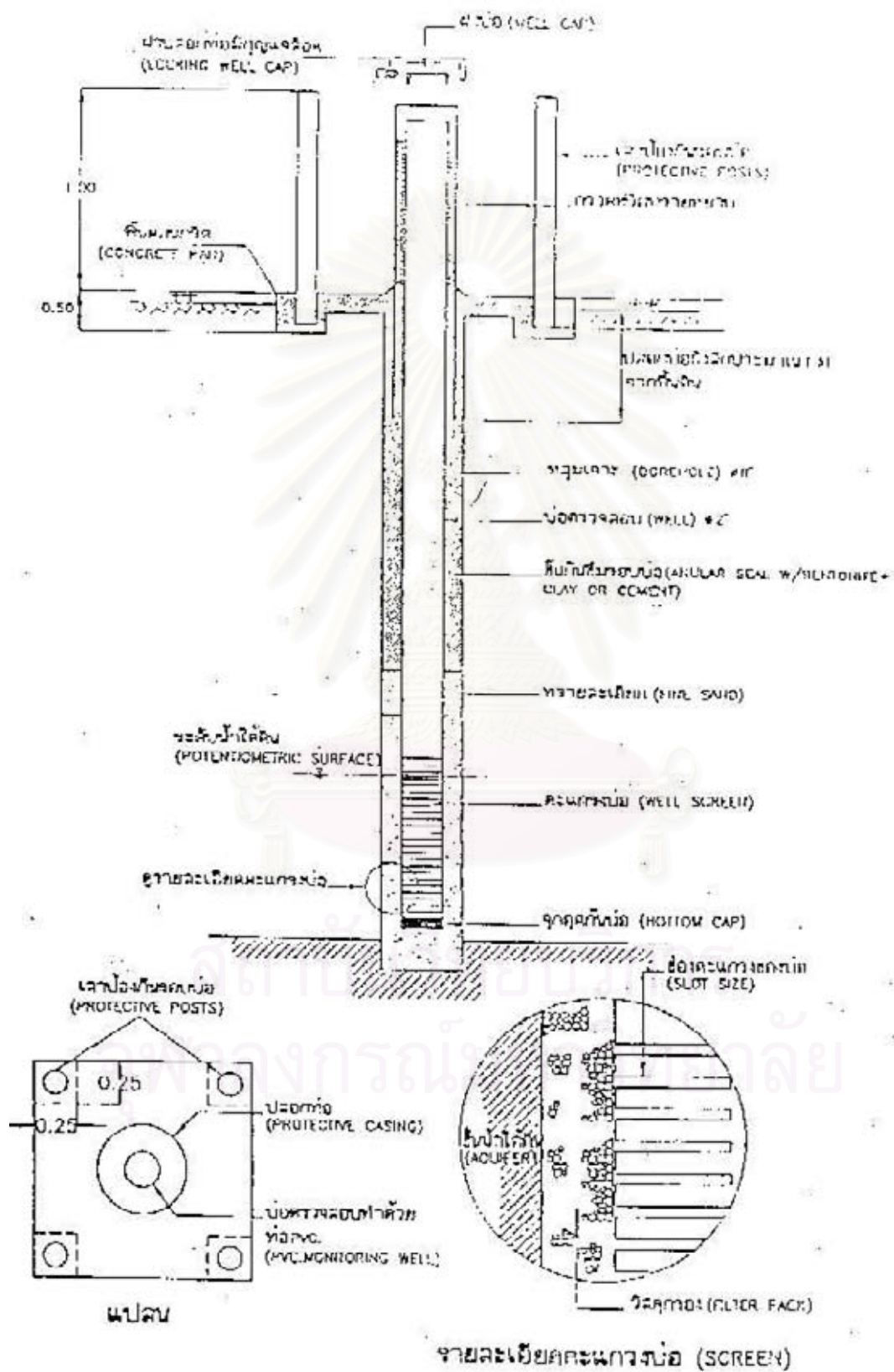


Figure 6 Fire Protection Buffer Zone



รูปที่ 7 รายละเอียดของบ่อตรวจวัดคุณภาพน้ำ

หลักเกณฑ์การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfilling)
สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เป็นของเสียอันตราย (Industrial hazardous wastes)
ซึ่งผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรมาแล้ว

1. ลักษณะที่ตั้งของหลุมฝังกลบ

- 1.1 หลุมฝังกลบ จะต้องมียกเว้นทางธรณีวิทยาที่เหมาะสม โดยต้องเป็นพื้นที่ที่ไม่มีแหล่งแร่ที่มีค่าทางเศรษฐกิจอยู่ข้างใต้ ไม่มีรอยแตก หรือเป็นโพรงของหินชั้นล่าง มีความหนาของชั้นดินระหว่างฐานของหลุมฝังกลบกับระดับน้ำใต้ดินพอสมควร ระดับก้นหลุมฝังกลบ จะต้องอยู่สูงจากระดับน้ำใต้ดินสูงสุดอย่างน้อยไม่น้อยกว่า 1.5 เมตร (5 ฟุต) และระยะห่างระหว่างขอบนอกของหลุมฝังกลบกับแนวเขตที่ตั้งของสถานที่ฝังกลบต้องไม่ต่ำกว่า 33 เมตร (100 ฟุต) หรือตามที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม
- 1.2 ไม่เป็นพื้นที่ลุ่มหรือที่น้ำท่วมถึง ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำท่วมและอยู่ห่างจากแม่น้ำ ลำคลอง หรือแหล่งน้ำที่ใช้ประโยชน์ได้ ไม่น้อยกว่า 66 เมตร (200 ฟุต) หรือตามที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ทั้งนี้โดยคำนึงถึงสภาพและลักษณะทางธรณีวิทยา หรือมาตรการป้องกันอื่นๆประกอบ
- 1.3 อยู่ห่างจากเขตชุมชน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการหกหล่นฟุ้งกระจาย ปัญหาการจราจร ระหว่างการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว รวมทั้งปัญหาเรื่องฝุ่นและเสียงที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทำงาน

2. มีเนื้อที่กว้างขวางพอที่ใช้ฝังกลบได้นานตั้งแต่ 5 ปีขึ้นไป

3. การออกแบบและก่อสร้างหลุมฝังกลบหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ต้องได้รับการเตรียมอย่างน้อยดังต่อไปนี้

- 3.1 ก่อนฝังกลบ จะต้องมีการปูพื้น และด้านข้างหลุมฝังกลบ โดยใช้วัสดุที่ใช้ในการปู (Lining materials) นี้ ต้องมีความแข็งแรงและหนาเพียงพอที่จะทนต่อการรับน้ำหนักและแรงดันที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด และจะต้องมีองค์ประกอบอย่างน้อยดังต่อไปนี้
 - 3.1.1 บุด้านล่างและด้านข้างโดยรอบหลุมฝังกลบด้วยวัสดุต่างๆ (Liners) หลายชั้นเพื่อป้องกันการซึมผ่านของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วออกสู่น้ำใต้ดินหรือน้ำผิวดินที่อยู่ใกล้เคียง โดยปูตามลำดับชั้นตั้งแต่ชั้นล่างสุดจนถึงบนสุด คือ
 - ชั้นดินธรรมชาติหรือดินเดิมบดอัดแน่น ที่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกทุกด้านบนได้ทั้งหมดและป้องกันความเสียหายต่อวัสดุปูพื้นด้านล่าง โดยบดอัดแน่นหนาไม่ต่ำกว่า 30 ซม. และมีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 85% ของความ

หนาแน่นมาตรฐาน (Standard Proctor Test) โดยทำการบดอัดดินให้แน่นที่ระดับความหนา (Lift) ทุกๆ 15 ซม.

- ชั้นกันซึมทุติยภูมิชั้นล่าง (Secondary protective barrier) ประกอบด้วยชั้นดินเหนียวที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ได้ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที (ประมาณ 0.1 ฟุตต่อปี) มีความหนาไม่ต่ำกว่า 90 ซม. และแผ่นวัสดุที่ทนน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) มีความหนาย่างต่ำ 1.5 มิลลิเมตร ในกรณีที่ใช้วัสดุธรณีสังเคราะห์แบบคอมโปสิต (Geocomposite) จะต้องได้ชั้นกันซึมที่มีค่าอัตราการซึมน้ำและคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption capacity) เทียบเท่ากับชั้นกันซึมดังกล่าวหรือดีกว่า
- ชั้นรวบรวมรวมน้ำ (Secondary leachate collection layer) จะต้องประกอบด้วยชั้นกรวดทรายซึ่งเป็นหินกรวดคัดขนาด (Graded sand and gravel) ที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ได้ไม่ต่ำกว่า 1×10^{-2} ซม./วินาที และมีความหนาไม่ต่ำกว่า 30 ซม. ในกรณีที่ใช้วัสดุธรณีสังเคราะห์แบบ Geonet จะต้องใช้ชั้นรวมน้ำที่มีค่าอัตราการไหลของน้ำ (Transmissivity) ไม่ต่ำกว่า 3×10^{-5} ตารางเมตรต่อวินาที
- ชั้นกันซึมปฐมภูมิชั้นบน (Primary protective barrier) ประกอบด้วยแผ่นวัสดุที่ทนน้ำสังเคราะห์โพลีเอธิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) มีความหนาย่างต่ำ 1.5 มิลลิเมตร ในกรณีที่ใช้วัสดุธรณีสังเคราะห์แบบคอมโปสิต (Geocomposite) จะต้องได้ชั้นกันซึมที่มีค่าอัตราการซึมน้ำและคุณสมบัติการดูดซับ (Sorption capacity) เทียบเท่ากับชั้นกันซึมดังกล่าวหรือดีกว่า
- ต้องมีชั้นกรอง (Filter zone) ซึ่งเป็นวัสดุกรองใยสังเคราะห์ (Geotextile) ที่สามารถระบายน้ำ ส่วนที่อิ่มตัว (Saturated hydraulic conductivity) ได้ไม่ต่ำกว่า 1×10^{-2} ซม./วินาที ซึ่งใช้แยกชั้นระบบรวมน้ำเสียออกจากชั้นที่บรรจุสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

3.1.2 ต้องมีระบบนำน้ำออกจากชั้นกันซึมปฐมภูมิชั้นบน (Primary protective barrier) และชั้นกันซึมทุติยภูมิชั้นล่าง (Secondary protective barrier) โดยนำที่รวบรวมจากแต่ละชั้นในหลุมฝังกลบ จะต้องระบายออกไปเก็บในบ่อสูบ (Sump) ที่แยกกัน เพื่อมิให้เกิดการขังของน้ำภายในหลุมฝังกลบและใช้เป็นระบบตรวจสอบการรั่ว (Leak detection system) ของชั้นกันซึมด้วย

3.1.3 การระบายที่กั้นหลุมฝังกลบ ต้องมีความลาด (Slope) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 1 เพื่อให้การระบายน้ำกั้นหลุมเป็นไปได้อย่างสะดวก

