

การชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง



นายพีรพัฒน์ อ้นโต

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

LEACHING OF HEAVY METALS FROM STABILIZED AND SOLIDIFIED WASTES



Mr. Peerapat Ownto

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006

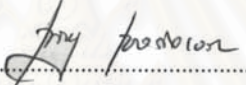
Copyright of Chulalongkorn University


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการ
ปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง
โดย นายพีรพัฒน์ อินโต
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แนบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

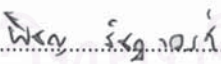

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพชรพร เขาวกิจเจริญ)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนัญ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

สถาบันเทคโนโลยี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พีรพัฒน์ อ้นโต : การชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง (LEACHING OF HEAVY METALS FROM STABILIZED AND SOLIDIFIED WASTES) อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร. มนัสกร ราชากรกิจ, 171 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากตัวอย่าง 2 ชนิด คือตัวอย่างของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง ซึ่งการทดลองนั้นทำการชะละลายด้วยน้ำกลั่น กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก โดยการทดลองด้วยกรดนั้นจะทำการควบคุมพีเอชในการทดลอง 4 ช่วงการทดลองคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 และในแต่ละช่วงพีเอชการทดลองจะทำการแปรผันระยะเวลาในการทดลองเท่ากับ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการทดสอบตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และ การทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โดยโลหะหนักที่ทำการศึกษา คือ ทองแดง สังกะสี นิกเกิล ตะกั่ว โครเมียม และแบเรียม

จากผลการทดลองพบว่า การชะละลายของโลหะหนักนั้นมีปัจจัยหลักในการชะละลายคือพีเอชสุดท้าย ซึ่งจะมีการชะละลายได้สูงที่สุดในช่วงพีเอช 3-5 โดยชนิดของกรดที่ใช้ในการปรับพีเอช และลักษณะของตัวอย่างเป็นปัจจัยควบคู่ที่ส่งผลต่อการชะละลายของโลหะหนัก คือ กรดอะซิติกจะส่งผลทำให้โลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างปรับเสถียรออกมามากที่สุดเนื่องจากความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนัก ยกเว้นนิกเกิลที่พบการชะละลายใกล้เคียงในการทดลองด้วยกรดทุกชนิด ส่วนการทดลองด้วยกรดไนตริกนั้นมีผลทำให้โลหะหนักที่อยู่ในตัวอย่างก้อนแข็งชะละลายมากที่สุดเนื่องจากกรดไนตริกมีความสามารถในการทำลายโครงสร้างซีเมนต์ได้ดีที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก ยกเว้นโครเมียมที่พบความเข้มข้นสูงที่สุดเมื่อทำการชะละลายโดยกรดอะซิติก ส่วนการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายนั้นมีผลต่อการชะละลายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าไม่มีการทดลองกรณีใดกรณีหนึ่งที่สามารถอธิบายความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆในของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบต่างๆได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต..... น.ร.ณัฐพร อ้นโต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ด.....
ปีการศึกษา..... 2549.....

4670422321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : LEACHING / HEAVY METAL / STABILIZED AND SOLIDIFIED WASTE

PEERAPAT OWNTO : LEACHING OF HEAVY METALS FROM STABILIZED
AND SOLIDIFIED WASTES. THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ,
Ph.D.,171 PP.

This research is aimed to study leachability of heavy metals from two types of treated wastes; namely, stabilized and solidified electronic sludges. Distilled water, acetic acid, nitric acid and sulfuric acid were employed in the investigation of leachability of heavy metals; Cu, Zn, Ni, Pb, Cr and Ba. In acid leaching experiments, pH values were controlled in four ranges; 9 to 11, 7 to 9, 5 to 7 and 3 to 5. Leaching was carried out in various leaching periods at 18, 24, 48, 120 and 168 hours, at each pH range. Results of this experiment were compared with those performed using US EPA regulatory leaching procedure (SW-846 Method 1311; TCLP) and the procedure described in the Notification No.6 of the Ministry of Industry (B.E. 2540) .

Results indicated that the main factor affecting the leachability of heavy metals was final pH, with pH 3 to 5 having the highest leaching. Types of acid and waste treatment condition were factors which affected the leachability of heavy metals. Acetic acid caused the highest metal leaching from stabilized waste due to complexation with heavy metals. However, Ni was found to have similar leachability in all acid leaching experiments. Nitric acid caused the highest metal leaching in solidified waste because of its ability to destroy cement matrix. One exception is Cr which was found in high concentrations in acetic acid leaching experiment. Duration of leaching had only a minor effect on the metal leachability. It is apparent that there is no single leaching procedure that can clearly and fully explain the leachability of heavy metals from stabilized and solidified wastes.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Environmental Engineering Student's Signature *Peerapat Own-to*
Field of Study Environmental Engineering Advisor's Signature *[Signature]*
Academic Year 2006

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางรวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เขมรัฐ โอสถาปนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่กรุณาแนะแนวทางทำให้วิทยานิพนธ์นี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์และกลุ่มวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2548 และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด มหาชน ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ) ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณคุณธีรพล พิรุฬห์ทรัพย์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง และพี่ๆน้องๆนิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณ มารดา และพี่ๆ ของผู้วิจัยในการสนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสาร.....	4
2.1 ของเสียอันตราย.....	4
2.2 โลหะหนัก.....	5
2.3 กระบวนการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมในประเทศไทย.....	6
2.4 การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง.....	9
2.4.1 การทำเสถียร.....	9
2.4.2 การทำก้อนแข็ง.....	9
2.4.3 ซีเมนต์.....	10
2.4.4 น้ำ.....	10
2.4.5 ประสิทธิภาพของการเสถียรและ/หรือการทำก้อนแข็ง.....	11
2.5 กลไกการจับยึดโลหะหนัก.....	11
2.5.1 Microencapsulation.....	12
2.5.2 Macroencapsulation.....	12
2.5.3 Adsorption.....	12
2.5.4 Absorption.....	12
2.5.5 Precipitation.....	12
2.5.6 Detoxification.....	13

2.6	การฝังกลบของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัด.....	13
2.6.1	น้ำชะในหลุมฝังกลบ.....	14
2.6.2	สารเจือปน.....	14
2.7	การทดสอบการชะละลาย.....	16
2.8	พฤติกรรมของการชะละลายออกมาของสารเจือปน.....	22
2.9	เกณฑ์มาตรฐานสำหรับเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัด.....	29
2.10	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	41
3.1	แผนการดำเนินการวิจัย.....	41
3.1.1	การวางแผนการวิจัย.....	41
3.1.2	ข้อมูลกระบวนการบำบัดของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการ อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกาก อุตสาหกรรม(แสมดำ).....	41
3.1.3	ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย.....	44
3.1.4	ขั้นตอนการวิจัย.....	45
3.2	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	46
3.3	การดำเนินการวิจัย.....	47
	การศึกษาที่ 1 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจาก กระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง.....	47
	การศึกษาที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่น.....	47
	การศึกษาที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง พีเอช ระยะเวลาในการ ชะละลายและความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่นที่ ทำการปรับพีเอชด้วยกรดอะซิติก.....	50
	การศึกษาที่ 4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ระยะเวลาในการ ชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่นที่ ทำการปรับพีเอชด้วยกรดไนตริก.....	53
	การศึกษาที่ 5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพีเอช ระยะเวลาใน การชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่นที่ ทำการปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริก.....	56

การศึกษาที่ 6 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดลองกับ มาตรฐานอื่นๆ.....	59
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	61
4.1 ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากกระบวนการ ปรับเสถียรและป็นทำก้อนแข็ง.....	61
4.1.1 การเลือกชนิดของโลหะหนักเพื่อทำการศึกษา.....	62
4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6(พ.ศ.2540) และมาตรฐาน US. EPA SW-846 Method 1311(TCLP)	62
4.3 การชะละลายของโลหะหนักโดยการใช้ น้ำกลั่น ในการชะละลาย.....	64
4.4 การชะละลายของแคลเซียม.....	67
4.4.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้น ของแคลเซียม.....	67
4.4.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่ชะละลาย ออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด.....	71
4.4.3 เปรียบเทียบการชะละลายของแคลเซียม.....	74
4.5 การชะละลายของทองแดง.....	74
4.5.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้น ของทองแดง.....	74
4.5.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของทองแดงที่ชะละลาย ออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด.....	78
4.5.3 เปรียบเทียบการชะละลายของทองแดง.....	81
4.6 การชะละลายของสังกะสี.....	83
4.6.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้น ของสังกะสี.....	83
4.6.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลาย ออกมา ในช่วงพีเอชที่กำหนด.....	87
4.6.3 เปรียบเทียบการชะละลายของสังกะสี.....	90
4.7 การชะละลายออกมาของนิกเกิล.....	92
4.7.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้น ของนิกเกิล.....	92

4.7.2	อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของนิกเกิลที่ชะละลาย ออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด.....	94
4.7.3	เปรียบเทียบการชะละลายของนิกเกิล.....	96
4.8	การชะละลายของตะกั่ว.....	97
4.8.1	อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้น ของตะกั่ว.....	97
4.8.2	อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลาย ออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด.....	101
4.8.3	เปรียบเทียบการชะละลายของตะกั่ว.....	104
4.9	การชะละลายของโครเมียม.....	106
4.9.1	อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้น ของโครเมียม.....	106
4.9.2	อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมที่ชะละลาย ออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด.....	109
4.9.3	เปรียบเทียบการชะละลายของโครเมียม.....	112
4.10	การชะละลายของแบเรียม.....	114
4.10.1	อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้น ของแบเรียม.....	114
4.10.2	อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของแบเรียมที่ชะละลาย ออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด.....	118
4.10.3	เปรียบเทียบการชะละลายของแบเรียม.....	121
4.11	ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายออกมาของโลหะหนัก.....	123
4.11.1	ระยะเวลาที่ใช้ในการชะละลาย.....	123
4.11.2	ของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย.....	124
4.11.3	พีเอชในการชะละลาย.....	124
4.11.4	ลักษณะของตัวอย่างที่ทำการศึกษา.....	125
4.12	พิจารณาเปรียบเทียบกับสภาวะการทดสอบตามมาตรฐาน.....	125
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	126
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	126
5.2	ความสำคัญทางด้านวิศวกรรม.....	128
5.3	ข้อเสนอแนะ.....	128

รายการอ้างอิง.....129

ภาคผนวก.....133

ภาคผนวก ก ผลการทดลองการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอชจากตัวอย่างปรับเสถียร

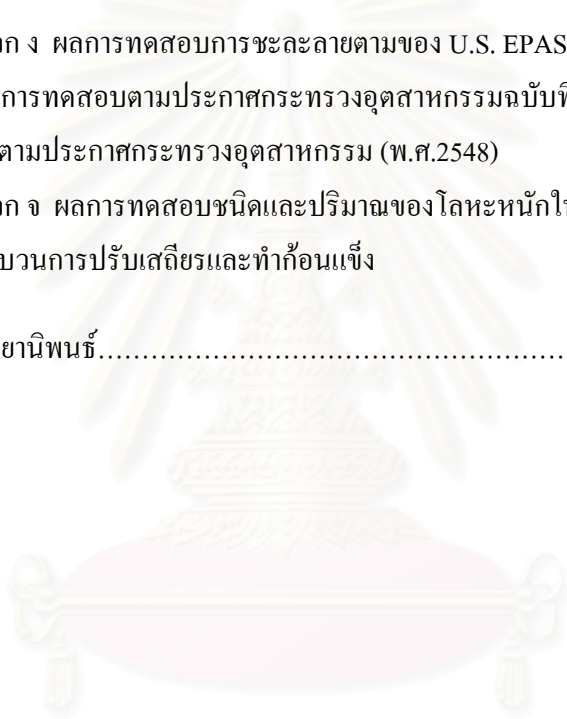
ภาคผนวก ข ผลการทดลองการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ในการปรับพีเอชจากตัวอย่างก้อนแข็ง

ภาคผนวก ค ผลการทดลองการชะละลายโดยการใช้น้ำกลั่น

ภาคผนวก ง ผลการทดสอบการชะละลายตามของ U.S. EPASW-846 Method 1311 (TCLP) การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และ การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548)

ภาคผนวก จ ผลการทดสอบชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่าง จากกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....171



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	ประเภทกากของเสียในการให้บริการของ บริษัท บริหารและพัฒนา เพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมคำ).....	6
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบของการทดสอบการชะละลายในวิธีการทดสอบชนิดต่างๆ.....	17
ตารางที่ 2.3	ค่ามาตรฐานของสารพิษต่างๆ จากการทดสอบด้วยวิธี TCLP.....	30
ตารางที่ 3.1	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 2.....	48
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 3.....	51
ตารางที่ 3.3	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 4.....	54
ตารางที่ 3.4	ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 5.....	57
ตารางที่ 4.1	ปริมาณของธาตุชนิดต่าง ๆ ที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF.....	61
ตารางที่ 4.2	ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ จากการทดสอบ การชะละลายตามมาตรฐาน.....	63
ตารางที่ 4.3	มาตรฐานโลหะหนักในน้ำชะละลาย.....	63
ตารางที่ 4.4	พีเอชสุดท้ายของน้ำชะละลายตามมาตรฐาน.....	64
ตารางที่ 4.5	เปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ จากการ ทดสอบการชะละลาย.....	65
ตารางที่ 4.6	ความเข้มข้นแคลเซียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร.....	67
ตารางที่ 4.7	ความเข้มข้นแคลเซียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	68
ตารางที่ 4.8	ความเข้มข้นทองแดงในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร.....	75
ตารางที่ 4.9	ความเข้มข้นทองแดงในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	76
ตารางที่ 4.10	เปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง.....	82
ตารางที่ 4.11	ความเข้มข้นสังกะสีในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร.....	83
ตารางที่ 4.12	ความเข้มข้นสังกะสีในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	84
ตารางที่ 4.13	เปรียบเทียบความเข้มข้นของสังกะสีจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง.....	91
ตารางที่ 4.14	ความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร.....	92
ตารางที่ 4.15	เปรียบเทียบความเข้มข้นของนิกเกิลจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง.....	97
ตารางที่ 4.16	ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร.....	98

ตารางที่ 4.17 ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	98
ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่วจากการชะละลายแบบต่างๆ	
ในการทดลอง.....	105
ตารางที่ 4.19 ความเข้มข้นโครเมียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร.....	106
ตารางที่ 4.20 ความเข้มข้นโครเมียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	107
ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมจากการชะละลายแบบต่างๆ	
ในการทดลอง.....	113
ตารางที่ 4.22 ความเข้มข้นแบเรียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร.....	114
ตารางที่ 4.23 ความเข้มข้นแบเรียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	115
ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบความเข้มข้นของแบเรียมจากการชะละลายแบบต่างๆ	
ในการทดลอง.....	123
ตารางที่ 5.1 ชนิดของกรดที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ.....	126

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แบบจำลองหลุมฝังกลบนิรภัยของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์ สิ่งแวดล้อม จำกัด(มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ).....	13
รูปที่ 2.2	แหล่งกำเนิดของของเหลวในหลุมฝังกลบ.....	15
รูปที่ 2.3	พฤติกรรมโดยทั่วไปของการชะละลายของสาร 3 กลุ่มที่พีเอชสถานะเดียวกัน.....	23
รูปที่ 2.4	ระดับที่เปลี่ยนแปลงในการละลายจากปัจจัยอื่นๆ.....	23
รูปที่ 2.5	ลักษณะเฉพาะของวัสดุและปัจจัยภายนอก(ทางเคมีและฟิสิกส์), อิทธิพลของการ ปล่อยสารเจือปนออกมาจากวัสดุก้อนขนาดใหญ่ และวัสดุแบบเกล็ด.....	27
รูปที่ 2.6	ค่าพีเอชและความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย.....	33
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่าง และ ซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย.....	34
รูปที่ 2.8	pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียมและตะกั่ว.....	34
รูปที่ 3.1	ระบบปรับเสถียร (Stabilization) ของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์ สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ).....	42
รูปที่ 3.2	การทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) ของบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการ อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ).....	43
รูปที่ 3.3	ตัวอย่างของเสียที่ผ่านการปรับเสถียร.....	44
รูปที่ 3.4	ตัวอย่างของเสียที่ผ่านการทำก้อนแข็ง.....	45
รูปที่ 3.5	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยน้ำกลั่น.....	49
รูปที่ 3.6	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยกรดอะติก.....	52
รูปที่ 3.7	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยกรดไนตริก.....	55
รูปที่ 3.8	แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยกรดซัลฟิวริก.....	58
รูปที่ 4.1	การชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ โดยการใช้ น้ำกลั่น ในตัวอย่างก้อนแข็ง.....	66
รูปที่ 4.2	การชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ โดยการใช้ น้ำกลั่น ในตัวอย่างปรับเสถียร.....	66
รูปที่ 4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมกับพีเอชต่าง ๆ โดยกรดอะซีติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก	70
รูปที่ 4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลา ในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร.....	72

- รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมกับพีเอชต่าง ๆ โดย
กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก.....117
- รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลา
ในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร.....119
- รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลา
ในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างก้อนแข็ง.....120



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ

Al	= อะลูมิเนียม (Aluminum)
Ba	= แบเรียม (Barium)
Ca	= แคลเซียม (Calcium)
Cl	= คลอรีน (Chlorine)
Cr	= โครเมียม (Cromium)
Cu	= ทองแดง (Copper)
DOC	= สารอินทรีย์คาร์บอนละลาย (Dissolve Organic Carbon)
Fe	= เหล็ก (iron)
H ₂ SO ₄	= กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid)
HAc	= กรดอะซิติก (Acetic Acid)
HNO ₃	= กรดไนตริก (Nitric Acid)
hr	= ชั่วโมง
M	= โมลาร์ (Molar)
Mg	= แมกนีเซียม (Megnesium)
mg/l	= มิลลิกรัมต่อลิตร
Mn	= แมงกานีส (Manganese)
Na	= โซเดียม (Sodium)
P	= ฟอสฟอรัส (Phosphorus)
Pb	= ตะกั่ว (Laed)
pH	= ค่าความเป็นกรด-ด่าง
S	= ซัลเฟอร์ (Sulfur)
Si	= ซิลิกอน (Silicon)
TCLP	= การทดสอบตามมาตรฐานของ U.S.EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure)
Ti	= ไททานเนียม(Titanium)
VOCs	= สารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compound)
XRF	= X-Ray Fluorescence
Zn	= สังกะสี (Zinc)
มก./ล.	= มิลลิกรัมต่อลิตร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญและที่มาของปัญหา

การพัฒนาด้านอุตสาหกรรม มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก ผลจากการผลิตทางอุตสาหกรรมส่งผลต่อปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ และมีแนวโน้มที่ปริมาณของเสียจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ การขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้ก่อให้เกิดกากของเสียจากกระบวนการผลิตมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งหากไม่มีการควบคุมดูแลให้เป็นไปอย่างถูกต้อง กากอุตสาหกรรมที่เกิดจากการผลิตสินค้าเพื่อการอุปโภคและบริโภคของโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ ก็จะย้อนกลับมาเป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน

โลหะหนัก ถือว่าเป็นสารอันตรายที่ปะปนมากับกากของเสียอุตสาหกรรมจนทำให้มีการจัดกลุ่มเป็นประเภทของเสียที่เป็นอันตราย โลหะหนักส่วนใหญ่ที่มีพบมีหลายชนิด เช่น โครเมียม แคลเดียม และตะกั่ว ซึ่งโลหะหนักทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมในหลายๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นต่อดิน น้ำ และอากาศ ของเสียเหล่านี้จะสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมซึ่งนอกจากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาวแล้วยังพร้อมที่จะก่ออันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมต่อไป

การบำบัดกากอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักอาจจะใช้วิธีทางฟิสิกส์ เคมี หรือชีววิทยาตามประเภทของของเสียที่เกิดขึ้น การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งกากอุตสาหกรรมด้วยปูนซีเมนต์เป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการลดความเป็นพิษหรือลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักก่อนที่จะทิ้งลงสู่หลุมฝังกลบ ซึ่งการบำบัดนี้ต้องผ่านการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 เพื่อทดสอบความเป็นอันตรายก่อนทำการฝังกลบด้วย

กระบวนการการชะละลายเป็นการจำลองเหตุการณ์ต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้หลังจากของเสียอันตรายนั้นได้ผ่านการบำบัด ตัวอย่างเช่น กระบวนการย่อยสลายโดยสภาวะไร้อากาศ ก่อให้เกิดกรดอะซิติกที่ค่าพีเอช 5 ถึง 8 สภาวะนี้ถูกจำลองโดย U.S. EPA SW-846 Method 1311 คือ Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) เป็นต้น

ดังนั้นการทดสอบการชะละลายจึงเป็นการทดสอบความเป็นอันตรายขั้นสุดท้ายก่อนการนำไปฝังกลบซึ่งในการฝังกลบนั้นไม่ได้เป็นการกำจัดของเสียอันตรายอย่างสมบูรณ์ โดยจะเป็นเพียงการนำไปของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดไปอยู่ในที่ที่เหมาะสมเท่านั้น ซึ่งของเสียอันตรายพร้อมที่จะหลุดออกมาสู่สภาพแวดล้อมตลอดเวลาถ้าเกิดสภาวะที่พอเพียง หากทราบความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการชะละลายและความสัมพันธ์ของความเข้มข้นโลหะหนักชนิดต่างๆ ในของเสียที่ผ่านการบำบัดที่จะชะละลายในสภาวะที่อาจจะเกิดขึ้นได้

กับของเสียที่ผ่านการบำบัด จะนำไปสู่การทดสอบการชะละลายและการบำบัดที่เหมาะสมต่อของเสียที่ผ่านการบำบัดเพื่อป้องกันการหลุดออกมาของสารอันตรายสู่สิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักที่บำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง
- 1.2.2 ศึกษาความสัมพันธ์ของพีเอช ลักษณะของการบำบัด ชนิดของโลหะหนัก และของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย ที่จะส่งผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายออกมา
- 1.2.3 เปรียบเทียบผลการชะละลายกับมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และ *การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

*หมายเหตุ ปัจจุบันการทดสอบการชะละลายได้เปลี่ยนมาใช้ในการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สถานที่ดำเนินการวิจัย คือ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
- 1.3.2 โลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ ทองแดง สังกะสี นิกเกิล ตะกั่ว โครเมียม และแบเรียม
- 1.3.3 หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย ความเข้มข้นของโลหะที่ชะละลายออกมา และความเข้มข้นของสารประกอบจากการบำบัดที่ละลายออกมา
- 1.3.4 ทำการทดลองแบบกะ (Batch) และทำการแปรผันพีเอชในการชะละลาย โดยสารที่ใช้ในการชะละลายคือ น้ำกลั่น กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก
- 1.3.5 ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบลักษณะและความเข้มข้นของโลหะหนักจากการชะละลายจากของเสียที่บำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง
- 1.4.2 ทำให้ทราบความสัมพันธ์ของพีเอช ลักษณะของการบำบัด ชนิดของโลหะหนัก และของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย ที่จะส่งผลต่อความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายออกมา
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของโลหะหนักที่สามารถบำบัดได้ด้วยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง
- 1.4.4 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาการทดสอบการชะละลายที่เหมาะสมจากของเสียที่บำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 ของเสียอันตราย (Hazardous waste)

Resource Conservation and Recovery Act. (RCRA, 2003) กฎหมายของประเทศสหรัฐอเมริกา กล่าวว่า ของเสียอันตราย คือ ของเสียหรือเป็นส่วนผสมของของเสีย ซึ่งมีความเข้มข้นลักษณะทางกายภาพ ลักษณะทางเคมีหรือการติดเชื้อ ที่อาจก่อให้เกิดซึ่งเกิดเหตุการณ์ดังต่อไปนี้

1. การเพิ่มขึ้นของอัตราการตาย หรือการป่วยที่รักษาไม่หาย หรือการทุพพลภาพ
2. เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์หรือสิ่งแวดล้อม หากทำการบำบัด การเก็บกัก การขนส่ง การทิ้งหรือการจัดการที่ไม่เหมาะสม

นอกจากนี้ U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA, 1992) ยังกล่าวว่า ของเสียจะเป็นของเสียอันตรายภายใต้การควบคุมของกฎหมาย ถ้ามีลักษณะตรงกับข้อใดข้อหนึ่งหรือหลายข้อดังต่อไปนี้

1. มีสมบัติเช่นเดียวกับของเสียอันตราย คือ ติดไฟได้ง่าย มีฤทธิ์กัดกร่อน เกิดปฏิกิริยากับสารอื่นง่ายหรือเป็นพิษ
 2. เป็นของเสียที่ไม่มีแหล่งที่มาเฉพาะ (Non Specific Source) มักเกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม
 3. เป็นของเสียที่มีแหล่งที่มาเฉพาะ (Specific Source) จากอุตสาหกรรมบางประเภท
 4. เป็นผลิตภัณฑ์เคมีที่ใช้ในการพาณิชย์กรรมบางประเภท
 5. เป็นส่วนผสมของสารที่ถูกระบุว่าเป็นของเสียอันตราย
 6. เป็นสารที่ถูกกำหนดไว้ในบทบัญญัติภายใต้ RCRA, Subtitle C, Section 3001
- หมายเหตุ RCRA, Subtitle C, Section 3001 ประกอบด้วยรายชื่อของของเสียอันตราย

สำหรับประเทศไทย ของเสียที่เป็นอันตรายตามคำจำกัดความของสำนักคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ หมายถึง ของเสียหรือสิ่งที่เจือปนด้วยของเสียซึ่งมีความเข้มข้นหรือมีสมบัติด้านกายภาพ เคมีหรืออื่นๆ ที่เป็นสาเหตุให้เกิดการตาย หรือเจ็บป่วยทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ ตลอดจนทำให้เกิด หรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการในการบำบัดเก็บกัก ขนส่ง และกำจัดที่เหมาะสม

ของเสียอันตรายสามารถแบ่งได้ตามสมบัติได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

1. สารไวไฟ คือ ของเสียที่ติดไฟได้ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน
2. สารเกิดปฏิกิริยาได้ง่าย คือ ของเสียที่ไม่คงตัว สามารถทำปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว
3. สารกัดกร่อน คือ ของเสียที่มีพีเอชน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 หรือ พีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 12.5
4. สารมีพิษ คือ ของเสียที่มีความเป็นพิษในตัวเอง ได้แก่ สารเคมีต่างๆ หรือสารกัมมันตรังสี
5. สารถูกชะละลายได้ง่าย คือ ของเสียที่มีความสามารถถูกชะละลายสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ดิน แหล่งน้ำผิวดิน หรือน้ำใต้ดิน ได้ง่าย
6. สารที่ก่อให้เกิดโรค คือ ของเสียที่มีจุลินทรีย์ปะปนอยู่ เช่น ของเสียจากสถานพยาบาล หรือ ห้องปฏิบัติการเพาะเชื้อ

นอกจากนี้โลหะหนักบางชนิด เช่น สารหนู แคดเมียม ปะทอ ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักประเภทที่มีพิษถาวร ซึ่งนอกจากจะไม่เปลี่ยนรูปไปตามกาลเวลาแล้วยังสามารถสะสมในร่างกายมนุษย์และสัตว์น้ำได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดโลหะหนักเหล่านี้ออกจากน้ำเสีย หรือตะกอน เพื่อป้องกันไม่ให้แพร่กระจายเข้าสู่วัฏจักรของน้ำหรือผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร

2.2 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23 ถึง 92 ภายในคาบที่ 4 ถึง 7 ของตารางธาตุ ที่จำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวในอุณหภูมิปกติ) มีคุณสมบัติทางกายภาพคือ นำไฟฟ้า และความร้อนได้ดี เป็นมันวาว สะท้อนแสง เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า

โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ เป็นสารประกอบอินทรีย์โลหะ (Organometallic Compound) ซึ่งมีพิษ และสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปทางห่วงโซ่อาหาร ความเป็นพิษของโลหะหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรงเมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์อาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้

U.S. EPA (1992)ได้กำหนดโลหะที่มีพิษ 13 ชนิด ที่ต้องกำจัดออกจากน้ำเสียได้แก่ แบรลเลียม แคดเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน ทองแดง สารหนู พลวง เซเลเนียม เทลลูเรียม และปรอท

2.3 กระบวนการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมในประเทศไทย

ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ เขตบางขุนเทียน มีการแบ่งประเภทกากของเสียในการให้บริการดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ประเภทกากของเสียในการให้บริการของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ), 2548

สำหรับการปรับเสถียรและการฝังกลบ	สำหรับการบำบัดโดยกระบวนการทางฟิสิกส์-เคมี
ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์	น้ำเสียจากโรงชุบโลหะ
แผงวงจรไฟฟ้า	น้ำจากการล้างหม้อต้ม
ดินที่ได้รับการปนเปื้อน	กรด
เถ้าจากเตาเผา	ด่าง
หลอดฟลูออเรสเซน	ของเสียที่ปนเปื้อนไซยาไนด์
แบตเตอรี่ต่างๆ	อื่นๆ
ของเสียพวกใยหิน	
คาร์บอนจากเครื่องดักจับอนุภาคฝุ่น	
ตะกอนโครเมียม	
ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย	
อื่น ๆ	

การบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมโดยวิธีการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง

ในรอบปี พ.ศ. 2547 ที่ผ่านมา ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรมแสมดำ มีกากของเสียอุตสาหกรรมจากโรงงานอุตสาหกรรมเข้าในระบบบำบัดปริมาณ 24,137 ตัน โดยแบ่งเป็นกากไฮดรอกไซด์ปริมาณ 4,498 ตัน และเป็นกากของเสียประเภทอื่นๆ 19,638 ตัน สำหรับขั้นตอนในการบำบัดและกำจัดกากของเสีย แสดงเป็นขั้นตอนดังนี้

การขนส่งกากของเสีย

ระบบการขนส่งกากของเสีย บริษัทฯ จัดให้มีเอกสารกำกับกับการขนส่งของเสีย (Manifest) ในการควบคุมการขนส่งของเสียอันตราย และได้ดำเนินการจัดทำระบบขนส่งโดยคำนึงถึงมาตรฐานความปลอดภัยสูงสุด โดยพนักงานขับรถทุกคนต้องมีใบอนุญาตขับขี่ประเภท 4 และผ่านการอบรมด้านมาตรฐานคุณภาพ ความปลอดภัย อาชีวอนามัย และสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้บริษัทฯ ได้ใช้กล่องดำระบบ GPS (Global Positioning System) ควบคุมพฤติกรรมการขับขี่ของพนักงานขับรถ รวมทั้งมีอุปกรณ์ต่างๆ ในการระงับเหตุฉุกเฉินได้อย่างทันที่

การตรวจสอบคุณลักษณะกากของเสีย

ก่อนทำการบำบัดกากของเสียแต่ละชนิด จะมีการตรวจสอบคุณลักษณะและคุณสมบัติของกากของเสียว่าตรงตามข้อมูลที่ส่งมาที่ลูกค้าส่งมา ทำการตรวจสอบก่อนขนส่งมาทำการบำบัด นอกจากนั้นยังทำการตรวจสอบว่ามีของเสียอันตรายชนิดอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับกากของเสียที่ส่งมาทำการบำบัดหรือไม่ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของพนักงานและเป็นการคัดแยกกากของเสียให้มีการบำบัดอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการ

การบำบัดกากของเสีย

กากของเสียที่ผ่านมาตรฐานคุณสมบัติและคุณลักษณะว่าถูกต้องแล้ว จะดำเนินการทำการบำบัดกากของเสีย โดยใช้สูตรการบำบัดจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ โดยใช้สารเคมีในการบำบัดกากของเสีย ได้แก่ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ และโซเดียมซัลไฟด์ ทั้งนี้การบำบัดกากของเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

1) การบำบัดกากของเสียโดยวิธีการปรับเสถียร (Stabilization) การบำบัดกากของเสียโดยวิธีการปรับเสถียร เป็นการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมที่เป็นกากของเสียอันตราย (Hazardous Waste) เช่น กากตะกอนไฮดรอกไซด์ กากจากระบบบำบัดน้ำเสีย สารเคมีเสื่อมสภาพ แผลงวงจร ภาชนะหรือวัสดุปนเปื้อนสารเคมี เป็นต้น โดยกากของเสียที่ทำการบำบัดจะมีค่าโลหะหนักเกินกว่าเกณฑ์มาตรฐานทางกฎหมาย สารเคมีที่ใช้ในการบำบัดโดยวิธีปรับเสถียร ได้แก่ ปูนขาว ปูนซีเมนต์ ทั้งนี้การบำบัดกากของเสียโดยใช้ปูนขาวจะทำการปรับค่าพีเอชของกากของเสียให้มีความสูง เนื่องจากกากตะกอนโลหะหนักจะละลายน้ำได้ยากเมื่อมีค่าพีเอชที่เป็นด่าง และการบำบัดกากของเสียโดยใช้ปูนซีเมนต์จะเป็นการทำลายฤทธิ์หรือลดความเป็นพิษของกากของเสีย ซึ่งจะส่งผลทำให้กากของเสียเปลี่ยนรูปทางเคมีเพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นสารเฉื่อย ทั้งนี้การใช้สารเคมีสำหรับการบำบัดกากของเสีย จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและคุณลักษณะของกากของเสียแต่ละ

ประเภท ซึ่งการบำบัดกากของเสียจะใช้รถตักในการคลุกผสมกากของเสียให้คลุกเคล้าเข้ากับสารเคมีที่ใช้ในการบำบัด

2) การบำบัดกากของเสียโดยวิธีทำเป็นก้อนแข็ง (Solidification) การบำบัดกากของเสียโดยวิธีทำเป็นก้อนแข็ง เป็นการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมที่เป็นกากของเสียอันตราย (Hazardous Waste) เช่น หลอดไฟฟ้าเสื่อมสภาพ ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่ต่างๆ เป็นต้น สารเคมีในการทำเป็นก้อนแข็ง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ โซเดียมซัลไฟด์ ทั้งนี้การใช้สารเคมีสำหรับการบำบัดกากของเสีย จะแตกต่างกันไปขึ้นกับการปนเปื้อนสารปรอทของกากของเสียแต่ละประเภท โดยสารปรอทจัดเป็นสารอันตรายและมีค่า Solubility Product เมื่ออยู่ในรูปตะกอนไฮดรอกไซด์สูงกว่าอยู่ในรูปซัลไฟด์ จึงต้องใช้สารโซเดียมซัลไฟด์ในการทำลายฤทธิ์ปรอทเสียก่อน เพื่อสามารถมั่นใจได้ว่าปรอทจะไม่ถูกชะละลายออกมาได้โดยง่าย การบำบัดกากของเสียประเภทนี้จะใช้เครื่องจักรในการบดละเอียด เครื่องผสมกากของเสีย และภาชนะในการหล่อให้แข็งตัว โดยกากของเสียจะถูกบดย่อยแล้วส่งลงมาที่ชุดผสมที่เตรียมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ จากนั้นคลุกผสมกากของเสียกับสารเคมีให้เข้ากัน และทำการเติมปูนซีเมนต์และผสมให้เข้ากับกากของเสีย จากนั้นเทใส่ภาชนะที่ใช้ในการหล่อแข็งและรอให้กากของเสียแข็งตัว โดยทั่วไปกากของเสียที่ทำการบำบัดจะใช้เวลาในการแข็งตัว 3 ถึง 5 วัน

การตรวจสอบผลการบำบัดกากของเสีย

หลังจากทำการบำบัดกากของเสียตามขั้นตอนการบำบัดในแต่ละวิธีแล้ว จะเก็บตัวอย่างกากของเสียเพื่อทำการตรวจสอบวิเคราะห์ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) อัตราการซึม น้ำ (Permeability) และคุณสมบัติในการชะละลาย (Leachate) เพื่อทดสอบว่ากากของเสียที่ผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์แล้ว

การฝังกลบกากของเสีย

กากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรแล้ว จะต้องทำการนำมาฝังกลบที่หลุมฝังกลบนิรภัย (Secure Landfill) ทั้งนี้หลุมฝังกลบปลอดภัยต้องได้รับการออกแบบและก่อสร้างจากผู้เชี่ยวชาญ สำหรับการก่อสร้างหลุมฝังกลบนั้นจะมีการใช้วัสดุกันซึมชนิดพิเศษต่างๆ ได้แก่ ดินเหนียวบดอัดพิเศษที่มีอัตราการซึม 1×10^{-7} ซม. / วินาที แผ่นพลาสติกกันซึมพิเศษชนิด HDPE ตาข่ายสังเคราะห์ โยกรองสังเคราะห์ ดินเหนียวสังเคราะห์ และชั้นกรวดทราย โดยเมื่อทำการฝังกลบกากของเสียจนเต็มปริมาตรของหลุมฝังกลบแล้ว จะต้องดำเนินการปิดคลุมหลุมฝังกลบด้วยวัสดุกันซึมเหมือนดังข้างต้นอีกครั้งหนึ่ง และทำการปลูกพืชคลุมดินเพิ่มเติมที่ส่วนบนของหลุม

ฝังกลบ นอกจากนั้นในช่วงระยะเวลาที่ดำเนินการฝังกลบกากของเสียจะต้องทำการสูบน้ำชะจากกากของเสียเพื่อนำมาจัดการที่บ่อฝัง และยังคงมีการตรวจวัดคุณภาพสิ่งแวดล้อมในบริเวณรอบหลุมฝังกลบ เพื่อการติดตามตรวจสอบว่าหลุมฝังกลบมีการรั่วซึมในช่วงเวลาดำเนินการหรือไม่

2.4 การทำเสถียรและทำให้เป็นก้อนแข็ง

การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง เป็นเทคนิคการทำของเสียอันตราย ซึ่งส่วนมากจะเป็นพวกสารอนินทรีย์ โดยเฉพาะพวกที่มีประจุบวกที่มีแนวโน้มจะแข็งตัวได้เพื่อทำหน้าที่ห่อหุ้ม ยึดตรึง หรือทำลายพิษแล้วห่อหุ้ม ของเสียอันตรายไว้ในตัวของก้อนแข็งเพื่อเปลี่ยนของเสียที่มีพิษปนอยู่ให้กลายเป็นสารที่เฉื่อย (Inert) หรือเสถียร (ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาทางเคมีต่อไปได้อีก) มีลักษณะทางกายภาพที่คงรูป (Stable) และอาจจับกันเป็นก้อนแข็งจนมีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการนำไปฝังกลบ เททับถม หรือถมที่ดินเพื่อการใช้งานในวัสดุประสงค์อื่นต่อไป

2.4.1 การทำเสถียร (Stabilization)

คือกระบวนการทำของเสียอันตรายให้เกิดเป็นผลึกเกลือหรือสารประกอบที่คงรูป (ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอีกต่อไป) หรือทำการห่อหุ้มกักสารมลพิษไว้ไม่ให้ละลายหรือลดการละลายออกมาได้อีก ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการทำให้เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยลง หรือการลดพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำ และส่วนมากจะใช้ทำเสถียรของเสียอันตรายจำพวกสารอนินทรีย์ที่มีโลหะหนักปนเปื้อน หลังจากการทำเสถียรแล้วตะกอนของเสียที่เสถียรแล้วนั้นยังต้องนำไปฝังกลบต่ออย่างถูกวิธีเพื่อลดการฟุ้งกระจาย และลดโอกาสที่จะถูกชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้อีก

2.4.2 การทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification)

ในบางแห่งจะเรียกว่าเป็นกระบวนการยึดตรึงของเสีย (Fixation) กล่าวคือ เป็นกระบวนการเติมวัสดุหรือสารเคมีหรือสารเคมี เช่น ปูนขาว ปูนซีเมนต์ สารซิลิเกต หรือโพลีเมอร์ ลงไปผสมกับของเสียเพื่อให้จับตัวกันและ/หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีจนกลายเป็นก้อนแข็ง นอกจากจะไม่ฟุ้งกระจาย และช่วยลดพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำแล้ว ยังทำให้การโยกย้าย ขนส่ง หรือฝังกลบทำได้สะดวกขึ้นด้วย

ทั้งนี้ เราจะพบบ่อยว่าการทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง มีการใช้สลับหรือแทนกันได้

การทำเสถียรและ/หรือการทำให้เป็นก้อนแข็ง อาจใช้ปูนขาว สารพอลิไซลานิก จำพวกซีเมนต์ ใต้อลอย หรือฝุ่นโรงงานปูนซีเมนต์ หรือใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ผสมกับของเสีย

อันตราย และน้ำในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ในบางกรณีอาจต้องเติมด้วยสารบางอย่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำเสถียร เช่น เติมสารละลายซิลิเกต เพื่อลดการต้านการแข็งตัวของโลหะบางตัว หรือของสารอนินทรีย์ต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น การเติมโซเดียมซิลิเกต จะเกิดผลดีเพราะมันละลายน้ำได้ดีมีราคาถูกไม่ขัดขวางการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้โซเดียมซิลิเกตจะมีสภาพด่าง (Alkaline) ดังนั้นเมื่อผสมปนกับของเสียนอันตรายที่มีสภาพเป็นกรด จะทำปฏิกิริยากัน และทำให้โลหะหนักหลายตัวรวมกัน (Coaculate) ทำให้กลายเป็นผลึกที่ซับซ้อนของ Amorphous Hydrated Silicate ซึ่งทำให้โลหะต่างๆละลายออกมาได้น้อย นอกจากนี้แล้วการเลือกวัสดุประสานหรือวัสดุที่จะไปทำปฏิกิริยากับของเสียนอันตรายซึ่งนอกจากจะสามารถหุ้มสารพิษได้ดีแล้วยังต้องไม่เพิ่มปริมาตรของตะกอนมากจนเกินไป เพราะจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการเก็บ ขน และฝังกลบตามมา

2.4.3 ซีเมนต์ (บุญยง โล่ห้วงศ์วัฒน์, 2539)

ในกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมบำบัดของอันตราย เพื่อทำลายพิษหรือหุ้มสารพิษไว้ ซึ่งเป็นการลดปริมาณสารมลพิษที่จะถูกชะละลายออกมา ทั้งนี้ในระหว่างที่จะแข็งตัวเป็นก้อนแข็ง (Hydration) จะเกิดเป็นสารประกอบ ในรูปของ Calcium Silicate Hydrate Gel (C-S-H Gel) ประมาณร้อยละ 60 ถึง 70 และปูนขาวผงน้ำ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 ซึ่งจะไปดูดซับติดไอออนต่างๆ และเกิดแขนงระแนง (Lattice) ยึดกันของผลึกต่างๆ รวมทั้งทำให้เกิดตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ต่างๆ และเกิดเกลือของซิลิเกตและแคลเซียมที่ละลายน้ำได้น้อย และหากของเสียนอันตรายมีฤทธิ์เป็นกรด เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ที่สภาพเป็นด่าง ดังนั้นสภาพกรดจะถูกทำลายก่อนจนพีเอชมีค่าขึ้นไปถึงประมาณ 11 ของเสียนกับซีเมนต์ก็จะเริ่มแข็งตัวโดยปกติแล้วจะไม่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวทำลายกรด เพราะจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองและสูญเปล่า แต่นิยมการทำลายสภาพกรดในตอนแรกโดยใช้วิธีการเติมปูนขาวหรือซีเถ้าและโดยทั่วไปจะใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับประมาณร้อยละ 10 ของของเสียนโดยน้ำหนัก

2.4.4 น้ำ (บุญยง โล่ห้วงศ์วัฒน์, 2539)

น้ำซึ่งเป็นส่วนจำเป็นในขบวนการแข็งตัว แต่หากเติมน้ำมากเกินไป ก็อาจทำให้เกิดการแข็งตัวช้า และลดความแข็งแรงของก้อนแข็ง ในกรณีที่ของเสียนอันตรายเป็นของเสียนประเภทเหลว หรืออยู่ในรูปตะกอนข้นอาจจำเป็นต้องเติมสารก่อตัว (Bulking Agent) จำพวกเถ้าในสัดส่วนที่เหมาะสมก่อน นอกจากนี้หากของเสียนอันตรายเป็นของเสียนประเภทตะกอนแห้งก็อาจต้องใช้น้ำมากกว่าปกติเพราะน้ำบางส่วนจะถูกดูดซับไว้ในของเสียน นอกจากนี้การใช้น้ำร่วมกับเถ้าผสมกัน

ก็จะได้ก้อนของแข็งที่สามารถห่อหุ้มและยึดเหนี่ยวสารอันตรายได้เช่นกัน แม้ว่าตัวเถ้าเองจะไม่สามารถยึดประสานตัวเองได้ก็ตาม

อย่างไรก็ตามในบางครั้ง ของเสียนอันตรายอาจจะไม่แข็งตัว หรือแข็งตัวช้าเพราะมีสิ่งแทรกสอด (Interferance) เช่น มีเกลือของแมงกานีส ดีบุก ทองแดง และตะกั่วละลายอยู่ ทำให้เกิดการแข็งตัวช้ามาก รวมทั้งลดความแข็งแรงของก้อนแข็งลงมากด้วย ในกรณีที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ ทรายแป้ง (Silt) หรือดินเหนียวบางชนิดก็อาจจะทำให้การแข็งตัวเกิดช้าลงด้วย อย่างไรก็ตามดินเหนียวจำพวกเบนโตนิต (Bentonite) ซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวก และมีพื้นที่ผิวเฉพาะมากมายจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์บางกลุ่ม ซึ่งอาจมากถึงร้อยละ 5 ให้แข็งตัวเป็นก้อนแข็งได้นอกจากนี้ฝุ่นผงที่มีขนาดเล็ก ที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ก็จะมีส่วนทำให้ความแข็งแรงของก้อนแข็งลดลงได้มากอีกด้วย

2.4.5 ประสิทธิภาพของการทำเสถียรและ/หรือการทำให้เป็นก้อนแข็ง

(บุญยง โฉ่ห้วงศิวฒน, 2539)

การประเมินหรือเปรียบเทียบหาประสิทธิภาพในการทำให้เสถียร ส่วนมากจะคำนึงถึงคุณสมบัติหลัก 3 ประการ คือ

1. ระยะเวลาในการแข็งตัว (ใช้ทดสอบด้วย Penetrometer)
2. คุณสมบัติทางกายภาพ (ความหนาแน่น การรับแรงกด)
3. คุณสมบัติในการชะละลายของก้อนแข็ง (แปรผันตามอัตราความให้ซึมได้ และอัตราการละลายของสารมลพิษเอง)

การละลายของสารมลพิษเอง)

2.5 กลไกการจับยึดโลหะหนัก

ความเข้าใจพื้นฐานทางกายภาพ และเคมีของกลไกการทำก้อนแข็งเพื่อที่จะความคุมประสิทธิภาพของตัวกระทำ เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการทำเป็นก้อนแข็งของเสียนอันตรายให้ประสบความสำเร็จ นอกจากนี้ยังมีโอกาสที่ตัวกระทำจะถูกปรับปรุงเพื่อให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียอื่น ๆ ความเข้าใจในกลไกการทำก้อนแข็งจะช่วยในการประเมินประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งกลไกทั่วไปมีดังนี้

- 1) Macroencapsulation
- 2) Microencapsulation
- 3) Adsorption
- 4) Absorption
- 5) Precipitation
- 6) Detoxification

Macroencapsulation เป็นกลไกที่นำของเสียนั้นมายึดติดกับก้อนแข็งขนาดใหญ่ ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งองค์ประกอบของเสียนั้นนั้น จะถูกยึดอยู่ในรูพรุนที่ไม่ต่อเนื่อง ภายในก้อนแข็ง เมื่อถึงเวลาเสื่อมหรือการแตกร้าวบนก้อนแข็งแล้ว ของเสียนั้นที่ถูกกักไว้จะสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกได้อย่างอิสระ การแตกร้าวสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย เช่น ระยะเวลา ของสภาพแวดล้อมบริเวณหลุมฝังกลบ (Wetting-Drying, Freezing-Thawing) และความเค้นจากการกดทับ เป็นต้น ดังนั้นกลไกนี้จะทำให้สิ่งปนเปื้อนมีโอกาสออกสู่สิ่งแวดล้อม หากไม่มีการดูแลรักษาให้ก้อนแข็งอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์

Microencapsulation เป็นกลไกที่นำของเสียนั้นมายึดติดกับโครงสร้างแบบผลึก ในระดับที่เล็กจนมองไม่เห็นด้วยตาเปล่าไม่เห็น และเมื่อก้อนแข็งเกิดการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ จะพบว่า ของเสียนั้นยังคงถูกกักไว้ แต่อย่างไรก็ตามกลไกของ Microencapsulation ยังไม่ใช่การยึดติดกันทางเคมี ดังนั้นอัตราการชะละลายของก้อนแข็งยังที่โอกาสที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อก้อนแข็งที่แตกมีขนาดเล็กลงและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น

Adsorption การดูดซับ การดูดแนบหรือการดูดติดผิวบนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นการดึงทางกายภาพมีการยึดเกาะแบบเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) โดยวัสดุหรือสารปรับเสถียรที่เกิดแรงแบบไฮโดรเจนบอนด์ดิง (Hydrogen Bonding) หรือแบบแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waal) ทำให้การรั่วไหลหรือหลุดออกจากผิวของแข็งมีน้อยกว่าของ Microencapsulation และ Macroencapsulation

Absorption การดูดซึมหรือดูดกลืน ของเสียนั้นจะถูกดูดซึมเข้าไปภายในตัวดูดซึม คล้ายกับฟองน้ำที่ดูดน้ำเข้าไป วิธีนี้จะใช้สารหรือตัวดูดซึมชนิดต่างๆ ทำการดูดของเหลวออกจากของเสียนั้น ทำให้ของเสียนั้นอยู่ในสภาพของแข็งมากขึ้น เป้าหมายหลักของของกลไกนี้นิยมใช้ในการแยกของเหลวออกจากของเสียนั้นเพื่อปรับปรุงลักษณะรูปร่างของของเหลวที่ถูกดูดซึมสามารถเคลื่อนที่ออกจากตัวดูดซึมได้อย่างอิสระ เมื่อมีความเค้นจากการยุบอัดตัว ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเหมาะสมเป็นวิธีการชั่วคราวสำหรับการปรับปรุงลักษณะรูปร่างของเสียนั้น (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2546)

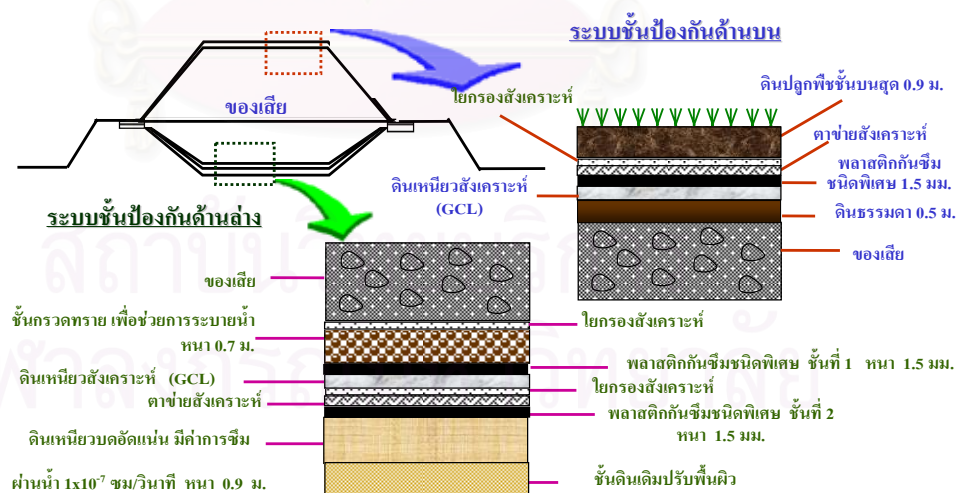
Precipitation การตกตะกอนผลึกหรือการนำพวของเสียนั้นโดยมากเป็นของสารอนินทรีย์มาผสมรวมกับสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนผลึก ถ้าอยู่ในสภาพเหมาะสม เช่น มีค่าพีเอชที่เหมาะสมในที่นี้จะเกิดตะกอนผลึกอนินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ (hydroxide) ซัลไฟด์ (sulfides) ซิลิเกต (silicates) คาร์บอเนต (carbonates) ฟอสเฟต (phosphates) เป็นต้น โดยทั่วไปจะเป็นการกำจัดโลหะหนัก ด้วยการปรับค่าพีเอชให้สูงหรือให้เหมาะสมต่อการทำตะกอนผลึก ถ้าตะกอนผลึกนี้มีค่าพีเอชลดลงเช่นได้ผสมกับกรดจะเกิดปัญหาของเสียนั้นหรือ

สารโลหะหนักละลายออกมาจากผลึก ถ้าผลึกตะกอนนี้มีพีเอชลดลงเช่นได้ผสมกับกรด จะเกิดปัญหาของเสียหรือสารโลหะหนักละลายออกมาจากผลึก สร้างปัญหาให้สิ่งแวดล้อมต่อไป (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2546)

Detoxification เป็นผลของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการทำเสถียรอาจทำให้ ของเสียมีความเป็นพิษลดลง การลดความเป็นพิษจะใช้กลไกที่เปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของของเสีย ไปสู่องค์ประกอบที่มีพิษน้อยกว่า หรืออาจไม่มีพิษเลย ตัวอย่างเช่น การลดวาเลนอิเล็กตรอนของโครเมียมจาก 6+ เป็น 3+ ในระหว่างการทำเสถียรด้วยซีเมนต์ ซึ่งโครเมียม 3+ มีความสามารถในการละลายและมีพิษต่ำกว่าโครเมียม 6+ การใช้เหล็ก (2) ซัลเฟต หรือส่วนผสม ระหว่าง เหล็ก (2) ซัลเฟตกับโซเดียมซัลเฟต สามารถลดวาเลนอิเล็กตรอนของโครเมียมได้ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2546)

2.6 การฝังกลบของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัด

ของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัด นอกจากจะต้องทำลายฤทธิ์ให้เหลือน้อยที่สุดแล้ว ยังต้องนำไปฝังกลบอย่างถูกวิธีเพื่อป้องกันไม่ให้ฝน หรือน้ำใต้ดินมีโอกาสไหลซึมผ่านของเสีย อันตรายเข้าไปชะละลายสารมลพิษต่าง ๆ ซึ่งลักษณะของหลุมฝังกลบนิรภัย (Secure Landfill) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองหลุมฝังกลบนิรภัยของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด มหาชน ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ), 2548

น้ำชะในหลุมฝังกลบ (Landfill Leachate) (Lagrega และคณะ, 2001)

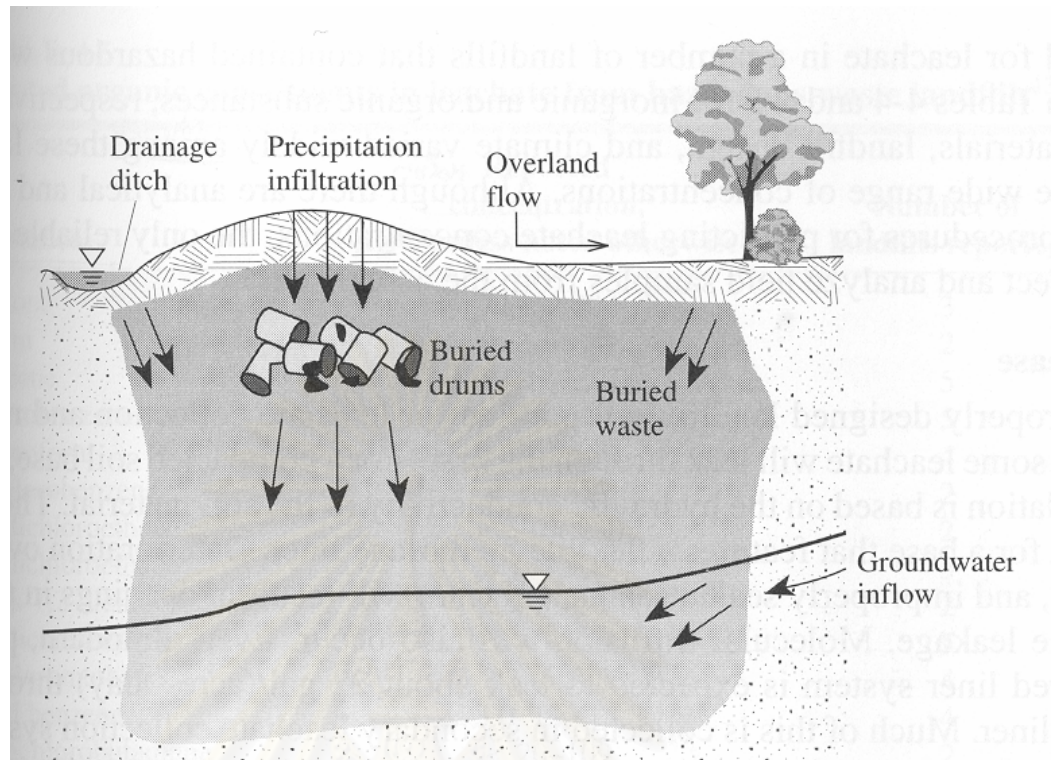
การหลุดออกมาของน้ำชะละลายเกิดจากน้ำชะในหลุมฝังกลบซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดของของเหลว ซึ่งในที่สุดท้ายจะกลายเป็นน้ำชะจากหลุมฝังกลบ แหล่งกำเนิดทั้งหมดก็คือน้ำจาก

1. ฝนที่ตกลงสู่หลุมฝังกลบ
2. น้ำผิวดินที่ไหลเข้าสู่หลุมฝังกลบ
3. น้ำใต้ดินที่ไหลผ่านส่วนใดส่วนหนึ่งของหลุมฝังกลบ
4. การนำเปื้อนและของเหลวอื่นๆในหลุมฝังกลบขยะชุมชน

ยังมีส่วนเล็กๆ น้อยๆ ของของเหลวในหลุมฝังกลบขยะ (ยกเว้นกรณีน้ำฝนที่ตกลงมา) แหล่งกำเนิดเหล่านั้นจะถูกควบคุมให้มีความเหมาะสมในการตั้งอยู่ทางวิศวกรรม และการย่อยสลายของสารอินทรีย์ การซึมขึ้นจะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการออกแบบทางด้านวิศวกรรม แต่อย่างไรก็ตามการซึมก็ยังคงเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

สารเจือปน (Contaminant)

น้ำที่ซึมลงสู่ของเสียนั้น ระยะเวลาแรกน้ำจะถูกดูดซึมโดยขยะที่เป็นของแข็งถ้าวัสดุนั้นมีค่าประสิทธิภาพจริง (Field Capacity) ที่น้อย ประสิทธิภาพจริงคือขีดจำกัดสูงสุดของช่องว่างในวัสดุที่มีอยู่สำหรับการดูดซับน้ำเมื่อของเสียนิ่มตัว (Saturated) หลังจากนั้นน้ำก็จะไหลผ่านของเสียด้วยแรงโน้มถ่วงโลก น้ำเหล่านี้จะกลายเป็นสารเจือปนจากส่วนประกอบของของเสียในส่วนของกระบวนการความเข้มข้นของส่วนประกอบในน้ำนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุที่สามารถชะละลายออกมาจากของเสียได้ จากการเคลื่อนที่ของมวลและอัตราส่วนความลึกของคอลัมน์ต่ออัตราการซึม ตัวแปรอื่นๆ ยังรวมถึงความสามารถในการละลายน้ำ พื้นที่ผิว ระยะเวลาที่สัมผัสและค่าพีเอช



รูปที่ 2.2 แหล่งกำเนิดของของเหลวในหลุมฝังกลบ (Lagrega และคณะ, 2001)

สำหรับหลุมฝังกลบที่ดีทางวิศวกรรมนั้น น้ำชะละลายจะเกิดขึ้นน้อย ความเข้มข้นของส่วนประกอบของของเสียสามารถเข้าถึงความสามารถการละลายที่สมดุลเมื่อให้การมีอยู่ของมวลของวัสดุที่สามารถชะละลายได้พอเพียง จากเหตุผลของของเหลวที่มีอยู่ในหลุมฝังกลบที่สามารถอยู่ได้ 20 ปีหรือมากกว่านั้น ทำให้มีตัวแปรมากมายที่สับสน การชะละลายสารเจือปนสารหนึ่งในสารต่าง ๆ เป็นผลให้ความเข้มข้นที่สูงมากกว่าที่เกิดขึ้นได้ในน้ำ นอกจากนี้อุปสรรคของการดำเนินการและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบทางเคมีและฟิสิกส์ที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบจะเปลี่ยนแปลงชนิดและความเข้มข้นของสารเจือปน

จากตัวแปรมากมายเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า สารเจือปน และความเข้มข้นในน้ำชะละลายนั้น มีค่าที่หลากหลายภายในหลุมฝังกลบเดียวกัน

2.7 การทดสอบการชะละลาย/การสกัด (Leaching/Extraction tests)

จากกระบวนการบำบัดของเสีย จะได้ของเสียที่มีความเสถียรจากนั้นของเสียจะถูกนำมาวัด ในเทอมของการทดสอบการชะละลาย (Leaching test) และการทดสอบการสกัด(Extraction test) ซึ่งในการทดสอบนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี และการทดสอบวิธีใดวิธีหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งวิธีเป็น ข้อกำหนดที่ต้องทำการทดสอบ

การทดสอบการชะละลายเป็นการวัดความเป็นไปได้ของของเสียที่เสถียรที่สามารถจะ ปลดปล่อยสารเจือปนออกสู่สิ่งแวดล้อม จากการทดสอบทั้งหมดของเสียจะถูกให้หลุดออกมาสู่น้ำชะ (Leachant) และปริมาณสารเจือปนในน้ำชะ หรือน้ำสกัด จะถูกนำมาวัดและนำมาเปรียบเทียบกับ มาตรฐานที่กำหนดไว้ ซึ่งอาจจะเป็นข้อกำหนดของข้อมูลพื้นฐานของการชะละลายสำหรับของเสีย ที่ยังไม่ได้ทำการบำบัด เมื่อใช้การทดลองการชะละลายเพื่อหาค่าประสิทธิภาพของการบำบัดของ กระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งแล้ว ผลที่ได้คือของการลดของความเข้มข้นของสารเจือ ปนต่อหนึ่งหน่วยของมวลของของเสียที่เหมาะสมในการยึดเหนี่ยวสารเจือปนจะใช้พิจารณาเพิ่มเติม ต่อไป (Means และคณะ, 1995)

การทดสอบการชะละลายนั้นมีอยู่หลายวิธีขึ้นอยู่กับข้อกำหนดที่พิจารณาซึ่งวัตถุประสงค์ และรายละเอียดในการทดลองนั้น จะแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของการทดสอบการชะละลายในวิธีการทดสอบชนิดต่างๆ (Means และคณะ, 1995)

วิธีการทดสอบ	Method	วัตถุประสงค์	สารที่ใช้ ในการชะละลาย	อัตราส่วนระหว่าง ของเหลวกับของแข็ง	ขนาดตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	ระยะเวลาที่ใช้
Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)	EPA SW-846 Method 1311	เปรียบเทียบความเป็นพิษกับข้อกำหนดรวมทั้ง VOCs ด้วยมาตรฐานของ RCRA	อะซิเตด บัฟเฟอร์(a)	20:1	< 9.5 มม.	1	18 ชั่วโมง
Extraction Procedure Toxicity (EP Tox) Test	EPA SW-846 Method 1310	หาความเข้มข้นของน้ำชะละลายมาตรฐานของ RCRA	0.04 M กรดอะซิติก (พีเอช = 5)	20:1	< 9.5 มม.	1	24 ชั่วโมง
TCLP "Cage" Modification	53 FR 18792	เพิ่มคุณภาพการหาค่าของความเสถียรจากการทดสอบ TCLP และนำโดย RCRA	อะซิเตด บัฟเฟอร์	20:1	(b)	1	48 ชั่วโมง
California Waste Extraction Test (Cal Wet)	California Code title 22, Article 11, pp.1800.75-1800.82	เป็นการทดสอบที่เข้มงวดสำหรับโลหะมากกว่า TCLP มาตรฐานของ California	0.2 M โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (พีเอช = 5)	10:1	(b)	1	18 ชั่วโมง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) องค์ประกอบของการทดสอบการชะละลายในวิธีการทดสอบชนิดต่างๆ (Means และคณะ, 1995)

วิธีการทดสอบ	Method	วัตถุประสงค์	สารที่ใช้ ในการชะละลาย	อัตราส่วนระหว่าง ของเหลวกับของแข็ง	ขนาดตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	ระยะเวลาที่ใช้
Multiple Extraction Procedure (MEP)	EPA SW-846 Method 1320	หาค่าของเสียภายใต้สภาวะกรด	เหมือนกับ EP Tox แล้วใช้ กรดซัลฟูริก: กรดไนตริก ในอัตราส่วน 60:40 (พีเอช = 3)	20:1	< 9.5 มม.	9 (หรือ มากกว่า)	24 ชั่วโมงต่อ 1 ตัวอย่าง
Synthetic Acid Precipitation Leach Procedure (SPLP)	EPA SW-846 Method 1312	สำหรับของเสียที่ละลายออกมา โดยฝนกรด	(c)	20:1	< 9.5 มม.	1	18 ชั่วโมง
Monofilled Waste Extraction Procedure (MWEP)	SW-924	สำหรับของเสียที่ฝังกลบใน ไซนอิมตัวที่มีความเร็ว ของการไหลน้อย	น้ำกลั่น	20:1	< 9.5 มม. หรือ ก้อนขนาดใหญ่	4	18 ชั่วโมงต่อ 1 ตัวอย่าง
American Nuclear Society Leach Test	ANSI/ANSI/16.1	เป็นข้อกำหนดของค่าสัมประสิทธิ์ การแพร่เปรียบเทียบกับ ของเสียที่ผ่านการบำบัดโดย การปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง	น้ำกลั่น	ก้อนแข็งขนาดใหญ่ ความยาวต่อ ขนาดหน้าตัด = 10 เซนติเมตร	ก้อนขนาดใหญ่ L/D ระหว่าง 0.2-0.5	12	เปลี่ยนน้ำชะใหม่ ที่ 2.7 ชั่วโมง 1 2 3 4 5 14 28 43 และ 90 วัน

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) องค์ประกอบของการทดสอบการชะละลายในวิธีการทดสอบชนิดต่างๆ (Means และคณะ, 1995)

วิธีการทดสอบ	Method	วัตถุประสงค์	สารที่ใช้ ในการชะละลาย	อัตราส่วนระหว่าง ของเหลวกับของแข็ง	ขนาดตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	ระยะเวลาที่ใช้
Dynamic Leaching Test	WTC, 1991, P.17	หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ ของเสียที่ผ่านการบำบัดโดย การปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง	น้ำกลั่น	(d)	ก้อนขนาดใหญ่ L/D ระหว่าง 0.2-0.5	(d)	เปลี่ยนน้ำชะใหม่ที่ 0 1 4 7 24 31 48 72 79 และ 100 ชั่วโมง สำหรับอนุภาค ที่ไม่มีการเคลื่อนไหว มากกว่าใช้ 0 4 24 31 72 104 168 และ 196 ชั่วโมง
Shake Extraction Test	ASTM D 3987-85	เพื่อหาค่ากลางที่รวดเร็ว ของการสกัดของเหลวที่ได้รับมา	น้ำกลั่น	20:1	ขนาดตามที่ ได้รับมา	1	18 ชั่วโมง
Equilibrium Leach Test(ELP)	WTC, 1991, P.16	หาความเข้มข้นสูงสุดของ น้ำชะละลาย	น้ำกลั่น	4 :1	< 150 ไมครอน	1	7 วัน
Sequential Extraction Test (SET)	Bishop, 1986 p.240	หาความสามารถในการต้านทาน การสกัดในหลายรูปแบบ	0.04 M กรดอะซิติก	50:1	< 9.5 ม.ม.	15	24 ชั่วโมง ต่อ 1 การสกัด
Sequential Chemical Extraction (SCE)	WTC, 1991, P.17	หาค่าการจับตัวตามธรรมชาติ ของโลหะและสารอินทรีย์ ในของเสียที่ผ่านการบำบัดโดย การปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง	ใช้สาร 5 ชนิด เพื่อเพิ่ม ความเป็นกรด	แปรผันจาก 16:1 ถึง 20:1	< 150 ไมครอน	5	แปรผันจาก 2 ถึง 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) องค์ประกอบของการทดสอบการชะละลายในวิธีการทดสอบชนิดต่างๆ (Means และคณะ, 1995)

วิธีการทดสอบ	Method	วัตถุประสงค์	สารที่ใช้ ในการชะละลาย	อัตราส่วนระหว่าง ของเหลวกับของแข็ง	ขนาดตัวอย่าง	จำนวน ตัวอย่าง	ระยะเวลาที่ใช้
Static Leach Test	MCC-1P MCC-2P	หาค่าความต้านทานการชะละลาย ของอนุภาคทั้งหมดใน ของเหลวที่คงที่	(e)	(f)	ก้อนขนาดใหญ่	1	ตัวอย่างสำหรับแต่ละ ค่าของ 3 7 14 28 56 91 182 และ 364 วัน บวกกับการเว้น ระยะอีก 12 เดือน โดยไม่เป็นการบังคับ
Agitated Power Leach Test	MCC-3S	หาค่าความต้านทานการชะละลาย ของอนุภาคทั้งหมดในของเหลว ที่ถูกเขย่า	(e)	10:1	50% < 0.044 ม.ม. 50% ใช้ค่าระหว่าง 0.074-0.149 ม.ม.	1	ตัวอย่างสำหรับแต่ละ ค่าของ 3 7 14 28 56 91 182 และ 364 วัน บวกกับการเว้น ระยะอีก 12 เดือน โดยไม่เป็นการบังคับ
Soxhlet Leach Test	MCC-5S	หาค่าความต้านทานการชะละลาย ของอนุภาคทั้งหมดในของเหลว	น้ำกลั่น	การไหลแบบ ต่อเนื่อง	ก้อนขนาดใหญ่	1	ตัวอย่างสำหรับแต่ละ ค่าของ 3 7 และ 14 วัน

หมายเหตุ

- (a) อย่างหนึ่งอย่างใดของสารละลายอะซิติคบัฟเฟอร์พีเอช 5 และกรดอะซิติคพีเอช 3
- (b) ก้อนแข็งขนาดใหญ่ที่หมดอำนาจในสายใยโครงสร้างระหว่างการสกัดของ TCLP
- (c) กรดซัลฟูริก : กรดไนตริก ผสมกันด้วยอัตราส่วน 60: 40 แล้วปรับพีเอชด้วยน้ำกลั่นให้มีค่าพีเอช 4.2 หรือ 5 สำหรับด้านตะวันออก หรือตะวันตกของแม่น้ำมิตติชิปปี้ ตามลำดับ
- (d) เปลี่ยนความถี่ใหม่จากสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ทราบ อัตราของพื้นผิวต่อปริมาตรจะต้องยืนยันการพบสารเจือปน ความถี่ที่เปลี่ยนใหม่จะต้องยืนยันว่าจะพบสภาวะที่ไม่สมดุล
- (e) น้ำซึบเกิด น้ำกลั่น น้ำเกลือ หรือน้ำที่เกิดในที่เกิดตัวอย่าง
- (f) ปริมาตรของน้ำชะมาจากข้อมูลจากการตรวจสอบพื้นผิวทางธรณีวิทยาของตัวอย่าง อัตราส่วนระหว่างปริมาตรกับพื้นผิวต้องอยู่ระหว่าง 10 และ 200 เซนติเมตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 พฤติกรรมการละลายออกมาของสารเจือปน

การละลายออกมาจากส่วนประกอบของวัสดุออกสู่สภาวะน้ำประกอบด้วย 2 กระบวนการคือ

- 1) กระบวนการทางเคมี (การละลายออกมาของแร่ธาตุ การดูดติดผิว และการมีพอลิเมอร์ให้น้ำไปใช้ได้ในรูปแบบต่างๆ)
- 2) กระบวนการการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์ (Advection การชะที่ผิวหน้า และการแพร่)

1. กระบวนการทางเคมี

กระบวนการทางเคมีประกอบด้วยกลไกพื้นฐาน 3 กลไกที่ควบคุมการชะออกมาของสารเจือปน คือ

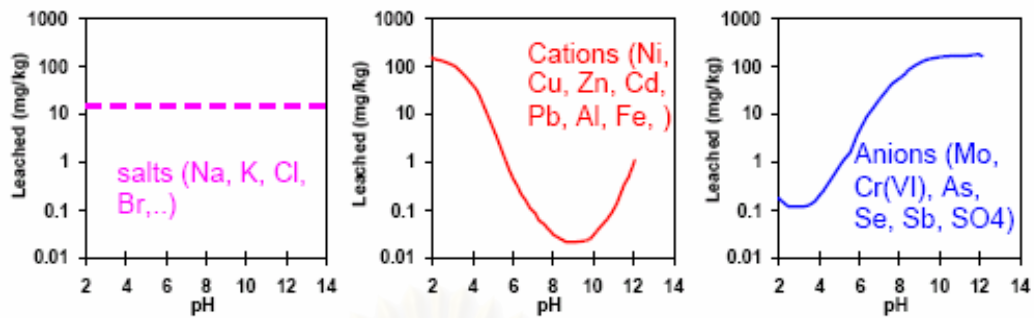
1. โดยการละลายออกมาของแร่ธาตุ (ควบคุมโดยความสามารถในการละลาย)
2. โดยกระบวนการการดูดติดผิว (ควบคุมโดยการดูดซับ)
3. โดยการมีพอลิเมอร์ที่จะนำไปใช้ใน รูปแบบต่าง ๆ ของตัวเอง (Availability) ในผลิตภัณฑ์

สารเจือปนบางสารแสดงความสัมพันธ์สำหรับสารดูดติดผิวกับปฏิกิริยาที่พื้นผิวประจุบวกของโลหะที่มีไอออนบวกจะไม่ถูกควบคุมโดยการชะละลายของแร่ธาตุ แต่พบบ่อยครั้งในการถูกควบคุมโดยการดูดติดผิวกับพื้นผิวผลิตภัณฑ์ เช่น วัสดุอินทรีย์สารที่มีออกไซด์

1.1 พีเอช (pH)

ค่าพีเอชของวัสดุและค่าพีเอชของสิ่งแวดล้อมคือตัวแปรสำคัญในการละลายออกมาของส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งสามารถส่งผลต่อวัสดุทุกชนิด (ก้อนขนาดใหญ่ เกล็ด ซีเมนต์ ดิน ของเสียด และตะกอน) ค่าพีเอชต่างๆของของเหลวที่อยู่รอบๆ จะเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของสภาวะน้ำที่ค่าพีเอชนั้นๆ และวัสดุแต่ละชนิดจะมีลักษณะการปล่อยสารเจือปนออกมาขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของวัสดุนั้นๆ ซึ่งในวัสดุแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการละลายตามลักษณะของตัวสารแสดงในรูป 2.3 รูปการละลายออกมาจะคล้ายๆกับการจัดระบบของความแตกต่างธาตุตามกลุ่มธาตุ โดยในแต่ละวัสดุจะมีระดับที่แตกต่างกันแต่จะมีลักษณะที่คล้ายกัน

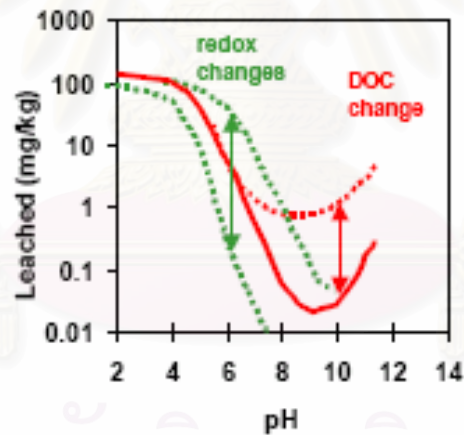
ยังมีอิทธิพลที่สำคัญของค่าพีเอชในการละลายออกมาอีกส่วนหนึ่งคือ กระบวนการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช



รูปที่ 2.3 พฤติกรรมโดยทั่วไปของการชะละลายของสาร 3 กลุ่มที่พีเอช สภาวะเดียวกัน

(Van der sloot และ Dijkstra, 2004)

จากรูปที่ 2.3 พฤติกรรมโดยทั่วไปของการชะละลายของสาร 3 กลุ่มที่พีเอชสภาวะเดียวกัน ไอออนบวก ไอออนลบ และเกลือที่ละลายในน้ำได้ จะมีรูปแบบการชะละลายที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากลักษณะทางเคมีของสารนั้นๆ และความแปรผันของขนาด ในฟังก์ชันของค่าพีเอช



รูปที่ 2.4 ระดับที่เปลี่ยนแปลงในการละลายจากปัจจัยอื่นๆ (Van der sloot และ Dijkstra, 2004)

รูปที่ 2.4 ระดับที่แน่นอนจะแตกต่างออกไปในแต่ละวัสดุ ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของรีดอกซ์ (Redox) และดีไอซี (DOC) และปัจจัยอื่น ถึงแม้รูปแบบของการชะละลายแต่ละกลุ่มของธาตุจะเป็นระบบแต่ก็จะเกิดในระดับที่ต่างออกไป

ค่าพีเอชของวัสดุนั้นมีความสำคัญมาก วัสดุเกี่ยวกับซีเมนต์จะมีค่าพีเอชสูงสุดประมาณ 12 (หรืออาจจะสูงกว่านี้ซึ่งแปรผันตามสภาพแวดล้อม) เช่นใน อิฐ จะมีค่าพีเอชประมาณกลางๆ

(พีเอช 6 ถึง 8) ในไม้มีค่าพีเอช 4 ถึง 7 ค่าพีเอชที่แท้จริงที่จะวัดในการชะละลายจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของวัสดุ ค่าพีเอชของสภาพแวดล้อม และความสามารถในการต้านทานของวัสดุ

1.2 รูปแบบทางเคมีของส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์ (รีดอกซ์ แร่ธาตุ สภาพการดูดซับและอื่นๆ)

จากกลไกการทำงานทางเคมีเบื้องต้น รูปแบบทางเคมีของสารเจือปนจะกำหนดพฤติกรรมการชะละลายด้วยลักษณะเฉพาะของสาร สารเจือปนอาจจะอยู่ในรูปออกซิไดซ์หรือรีดิวซ์ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในพฤติกรรมการชะละลาย

โลหะหนักมีแนวโน้มว่าจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับสารทางธรรมชาติของน้ำดินและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากธรรมชาติ เช่น ไม้ สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะหนักโดยทั่วไปจะมีความสามารถในการละลายสูง ดังนั้นจะมีการละลายออกมาที่รวดเร็วกว่าโลหะที่ไม่เกิดโลหะเชิงซ้อน

1.3 ส่วนประกอบทั้งหมดของผลิตภัณฑ์

ในส่วนประกอบทั้งหมด (มิลลิกรัมของธาตุ/กิโลกรัมของผลิตภัณฑ์) จะมีความสามารถในการชะละลายสูงสุดขึ้นอยู่กับอิทธิพลของธาตุส่วนใหญ่ยกเว้นสารละลายเกลือที่ไม่เกิดปฏิกิริยาจะมีการชะละลายในปริมาณสูงที่สุดตลอดเวลา และมีความเข้มข้นใกล้เคียงกับในผลิตภัณฑ์ การละลายออกมาของอนุภาคอื่นๆ โดยส่วนใหญ่เป็นผลมาบ้ปัจจัยทางธรณีวิทยา ตัวแปรทางฟิสิกส์ และปริมาณในการชะละลายดังนั้นจึงไม่ค่อยที่ความสัมพันธ์กับส่วนประกอบทั้งหมดของผลิตภัณฑ์

1.4 รีดอกซ์ (Redox)

ในสภาวะออกซิเดชัน/รีดักชันของวัสดุ หรือโดยธรรมชาติ(รีดอกซ์) จะมีอิทธิพลต่อรูปแบบทางเคมีของสารเจือปน สำหรับโลหะหนักการออกซิเดชันของวัสดุจะเพิ่มปริมาณของการชะละลาย ในขณะที่การเกิดรีดักชันจะให้ผลตรงกันข้าม รูปแบบทางเคมีของความสัมพันธ์คือสิ่งที่ควรพิจารณา

1.5 ความต้านทานกรด-เบส (Acid-base Buffering)

ความสามารถในการต้านทานกรดเบสของผลิตภัณฑ์เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ภายใต้อิทธิพลของปัจจัยภายนอก เช่น ความสามารถในการเป็นกลางของซีเมนต์ของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เช่น ในกรณีของ

ความสามารถในการต้านทานความเป็นด่างของซีเมนต์ ในกำหนดเวลาที่ต้องการจนกระทั่งค่าพีเอช ลดลงจากค่าความเป็นด่างที่สูง (พีเอชมากกว่า 12) เป็นค่าพีเอชตามธรรมชาติ (พีเอชประมาณ 8)

1.6 สารอินทรีย์และดีไอซี (DOC)

ของแข็ง และสารอินทรีย์ละลาย หรือสารชีวมีก ซึ่งอาจจะเรียกว่า “ดีไอซี” หรือ สารอินทรีย์คาร์บอนละลาย (Dissolved Organic Carbon) ประกอบด้วยสารประกอบเชิงซ้อนของ โมเลกุลที่รวมตัวได้ดีกับโลหะหนัก ในการที่มีดีไอซีจะทำให้การชะละลายมีค่าเพิ่มขึ้นดังเช่นใน รูปที่ 2.4 มาจากผลของการรวมตัวของดีไอซีบอนด์กับโลหะหนักอิสระ ดีไอซีจะพบในผลิตภัณฑ์ ที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติ

1.7 องค์ประกอบของสถานะน้ำ และ Ionic Strength

ความเข้มข้นของเกลือของสารละลายในผลิตภัณฑ์ หรือในสภาพแวดล้อม จะมีอิทธิพลต่อ ส่วนประกอบอื่นๆ (โดยทั่วไป ค่าความเข้มข้นเกลือที่สูงขึ้นจะเพิ่มความสามารถการละลายของ สารเจือปน) ส่วนประกอบอื่นๆ จะแสดงในรูปของสารละลายที่อาจเกิดการเพิ่มของการชะละลาย เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เช่น โลหะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับคลอไรด์ หรือ คาร์บอเนต

1.8 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นซึ่งในการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมินั้น จะส่งผลต่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเพิ่มขึ้นและส่งผลให้การเคลื่อนที่โดยการแพร่ เพิ่มขึ้นด้วย

1.9 เวลา

เวลาเป็นปัจจัยที่สำคัญ สำหรับปริมาณที่ละลายออกมา เมื่อ

1) โดยทั่วไป มาตรฐานเวลาจะประยุกต์ใช้กับวัสดุที่เฉพาะ

2) อัตราส่วนที่กระบวนการได้ดำเนินการจะถูกจำกัดสำหรับการปล่อยออกมาในกรณี ของปฏิกิริยาทางจลนศาสตร์ที่ช้า (การละลายอย่างช้าของแร่ธาตุ) หรือการแพร่ซึ่งอาจจะเพียงพอ ในการเกิดปฏิกิริยาจนสมบูรณ์ ดังนั้นเวลาที่พอเพียงอาจจะยาวนานเกินไปในกรณีนี้ได้มีการ ประมาณค่าที่น่าจะมีผลลัพธ์ที่เป็นไปได้ของผลที่ตามมาของกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ใน การปล่อยออกของสารทั้งหมด

3) การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวัสดุ และสภาวะแวดล้อมต่อช่วงเวลา เช่น คาร์บอนชั้นของผลิตภัณฑ์ที่มีความเป็นด่าง หรือการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวของก้อนขนาดใหญ่ เนื่องจากการโค่นการกัดกร่อน

วิธีการทดสอบจะรวบรวมขั้นตอนต่างๆ เพื่อเข้าใจผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการชะละลายในระยะสั้น และระยะยาว การทดสอบอาจจะให้ข้อมูลสำหรับการถอดแตรก หรือการประเมินค่าตามช่วงระยะเวลาที่สั้นหรือยาว

2. ตัวแปรทางฟิสิกส์ที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนย้ายส่วนประกอบจากผลิตภัณฑ์สู่สถานะน้ำ

จากกระบวนการทางเคมี การเคลื่อนที่ด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ก็เป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบจากวัสดุออกสู่สถานะน้ำ 3 กลไกของการเคลื่อนที่ คือ Advection การชะที่ผิวหน้า และการแพร่

ในการที่สารประกอบไหลร่วมกับน้ำ (น้ำฝน) ซึมผ่าน หรือไหลผ่านผลิตภัณฑ์จะถูกเรียกว่า “Advection” น้ำที่ซึมผ่านหรือไหลผ่านผลิตภัณฑ์ โดยปกติจะเกิดจากน้ำฝนซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการชะละลายและมีผลกระทบต่อดินและน้ำใต้ดิน เนื่องจากการกระจายตัวของส่วนประกอบการซึมผ่าน (Percolation) ผลิตภัณฑ์นี้จะเกิดกับวัสดุที่มีรูพรุน

2.1 การแพร่ (Diffusion)

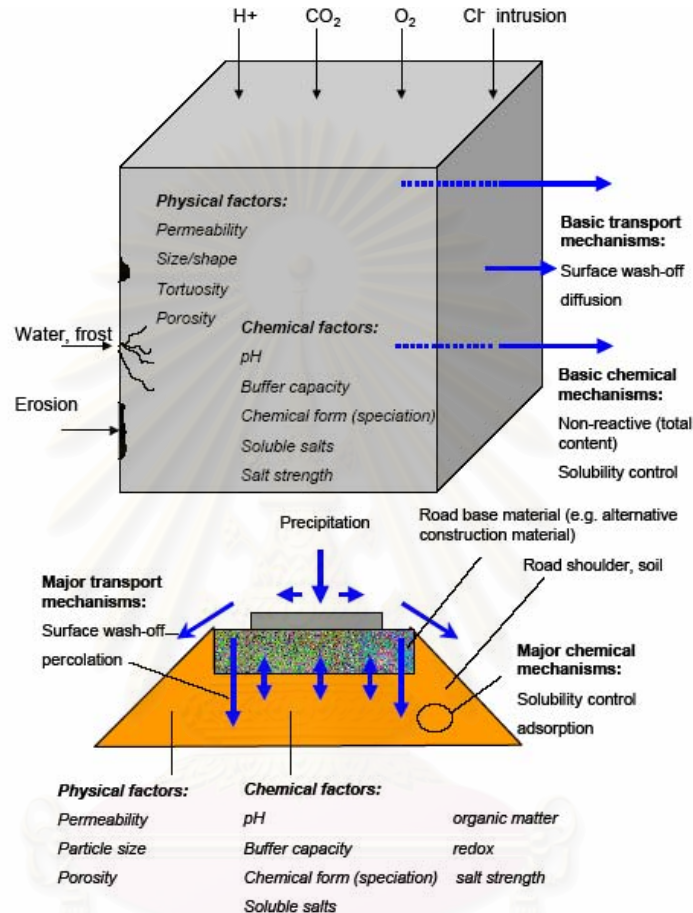
การแพร่ คือ การเดินทางของส่วนประกอบเนื่องจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในการไหลที่ไม่ต่อเนื่องโดยทั่วไปจะเกิดขึ้นกับวัสดุที่อัดแน่นซึ่งจะไม่มีน้ำซึม และมีรูพรุนต่ำ (น้ำในรูพรุนจะหยุดนิ่ง) การละลายออกมายังคงเกิดขึ้นแต่จะเป็นการเดินทางออกมาโดยการแพร่ภายใต้สภาพแวดล้อมเหล่านี้ การแพร่จะกำหนดการเคลื่อนที่ก่อนที่สารจะละลายออกมาเนื่องจาก Advection อัตราการแพร่จะขึ้นกับเกรเดียนต์ของส่วนประกอบระหว่างผลิตภัณฑ์กับการสัมผัสของน้ำและเวลาที่เหมาะสม การชะละลายที่ผิวหน้า (Surface Wash-out) คือ กระบวนการที่เหมือนกับ Advection ในกรณีของการชะที่ผิวหน้าจะใช้ธิบายการชะละลายวัสดุที่ผิวหน้าของผลิตภัณฑ์ที่เป็นก้อนขนาดใหญ่หลังจากมีการชะละลายที่ผิวหน้าในระยะแรก การแพร่จะเป็นกลไกการเคลื่อนที่ในวัสดุก้อนขนาดใหญ่

2.2 ตัวอย่างแบบเกร็ดและแบบก้อนขนาดใหญ่

พฤติกรรมของการปล่อยสารเจือปนออกมาแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

1. วัสดุแบบก้อนขนาดใหญ่ (Monolithic)
2. วัสดุแบบเกร็ด (Granular)

โดยในวัสดุแบบก้อนขนาดใหญ่นั้นบ่อยครั้งจะแสดงการแพร่ (Diffusion) เป็นตัวควบคุมการชะละลายออกมา (การชะละลายออกมาของส่วนประกอบของวัสดุเนื่องจากการแพร่) ในขณะที่วัสดุแบบเกล็ดโดยปกติจะพบในลักษณะการซึม (Percolation) เป็นหลักในการชะละลายออกมา



รูปที่ 2.5 ลักษณะเฉพาะของวัสดุและปัจจัยภายนอก(ทางเคมีและฟิสิกส์), อิทธิพลของการปล่อยสารเจือปนออกมาจากวัสดุก้อนขนาดใหญ่ และวัสดุแบบเกล็ด (Van der sloot และ Dijkstra, 2004)

สิ่งสำคัญในการแบ่งแยกผลิตภัณฑ์แบบเกล็ดและแบบก้อนขนาดใหญ่ เพราะว่าการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันของวัสดุ 2 ประเภท พฤติกรรมการชะละลายเนื่องจากการสัมผัสกับน้ำ คือ การซึมจะเด่นชัดในตัวอย่างแบบเกล็ด และการแพร่จะเด่นชัดในวัสดุแบบก้อนใหญ่(ปริมาณการชะละลายขึ้นอยู่กับของการแพร่ของส่วนประกอบที่ต้องการจากผลิตภัณฑ์ละลายออกสู่น้ำ) สำหรับวัสดุก้อนขนาดใหญ่ พื้นผิวการชะละลายในระยะเริ่มต้นอาจจะพอเพียงในกรณีนี้สารละลายเกลือที่มีอยู่บนพื้นผิวจะละลายอย่างรวดเร็วและละลายมากขึ้น ในบางกรณีวัสดุแบบเกล็ดอาจจะอัดแน่น

จนกลายเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการซึมที่น้อยในการใช้งานจริง ดังนั้นจะให้ผลเหมือนกับวัสดุที่เป็นแบบก้อนขนาดใหญ่

2.3 ขนาดของอนุภาค

สำหรับวัสดุแบบเกล็ด ขนาดอนุภาคจะเป็นตัวกำหนดระยะการเดินทางระหว่างศูนย์กลางของอนุภาคสู่สถานะน้ำ ปฏิกริยาและการเคลื่อนที่จะเกิดอย่างรวดเร็วในอนุภาคขนาดเล็ก ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ การเคลื่อนที่จะถูกควบคุมโดยการแพร่

2.4 ความพรุน

ช่องว่างของรูพรุนหรือความพรุน (อัตราส่วนระหว่างช่องว่างของรูพรุนกับปริมาตรทั้งหมด) คือ ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของส่วนประกอบออกสู่สถานะน้ำ ทั้งวัสดุแบบก้อนขนาดใหญ่และวัสดุแบบเกล็ด การเคลื่อนที่ของน้ำเข้าไปวัสดุที่มีความพรุนสูงจะเกิดขึ้นดีกว่า วัสดุที่มีความพรุนต่ำ และความพรุนสูงจะทำให้มีการชะละลายที่สูงเช่นกัน

2.5 ความสามารถในการซึม

ความสามารถในการซึม หรือ Hydraulic Conductivity จะกำหนดความยากง่ายของน้ำที่เข้าสู่ผลิตภัณฑ์และความเร็วของสารเจือปนที่หลุดออกมาต่อหน่วยเวลาความสามารถในการซึมอาจจะเป็นประเด็นของวัสดุที่คล้ายดินเหนียวที่มีความหนาแน่นหรือวัสดุแบบก้อนที่มีขนาดใหญ่ น้ำมีแนวโน้มที่จะไหลรอบๆผลิตภัณฑ์ แทนการไหลเข้าไปภายในที่มีความซึมต่ำ ซึ่งเป็นเหตุผลว่าผลิตภัณฑ์ที่มีความซึมต่ำ จะถูกควบคุมโดยการแพร่

2.6 ขนาดและรูปร่างของก้อนแข็งขนาดใหญ่

คุณภาพของสารที่ชะละลายจากผลิตภัณฑ์ โดยการแพร่ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะทางธรณีวิทยาของผลิตภัณฑ์ ตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อปริมาณที่หลุดออกมาของพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญของการแพร่ กระบวนการของการแพร่จะเกิดขึ้นเร็วกว่าในผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราที่สูงของพื้นผิวต่อหน่วยน้ำหนัก

การทดสอบการแพร่และสูตรคำนวณการแพร่ คือ พื้นฐานแรกของก้อนตัวอย่างขนาดใหญ่ที่พอเพียงต่อการรักษาความเข้มข้นของสาร ที่มีอยู่ในก้อนตัวอย่างที่ระดับปกติและในไม่ช้าที่แกนกลางของตัวอย่าง ระดับของส่วนประกอบที่มีจะลดลงจนหมดสิ้นซึ่งจะปรากฏผลในการทดสอบสำหรับตัวอย่างชนิดที่บางหรือวัสดุที่มีความพรุนสูงอาจเกิดขึ้นในไม่ช้า ในบางครั้งการทดลองในทางปฏิบัติ การทำลายล้างไม่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 100 ปี ความแตกต่างระหว่างการทดลองกับในทางปฏิบัติ ก็สำคัญต่อความเข้าใจในการอธิบายผลของการทดสอบ

2.7 ความไวต่อการกัดกร่อน

สำหรับก้อนแข็งขนาดใหญ่ การกัดกร่อน/การสึกกร่อนทางฟิสิกส์ส่งผลให้การละลายมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก 2 ตัวแปร คือ 1. การกัดกร่อนทำให้พื้นผิวมีค่าเพิ่มขึ้น 2. เนื่องจากการกัดกร่อนทำให้มีพื้นผิวใหม่ละลายออกมาซึ่งทำให้มีเกรเดียนต์ความเข้มข้นของสารเจือปนสูงขึ้น ดังนั้นจะมีการละลายออกมากที่สูงขึ้น

3. ตัวแปรภายนอก

ตัวแปรภายนอกต่างๆ นั้นมีความสำคัญสำหรับพฤติกรรมของการชะละลายภายใต้สภาวะที่เกิดขึ้นจริง มีตัวแปรมากมายที่เกี่ยวข้องกับปริมาณของน้ำที่ผลิตภัณฑ์จะหลุดในช่วงระยะเวลาหนึ่ง อัตราการไหลของน้ำ (วัสดุแบบก้อนใหญ่) และการไหลได้มากกว่าของวัสดุแบบเกล็ด ตัวแปรภายนอกเหล่านี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน

ตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการหลุดออกมา คือ การย่อยสลายของสารอินทรีย์ ในผลิตภัณฑ์ หรือการย่อยสลายจากอิทธิพลของแสง

2.9 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

U.S.EPA (1992) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับของเสียที่สามารถนำไปฝังกลบหรือของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้ว โดยการทดสอบของเสียดังกล่าวด้วยวิธีการสกัดสาร (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) และวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Extraction Solution) มาตรฐานของ U.S.EPA ได้กำหนดความเข้มข้นของโลหะหนักซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของสารที่เป็นพิษตามประเภทของของเสียซึ่งที่รายละเอียดตามตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่ามาตรฐานของสารพิษต่างๆ จากการทดสอบด้วยวิธี TCLP (U.S. EPA, 1992)

สารมลพิษ	ระดับมาตรฐาน (มก./ล.)	สารมลพิษ	ระดับมาตรฐาน (มก./ล.)
สารหนู	5	Hexachlorobenzene	0.13
แบเรียม	100	Hexachlorobutadiene	0.5
เบนซีน	0.5	Hexachloroethane	3
แคดเมียม	1	ตะกั่ว	5
Carbon tetrachloride	0.5	Lidane	0.4
Chlordane	0.03	ปรอท	0.2
Chlorbenzene	100	Methoxychlor	10
คลอโรฟอร์ม	6	Methyl ethyl kethone	200
โครเมียม	5	Nitrobenzene	2
o-Cresol	200	Pentachlorophenol	100
m-Cresol	200	Pyridine	5
p-Cresol	200	เซเลเนียม	1
Cresol	200	เงิน	5
2,4-D*	10	Tetrachloroethylene	0.7
1,4-Dichlorobenzene	7.5	Toxaphene	0.5
1,2-Dichloroethane	0.5	Trichloroethylene	0.5
1,1-Dichloroethane	0.7	2,4,5-Trichlorophenol	400
1,4-Dichloroethane	0.13	2,4,6-Trichlorophenol	2
Endrin	0.02	2,4,5-TP(Silvex)**	1
Heptachlor	0.008	Vinyl chloride	0.2

* สารประกอบประเภท Dichlorophenol

** สารประกอบประเภท Trichlorophenol

กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้ออกประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งได้กำหนดสมบัติของของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง ดังนี้

- 1) สามารถรับแรงอัด (Unconfined Compressive Strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่บนหลุมฝังกลบนิรภัย (Secured Landfill) ได้อย่างปลอดภัย
- 2) มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

3) มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) เพื่อทดสอบของเสียได้ผ่านการทำลายฤทธิ์และปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์ก่อนการนำไปฝังกลบ

โดยในการสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

1. การสกัดสารเพื่อทดสอบหาปริมาณสารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable) จากของเสีย และเพื่อทดสอบว่าของเสียได้ผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์แล้วนั้น ให้ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

1.1 หากตัวอย่างของเสียเป็นของเหลว หรือมีของแข็ง (Dry Solid) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วจึงนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 2

1.1.1 หากตัวอย่างของเสียมีของแข็ง (Dry Solid) ปะปนในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 0.5 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1.1.2 บดตัวอย่างของเสียให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

1.1.3 นำตัวอย่างที่ผ่านการบดหนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดค้างพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้ได้อัตราส่วนของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก(กรัม)ของตัวอย่าง

1.1.4 เขย่าบนเครื่องหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

1.1.5 กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

2. การวิเคราะห์หาค่าสารอันตรายต่างๆ ในของเหลวที่ผ่านการกรองแล้ว ให้ใช้วิธีมาตรฐาน US EPA SW 846 หรือวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์ของสารละลายจากการสกัด (Leachate) มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐานที่ระบุในข้อ 5 หมวด 1 ของภาคผนวกที่ 1 ให้ดำเนินการทำลายฤทธิ์ใหม่เพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bishop (1988) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำก้อนแข็ง โดยใช้ของเสียสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว โดยศึกษาถึงความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนัก และกลไกการจับยึดของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในของเสียที่ถูกทำแข็ง

1. ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)

จากการทดสอบการชะละลายของก้อนแข็งโดยทำการชะละลายก้อนแข็งด้วยกรดอะซิติกแล้วทำการชะละลายติดต่อกันอีกเป็นจำนวนรวมทั้งหมด 15 ครั้ง ตรวจวัดค่าพีเอชและความ เป็นด่างแล้วนำไปเขียนกราฟดังรูปที่ 2.6 จะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของก้อนแข็งหลายๆ ครั้ง พบว่าค่าพีเอชของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสมจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในครั้งที่ 15 ค่าความความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยประมาณ 1.7 ของความเป็นด่างสะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างสะสมถึงการชะล้างในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 1.83 meq/g ซึ่งถือเป็นค่าความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของก้อนแข็ง ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะล้างออกมาแต่ละครั้งนี่จะเป็นตัวควบคุมพีเอชของการชะล้างโดยการสะเทินกรดอะซิติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง

2. กลไกการจับยึดโลหะหนัก

จากรูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย (โครเมียม แคลเซียม และตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่างและซิลิกอนซึ่งจะถูกชะละลายมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.0

จากการทดลองที่ผ่านมาหลายครั้งทำให้ทราบว่าโลหะหนักอาจอยู่ในโครงสร้างของก้อนแข็งในรูปแบบต่างๆ เช่น อยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในก้อนแข็งถูกเกาะบนผนังของรูพรุนและทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาได้มากกว่าโครเมียมและตะกั่ว

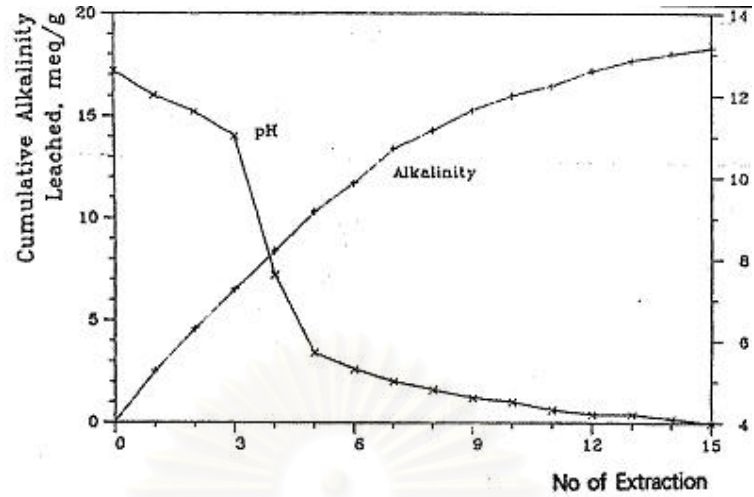
กรณีที่โลหะหนักถูกล้อมอยู่ในของแข็ง หรืออยู่ในรูพรุน หรือเกาะติดผิวรูพรุนแล้วโลหะหนักเหล่านี้ควรจะถูกระบายออกมามากน้อยขึ้นกับการชะละลายค่าความเป็นด่าง จากรูปที่ 2.7 เส้นกราฟของแคลเซียมสะสมที่ถูกชะล้างออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะล้างออกมา จึงสันนิษฐานได้ว่าแคลเซียมจะอยู่ในรูปของเสียที่แข็งในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ตามรูพรุนและเกาะติดอยู่ตามผนังของรูพรุน

สำหรับโครเมียมและตะกั่วนั้น เมื่อพิจารณาเส้นกราฟแล้วจะมีรูปแบบของการชะละลายคล้ายคลึงกับซิลิกอนซึ่งเป็นสารประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วจะถูกยึดติดในโครงสร้างซิลิกอนมากกว่าเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูพรุน การชะละลายของโครเมียมและตะกั่วค่อนข้างยากที่จะเกิดที่พีเอชต่ำๆ และต่ำกว่าพีเอชในการชะละลายแคลเซียม อัตราการชะละลายโลหะทั้งสองนี้มีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการชะละลายที่คาดคะเนจากการชะละลายของโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งแสดงว่าโลหะทั้งสองนี้ เกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา และจะถูกชะละลายออกมาต่อเมื่อโครงสร้างของซิลิกาถูกทำลาย

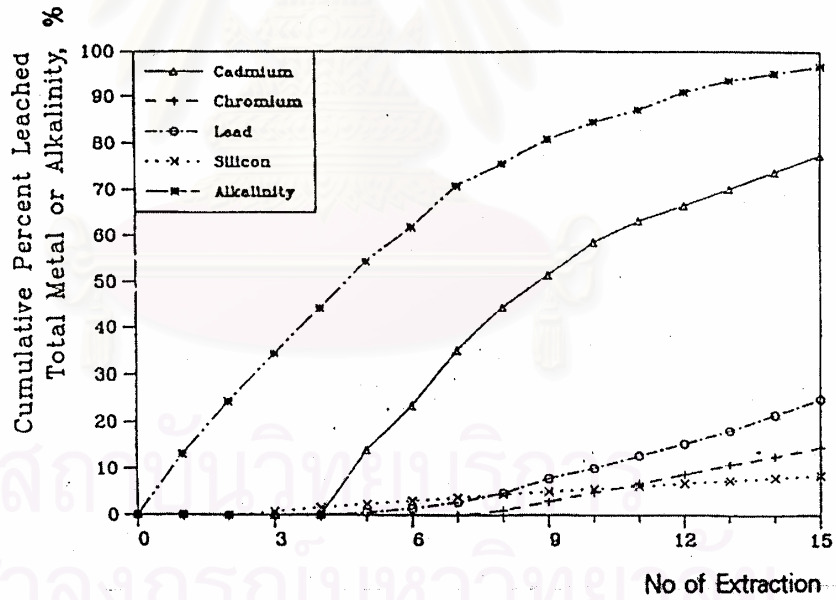
รูปที่ 2.8 แสดงถึง pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียมและตะกั่วในสารละลายที่มีค่า Ionic Strength 0.75 M พบว่าในขณะที่เริ่มผสมปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นๆ ค่าพีเอชจะมีค่าสูงประมาณ 12 ถึง 13 ซึ่งทำให้แคลเซียมส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งที่อยู่ในซีเมนต์ ส่วนโครเมียมและตะกั่วที่ละลายน้ำได้ และมีส่วนในปฏิกิริยาการแข็งตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะทำปฏิกิริยากับซิลิเกต จากสาเหตุดังกล่าวอธิบายได้ว่าแคลเซียมจะถูกชะละลายออกมาเช่นเดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียม และตะกั่วจะถูกชะล้างออกมาโดยขึ้นกับการละลายของซิลิเกต

ภายหลังการทดลองการชะละลายได้วิเคราะห์น้ำหนักแห้งของสสารทั้งหมด พบว่าหลังจากการทดลองชะล้าง 15 ครั้ง ปริมาณสารที่ถูกชะล้างออกไปประมาณร้อยละ 50 ถึง 70 ของปริมาณทั้งหมดก่อนการทดลอง แต่ยังมีโลหะหนักเหลืออยู่ โดยมีแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว เหลืออยู่ 50 85 และ 75 เปอร์เซ็นต์ และมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกอน เหลืออยู่ร้อยละ 90 98 และ 80 ตามลำดับ และแคลเซียมที่เหลืออยู่ร้อยละ 8 ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่าซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดจับโลหะหนักได้ดี และยากที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวดังกล่าว

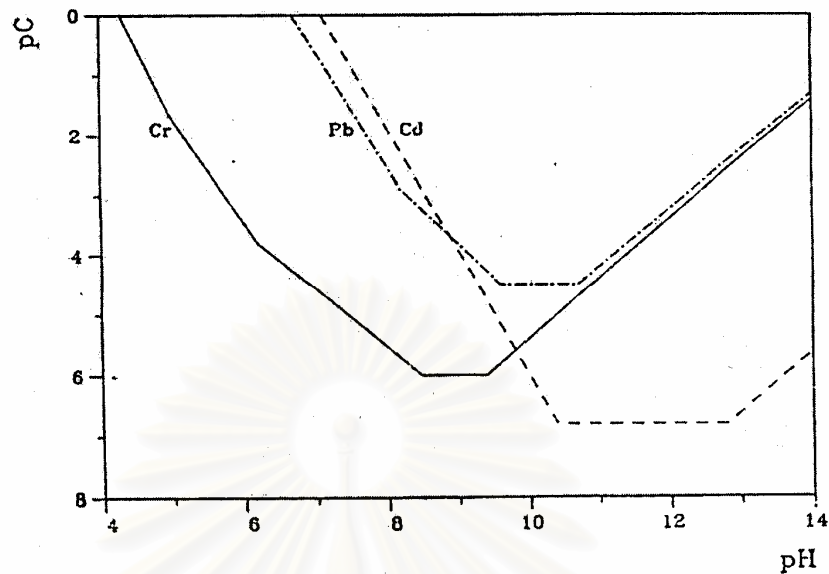
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ค่าพีเอชและความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่างและซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)



รูปที่ 2.8 pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียมและตะกั่ว (Bishop, 1988)

Cartledge และคณะ (1990) ได้ทำการศึกษาถึงกลไกการจับยึดการบ่มตัว และการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชันด้วยซีเมนต์ เมื่อบำบัดของเสียประเภทโลหะหนักโดยใช้วิธีทำให้เป็นก้อน ตัวอย่างโลหะหนักที่เลือกใช้ได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียม ซึ่งโลหะหนัก 2 ชนิดนี้เป็นตัวแทนของของเสียนินทรีย์ที่มีลักษณะสมบัติที่แตกต่างกันมาก อัตราส่วนระหว่างของเสียต่อซีเมนต์ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 0.3 ของเสียที่ผ่านการบำบัดโดยการทำก้อนแข็งด้วยซีเมนต์แล้ว จะนำมาทดสอบการสกัด (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) และ Solid-state NMR

จากการทดสอบการสกัดพบว่าความเข้มข้นของแคดเมียมในน้ำชะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นของตะกั่วในน้ำชะมาก ซึ่งให้เหตุผลว่าในสารละลายพื้นฐานของแคดเมียมเมื่อตกตะกอนให้อยู่ในรูปไฮดรอกไซด์ที่ค่อนข้างจะบริสุทธิ์ ไม่ค่อยเกิดสารประกอบอื่น ในขณะที่ตะกั่วเกิดตะกอนที่เป็นสารประกอบหลายชนิดผสมกันซึ่งโดยปกติจะประกอบไปด้วยตะกั่วไฮดรอกไซด์ และเกลือผสมอื่นๆ นอกจากนี้ตะกั่วยังมีคุณสมบัติเป็นสารแอมโฟเทอริก ในขณะที่แคดเมียมไม่ใช่สารที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ตะกั่วไฮดรอกไซด์ยังสามารถรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนทำให้เกิดสารประกอบไตรไฮดรอกซีฟอสเฟตซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำได้มากกว่าตะกั่วออกไซด์และตะกั่วไฮดรอกไซด์ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเม็ดซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สภาพของปฏิกิริยาไฮเดรชันจะไม่เหมาะต่อการเกิดสารประกอบไตรไฮดรอกซีฟอสเฟต สำหรับแคดเมียมแล้วเมื่อค่าพีเอชที่ค่ามากกว่า 13 เท่านั้น

จึงจะสามารถวัดจำนวนของ $Cd(OH)_2$ ได้ ดังนั้นสถานะที่เกิดขึ้นในโพรงช่องว่างของซีเมนต์จึงไม่เหมาะสมที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่แคลเซียมจะอยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่สามารถละลายน้ำได้น้อยมาก ส่วนไอออนที่สามอันได้แก่ ซัลเฟต ซึ่งเป็นไอออนที่อยู่ในซีเมนต์โดยมีหน้าที่ควบคุมการก่อตัวนั้น ไม่น่าที่จะเกิดตะกอนของสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตแข่งกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้มากนัก ทั้งแคลเซียมและแคลเซียมต่างก็เป็นสารที่มีประจุเดียวกันและมีรัศมีไอออนใกล้เคียงกัน จึงน่าจะแทนที่กันได้เป็นอย่างดีในโครงสร้างของซีเมนต์ ดังนั้นการเติมเกลือของแคลเซียมจะมีผลกระทบต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์น้อยมาก นอกจากนี้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ทั้งที่เติมลงไปและที่เกิดปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังเป็นสารที่มีนิวคลีเอชันไซต์ให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมาเกิดรอบๆ ทำให้สารสกัดเข้าถึงแคลเซียมได้ยากขึ้นอีกระดับหนึ่ง

เมื่อพิจารณาการทดลองด้วยการไตเตรดสารละลายตะกั่วไนเตรดด้วยสารละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์และสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับแคลเซียมซัลเฟต ซึ่งสารละลายผสมนี้เป็นการจำลองสถานะของปูนซีเมนต์ที่แท้จริงเนื่องจากมีอิทธิพลผสมอยู่ด้วย จากการทดลองในการไตเตรดด้วยสารละลายผสมจะเกิดสารประกอบตะกั่วไฮดรอกไซด์ ตะกั่วซัลเฟต และตะกั่วไนเตรดผสมกันซึ่งไม่สามารถหาจุดยุติของการไตเตรดได้ ค่าพีเอชก็มีความแปรปรวนอยู่ในช่วง 8.5 ถึง 10 ซึ่งเกิดขึ้นจากการละลายของสารประกอบรูปเบื้องต้น และมีการเกิดสารประกอบชนิดนี้ขึ้นอีก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Dissolution-Precipitation

จากการทดลองของจึงได้สรุปว่า การที่ตะกั่วถูกชะละลายมากกว่าแคลเซียมเนื่องจากเกลือต่างๆของตะกั่วที่เกิดขึ้นจะไปหุ้มรอบๆ เม็ดซีเมนต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์กับน้ำจึงลดน้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดลอง ซึ่งได้ว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วันก่อนซีเมนต์ที่ประกอบด้วยตะกั่วยังมีปริมาณน้ำที่สามารถแลกเปลี่ยนได้สูง และมีแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยกว่าซีเมนต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีสารประกอบตะกั่วในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ด้วย

Shi และ Stegemann (2000) ศึกษาความต้านทานการกัดกร่อนจากกรดของซีเมนต์ชนิดต่างๆ ได้แก่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (PC) ซีเมนต์จากเตาเผากากโลหะ (ASC) ปูนขาวจากถ้ำลอย (LFA) และการผสมระหว่างซีเมนต์ที่มีอัลลูมินาสูง ยิปซัม และปูนขาว (HAC) ในสารละลายกรดไนตริกพีเอช 3 กรดอะซิติกพีเอช 3 และกรดอะซิติกพีเอช 5 พบว่า PC เกิดการกัดกร่อนเร็วกว่า ASC และ LFA ส่วน HAC นั้นเกิดการละลายอย่างรวดเร็วในสารละลายกรดเหล่านี้ PC มีรูพรุนมากกว่า ASC

แต่ก็มีรูพรุนน้อยกว่า LFA ดังนั้นการกักคร่อนจึงขึ้นอยู่กับกระบวนการไฮเดรชันซึ่งจะส่งผลต่อความพรุนของตัวอย่าง

Poon และคณะ (2001) ศึกษาการการชะละลายโดยใช้วิธีการใช้ความดันไหลผ่านก้อนแข็งขนาดใหญ่ของของเสียนไตรายที่บำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง โดยจำลองการชะละลายจากหลุมฝังกลบที่ฝังเฉพาะของเสียนไตราย ที่จะมีการชะละลายจากน้ำที่ไหลอยู่โดยรอบไหลผ่านลงสู่ชั้นน้ำใต้ดิน ซึ่งจะไหลผ่านรูพรุนที่อยู่ภายในโครงสร้างของก้อนแข็ง โดยโลหะหนักที่นำมาศึกษาประกอบไปด้วย Pb^{2+} Zn^{2+} Cu^{2+} Ni^{2+} และ Cr^{6+}

ผลการศึกษาพบว่า การชะละลายของโลหะหนักนั้นจะแบ่งเป็น 2 ระยะ โดยในระยะแรกโลหะหนักจะถูกชะละลายออกมาอย่างรวดเร็วและในจะละลายออกมาอย่างช้าๆ ในระยะที่ 2 โดยในระยะที่ 2 นี้ พบว่าแคลเซียมชะละลายออกมามากกว่า โลหะหนักแต่ละชนิดนั้น จะชะละลายออกมาในอัตราที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะการจับตัวกับโครงสร้างซีเมนต์ และการที่มีน้ำไหลผ่านอยู่ตลอดเวลาส่งผลให้โครงสร้างของก้อนแข็งถูกทำลาย รูพรุนภายในจึงมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับความสามารถในการชะละลายออกมาโดยกระบวนการทดลองนี้ พบว่า Pb มีความสามารถในการชะละลายมากที่สุด ตามด้วย Zn Cu และ Ni

Asavapisit และคณะ (2002) ศึกษาการกักคร่อนของของเสียที่ผ่านกระบวนการทำก้อนแข็งจากซีเมนต์ด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกซึ่งพบว่าก้อนแข็งนั้นมีการต้านทานการกักคร่อนได้แตกต่างกันคือ ก้อนแข็งมีการต้านทานการกักคร่อนจากกรดซัลฟิวริกได้ดีที่สุด ตามด้วยกรด อะซิติก และกรดไนตริก ตามลำดับ จากรูปแบบของแคลเซียมซัลเฟตที่ไม่ละลายน้ำบนพื้นผิวของตัวอย่างนั้นจะเป็นสิ่งป้องกันการกักคร่อนเมื่อใช้กรดซัลฟิวริกในการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบที่มีการละลายที่สูงกว่าของแคลเซียมอะซิเตด และแคลเซียมไนเตรด

ภัทร กฤตานุสรณ์ (2546) ศึกษาการทำเสถียรตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ด้วยการหล่อเป็นก้อนแข็งนี้เพื่อเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งเมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในตะกอนแต่ละประเภท ศึกษาความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นของตะกอนและอัตราส่วนผสมระหว่างตะกอนกับซีเมนต์โดยตะกอนที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรม วัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งที่มีอัตราส่วนต่าง ๆ กันซึ่งสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมจำนวน 8 ประเภท มีอยู่ 6 ประเภท ได้แก่ ตะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกหนัง ประกอบรถยนต์ ผลิตภัณฑ์รีดเหล็ก ผลิตภัณฑ์จาก และผลิตภัณฑ์กิ่งตัวนำ ที่จัดเป็นของเสียอันตรายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เพราะจากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดสารตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) พบว่าตะกอนของ 6 ตัวอย่างอุตสาหกรรมมีปริมาณ โครเมียมหรือตะกั่ว หรือทั้งปริมาณโครเมียมและตะกั่วในน้ำสกัด มีปริมาณสูงกว่าค่ามาตรฐาน โดยในทุกตัวอย่างมีค่าเกินกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ คือ 5 มก./ล. และทั้ง 6 ตัวอย่าง มีความหนาแน่นอยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 3 ตัน/ลบ.ม. ดังนั้นจึงได้ทำการเลือกตะกอนทั้ง 6 ตัวอย่างอุตสาหกรรมดังกล่าวมาทำการหล่อเป็นก้อนแข็ง

2. จากการทดสอบหาค่าปริมาณน้ำในตะกอนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัด สูงที่สุด ของตะกอนแต่ละประเภท โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง เป็นวัสดุประสาน ด้วยอัตราส่วนผสมตะกอนต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5:1 พบว่าค่าปริมาณน้ำในตะกอนที่เหมาะสมจากอุตสาหกรรมฟอกหนังมีค่าเท่ากับร้อยละ 49 อุตสาหกรรมประกอบรถยนต์เท่ากับร้อยละ 62 อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์รีดเหล็กเท่ากับร้อยละ 65 อุตสาหกรรมรีดเหล็กเท่ากับร้อยละ 5 อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากเท่ากับร้อยละ 74 และ อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์กิ่งตัวนำเท่ากับร้อยละ 55 ของน้ำหนักตะกอนแห้ง นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าปริมาณน้ำในตะกอนที่เหมาะสม มีค่าใกล้เคียงกับค่าความดูดซึมน้ำในตะกอนในสภาวะ อิ่มตัวผิวแห้ง ทำให้ค่าความดูดซึมน้ำในสภาวะนี้มาใช้แทนค่าปริมาณน้ำในตะกอนที่เหมาะสมได้

3. จากการทดลองการหล่อก้อนแข็งตะกอนแต่ละประเภท ที่อัตราส่วนผสมตะกอน ออบแห้งต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5:1 0.75:1 1:1 1.25:1 1.5:1 และ 1.75:1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.5:1 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดและค่าความหนาแน่นของก้อนแข็งในทุกอัตราส่วนผสมของตะกอน แต่ละประเภท ผ่านมาตรฐานในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) แต่ผลการ สกัดโลหะหนักในก้อนแข็งตะกอนจากอุตสาหกรรมฟอกหนังนั้น ผ่านมาตรฐานที่อัตราส่วนผสม ตะกอนต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.5:1 และ 0.75:1 ในขณะที่ตะกอนอุตสาหกรรมอื่นๆ นั้น ผ่านมาตรฐานในทุกอัตราส่วน

4. การเพิ่มอัตราส่วนผสมตะกอนอบแห้งต่อซีเมนต์แต่ละประเภท ทำให้ค่ากำลัง รับแรงอัดของก้อนแข็งที่ได้มีค่าลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งตะกอนแต่ละประเภท ที่ได้มีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังรับแรงอัดมากที่อัตราส่วนตะกอน ต่อซีเมนต์ 0.5:1 และค่าเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อทำการเพิ่มปริมาณตะกอน

5. การเพิ่มอัตราส่วนผสมตะกอนอบแห้งต่อซีเมนต์แต่ละประเภท ทำให้ค่าปริมาณ โลหะหนักในน้ำสกัดจากก้อนตัวอย่างที่ได้มีเพิ่มขึ้น สาเหตุจากการเพิ่มอัตราส่วนตะกอน ต่อซีเมนต์ทำให้สัดส่วนซีเมนต์ในก้อนแข็งลดลงทำให้ความสามารถในการจับยึดโลหะลดลง

6. ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งและค่าความหนาแน่นของตะกอนที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน แต่อย่างไรก็ดีหากทำการแบ่งประเภทตะกอนจากกระบวนการผลิตที่มาของตะกอน ชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในตะกอนร่วมด้วย จะพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นของตะกอน

Asavapisit และคณะ (2003) ศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากจากก้อนแข็งของกระบวนการบำบัดตะกอนของโรงชุบโลหะ โดยใช้วิธีการทดสอบ 3 วิธีคือ TCLP DLT และการทดสอบการชะละลายภายใต้การควบคุมพีเอช โดยพิจารณาโลหะหนัก 3 ชนิดคือ โครเมียม สังกะสี และเหล็ก โดยการทดสอบการชะละลายภายใต้การควบคุมค่าพีเอช จะใช้ค่าพีเอช คือ 4 8 และ 11 โดยเตรียมตัวอย่างจากน้ำกลั่น และปรับค่าพีเอชโดยกรดไนตริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้ทั้งตัวอย่างที่ตัดแล้ว และตัวอย่างที่เป็นก้อนขนาดใหญ่

ผลการศึกษาพบว่า ค่าพีเอช เป็นตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการชะละลายของโลหะหนักทั้งหมด โดยที่พีเอช 4 โลหะหนักทั้งสามจะมีค่ามากที่สุด และการชะละลายจากตัวอย่างที่ตัดแล้ว จะมีความเข้มข้นของโลหะหนักที่มากกว่าตัวอย่างที่เป็นก้อนขนาดใหญ่

Halim และคณะ (2003) ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของการชะละลาย ที่มีต่อการชะละลายของตะกั่วและแคดเมียมจากของเสียที่เจือปนในซีเมนต์ เพื่อสืบหาค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการทำการชะละลาย และความสัมพันธ์เหล่านี้กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของโลหะที่ชะละลายออกมา พารามิเตอร์ของการชะละลายวิเคราะห์จากพีเอชสุดท้ายของการชะละลาย ระยะเวลาในการชะละลาย ขนาดของอนุภาคที่ใช้ทดสอบ อัตราส่วนระหว่างของเหลวกับของแข็ง และชนิดของของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ค่าพีเอชในการชะละลายนั้น เป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อการหลุดออกมาของโลหะในสารละลาย สำหรับแคดเมียมจะมีค่าความเข้มข้นลดลงเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเนื่องจากการตกผลึกของไฮดรอกไซด์ สำหรับตะกั่วเนื่องจากในธรรมชาติสารนี้สามารถอยู่ได้ทั้งสภาวะกรดและเบส ตะกั่วจะเพิ่มขึ้นอีกในค่าพีเอชที่มากกว่า 12 ขนาดของอนุภาค อัตราส่วนระหว่างของเหลวกับของแข็ง และระยะเวลาในการชะละลายจะส่งผลต่อพีเอชของน้ำชะละลาย สำหรับชนิดของกรดนั้นการศึกษาจะพบว่าผลกระทบเช่นกัน โดยจะเป็นตัวควบคุม H^+ ในระบบ

จากการทดสอบการชะละลายโดย TCLP พบว่าไม่เป็นการจำลองจากหลุดออกมาของโลหะหนัก (ตะกั่วและแคดเมียม) จากของเสียที่ปะปนในซีเมนต์ ถ้าทำการฝังกลบในหลุมฝังกลบของเสียชุมชน เป็นผลมาจากค่าที่สูงของความเป็นด่างในของเสียที่ปะปนในซีเมนต์ซึ่งมันจะต่อต้านค่าพีเอช ทำให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วงของค่าความเป็นด่าง การทดสอบการชะละลายที่ถูกใช้ใน

การทดสอบของเสียที่ปรับเสถียรแล้วทำเป็นก้อนแข็งควรมีการพิจารณาความสามารถในการต่อต้านค่าพีเอชในของเสียด้วย

Jing และคณะ (2004) ศึกษาการชะละลายของตะกั่วจากตัวอย่างดินที่ผ่านการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง ด้วยการทดสอบการชะละลายชนิดต่างๆ พบว่าปัจจัยหลักในการชะละลายออกมาคือ พีเอชสุดท้าย ฟังก์ชันของสารชะละลายที่เป็นกรดและความสัมพันธ์ของชนิดของสารชะละลายที่เป็นกรด จากการใช้แบบจำลองโมเดลและการทดสอบการชะละลายชี้ให้เห็นว่า Pb มีการชะละลายออกมาเป็น 3 สภาวะภายใต้พีเอชที่ทำการทดลอง ในสภาวะที่ความเป็นด่างสูง(พีเอชมากกว่า 12) Pb จะอยู่ในรูปสารประกอบไฮดรอกไซด์ และละลายออกมา ในช่วงพีเอช6-12 จะมีการละลายออกมาในปริมาณน้อย ส่วนในสภาวะกรด(พีเอชน้อยกว่า 6) Pb จะละลายออกมาในรูปไอออนอิสระ

Al-Abed และคณะ (2006) ศึกษาเปรียบเทียบการชะละลายของโลหะหนักด้วยการทดสอบระยะสั้นจากของเสียในกระบวนการเหมืองแร่ ซึ่งทำการทดสอบด้วยวิธี TCLP FLT SEP DI และการทดสอบด้วยการควบคุมค่าพีเอช โดยพบการละลายสูงสุดของ Cu Pb และ Zn ในการทดลองการควบคุมพีเอชในสภาวะกรด ในขณะที่ Se จะมีการละลายออกมาในสภาวะด่าง การตกตะกอนของเหล็กเกิดขึ้นเมื่อพีเอชสูงขึ้นเป็นผลให้ Cu Pb และ Zn เกิดการตกตะกอนร่วมและหยุดการละลายด้วย ส่วนการดูดซับและการตกตะกอนร่วมของ Cu Pb และ Se บนตะกอนไฮดรอกไซด์นั้นพบจากตะกอนของแข็งที่เหลืออยู่จากการทดลองซึ่งเกิดขึ้นเมื่อค่าพีเอชมากกว่า 7

Qiao และคณะ (2006) ศึกษากลไกการเคลื่อนที่ของสารเจือปนในของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง พบว่าการเคลื่อนที่ของสารเจือปนนั้นเกิดจากภายในรูพรุนของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งในระหว่างการทดสอบการชะละลายออกมาสู่ผิวหน้าของตัวอย่างและสะสมอยู่ที่ขอบด้านนอกของตัวอย่างปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง ระดับของการสะสมนั้นแสดงถึงชนิดของสารเจือปนและปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

Moon และ Dermatas (2006) ศึกษาปริมาณการชะละลายออกมาของตะกั่วจากดินที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งภายใต้สภาวะการชะละลายที่ปรับปรุงจากการชะละลายแบบกึ่งการเคลื่อนไหว (semi-dynamic) โดยการใช้กรดไนตริก 0.014 N (พีเอช 3.25) แทนที่น้ำกลั่น ซึ่งจากการทดลองชี้ให้เห็นว่ากระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งมีประสิทธิภาพเพียงพอในป้องกันการชะละลายของตะกั่วและการบำบัดดินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

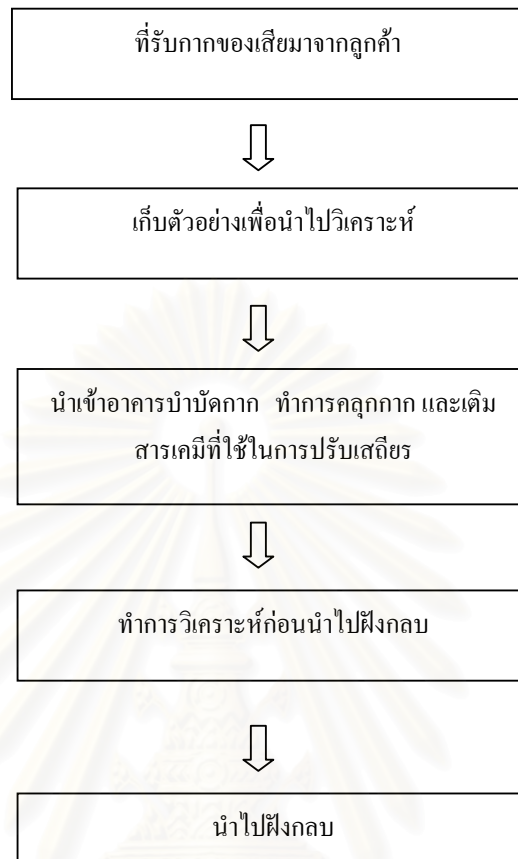
3.1.1 การวางแผนการวิจัย มีขั้นตอนดังนี้

- 1) สอบถามข้อมูลและวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักจากของเสียอันตรายที่ผ่านกระบวนการบำบัดของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด มหาชน ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ) โดยระยะเวลาที่ทำการศึกษาคือ สิงหาคม 2548 ถึง พฤษภาคม 2549
- 2) การเตรียมวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 3) การดำเนินการวิจัย
- 4) การวิเคราะห์ผลการวิจัย

3.1.2 ข้อมูลกระบวนการบำบัดของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ)

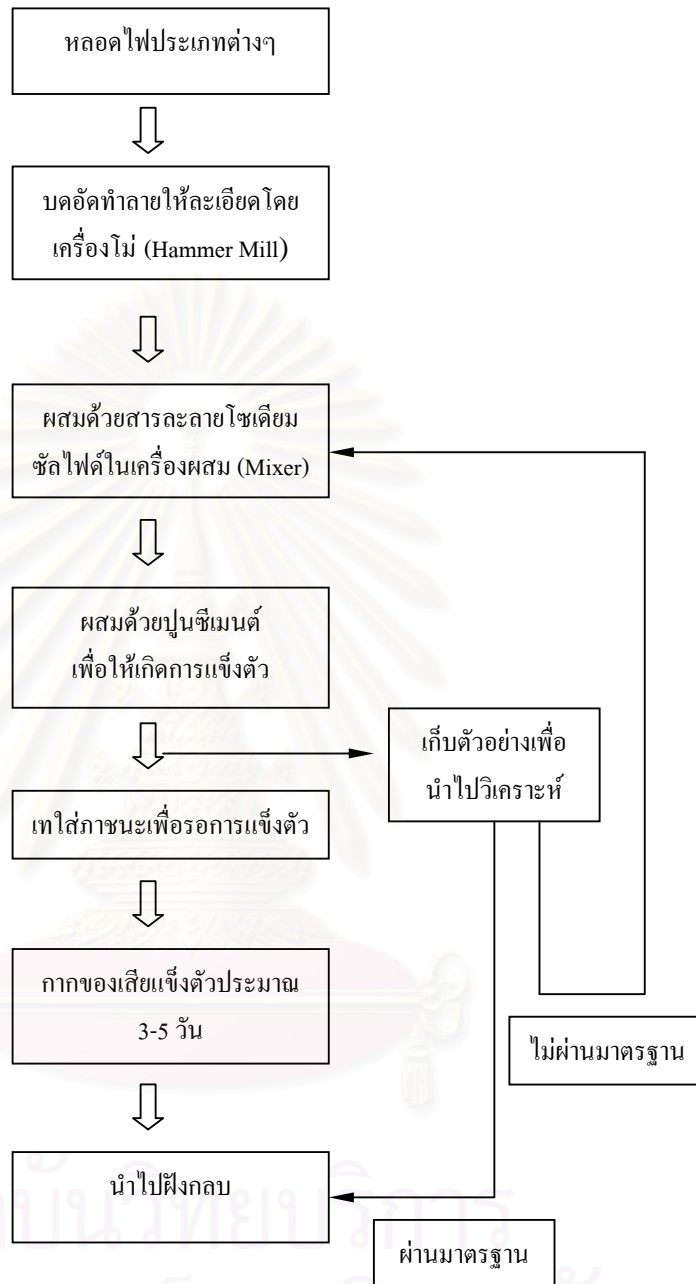
จากการสอบถามข้อมูลจากทางบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ) สามารถสรุปกระบวนการบำบัดกากของเสียอันตรายได้ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ระบบปรับเสถียร (Stabilization) ของบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมจำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 การทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) ของบริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ)

3.1.3 ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

1) ตัวอย่างของเสียผ่านการปรับเสถียร

ดังรูปที่ 3.3 ตัวอย่างของเสียผ่านการปรับเสถียรที่ใช้ในการศึกษานั้น ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ) ทำการเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ 2548 โดยตัวอย่างชนิดนี้จะมาจากกระบวนการบำบัดจากการปรับเสถียร (Stabilization) ด้วยปูนขาว กากของเสียอุตสาหกรรมที่ผ่านการบำบัดเป็นกากของเสียอันตรายจากระบบบำบัดน้ำเสียในโรงงานผลิตแผงวงจรไฟฟ้าซึ่งจะมีโลหะหนักปะปนอยู่ โดยการเก็บตัวอย่างจะทำการแบ่งตัวอย่างเป็น 4 ส่วน แล้วทำการเลือกมา 1 ส่วน หลังจากนั้นก็ทำการแบ่งเป็น 4 ส่วนแล้วเลือกมา 1 ส่วนและทำต่อไปจนได้ตัวอย่างในปริมาณที่ต้องการซึ่งทำการเก็บตัวอย่างเพียง 1 ครั้ง



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างของเสียที่ผ่านการปรับเสถียร

2) ตัวอย่างก้อนแข็งแบบก้อน

ดังรูปที่ 3.4 ก้อนแข็งแบบก้อนที่ใช้ในการศึกษานั้น ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการกำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ) ทำการเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม พ.ศ 2548 โดยตัวอย่างชนิดนี้ จะมาจากกระบวนการบำบัดจากการทำก้อนแข็ง (Solidification) ด้วยซีเมนต์ วิธีการทำเป็นก้อนแข็งเป็นการบำบัดกากของเสียอุตสาหกรรมที่เป็นกากของเสียอันตรายคือ หลอดไฟฟ้าเสื่อมสภาพ โดยหล่อลงแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.16 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างของเสียที่ผ่านการทำก้อนแข็ง

3.1.4 ขั้นตอนการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 6 ส่วน คือ

- 1) การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

- 1.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRF

- 2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนักจากการชะละลายโดยน้ำกลั่น
 - 2.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP
- 3) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนักจากการชะละลายโดยกรดอะซิติก
 - 3.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP
- 4) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนักจากการชะละลายโดยกรดซัลฟิวริก
 - 4.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP
- 5) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนักจากการชะละลายโดยกรดไนตริก
 - 5.1) ตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP
- 6) การเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดลองโดยกรดชนิดต่างๆ กับมาตรฐานอื่น ๆ
 - 6.1) การทดสอบตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP)
 - 6.2) การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

3.2 วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี

3.2.1 วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่อง XRF (X-Ray Diffraction Spectrometer)
2. เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer)
3. เครื่องวัดพีเอช (pH-meter)
4. เครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum Filter)
5. เครื่องชั่งแบบละเอียด
6. เครื่องเขย่า (Shaker)
7. เครื่องแก้ว

3.2.2 สารเคมี

1. กรดอะซิติก (HAc)
2. กรดไนตริก (HNO₃)
3. กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄)
4. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
5. น้ำกลั่น

3.3 การดำเนินการศึกษาวิจัย

การศึกษาที่ 1 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่างจากกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

ส่วนประกอบทางเคมีของก้อนแข็งที่บำบัดโลหะหนักด้วยกระบวนการปรับและทำก้อนแข็ง ทดสอบหาโดยวิธีการวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy โดยเครื่อง Philips XRF Spectrometer Model 2400

การศึกษาที่ 2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่น

การทดลองนี้เป็นการทดลองการชะละลายโดยน้ำกลั่น โดยนำตัวอย่างมาบดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.5 และรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างหนัก 10 กรัม ลงในหลอดเขย่า เติมน้ำกลั่นให้มีน้ำเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ตัวอย่าง
2. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบเหวี่ยง (Shaker) ที่มีอัตราการหมุน 150 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
3. กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
4. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก สารประกอบจากการบำบัดและค่าพีเอช
5. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 โดยเปลี่ยนค่าเวลาที่ใช้ในการเขย่าเป็น 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง ตามลำดับ
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก ความเข้มข้นของสารประกอบจากการบำบัด พีเอช และเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

หมายเหตุ ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ตัวแปรคงที่ (Fixed Variables) และ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 2

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ลักษณะของตัวอย่าง	บดขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร
2. เวลาที่ใช้ในการชะละลาย	18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวอย่าง	10 กรัม
2. อัตราส่วนของเหลวกับของแข็ง	20 เท่า
4. อุณหภูมิการทดลอง	25 องศาเซลเซียส
5. ความเร็วในการเขย่า	150 รอบต่อนาที
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. โลหะหนัก	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
2. สารประกอบจากการบำบัด	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
3. พีเอชสุดท้าย	ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นหลังจากการทดลอง

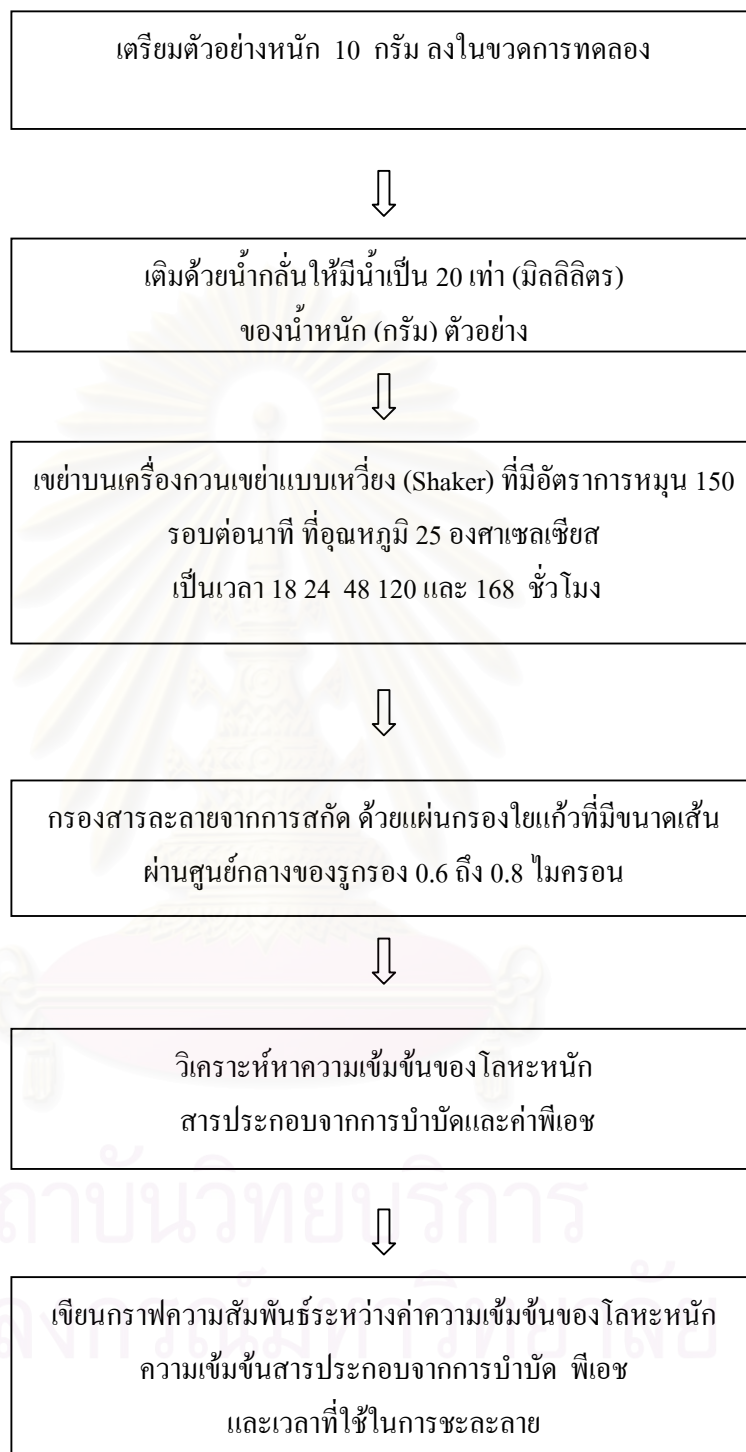
หมายเหตุ

ตัวแปรอิสระ หมายถึง ตัวแปรที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ทดลองที่ค่าต่างๆ

ตัวแปรคงที่ หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าคงที่ที่จะนำมาใช้ตลอดการทดลอง

ตัวแปรตาม หมายถึง ตัวแปรที่จะทำการวัดค่าที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยน้ำกลั่น

การศึกษาที่ 3 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และ ความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่นที่ทำการปรับค่าพีเอชด้วยกรดอะซิติก

การทดลองนี้เป็นการทดลองการชะละลายโดยกรดอะซิติก นำตัวอย่างมาบดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอน และวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.6 และ รายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างหนัก 10 กรัม ลงในหลอดเขย่า เติมด้วยน้ำกลั่นให้มีน้ำเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ตัวอย่าง
2. เติมกรดอะซิติกเพื่อปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยใช้ หนึ่งช่วงพีเอชต่อหนึ่งชุดการทดลอง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบเหวี่ยง (Shaker) ที่มีอัตราการหมุน 150 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 โดยเปลี่ยนค่าเวลาที่ใช้ในการเขย่าเป็น 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก และสารประกอบจากการบำบัด
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก ความเข้มข้น สารประกอบจากการบำบัด ค่าพีเอชและเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

หมายเหตุ ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ตัวแปรคงที่ (Fixed Variables) และ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 3

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ลักษณะของตัวอย่าง	บดขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร
2. เวลาที่ใช้ในการชะละลาย	18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง
3. ค่าพีเอช	9-11 7-9 5-7 และ 3-5
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวอย่าง	10 กรัม
2. อัตราส่วนน้ำกลั่นกับของแข็ง	20 เท่า
3. อุณหภูมิการทดลอง	25 องศาเซลเซียส
4. ความเร็วในการเขย่า	150 รอบต่อนาที
5. ชนิดของกรด	กรดอะซิติก
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. โลหะหนัก	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
2. สารประกอบจากการบำบัด	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
3. พีเอชสุดท้าย	ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นหลังจากการทดลอง

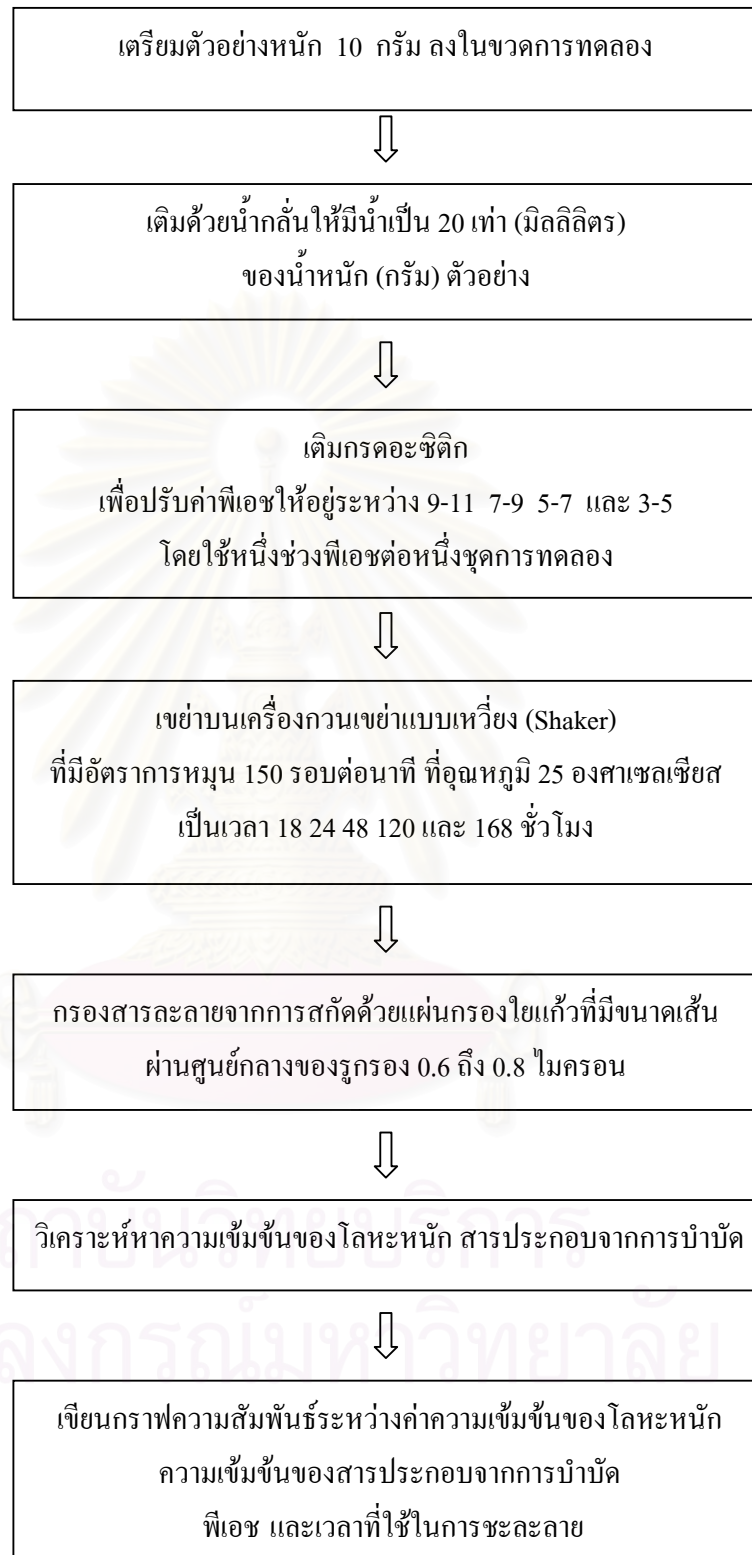
หมายเหตุ

ตัวแปรอิสระ หมายถึง ตัวแปรที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ทดลองที่ค่าต่างๆ

ตัวแปรคงที่ หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าคงที่ที่จะนำมาใช้ตลอดการทดลอง

ตัวแปรตาม หมายถึง ตัวแปรที่จะทำการวัดค่าที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยกรดอะซิติก

การศึกษาที่ 4 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และ ความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่นที่ทำการปรับพีเอชด้วยกรดไนตริก

การทดลองนี้เป็นการทดลองการชะละลายโดยกรดไนตริก โดยนำตัวอย่างมาบดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.7 และ รายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างหนัก 10 กรัม ลงในหลอดเขย่า เติมด้วยน้ำกลั่นให้มีน้ำเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ตัวอย่าง
2. เติมกรดไนตริกเพื่อปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยใช้ หนึ่งช่วงพีเอชต่อหนึ่งชุดการทดลอง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบเหวี่ยง (Shaker) ที่มีอัตราการหมุน 150 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 โดยเปลี่ยนค่าเวลาที่ใช้ในการเขย่าเป็น 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก และสารประกอบจากการบำบัด
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก ความเข้มข้น สารประกอบจากการบำบัด ค่าพีเอชและเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

หมายเหตุ ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ตัวแปรคงที่ (Fixed Variables) และ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 4

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ลักษณะของตัวอย่าง	บดขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร
2. เวลาที่ใช้ในการชะละลาย	18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง
3. ค่าพีเอช	9-11 7-9 5-7 และ 3-5
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวอย่าง	10 กรัม
2. อัตราส่วนน้ำกลั่นกับของแข็ง	20 เท่า
3. อุณหภูมิการทดลอง	25 องศาเซลเซียส
4. ความเร็วในการเขย่า	30 รอบต่อนาที
5. ชนิดของกรด	กรดไนตริก
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. โลหะหนัก	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
2. สารประกอบจากการบำบัด	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
3. พีเอชสุดท้าย	ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นหลังจากการทดลอง

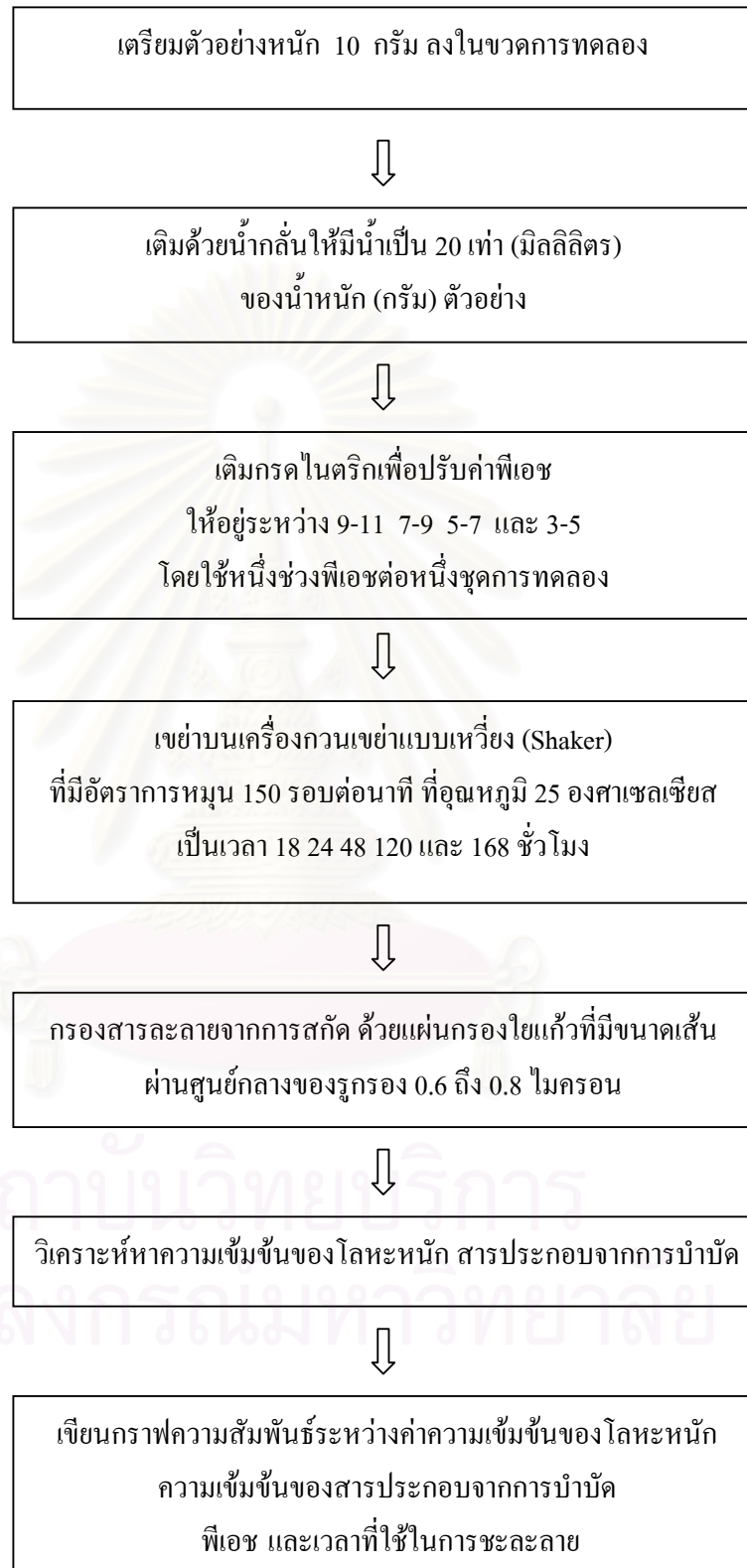
หมายเหตุ

ตัวแปรอิสระ หมายถึง ตัวแปรที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ทดลองที่ค่าต่างๆ

ตัวแปรคงที่ หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าคงที่ที่จะนำมาใช้ตลอดการทดลอง

ตัวแปรตาม หมายถึง ตัวแปรที่จะทำการวัดค่าที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยกรดไนตริก

การศึกษาที่ 5 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ระยะเวลาในการชะละลาย และ ความเข้มข้นของโลหะหนัก จากการชะละลายโดยน้ำกลั่นที่ทำการปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริก

การทดลองนี้เป็นการทดลองการชะละลายโดยกรดซัลฟิวริก โดยนำตัวอย่างมาบดให้มี เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการทดลองสรุปได้ดังรูปที่ 3.8 และ รายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมตัวอย่างหนัก 10 กรัม ลงในหลอดเขย่า เติมด้วยน้ำกลั่นให้มีน้ำเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ตัวอย่าง
2. เติมกรดซัลฟิวริกเพื่อปรับค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยใช้ หนึ่งช่วงพีเอชต่อหนึ่งชุดการทดลอง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบเหวี่ยง (Shaker) ที่มีอัตราการหมุน 150 รอบต่อนาที ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. ทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 โดยเปลี่ยนค่าเวลาที่ใช้ในการเขย่าเป็น 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง
5. วิเคราะห์หาความเข้มข้นของโลหะหนัก และสารประกอบจากการบำบัด
6. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของโลหะหนัก ความเข้มข้น สารประกอบจากการบำบัด ค่าพีเอชและเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

หมายเหตุ ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ

ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) ตัวแปรคงที่ (Fixed Variables) และ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาที่ 5

ตัวแปรอิสระ	พารามิเตอร์
1. ลักษณะของตัวอย่าง	บดขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร
2. เวลาที่ใช้ในการชะละลาย	18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง
3. ค่าพีเอช	9-11 7-9 5-7 และ 3-5
ตัวแปรคงที่	พารามิเตอร์
1. ปริมาณตัวอย่าง	10 กรัม
2. อัตราส่วนน้ำกลั่นกับของแข็ง	20 เท่า
3. อุณหภูมิการทดลอง	25 องศาเซลเซียส
4. ความเร็วในการเขย่า	30 รอบต่อนาที
5. ชนิดของกรด	กรดซัลฟิวริก
ตัวแปรตาม	พารามิเตอร์
1. โลหะหนัก	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
2. สารประกอบจากการบำบัด	ความเข้มข้นที่เกิดจากการชะละลาย
3. พีเอชสุดท้าย	ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นหลังจากการทดลอง

หมายเหตุ

ตัวแปรอิสระ หมายถึง ตัวแปรที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้ทดลองที่ค่าต่างๆ

ตัวแปรคงที่ หมายถึง ตัวแปรที่มีค่าคงที่ที่จะนำมาใช้ตลอดการทดลอง

ตัวแปรตาม หมายถึง ตัวแปรที่จะทำการวัดค่าที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดลองการชะละลายโดยกรดซัลฟิวริก

การศึกษาที่ 6 เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของโลหะหนักจากการทดลองกับมาตรฐานอื่นๆ

- 1) การทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

การทดสอบในส่วนนี้เป็นการทดสอบตามประกาศของกรมโรงงานในการทดสอบของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดก่อนนำไปฝังกลบลงในหลุมฝัง ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

 1. บดตัวอย่างของเสียให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร
 2. นำตัวอย่างที่ผ่านการบดหนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้ได้อัตราส่วนของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิเมตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
 3. เขย่าบนเครื่องหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
 4. กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
 5. วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารอันตรายต่างๆ ในของเหลวที่ผ่านการกรอง

- 2) การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP)

การทดสอบในส่วนนี้เป็นการทดสอบตามมาตรฐานของ U.S.EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) ของเสียอันตรายที่ผ่านการบำบัดก่อนนำไปฝังกลบลงในหลุมฝัง ซึ่งมีรายละเอียดวิธีการทดลองดังนี้

 1. บดตัวอย่างของเสียให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร
 2. นำตัวอย่างประมาณ 100 กรัม และเติมสารสกัดปริมาณ 20 เท่า
 3. เขย่าด้วยเครื่องหมุนที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 18 ชั่วโมง
 4. กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
 5. วิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของสารอันตรายต่างๆ ในของเหลวที่ผ่านการกรอง

สารสกัดมี 2 ชนิด ได้แก่

สารสกัดชนิดที่ 1 เป็นสารสกัดที่ได้จากการเติม 5.7 มิลลิลิตรของกรดอะซิติก ลงใน น้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร และเติม 64.3 มิลลิลิตร ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล และปรับ ปริมาตรเป็น 1 ลิตร

สารสกัดชนิดที่ 2 เป็นสารสกัดที่ได้จากการนำ 5.7 มิลลิลิตรของกรดอะซิติก ให้เจือ จางโดยปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น

การเลือกใช้สารสกัด

นำตัวอย่างเล็กๆ 5 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร แล้วกวนอย่างแรงเป็นเวลา 5 นาที ถ้าค่าพีเอชน้อยกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดแรก ถ้าพีเอชมากกว่า 5 เติม 3.5 มิลลิลิตรของ กรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัล แล้วให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทิ้งให้เย็น ที่อุณหภูมิห้อง ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดแรก ถ้าพีเอชมากกว่า 5 ใช้สารสกัดชนิดที่ 2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่งจากกระบวนการปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็ง

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิดคือ ของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและของเสียที่ผ่านการทำก้อนแข็ง การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่งจะเป็นแนวทางในการเลือกโลหะหนักมาพิจารณาในการทดสอบการชะละลายในการทดลองต่อไป

งานวิจัยนี้ทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีของตัวอย่างที่บำบัดโลหะหนักด้วยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง โดยวิธีการวิเคราะห์ X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy โดยเครื่อง Philips XRF Spectrometer Model 2400

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของธาตุชนิดต่าง ๆ ที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF

ธาตุ	ความเข้มข้น (ร้อยละ)	
	ตัวอย่างแบบก้อนแข็ง	ตัวอย่างแบบปรับเสถียร
Ca	55.806	78.648
Na	13.877	0.959
Si	12.961	0.231
S	11.335	2.786
Al	2.128	3.640
Mg	1.130	0.609
Fe	0.902	6.238
Cl	0.687	0.266
P	0.290	2.973
Ti	0.092	N.A.
Ba	0.057	N.A.
Mn	0.045	0.054
Cu	N.A.	2.768
Ni	N.A.	0.292
Zn	0.008	0.236

ส่วนประกอบหลักที่พบในตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด คือ แคลเซียมร้อยละ 56 สำหรับตัวอย่าง ก้อนแข็งซึ่งมาจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทำก้อนแข็ง และแคลเซียมร้อยละ 79 ซึ่งมาจากปูนขาว สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร ซึ่งในทั้งตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดนั้นทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะ ไฮดรอกไซด์ และทำให้โลหะหนักมีการชะละลายน้อยลง ในการศึกษานี้เป็นตัวอย่างที่ผ่านการ บำบัดจริงจากบริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน) ศูนย์บริการ กำจัดกากอุตสาหกรรม (แสมดำ) โดยทำการเก็บตัวอย่างเมื่อวันที่ 16 สิงหาคม 2548

โลหะหนักที่พบจากการวิเคราะห์ในตัวอย่างปรับเสถียรคือ ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี ในปริมาณร้อยละ 0.28 0.3 และ 0.2 ตามลำดับ และในตัวอย่างก้อนแข็งพบแบเรียมและสังกะสีใน ปริมาณร้อยละ 0.057 และ 0.008

4.1.1 การเลือกชนิดของโลหะหนักเพื่อการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในเชิงวิเคราะห์คุณภาพโดยศึกษาถึงการชะละลายของโลหะหนัก เพื่อเปรียบเทียบในกรดทั้ง 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก รวมถึงการ ชะละลายโดยน้ำกลั่นและการทดสอบตามมาตรฐาน ดังนั้นในการเลือกชนิดของโลหะหนักที่ทำการ วิเคราะห์นั้นจะทำการเลือกโลหะหนักชนิดเดียวกันในทั้ง 2 ตัวอย่างที่ทำการศึกษา เพื่อสามารถ อธิบายได้ว่าในโลหะชนิดเดียวกันที่ทำการศึกษานั้น กระบวนการบำบัดที่แตกต่างออกไปสัมพันธ์ กับชนิดของสารชะละลายที่จะส่งผลต่อการชะละลายในลักษณะใด ซึ่งโลหะหนักที่ทำการเลือก ศึกษา นั้นคือ ทองแดง นิกเกิล สังกะสี และแบเรียม ซึ่งพบจากการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยเครื่อง XRF และ ตะกั่วและโครเมียม ซึ่งเลือกจากโลหะหนักพบบ่อยและมาตรฐานน้ำชะละลายที่มี ปริมาณน้อยคือตะกั่วและโครเมียมต้องมีค่าไม่เกิน 5 มก./ล. ดังนั้นโลหะหนักที่ทำการวิเคราะห์ ทั้งหมดคือ ทองแดง นิกเกิล สังกะสี แบเรียม ตะกั่ว และโครเมียม

4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักจากการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และมาตรฐาน US. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP)

จากการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311(TCLP) ซึ่งมีการ ใช้ระยะเวลาในการชะละลายเท่ากันคือ 18 ชั่วโมง อัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็งเท่ากัน คืออัตราส่วนของเหลวต่อของแข็งในอัตราส่วน 20 ต่อ 1 และขนาดของตัวอย่างเท่ากันคือ ตัวอย่างที่ผ่านการบดแล้วมีขนาดไม่เกิน 9.5 มิลลิเมตร แต่มีการใช้สารชะละลายที่ต่างกันคือ การ ทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ใช้กรดกำมะถัน ผสมกับกรดไนตริกในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 (โดยน้ำหนัก) ในการปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 5 และ การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) ใช้

กรดอะซิติคในการปรับพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 2.88 ซึ่งความเข้มข้นของโลหะหนัก ที่วิเคราะห์ได้มีค่าแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ จากการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐาน

ธาตุ	ก่อนแข็ง		ภาคปรับเสถียร	
	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 (มก./ล.)	TCLP (มก./ล.)	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 (มก./ล.)	TCLP (มก./ล.)
Ba	0.2573	0.2132	0.1910	0.1981
Cr	0.0172	0.0180	0.0179	0.0161
Cu	0.0199	0.0203	1.0035	1.4364
Ni	0.0156	0.0159	0.0187	0.0175
Pb	0.0230	0.0188	0.1623	0.2760
Zn	0.0557	0.0273	0.3037	0.2856

จากการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทุกชนิดที่ทำการศึกษาไม่เกินมาตรฐานซึ่งมาตรฐานน้ำชะละลายแสดงดังตารางที่ 4.3 โดยพีเอชสุดท้ายของน้ำชะละลายจะอยู่ในช่วงพีเอช 11 – 12 จะเห็นได้ว่าแม้การทดสอบการชะละลายจะมีสารชะละลายที่ใช้ในการปรับพีเอชที่แตกต่างกันและพีเอชน้ำชะละลายที่ใช้นั้นมีค่าแตกต่างกัน ผลกระทบที่มีต่อพีเอชสุดท้ายของการชะละลายและความเข้มข้นของโลหะหนักที่ละลายออกมามีค่าไม่แตกต่างกันมาก ซึ่งผลการชะละลายจากสภาวะในการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่ได้จากการทดสอบตามมาตรฐานต่อไป

ตารางที่ 4.3 มาตรฐานโลหะหนักในน้ำชะละลาย

ธาตุ	มาตรฐานของโลหะหนักในน้ำชะละลาย(มก./ล.)
Ba	100
Cr	5
*Cu	25
*Ni	20
Pb	5
*Zn	250

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6(ภาคผนวกที่ 1), 2540

หมายเหตุ *เพิ่มเติมจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว, 2548

ตารางที่ 4.4 พีเอชสุดท้ายของน้ำชะละลายตามมาตรฐาน

ชนิดของตัวอย่าง	มาตรฐาน	ตัวอย่างที่	พีเอช
ก้อนแข็ง	TCLP	1	11.95
		2	11.90
		3	11.96
	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6(พ.ศ.2540)	1	12.53
		2	12.54
		3	12.51
ปรับเสถียร	TCLP	1	12.49
		2	12.52
		3	12.55
	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6(พ.ศ.2540)	1	12.47
		2	12.62
		3	12.67

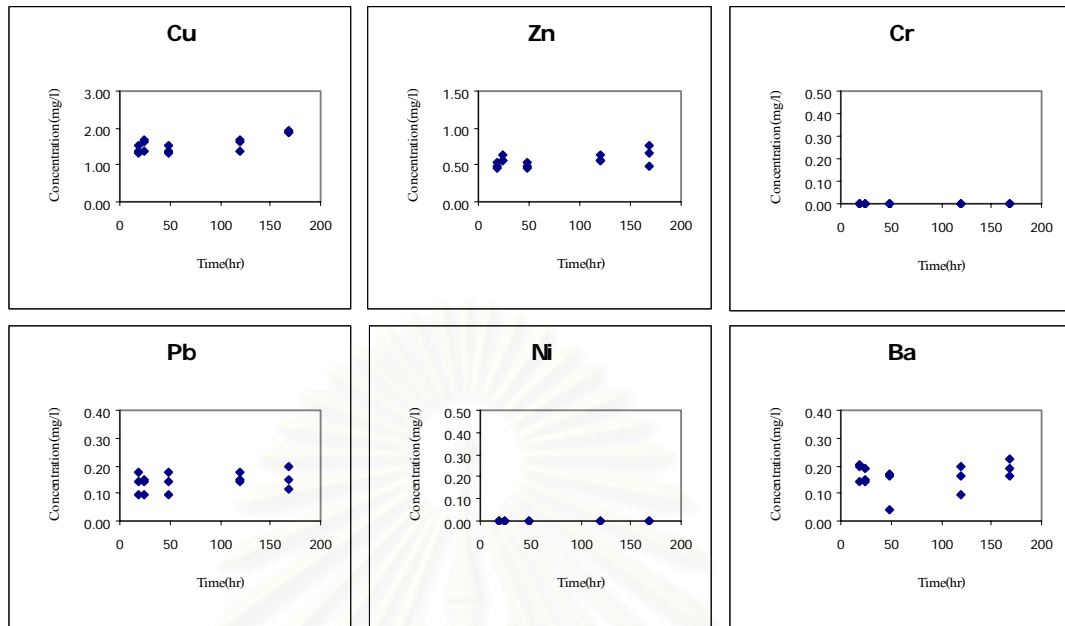
4.3 การชะละลายของโลหะหนักโดยการใช้น้ำกลั่นในการชะละลาย

จากตัวอย่างในการทดลองเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียรและของเสียทำก้อนแข็งนั้น พบว่าการชะละลายโดยการใช้น้ำกลั่น พีเอชสุดท้ายของน้ำชะละลายจะมีค่าประมาณ 11- 12 เช่นเดียวกับการทดลองตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 1311 (TCLP) โดยการทดลองได้มีการแปรผันเวลาในการชะละลายเป็น 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าการชะละลายของโลหะชนิดต่าง ๆ นั้นมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเล็กน้อยเมื่อระยะเวลาในการชะละลายเพิ่มขึ้น โดยในตัวอย่างก้อนแข็งพบว่า ทองแดง ตะกั่ว นิกเกิล และโครเมียม มีความเข้มข้นที่ชะละลายออกมาน้อยตลอดการทดลอง ส่วนการชะละลายของสังกะสีในตัวอย่างก้อนแข็งมีความเข้มข้นประมาณ 0 - 0.2 มก./ล. แคลเซียมมีความเข้มข้นประมาณ 40 - 60 มก./ล. และแบเรียมมีความเข้มข้นประมาณ 0.1 - 0.3 มก./ล. ซึ่งมีความเข้มข้นของการชะละลายค่อนข้างน้อย ส่วนในตัวอย่างปรับเสถียรพบว่า นิกเกิล และโครเมียม มีความเข้มข้นน้อยในการชะละลายตลอดการทดลอง แต่พบการชะละลายออกมาของทองแดงมีความเข้มข้นประมาณ 1.0 - 2.0 มก./ล. สังกะสีมีความเข้มข้นประมาณ 0.4 - 0.8 มก./ล. ตะกั่วมีความเข้มข้นประมาณ 0.1 - 0.2 มก./ล. และแบเรียมมีความเข้มข้นประมาณ 0.1 - 0.2 มก./ล. โดยเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่พบการ

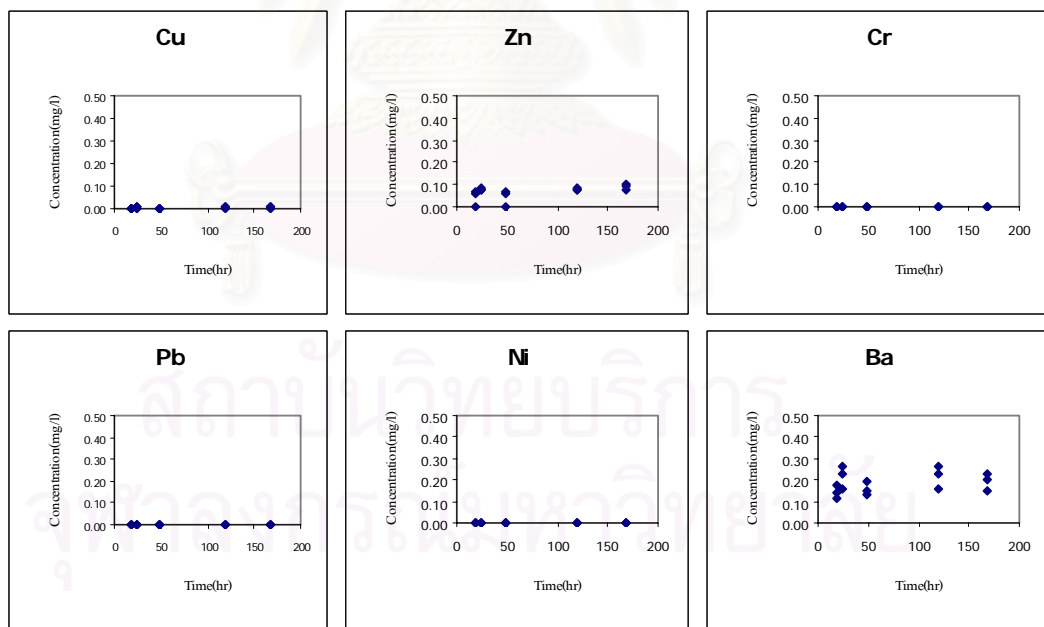
ทดลองโดยน้ำกลั่นกับความเข้มข้นจากการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) พบว่ามีความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกัน โลหะหนักบางชนิดที่พบค่าน้อยกว่าคือ โครเมียม ทองแดง นิกเกิล และตะกั่ว สำหรับตัวอย่างก้อนแข็ง โครเมียม และนิกเกิล สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการการชะละลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากการทดลองโดยน้ำกลั่นนั้นมึระยะเวลาในการชะละลายมากกว่าและสารละลายจากการทดสอบคือ กรดอะซิติก และกรดไนตริกผสมกับกรดซัลฟิวริกมีผลต่อการชะละลายออกมาของโลหะเหล่านี้ และโลหะที่พบค่ามากกว่าค่าจากการทดลองโดยน้ำกลั่นเมื่อเวลาในการทดลองเท่ากับ 168 ชั่วโมงคือ สังกะสีสำหรับตัวอย่างก้อนแข็ง และ ทองแดงและสังกะสี สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร แสดงให้เห็นว่ากระบวนการการชะละลายจากโลหะเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างช้าๆ เพราะเวลาที่ใช้ในการทดลองโดยน้ำกลั่นมีระยะเวลาในการชะละลายมีมากกว่าการทดสอบตามมาตรฐานและพีเอชสุดท้ายในการชะละลายจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าแม้พีเอชสุดท้ายจะเป็นตัวแปรหลักในการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ แต่ระยะเวลาในการชะละลายและชนิดของสารชะละลายก็มีผลเฉพาะต่อโลหะหนักบางชนิดเช่นกัน

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ จากการทดสอบการชะละลาย

วิธีการทดสอบการชะละลาย		Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
ก้อนแข็ง	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 (มก./ล.)	0.2573	0.0172	0.0199	0.0156	0.023	0.0557
	TCLP(มก./ล.)	0.2132	0.018	0.0203	0.0159	0.0188	0.0273
	น้ำกลั่น18 ชม.(มก./ล.)	0.1399	< 0.0005	< 0.0009	< 0.0007	< 0.0015	0.0428
	น้ำกลั่น168 ชม.(มก./ล.)	0.1934	< 0.0005	0.0052	< 0.0007	< 0.0015	0.0905
ปรับเสถียร	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 (มก./ล.)	0.1910	0.0179	1.0035	0.0187	0.1623	0.3037
	TCLP(มก./ล.)	0.1981	0.0161	1.4364	0.0175	0.1760	0.2856
	น้ำกลั่น18 ชม.(มก./ล.)	0.1806	< 0.0005	1.4141	< 0.0007	0.1397	0.4855
	น้ำกลั่น168 ชม.(มก./ล.)	0.1919	< 0.0005	1.8819	< 0.0007	0.1534	0.6318



รูปที่ 4.1 การชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ โดยการใช้ น้ำกลั่น ในตัวอย่างปรับเสถียร



รูปที่ 4.2 การชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ โดยการใช้ น้ำกลั่น ในตัวอย่างก้อนแข็ง

4.4 การชะละลายของแคลเซียม

4.4.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้นของแคลเซียม

รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียร พบว่าการชะละลายของแคลเซียมจะมีค่าเท่าๆ กันที่พีเอช 9-11 7-9 และ 5-7 หลังจากนั้นค่าเฉลี่ยของการชะละลายจะลดลงในพีเอช 3-5 การชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติก กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอชทำให้แคลเซียมชะละลายออกมาที่ความเข้มข้นสูงสุดใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 4.6 ซึ่งการชะละลายโดยการใช้กรดไนตริกจะมีการชะละลายมากที่สุด โดยกรดไนตริกชะละลายแคลเซียมออกมาสูงสุดเท่ากับ 168.66 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.28

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นแคลเซียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
7.04	160.52	-	-
6.48	162.50	-	-
6.52	162.86	-	-
4.45	-	167.49	-
3.92	-	167.58	-
4.28	-	168.66	-
4.35	-	-	139.30
9.04	-	-	141.08
5.50	-	-	145.21

รูปที่ 4.3 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง พบว่าการชะละลายของแคลเซียมนั้นมีค่าใกล้เคียงกันในทุกๆ ชนิดของกรดที่ใช้ในการทดลอง คือมีความเข้มข้นระหว่าง 150 – 170 มก./ล. ดังตารางที่ 4.7 โดยแคลเซียมชะละลายมากที่สุดจากการทดลองโดยการใช้กรดไนตริกซึ่งแคลเซียมมีความเข้มข้นเท่ากับ 167.05 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้าย

เท่ากับ 4.07 กรดอะซิติคและกรดซัลฟิวริกจะละลายแคลเซียมออกมามีค่าใกล้เคียงกันมาก และการละลายของแคลเซียมที่พีเอชต่าง ๆ นั้นพบว่ามีความเข้มข้นของแคลเซียมที่ละลายออกมาค่อนข้างใกล้เคียงกันเช่นกัน

ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นแคลเซียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของแคลเซียมที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติค	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.36	159.65	-	-
5.18	159.84	-	-
4.17	163.02	-	-
5.57	-	156.88	-
3.94	-	163.92	-
4.07	-	167.06	-
8.86	-	-	150.97
6.55	-	-	151.92
8.15	-	-	160.52

จากการทดลองในตัวอย่างปรับเสถียรพบว่าการชะละลายออกมาของแคลเซียมนั้น มีการชะละลายออกมาก่อนข้างคองที่ในทุก ๆ พีเอช ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการละลายน้ำได้ดีในทุกพีเอชของปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักที่ใช้ในการปรับเสถียร และจะพบว่าเมื่อพีเอชมีค่าสูงขึ้นในการทดลอง ความเข้มข้นของแคลเซียมบางส่วนมีค่าน้อยลงเมื่อพีเอชอยู่ในสภาวะกรดโดยอาจเป็นผลมาจากตะกอนบางส่วนที่อยู่ในรูปตะกอนซัลเฟตละลายออกมาและจับตัวกับแคลเซียมเกิดสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ต่ำ ส่วนการใช้กรดซัลฟิวริกในการชะละลายนั้นจะมีการชะละลายต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นที่ละลายออกมาจากกรดอะซิติค และไนตริก ซึ่งเกิดจากการรวมตัวระหว่างไอออนซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ (Asavapisit และคณะ, 2003) ดังสมการที่ (1)

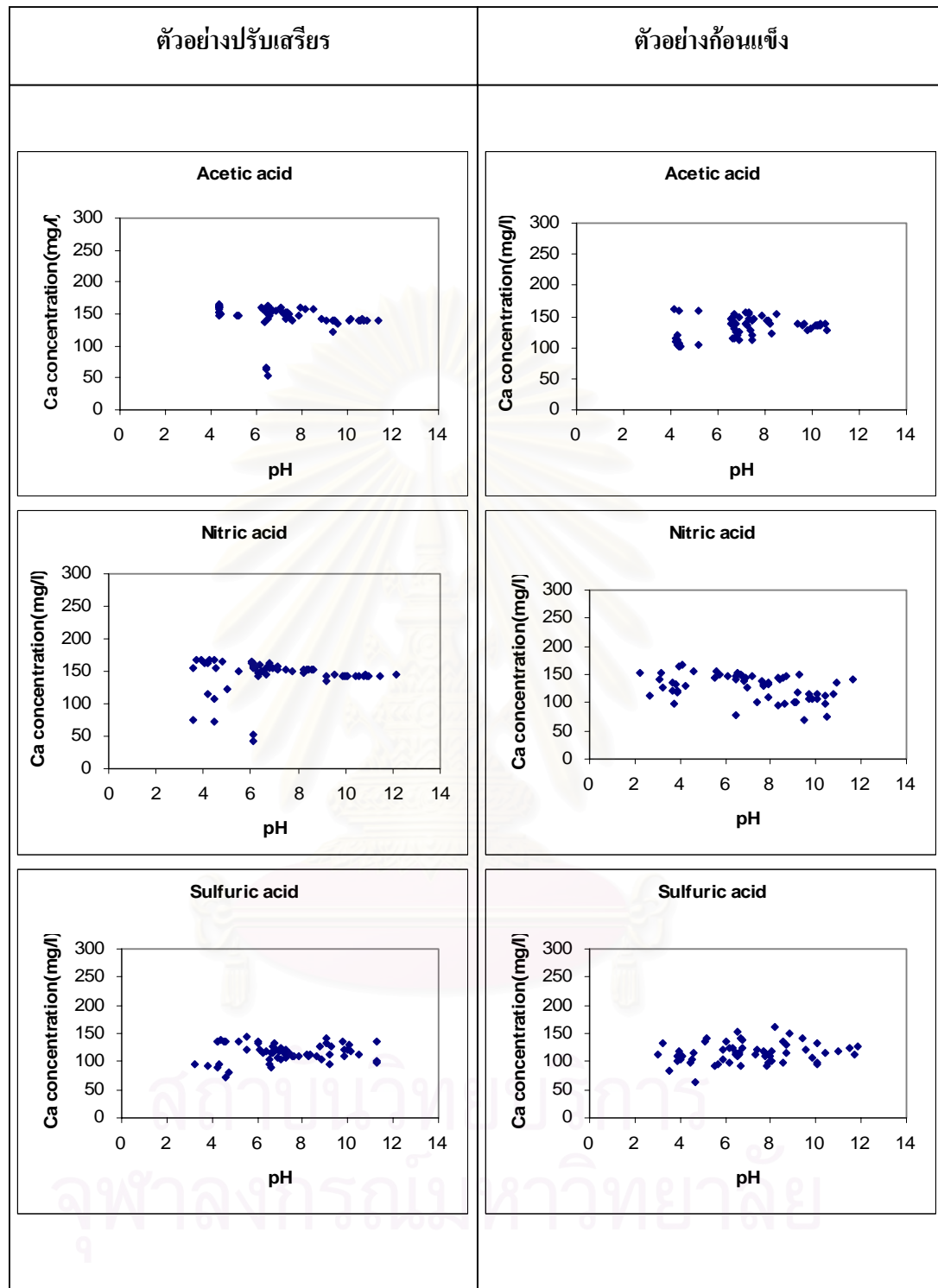


ในกรณีของการทดลองจากตัวอย่างก้อนแข็งพบว่าการชะละลายของแคลเซียมนั้นละลายออกมาจากแคลเซียมที่อยู่ในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีความสามารถในการละลายออกมาได้ดีในทุกพีเอช จากการศึกษาของ Halim และคณะ(2003) พบว่าความสามารถจากคุณสมบัติของ “ฟรีแคลเซียม” ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในซีเมนต์ ซึ่งในที่นี้ก็คือค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ของซีเมนต์ โดยฟรีแคลเซียมจะอยู่ในช่องว่างของโครงสร้างซีเมนต์ และไม่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงของซีเมนต์ ปริมาณโดยเฉลี่ยของฟรีแคลเซียมจะอยู่ในรูปซิลิเกตและอลูมิเนทไฮเดรท ในส่วนประกอบของซีเมนต์ โดยจากการศึกษาพบว่าแคลเซียมจะมีค่าประมาณ 0.40 กก.CaO /กก. ซีเมนต์

ชนิดของกรดที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ชนิดคือกรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ไม่มีความแตกต่างในการชะละลายแคลเซียมออกมาจากตัวอย่างก้อนแข็งอย่างเห็นได้ชัด แต่ผลของกรดซัลฟิวริกก็ทำให้การชะละลายออกมาของแคลเซียมมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติก และกรดไนตริก ซึ่งอาจเป็นผลเช่นเดียวกันในตัวอย่างปรับเสถียรคือ เกิดจากการรวมตัวระหว่างไฮดรอกไซด์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมาความสามารถในการละลายต่ำ (Asavapisit และคณะ, 2003) ดังสมการที่ (1)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

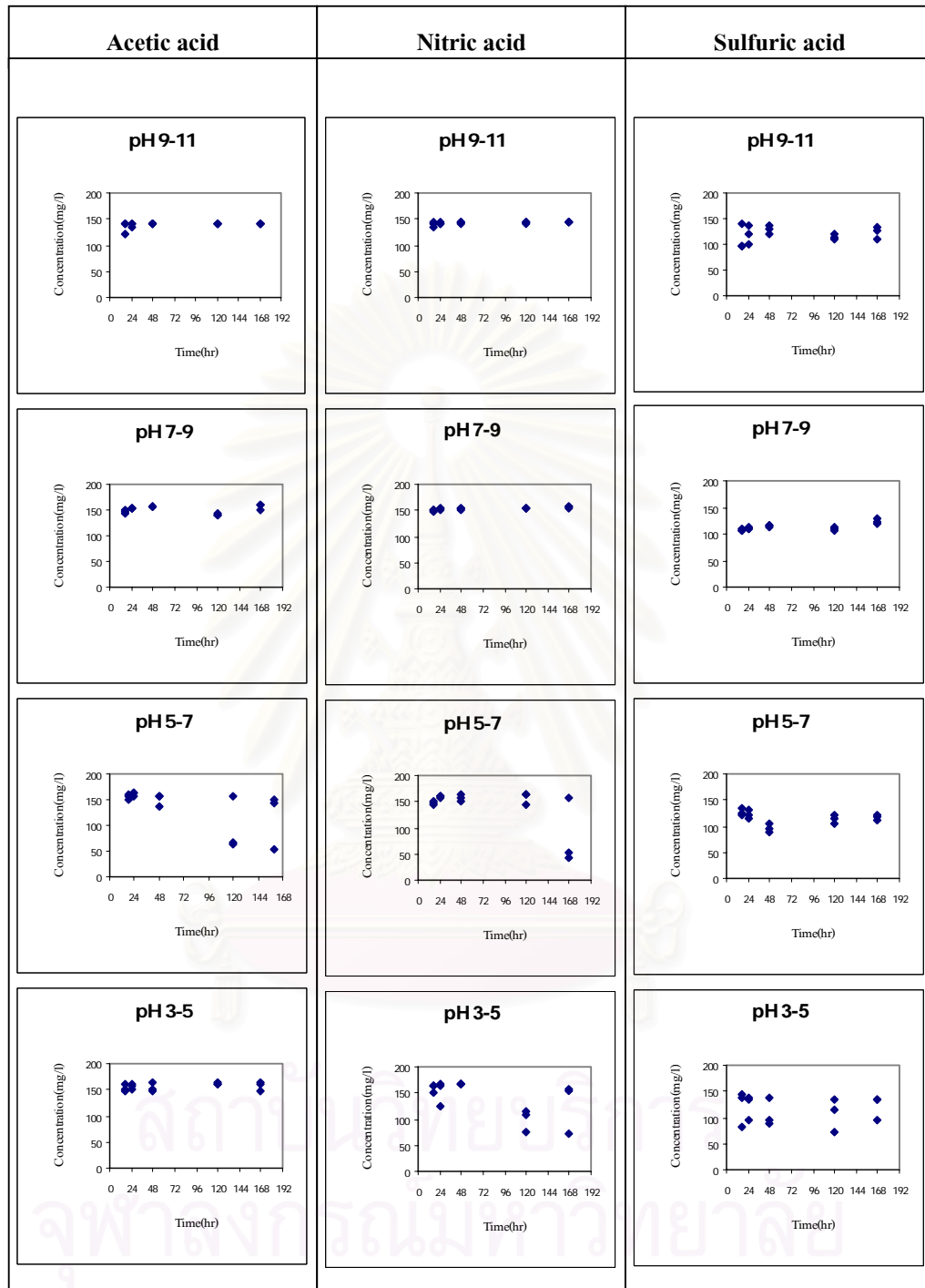


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมกับพีเอชต่างๆ โดย กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก

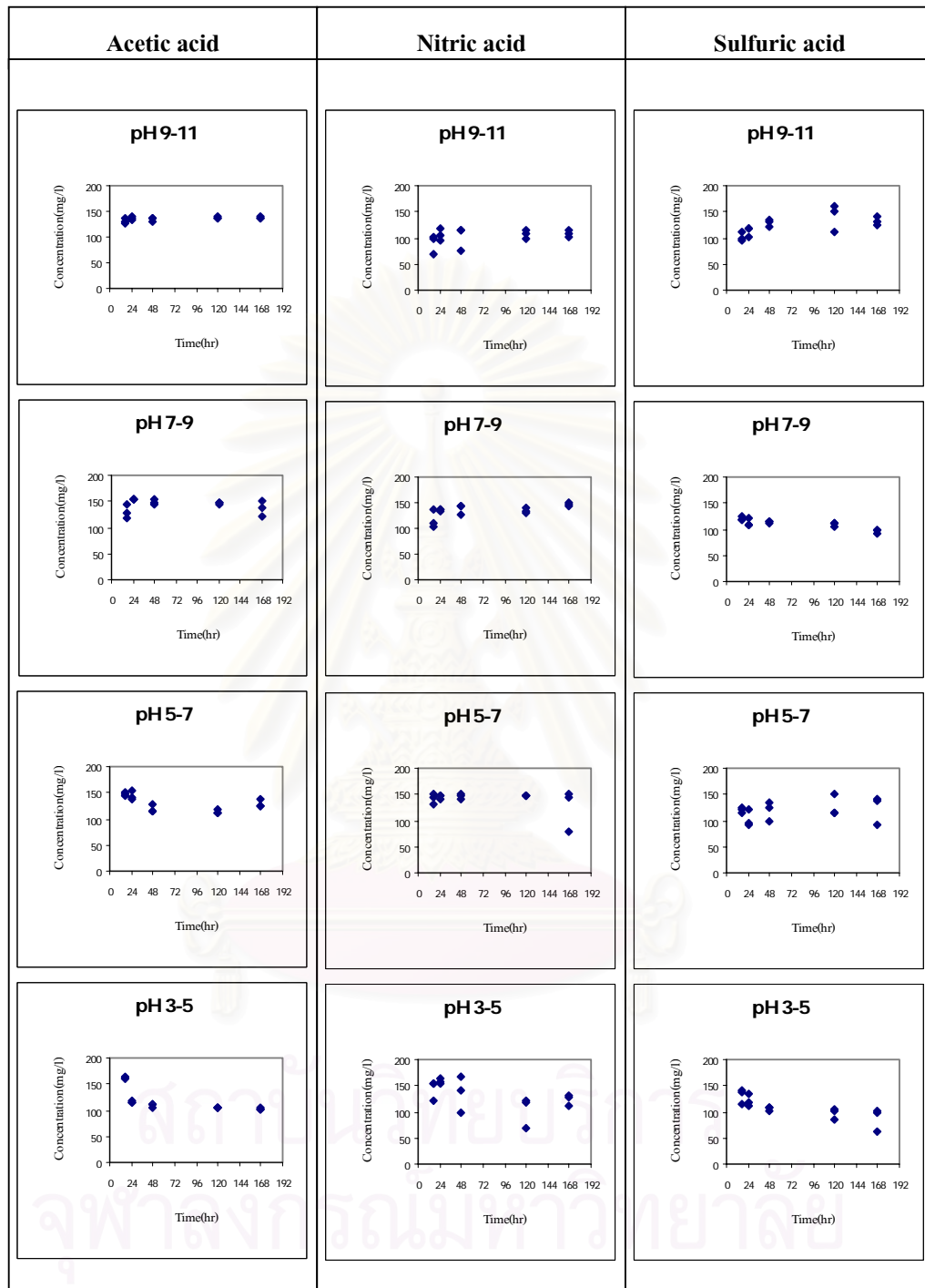
4.4.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่ชะละลายออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด

การทดลองในช่วงพีเอช 4 ช่วงคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยการควบคุมพีเอชสุดท้ายตลอดการทดลองด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก มีการแปรผันช่วงเวลาทั้งหมด 5 ค่าการทดลอง คือ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นจากการชะละลายของแคลเซียม

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลการทดลองการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายจากตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างทำก้อนแข็ง โดยการชะละลายของแคลเซียมนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อทำการเพิ่มระยะเวลาในการชะละลายสูงขึ้น โดยมีความเข้มข้นของแคลเซียมประมาณ 100 – 160 มก./ล. ระยะเวลาในการชะละลายที่เพิ่มขึ้นในการทดลองนั้นไม่ส่งผลต่อการชะละลายออกมาของแคลเซียม แสดงว่าการชะละลายออกมาของแคลเซียมนั้นเกิดกระบวนการในระยะเวลาที่รวดเร็ว ส่วนในกรณีการใช้กรดซัลฟิวริกในการปรับค่าพีเอชนั้นมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของแคลเซียมที่ชะละลายออกมามีค่าลดลงเป็นผลมาจากการใช้กรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอชอาจทำให้เกิดตะกอนแคลเซียมซัลเฟตที่มีความสามารถในการชะละลายต่ำ



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแคลเซียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างก้อนแข็ง

4.4.3 เปรียบเทียบการชะละลายของแคลเซียม

แคลเซียมที่อยู่ในรูปของแข็งมีอยู่หลายรูปแบบ จากการทดลองการชะละลายพบว่า แคลเซียมจากตัวอย่างมีการชะละลายออกมาได้ดีในทุกพีเอชซึ่งอาจเป็นผลมาจากแคลเซียมที่อยู่ในรูปของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ดีในทุกๆพีเอช ดังนั้นความเข้มข้นของการชะละลายของแคลเซียมที่ได้จากการทดลองในตัวอย่างปรับเสถียร และแบบก้อนแข็งจึงมีค่าใกล้เคียงกันในการใช้กรดทั้ง 3 ชนิดปรับพีเอช

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าทั้งตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างก้อนแข็งนั้น ความเข้มข้นของแคลเซียมจากการทดลองปรับพีเอชโดยกรดไนตริกจะมีค่ามากกว่าการทดลองโดยการใช้กรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก โดยกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการทดลองจะพบความเข้มข้นของแคลเซียมน้อยที่สุด สามารถอธิบายได้ว่าความสามารถในการกัดกร่อนของกรดแต่ละชนิดมีค่าต่างกันซึ่งกรดไนตริกจะมีความสามารถในการกัดกร่อนมากที่สุด ตามด้วยกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริกตามลำดับ เช่นเดียวการทดลองโดย Asavapisit และคณะ (2002) ศึกษาการกัดกร่อนต่อของเสียที่บำบัดโดยการทำก้อนแข็งพบว่ากรดไนตริกมีความสามารถในการกัดกร่อนมากที่สุดตามด้วยกรดอะซิติก และกรดซัลฟิวริกตามลำดับ ซึ่งสามารถนำไปอธิบายการทดลองต่อไปได้ หากกรณีการชะละลายออกมาโลหะหนักที่ทำการศึกษานั้นสอดคล้องกับการชะละลายของแคลเซียมแสดงให้เห็นว่า โลหะหนักชนิดนั้นๆ ได้ถูกห่อหุ้มอยู่ในโครงสร้างของแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการบำบัดทั้งในการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

4.5 การชะละลายของทองแดง

4.5.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้นของทองแดง

รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียร พบว่าการชะละลายของทองแดงจากตัวอย่างนั้นเมื่อพีเอชสูงกว่า 6 ไม่พบการชะละลายของทองแดง การชะละลายของทองแดงนั้นจะเกิดขึ้นที่พีเอชน้อยกว่า 6 เท่านั้น ความเข้มข้นของทองแดงที่พบมากที่สุดคือการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติกที่มีความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 492.95 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 5.19 ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความเข้มข้นของทองแดงในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างเป็นรูปสี่เหลี่ยม

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของทองแดงที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
5.13	449.16	-	-
4.39	469.08	-	-
5.19	491.95	-	-
3.92	-	113.89	-
3.72	-	134.52	-
3.54	-	152.30	-
4.23	-	-	124.32
4.23	-	-	139.58
3.83	-	-	140.70

รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง พบว่าการชะละลายของทองแดงในของเสียผ่านการปรับเสถียรนั้นพบการชะละลายที่พีเอชประมาณ 7 และจะมีการชะละลายเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชลดลง การชะละลายมีค่าไม่ต่างกันมากเท่ากับตัวอย่างปรับเสถียรซึ่งการชะละลายโดยใช้กรดไนตริกมีการชะละลายของทองแดงมากที่สุดเท่ากับ 0.58 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 2.26 ดังตารางที่ 4.9

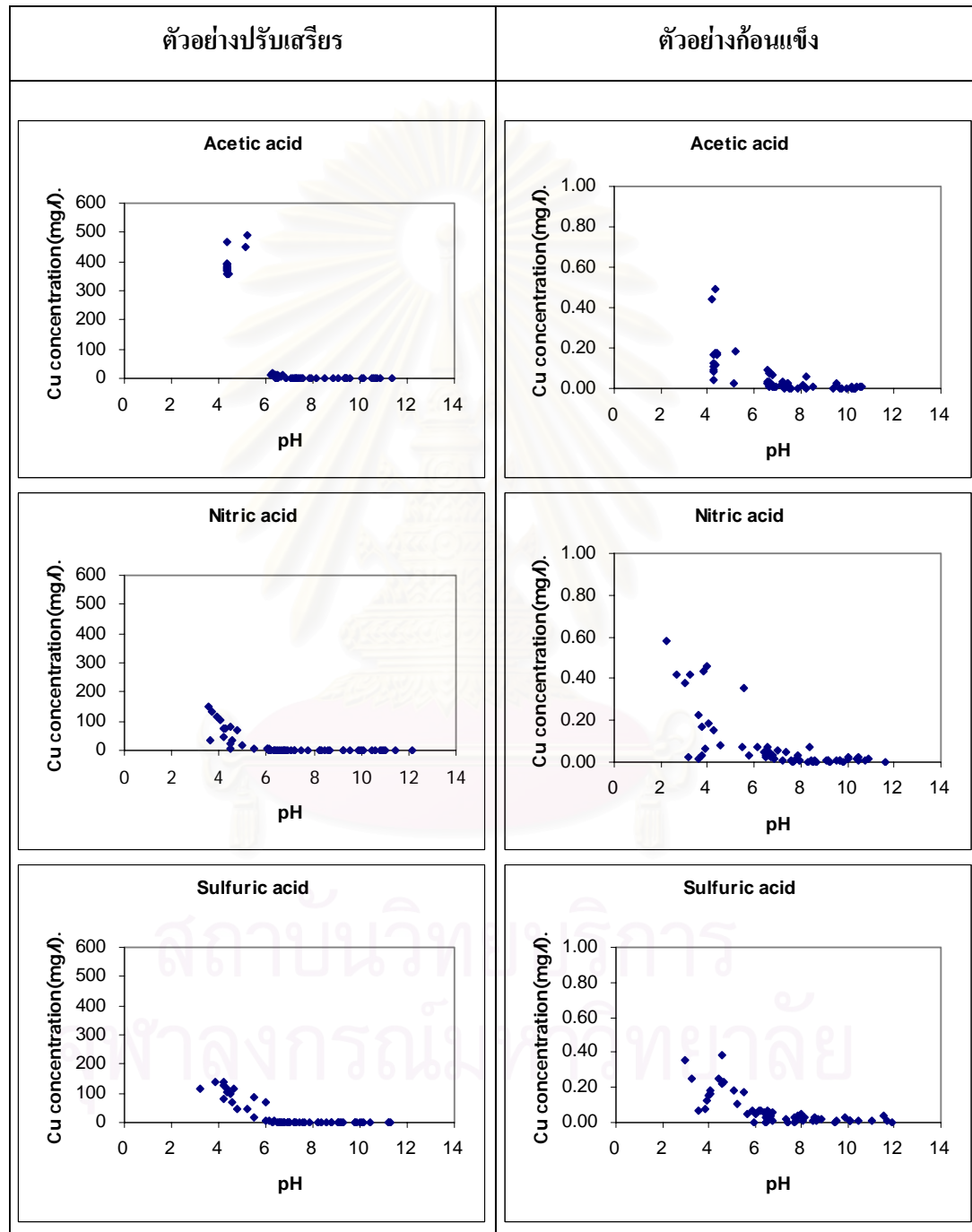
ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นของแดงในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของแดงที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
5.18	0.1822	-	-
4.17	0.4400	-	-
4.36	0.4885	-	-
3.86	-	0.4394	-
3.94	-	0.4616	-
2.26	-	0.5818	-
4.44	-	-	0.2522
2.99	-	-	0.3596
4.56	-	-	0.3893

จากการทดลองพบว่ากรดอะซิติกนั้นส่งผลต่อทองแดงในตัวอย่างปรับเสถียรมากที่สุด เนื่องจากในการใช้กรดอะซิติกปรับพีเอชในการทดลองนั้นทำให้โลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตตซึ่งมีผลทำให้การชะละลายของทองแดงนั้นมีค่ามากที่สุด ในสภาวะกรดเมื่อเทียบกับกรดไนตริกและซัลฟิวริก โดยจากการบำบัดโดยการปรับเสถียรนั้นเป็นเพียงการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชที่จะอยู่ในสภาวะกรดเท่านั้น โดยไม่มีการสร้างโครงสร้างเพิ่มเพื่อป้องกันการชะละลายอย่างเช่นปูนซีเมนต์ในการบำบัดแบบก้อนแข็ง การปรับเสถียรจะใช้เพียงปูนขาวในการบำบัดเท่านั้น ทองแดงที่อยู่ในของเสี่ยผ่านการปรับเสถียรนั้นจึงมีเพียงพีเอชที่มีค่าสูงคอยควบคุมการชะละลาย

ในกรณีของตัวอย่างก้อนแข็งพบว่ากรดไนตริกส่งผลต่อทองแดงในตัวอย่างก้อนแข็งมากที่สุด เนื่องจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) และความสามารถในการชะละลายซิลิกาออกมาซึ่งสารประกอบหลักอีกชนิดหนึ่งในโครงสร้างของปูนซีเมนต์ (Halim และคณะ, 2003) ซึ่งส่งผลให้การชะละลายโดยกรดไนตริกทำให้โครงสร้างปูนซีเมนต์ถูกทำลายเป็นผลให้สารชะละลายสามารถเข้าถึงทองแดงที่อยู่ภายในโครงสร้างได้ การชะละลายของทองแดงนั้นจะสัมพันธ์กับพีเอชคือ สามารถชะละลายได้ดีในพีเอชเป็นกรด เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการทำลายโครงสร้างของกรดไนตริกได้สอดคล้องกับการชะละลายของทองแดงจากของเสี่ยผ่านการทำก้อนแข็ง ทำให้พบว่าทองแดงที่ศึกษาในของเสี่ยทำก้อนแข็งนั้นแล้วถูกห่อหุ้มโดยโครงสร้างของ

ปูนซีเมนต์ซึ่งป้องกันการเข้าถึงของสารชะละลายต่างๆ ดังนั้นกระบวนการการชะละลายจากก้อนแข็งที่มีการชะละลายของทองแดงมากที่สุดจึงต้องมีการทำลายโครงสร้างของตัวอย่างควบคู่กับการควบคุมพีเอชให้อยู่ในสภาวะกรดด้วย



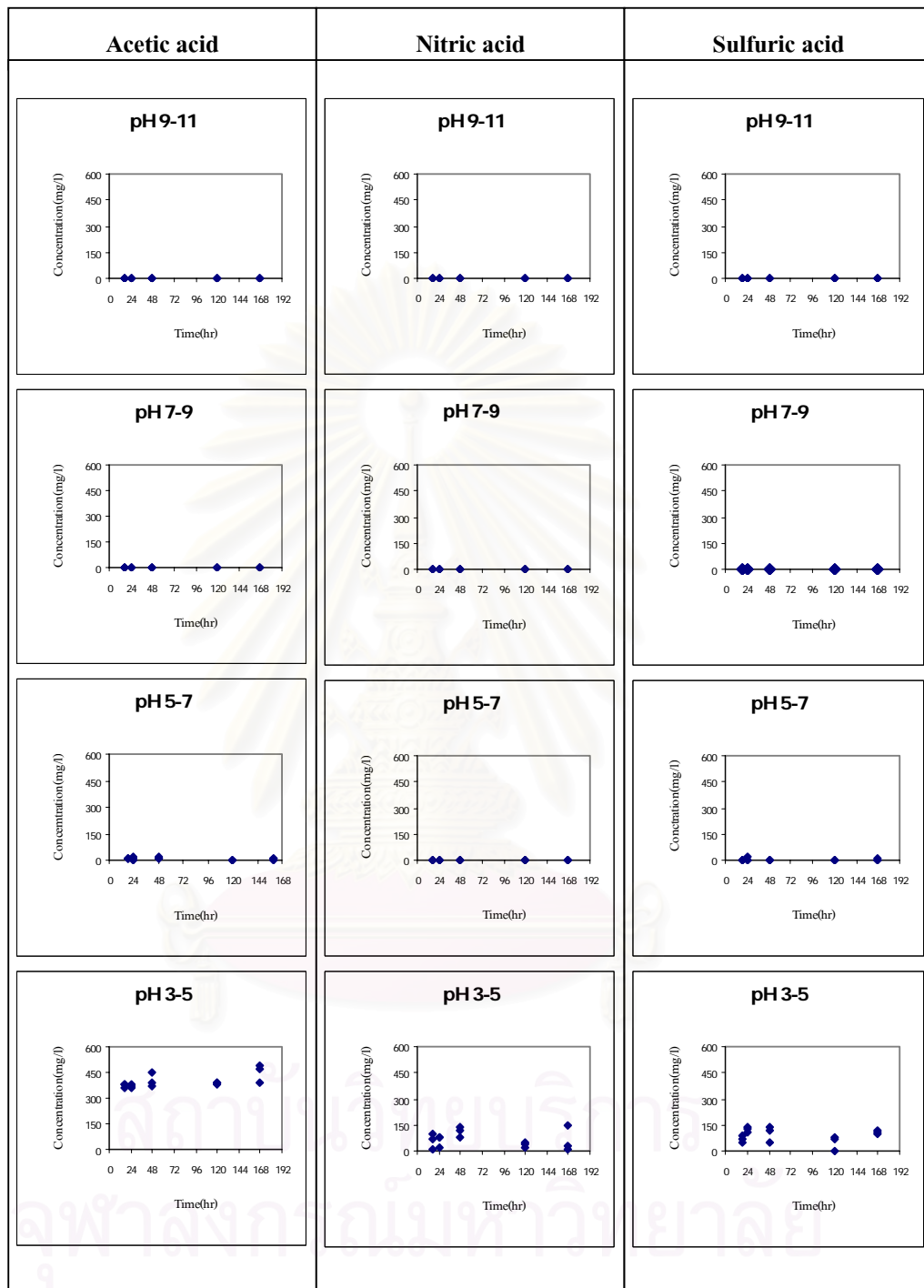
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงกับพีเอชต่าง ๆ โดย กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก

4.5.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของทองแดงที่ชะละลายออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด

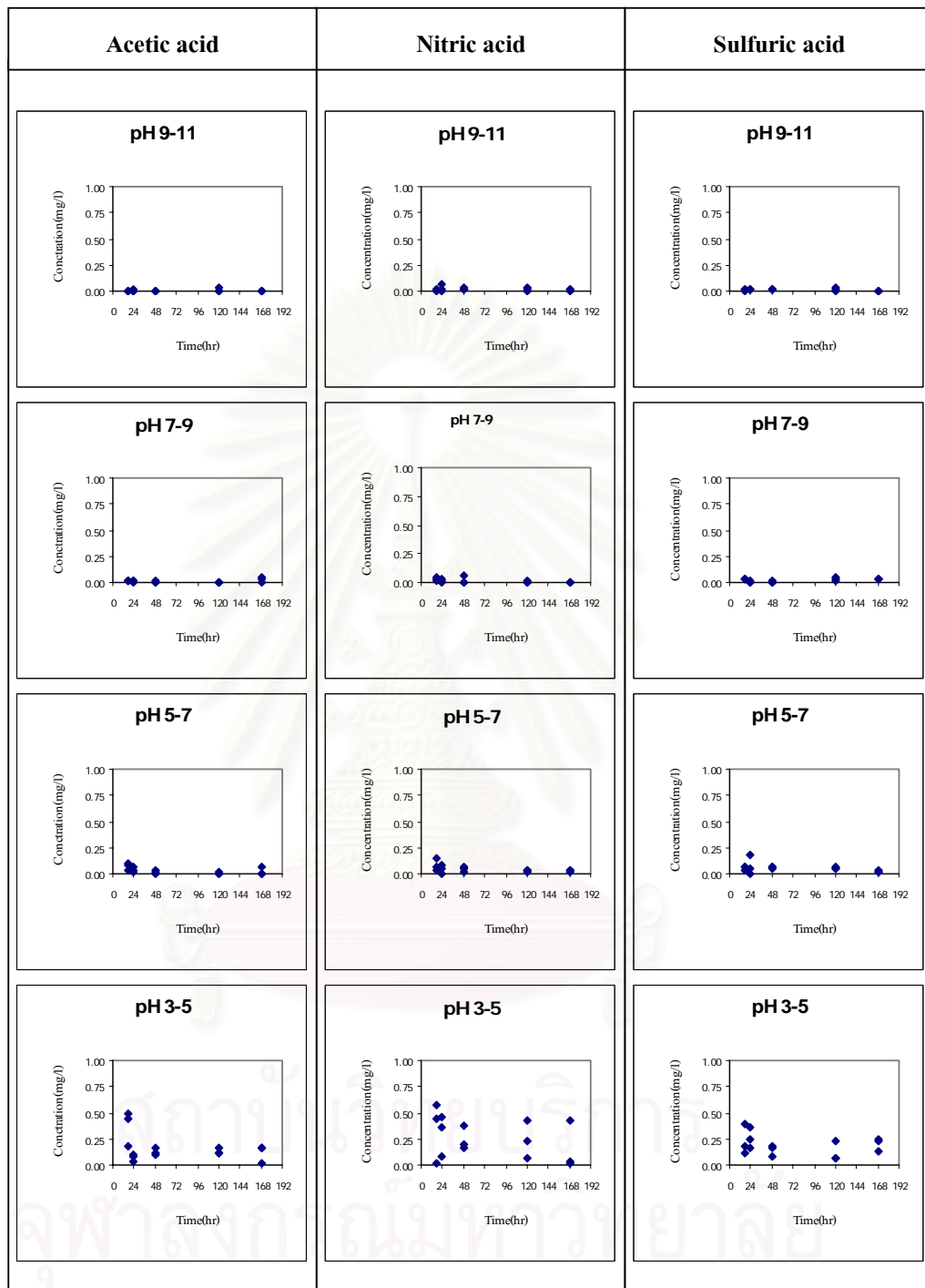
การทดลองในช่วงพีเอช 4 ช่วงคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยการควบคุมพีเอชสุดท้ายตลอดการทดลองด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก มีการแปรผันช่วงเวลาทั้งหมด 5 ค่าการทดลอง คือ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของทองแดง

จากรูปที่ 4.7 และ 4.8 แสดงผลการทดลองการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายจากตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างทำก้อนแข็ง พบว่าทองแดงมีความเข้มข้นน้อยแม้เวลาในการชะละลายในการทดลองเพิ่มขึ้นซึ่งทองแดงชะละลายออกได้ดีในสภาวะกรดเท่านั้น คือจะพบความเข้มข้นสูงในช่วงพีเอช 3-5 แต่แนวโน้มการชะละลายของทองแดงนั้นไม่ชัดเจนทั้งในตัวอย่างก้อนแข็งและตัวอย่างปรับเสถียร ซึ่งความเข้มข้นทองแดงที่พบเป็นลักษณะกระจายตัว ยกเว้นการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชโดยตัวอย่างปรับเสถียรมีแนวโน้มการชะละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการชะละลาย และจากการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายทำให้มีตัวอย่างในการชะละลาย 15 ตัวอย่างต่อ 1 ช่วงพีเอช ซึ่งสามารถพิจารณาความสามารถสูงสุดในการชะละลายจากตัวอย่างที่มีความเข้มข้นกระจายตัวจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างได้ โดยความเข้มข้นสูงสุดที่พบจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ส่งผลต่อตัวอย่างนั้นๆ ด้วย โดยในตัวอย่างปรับเสถียรการชะละลายสูงสุดโดยกรดอะซิติก และตัวอย่างก้อนแข็งชะละลายสูงสุดโดยกรดไนตริก

จากการทดลองแสดงให้เห็นได้ว่าระยะเวลาในการชะละลายที่เพิ่มมากขึ้นมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปโลหะอะซิเตตเท่านั้น ซึ่งส่งผลทำให้การชะละลายจากการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชจากตัวอย่างปรับเสถียรมีการชะละลายออกมามากขึ้น



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของทองแดงที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างก้อนแข็ง

4.5.3 การเปรียบเทียบการชะละลายของทองแดง

เมื่อพิจารณาความสามารถในการชะละลายของสารประกอบของทองแดงนั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบเนื่องจากตัวอย่างนั้นมีธาตุอื่น ๆ มากมายที่ไม่ได้ทำการควบคุม แต่การทดลองจะพิจารณาถึง $(\text{Cu}(\text{OH})_2)$ เนื่องจากในการบำบัดจะทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งการละลายของคอปเปอร์ไฮดรอกไซด์จะเกิดขึ้นที่พีเอชประมาณ 5-6 ซึ่งก็มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลอง ก็คือในการทดลองนั้นจะมีการชะละลายของทองแดงในพีเอชน้อยกว่า 6

ความเข้มข้นของทองแดงที่เกิดจากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลองโดยน้ำกลั่น การทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311(TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) พบว่าความเข้มข้นของทองแดงมีค่าน้อยมากดังตารางที่ 4.10 และมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นจากการทดลองในช่วงพีเอช 7-11 ในการทดลอง แต่เมื่อพีเอชน้อยกว่า 6 นั้น พบความเข้มข้นแตกต่างกันค่อนข้างมากในตัวอย่างปรับเสถียร โดยความเข้มข้นทองแดงจะเพิ่มสูงถึงประมาณ 100 – 500 มก./ล. ในตัวอย่างปรับเสถียร และเมื่อพิจารณาร่วมกับการชะละลายของแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร พบว่าแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร ซึ่งมีการชะละลายสูงสุดใกล้เคียงกันในกรณีทุกชนิดจากการทดลอง (จากรูปที่ 4.1) โดยกรดไนตริกทำให้แคลเซียมมีการชะละลายมากที่สุด แต่พบว่าการชะละลายออกมาได้สูงที่สุดของทองแดงนั้นเกิดจากการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอช แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นเพียงสารควบคุมพีเอชในการทดสอบเท่านั้นซึ่งทำให้พีเอชของน้ำชะละลายมีค่าสูงและป้องกันสภาวะกรดที่ทำให้ทองแดงไม่มีการชะละลายออกมา ซึ่งไม่ได้มีความสัมพันธ์กับการชะละลายของทองแดง ส่วนในกรณีของก้อนแข็งพบความเข้มข้นของทองแดงในปริมาณน้อยโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพีเอชน้อยกว่า 6 เช่นเดียวกับตัวอย่างปรับเสถียร ในตัวอย่างก้อนแข็งนี้จะพบว่าทองแดงมีการชะละลายออกมามากที่สุดในการชะละลายโดยกรดไนตริก ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) โดยสัมพันธ์กับการทดลองการชะละลายออกมาของแคลเซียมจากตัวอย่างก้อนแข็ง คือ แคลเซียมมีการชะละลายของสูงสุดโดยการใช้กรดไนตริก

ในปัจจุบันมีการปรับปรุงประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับใหม่โดยมีการใช้ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แทนที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งในการทดสอบการชะละลายมีการเปลี่ยนมาใช้สารชะละลายเป็น โซเดียมซิเตรด (Sodium citrate) ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นสารชะละลายชนิดใหม่ แทนการใช้การใช้น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) มีการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อ

ของแข็ง 10 ต่อ 1 แทนที่การใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 ต่อ 1 และมีการใช้ระยะเวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้นเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งจากผลที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมพบว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีความเข้มข้นของทองแดงน้อยกว่าการทดลองในงานวิจัยนี้เนื่องจากพีเอชสุดท้ายที่แตกต่างกัน คือพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 แต่การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่ามากกว่าการทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งความเข้มข้นที่มากกว่าน่าจะเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวที่ลดลง เนื่องจากพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบอื่นๆ

เมื่อพิจารณาถึงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ของทองแดงแล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวเท่ากับ 20 จะได้ความเข้มข้นของทองแดงเท่ากับ 1384 มก./ล. สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร และความเข้มข้น 4 มก./ล. สำหรับตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่พบจากการทดลองมีค่าร้อยละ 34 และ 13 ของความเข้มข้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF แสดงว่าทองแดงยังอยู่ในรูปแบบอื่นอีกปริมาณมาก

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบความเข้มข้นของทองแดงจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น(มก./ล.)	
	ตัวอย่างปรับเสถียร	ตัวอย่างก้อนแข็ง
กรดอะซิติก	470.0619*	0.3702
กรดไนตริก	133.5707	0.4942*
กรดซัลฟิวริก	134.8676	0.3337
น้ำกลั่น	1.8819	0.0067
TCLP	1.4364	0.0203
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	1.0035	0.0199
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548)	2.2124	0.0341

4.6 การชะละลายของสังกะสี

4.6.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้นของสังกะสี

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียร พบว่าการชะละลายของสังกะสีนั้นมีความเข้มข้นน้อยเมื่อพีเอชสุดท้ายมากกว่า 7 และความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อพีเอชลดลง โดยพีเอชในช่วง 3-5 จะมีการชะละลายค่อนข้างสูง โดยการชะละลายมีค่ามากที่สุดในการทดลองโดยการใชกรดอะซิติกในการปรับพีเอชซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 35.03 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.39 ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นสังกะสีในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.38	30.81	-	-
5.13	32.35	-	-
4.39	35.03	-	-
3.72	-	13.84	-
4.79	-	15.61	-
4.16	-	18.30	-
4.6	-	-	10.25
3.83	-	-	11.19
4.23	-	-	11.99

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง พบว่าการชะละลายของสังกะสีนั้นมิต่ำ คือพบความเข้มข้นของสังกะสีสูงสุดไม่เกิน 1 มก./ล. โดยการชะละลายของสังกะสีเกิดขึ้นในสภาวะกรดเท่านั้น โดยการใชกรดไนตริกมีผลทำให้สังกะสีการชะละลายออกมาได้มากที่สุดซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 1.03 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้าย 2.26 ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ความเข้มข้นสังกะสีในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของสังกะสีที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.34	0.3002	-	-
4.37	0.3135	-	-
4.40	0.4004	-	-
5.57	-	0.8712	-
3.94	-	1.0000	-
2.26	-	1.0314	-
4.56	-	-	0.4277
5.19	-	-	0.4392
4.55	-	-	0.4659

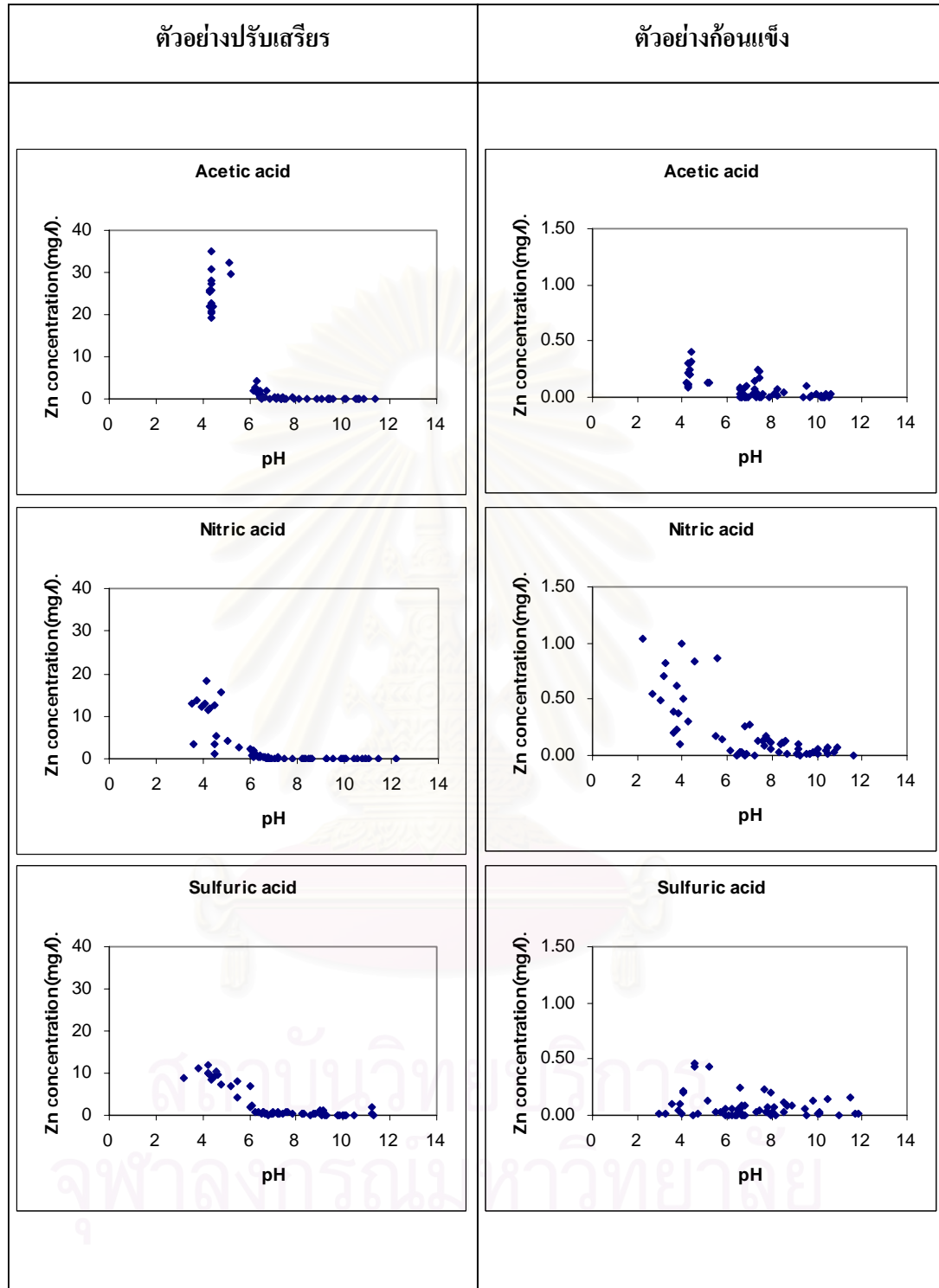
จากการทดลองในตัวอย่างปรับเสถียรพบว่ากรดอะซิติกส่งผลเช่นเดียวการชะละลายของทองแดงคือ ทำให้สังกะสีมีความเข้มข้นมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก เนื่องจากการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชในการทดลองทำให้โลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตตซึ่งมีผลทำให้การชะละลายของสังกะสีนั้นมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับการชะละลายโดยกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก จากการบำบัดโดยการปรับเสถียรนั้นเป็นเพียงการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชที่อยู่ในสภาวะกรดเท่านั้น โดยไม่มีการสร้างโครงสร้างเพิ่มเพื่อป้องกันการชะละลายอย่างเช่นปูนซีเมนต์ในการบำบัดแบบก้อนแข็ง การปรับเสถียรจะใช้เพียงปูนขาวในการบำบัดเท่านั้น โดยสังกะสีในตัวอย่างนั้นจะถูกความคุมการชะละลายโดยปูนขาวซึ่งทำให้พีเอชของน้ำชะละลายมีค่าสูงและการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสังกะสีกับกรดอะซิติกก็ส่งผลต่อการชะละลายมากที่สุดของสังกะสีจากตัวอย่างปรับเสถียร

ในกรณีของตัวอย่างก้อนแข็งพบว่ากรดไนตริกส่งผลต่อการชะละลายของสังกะสีมากที่สุด เช่นเดียวกับการทดลองการชะละลายของทองแดงในตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) และกรดไนตริกยังมีความสามารถในการชะละลายซิลิกาออกมาซึ่งสารประกอบหลักอีกชนิดหนึ่งในโครงสร้างของปูนซีเมนต์ (Halim และคณะ, 2003) ซึ่งส่งผลให้การชะละลายโดยกรดไนตริกทำให้โครงสร้างปูนซีเมนต์ถูกทำลายเป็นผลให้สารชะละลายสามารถเข้าถึงสังกะสีที่อยู่ภายในโครงสร้างได้ การชะละลายของสังกะสีนั้นจะสัมพันธ์

กับพีเอชคือ สามารถชะละลายได้ดีในพีเอชเป็นกรด เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการทำลายโครงสร้างของกรดไนตริกได้สอดคล้องกับการชะละลายของสังกะสีจากของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง ทำให้พบว่าสังกะสีที่ศึกษาในของเสียทำก้อนแข็งนั้นแล้วถูกห่อหุ้มโดยโครงสร้างของปูนซีเมนต์ซึ่งป้องกันการเข้าถึงของสารชะละลายต่างๆ ดังนั้นกระบวนการการชะละลายจากก้อนแข็งที่มีการชะละลายของสังกะสีมากที่สุดจึงต้องมีการทำลายโครงสร้างของตัวอย่างควบคู่กับการควบคุมพีเอชให้อยู่ในสภาวะกรดด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



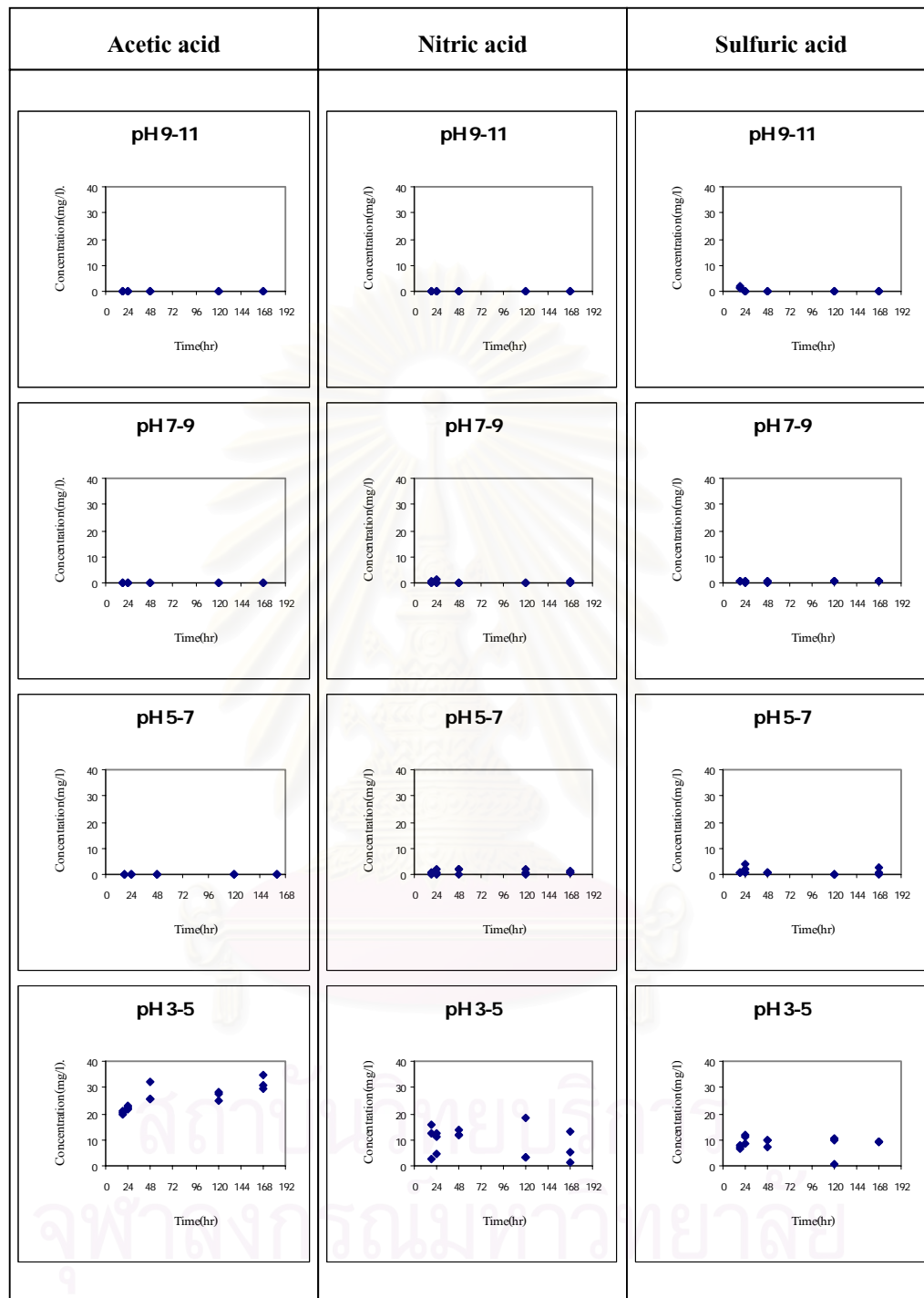
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีกับพีเอชต่าง ๆ โดยกรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก

4.6.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลายออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด

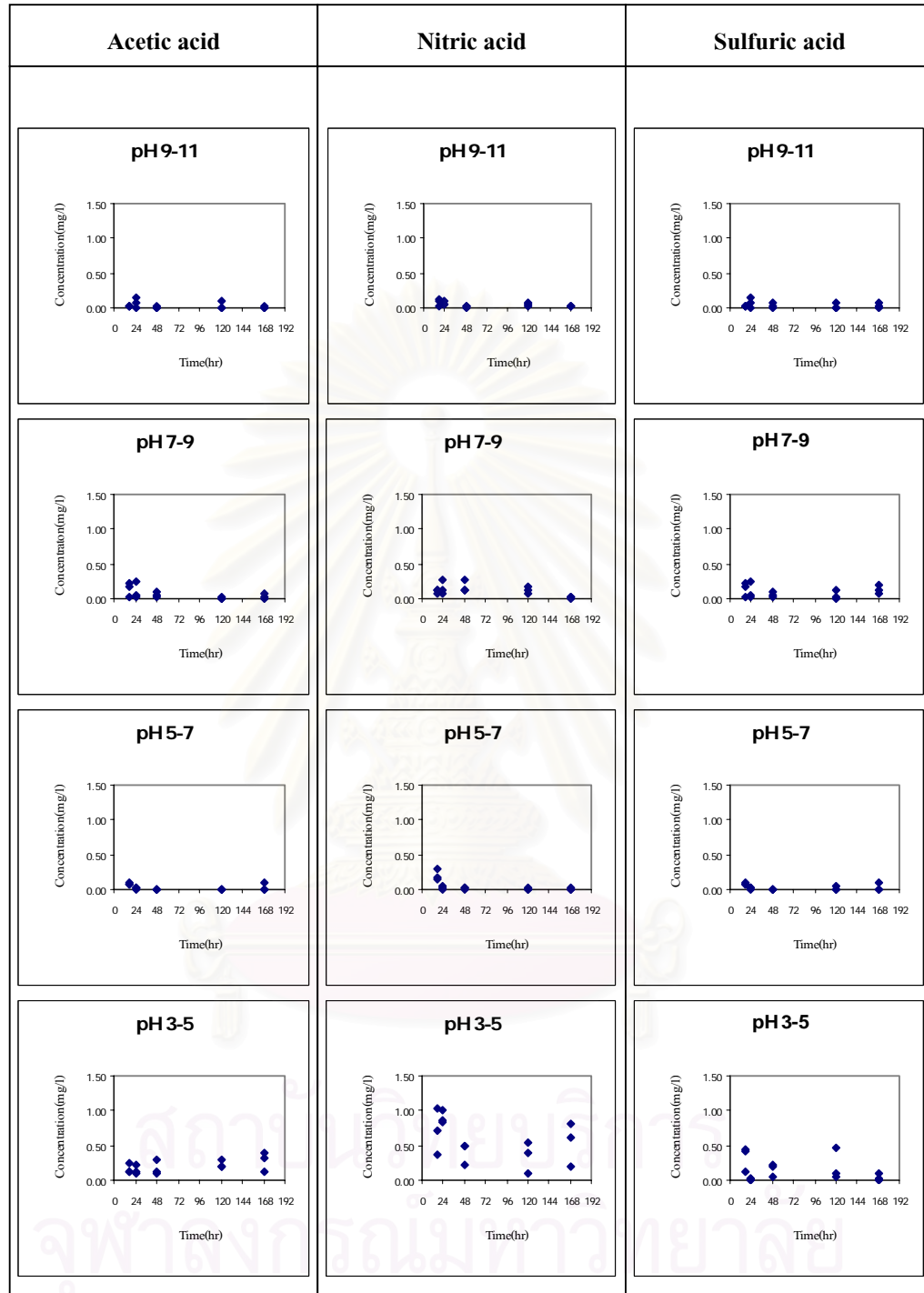
จากการทดลองในช่วงพีเอช 4 ช่วงคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยการควบคุมพีเอชสุดท้ายตลอดการทดลองด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก มีการแปรผันช่วงเวลาทั้งหมด 5 ค่าการทดลอง คือ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของสังกะสี

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงผลการทดลองการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายจากตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างทำก้อนแข็ง พบว่าความเข้มข้นของสังกะสียังคงไม่มีค่าเพิ่มขึ้นในการชะละลายของสังกะสีช่วงพีเอช 9-11 7-9 และ 5-7 แม้ระยะเวลาในการชะละลายจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยเป็นผลมาจากสังกะสีสามารถชะละลายออกมาได้ดีในสภาวะกรดเท่านั้น ซึ่งพบความเข้มข้นของสังกะสีที่มีค่าสูงในช่วงพีเอช 3-5 ซึ่งความเข้มข้นของสังกะสีที่พบเป็นลักษณะกระจายตัว ยกเว้นการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชโดยตัวอย่างปรับเสถียรมีแนวโน้มการชะละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการชะละลาย และจากการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายทำให้มีตัวอย่างในการทดลอง 15 ตัวอย่างต่อ 1 ช่วงพีเอช ซึ่งสามารถพิจารณาความสามารถสูงสุดในการชะละลายจากตัวอย่างที่มีความเข้มข้นกระจายตัวจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างได้ โดยความเข้มข้นสูงสุดที่พบจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ส่งผลต่อตัวอย่างนั้นๆ ด้วย

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการชะละลายที่เพิ่มมากขึ้นมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปโลหะอะซิเตตเท่านั้น ซึ่งส่งผลทำให้การชะละลายจากการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชจากตัวอย่างปรับเสถียรมีการชะละลายออกมามากขึ้น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสังกะสีที่ชะละลายออกมา กับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างก้อนแข็ง

4.6.3 เปรียบเทียบการชะละลายของสังกะสี

เมื่อพิจารณาสังกะสีในรูปแบบของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เนื่องจากกระบวนการบำบัดจะทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะหนักไฮดรอกไซด์ สังกะสีจะสามารถละลายออกมาได้ดีพีเอชน้อยกว่า 6-7 ซึ่งมีลักษณะรูปแบบใกล้เคียงกับการทดลองการคือ มีการชะละลายออกมาเมื่อพีเอชน้อยกว่า 6 เช่นเดียวกันในตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด

จากการทดลอง กรดอะซิติกที่ใช้ในปรับพีเอชจะมีผลทำให้มีการชะละลายของสังกะสีมีค่าสูงสุดในการทดลองจากตัวอย่างปรับเสถียร ซึ่งจะมากกว่าการทดลองและการทดสอบการชะละลายแบบต่างๆในปริมาณมาก ดังตารางที่ 4.13 เมื่อพิจารณาร่วมกับแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการบำบัดพบว่าในตัวอย่างปรับเสถียรนั้นไม่มีความสัมพันธ์ต่อการชะละลายของสังกะสี ซึ่งแคลเซียมนั้นชะละลายออกมาใกล้เคียงกันในการทดลองทั้งในตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างก้อนแข็งโดยกรด 3 ชนิดโดยกรดไนตริกชะละลายแคลเซียมออกมามากกว่ากรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริกเล็กน้อย ดังนั้นการใช้กรดอะซิติกในตัวอย่างปรับเสถียรมีผลทำให้สังกะสีชะละลายจากตัวอย่างปรับเสถียรได้มากที่สุดเนื่องจากความสามารถในการสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะหนักได้โดยสังกะสีชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตด ส่วนในตัวอย่างก้อนแข็งกรดไนตริกที่ใช้ในการปรับพีเอชมีผลต่อตัวอย่างก้อนแข็งในการชะละลายของสังกะสีมากที่สุดเนื่องจากความสามารถของไนตริกมีความกัดกร่อนได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) ส่วนการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) การทดสอบตามมาตรฐาน U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดลองโดยการใช้น้ำกลั่น พบว่าทำให้สังกะสีชะละลายออกมาได้เพียงเล็กน้อย (ไม่เกินร้อยละ 10 ของการชะละลายสูงสุด) ทั้งในตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างและทำก้อนแข็ง ดังตารางที่ 4.13 โดยเหตุผลหลักที่ทำให้มีการชะละลายมีค่าน้อยคือพีเอชสุดท้ายที่มีค่าสูงของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) การทดสอบตามมาตรฐาน U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดลองโดยการใช้น้ำกลั่นซึ่งจะมีค่าประมาณ 12 ทำให้ความสามารถในการละลายออกมาของสังกะสีมีค่าน้อย

ในปัจจุบันมีการปรับปรุงประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับใหม่โดยมีการใช้ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แทนที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งในการทดสอบการชะละลายมีการเปลี่ยนมาใช้สารชะละลายเป็นโซเดียมซิเตรด (Sodium citrate) ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นสารชะละลายชนิดใหม่แทนการใช้การใช้น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) มีการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 แทนที่การใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 ต่อ 1 และมีการใช้ระยะเวลาใน

การชะละลายเพิ่มมากขึ้นเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งจากผลที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมพบว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีความเข้มข้นของสังกะสีน้อยกว่าการทดลองในการวิจัยนี้เนื่องจากพีเอชสุดท้ายที่แตกต่างกัน คือพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 แต่การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่ามากกว่าการทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวที่ลดลง เนื่องจากพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบอื่นๆ

เมื่อพิจารณาถึงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ของสังกะสีแล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวเท่ากับ 20 จะได้ความเข้มข้นของสังกะสีเท่ากับ 118 มก./ล. สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร และความเข้มข้นเท่ากับ 4 มก./ล. สำหรับตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่พบจากการทดลองชะละลายสังกะสีออกมาได้ร้อยละ 28 และ 24 ของความเข้มข้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF แสดงว่าสังกะสียังอยู่ในรูปแบบอื่นอีกปริมาณมากซึ่งยังไม่ได้มีการชะละลายออกมา

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบความเข้มข้นของสังกะสีจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น(มก./ล.)	
	ตัวอย่างปรับเสถียร	ตัวอย่างก้อนแข็ง
กรดอะซิติก	32.7303*	0.3380
กรดไนตริก	15.9168	0.9676*
กรดซัลฟิวริก	11.1429	0.4443
น้ำกลั่น	0.6802	0.0934
TCLP	0.2856	0.0273
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	0.3037	0.0557
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548)	0.6094	0.0732

4.7 การชะละลายของนิกเกิล

4.7.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้นของนิกเกิล

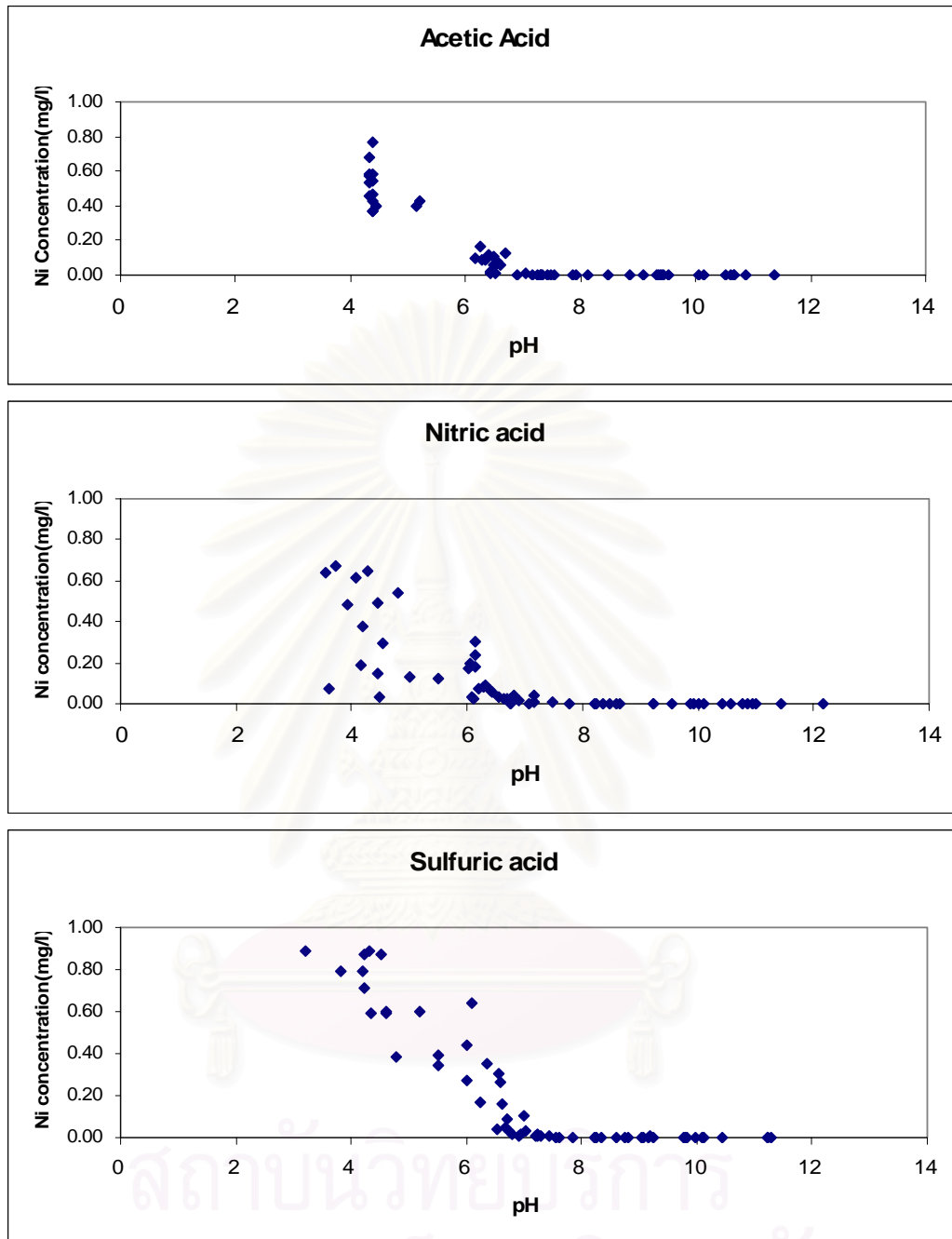
รูปที่ 4.13 แสดงการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลที่ชะละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียร พบว่าการชะละลายของนิกเกิลมีความเข้มข้นน้อยมากเมื่อพีเอชมากกว่า 7 เนื่องจากนิกเกิลสามารถละลายออกมาได้ดีในสภาวะกรด การชะละลายจากกรดทั้ง 3 ชนิดนั้นส่งผลให้มีการชะละลายของนิกเกิลที่พีเอชน้อยกว่า 7 ซึ่งการชะละลายเกิดขึ้นสูงที่สุดจากการชะละลายโดยกรดซัลฟิวริก ซึ่งทำให้เกิดการชะละลายของนิกเกิลเท่ากับ 0.89 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.33 และ 3.20 ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ความเข้มข้นนิกเกิลในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของนิกเกิลที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.33	0.5832	-	-
4.34	0.6828	-	-
4.39	0.7647	-	-
3.54	-	0.6375	-
4.28	-	0.6465	-
3.72	-	0.6707	-
4.52	-	-	0.8687
4.33	-	-	0.8880
3.20	-	-	0.8880

จากการทดลองพบว่าการชะละลายออกมานิกเกิลในตัวอย่างปรับเสถียรนั้นพบความเข้มข้นของนิกเกิลใกล้เคียงกันในกรดทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง แสดงว่าชนิดของกรดที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีผลต่อการชะละลายออกมานิกเกิลอย่างชัดเจน โดยปัจจัยหลักในการชะละลายออกมามีขึ้นอยู่กับพีเอชสุดท้ายเท่านั้น

ส่วนในกรณีของการชะละลายของนิกเกิลจากตัวอย่างก้อนแข็งพบว่าความเข้มข้นของนิกเกิลจากการชะละลายนั้นมีค่าน้อยมากตลอดการทดลอง ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์ผลการชะละลายของนิกเกิลที่อยู่ในตัวอย่างก้อนแข็งได้

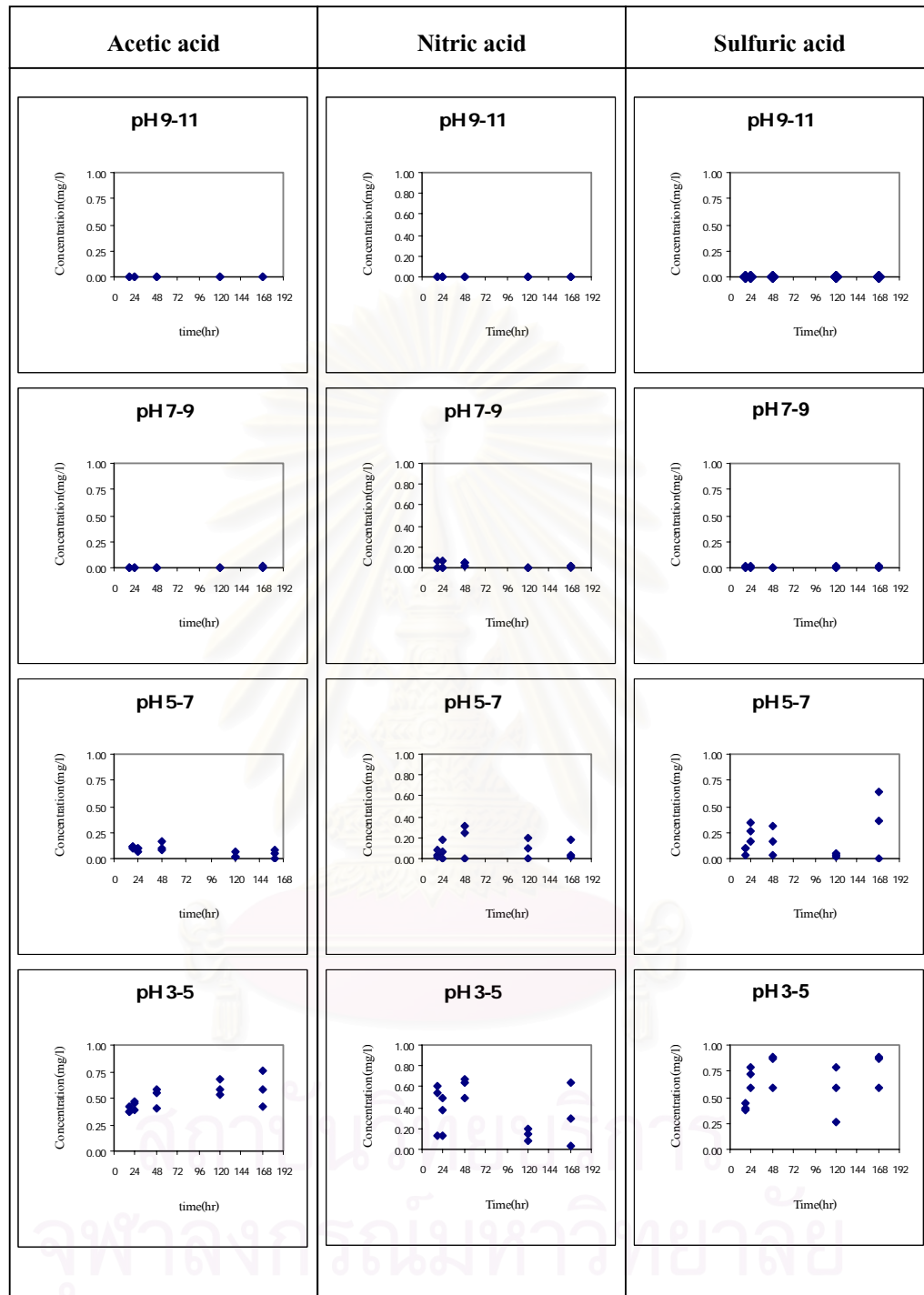


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลกับพีเอชต่าง ๆ โดย กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟูริก จากตัวอย่างปรับเสถียร

4.7.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของนิกเกิลที่ชะละลายออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด

จากการทดลองในช่วงพีเอช 4 ช่วงคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยการควบคุมพีเอชสุดท้ายตลอดการทดลองด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก มีการแปรผันช่วงเวลาทั้งหมด 5 ค่าการทดลอง คือ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของนิกเกิล

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายในตัวอย่างปรับเสถียร พบว่าในช่วงพีเอช 9-11 และ 7-9 มีการชะละลายออกมานิกเกิลในปริมาณน้อย แม้จะทำการเพิ่มระยะเวลาในการชะละลายมากขึ้น โดยเป็นผลมาจากนิกเกิลสามารถชะละลายออกมาได้ดีในสภาวะกรดเท่านั้น โดยพบค่าความเข้มข้นที่สูงในช่วงพีเอช 5-7 และ 3-5 การชะละลายของนิกเกิลไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจน โดยความเข้มข้นที่พบมีลักษณะกระจายตัวและจากการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายทำให้มีตัวอย่างในการทดลอง 15 ตัวอย่างต่อ 1 ช่วงพีเอช ซึ่งสามารถพิจารณาความสามารถสูงสุดในการชะละลายจากตัวอย่างที่มีความเข้มข้นกระจายตัวจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างได้ โดยความเข้มข้นสูงสุดที่พบจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ส่งผลต่อตัวอย่างนั้นๆ ด้วย โดยนิกเกิลมีชะละลายออกมาใกล้เคียงกันในกรดทุกชนิด



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของนิกเกิลที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร

4.7.3 เปรียบเทียบการชะละลายออกมาของนิกเกิล

เมื่อพิจารณาการชะละลายของนิกเกิลจากตัวอย่างปรับเสถียรนั้นพบว่า การชะละลายจะเกิดขึ้นที่พีเอชน้อยกว่า 7-8 ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับความสามารถในการการชะละลายของนิกเกิลในรูปนิกเกิลไฮดรอกไซด์ คือการจะมีการชะละลายที่พีเอชน้อยกว่า 7-8 เช่นเดียวกัน โดยการทดลองพิจารณานิกเกิลไฮดรอกไซด์ เนื่องจากกระบวนการบำบัดทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์

ความเข้มข้นของนิกเกิลจากการทดลองเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับ การทดลองโดยน้ำกลั่น การทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และ การทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของนิกเกิลมีค่าน้อยมากดังตารางที่ 4.15 ซึ่งจากการทดลองโดยน้ำกลั่นและการทดสอบตามมาตรฐานพบว่า ความสามารถในการชะละลายนิกเกิลออกมาจากตัวอย่างนั้นมีค่าไม่เกินร้อยละ 3 ของการชะละลายสูงสุดโดยกรดซัลฟิวริก การทดลองโดยกรดทั้ง 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกนั้นพบการชะละลายของนิกเกิลไม่ต่างกันมาก แสดงให้เห็นว่าชนิดของกรดที่ใช้ไม่มีผลต่อการชะละลายออกมาของนิกเกิล ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพีเอชสุดท้ายเท่านั้น โดยการชะละลายของแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร ซึ่งมีการชะละลายได้สูงที่สุดใกล้เคียงกันในกรดทุกชนิดการทดลองในการปรับพีเอช (จากรูปที่ 4.1) ซึ่งเป็นลักษณะการชะละลายเช่นเดียวกับการชะละลายของนิกเกิล โดยแคลเซียมจะเป็นสารควบคุมพีเอชทำให้การทดลองโดยน้ำกลั่น การทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) มีพีเอชสุดท้ายที่สูง ส่วนในจากการทดลองการชะละลายทองแดงและสังกะสีนั้น กรดอะซิติกจะมีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักในตัวอย่างปรับเสถียรมากกว่ากรดชนิดอื่นๆ แต่สำหรับนิกเกิลพบผลการทดลองที่แตกต่างออกไป

ในปัจจุบันมีการปรับปรุงประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับใหม่โดยมีการใช้ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แทนที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งในการทดสอบการชะละลายมีการเปลี่ยนมาใช้สารชะละลายเป็น โซเดียมซิเตรด (Sodium citrate) ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นสารชะละลายชนิดใหม่แทนการใช้การใช้น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) มีการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 แทนที่การใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 ต่อ 1 และมีการใช้ระยะเวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้นเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งจากผลที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมพบว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีความเข้มข้นของนิกเกิลน้อยกว่าการทดลองในการวิจัยนี้เนื่องจากพีเอชสุดท้ายที่แตกต่างกัน คือพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตาม

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 แต่การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่ามากกว่าการทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวที่ลดลง เนื่องจากพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบอื่นๆ

เมื่อพิจารณาถึงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ของนิกเกิลแล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวเท่ากับ 20 จะได้ความเข้มข้นของนิกเกิลเท่ากับ 146 มก./ล. สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่พบจากการทดลองมีค่าร้อยละ 0.60 ของความเข้มข้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF แสดงว่านิกเกิลยังอยู่ในรูปแบบอื่นอีกปริมาณมากและมีการชะละลายออกมาในปริมาณน้อยมากในการทดลอง

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบความเข้มข้นของนิกเกิลจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น(มก./ล.)จากตัวอย่างปรับเสถียร
กรดอะซิติก	0.6769
กรดไนตริก	0.6516
กรดซัลฟิวริก	0.8816*
น้ำกลั่น	< 0.0007
TCLP	0.0187
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	0.0175
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548)	0.0249

4.8 การชะละลายของตะกั่ว

4.8.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้นของตะกั่ว

รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่างๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียร พบว่าเมื่อพีเอชมีค่ามากกว่า 6 ขึ้นไป ความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายนั้นมีค่าน้อยมาก แต่เมื่อพีเอชน้อยกว่า 6 ความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายออกมาก็จะเพิ่มขึ้น ยกเว้นการชะละลายด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งพบว่าความเข้มข้นของตะกั่วมีการชะละลายน้อยตลอดการทดลอง โดยเมื่อเปรียบเทียบความ

เข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายกับชนิดของกรดที่ใช้ในการปรับพีเอชแล้ว พบว่ากรดอะซิติกมีผลทำให้ตะกั่วชะละลายได้สูงที่สุดในพีเอชสุดท้ายใกล้เคียงกัน โดยความเข้มข้นของตะกั่วสูงสุดที่พบโดยการชะละลายโดยกรดอะซิติก คือ 3.41 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.39 ดังตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4.16 ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของตะกั่วที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.34	1.5062	-	-
4.33	2.6166	-	-
4.39	3.4087	-	-
3.72	-	0.2891	-
3.54	-	0.3923	-
4.07	-	0.4231	-
4.23	-	-	0.3121
4.52	-	-	0.3322
5.5	-	-	0.3456

จากรูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียทำก้อนแข็ง พบว่าการชะละลายโดยการปรับพีเอชด้วยกรด 3 ชนิดนั้น ความเข้มข้นของตะกั่วนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าน้อยกว่า 7 โดยการปรับพีเอชด้วยกรดไนตริกนั้นมีผลทำให้ตะกั่วชะละลายออกมาได้มากที่สุด โดยมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.73 มก./ล. ที่พีเอชเท่ากับ 3.94 ดังตารางที่ 4.17

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

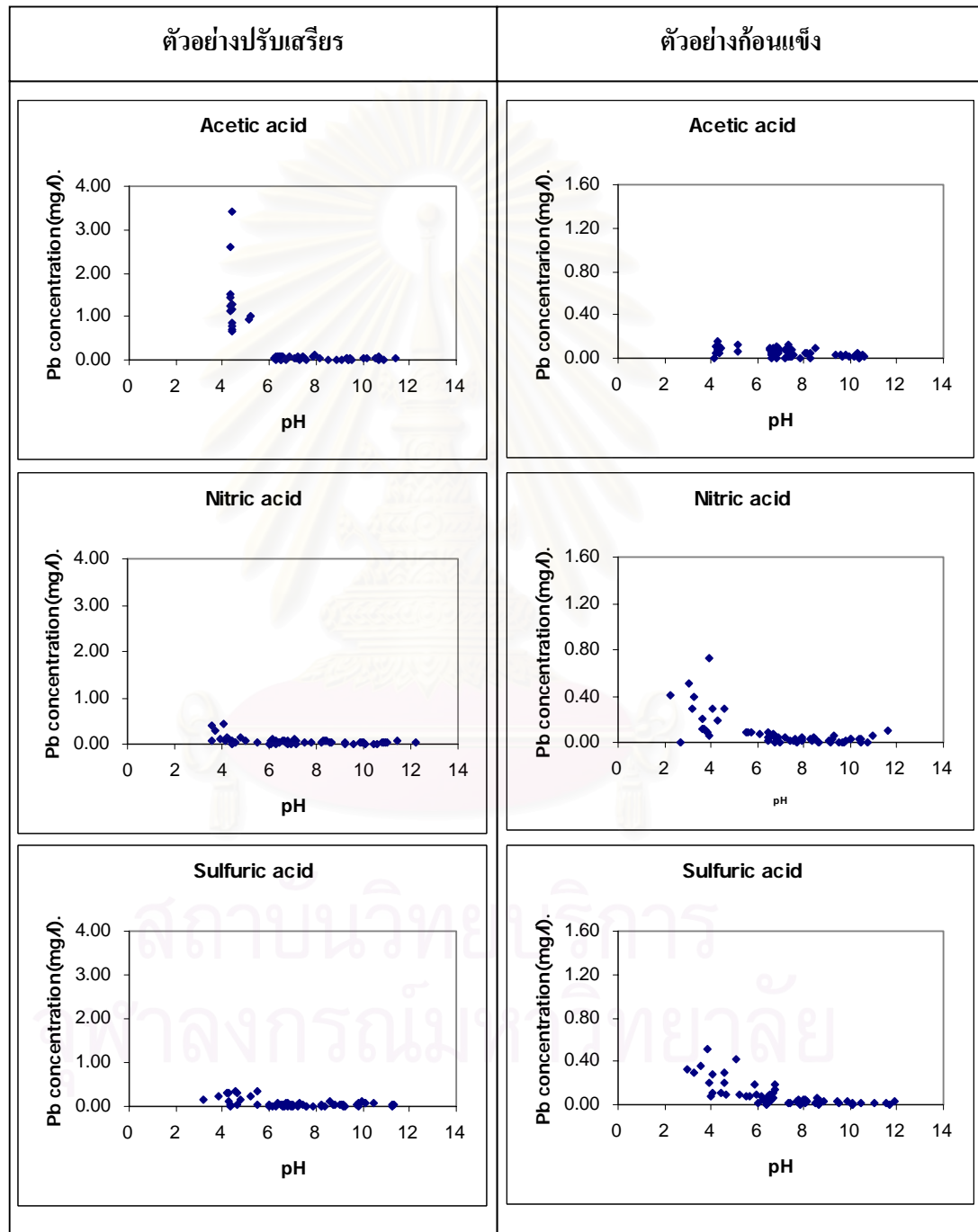
ตารางที่ 4.17 ความเข้มข้นตะกั่วในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของตะกั่วที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.23	0.1159	-	-
5.18	0.1187	-	-
4.29	0.1519	-	-
2.26	-	0.4142	-
3.06	-	0.5099	-
3.94	-	0.7280	-
3.52	-	-	0.3590
5.1	-	-	0.4002
3.86	-	-	0.5189

จากการทดลองพบว่ากรดอะซิติกนั้นส่งผลต่อตะกั่วในตัวอย่างปรับเสถียรมากที่สุด เนื่องจากในการใช้กรดอะซิติกปรับพีเอชในการทดลองนั้นทำให้โลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตตมีผลทำให้การชะละลายของตะกั่วนั้นมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริก จากการบำบัดโดยการปรับเสถียรนั้นเป็นเพียงการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชที่จะอยู่ในสภาวะกรดเท่านั้น โดยไม่มีการสร้างโครงสร้างเพิ่มป้องกันการชะละลายอย่างเช่นปูนซีเมนต์ในการบำบัดแบบก้อนแข็ง การปรับเสถียรจะใช้เพียงปูนขาวในการบำบัดเท่านั้น ตะกั่วที่อยู่ในของเสียบผ่านการปรับเสถียรนั้นจึงมีเพียงพีเอชที่มีค่าสูงคอยควบคุมการชะละลายของตะกั่ว ส่วนในกรณีของการชะละลายโดยใช้ไนตริกและ กรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอชนั้นพบความเข้มข้นของตะกั่วสูงสุดชะละลายออกมาใกล้เคียงกันในการทดลอง

ในกรณีตัวอย่างก้อนแข็งพบว่ากรดไนตริกส่งผลต่อการชะละลายของตะกั่วมากที่สุด เช่นเดียวกับในการทดลองการชะละลายของทองแดงและสังกะสีในตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) และกรดไนตริกยังมีความสามารถในการชะละลายซิลิกาออกมาซึ่งสารประกอบหลักอีกชนิดหนึ่งในโครงสร้างของปูนซีเมนต์ (Halim และคณะ, 2003) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างปูนซีเมนต์ถูกทำลายทำให้สารชะละลายสามารถเข้าถึงตะกั่วที่อยู่ภายในโครงสร้างได้ ซึ่งการชะละลายของตะกั่วจะสัมพันธ์กับพีเอชคือ สามารถชะละลายได้ดีในพีเอชเป็นกรด เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการทำลายโครงสร้างของกรดไนตริกได้

สอดคล้องกับการชะละลายออกมาของตะกั่วจากของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง ทำให้พบว่าตะกั่วที่ศึกษาในของเสียทำก้อนแข็งนั้นแล้วถูกห่อหุ้มโดยโครงสร้างของปูนซีเมนต์ซึ่งป้องกันการเข้าถึงของสารชะละลายต่างๆ ดังนั้นการชะละลายของตะกั่วจากก้อนแข็งต้องมีการทำลายโครงสร้างของตัวอย่างควบคู่กับการควบคุมพีเอชให้อยู่ในสภาวะกรดด้วย

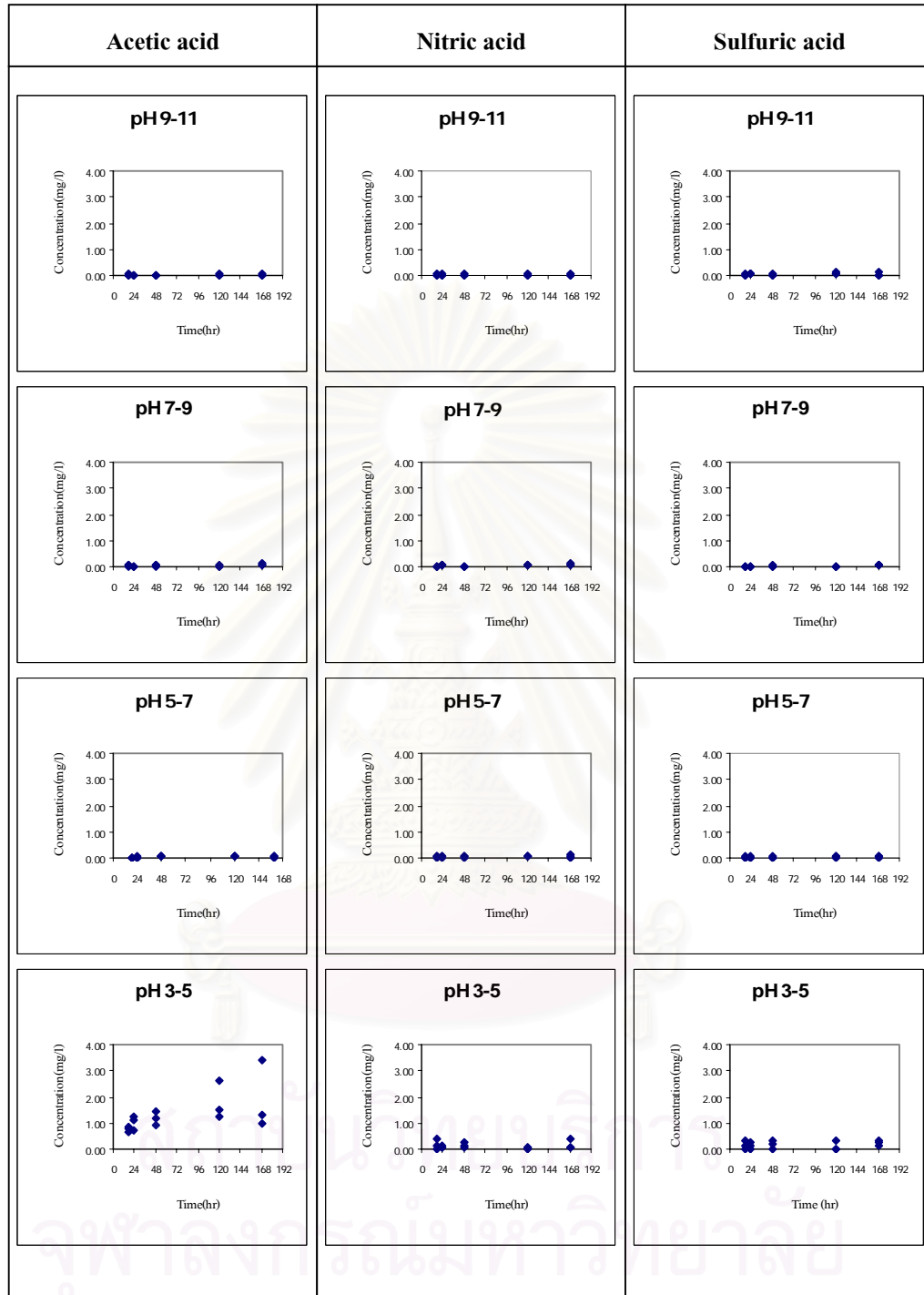


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วกับพีเอชต่าง ๆ โดยกรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก

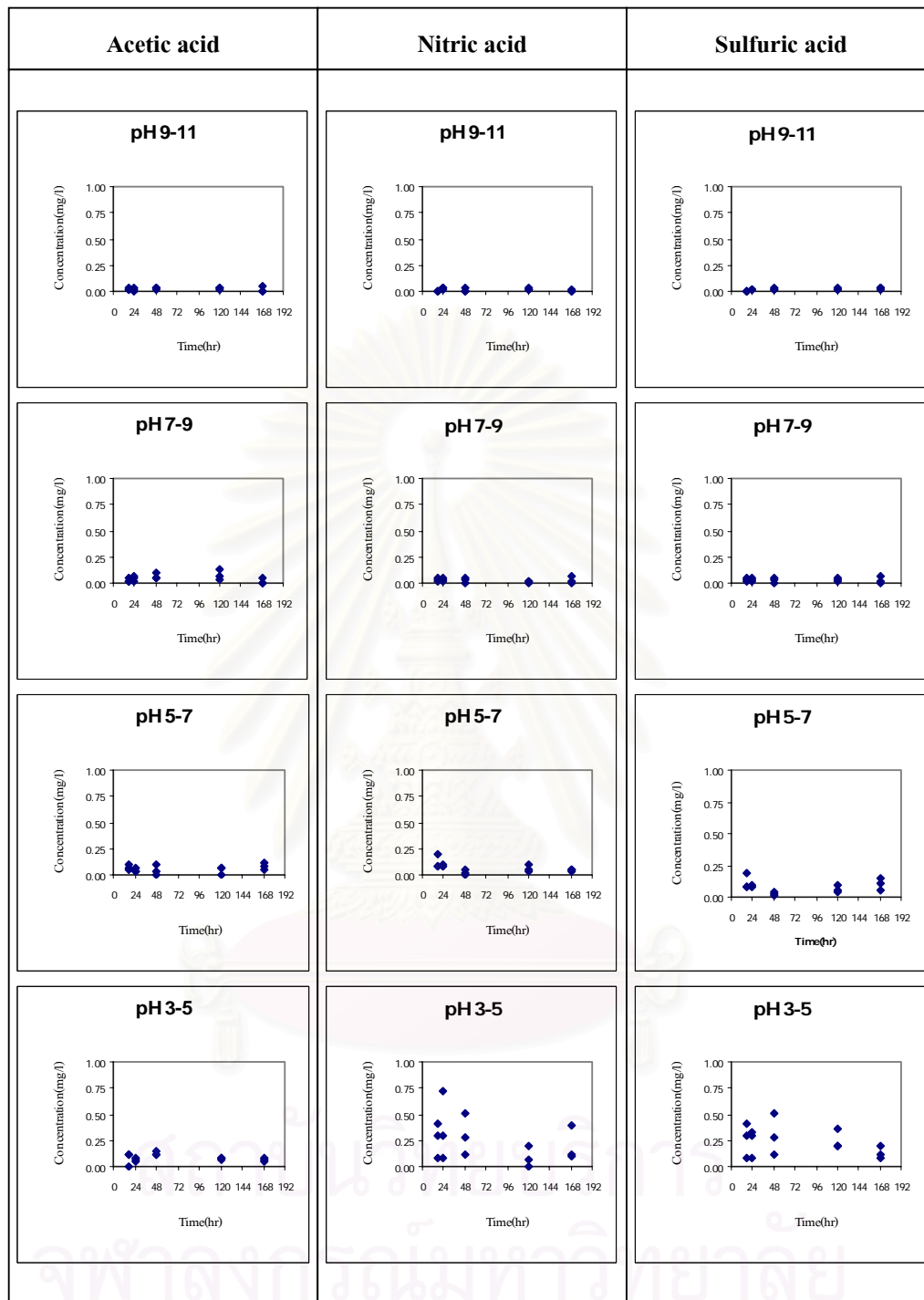
4.8.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด

การทดลองได้ทำการปรับพีเอช 4 ช่วงการทดลองคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 ด้วยการควบคุมพีเอชสุดท้ายตลอดการทดลองด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก มีการแปรผันช่วงเวลาทั้งหมด 5 ค่าการทดลอง คือ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของตะกั่ว

จากรูปที่ 4.16 และ 4.17 แสดงผลการทดลองการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายจากตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างทำก้อนแข็ง พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วที่ละลายออกมามีค่าน้อยในช่วงพีเอช 9-11 7-9 และ 5-7 แม้ระยะเวลาในการชะละลายจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในตัวอย่างปรับเสถียรมีพบความเข้มข้นที่สูงโดยการชะละลายโดยกรดอะซิติกเพียงเท่านั้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบในรูปโลหะอะซิเตด โดยการใช้กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกมีความเข้มข้นน้อยตลอดการทดลอง ส่วนในตัวอย่างก้อนแข็งพบการชะละลายในสภาวะกรดเพียงเท่านั้นแต่แนวโน้มการชะละลายนั้นไม่ชัดเจน ซึ่งพบความเข้มข้นในลักษณะกระจายตัวเมื่อแปรผันระยะเวลาในการชะละลายที่เพิ่มมากขึ้น และจากการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายทำให้มีตัวอย่างในการทดลอง 15 ตัวอย่างต่อ 1 ช่วงพีเอช ซึ่งสามารถพิจารณาความสามารถสูงสุดในการชะละลายจากตัวอย่างที่มีความเข้มข้นกระจายตัวจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างได้ โดยความเข้มข้นสูงสุดที่พบจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ส่งผลต่อตัวอย่างนั้นๆ ด้วย



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตะกั่วที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างก้อนแข็ง

4.8.3 เปรียบเทียบการชะละลายของตะกั่ว

เมื่อพิจารณาความสามารถในการชะละลายของสารประกอบของตะกั่วที่นั้นสามารถเกิดขึ้นได้หลายรูปแบบเนื่องจากตัวอย่งนั้นมีธาตุอื่นๆมากมายที่ไม่ทำการควบคุม ทำให้เกินตะกอนโลหะหนักในหลายรูปแบบ แต่ตะกอนโดยส่วนใหญ่สามารถชะละลายได้คือใช้สภาวะกรด โดยการละลายออกมาของตะกั่วจะเกิดขึ้นที่พีเอชน้อยกว่า 8 - 9 ซึ่งก็มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลอง คือในการทดลองนั้นจะมีการชะละลายของตะกั่วในพีเอชน้อยกว่า 7 ในตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด

ความเข้มข้นของตะกั่วที่เกิดจากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกรทดลองโดยน้ำกลั่น การทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311(TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) พบว่าความเข้มข้นของตะกั่วมีค่าน้อยดังตารางที่ 4.18 คือในตัวอย่างปรับเสถียรมีค่าไม่เกินร้อยละ 20 ของการชะละลายโดยกรดอะซิติก และในตัวอย่างก้อนแข็งไม่เกินร้อยละ 5 ของการชะละลายโดยกรดไนตริกซึ่งชะละลายตะกั่วออกมามากที่สุด ในตัวอย่างปรับเสถียรจะเห็นได้ว่าการทดลองโดยน้ำกลั่นและการทดสอบตามมาตรฐานมีค่าใกล้เคียงกับการชะละลายโดยกรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกแสดงให้เห็นการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปโลหะอะซิเตดโดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชนั้นส่งผลต่อการชะละลายออกมาของตะกั่วมากที่สุดเท่านั้น โดยกรดชนิดอื่นๆ มีผลต่อตัวอย่างเพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับการชะละลายของแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร พบว่าแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร ซึ่งมีการชะละลายสูงที่สุดใกล้เคียงกันในการทดสอบทุกชนิดการทดลอง ซึ่งการปรับ พีเอชโดยกรดไนตริกมีการชะละลายแคลเซียมมากที่สุด แต่พบว่าการชะละลายออกมาได้สูงที่สุดของตะกั่วที่นั้นเกิดจากการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอช แสดงว่าในตัวอย่างปรับเสถียรนั้น แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นพวกสารควบคุมพีเอชในการทดสอบเท่านั้นซึ่งมีคุณสมบัติทำให้พีเอชของน้ำชะละลายมีค่าสูงเพื่อป้องกันสภาวะกรดที่จะทำให้ตะกั่วชะละลายที่นั้นไม่ได้มีความสัมพันธ์กับการชะละลายของตะกั่ว ส่วนในกรณีของก้อนแข็งพบในปริมาณน้อยคือมีค่าไม่เกิน 0.8 มก./ล. เนื่องจากในตัวอย่างของก้อนแข็งมีตะกั่วในปริมาณน้อย แต่ในตัวอย่างก้อนแข็งนี้จะพบว่าตะกั่วมีการชะละลายออกมามากที่สุดในการชะละลายโดยกรดไนตริก ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) โดยสัมพันธ์กับการทดลองการชะละลายของแคลเซียมจากตัวอย่างก้อนแข็ง คือ มีการชะละลายของแคลเซียมสูงสุดโดยการใช้กรดไนตริก

ในปัจจุบันมีการปรับปรุงประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับใหม่โดยมีการใช้ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แทนที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งในการทดสอบการชะละลายมีการเปลี่ยนมาใช้สารชะละลายเป็น โซเดียมซิเตรด

(Sodium citrate) ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นสารชะละลายชนิดใหม่ แทนการใช้การใช้น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) มีการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 แทนที่การใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 ต่อ 1 และมีการใช้ระยะเวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้นเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งจากผลที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมพบว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีความเข้มข้นของตะกั่วน้อยกว่าการทดลองในการวิจัยนี้เนื่องจากพีเอชสุดท้ายที่แตกต่างกัน คือพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 แต่การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีความเข้มข้นมากกว่าการทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวที่ลดลง เนื่องจากพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบอื่นๆ

เมื่อพิจารณาถึงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ของตะกั่วแล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวเท่ากับ 20 จะได้ความเข้มข้นของตะกั่วเท่ากับ 27 มก./ล. สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร และความเข้มข้น 4 มก./ล. สำหรับตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่พบจากการทดลองชะละลายมีค่าร้อยละ 2.26 และ 13.75 ของความเข้มข้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ตามลำดับ แสดงว่าตะกั่วยังอยู่ในรูปแบบอื่นอีกปริมาณมาก

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบความเข้มข้นของตะกั่วจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น(มก./ล.)	
	ตัวอย่างปรับเสถียร	ตัวอย่างก้อนแข็ง
กรดอะซิติก	2.5105*	0.0230
กรดไนตริก	0.3682	0.5507*
กรดซัลฟิวริก	0.3300	0.4277
น้ำกลั่น	0.1849	< 0.0015
TCLP	0.1760	0.0188
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	0.1623	0.0230
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548)	0.2890	0.0344

4.9 การชะละลายของโครเมียม

4.9.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้นของโครเมียม

รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียร พบว่าการชะละลายของโครเมียมมีความเข้มข้นน้อยมากสำหรับการใช้กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอชในทุกๆ ค่าการทดลอง ในกรณีการใช้กรดอะซิติกปรับพีเอชนั้น โครเมียมมีการชะละลายน้อยเมื่อพีเอชมากกว่า 6 และมีการชะละลายสูงขึ้นเมื่อพีเอชน้อยกว่า 6 โดยพบความเข้มข้นโครเมียมสูงที่สุดจากปรับพีเอชโดยกรดอะซิติกซึ่งมีความเข้มข้นเท่ากับ 3.03 มก./ล.ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.38 ดังตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ความเข้มข้นโครเมียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของโครเมียมที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
5.13	3.0139	-	-
4.33	3.0189	-	-
4.38	3.0479	-	-
4.49	-	0.7158	-
3.54	-	0.8486	-
4.45	-	0.8537	-
4.23	-	-	0.3004
3.83	-	-	0.4300
3.2	-	-	0.4300

รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง พบว่าการชะละลายของโครเมียมนั้นพบค่อนข้างน้อยในตัวอย่างแบบก้อนแข็งนี้ โดยพบความเข้มข้นมากที่สุดเพียง 0.35 มก./ล. จากการชะละลายโดยกรดอะซิติกที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.36 ดังตารางที่ 4.20

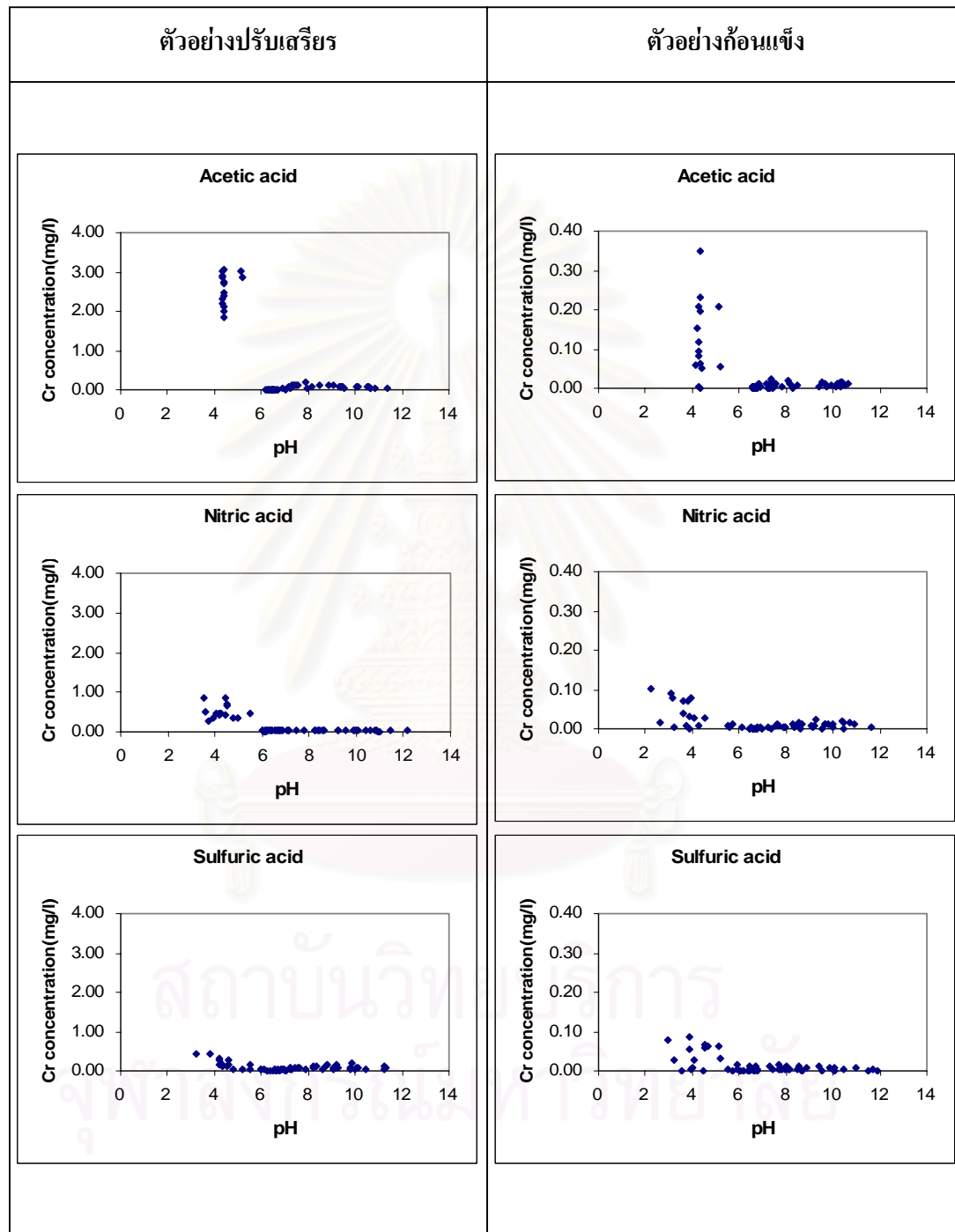
ตารางที่ 4.20 ความเข้มข้นโครเมียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของโครเมียมที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.26	0.2094	-	-
4.37	0.2316	-	-
4.36	0.3471	-	-
3.16	-	0.0787	-
3.06	-	0.0900	-
2.26	-	0.1011	-
4.56	-	-	0.0677
2.99	-	-	0.0765
3.86	-	-	0.0880

จากการทดลองในตัวอย่างปรับเสถียรพบว่าการชะละลายของโครเมียมสามารถชะละลายได้ดีในการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอช เช่นเดียวกับการชะละลายของทองแดง สังกะสี และตะกั่ว เนื่องจากในการใช้กรดอะซิติกปรับพีเอชในการทดลองนั้นทำให้โลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตดมีผลทำให้การชะละลายมีค่ามากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การชะละลายโดยการ ใช้กรดไนตริกและกรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอช จากกระบวนการบำบัดโดยการปรับเสถียรนั้นเป็นเพียงการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชที่จะอยู่ในสภาวะกรดเท่านั้น โดยไม่มีการสร้างโครงสร้างป้องกันการชะละลายอย่างเช่นปูนซีเมนต์ในการบำบัดแบบก้อนแข็ง การปรับเสถียรจะใช้เพียงปูนขาวในการบำบัดเท่านั้น

ในกรณีตัวอย่างก้อนแข็งจากการทดลองพบว่าการใช้กรดอะซิติกทำให้โครเมียมมีการชะละลายออกมาจากตัวอย่างก้อนแข็งมากที่สุดเช่นเดียวกับตัวอย่างปรับเสถียร แม้ว่าผลมาจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก(Asavapisit และคณะ, 2002) และกรดไนตริกยังมีความสามารถในการชะละลายซิลิกาออกมาซึ่งสารประกอบหลักอีกชนิดหนึ่งในโครงสร้างของปูนซีเมนต์(Halim และคณะ, 2003) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างปูนซีเมนต์ถูกทำลายทำให้สารชะละลายสามารถเข้าถึงโลหะหนักที่อยู่ภายในโครงสร้างได้ แสดงให้เห็นว่าโครเมียมนั้นเป็นโลหะหนักที่จับอยู่ที่ผิวหน้าของก้อนแข็งมากกว่าที่จะอยู่ในโครงสร้างของก้อนแข็งซึ่งจะเป็นลักษณะคล้ายกับตัวอย่างปรับเสถียรที่ไม่มีการห่อหุ้ม

โลหะหนักโดยโครงสร้างของซีเมนต์ ซึ่งการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชในการทดลองนั้น ทำให้โลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตด

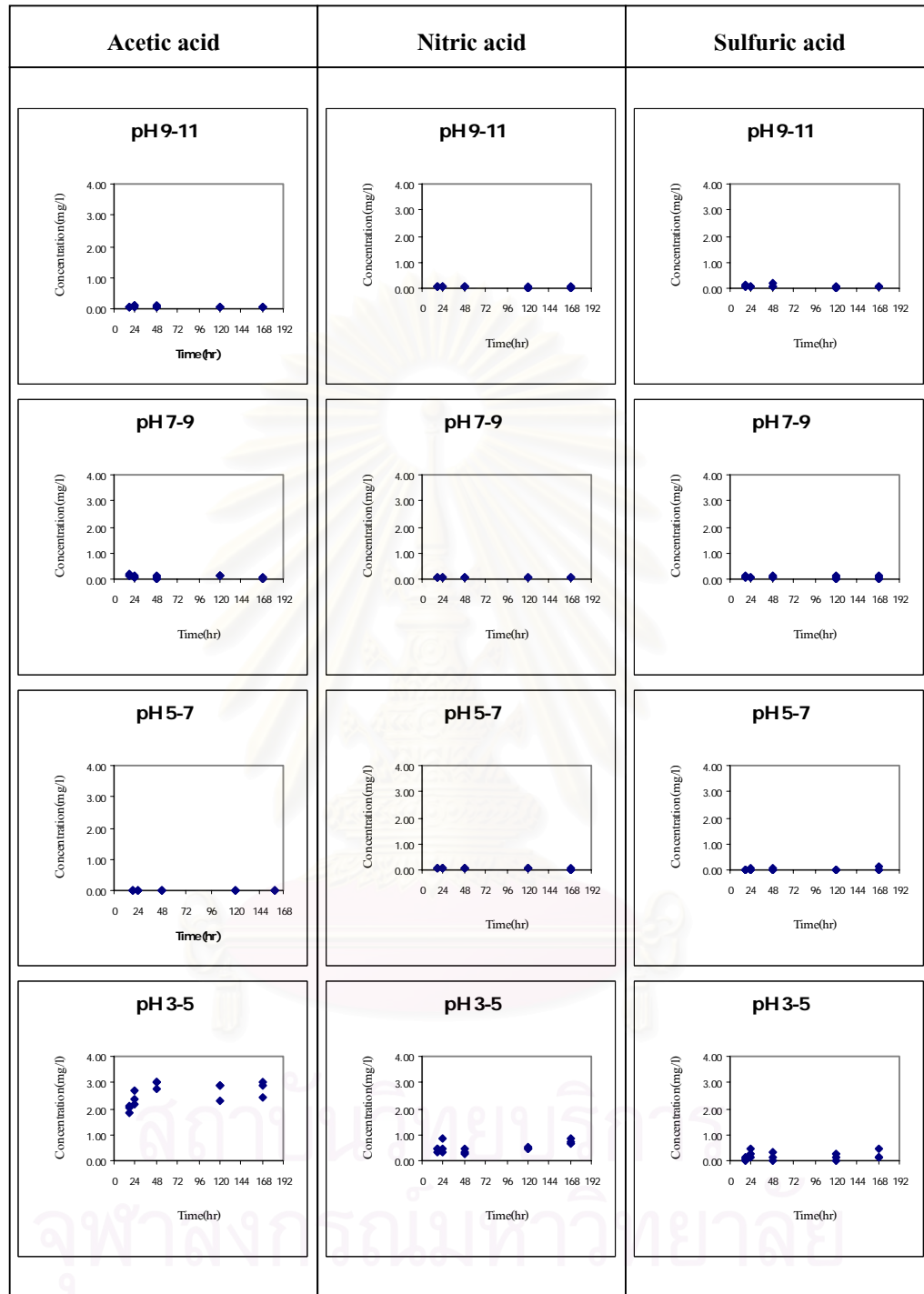


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมกับพีเอชต่าง ๆ โดยกรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก

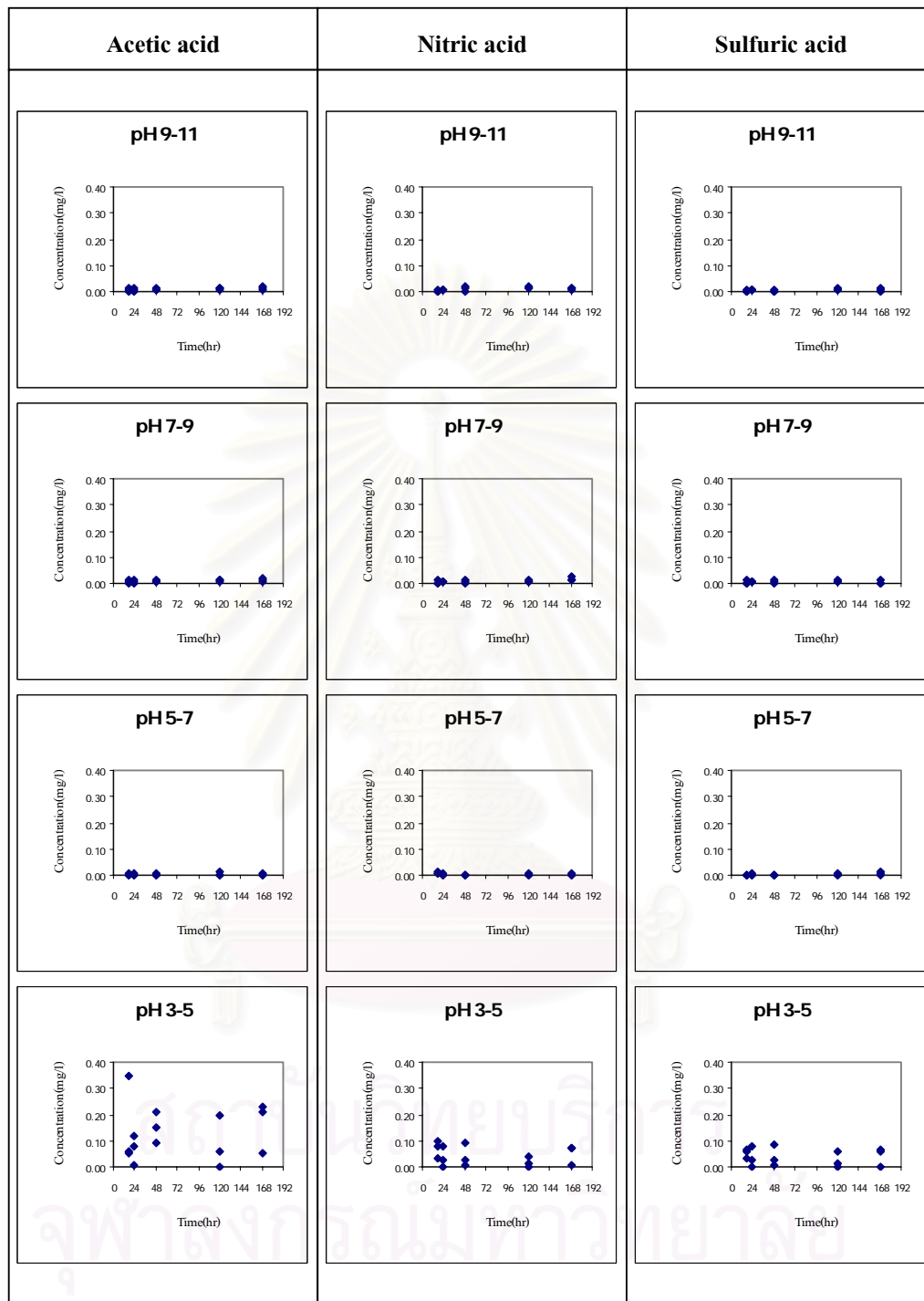
4.9.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของโครเมียมที่ชะละลายออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด

การทดลองในช่วงพีเอช 4 ช่วงคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยการควบคุมพีเอชสุดท้ายตลอดการทดลองด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก มีการแปรผันช่วงเวลาทั้งหมด 5 ค่าการทดลอง คือ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของโครเมียม

จากรูปที่ 4.19 และ 4.20 แสดงผลการทดลองการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายจากตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างทำก้อนแข็ง พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมที่ชะละลายมีค่าน้อยตลอดการทดลองในช่วงพีเอช 9-11 7-9 และ 5-7 ซึ่งเป็นผลมาจากโครเมียมจะสามารถละลายได้ดีในสภาวะกรดโดยในช่วงพีเอช 3-5 ที่พบความเข้มข้นของโครเมียมในปริมาณสูงกว่าช่วงพีเอชอื่นๆ แต่ไม่มีแนวโน้มที่ชัดเจนในการชะละลาย ยกเว้นการชะละลายโดยกรดอะซิติกจากตัวอย่างปรับเสถียรที่มีแนวโน้มชะละลายมากขึ้นในระยะเวลา 48 ชม. และคงที่ในระยะเวลา 120 และ 168 ชม. แสดงว่าการเกิดระยะเวลาในการชะละลายมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของโครเมียมกับกรดอะซิติก และจากการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายทำให้มีตัวอย่างในการทดลอง 15 ตัวอย่างต่อ 1 ช่วงพีเอช ซึ่งสามารถพิจารณาความสามารถสูงสุดในการชะละลายจากตัวอย่างที่มีความเข้มข้นกระจายตัวจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างได้ โดยความเข้มข้นสูงสุดที่พบจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรดที่ส่งผลต่อตัวอย่างนั้นๆ ด้วย โดยกรดอะซิติกนั้นมีผลทำให้การชะละลายของโครเมียมมีค่าสูงสุดทั้งในตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างก้อนแข็ง



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างก้อนแข็ง

4.9.3 เปรียบเทียบการชะละลายออกมาของโครเมียม

เมื่อพิจารณาความสามารถในการชะละลายของตะกอนสารประกอบของโครเมียมนั้น โดยส่วนใหญ่สามารถชะละลายได้ดีใช้สภาวะกรด การละลายออกมาของโครเมียมจะเกิดขึ้นที่พีเอชน้อยกว่า 6-7 ซึ่งก็มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลอง ก็คือในการทดลองนั้นจะมีการชะละลายออกมาของตะกั่วในพีเอชน้อยกว่า 6 ในตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด

ความเข้มข้นของโครเมียมที่เกิดจากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับ การทดลองโดยน้ำกลั่น การทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311(TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) พบว่าความเข้มข้นของโครเมียมมีค่าน้อยดังตารางที่ 4.21 คือในตัวอย่างปรับเสถียรมีค่าไม่เกินร้อยละ 1 และในตัวอย่างก้อนแข็งมีค่าไม่เกินร้อยละ 7 ของการชะละลายโดยกรดอะซิติกซึ่งชะละลายโครเมียมออกมามากที่สุด ทั้งในตัวอย่างปรับเสถียร และตัวอย่างก้อนแข็ง การเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดอะซิติกในรูปโลหะอะซิเตดนั้นส่งผลต่อการชะละลายออกมาของโครเมียมมากที่สุด โดยกรดชนิดอื่น ๆ นั้นมีผลต่อตัวอย่างเพียงบางส่วน เมื่อพิจารณาร่วมกับการชะละลายออกมาของแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร พบว่าแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร ซึ่งมีการชะละลายออกมาได้สูงที่สุดใกล้เคียงกัน ในกรดทุกชนิดการทดลองในการปรับพีเอชโดยกรดไนตริกมีการชะละลายออกมามากที่สุด แต่พบว่าการชะละลายได้สูงที่สุดของโครเมียมนั้นเกิดจากการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอช แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นพวกสารควบคุมพีเอชในการทดสอบเท่านั้นเพื่อทำให้พีเอชของน้ำชะละลายมีค่าสูงเพื่อป้องกันสภาวะกรดที่จะทำให้โครเมียมชะละลายออกมาเท่านั้น ไม่ได้มีความสัมพันธ์กับการชะละลายออกมาของโครเมียม ส่วนในการทดลองของก้อนแข็งพบโครเมียมในปริมาณน้อยคือมีค่าไม่เกิน 0.3 มก./ล. เนื่องจากในตัวอย่างของตัวอย่างก้อนแข็งมีโครเมียมในปริมาณน้อย ในตัวอย่างก้อนแข็งนี้จะพบว่าโครเมียมมีการชะละลายออกมามากที่สุดในการชะละลายโดยกรดอะซิติก แม้ว่าผลมาจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) แสดงให้เห็นว่าโครเมียมนั้นเป็นโลหะหนักที่จับอยู่ที่ผิวนอกของก้อนแข็งมากกว่าที่จะอยู่ในโครงสร้างของก้อนแข็งซึ่งจะเป็นลักษณะเดียวกับตัวอย่างปรับเสถียรที่ไม่มีการห่อหุ้มโลหะหนักโดยโครงสร้างของซีเมนต์ ทำให้เกิดการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดอะซิติกในรูปโลหะอะซิเตด ส่งผลต่อการชะละลายออกมามากที่สุดของโครเมียมจากตัวอย่าง

ในปัจจุบันมีการปรับปรุงประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับใหม่โดยมีการใช้ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แทนที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งในการทดสอบการชะละลายมีการเปลี่ยนมาใช้สารชะละลายเป็น โซเดียมซิเตรด (Sodium citrate) ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นสารชะละลายชนิดใหม่แทนการใช้การใช้น้ำฝนกรด

สังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) มีการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 แทนที่การใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 ต่อ 1 และมีการใช้ระยะเวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้นเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งจากผลที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมพบว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีความเข้มข้นของโครเมียมน้อยกว่าการทดลองในการวิจัยนี้เนื่องจากพีเอชสุดท้ายที่แตกต่างกัน คือพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 แต่การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่ามากกว่าการทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวที่ลดลง เนื่องจากพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบอื่นๆ

เมื่อพิจารณาถึงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ของโครเมียมแล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวเท่ากับ 20 จะได้ความเข้มข้นของโครเมียมเท่ากับ 27 มก./ล. สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร และความเข้มข้น 4 มก./ล. สำหรับตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่พบจากการทดลองมีความเข้มข้นร้อยละ 11.21 และ 6.57 ของความเข้มข้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF แสดงว่าโครเมียมยังอยู่ในรูปแบบอื่นอีกปริมาณมาก

ตารางที่ 4.21 เปรียบเทียบความเข้มข้นของโครเมียมจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น(มก./ล.)	
	ตัวอย่างปรับเสถียร	ตัวอย่างก้อนแข็ง
กรดอะซิติก	3.0269*	0.2627*
กรดไนตริก	0.8060	0.0899
กรดซัลฟิวริก	0.3868	0.0774
น้ำกลั่น	< 0.0005	< 0.0005
TCLP	0.0161	0.0180
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	0.0179	0.0172
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548)	0.0267	0.0314

4.10 การชะละลายของแบเรียม

4.10.1 อิทธิพลของชนิดของกรดและพีเอชสุดท้ายที่มีต่อความเข้มข้นของแบเรียม

รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการปรับเสถียร พบว่าการชะละลายของแบเรียมโดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชนั้น มีการชะละลายออกมา 2 ช่วงคือ ในช่วงพีเอชสูงและพีเอชต่ำ ส่วนพีเอชที่เป็นกลางจะมีการชะละลายค่อนข้างน้อย ในการชะละลายโดยใช้กรดไนตริกในการปรับพีเอชนั้น แบเรียมมีการชะละลายออกมาในช่วงพีเอชสูงเท่านั้น และในการใช้กรดซัลฟิวริกในการชะละลายนั้นมีการชะละลายออกมาในปริมาณน้อยมากตลอดการทดลอง ซึ่งการชะละลายโดยกรดอะซิติกนั้นมีผลทำให้แบเรียมชะละลายมากที่สุดเท่ากับ 1.49 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 4.33

ตารางที่ 4.22 ความเข้มข้นแบเรียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างปรับเสถียร

พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของแบเรียมที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
4.39	1.4472	-	-
4.43	1.4761	-	-
4.33	1.4887	-	-
12.18	-	0.6197	-
11.00	-	0.6328	-
10.58	-	0.9304	-
11.24	-	-	0.0482
9.17	-	-	0.0551
11.30	-	-	0.0649

รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองของการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมที่ละลายออกมาที่พีเอชสุดท้ายต่าง ๆ โดยปรับพีเอชในการชะละลายด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกโดยตัวอย่างเป็นของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง พบว่าการชะละลายของแบเรียมนั้นมีความเข้มข้นค่อนข้างน้อย คือมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.42 มก./ล. ที่พีเอชสุดท้ายเท่ากับ 3.86 จากการชะละลายโดยกรดไนตริก ดังตารางที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการ

ชะละลายโดยกรดทั้ง 3 ชนิดนี้มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยการชะละลายจากตัวอย่างก้อนแข็งนี้ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจนในการชะละลาย โดยการชะละลายมีค่าเท่าๆกันในทุกๆ พีเอช

ตารางที่ 4.23 ความเข้มข้นแบเรียมในน้ำชะละลายที่พบสูงสุดในตัวอย่างก้อนแข็ง

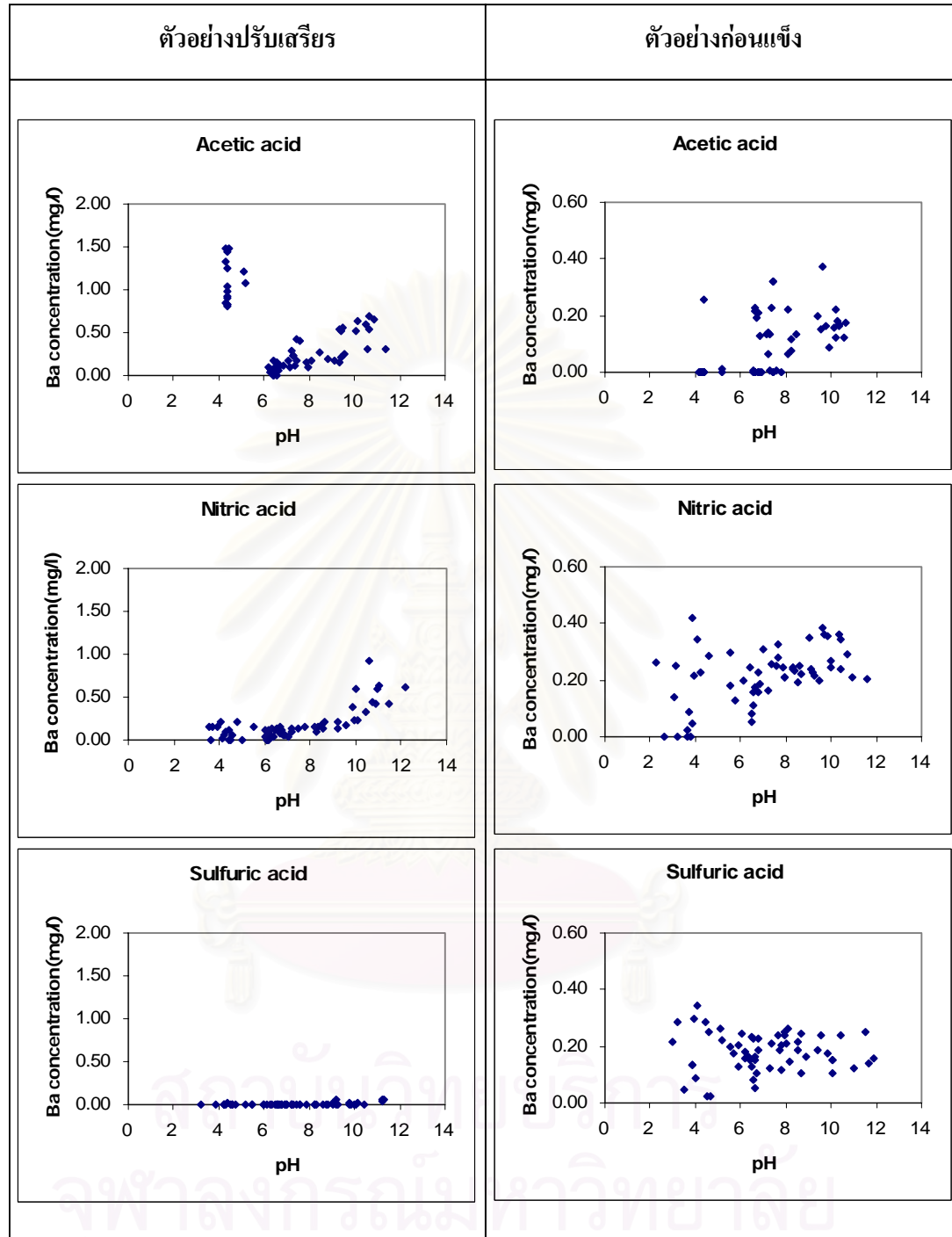
พีเอชสุดท้าย	ความเข้มข้นของแบเรียมที่ละลายออกมา(มก./ล.)		
	กรดอะซิติก	กรดไนตริก	กรดซัลฟิวริก
7.41	0.3178	-	-
7.46	0.3198	-	-
9.65	0.3701	-	-
10.38	-	0.3626	-
9.66	-	0.3867	-
3.86	-	0.4215	-
4.44	-	-	0.2859
3.96	-	-	0.2965
4.06	-	-	0.3410

จากการทดลองพบว่ากรดอะซิติกส่งผลทำให้แบเรียมชะละลายมากที่สุดเนื่องจากการใช้กรดอะซิติกปรับพีเอชในการทดลองนั้นทำให้โลหะหนักเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตตมีผลทำให้เกิดการชะละลายในสภาวะกรด ซึ่งจากการบำบัดโดยการปรับเสถียรนั้นเป็นเพียงการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชในสภาวะกรดเท่านั้น โดยไม่มีการสร้างโครงสร้างป้องกันการชะละลายอย่างเช่นปูนซีเมนต์ในการบำบัดแบบก้อนแข็ง การปรับเสถียรจะใช้เพียงปูนขาวในการบำบัดเท่านั้น โดยแบเรียมในตัวอย่างนั้นจะถูกความคุมการชะละลายออกมาโดยปูนขาวซึ่งทำให้พีเอชของน้ำชะละลายมีค่าสูง โดยแบเรียมจะมีการละลายออกมาทั้งในพีเอชสูงและพีเอชต่ำซึ่งตะกอนสารประกอบของแบเรียมอาจจะอยู่ในรูปของ $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ ซึ่งสามารถชะละลายได้ดีในทุกพีเอช $BaSO_4$ การละลายมีค่าต่ำในทุกพีเอช แสดงว่าตะกอนจากตัวอย่างจะอยู่ในรูป $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ โดยเป็นผลมาจากการบำบัดที่ทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งละลายออกมาได้ดีในทุกพีเอชแล้วเมื่อตะกอนซัลเฟตในรูปอื่นๆละลายออกมาเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นทำให้เกิดตะกอน $BaSO_4$ ที่มีการชะละลายน้อยลงตามลำดับ และในพีเอชต่ำมีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดอะซิติกทำให้มีการชะละลายออกมาของแบเรียมในรูปแบเรียมอะซิเตต ส่วนการใช้กรดซัลฟิวริกในการปรับพีเอชนั้นพบว่าการทดลองมีการชะละลายของแบเรียมน้อยมากตลอดการทดลองอาจเป็นผลมาจากการเกิดสารประกอบแบเรียมซัลเฟตซึ่งมีความสามารถในการละลายออกมต่ำทุกพีเอช

ในกรณีตัวอย่างก่อนแจ้งพบว่าการชะละลายของแบเรียมในตัวอย่างก่อนแจ้งนั้นพบความเข้มข้นของแบเรียมใกล้เคียงกันมากในกรดทั้ง 3 ชนิดที่ใช้ในการทดลอง แสดงว่าชนิดของกรดที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีผลต่อการชะละลายออกมาของแบเรียมอย่างชัดเจน โดยปัจจัยหลักในการชะละลายออกมาจะขึ้นอยู่กับพีเอชสุดท้ายเท่านั้น โดยตะกอนจากตัวอย่างจะอยู่ในรูป $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ โดยเป็นผลมาจากการบำบัดที่ทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ซึ่งสามารถละลายออกมาได้ดีในทุกพีเอช



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

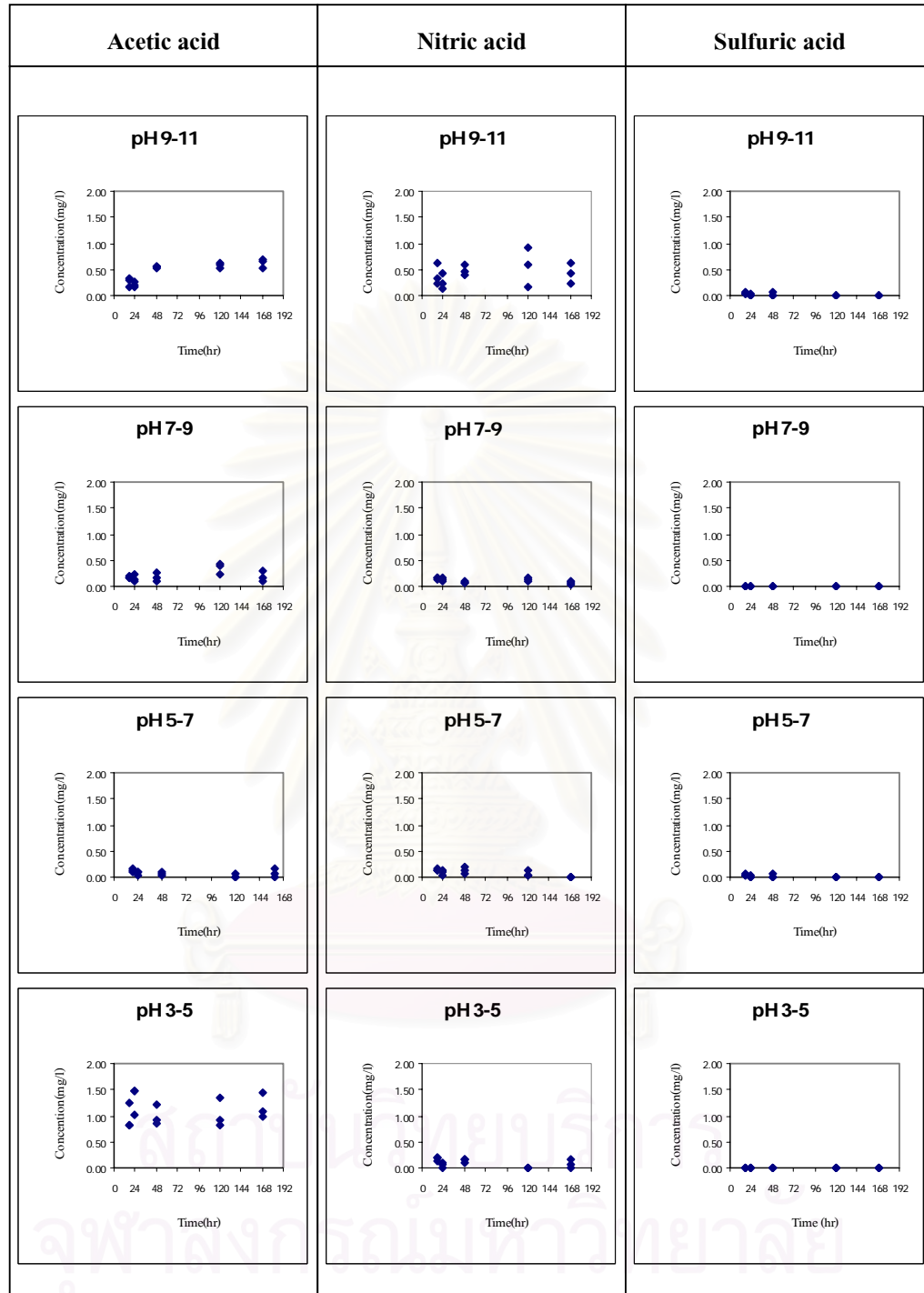


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมกับพีเอชต่าง ๆ โดยกรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก

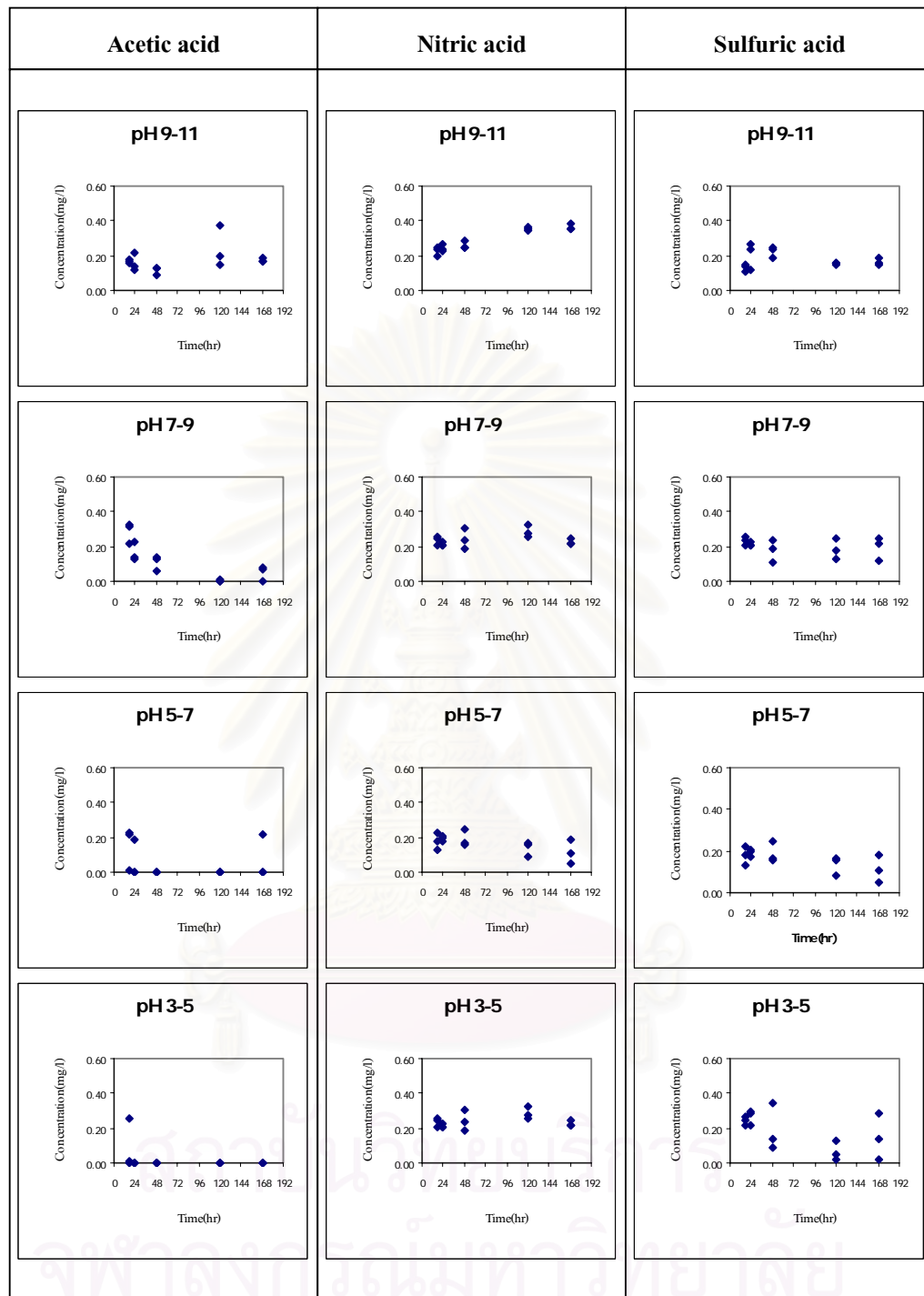
4.10.2 อิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของแบเรียมที่ชะละลายออกมาในช่วงพีเอชที่กำหนด

การทดลองในช่วงพีเอช 4 ช่วงคือ 9-11 7-9 5-7 และ 3-5 โดยการควบคุมพีเอชสุดท้ายตลอดการทดลองด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก มีการแปรผันช่วงเวลาทั้งหมด 5 ค่าการทดลอง คือ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง เพื่อศึกษาอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อความเข้มข้นของแบเรียม

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงผลการทดลองการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายจากตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างทำก่อนแข็ง พบว่าแบเรียมจะมีแนวโน้มการชะละลายที่ไม่ชัดเจนเมื่อทำการแปรผันเวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นแบเรียมที่พบมีลักษณะค่อนข้างคงที่และมีการกระจายตัวในแต่ละช่วงพีเอช ซึ่งจากการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายทำให้มีตัวอย่างในการทดลอง 15 ตัวอย่างต่อ 1 ช่วง พีเอช ซึ่งสามารถพิจารณาความสามารถสูงสุดในการชะละลายจากตัวอย่างที่มีความเข้มข้นกระจายตัวจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างได้ ส่วนในการใช้กรดซัลฟิวริกปรับพีเอชจากตัวอย่างปรับเสถียรพบความเข้มข้นน้อยตลอดการทดลองเนื่องอาจเกิดตะกอนแบเรียมซัลเฟตซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำ



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างปรับเสถียร



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของแบเรียมที่ชะละลายออกมากับระยะเวลาในการชะละลายต่างๆ ในช่วงพีเอชที่กำหนด จากตัวอย่างก้อนแข็ง

4.10.3 เปรียบเทียบการชะละลายออกมาของแบเรียม

เมื่อพิจารณาความสามารถในการชะละลายออกมาจากตะกอนสารประกอบของแบเรียมในรูปของ $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ ซึ่งเป็นจากการบำบัดที่ทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถชะละลายได้ดีในทุกพีเอช และ $BaSO_4$ การละลายมีค่าต่ำในทุกพีเอช ซึ่งในตัวอย่างปรับเสถียรพบว่าการชะละลายออกมาทั้งช่วงพีเอชสูงและพีเอชต่ำ แสดงว่าตะกอนจากตัวอย่างอาจจะอยู่ในรูป $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ จากกระบวนการบำบัดซึ่งละลายออกมาได้ดีในทุกพีเอชแล้วเมื่อตะกอนซัลเฟตในรูปอื่นๆละลายออกมาเมื่อพีเอชลดลงทำให้เกิดตะกอน $BaSO_4$ ที่มีการชะละลายน้อยลงตามลำดับ และกรดอะซิติกส่งผลทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปแบเรียมอะซิเตตในสภาวะกรด ส่วนในตัวอย่างก้อนแข็งมีการละลายได้ดีในทุกๆพีเอชซึ่งเป็นผลมาจากตะกอนจากตัวอย่างจะอยู่ในรูป $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการบำบัดโดยไม่เกิดตะกอนรูปอื่นๆ อย่างเช่นในตัวอย่างปรับเสถียรเนื่องจากแบเรียมในตัวอย่างก้อนแข็งมีปริมาณน้อยคือมีค่าไม่เกิน 0.45 มก./ล.

ความเข้มข้นของแบเรียมที่เกิดจากการทดลองเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าการทดลองโดยนักสิ่งแวดล้อม การทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) พบว่าความเข้มข้นของแบเรียมมีค่าดังตารางที่ 4.24 คือในตัวอย่างปรับเสถียรมีค่าไม่เกินร้อยละ 15 ของการชะละลายโดยกรดอะซิติกซึ่งชะละลายแบเรียมออกมามากที่สุด โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับกรดอะซิติกนั้นส่งผลต่อการชะละลายของแบเรียมมากที่สุดเท่านั้น เมื่อพิจารณาร่วมกับการชะละลายออกมาของแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร พบว่าแคลเซียมซึ่งเป็นสารประกอบหลักในการปรับเสถียร ซึ่งมีการชะละลายออกมาได้สูงที่สุดใกล้เคียงกัน ในกรณีทุกชนิดจากการทดลองในการปรับพีเอช (จากรูปที่ 4.1) แต่พบว่าการชะละลายสูงที่สุดของแบเรียมนั้นเกิดจากการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอช แสดงว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นพวกสารควบคุมพีเอชในการทดสอบเท่านั้นเพื่อทำให้พีเอชของน้ำชะละลายมีค่าสูงเพื่อป้องกันสภาวะกรดที่จะทำให้แบเรียมชะละลายออกมาเท่านั้น ส่วนในกรณีของก้อนแข็งพบแบเรียมในปริมาณน้อยคือมีค่าไม่เกิน 0.45 มก./ล. เนื่องจากในตัวอย่างก้อนแข็งมีแบเรียมในปริมาณน้อย ในตัวอย่างก้อนแข็งนี้จะพบว่าแบเรียมมีการชะละลายออกมามากที่สุดในการชะละลายโดยกรดไนตริก ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถของกรดไนตริกในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) แต่ถึงอย่างไรแบเรียมในตัวอย่างก้อนแข็งสามารถละลายออกมาได้ดีในทุกการทดสอบและการทดลองที่ทำการศึกษาดังตารางที่ 4.24 แสดงว่าตะกอนส่วนใหญ่อยู่ในรูป $Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$ ซึ่งสามารถละลายออกมาได้ดีในทุกพีเอช

ในปัจจุบันมีการปรับปรุงประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับใหม่โดยมีการใช้ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แทนที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ซึ่งในการทดสอบการชะละลายมีการเปลี่ยนมาใช้สารชะละลายเป็น โซเดียมซิเตรด (Sodium citrate) ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นสารชะละลายชนิดใหม่ แทนการใช้การใช้น้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบไปด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) มีการใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 10 ต่อ 1 แทนที่การใช้อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง 20 ต่อ 1 และมีการใช้ระยะเวลาในการชะละลายเพิ่มมากขึ้นเป็น 48 ชั่วโมง ซึ่งจากผลที่ทำการศึกษาเปรียบเทียบเพิ่มเติมพบว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีความเข้มข้นของแบเรียมน้อยกว่าการทดลองในการวิจัยนี้เนื่องจากพีเอชสุดท้ายที่แตกต่างกัน คือพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 แต่การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่ามากกว่าการทดสอบของ U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวที่ลดลง เนื่องจากพีเอชสุดท้ายของการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 มีค่าประมาณ 12 ซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบอื่นๆ

เมื่อพิจารณาถึงผลจากการวิเคราะห์โดยเครื่อง XRF ของแบเรียมแล้วนำมาคำนวณหาความเข้มข้นจากอัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลวเท่ากับ 20 จะได้ความเข้มข้นของแบเรียมเท่ากับ 27 มก./ล. สำหรับตัวอย่างปรับเสถียร และ 28.5 มก./ล. สำหรับตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งความเข้มข้นสูงสุดที่พบจากการทดลองชะละลายออกมาประมาณร้อยละ 1.36 และ 5.47 ของความเข้มข้นที่วิเคราะห์โดยเครื่อง XRF แสดงว่าแบเรียมยังอยู่ในรูปแบบอื่นอีกปริมาณมาก

ตารางที่ 4.24 เปรียบเทียบความเข้มข้นของแบเรียมจากการชะละลายแบบต่างๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น(มก./ล.)	
	ตัวอย่างปรับเสถียร	ตัวอย่างก้อนแข็ง
กรดอะซิติก	1.4706*	0.3359
กรดไนตริก	0.7276	0.3902*
กรดซัลฟิวริก	0.0561	0.3078
น้ำกลั่น	0.2068	0.2520
TCLP	0.1981	0.2132
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	0.1910	0.2573
ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ.2548)	0.3754	0.2985

4.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการชะละลายออกมาของโลหะหนัก

4.11.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการชะละลาย

ผลของการศึกษาพบว่าระยะเวลาที่ใช้ในการชะละลายที่เพิ่มขึ้นนั้นมีผลต่อการทดลองในบางตัวอย่างเท่านั้นคือ มีผลต่อการชะละลายโดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอชจากตัวอย่างปรับเสถียรแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาในการชะละลายมีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปโลหะอะซิเตด ซึ่งระยะเวลาในการชะละลายนั้นเป็นปัจจัยควบคู่กับกรดที่ใช้ในการชะละลายและพีเอชในการชะละลายที่จะส่งผลให้มีการชะละลายมากขึ้น โดยมีผลต่อตัวอย่างปรับเสถียรจากการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอช การแปรผันเวลาในการชะละลายแสดงให้เห็นถึงการชะละลายของโลหะหนักนั้นเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วหรือไม่ ผลจากการทดลองที่ทำการชะละลายโดยการใช้ น้ำกลั่น เวลาที่ทำการชะละลายที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักเกือบทุกชนิดที่ทำการทดลองมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในตัวอย่างทั้ง 2 ชนิด ในการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายนั้นยังแสดงถึงความสามารถสูงสุดในการชะละลายของโลหะหนักในตัวอย่างที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยพบความเข้มข้นที่สูงในบางอย่างที่ทำการทดลอง ซึ่งการทดลองจะทำการทดลอง 3 ชั่วโมง และแปรผันระยะเวลาการชะละลาย 5 ช่วงเวลา ทำให้มีจำนวนตัวอย่าง 15 ตัวอย่างใน 1 ชั่วโมงพีเอชในการชะละลายโดยกรด 1 ชนิด ซึ่งเพียงพอที่ตรวจสอบสามารถสูงสุดในการชะละลายของโลหะหนักจากตัวอย่างที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยในปัจจุบันมีการเปลี่ยนแปลงให้มีการใช้เวลาในการชะละลายมากขึ้นในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 จาก 18 ชั่วโมง เปลี่ยนมาใช้ระยะเวลาในการชะละลาย 48 ชั่วโมง

4.11.2 ของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย

ผลจากการศึกษาของของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย คือ น้ำกลั่นซึ่งจะทำการปรับพีเอชด้วยกรด 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริกซึ่งพบว่าลักษณะเฉพาะของกรดแต่ละชนิดที่ส่งผลต่อของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งนั้นมีลักษณะต่างกันไปคือ ในกรดอะซิติกนั้นจะส่งผลต่อของเสียที่ผ่านการปรับเสถียรทำให้มีการชะละลายของโลหะหนักสูงที่สุด เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนและชะละลายออกมาในรูปโลหะอะซิเตดในสภาวะกรด โดยจากการทำบัต โดยการปรับเสถียรนั้นเป็นเพียงการเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงพีเอชที่จะอยู่ในสภาวะกรดเท่านั้น โดยไม่มีการสร้างโครงสร้างป้องกันการชะละลายอย่างเช่นปูนซีเมนต์ในการบำบัดแบบก้อนแข็ง การปรับเสถียรจะใช้เพียงปูนขาวในการบำบัดเท่านั้น โลหะหนักที่อยู่ในของเสียผ่านการปรับเสถียรนั้นจึงมีเพียงพีเอชที่คอยควบคุมการชะละลายออกมาของโลหะหนัก ส่วนในกรณีของก้อนแข็งกรดไนตริกมีความสามารถในการกัดกร่อนต่อปูนซีเมนต์สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก (Asavapisit และคณะ, 2002) และกรดไนตริกยังมีความสามารถในการชะละลายซิลิกาออกมาซึ่งเป็นสารประกอบหลักอีกชนิดหนึ่งในโครงสร้างของปูนซีเมนต์ (Halim และคณะ, 2003) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างปูนซีเมนต์ถูกทำลายและทำให้สารชะละลายสามารถเข้าถึงโลหะหนักที่อยู่ภายในโครงสร้างได้ ซึ่งการชะละลายของโลหะหนักนั้นจะสัมพันธ์กับพีเอชคือ สามารถชะละลายได้ดีในพีเอชเป็นกรด เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการทำลายโครงสร้างของกรดไนตริกได้สอดคล้องกับการชะละลายออกมาของโลหะหนักจากของเสียผ่านการทำก้อนแข็ง ทำให้พบว่าโลหะหนักที่ศึกษาในของเสียทำก้อนแข็งนั้นแล้วถูกห่อหุ้มโดยโครงสร้างของปูนซีเมนต์ซึ่งป้องกันการเข้าถึงของสารชะละลายต่างๆ ดังนั้นกระบวนการการชะละลายจากก้อนแข็งที่มีการชะละลายของโลหะหนักที่มีค่ามากที่สุดจึงต้องมีการทำลายโครงสร้างของตัวอย่างควบคู่กับการควบคุมพีเอชให้อยู่ในสภาวะกรดด้วย

4.11.3 พีเอชในการชะละลาย

ค่าความแตกต่างของพีเอชต่อการชะละลายออกมาของโลหะนั้น มีผลโดยตรงต่อกระบวนการดูดซับ/การหลุดออกมาจากการดูดซับ (adsorption/desorption) และการละลายออกมา (dissolution) จากการศึกษาพบว่า ทองแดง สังกะสี และตะกั่ว การชะละลายออกมามีขึ้นอยู่กับกลไกการละลายออกมาและการตกผลึก (solubility/precipitation) ของธาตุนั้นๆ (Al-Abed และคณะ, 2005) ซึ่งผลจากการทดลองพบว่ากระบวนการบำบัดทั้งการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งนั้นทำให้น้ำชะละลายนั้นมีพีเอชสูงประมาณ 12 ซึ่งทำให้โลหะชนิดต่างๆ อยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ เมื่อพีเอชในการทดลองลดลงการชะละลายก็มีการชะละลายเพิ่มขึ้นในทุกๆ ธาตุที่ทำการศึกษา โดยโลหะหนักที่ทำการทดลองจะมีการชะละลายออกมาได้ดีในสภาวะกรด โดยการ

ชะละลายออกมาจะมีความเข้มข้นมากขึ้นขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของการบำบัด ชนิดของสารชะละลาย และพีเอชสุดท้ายในการทดลอง

4.11.4 ลักษณะของตัวอย่างที่ทำการศึกษา

ในการทดลองมีตัวอย่างอยู่ 2 ลักษณะคือ ตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างก้อนแข็ง ซึ่งมีลักษณะในการบำบัดที่แตกต่างกันคือ ตัวอย่างปรับเสถียรจะเป็นการนำปูนขาวผสมรวมกับกากของเสียซึ่งในการศึกษาพบว่ากรดอะซิติกมีผลต่อตัวอย่างปรับเสถียรในการชะละลายออกมาของโลหะหนักมากกว่าสารชะละลายชนิดอื่นๆ ที่ทำการทดลอง ส่วนในตัวอย่างก้อนแข็งนั้นจะเป็นการบำบัด หลอดฟลูออเรสเซนต์ โดยการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งผลการจากการศึกษาพบว่ากรดไนตริกจะมีผลต่อตัวอย่าง ก้อนแข็งในการชะละลายของโลหะหนักมากกว่าสารชะละลายชนิดอื่นๆ ที่ทำการทดลอง จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าลักษณะของตัวอย่างการทดลองนั้นจะมีความสัมพันธ์กับชนิดของสาร ชะละลายที่จะส่งผลต่อการชะละลายของโลหะหนัก

4.12 พิจารณาเปรียบเทียบกับสถานะที่ใช้การทดสอบการชะละลาย

ในการทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ นั้นเป็นการจำลองสถานะที่สามารถเกิดขึ้นได้ในการ ฝังกลบ คือ ผลของฝนกรดที่พีเอชประมาณ 4-5 ที่ทำให้มีการชะละลายของของเสียในหลุมฝังกลบ และการเกิดกรดอะซิติกที่พีเอชประมาณ 3-5 ในหลุมฝังกลบที่มีกระบวนการแอนแอโรบิกจากขยะ มูลฝอย ซึ่งใช้ในการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311(TCLP) ตามลำดับ จากผลจากการศึกษาพบว่าค่าความเป็นด่างที่เกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัด นั้นเป็นผลทำให้พบความเข้มข้นที่น้อยกว่าการศึกษาในงานวิจัยนี้ในปริมาณมากซึ่งในการศึกษานี้ ได้ทำการควบคุมพีเอชตลอดการทดลอง ซึ่งโดยวัตถุประสงค์ของการทดสอบตามมาตรฐานนั้น ต้องการให้น้ำชะละลายมีสถานะตามที่ศึกษาไว้ โดยค่าความเป็นด่างของตัวอย่างทำให้น้ำชะละลาย มีพีเอชสูงถึงประมาณ 12 ซึ่งจะเห็นได้ควรมีการควบคุมค่าพีเอชในการชะละลายในระหว่างการ ทดสอบการชะละลาย โดยหลังจากของเสียผ่านกระบวนการทดสอบการชะละลายแล้วจะถูกนำไป ฝังกลบลงในหลุมฝังกลบต่อไป โดยไม่ได้เป็นกำจัดของเสียอย่างถาวร ของเสียยังคงพร้อมที่จะ ชะละลายออกมาเมื่อมีสถานการณ์หรือสถานะที่เหมาะสม

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการวิจัยการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งครั้งนี้ สามารถสรุปงานวิจัยและมีข้อเสนอแนะในการศึกษาและวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง โดยใช้กรดในการปรับพีเอช 3 ชนิดคือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก และทำการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายเท่ากับ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง สามารถสรุปชนิดของกรดที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆได้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ชนิดของกรดที่มีผลต่อการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ

ธาตุ	ชนิดของกรดที่ทำให้โลหะหนักชะละลายสูงที่สุด	
	ตัวอย่างปรับเสถียร	ตัวอย่างก้อนแข็ง
Ca	กรดไนตริก	กรดไนตริก
Cu	กรดอะซิติก	กรดไนตริก
Zn	กรดอะซิติก	กรดไนตริก
Ni	มีค่าใกล้เคียงกันในกรดทุกชนิด	-
Pb	กรดอะซิติก	กรดไนตริก
Cr	กรดอะซิติก	กรดอะซิติก
Ba	กรดอะซิติก	กรดไนตริก

การวิจัยนี้ทำการทดลองการชะละลายของโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง ได้ทำการศึกษาโดยการควบคุมพีเอชในการทดลองโดยใช้กรด 3 ชนิด คือ กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ทำการแปรผันระยะเวลาในการชะละลายเท่ากับ 18 24 48 120 และ 168 ชั่วโมง และเปรียบเทียบความเข้มข้นกับการทดลองโดยใช้น้ำกลั่นในการชะละลาย การทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) และการทดสอบตามมาตรฐาน U.S. EPA SW-846 Method 1311 (TCLP) พบว่า

1) พีเอชสุดท้ายที่เกิดขึ้นในการชะละลายเป็นปัจจัยหลักในการชะละลายออกมาของโลหะหนักทุกชนิดที่ทำการศึกษาคือ มีการชะละลายออกมาได้ดีที่สุดในสภาวะกรดช่วงพีเอช 3-5 ของการศึกษาในงานวิจัยนี้

2) ความเป็นต่างของตัวอย่างทำให้การทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ มีค่าน้อยกว่าการทดลองจากการศึกษาในงานวิจัยนี้มาก ดังนั้นในการทดสอบการชะละลายควรมีการควบคุมพีเอชในการทดสอบเพื่อให้การทดสอบการชะละลายเป็นไปตามสภาวะที่การทดสอบตามมาตรฐานนั้นๆ กำหนดขึ้น

3) พีเอชสุดท้ายที่เกิดขึ้นในการชะละลายแม้เป็นปัจจัยหลักในการชะละลายของโลหะหนัก แต่ยังมีปัจจัยควบคู่ที่จะส่งผลให้มีการชะละลายของโลหะหนักมากขึ้นคือ ชนิดของสารชะละลายและระยะเวลาในการชะละลาย โดยขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของตัวอย่างและโลหะหนักแต่ละชนิดที่ทำการศึกษาด้วย

4) การเกิดรูปแบบทางเคมีอื่นๆ ส่งผลต่อการชะละลายออกมาให้มีค่ามากขึ้นหรือน้อยลง คือ การเกิดตะกอนซัลเฟตในการทดลองการชะละลายของแบเรียมที่ทำให้แบเรียมมีการละลายออกมาน้อยเนื่องจากความสามารถละลายน้ำได้ต่ำของแบเรียมซัลเฟต และการใช้กรดอะซิติกในตัวอย่างปรับเสถียรทำให้โลหะหนักเกิดการชะละลายออกมาในรูปของโลหะอะซิเตด

5) การแปรผันระยะเวลาที่ใช้ในการชะละลายนั้นส่งผลต่อการทดลองในบางส่วนเท่านั้น คือ มีผลทำให้การชะละลายของโลหะหนักที่ทำการศึกษาจากตัวอย่างปรับเสถียร โดยการใช้กรดอะซิติกในการปรับพีเอช มีความเข้มข้นมากขึ้นเมื่อระยะเวลาในการชะละลายเพิ่มสูงขึ้น

6) การแปรผันระยะเวลาที่ใช้ในการชะละลายแสดงให้เห็นว่าลักษณะของโลหะหนักที่ปนเปื้อนในตัวอย่างนั้นมีการปนเปื้อนอย่างไม่สม่ำเสมอหรือมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันจากผลการทดลองที่พบว่าการชะละลายของโลหะหนักส่วนใหญ่เป็นรูปแบบกระจายตัวดังนั้นจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดลองและทดสอบตามมาตรฐานต่างๆ ควรจะต้องมีจำนวนตัวอย่างที่มากเพียงพอที่จะครอบคลุมลักษณะตัวอย่างทั้งหมดเพื่ออธิบายโลหะหนักที่สามารถชะละลายออกมาได้

7) กรดอะซิติกส่งผลทำให้โลหะหนักในตัวอย่างปรับเสถียรชะละลายออกมามากที่สุดเนื่องจากผลจากความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนในรูปโลหะอะซิเตดและกรดไนตริกส่งผลทำให้โลหะหนักในตัวอย่างก้อนแข็งชะละลายออกมามากที่สุดเนื่องจากกรดไนตริกมีความสามารถในการกัดกร่อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดอะซิติกและกรดซัลฟิวริก

8) โลหะหนักบางชนิดมีการชะละลายที่แตกต่างออกไปคือ โครเมียมมีการชะละลายได้ดีโดยการใช้กรดอะซิติกทั้งในตัวอย่างปรับเสถียรและตัวอย่างก้อนแข็ง และนิกเกิลจากตัวอย่างปรับเสถียรมีการชะละลายออกมาใกล้เคียงกันในกรดทุกชนิดที่ทำการศึกษานงานวิจัยนี้

9) เมื่อทำการเปรียบเทียบการชะละลายของโลหะหนักจากการทดลองและจากการทดสอบตามมาตรฐานนั้นพบว่า การทดสอบการชะละลายด้วยสารชะละลายชนิดต่างๆ นั้น ไม่สามารถวิเคราะห์การชะละลายออกมาของโลหะหนักด้วยสารชะละลายเพียงชนิดเดียวได้ โดยสารชะละลายต่างๆ จะมีลักษณะเฉพาะที่มีผลต่อโลหะหนักและการบำบัดแต่ละชนิด

5.2 ความสำคัญทางด้านวิศวกรรม

- 1) เป็นแนวทางเพื่อใช้ในการออกแบบในการบำบัดของเสียอันตรายด้วยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง
- 2) เป็นแนวทางเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาการทดสอบการชะละลายสำหรับการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) ศึกษาของเหลวชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการชะละลายที่สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากการฝกกลบของเสียอันตราย หรือของเหลวที่ใช้ตามมาตรฐานอื่น เช่น ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2548 มีการใช้ sodium citrate เป็นสารชะละลาย
- 2) ลักษณะตัวอย่างที่ส่วนใหญ่ที่ทำการศึกษานั้นมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกันดังนั้นควรมีการเพิ่มจำนวนตัวอย่างในแต่ละการทดลองให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มถูกต้องในการวิเคราะห์ผลการทดลองได้อย่างชัดเจน
- 3) ศึกษาตัวอย่างในลักษณะต่างๆ ที่ยังไม่ได้ทำการศึกษา เช่น ตัวอย่างที่บำบัดแผลงจรรยาไฟฟ้า ตัวอย่างที่บำบัดสัดจากโรงงานชุบโลหะ เนื่องจากลักษณะเฉพาะของการบำบัดที่ส่งผลต่อการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ โดยสารชะละลายชนิดต่างๆ นั้นยังไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2539. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่2. กำหนดคุณลักษณะน้ำทิ้ง
ที่ระบายออกจากโรงงานอุตสาหกรรม

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2540. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. ฉบับที่6. การกำจัดปฏิจุลหรือ
วัสดุที่ไม่ใช่แล้ว

กระทรวงอุตสาหกรรม. 2548. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม. การกำจัดปฏิจุลหรือ
วัสดุที่ไม่ใช่แล้ว. เล่มที่ 123 ตอนพิเศษ 11 ง

บริษัท บริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (มหาชน). 2548. ศูนย์กำจัดกาก
อุตสาหกรรม (แสมดำ). เอกสารแนะนำบริษัท. กรุงเทพมหานคร.

บุญยง โล่ห์หวัดวน. เทคโนโลยีการบำบัดของเสียอันตราย. เอกสารประกอบการเรียนการสอน
ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539

ภัทร กฤตานุสรณ์. อิทธิพลของสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อการทำเป็นก้อนแข็งของตะกอนโลหะ
หนักจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ,

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546
เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. ของเสียอันตราย เทคโนโลยีการกำจัด การจัดการ.

เอกสารประกอบการเรียนการสอน ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยรังสิต, 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Al-Abed, S.R.; Hageman, P.L.; Jegadeesan, G.; Madhavan, N.; and Allen, D. Comparative evaluation of short-term leach tests for heavy metal release from mineral process waste. Science of the Total Environment (An International Journal for Scientific Research into the Environment and its Relationship with Humankind). 364 (2006) :14-23
- American Society of Testing and material. 1996 Test method of compressive strength of soil-cement using portion of beams broken in fixture (modified cube method). D1633-84. Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.08 section 4:148-150
- American Society of Testing and material. 1996 Test method of unconfined compressive strength of cohesine soil. D2166-91. Annual Book of ASTM Standards Vol. 04.08 section 4:169-173
- Asavapisit, S.; Intarawong, S.; and Harnwajanawong, N. Leaching behavior of heavy metals from the solidified plating sludge under various leaching condition. Thamasat International Journal of Science and Technology 8,1 (Jan-Mar 2003):1-12.
- Asavapisit, S.; Boonjam, M.; and Polprasert, C. Corrosion of cement-based solidified wastes due to different acid attack. Thamasat International Journal of Science and Technology 7,2 (May-August 2002):46-54.
- Bishop, P.L. Leaching of inorganic hazardous constitues from stabilized/solidified hazardous waste. Journal of Hazardous Waste&Hazardous Materials vol. 5 (1988) :133-135.
- Cartledge, F.K.; Butler, L.G.; Chalasani, D.; Eaton, H.C.; Freg, F.P.; Herrera, E.; Titlebaum, M.E; and Yang, S.L. Immobilization mechanism in solidification/stabilization of Cd and Pb salts using portland cement fixing agents. Environmental Science 24 (1990):867-873
- Halim, C. E.; Amal, R.; Beydoun, D.; Scott J. A.; and Low, G. Evaluating the applicability of a modified toxicity characteristic leaching procedure (TCLP) for the classification of cementitious wastes containing lead and cadmium. Journal of Hazardous Materials B103 (2003):125–140
- Jing, C.; Meng, X.; and Korfiatis G.P. Lead leachability in stabilized/solidified soil samples evaluated with different leaching tests. Journal of Hazardous Material.B114 (2004) : 101-110

- Legrega, M.D.; Buckingham, P.L.; Evans, J.C.; and Environment Resources Management. Fate and transport of contaminants. Hazardous Waste Management. 2nd ed. America : McGraw-Hill, 2001
- Means, J.L.; Smith, L.A.; Nehring, K.W.; Brauning, S.E.; Gavaskar, A.R.; and Sass, B.M. The Application of Solidification/Stabilization to Waste Materials. America :Lewis Publishers, 1995.
- Moon, D.H.; and Dermatas, D. An Evaluation of lead leachability from stabilized/solidified soils under modified semi-dynamic leaching conditions. Engineering Geology 85 (2006): 67-74
- Poon, C.S.; Chen, Z.Q.; and Wai, O.W. The effect of flow-through leaching on the diffusivity of heavy metals in stabilized/solidified wastes. Journal of Hazardous Materials B81 (2001):179–192
- Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). 2003. Hazardous Waste Management RCRA Section 6219[online] Available from:http://www.frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=browse_usc&docid=Cite:+42USC6921 [2004, November 2]
- Resource Conservation and Recovery Act (RCRA). 2005. Hazardous Waste Generation RCRA Subtitle C, Section 3001-3002[online] Available from: <http://www.chemalliance.org/Handbook/regtour/regs-4rcra.asp> [2004, November 2]
- Qiao, X.C.; Poon,C.S.; and Cheeseman, C.R. Transfer mechanisms of contaminants in cement-based stabilized/solidified waste. Journal of Hazardous Material. (2005)
- Shi, C.; Stegemann, J.A. Acid corrosion resistance of different cementing materials. Cement and Concrete Research. 30 (2000) : 803-808
- Salihoglu, G.; Pinarli V.; Saihoglu K.N.; and Karaca G. Properties of steel foundry electric arc furnace dust solidified and stabilized with Portland cement. Journal of Environmental Management. (2006)
- U.S. Environmental Protection Agency. 1992. Code of Federal Regulation Part 260 to 299. Office of the Federal Register Archives and Records Administration.
- U.S. Environmental Protection Agency. 1992. Toxicity Characteristic of Leaching Procedure EPA SW-846 Method 1311[online] Availablefrom: <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/1331.pdf> [2004, November 2]

Van der sloot, H.A.; and Dijkstra, J.J. Development of horizontally standardized leaching tests for construction materials : A material based or release based Approach? Identical leaching mechanisms for different materials. ENC Clean Fossil Fuels. ECN-C-04-060 [online] Available from: <http://www.ecn.nl/docs/society/leaching/C04060.pdf>[2004, November 2]

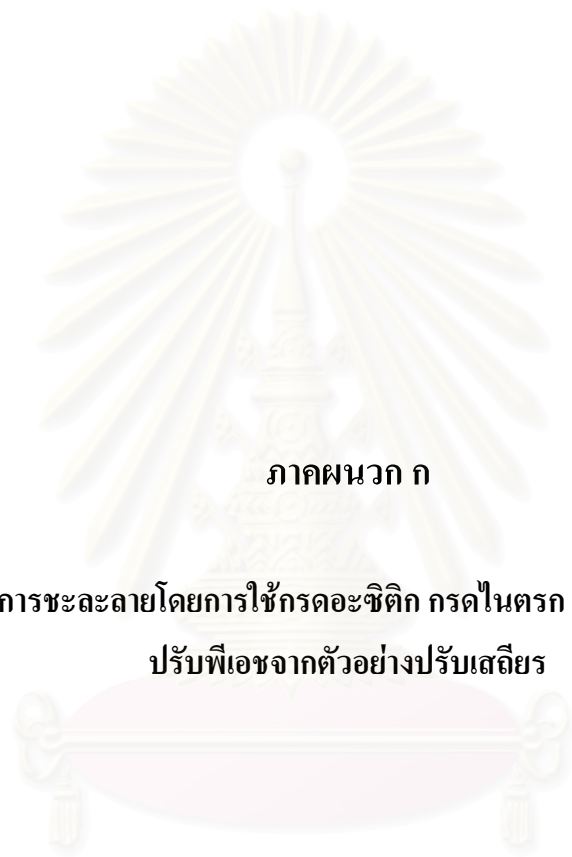


สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก ในการ
ปรับพีเอชจากตัวอย่างปรับเสถียร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.1 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียร โดยกรดอะซิติกที่ช่วงพีเอช 9-11

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	9.34	0.2786	0.0046	< 0.0007	121.33	0.0671	0.0469	0.1477
2	18	10.60	0.3480	0.0487	< 0.0007	139.65	0.0625	0.0250	0.3050
3	18	11.38	0.3931	0.0933	< 0.0007	140.24	0.0350	0.0301	0.3148
1	24	9.08	0.3135	0.0428	< 0.0007	140.96	0.1078	0.0142	0.1801
2	24	9.54	0.2904	0.0239	< 0.0007	135.99	0.0576	0.0002	0.2562
3	24	9.41	0.3032	0.0190	< 0.0007	140.52	0.0883	0.0138	0.2119
1	48	9.33	0.2996	0.0364	< 0.0007	140.87	0.0660	0.0230	0.5410
2	48	9.37	0.3053	0.0296	< 0.0007	140.79	0.0889	0.0176	0.5172
3	48	9.45	0.3072	0.0472	< 0.0007	140.30	0.0796	0.0274	0.5647
1	120	10.15	0.3218	0.0632	< 0.0007	141.20	0.0653	0.0230	0.6295
2	120	10.53	0.3325	0.0679	< 0.0007	140.60	0.0610	0.0477	0.6019
3	120	10.04	0.3153	0.0356	< 0.0007	140.22	0.0694	0.0246	0.5135
1	168	10.68	0.3478	0.0939	< 0.0007	140.82	0.0543	0.0002	0.5325
2	168	10.87	0.5805	0.1258	< 0.0007	140.48	0.0319	0.0093	0.6452
3	168	10.67	0.3379	0.0823	< 0.0007	141.60	0.0482	0.0637	0.6854

ก.2 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดอะซิติกในช่วงพีเอช 7-9

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	8.85	0.3181	0.0646	< 0.0007	143.02	0.1100	0.0092	0.1931
2	18	7.86	0.3101	0.2562	< 0.0007	146.63	0.2011	0.0583	0.1540
3	18	7.41	1.1253	0.2359	0.0024	148.88	0.1088	0.0807	0.1648
1	24	7.34	0.3231	0.0676	< 0.0007	153.10	0.1360	0.0270	0.1222
2	24	7.32	0.3125	0.1789	< 0.0007	151.88	0.0674	0.0002	0.2284
3	24	7.17	0.2863	0.1192	< 0.0007	152.60	0.0602	0.0225	0.0983
1	48	8.49	0.2385	0.1520	< 0.0007	156.56	0.1104	0.0132	0.2658
2	48	8.12	0.1905	0.1096	< 0.0007	156.87	0.0626	0.0536	0.1707
3	48	6.89	0.2682	0.1760	< 0.0007	156.04	0.0257	0.0585	0.1138
1	120	7.55	0.3192	0.1052	< 0.0007	140.93	0.1269	0.0139	0.4037
2	120	7.32	0.3115	0.0179	< 0.0007	141.23	0.1035	0.0576	0.2212
3	120	7.47	0.3198	0.0627	< 0.0007	143.02	0.1117	0.0249	0.4142
1	168	7.24	0.8011	0.2434	0.0041	151.05	0.0537	0.0832	0.2813
2	168	7.04	1.0845	0.2246	0.0085	160.53	0.0050	0.0442	0.1800
3	168	7.93	0.2345	0.0991	< 0.0007	159.63	0.0555	0.1166	0.1051

ก.3 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดอะซิติกที่ช่วงพีเอช 5-7

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	6.41	12.6287	1.6651	0.1171	151.63	0.0033	0.0309	0.1657
2	18	6.70	10.4493	1.9673	0.1224	155.31	0.0013	0.0100	0.1184
3	18	6.18	13.9933	1.8869	0.1007	160.40	0.0068	0.0218	0.0884
1	24	6.48	13.1389	1.7405	0.1049	162.50	0.0015	0.0795	0.0909
2	24	6.52	3.7269	0.7565	0.0625	162.86	< 0.0005	0.0179	0.0831
3	24	6.29	16.6377	4.2765	0.0911	157.30	< 0.0005	0.0002	0.0462
1	48	6.25	20.0452	2.5559	0.1641	157.29	0.0049	0.0758	0.0848
2	48	6.38	12.6223	1.3544	0.0946	158.27	0.0065	0.0606	0.0492
3	48	6.34	9.8167	1.7200	0.0843	137.99	< 0.005	0.0548	0.0335
1	120	6.42	2.0817	0.2629	0.0109	66.28	0.0033	0.0694	< 0.0003
2	120	6.62	4.3297	0.4949	0.0586	156.55	< 0.0005	0.0505	0.0612
3	120	6.44	2.4404	0.2197	0.0157	62.58	0.0023	0.0856	< 0.0003
1	160	6.50	6.0896	0.5537	0.0558	142.23	< 0.0005	0.0191	0.0645
2	160	6.54	6.3806	0.6716	0.0757	148.59	0.0067	0.0734	0.1514
3	160	6.53	1.4530	0.1923	0.0071	52.82	0.0079	0.0771	< 0.0003

ก.4 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดอะซิติกที่ช่วงพีเอช 3-5

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	4.38	376.63	20.4375	0.4227	151.62	2.1147	0.8712	1.2509
2	18	4.38	382.03	19.3467	0.3666	147.93	2.0047	0.6715	0.8277
3	18	4.38	357.82	20.6814	0.3662	160.60	1.8269	0.7653	0.8323
1	24	4.43	357.78	21.9990	0.3946	151.02	2.7145	1.2701	1.4761
2	24	4.38	375.52	22.6560	0.4665	158.15	2.3931	0.7064	1.0309
3	24	4.33	366.75	21.9306	0.4533	160.62	2.1891	1.1257	1.4887
1	48	5.13	449.16	32.3472	0.3997	146.47	3.0139	0.9193	1.2039
2	48	4.38	367.40	25.7259	0.5429	162.30	2.7408	1.1624	0.9178
3	48	4.33	386.19	25.7052	0.5768	151.73	3.0189	1.4213	0.8520
1	120	4.34	389.86	28.0254	0.5307	163.96	2.9170	1.2289	0.8130
2	120	4.34	382.98	27.3900	0.6828	162.16	2.3191	1.5062	0.9054
3	120	4.33	391.74	25.2156	0.5832	159.22	2.8727	2.6166	1.3357
1	168	5.19	491.95	29.5257	0.4235	146.58	2.8640	0.9969	1.0770
2	168	4.39	469.08	35.0337	0.7647	160.63	2.4524	3.4087	1.4472
3	168	4.38	390.03	30.8100	0.5801	164.00	3.0479	1.2966	0.9868

ก.5 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดไนตริกที่ช่วงพีเอช 9-11

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	9.22	0.3418	0.0018	< 0.0007	136.01	0.0471	0.0217	0.2203
2	18	12.18	0.2352	0.0826	< 0.0007	144.52	0.0522	0.0463	0.6197
3	18	10.43	0.4167	0.0448	< 0.0007	141.84	0.0521	< 0.0015	0.3288
1	24	10.09	0.4501	0.0300	< 0.0007	142.53	0.0537	< 0.0015	0.2245
2	24	11.44	0.4485	0.0969	< 0.0007	142.13	0.0522	0.0602	0.4182
3	24	9.22	0.4200	0.0320	< 0.0007	142.69	0.0360	0.0101	0.1343
1	48	10.02	0.3793	0.0390	< 0.0007	142.22	0.0537	0.0257	0.5986
2	48	10.77	0.4245	0.0622	< 0.0007	143.16	0.0542	0.0354	0.4467
3	48	9.87	0.4043	0.0421	< 0.0007	143.20	0.0536	0.0279	0.3805
1	120	10.58	0.4277	0.0649	< 0.0007	141.41	0.0330	< 0.0015	0.9304
2	120	10.93	0.4706	0.1270	< 0.0007	143.34	0.0172	0.0516	0.5893
3	120	9.54	0.4472	0.0207	< 0.0007	145.08	0.0297	0.0179	0.1687
1	168	11.00	0.3860	0.0685	< 0.0007	143.71	0.0158	0.0206	0.6328
2	168	10.87	0.3619	0.0381	< 0.0007	144.68	0.0486	0.0512	0.4276
3	168	9.92	0.4525	0.0229	< 0.0007	143.24	0.0491	0.0271	0.2394

ก.6 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดไนตริกในช่วงพีเอช 7-9

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	8.22	0.3562	0.1389	< 0.0007	147.19	0.0456	0.0299	0.1593
2	18	7.78	0.4165	0.1411	0.0019	149.22	0.0464	0.0219	0.1632
3	18	6.44	1.5253	0.8248	0.0593	150.76	0.0470	0.0281	0.1223
1	24	8.46	0.3100	0.0880	< 0.0007	151.40	0.0473	0.0562	0.1649
2	24	7.48	0.3800	0.1487	0.0072	152.72	0.0478	0.0446	0.1341
3	24	6.19	1.1375	1.0406	0.0703	154.04	0.0483	0.0364	0.0887
1	48	7.16	0.4573	0.1909	0.0422	151.34	0.0472	0.0051	0.0931
2	48	6.90	0.2949	0.1125	0.0132	154.82	0.0486	0.0034	0.0633
3	48	6.80	0.4559	0.1585	0.0428	155.12	0.0487	0.0025	0.0552
1	120	8.58	0.2681	0.0416	< 0.0007	152.69	0.0478	0.0473	0.1275
2	120	8.25	0.2788	0.0543	< 0.0007	153.29	0.0480	0.0665	0.1050
3	120	8.35	0.3098	0.0544	< 0.0007	152.69	0.0478	0.0663	0.1484
1	168	6.74	0.3931	0.4168	0.0243	158.32	0.0500	0.0402	0.0826
2	168	7.06	0.2151	0.0827	0.0026	155.17	0.0488	0.1094	0.0414
3	168	6.68	0.4536	0.1680	0.0222	155.87	0.0490	0.0496	0.0800

ก.7 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดไนตริกที่ช่วงพีเอช 5-7

Sample No.	Times(hr)	pH	TDS	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	6.64	11.78	0.5857	0.2364	0.0226	145.34	0.0448	0.0730	0.1581
2	18	6.3	11.82	1.5941	0.8677	0.0852	148.06	0.0459	0.0061	0.1275
3	18	6.54	11.98	0.8228	0.3908	0.0356	150.46	0.0469	0.0623	0.1347
1	24	7.16	11.95	0.3897	0.0838	0.0072	157.02	0.0495	0.0833	0.1432
2	24	6.03	12.07	3.0086	2.1757	0.1727	162.20	0.0516	0.0107	0.1078
3	24	6.40	11.94	0.6895	0.4351	0.0617	159.58	0.0505	0.0454	0.0384
1	48	6.13	11.94	2.5585	2.0904	0.2388	163.67	0.0522	0.0200	0.0791
2	48	6.14	11.94	3.4397	1.9405	0.3045	155.98	0.0491	0.0651	0.1211
3	48	8.64	11.94	0.4315	0.0279	< 0.0007	151.76	0.0474	0.0386	0.2023
1	120	6.76	11.78	0.3301	0.1249	0.0035	162.58	0.0517	0.0586	0.1187
2	120	6.04	11.82	3.0764	1.8800	0.1976	163.87	0.0522	0.0814	0.0450
3	120	6.32	11.98	0.9527	0.5556	0.0941	142.69	0.0438	0.0669	0.0400
1	168	6.14	11.95	2.4639	1.5947	0.1843	158.08	0.0499	0.0992	< 0.0003
2	168	6.12	12.07	0.6237	0.3438	0.0244	41.32	0.0032	0.0785	< 0.0003
3	168	6.09	11.94	0.6873	0.8220	0.0340	52.43	0.0077	0.0073	< 0.0003

ก.8 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดไนตริกที่ช่วงพีเอช 3-5

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	5.5	5.74	2.5988	0.1236	151.10	0.4471	0.0323	0.1468
2	18	4.79	71.44	15.6090	0.5413	163.79	0.3522	0.1281	0.2074
3	18	4.07	102.65	12.7731	0.6119	163.45	0.4521	0.4231	0.2045
1	24	4.45	78.00	12.5499	0.4900	167.49	0.8537	0.0878	0.1085
2	24	4.18	77.75	11.3691	0.3789	163.64	0.4522	0.1609	0.0667
3	24	5.00	18.92	4.3412	0.1308	123.15	0.3360	0.0814	0.0083
1	48	3.92	113.89	12.0864	0.4840	167.55	0.3537	0.1049	0.1514
2	48	4.28	76.80	11.7984	0.6465	168.66	0.4542	0.0927	0.0940
3	48	3.72	134.52	13.8441	0.6707	167.29	0.2536	0.2891	0.1490
1	120	4.16	47.39	18.2973	0.1887	115.86	0.4330	0.0819	0.0101
2	120	3.60	36.04	3.5421	0.0752	76.20	0.5172	0.0678	< 0.0003
3	120	4.45	23.76	3.4412	0.1474	107.47	0.4297	< 0.0015	0.0008
1	168	4.49	8.64	1.2686	0.0322	72.63	0.7158	0.0487	< 0.0003
2	168	3.54	152.30	12.9963	0.6375	154.64	0.8486	0.3923	0.1578
3	168	4.54	33.85	5.3488	0.2965	155.92	0.6491	0.0466	0.0623

ก.9 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 9-11

Sample No.	Times	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	9.17	0.7697	1.2228	< 0.0007	96.15	0.0936	0.0057	0.0551
2	18	11.24	1.4317	1.9007	< 0.0007	97.21	0.1085	0.0002	0.0482
3	18	9.04	0.5359	1.3276	< 0.0007	141.08	0.0942	0.0515	0.0257
1	24	9.77	1.2047	0.1490	< 0.0007	136.50	0.0941	0.0571	0.0132
2	24	10.11	1.3022	0.1563	< 0.0007	119.65	0.0698	0.0623	0.0145
3	24	11.24	1.5326	0.2105	< 0.0007	101.50	0.0528	0.0407	0.0304
1	48	11.30	1.5002	0.1809	< 0.0007	135.79	0.0888	0.0314	0.0649
2	48	9.83	0.7345	0.0911	< 0.0007	120.03	0.2051	0.0002	0.0011
3	48	10.08	0.2496	0.0227	< 0.0007	130.93	0.0590	0.0902	< 0.0003
1	120	9.80	0.0771	0.0198	< 0.0007	110.97	0.0511	0.0608	< 0.0003
2	120	9.98	0.0626	0.0095	< 0.0007	120.52	0.0263	0.0994	< 0.0003
3	120	10.45	0.0500	0.0331	< 0.0007	112.19	0.0537	0.0654	< 0.0003
1	168	9.07	0.0398	0.0277	< 0.0007	132.63	0.0388	0.0222	< 0.0003
2	168	9.26	0.0457	0.0262	< 0.0007	126.02	0.0637	0.0162	< 0.0003
3	168	8.60	0.0435	0.0296	< 0.0007	110.18	0.0541	0.1271	< 0.0003

ก.10 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 7-9

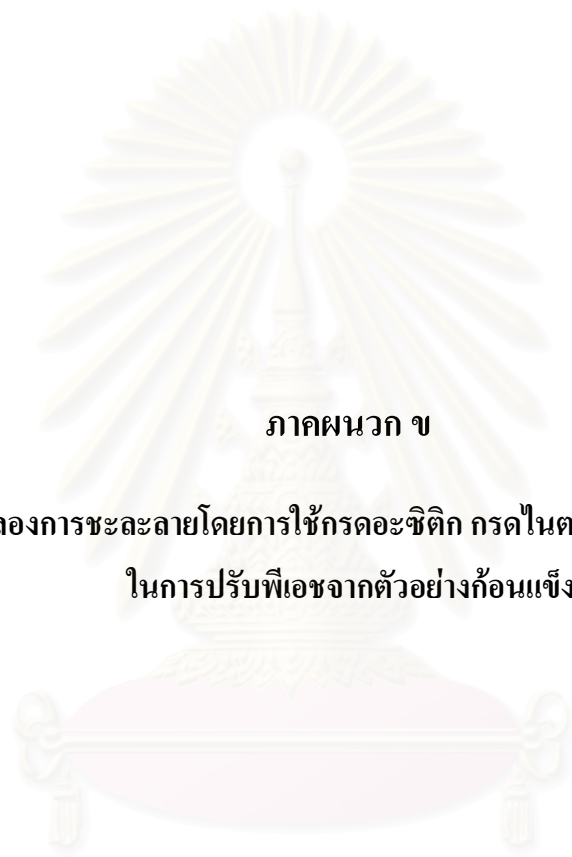
Sample No.	Times	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	8.82	0.4675	0.4561	< 0.0007	105.23	0.1638	0.0293	0.0039
2	18	7.56	0.4939	0.8297	0.0024	108.72	0.0884	0.0049	0.0053
3	18	7.23	0.5366	0.3878	0.0110	107.98	0.0681	0.0278	0.0083
1	24	7.61	0.4135	0.5900	0.0032	109.47	0.0771	0.0137	0.0051
2	24	7.24	0.5158	0.6470	0.0124	112.46	0.0540	0.0116	0.0053
3	24	8.24	0.4307	0.3023	< 0.0007	109.45	0.0944	0.0252	0.0087
1	48	8.34	0.3903	0.4456	< 0.0007	112.66	0.1147	0.0025	0.0043
2	48	7.43	0.4196	0.4819	0.0057	114.53	0.0874	0.0463	0.0051
3	48	7.20	0.4013	0.2921	0.0048	115.34	0.0655	0.0269	0.0081
1	120	8.22	0.3480	0.4179	< 0.0007	111.37	0.1351	< 0.0015	0.0041
2	120	7.86	0.3475	0.4132	< 0.0007	110.81	0.0518	0.0108	0.0041
3	120	6.92	0.4187	0.3766	0.0086	106.37	0.0237	< 0.0015	0.0047
1	168	6.95	0.5890	0.4937	0.0151	119.29	0.0406	0.0330	0.0055
2	168	7.28	0.4683	0.4613	0.0044	121.89	0.0236	0.0858	0.0031
3	168	8.75	0.5521	0.4341	< 0.0007	127.89	0.1091	0.0420	0.0027

ก.11 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 5-7

Sample No.	Times	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	6.75	0.6802	0.3608	0.0319	133.77	0.0161	0.0036	0.0017
2	18	6.71	0.9827	0.3847	0.0916	125.62	0.0266	0.0659	0.0019
3	18	7.00	2.0766	0.7456	0.1012	122.88	0.0122	< 0.0015	0.0060
1	24	6.25	1.9812	0.8342	0.1652	114.60	0.0145	0.0062	0.0025
2	24	6.00	4.8617	1.8181	0.2694	132.67	0.0332	0.0385	0.0049
3	24	5.50	15.0882	4.2422	0.3443	121.33	0.0297	0.0323	0.0045
1	48	6.56	2.2043	0.7411	0.3042	95.98	0.0478	< 0.0015	0.0034
2	48	6.61	1.9332	0.6081	0.1570	88.98	0.0146	< 0.0015	0.0064
3	48	7.03	0.6781	0.3772	0.0338	103.36	0.0141	0.0473	0.0012
1	120	6.52	0.6938	0.2757	0.0365	103.73	0.0095	0.0406	0.0026
2	120	6.81	0.4883	0.1521	0.0151	121.92	0.0229	0.0766	0.0007
3	120	6.67	0.7126	0.2123	0.0462	114.69	0.0150	0.0278	0.0030
1	168	6.36	3.8051	0.9269	0.3547	117.60	0.0156	0.0661	0.0021
2	168	6.11	7.3575	2.4292	0.6389	121.90	0.0262	< 0.0015	0.0050
3	168	9.19	0.8075	0.1005	0.0061	112.22	0.1393	0.0422	0.0026

ก.12 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 3-5

Sample No.	Times	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Pb(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	4.77	46.23	7.1266	0.3812	80.85	0.0322	0.1420	0.0057
2	18	6.00	69.46	6.8042	0.4439	136.11	0.0555	0.0094	0.0088
3	18	5.50	88.50	8.0365	0.3929	145.21	0.1529	0.3456	0.0071
1	24	4.23	124.32	11.9890	0.7159	134.51	0.2918	0.1250	0.0053
2	24	3.83	140.70	11.1925	0.7912	93.62	0.4300	0.2300	0.0081
3	24	4.35	105.52	8.3068	0.5920	139.30	0.1505	0.0134	0.0099
1	48	4.33	116.25	9.5291	0.8880	94.54	0.1161	0.0216	0.0045
2	48	5.18	48.76	7.0799	0.5977	136.14	0.0291	0.2130	0.0045
3	48	4.23	139.58	9.9111	0.8687	88.88	0.3004	0.3121	0.0023
1	120	6.58	2.55	0.7060	0.2619	115.95	0.0200	0.0291	0.0031
2	120	4.21	80.59	9.9505	0.7912	135.30	0.1529	0.3004	0.0006
3	120	4.60	71.19	10.2472	0.5920	73.48	0.2918	0.0200	< 0.0003
1	168	3.20	112.62	8.9404	0.8880	94.79	0.4300	0.1529	< 0.0003
2	168	4.61	114.90	9.4439	0.5977	135.17	0.1505	0.2918	< 0.0003
3	168	4.52	95.67	9.2259	0.8687	134.64	0.1161	0.3322	< 0.0003



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการชะละลายโดยใช้กรดอะซิติก กรดไนตริก และกรดซัลฟิวริก
ในการปรับพีเอชจากตัวอย่างก้อนแข็ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข.1 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊องแข็งโดยกรดอะซิดิกที่ช่วงพีเอช 9-11

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	9.76	0.0038	0.0178	0.0302	127.43	0.0033	0.1653
2	18	10.62	0.0066	0.0242	0.0159	128.58	0.0105	0.1755
3	18	10.14	0.0031	0.0156	0.0163	135.78	0.0026	0.1564
1	24	7.22	0.0162	0.1415	0.0185	136.06	< 0.0005	0.1397
2	24	10.20	0.0070	0.0003	0.0280	134.38	0.0112	0.2204
3	24	8.24	0.0001	0.0734	< 0.0015	138.72	0.0072	0.1137
1	48	9.94	0.0035	0.0263	0.0113	129.59	0.0084	0.0877
2	48	10.54	0.0055	0.0042	0.0248	137.90	0.0086	0.1248
3	48	10.22	0.0003	0.0020	0.0248	136.05	0.0110	0.1235
1	120	9.56	0.0261	0.1045	0.0386	135.80	0.0148	0.1520
2	120	9.65	0.0020	0.0054	0.0214	138.02	0.0099	0.3701
3	120	9.37	0.0002	0.0046	0.0315	139.12	0.0059	0.1963
1	168	10.37	0.0046	0.0243	< 0.0015	136.63	0.0142	0.1688
2	168	10.30	0.0029	0.0070	0.0465	136.25	0.0175	0.1823
3	168	10.35	0.0015	0.0059	0.0054	138.35	0.0057	0.1627

ข.2 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊อแก็งโดยกรดอะซิดิกที่ช่วงพีเอช 7-9

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	7.46	0.0228	0.1664	0.0170	119.27	0.0140	0.3198
2	18	7.41	0.0245	0.2279	0.0185	128.45	0.0151	0.3178
3	18	8.08	0.0162	0.0313	0.0412	143.80	0.0180	0.2202
1	24	7.34	0.0067	0.2401	0.0098	154.59	0.0251	0.2263
2	24	7.32	0.0183	0.0391	0.0551	155.44	0.0102	0.1347
3	24	7.17	0.0145	0.0312	0.0714	155.48	0.0113	0.1316
1	48	8.49	0.0064	0.0419	0.0923	153.10	0.0081	0.1349
2	48	8.12	0.0052	0.0343	0.0440	143.28	0.0102	0.0624
3	48	6.89	0.0108	0.0938	0.0504	148.35	0.0042	0.1264
1	120	7.55	< 0.0009	0.0268	0.0286	147.39	0.0117	0.0038
2	120	7.32	0.0025	0.0010	0.1247	145.97	0.0013	0.0083
3	120	7.47	< 0.0009	< 0.0002	0.0711	144.33	0.0052	< 0.0003
1	168	8.26	0.0555	0.0210	0.0433	122.57	< 0.0005	0.0773
2	168	7.20	0.0358	0.0736	< 0.0015	137.79	0.0018	0.0646
3	168	7.83	0.0032	0.0002	< 0.0015	151.60	0.0045	< 0.0003

ข.3 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊องแข็งโดยกรดอะซิดิกที่ช่วงพีเอช 5-7

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	6.60	0.0945	0.0890	0.0457	144.20	0.0050	0.2134
2	18	6.55	0.0312	0.0660	0.0985	146.90	0.0028	0.0086
3	18	6.62	0.0738	0.0641	0.0655	149.66	< 0.0005	0.2268
1	24	6.71	0.0727	0.0333	0.0402	154.01	0.0006	0.1897
2	24	6.60	0.0256	0.0287	0.0264	141.83	< 0.0005	< 0.0003
3	24	6.55	0.0231	0.0064	0.0727	137.07	0.0052	< 0.0003
1	48	6.67	0.0296	< 0.0002	0.0384	129.31	0.0042	< 0.0003
2	48	6.62	0.0051	< 0.0002	0.0038	114.17	< 0.0005	< 0.0003
3	48	6.66	0.0157	< 0.0002	0.1006	115.70	< 0.0005	< 0.0003
1	120	6.81	0.0145	< 0.0002	< 0.0015	119.09	0.0111	< 0.0003
2	120	6.88	0.0070	< 0.0002	0.0652	111.03	0.0020	< 0.0003
3	120	7.43	0.0048	< 0.0002	0.0723	110.92	< 0.0005	< 0.0003
1	168	6.92	0.0047	< 0.0002	0.0869	125.69	0.0027	< 0.0003
2	168	6.79	0.0043	< 0.0002	0.1092	124.87	0.0065	< 0.0003
3	168	6.79	0.0638	0.0928	0.0439	138.99	< 0.0005	0.2119

ข.4 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊อแก๊งโดยกรดอะซิดิกที่ช่วงพีเอช 3-5

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	4.36	0.4885	0.2412	0.1143	159.65	0.3471	0.2572
2	18	5.18	0.1822	0.1320	0.1187	159.84	0.0542	0.0130
3	18	4.17	0.4400	0.1297	0.0002	163.02	0.0600	< 0.0003
1	24	4.25	0.0921	0.1144	0.0756	113.14	0.0036	< 0.0003
2	24	4.28	0.0825	0.0923	0.0657	118.98	0.0811	< 0.0003
3	24	4.24	0.0377	0.2180	0.0439	116.04	0.1164	< 0.0003
1	48	4.29	0.1225	0.1140	0.1519	110.39	0.0950	< 0.0003
2	48	4.23	0.1054	0.1002	0.1159	110.50	0.1516	< 0.0003
3	48	4.26	0.1657	0.3002	0.1125	105.27	0.2094	< 0.0003
1	120	4.34	0.1175	0.2086	0.0712	104.81	0.0621	< 0.0003
2	120	4.34	0.1208	0.3002	0.0878	106.00	0.0011	< 0.0003
3	120	4.35	0.1712	0.2002	0.0759	105.47	0.1948	< 0.0003
1	168	4.40	0.1719	0.4004	0.0880	102.07	0.0521	< 0.0003
2	168	5.15	0.0213	0.1302	0.0642	105.37	0.2081	< 0.0003
3	168	4.37	0.1627	0.3135	0.0517	101.05	0.2316	< 0.0003

ข.5 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊อแก๊งโดยกรดไนตริกในช่วงพีเอช 9-11

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	9.50	0.0111	0.0189	0.0063	67.89	< 0.0005	0.1969
2	18	8.60	0.0087	0.1339	0.0017	97.13	< 0.0005	0.2506
3	18	9.13	0.0055	0.0999	0.0023	101.41	0.0050	0.2398
1	24	8.34	0.0689	0.1016	0.0093	94.03	0.0043	0.2380
2	24	9.18	0.0043	0.0566	0.0314	118.75	0.0070	0.2248
3	24	10.02	0.0128	0.0586	0.0287	106.29	0.0047	0.2656
1	48	10.74	0.0110	0.0260	0.0024	114.84	0.0165	0.2890
2	48	10.46	0.0105	0.0083	< 0.0015	76.27	0.0002	0.2410
3	48	10.02	0.0249	0.0176	0.0353	115.65	0.0102	0.2449
1	120	10.38	0.0184	0.0467	0.0282	98.99	0.0197	0.3626
2	120	10.43	0.0271	0.0763	0.0239	113.88	0.0157	0.3466
3	120	9.82	0.0033	0.0220	0.0160	106.69	0.0134	0.3545
1	168	9.07	0.0054	0.0145	0.0109	100.19	0.0082	0.3523
2	168	9.69	0.0107	0.0199	0.0069	114.96	0.0114	0.3586
3	168	9.66	0.0112	0.0191	0.0064	107.03	0.0109	0.3867

ข.6 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊องแข็งโดยกรดไนตริกในช่วงพีเอช 7-9

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	7.38	0.0452	0.1322	0.0090	102.29	< 0.0005	0.2539
2	18	7.90	0.0349	0.1324	0.0344	109.80	0.0022	0.2418
3	18	10.93	0.0121	0.0772	0.0521	136.87	0.0105	0.2103
1	24	6.79	0.0329	0.2607	0.0307	138.13	0.0033	0.2291
2	24	7.93	0.0063	0.0647	0.0198	132.52	0.0039	0.2113
3	24	7.93	0.0098	0.1212	0.0489	136.80	0.0045	0.2086
1	48	8.42	0.0065	0.1211	0.0451	142.00	0.0085	0.2332
2	48	8.52	0.0012	0.1154	0.0348	143.76	0.0139	0.1899
3	48	6.98	0.0563	0.2761	0.0063	126.22	0.0007	0.3080
1	120	7.65	0.0028	0.0829	0.0230	130.62	0.0124	0.3256
2	120	7.58	0.0076	0.1346	0.0143	139.26	0.0062	0.2509
3	120	7.69	0.0045	0.1663	0.0002	131.84	0.0069	0.2794
1	168	9.26	0.0015	0.0025	0.0575	150.37	0.0231	0.2160
2	168	8.66	0.0031	0.0172	< 0.0015	146.20	0.0126	0.2193
3	168	8.30	0.0028	0.0250	0.0228	143.66	0.0113	0.2433

ข.7 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊อแข็งโดยกรดไนตริกที่ช่วงพีเอช 5-7

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	4.25	0.1515	0.3002	0.1906	130.00	0.0080	0.2271
2	18	5.75	0.0286	0.1451	0.0828	150.93	0.0107	0.1309
3	18	5.51	0.0691	0.1734	0.0808	142.94	0.0090	0.1812
1	24	6.66	0.0489	0.0222	0.0774	149.18	0.0004	0.1751
2	24	6.12	0.0752	0.0409	0.0788	148.11	0.0023	0.2001
3	24	11.62	0.0039	< 0.0002	0.0953	141.07	0.0043	0.2041
1	48	6.45	0.0521	< 0.0002	0.0215	140.64	< 0.0015	0.2467
2	48	6.55	0.0690	0.0331	0.0416	150.28	< 0.0015	0.1600
3	48	6.72	0.0214	0.0194	0.0071	146.86	< 0.0015	0.1651
1	120	6.75	0.0300	0.0070	0.0571	147.21	< 0.0015	0.1552
2	120	6.48	0.0315	0.0173	0.0922	148.09	0.0052	0.0839
3	120	7.21	0.0098	0.0041	0.0395	147.68	0.0032	0.1631
1	168	6.88	0.0145	0.0093	0.0431	145.59	0.0035	0.1862
2	168	6.55	0.0392	0.0343	0.0556	151.71	< 0.0015	0.1087
3	168	6.46	0.0270	0.0104	0.0390	77.05	0.0019	0.0516

ข.8 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊อแข็งโดยกรดไนตริกที่ช่วงพีเอช 3-5

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	3.86	0.4394	0.3731	0.0880	122.10	0.0322	1.1215
2	18	2.26	0.5818	1.0314	0.4142	153.13	0.1011	0.2627
3	18	3.16	0.0213	0.7106	0.2918	154.31	0.0787	0.2516
1	24	3.94	0.4616	1.0000	0.7280	163.92	0.0765	0.2160
2	24	5.57	0.3588	0.8712	0.0839	156.88	0.0024	0.2985
3	24	4.56	0.0837	0.8432	0.2923	154.36	0.0274	0.2879
1	48	4.07	0.1894	0.5027	0.2867	167.05	0.0256	0.3430
2	48	3.06	0.3778	0.4910	0.5099	141.61	0.0900	0.1384
3	48	3.72	0.1678	0.2298	0.1164	98.64	0.0090	0.0867
1	120	3.64	0.2279	0.3927	0.2024	119.81	0.0382	0.0252
2	120	3.89	0.0681	0.1067	0.0590	69.13	0.0002	0.0495
3	120	2.65	0.4211	0.5526	0.0002	118.48	0.0139	< 0.0003
1	168	3.78	0.0297	0.6167	0.0994	112.76	0.0714	< 0.0003
2	168	3.23	0.4206	0.8209	0.3880	132.11	0.0041	< 0.0003
3	168	3.63	0.0172	0.2058	0.1118	126.86	0.0702	< 0.0003

ข.9 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊องแข็งโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 9-11

Sample No.	Times	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	10.07	0.0125	0.0158	0.0063	96.15	< 0.0005	0.1049
2	18	10.07	0.0095	0.0222	0.0017	97.21	< 0.0005	0.1486
3	18	11.69	0.0055	0.0136	0.0023	111.08	0.0050	0.1378
1	24	10.44	0.0089	0.1395	0.0193	116.50	0.0043	0.2360
2	24	10.99	0.0143	< 0.0002	0.0114	119.65	0.0070	0.1228
3	24	8.07	0.0128	0.0714	0.0187	101.50	0.0047	0.2636
1	48	8.51	0.0110	0.0243	0.0224	135.79	0.0053	0.1870
2	48	9.53	0.0105	0.0022	0.0202	120.03	0.0002	0.2390
3	48	8.68	0.0149	0.0855	0.0353	130.93	0.0017	0.2429
1	120	8.86	0.0184	0.0825	0.0282	150.97	0.0067	0.1606
2	120	8.15	0.0271	0.0034	0.0239	160.52	0.0057	0.1446
3	120	6.43	0.0033	0.0026	0.0160	112.19	0.0134	0.1525
1	168	10.06	0.0054	0.0123	0.0109	132.63	0.0082	0.1503
2	168	11.87	0.0027	0.0200	0.0269	126.02	0.0014	0.1566
3	168	9.43	0.0042	0.0639	0.0314	140.18	0.0109	0.1847

ข.10 ผลการทดลองของตัวอย่างก้อนแข็งโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 7-9

Sample No.	Times	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	11.50	0.0380	0.1644	0.0090	125.23	< 0.0005	0.2519
2	18	7.68	0.0327	0.2259	0.0344	118.72	0.0022	0.2398
3	18	8.04	0.0299	0.0293	0.0521	117.98	0.0105	0.2083
1	24	6.56	0.0207	0.2381	0.0307	109.47	0.0033	0.2271
2	24	7.40	0.0041	0.0371	0.0198	122.46	0.0039	0.2093
3	24	7.77	0.0076	0.0292	0.0489	109.45	0.0045	0.2066
1	48	6.49	0.0043	0.0399	0.0451	112.66	0.0085	0.2312
2	48	7.72	< 0.0009	0.0323	0.0348	114.53	0.0139	0.1879
3	48	8.66	0.0141	0.0918	0.0063	115.34	0.0007	0.1060
1	120	7.32	0.0206	0.0248	0.0230	111.37	0.0124	0.1236
2	120	7.95	0.0454	< 0.0002	0.0543	110.81	0.0062	0.2489
3	120	9.85	0.0323	0.1245	0.0382	106.37	0.0069	0.1774
1	168	8.55	0.0293	0.1190	0.0575	99.29	0.0131	0.2140
2	168	7.80	0.0409	0.0716	< 0.0015	91.89	0.0020	0.1173
3	168	7.93	0.0406	0.2002	0.0228	97.89	0.0020	0.2413

ข.11 ผลการทดลองของตัวอย่างก้อนแข็งโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 5-7

Sample No.	Times	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	6.75	0.0585	0.0870	0.1906	123.77	< 0.0005	0.2251
2	18	6.46	0.0256	0.0640	0.0828	115.62	< 0.0005	0.1289
3	18	6.20	0.0661	0.0621	0.0808	122.88	< 0.0005	0.1792
1	24	5.69	0.0459	0.0313	0.0774	94.60	< 0.0005	0.1731
2	24	5.51	0.1722	0.0267	0.0788	92.67	0.0023	0.1981
3	24	5.92	0.0009	0.0044	0.0953	121.33	0.0043	0.2021
1	48	6.03	0.0491	0.0052	0.0215	135.98	< 0.0005	0.2447
2	48	6.21	0.0660	0.0061	0.0416	98.98	< 0.0005	0.1580
3	48	6.35	0.0584	< 0.0002	0.0071	123.36	< 0.0005	0.1631
1	120	6.62	0.0570	< 0.0002	0.0571	113.73	< 0.0005	0.1532
2	120	6.55	0.0685	0.0522	0.0922	151.92	0.0052	0.0819
3	120	6.63	0.0568	0.0100	0.0395	114.69	0.0032	0.1611
1	168	6.75	0.0115	< 0.0002	0.1431	137.60	0.0035	0.1842
2	168	6.69	0.0362	< 0.0002	0.0556	141.90	0.0102	0.1067
3	168	6.65	0.0240	0.0928	0.1090	92.22	0.0019	0.0496

ข.12 ผลการทดลองของตัวอย่างก้อนแข็งโดยกรดซัลฟิวริกที่ช่วงพีเอช 3-5

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
1	18	5.19	0.1074	0.4392	0.0880	140.85	0.0322	0.2195
2	18	5.10	0.1798	0.1300	0.4142	136.11	0.0611	0.2607
3	18	4.56	0.3893	0.4277	0.2918	115.21	0.0677	0.2496
1	24	2.99	0.3596	0.0124	0.3280	111.14	0.0765	0.2140
2	24	3.96	0.1568	0.0103	0.0839	116.98	0.0024	0.2965
3	24	3.23	0.2517	0.0160	0.2923	134.04	0.0274	0.2859
1	48	4.06	0.1874	0.2120	0.2867	108.39	0.0256	0.3410
2	48	3.86	0.0758	0.0402	0.5099	108.50	0.0880	0.1364
3	48	4.04	0.1658	0.2020	0.1164	103.27	0.0090	0.0847
1	120	4.55	0.2259	0.4659	0.2024	102.81	0.0582	0.0232
2	120	3.52	0.0661	0.1002	0.3590	84.00	< 0.0005	0.0475
3	120	5.91	0.0719	0.0602	0.1902	103.47	0.0139	0.1256
1	168	3.89	0.1277	0.1002	0.1994	100.07	0.0564	0.1364
2	168	4.66	0.2299	0.0202	0.0880	63.37	0.0641	0.0232
3	168	4.44	0.2522	0.0015	0.1118	99.05	< 0.0005	0.2859



ภาคผนวก ค

ผลการทดลองการชะละลายโดยการใช้น้ำกลั่น

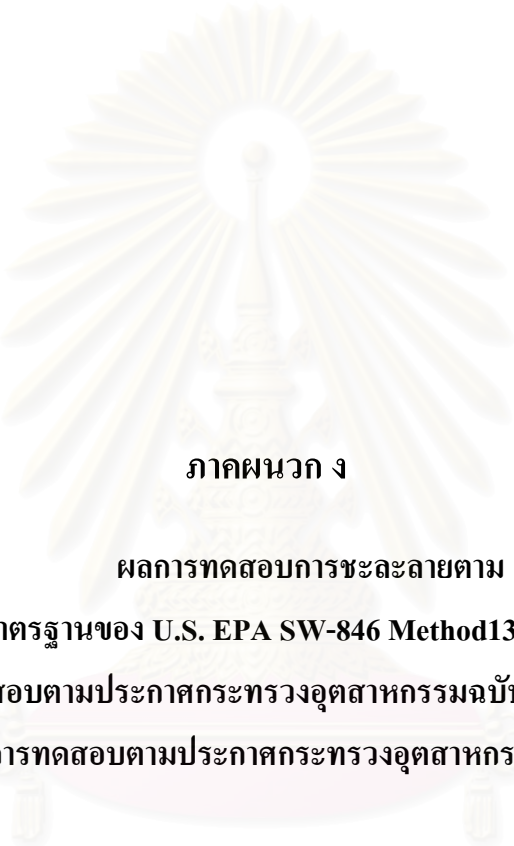
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.1 ผลการทดลองของตัวอย่างปรับเสถียรโดยการใช้น้ำกลั่น

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)	Ni(mg/l)
1	18	12.21	1.3440	0.4832	0.1787	56.81	< 0.0005	0.2023	< 0.0007
2	18	12.43	1.5091	0.5217	0.0973	58.17	< 0.0005	0.1961	< 0.0007
3	18	11.89	1.3892	0.4517	0.1432	57.51	< 0.0005	0.1434	< 0.0007
1	24	11.88	1.3629	0.6393	0.1497	56.53	< 0.0005	0.1490	< 0.0007
2	24	12.79	1.6210	0.5688	0.1424	57.87	< 0.0005	0.1874	< 0.0007
3	24	12.44	1.6718	0.5480	0.0981	56.97	< 0.0005	0.1409	< 0.0007
1	48	12.53	1.3440	0.4832	0.1787	56.81	< 0.0005	0.1631	< 0.0007
2	48	12.61	1.5091	0.5217	0.0973	58.17	< 0.0005	0.0378	< 0.0007
3	48	12.55	1.3892	0.4517	0.1432	57.51	< 0.0005	0.1714	< 0.0007
1	120	12.53	1.3629	0.6393	0.1497	56.53	< 0.0005	0.1622	< 0.0007
2	120	11.98	1.6210	0.5688	0.1424	57.87	< 0.0005	0.0983	< 0.0007
3	120	12.45	1.6718	0.5480	0.1787	56.97	< 0.0005	0.1954	< 0.0007
1	168	12.46	1.8608	0.4941	0.1973	62.08	< 0.0005	0.2222	< 0.0007
2	168	12.62	1.9152	0.6485	0.1132	55.18	< 0.0005	0.1612	< 0.0007
3	168	12.47	1.8697	0.7529	0.1497	59.29	< 0.0005	0.1922	< 0.0007

ค.2 ผลการทดลองของตัวอย่างก๊องแข็งโดยการใช้น้ำกลั่น

Sample No.	Times(hr)	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Pb(mg/l)	Ca(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)	Ni(mg/l)
1	18	12.54	0.0010	0.0656	< 0.0015	47.03	< 0.0005	0.1097	< 0.0007
2	18	12.34	< 0.0009	0.0000	< 0.0015	43.31	< 0.0005	0.1366	< 0.0007
3	18	12.61	0.0010	0.0627	< 0.0015	46.83	< 0.0005	0.1734	< 0.0007
1	24	11.95	0.0047	0.0847	< 0.0015	46.31	< 0.0005	0.1551	< 0.0007
2	24	12.34	0.0053	0.0783	< 0.0015	47.49	< 0.0005	0.2260	< 0.0007
3	24	12.55	< 0.0009	0.0721	< 0.0015	49.51	< 0.0005	0.2629	< 0.0007
1	48	12.62	0.0010	0.0656	< 0.0015	47.03	< 0.0005	0.1304	< 0.0007
2	48	11.87	< 0.0009	0.0000	< 0.0015	43.31	< 0.0005	0.1941	< 0.0007
3	48	11.86	0.0010	0.0627	< 0.0015	46.83	< 0.0005	0.1456	< 0.0007
1	120	11.98	0.0047	0.0747	< 0.0015	46.31	< 0.0005	0.1551	< 0.0007
2	120	12.56	0.0023	0.0783	< 0.0015	47.49	< 0.0005	0.2260	< 0.0007
3	120	12.44	0.0058	0.0821	< 0.0015	49.51	< 0.0005	0.2629	< 0.0007
1	168	12.36	0.0013	0.0758	< 0.0015	49.84	< 0.0005	0.2304	< 0.0007
2	168	12.35	0.0069	0.0996	< 0.0015	55.76	< 0.0005	0.2041	< 0.0007
3	168	12.57	0.0074	0.0960	< 0.0015	51.68	< 0.0005	0.1456	< 0.0007



ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการชะละลายตาม

มาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method1311(TCLP)

การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

และ การทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548)

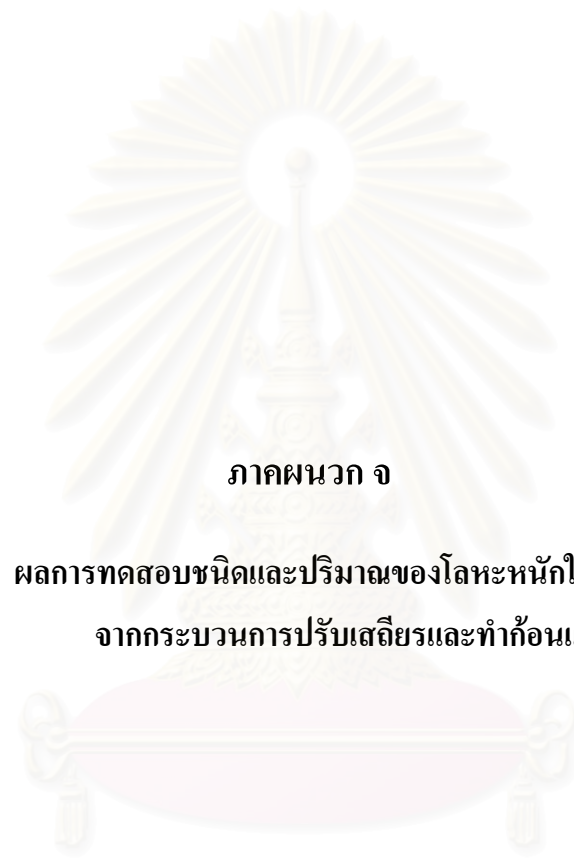
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1 ผลการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของ U.S. EPA SW-846 Method 1311(TCLP) และการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ชนิดของตัวอย่าง	มาตรฐาน	Sample No.	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Pb(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
ตัวอย่างก้อนแข็ง	TCLP	1	11.95	0.0254	0.0360	0.0114	0.0222	0.0221	0.1851
		2	11.90	0.0226	0.0199	0.0139	0.0165	0.0212	0.2110
		3	11.96	0.0129	0.0260	0.0224	0.0177	0.0108	0.2435
		Average			0.2132	0.0203	0.0273	0.0159	0.0188
	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)	1	12.53	0.0222	0.0619	0.0118	0.0253	0.0257	0.3000
		2	12.54	0.0183	0.0568	0.0116	0.0214	0.0112	0.2072
		3	12.51	0.0192	0.0484	0.0234	0.0223	0.0148	0.2647
		Average			0.2573	0.0199	0.0557	0.0156	0.0230
ตัวอย่างปรับเสถียร	TCLP	1	12.49	1.6598	0.2879	0.0239	0.2994	0.0126	0.2008
		2	12.52	1.2643	0.2840	0.0140	0.3039	0.0185	0.2091
		3	12.55	1.3851	0.2849	0.0146	0.2247	0.0172	0.1844
		Average			0.1981	1.4364	0.2856	0.0175	0.2760
	ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)	1	12.47	1.0869	0.3871	0.0205	0.1646	0.0137	0.1559
		2	12.62	0.9714	0.2716	0.0208	0.1607	0.0148	0.2141
		3	12.67	0.9522	0.2524	0.0148	0.1616	0.0252	0.2030
		Average			0.1910	1.0035	0.3037	0.0187	0.1623

ง.2 ผลการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548)

ชนิดของตัวอย่าง	Sample No.	pH	Cu(mg/l)	Zn(mg/l)	Ni(mg/l)	Pb(mg/l)	Cr(mg/l)	Ba(mg/l)
ตัวอย่างปรับเสถียร	1	12.33	2.3034	0.6021	0.0322	0.2731	0.0288	0.3114
	2	12.30	2.4118	0.6148	0.0213	0.2826	0.0280	0.4130
	3	12.37	1.9221	0.6112	0.0211	0.3112	0.0231	0.4019
	Average			2.2124	0.6094	0.0249	0.2890	0.0267
ตัวอย่างก้อนแข็ง	1	12.13	0.0293	0.0654	0.0154	0.0418	0.0332	0.2811
	2	12.14	0.0348	0.0721	0.0210	0.0401	0.0311	0.3012
	3	12.25	0.0381	0.0822	0.0221	0.0213	0.0299	0.3133
	Average			0.0341	0.0732	0.0195	0.0344	0.0314



ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบชนิดและปริมาณของโลหะหนักในตัวอย่าง
จากกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\482415a_.pks

Summary of results

Sample: 482415A Solid
Measured: 9/13/05 13:42
Quantified: 9/21/05 09:44
Sum: 100. %
RMS: 0.000
Used lines: 18
Traces: Ni Cu
Qual. program: SemiQ2004

Concentrations

Analyte	Type	Calibration status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
Na	Sample	Calibrated	Na2O	13.877	Calculate
Mg	Sample	Calibrated	MgO	1.13	Calculate
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	2.128	Calculate
Si	Sample	Calibrated	SiO2	12.961	Calculate
P	Sample	Calibrated	P2O5	0.29	Calculate
S	Sample	Calibrated	SO3	11.335	Calculate
Cl	Sample	Calibrated	Cl	0.687	Calculate
K	Sample	Calibrated	K2O	0.592	Calculate
Ca	Sample	Calibrated	CaCO3	55.806	Calculate
Ti	Sample	Calibrated	TiO2	0.092	Calculate
Mn	Sample	Calibrated	MnO2	0.045	Calculate
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	0.902	Calculate
Zn	Sample	Calibrated	ZnO	0.008	Calculate
Sr	Sample	Calibrated	SrO	0.01	Calculate
Y	Sample	Calibrated	Y2O3	0.027	Calculate
Zr	Sample	Calibrated	ZrO2	0.01	Calculate
Sb	Sample	Calibrated	Sb2O3	0.042	Calculate
Ba	Sample	Calibrated	BaO	0.057	Calculate

Sample preparation

Sample type: solid
Area ratio: 1.
Additive/sample: 0.
Normalise: to 100.0%
X-ray path: Vacuum

Quantify parameters

Recipe: c:\superq\data\new.rcp
Spectrometer resp. file: c:\superq\data\semiq.sti
Use compound list: c:\superq\example\semiq.cpl
Apply drift corr.: No
Disall. elem. set: None
Disall. lines set: None
Error weighting: Root
Max. Flow detector intensity: 2000 kcps
Max. Sealed detector intensity: 1000 kcps
Max. Scint detector intensity: 1000 kcps
Max. Duplex detector intensity: 3000 kcps

Disallowed elements

No elements disallowed

9/21/05 09:44

Page

Chulalongkorn University
Quantified peaks in c:\superq\data\482415a_.pks

Disallowed lines

No lines disallowed

Sc #	X-tal	Filter # material um	Collimator # / um	Parameters						
				Detector	kV	At. shift	Sign. level	Disall. elem. set	Disall. lines set	Used lines
1	LiF220	2 Brass 100	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
2	LiF200	5 Brass 300	1 / 150	Scint	55	3	5.0	None	None	1
3	LiF220	6 Al 750	1 / 150	Scint	55	3	5.0	None	None	3
4	LiF220	3 Al 200	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
5	LiF220	None	1 / 150	Duplex	55	3	5.0	None	None	3
6	LiF200	None	1 / 150	Flow	30	3	4.0	None	None	4
7	Ge	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	3
8	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
9	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
10	PX1	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	2

Line	Used	Lines			Scan #	X-tal	Detect.	Filter # material um	kV	mA	Collim. # / um
		Measured (keps)	Calcul. (keps)	Diff. (keps)							
O _K A	No	1.275	0.000	1.275	10	PX1	Flow	None	24	100	2 / 550
Na _K A	Yes	31.215	31.216	0.000	10	PX1	Flow	None	24	100	2 / 550
Mg _K A	Yes	6.737	6.737	0.000	10	PX1	Flow	None	24	100	2 / 550
Al _K A	Yes	8.023	8.023	0.000	9	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
Si _K A	Yes	44.286	44.286	0.000	8	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
P _K A	Yes	3.575	3.575	0.000	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
S _K A	Yes	125.839	125.837	0.002	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
Cl _K A	Yes	6.051	6.051	0.000	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
K _K A	Yes	4.389	4.389	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
Ca _K A	Yes	215.635	215.635	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
Ti _K A	Yes	0.432	0.432	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
Mn _K A	Yes	0.199	0.199	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
Fe _K A	Yes	6.802	6.802	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
Zn _K A	Yes	0.203	0.203	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
Sr _K A	Yes	0.330	0.330	0.000	3	LiF220	Scint	6 Al 750	55	45	1 / 150
Y _K A	Yes	0.970	0.970	0.000	3	LiF220	Scint	6 Al 750	55	45	1 / 150
Zr _K A	Yes	0.477	0.477	0.000	3	LiF220	Scint	6 Al 750	55	45	1 / 150
Sb _K A	Yes	0.590	0.591	0.000	2	LiF200	Scint	5 Brass 300	55	45	1 / 150
Ba _L B1	Yes	0.084	0.084	0.000	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University

Quantified peaks in c:\superq\data\482415b_.pks

Summary of results

Sample: 482415B
Measured: 9/19/05 11:02
Quantified: 9/21/05 09:45
Sum: 100. %
RMS: 0.000
Used lines: 13
Traces: Cr
Qual. program: SemiQ2004

Concentrations

Analyte	Type	Calibration status	Compound	Concentration (%)	Calculation method
	Binder	Not matched	H3BO3	9.948	Fixed
Na	Sample	Calibrated	Na2O	0.959	Calculate
Mg	Sample	Calibrated	MgO	0.609	Calculate
Al	Sample	Calibrated	Al2O3	3.64	Calculate
Si	Sample	Calibrated	SiO2	0.231	Calculate
P	Sample	Calibrated	P2O5	2.973	Calculate
S	Sample	Calibrated	SO3	2.786	Calculate
Cl	Sample	Calibrated	Cl	0.266	Calculate
Ca	Sample	Calibrated	CaCO3	78.648	Balance
Mn	Sample	Calibrated	MnO2	0.054	Calculate
Fe	Sample	Calibrated	Fe2O3	6.238	Calculate
Ni	Sample	Calibrated	NiO	0.292	Calculate
Cu	Sample	Calibrated	CuO	2.768	Calculate
Zn	Sample	Calibrated	ZnO	0.236	Calculate
Sn	Sample	Calibrated	SnO2	0.301	Calculate

Sample preparation

Sample type: Powder (binder: H3BO3)
Initial weight: 5.06 g
Final weight: 5.56 g
Area ratio: 1.
Additive/sample: 0.1
Film: None
Normalise: to 100.0% with as balance CaO
X-ray path: Vacuum

Quantify parameters

Recipe: c:\superq\data\new.rep
Spectrometer resp. file: c:\superq\data\semiq.sti
Use compound list: c:\superq\example\semiq.cpl
Apply drift corr.: No
Disall. elem. set: None
Disall. lines set: None
Error weighting: Root
Max. Flow detector intensity: 2000 kcps
Max. Sealed detector intensity: 1000 kcps
Max. Scint detector intensity: 1000 kcps
Max. Duplex detector intensity: 3000 kcps

Disallowed elements

No elements disallowed

9/21/05 09:45

Chulalongkorn University
 Quantified peaks in c:\superq\data\482415b_pks

Disallowed lines
 No lines disallowed

Sc #	X-tal	Filter # material um	Collimator # / um	Parameters						
				Detector	kV	At. shift	Sign. level	Disall. elem. set	Disall. lines set	Used lines
1	LiF220	2 Brass 100	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
2	LiF200	5 Brass 300	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	1
3	LiF220	6 Al 750	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
4	LiF220	3 Al 200	1 / 150	Scint	55	3	20.0	None	None	0
5	LiF220	None	1 / 150	Duplex	55	3	5.0	None	None	5
6	LiF200	None	1 / 150	Flow	30	3	20.0	None	None	0
7	Ge	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	3
8	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
9	PE	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	1
10	PXI	None	2 / 550	Flow	24	3	20.0	None	None	2

Line	Used	Measured (keps)	Calcul. (keps)	Diff. (keps)	Lines						
					Scan #	X-tal	Detect.	Filter # material um	kV	mA	Collim. # / um
OKA	No	1.262	0.000	1.262	10	PXI	Flow	None	24	100	2 / 550
NaKA	Yes	1.667	1.667	0.000	10	PXI	Flow	None	24	100	2 / 550
MgKA	Yes	3.377	3.377	0.000	10	PXI	Flow	None	24	100	2 / 550
AlKA	Yes	12.972	12.972	0.000	9	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
SiKA	Yes	0.745	0.745	0.000	8	PE	Flow	None	24	100	2 / 550
PKA	Yes	40.255	40.256	0.001	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
SKA	Yes	33.481	33.482	0.001	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
ClKA	Yes	2.772	2.772	0.000	7	Ge	Flow	None	24	100	2 / 550
CaKA	No	316.970	0.000	316.970	6	LiF200	Flow	None	30	80	1 / 150
MnKA	Yes	0.206	0.206	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
FeKA	Yes	39.809	39.809	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
NiKA	Yes	3.362	3.362	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
CuKA	Yes	40.072	40.073	0.001	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
ZnKA	Yes	4.312	4.312	0.000	5	LiF220	Duplex	None	55	45	1 / 150
SnKA	Yes	2.671	2.671	0.000	2	LiF200	Scint	5 Brass 300	55	45	1 / 150

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติของผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพีรพัฒน์ อ้นโต เกิดวันที่ 2 พฤศจิกายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดสมุทรปราการ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546 จนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย