

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การนำตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ที่ได้จากของเสียจากห้องปฏิบัติการมาทำ  
ให้เป็นก้อนโดยใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์



นางสาวนันทวัน หมีนเดช  
นางสาวสายตะวัน เลี้ยวสุด

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์

2/กค. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
หน้า 254 ก  
ปีการศึกษา 2543

เลขที่.....  
เลขทะเบียน 40053  
วัน, เดือน, ปี 24 ก.ค. 2544

b.....  
i.....

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Solidification of Metal Hydroxide Sludge from Heavy Metals Laboratory Waste  
Using Portland Cement



A special Project Submitted in Partial Fulfillment of  
the Requirement for the Degree of Bachelor of Science  
Major of Environmental Resource Chemistry  
Department of Chemistry  
Faculty of Science  
King Mongkut' s Institute of Technology Ladkrabang  
2000


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การนำตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ที่ได้จากของเสียจากห้องปฏิบัติการมาทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์
นักศึกษา	นางสาวนันทวัน หมื่นเดช นางสาวสายตะวัน เลี้ยวสุต
อาจารย์ที่ปรึกษา	นางยุพา ตันทวี
ภาควิชา	เคมี
สาขา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา	2543

ภาควิชาเคมีสาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
อนุมัติให้นับโครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรคณะวิทยาศาสตร์  
บัณฑิต

  
..... หัวหน้าภาควิชาเคมี  
( ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย )

คณะกรรมการสอบโครงการ  
  
..... ประธานกรรมการ  
( ผศ.ดร.ประยงค์ ดวงดี )

  
..... กรรมการ  
( อาจารย์สุจินต์ ตันติพิสิฐกุล )

  
..... กรรมการ  
( อาจารย์ยุพา ตันทวี )

ลิขสิทธิ์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Solidification of Metal Hydroxide Sludge from Heavy Metals Laboratory Waste Using Portland Cement
Name	Miss. Nantawan Muendech Miss. Saitawan Leovasut
Special Project Advisor	Mrs. Yupa Tantawee
Department	Chemistry
Major	Environmental Resource Chemistry
Academic Year	2000

### Abstract

This project investigated stabilization of heavy metal wastes 6 sample from chemical laboratory by Calcium Oxide (CaO) and solidification hydroxide sludge using Portland cement. The concentration of heavy metals Fe, Zn, Pb, Cd, Ni, Mn and Cr which are mostly used in laboratory were analyzed. The stabilization of 6 wastes by pH adjustment 9.5 with Calcium Oxides. The concentration of 7 metals in supernatants were analyzed. The results show its concentrations were lower than standard of effluent by Department of Industry . Then hydroxide sludge of 6 samples were solidified by portland cement at portland cement to water to silica ratio 100:50:200 by mass, heavy metal hydroxide sludge to portland cement ratio of 0.25 and curing time of 7 days . The cement waste properties were tested. For density ranged 2.08-2.23 ton/m<sup>3</sup> and these were upper than standard density of cement waste by Department of Industry at 1.04 ton/m<sup>3</sup> . The compressive strength of cement waste ranged 120-296 kg/cm<sup>2</sup> and these were upper than standard compressive strength of cement waste at 14 kg/cm<sup>2</sup> .The concentration of heavy metals in its extracted solution were analyzed. The results showed concentration of Zn, Pb, Cd, Ni, Mn and Cr ranged respectively from ND-0.1, ND-0.53, 0.02-0.05, 0.05-0.7, ND and 0.48-0.63. The concentration of Fe in extracted solution was not detected

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลหลายฝ่ายทางผู้วิจัย โครงการพิเศษจึงใครขอขอบพระคุณทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ยุพา ตันทวี ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานโครงการพิเศษนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และเงินทุนในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องมือ อุปกรณ์และเงินทุนในการทำโครงการพิเศษ

ท้ายนี้ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ คณาจารย์ และ เจ้าหน้าที่ทุกท่าน อีกทั้งบิดามารดา ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้กำลังใจ และสนับสนุนในทุกๆด้านตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วารสารปริทัศน์	2
1.3 วัตถุประสงค์	5
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎี	6
2.1 ของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการ	6
2.2 สมบัติและความเป็นพิษของโลหะหนัก	8
2.3 การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย	13
2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน	13
2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน	13
2.3.3 รีเวิร์สออสโมซิส	14
2.3.4 อิเล็กโตรไดอะไลซิส	14
2.3.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า	14
2.3.6 การดูดซับ	14
2.3.7 การระเหย	14
2.3.8 การปรับเสถียร	14
2.3.9 การตกตะกอนเคมี	14
2.4 การบำบัดโลหะหนักโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี	15
2.4.1 การใช้สารเคมีช่วยตกตะกอน	15
2.5 การทำให้อยู่ในรูปของแข็ง ( Solidification )	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อน ( StabiliZation/Solidification )	18
2.7 ปูนซีเมนต์	24
2.7.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	25
2.7.2 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ	28
2.7.3 วัสดุผสม	31
2.7.4 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์	31
2.7.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	35
2.7.5.1 กำลังอัดของคอนกรีต	35
2.7.5.2 การบ่มคอนกรีต	35
2.7.5.3 การผันแปรของกำลังอัดคอนกรีต	36
2.8 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน	37
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินการ	42
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย	42
3.1.1 วัสดุ	43
3.1.2 สารเคมี	44
3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์	44
3.2 วิธีการทดลอง	48
3.3 การตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์	49
3.4 การเตรียมก้อนซีเมนต์	49
3.5 ทดสอบกำลังรับแรงอัด	52
3.6 การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก	53
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	55
4.1 สมบัติของของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมี	55
4.2 การปรับเสถียรด้วยปูนขาว	61
4.3 การทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยการทำให้เป็นก้อน	67
4.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์	67
4.3.2 การทดสอบการชะละลายของซีเมนต์ก้อนจากตะกอนของเสีย	68
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	70
5.1 สรุปผลการวิจัย	71
5.2 ข้อเสนอแนะ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก ส่วนผสมโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน

ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน	21
2.2 แสดงข้อดีข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี	22
2.2 แสดงข้อดีข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี ( ต่อ )	23
2.2 แสดงข้อดีข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี (ต่อ )	24
2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	25
2.4 ลักษณะของสารประกอบที่เกิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	26
2.5 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา	28
2.6 สมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยวิธีSealoSafe	37
2.7 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิภูลประเภทต่างๆ	39
4.1 ลักษณะทั่วไปของของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี	56
4.2 แสดงการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ด้วยปูนขาวและเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตะกอน	61
4.3 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักก่อนและหลังบำบัดโดยการตกตะกอนด้วยปูนขาว	62
4.4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนัก	66
4.5 แสดงสมบัติค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์จากตะกอนของเสีย	67
4.6 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัด	68

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 อัตราส่วนที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อน	3
2.1 การจัดเก็บของเสียของห้องปฏิบัติการเคมี	6
2.2 กราฟแสดงความสามารถในการละลายโลหะหนักไฮดรอกไซด์และโลหะหนักซัลไฟด์	17
2.3 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในซีเมนต์ past	29
2.4 กราฟแสดงค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย	32
2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกละลายกับค่าความเป็นด่างและซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย	34
2.6 กราฟแสดง PC-PH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว	34
3.1 แสดงแผนการดำเนินการวิจัย	42
3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง	43
3.3 ทราयर่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช	44
3.4 เครื่องทดสอบแรงอัด	45
3.5 แบบหล่อขนาด 5x5x5 ลบ.ซม.	46
3.6 เครื่องผสมปูนซีเมนต์	46
3.7 ที่กระทุ้ง	47
3.8 เครื่องเขย่า	47
3.9 แผนผังการทดลองตามวิธีของกรมโรงงาน	48
3.10 ตัวอย่างของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี	49
3.11 ตัวอย่างที่หล่อเรียบร้อยแล้ว	50
3.12 สัดส่วนของวัสดุซีเมนต์และขั้นตอนการเตรียมก้อนซีเมนต์	49
3.13 แผนผังการทดสอบกำลังแรงอัด	52
3.14 แผนผังการทดสอบการชะละลาย	54
4.1 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย A	57
4.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย B	58
4.3 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย C	58
4.4 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย D	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย E	60
4.6 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย F	60
4.7 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณสังกะสีก่อนและหลังบำบัด	63
4.8 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณตะกั่วก่อนและหลังบำบัด	63
4.9 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมก่อนและหลังบำบัด	64
4.10 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลก่อนและหลังบำบัด	64
4.11 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณแมงกานีสก่อนและหลังบำบัด	65
4.12 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณโครเมียมก่อนและหลังบำบัด	65



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายลักษณะและคำย่อ

กก./ตร.ซม.	กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ซม.	เซนติเมตร
ซม./วินาที	เซนติเมตรต่อวินาที
(°C)	องศาเซลเซียส
%	เปอร์เซ็นต์
>	มากกว่า
มก./ล.	มิลลิกรัมต่อลิตร
AAS	Atomic Absorption Spectrophotometer
ASTM	American Society for Testing and Material
AV ratio	อัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตร
Cd	โลหะแคดเมียม
Cr	โลหะโครเมียม
Fe	โลหะเหล็ก
Meq/g	มิลลิกรัมสมมูลต่อกรัม
Mn	โลหะแมงกานีส
ND	ไม่สามารถตรวจวัดได้
Ni	โลหะนิกเกิล
PH	ค่าความเป็นกรดต่าง
Pb	โลหะตะกั่ว
Ppm	ส่วนในล้านส่วน
U.S.EPA	United State Environmental Protection Agency
W/C	อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับซีเมนต์
Zn	โลหะสังกะสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากการเรียนการสอนในวิชาปฏิบัติการเคมีต่างๆ เช่น ปฏิบัติการเคมีทั่วไป เคมีเชิงฟิสิกส์ เคมีเชิงอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้เครื่องมือ เคมีวิเคราะห์ โดยในแต่ละวิชาได้มีการใช้สารเคมีประเภทโลหะหนักหลายชนิด ซึ่งในแต่ละปีของเสียจะมีปริมาณมากขึ้น การทิ้งของเสียลงในอ่างจะทำให้โลหะหนักแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงควรที่จะมีการบำบัด การสร้างระบบบำบัดทางเคมีโดยการรวบรวมน้ำเสียที่ใช้จากห้องปฏิบัติการทั้งหมดมาบำบัด ต้องใช้งบประมาณสูง และค่าเดินระบบ ( Operating Cost ) มีราคาแพง ปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดต้องมากพอจึงจะคุ้มค่า นอกจากนี้การรวบรวมน้ำเสียจากกิจกรรมทุกอย่าง จากการเทล้างสารเคมีและน้ำล้างภาชนะทุกชนิดจากห้องปฏิบัติการไปยังบ่อบำบัดทำให้ปริมาณของน้ำเสียมีมากเกินไปอันเป็นการเพิ่มต้นทุนในการบำบัด

การแยกของเสียก่อนทิ้งเป็นประเภทต่างๆ เช่น ของเสียโลหะหนักทั่วไป ปุ๋ย ด่าง วัตถุอันตรายอินทรีย์ ( Organic Solvents ) จะทำให้ปริมาณของเสียไม่มากนักและยังสามารถหาวิธีที่เหมาะสมในการบำบัดสำหรับของเสียแต่ละประเภทได้ด้วย ปัจจุบันภาควิชาเคมีได้ทำการเก็บของเสียโดยแยกเก็บของเสียที่มีโลหะหนักไว้ต่างหาก ซึ่งทางห้องปฏิบัติการยังไม่ได้นำไปบำบัดทำให้ปริมาณของเสียมากขึ้นในแต่ละปีและได้ทำให้เกิดปัญหาต่อการหาที่จัดเก็บต่อไป

โดยทั่วไปวิธีการบำบัดของเสียประเภทโลหะหนักจะใช้วิธีปรับค่าความเป็นกรดต่างตามแต่ละชนิดของโลหะหนัก เพื่อตกตะกอนโลหะหนักให้อยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นการทำให้โลหะหนักอยู่ในรูปที่เสถียร ( Stabilization ) จากการทำวิธีนี้ทำให้มีตะกอนโลหะหนักเกิดขึ้น และตะกอนโลหะหนักดังกล่าวจัดเป็นของเสียอันตรายประเภทหนึ่ง ซึ่งจัดในข่ายสารพิษที่ต้องนำไปทำลายฤทธิ์ให้ได้ตามเกณฑ์มาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรมเสียก่อน จึงสามารถนำไปกำจัดโดยการฝังกลบได้

การศึกษานี้เป็นการศึกษาการบำบัดของเสียประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการ โดยทำการปรับเสถียร ( Stabilization ) ด้วยปูนขาว ( CaO ) ตามวิธีของกรมโรงงานและนำตะกอนที่ได้มาทำให้เป็นก้อนด้วยปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เพื่อยับยั้งการเคลื่อนย้าย ( Immobilize ) โลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมอย่างถาวร ในการศึกษาที่ใช้สัดส่วนของตะกอนของเสียต่อซีเมนต์ ( W/C ) ในอัตราส่วน 0.25 : 1 ทำการบ่มซีเมนต์ก้อนเป็นเวลา 7 วัน ต่อจากนั้นนำมาทดสอบกำลังแรงอัด ( Compressive Strength ) และสมบัติในการชะละลาย ( Leaching Tests ) โลหะหนักของก้อนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

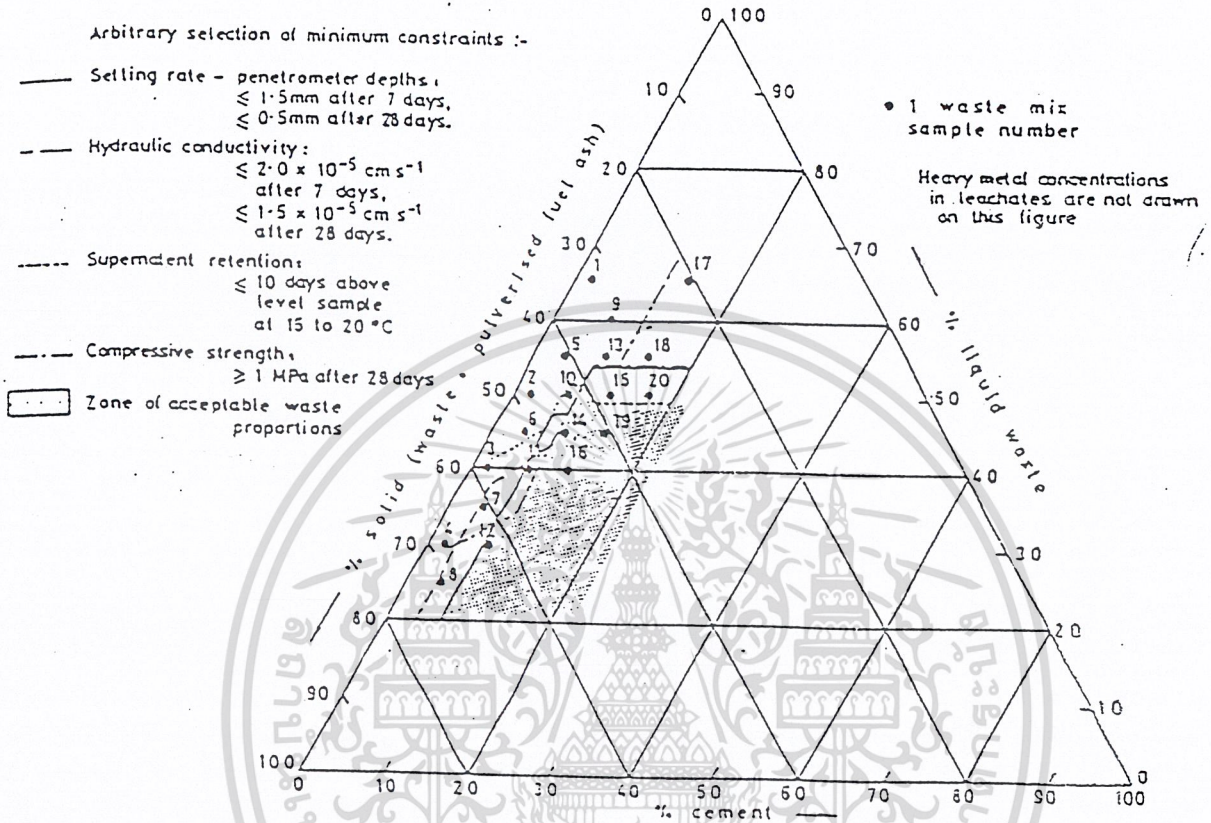
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วารสารปริทัศน์

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์เป็นดังนี้

Shively และคณะ (1986) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยการทำให้เป็นก้อนจากนั้นจึงทดสอบกำลังแรงอัด (Compressive Strength) และการชะละลาย (Leaching Tests) ของโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสมกัน จากผลการทดสอบกำลังแรงอัด ที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 วัน พบว่า เมื่อใช้อาร์เซนิก และแคดเมียมในการกำจัดโดยการทำให้เป็นก้อน จะทำให้กำลังแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังแรงอัดเฉพาะค่า W/C 0.5 ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะไม่มีผลต่อกำลังแรงอัด สำหรับค่าความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสม พบว่า ความเข้มข้นของน้ำสกัดโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA ทั้งกรณีที่ใช้ W/C 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม W/C จาก 0.5 เป็น 1.0

Baldwin และคณะ (1987) ได้ทำการวิจัยการกำจัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ผสมกับของเสียหลายชนิด จำแนกเป็น 2 จำพวก คือ พวกที่เป็นของเหลว (Liquid Waste) ได้แก่ Oxidized Solid Cyanide Waste (In Liquid Form), Oxidized Liquid Cyanide Waste และ Neutralized Acid/Alkali และ พวกที่เป็นของแข็ง (Solid Waste) ได้แก่ แก้วลอยที่บดละเอียด (Pulverized Fly Ash) และซีโลหะจากเตาหลอม (Metal Slages) ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ของก้อนซีเมนต์ที่ได้ เช่น การทดสอบการชะละลาย (Leaching Tests) กำลังแรงอัด (Compressive Strength) อัตราการตกตัว (Setting Rate) ฯลฯ โดยใช้มาตรฐานการทดสอบจาก Standard Waste Research Unit Method จากผลการทดลองนำค่าอัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ ของเสียในรูปของเหลว และของเสียในรูปของแข็งมาเขียนกราฟ ทำให้สามารถทราบอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดได้ ดังแสดงรายละเอียดดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการกำจัดของเสียด้วยการทำให้เป็นก้อน  
 ( Baldwin และคณะ , 1987 )

Shin และคณะ ( 1988 ) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยการทำเป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งมีปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนผสมทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณของเสีย และปริมาณตัวตกตะกอน ( Precipitator ) พบว่าการชะละลายของโครเมียมและสังกะสีจะลดลง เมื่อลดค่าอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณตัวตกตะกอน สำหรับค่ากำลังแรงอัดที่ระยะเวลาบ่มตัว 14 วัน จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณของเสียที่กำจัด และทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Anova Analysis พบว่า อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ จะมีผลต่อค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการถูกชะละลายของโครเมียม สำหรับอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์จะมีผลต่อค่าความสามารถในการถูกชะละลายของสังกะสี และค่ากำลังแรงอัดของแท่งซีเมนต์ ส่วนการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพิจารณาปัจจัยต่างๆ เช่น ค่าใช้จ่าย ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของโครเมียม และสังกะสีที่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 5 ppm ของโครเมียมและสังกะสี และค่ากำลังแรงอัดของซีเมนต์แท่งมีค่าสูงกว่า 10 กก./ตร.ซม. จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกากตะกอนแห้ง 30 กรัม ดังนี้คือ อัตราส่วนผสมทรายตอปูนซีเมนต์ น้ำตอปูนซีเมนต์ และปริมาณตัวตกตะกอน เท่ากับ 1, 1.5 และ 1.075 กรัม ตามลำดับ

พัตรยศ และโกคิน (2542) ได้ทำการศึกษากการทำลายฤทธิ์ของโลหะหนัก 4 ชนิดที่ไว้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ โลหะหนักนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้โลหะหนักในเตรทและโลหะหนักในเตรทผสมทั้ง 4 ชนิด ต่อวัสดุประสานที่สัดส่วน 0.25 และ 0.5 ทำการบ่มซีเมนต์เป็นระยะเวลา 7 วัน และจากการทดสอบกำลังแรงอัดของโลหะหนักในซีเมนต์ก้อน พบว่าที่สัดส่วนของโลหะหนักในเตรทเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 0.5 กำลังแรงอัดจะลดลง และเมื่อเพิ่มเวลาบ่มจาก 7 วัน เป็น 28 วัน กำลังแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยกำลังแรงอัดของก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักทั้งหมดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (ช่วง 17-158 กก./ตร.ซม., มาตรฐาน 14 กก./ตร.ซม.)

เมื่อนำมาศึกษาสมบัติการชะละลาย ( กนกพร และอรรณวิทย์ , 2542 ) พบว่าค่าการชะละลายของโลหะหนักในก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักในเตรทเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของโลหะในเตรท และค่าการชะละลายของโลหะในเตรทลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเวลาบ่มจาก 7 วัน เป็น 28 วัน โดยค่าการชะละลายของโลหะหนักทุกชนิด ทุกตัวอยู่ในมาตรฐานน้ำชะของกรมโรงงานอุตสาหกรรมยกเว้น  $Zn(NO_3)_2$  ที่สัดส่วน W/C 0.5 เวลาบ่ม 7 วัน มีค่าใกล้เคียงค่ามาตรฐาน

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ ของเสียเป็นโลหะหนักผสมหลายชนิด เพื่อให้แน่ใจว่า โลหะทุกชนิดในน้ำชะจากก้อนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานจึงเลือกใช้ W/C 0.25 โดยใช้เวลาบ่ม 7 วัน ในการทดลองนี้ของเสียที่ใช้เป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์

### 1.3 วัตถุประสงค์

- 1.) ศึกษาความสามารถในการบำบัดโลหะหนักในของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการโดยวิธีปรับเสถียร (Stabilization)
- 2.) ศึกษาลักษณะและปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้นและปริมาณสารเคมีที่ใช้ปรับเสถียรต่อหน่วยปริมาตรของของเสีย
- 3.) ศึกษาสมบัติของก้อนซีเมนต์จากการทำให้ตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์เป็นก้อนโดยใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์
- 4.) ศึกษาปริมาณสารเคมีที่ใช้ปรับเสถียรและทำให้เป็นก้อนต่อหน่วยปริมาตรของของเสีย
- 5.) ศึกษาการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะใช้ตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์จากของเสียโลหะหนักในห้องปฏิบัติการให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ โดยทำการปรับเสถียรของเสียโลหะหนักด้วยปูนขาว ( $\text{CaO}$ ) ให้ของเสียโลหะหนักมีค่า พีเอช เป็น 9 ซึ่งเป็นวิธีการของกรมโรงงาน โดยมีตัวแปรที่เกี่ยวข้อง คือ สัดส่วนของตะกอนไฮดรอกไซด์ และเวลาบ่ม ดังนี้

- 1.) ใช้สัดส่วน ของเสียดต่อซีเมนต์ (W/C) 0.25
- 2.) ใช้ระยะเวลาบ่มทั้งหมด 7 วัน

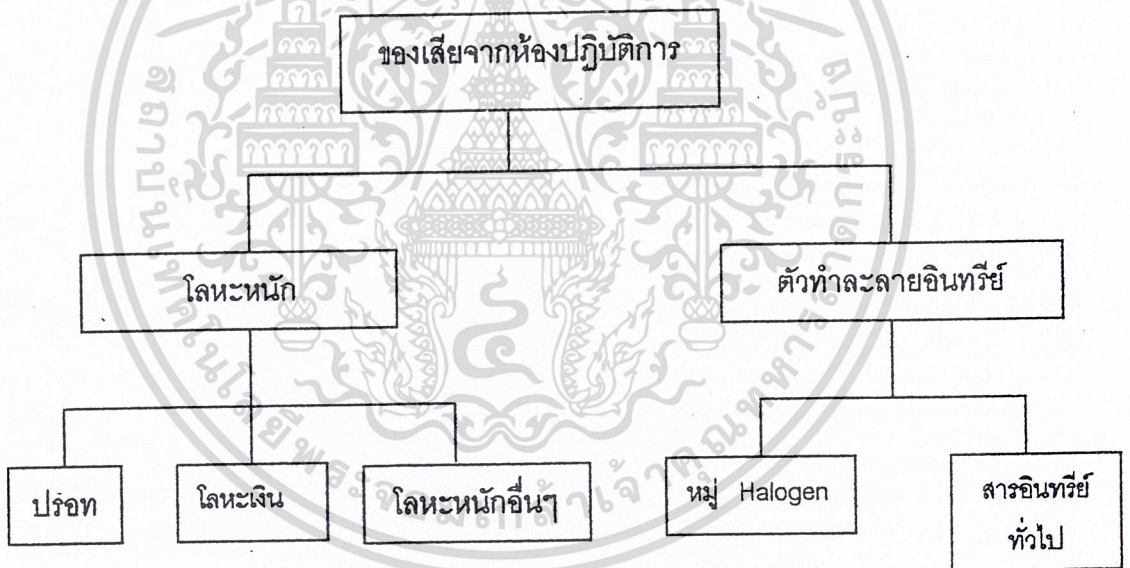
### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย

- 1.) สามารถลดปัญหาการกำจัดของเสียประเภทโลหะหนักของห้องปฏิบัติการ
- 2.) ลดพื้นที่การจัดเก็บของเสียของห้องปฏิบัติการ
- 3.) ทราบถึงความสามารถในการบำบัดโลหะหนักในของเสียโลหะหนักในห้องปฏิบัติการ จากวิธีการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ด้วยปูนขาว ( $\text{CaO}$ )
- 4.) ทราบถึงคุณสมบัติของก้อนซีเมนต์ จากการผสมตะกอนไฮดรอกไซด์ ด้วยการทดสอบค่าการชะละลายโลหะหนัก และกำลังแรงอัดของก้อนซีเมนต์

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 ของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการ

ในการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการเคมีต่างๆ เช่น ปฏิบัติการเคมีทั่วไป เคมีอินทรีย์ เคมีเชิงฟิสิกส์ เคมีวิเคราะห์ เคมีเชิงอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้เครื่องมือ มีสารเคมีหลายชนิดที่ใช้ในการปฏิบัติการ เมื่อใช้แล้วจะกลายเป็นของเสีย เพื่อให้ง่ายต่อการบำบัด ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ได้แยกเก็บของเสียออกเป็นประเภทต่างๆ เพื่อรอทำการบำบัดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2.1 การจัดเก็บของเสียของห้องปฏิบัติการเคมี

สำหรับของเสียโลหะหนัก แบ่งเป็น ปรอท ซึ่งต้องแยกไปกำจัดต่างหากโลหะเงินซึ่งเป็นโลหะที่มีราคา แยกเก็บต่างหากเพื่ออาจนำกลับมาใช้ใหม่ ส่วนโลหะอื่นๆจะทิ้งรวมกันจากการสำรวจโลหะหนักที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมีจะมีหลายชนิด ดังต่อไปนี้

**ปรอท**

Mercuric acetate	Mercury (II) nitrate
Mercury (II) oxide	Mercury (II) iodide
Mercury (II) chloride	Mercury (II) chloride powder
Mercury (II) sulphate	

**โลหะเงิน**

Silver chloride
Silver nitrate
Silver sulphate

**โลหะหนักทั่วไป****โครเมียม**

Chromium	Chromium (III) chloride
Chromium (III) nitrate	Potassium chromium
Potassium dichromate	Ammonium chromate

**แคดเมียม**

Cadmium chloride	Cadmium sulphat
------------------	-----------------

**สังกะสี**

Zinc	Zinc acetate
Zinc chloride	Zinc sulphate
Zinc oxide	Zinc nitrate hexahydrate

**เหล็ก**

Ferric chloride	Ferric nitrate
Ferrous chloride	

## นิกเกิล

Nickel (II) chloride

Nickel (II) sulphate hexahydrate

## ตะกั่ว

Lead acetate

Lead chloride

Lead nitrate

## แมงกานีส

Manganese dioxide

Manganese (II) carbonate

Manganous chloride

Manganese sulphate

โลหะหนักทั่วไปที่ใช้มากได้แก่ เหล็ก แมงกานีส โครเมียม แคดเมียม นิกเกิล สังกะสีและตะกั่ว ดังนั้น ในการศึกษาคุณสมบัติจึงศึกษาการบำบัดโลหะหนัก 7 ชนิดนี้ในของเสีย

## 2.2 สมบัติและความเป็นพิษของโลหะหนัก

### โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ระหว่าง 23-92 ภายในคาบที่ 4-7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งหมด 68 ธาตุ โลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง (ยกเว้นปรอทที่เป็นของเหลวเมื่ออยู่ในสภาวะอุณหภูมิปกติ) สมบัติทางกายภาพของโลหะหนัก คือ นำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว เหนียว สามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆได้ และสะท้อนแสงได้ดี ส่วนสมบัติทางด้านเคมีที่สำคัญของโลหะหนัก คือ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า ดังนั้นโลหะหนักจึงสามารถที่จะรวมกับสารอื่นเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ได้หลายรูปซึ่งเสถียรกว่าโลหะอิสระ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งสามารถที่จะถ่ายทอดสู่สิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โลหะหนักเหล่านี้จะแพร่กระจายอยู่ในสิ่งแวดล้อมโดยปนเปื้อนในดิน น้ำ อากาศ ผัก และผลไม้ จากนั้นจึงเข้าสู่มนุษย์ โลหะหนักหลายชนิดมีสมบัติเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต อาจมีผลทำให้สิ่งมีชีวิตพิการหรือตายได้

## แคดเมียม

แคดเมียมเป็นธาตุที่มีอยู่น้อยในธรรมชาติ ส่วนมากมักพบปนอยู่กับแร่ธาตุสังกะสี ทองแดง และดีบุก ปกติในธรรมชาติแคดเมียมจะรวมตัวกับกำมะถันเป็น แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium sulfide)

ในทางอุตสาหกรรมแคดเมียมมีความสำคัญ และมีประโยชน์หลายประการ เช่น ใช้ในการชุบโลหะ ทำยาง พลาสติก โลหะผสม แบตเตอรี่ ผสมซีเลเนียมทำสี เป็นส่วนผสมของน้ำมันเครื่อง

แคดเมียมเป็นโลหะที่เป็นอันตราย โดยอวัยวะในร่างกายมนุษย์ที่เป็นส่วนที่ได้รับอันตรายจากแคดเมียม คือ ตับ และไต ซึ่งผลกระทบจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับแคดเมียมเข้าไป 200 ugCd/g และปริมาณการสะสมของแคดเมียมในร่างกายจะเพิ่มขึ้นตามอายุซึ่ง half-life ของแคดเมียมในร่างกายมนุษย์ประมาณ 20-30 ปี เมื่อร่างกายได้รับพิษเนื่องจากการสูดดมหรือหายใจเอาสารที่มีแคดเมียมเข้าไปอาการที่เกิดขึ้น คือ คอแห้ง ระบายคอ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ เมื่อได้รับแคดเมียมมากขึ้นจะมีอาการหายใจไม่ออก ถ้ายังคงได้รับเข้าไปอีกอาจถึงตายได้ ส่วนอาการที่เกิดจากการกินอาหารหรือน้ำที่มีแคดเมียมเจือปน คือ อาเจียน ท้องร่วง ถ้าได้รับพิษเรื้อรังทำให้เกิดโรค อีไต-อีไต (Itai-itai Disease) ทำให้ผู้ได้รับพิษมีความเจ็บปวดทรมานมาก เพราะเกิดจากอาการไตพิการ ระยะแรกผู้ป่วยจะมีอาการปวดบริเวณสะโพก แขน ขา ส่วนในกรณีที่ผู้ป่วยได้รับแคดเมียมสะสมมานานจะมีอาการรุนแรงมาก คือ เจ็บปวดที่ร่างกาย แรกกดของน้ำหนักตัวที่มีต่อกระดูกสันหลังทำให้ร่างกายเตี้ยหรือค่อมลง กระดูกเปราะในระยะสุดท้าย ผู้ป่วยจะสูญเสียแคลเซียมออกทางปัสสาวะมาก จนกระดูกผุกร่อน และเสียชีวิตในที่สุด

## ตะกั่ว

ตะกั่วเป็นธาตุทรานซิชัน พบกระจายอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ ส่วนมากอยู่ในรูปสินแร่ กาลีนา (GALENA, PbS) เซอร์ไซต์ (CERUSSITE,  $PbCO_3$ ) และ แองกลีไซต์ (ANGLESITE,  $PbSO_4$ ) โดยปนอยู่ในดินชั้นบางชนิด ในลักษณะของสารประกอบซัลไฟด์ ตะกั่วจัดเป็นโลหะหนักมีความถ่วงจำเพาะ 11.34 จุดหลอมเหลว  $324.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  และจุดเดือด  $1,751\text{ }^{\circ}\text{C}$  ตะกั่วเมื่อบริสุทธิ์จะมีสีเทา รอยตัดและผิวบนจะเป็นสีฟ้า เป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ สามารถ ดัด รีด ตีได้ง่าย ขยายตัวมากเมื่อได้รับความร้อน ผสมกับโลหะต่างๆได้หลายชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันมีการนำตะกั่ว มาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้งานกันอย่างมาก ซึ่งทำให้อุตสาหกรรมประเภทที่ใช้ตะกั่วในการผลิตนั้นมีจำนวนมาก ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้ทำการปล่อยตะกั่วออกสู่สิ่งแวดล้อม จึงทำให้เกิดผลกระทบต่อด้านคุณภาพของสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติอย่างรุนแรง ตะกั่วเป็นธาตุที่มนุษย์รู้จักและนำมาใช้ประโยชน์ตั้งแต่ครั้งโบราณ เพราะมีคุณสมบัติเป็นโลหะอ่อน มีจุดหลอมเหลวต่ำ ทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย และทนต่อการผุกร่อนได้ดี มีการนำตะกั่วมาใช้ในกิจกรรมต่างๆ อาทิ การผลิตแบตเตอรี่รถยนต์ การใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมเคมี เช่น การผลิตสี และหมึกพิมพ์

ตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศ อาจแพร่กระจายสู่สิ่งมีชีวิตได้ 2 ทาง คือ ทางตรง โดยการที่มนุษย์ หรือสัตว์ สูดดมหรือกินอาหารที่มีการเจือปนเข้าไป ส่วนทางอ้อมนั้นตะกั่วจะเข้ารกบกวน หรือทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาได้ช้ามาก ส่วนใหญ่จะจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงหมุนเวียนไปตามกระแสเลือด กระจายไปทั่วร่างกายเข้าสู่เนื้อเยื่อส่วนต่างๆ โดยสะสมอยู่ในไตเป็นจำนวนมาก รongลงมาเป็นตับ จากนั้นจะเกิดการแพร่กระจายอีกครั้ง โดยจะไปจับยึดกระดูกเป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะกระจายไปอยู่ในผมและฟัน ตะกั่วเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะเป็นผลรบกวนและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตได้หลายระบบด้วยกันคือ

- ระบบสร้างเม็ดเลือดแดง พิษตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจางโดยมีผลไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ฮีโมโกลบิน (Heme) หลายชนิด ทำให้ระดับฮีโมโกลบินลดลง
- ระบบประสาท ตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้า ข้อมือข้อเท้าตกรึง เวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ปวดหัว หมดหนืด ตกใจง่าย มึนงง และมีอาการชัก
- ไต ตะกั่วจะทำความเสียหายแก่ท่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาล และ ฟอสเฟส ออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไตทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

## นิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่อยู่ในธาตุหมู่ II B ในตารางธาตุมีเลขออกซิเดชัน+2 เลขอะตอม 28 น้ำหนักอะตอม 58.70 จุดเดือด 2732 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 1453 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะ 8.908 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดีสามารถนำไปผสมเพิ่มกับโลหะอื่นๆได้เป็นโลหะอัลลอยด์

นิกเกิลจะถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายชนิดได้แก่ โรงงานชุบโลหะที่จะทำให้ได้โลหะที่ทนทานต่อการผุกร่อนใช้ในการผลิตเหล็กใช้ในการกันสนิมและโลหะผสมชนิดอื่น ๆ นอกจากที่ยังนิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมี ใช้ผลิตแบตเตอรี่ชนิดที่ใช้โลหะนิกเกิลและแคดเมียม(Nickel-Cadmium battery)ใช้ในการผลิตตรงควัดในการผลิตสีที่มีมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลจะมีฝุ่นนิกเกิลและนิกเกิลคาร์บอนิลเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำนิกเกิลให้บริสุทธิ์ซึ่งเป็นสารที่มีความเป็นพิษร้ายแรงมาก

กลไกการออกฤทธิ์ คือ จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์เมื่อนิกเกิลเข้าสู่ร่างกายจะไปสะสมตามกระดูกสันหลัง สมอง ปอดและหัวใจ อาการของผู้ได้รับพิษมีดังนี้ คือ ปวดหัว มีง คลื่นไส้และอาเจียน แน่นหน้าอก ไอแห้ง ถ้าหากมีอาการรุนแรงอาจมีเลือดออกในปอดได้ นอกจากนี้ยังพบว่า นิกเกิลมีคุณสมบัติทำเป็นสารชักนำให้เกิดมะเร็งในสัตว์ทดลอง คนงานที่ประกอบอาชีพเกี่ยวข้องกับการใช้นิกเกิลมีโอกาสเป็นมะเร็งในช่องจมูกและโพรงจมูกสูงกว่าคนปกติ ประมาณ 150 เท่า

### โครเมียม

โครเมียม(Cr)เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากับ24เกิดตามธรรมชาติในรูปของโครไมต์หรือสินแร่Chrome iron ( $FeOCr_2O_3$ )ที่มีอยู่ประมาณ0.037%ของเปลือกโลกทั่วทั้งโลกจะมีความเข้มข้นของโครเมียมในดินอยู่ในช่วงตั้งแต่ปริมาณน้อยมาจนถึง24%ขณะที่ความเข้มข้นในบรรยากาศจะมีอยู่ในช่วง0.001-0.007ไมโครกรัม/ลูกบาศก์เมตรโครเมียมมีเลขออกซิเดชันตั้งแต่-2ถึง+6ซึ่งจะพบมากในคาร์บอนิลและสารประกอบอินทรีย์

- โครเมียม(+2) เป็นตัวรีดิวซ์ที่แรงและถูกออกซิไดซ์เป็นโครเมียม(+3)โดยอากาศ
- โครเมียม(+3)เป็นเวเลนซ์ที่เสถียรเป็นรูปที่พบมากในธรรมชาติเมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโดยมีโมเลกุลของน้ำเป็นลิแกนด์ในสภาวะกรด $[Cr(H_2O)_6]^{3+}$  และในสภาวะด่าง $[Cr(OH)(H_2O)_5]^{2+}$
- โครเมียม(+6)พบมากในธรรมชาติพอๆกับ(+3)แต่พบในรูปสารประกอบที่มีออกซิเจน(Oxo species)ตัวอย่างเช่นไดโครเมต( $Cr_2O_7$ )<sup>2-</sup>

ปัจจุบันได้มีการนำโครเมียมมาใช้อย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก, สีทา, สี ย้อม, สารยืดอายุไม้, สารป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ, การชุบโครเมียม, การฟอกหนังและอุตสาหกรรมการชุบเพลทโลหะและการประดิษฐ์ส่วนผสมประกอบรถยนต์ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการนำโลหะมาชุบโครเมียมมากที่สุด

โครเมียมหรือสารประกอบโครเมียมส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของฝุ่นและควันซึ่งจะเข้าสู่ร่างกายได้โดย

- 1.ทางจุมูก โดยการสูดหายใจของผงและควันของกรดโครมิก ซึ่งส่วนใหญ่จะตกค้างบริเวณจุมูกและทำอันตรายแก่กระดูกอ่อนที่กั้นระหว่างจุมูกและอาจเข้าไปถึงปอดซึ่งอาจจะทำให้เกิดมะเร็งขึ้นได้
- 2.ทางผิวหนัง คนงานที่ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับโครเมียมซึ่งอาจได้รับฝุ่นละอองหรือควันของโครเมียมจะเกิดปฏิกิริยาต่อผิวหนังได้

### สังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ II B ในตารางธาตุมีเลขออกซิเดชัน+2 เลขอะตอม 28 น้ำหนักอะตอม 58.70 จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 7.14 มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี

สังกะสีส่วนใหญ่ใช้เคลือบเหล็กเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเป็นสารที่มีสภาพความนำทางไฟฟ้ามากกว่าเหล็กในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนสังกะสีจะทำหน้าที่เป็นตัวถูกกัดกร่อนแทนเหล็ก ออกไซด์ของสังกะสีใช้ในงานประดิษฐ์ทางหัตถกรรม การเคลือบลงยา เคลือบกระเบื้องปูพื้น แก้วกระจกเงา ไม้ขีดไฟ สี เครื่องเคลือบดินเผา อุตสาหกรรมยาง ยางรถ หลอดโลหะ โลหะสังกะสีสามารถตัดงอเป็นรูปทรงใดๆ ได้ง่าย

สังกะสีเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์หลายชนิดโดยเอนไซม์ที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบในสัตว์กระดูกสันหลังนั้นมีประมาณน้อย ระดับมาตรฐานของสังกะสีในพืช คือ 25-150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่ถ้าความเข้มข้นสูงกว่า 400 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จะเป็นพิษ ในมนุษย์นั้นจะมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบประมาณ 1.4-2.3% ถ้าขาดสังกะสีจะทำให้กระดูกอ่อน ลดอัตราการจับตัวเป็นก้อนของเลือด ทำให้เป็นแผล ผิวน้ำหนักผิดปกติและปัญหาอื่นๆ

### 2.3 การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียมียหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

### 2.3.1 การแลกเปลี่ยนไอออน ( Ion Exchange )

กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนนี้สามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกจัดโดยเรซิน ( Resin ) ไม่เท่ากันซึ่ง การแลกเปลี่ยนไอออนนี้จะมีทั้งที่ได้แบบตามธรรมชาติ และชนิดสังเคราะห์ วิธีการนี้จะเหมาะ สำหรับโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง

### 2.3.2 ออกซิเดชันและรีดักชัน ( Oxidation and Reduction )

เป็นวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมี สารประกอบโลหะหนักต่างๆ เจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อให้ทำปฏิกิริยา ออกซิเดชันหรือรีดักชันกับสารประกอบที่ต้องการกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็น สารประกอบอื่นที่ไม่มีพิษหรือตกตะกอนได้

### 2.3.3 รีเวอร์สออสโมซิส ( Reverse Osmosis )

วิธีนี้เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดัน ระหว่างแผ่นเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลส อะซิเตด และโพลีเอมีน ซึ่งจะใช้เฉพาะตัวทำละลาย ผ่าน Semipermeable Membrane เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้น วิธีนี้ต้องใช้ แรงดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ

### 2.3.4 อิเล็กโทรไดอะไลซิส ( Electrodialysis )

วิธีนี้เป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรงร่วมกับการใช้ เมมเบรนที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนแต่ละชนิด ( Ion Selective Membrane ) กลไกของวิธีการ นี้เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลาย วิธีนี้มีต้นทุนการก่อสร้างและการ ดำเนินงานสูง แต่มีข้อดี คือ สามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

### 2.3.5 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า ( Electrolytic Recovery )

วิธีนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่ละลายอยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทดและเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงาน

### 2.3.6 การดูดซับ ( Adsorption )

วิธีนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดมลทินสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุลและสารดูดซับที่มักใช้ในระบบบำบัด คือ ถ่านกัมมันต์ ( Activated carbon ) เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักได้ และสามารถลดความเข้มข้นของโลหะอื่นๆ เช่น ตะกั่ว ทองแดง เป็นต้น

### 2.3.7 การระเหย ( Evaporation )

วิธีการระเหยนี้เป็นวิธีที่ง่าย ๆ ที่ใช้ทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่บรรยากาศธรรมดา ( Atmospheric Evaporation ) และระเหยภายใต้สุญญากาศ ( vacuum Evaporation ) วิธีการบำบัดแบบนี้จะได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงเท่านั้น แต่วิธีนี้มีข้อเสีย คือ ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

### 2.3.8 การปรับเสถียร ( Stabilitation )

กระบวนการปรับเสถียรเป็นการเปลี่ยนสารพิษให้อยู่ในรูปที่เสถียรไม่สามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ซึ่งมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การปรับพีเอช การตกตะกอน การย่อยสลายด้วยอินทรีย์

### 2.3.9 การตกตะกอนทางเคมี ( Chemical Precipitation )

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานแล้ว เป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน ทำโดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำทิ้ง เพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่ละลายอยู่เกิดตะกอนแยกออกมาจากน้ำได้

## 2.4 การบำบัดโลหะหนักโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

### 2.4.1 การใช้สารเคมีช่วยตกตะกอน

สารเคมี Coagulant ที่นำมาใช้แต่ละตัวต้องทราบลักษณะสมบัติเฉพาะ เพื่อจะสามารถควบคุมการทำงานได้ถูกต้องซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ปูนขาว ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

ปูนขาว (Lime)

1. มีราคาถูก สร้างตะกอนได้ดี เกิดตะกอนมาก ทำให้พีเอชสูง
2. เกาหรือจับตัวเป็นก้อนง่าย
3. การผสมกับน้ำเพื่อให้เกิดเป็น slurry ควรมีความเข้มข้นประมาณ 10 % ของ  $\text{Ca(OH)}_2$

ในการผสมจะทำให้เกิดความร้อนสูงประมาณ 82 องศาเซลเซียส และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 3-60 นาที ตามแต่คุณภาพของปูนขาว

เมื่อผสมปูนขาวลงในน้ำ ปูนขาวจะสลายตัวให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca}^{2+}$

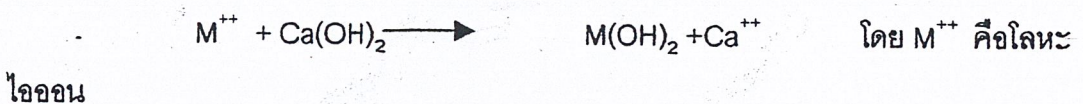


$\text{Ca}^{2+}$  จะรวมตัวกับอนุภาคคอลลอยด์ และทำลายประจุลบของอนุภาคคอลลอยด์ จนอนุภาคคอลลอยด์สามารถจับตัวกันเป็นก้อนขนาดใหญ่และสามารถจมตัวลงได้



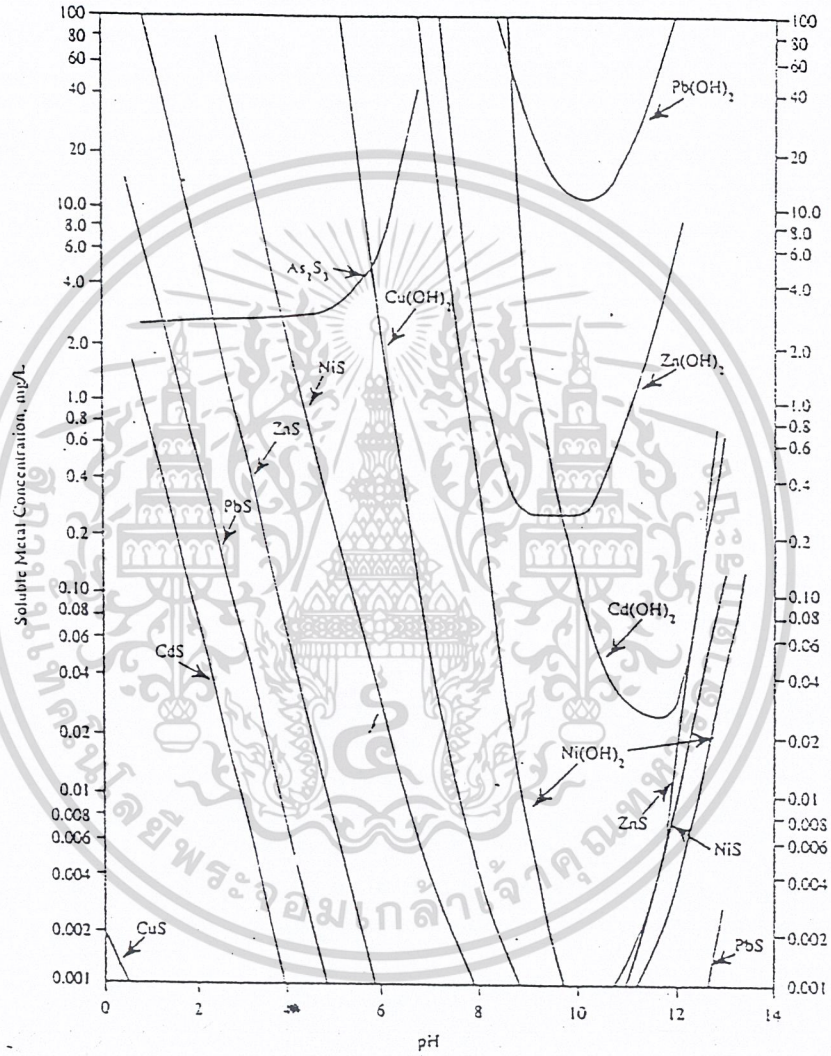
การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ (Hydroxide Precipitation)

ทำได้โดยการเติมสารละลายที่มีหมู่ไฮดรอกไซด์ลงไปในน้ำที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก สารเคมีที่เติม คือ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เกิดปฏิกิริยาดังนี้



การตกผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัด คือ โลหะไฮดรอกไซด์จะมีคุณสมบัติกึ่ง(Amphoteric Property ) คือ จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่งแต่จะตกตะกอนเป็นช่วงพีเอชกว้างโดยทั่วไปโลหะส่วนใหญ่จะตกตะกอนได้ที่พีเอช 8-11 และโลหะไฮดรอกไซด์นี้สามารถละลายกลับมาได้อีกถ้าค่าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก

ในกระบวนการตกตะกอนด้วยไฮดรอกไซด์ โลหะหนักจะถูกกำจัดออกโดยการเติมสารที่เป็นด่าง เช่น โซดาไฟหรือปูนขาว เพื่อปรับค่าพีเอชของน้ำเสียให้ถึงจุดที่โลหะมีความสามารถในการละลายต่ำสุด โดยทั่วไปความสามารถในการละลายของโลหะหนักไฮดรอกไซด์ในสารละลายจะลดลงเมื่อปรับพีเอชเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง(isoelectric) หลังจากนั้นโลหะจะกลับมาละลายได้อีกเพราะกลายเป็น amphoteric โลหะที่ตกตะกอนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์แล้วสามารถกำจัดออกได้โดยการรวมตะกอนและปล่อยให้ตกตะกอนหรือกรอง การตกตะกอนจะขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการละลาย( $K_{sp}$ ) ของโลหะไฮดรอกไซด์ ส่วนประสิทธิภาพในการแยกของแข็งและของเหลวในระบบจะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น ขนาด ความหนาแน่นของโลหะไฮดรอกไซด์ เทคนิคนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ค่าใช้จ่ายต่ำ และควบคุมได้ง่ายด้วยค่าพีเอช

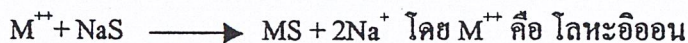


ภาพที่ 2.2 กราฟแสดงความสามารถในการละลายของโลหะไฮดรอกไซด์และโลหะซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอย่างอ้อมถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การตกตะกอนซัลไฟด์

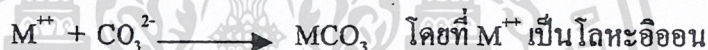
การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์สารเคมีที่มีมักจะใช้ในการตกตะกอน คือ โซเดียมซัลไฟด์ (NaS) และเฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาคังสมการ



ข้อดีของการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ คือ การละลายของโลหะซัลไฟด์เกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโลหะไฮดรอกไซด์ แต่การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์มีข้อจำกัด คือ เรื่องของกลิ่นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งเกิดจากอิกอนของซัลไฟด์ที่มากเกินไปจึงต้องมีการป้องกันกลิ่นที่เกิดขึ้นโดยบำบัดเอาซัลไฟด์ออกก่อนที่จะมีการระบายน้ำทิ้ง

## การตกตะกอนคาร์บอเนต (Carbonate Precipitation)

การทำให้เกิดตกตะกอนของโลหะหนัก โดยการเติมสารที่มีคาร์บอเนตอิกอน ( $CO_3^{2-}$ ) เช่น โซดาแอช ( $Na_2CO_3$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับโลหะหนักในน้ำเสีย ดังนี้



ข้อดี 1. เมื่อใช้กับแคลเซียมและตะกั่ว จะทำปฏิกิริยาที่แพงต่ำกว่าไฮดรอกไซด์

2. สามารถกรองตะกอนได้มากกว่า

ข้อเสีย 1. ใช้กับโลหะได้ไม่ทุกชนิด

2. เกิดตะกอนได้มากกว่าไฮดรอกไซด์

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้ใช้วิธี Chemical Precipitation โดยจะเลือกใช้การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์และสารเคมีที่เลือกใช้คือ ปูนขาว (CaO) เนื่องจากว่ามีราคาถูกและหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด

## 2.5 การทำให้อยู่ในรูปของแข็ง (Solidification)

การทำให้อยู่ในรูปของแข็งเป็นการทำให้ของเสียอยู่ในโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกันของของแข็ง การทำให้อยู่ในรูปแข็งสามารถทำได้ 2 กระบวนการด้วยกัน คือ

- 1) การตรึงกับที่ใช้วิธีการทางเคมี(Chemical Fixation)
- 2) การทำแคปซูลห่อหุ้ม(encapsulation)

ใน Chemical fixation จะมีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างของเสียและตัวกลางของแข็งเช่น silicate sorbents ในการทำencapsulationนั้นตัวกลางของแข็ง(solidifying agent )จะเข้าล้อมรอบทางกายภาพรอบทางกายภาพรอบอนุภาคของเสีย ตัวอย่างของกระบวนการนี้คือ thermoplastic method, organic polymer resins, Poatland cement technique และ lime fly ash process ถึงแม้ว่าการทำให้อยู่ในรูปของแข็งและการปรับเสถียรจะมีเป้าหมายที่แตกต่างกัน ระบบการบำบัดที่เหมาะสมต้องมีความเป็นไปได้ในทางเศรษฐศาสตร์และประกอบด้วยกำบัตของเสีย เช่น การเปลี่ยนของเสียไปให้อยู่ในรูปที่มีความเสถียรและไม่ละลายน้ำ(Cullinate et al.,1986) ยิ่งกว่านั้นต้องใช้วัสดุประสานเพื่อให้จับตัวกันแน่นเพื่อปรับเสถียรของเสียและตัวกลางที่ใช้ต้องมีความเหมาะสมโดยสามารถดูดซึมของเหลวได้ทุกชนิด ซึ่งหมายความว่าทั้งกระบวนการปรับเสถียรและการทำให้อยู่ในรูปของแข็งควรจะได้นำมาพิจารณาเพื่อกำบัตของเสีย

## 2.6 การปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อน (STABILIZATION / SOLIDIFICATION )

การปรับเสถียรและ การทำให้เป็นก้อน เป็นกระบวนการที่ใช้เพื่อป้องกันการละลายของสารเคมีที่เป็นของเสียเสี่ยงอันตราย และการปนเปื้อนลงสู่สิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทำให้คงตัว และการทำให้เป็นก้อนมีดังนี้

- ปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียให้เหมาะสมในการเคลื่อนย้ายของเสียนั้น
- การลดพื้นที่ของของเสียเพื่อป้องกัน หรือ ลดการรั่วไหลของสารมลพิษ
- การกำจัดการละลายของสารมลพิษที่อยู่ในของเสีย
- การกำจัดการมลพิษออกจากของเสีย

ตารางที่ 2.1 แสดงกระบวนการกำจัดการของเสียเสี่ยงอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อนประเภทต่างๆ 7 วิธี ได้แก่ Cement Based , Pozzolanic (Lime Based) ,Thermoplastic, Organic Polymer , Surface Encapsulation , Self – Cementing และ Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics ซึ่งการเลือกวิธีการกำบัตของเสียดังกล่าวควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆ โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดและสมบัติเฉพาะของของเสีย สำหรับโลหะหนักนั้นสามารถกำจัดการได้หลายวิธีเช่น Cement เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Based ,Pozzolanic (Lime Based) ,Thermoplastic, , Surface Encapsulation และ  
Classification

Rijal (1990) ได้สรุปข้อดีและข้อเสีย สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี  
ไว้ในตารางที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงกระบวนการกำจัดของเสียเสี่ยงอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อน (Rijal, 1990)

กระบวนการทำให้เป็นก้อน ( solidification )	รายละเอียด
1. Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงไปในซีเมนต์ น้ำ และ ส่วนผสม อย่างอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2. Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็น ปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย , ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว
3. Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้ กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น bitumen , parafin หรือ polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็ง ตัว
4. Organic Polymer	ของเสียชั้นแรกจะถูกผสมกับโพลิเมอร์ (gelling agent หรือ formaldehyde) และเติมสารคะตะลิสต์ ผสมให้เข้า กันก่อนสารโพลิเมอร์แข็งตัว
5. Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น แล้วเคลือบผิวนอก ของของเสียที่ถูกอัดด้วยสารเหนียว เช่น polyethylene หรือ organic resins
6. Self-cementing	สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลิเฟต และ แคลเซียมซิลไฟต์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสีย อุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็ง ตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อน ย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
7. Glassification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็น ส่วนผสมของแก้ว หรือ synthetic silicate mineral เพื่อ ป้องกันการไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำ สามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีกระบวนการหุ้ม หรือบรรจุครั้งที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี ( Rijal,1990)

กระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement Based	Chemical fixation solidification	แห้งหรือเปื่อย (โดยทั่วไปเหมาะกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์)	-วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี -กำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาดีแล้ว	-ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดจะทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ -ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะล้างได้ในสภาพที่มีค่าพีเอชต่ำ -เพิ่มน้ำหนักและขนาดของของเสีย และเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการฝังกลบ
2. Lime Based	Chemical fixation solidification	แห้งหรือเปื่อย (โดยทั่วไปเหมาะกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์)	-วัสดุที่ใช้มีราคาถูก -เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาดีแล้ว -การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิด โดยใช้กระบวนการเดียวกัน	-เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based
3. Thermoplastic Based	Physical fixation	แห้ง (เหมาะกับ-สารอินทรีย์)	-สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมีเป็นอย่างดี -สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก	-ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และต้องใช้แรงงานที่มีความชำนาญ -ของเสียชนิดเปียกจะลดประสิทธิภาพของกระบวนการ -ไม่สามารถกำจัดสารพวก Strong oxidants , dehydrated salts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี (ต่อ) ( Rijal ,1990)

กระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
4. Organic Polymer Process	Physical fixation	แห้งหรือเปียก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	-ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิด polymer's matrix -ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	-ของเสียจะถูกยึดอยู่ในโพลีเมอร์อย่างหลวมๆ -สารที่มีพีเอชต่ำจะทำให้โลหะละลายออกมามากขึ้น -การย่อยสลายทางชีวภาพของโพลีเมอร์บางชนิดทำให้เกิดปัญหาในการฝังกลบ
5. Encapsulation	Chemical containment	แห้งหรือเปียก	-ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี -ไม่มีการชะละลายของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย -ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น	-การชะล้างของเสียจะเกิดขึ้น หากสารที่หุ้มถูกทำลาย -ไม่เหมาะสมในการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียจำนวนมากๆ
6. Self Cement	Chemical fixation	แห้งหรือเปียก	-กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมที่จะช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก	-สารอินทรีย์บางชนิดจะทำให้เกิดการแข็งตัวของซีเมนต์ -ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียไม่ได้มีการหุ้มห่อ สามารถถูกย่อยสลายและถูกชะละลายได้ภายใต้สภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธี (ต่อ)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
7. Classification	Physical fixation	แห้ง	-ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก๊วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก -การบรรจุหุ้มห่ออยู่ในเกณฑ์ดี -ใช้วัสดุที่มีราคาถูก	-อุณหภูมิสูงอาจทำให้มีของเสียอื่นระเหยออกมา -ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อนแก่อุปกรณ์และต้องการผู้ชำนาญงานโดยเฉพาะ -ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารกัมมันตภาพรังสี และสารที่มีพิษมากๆ

ดังนั้นจะเห็นว่ากระบวนการบำบัดโดยทำให้เป็นก้อนมีหลายวิธีและแต่ละวิธีสามารถใช้ได้กับของเสียที่แตกต่างกันได้ ในตารางที่ 2.1 ซึ่งเป็นการแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากกระบวนการต่างๆที่ใช้กับของเสียที่แตกต่างกัน

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้กระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement Based Technique) ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยปูนซีเมนต์ ประกอบด้วยคุณสมบัติของเสียกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์และสารผสมอื่นๆ เนื่องมาจากว่าเป็นวิธีที่ใช้วัสดุราคาถูก มีความทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และที่สำคัญ คือ สามารถกำจัดของเสียจำพวกโลหะหนักได้ดี

## 2.7 ปูนซีเมนต์ (Cement)

ปูนซีเมนต์ (cement) หมายถึง วัสดุยึดเกาะที่สามารถเกิดพันธะกับชิ้นส่วนหรืออนุภาคของสารที่เป็นของแข็งในสัดส่วนที่เหมาะสม (Soroka, 1979) การให้คำจำกัดความนี้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางของวัสดุหลายชนิด แต่วัสดุในเชิงวิศวกรรมและการก่อสร้าง ต้องการปูนซีเมนต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcareous Cement) หรือปูนขาวเป็นโครงสร้าง

หลัก ซึ่งโดยทั่วไปปูนซีเมนต์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทที่1 ปูนซีเมนต์ที่ไม่สามารถก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำ หรือ ไม่เสถียรในน้ำ เรียกว่า Non-Hydraulic Cement

ประเภทที่2 ปูนซีเมนต์ที่สามารถก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำ และ ให้ผลลิตภัณฑ์ของแข็งซึ่งเสถียรในน้ำ เรียก Hydraulic Cement เช่น ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดชัน (Hydration) ดังนั้นปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้ คือ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement)

### 2.7.1 ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement)

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement) คือ วัสดุซีเมนต์ที่ได้มาจากการผสมเข้าด้วยกันของสารที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต หรือวัสดุปูนขาวทนทานอื่นๆพร้อมทั้งสารที่ประกอบด้วยสารดินเหนียว (Argillaceous) และ/หรือวัสดุอื่นๆ เช่น ซิลิกา อลูมินา หรือเหล็กออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติให้เป็นที่ไปตามความต้องการ จากนั้นทำการเผาจะเกิดปฏิกิริยาเคมีและรวมตัวเป็นสารประกอบได้ปูนซีเมนต์หรือปูนเม็ด (clinker) แล้วจึงลดอุณหภูมิให้เหมาะสม (clinking temperature) โดยการทิ้งไว้หรือใช้เครื่องทำให้เย็น (clinker cooling) ก่อนนำไปบดให้ละเอียด (Grinding) ให้สามารถผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์200ได้หมด

#### 2.7.1.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีด้วยกัน 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรแคลเซียมอลูมินา (Tricalcium Aluminate) และไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tricalcium Aluminoferte) ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอลูมินา	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaAF}$

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ คือ  $MgO$  ,  $TiO_2$  ,  $Mn_2O_3$  ,  $K_2O$  และ  $Na_2O$  ซึ่งปะปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักของปูน โดยสารประกอบแต่ละชนิดจะแสดงพฤติกรรมของสมบัติแตกต่างกันดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของสารประกอบที่เกิดในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

สมบัติที่เกิด	พฤติกรรมสัมพันธ์ของสารประกอบ			
	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	CaAF
อัตราของปฏิกิริยา ( Reaction )	ปานกลาง	ช้า	เร็ว	ช้า
ความร้อนต่อหน่วยของสารประกอบ	ปานกลาง	เล็กน้อย	มาก	เล็กน้อย
ค่าการยึดติด ( Cementing ) ต่อหน่วยสารประกอบ				
- ก่อน ( Early )	ดี	ไม่ดี	ดี	ไม่ดี
- หลังสุด ( Ultimate )	ดี	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี

### 2.7.1.2 ประเภทของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

จำนวนเปอร์เซ็นต์ของสารประกอบพื้นฐาน แต่ละชนิดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามการผลิต ทำให้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีลักษณะแตกต่างกัน แบ่งได้ 5 ชนิด คือ

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา ( Ordinary Portland Cement ) สามารถใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดาและสำหรับใช้ในการก่อสร้างโดยทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง หรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือที่ความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตราย ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราพญานาคสีเขียวและตราเพชรเม็ดเดียว

2. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ดัดแปลง ( Modified Portland Cement ) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น ทนสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดินหนาๆ หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอท่อ สะพาน เป็นต้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาคเจ็ดเศียร

3. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์แข็งแรง ( High -early Strength Portland Cement ) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังสูงในระยะแรก มีเนื้อเป็นผง

ละเอียดกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตได้โดยการเปลี่ยนสัดส่วนและโดยการเติมสารอื่น โดยการบดให้ละเอียดยิ่งขึ้น หรือโดยการเผาให้ดีขึ้น มีประโยชน์สำหรับคอนกรีตที่ต้องการใช้เร็ว หรือรีบแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและอาคารที่ต้องการถอดแบบเป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตราเอราวัณ ตราพญานาคสีแดง และตราเพชรสามเม็ด

4. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ(Low-heat Portland Cement ) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำที่สุด ซึ่งปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีต ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะแข็งตัว

5. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต้านซัลเฟตได้สูง(Sulfate-Resistant Portland Cement ) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีด่าง ( Alkaline )สูงมีระยะเวลาในการแข็งตัวน้อยกว่าประเภทอื่น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราปลาฉลาม



ตารางที่ 2.5 สมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดา ( วินิต,2529 และ พิกพ,2532)

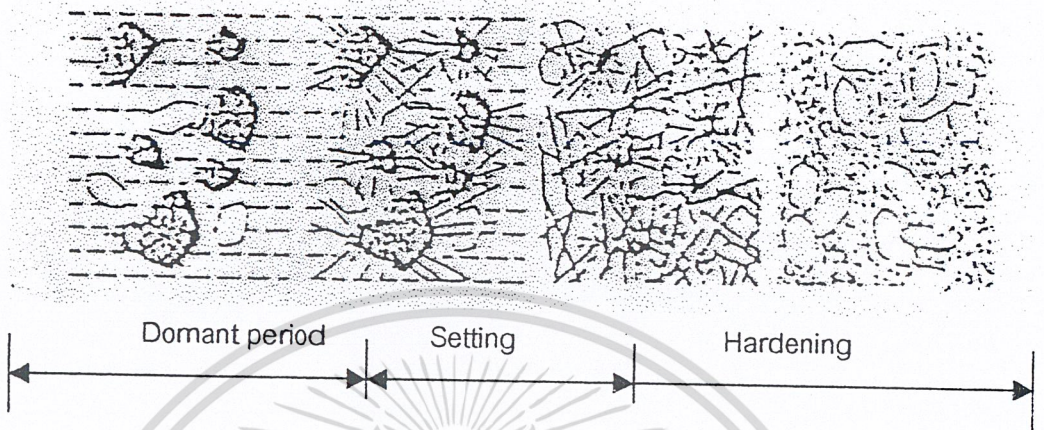
สมบัติทางกายภาพ	มาตรฐาน	ตราเพชร
3. ระยะเวลาก่อตัว ( Time of Setting ) ( เลือกวิธีทดสอบได้ )		
3.1 ทดสอบแบบกิลโมร์ ( Gillmore Test )		
- การก่อตัวระยะต้น ( Initial Set ) ไม่น้อยกว่า ( นาที )	60	-
- การก่อตัวระยะปลาย ( Final Set ) ไม่มากกว่า ( นาที )	10	-
3.2 ทดสอบแบบไวแคต ( Vicat Test )		
- การก่อตัวไม่น้อยกว่า ( นาที )	45	2 ชม.
4. ปริมาณอากาศในมอร์ต้า ( Air Content of Mortar )		
เมื่อเตรียมและทดสอบตามวิธีมาตรฐานโดยปริมาตรสูงสุดไม่มากกว่า ( % )	12	
5. กำลังรับแรงอัด ( Compressive Strength )		
กำลังรับแรงอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ต้า ( Mortar Cube ) ซึ่งประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐานที่ร่อนได้ตามขนาด ( Graded Standard Sand ) 2.75 ส่วนโดยน้ำหนักเตรียมและทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ต้องเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่กำหนดตามเกณฑ์อายุข้างล่างนี้		
1วันในอากาศชื้น 2วันในน้ำ ( กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร )	85	170
1วันในอากาศชื้น 6วันในน้ำ ( กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร )	150	250
1วันในอากาศชื้น 27วันในน้ำ ( กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร )	245	360
6. การก่อตัวผิดปกติ ( False Set )		
ระยะจมตัวสุดท้าย ( Final Penetration ) สูงสุด ( % )	50	

### 2.7.2 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

การเติมน้ำในปูนซีเมนต์ผงจะทำให้เกิดปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ เรียกส่วนผสมส่วนนี้ว่า ซีเมนต์ Paste ซึ่งในช่วงเวลา 2-3 นาทีหลังจากเติมน้ำจะเกิดผลึกคล้ายเข็มของแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตซัลเฟตไฮเดรตโดยจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เรียกว่าการทำให้ซีเมนต์ Paste แข็งตัว ( Stiffening ) นี้ว่า การตกตัว ( Setting ) และเมื่อทิ้งไว้เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มเกิดผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขนาดใหญ่ และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ขนาดเล็ก โดยมีน้ำกระจายเข้าไปในโครงผลึก และรอบ ๆ เรียกว่า การยัด (Hardening) แสดงดังภาพที่ 2.3 ซึ่งกำลังรับแรงอัดของ Paste จะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการยัด



ภาพที่ 2.3 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในซีเมนต์ Paste

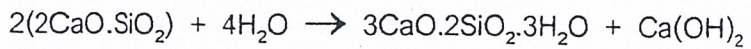
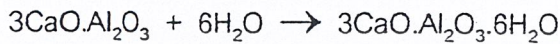
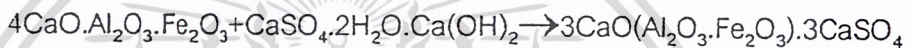
โดยจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ยังผลให้เกิดความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา เรียกว่า Heat of Hydration วัดเป็นแคลอรีต่อกรัมของปูนซีเมนต์ ซึ่งบางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีตออกมา แต่บางส่วนจะอยู่ในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงจะทำให้คอนกรีตเสียความแข็งแรง และเกิดหน่วยแรงต่าง ๆ ภายในเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว

ตัวอย่างของปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้ คือ

#### 1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S)



## 2. ไดแคลเซียมซิลิเกต

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $\text{C}_3\text{A}$ )4. ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ( $\text{C}_4\text{AF}$ )

จากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะก่อให้เกิดสภาพต่างในรูปของแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีความสามารถในการทำให้ซีเมนต์เป็นกลาง โดยการตกตะกอนแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ละลายในรูปของแม่พิมพ์ซีเมนต์เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่า 100 มก./ล. และ pH มากกว่า 11 ซึ่งซีเมนต์ Paste ที่มีความเป็นด่างสูงด้วยผิวซิลิกา และออกซีไฮดรอกไซด์ (Shively, 1986) สามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อม สำหรับการตกตะกอนโลหะที่มีฤทธิ์เป็นกรดหรือเป็นด่าง และปฏิกิริยาการดูดซับ (Adsorption) เชิงซ้อน พบว่า โลหะหนักจะถูกดูดซับบนผิวซิลิกา และเหล็กออกซีไฮดรอกไซด์ โดยแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดซับโลหะสูง แต่ซีเมนต์ Paste อาจไม่ก่อตัวเป็นสารประกอบเนื่องจากการไม่ละลายของปูนขาว และอลูมินาบางส่วน ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ กับน้ำในธรรมชาติส่วนใหญ่ แต่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับสารละลายกรด กลไกคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของแร่ที่มีความเข้มข้นของซิลิกาอยู่มากในสิ่งแวดล้อมในวัสดุที่เป็นซีเมนต์อื่น ๆ ก็เช่นเดียวกัน คือ เกิดปฏิกิริยาคลายคลึงกัน แต่จะมีความแตกต่างในส่วนประกอบทำให้ Stoichiometry ของผลิตภัณฑ์มีหลายชนิด

การทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำหนีออกจาก ซีเมนต์ Paste หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มตัวจึงเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตที่สำคัญ เวลาที่ใช้เพื่อให้การทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำเป็นไปอย่างสมบูรณ์ขึ้นกับ ปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ และอุณหภูมิโดยรอบ แต่ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับ การให้น้ำจากภายนอกด้วย

### 2.7.3 วัสดุผสม

หินย้อย กรวด และทราย รวมเรียกว่า วัสดุผสม ซึ่งเป็นพวกแร่ธาตุที่เฉื่อยไม่ทำปฏิกิริยา อาจได้จากธรรมชาติ ได้แก่ หินอัคนี หินชั้น และหินแปร หรือทำเทียมขึ้น เช่น วัสดุผสมตะกักรันเตาถลุงในเนื้อคอนกรีตจะมีวัสดุผสมอยู่สามในสี่ส่วน

การเลือกใช้วัสดุผสมนี้ มีส่วนสำคัญที่จะช่วยทำให้ได้คอนกรีตที่ดี กล่าวคือ คุณสมบัติของหินและทรายจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต สัดส่วนของการผสม

วัสดุผสมละเอียด หมายถึง ทรายซึ่งเป็นวัสดุผสมที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มม. หรือที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ทั้งนี้ต้องมีขนาดไม่เล็กกว่า 0.07 มม. วัสดุผสมที่เล็กกว่านี้เรียกว่า ฝุ่น

วัสดุผสมหยาบ เป็นวัสดุที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มม. ขึ้นไป หรือที่ไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ซึ่งได้แก่ กรวด หรือหินย้อยหรือหินไม่

### 2.7.4 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

ได้มีผู้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์หลายท่าน ดังต่อไปนี้

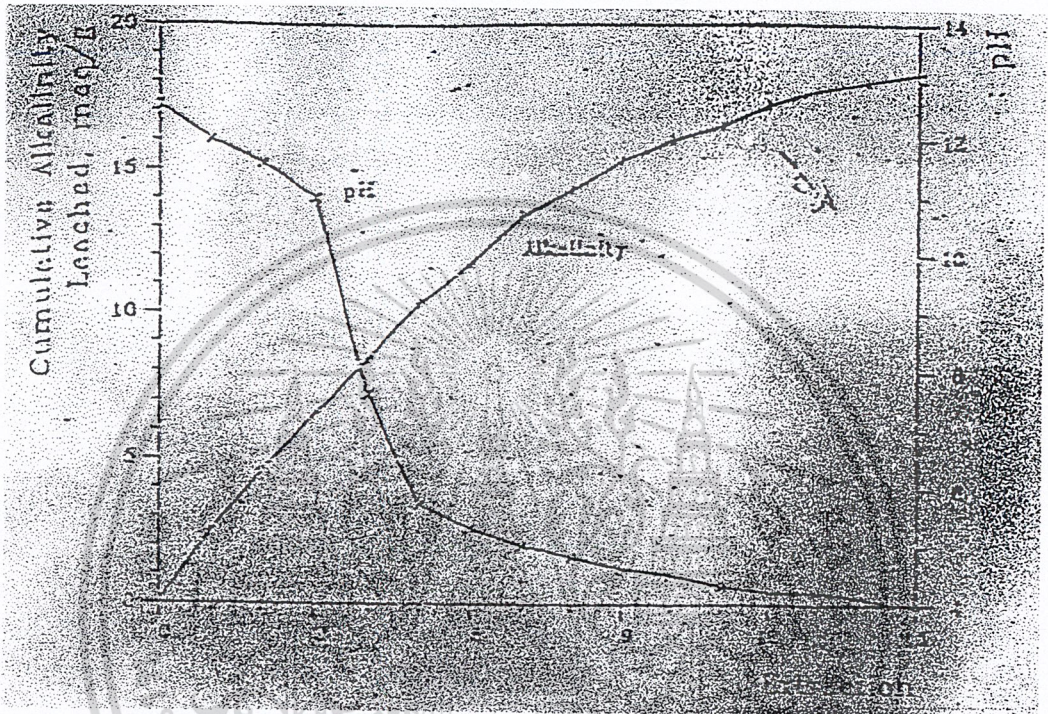
Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement-based Solidification) โดยใช้ของเสียสังเคราะห์ที่เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง buffering capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนัก และกลไกการยึดจับโลหะหนักของโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในของเสียที่ถูกทำให้เป็นก้อน สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### 1 ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (buffering capacity)

จากการทดสอบ leaching test กับของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์ โดยการชะละลายของเสียที่แข็งตัวด้วยกรดอะซิติก และทำการชะละลายติดต่อกันอีกเป็นจำนวนทั้งหมด 15 ครั้ง นำมาตรวจวัดค่า pH และค่าความเป็นด่าง (alkalinity) และนำไปเขียนกราฟ

ดังที่แสดงในภาพที่ 2.3 จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของเสียที่ทำการชะละลายของเสียที่แข็งตัวหลาย ๆ ครั้ง พบว่าค่าพีเอชของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสม (cumulative alkalinity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยมากซึ่งมีค่าประมาณ

1.7% ของค่าความเป็นด่างที่สะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างจะถูกชะละลายออกมามากในช่วงต้น และลดลงตามลำดับในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 18.3 mg/g ซึ่งถือว่าเป็นค่า buffering capacity ของของเสียแข็งตัว ค่าความเป็นด่างที่ชะละลายออกมาแต่ละครั้งนี้จะเป็นตัวควบคุมพีเอชของการชะละลายโดยการสะท้อนกรดอะซิติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง



ภาพที่ 2.4 กราฟแสดงค่าพีเอชและค่าความเป็นด่างจากการทดสอบการชะละลาย ( Bishop , 1988 )

## 2. กลไกการยึดจับโลหะ (mechanism of fixation)

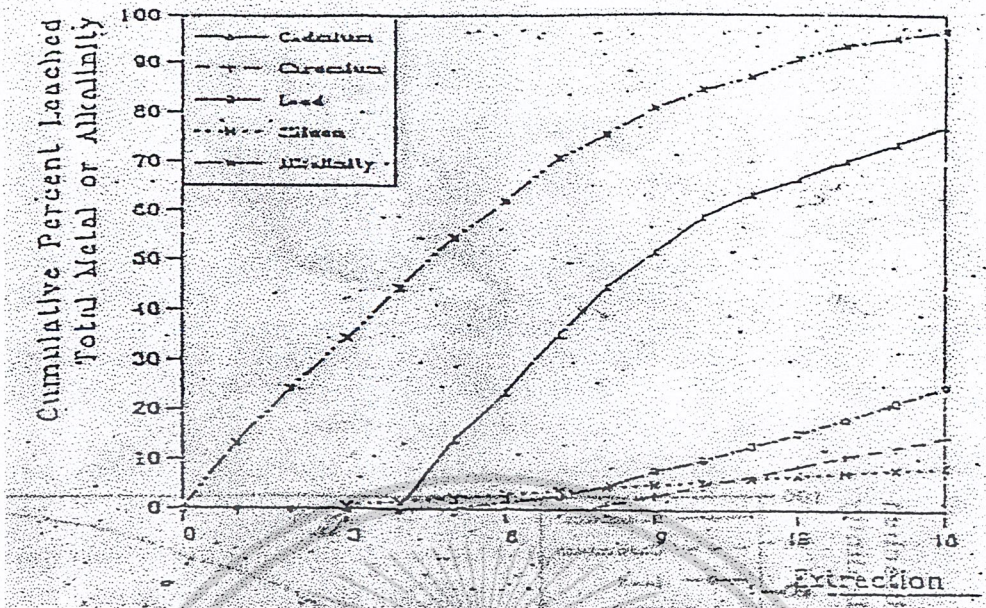
จากกราฟภาพที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะที่ถูกชะละลาย (แคดเมียม , โครเมียม , และตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่าง และซิลิกอน ซึ่งจะถูกระบายออกมากขึ้นเมื่อค่าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.0 จากการทดลองที่ผ่านมาหลาย ๆ ครั้ง ทำให้ทราบว่าโลหะหนักอาจจะอยู่ในโครงสร้างของของเสียที่แข็งตัวในรูปแบบต่าง ๆ เช่นอยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของของเสียที่แข็งตัว , ถูกเกาะติดกับผนังรูพรุน , และทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคดเมียมจะถูกระบายออกมาได้มากกว่าโครเมียม และตะกั่วซึ่งถูกระบายออกมาน้อย

กรณีทีโลหะหนักถูกปล่อยอยู่ในของแข็ง หรืออยู่ในรูปพูน หรือเกาะติดผิวพูนแล้ว โลหะหนักเหล่านั้นควรจะถูกระบายออกมาคล้ายกับการระบายออกของค่าความเป็นด่าง (alkalinity) จากภาพที่ 2.4 เส้นกราฟของแคดเมียมสะสมถูกระบายออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้น กราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกระบายออกมา ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าแคดเมียมอาจ จะอยู่ในของเสียที่แข็งตัวในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ตามรูปพูนและเกาะติดอยู่กับผนังของ รูปพูน

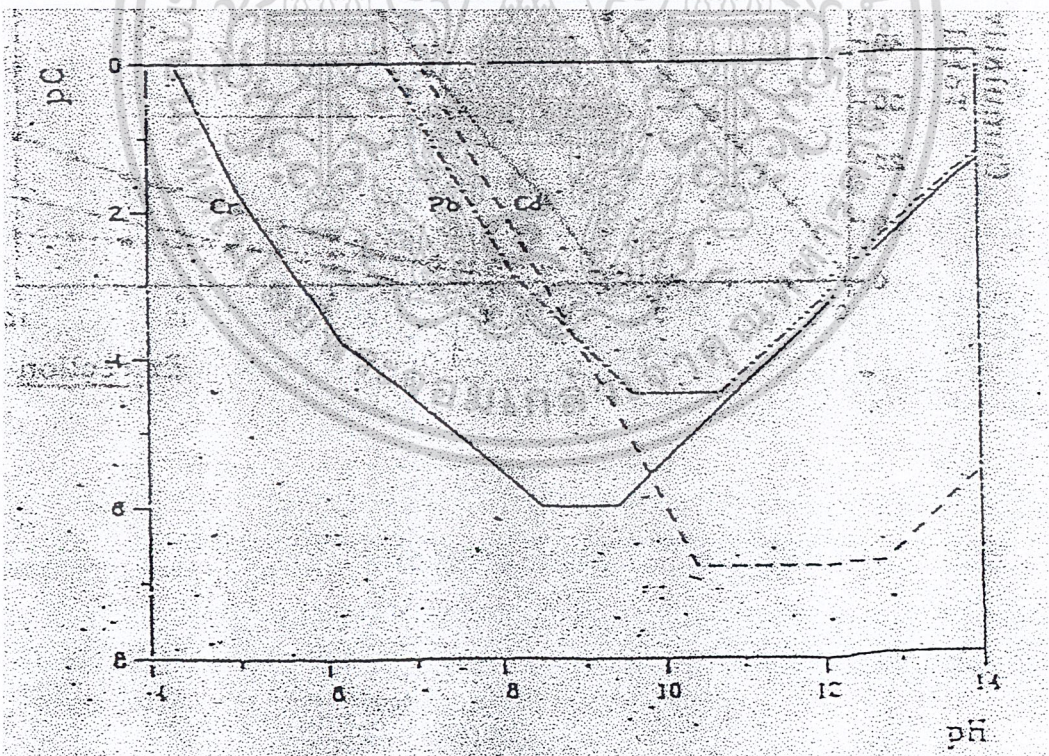
สำหรับโครเมียมและตะกั่วนั้นเมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟแล้วจะมีรูปแบบของ การถูกระบายคล้ายกับการระบายของซิลิกอนซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนมากกว่าเป็น โลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูปพูน การระบายของตะกั่วและโครเมียมค่อนข้างยากที่จะเกิดขึ้น เฉพาะที่พีเอชต่ำ ๆ และต่ำกว่าพีเอชในการระบายแคดเมียม อัตราการระบายของโลหะหนัก ทั้งสองนี้มีค่าต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการระบายที่คาดคะเนจากการระบายของ โลหะไฮดรอกไซด์ แสดงว่าโลหะทั้งสองนี้จะเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกา และการระบายออกเมื่อโครงสร้างของซิลิกานี้ถูกทำลาย

ภาพที่ 2.5 แสดงถึงกราฟ pC – pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียม, โครเมียม , และตะกั่วในสารละลายที่มีค่า ionic strength 0.75 โมลาร์ พบว่าในขณะที่เริ่มผสมปูน ซีเมนต์และส่วนผสมอื่น ๆ ค่าพีเอชจะมีค่าสูงประมาณ 12 – 13 ซึ่งจะทำให้แคดเมียมส่วนใหญ่ไม่ ละลายน้ำ และอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งซึ่งอยู่ในรูปพูนของซีเมนต์ ส่วน โครเมียมและตะกั่วจะละลายน้ำได้ และมีส่วนในปฏิกิริยาก่อตัวของซีเมนต์ และเป็นไปได้ที่จะ ทำปฏิกิริยากับซิลิกเกต จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่าแคดเมียมถูกระบายออกมาเช่น เดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะถูกระบายออกมาโดยขึ้นอยู่กับการละลาย ของซิลิกเกต

ภายหลังการทดลอง leaching test ได้วิเคราะห์น้ำหนักแห้งของสารทั้งหมดพบว่า ภายหลังจากการทดลองระบาย 15 ครั้ง ปริมาณสารที่ถูกระบายออกไปประมาณ 50 – 70 % ของปริมาณทั้งหมดก่อนการทดลอง แต่ว่ายังมีโลหะหนักเหลืออยู่โดยมีแคดเมียม โครเมียม และ ตะกั่ว เหลืออยู่ 50 , 85 และ 75% ตามลำดับ และมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกอนเหลืออยู่ 90 , 98 และ 80% ตามลำดับ และแคลเซียมเหลืออยู่ 8 % ดังนั้นจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดติดกับโลหะหนักได้ดี และ ยากที่จะทำการระบายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วดังกล่าว



ภาพที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกละลายกับค่าความเป็นด่าง และซิลิกอนจากการทดสอบการชะละลาย



## 2.7.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของซีเมนต์

### 2.7.5.1 กำลังอัดของคอนกรีต

สมบัติของคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวมีความสำคัญในขณะก่อสร้างเท่านั้น แต่สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว จะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งในทางปฏิบัติ สมบัติของคอนกรีตทั้งสองลักษณะ จะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วที่ดี จะต้องมาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว มีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

#### 1. กำลังมอร์ต้า

กำลังของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยขึ้นกับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณกำลัง ลักษณะผิวขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่าง ๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มากนัก

#### 2. กำลัง และโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังของมอร์ต้าที่กำหนดให้ ความสามารถต้านแรงคอนกรีตจะขึ้นกับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้า ซึ่งเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในหินขนาดใหญ่จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าลดลง เนื่องจากเกิดน้ำในหินได้มากขึ้น และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปานกลาง ขนาดของมวลรวมจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง รวมทั้งการเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมก็ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นด้วย

#### 3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต้ากับผิวของมวลรวม

แรงยึดเหนี่ยวขึ้นกับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมีคือ ปฏิบัติเคมีระหว่าง ปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่าง ๆ นอกจากนี้ ทิศทางในการหล่อและทิศทางในการให้น้ำหนัก ก็มีผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน เนื่องจากจะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้าต่ำลง

### 2.7.5.2 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่าง

สมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำให้โดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมี 2 ประการ คือ

1. ป้องกันการสูญเสียความร้อนจากเนื้อคอนกรีต
2. รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

1. เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและมีความทนทาน
2. เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่ม อาจหมายถึง การควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิสูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียในระยะยาว

#### 2.7.5.3 การผันแปรของกำลังอัดคอนกรีต

ความผันแปรของกำลังอัดคอนกรีตในโครงสร้างที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งหรืออาจเป็นการผสมผสานกันหลายๆสาเหตุ ได้แก่

1. ใช้สัดส่วนผสมที่ไม่เหมาะสม
2. ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
3. ควบคุมปริมาณอากาศไม่ดี
4. การผสมไม่ดีพอ
5. มีสารอินทรีย์ต่างๆ มากเกินข้อกำหนด
6. ใช้หินทรายที่สกปรก
7. ใช้น้ำยาคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
8. ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม

## 2.8 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

การประเมินคุณภาพ ของเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัด โดยการทำให้แข็งตัว ( Sollars และ Perry , 1989 ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับวัตถุประสงค์ของการบำบัด ได้แก่ ปัจจัยต่างๆ เช่น การปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคง การลดพื้นที่ผิว การกำจัดและการละลายสารที่เป็นอันตราย เมื่อสัมผัสกับสารชะละลาย ในช่วงเวลาดังกล่าวนั้นประเทศใน สหราชอาณาจักร (ประเทศอังกฤษ ) ยังไม่ได้กำหนดมาตรฐานเป็นทางการสำหรับคุณภาพของเสียที่ผ่านการบำบัด โดยวิธีการข้างต้น แต่ได้มีหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง อาทิ หน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดน้ำเสีย (Waste Disposal Authority ) ได้กำหนดมาตรฐานสำหรับกาปฏิบัติงานในการบำบัดของเสีย โดยการกำหนดค่า Compressive Strength, Permeability และ Leachability แสดงดังตารางที่ 2.6 ซึ่งกล่าวถึงรายละเอียดของสมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการ Sealoface จากกาบำบัดของเสียที่เมือง West Thurrock

Characteristic	Requirements	Comparative values
Permeability (28 day)	$\leq 1 \times 10^{-11}$ m/s	Sand: $1 \times 10^{-4}$ - $5 \times 10^{-3}$ m/s Silt: $1 \times 10^{-4}$ - $1 \times 10^{-2}$ m/s Concrete: $1 \times 10^{-6}$ m/s
Compressive strength (28 day)	$\leq 0.34$ MN/m <sup>2</sup>	Concrete: 30 MN/m <sup>2</sup> Mortar: 20 MN/m <sup>2</sup> Grouts: 0.5 - 1 MN/m <sup>2</sup>
Leachate Quality***	pH 8-11 COD < 250 g/m <sup>3</sup> Total CN < 1 g/m <sup>3</sup> Total Sulphide < 5 g/m <sup>3</sup> Total Phenol < 5 g/m <sup>3</sup> NH <sub>3</sub> < 40 g/m <sup>3</sup> Toxic heavy metals: Zn < 10 g/m <sup>3</sup> , Hg < 0.5 g/m <sup>3</sup> Others (inc. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Bi, Co, Mn, Sr, As, Se, Sb): < 5 g/m <sup>3</sup> total Pesticides < 0.1 g/m <sup>3</sup> Supernatants: none after 24 h	- - - - - - - - - - - -

\* n.s. = not applicable  
 \*\* Compressive: 30 g solidified waste (28 day cure), ground to fine powder, stored 2 h with 200 ml distilled water  
 \*\*\* COD filtered through Whatman No. 1 filter paper

ตารางที่ 2.6 สมบัติที่ต้องการสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อน ด้วยวิธี Sealosafe ( Sollars และ Parry , 1989)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ( พ.ศ. 2531) ได้ออกประกาศ  
กรมโรงงานฯ ฉบับที่ 1 เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บ ทำลายฤทธิ์ กำจัด ฝังทิ้ง เคลื่อนย้าย และขนส่ง  
ปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วสรุปเป็นมาตรฐานที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

1. วิธีการทำลายสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วก่อนนำไปทิ้งหรือฝัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 วิธีการทำลายฤทธิ์ของสิ่งปฏิภูลประเภทต่างๆ ( กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม,2531 )

ประเภทสิ่งปฏิภูล	วิธีการทำลายฤทธิ์
1. กากตะกอนที่มีสารปรอทปนเปื้อน	นำกากตะกอนผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วทำให้เกิดเป็นก้อน ( Solidification ) โดยผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดอัตราการซึมของสารพิษในสารตัวเติม ( Additive ) ผสมลงไปด้วย
2. กากจากการผลัดไฟฟูลูออเรสเซนต์ที่มีสารประกอบปนเปื้อน	นำกากที่อาจต้องผ่านการบดให้มีขนาดเล็กลงก่อนเพื่อช่วยให้ทำปฏิกิริยาทางเคมีให้ทั่วถึง ผสมกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้เป็นปรอทซัลไฟด์ ( $\text{HgS}$ ) แล้วจึงทำให้เป็นก้อน ( Solidification ) โดยการผสมกับปูนซีเมนต์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพ หรือลดอัตราการซึมของสารพิษให้ใช้สารตัวเติม ( Additive ) ผสมลงไปด้วย
3. กากตะกอน หรือฝุ่นที่มีองค์ประกอบของโลหะหนัก เช่น แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และแมงกานีส เป็นต้น	ใช้สารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ผสมกับตะกอนให้ทั่ว จนสารโลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบเกลือไฮดรอกไซด์ที่มีค่า pH ของของผสมประมาณ 11 แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง ในกรณีที่เป็นกากตะกอน หรือฝุ่นที่ปนเปื้อนด้วยแคดเมียม ( $\text{Cd}$ ) จะต้องทำเป็นก้อนต่อด้วยการผสมกับปูนซีเมนต์
4. กากตะกอน หรือวัสดุไม้ใช้แล้วที่มียาฆ่าแมลง ยากำจัดศัตรูพืช หรือยากำจัดเชื้อราปนเปื้อน	เติมสารละลายต่าง เช่น ปูนขาว หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) ในปริมาณที่สามารถที่จะทำลายพิษของตัวยาแต่ละชนิดให้หมดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สิ่งปฏิภูลที่ทำให้เป็นก้อน ( Solidification ) จะต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- น้ำซึมผ่านในอัตราส่วนต่ำกว่า  $1 \times 10^{-6}$  ซม./วินาที
- รับแรงอัด ( Compressive Strength ) ได้ไม่น้อยกว่า 14 กก./ตร.ซม.
- ความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.04 ตันต่อตารางเมตร
- ลักษณะแข็งคล้ายหิน ไม่มีไหมไฟ ไม่มีกลิ่น

3. ปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดควรมีค่าใดค่าหนึ่งต่อไปนี้

Arsenic	ไม่เกิน	5	มก./ล.
Cadmium	ไม่เกิน	1	มก./ล.
Chromium	ไม่เกิน	5	มก./ล.
Lead	ไม่เกิน	5	มก./ล.
Mercury	ไม่เกิน	0.2	มก./ล.
Nickel	ไม่เกิน	1	มก./ล.
Zinc	ไม่เกิน	1	มก./ล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

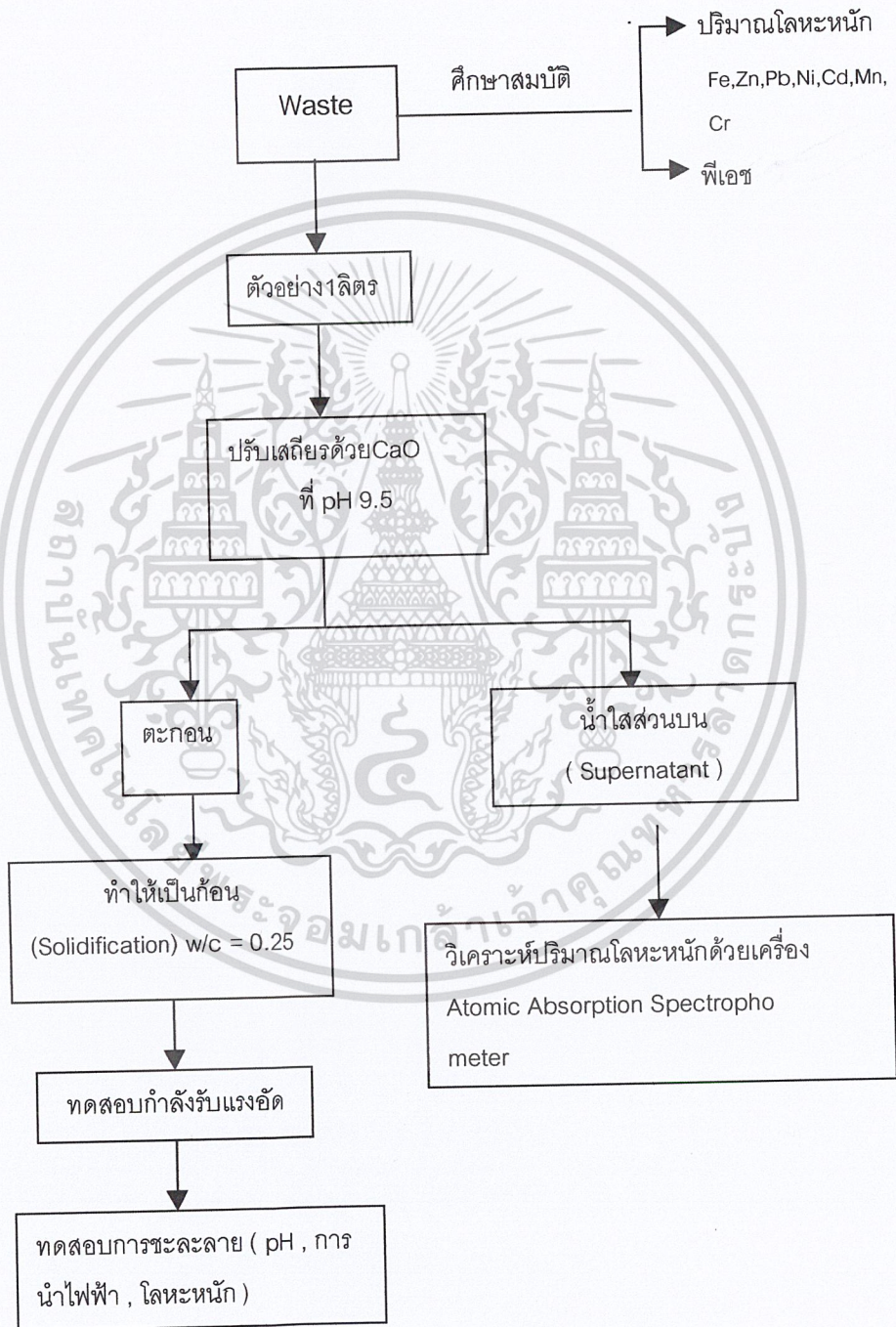
โลหะหนักควรมีค่าดังนี้

1. ปรอท (Mercury)	ไม่มากกว่า	0.005	มิลลิกรัมต่อลิตร
2. เซเลเนียม (Selenium)	ไม่มากกว่า	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
3. แคดเมียม (Cadmium)	ไม่มากกว่า	0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร
4. ตะกั่ว (Lead)	ไม่มากกว่า	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
5. อาร์เซนิก (Arsenic)	ไม่มากกว่า	0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร
6. โครเมียม (Chromium)			
Hexavalent Chromium	ไม่มากกว่า	0.25	มิลลิกรัมต่อลิตร
Trivalent Chromium	ไม่มากกว่า	0.75	มิลลิกรัมต่อลิตร
7. บาเรียม (Barium)	ไม่มากกว่า	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
8. นิกเกิล (nickel)	ไม่มากกว่า	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
9. ทองแดง (Copper)	ไม่มากกว่า	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
10. สังกะสี (Zinc)	ไม่มากกว่า	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
11. แมงกานีส (Manganese)	ไม่มากกว่า	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินการ

#### 3.1 แผนการการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3.1 แสดงแผนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 วัสดุ

1. ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์
2. ทราयर่อนผ่านตะแกรง 20 เมลล์
3. น้ำ (น้ำประปา)



ภาพที่ 3.2 : ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตราช้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 : ทราयर่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช

### 3.1.2 สารเคมี

- 1.กรดไนตริกเข้มข้น65%
- 2.แคลเซียมออกไซด์
- 3.สารมาตรฐานโลหะ
- 4.ของเสียที่มีส่วนประกอบโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการ
- 5.กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น

### 3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ( Atomic Absorption Spectrophotometer )
- 2.hotplate
- 3.ปิ๊กเกอร์
- 4.แท่งแก้วคน
- 5.เครื่องทดสอบแรงอัด(Testing Machine) แสดงดังภาพที่ 3.4
- 6.ตะแกรงร่อนขนาด 20 เมช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เครื่องวัดพีเอช
8. เครื่องวัดค่าความนำไฟฟ้า
9. ขวดวัดปริมาตรขนาด 100
10. เครื่องชั่ง
11. แบบหล่อขนาด 5x5x5 ลบ.ซม. แสดงดังภาพที่ 3.5
12. เครื่องผสมปูนซีเมนต์ แสดงดังภาพที่ 3.6
13. เหล็กกระทง (Temper) แสดงดังภาพที่ 3.7
14. เกรียง
15. เครื่องเขย่า แสดงดังภาพที่ 3.8

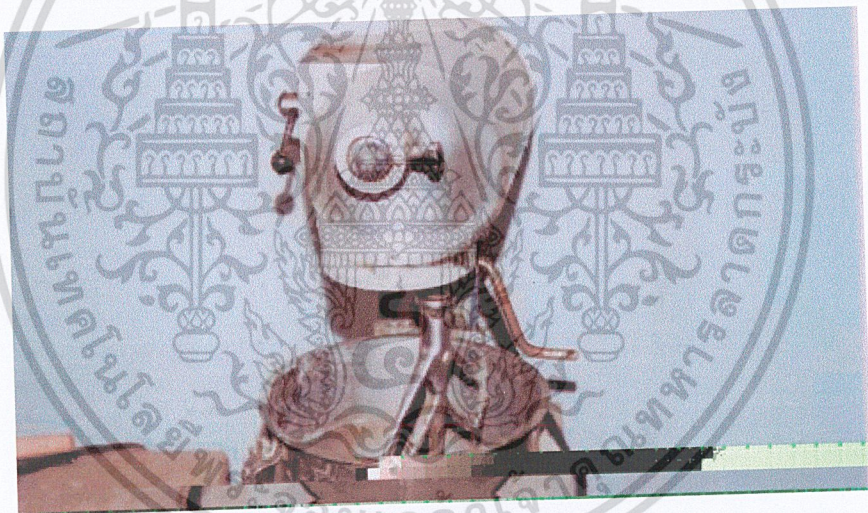


ภาพที่ 3.4 เครื่องทดสอบแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

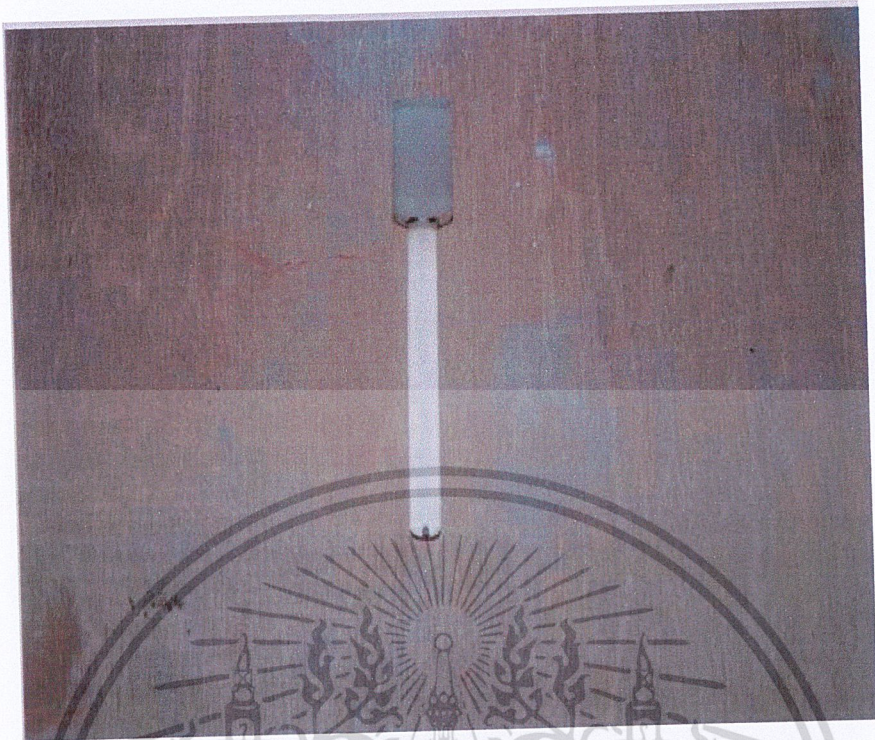


ภาพที่ 3.5 : แบบหล่อขนาด 5x5x5 ลบ.ซม.



ภาพที่ 3.6 : เครื่องผสมปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.7 : ที่กระทิ้ง



ภาพที่ 3.8 เครื่องเขย่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 วิธีการทดลอง

การวิเคราะห์โลหะหนักในของเสียโดยใช้วิธีของกรมโรงงานแสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 : แผนการการทดลองตามวิธีของกรมโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การตกตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์

#### 1. นำของเสียมา 1 ลิตรใส่ในถังกวน



ภาพที่ 3. 10 ตัวอย่างของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

2. ค่อยๆ เทสารละลาย 50% CaO ลงในถังกวนพร้อมเปิดใบพัดให้มีความเร็ว 100 รอบ/นาที โดยเติมจนมีพีเอช 9.5 จึงหยุดเติม
3. ปลดปล่อยให้ตะกอนตกลงกันถึงประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงทำการกรอง
4. นำน้ำที่ผ่านการกรองไปวิเคราะห์โลหะหนัก
5. นำตะกอนที่ได้ไปผึ่งให้แห้งแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นเก็บไว้ในเดซิเคเตอร์ 1 วัน ชั่งน้ำหนัก
6. นำตะกอนที่ได้ไปวิเคราะห์โลหะหนัก

#### 3.4 การเตรียมก้อนซีเมนต์

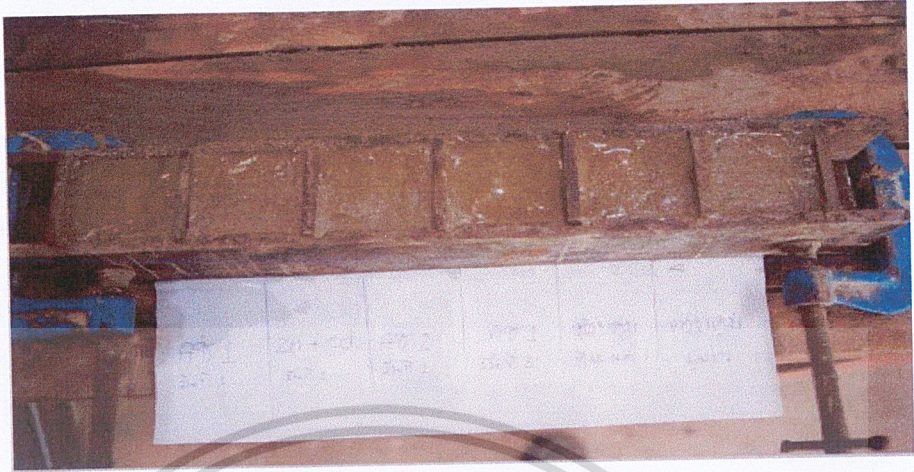
1. ชั่งวัสดุที่ใช้ในการหล่อซีเมนต์ตามมาตรฐานของ ASTM C109.86 ในแบบหล่อขนาด 5\*5\*5 ลบ.ซม ใช้วัดส่วนผสมโดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์:น้ำ:ทราย เท่ากับ 100:50:200 และใช้สัดส่วนผสมโลหะหนักต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.25 ในการผสมซีเมนต์ใช้จำนวนตัวอย่างครั้งละ 2 ตัวอย่าง

2. ผสมปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่นๆ ในเครื่องผสม (Mixer) จนเข้ากันดี

3. เทซีเมนต์ที่ผสมแล้วลงในแบบหล่อมอร์ตาร์ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที และ 30 วินาที หลังจากผสมเสร็จ การหล่อจะแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะหนาประมาณ 1 นิ้ว หรือ 25 มิลลิเมตร แล้วใช้เหล็กกระทัน (Tamper) กระทันครั้งละ 16 ครั้ง โดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลัง ให้ใช้แรงกระทันพอประมาณและเท่ากันโดยตลอดใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมนอร์ตาร์ครั้งที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อยและใช้มือป้อนขณะกระทันเช่นเดียวกับชั้นแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้เกรียงปาดมอร์ตาร์ส่วนที่เกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อยเก็บตัวอย่างพร้อมแบบหล่อไว้ในที่ชื้นทันที



ภาพที่ 3.11 ตัวอย่างที่หล่อเรียบร้อยแล้ว

5. ถอดแบบหลังจาก 24 ชั่วโมง

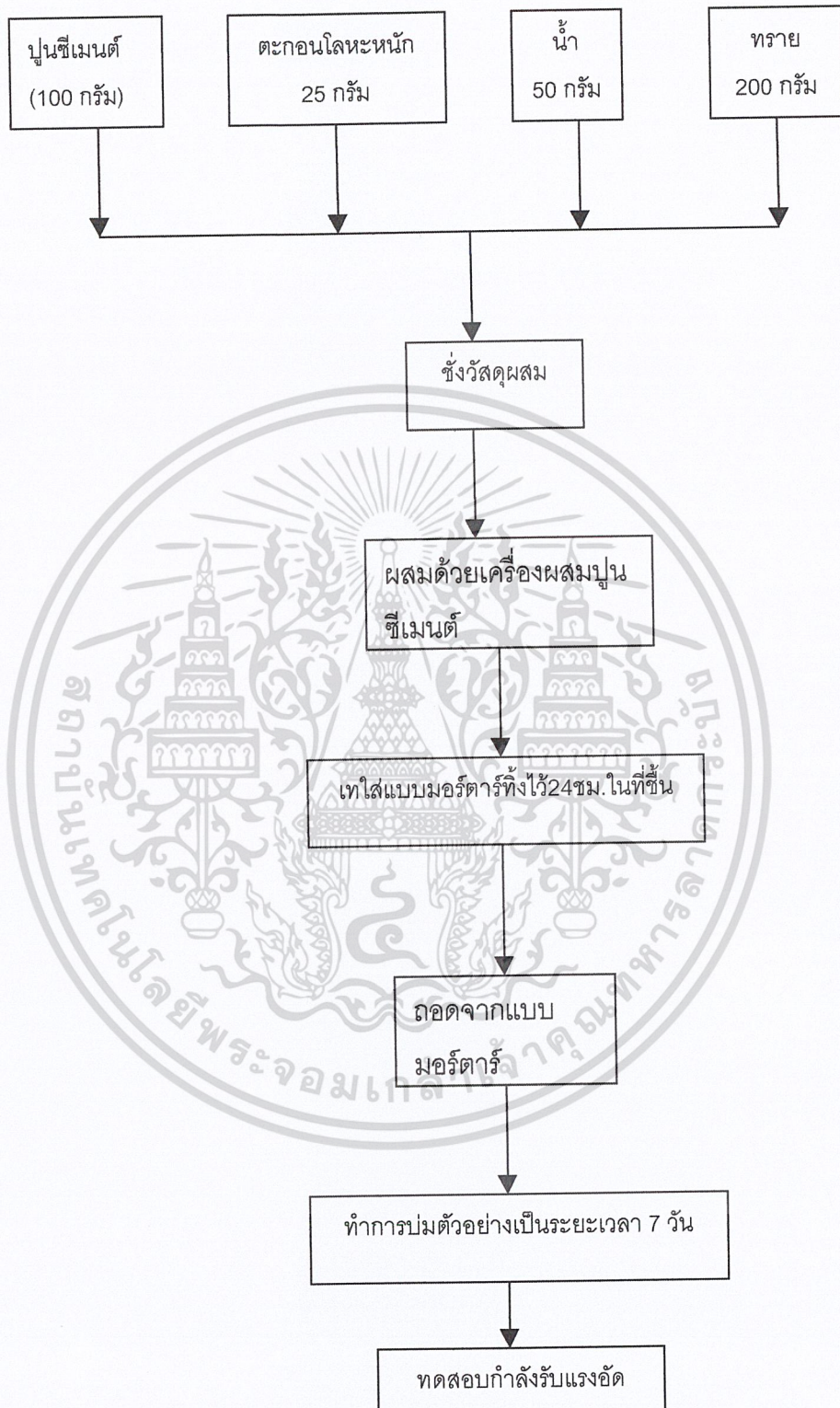
6. ปั่นตัวอย่างต่อจนครบ 7 วันโดยใช้ผ้ากระสอบชุมน้ำคลุมทับหรือแช่ไว้ในน้ำ

7. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนชนิดของโลหะหนักเป็นโลหะหนักนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปเป็นแผนภาพแสดงสัดส่วนของวัสดุซีเมนต์และขั้นตอนการหล่อซีเมนต์

สัดส่วนผสมต่อวัสดุประสาน



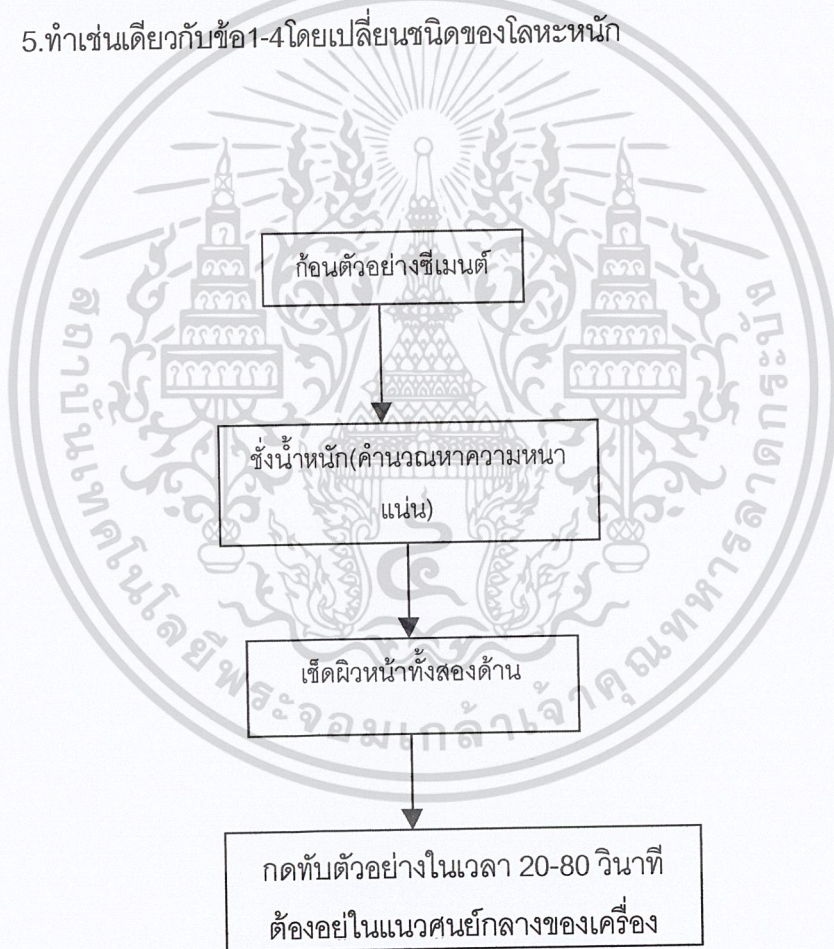
ภาพที่ 3.12 : สัดส่วนของวัสดุซีเมนต์และขั้นตอนการเตรียมก้อนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ทดสอบกำลังรับแรงอัด

นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.4 ไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยเครื่อง Test Machine ด้วยวิธีการดังนี้

1. นำก้อนซีเมนต์ตัวอย่างที่จะทดสอบซึ่งน้ำหนักเพื่อคำนวณความหนาแน่นโดยหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่าง
2. วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกดโดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ
3. เช็ดผิวหน้าทั้งสองด้าน
4. ใช้แรงกดทับแท่งตัวอย่างในเวลา 20-80 วินาที โดยผิวหน้าของเครื่องมือทั้งสองด้านที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบและตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง
5. ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนชนิดของโลหะหนัก



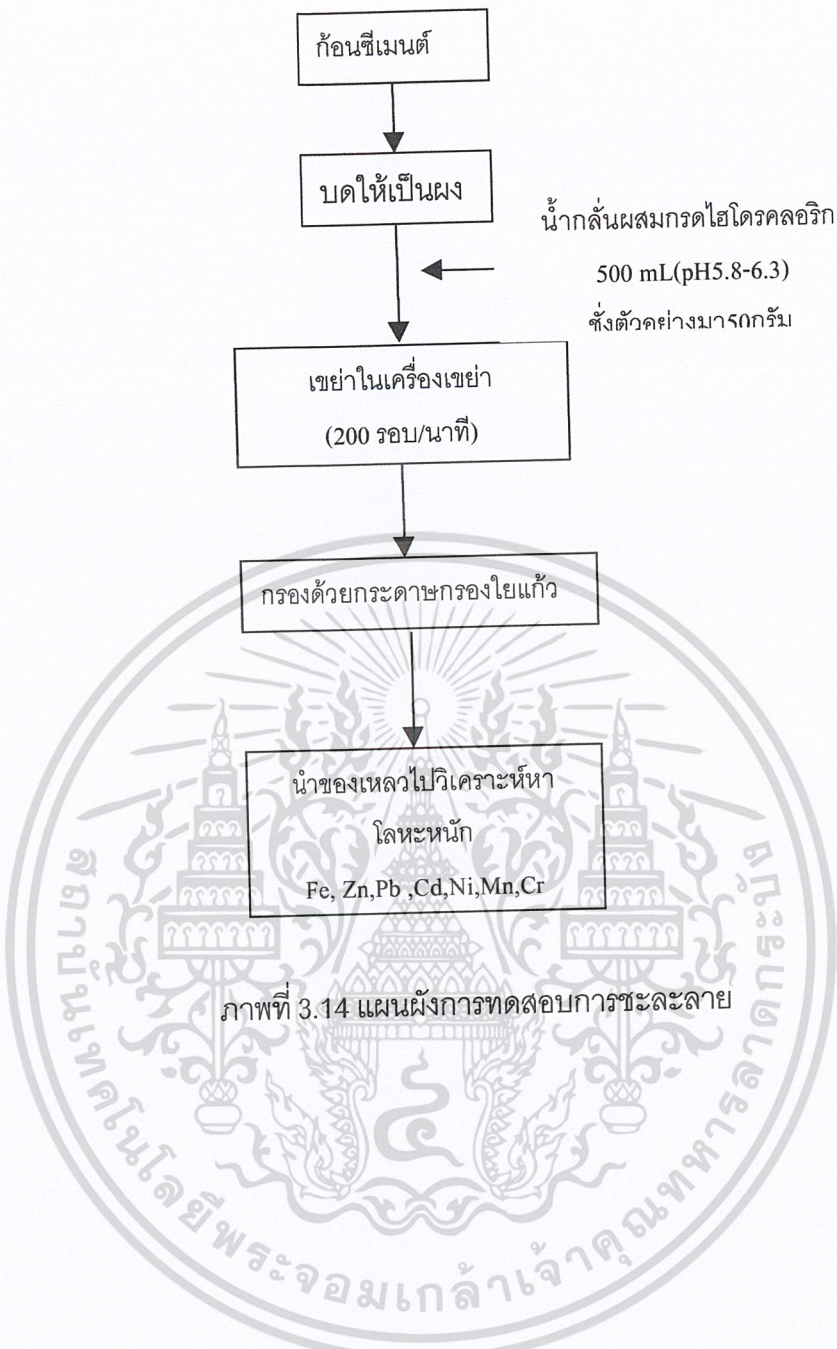
ภาพที่ 3.13 แผนผังการทดสอบกำลังรับแรงอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

การทดสอบนี้ใช้มาตรฐานการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้วิธีสกัดสาร (Extraction procedure) ซึ่งกรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดไว้ดังรายละเอียดตามขั้นตอนดังนี้

1. บดตัวอย่างที่แข็งตัวให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงให้ได้ขนาดระหว่าง 0.5-5 มิลลิเมตร
2. ชั่งตัวอย่างในข้อ 1) มา 50 กรัม ใส่ในถ้วยทำละลายซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมกับกรดไฮโดรคลอริกจนมีความเป็นกรดต่างระหว่าง 5.8-6.3 ในอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายเป็น 10 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่างสาร
3. เขย่าตัวอย่างบนเครื่องเขย่า (Shaker) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องเขย่าชนิด 200 รอบ/นาที
4. กรองสารละลายโดยใช้กระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดรู 1 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์โลหะหนักโดยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer
6. วัดค่าพีเอช ความนำไฟฟ้าและวิเคราะห์ความเป็นต่างของน้ำสกัด



ภาพที่ 3.14 แผนผังการทดสอบการชะละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์

### 4.1 สมบัติของของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมี

นำของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมีมา 6 ตัวอย่าง คือ A B C D E และ F มาทำการย่อยด้วยกรดไนตริกเข้มข้น แล้วนำมาทำการกรอง เพื่อที่จะนำน้ำที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก 7 ชนิด คือ เหล็ก โคโรเมียม นิกเกิล แคดเมียม สังกะสี ตะกั่วและแมงกานีส โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer แสดงดังตารางที่ 4.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 : ลักษณะทั่วไปของของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมี

ตัวอย่าง ของเสีย	คำพี เอช	ลักษณะของ ของเสีย	ปริมาณโลหะหนัก						
			Fe	Zn	Pb	Cd	Ni	Mn	Cr
A	1	สีน้ำตาล มี ตะกอนนอน ก้น กลิ่น เหม็น	8.02	10.07	12.81	0.303	3.101	30.73	35.96
B	1	สีน้ำตาล เหลืองใส กลิ่นเหม็น	ND	ND	10.30	0.120	0.201	ND	6.140
C	1	สีแดงใส มี กลิ่นเหม็น ไม่ มีตะกอน	ND	3.271	ND	9.482	0.572	5.42	5.312
D	1	สีน้ำตาล เหลืองขุ่น มี กลิ่นเหม็น	ND	4.51	9.325	0.305	0.265	ND	5.802
E	6	แยกเป็น2ชั้น ชั้นล่างเป็น ตัวทำละลาย อินทรีย์	ND	ND	10.25	0.380	0.392	ND	5.401
F	6	สีน้ำเงินใส มี กลิ่นเหม็น ไม่ มีตะกอน	ND	6.50	ND	12.72	0.237	ND	5.690
พิสัย			ND- 8.02	ND- 10.07	ND- 12.81	0.120- 12.72	0.201- 3.101	ND- 30.73	5.312- 35.96
เฉลี่ย			1.337	4.058	7.114	3.885	0.795	6.025	10.718
มาตรฐานนี้ตั้ง			*	5.0	0.2	0.03	1.0	5.0	0.25

หมายเหตุ \* = ไม่มีประกาศนํ้าทิ้งกระทรวงอุตสาหกรรม

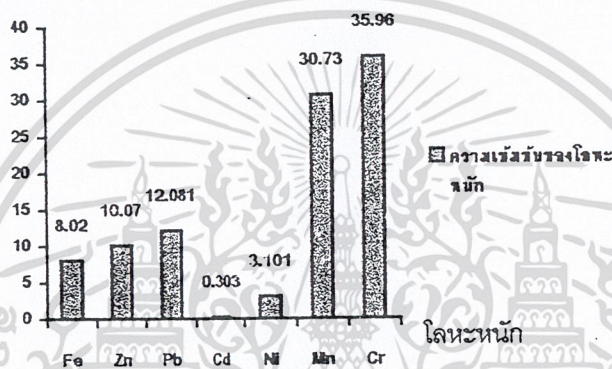
ND = not detected

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 พบว่า ค่าพีเอช ของของเสียทั้ง 6 ชนิดอยู่ในช่วง 1-6 ปริมาณเหล็ก สังกะสี ตะกั่วแคดเมียม นิกเกิล แมงกานีสและโครเมียม อยู่ในช่วง ND – 8.02 , ND-10.07 , ND – 12.81 , 0.120-12.72 , ND-30.73 และ 5.312-35.96 มก. / ล. ตามลำดับ

สำหรับตัวอย่างของเสีย A ลักษณะของน้ำเสียมีสมบัติเป็นกรด ( $\text{pH} = 1$ ) และมีปริมาณ โลหะหนักทุกชนิดเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น เหล็กซึ่งไม่ได้ กำหนดไว้ในมาตรฐานมีค่า 8.02 มก./ล. โดยปริมาณโครเมียมและแมงกานีสมีค่าสูงมาก คือ 35.96 และ 30.73 มก. / ล. ตามลำดับ แสดงปริมาณโลหะหนักในของเสีย A ดังภาพที่ 4.1

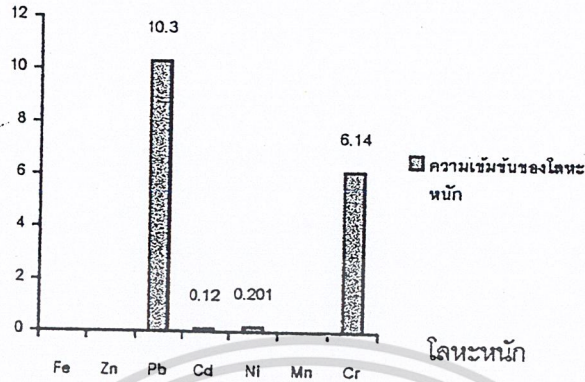
ความเข้มข้น (มก. / ล. )



ภาพที่ 4.1 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย A

สำหรับตัวอย่างของเสีย B มีลักษณะของน้ำเสียเป็นกรด ( $\text{pH} = 1$ ) และมีปริมาณโลหะหนักทุกตัวเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น นิกเกิลและแมงกานีส ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน สำหรับปริมาณเหล็กตรวจไม่พบ โดยปริมาณตะกั่วที่พบมีค่ามากที่สุด คือ 10.30 มก. / ล. แสดงปริมาณโลหะหนักในของเสีย B ดังภาพที่ 4.2

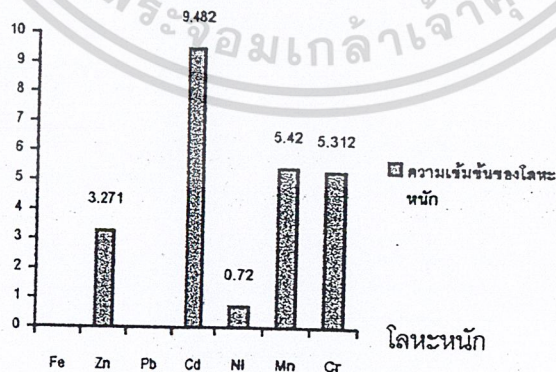
ความเข้มข้น ( มก. / ล. )



ภาพที่ 4.2 ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย B

สำหรับตัวอย่างของเสีย C ลักษณะของเสียมีสมบัติเป็นกรด ( $\text{pH} = 1$ ) และมีปริมาณโลหะหนักทุกตัวเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น สังกะสี ตะกั่ว และนิกเกิล ที่มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน สำหรับปริมาณเหล็กนั้นกรมโรงงานอุตสาหกรรมไม่ได้ระบุค่ามาตรฐานน้ำทิ้งไว้ในประกาศ แสดงปริมาณโลหะหนักในของเสีย C ดังภาพที่ 4.3

ความเข้มข้น ( มก. / ล. )

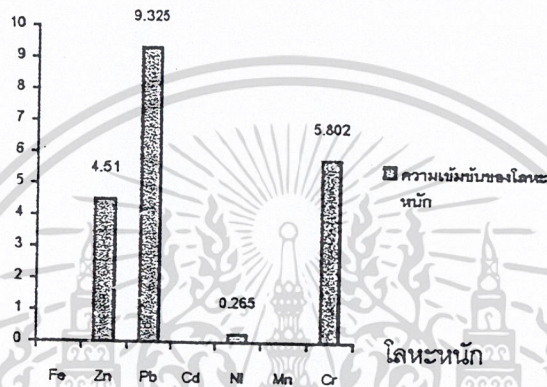


ภาพที่ 4.3 แสดงปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวอย่างของเสีย D ลักษณะของเสียมีสมบัติเป็นกรด ( pH = 1 ) และมีปริมาณโลหะหนักทุกตัวเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น สังกะสี นิกเกิล และแมงกานีส ปริมาณเหล็กตรวจไม่พบโลหะที่ตรวจพบมากที่สุด คือ 9.325 มก. / ล. แสดงปริมาณโลหะหนักในของเสีย D ดังภาพ

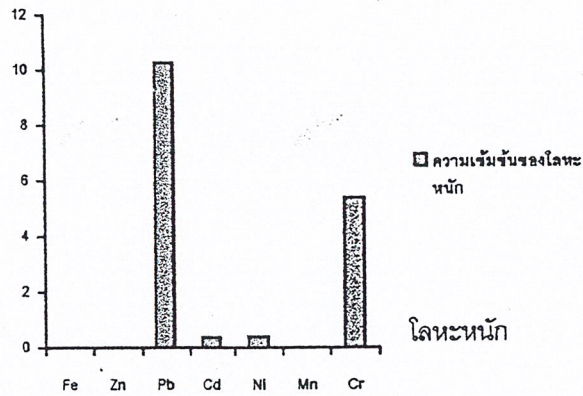
ความเข้มข้น ( มก. / ล. )



ภาพที่ 4.4 แสดงปริมาณโลหะหนักของเสีย D

สำหรับตัวอย่างของเสีย E มีลักษณะของเสียมีสมบัติเป็นกลาง ( pH = 6 ) และมีปริมาณโลหะหนักทุกตัวเกินเกณฑ์มาตรฐานของน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น สังกะสี นิกเกิลและแมงกานีส เหล็กตรวจไม่พบโลหะที่มีปริมาณสูงสุด คือ ตะกั่ว มีค่า 10.25 มก. / ล. แสดงปริมาณโลหะหนักในของเสีย E ดังภาพที่ 4.5

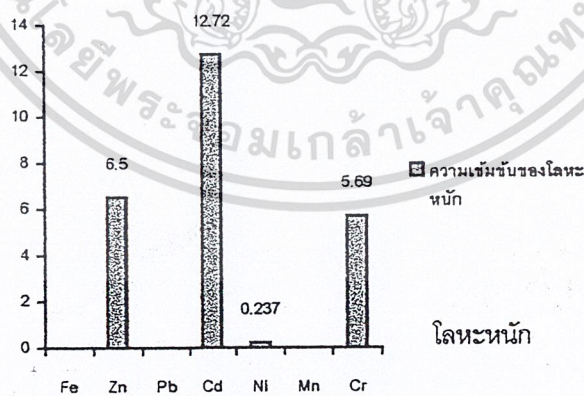
ความเข้มข้น (มก. / ล. )



ภาพที่ 4.5 แสดงปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย E

สำหรับตัวอย่างของเสีย F มีลักษณะของน้ำเสียมีสมบัติเป็นกลาง ( $\text{pH} = 6$ ) และมีปริมาณโลหะหนักทุกตัวเกินเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น ตะกั่ว นิกเกิลและแมงกานีส สำหรับปริมาณหลักตรวจไม่พบ จากการวิเคราะห์ พบว่า มีปริมาณของแคดเมียมมีค่ามากที่สุด คือ 12.72 มก. / ล. แสดงปริมาณโลหะหนักในของเสีย แสดงดังภาพที่ 4.6

ความเข้มข้น (มก. / ล. )



ภาพที่ 4.6 แสดงปริมาณโลหะหนักในน้ำเสีย F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การปรับเสถียรด้วยปูนขาว ( CaO )

เมื่อทำการปรับเสถียรด้วยปูนขาว ( CaO ) ตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ ตะกอนที่ได้ พบว่า ตัวอย่างของเสีย B มีน้ำหนักตะกอนมากที่สุด คือ 87.94 กรัม รองลงมา คือ ตัวอย่างของเสีย A คือ 83.15 กรัม โดยปริมาณปูนขาวที่เติมลงไปของเสียแต่ละตัวอย่าง เพื่อให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ ซึ่งการตกตะกอนของโลหะหนักจะแตกต่างกันทั้งนี้เนื่องมาจาก ค่าพีเอชเริ่มต้นของของเสีย โดยเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตะกอนตัวอย่างของเสียแต่ละประเภทอยู่ในช่วง 36.74-46.10 แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ด้วยปูนขาวและเปอร์เซ็นต์ความชื้นของตะกอน

ตัวอย่างของเสีย	ปริมาตร (มิลลิเมตร)	ค่าเป็นกรดต่าง		ปูนขาว (กรัม)	น้ำหนักตะกอน		%ความชื้นของตะกอน	
		เริ่มต้น	สุดท้าย		เปียก	แห้ง		
A	1,000	1	9.5	81.02	150.09	83.15	44.60	
B	1,000	1	9.5	86.48	146.02	87.94	39.78	
C	1,000	1	9.5	58.74	104.3	59.65	42.81	
D	1,000	1	9.5	72.34	122.68	73.79	39.85	
E	1,000	6	9.5	9.49	19.87	12.57	36.74	
F	1,000	6	9.5	5.22	14.49	7.81	46.10	
ฟิล์ม								36.74- 46.10
เจลลี่								41.65

เมื่อศึกษาผลการบำบัดโลหะหนักในของเสียโดยนำน้ำใสส่วนบน ( Supernatant ) เหนือตะกอนมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักทั้ง 7 ชนิด ผลการทดลองแสดงดังตาราง 4.3

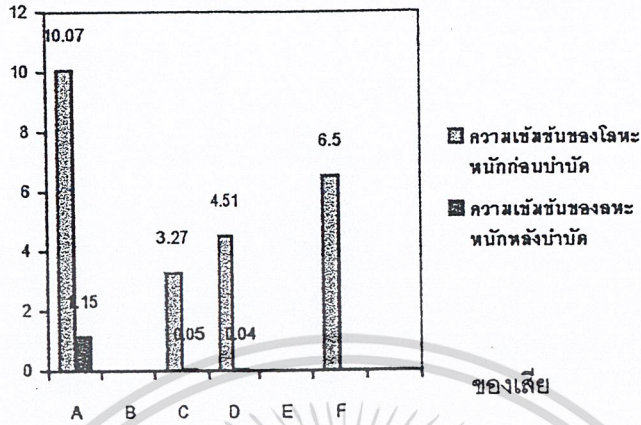
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักก่อนและหลังบำบัดโดยการตกตะกอน  
ด้วยปูนขาว (pH = 9.5)

ตัวอย่าง ของเสีย	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดโลหะหนัก						
		Fe	Zn	Pb	Cd	Ni	Mn	Cr
A	ก่อนบำบัด	8.02	10.07	12.81	0.30	3.10	30.73	35.9
	หลังบำบัด	ND	1.15	ND	0.030	0.630	0.111	0.240
B	ก่อนบำบัด	ND	ND	10.30	0.120	0.20	ND	6.17
	หลังบำบัด	ND	ND	0.20	0.030	0.03	ND	0.25
C	ก่อนบำบัด	ND	3.27	ND	9.480	0.570	5.42	5.31
	หลังบำบัด	ND	0.05	ND	0.03	0.08	ND	0.25
D	ก่อนบำบัด	ND	4.51	9.32	0.30	0.26	ND	5.80
	หลังบำบัด	ND	0.04	0.19	0.03	0.16	ND	0.25
E	ก่อนบำบัด	ND	ND	10.25	0.38	0.39	ND	5.69
	หลังบำบัด	ND	ND	0.01	0.03	0.27	ND	0.25
F	ก่อนบำบัด	10.81	6.50	ND	12.72	0.24	ND	5.69
	หลังบำบัด	2.82	ND	ND	0.03	0.10	ND	0.25
มาตรฐานน้ำทิ้ง(มก./ล.)		*	5.0	0.2	0.03	1.0	5.0	0.25

หมายเหตุ \* = ไม่มีในประกาศน้ำทิ้งกระทรวงอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบ ตัวอย่างของเสียแต่ละประเภท พบว่า ตัวอย่างของเสียหลังการบำบัดทุกชนิดมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แสดงดังภาพ 4.7-4.12

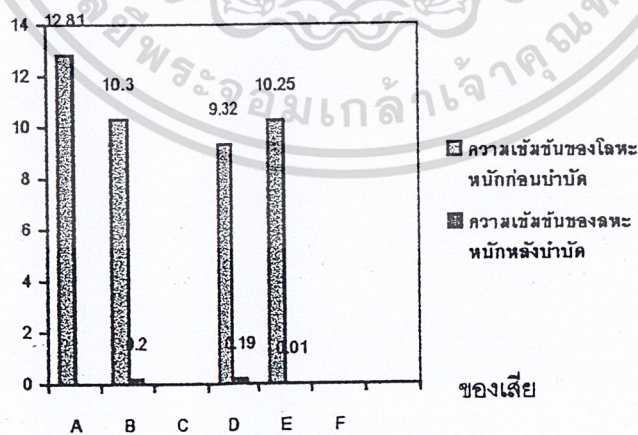
ความเข้มข้น (มก./ล.)



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบปริมาณสังกะสีก่อนและหลังบำบัด

จากภาพที่ 4.7 พบว่า ค่าที่ได้หลังการบำบัดด้วยปูนขาว อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานที่ระบุไว้ (มาตรฐาน 5.0 มก./ล.)

ความเข้มข้น (มก./ล.)

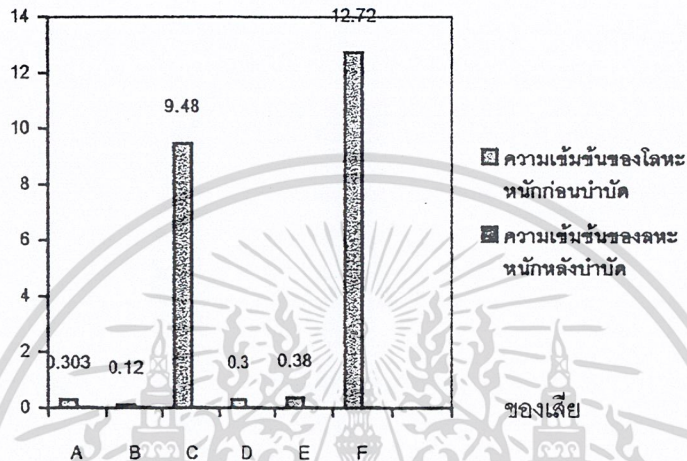


ภาพที่ 4.8 เปรียบเทียบปริมาณตะกั่วก่อนและหลังบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 4.8 พบว่า ค่าที่ได้หลังจากทำการบำบัดด้วยปูนขาวมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ากรรมโรงงาน ( มาตรฐานตะกั่ว เท่ากับ 0.2 มก./ล. )

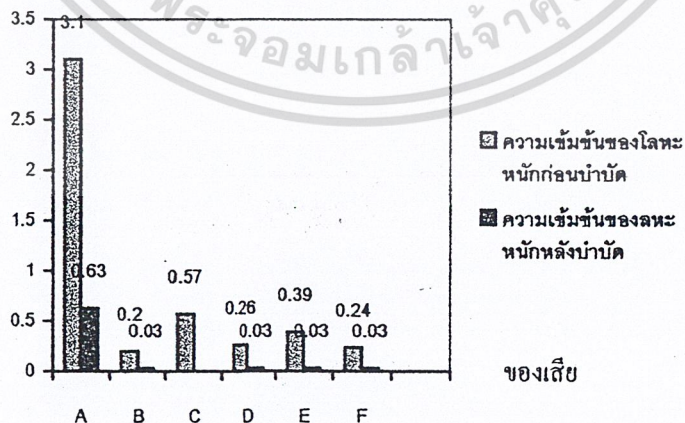
ความเข้มข้น ( มก./ล. )



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบปริมาณแคดเมียมก่อนและหลังบำบัด

จากภาพที่ 4.9 พบว่า ค่าที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยปูนขาวมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ากรรมโรงงาน ( มาตรฐานแคดเมียม เท่ากับ 0.03 มก./ล. )

ความเข้มข้น ( มก. / ล. )

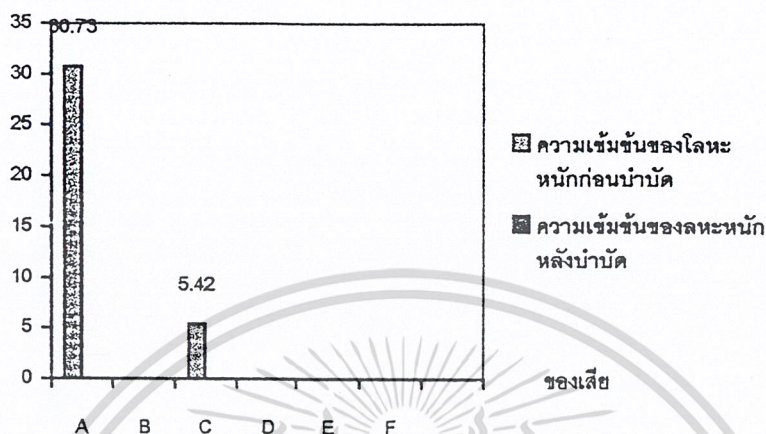


ภาพที่ 4.10 เปรียบเทียบปริมาณนิกเกิลก่อนและหลังบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพ 4.10 พบว่า ค่าที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยปูนขาวมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ากรมโรงงาน (มาตรฐานแคดเมียม เท่ากับ 1.00 มก./ล.)

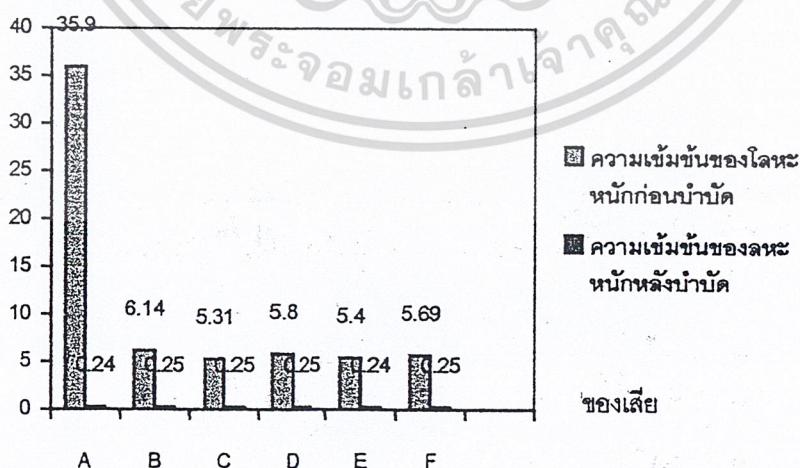
ความเข้มข้น (มก./ล.)



ภาพที่ 4.11 เปรียบเทียบปริมาณแมงกานีสก่อนและหลังบำบัด

จากภาพ 4.11 พบว่า ค่าที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยปูนขาวมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ากรมโรงงาน (มาตรฐานแมงกานีส เท่ากับ 5.00 มก./ล.)

ความเข้มข้น (มก./ล.)



ภาพที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณโครเมียมก่อนและหลังบำบัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพ 4.12 พบว่า ค่าที่ได้หลังจากการบำบัดด้วยปูนขาวมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่ากรมโรงงาน (มาตรฐานโครเมียม เท่ากับ 0.25 มก./ล.)

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดโลหะหนักทั้ง 7 ชนิด ตามวิธีของกรมโรงงานอุตสาหกรรม แสดงข้อมูลดังตาราง 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนัก

ตัวอย่างของเสีย	เปอร์เซ็นต์การบำบัดโลหะหนัก						
	Fe	Zn	Pb	Cd	Ni	Mn	Cr
A	100	88.5	100	90	79.68	99.64	99.33
B	-	-	98.06	75	85	-	95.29
C	-	98.47	-	99.68	85.96	100	95.69
D	-	99.11	97.96	90	38.46	-	95.56
E	-	-	99.90	92.10	30.77	-	95.61
F	73.91	100	-	99.76	58.33	-	95.29- 99.33
พิสัย	73.91- 100	88.58- 100	97.96- 100	75-99.76	30.77- 85.96	99.64- 100	96.24
เฉลี่ย	86.96		98.98	91.09	63.03	99.82	

จากตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดของ เหล็ก สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิล แมงกานีสและโครเมียม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.96 96.54 98.98 91.09 63.03 99.82 และ 96.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการบำบัดโลหะหนักอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถบำบัดโลหะหนักได้เป็นอย่างดี

### 4.3 การทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยการทำให้เป็นก้อน

นำตะกอนที่ได้จากการตกตะกอนไฮดรอกไซด์มาทำลายฤทธิ์โลหะหนักโดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งสัดส่วนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.25 ใช้ระยะเวลาบ่มตัว 7 วัน จากนั้นนำซีเมนต์ก้อนของของเสียแต่ละชนิดไปทดสอบสมบัติการชะละลาย ความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัด ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเกณฑ์มาตรฐานการทำให้เป็นก้อนของกรมโรงงานอุตสาหกรรม

#### 4.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นของของเสียโลหะหนักที่ให้เป็นก้อน ดังตารางที่ 4.5 สมบัติค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์จากตะกอนของเสีย

ตารางที่ 4.5 แสดงสมบัติค่าความหนาแน่นและกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์จากตะกอนของเสีย

ก้อนซีเมนต์ ( เฉลี่ย )	ความหนาแน่น ตัน/ลบ.ม.	กำลังรับแรงอัด กก./ตร.ซม.
A	2.21	280.4
B	2.11	260.0
C	2.09	190.4
D	2.08	120.0
E	2.23	282.3
F	2.20	276.0
Control 1 ( ปูนขาว+ซีเมนต์ )	2.23	296.0
Control 2 ( ปูนซีเมนต์ )	2.15	283.0
ค่ามาตรฐาน	1.04	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่าความหนาแน่นของซีเมนต์ก้อนเฉลี่ยของตาละชนิดอยู่ในช่วง 2.08-2.23 ตัน / ลบ.ม. ซึ่งเป็นค่าที่สูงกว่าค่ามาตรฐาน (1.04 ตัน / ลบ.ม.) โดย ซีเมนต์ก้อนเฉลี่ยของ E มีค่ามากที่สุด คือ 2.23 ตัน / ลบ.ม. และ D มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 2.08 ตัน / ลบ.ม.

สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ก้อนเฉลี่ยของแต่ละชนิดอยู่ในช่วง 120.0 – 282.3 กก. / ตร. ซม. ซึ่งพบว่า ค่าที่ได้ทุกตัวมีค่าสูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดมาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีค่าเท่ากับ 14 กก. / ตร. ซม. โดยค่าที่มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด คือ ซีเมนต์ก้อนเฉลี่ย F ซึ่งมีค่าเท่ากับ 282.3 กก./ตร.ซม. ซึ่งเป็นของซีเมนต์ก้อนเฉลี่ยของ D

#### 4.3.2 การทดสอบการชะละลายของซีเมนต์ก้อนจากตะกอนของเสีย

ผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัดจากการทดสอบค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าและปริมาณโลหะหนัก แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวิเคราะห์สมบัติของน้ำสกัด

ก้อนซีเมนต์ (เฉลี่ย)	ค่าพีเอช	ค่าการนำไฟฟ้า(ms/cm)	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล.)						
			Fe	Zn	Pb	Cd	Ni	Mn	Cr
A	11.21	19.60	Fe	Zn	Pb	Cd	Ni	Mn	Cr
B	11.32	18.35	ND	ND	0.05	0.02	0.70	ND	0.63
C	11.02	16.62	ND	ND	0.53	0.02	0.07	ND	0.53
D	11.59	10.09	ND	0.10	0.08	0.05	0.43	ND	0.53
E	11.61	10.51	ND	ND	ND	0.05	0.05	ND	0.48
F	11.57	18.88	ND	ND	ND	0.05	0.07	ND	0.50
มาตรฐานน้ำสกัด			*	1.0	5.0	1.0	1.0	*	5.0
พิสัย	11.02-	9.12-	ND	ND-	ND-	0.02-	0.05-	ND	0.48-
	11.61	19.6		0.10	0.53	0.05	0.70		0.63
เฉลี่ย	11.33	15.12	ND	0.10	0.28	0.04	0.23	ND	0.55
Control1	11.13	17.76	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Control2	11.22	9.12	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

หมายเหตุ \* = ไม่มีในประกาศน้ำสกัดของกรมโรงงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์สัมบัติน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย พบว่า

### 1. พีเอช

ค่าพีเอชในน้ำสกัดอยู่ในช่วง 11.02-11.59 ซึ่งเฉลี่ยได้เท่ากับ 11.33 จะพบว่าในน้ำสกัดมีค่าพีเอช เป็น เบส เนื่องจาก การละลายของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยค่าพีเอชของก้อนซีเมนต์ของของเสียแต่ละประเภทมีค่าใกล้เคียงกับค่าพีเอชของก้อนซีเมนต์ที่ทำการควบคุม( พีเอช อยู่ในช่วง 11.13-11.22 )

### 2. ค่าการนำไฟฟ้า ( Conductivity )

ค่าการนำไฟฟ้าในน้ำสกัดอยู่ในช่วง 9.12-19.6 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งเฉลี่ยได้เท่ากับ 15.12 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตรและก้อนซีเมนต์ที่มีตะกอนของของเสีย D เป็นส่วนผสมมีการนำไฟฟ้าน้อยที่สุด คือ 10.09 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าต่ำจะดีกว่าค่าการนำไฟฟ้าที่มีค่าสูง เนื่องจาก ค่าการนำไฟฟ้าสูงจะมีปริมาณไอออนของโลหะหนักถูกสกัดออกมาได้มาก

### 3. ปริมาณโลหะหนัก

ปริมาณของโลหะหนัก สังกะสี ตะกั่ว แคดเมียม นิเกิลและโครเมียม อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำสกัดของกรมโรงงาน ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ได้ มีค่าเท่ากับ 0.14 0.28 0.04 0.23 และ 0.55 มก. / ล. สำหรับ เหล็กและแมงกานีส ไม่มีการตรวจพบในน้ำสกัด

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการบำบัดของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการภาควิชาเคมี โดยวิธีการปรับเสถียรของเสียโลหะหนักด้วยปูนขาว (CaO) แล้วนำตะกอนโลหะหนักไฮดรอกไซด์ไปทำลายฤทธิ์โดยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง สรุปผลได้ดังนี้

1. น้ำทิ้งที่ได้หลังจากการบำบัดโดยการปรับเสถียรด้วยปูนขาว (CaO) เมื่อทำการวิเคราะห์โลหะหนักทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ ตะกั่ว สังกะสี แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล เหล็ก และแมงกานีส พบว่า ประสิทธิภาพการบำบัด เท่ากับ 98.98, 96.54, 91.09, 63.03, 86.96, 99.82 เปอร์เซ็นต์ และค่าที่ได้มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งกรมโรงงานอุตสาหกรรม
2. ค่าความสามารถในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักไฮดรอกไซด์ โดยการทำให้เป็นก้อนโดยใช้สัดส่วน W/C เท่ากับ 0.25 เวลาบ่ม 7 วัน พบว่า ค่าความหนาแน่น และค่ากำลังรับแรงอัด อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการทำให้เป็นก้อน คือ มีค่าสูงกว่า 1.04 ตัน/ลบ.ม. และ 14 กก./ลบ.ซม. ตามลำดับ ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม สำหรับค่าการชะละลาย พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาในน้ำสกัด มีค่า อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เปลี่ยนสารเคมีที่ใช้ในการปรับเสถียร เป็นสารเคมีชนิดอื่น เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ โซเดียมคาร์บอเนต
2. ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์โลหะหนักโดยเปลี่ยนวัสดุประสานเป็นชนิดอื่นเช่น ซีเมนต์ ลอย ฟางข้าว
3. นำก้อนซีเมนต์มาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น นำมาปูทางเดินเท้า
4. ผลจากการศึกษาวิจัยนี้สามารถใช้บำบัดโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการของสถานศึกษาต่างๆซึ่งมีปริมาณไม่มากถึงขั้นต้องสร้างโรงบำบัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

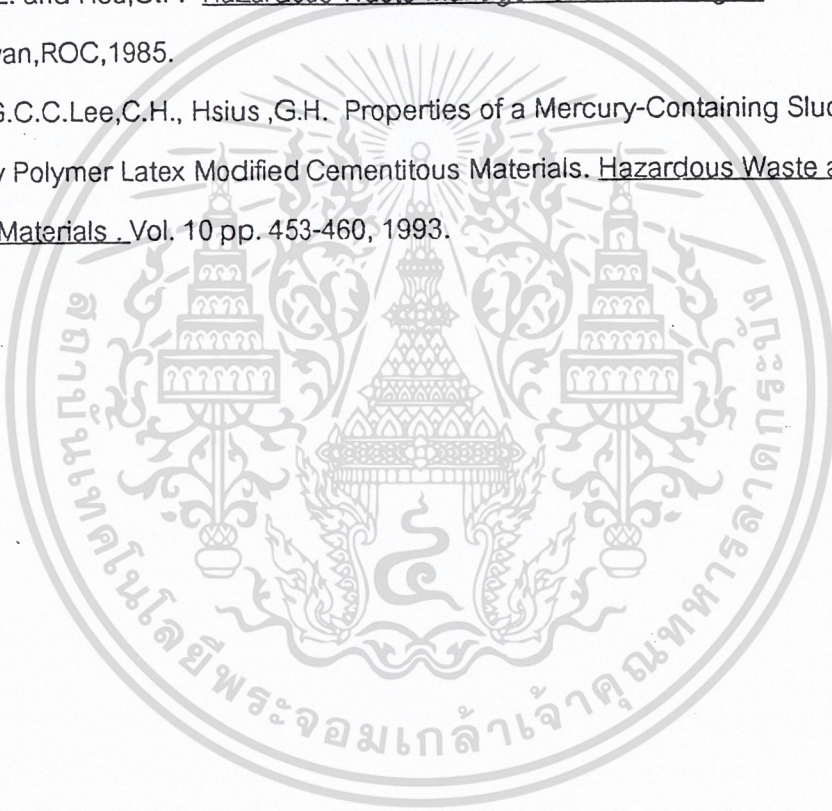
## เอกสารอ้างอิง

1. กองมาตรฐานคุณภาพสิ่งแวดล้อม รายงานผลการปฏิบัติงานของคณะกรรมการสืบค้นปัญหาอันเนื่องมาจากสารพิษและจัดอันดับความสำคัญปี 2526-2527. สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ, กรุงเทพมหานคร, 2527
2. กระทรวงอุตสาหกรรม ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 25 (พ.ศ.2531) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2521 เรื่อง หน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร, 2521
3. กนกพร ชัยวุฒิกุลและคณะ การศึกษาการชะละลายของซีเมนต์ที่มีโลหะเจือปนในปริมาณสูง วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
4. กรมโรงงานอุตสาหกรรม ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดวิธีการเก็บทำลายฤทธิ์กำจัด ผึ่งทิ้ง เคลื่อนย้าย และการขนส่งสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว(ฉบับที่1) พ.ศ.2531 กระทรวงอุตสาหกรรม กรุงเทพมหานคร, 2531
5. นฤมิต คินิมาน การนำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำที่เจือให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์และถ้ำลอยลิกไนต์ วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาค วิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538
6. พิภพ สุนทรสมัย วัสดุวิศวกรรมการก่อสร้าง สหประชากรมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2532
7. พัศยศ สมวงษ์ และคณะ การศึกษากำลัรับแรงอัดของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนในปริมาณสูง วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
8. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ การทำลายฤทธิ์ของเสียอันตรายเอกสารประกอบการอบรมด้านการสหภาพและสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมรุ่นที่ 7 (8 ส.ค. เม.ย. 2536) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536
9. วินิต ซอวิเชียร คอนกรีตเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529
10. American Society for Testing and Materials. Standard Method of Testing for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or 50-mm Cube Speciment). C 109-86, Annual Book of ASTM Standard, Section 4, Vol.0402, pp. 74-79, 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. American Society for Testing and Materials. Standard Method of Testing for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using Portion of prisms Broken in Flexure). C 349-82, Annual Book of ASTM Standard , Section 4, Vol.0402,pp. 266-269, 1988.
14. Bishop, P.L. Leaching of Inorganic Hazardous Constituents from Stabilized/Solidified Hazardous Wastes. Hazardous Waste and Hazard Material, Vol. 5 pp. 129-143,1988.
15. B.J.Alloway and D.C. Ayres Toxicology of Heavy Metal Chemical Principles of Environmental Pollution pp. 156-159, 1993.
16. Chang, C.L. Solidification of Heavy Metal Using Cement and Rice Husk ash Master's Thesis, Engineering,Asian Instituted of Technology, 1989.
17. Charles A. Wentz Chemical, Physical and Biological Treatment Hazardous Management McGRAWHILL International Edition pp. 145-176, 1990.
18. Cheng, K.Y. and Bishop, P. Metal distribution in Solidified/Stabilized Waste Forms After Leaching. Hazardous Waste and Hazardous Materials, Vol. 9 pp. 163-171,1992.
19. Engineering Scienae Co. Ltd., Thai DCI Co. Ltd. And System Engineering Co.Ltd. National Hazardous Waste Management Plan. Office of The National Environmental Board, Ministry of Science, Technology and Energy, Kingdom of Thailand, 1989.
20. Kanatip Ratanachoo Biological Heavy Metal Removal Frome Seweg Sludge Master's Engineering,Asian Instituted of Technology, 1995.
21. Patty, F.A. Industrial Hygiene and Technology Second Revised Edition, Vol. 2 pp. 1017-1022,1052-1058,1090-1104. Interscience Publishers, New York, London Sydney, 1962.
22. Perket, C.L. and Webster, W.C. The Dissolution/Leaching Behavior of Metal Hydroxide/Metal Sulfide Sludge from Plating Waste Water. Hazardous Waste and Hazardous Material , Vol. 4 pp. 325-355, 1981.
23. Peter'o neill Heavy Metal Envirmmental Chemisty PP. 203,215-221,1993.
24. Rijal, S.P. Solidification of Laboratory Waste Using Cementitious Binders. Thesis No. EV 90-20, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand,1990.

25. Shin, H.S. and SujiWathana, P. Factors Affecting Solidification of Hazardous Materials. Hazardous Waste Detection Control Treatment pp. 1549-1560, 1988.
26. Shively, W., Bishop, P., Gress, D. and Brown, T. Leaching Tests of Heavy Metal Stabilized with Portland Cement. WPCF, Vol. 58 pp. 234-241, 1986.
27. Sollars, C.J. and Perry, R., Cement Based Stabilization of Wastes : Practical and Theoretical Considerations. Journal of Institution of Water and Environmental Management, Vol. 3 pp. 125-131, 1989.
28. Sujiwathana, P. Factors Affecting Solidification of Hazardous Waste Material. Thesis No. EV-87-5, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand, 1987.
29. Tsai, C.E. and Hsu, C.P. Hazardous Waste Management Technologies. Ou-Ya Inc., Taiwan, ROC, 1985.
30. Yang, G.C.C., Lee, C.H., Hsiao, G.H. Properties of a Mercury-Containing Sludge Solidified by Polymer Latex Modified Cementitious Materials. Hazardous Waste and Hazardous Materials . Vol. 10 pp. 453-460, 1993.



## ภาคผนวก ก

ส่วนผสมโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อน

ตารางที่ ก.1 : ส่วนผสมโดยน้ำหนักขององค์ประกอบต่างๆที่ใช้ในการทำให้เป็นก้อนสำหรับ  
โลหะหนัก

ตะกอนไฮดรอกไซด์		ปริมาณปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณทราย (g)	ปริมาณน้ำ (ml)
ตัวอย่างของเสีย	ปริมาณ (g)			
A	25	100	200	50
B	25	100	200	50
C	25	100	200	50
D	25	100	200	50
E	25	100	200	50
F	25	100	200	50
Control 1	25	100	200	50
Control 2		100	200	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลผลการทดลอง

1. การศึกษาการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ด้วยปูนขาว

ตารางที่ ข.1 : การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ด้วยปูนขาว (CaO) ให้ได้ pH 9.5

ตัวอย่างของเสีย	ปริมาณ (ml)	pH		ปริมาณปูนขาว (g)	ปริมาณตะกอน (ml)
		เริ่มต้น	สุดท้าย		
A	1,000	1	9.5	81.02	83.15
B	1,000	1	9.5	86.48	87.94
C	1,000	1	9.5	58.74	59.65
D	1,000	1	9.5	72.34	73.79
E	1,000	6	9.5	9.49	12.57
F	1,000	8	9.5	5.22	7.81

2. การศึกษาความสามารถในการทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยกระบวนการทำให้เป็นก้อน

ตารางที่ ข.2 : คุณสมบัติการนำไฟฟ้า อุณหภูมิและค่าความเป็นกรดต่างของน้ำสกัดจากการทดสอบการชะละลาย

ตัวอย่างของเสีย	ค่าการนำไฟฟ้า (ms/cm)			อุณหภูมิ (C)			ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
A	18.51	20.69	19.60	22.45	24.75	23.60	11.15	11.27	11.21
B	17.65	19.05	18.35	21.91	23.89	22.90	11.31	11.33	11.32
C	15.72	17.52	16.62	23.26	25.84	24.55	11.05	10.99	11.02
D	10.10	10.08	10.09	24.32	26.38	25.35	11.12	12.06	11.59
E	10.25	10.77	10.51	22.15	24.75	23.45	11.24	11.98	11.61
F	18.01	19.75	18.88	24.07	25.43	24.75	11.62	11.52	11.57
Control 1	16.51	19.01	17.76	22.57	25.03	23.80	11.03	11.23	11.13
Control 2	8.11	10.13	9.12	14.78	15.22	15.00	11.15	11.29	11.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

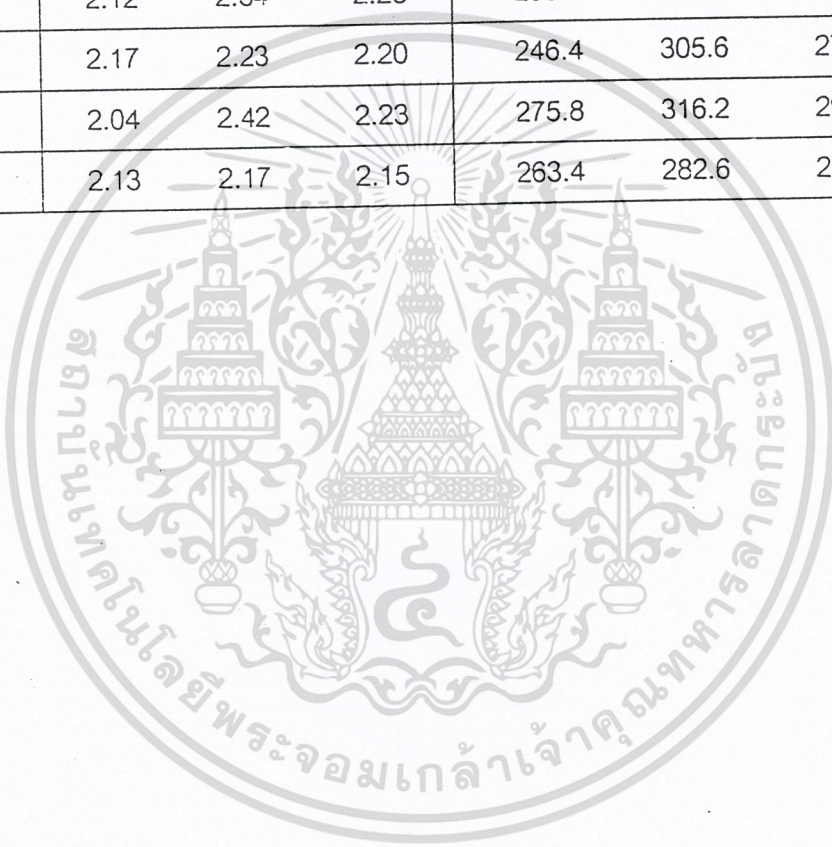
ตารางที่ ข.3 : ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของน้ำสกัดจากการทดสอบ  
การชะละลาย

ตัวอย่างของเสีย		ความเข้มข้นของโลหะหนัก ( mg/l )						
		Fe	Zn	Pb	Cd	Ni	Mn	Cr
A	1	ND	ND	0.615	0.012	0.619	ND	0.598
	2	ND	ND	0.389	0.026	0.783	ND	0.658
	เฉลี่ย	ND	ND	0.502	0.019	0.701	ND	0.628
B	1	ND	ND	0.510	0.014	0.063	ND	0.456
	2	ND	ND	0.550	0.028	0.079	ND	0.608
	เฉลี่ย	ND	ND	0.530	0.021	0.071	ND	0.532
C	1	ND	0.115	ND	0.036	0.312	ND	0.435
	2	ND	0.125	0.043	0.072	0.546	ND	0.623
	เฉลี่ย	ND	0.120	0.079	0.054	0.429	ND	0.529
D	1	ND	0.095	0.031	0.039	0.042	ND	0.578
	2	ND	0.111	0.031	0.061	0.074	ND	0.676
	เฉลี่ย	ND	0.103	0.031	0.050	0.058	ND	0.627
E	1	ND	ND	ND	0.048	0.031	ND	0.364
	2	ND	ND	ND	0.054	0.065	ND	0.588
	เฉลี่ย	ND	ND	ND	0.051	0.048	ND	0.476
F	1	ND	ND	ND	0.061	0.058	ND	0.415
	2	ND	ND	ND	0.045	0.086	ND	0.589
	เฉลี่ย	ND	ND	ND	0.053	0.072	ND	0.502
Control 1	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	เฉลี่ย	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Control 2	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	เฉลี่ย	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๑.4 : คุณสมบัติค่าความหนาแน่น และกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์

ตัวอย่างของเสี้ยน	ความหนาแน่น ( ตัน/ตร.ม.)			กำลังรับแรงอัด ( กก./ตร.ซม.)		
	1	2	เฉลี่ย	1	2	เฉลี่ย
A	2.11	2.31	2.21	274.8	286.0	280.4
B	2.04	2.18	2.11	275.6	244.4	260.0
C	2.03	2.17	2.10	185.4	195.4	190.4
D	2.15	2.03	2.09	120.2	119.8	120.0
E	2.12	2.34	2.23	259.2	305.4	282.3
F	2.17	2.23	2.20	246.4	305.6	276.0
Control 1	2.04	2.42	2.23	275.8	316.2	296.0
Control 2	2.13	2.17	2.15	263.4	282.6	273.0



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 : การเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักก่อน และ หลังบำบัด

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/L)	ตัวอย่างของเสีย					
		A	B	C	D	E	F
Fe	ก่อนบำบัด	8.025	ND	ND	ND	ND	10.81
	หลังบำบัด	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Zn	ก่อนบำบัด	10.07	ND	3.269	4.512	ND	6.497
	หลังบำบัด	ND	ND	0.120	0.108	ND	ND
Pb	ก่อนบำบัด	12.81	10.30	ND	9.316	10.25	ND
	หลังบำบัด	0.502	0.530	ND	0.061	0.031	ND
Cd	ก่อนบำบัด	0.303	0.120	9.478	0.305	0.380	12.720
	หลังบำบัด	0.019	0.021	0.054	0.050	0.051	0.053
Ni	ก่อนบำบัด	3.101	0.201	0.572	0.265	0.392	0.237
	หลังบำบัด	0.701	0.071	0.429	0.058	0.048	0.072
Mn	ก่อนบำบัด	30.73	ND	5.420	ND	ND	ND
	หลังบำบัด	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	ก่อนบำบัด	35.96	6.140	5.312	5.802	5.402	5.690
	หลังบำบัด	0.628	0.532	0.529	0.627	0.476	0.502

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้