3.2 เมื่อหลุมฝังกลบเต็มแล้ว ให้ทำการปิดหลุม (Capping) ด้วยวัสดุต่างๆหลายชั้นเพื่อป้องกันมิให้น้ำหรือสิ่งรบกวนจากภายนอกเข้ามาสัมผัสกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วภายในหลุมฝังกลบ โดยปูตามลำดับชั้นตั้งแต่ล่างสุดจนถึงบนสุด คือ ชั้นดินเหนียวที่ยอมให้น้ำซึมผ่าน (Hydraulic conductivity) ได้ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} ซม./วินาที มีความหนาไม่ต่ำกว่า 30 ซม. แล้วปูทับด้วยแผ่นวัสดุที่บดน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 1.5 มิลลิเมตร หรือแผ่นวัสดุสังเคราะห์อื่นที่มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่า จากนั้นให้ปูทับด้วยชั้นกรวดทรายลดขนาด เพื่อช่วยในการระบายน้ำหนาน้อย 30 ซม. ซึ่งใช้ระบายน้ำที่อิ่มตัว (Saturated hydraulic conductivity) ได้ไม่ต่ำกว่า 1×10^{-2} ซม./วินาที แล้วจึงปูทับด้วยด้วยชั้นวัสดุกรองใยสังเคราะห์ และชั้นดินธรรมชาติที่เหมาะสมสำหรับปลูกพืชคลุมดินเป็นชั้นบนสุดมีความหนาน้อย 90 ซม. หากสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสามารถก่อให้เกิดก๊าซขึ้นได้ ภายหลังการฝังกลบ ให้จัดให้มีระบบท่อรวบรวมและระบายก๊าซออกไปอย่างเพียงพอ

3.3 แผ่นวัสดุที่บดน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ใช้ ต้องมีความทึบน้ำสูงทนทานต่อสภาพการกัดกร่อนทางเคมีและต่อสภาวะแวดล้อม มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะทนต่อการรับน้ำหนักและแรงดันที่จะเกิดขึ้นทั้งหมด โดยต้องมีคุณลักษณะไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังต่อไปนี้

คุณลักษณะของแผ่นวัสดุที่บดน้ำ	ค่าที่กำหนด	หน่วย	วิธีการทดสอบหรือวิเคราะห์
ความหนาเฉลี่ยไม่น้อยกว่า (Average thickness)	60	มิลล์ (Mils)	ASTM D-751/1593/374
ความหนาด้านล่างสุดเมื่อวัดไม่น้อยกว่า (Minimum thickness)	54	มิลล์ (Mils)	ASTM D-751/1593/374
ความหนาแน่น ไม่น้อยกว่า (Density)	0.94	ก./ลบ.ซม.	ASTM D-1505
กำลังดึงที่จุดคลาก ไม่น้อยกว่า (Tensile Strength at Yield)	132	ปอนด์/ตร.นิ้ว (ความกว้าง)	ASTM D-638-IV
กำลังดึงที่จุดขาด ไม่น้อยกว่า (Tensile Strength at Break)	304	ปอนด์/ตร.นิ้ว (ความกว้าง)	ASTM D-638-IV
การยืดตัวที่จุดขาด ไม่น้อยกว่า (Elongation at Break)	750	% (ร้อยละ)	ASTM D-638-IV
การยืดตัวที่จุดคลาก ไม่น้อยกว่า (Elongation at Yield)	12	% (ร้อยละ)	ASTM D-638-IV
ความต้านทานแรงฉีกขาด ไม่น้อยกว่า (Tear resistance)	42	ปอนด์	ASTM D-1004-C
ดัชนีการหลอมเหลว ไม่มากกว่า (Melt flow index)	1.0	ก./10 นาที	ASTM D-1238

- 3.4 แผ่นวัสดุทึบน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงนี้ ต้องเป็นชนิดคุณภาพสูง (High grade) ซึ่งทำจากโพลีเอทิลีนเรซิน (Polyethylene resin) หรือเอทิลีนโคโพลีเมอร์เรซิน (Ethylene copolymer resin) หรือส่วนผสมของโพลีเอทิลีนเรซินเป็นส่วนใหญ่กับโพลีเมอร์อื่นเพียงเล็กน้อย จะต้องเป็นของใหม่ไม่เคยใช้งานมาก่อน ผลิตสำเร็จรูปจากโรงงานของผู้ผลิตที่ได้รับมาตรฐานสากลทางด้านการผลิต และต้องมีสีสม่ำเสมอ ไม่มีคราบเหนียว หรือข้อบกพร่องต่างๆที่อาจมีผลเสียต่อการใช้งาน เช่น รู รอยพอง รอยฉีกขาดตำหนิซึ่งเกิดจากสิ่งแปลกปลอม เป็นต้น การเชื่อมต่อแผ่นวัสดุทึบน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ให้ต่อโดยวิธีเชื่อมด้วยความร้อน โดยต้องเป็นแบบ wedge weld ชนิด dual track หรือ extrusion joint ตามความเหมาะสมของวิธีการ โดยมีระยะทางตามคำแนะนำของผู้ผลิต หรือไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร เมื่อทดสอบ shear test และ peel test ของจุดเชื่อม ตามมาตรฐาน ASTM D-4437 จะต้องมีความสัมพันธ์ต่างๆไม่ต่ำกว่าแผ่นวัสดุทึบน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง และให้ทดสอบรอยรั่วจากการเชื่อมโดยวิธี air pressure test และ dual track และโดยวิธี vacuum box test สำหรับ extrusion welding หากใช้แผ่นวัสดุทึบน้ำสังเคราะห์ (Geomembrane) ประเภทอื่นๆ ต้องมีคุณสมบัติเทียบเท่ากับแผ่นวัสดุทึบน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงหรือสูงกว่า และต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม วัสดุธรณีสังเคราะห์ (Geosynthesis) ประเภทอื่นๆ ที่นำมาใช้ต้องได้รับการพิจารณาและเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม
- 3.5 หลุมฝังกลบจะต้องได้รับการออกแบบให้สามารถควบคุมการไหลท่วมและขังนองของปริมาณน้ำฝนในรอบ 24 ชั่วโมง ของคาบการตกของฝนในรอบ 25 ปีได้ โดยจัดให้มีระบบป้องกันมิให้น้ำฝนหรือน้ำไหลบ่าจากด้านนอกหลุมฝังกลบเข้ามาสัมผัสกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วในหลุมฝังกลบระหว่างการฝังกลบ รวมทั้งจัดให้มีระบบระบายน้ำออกจากบริเวณหลุมฝังกลบได้อย่างรวดเร็วและเหมาะสม หากน้ำที่สัมผัสกับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ไม่ว่าจะกรณีใด ให้ถือเสมือนหนึ่งเป็นน้ำเสียที่ต้องผ่านการบำบัดจนมีคุณลักษณะได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด จึงระบายออกทิ้งได้

4. การดำเนินการฝังกลบ

- 4.1 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่นำมาฝังกลบนั้น เมื่อทำการสกัดและวิเคราะห์ตามวิธีที่กำหนดในข้อ 3 ของภาคผนวกที่ 2 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2541) เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว จะต้องมีความเข้มข้นของสารอันตรายต่างๆไม่มากกว่าที่ระบุไว้ในข้อ 5 หมวด 1 ของภาคผนวกที่ 1 ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับดังกล่าว
- 4.2 ห้ามมิให้ฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ซึ่งมีส่วนประกอบที่เป็นของเหลวอิสระ (Free liquid) โดยให้ทดสอบสถานะของของเหลวอิสระด้วยมาตรฐาน Paint filter liquids test –USEPA (United States Environment Protection Agency) SW-846 Method 9095 ทุกครั้ง
- 4.3 ให้จัดทำบันทึกการดำเนินงาน ซึ่งมีรายการแสดงเกี่ยวกับประเภท ชนิด ปริมาณ วิธีการฝังรวมทั้งฝังการจัดแบ่งส่วน (Cell) หลุมฝัง และชนิดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่อยู่ในแต่ละส่วนของหลุมฝังกลบ โดยให้เก็บรักษาทันทีนี้ไว้เพื่อให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมสามารถตรวจสอบได้ทุกเรื่อง
- 4.4 เมื่อเลิกใช้หลุมฝังกลบในบางบริเวณเป็นการชั่วคราว ต้องจัดให้มีการปิดคลุมด้วยแผ่นวัสดุที่ทนน้ำสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่มีความหนาไม่ต่ำกว่า 1.5 มิลลิเมตร และจัดระบบระบายน้ำออกจากพื้นที่นั้นให้เพียงพอ พร้อมทั้งให้มีวิธีการป้องกันการชะล้างโดยวิธีที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม
- 4.5 จัดให้มีวัสดุปิดคลุมสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วในหลุมฝังกลบหลังจากเสร็จสิ้นภาระกิจการฝังในแต่ละวัน เพื่อลดการกระจายของฝุ่นอันอาจเกิดจากแรงลม วัสดุปิดคลุมอาจเป็นวัสดุสังเคราะห์หรือวัสดุธรรมชาติตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมเห็นชอบ
- 4.6 ให้ปลูกพืชคลุมดินบนหลุมฝังกลบที่ปิดแล้ว เพื่อลดความรุนแรงของการพังทลายของผิวหน้าดินโดยพืชที่ปกคลุมดินจะต้องเป็นพืชรากสั้น หรือมีเอกสารที่พิสูจน์ได้ว่าความยาวที่สุดของรากจะชายน้อยกว่า 90 เซนติเมตร
- 4.7 ผู้ประกอบกิจการโรงงานจะต้องให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมทราบถึงกำหนดการปิดหลุมฝังกลบขั้นสุดท้าย เพื่อให้กรมโรงงานอุตสาหกรรมทำการตรวจสอบความเรียบร้อยของหลุมฝังกลบก่อนการปิดหลุม หากต้องแก้ไขและมีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นเท่าใด ให้อยู่ในความรับผิดชอบของผู้ประกอบการโรงงานทั้งหมด
- 4.8 เมื่อเลิกใช้หลุมฝังกลบโดยปิดคลุมด้านบนเรียบร้อยแล้ว ผู้ประกอบกิจการโรงงานจะต้องรับผิดชอบดูแลรักษาและตรวจสอบหลุมฝังกลบไปอีกเป็นระยะเวลา 30 ปี นับจากวันที่ปิดหลุมฝังกลบเสร็จเรียบร้อย ในกรณีที่ยังไม่แน่ใจในความปลอดภัยของหลุมฝัง

กลบนั้น กรมโรงงานอุตสาหกรรมอาจพิจารณากำหนดระยะเวลาดังกล่าวให้นานขึ้นตามความเหมาะสมได้

- 4.9 ค่าใช้จ่ายของการแก้ไขหลุมฝังกลบที่เกิดรอยรั่ว การฉีกขาด หรือเกิดข้อบกพร่องใดๆที่ก่อให้เกิดการรั่วไหลของสารต่างๆออกสู่ภายนอกหลุม ทั้งในระหว่างการฝังและในช่วงระยะเวลาการดูแลของผู้ดำเนินการฝังหลังการปิดหลุมฝังกลบแล้ว ให้อยู่ในความรับผิดชอบของผู้ประกอบกิจการโรงงานทั้งหมด

5. การตรวจสอบติดตามผล

- 5.1 ต้องสร้างบ่อสังเกตการณ์ (Monitoring well) สำหรับตรวจสอบคุณลักษณะของน้ำใต้ดินในชั้นไม่อิ่มตัว (Unsaturated zone) และชั้นอิ่มตัว (Saturated zone) ที่ตื้นที่สุดที่ไหลผ่านบริเวณหลุมฝังกลบ โดยตั้งอยู่ที่บริเวณเหนือน้ำ (Upgradient) และใต้น้ำ (Downgradient) ของหลุมฝังกลบตามทิศทางการไหลของน้ำใต้ดิน สถานที่ตั้งและจำนวนของบ่อสังเกตการณ์ ให้กำหนดตามความจำเป็นและเหมาะสมต่อการที่จะให้ได้ตัวอย่างน้ำใต้ดินที่สามารถใช้เป็นตัวแทนคุณภาพน้ำใต้ดินธรรมชาติจากบริเวณด้านเหนือน้ำ (Upgradient) และด้านใต้น้ำ (Downgradient) หลุมฝังกลบ เพื่อสามารถไปทำการเปรียบเทียบวิเคราะห์และประเมินผลความปลอดภัยของหลุมฝังกลบ
- 5.2 การกำหนดชนิดและปริมาณของสาร เพื่อใช้ในการตรวจสอบน้ำในบ่อสังเกตการณ์ จะแตกต่างกันไปตามสถานที่ตั้งของหลุมฝังกลบแต่ละแห่งตามความเหมาะสม ขึ้นกับคุณสมบัติของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินเดิม โดยพิจารณาจากความเข้มข้นก่อนการประกอบการ (Background concentrations) ตลอดจนชนิดและปริมาณของสารที่ฝังกลบ
- 5.3 น้ำใต้ดินที่เก็บจากบ่อสังเกตการณ์ด้านใต้น้ำ (Downgradient) ของหลุมฝังกลบจะต้องมีลักษณะไม่เกินกว่าเกณฑ์เฉลี่ยที่กำหนดไว้ ดังต่อไปนี้

ชนิดของสารอันตราย	ปริมาณสูงสุดไม่เกิน (มก./ล.)
อาร์เซนิก	0.05
แคดเมียม	0.01
โครเมียม	0.05
ตะกั่ว	0.05
ปรอท	0.002
นิกเกิล	0.05
แมงกานีส	0.3
ทองแดง	1.0

สังกะสี	5.0
เงิน	0.05
แบเรียม	1.0
ซีลีเนียม	0.01
ซิลเว็กซ์ (Silvex)	0.01
2,4-ดี (2,3-D)	0.1
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.005
เมทอซิคลอร์ (Methyachlor)	0.1
ลินเดน (Lindane)	0.004
เอนดริน (Endrin)	0.0002

- 5.4 ให้ตรวจสอบคุณภาพน้ำใต้ดินที่เก็บจากบ่อสังเกตการณ์อย่างสม่ำเสมอตั้งแต่ก่อนเริ่มดำเนินการฝัง ระหว่างการดำเนินการฝัง และระหว่างการดูแลหลุมฝังกลบหลังจากเลิกใช้แล้ว โดยเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำใต้ดินก่อนทำการฝังกลบอย่างน้อย 6 ครั้ง ในระยะเวลาต่าง ๆ กันของปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบ (Baseling data) เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำใต้ดินของบ่อสังเกตการณ์ทุกบ่อในระหว่างดำเนินการฝังกลบอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง และเก็บและวิเคราะห์น้ำใต้ดินจากบ่อสังเกตการณ์ทุกบ่อในช่วงการดูแลหลุมฝังกลบ หลังจากเลิกใช้อย่างน้อยทุก 6 เดือน ตามลำดับ
- 5.5 ให้ตรวจสอบการรั่วซึมของชั้นกันซึมด้านบน (Primary protective barrier) ของหลุมฝังกลบ หากพบว่ามียุทธการรั่วไหล (Active leakage rate) เกินกว่า 17 มม./ตร.ม./วัน ให้ถือว่าชั้นกันซึมนั้นหมดสภาพการใช้งานแล้ว และต้องดำเนินการแก้ไข ตามวิธีที่ได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม
- 5.6 หากผลการตรวจสอบในข้อ 5.4 พบว่าคุณภาพน้ำใต้ดินสูงเกินกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในข้อ 5.3 หรือสามารถพิสูจน์ได้ว่าการรั่วซึมของหลุมฝังกลบเกิดขึ้น ผู้ประกอบกิจการโรงงานจะต้องทำการแก้ไขทันทีโดยวิธีการทำผนังกัน (Cut-off wall confinement) ซึ่งประกอบด้วยวัสดุผสมของดินและเบนโทไนท์ (Soil-bentonite admixture) หรือวัสดุผสมของซีเมนต์และเบนโทไนท์ (Cement-bentonite admixture) ที่ยอมให้มีอัตราการซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ได้ไม่เกินกว่า 1×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที มีความหนา 60 เซนติเมตร แล้วจึงแทรกเสริมระหว่างผนังด้วยแผ่นวัสดุที่บดสังเคราะห์ (Geomembrane) x ประเภทโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene) หนาอย่างน้อย 1.5 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชั้น ในแนวตั้งจากผิวดินถึงชั้นที่บดน้ำ (Impervious layer) เบื้องล่างโดยรอบบริเวณหลุมฝังกลบ ทั้งนี้อาจใช้วิธีการป้องกันวิธีอื่นที่ได้ผลเทียบเท่าหรือดีกว่า และจะต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม หากได้หลุมฝังกลบมี

ลักษณะรอยแตกร้าว (Hydraulic fracturing) ให้เทปูนเกราดึงกันซึมด้านล่าง (Grouting) เพื่อกันมิให้สารหรือของเหลวใดๆออกจากหลุมฝังกลบ และปนเปื้อนดิน รongรับบริเวณหลุมฝังกลบแพร่กระจายต่อไปได้ หรืออาจใช้วิธีการอื่นที่ได้ผลเทียบเท่า หรือดีกว่าและต้องได้รับความเห็นชอบจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม

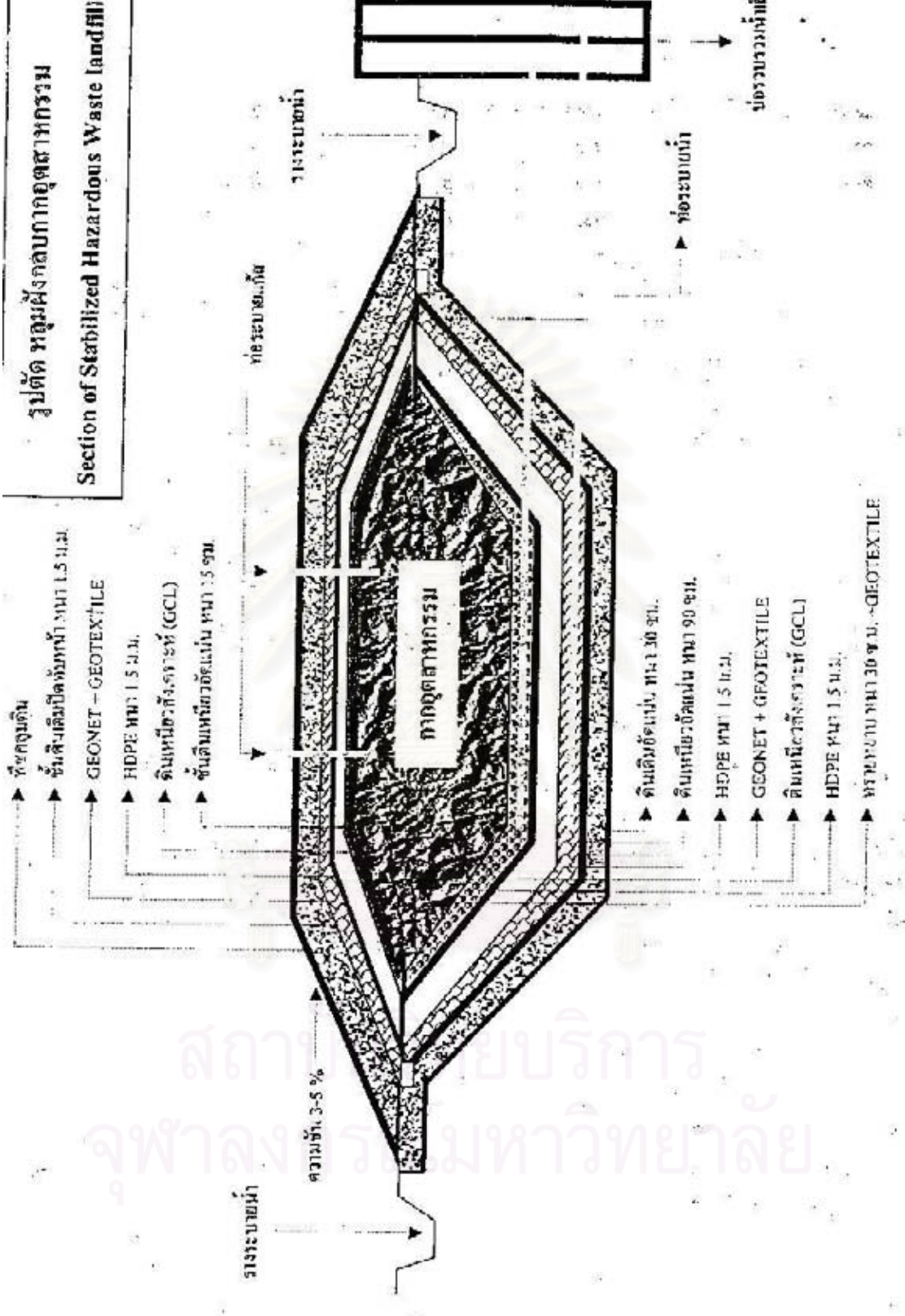
5.7 ให้ตรวจสอบคุณภาพของน้ำในบ่อตื้นที่รวบรวมได้จากชั้นรวบรวมน้ำทุกครั้งก่อนระบาย ออกทิ้ง ถ้าพบว่ามีค่าความสกปรกเกินมาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด จะต้องทำการบำบัดจนมีคุณลักษณะเป็นไปตามมาตรฐานนั้นเสียก่อน

6. ผู้ประกอบการโรงงานจะต้องปฏิบัติตามแผนการใช้ประโยชน์ของหลุมฝังกลบหลังจากเลิก ใช้แล้ว ที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมระบุไว้เป็นเงื่อนไขของการอนุญาตประกอบการโรงงาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปตัด หลุมฝังกลบกากอุตสาหกรรม
Section of Stabilized Hazardous Waste landfill



สถานียบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

ภาพถ่ายการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 สภาพของดินตะกอนที่ขุดออกจากลำห้วยคลิตี้ ณ จุด KC2



รูปที่ ข.2 เครื่องเขย่าพร้อมตะแกรงร่อน



รูปที่ ๓.3 pycnomete สำหรับวัดความถ่วงจำเพาะ



รูปที่ ๓.4 การเขย่าดินตะกอนด้วยเครื่องเขย่าหมุนในแนวราบ เพื่อวัด pH ของดิน
ตามวิธีที่ 103 ของ NEPC. 2000



รูปที่ ๑.5 การชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540



รูปที่ ๑.6 เครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrometer



รูปที่ ข.7 อุปกรณ์สำหรับหาค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสม (ASTM D698) และ
การเตรียมสภาพดินตะกอน/กากตะกอน ก่อนวัดกำลังรับแรงอัด (ASTM D2166)



รูปที่ ข.8 อุปกรณ์สำหรับหล่อก้อนแข็งตามวิธีมาตรฐาน ASTM C109



รูปที่ ๗.9 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.10 การคัดแยกดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก



รูปที่ ข.11 การคัดแยกดินตะกอนสะอาดที่ได้จากการคัดแยกดินตะกอนปนเปื้อน



รูปที่ ข.12 การชะล้าง/สกัดดินตะกอนด้วยเครื่องกวนแม่เหล็ก



รูปที่ ข.13 การชะล้าง/สกัดดินตะกอนด้วยเครื่องกวนความเร็วสูง



รูปที่ ข.14 การตกผลึกตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์ (ขวา : ตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้น,
ซ้าย : น้ำสกัด)



รูปที่ ข.15 การตกผลึกตะกอนตะกั่วซัลไฟด์ (ซ้าย : น้ำทิ้งจากการล้างกากตะกอน,
ขวา : ตะกอนผลึกซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น)



รูปที่ ข.16 ก้อนตัวอย่างของดินตะกอน ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 7.5:1 โดยน้ำหนัก และคงที่ w/c เท่ากับ 0.5



รูปที่ ข.17 ก้อนตัวอย่างของกากตะกอน ที่อัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 3.5:1 โดยน้ำหนัก และคงที่ w/c เท่ากับ 0.5



ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์การทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 สรุปสมบัติทางกายภาพและเคมีของดินตะกอนปนเอนตะกั่ว จากห้วยคลิตี้

ค่าที่	ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	ความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณตะกั่ว	
			ดิน (1:5 H ₂ O)	น้ำสกัด	ดินตะกอน(ก./กก.)	น้ำสกัด (มก./ล.)
1	1.31	3.03	7.78	7.18	61.70	2.97
2	1.33	3.09	7.84	7.13	86.75	2.85
3	1.31	3.05	7.73	7.26	50.50	2.64
4	1.32	3.04	7.75	7.19	85.50	3.10
5	1.29	3.07	7.89	7.16	77.25	3.25
6	1.35	3.04	7.77	7.23	62.50	3.14
7	1.33	3.07	7.72	7.16	70.25	2.84
8	1.38	3.08	7.73	7.21	86.55	2.94
9	1.29	3.06	7.83	7.31	88.50	2.78
10	1.32	3.05	7.87	7.27	85.95	3.29
11	1.37	3.04	7.76	7.26	84.20	1.89
12	1.35	3.03	7.74	7.15	79.45	3.59
13	1.29	3.02	7.69	7.23	83.20	2.61
14	1.32	3.07	7.84	7.25	70.65	2.95
15	1.35	3.05	7.85	7.35	55.75	3.89
16	1.33	3.02	7.72	7.24	85.75	1.53
17	1.32	3.04	7.77	7.20	63.45	2.87
18	1.26	3.06	7.79	7.28	83.00	3.78
19	1.27	3.05	7.82	7.25	65.70	1.02
20	1.29	3.04	7.85	7.30	80.75	2.79
ค่าเฉลี่ย	1.32	3.05	7.79	7.23	75.37	2.84
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.03	0.02	0.06	0.06	11.78	0.69

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2 การกระจายขนาดอนุภาคของดินตะกอนตัวอย่าง จากห้วยคลิตี้

ตะแกรง เบอร์	ขนาดช่องเปิด (มม.)	ร้อยละของความละเอียด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
20	0.850	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
40	0.420	95.15	95.78	95.56	95.50	0.32
70	0.210	83.64	82.47	82.72	82.94	0.62
100	0.149	64.63	62.85	65.37	64.28	1.30
140	0.105	40.38	37.29	40.56	39.41	1.84
170	0.088	33.05	30.68	32.94	32.22	1.34
200	0.074	23.96	22.26	23.79	23.34	0.93
pan	< 0.074	0.00	0.00	7.16	2.39	-

ตารางที่ ค.3 การกระจายปริมาณตะกั่วในแต่ละช่วงอนุภาคของดินตะกอนตัวอย่าง จากห้วยคลิตี้

ตะแกรง เบอร์	ขนาดช่องเปิด (มม.)	ร้อยละของการกระจายในแต่ละช่วงอนุภาค					ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (ก./กก. ดินแห้ง)				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
40.00	0.42	5.39	4.71	4.97	5.02	0.34	87.60	83.40	71.45	80.82	8.38
70.00	0.21	13.01	13.55	15.53	14.03	1.33	75.86	86.04	91.32	84.41	7.86
100.00	0.15	14.18	14.10	11.69	13.32	1.42	55.65	60.30	46.25	54.07	7.16
140.00	0.11	21.68	25.62	21.23	22.84	2.41	63.84	82.17	63.03	69.68	10.83
170.00	0.09	5.50	4.39	5.70	5.20	0.71	56.05	48.68	58.58	54.43	5.14
200.00	0.07	16.37	13.52	14.92	14.94	1.42	134.88	121.38	123.96	126.74	7.17

pan	< 0.074	23.87	26.27	26.17	25.44	1.36	74.91	82.45	82.15	79.84	4.27
-----	---------	-------	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------	-------	------



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 สรุปสมบัติของตะกอนตะกั่ว ที่ได้จากการคัดแยกดินตะกอน ด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก

ค่าที่	ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	ความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณตะกั่ว		ร้อยละของการเก็บได้
			ดิน (1:5 H ₂ O)	น้ำสกัด	ดินตะกอน(ก./กก.)	น้ำสกัด (มก./ล.)	
1	1.60	3.58	8.19	7.62	106.90	3.10	65.61
2	1.58	3.23	8.22	7.70	102.73	3.22	62.76
3	1.55	3.16	8.25	7.62	112.86	3.17	74.17
ค่าเฉลี่ย	1.58	3.32	8.22	7.65	107.50	3.16	67.51
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.02	0.22	0.03	0.05	5.09	0.06	5.94

ตารางที่ ค.5 สรุปสมบัติของดินตะกอนสะอาด ที่ได้จากการคัดแยกดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก

ค่าที่	ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	ความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณตะกั่ว		ร้อยละของการเก็บได้
			ดิน (1:5 H ₂ O)	น้ำสกัด	ดินตะกอน(ก./กก.)	น้ำสกัด (มก./ล.)	
1	1.14	2.66	7.91	7.97	48.00	2.40	34.39
2	1.12	2.89	8.16	7.96	50.12	2.97	37.24
3	1.11	2.69	7.85	8.08	40.56	2.77	25.83
ค่าเฉลี่ย	1.12	2.74	7.97	8.00	46.23	2.71	32.49
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.02	0.13	0.16	0.07	5.02	0.29	5.94

ร้อยละปริมาณที่เก็บได้
46.00
44.00
52.00
47.33
4.16

ร้อยละปริมาณที่เก็บได้
54.00
56.00
48.00
52.67
4.16



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.6 การกระจายขนาดอนุภาคของตะกอนตะกั่ว ที่ได้จากการคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก

ขนาดอนุภาค (มม.)	ร้อยละของความละเอียด				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
-0.850	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
-0.850+0.420	98.94	98.66	98.88	98.83	0.15
-0.420+0.210	98.46	95.75	94.54	96.25	2.01
-0.210+0.149	86.84	86.08	85.75	86.23	0.56
-0.149+0.105	50.29	45.98	36.45	44.24	7.08
-0.105+0.088	35.87	33.79	27.21	32.29	4.52
-0.088+0.074	25.91	24.63	19.52	23.36	3.38
-0.074	0.00	0.00	0.00	7.16	0.00

ตารางที่ ค.7 การกระจายขนาดอนุภาคของดินตะกอนละเอียด ที่ได้จากการคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก

ขนาดอนุภาค (มม.)	ร้อยละของความละเอียด				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
-0.850	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00
-0.850+0.420	97.81	97.68	97.44	97.64	0.19
-0.420+0.210	89.06	89.30	88.47	88.95	0.43
-0.210+0.149	76.94	77.04	76.15	76.71	0.49
-0.149+0.105	42.50	43.05	41.68	42.41	0.69
-0.105+0.088	33.19	31.89	33.48	32.85	0.85
-0.088+0.074	26.03	24.15	25.64	25.27	0.99
-0.074	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ตารางที่ ค.8 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำ ที่ผ่านการคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก

วันที่	ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำ (มก./ล.)				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
1	3.03	3.05	2.99	3.02	0.03
2	2.72	2.63	2.73	2.69	0.06
3	1.83	1.90	1.64	1.79	0.13
4	1.20	1.08	1.34	1.21	0.13
5	0.65	0.51	0.64	0.60	0.08
6	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
7	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
8	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
9	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
10	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
11	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
12	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
13	N.D.	N.D.	N.D.	-	-
14	N.D.	N.D.	N.D.	-	-

หมายเหตุ N.D หมายถึง Not Detectable

ตารางที่ ค.9 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำ ที่ผ่านการคัดแยกด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
1	7.80	7.85	7.83	7.83	0.03
2	7.75	7.77	7.78	7.77	0.02
3	7.79	7.81	7.81	7.80	0.01
4	7.85	7.82	7.82	7.83	0.02
5	7.83	7.82	7.82	7.82	0.01
6	7.79	7.83	7.85	7.82	0.03
7	7.88	7.86	7.86	7.87	0.01
8	7.79	7.77	7.77	7.78	0.01
9	7.75	7.78	7.78	7.77	0.02
10	7.82	7.79	7.79	7.80	0.02
11	7.76	7.79	7.78	7.78	0.02
12	7.85	7.81	7.81	7.82	0.02
13	7.89	7.85	7.83	7.86	0.03

14	7.84	7.81	7.81	7.82	0.02
----	------	------	------	------	------



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.10 สรุปสมบัติของตะกอนตะกั่ว ที่ได้จากการคัดแยกดินตะกอนสะอาด ด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก

ค่าที่	ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	ความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณตะกั่ว		ร้อยละของการเก็บได้	ร้อยละปริมาณที่เก็บได้
			ดิน (1:5 H ₂ O)	น้ำสกัด	ดินตะกอน(ก./กก.)	น้ำสกัด (มก./ล.)		
1	1.80	3.51	8.32	7.26	73.23	3.00	15.38	11.02
2	1.77	3.68	8.26	7.33	67.65	2.37	15.41	11.54
3	1.84	3.68	8.40	7.31	60.02	2.77	16.16	9.79
ค่าเฉลี่ย	1.80	3.62	8.33	7.30	66.97	2.71	27.51	10.78
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.03	0.10	0.07	0.04	6.63	0.32	0.44	0.90

ตารางที่ ค.11 สรุปสมบัติของดินตะกอนสะอาด ที่ได้จากการคัดแยกดินตะกอนสะอาด 7.16

ค่าที่	ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)	ความถ่วงจำเพาะ (ตัน/ลบ.ม.)	ความเป็นกรด-ด่าง		ปริมาณตะกั่ว		ร้อยละของการเก็บได้	ร้อยละปริมาณที่เก็บได้
			ดิน (1:5 H ₂ O)	น้ำสกัด	ดินตะกอน(ก./กก.)	น้ำสกัด (มก./ล.)		
1	1.15	2.57	8.05	7.30	43.66	2.37	84.62	88.98
2	1.19	2.63	8.10	7.30	43.52	1.87	84.59	88.46
3	1.17	2.38	8.10	7.28	43.98	1.97	83.84	90.21
ค่าเฉลี่ย	1.17	2.53	8.08	7.29	43.72	2.07	84.35	89.22
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.02	0.13	0.03	0.01	0.23	0.26	0.44	0.90

ตารางที่ ค.12 การเลือกสารละลายที่เหมาะสม ในการล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ปริมาณตะกั่วที่ละลายอยู่ในสารละลาย (มก./ล.)				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
น้ำประปา	25:1	7.87	4.53	7.27	6.56	1.78
HCl 0.10 N.	25:1	530.00	530.00	580.00	546.67	28.87
NaOH 0.10 N.	25:1	7.40	10.60	8.67	8.89	1.61

ตารางที่ ค.13 ร้อยละของตะกั่วที่ถูกกำจัดออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.10 N

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	7.16	2.39	4.13
5	25:1	8.29	9.62	9.29	9.07	0.69
10	25:1	13.93	14.60	13.93	14.15	0.38
20	25:1	16.59	16.92	18.24	17.25	0.88
30	25:1	17.58	17.58	19.24	18.13	0.96
40	25:1	19.24	18.58	20.90	19.57	1.20

ตารางที่ ค.14 ร้อยละของตะกั่วที่ถูกกำจัดออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25:1	27.25	32.18	27.20	28.87	2.86
10	25:1	31.23	36.82	36.82	34.96	3.23
20	25:1	47.53	42.79	51.75	47.36	4.48
30	25:1	42.51	48.43	56.06	49.00	6.79
40	25:1	48.81	49.76	58.05	52.20	5.08

ตารางที่ ค.15 ร้อยละของตะกั่วที่ถูกกำจัดออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.30 N

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25:1	7.30	6.63	6.63	6.86	0.38
10	25:1	9.62	7.63	8.62	8.62	1.00
20	25:1	13.27	11.94	11.28	12.16	1.01
30	25:1	12.94	13.93	12.60	13.16	0.69
40	25:1	13.60	13.27	13.27	13.38	0.19

ตารางที่ ค.16 ร้อยละของตะกั่วที่ถูกกำจัดออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.40 N

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25:1	7.63	5.31	6.63	6.52	1.16
10	25:1	10.61	10.28	10.28	10.39	0.19
20	25:1	14.60	14.26	12.94	13.93	0.88
30	25:1	14.60	14.40	14.60	14.53	0.11
40	25:1	14.26	14.60	14.60	14.48	0.19

ตารางที่ ค.17 ร้อยละของตะกั่วที่ถูกกำจัดออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.60 N

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25:1	5.64	7.30	7.63	6.86	1.07
10	25:1	8.29	8.96	9.29	8.85	0.51
20	25:1	10.61	11.94	12.27	11.61	0.88
30	25:1	13.93	14.26	13.93	14.04	0.19
40	25:1	14.26	14.26	13.93	14.15	0.19

ตารางที่ ค.18 ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายกรดเกลือ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น	ความเป็นกรด-ด่าง				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0.10 N.	1.08	1.05	1.04	1.06	0.02
0.20 N.	0.73	0.71	0.74	0.73	0.02
0.30 N.	0.57	0.59	0.60	0.59	0.02
0.40 N.	0.41	0.45	0.44	0.43	0.02
0.60 N.	0.32	0.31	0.35	0.33	0.02

ตารางที่ ค.19 ความเป็นกรด-ด่างของผสม ที่ความเข้มข้นของกรดเกลือต่างๆ

ความเข้มข้น	ความเป็นกรด-ด่าง				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0.10 N.	1.20	1.12	1.19	1.17	0.04
0.20 N.	0.87	0.85	0.86	0.86	0.01
0.30 N.	0.69	0.66	0.65	0.67	0.02
0.40 N.	0.56	0.54	0.53	0.54	0.02
0.60 N.	0.41	0.40	0.39	0.40	0.01

ตารางที่ ค.20 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และความเร็วยรอบ 100 รอบ/นาที

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25:1	21.60	25.48	23.08	23.38	1.96
10	25:1	28.80	29.17	29.91	29.29	0.56
20	25:1	31.57	35.08	36.37	34.34	2.48
30	25:1	41.54	36.00	41.35	39.63	3.15
40	25:1	43.20	38.22	42.83	41.42	2.78

ตารางที่ ค.21 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และความเร็วยรอบ 250 รอบ/นาที

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25:1	44.49	41.91	44.86	43.75	1.61
10	25:1	46.43	42.65	45.05	44.71	1.91
20	25:1	48.69	46.15	46.89	47.25	1.31
30	25:1	53.17	52.63	50.82	52.21	1.23
40	25:1	55.94	57.23	59.94	57.70	2.04

ตารางที่ ค.22 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และความเร็วรอบ 500 รอบ/นาที

เวลา (นาที)	L/S (Liquid/Soil)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	25:1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	25:1	50.22	50.95	50.22	50.46	0.43
10	25:1	60.18	55.94	60.00	58.71	2.40
20	25:1	61.29	56.31	61.11	59.57	2.83
30	25:1	64.80	56.86	63.14	61.60	4.19
40	25:1	66.28	64.37	64.43	65.03	1.08

ตารางที่ ค.23 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และอัตราส่วนกรดเกลือต่อดินตะกอน เท่ากับ 25:1

เวลา (นาที)	ความเร็วรอบ (rpm)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	500.00	50.22	50.95	50.22	50.46	0.43
10	500.00	60.18	55.94	60.00	58.71	2.40
20	500.00	61.29	56.31	61.11	59.57	2.83
30	500.00	64.80	56.86	63.14	61.60	4.19
40	500.00	66.28	60.37	64.43	63.69	3.02
50	500.00	67.75	64.80	64.43	65.66	1.82
60	500.00	70.71	72.18	71.82	71.57	0.77

ตารางที่ ค.24 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และอัตราส่วนกรดเกลือต่อดินตะกอน เท่ากับ 50:1

เวลา (นาที)	ความเร็วรอบ (rpm)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	500.00	65.54	58.09	52.61	58.75	6.49
10	500.00	77.48	71.59	66.36	71.81	5.56
20	500.00	79.96	75.49	76.75	77.40	2.31
30	500.00	80.79	79.17	78.15	79.37	1.33
40	500.00	86.47	79.05	84.22	83.25	3.80
50	500.00	89.06	83.00	86.33	86.13	3.03
60	500.00	92.04	88.81	89.78	90.21	1.66

ตารางที่ ค.25 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และอัตราส่วนกรดเกลือต่อดินตะกอน
เท่ากับ 100:1

เวลา (นาที)	ความเร็วรอบ (rpm)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	500.00	60.94	68.74	68.64	66.11	4.48
10	500.00	71.56	71.81	78.48	73.95	3.92
20	500.00	74.77	80.29	82.75	79.27	4.09
30	500.00	81.63	80.45	82.36	81.48	0.97
40	500.00	85.96	83.63	82.56	84.05	1.74
50	500.00	87.08	85.15	84.96	85.73	1.17
60	500.00	90.89	87.97	91.16	90.01	1.77

ตารางที่ ค.26 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และอัตราส่วนกรดเกลือต่อดินตะกอน
เท่ากับ 200:1

เวลา (นาที)	ความเร็วรอบ (rpm)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	500.00	81.03	55.05	65.61	67.23	13.07
10	500.00	78.83	72.22	89.17	80.07	8.55
20	500.00	83.89	81.69	83.89	83.16	1.27
30	500.00	84.55	81.03	84.11	83.23	1.92
40	500.00	84.77	84.13	86.31	85.07	1.12
50	500.00	85.43	86.75	86.09	86.09	0.66
60	500.00	88.95	92.70	94.24	91.96	2.72

ตารางที่ ค.27 การล้างตะกั่วออกจากดินตะกอน โดยใช้ HCl 0.20 N และอัตราส่วนกรดเกลือต่อดินตะกอน เท่ากับ 400:1

เวลา (นาที)	ความเร็วรอบ (rpm)	ร้อยละการชะล้าง/สกัด				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
0	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	500.00	74.26	74.07	73.97	74.10	0.14
10	500.00	79.87	81.71	73.83	78.47	4.12
20	500.00	80.58	82.28	78.74	80.53	1.77
30	500.00	83.93	82.75	83.74	83.47	0.63
40	500.00	86.33	83.74	83.60	84.56	1.54
50	500.00	87.70	87.33	87.23	87.42	0.25
60	500.00	89.54	92.66	89.50	90.56	1.81

ตารางที่ ค.28 ปริมาณและคุณสมบัติของดินตะกอนที่เหลือจากการชะล้างสกัด ด้วยสารละลายกรดเกลือที่มีความเข้มข้น 0.20 N. อัตราส่วนสารละลายต่อดินตะกอนที่ 50:1 และความเร็วนรอบ 500 รอบ/นาที

ค่าที่	น้ำทิ้งจากการชะล้าง/สกัด		ตะกอนที่เหลือจากการชะล้าง		ความหนาแน่น
	ตะกั่ว (มก./ล.)	pH	ร้อยละ	ตะกั่ว (มก./กก.)	รวม (ตัน/ลบ.ม.)
1	1,840.00	0.83	63.46	9,875.00	1.17
2	1,779.00	0.75	61.88	9,282.50	1.19
3	1,969.00	0.77	59.61	8,492.50	1.13
ค่าเฉลี่ย	1,862.67	0.78	61.65	9,216.67	1.16
Std.	97.01	0.04	1.94	693.60	0.03

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.29 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดของน้ำสกัด จากกากตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยกรดเกลือ

ชนิดของดินตะกอน	ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (มก./ล.)				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
กากตะกอนที่ผ่านสกัด	200.00	196.00	192.00	196.00	3.27
กากตะกอนที่ผ่านการล้างน้ำประปา ครั้งที่ 1	20.00	19.80	21.20	20.33	0.62
กากตะกอนที่ผ่านการล้างน้ำประปา ครั้งที่ 2	1.20	1.50	1.80	1.50	0.24
กากตะกอนที่ผ่านการล้างน้ำประปา ครั้งที่ 3	N.D	N.D	N.D	-	-

หมายเหตุ N.D. หมายถึง Not Detectable

ตารางที่ ค.30 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด จากกากตะกอนที่ผ่านการล้างด้วยกรดเกลือ

ชนิดของดินตะกอน	ความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้งจากการชะล้าง/สกัด				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
กากตะกอนที่ผ่านสกัด	4.60	4.50	4.40	4.50	0.08
กากตะกอนที่ผ่านการล้างน้ำประปา ครั้งที่ 1	7.71	7.82	7.79	7.77	0.05
กากตะกอนที่ผ่านการล้างน้ำประปา ครั้งที่ 2	7.94	7.84	7.93	7.90	0.04
กากตะกอนที่ผ่านการล้างน้ำประปา ครั้งที่ 3	7.95	8.05	7.97	7.99	0.04

ตารางที่ ค.31 ปริมาณตะกั่วทั้งหมดในน้ำทิ้งชนิดต่างๆ ที่ได้จากการล้างด้วยกรดเกลือ

ชนิดของน้ำทิ้ง	ปริมาณตะกั่วทั้งหมด (มก./ล.)				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
น้ำสกัด	1,840.00	1,779.00	1,969.00	1,862.67	79.21
น้ำทิ้ง จากการล้างกากตะกอน ครั้งที่ 1	18.76	17.92	18.46	18.38	0.35
น้ำทิ้ง จากการล้างกากตะกอน ครั้งที่ 2	0.74	1.04	1.03	0.94	0.14
น้ำทิ้ง จากการล้างกากตะกอน ครั้งที่ 3	N.D.	N.D.	N.D.	-	-

หมายเหตุ N.D. หมายถึง Not Detectable

ตารางที่ ค.32 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด และน้ำทิ้งชนิดต่างๆ

ชนิดของน้ำเสีย	ความเป็นกรด-ด่างของน้ำทิ้ง				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
น้ำสกัด	0.83	0.75	0.77	0.78	0.04
น้ำทิ้ง จากการล้างกากตะกอน ครั้งที่ 1	5.82	5.83	5.83	5.83	0.01
น้ำทิ้ง จากการล้างกากตะกอน ครั้งที่ 2	6.98	7.00	6.98	6.99	0.01
น้ำทิ้ง จากการล้างกากตะกอน ครั้งที่ 3	7.25	7.28	7.27	7.27	0.02

ตารางที่ ค.33 การกำจัดตะกั่วออกจากรูน้ำสกัด ที่ได้จากล้างด้วยกรดเกลือ โดยใช้ความเข้มข้นที่ 0.2 N. ความเร็วรอบที่ 500 รอบ/นาที และอัตราส่วนสารละลายกรดเกลือต่อดินตะกอน ที่ 50:1

ค่าที่	ปริมาณตะกั่ว (มก./ล.)		ความเป็นกรด-ด่าง		ตะกอนตะกั่วไฮดรอกไซด์	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ปริมาณ (ก./ล.)	ความเข้มข้น (ก./กก.)
1	1,862.67	4.50	0.81	9.17	7.78	219.08
2	1,862.67	4.60	0.81	9.26	7.74	224.67
3	1,862.67	4.80	0.81	9.30	7.50	218.50
ค่าเฉลี่ย	1,862.67	4.63	0.81	9.24	7.67	220.75
Std.	-	0.15	-	0.07	0.15	3.40

7.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.34 การกำจัดตะกั่วออกจากน้ำเสียชนิดต่างๆ ที่ได้จากการล้างตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยกรดเกลือ

ชนิดของน้ำเสีย	ปริมาณตะกั่ว (มก./ล.)						ความเป็นกรด-ด่าง						ปริมาณตะกั่วซัลไฟด์ (กรัม)					
	ก่อน	หลัง					ก่อน	หลัง					ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.						
น้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนไฮดรอกไซด์																		
- Na ₂ S 1.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	4.63	2.93	3.10	2.86	2.96	0.12	9.24	11.30	11.30	11.26	11.29	0.02	0.14	0.16	0.15	0.15	0.01	
- Na ₂ S 1.5 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	4.63	1.92	1.84	2.04	1.93	0.10	9.24	11.53	11.55	11.55	11.54	0.01	0.25	0.28	0.25	0.26	0.02	
- Na ₂ S 2.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	4.63	1.90	1.79	1.89	1.86	0.06	9.24	11.84	11.80	11.83	11.82	0.02	0.27	0.25	0.27	0.26	0.01	
- Na ₂ S 2.5 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	4.63	1.90	1.84	1.94	1.89	0.05	9.24	11.95	12.01	11.97	11.98	0.03	0.31	0.30	0.28	0.30	0.02	
- Na ₂ S 3.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	4.63	1.87	1.90	7.16	3.64	3.05	9.24	12.14	12.16	12.16	12.15	0.01	0.36	0.36	0.35	0.36	0.00	
น้ำทิ้ง จากการล้างกากตะกอน ครั้งที่ 1																		
- Na ₂ S 1.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	18.38	1.67	1.72	1.90	1.76	0.12	5.83	12.03	12.06	12.09	12.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	
- Na ₂ S 1.5 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	18.38	1.57	1.62	1.58	1.59	0.03	5.83	12.22	12.27	12.28	12.26	0.03	0.05	0.04	0.04	0.04	0.00	
- Na ₂ S 2.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	18.38	1.49	1.38	1.54	1.47	0.08	5.83	12.37	12.35	12.32	12.35	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	
- Na ₂ S 2.5 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	18.38	1.58	1.64	1.59	1.60	0.03	5.83	12.41	12.40	12.41	12.41	0.01	0.08	0.09	0.08	0.08	0.01	
- Na ₂ S 3.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	18.38	1.79	1.74	1.69	1.74	0.05	5.83	12.66	12.61	12.61	12.63	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	0.01	
น้ำล้างดินตะกอน ครั้งที่ 2																		
- Na ₂ S 1.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	0.94	N.D	N.D	N.D	-	-	6.99	10.59	10.64	10.71	10.65	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	
- Na ₂ S 1.5 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	0.94	N.D	N.D	N.D	-	-	6.99	11.08	11.13	11.09	11.10	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	
- Na ₂ S 2.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	0.94	N.D	N.D	N.D	-	-	6.99	11.16	11.13	11.15	11.15	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	
- Na ₂ S 2.5 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	0.94	N.D	N.D	N.D	-	-	6.99	11.21	11.25	11.22	11.23	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	
- Na ₂ S 3.0 เท่าสมมูลกับ Pb ²⁺	0.94	N.D	N.D	N.D	-	-	6.99	11.38	11.37	11.40	11.38	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.00	

ตารางที่ ค.35 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพ และปรับสภาพน้ำทิ้งที่ผ่านขั้นตอนการตกตะกอนทางเคมี

ชนิดของน้ำทิ้ง	ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)					ปริมาณ Na ₂ S(น./ล.)	ปริมาณกรดไนตริกเข้มข้น (ml./l) ปรับ pH เท่ากับ 9				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std
น้ำสกัด ที่ได้จากกรล้างด้วยกรดเกลือ	0.41	0.42	0.41	0.41	0.00	-	-	-	-	-	-
น้ำสกัดที่ผ่านการตกตะกอนไฮดรอกไซด์											
- Na ₂ S 1.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	1.75	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 1.5 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	2.65	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 2.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	3.50	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 2.5 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	4.40	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 3.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	5.25	-	-	-	-	-
น้ำทิ้ง จากกรล้างกากตะกอน ครั้งที่ 1											
- Na ₂ S 1.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	7.00	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 1.5 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	10.50	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 2.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	14.00	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 2.5 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	17.50	-	-	-	-	-
- Na ₂ S 3.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	21.00	-	-	-	-	-
น้ำล้างดินตะกอน ครั้งที่ 2											
- Na ₂ S 1.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	0.35	0.014	0.014	0.014	0.014	0.000
- Na ₂ S 1.5 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	0.53	0.065	0.064	0.064	0.064	0.000
- Na ₂ S 2.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	0.70	0.088	0.089	0.088	0.088	0.000
- Na ₂ S 2.5 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	0.88	0.112	0.112	0.112	0.112	0.000
- Na ₂ S 3.0 เท่าผสมมูลกับ Pb ²⁺	-	-	-	-	-	1.05	0.128	0.129	0.129	0.129	0.000

ตารางที่ ค.36 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม ที่ทำให้ดินตะกอนอิ่มตัวด้วยน้ำและมีความหนาแน่นสูงสุด
ของดินตะกอนชนิดต่างๆ ตามวิธี Standard Proctor test (ASTM D698)

ค่าที่	ชนิดของดินตะกอน		
	ดินตะกอน	ดินตะกอนละเอียด	กากตะกอน
1	18.72	12.82	14.53
2	22.16	13.06	17.72
3	23.42	13.86	15.77
ค่าเฉลี่ย	21.43	13.25	16.01
Std.	2.43	0.55	1.61

ตารางที่ ค.37 กำลังรับแรงอัดของดินตะกอนชนิดต่างๆที่เตรียมสภาพ ด้วยวิธี Standard Proctor
(ASTM D2166)

7.16

ค่าที่	ชนิดของดินตะกอน		
	ดินตะกอน	ดินตะกอนละเอียด	กากตะกอน
1	1.40	1.46	1.40
2	1.51	1.51	1.46
3	1.51	1.51	1.40
ค่าเฉลี่ย	1.48	1.50	1.42
Std.	0.06	0.03	0.03

ตารางที่ ค.38 ความหนาแน่นแห้งสำหรับการฝังกลบจากดินตะกอนชนิดต่างๆที่เตรียมสภาพ
ตามมาตรฐาน ASTM D698

ค่าที่	ชนิดของดินตะกอน		
	ดินตะกอน	ดินตะกอนละเอียด	กากตะกอน
1	1.82	1.93	1.92
2	1.86	1.87	1.94
3	1.77	1.86	1.89
ค่าเฉลี่ย	1.82	1.89	1.92
Std.	0.05	0.04	0.03

ตารางที่ ค.39 ปริมาณตะกั่วและความเป็นกรด-ด่างในน้ำสกัดของก้อนแข็ง ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM C109 โดยคงที่ w/c เท่ากับ 0.5

ชนิดของดินตะกอน	ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัด (มก./ล.)										ความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัด									
	7 วัน					28 วัน					7 วัน					28 วัน				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 (w/c = 0.50)	N.D.	N.D.	N.D.	-	-	N.D.	N.D.	N.D.	-	-	11.83	11.83	11.85	11.84	0.01	11.87	11.65	11.78	11.77	0.11
ดินตะกอน																				
- ดินตะกอนเพียงอย่างเดียว	2.84	2.84	2.84	2.84	0.00	2.84	2.84	2.84	2.84	0.00	7.78	7.77	7.76	7.77	0.01	7.78	7.77	7.76	7.77	0.01
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.1 เท่า	48.90	45.80	41.90	45.53	3.51	20.40	18.50	22.80	20.57	2.15	11.21	11.21	11.29	11.24	0.05	11.14	11.07	11.10	11.10	0.04
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.2 เท่า	138.20	134.20	134.50	7.16	2.23	87.85	83.12	80.70	83.89	3.64	11.73	11.78	11.77	11.76	0.03	11.59	11.67	11.74	11.67	0.08
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.3 เท่า	150.50	173.50	163.90	162.63	11.55	89.22	85.71	82.10	85.68	3.56	11.98	11.91	11.93	11.94	0.04	11.81	11.83	11.83	11.82	0.01
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.4 เท่า	126.20	114.70	127.50	122.80	7.04	90.24	86.48	85.20	87.31	2.62	12.06	12.10	12.05	12.07	0.03	12.03	12.03	12.05	12.04	0.01
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 1.0 เท่า	18.64	20.43	20.28	19.78	0.99	19.25	16.78	19.01	18.35	1.36	11.96	11.99	11.90	11.95	0.05	12.10	12.07	12.03	12.07	0.04
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 2.0 เท่า	10.47	11.00	10.58	10.68	0.28	7.65	8.21	8.39	8.08	0.39	11.93	11.94	11.95	11.94	0.01	12.17	12.02	12.04	12.08	0.08
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 3.0 เท่า	11.51	10.72	10.58	10.94	0.50	7.23	6.46	6.53	6.74	0.43	11.96	11.96	11.97	11.96	0.01	11.92	12.04	12.11	12.02	0.10
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 5.0 เท่า	5.70	5.80	5.90	5.80	0.10	4.50	4.26	4.23	4.33	0.15	11.96	11.96	11.97	11.96	0.01	11.98	12.07	12.12	12.06	0.07
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 10.0 เท่า	2.40	2.70	2.40	2.50	0.17	2.37	2.42	2.13	2.31	0.16	11.98	11.97	11.98	11.98	0.01	11.87	11.97	12.02	11.95	0.08
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 15.0 เท่า	1.10	1.30	1.40	1.27	0.15	1.51	1.74	1.59	1.61	0.12	11.99	11.96	12.00	11.98	0.02	12.03	12.07	12.01	12.04	0.03
กากตะกอนที่เหลือจากการล้าง¹																				
- ดินตะกอนเพียงอย่างเดียว	1.20	1.50	1.80	1.50	0.30	1.20	1.50	1.80	1.50	0.30	7.94	7.84	7.93	7.90	0.06	7.94	7.84	7.93	7.90	0.06
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.1 เท่า	47.90	46.10	45.20	46.40	1.37	24.85	33.57	29.24	29.22	4.36	11.62	11.64	11.66	11.64	0.02	11.30	11.33	11.36	11.33	0.03
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.2 เท่า	53.40	55.40	53.60	54.13	1.10	36.50	33.50	38.95	36.32	2.73	11.85	11.93	11.95	11.91	0.05	11.60	11.61	11.62	11.61	0.01
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.3 เท่า	92.10	96.90	96.10	95.03	2.57	35.08	37.98	37.84	36.97	1.64	12.09	12.03	12.03	12.05	0.03	11.69	11.71	11.77	11.72	0.04
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.4 เท่า	77.90	76.50	76.00	76.80	0.98	36.44	38.12	37.78	37.45	0.89	12.00	12.02	12.03	12.02	0.02	11.80	11.78	11.78	11.79	0.01
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 1.0 เท่า	20.67	18.84	19.28	19.60	0.96	18.23	17.48	18.42	18.04	0.50	12.01	12.02	12.02	12.02	0.01	11.92	11.97	11.96	11.95	0.03
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 2.0 เท่า	9.84	10.24	9.69	9.92	0.28	8.25	9.17	9.54	8.99	0.66	12.03	12.04	12.06	12.04	0.02	12.07	12.02	12.03	12.04	0.03
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 3.0 เท่า	6.76	6.03	5.54	6.11	0.61	5.27	5.73	5.84	5.61	0.30	12.06	12.07	12.08	12.07	0.01	12.11	12.04	12.01	12.05	0.05
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 5.0 เท่า	1.10	1.30	1.40	1.27	0.15	1.48	1.50	1.47	1.48	0.02	12.02	12.05	12.06	12.04	0.02	11.99	11.92	12.03	11.98	0.06
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 10.0 เท่า	0.80	0.70	1.00	0.83	0.15	0.92	0.69	0.52	0.71	0.20	12.01	12.02	12.03	12.02	0.01	12.06	12.05	12.01	12.04	0.03
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 15.0 เท่า	0.50	0.50	0.40	0.47	0.06	0.23	0.24	0.25	0.24	0.01	12.01	12.02	12.03	12.02	0.01	11.89	12.01	12.05	11.98	0.08

หมายเหตุ ¹ คือ กากตะกอนที่เหลือจากการสกัดด้วยกรดเกลือ และผ่านการล้างน้ำประปาเป็นจำนวน 2 ครั้ง

ตารางที่ ค.40 ความหนาแน่นรวมและกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็ง ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM C109 โดยคงที่ w/c เท่ากับ 0.5

ชนิดของดินตะกอน	ความหนาแน่นรวม (ตัน/ลบ.ม.)										กำลังรับแรงยึดบริวาร (ksc)											
	7 วัน					28 วัน					7 วัน					28 วัน						
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ASTM D1633	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.	ASTM D1633
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 1 (w/c = 0.50)	1.61	1.62	1.68	1.64	0.04	1.58	1.54	1.54	1.55	0.02	78.00	66.36	71.20	71.85	5.85	61.08	154.90	163.30	157.90	158.70	4.26	134.90
ดินตะกอน																						
- ดินตะกอนเพียงอย่างเดียว	1.82	1.77	1.86	1.82	0.05	1.82	1.77	1.86	1.82	0.05	1.40	1.51	1.51	1.48	0.06	1.48	1.40	1.51	1.51	1.48	0.06	1.48
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.1 เท่า	2.10	2.12	2.15	2.13	0.02	2.02	2.05	2.07	2.05	0.03	8.18	7.27	6.18	7.21	1.00	6.13	9.45	10.18	10.55	10.06	0.56	8.55
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.2 เท่า	2.02	2.11	2.14	2.09	0.06	1.97	1.99	1.91	1.96	0.04	7.82	8.00	7.09	7.64	0.48	6.49	84.00	91.82	84.55	86.79	4.36	73.77
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.3 เท่า	2.04	2.09	2.07	2.07	0.03	1.94	1.87	1.92	1.91	0.04	9.09	8.18	8.73	8.67	0.46	7.37	104.55	122.73	118.18	115.15	9.46	97.88
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.4 เท่า	2.13	2.08	2.07	2.09	0.03	1.92	1.95	1.92	1.93	0.02	19.09	16.91	20.00	18.67	1.59	15.87	131.82	136.36	127.27	131.82	4.55	112.05
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 1.0 เท่า	1.93	1.86	1.89	1.89	0.03	1.86	1.84	1.81	1.84	0.03	45.45	43.64	39.09	42.73	3.28	36.32	140.18	139.92	143.41	141.17	1.94	119.99
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 2.0 เท่า	1.82	1.85	1.81	1.83	0.02	1.79	1.82	1.84	1.82	0.03	50.91	44.55	48.18	47.88	3.19	40.70	152.05	153.15	154.22	153.14	1.08	130.17
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 3.0 เท่า	1.82	1.81	1.82	1.81	0.00	1.74	1.69	1.71	1.71	0.03	52.73	59.64	59.45	57.27	3.94	48.68	159.01	157.15	157.18	157.78	1.07	134.11
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 5.0 เท่า	1.87	1.79	1.80	1.82	0.04	1.78	1.78	1.74	1.77	0.02	70.25	71.38	71.03	70.89	0.58	60.25	160.28	156.87	156.72	157.96	2.01	134.26
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 10.0 เท่า	1.78	1.73	1.71	1.74	0.04	1.66	1.60	1.68	1.65	0.04	70.97	71.79	71.12	71.29	0.44	60.60	157.32	158.51	157.89	157.91	0.60	134.22
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 15.0 เท่า	2.05	1.95	1.97	1.99	0.05	1.81	1.87	1.79	1.82	0.04	71.28	71.39	71.58	71.42	0.15	60.70	153.10	159.69	155.44	156.08	3.34	132.67
กากตะกอนที่เหลือจากการล้าง ¹																						
- ดินตะกอนเพียงอย่างเดียว	1.92	1.94	1.89	1.92	0.03	1.92	1.94	1.89	1.92	0.03	1.40	1.46	1.40	1.42	0.03	1.42	1.40	1.46	1.40	1.42	0.03	1.42
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.1 เท่า	2.21	2.21	2.19	2.20	0.01	2.06	2.04	2.06	2.05	0.01	3.27	3.64	3.73	3.55	0.24	3.01	8.55	7.45	8.73	8.24	0.69	7.01
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.2 เท่า	2.16	2.14	2.15	2.15	0.01	2.02	2.01	1.98	2.00	0.02	3.73	3.27	3.91	3.64	0.33	3.09	49.55	54.55	53.64	52.58	2.66	44.69
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.3 เท่า	2.07	2.07	2.06	2.06	0.00	1.99	2.01	1.97	1.99	0.02	3.45	4.00	3.64	3.70	0.28	3.14	63.09	71.64	74.18	69.64	5.81	59.19
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 0.4 เท่า	2.03	2.02	2.04	2.03	0.01	1.97	1.94	1.92	1.94	0.03	4.91	4.73	4.73	4.79	0.10	4.79	109.09	105.45	93.45	102.67	8.18	87.27
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 1.0 เท่า	1.97	2.00	1.94	1.97	0.03	1.90	1.87	1.85	1.87	0.03	50.91	40.91	40.91	44.24	5.77	37.61	124.35	125.47	125.14	124.99	0.57	106.24
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 2.0 เท่า	1.89	1.84	1.84	1.86	0.03	1.81	1.72	1.97	1.83	0.13	60.00	56.36	59.64	58.67	2.00	49.87	138.45	140.12	139.77	139.45	0.88	118.53
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 3.0 เท่า	1.86	1.79	1.86	1.84	0.04	1.82	1.79	1.84	1.82	0.03	69.09	66.36	62.73	66.06	3.19	56.15	160.19	159.79	159.94	159.97	0.20	135.98
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 5.0 เท่า	1.84	1.82	1.81	1.82	0.02	1.81	1.80	1.85	1.82	0.03	71.29	72.74	72.85	72.29	0.87	61.45	160.15	159.45	161.24	160.28	0.90	136.24
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 10.0 เท่า	1.75	1.69	1.78	1.74	0.05	1.69	1.71	1.59	1.66	0.06	72.05	73.55	72.69	72.76	0.75	61.85	159.34	157.48	161.45	159.42	1.99	135.51
- ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1 เท่ากับ 15.0 เท่า	1.90	1.92	1.93	1.92	0.02	1.80	1.91	1.82	1.84	0.06	72.47	71.65	72.31	72.14	0.43	61.32	157.48	159.98	157.46	158.31	1.45	134.56

หมายเหตุ ¹ คือ ดินตะกอนที่ผ่านการชะล้าง/สกัด และผ่านการล้างน้ำประปา 2 ครั้ง

ตารางที่ ค.41 การสกัดตะกั่วออกจากดินตะกอน ที่ระดับความเป็นกรด-ด่าง ที่ 10 11 และ 12

โดยใช้สภาพแบบวิธีการชะล้างตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6/2540

ชนิดของดินตะกอน	pH	ปริมาณตะกั่วในน้ำสกัด (มก./ล.)				
		ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	Std.
ดินตะกอน	10.00	N.D	N.D	N.D	-	-
	11.00	14.50	13.90	13.90	14.10	0.35
	12.00	31.70	28.30	29.20	29.73	1.76
กากตะกอน	10.00	N.D	N.D	N.D	-	-
	11.00	24.00	21.70	22.50	22.73	1.17
	12.00	35.40	37.20	37.80	36.80	1.25

7.16

ตารางที่ ค.42 ความเป็นกรด-ด่างของน้ำสกัดของก้อนมอร์ต้าและคอนกรีต

ชนิด	ความเป็นกรด-ด่าง				
	ค่าที่ 1	ค่าที่ 2	ค่าที่ 3	ค่าเฉลี่ย	std.
ก้อนมอร์ต้า	12.03	12.07	12.04	12.05	0.02
คอนกรีต	11.92	12.07	12.03	12.01	0.08

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง

รายละเอียดราคาค่าใช้จ่ายในการกำจัด/บำบัดดินตะกอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างหลุมฝังกลบดินตะกอน

ชนิดของค่าใช้จ่าย	จำนวนหน่วย	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	ราคาทั้งหมด
ค่าเจาะสำรวจชั้นดิน ลึก 10 เมตร	4	10,000.00	หลุม	40,000.00
ค่าสำรวจทำแผนที่	1	10,000.00	ครั้ง	10,000.00
ค่าขุดดิน พร้อมทำการฝังกลบ	12,746	100.00	ลบ.ม.	1,274,550.00
ค่าบดอัดดินตะกอน ชั้นละ 0.5 ม. จำนวน 10 ชั้น	19,803	10.00	ตร.ม.	198,030.00
ค่าดินเหนียว พร้อมบดอัด หนา 0.6 ม. พร้อมปู HDPE หนา 1.5 มม. ที่กันหลุม ข้างหลุม และปากหลุมขณะทำการปิดหลุม	6,637	200.00	ตร.ม.	1,327,400.00
ค่าขุดลอกและขนส่ง	15,000	267.00	ตัน	4,005,000.00
ค่าทรายหนา 0.3 ม. พร้อมบดอัด	1,035.00	220.00	ลบ.ม.	227,700.00
ค่าวางระบบรวบรวมน้ำเสีย พร้อมอุปกรณ์	1	60,000.00	หน่วย	60,000.00
ค่าดำเนินงาน (วิศวกร 1 คน + คนคุมงาน 1 คน)	1	40,000.00	เดือน	40,000.00
ค่าจัดการทางวิศวกรรม	1	3% ค่าก่อสร้าง	หน่วย	215,481.00
ค่าจัดการทางทัศนียภาพ	1	5% ค่าก่อสร้าง	หน่วย	359,134.00
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น				7,757,295.00
ค่าใช้จ่ายต่อตัน				518.00

ตารางที่ ง.2 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการกำจัดดินตะกอนด้วยโต๊ะเขย่าแบบเปียก พร้อมฝังกลบดินตะกอนสะอาด

ชนิดของค่าใช้จ่าย	จำนวนหน่วย	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	ราคาทั้งหมด
ค่าโต๊ะเขย่าแบบเปียก	1	1,600,000.00	ตัว	1,600,000.00
ค่าเจาะสำรวจชั้นดิน ลึก 10 เมตร	4	10,000.00	หลุม	40,000.00
ค่าสำรวจทำแผนที่	1	10,000.00	ครั้ง	10,000.00
ค่าขุดดิน พร้อมทำการฝังกลบ	8,640	100.00	ลบ.ม.	864,000.00
ค่าบดอัดดิน ชั้นละ 0.5 ม. จำนวน 10 ชั้น	12,960	10.00	ตร.ม.	129,600.00
ค่าดินเหนียว พร้อมบดอัด หนา 0.6 ม. พร้อมปู HDPE หนา 1.5 มม. ที่กันหลุม ข้างหลุม และปากหลุมขณะทำการปิดหลุม	4,812	200.00	ตร.ม.	962,400.00
ค่าขุดลอกและขนส่ง	15,000	267.00	ตัน	4,005,000.00
ค่าทรายหนา 0.3 ม. พร้อมบดอัด	753	220.00	ลบ.ม.	165,660.00
ค่าวางระบบรวบรวมน้ำเสีย พร้อมอุปกรณ์	1	60,000.00	หน่วย	60,000.00
ค่าดำเนินงาน (วิศวกร 1 คน + คนคุมงาน 2 คน)	8	45,000.00	เดือน	360,000.00
ค่าจัดการทางวิศวกรรม	1	3% ค่าก่อสร้าง	หน่วย	187,100.00
ค่าจัดการทางทัศนียภาพ	1	5% ค่าก่อสร้าง	หน่วย	329,833.00
ค่าเครื่องผสมระหว่างดินตะกอนกับน้ำ พร้อมปั๊ม	2	50,000.00	หน่วย	100,000.00
ค่าเครื่อง Filter Press	1	550,000.00	เครื่อง	550,000.00
จำหน่ายตะกอนตะกั่ว	7,099.5	-1,000.00	ตัน	-7,099,500.00
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น				2,264,093.00
ค่าใช้จ่ายต่อตัน				151.00

ตารางที่ ง.3 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการกำจัดตะกั่วออกจากดินตะกอนด้วยการล้างสกัดด้วยกรดเกลือ พร้อมทั้งการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น

ชนิดของค่าใช้จ่าย	จำนวนหน่วย	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	ราคาทั้งหมด
รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการล้างสกัดด้วยกรดเกลือ				
ค่า Plant Layout	1	30,000.00	หน่วย	30,000.00
ค่าขุดลอกและขนส่ง	15,000	267.00	ตัน	4,005,000.00
ถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลบ.ม. ทำด้วย Stainless Steel 316L (จำนวนถังปฏิกรณ์ทั้งสิ้น 40 ถัง เป็นถังปฏิกรณ์สำหรับการล้างสกัดตะกั่ว 20 ถัง) สามารถกำจัดดินตะกอนได้ชั่วโมงละ 200 กก. พร้อมอุปกรณ์	40	400,000.00	บาท/ถัง	16,000,000.00
ค่าติดตั้งระบบอัตโนมัติ พร้อมอุปกรณ์	1	10,000,000.00	บาท/ชุด	10,000,000.00
ค่า Filter Press	2	5,000,000.00	หน่วย	10,000,000.00
ค่าฐานรากสำหรับรองรับน้ำหนักถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลบ.ม.	40	50,000.00	บาท/ 1 ฐาน	2,000,000.00
ค่าดำเนินงาน (วิศวกร 1 คน + หัวหน้าคนงาน 1 คน + 5 คนงาน)	8	80,000.00	บาท/เดือน	640,000.00
ค่าเครื่องแมมเบรน สำหรับกำจัดน้ำเสีย	2	10,000,000.00	บาท/เครื่อง	20,000,000.00
ค่าสารเคมี				
- กรดเกลือ	100,100	15.00	บาท/กก.	1,501,500.00
- กรดไนตริก	70	18.60	บาท/กก.	1,302.00
- โซดาไฟ	4,150	35.00	บาท/กก.	145,250.00
- โซเดียมซัลไฟด์	36,750	98.00	บาท/กก.	3,601,500.00
รายละเอียดค่าฝังกลบ				
ค่าเจาะสำรวจชั้นดิน ลึก 10 เมตร	4	10,000.00	หลุม	40,000.00
ค่าสำรวจทำแผนที่	1	10,000.00	ครั้ง	10,000.00
ค่าขุดดิน พร้อมทำการฝังกลบ	9,990	100.00	ลบ.ม.	999,000.00
ค่าบดอัดดินตะกอน ชั้นละ 0.5 ม. จำนวน 10 ชั้น	15,210	10.00	ตร.ม.	152,100.00
ค่าดินเหนียว พร้อมบดอัด หนา 0.6 ม.พร้อมปู HDPE หนา 1.5 มม. ที่กันหลุม ข้างหลุม และปากหลุมขณะทำการปิดหลุม	5,424	200.00	ตร.ม.	1,084,800.00
ค่าทรายหนา 0.3 ม.พร้อมบดอัด	847.00	220.00	ลบ.ม.	186,340.00
ค่าวางระบบรวบรวมน้ำเสีย พร้อมอุปกรณ์	1	60,000.00	หน่วย	60,000.00
ค่าจัดการทางวิศวกรรม	1	3% ค่าก่อสร้าง	หน่วย	75,967.00
ค่าจัดการทางทัศนียภาพ	1	5% ค่าก่อสร้าง	หน่วย	126,612.00
รายละเอียดค่าขนส่งตะกอนเคมี				
ค่าขนส่ง 1.20 บาท/ตัน/กิโลเมตร ระยะทางการขนส่งเท่ากับ 80 กม. ดังนั้นราคาขนส่งต่อตันเท่ากับ 96 บาท/ตัน	5,824	96.00	บาท/ตัน	559,104.00
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น				71,218,475.00
ค่าใช้จ่ายต่อตัน				4,748.00

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.4 รายละเอียดค่าใช้จ่ายในการทำเสถียร/กั้นแข็งดินตะกอน พร้อมฝังกลบในหลุมฝังกลบนิรภัย

ชนิดของค่าใช้จ่าย	จำนวนหน่วย	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	ราคาทั้งหมด
ค่าขุดลอกและขนส่ง	15,000	267.00	ตัน	4,005,000.00
ค่าเจาะสำรวจชั้นดิน ลึก 15 เมตร	4	10,000.00	หลุม	40,000.00
ค่าขุดดินเพื่อก่อสร้างหลุมฝังกลบและฝังกลบดินตะกอน	139,500	100.00	บาท/ลบ.ม	13,950,000.00
ค่าเครื่องผสมคอนกรีตขนาด 3.8 ลบ.ม. พร้อมบ่มสำหรับเทคอนกรีตสด สามารถผลิตคอนกรีตผสมได้ 114 ลบ.ม./ชม. หรือผลิตคอนกรีตสดได้ วันละ 2,736 ลบ.ม	1	200,000.00	บาท/ชุด	200,000.00
ค่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 1	112,500	2,400.00	บาท/ตัน	270,000,000.00
ค่าบดอัดดินเดิมหนา 30 ซม.	27,500	50.00	บาท/ตร.ม.	1,375,000.00
ค่าดินเหนียวตอัดหนา 90 ซม. และ 30 ซม. พร้อม HDPE หนา 1.5 มม.	13,800	200.00	บาท/ตร.ม.	2,760,000.00
ค่ากวาดทรายหยาบคัดขนาด	15,700	200.00	บาท/ตร.ม.	3,140,000.00
ค่าดำเนินงาน (วิศวกร 1 คน + หัวหน้าคนงาน 1 คน + คนงาน 5 คน)	2.00	46,000.00	บาท/เดือน	92,000.00
ค่าระบบระบายน้ำภายในหลุมพร้อมอุปกรณ์	1.00	300,000.00	บาท	300,000.00
ค่าออกแบบทางวิศวกรรม	1.00	3% ของค่าก่อสร้าง	บาท	646,950.00
ค่าจัดการทางด้านทัศนียภาพ พร้อมปลูกพืชบนหลุมฝังกลบ	1.00	5% ของค่าก่อสร้าง	บาท	1,078,250.00
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น				297,587,200.00
ค่าใช้จ่ายต่อตัน				19,840.00

ตารางที่ ง.5 การบำบัดดินตะกอนโดยการส่งไปฝังกลบยังหลุมฝังกลบของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (GENCO)

	จำนวนหน่วย	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	ราคาทั้งหมด
ค่าขนส่งจากโรงแต่งแร่ไปยังศูนย์แสมดำ มีระยะทาง 250 กม. โดยคิดค่าขนส่ง 2.75 บาท/ตัน/กิโลเมตร ดังนั้นมีค่าขนส่งเท่ากับ 687.50 บาท/ตัน	15,000	687.50	บาท/ตัน	10,312,500.00
ค่าขนส่งจากศูนย์แสมดำถึงระบือ	15,000	228.00	บาท/ตัน	3,420,000.00
ค่าฝังกาก	15,000	874.00	บาท/ตัน	13,110,000.00
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น				26,842,500.00
ค่าใช้จ่ายต่อตัน				1,789.50

ตารางที่ ง.6 การบำบัดดินตะกอนโดยการฝังกลบที่หลุมฝังกลบของบริษัท Better World Green ที่สระบุรี

ชนิดค่าใช้จ่าย	จำนวนหน่วย	ราคาต่อหน่วย	หน่วย	ราคาทั้งหมด
ค่าขนส่ง 1.20 บาท/ตัน/กิโลเมตร ระยะทางการขนส่งเท่ากับ 400 กม. ดังนั้นราคาขนส่งต่อตันเท่ากับ 480 บาท/ตัน	15,000	480.00	บาท/ตัน	7,200,000.00
ค่าฝังกาก	15,000	3,000.00	บาท/ตัน	45,000,000.00
ค่าใช้จ่ายรวมทั้งสิ้น				52,200,000.00
ค่าใช้จ่ายต่อตัน				3,480.00

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ทิว คำปาน เกิดวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ.2518 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ในปีการศึกษา 2538 ทำงานตำแหน่งวิศวกรโยธา ที่บริษัท พีระมิดดีเวลอปเม้นท์ อินเตอร์เนชั่นแนล คอร์ปอเรชั่น จำกัด ตั้งแต่ ปี พ.ศ.2539 ถึง พ.ศ. 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย