

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับเสถียรเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล  
ด้วยวิธีการยัดจับด้วยซีเมนต์



โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 55552  
วัน,เดือน,ปี 19 พ.ค. 2548

.....  
.....

Cement-Based Stabilization/Solidification of Ash  
from Hospital Waste Incinerator



A Special Project Submitted in Partial Fulfilment of the Degree of

Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การปรับเสถียรได้จากเตาเผาขยะโรงพยาบาลให้เสถียรด้วยวิธีการยึด  
จับด้วยซีเมนต์

นักศึกษา นายพรเทพ มั่นกตัญญู  
นายวสันต์ โพธิ์เต็ง

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชลด อารุสุทธิรักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ธรรมเรศ เชื้อสาวดี

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติ  
ให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

	คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	อาจารย์ยุพา ดันทวี	
กรรมการ	อาจารย์กมลสินุสนธิ์ สุวรรณรัตน์	
กรรมการ	ดร.สุวรรณ จรรยาพูน	
กรรมการ	ดร.ชลด อารุสุทธิรักษ์	

  
.....  
(ผศ. ดร.ประยงค์ ดวงดี)  
หัวหน้าภาควิชา

**ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์**

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project Title</b>	Cement –Based Stabilization of Ash from Hospital Waste Incinerator
<b>Name</b>	Mr. Pornthep Mangatanyoo Mr. Wasan Poteng
<b>Department</b>	Chemistry
<b>Faculty</b>	Science
<b>Major Program</b>	Environmental Resource Chemistry
<b>Academic Year</b>	2003
<b>Project Advisor</b>	Dr. Chalor Jarusutthirak
<b>Project Co-Advisor</b>	Asso. Prof. Thammaret Cheusawathi

### ABSTRACT

This research studied the stabilization/solidification (S/S) from hospital waste incinerator using cement-based method. The ash is obtained from Srinakarin hospital, Khonkhan province. The chemical composition of ash was investigated using X-Ray Fluorescence Spectrophotometry. The main compositions of ash from hospital waste were silica ( $\text{SiO}_2$ ) and calcium oxide ( $\text{CaO}$ ). Regarding to the heavy metal, including zinc (Zn), lead (Pb) and copper (Cu) was extracted. The contents of leached heavy metal were lower than the standard leaching procedure. Microwave digestion of ash provided considerable amounts of the heavy metal in the solution. However one was proper to heavy metal doses leached from ash for only zinc (Zn), but lead (Pb) and copper (Cu) did not effect from ash amount, otherwise curing was proper to compressive strength but did not effect on heavy metal dosed leached from ash. The cement-based S/S of ash from hospital waste incinerator was studied, the factors affecting compressive strength and leaching character of the concrete blocks, included ratio of ash to cement, amount of sand, and curing period, were investigated. An increase of the ratio of ash to cement led to a decrease of compressive strength and a difficulty of setting. The optimum ratio was found to be 40%. However, leaching properties of all concrete blocks satisfied the standard. The amount of sand did not exhibit any effect on compressive strength and leach ability. An increasing curing period contributed to an increase of compressive strength, but no significant difference of leaching character was found. The increase pH of leachate possibly affect the leachability of the leaching solution.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือในการให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ ในการแก้ปัญหาเป็นอย่างดีจาก ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ รศ.ธรรมเรศ เชื้อสาวดี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในการให้คำปรึกษา ข้อมูลที่มีประโยชน์ และอนุเคราะห์ความช่วยเหลือในการจัดส่งเก้าอี้ขาเดี่ยวที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ โรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น ในการอนุเคราะห์ให้เก้าอี้ขาเดี่ยวจากเตาเผาเพื่อใช้สำหรับการทดลองเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษในครั้งนี้ทุกท่าน ที่กรุณาเสนอแนะ และแก้ไขเพิ่มเติมทำให้โครงการนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณพี่ๆเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี, ศึกษาศาสตร์ ที่คอยให้ความรู้และความช่วยเหลือเกี่ยวกับอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณพี่ๆเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์, ศึกษาศาสตร์ ๒ ที่คอยให้ความรู้ และความช่วยเหลือเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และช่วยให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือต่างๆเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องและเพื่อนๆที่ให้ความรัก ความห่วงใย คอยช่วยเหลือในด้านปัจจัยต่างๆรวมทั้งให้กำลังใจตลอดมา

นายพรเทพ มั่นกตัญญู

นายวสันต์ โพธิ์เต็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของ โครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 ของเสียอันตราย	4
2.1.1 ประเภทของเสียอันตราย	4
2.1.2 การจัดการของเสียอันตราย	5
2.2 การจัดการขยะมูลฝอยจากโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น	6
2.2.1 ประเภทขยะในโรงพยาบาลศรีนครินทร์	7
2.2.2 เตาเผาขยะของโรงพยาบาลศรีนครินทร์	8
2.3 ถ้ำลอย	10
2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของถ้ำลอย	10
2.3.2 รูปร่างของถ้ำลอย	11
2.3.3 ความละเอียดของถ้ำลอย	11
2.3.4 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของถ้ำลอย	12
2.3.5 ปฏิกริยาทางเคมีของถ้ำลอย	12
2.3.6 ประโยชน์ของการเลือกใช้ถ้ำลอยในงานคอนกรีต	13
2.4 โดหะหนัก	14
2.4.1 สังกะสี	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 ตะกั่ว	15
2.4.3 ทองแดง	15
2.5 ปูนซีเมนต์	16
2.5.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	16
2.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	18
2.5.3 ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ	19
2.5.4 ช่องว่างระหว่างซีเมนต์ Paste	21
2.6 การทำลายฤทธิ์และการทำให้เป็นก้อน	22
2.6.1 กระบวนการทำให้เป็นก้อนสำหรับการกำจัดของเสีย	22
2.6.2 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์	26
2.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์	27
2.7.1 กำลังอัดของคอนกรีต	27
2.7.2 การบ่มคอนกรีต	28
2.7.3 การแปรผันของกำลังคอนกรีต	29
2.7.4 ความเสียหายของคอนกรีต	29
2.7.5 การลดความเสียหาย	30
2.8 การทดสอบการชะละลาย	30
2.9 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน	32
2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	36
3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าและปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในเถ้า	38
3.1.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy	40
3.1.2 การทดสอบการชะละลายของเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาล	41
3.1.3 การย่อยสารด้วยไมโครเวฟ	42
3.2 การทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยการทำเป็นก้อนคอนกรีต	44
3.2.1 การหล่อและบ่มก้อนคอนกรีต	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 การวิเคราะห์หาความหนาแน่นและ การทดสอบแรงอัดของก้อนคอนกรีต	48
3.2.3 การวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนัก ในน้ำชะละลายจากก้อนคอนกรีต	50
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	52
4.1 องค์ประกอบทางเคมี	52
4.1.1 X-ray fluorescence (XRFs) Spectroscopy	52
4.1.2 การทดสอบการชะละลาย	54
4.1.3 การย่อยสารด้วยไมโครเวฟ	55
4.2 การยับยั้งและการทำลายฤทธิ์โลหะหนัก ในเถ้าขยะด้วยการทำให้เป็นก้อนซีเมนต์	57
4.2.1 อิทธิพลของปริมาณเถ้าขยะ ต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต	57
4.2.2 อิทธิพลของจำนวนวันในการบ่ม ต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต	59
4.2.3 อิทธิพลของปริมาณทราย ต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต	60
4.3 การศึกษาปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะละลาย	61
4.3.1 อิทธิพลของปริมาณเถ้า ต่อปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะละลาย	62
4.3.2 ผลของระยะเวลาในการบ่ม ต่อปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะละลาย	62
4.3.3 ผลของปริมาณทราย ต่อปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะละลาย	64
4.3.4 ผลของค่า pH ต่อการชะละลายของโลหะหนัก	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก ก องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำ	73
ภาคผนวก ข การคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำในรูป มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม (มก./กก.)	75
ภาคผนวก ค ปริมาณโลหะหนักในการทดสอบการชะละลายและการย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (มก./ล, มก./กก.ถ้ำ)	77
ภาคผนวก ง รายละเอียดและสมบัติของก้อนคอนกรีต	80
ภาคผนวก จ การเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำชะละลายก่อนและหลังการทดสอบการชะละลายก้อนคอนกรีต	82
ภาคผนวก ฉ ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) เรื่องกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งจากโรงงาน	83
ภาคผนวก ช หลักเกณฑ์และวิธีการทำสายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางกายภาพของเส้นลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-97	10
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	17
ตารางที่ 2.3 ลักษณะของสารประกอบที่เกิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	17
ตารางที่ 2.4 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน	24
ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการและข้อดีข้อเสียของการกำจัดของเสีย โดยวิธีทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์	25
ตารางที่ 2.6 ตารางเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย	31
ตารางที่ 2.7 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน ของกระทรวงอุตสาหกรรมและ US.EPA.	32
ตารางที่ 2.8 ตารางเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในเถ้าจากแหล่งต่างๆ	33
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากเตาเผาขยะ	53
ตารางที่ 4.2 ปริมาณองค์ประกอบของเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล	54
ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์จากเถ้าที่ผ่านการทดสอบการชะละลาย	55
ตารางที่ 4.4 รายละเอียดในการทำการย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digestion)	56
ตารางที่ 4.5 ปริมาณของโลหะหนักในเถ้าที่ผ่านการย่อยด้วยไมโครเวฟ	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (ksc) กับอัตราส่วนปริมาตรทรายต่อมวลรวม (กรัมต่อ 300 กรัม) ที่จำนวนวันในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน	61
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล.) กับปริมาณเถ้าในซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม ก) 7 วัน ข) 14 วัน ค) 28 วัน	63
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล) กับจำนวนวันในการบ่ม (วัน)	64
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายกับอัตราส่วนของปริมาตรทรายต่อมวลรวม (กรัมต่อ 300 กรัม) ที่ระยะเวลาการบ่ม ก) 7 วัน ข) 14 วัน ค) 28 วัน	65
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำชะละลาย ก่อนและหลังการทดสอบการชะละลายก่อนคอนกรีต	66



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

ในสภาวะโลกปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของประชากรเป็นอย่างมาก ส่งผลให้ภาครัฐและภาคเอกชนจำเป็นต้องมีการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม เพื่อรองรับกับสภาวะดังกล่าวนี้ ทั้งทางด้าน เกษตรกรรม อุตสาหกรรม สาธารณสุข คมนาคมขนส่ง และอื่นๆ ทำให้ต้องมีการใช้ทรัพยากรอย่างมาก ส่งผลให้ทรัพยากรธรรมชาติสูญเสียและร่อยหรอเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งทำให้เกิดมลพิษทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา อาทิเช่น น้ำเสีย อากาศเสีย ดินเสื่อม มลพิษทางเสียง ขยะ เป็นต้น ขยะเป็นอีกปัญหาหนึ่งที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขยะที่เป็นของเสียอันตรายที่มีสารพิษและโลหะหนัก จะทำให้เกิดปัญหาในการกำจัดทิ้งในรูปแบบของเทคโนโลยี การขนย้าย การรวบรวมและการหาพื้นที่กำจัด หากไม่มีการจัดการและควบคุมที่ดีแล้ว สารพิษเหล่านี้ก็อาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

ถ้าขยะที่มาจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาลจัดเป็นของเสียอันตรายอย่างหนึ่ง ซึ่งแนวโน้มของปริมาณขยะจากโรงพยาบาลมีมากขึ้นเรื่อยๆตามการเพิ่มขึ้นของประชากรผู้ป่วย กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดและจัดเก็บขยะโรงพยาบาล ทำโดยการเผาโดยใช้อุณหภูมิสูงที่ 700-1100 องศาเซลเซียส และหลังการเผาจะเกิดเถ้าขึ้น จำเป็นที่ต้องกำจัดต่อไปด้วยกระบวนการใช้ลมที่ลุ่ม ปรับระดับพื้นดิน หรือฝังในหลุมฝังกลบ เป็นต้น อย่างไรก็ตามเถ้าจากการเผาขยะอันตรายจัดว่าเป็นของเสียอันตรายอีกประเภทหนึ่งซึ่งจำเป็นต้องได้รับการกำจัดอย่างถูกวิธี เนื่องจาก ในเถ้านี้มีโลหะหนักปะปนอยู่ หากนำไปฝังกลบ โดยไม่มีการทำลายฤทธิ์ของสารพิษ หรือ ทำให้เกิดเสถียรภาพอาจมีการชะละลายของสารพิษ และ โลหะหนัก จนในที่สุด อาจไปปนเปื้อนกับน้ำใต้ดิน เกิดปัญหาต่อสุขภาพอนามัยของชุมชนที่บริเวณ และอุปโภคน้ำ หรือ สารพิษต่างๆอาจไหลซึมลงสู่แหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียง ทำให้เกิดมลพิษทางน้ำ และผลกระทบต่อระบบนิเวศตามมา ซึ่งในที่นี้ ได้ใช้วิธีการบำบัดกับเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาลด้วยวิธีการทำลายฤทธิ์โลหะหนักให้เบื้องต้น ด้วยซีเมนต์ (Cement Based Stabilization/Solidification) ซึ่งเป็นวิธีที่คงทน ต่อ สภาพการเปลี่ยนแปลง และเป็นวิธีที่ใช้กำจัดของเสียที่เป็นโลหะหนักได้ดี รวมทั้งเป็นวิธีการที่ได้การยอมรับอย่างแพร่หลาย (Fitch and Cheeseman, 2003)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการนี้เป็นการศึกษาการทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement Based Method) โดยใช้เถ้าที่เหลือจากการเผาขยะจากโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น โดยทำการตรวจวัดปริมาณโลหะหนักจากเถ้า และนำไปทำให้เป็นก้อนคอนกรีต โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนของเถ้าที่ผสมในซีเมนต์ เพื่อให้ได้ก้อนคอนกรีตที่สามารถทนกำลังแรงอัดได้ดีที่สุดและการถูกชะละลายโลหะหนักซึ่ง ได้แก่ สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) น้อยที่สุด ตามหลักเกณฑ์การจัดทิ้ง หรือการฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาองค์ประกอบ และปริมาณโลหะหนักในเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล
2. เพื่อศึกษาถึงการยับยั้ง และทำลายฤทธิ์ของโลหะหนักจากเถ้าขยะ โรงพยาบาลโดยวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement Based Stabilization/Solidification)
3. เพื่อศึกษาถึงการรับกำลังแรงอัด และการชะละลายของก้อนคอนกรีตที่ได้จากการทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการทดลองโดยใช้เถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล โดยได้รับตัวอย่างเถ้าขยะจากโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น
2. ทำการแปรค่าอัตราส่วนของเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาลต่อซีเมนต์ในส่วนผสมของก้อนคอนกรีต เป็น 0: 100, 5: 95, 10: 90, 20: 80, 33: 67 และ 50: 50 ตามลำดับ
3. ทำการทดลองการรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด
4. หาโลหะหนักที่ปนเปื้อนคือ สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง ในเถ้า และวิเคราะห์น้ำชะละลายโดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS)
5. วิธีการทำให้เป็นก้อนคอนกรีตใช้ตามมาตรฐานของ ASTM C 1096-86 และวิธีการชะละลายตามหลักเกณฑ์การจัดทิ้ง หรือการฝังกลบสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.ทราบถึงองค์ประกอบของเก้าอี้จากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล รวมทั้งปริมาณ โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในเก้าอี้ดังกล่าว
- 2.สามารถเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดสารอันตรายจากเก้าอี้ขยะ โรงพยาบาลโดยทั่วไป
- 3.สามารถพัฒนาแนวทางการนำผลิตภัณฑ์ก่อนคอนกรีตไปใช้ประโยชน์ในอนาคตได้ เช่นปูทางเดิน เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ของเสียอันตราย

ของเสียที่เป็นอันตราย (Hazardous Waste) ตามคำจำกัดความของกรมควบคุมมลพิษ หมายถึง ของเสียหรือสิ่งเจือปนด้วยของเสียที่มีความเข้มข้น หรือคุณสมบัติทางด้านกายภาพเคมี หรืออื่นๆที่อาจเป็นสาเหตุของการตายหรือการเจ็บป่วย ทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มจะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด ขนส่ง และการกำจัด (เกรียงศักดิ์, 2546)

แหล่งกำเนิดของเสียอันตรายที่สำคัญมีดังนี้

1. ของเสียอันตรายจากภาคอุตสาหกรรม ได้แก่ สารเคมี วัสดุเคมี เศษผลิตภัณฑ์
2. ของเสียอันตรายจากสถานพยาบาล ได้แก่ มูลฝอยติดเชื้อ เศษชิ้นส่วนอวัยวะต่างๆ เศษเนื้อเยื่อ สารเคมีมันตรังสี ซากสัตว์ที่ทดลอง และสิ่งขับถ่าย หรือของเหลวจากร่างกายผู้ป่วย
3. ของเสียอันตรายจากบ้านเรือนเมื่อหมดอายุการใช้งานแล้ว ได้แก่ ถ่านไฟฉาย แบตเตอรี่รถยนต์ น้ำยาทำความสะอาด เครื่องสุขภัณฑ์ หลอดฟลูออโรเรสเซนส์ สารเคมีกำจัดแมลง
4. ของเสียอันตรายจากภาคเกษตรกรรม ได้แก่ ภาชนะบรรจุหรือสารเคมีประเภทสารเคมีกำจัดศัตรูพืช

#### 2.1.1 ประเภทของเสียอันตราย

ภาคผนวกที่ 1 หมวดที่ 2 ในบัญชีลักษณะ และคุณสมบัติของสิ่งปฏิบัติ หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้แบ่งประเภทของเสียอันตรายตามแหล่งกำเนิด ดังนี้คือ

- 1) ของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดไม่จำเพาะประเภทหรือไม่จำเพาะชนิด (Non-specific sources) ที่มีลักษณะและคุณสมบัติ เช่น
  - ตัวทำลายที่มีธาตุฮาโลเจนเป็นองค์ประกอบที่ใช้งานแล้ว เช่น เตตระคลอโรเอธิลีน เมธิลคลอไรด์ คาร์บอนเตตระคลอไรด์ เป็นต้น
  - สารละลายที่ใช้งานแล้วจากถังชุบไซยาไนด์ ในการชุบโลหะต่างๆ

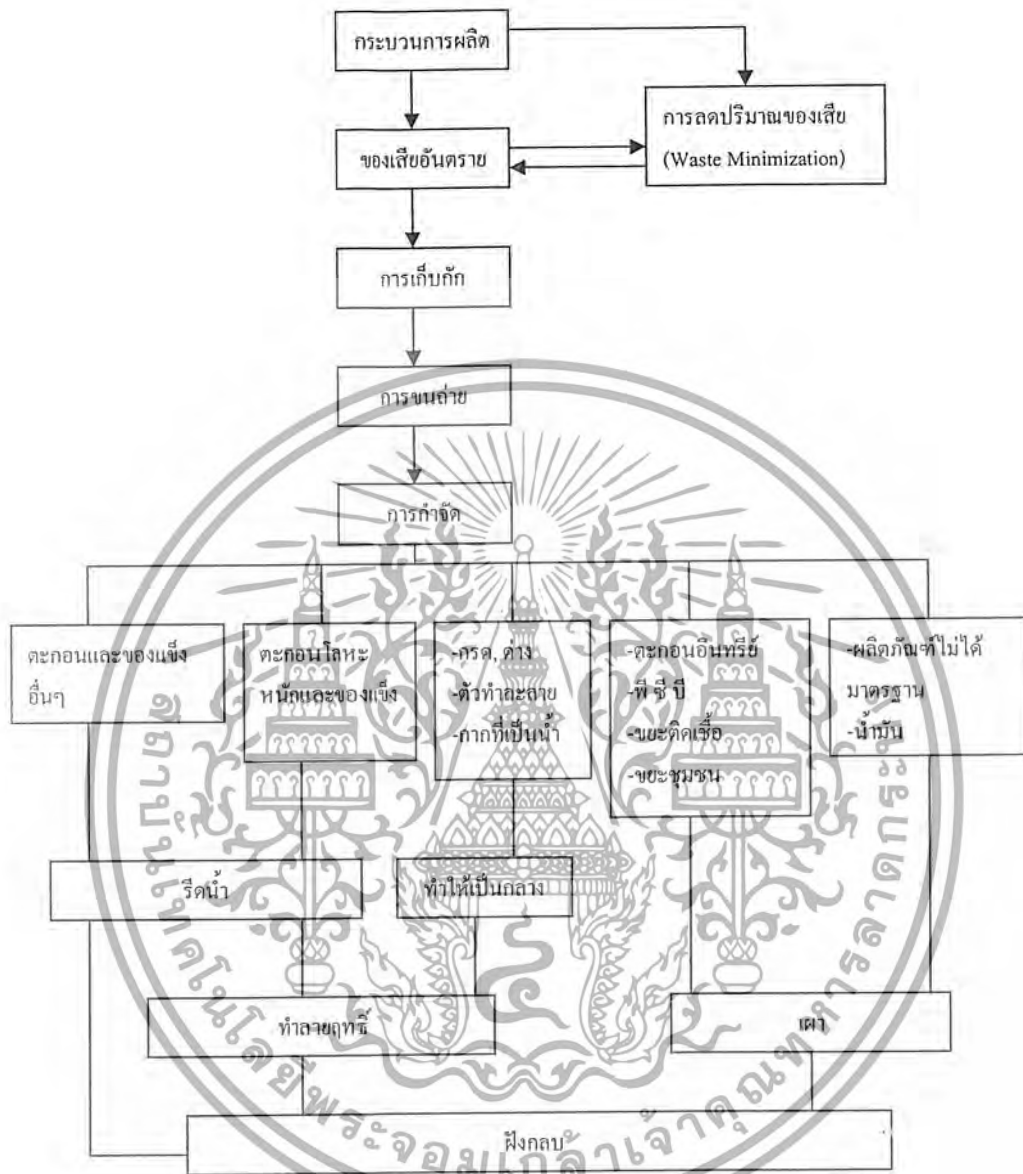
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียจากการเคลือบอลูมิเนียม ยกเว้นจาก zirconium phosphating ในกระบวนการ aluminium can wash
- น้ำเสีย และเศษวัสดุจากกรรมวิธีในกระบวนการถนอมรักษาเนื้อไม้รวมทั้งสาร preservative drip page และสารผสม ที่ใช้งานแล้วที่เกิดในโรงงานที่มีการใช้สารคลอโรฟีนอลิก อยู่ ยกเว้น น้ำเสียที่ไม่ได้รับการสัมผัสสารปนเปื้อนต่างๆจากกระบวนการ
  - เศษวัสดุที่เหลือจากการเผา หรือจากการบำบัดด้วยความร้อนของดินที่ถูกลบปนเปื้อน ด้วยสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว
  - การตะกอนชั้นปฐมภูมิของการกลั่นปิโตรเลียมที่ได้จากการแยกน้ำมัน น้ำ ของแข็ง ทั้งนี้ รวมถึงการตะกอนน้ำมัน น้ำ หรือน้ำแข็งใดๆที่ได้จากการแยกตะกอนโดยแรงโน้มถ่วงใน ระหว่างการเก็บ หรือการบำบัดน้ำเสียจากการหล่อเย็นด้วยน้ำมัน
- 2) ของเสียอันตรายจากแหล่งกำเนิดจำเพาะประเภท หรือจำเพาะชนิดที่มีลักษณะและ คุณสมบัติ เช่น
  - อุตสาหกรรมรักษาเนื้อไม้ ได้แก่ การตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการรักษา เนื้อไม้ด้วยคลอรีน โซดา หรือเพนตาคลอโรฟีนอล
  - อุตสาหกรรมการผลิตสารอินทรีย์เคมีต่างๆ เช่น ตะกอนจากการทำน้ำเกลือให้บริสุทธิ์ การของเสียพวกคลอรีเนตเต็ด ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น
  - อุตสาหกรรมการผลิตสารที่ใช้ในการป้องกัน กำจัด ทำลาย ควบคุมศัตรูพืชหรือสัตว์ เช่น การตะกอนน้ำเสียในการผลิตคลอรีน เป็นต้น
  - อุตสาหกรรมการผลิตทองแดงปฐมภูมิ ได้แก่ การตะกอนและเลน จากกระบวนการทำให้ตะกอนเข้มข้น ใน acid plant
  - อุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น เศษผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ปนเปื้อนด้วยตัวทำละลายต่างๆ สารเร่งปฏิกิริยา และสารตัวกลางที่เหลือใช้หรือใช้งานแล้วทุกชนิด

### 2.1.2 การจัดการของเสียอันตราย

ปัญหาในการจัดการของเสียอันตรายในปัจจุบัน มีสาเหตุมาจากการที่มักไม่มีการแยกของเสียอันตรายออกจากของเสียส่วนอื่น และมีการจัดการกันเองภายในโรงงาน โดยไม่มีการควบคุมในเรื่องความปลอดภัย เช่นในวิธีกองไว้ (Open dumping) หรือเผาในที่แจ้ง (Open burning) ซึ่งทำให้ของเสียอันตรายสามารถแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย การจัดการของเสียอันตรายสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.1 การลดปริมาณของเสีย โดยเฉพาะของเสียอันตรายนั้นจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่ออนุรักษ์สภาพแวดล้อมและป้องกันอันตรายต่อมนุษย์ และสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 การจัดการของเสียอันตราย (ยงยุทธ และคณะ, 2544)

## 2.2 การจัดการขยะมูลฝอยจากโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น

จากรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ.2544 โดยกรมควบคุมมลพิษ พบว่าปริมาณมูลฝอยติดเชื้อในปี 2544 ซึ่งเกิดจากสถานพยาบาล ทั้งของรัฐและเอกชนกว่า 24,000 แห่งมีประมาณ 15,300 ตัน มีการจัดการดังต่อไปนี้

กรุงเทพมหานครได้ว่าจ้างให้บริษัทเอกชน ดำเนินการเก็บขนและทำลายมูลฝอยติดเชื้อ แทนการให้บริการเก็บขน และกำจัดมูลฝอยติดเชื้อในโรงพยาบาล ศูนย์บริการสาธารณสุข และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานพยาบาลในเขตกรุงเทพมหานคร โดยสามารถบริการเก็บรวบรวมมูลฝอยติดเชื้อได้ประมาณ 12 ตัน/วัน ซึ่งทั้งหมดนำไปเผาทำลายยังโรงงานกำจัดมูลฝอยอ่อนนุช

ส่วนการจัดการมูลฝอยติดเชื้อในส่วนภูมิภาค สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข รายงานว่า มูลฝอยติดเชื้อที่เกิดจากสถานพยาบาลในสังกัดกระทรวงสาธารณสุข ซึ่งมีประมาณ 750 แห่ง มีสถานพยาบาล ร้อยละ 87 ที่มีเตาเผามูลฝอยติดเชื้อของตนเอง โดยโรงพยาบาลศูนย์ฯ และโรงพยาบาลทั่วไป มีเตาเผามูลฝอยติดเชื้อครบทุกแห่ง แต่โรงพยาบาลชุมชนบางส่วนที่ยังไม่มีเตาเผา ในส่วนของโรงพยาบาลเอกชนมีเพียงบางแห่งที่มีเตาเผามูลฝอยเป็นของตนเอง สถานพยาบาลขนาดเล็กต่างๆที่ไม่มีเตาเผา ใช้วิธีทำลายเชื้อโรคเบื้องต้น แล้วส่งให้ราชการส่วนท้องถิ่นรับไปกำจัดร่วมกับมูลฝอยชุมชน (กรมควบคุมมลพิษ, 2544)

### 2.2.1 ประเภทขยะในโรงพยาบาลศรีนครินทร์

จากข้อมูลการจัดการขยะมูลฝอยในโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น พบว่า ปริมาณมูลฝอยรวมทั้งสิ้น 1.5 ตัน/วัน โดยแบ่งประเภทขยะในโรงพยาบาลศรีนครินทร์ เป็น 3 ประเภท ดังนี้ (คณะกรรมการบริหารความเสี่ยงทางกายภาพและสิ่งแวดล้อมโรงพยาบาลศรีนครินทร์, 2545)

- 1) ขยะมูลฝอยติดเชื้อ หมายถึงขยะมูลฝอยที่เป็นผลจากกระบวนการให้การรักษาพยาบาล การตรวจวินิจฉัย การให้ภูมิคุ้มกันโรค และการศึกษาวิจัยที่จัดทำขึ้นทั้งในมนุษย์และสัตว์ เช่น ก้อนขี้ปิดแผล ผ้าพันแผล เศษชิ้นเนื้อ, อวัยวะของมนุษย์และสัตว์ที่ตกลง ชิ้นส่วนวัสดุทางการแพทย์ที่ปนเปื้อนเชื้อโรค หลอดบรรจุเลือดที่ส่งตรวจทางห้องปฏิบัติการ ถุงมือที่สัมผัสเลือดและน้ำเหลือง เป็นต้น
- 2) ขยะมูลฝอยไม่ติดเชื้อ หมายถึง เศษวัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ภายในสำนักงาน คราวเรือน เช่น เศษกระดาษ กระดาษชำระ วัสดุสำนักงาน ถุงพลาสติก กล่องโฟมบรรจุอาหาร ซองบรรจุวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น
- 3) ขยะมูลฝอยพิเศษ หมายถึงขยะที่มีความยุ่งยากในการเก็บ และต้องกำจัดด้วยวิธีที่แตกต่างจากขยะประเภทที่ 1 และ 2 ได้แก่

3.1) ขยะมูลฝอยมีคม ที่อยู่ในกระบวนการดูแลรักษา วินิจฉัย และการปฏิบัติการทางห้องปฏิบัติการ เช่น เข็มฉีดยา เข็มแทงเส้นเลือดดำเพื่อให้น้ำเกลือ หลอดยา หลอดแก้วแตก เข็มเจาะเลือดที่ปลายนิ้ว เป็นต้น

3.2) ขยะมูลฝอยเคมีบำบัด หมายถึง ยาเคมีบำบัดและอุปกรณ์ที่สัมผัสยาเคมีบำบัดทุกชนิด เช่น

ขวดยาเคมีบำบัด ขวดวัคซีน ภาชนะบรรจุสารกัมมันตรังสี ขวดน้ำเกลือที่ผสมเคมีบำบัด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3) ขยะมูลฝอยถุงมือที่ใช้แล้ว หมายถึง ถุงมือที่ใช้ในกระบวนการตรวจรักษาผู้ป่วย ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก เช่น ถุงมือที่ใช้จับหรือสัมผัสเลือด สารคัดหลั่งของผู้ป่วย ถุงมือที่ใช้จับอุปกรณ์เครื่องใช้ที่ปนเปื้อนเชื้อโรค เป็นต้น

3.4) ขยะมูลฝอยสารพิษ หมายถึง วัสดุ อุปกรณ์ที่เหลือจากการใช้งาน และมีพิษต่อสุขภาพร่างกายของมนุษย์ รวมทั้งมีผลต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ถ่านไฟฉาย หรือแบตเตอรี่ที่หมดอายุ กระป๋องสเปรย์ กระป๋องยาฆ่าแมลงทุกชนิด หลอดนีออน เป็นต้น

3.5) ขยะมูลฝอยนำกลับมาใช้ได้ อีก ริไซเคิล หมายถึง วัสดุ อุปกรณ์ หรือกระดาษที่ใช้ภายในสำนักงาน หรืออาคารที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น กระดาษ ก่อกระดาษ พลาสติก ขวดนม ขวดเพท ขวดน้ำ ขวดน้ำแก๊ส

3.6) ขยะมูลฝอยรกร หมายถึง รกจากวงจรคลอด หรือการทิ้งบุตร

วิธีการกำจัดขยะมูลฝอยของโรงพยาบาลศรีนครินทร์มีดังนี้

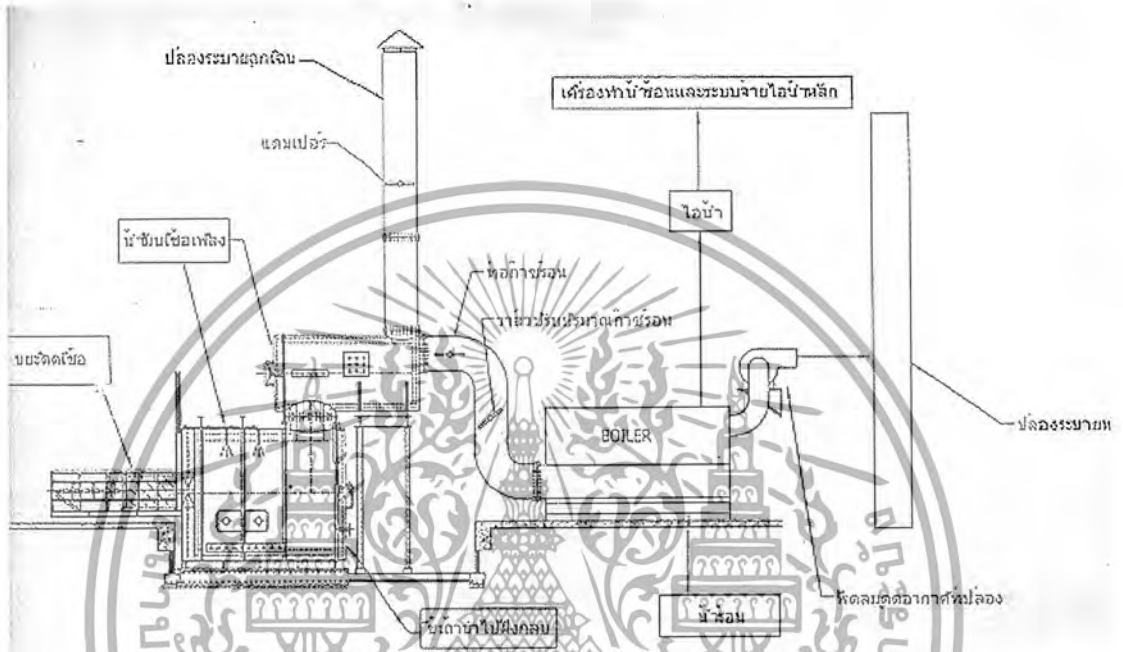
- การนั่งด้วยไอน้ำ ให้กับอาหารเลี้ยงเชื้อโรคแล้วนำไปใส่ในถุงพลาสติกสีดำ
- การใช้สารเคมี ใช้กับขยะที่ไม่สามารถเผาได้ เช่น กระโถน ขวดแก้ว เป็นต้น
- การฝังกลบ ได้แก่ รก และสารพิษ
- ส่งเทศบาล ได้แก่ ขยะไม่ติดเชื้อ ขยะเคมีบำบัด และกัมมันตภาพรังสี ที่หมดอายุจะทำการทุบหรือบดละเอียดก่อนส่งให้เทศบาลกำจัด
- การเผา ได้แก่ ขยะมูลฝอยติดเชื้อทุกชนิด ขยะมูลฝอยถุงมือที่ใช้แล้วทิ้ง และขยะของมีคม

## 2.2.2 เตาเผาขยะของโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น

เตาเผามูลฝอยติดเชื้อของโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น มีความสามารถในการเผาขยะติดเชื้อได้ 250 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เป็นเตาเผาที่มีหลักการทำงานแบบควบคุมอากาศ (Controlled-Air Incinerator) มีระบบการป้อนมูลฝอยอัตโนมัติ เตาเผาแบ่งออกเป็นสองห้องเผาใหม่ คือ ห้องเผาไหม้แรก ซึ่งเป็นที่รองรับมูลฝอยที่จะทำการเผาไหม้ โดยมีหัวเผาห้องเผาไหม้แรกช่วยให้มูลฝอยลุกติดไฟ อุณหภูมิในห้องเผาไหม้แรกควบคุมให้อยู่ระหว่าง 700-800 องศาเซลเซียส ซึ่งเพียงพอต่อการแตกตัวทางความร้อนของมูลฝอย (Thermal Cracking) ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้จะไหลเข้าไปเผาไหม้อีกครั้งในห้องเผาไหม้ที่สอง โดยมีหัวเผาที่สองช่วยควบคุมอุณหภูมิ อากาศที่จ่ายเข้าห้องเผาที่สองจะแยกเป็นอิสระจากห้องเผาไหม้แรก ทำให้สามารถถ่ายเทอากาศเพื่อให้เกิดการเผาไหม้แบบ Excess air ได้ อุณหภูมิในห้องเผาที่สอง สามารถควบคุมให้อยู่ระหว่าง 900 –1000 องศาเซลเซียส เถ้าที่เหลือค้างจากการเผาไหม้ครั้งที่ผ่านมาจะถูกถ่ายออกจากเตาเผา โดยเปิดประตู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่ายซีเด้้าทางด้านหลังเตาเผา เมื่อปล่อยให้เตาเผาเย็นลงอย่างน้อย 8 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.2 แสดงภาพตัดขวางของเตาเผามูลฝอยติดเชื้อที่ใช้ในโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น (พอลลูชั่นแคร์, ม.ป.ป.)



รูปที่ 2.2 เตาเผามูลฝอยติดเชื้อของโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 กล้วย

### 2.3.1 คุณสมบัติพื้นฐานทางกายภาพของกล้วย

คุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของกล้วยจะแสดงด้วยพฤติกรรมของคอนกรีตที่มีกล้วยเป็นส่วนผสม แต่คุณสมบัติของกล้วยอาจเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการเผาไหม้ เช่น มีการเผาไหม้เนื้อกล้วยกับการเผาถ่านหิน มีการเติมวัสดุบางประเภทเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ และลดการกักคาร์บอน ดังนั้นคุณสมบัติต่างๆของกล้วย จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องมีการทดสอบเพื่อนำไปใช้งาน ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อกำหนดทางกายภาพของกล้วยตามมาตรฐาน ASTM C618-97 (เปรมชัย, 2542)

ข้อกำหนดด้านกายภาพ	กล้วย
ความละเอียด ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 หลังจากร่อนแบบเปียก, max%	34
หาดัชนีกำลัง โดยผสมกับปอร์คลเลนดัจจ์เมนต์	
7 วัน, min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75
28 วัน, min % เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	75
ความต้องการน้ำ, min% เมื่อเทียบกับตัวควบคุม	105
ความอยู่ตัว การขยายหรือหดตัว โดยวิธี Autoclave, max%	0.8
การกำหนดคุณสมบัติผสม	
ความหนาแน่น, max จากค่าเฉลี่ย%	5
ส่วนที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 325, max จากค่าเฉลี่ย	5
Drying Shrinkage ของแท่งมอร์ต้าที่ 28 วัน max% ที่แตกต่างจากตัวควบคุม	0.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 รูปร่างของเถ้าลอย

เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม บางครั้งอาจพบเป็นรูพรุนซึ่งมีน้ำหนักเบา ลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งแตกต่างจากซีเมนต์ที่มีลักษณะเป็นแท่ง หรือ สี่เหลี่ยม ทั้งนี้รูปร่างจะเป็นแบบใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่เผา ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนี้



รูปที่ 2.3 ภาพขยาย SEM ของอนุภาคเถ้าลอยที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน (สำนักงานวิจัย และพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2545)

จากจุดเด่นทางด้านรูปร่างของเถ้าลอยที่เป็นทรงกลม หลังจากทดแทนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตแล้วจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของคอนกรีต ทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นทึบ หรือในการเทคอนกรีตในที่แคบๆ ที่ต้องการให้ไหลลื่นได้ ซึ่งคอนกรีตบางชนิดจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติเหล่านี้ แต่ถ้ามีรูปร่างไม่แน่นอน หรือมีรูพรุนอาจมีผลต่อปริมาณน้ำที่ใช้มีผลให้กำลังอัดของส่วนผสมที่ได้ต่ำลง

### 2.3.3 ความละเอียดของเถ้าลอย

ขนาดหรือพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าลอยจะบ่งบอกถึงความสามารถในการทำปฏิกิริยาPozzolanic ซึ่งจะใช้การทดสอบความละเอียดของเถ้าลอย ตามมาตรฐาน ASTM C430 โดยกำหนดปริมาณของเถ้าลอยที่ล้างบนตะแกรงเบอร์ 325 โดยวิธีร่อนแบบเปียก เนื่องจากเถ้าลอยที่มีอนุภาคหยาบจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยทำปฏิกิริยาได้ช้ากว่าอนุภาคที่ละเอียดกว่า นั่นคือส่วนที่ผ่านตะแกรงแล้วจะทำปฏิกิริยาได้มีประสิทธิภาพกว่า

### 2.3.4 คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีของเถ้าลอย

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ โดยใช้เทคนิค X-ray fluorescence spectroscopy พบว่าประกอบด้วยองค์ประกอบของแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อะลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) เหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) เป็นต้น ส่วนประกอบทางเคมีเหล่านี้จะมีค่าต่างกันในเชิงปริมาณตามแหล่ง หรือชนิดของถ่านหินที่มาของเถ้าลอย กระบวนการเผา อุณหภูมิที่ใช้เผา สำหรับข้อกำหนดทางด้านเคมีใช้ผลรวมของปริมาณออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าในเถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบที่สามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างเพียงพอ นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์ กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวอีกด้วย สำหรับร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ กำหนดไม่เกินร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องมาจากปริมาณซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในเถ้าลอยมีผลกระทบ ต่อการพัฒนาความสามารถในการรับกำลังอัด และเวลาในการก่อตัวได้ และยังมีผลเสียต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย (สำนักงานวิจัย และพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2545)

### 2.3.5 ปฏิกิริยาทางเคมีของเถ้าลอย

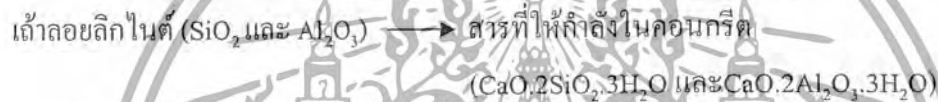
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมอยู่จะมีปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ กับ น้ำ ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ( $3\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) หลังจากนั้นสารปอซโซลาน (ในที่นี้คือเถ้าลอย) ซึ่งมีส่วนผสมของซิลิกาออกไซด์ และ อะลูมินาออกไซด์หลงในส่วนผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เกิดปฏิกิริยา Pozzolanic ได้สารไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) และ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ จะได้ผลิตภัณฑ์เช่นเดียวกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ แต่ปฏิกิริยาไฮเดรชันในคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมที่เกิดขึ้น จะช้ากว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ด้วยเหตุนี้ ในงานที่เป็นคอนกรีตหยาบ เมื่อใส่เถ้าลอยลงไปปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆก็จะทำให้คอนกรีตสามารถระบายความร้อนได้ทัน

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงในรูปสมการเคมีได้ดังนี้

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ



ปฏิกิริยาระหว่าง  $\text{Ca (OH)}_2$  กับเถ้าลอยลิกไนต์ (Pozzolanic reaction)



อย่างไรก็ตามกลไกในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะซับซ้อนกว่าที่นำเสนอ ซิลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยตรง

### 2.3.6 ประโยชน์ของการเลือกใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต

การนำเถ้าลอยมาผสมกับปูนซีเมนต์ มวลรวม (หิน, ทราย) และน้ำช่วยทำให้พฤติกรรมของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงในทางที่ดีขึ้น ทั้งในระยะเริ่มต้น และในระยะยาว โดยสรุปคือ

- 1) เพิ่มความสามารรถในช่วงการใช้งาน การบ่ม และการถอดแบบ เนื่องจากเถ้าลอยมีอนุภาคเป็นทรงกลม และมีขนาดเล็ก จึงทำให้คอนกรีตสดมีการสิ้นเปลืองไฮดรอกไซด์ไหลเข้าไปในที่แคบๆหรือที่ๆ มีเหล็กเสริมหนาแน่นมาก
- 2) เพิ่มแรงยึดเกาะในคอนกรีต ทั้งนี้เพราะอนุภาคของเถ้าลอยที่กลมสามารถแทรกเข้าไปตามช่องว่างของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตอัดตัวแน่น ความต้องการน้ำน้อยลง
- 3) ความร้อนของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลดลง ลดการแตกร้าวของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำคายความร้อนออกมา เมื่อมีการลดปูนซีเมนต์ลง ปริมาณความร้อนที่คายออกมาก็ลดลงด้วย สำหรับในปฏิกิริยาปอซโซลานที่เถ้าลอยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะค่อยๆเกิดขึ้น ปริมาณการคายความร้อนเกิดขึ้นช้าๆการสะสมจึงน้อยลง เมื่อเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ล้วนๆ ซึ่งเป็นข้อดีอย่างมากสำหรับการนำไปใช้กับงานคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) กำลังอัดของคอนกรีตในระยะยาวของคอนกรีตจะสูงกว่าคอนกรีตทั่วไป อันเป็นผลมาจากกลไกของการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้นช่วงหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะให้สารที่ให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาว

5) เพิ่มความคงทนต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เช่น เพิ่มความต้านทานซัลเฟต การแทรกซึมคลอไรด์ ทนสารเคมี ทนกรด – ด่าง ต่างๆ ทั้งนี้จากการที่คอนกรีตมีแรงยึดเกาะเพิ่มขึ้นทำให้การแทรกซึมของสภาพแวดล้อมต่างๆ เหล่านี้เข้าไปในเนื้อคอนกรีตยากขึ้น

6) อายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น จากปัจจัยต่างๆข้างต้น ส่งผลให้อายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น

ส่วนประโยชน์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ก็ก็จะสามารถประหยัดปูนซีเมนต์ในการผสมทำคอนกรีตลงได้มาก โดยใช้วัสดุที่เหลือแทนซึ่งเป็นวัสดุที่ไร้ประโยชน์ และเป็นภาระในการกำจัดทิ้งเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายที่จะต้องซื้อปูนซีเมนต์แล้ว ถือว่าเป็นการประหยัดค่าวัสดุลงได้อย่างมหาศาล โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับงานที่ต้องใช้ปริมาณคอนกรีตเป็นจำนวนมาก

## 2.4 โลหะหนัก

ในการศึกษานี้ จะศึกษาถึงโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงโลหะหนักดังกล่าวไว้ข้างต้นเท่านั้น

### 2.4.1 สังกะสี (Zn)

สังกะสี เป็นโลหะสีขาวปนฟ้าอ่อน ไม่มีกลิ่น เมื่อได้รับความร้อนจะกลายเป็นฟุ้ง มีน้ำหนักโมเลกุล 65.38 มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลว เท่ากับ 907 และ 419.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีความถ่วงจำเพาะ 7.14 ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในกรดและด่าง

สังกะสี สามารถพบได้จากหลายๆแหล่งด้วยกัน เช่น อุตสาหกรรมผลิต เหล็กและเหล็กกล้า การผลิตดีเซล อัลลอยด์ การหล่อ และชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การผลิตถ่านไฟฉาย เป็นต้น สังกะสีสามารถเข้าไปสู่วงกายได้ทางการหายใจ การสัมผัสและการกิน ส่วนอันตรายที่เป็นอาการเฉียบพลัน เช่น ถ้าสัมผัสทางผิวหนังอาจทำให้เกิดการระคายเคืองผิวหนังหรือผิวหนังแห้งได้ ถ้าได้รับทางการหายใจ คือ สัมผัสกับฝุ่นสังกะสีมากๆจะมีอาการไอและมีเสมหะ อาจมีอาการคล้ายไข้หวัด เช่น หงื่อออก หนาวสั่น ปวด

ศึรยะได้ ส่วนอันตรายเรื่อร้งถ้าสัมผัสเป็นระยะเวลานานๆมีรายงานว่าในสัตว์ทดลองถึงกะลีสามารถก่อนะเรื่อได้ แต่ยังไม่มีการศึษาวิจัยที่มากพอในมนุษย์

#### 2.4.2 ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่วเป็นโลหะที่มีสีขาวอ่อนๆ มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดที่ 327.4 และ 1,620 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 11.35

ตะกั่วสามารถพบได้ จากแหล่งที่มาหลายๆแหล่งด้วยกัน เช่น การทำเหมืองแร่ อุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งอาจพบได้ในอากาศ ดิน และฝุ่น หรืออาจปนเปื้อนในอาหาร และภาชนะบรรจุต่างๆ ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ โดยทางปากผ่านอาหารเครื่องดื่ม ทางการหายใจ โดยการสูดดมไอตะกั่วเข้าไปในขณะที่ทำงาน รวมทั้งทางผิวหนังได้ อาการพิษของตะกั่ว ถ้าเป็นแบบเฉียบพลัน จะมีอาการปวดท้องอย่างรุนแรง อุจจาระมีสีแดง เป็นอันตรายต่อไต สำหรับคนทั่วไปพิษตะกั่วจะเป็นแบบสะสม ซึ่งตะกั่วสามารถไปยับยั้งการเกิดฮีโมโกลบินของร่างกายได้ ซึ่งจะมีอาการต่างๆ เช่น เบื่ออาหาร อาเจียน ปวดตามมือเท้า อารมณ์เฉื่อยเฉียว เกิดโรคโลหิตจาง เป็นต้น

#### 2.4.3 ทองแดง (Cu)

ทองแดงมีลักษณะเป็นก้อน โลหะสีแดง ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุล 63.55 มีจุดเดือด และจุดหลอมเหลว เป็น 2,595 และ 1,083 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 8.92 (เมื่อเทียบกับน้ำ, น้ำ = 1)

ทองแดงสามารถพบได้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการทำอัลลอยด์ชนิดบรอนซ์ และทองเหลือง ทำตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ ทำกระสุนปืน ทำการเตรียมเกลือทองแดง อุตสาหกรรมผลิตสารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น ทองแดงสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางการหายใจ และทางการกิน โดยอาการที่เป็นอันตรายเฉียบพลัน เช่น ถ้าสัมผัสผิวหนังจะทำให้ระคายเคือง ถ้าได้รับทางการหายใจ จะทำให้เกิดไข้โลหะ ซึ่งจะมีอาการมีรสขมโลหะในปาก เป็นไข้หนาวสั่น ไอ เจ็บหน้าอก ส่วนอันตรายเรื่อร้งอาจทำให้ระคายเคืองจมูก และทำให้จมูกเป็นแผลได้ ทำให้เป็นโรคมุมิแพ้ที่ผิวหนังโดยจะมีอาการผื่นแดงและคัน ถ้าได้รับเป็นระยะเวลานาน และความเข้มข้นสูงมาก อาจทำลายตับได้

## 2.5 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ (Cement) หมายถึง วัสดุยึดเกาะที่สามารถเกิดพันธะกับชิ้นส่วนหรืออนุภาคของสารที่เป็นของแข็งในสัดส่วนที่เหมาะสม (Soroka, 1979) การให้คำจำกัดความนี้เป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางของวัสดุหลายชนิด แต่วัตถุประสงค์ในเชิงวิศวกรรมและการก่อสร้าง ต้องการปูนซีเมนต์ที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcareous Cement) หรือปูนขาวที่เป็นโครงสร้างหลัก ซึ่งโดยทั่วไปปูนซีเมนต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. ปูนซีเมนต์ที่ไม่สามารถก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำ หรือไม่เสถียรในน้ำเรียกว่า Non-Hydraulic Cement
2. ปูนซีเมนต์ที่สามารถก่อตัวหรือแข็งตัวในน้ำ และให้ผลิตภัณฑ์ของแข็งซึ่งเสถียรในน้ำ เรียกว่า Hydraulic Cement

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ดังนั้นปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) คือ วัสดุซีเมนต์ซึ่งได้มาจากการผสมให้เข้ากันของสารที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต หรือวัสดุปูนขาวทนทานอื่นๆ พร้อมทั้งสารที่ประกอบด้วยสารดินเหนียว (Argillaceous) และวัสดุอื่นๆ เช่น ซิลิกา อลูมินา หรือเหล็กออกไซด์ เพื่อปรับปรุงสมบัติให้ เป็นไปตามต้องการ จากนั้นทำการเผาจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และรวมเป็นสารประกอบ ได้ปูนซีเมนต์เม็ด หรือปูนเม็ด (Clinker) แล้วจึงลดอุณหภูมิให้เหมาะสม (Clinkering Temperature) โดยการทิ้งไว้ให้เย็น (Clinker Cooler) ก่อนนำไปบดละเอียด (Grinding) ให้สามารถผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้หมด

### 2.5.1 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีด้วยกัน 4 ชนิด คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate) ไตรแคลเซียมอลูมินेट (Tricalcium Aluminate) และ ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tricalcium Aluminoferrite) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต, 2539)

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

นอกจากนี้ยังมีสารประกอบอื่นๆ คือ  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และ  $\text{Na}_2\text{O}$  ซึ่งปะปนอยู่ในปริมาณเล็กน้อยเมื่อเทียบกับน้ำหนักปูน โดยสารประกอบแต่ละชนิดจะแสดงพฤติกรรมของสมบัติแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของสารประกอบที่เกิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต, 2539)

สมบัติที่เกิด	พฤติกรรมสัมพันธ์ของสารประกอบ			
	$\text{C}_3\text{S}$	$\text{C}_2\text{S}$	$\text{C}_3\text{A}$	$\text{C}_4\text{AF}$
อัตราของปฏิกิริยา (Reaction)	ปานกลาง	ช้า	เร็ว	ช้า
ความร้อนต่อหน่วยของสารประกอบ	ปานกลาง	เล็กน้อย	มาก	เล็กน้อย
ค่าการยึดติด (Cementing) ต่อหน่วยสารประกอบ				
*ก่อน (Early)	ดี	ไม่ดี	ดี	ไม่ดี
*หลังสุด (Altimate)	ดี	ดี	ไม่ดี	ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ประเภท, 2538)

ตามมาตรฐานทั่วไป ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาสามารถแบ่งได้เป็น 5 ประเภทดังนี้  
 ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีการผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์คอนกรีตทั่วไป ที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ได้แก่ ปูนปอร์ตแลนด์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคเขียว เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับในงานคอนกรีตที่เกิดความร้อน และทนซัลเฟตได้ปานกลาง ซึ่งในปัจจุบันไม่มีการผลิตใช้ในประเทศไทย

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการทำงานคอนกรีตที่ต้องการจะใช้งานเร็วหรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ข้อควรระวัง คือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้นอาจก่อให้เกิดโครงสร้างนั้นแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ได้ถูกพัฒนาขึ้นใช้ครั้งแรกในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตหยาบ (Mass Concrete) เช่นการสร้างเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่น ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking) ในประเทศไทยไม่มีการผลิตปูนชนิดนี้ ปัจจุบันปูนประเภทนี้ถูกทดแทนโดยการใช้ปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverized Fuel Ash (PFA) และ Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนซัลเฟตได้สูง (Sulfate Resistance Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มี  $C_3A$  ต่ำ เพื่อจะป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต เหมาะสำหรับโครงสร้างที่มีการกระทำของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังอัดช้า และให้ความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดที่ 1 ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้างฟ้า และตราปลาฉลาม

### 2.5.3 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำ

การเติมน้ำในปูนซีเมนต์ผงจะทำให้เกิดซีเมนต์กับน้ำ เรียกว่าส่วนผสมในช่วงนี้ว่า ซีเมนต์ Paste ซึ่งในระยะเวลา 2-3 นาที หลังจากเติมน้ำจะเกิดผลึกคล้ายเข็มของแคลเซียมซิลิโคฟอสเฟตไฮดรอกไซด์ และปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เรียกการทำให้ซีเมนต์ Paste แข็งตัวนี้ว่ากรดตกตัว (Setting) และเมื่อทิ้งไว้ 2-3 ชั่วโมงจะเริ่มเกิดผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ขนาดใหญ่และแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-H-S) ขนาดเล็กโดยมีน้ำกระจายเข้าไปในโครงสร้างผลึกและรอบๆ เรียกว่า การยัด (Hardening) แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งกำลังรับแรงอัดของ paste จะขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการยัด



รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำและการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างในซีเมนต์ Paste (Means, 1995)

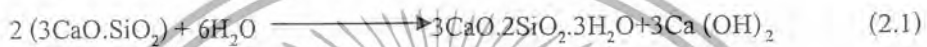
โดยจะเกิดปฏิกริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์และน้ำ เรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) ยังผลให้เกิด ความเหนียว และเกาะแน่นกับวัสดุผสม ความร้อนที่เกิดจากปฏิกริยาเรียกว่า Heat of Hydration วัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลอรีต่อกรัมของปูนซีเมนต์ ซึ่งบางส่วนจะหนีผ่านเนื้อคอนกรีตออกมา แต่บางส่วนจะอยู่ในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูงจะทำให้คอนกรีตเสียความแข็งแรงและเกิดหน่วยแรงต่างๆภายในเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว

ตัวอย่างของปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์ กับ น้ำที่เกิดขึ้นเป็นดังปฏิกิริยา(2.1) – (2.5)

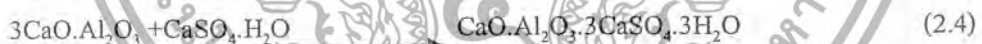
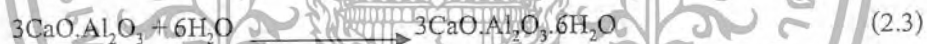
1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $C_3S$ )



2. ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $C_2S$ )



3. ไตรแคลเซียมอลูมินา ( $C_3A$ )



4. ไตรแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $C_4AF$ )



จากปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะก่อให้เกิดสภาพต่างในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีความสามารถในการทำให้ซีเมนต์เป็นกลาง โดยการตกตะกอนแคลเซียมซิลิเกตที่ไม่ละลาย

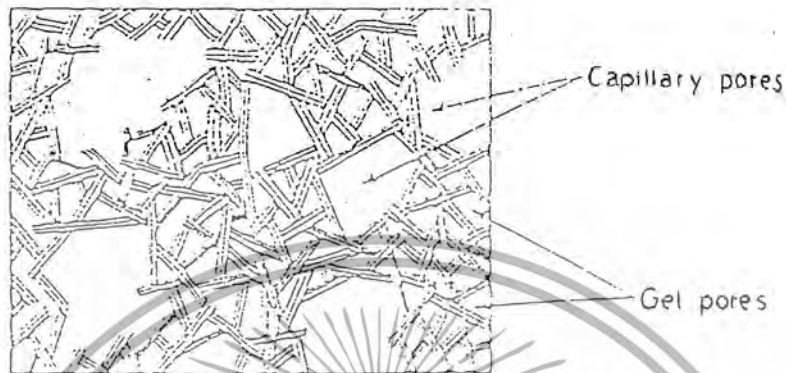
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปของแม่พิมพ์ซีเมนต์ เพื่อให้ความเข้มข้นของแคลเซียมมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชมากกว่า 11 ซึ่งซีเมนต์ Paste ที่มีความเป็นด่างสูงด้วยผิวซิลิกาและออกซีไฮดรอกไซด์ สามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อม สำหรับการตกตะกอนโลหะที่มีฤทธิ์เป็นกรด หรือด่าง และปฏิกิริยาการดูด(Adsorption)เชิงซ้อน พบว่าโลหะจะถูกดูดซับบนผิวซิลิกา และเหล็กออกซีไฮดรอกไซด์ โดยแคลเซียมซิลิเกตมีความสามารถในการดูดซับโลหะสูง แต่ซีเมนต์ Paste อาจไม่ก่อตัวเป็นสารประกอบเนื่องจากการไม่ละลายของปูนขาว และอลูมินาบางส่วน ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างช้าๆกับน้ำธรรมชาติโดยส่วนใหญ่ แต่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกับสารละลายกรด กลไกคล้ายกับการเปลี่ยนแปลงของแร่ที่มีความเข้มข้นของซิลิกาอยู่มากในสิ่งแวดล้อม ในวัสดุที่เป็นซีเมนต์อื่นๆ ก็เช่นเดียวกัน คือ เกิดปฏิกิริยาคายคลึงกันแต่จะมีความแตกต่างในส่วนประกอบทำให้ Stoichiometry ของผลิตภัณฑ์มีหลายชนิด

การทำปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำจะหยุดเมื่อน้ำเสียออกจากซีเมนต์ Paste หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มตัว จึงเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตที่สำคัญ เวลาที่ใช้เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำเป็นไปอย่างสมบูรณ์ขึ้นกับ ปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ชนิดของปูนซีเมนต์ ความละเอียดของปูนซีเมนต์ และอุณหภูมิโดยรอบ แต่ถ้าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำกว่า 0.5 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับทำให้ น้ำจากภายนอกด้วย

#### 2.5.4 ช่องว่างระหว่างซีเมนต์ Paste

ซีเมนต์ Paste ที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะประกอบด้วย น้ำ รูพรุนซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจน คือ รูพรุนเจล (Gel Pores) และรูพรุนขนาดเล็ก (Capillary Pores) แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยรูพรุนเกิดขึ้นในรูปของอนุภาคขนาดคอลลอยด์ มีลักษณะเป็นรูพรุนประมาณ 28 % ของปริมาณน้ำเริ่มต้น ส่วนปริมาตรของรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนเจลจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เริ่มต้น และระดับของปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และน้ำ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของซีเมนต์ Paste (Saroka, 1979)

## 2.6 การทำลายฤทธิ์และการทำให้เป็นก้อน (Stabilization/Solidification)

กระบวนการทำลายฤทธิ์ (Stabilization) และทำให้เป็นก้อน (Solidification) จะใช้ร่วมกันในการอธิบายถึงระบบที่ทำให้สารต่างๆ ถูกยึดไว้ และไม่สามารถแสดงคุณสมบัติทางเคมีออกมาได้โดยการทำให้เป็นก้อน คือกิจกรรมซึ่งทำให้สารที่กระจัดกระจาย หรือตะกอน หรือองค์ประกอบของสารเหล่านี้ถูกนำมารวมกันเพื่อทำให้เกิดเป็นมวลแข็งตัวขึ้น (Chandle and Barnes, 1981)

การทำลายฤทธิ์เป็นกระบวนการนำปัดของเสียอันตรายเพื่อกำจัดความเป็นพิษของของเสีย โดยทั่วไปของเสียอันตรายจะถูกยึดติดด้วยกระบวนการทางเคมี หรือทำให้ดูดติดทางกายภาพ โดยการผสมสารเคมีบางชนิดลงไป ส่วนกระบวนการทำให้เป็นก้อนถูกออกแบบมาเพื่อสร้างมวลของของแข็งเนื้อเดียวที่สามารถให้น้ำซึมผ่านได้เล็กน้อย และมีโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรงอันจะเป็นการปรับปรุงปรับปรุงคุณลักษณะของของเสียเกี่ยวกับการขนส่ง การเคลื่อนย้าย การลดพื้นที่ผิวของของเสีย และจำกัดการปนเปื้อนของสารที่ปล่อยออกมาจากของเสีย (Chandle and Barnes, 1981)

### 2.6.1 กระบวนการทำให้เป็นก้อนสำหรับการกำจัดของเสีย

กระบวนการทำให้เป็นก้อนที่ใช้สำหรับการกำจัดของเสียประกอบด้วย Cement Based Techniques, Lime Based Techniques (Pozzolanic), Thermoplastic Technique (Bitumen, Paraffin and Polyethylene), Organic Polymer, Surface Encapsulation, Self-Cementing Techniques และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Classification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics (Chandle and Barnes, 1981) ดังแสดงในตารางที่ 2.4

เทคนิคการทำให้เป็นก้อนแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ Porous Systems และ ระบบ Monolytic Systems ซึ่งแตกต่างกันที่ความสามารถทนทานต่อน้ำ โดยวิธีการ Cement Based Techniques และ Lime Based Techniques จัดเป็นระบบ Porous Systems จึงอาจมีการถูกละลายสารต่างๆออกมาได้ เนื่องจากวัสดุแข็งตัวที่ใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ คือ ฝุ่นซีเมนต์จากเตา ซิลิเกตที่สามารถละลายน้ำ แล้วย่อยจีไธหะจากเตาหลอม ปูนขาว Bituminous Asphalt และสารโพลีเมอร์ ส่วนระบบ Monolytic Systems จะสามารถป้องกันการซึมแพร่ของน้ำได้

กระบวนการทำให้เป็นก้อนของสารอันตราย สารพิษ และของเสียที่กำจัดยากมีข้อกำหนดดังนี้ (Chandle and Barnes, 1981)

1. สารพิษทั้งหมดในของเสีย ควรมี สมบัติไม่ละลายน้ำ ไม่เกิดปฏิกิริยา และสามารถถูกจับยึดไว้ในของเสียได้ดี
2. ของเสียควรจะมีมวลแข็งที่หนัก และแสงไม่สามารถผ่านได้ และมีพื้นที่ผิวที่สามารถสัมผัสกับน้ำได้น้อยที่สุด
3. มวลของแข็งควรมีคุณสมบัติดังนี้
  - มีความคงตัวตามลักษณะขนาด
  - มีความทนทานต่อน้ำหนักและแรงกดได้ดี
  - มีสมบัติของ การเปียก/แห้ง (Wet/Dry) และการแข็งตัว/การหลอมเหลว (Freeze/Thaw) ที่ดี
  - การซึมของน้ำน้อย
  - น้ำชะ (Leachate) และน้ำไหล (Runoff) ควรอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน
4. สถานที่ที่ใช้สำหรับการกำจัดสามารถใช้ประโยชน์ได้หลังจากทิ้งของเสียแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 กระบวนการกำจัดของเสียที่เป็นอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน (Flemings, 1974)

กระบวนการทำให้เป็นก้อน (Solidification)	รายละเอียดของกระบวนการ
1.Cement Based	ของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์ น้ำ และส่วนผสมอย่างอื่นๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
2.Pozzolanic (Lime Based)	ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย ผงซีเมนต์ที่เผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติที่แข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว
3.Thermoplastic	นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น bitumen, paraffin หรือ polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลง และแข็งตัว
4.Organic Polymer	ของเสียชั้นแรกจะถูกผสมกับโพลิเมอร์ (Gelling agent หรือ formaldehyde) และเติมสารกระตุ้นให้แข็งตัว ผสมให้เข้ากันก่อนสารโพลิเมอร์แข็งตัว
5.Surface Encapsulation	ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวกันแน่น แล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกอัดด้วยสารเคลือบ เช่น polyethylene หรือ Organic resin
6.Self-cementing	สารที่มีลักษณะเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลไฟด์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดแก๊ส SO <sub>2</sub> สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย
7.Glassification and Production of Synthetic Mineral or Ceramics	สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสารกัมมันตรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้วหรือ synthetic silicate mineral เพื่อป้องกันไม่ให้สารอันตรายนี้ถูกชะละลายด้วยน้ำสามารถนำไปกำจัดต่อไปไม่ต้องมีกระบวนการหุ้มหรือบรรจุครั้งที่ 2

การเลือกวิธีการบำบัดของเสียดังกล่าวควรเลือกให้เหมาะสมกับของเสียประเภทต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของของเสียและคุณสมบัติเฉพาะของของเสีย

สำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนทั้ง 7 วิธีมีข้อดีและข้อเสีย (Flemings, 1974) ดังสรุปไว้ในตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 ตารางเปรียบเทียบกระบวนการ และข้อดีข้อเสียของการกำจัดของเสีย โดยวิธีทำให้เป็นก้อน (Flemings, 1974)

ประเภทของกระบวนการ	กระบวนการ	ประเภทของเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1.Cement Based	Chemical fixation solidification	แห้งหรือเปื่อยก (โดยทั่วไปเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์)	* วัสดุที่ใช้มีราคาถูก * ทนทานต่อสภาพการเปลี่ยนแปลง	* ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ * ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวแล้วถูกชะล้างได้ในสภาพที่มีค่า pH ต่ำ
2.Pozzolanice (Lime Based)	Chemical fixation solidification	แห้งหรือเปื่อยก (โดยทั่วไปเหมาะสมกับของเสียที่เป็นสารอินทรีย์)	* วัสดุที่ใช้มีราคาถูก * การใช้ได้ลดยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิดโดยใช้กระบวนการเดียวกัน	* เหมือนกับกระบวนการประเภท Cement Based
3.Thermoplastic Based	Physical Fixation	แห้งหรือเปื่อยก (เหมาะสมกับสารอินทรีย์)	* สารละลายที่ชะล้างมีผลต่อสารเคมีน้อยมาก	* ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และต้องการแรงงานที่มีราคาแพง
4.Organic Polymer Process	Physical Fixation	แห้งหรือเปื่อยก (สารอินทรีย์ที่เป็นพิษ)	* ใช้ปริมาณน้อยในการทำให้เกิด Polymer's matrix * ผลึกผลึกที่ได้มีความหนาแน่นต่ำช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง	* ของเสียจะถูกยึดไว้ใน Polymer อย่างหลวมๆ * สารที่มีพิษต่ำจะทำให้โลหะละลายออกมามากขึ้น
5.Encapsulation	Chemical Containment	แห้งหรือเปื่อยก	* ผลึกผลึกที่ได้สามารถป้องกันน้ำได้ดี * ไม่มีการชะล้างของของเสียออกมา เมื่อสารที่หุ้มห่ออยู่ไม่ถูกทำลาย * ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่นๆ	* การชะล้างของเสียจะเกิดขึ้นเมื่อสารที่หุ้มถูกทำลาย * ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่ต้องกำจัดของเสียเป็นจำนวนมากๆ
6.Self-cementing	Chemical fixation	แห้งหรือเปื่อยก	* กระบวนการนี้ต้องการสารเติมในส่วนผสมซีเมนต์ซึ่งจะช่วยทำให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก	* ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์
7.Glassification (Vitrification)	Chemical fixation	แบบแห้ง	* ของที่หลอมด้วยแก้วจะถูกชะล้างได้น้อยมาก * การบรรจุหุ้มห่ออยู่ในเกณฑ์ดี	* อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียระเหยออกมา * ต้องเสียค่าใช้จ่ายมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 การทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์ (Cement -Based Technique)

กระบวนการทำให้เป็นก้อน โดยใช้ปูนซีเมนต์ ประกอบด้วย การผสมของเสี้ยนกับปูนซีเมนต์ และสารอื่นที่เติมลงไป ได้แก่ เถ้าลอย ซิลิกาเกต ซัลไฟด์ ฯลฯ โลหะหนักหลายชนิดในของเสี้ยนจะถูกเปลี่ยนเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ และโลหะซิลิเกตซึ่งไม่ละลายน้ำ ในสภาพแวดล้อม ซึ่งมีความเป็นกรด เป็นด่างสูงมากในปูนซีเมนต์ และจะถูกจับไว้ให้อยู่ภายในรูพรุนของส่วนผสมปูนซีเมนต์ (Bishop, 1988) สรุปข้อดีและข้อเสียได้ดังนี้

### ข้อดี

1. สารที่เติมในส่วนผสมมีเพียงพอสำหรับอัตราส่วนที่ใช้
2. เทคนิคการผสมปูนซีเมนต์ และการกำจัด ได้มีการพัฒนามาอย่างดีแล้ว
3. วิธีการนี้สามารถทนต่อสารเคมีหลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่แล้ว
5. ความแข็งแรงและความสามารถในการให้น้ำผ่านซึมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัวของ เสี้ยนปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสี้ยน
6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

### ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในกรณีกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะทำให้สูญเสียกลไกการแข็งตัวของ ซีเมนต์
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสี้ยนโดยการหล่อด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ของเสี้ยนไปกำจัดเพิ่มขึ้น

## 2.7 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ของซีเมนต์

### 2.7.1 กำลังอัดของคอนกรีต

สมบัติของคอนกรีตที่ยังอยู่ในสภาพของเหลวมีความสำคัญในขณะก่อสร้างเท่านั้น แต่สมบัติ ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีความสำคัญไปตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งในทางปฏิบัติสมบัติของ คอนกรีตทั้ง 2 ลักษณะจะมีผลต่อกันและกัน การที่จะให้ได้สมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วดีจะต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาจากการเลือกสัดส่วนผสมเพื่อให้คอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลว มีความเหมาะสมอย่างมากในการใช้งาน กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ (ธีระชาติ, 2543) คือ

### 1) กำลังมอร์ต้า

กำลังของมอร์ต้ามีบทบาทอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยขึ้นอยู่กับความพรุนภายในเนื้อมอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และ Degree of Hydration ซึ่งอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง

การเปลี่ยนแปลงสมบัติมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาณ กำลัง ลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแรงตึงผิว จะส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตไม่มากนัก

### 2) กำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังมอร์ต้าที่กำหนดให้ ความสามารถด้านแรงคอนกรีตจะขึ้นกับกำลังของหินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้า ซึ่งเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในหินขนาดใหญ่จะทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต้าลดลง เนื่องจากเกิดน้ำในหินมากขึ้น และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ หรือปานกลางขนาดของมวลรวมจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูงรวมทั้งการเพิ่มปริมาณของมวลรวมในส่วนผสมก็ทำให้กำลังเพิ่มขึ้นด้วย

### 3) แรงยึดเหนี่ยวของมอร์ต้ากับผิวของมวลรวม

แรงยึดเหนี่ยวขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และลักษณะทางเคมี คือ ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่างๆ นอกจากนี้ ทิศทางในการหล่อและทิศทางในการให้น้ำหนัก ก็มีผลต่อกำลังรับแรงอัดเช่นกัน เนื่องจากจะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมกับมอร์ต้าต่ำลง

### 2.7.2 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ วิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง วิธีการทำโดยให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการ คือ

1. ป้องกันการสูญเสียความชื้นจากเนื้อคอนกรีต
2. รักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

วัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

1. เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน
2. เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิที่เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้อยที่สุด

การบ่มอาจหมายถึง การควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีตด้วย ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก

### 2.7.3 การผันแปรของกำลังอัดคอนกรีต

การผันแปรของกำลังอัดคอนกรีตในโครงสร้างที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง หรืออาจเป็นการผสมกันของหลายๆสาเหตุได้แก่

1. ใช้สัดส่วนที่ไม่เหมาะสม
2. ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
3. ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดีพอ
4. การผสมไม่ดีพอ
5. มีสารอินทรีย์ต่างๆมากเกินไปเกินข้อกำหนด
6. ใช้หินทรายที่สกปรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
8. ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม
9. การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
10. การบ่มไม่เพียงพอ
11. การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
12. อุณหภูมิผันแปรไป

#### 2.7.4 ความเสียหายของคอนกรีต

คอนกรีตในโครงสร้างต่างๆอาจเกิดความเสียหาย หรือขาดความทนทาน อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม หรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม ความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือบางครั้งเกิดขึ้นหลังจากการใช้งาน ไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง และความเสียหายนี้อาจเกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุภายในหรือภายนอกคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 สาเหตุ คือ

ด้านกายภาพ เช่น ความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อน ความเย็น การเปียก และแห้งสลับกันไป น้ำหนักบรรทุกมากเกินไป ความล่า อนุมัติเหตุ

ด้านเคมี เช่น การซึมผ่านของสารเคมีเข้ามากัดกร่อนคอนกรีตและเสริมเหล็ก การกระทำของแบคทีเรีย

ด้านกล เช่น การเสียดสีจนเกิดความเสียหาย การกัดกร่อนโดยแรงลม

ขอบเขตของความเสียหายขึ้นกับองค์ประกอบเฉพาะที่มาเกี่ยวข้องอันได้แก่ คุณภาพของคอนกรีต ความหนาแน่นของคอนกรีต และความรุนแรงของสภาพแวดล้อม เป็นต้น

#### 2.7.5 การลดความเสียหาย

ความเสียหายของคอนกรีตในโครงสร้างต่างๆสามารถลดลงได้ โดยการพิจารณาสภาพแวดล้อม สภาพการใช้งานของโครงสร้างนั้นอย่างละเอียดก่อนการออกแบบ จากนั้นควรเลือกออกแบบและใช้ข้อกำหนดของคอนกรีตที่เหมาะสมในขั้นตอนการออกแบบ ส่วนในขั้นตอนการก่อสร้างจำเป็นต้องมีการควบคุมเป็นอย่างดี ทั้งขั้นตอนการผสม การเขย่า การแต่งผิวและการบ่ม รวมทั้งการบำรุงรักษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.8 การทดสอบการชะละลาย

การทดสอบการชะละลายแบ่งออกได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์คุณภาพของสารที่ต้องการทดสอบ โดยใช้ปริมาณสารตัวอย่าง วิธีการเตรียมตัวอย่าง และเครื่องมือที่แตกต่างกัน ซึ่งการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ Batch Tests และ Column Tests โดย Batch Tests เป็นการทดสอบการชะละลายที่ให้ตัวอย่างสารสัมผัสกับของเหลวที่ใช้ในการชะละลาย (Extraction Solution) ในภาชนะอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงเวลาทำการทดสอบ ส่วน Column Tests นั้นจะทำการทดสอบในคอลัมน์ซึ่งบรรจุตัวอย่างสารที่ต้องการทดสอบจนแน่น และป้อนสารที่ต้องการทดสอบผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

ในอดีตการทดสอบการชะละลายของสารนิยมใช้ทั้งวิธี Batch Tests และ Column Tests ปัจจุบันมีการออกแบบเครื่องมือสำหรับ Batch Tests ซึ่งใช้กับการทดสอบการชะละลายของของเสียก่อนจะนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ

วิธี Toxicant Extraction Procedure (TEP) เป็นวิธีที่ใช้บังคับ กำหนดโดย US.EPA (1980) ต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการเป็นวิธี Extraction Procedure (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันดังมีรายละเอียดแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ตารางเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย (Extraction Test Procedure) (กยมาและพงศภัทร, 2545)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leaching Test pressure filtration	(US.EPA) Toxicant Extraction Procedure	ASTM Method A	Extraction Procedure	วิธีการสกัดสารตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6
1. ปริมาณตัวอย่างสาร	28.6 กรัม สารตัวอย่าง(ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักค่าสุด	350 กรัม	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5 % ของแข็ง)	100 กรัม
2. การเตรียมตัวอย่างสาร	แยกของเหลวโดยใช้ 0.45 $\mu\text{m}$	แยกของเหลวโดยวิธี Centrifugal Filtration	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้วขนาด 0.45 $\mu\text{m}$	บดจนมีขนาด 9.5 มม.	บดจนมีขนาด 9.5 มม.
3. อัตราส่วนของของเหลวต่อของแข็ง	10 : 1 ถึง 7 : 1	10 : 1 ถึง 8 : 1	4:01	20:01	20:01
4. สารที่ใช้ทดสอบการชะละลาย	Buffered Acetic Acid หรือน้ำกลั่น	Acetic Acid หรือ Sodium Hydroxide	ASTM Type IV Water	0.5 N Acetic Acid 4 มล./ก.ของสารตัวอย่าง	Sulfuric acid และ nitric acid
5. การควบคุม pH	4.8-5.2	4.9-5.2	ไม่กำหนด	n/a	4.6-5.8
6. ภาชนะที่ใช้ทดสอบ	ภาชนะปิด	ไม่กำหนด	ขวดปากกว้าง (ปิดฝา)	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด
7. วิธีการผสมและระยะเวลาการทดสอบ	Rotating Shaker	Mechanical Stirring	Reciprocating Shaker	เครื่องกวนหรือเครื่องมือที่เทียบเท่า	Centrifugal Filtration
8. การแยกของเหลวและของแข็ง	24 ชั่วโมง	24 ชั่วโมง	48 ชั่วโมง	เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.9 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อน

ทำการเปรียบเทียบเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อนของ กระทรวงอุตสาหกรรมและ US.EPA. เพื่อให้ทราบถึงส่วนที่เหมือน หรือแตกต่างกัน และเป็นแนวทาง ในการเลือกใช้ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 เกณฑ์มาตรฐานสำหรับการบำบัดของเสียโดยการทำให้เป็นก้อนของกระทรวง อุตสาหกรรม และ US.EPA.

พารามิเตอร์	กระทรวงอุตสาหกรรม	US.EPA.*
ความหนาแน่น (ton/m <sup>3</sup> )	1.15	na*
การรับแรงอัด (kg/cm <sup>2</sup> )	3.5	3.5
ปริมาณความเข้มข้นของ โลหะหนักในน้ำสกัด (mg/l)		
อาร์เซนิก	5.0	0.5
แบเรียม	100.0	7.6
แคดเมียม	1.0	0.05
โครเมียม	5.0	0.30
ตะกั่ว	5.0	0.15
ปรอท	0.2	0.009
ซีลีเนียม	4.0	0.160
เงิน	5.0	0.30

\* ที่มา: <http://ecfr.gpoaccess.gov/>

na\* = not applicable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดของเสียอันตรายโดยการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยวัสดุซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตารางเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในเถ้าจากแหล่งต่างๆ

ประเภทของเถ้า	ปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.)							เอกสารอ้างอิง
	Zn	Pb	Cu	Ni	Fe	Hg	Cd	
เถ้าขยะจากโรงพยาบาล	3528.2	706.4	44.4E	164.9	6293	na*	na*	Idris และ Saed, 2002
เถ้าลอยจากมูลฝอยชุมชน	4386	1496	313	60.8	25777	52	25.5	Youcaf et al., 2002
เถ้าลอยจากขยะอุตสาหกรรม	310000	140	315	106	135000	na*	na*	Fitch & Cheeseman, 2003

na\* = not applicable

จากตารางที่ 4.3 พบว่า เถ้าลอยจากมูลฝอยชุมชนมี แคดเมียม และปรอท ส่วนทั้งในเถ้าขยะจากโรงพยาบาล และเถ้าลอยจากอุตสาหกรรมไม่พบว่ามี แคดเมียม และปรอท เนื่องจากในชุมชนมีการใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบของ แคดเมียม และปรอท กันมาก เช่น ฉนวน ไฟฉาย สี แบตเตอรี่ เป็นต้น แต่ทั้งนี้ก็ไม่ได้หมายความว่าในโรงพยาบาล และอุตสาหกรรมนั้นจะไม่มีการใช้วัสดุพวกนี้เลย เพียงแต่ว่ามีปริมาณการใช้น้อยเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าในเถ้าลอยอุตสาหกรรมนั้นจะพบ สังกะสี และเหล็ก ในปริมาณที่สูงมาก เนื่องจากสังกะสี และเหล็ก เป็นองค์ประกอบหลักในวัสดุชนิดต่างๆที่จำเป็นต้องใช้ในอุตสาหกรรม ส่วน ทองแดง, ตะกั่ว และนิกเกิล พบว่าปริมาณที่พบจากทั้ง 3 แหล่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Jaggi (1990) ศึกษาประสิทธิภาพในการทำกากของเสียอันตรายให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซีเมนต์ ژیเต้าแกลบล และซีเมนต์กันเทา การของเสียอันตรายที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วยกากของเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า และโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ซึ่งมีแคดเมียม และตะกั่วเจือปน และสลัดจ์จากโรงงานผลิตยาฆ่าแมลง ซึ่งมีสารอัลดรินเจือปน เมื่อทำการทดสอบการชะละลาย และกำลังรับแรงอัด พบว่า

- การชะละลายจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของกากของเสียในก้อนตัวอย่าง และอัตราส่วนของพื้นที่ผิว ต่อ ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง แต่จะเป็นอัตราส่วนผกผันกับค่าพีเอชแรกเริ่มของสารละลายที่ใช้ในการสกัด
- ปริมาณของเสียที่เพิ่มจึบจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง
- อัตราส่วนน้ำ ต่อ ซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และ 0.35 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับกากของเสียอินทรีย์ ตามลำดับ
- การใช้ซีเมนต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วน 1:1 เป็นวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกากของเสียจากโรงงานชุบโลหะ
- การใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน ทำให้แคดเมียมถูกชะละลายออกมาน้อยที่สุด
- การใช้ซีเมนต์กันเทาเป็นวัสดุประสานทำให้ค่าการชะละลายต่ำที่สุด และมีกำลังรับแรงอัดพอเพียงสำหรับกรบ้ำนคของกากของเสียจากยาฆ่าแมลง

Shin (1988) ศึกษาปัจจัย 4 ประการที่มีผลต่อการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท I คือ อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ปริมาณสลัดจ์ และปริมาณ precipitator ของเสียเป็นสลัดจ์ของ โรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เมื่อนำมาทดสอบการชะละลายด้วยวิธี EP toxicity พบว่า

- อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำ ทำให้การชะละลายสังกะสีและโครเมียมลดลง
- อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์มีผลต่อการชะละลายของโครเมียมมากที่สุด อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลต่อการชะละลายของสังกะสีมากที่สุด
- ปริมาณ precipitator ไม่ค่อยมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและการชะละลายมากนัก
- ปริมาณสลัดจ์เพิ่ม ส่งผลให้สังกะสี และ โครเมียมถูกชะละลายออกมามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ทำให้ระดับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการเกิดผลึกสูง เมื่อผ่านการบ่มน้ำจะระเหยออกไปคงเหลือแต่รูพรุนในตัวอย่าง ทำให้อัตราซีเมนต์น้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โลหะหนักถูกชะละลายออกมา

Chang (1989) ศึกษาการทำโลหะหนักให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ และเถ้าแกลบ โดยใช้น้ำเสีย สังกะสีของโครเมียม ทองแดง และปรอท จากผลการวิจัย พบว่ากลไกการยึดจับโลหะหนักเป็น ปัจจัยสำคัญในการชะละลายของโลหะหนัก

- การชะละลายของโครเมียมในซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ (1 : 1) จะสูงกว่าการใช้ซีเมนต์อย่างเดียว ในขณะที่การชะละลายของทองแดง และปรอทในซีเมนต์อย่างเดียวสูงกว่าซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ
- ทองแดงและปรอทจะยึดจับกับซีเมนต์โดยอยู่ในรูพรุน หรือติดกับซีเมนต์การชะละลายจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นด่าง จากการวิเคราะห์น้ำสกัดจะพบว่าค่าความเป็นด่างมีค่าสูงขึ้นตามค่าการชะละลายของทองแดง และปรอท
- การใช้ซีเมนต์เหมาะสมสำหรับโครเมียม และ การใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเหมาะสมสำหรับทองแดง และปรอท

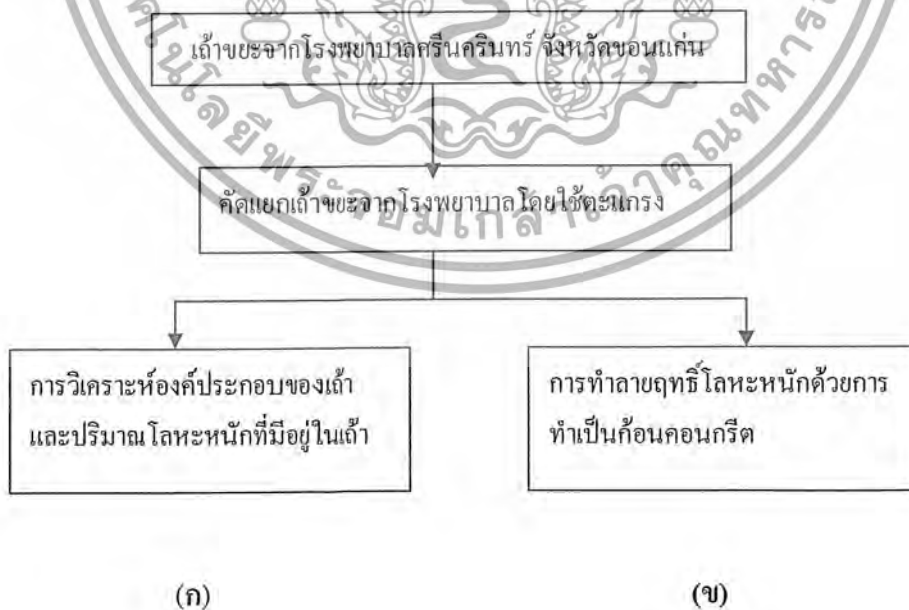
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การทำลายฤทธิ์โลหะหนัก โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement-Based Stabilization/Solidification) สำหรับเถ้าขยะจากโรงพยาบาล ได้ทำการศึกษาตัวอย่างเถ้าจากเตาเผา ขยะโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าและ ปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในเถ้าด้วยวิธีการต่างๆ และทำการหล่อก้อนคอนกรีตด้วยอัตราส่วนเถ้าต่อ ซีเมนต์แตกต่างกัน พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติของก้อนคอนกรีต ทั้งทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น และการทดสอบการรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต และคุณสมบัติการชะละลายโลหะหนักได้แก่ สังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu)

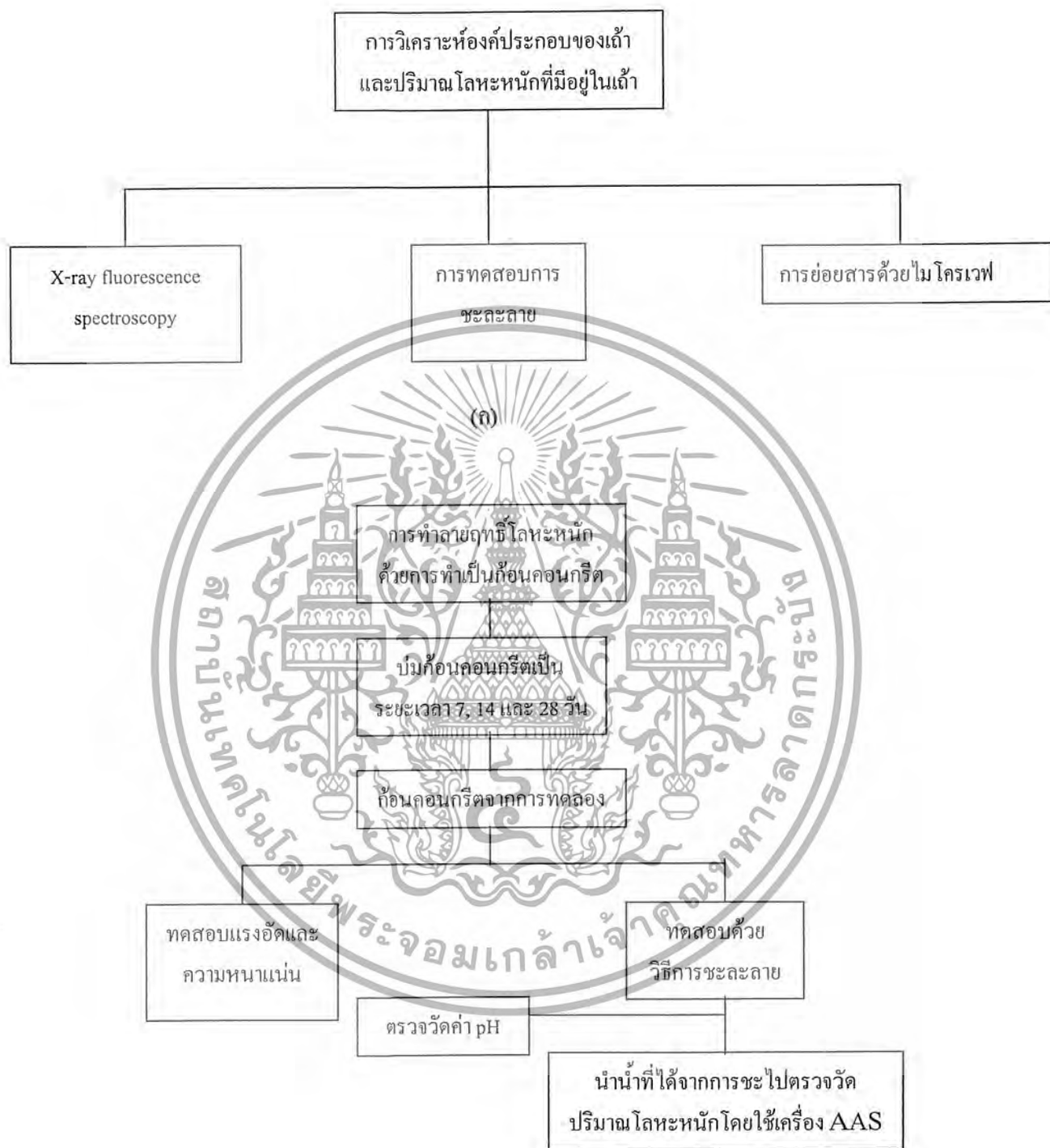
แผนการการทดลองและการดำเนินการวิจัยสามารถสรุปแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักๆคือ

1. ขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าและปริมาณ โลหะหนักที่มีอยู่ในเถ้า
  2. ขั้นตอนการศึกษาทำลายฤทธิ์ โลหะหนัก โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์
- โดยขั้นตอนทั้ง 2 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.1 ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 3.1 (ต่อ) แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย โดยที่

ก) การวิเคราะห์องค์ประกอบของดินและปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในดิน

ข) การทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยการทำเป็นก้อนคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ้ำและปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในถ้ำ

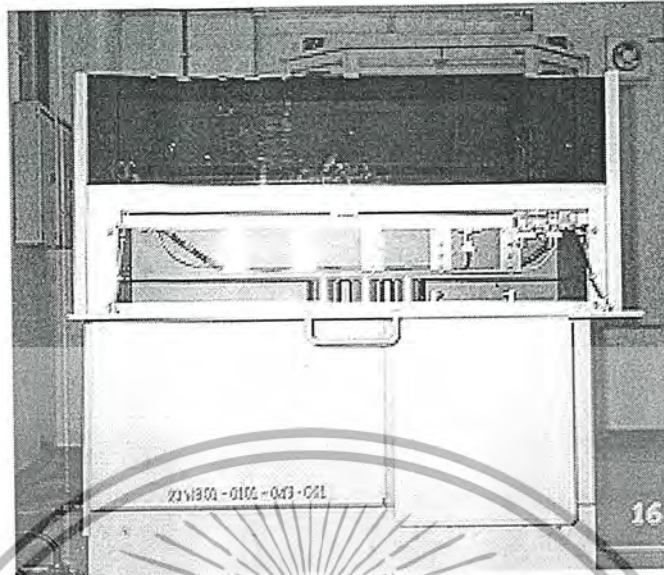
ในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างถ้ำ ซึ่งใช้วิธีการดังนี้

- 1) X-ray fluorescence spectroscopy (XRFs) เพื่อทดสอบหาปริมาณองค์ประกอบหลักของถ้ำขยะ
- 2) การทดสอบการชะละลาย (Leaching test) เพื่อทดสอบการชะละลายของสังกะสี ตะกั่ว และทองแดงจากถ้ำ
- 3) การย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion) เพื่อศึกษาการย่อยสลายองค์ประกอบที่เป็นของแข็งของถ้ำขยะ และหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกสกัดออกมา

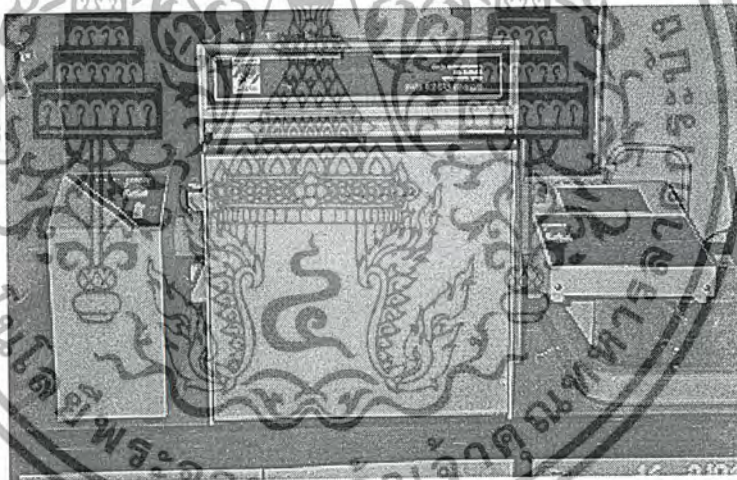
อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. ตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร
2. เครื่องวัด pH (pH meter) รุ่น 225 pH/ISE METER, บริษัท Denver Instrument
3. เครื่องเขย่า (Horizontal shaker) 30 รอบต่อนาที, ยี่ห้อ GALLENKAMP
4. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) รุ่น TC-254, บริษัท Denver Instrument
5. กระดาษกรองใยแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.45 ไมครอน
6. ขวดวัดปริมาตร
7. ปีกนอร์
8. กระบอกลวด
9. ชุดกรองบุชเนอร์
10. เครื่องดูดสุญญากาศ
11. เครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS)
12. เครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy (XRFs) รุ่น SRS 3400 บริษัท BRUKER AXS (ดังรูปที่ 3.2)
13. เครื่องย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (High performance microwave digestion) รุ่น 1200 Mega, บริษัท Milestone Microwave Laboratory System (ดังรูปที่ 3.3)
14. Grinding vessel บริษัท Rock LABS รุ่น 7KP9001-8AN
15. Palletizing บริษัท HERZOG รุ่น TP 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy



รูปที่ 3.3 เครื่อง Microwave Digestion

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. กรดไนตริกเข้มข้น 65% เกรดวิเคราะห์, บริษัท Mallinckrodt
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck
3. กรดบอริก เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck
4. กรดเปอร์คลอริก 70% เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck
5. กรดไฮโดรฟลูออริก 40% เกรดวิเคราะห์, บริษัท Ajax Chemical
6. สารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% เกรดวิเคราะห์, บริษัท Merck

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy มีวัตถุประสงค์เพื่อหาองค์ประกอบของถ้ำ และปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในถ้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) นำถ้ำขยตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 9.5 มม.
- 2) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1) หนัก 2.5 กรัม มาทำการบดผสมรวมกับกรดบอริกหนัก 2.5 กรัม ด้วยเครื่อง Grinding vessel โดยตั้งเวลาไว้ที่ 1 นาที
- 3) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 2 มาเทลงใน Pallet แล้วปาดด้วยกระจกสไลด์ให้เรียบ แล้วนำไปอัดให้แน่นด้วยเครื่อง Palletizing โดยใช้เวลาประมาณ 2 นาที
- 4) นำตัวอย่างที่อัดแน่นเรียบร้อยแล้ว ไปทำการวิเคราะห์โดยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 การทดสอบการชะละลายของเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาล

ในการทดสอบการชะละลายของเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาลใช้มาตรฐานการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก โดยวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ซึ่งระบุไว้ตามหลักเกณฑ์การจัดตั้ง หรือการฝังกลบสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

- 1) นำเถ้าขยะมาร้อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มม.
- 2) เตรียมน้ำสกัด (Leachant) โดยใช้สารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในอัตราส่วน 80ต่อ20 โดยน้ำหนัก) ผสมกับน้ำกลั่น จนค่าความเป็นกรดต่าง พีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้เป็น 2000 มิลลิลิตร
- 3) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ (1)หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัดที่เตรียมจากข้อ 2) จำนวน 2000 มิลลิลิตร
- 4) เหย้าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- 5) กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
- 6) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy)
- 7) วัดค่าพีเอช

ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาลสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์น้ำหนักขยะละลายจากเก็บขยะโรงพยาบาล

### 3.1.3 การย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion)

วิธีการย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion) เป็นการศึกษาปริมาณโลหะหนักในเถ้า โดยการทำลายเสถียรภาพของโมเลกุลเถ้าขยะด้วยการใช้สารเคมีต่างๆเป็นตัวย่อย โดยวิธีการย่อยสารด้วยไมโครเวฟนี้ได้ใช้สารเคมี 2 กลุ่มตามวิธีการของ Ashes of polluted soil และ Siliceous soil with organi

วิธีการของ Ashes of polluted soil มีขั้นตอนดังนี้

- 1) นำเถ้าขยะตัวอย่าง มาใส่ลงใน Vessel
- 2) นำสารย่อย คือ กรดเปอร์คลอริก 70% 1 มล. และกรดไนตริก 65% 4 มล. ใส่ในแต่ละ Vessel
- 3) ขันน็อคเพื่อยึด Vessel กับ Rotor ให้แน่น
- 4) นำ Rotor พร้อม Vessel เข้าเครื่อง Microwave Digestion และตั้งโปรแกรมที่ได้กำหนดมาให้ในคู่มือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) หลังจากเดินเครื่องประมาณครึ่งชั่วโมง นำ Rotor พร้อม Vessel ออกจากเครื่อง แล้วนำไปหล่อเย็นเป็นเวลาประมาณ 10 นาที
- 6) กรองน้ำตัวอย่างที่ได้ด้วยกระดาษกรองใยแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.45 ไมครอน
- 7) ปรับปริมาตรให้เป็น 100 มล. จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักในน้ำตัวอย่างด้วยเครื่อง AAS

วิธีการของ Siliceous soil with organi มีขั้นตอนเหมือนกับวิธีการข้างต้นทุกอย่าง ยกเว้นใส่ถ้ำใน Vessel เพียง 0.25 กรัม และเปลี่ยนสารย่อย เป็นกรดไนตริก 65% 2 มล. กรดไฮโดรฟลูออริก 40% 2 มล. และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% 1 มล. เท่านั้น สามารถแสดงขั้นตอนได้ดังรูปที่ 3.6 ดังนี้



รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงกระบวนการย่อยสารด้วยไมโครเวฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยการทำเป็นก้อนคอนกรีต

อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราเสือ (ดังรูปที่ 3.7)
2. ทราयर่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช
3. ตะแกรงขนาด 9.5 มม.
4. เครื่องผสมปูนซีเมนต์ (ดังรูปที่ 3.8)
5. เครื่องขนาดหน้ากว้างของใบ 4-6 นิ้ว
6. แบบหล่อขนาด  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  (ดังรูปที่ 3.9)
7. เวอร์เนีย
8. เครื่องวัด pH (pH meter) รุ่น 225 pH/ISE METER, บริษัท Denver Instrument
9. เครื่องทดสอบแรงอัด (Compressive Strength Test Machine) (ดังรูปที่ 3.10)
10. เครื่องเขย่า (horizontal shaker) 30 รอบต่อนาที, ยี่ห้อ GALLENKAMP
11. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) รุ่น TC-254, บริษัท Denver Instrument
12. กระดาษกรองใยแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
13. ขวดวัดปริมาตร
14. บีกเกอร์
15. กระบอกตวง
16. ชุดกรองบุษนอร์
17. เครื่องดูดสูญญากาศ
18. เครื่องอะตอมมิค แอปซอพชั่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer AAS) (ดังรูปที่ 3.11)

สารเคมีที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

1. กรดไนตริกเข้มข้น (conc.HNO<sub>3</sub>) เกรควิเคราะห์, บริษัท Mallinckrodt
2. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (conc.H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) เกรควิเคราะห์, บริษัท Mallinckrodt
3. น้ำปราศจากไอออน (น้ำ DI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

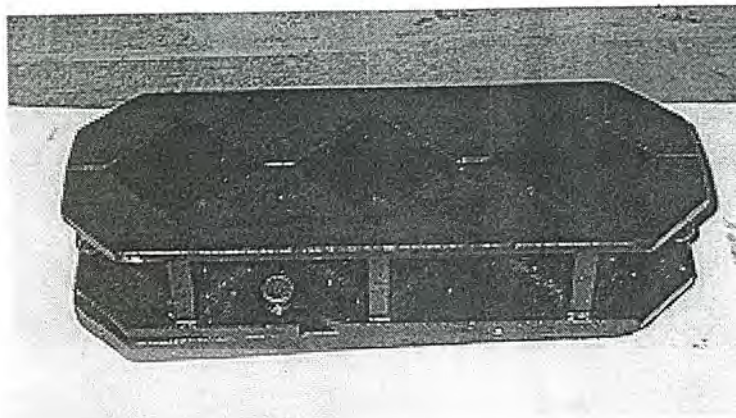


รูปที่ 3.7 ปูนซีเมนต์บอร์ตแลนด์ตราเสือ



รูปที่ 3.8 เครื่องผสมปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

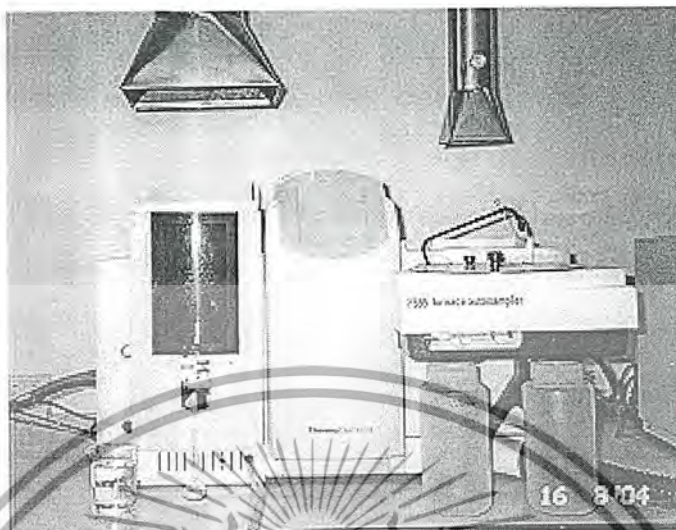


รูปที่ 3.9 แบบหล่อขนาด  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$



รูปที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงอัด (Compressive Strength Test Machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 เครื่องอะตอมมิก แอ็บซอร์พชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (AAS)

### 3.2.1 การหล่อและบ่มก่อนคอนกรีต

ในการหล่อและบ่มก่อนคอนกรีต โดยใช้ตามมาตรฐานของ ASTM C1096-86 และได้แปรค่าส่วนผสมของเถ้าในการหล่อคอนกรีตต่อซีเมนต์ คือ 0:100, 5:95, 10:90, 20:80, 33:67 และ 50:50 ตามลำดับ

1) ชั่งวัสดุที่ใช้ในการหล่อซีเมนต์ ตามมาตรฐานของ ASTM C1096-86 ในแบบหล่อขนาด  $5 \times 5 \times 5$  cm ใช้สัดส่วนของเถ้าในการหล่อคอนกรีตต่อซีเมนต์ คือ 0:100, 5:95, 10:90, 20:80, 33:67 และ 50:50 ตามลำดับ โดยใช้ทรายเป็นสองเท่าของปริมาณเถ้าและซีเมนต์รวมกัน และใช้น้ำ 50 มิลลิลิตร

2) ทำการผสมด้วยเครื่องผสมปูนซีเมนต์ โดยผสมปูนซีเมนต์ ทราย เถ้า และน้ำ ตามอัตราส่วนในข้อ (1) ให้เข้ากัน เมื่อเข้ากันดีแล้ว กองซีเมนต์ที่ผสมแล้วเป็นรูปภูเขาที่มีหลุมตรงกลางแล้วเติมน้ำลงไปในหลุม และส่วนผสมจากด้านข้างลงในกลางหลุมในเวลา 30 วินาที และทิ้งไว้ให้ซีเมนต์ด้วยน้ำ 30 นาที เริ่มผสมเข้ากันในเวลา 1 นาที 30 วินาที

3) เทซีเมนต์ที่ผสมแล้วลงในแบบหล่อภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังจากการผสมเสร็จการหล่อจะต้องแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะหนาประมาณ 1 นิ้ว หรือ 2.5 cm. แล้วใช้ Tamper กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้ง โดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลัง ให้ใช้แรงกระทุ้งพอประมาณ และเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 นาที เติมน้ำซีเมนต์ผสมครั้งที่ 2 ให้เลยขอบบ่อ

เล็กน้อย ใช้มือป้องกัน Tamper กระทุ้ง กระทุ้ง 16 ครั้งเช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วใช้เกรียงปาดส่วนที่เกินออก

4) หลังจากการหล่อเสร็จแล้วให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อมาเก็บไว้ในที่ชื้นทันที ถอดแบบภายใน 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างจนครบ 7 14 และ 28 วัน โดยใช้ผ้ากระสอบชื้นคลุมทับ นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยใช้เครื่อง Compressive Strength Test Machine ตามจำนวนวันที่บ่ม หลังจากนั้นก็ถอนคอนกรีต ผ่านการบ่มมาเป็นเวลา 7 14 และ 28 วัน จึงนำไปทำการหาความหนาแน่นของก้อนคอนกรีต และนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัด

1) หาความหนาแน่นของตัวอย่าง (D) โดยการชั่งน้ำหนักก้อนตัวอย่าง (M) และหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่าง (V) ดังสมการที่ 3.1

$$D = M/V \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

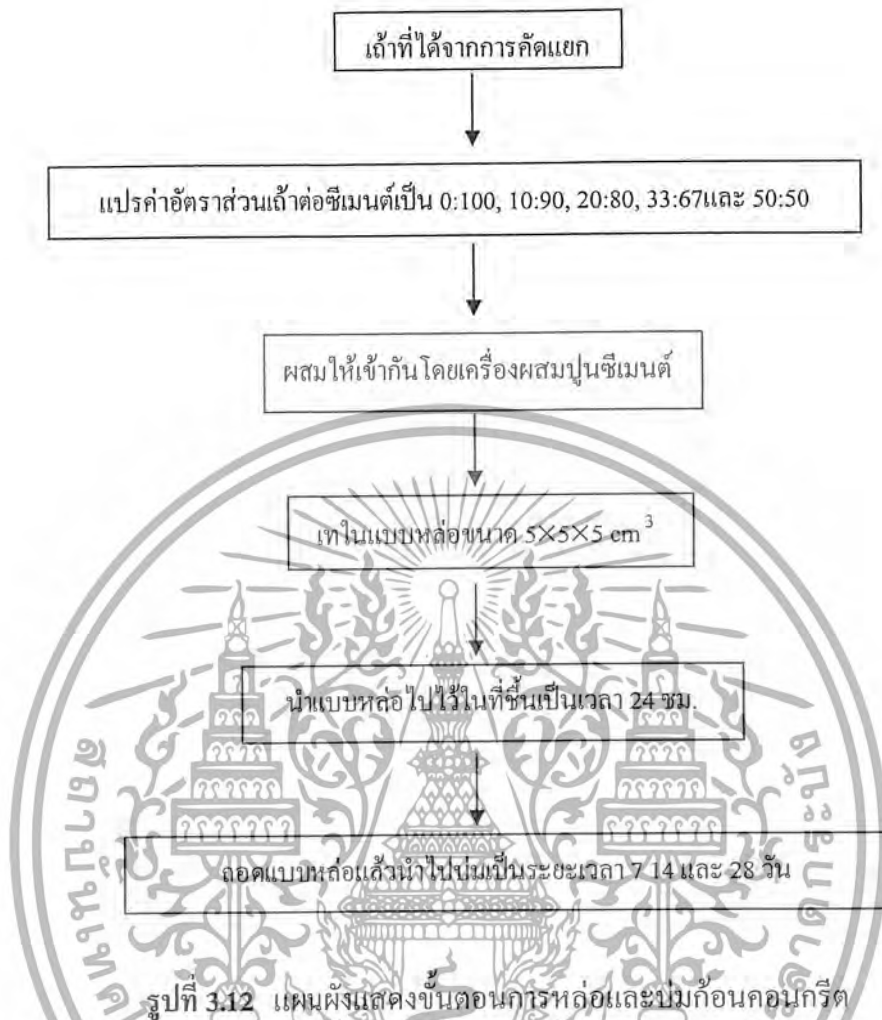
โดยที่ปริมาตรหาจากการแทนที่ปริมาตรของก้อนตัวอย่างในน้ำ

2) ทดสอบกำลังรับแรงอัด ดังนี้

- วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะใช้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสแบบหล่อ
  - เช็ดผิวหน้าทั้งสองด้าน
  - ใช้แรงกดที่บ่มตัวอย่าง โดยผิวหน้าของเครื่องมือทั้ง 2 ด้าน ที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบ และตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง
- จนก้อนคอนกรีตเกิดความเสียหาย  
บันทึกค่าสูงสุด

### 3.2.2 การวิเคราะห์หาความหนาแน่น และการทดสอบการรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต

นำตัวอย่างเก็บ ๓ วันที่เก็บต่างๆกันมาผสมรวมกัน เพื่อได้เอ้าท์ที่มีองค์ประกอบเป็นตัวแทนของเอ้าท์ทั้งหมด จากนั้นจึงนำไปบ่มและทำลายฤทธิ์โลหะหนัก โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนในการหล่อก้อนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.12



ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัดและวิเคราะห์หาความหนาแน่นของก้อนคอนกรีต

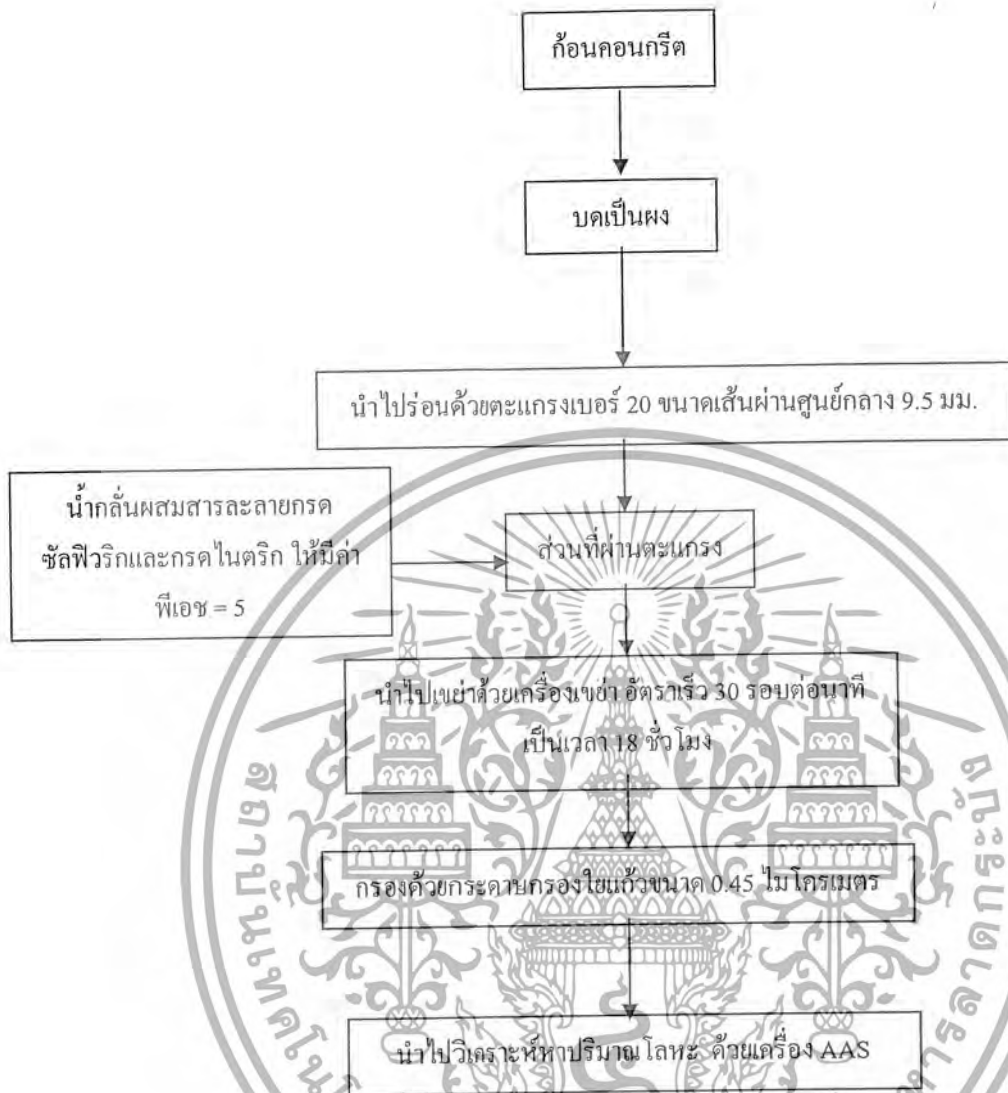
หลังจากที่ทำการหล่อก้อนคอนกรีตและทำการบ่มจนครบเวลาที่กำหนดซึ่งในที่นี้ คือ 7 14 และ 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มที่กำหนดแล้วจึงนำเอาก้อนคอนกรีตไปทดสอบกำลังรับแรงอัดและวิเคราะห์หาความหนาแน่น เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ เช่น ปริมาณเถ้า ระยะเวลาในการบ่ม ที่มีต่อกำลังรับแรงอัดและความหนาแน่น ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ซึ่งวิธีการสกัดสาร ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1.2 ดังแสดงในรูปที่ 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะละลายจากก๊องคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

#### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาล

เถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น ถูกเก็บตัวอย่างเป็นระยะเวลา 2 ช่วงด้วยกัน คือ ช่วงวันที่ 31 กรกฎาคม ถึง 1 สิงหาคม พ.ศ. 2546 และช่วงระหว่างวันที่ 15 ถึง 21 กันยายน พ.ศ. 2546 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างเถ้าทั้ง 2 กลุ่ม โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้

1. X-ray Fluorescence (XRFs) Spectroscopy เพื่อทดสอบหาปริมาณองค์ประกอบหลักของเถ้าขยะ
2. การทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) ตามมาตรฐานของท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (2540) เพื่อทดสอบการชะละลายของ Zn Pb และ Cu จากเถ้า
3. การย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave digestion) เพื่อย่อยสลายองค์ประกอบที่เป็นของแข็งของเถ้าขยะ และหาปริมาณโลหะหนักที่ถูกสกัดออกมา โดยการใช้สารสกัดที่แตกต่างกัน 2 กลุ่มได้แก่
  - 1) กรดไนตริก 65% 1 มล. และกรดเปอร์คลอริก 70% 4 มล.
  - 2) กรดไนตริก 65% 2 มล., กรดไฮโดรฟลูออริก 40% 2 มล. และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% 1 มล.

ผลการทดสอบองค์ประกอบของเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาล ด้วยวิธีต่างๆเป็นดังนี้

##### 4.1.1 X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFs)

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขยะ โดยนำตัวอย่างเถ้าขยะในวันต่างๆกันของทั้ง 2 ช่วง มาวิเคราะห์ ซึ่งในที่นี้จะแสดงเฉพาะองค์ประกอบที่สำคัญเท่านั้น ส่วนองค์ประกอบทั้งหมดได้แสดงไว้ในภาคผนวก

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากเตาเผาขยะ

ตัวอย่าง ที่	วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ร้อยละขององค์ประกอบ								
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	PbO
1	31/7/2546	24.00	14.60	12.30	11.80	8.30	5.09	1.80	0.65	0.50
2	1/8/2546	23.80	15.00	13.80	10.50	9.80	4.39	0.90	0.56	0.08
3	15/9/2546	25.70	10.20	15.90	17.50	5.31	6.90	0.68	0.19	0.06
4	16/9/2546	24.20	17.20	13.10	10.70	8.40	5.21	1.08	0.34	0.04
5	17/9/2546	25.00	15.20	14.80	10.70	7.82	5.23	1.51	0.23	0.04
6	18/9/2546	25.20	13.00	16.20	12.10	7.17	6.01	0.94	0.35	0.03
7	19/9/2546	32.00	17.10	9.61	10.30	7.94	4.36	1.09	0.25	0.03
8	20/9/2546	24.20	14.50	16.20	10.90	7.56	5.41	0.96	0.31	0.04
9	21/9/2546	24.10	14.60	12.10	14.70	7.63	6.88	0.79	0.21	0.03
เฉลี่ย		25.36	14.60	13.78	12.13	7.77	5.50	1.08	0.34	0.09
SD		2.57	2.11	2.24	2.43	1.19	0.93	0.36	0.16	0.15

จากตารางที่ 4.1 เมื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขยะทั้ง 9 ตัวอย่าง จากทั้ง 2 ช่วง พบว่าเถ้าขยะจากโรงพยาบาลมีองค์ประกอบสำคัญ 4 ชนิด คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกอนออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>), คลอไรด์ (Cl) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) ซึ่งมีปริมาณรวมกันมากกว่าร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก จากองค์ประกอบดังกล่าวทำให้สามารถอธิบายได้ว่า สาเหตุที่เถ้ามีลักษณะเป็นผงแข็งเนื่องมาจากมี แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และ ซิลิกอนออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) เป็นจำนวนมาก ซึ่งทั้งคู่มีคุณสมบัติของผลึกแข็ง และองค์ประกอบดังกล่าวมีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไอออนิก ซึ่งจะช่วยในการระบายความร้อนของก้อนคอนกรีตได้ ส่วนคลอไรด์ (Cl) เป็นสารที่ถูกใช้เป็นปริมาณมากในโรงพยาบาล เช่น การฆ่าเชื้อโรค นอกจากนี้ถุงน้ำเกลือยังทำมาจากพีวีซี (PVC) ซึ่งมีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ ส่วนคลอไรด์ในยา และน้ำเกลือนั้นมีโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) เป็นส่วนผสมอยู่ ดังนั้นคลอไรด์จึงมีปริมาณมากในเถ้าขยะจากโรงพยาบาลเมื่อเทียบกับเถ้าจากเตาเผาขยะชุมชน ซึ่งมีปริมาณคลอไรด์ ประมาณ 11% (Lombradi *et. al.*, 2002) การที่มีคลอไรด์มากส่งผลต่อการก่อตัวของคอนกรีต และทำให้โลหะหนักถูกชะออกมาจากก้อนคอนกรีตได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังพบซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) ในเถ้าขยะเป็นปริมาณมาก คือ ตั้งแต่ 10.3% ถึง 17.5% ซึ่งมาตรฐานโดย US.EPA. ระบุให้มีซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ในเถ้าลอยได้ไม่เกินร้อยละ 5 (สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2545) และเนื่องจากคุณสมบัติของซัลเฟอร์ไตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) ที่ส่งผลกระทบต่อการพัฒนาความสามารถในการรับแรงอัด และเวลาในการก่อตัว อีกทั้งยังมีผลต่อคอนกรีตที่แข็งตัวอีกด้วย (สำนักวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2545)

เนื่องจากการแสดงองค์ประกอบของเถ้าขยะในรูปเปอร์เซ็นต์นี้ อาจยังแสดงให้เห็นถึง ปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ไม่ชัดเจน จึงมีการแปลงหน่วยจากในรูปเปอร์เซ็นต์ (%) ไปเป็น มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของเถ้าขยะ (มก./กก.) ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ปริมาณองค์ประกอบของเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล

วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ปริมาณองค์ประกอบของเถ้า (มก./กก.)								
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZnO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	PbO
31 ก.ค. 46	171,430	68,130	123,000	47,200	43,940	40,910	1,260	5,170	4,594
1 ส.ค. 46	170,000	70,000	138,000	42,000	51,880	35,280	6,290	4,440	710
15 ก.ย. 46	183,571	47,600	159,000	70,000	28,112	55,454	4,781	1,526	472
16 ก.ย. 46	172,857	80,267	131,000	42,800	44,471	41,872	7,560	2,716	365
17 ก.ย. 46	178,571	70,933	148,000	42,800	41,400	42,033	10,570	1,821	400
18 ก.ย. 46	180,000	60,667	162,000	48,400	37,959	48,301	6,552	2,820	300
19 ก.ย. 46	228,571	79,800	961,000	41,200	42,035	35,040	7,630	1,973	247
20 ก.ย. 46	172,857	67,667	162,000	43,600	40,024	43,479	6,748	2,452	335
21 ก.ย. 46	174,286	68,133	121,000	58,800	40,394	55,293	5,593	1,653	272
Mean	181,349	68,133	233,889	48,533	41,135	44,185	6,332	2,730	855
SD	18,254	9,825	273,138	9,712	6,293	7,512	2,501	1,273	1,409

#### 4.1.2 การทดสอบการชะละลาย (Leaching test)

ทำการทดสอบโดยใช้ตัวอย่างเถ้า 3 ตัวอย่าง ของวันที่ 17, 19 และ 20 กรกฎาคม พ.ศ. 2546 มาทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก โดยวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) ซึ่งระบุไว้ตามหลักเกณฑ์การกำจัดทิ้ง หรือการฝังกลบสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) เพื่อศึกษาปริมาณของ สังกะสี (Zn) และตะกั่ว (Pb) ในน้ำชะละลายด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ใน ตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณ โลหะหนักที่วิเคราะห์จากเถ้าที่ผ่านการทดสอบการชะละลาย

ตัวอย่างที่	วันที่เก็บ ตัวอย่าง (2546)	ปริมาณโลหะหนัก (มก. /ล.)				ปริมาณโลหะหนัก (มก. /กก.เถ้า)			
		สังกะสี (Zn)		ตะกั่ว (Pb)		สังกะสี (Zn)		ตะกั่ว (Pb)	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
1	17/9	0.058	0.028	0.096	0.027	1.160	0.677	1.920	0.652
2	19/9	0.055	0.004	0.121	0.027	1.100	0.081	2.420	0.543
3	20/9	0.106	0.037	0.084	0.013	2.120	0.907	1.680	0.260
	ค่าเฉลี่ย	0.073	0.023	0.100	0.022	1.460	0.555	2.007	0.485
เถ้ารวม 7 วัน		0.075	0.012	0.103	0.020	1.493	0.230	2.053	0.393

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณ โลหะหนักทั้ง สังกะสี และตะกั่ว ในน้ำชะมีค่าเป็น 0.073 และ 0.100 มิลลิกรัม/ลิตร (1.460 และ 2.007 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของเถ้า) ตามลำดับ ซึ่งจากการคำนวณ น้ำชะละลายสามารถชะโลหะหนักออกมาได้ทั้งหมด จะพบปริมาณสังกะสี และตะกั่ว ในน้ำชะเป็น 14,011 และ 133 มิลลิกรัม/ลิตร (280,220 และ 2,669 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของเถ้า) ตามลำดับ ซึ่งปริมาณโลหะหนักในน้ำชะที่วัดได้มีค่าน้อยกว่ามาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาลนั้นมีความเสถียรในตัวอยู่แล้ว (Idris และ Saed 2002) จึงทำให้น้ำชะละลายไม่สามารถชะโลหะหนักออกมาได้เท่าที่ควรจะเป็น เกณฑ์มาตรฐานกำหนดความเข้มข้นของ โลหะหนักในน้ำชะละลายสำหรับ สังกะสี ไม่เกิน 2.0 มิลลิกรัม /ลิตร และตะกั่ว ไม่เกิน 5.0 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งปริมาณโลหะหนักทั้งสังกะสีและตะกั่วในน้ำชะจากเถ้าขยะเตาเผาอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด และจากการทดสอบการชะละลายของเถ้าซึ่งได้จากการนำเถ้าทั้ง 7 วัน มารวมกัน เพื่อศึกษาถึงปริมาณโลหะหนักที่มีก่อนนำไปทำเป็นคอนกรีต (ในการทำคอนกรีตใช้ เถ้าทั้ง 7 วันผสมรวมกัน) พบว่า ปริมาณ โลหะหนักที่พบ คือ Zn และ Pb มีค่าใกล้เคียงกัน กับ เถ้าแต่ละวัน

#### 4.1.3 การย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digestion)

ในการศึกษาปริมาณ โลหะหนักที่มีอยู่ในเถ้าจำเป็นต้องมีการทำลายเสถียรภาพของโมเลกุลของเถ้าขยะเพื่อให้โลหะหนักที่ยึดติดกับ โมเลกุลของเถ้าหลุดออกมาอยู่ในสารละลายได้ โดยทำการย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟด้วยสารเคมีต่างๆ และใช้เถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาลคือ ตัวอย่างเถ้าของวันที่ 15, 18 และ 21 กันยายน พ.ศ. 2546 มาทำการทดลองเพื่อศึกษาหาปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในเถ้าขยะ การย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digestion) นั้นเลือกใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมี 2 กลุ่มด้วยกันตามวิธีการของ Ashes of polluted soil และ Siliceous soil with organic (Milestone Application Lab January, 1996) โดยมีรายละเอียดดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 รายละเอียดในการทำการย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digestion)

รายละเอียด	วิธีที่ 1 สำหรับ Ashes of polluted soil	วิธีที่ 2 สำหรับ Siliceous soil with organic
น้ำหนักแก้วที่ใช้ (กรัม)	0.5	0.25
สารที่ใช้	กรดไนตริก 65% 2 มล. กรดเปอร์คลอริก 70% 1 มล.	กรดไนตริก 65% 2 มล. กรดไฮโดรฟลูออริก 40% 2 มล. และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% 1 มล.

หลังจากทำการย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟแล้ว จึงทำการวัดปริมาณโลหะหนักในสารละลายด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ปริมาณของโลหะหนักในแก้วที่ผ่านการย่อยด้วยไมโครเวฟ

ตัวอย่าง วันที่	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ถ.)						ปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.แก้ว)					
	วิธีที่ 1			วิธีที่ 2			วิธีที่ 1			วิธีที่ 2		
	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu
15	565	49	77	339	20	37	5655	485	770	6780	400	740
18	620	17	95	700	20	76	6200	165	945	14010	410	1510
21	1739	70	86	1380	90	121	1739	695	860	27610	1800	1210
เฉลี่ย	975	45	86	806	43	78	4531	448	858	16133	870	1153

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณโลหะหนักทั้ง สังกะสีและตะกั่ว จากการทำการย่อยสารด้วยไมโครเวฟของแก้วขยะ มีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดสอบการชะละลายในข้อ 4.1.2 เนื่องจากการทำการย่อยสารด้วยไมโครเวฟนั้น ใช้กรดในการย่อยแก้วซึ่งมีค่าพีเอช (pH) ต่ำมาก (น้อยกว่า 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะที่การชะละลายนั้นใช้น้ำชะละลายที่มีค่าพีเอชประมาณ 5 และเนื่องจากที่ ค่า pH ดังกล่าว โครงสร้างผลึกของของแข็ง (Solid Matrix) ในถ้ำถูกทำลายจึงปล่อยโลหะหนักออกมา ดังนั้นการย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ จึงสามารถดึงโลหะหนักออกจากถ้ำขยะได้มากกว่าการทดสอบการชะละลาย จากการเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ ทั้ง 2 วิธี พบว่าวิธีที่ 2 ซึ่งใช้กรดไฮโดรฟลูออริกเป็นองค์ประกอบในสารสกัด สามารถสกัดโลหะหนัก ในปริมาณมากกว่า วิธีที่ 1 เนื่องจากกรดไฮโดรฟลูออริกสามารถทำลายโมเลกุลของ  $\text{SiO}_2$  ได้ จึงพบโลหะหนักในสารสกัดมาก

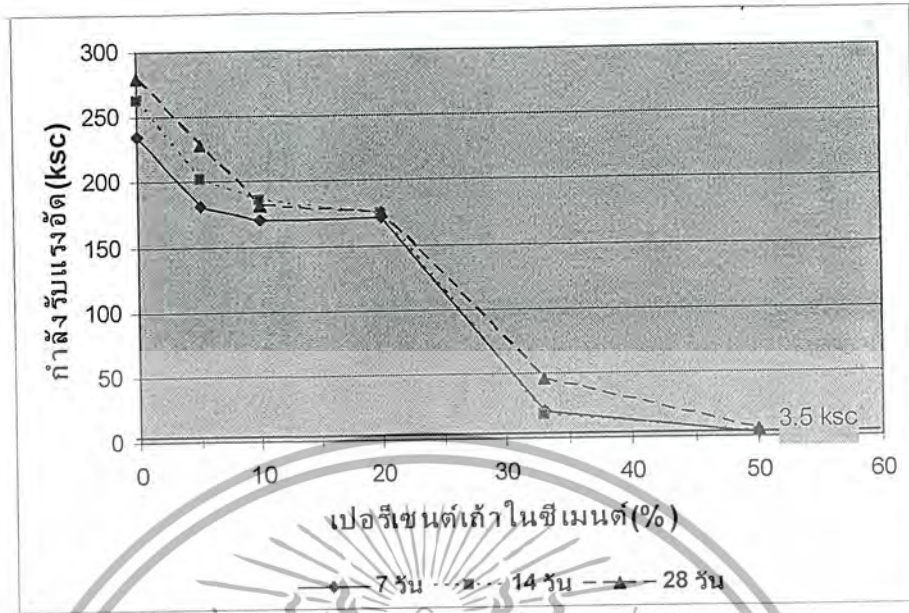
#### 4.2 การยับยั้งและการทำลายฤทธิ์โลหะหนักในถ้ำขยะด้วยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์

หลังจากการทำการวิเคราะห์และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของถ้ำขยะแล้ว ได้นำถ้ำขยะไปทำการหล่อและบ่มซีเมนต์ตามมาตรฐานของ ASTM C 1096-86 โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนถ้ำต่อซีเมนต์เป็น 0:100, 5:95, 10:90, 20:80, 33:67 และ 50:50 จากนั้นนำก้อนคอนกรีตที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพทั้งกายภาพและเคมี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

##### 4.2.1 อิทธิพลของปริมาณถ้ำขยะต่อกำลังรับอัดของก้อนคอนกรีต

ทำการทดสอบ โดยแปรค่าอัตราส่วนถ้ำขยะต่อซีเมนต์ เพื่อศึกษาผลของปริมาณถ้ำขยะที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต ส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีต ได้แก่ ถ้ำ, ซีเมนต์, ทราย และน้ำ ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ถ้ำต่อปริมาณซีเมนต์เป็น 0, 5, 10, 20, 33 และ 50 % ตามลำดับ

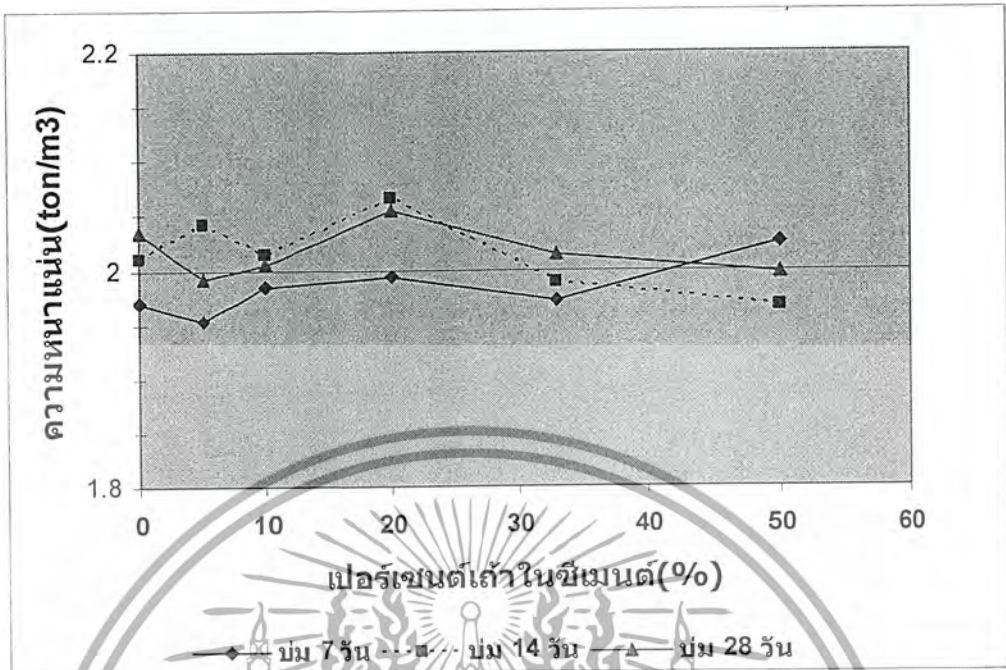
หลังจากเตรียมก้อนคอนกรีตแล้ว จึงบ่มก้อนคอนกรีตที่ระยะเวลา 7 14 และ 28 วัน จากนั้นนำก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนถ้ำต่อซีเมนต์ และเวลาบ่มต่างๆ มาทดสอบหาลำดับรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร,  $\text{ksc}$ ) ซึ่ง ได้ผลของกำลังรับแรงอัดดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (ksc) กับเปอร์เซ็นต์เถ้าในซีเมนต์ที่จำนวนวันในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบ พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตจะลดต่ำลงตามเปอร์เซ็นต์เถ้าในซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณซีเมนต์ที่ลดต่ำลงเนื่องจากปริมาณเถ้าที่ไปแทนที่ซีเมนต์ รวมถึงอิทธิพลของคุณสมบัติของเถ้าที่มีองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ คลอไรด์ (Cl) และ ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $SO_3$ ) ซึ่งทำให้ความสามารถในการพัฒนากำลังรับแรงอัด และเวลาในการก่อตัวลดต่ำลง (Means, et. al., 1995)

จากรูปที่ 4.1 พบว่าปริมาณเถ้าที่เหมาะสมในการนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ คือ ประมาณ 40% เนื่องจากที่ปริมาณนี้สามารถกำจัดเถ้าได้มากโดยที่สมบัติต่างๆของคอนกรีตนั้น ยังอยู่ภายใต้เกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด และที่ปริมาณเถ้าขะมากกว่านี้ มีโอกาสที่ก้อนคอนกรีตจะมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานซึ่งเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม คือ 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังได้ทดสอบหาความหนาแน่นของก้อนคอนกรีต ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.2

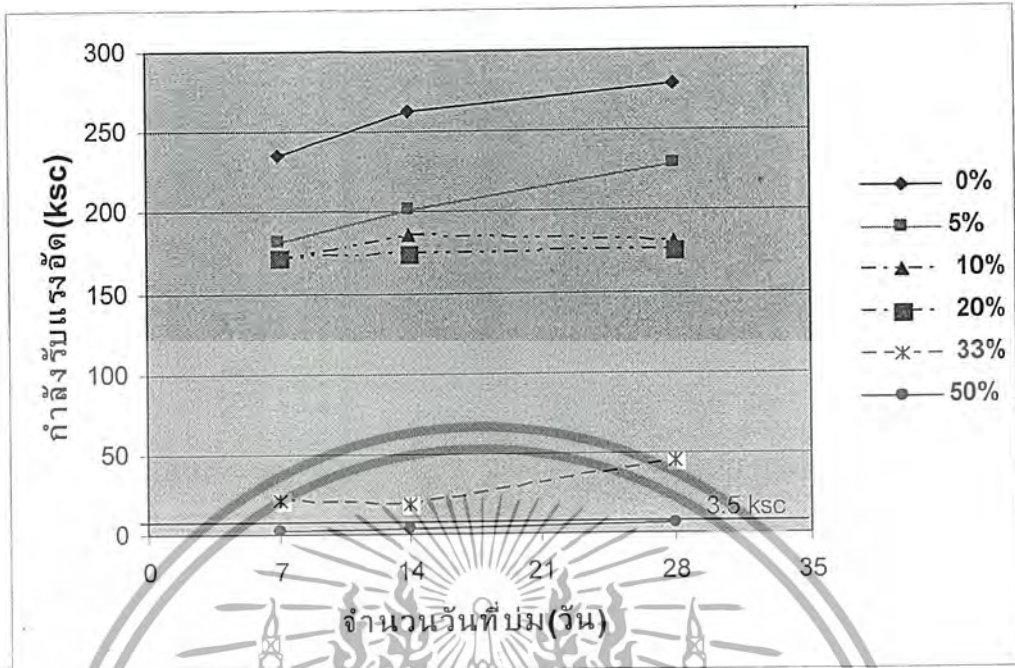


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น (ตันต่อลูกบาศก์เมตร) กับเปอร์เซ็นต์เถ้าในซีเมนต์ที่จำนวนวันในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

จากผลการทดสอบ พบว่าเปอร์เซ็นต์เถ้าในซีเมนต์ไม่มีผลต่อความหนาแน่นของก้อนคอนกรีต แต่ทุกก้อนมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ ไม่นต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

#### 4.2.2 อิทธิพลของจำนวนวันในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต

การบ่มมีความสำคัญต่อความแข็งแรงของก้อนคอนกรีต เนื่องจากการบ่มจะช่วยป้องกันการสูญเสียน้ำจากเนื้อคอนกรีต และรักษาอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม ในการทดสอบได้ทำการบ่มก้อนคอนกรีตที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ซึ่งผลการทดลอง แสดงในรูปที่ 4.3



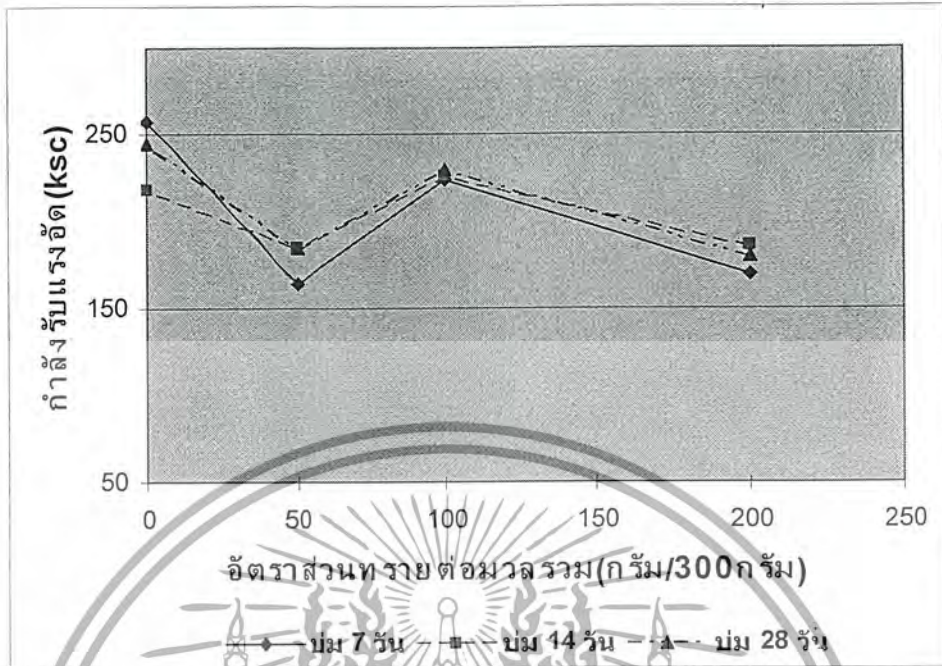
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (ksc) กับ จำนวนวันในการบ่มก้อนคอนกรีตที่เปอร์เซ็นต์ได้ในซีเมนต์ 0, 5, 10, 20, 33 และ 50

จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้น เนื่องจาก เมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้น จะช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนา กำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตเป็น ไปอย่างต่อเนื่อง

จากค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ พบว่าทั้งที่ระยะเวลาในการบ่ม 7, 14 และ 28 วันต่างมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้คือ ไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

#### 4.2.3 อิทธิพลของปริมาณทรายต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต

ในการทดลองได้เลือกอัตราส่วนของเถ้าต่อซีเมนต์ ที่ 10:90 หรือเปอร์เซ็นต์ของเถ้าในซีเมนต์เป็น 10 % มาทำการแปรค่าอัตราส่วนปริมาณทรายต่อมวลรวมเป็น 100:300 50:300 และ 0:300 ในขณะที่ยังคงปริมาณของมวลรวม ซึ่งได้แก่ เถ้า, ซีเมนต์, และทรายไว้เท่าเดิม ซึ่งผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด (ksc) กับอัตราส่วนปริมาณทรายต่อมวลรวม (กรัมต่อ 300 กรัม) ที่จำนวนวันในการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ปริมาณทรายไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต แต่ทุกค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ คือ ไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

#### 4.3 การศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย

หลังจากทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อกำลังรับแรงอัด และความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 จากนั้นจึงทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้มาตรฐานวิธีการสกัดสารตามหลักเกณฑ์ในท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และทำการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำชะละลายด้วยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) โดยโลหะหนักที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ สังกะสี (Zn), ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) เนื่องจากโลหะหนักทั้งสามตัวนี้มีปริมาณมากในเถ้ารวมถึงจะมีอันตรายมาก ถ้าได้รับในปริมาณที่เกินเกณฑ์มาตรฐาน โดยได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

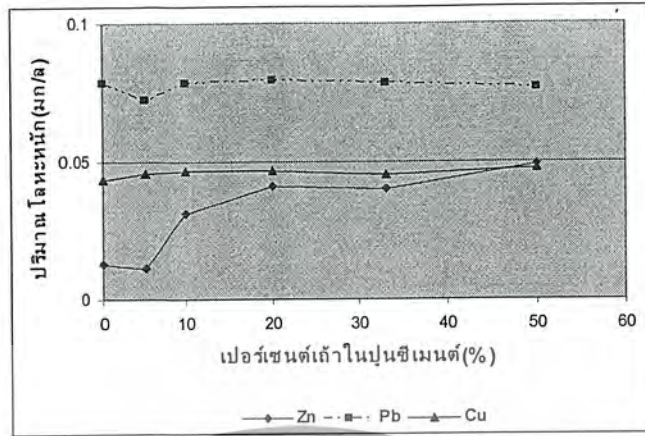
#### 4.3.1 อิทธิพลของปริมาณเถ้าต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย

ทำการทดลองโดยทำการแปรค่าอัตราส่วนเถ้าขยะต่อซีเมนต์ เพื่อศึกษาถึงปริมาณเถ้าขยะที่มีต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก. / ลิ.) โดยใช้อัตราส่วนเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.2.1 ผลของปริมาณโลหะหนัก ในน้ำชะละลายแสดงดังรูปที่ 4.5 ซึ่งผลการทดลอง โดยละเอียดสามารถดูได้จากภาคผนวก

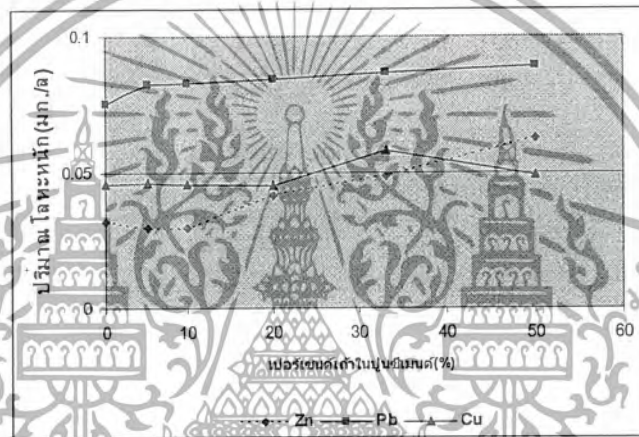
จากรูปที่ 4.5 พบว่า สังกะสี (Zn) มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเปอร์เซ็นต์เถ้าในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเถ้าไปแทนที่ปูนซีเมนต์มากขึ้น ความแข็งแรงของก้อนคอนกรีตจึงลดต่ำลง ทำให้ความสามารถในการจับโลหะหนักของก้อนคอนกรีตลดลง ปริมาณของสังกะสีจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่สำหรับปริมาณของตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) กลับมีแนวโน้มที่คงที่ โดยที่มาตรฐานความเข้มข้นของ สังกะสี และตะกั่ว ในน้ำชะละลาย เป็น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนทองแดง เป็น 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งปริมาณที่พบในน้ำชะละลายของโลหะหนักทั้งสามชนิดนั้น ปรากฏว่าไม่มีชนิดใดเลยที่เกินมาตรฐาน

#### 4.3.2 ผลของระยะเวลาในการบ่มต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย

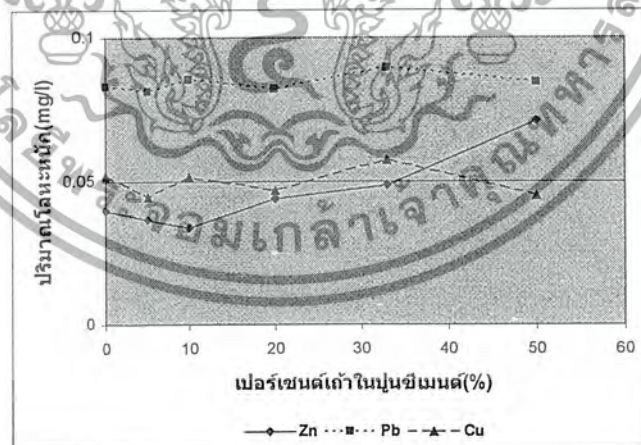
ในที่นี้จะเลือกผลการทดลองจากอัตราส่วนเถ้าต่อซีเมนต์ที่ 50:50 เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้ ก้อนคอนกรีตมีความแข็งแรง (ค่ากำลังรับแรงอัด) น้อยที่สุด ดังนั้นโอกาสที่จะพบโลหะหนักจึงมีสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่น โดยผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.5



(ก)



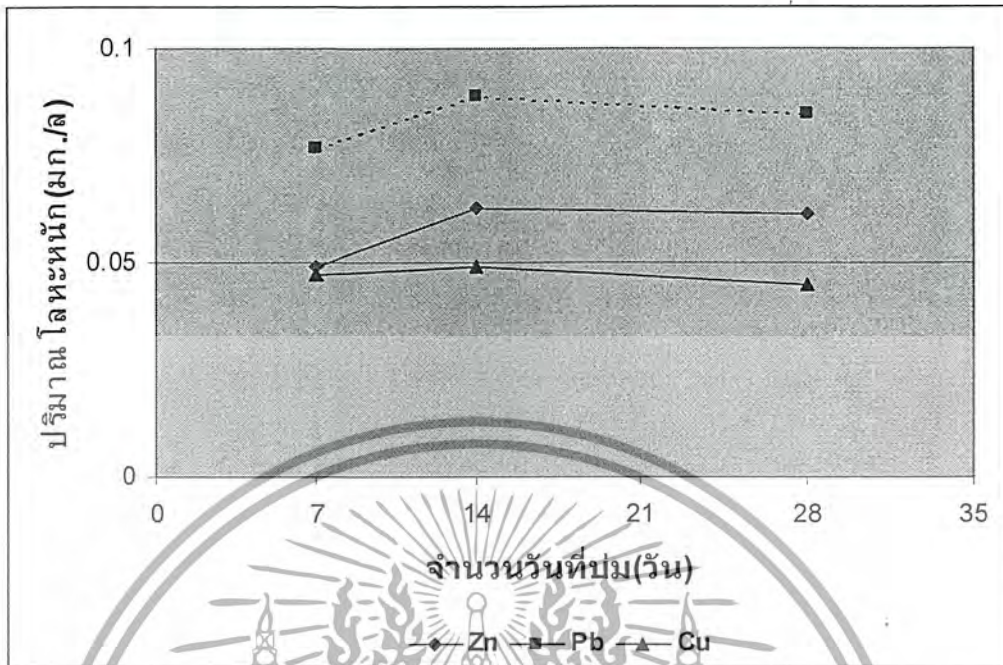
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล.) กับ ปริมาณเถ้าในซีเมนต์ ที่ระยะเวลาบ่ม ก) 7 วัน ข) 14 วัน ค) 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



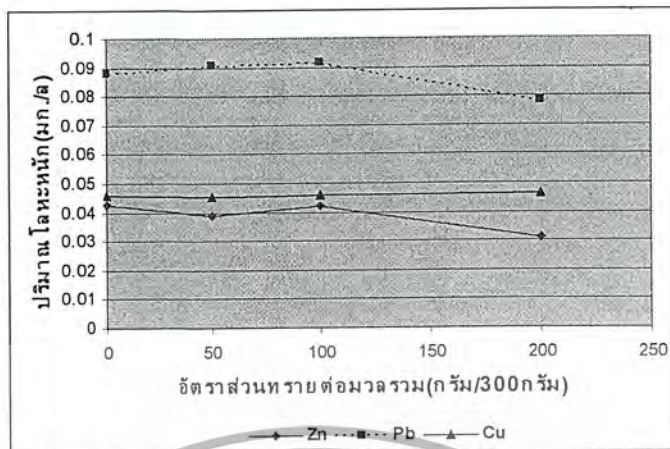
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก./ล) กับจำนวนวันในการบ่ม(วัน)

จากผลการทดลอง จะเห็นว่า จำนวนวันที่บ่มไม่มีผลต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่พบในน้ำชะละลายทั้งสังกะสี (Zn), ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม คือ 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูป 4.6

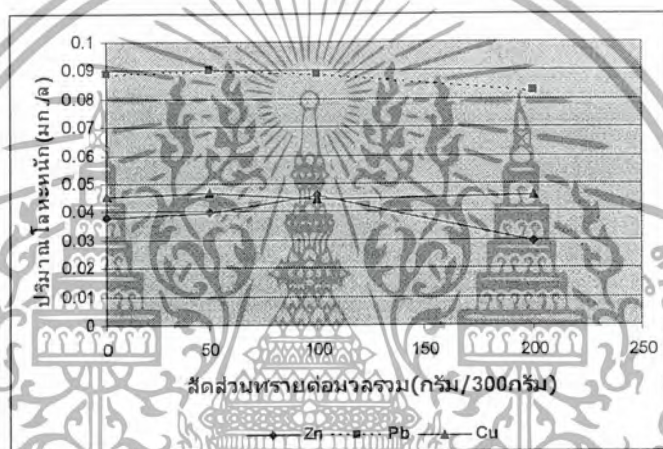
#### 4.3.3 ผลของปริมาณทรายต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย

ทำการทดลองโดยทำการแปรค่าอัตราส่วนทรายต่อมวลรวม เพื่อศึกษาถึงปริมาณของทรายที่มีต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย (มก. /ล.) โดยใช้ปัจจัยต่างๆ เหมือนดังหัวข้อที่ 4.2.3 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 ซึ่งผลการทดลองโดยละเอียดสามารถดูได้จากภาคผนวก

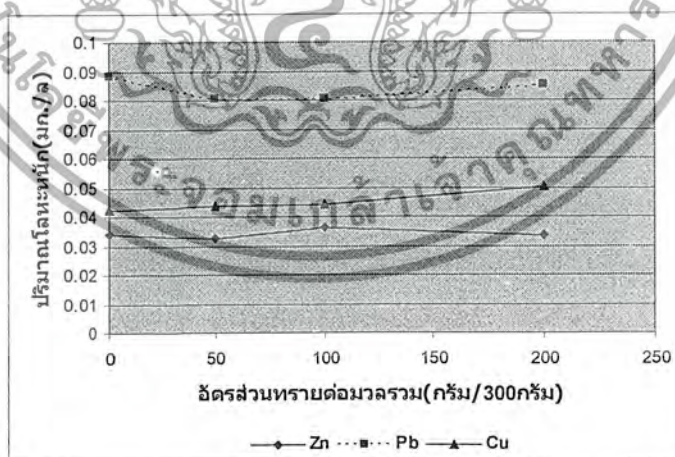
จากผลการทดลอง จะเห็นปริมาณทรายไม่มีผลต่อปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่พบในน้ำชะละลายทั้งสังกะสี (Zn) ตะกั่ว (Pb) และทองแดง (Cu) ต่างมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานทั้งหมด



(ก)



(ข)



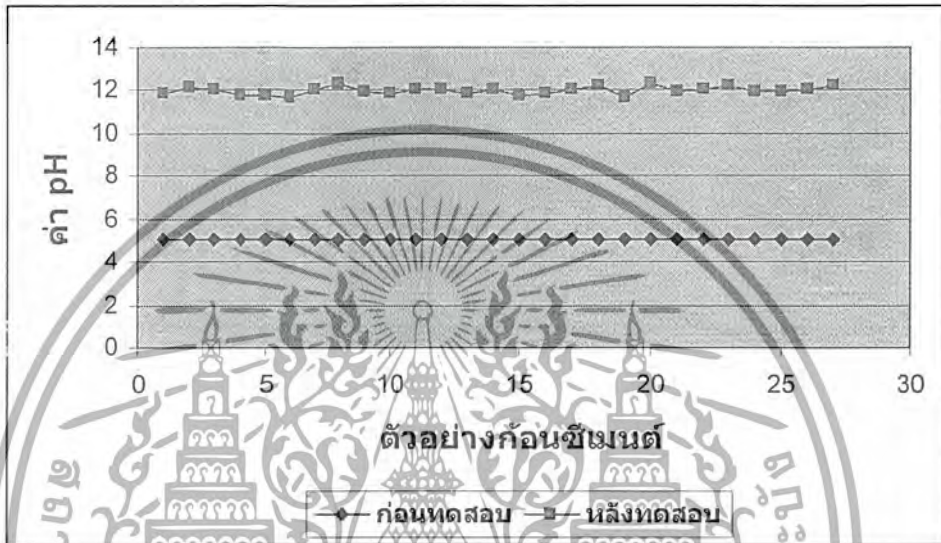
(ค)

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โลหะหนักในน้ำชะละลายกับอัตราส่วนของปริมาณทรายต่อมวลรวม (กรัมต่อ300กรัม) ที่ระยะเวลาการบ่ม ก) 7 วัน ข) 14 วัน ค) 28 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.4 ผลของค่า pH ต่อการชะละลายของโลหะหนัก

ในการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนคอนกรีตในหัวข้อที่ 4.3 นั้น พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่พบมีปริมาณน้อยมาก จึงได้ทำการหาสาเหตุโดยศึกษาถึงค่า pH ของน้ำชะละลาย หลังจากทำการทดสอบการชะละลายก้อนคอนกรีต ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำชะละลายก่อน และหลังการทดสอบ การชะละลายก้อนคอนกรีต

จากรูปที่ 4.8 พบว่า หลังจากทำการทดสอบการชะละลายตัวอย่างก้อนคอนกรีต ค่า pH ของน้ำชะละลายได้เพิ่มสูงขึ้นมาก คือ จาก pH เริ่มต้นที่ 5 เพิ่มขึ้นเป็น pH ประมาณ 11-12 ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบในซีเมนต์ เช่น แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ), แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) และ อลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) โดยเฉพาะแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซึ่งมีถึงร้อยละ 65 (เฉลิมราชและ พิณชูภรณ์, 2547) เกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง จึงทำให้ค่า pH ในน้ำชะละลายสูงขึ้นเป็นอย่างมาก เมื่อค่า pH ในน้ำชะละลายสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถในการชะละลายโลหะหนักลดลง เนื่องจากโลหะหนักมีโอกาสดกตะกอนที่ pH สูงๆ ทำให้พบโลหะหนักน้อยในน้ำชะละลาย (สำนักวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2545)

ในการทดสอบการชะละลายโลหะหนัก โดยวิธีสกัดสารตามท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (2540) ไม่ได้กำหนดให้เติมสารบัฟเฟอร์ใดๆ เพื่อควบคุมค่า pH แต่ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาตรฐานของ US.EPA Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) มีการกำหนดให้เติมสารอะซิเตดบัฟเฟอร์ ซึ่งสามารถควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงประมาณ 5 ลงไปในการทดสอบการชะละลาย ทำให้ค่า pH คงที่ อยู่ในช่วงประมาณ 5 ซึ่งลดการตกตะกอนของโลหะหนักได้ดี ดังนั้นเพื่อการแก้ปัญหาในการตกตะกอนของโลหะหนักในน้ำชะละลาย จึงควรมีการพิจารณาถึงปัจจัยที่ส่งผล ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยการศึกษาหาส่วนประกอบของเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล และการทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement-Based Solidification) ได้ทำการทดลองศึกษาปัจจัยต่างๆทั้งทางกายภาพ และทางด้านเคมีซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าจากเตาเผาขยะ โรงพยาบาล โดยใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFs) พบว่า เถ้ามีองค์ประกอบสำคัญ 4 ชนิด คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) 25%, ซิลิกอนออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) 15%, คลอไรด์ (Cl) 14%, และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) 12% ซึ่งทั้งหมดมีปริมาณรวมมากกว่าร้อยละ 60

2. จากการศึกษาโดยแปรค่าอัตราส่วนของเถ้าต่อซีเมนต์ในส่วนผสมของก้อนคอนกรีต ที่ 0:100, 5:95, 10:90, 20:80, 33:67 และ 50:50 ซึ่งพบว่าค่าการรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต จะมีการลดลงตามเปอร์เซ็นต์ (%) เถ้าในซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าต่อซีเมนต์ คือ 40 %

3. จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนวันในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต โดยทำการบ่มที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ของระยะเวลาที่บ่มต่าง ๆ กันมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด คือ มีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4. จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณทรายต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต พบว่า ปริมาณทรายไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต และค่ากำลังรับแรงอัดก็มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด

5. จากการทดสอบการชะละลายของก้อนคอนกรีต พบว่ามีการปนเปื้อนของสังกะสี ตะกั่ว และทองแดง จากในปัจจัยของปริมาณเถ้า และระยะเวลาที่บ่มก้อนคอนกรีต มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม คือ สังกะสีไม่เกิน 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ตะกั่วและทองแดงไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

6. จากการทดสอบการชะละลายของก้อนคอนกรีตพบว่า ในน้ำชะละลายมีค่า pH สูงขึ้นเป็นอย่างมาก เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างองค์ประกอบในซีเมนต์กับน้ำเกิดสารที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ทำให้ความสามารถในการชะละลายโลหะหนักน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองโดยศึกษาถึงโลหะหนักชนิดอื่นในฝ้าขยและในน้ำขย
2. การศึกษาการใช้สารสกัดประเภทต่างๆ สำหรับการทดสอบการขยขย โดยเฉพาะสารสกัดที่มีการควบคุม ค่า pH โดยระบบบัฟเฟอร์ เช่น อะซีเตดบัฟเฟอร์ ตามมาตรฐานของ US.EPA.
3. การศึกษาฝ้าขยประเภทอื่นๆ นอกเหนือจากฝ้าขยจากเตาเผาขยโรงพยาบาล เช่น ฝ้าขยอุตสาหกรรม ฝ้าขยชุมชน เป็นต้น
4. ศึกษาปัจจัยอื่นๆที่มีผลคุณสมบัติต่อก่อนคอนกรีต เช่น คลอไรด์ (Cl) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- กนกพร ชัยวุฒิกุล และ วรวิทย์ ชัยวรรณ. 2542. การศึกษาการชะละลายของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนในปริมาณสูง. ปรินญาณิพนธ์ ปรินญาณิวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- กรมควบคุมมลพิษ. 2544. การจัดการของเสียอันตรายในรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2544 หน้า 100
- กษมา เพชรทับทิม และ พงศ์ภัทร ศรีขจร. 2545. การบำบัดน้ำเสียที่มีโครเมียม (VI) และตะกั่ว (II) โดยวิธีการระเหยด้วยพลังงานแสงอาทิตย์และกระบวนการยัดจับด้วยซีเมนต์. ปรินญาณิพนธ์ ปรินญาณิวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต.
- คณะกรรมการบริหารความเสี่ยงทางกายภาพและสิ่งแวดล้อม โรงพยาบาลศรีนครินทร์. 2545. การกำจัดขยะมูลฝอยในโรงพยาบาลศรีนครินทร์. คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- เฉลิมราช วันทวิน และ พิณชุกรณ์ ชอบเที่ยงธรรม. 2004. การหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากโรงชุบโลหะโครเมียมด้วยปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยติกไนต์และปูนทรายดำ ใน วารสารการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 3 หน้า 759-765 : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย
- ธีระชาติ รื่นไกรฤกษ์. 2543. คุณสมบัติความกันความเครียดของวัสดุปรับปรุงคุณภาพด้วยซีเมนต์ภายใต้การทดสอบกำลังรับแรงอัดแนวตั้ง. กรุงเทพฯ : ศูนย์วิจัยและพัฒนางานทางกรรมทางหลวง กระทรวงคมนาคม.
- ประณต กุลประสูต. 2538. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : อมรินทร์พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง
- เปรมชัย บูรณวนิช. 2542. คุณสมบัติด้านกำลังคอนกรีตบดอัดผสมเถ้าลอยในปริมาณสูงที่ใช้วัสดุมวลหยาบต่างกัน. ปรินญาณิพนธ์ ปรินญาณิวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 2, 2539. เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน : ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535.  
กระทรวงอุตสาหกรรม
- พอลลูชันแคร์. [ม.ป.ป.]. หลักการทำงานเตาเผาขยะ. [ม.ป.ท.]
- พัศยศ สมวงษ์ และ โภคิน พันธุ์นิคม. 2542. การศึกษาการรับแรงอัดของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนในปริมาณสูง. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ยงยุทธ บุญจันทร์, อัมพร บุศรีงษ์ และ วิมลภ ไทยเหนือ. 2544. การจัดการมูลฝอยของเทศบาลในประเทศไทย. กรุงเทพฯ : สำนักงานอนามัยสิ่งแวดล้อม กรมอนามัย.
- วินิต ช่อวินิจ. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สำนักวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2545. การพัฒนาการใช้ประโยชน์ถ่าน  
ล้อยกในเตาไทย. LAB TODAY 2(1): 29-35 ใน เอกสารประกอบการสัมมนาทาง  
วิชาการโดยกลุ่มพัฒนาการใช้ประโยชน์ถ่านล้อยกในเตา สำนักวิจัยและพัฒนาการไฟฟ้าฝ่าย  
ผลิตแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ : บริษัทฐานการพิมพ์ จำกัด
- Bishop, P.L. 1988. Leaching of Inorganic Hazardous Constituents from Stabilized/  
Solidified Hazardous Waste. Haz. Waste. Vol 5: 129 – 143
- Chandler and Barnes. 1981. Laboratory experiments in general chemistry. London. Glenco.
- Chang, C.L. 1989. Solidification of Heavy Metals Using Cement and Rice Husk Ash. Thesis  
No.EV-89-15 Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand
- Fitch, J.R. and Cheeseman, C.R. 2003. Characterisation of environmentally exposed cement-  
based stabilized/solidified industrial waste. **Journal of Hazardous Material A**101:  
239-255.
- Flemings, M.C. 1974. **Solidification processing**. New York: McGraw-Hill.
- Idris, A. and Saed, K. 2002. Characteristics of slag produced from incinerated hospital waste.  
**Journal of Hazardous Materials B**93: 201-208.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- Jaggi, N. 1990. **Solidification of Laboratory Waste Using Cementitious Binders.** Thesis No.EV 90 - 20, Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand
- Mean, J.L. *et al* .1995. **The application of solidification/stabilization to waste materials** Boca: Lewis
- Milestone Laboratory. 1994 . Ashes of polluted soil and siliceous soil with organi. **Application Notes Microwave Digestion.** Report code: 216-223.
- Shin, H.S. 1988. **Factor Affecting Solidification of Hazardous Materials.** Hazardous Waste Detection Control Treatment: 1549-1560
- Soroka, I. 1979. **Portland cement paste and Concrete.** New York: Chemical
- Youcaf, Z., Lijie, S. and Guojian, L, 2002. Chemical stabilization of MSW incinerator fly ashes. **Journal of Hazardous Materials B95:** 47-63.  
<http://ecfr.gpoaccess.gov/> access on 19 March 2004.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ตารางแสดง องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำ

ตาราง ก-1 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำ (%)

ส่วนประกอบ	ปริมาณในถ้ำ (%)								
	ช่วงที่ 1		ช่วงที่ 2						
	31 ก.ค.	1 ส.ค.	15 ก.ย.	16 ก.ย.	17 ก.ย.	18 ก.ย.	19 ก.ย.	20 ก.ย.	21 ก.ย.
CaO	24.00	23.80	25.70	24.20	25.00	25.20	32.00	24.20	24.40
SiO <sub>2</sub>	14.60	15.00	10.20	17.20	15.20	13.00	17.10	14.50	14.60
Cl	12.30	13.80	15.90	13.10	14.80	16.20	9.61	16.20	12.10
SO <sub>3</sub>	11.80	10.50	17.50	10.70	10.70	12.10	10.30	10.90	14.70
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.30	9.80	5.31	8.40	7.82	7.17	7.94	7.56	7.63
TiO <sub>2</sub>	7.53	6.76	8.34	8.32	8.54	8.46	6.95	7.77	9.21
Na <sub>2</sub> O	4.56	6.29	4.68	4.10	4.62	4.83	2.96	5.29	3.00
ZnO	5.09	4.39	6.90	5.21	5.23	6.01	4.36	5.41	6.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3.43	2.69	2.98	3.95	3.75	3.54	2.70	4.55	3.44
MgO	2.33	2.24	2.13	3.36	2.51	2.16	4.84	2.63	2.79
K <sub>2</sub> O	1.93	2.19	2.34	1.79	2.21	2.52	1.16	2.34	2.03
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.80	0.90	0.68	1.08	1.51	0.94	1.09	0.96	0.80
BaO	0.79	0.60	0.43	0.64	0.76	0.59	0.55	0.04	0.57
CuO	0.65	0.56	0.19	0.34	0.23	0.35	0.25	0.31	0.21
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.11	0.09	0.12	0.11	0.13	0.11	0.09	0.09
PbO	0.50	0.08	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03
Br	0.05	0.07	0.06	0.08	0.06	0.08	0.08	0.07	0.10
ZrO <sub>2</sub>	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05
SrO	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02
MnO	0.04	0.02	0.02	0.04	0.07	0.04	0.03	0.07	0.02
NiO	0.22	0.02	0.01	0.02	0.01	0	0.03	0	0.02
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
CoO	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้า (มก. / กก.)

ส่วนประกอบ	ปริมาณในเถ้า (มก. / กก.)								
	ช่วงที่ 1 (2546)		ช่วงที่ 2 (2546)						
	31ก.ค.	1 ต.ค.	15 ก.ย.	16 ก.ย.	17 ก.ย.	18 ก.ย.	19 ก.ย.	20 ก.ย.	21 ก.ย.
CaO	171,430	170,000	183,571	172,857	178,571	180,000	228,571	172,587	174,286
SiO <sub>2</sub>	68,130	70,000	47,600	80,267	70,933	60,667	79,800	67,667	68,133
Cl	123,000	138,000	159,000	131,000	148,000	162,000	96,100	162,000	121,000
SO <sub>3</sub>	47,200	42,000	70,000	42,800	42,800	48,400	41,200	43,600	58,800
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43,940	51,880	28,112	4,471	41,400	37,659	42,035	40,024	40,394
TiO <sub>2</sub>	45,180	40,560	50,040	49,920	51,240	50,760	41,700	46,620	55,260
Na <sub>2</sub> O	33,830	46,670	34,720	30,420	34,280	35,840	21,960	39,250	22,260
ZnO	40,910	35,280	55,454	41,872	42,033	48,301	35,040	43,479	55,293
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	14,980	11,750	13,010	17,250	16,370	15,460	11,790	19,670	15,020
MgO	14,100	13,550	13,050	20,580	15,370	13,230	29,650	16,110	17,090
K <sub>2</sub> O	16,010	18,170	19,420	14,850	18,340	20,910	9,630	19,420	16,840
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,600	18,170	19,420	14,850	18,340	20,910	9,630	19,420	16,840
BaO	7,100	5,330	3,840	5,690	6,770	5,260	4,920	3,200	5,140
CuO	5,170	4,440	1,526	2,716	1,821	2,820	1,973	2,452	1,653
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	920	760	628	828	753	917	760	640	628
PbO	4,594	710	472	365	400	300	247	335	272
Br	540	720	610	760	550	750	760	660	970
ZrO <sub>2</sub>	360	370	440	370	550	750	760	660	970
SrO	240	200	550	250	240	190	240	210	200
MnO	300	190	160	320	510	320	260	560	170
NiO	170	170	120	190	100	0	240	0	130
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120	110	130	120	130	120	110	120	150
CoO	0	0	0	0	0	0	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การคำนวณองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าในรูป มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม

(มก. / กก.)

#### 1. ข้อมูลที่จำเป็นต้องทราบ

- ปริมาณในรูป เปอร์เซ็นต์, มวลอะตอม, มวลโมเลกุล ขององค์ประกอบที่ต้องการจะคำนวณ

#### 2. การคำนวณปริมาณองค์ประกอบต่างๆในเถ้า

$$Y \text{ (มก.)} = \frac{AW. * \% * 1000 * X \text{ (ก.)}}{MW. * 100} \dots (1)$$

โดยที่ Y คือ ปริมาณแท้จริงขององค์ประกอบที่เราต้องการคำนวณ (มิลลิกรัม)

X คือ น้ำหนักของเถ้าที่นำมาทดสอบ (กรัม)

% คือ ปริมาณในรูปเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบที่ทดสอบ

AW. คือ มวลอะตอมขององค์ประกอบที่ทดสอบ

MW. คือ มวลโมเลกุลขององค์ประกอบที่ทดสอบ

#### 3. การเปรียบเทียบหน่วยเป็น มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม โดยคำนวณดังนี้

ใน X กรัม มี Y มิลลิกรัม

ดังนั้น ใน 1000 กรัม (1 กก.) จึงมีเท่ากับ  $\frac{Y \text{ (มก.)} * 1000}{X \text{ (ก.)}}$

X (ก.)

หน่วยเป็น มิลลิกรัม ต่อ กิโลกรัม (มก. / กก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ก

## ปริมาณโลหะหนักในการทดสอบการชะละลาย และการย่อยสลายด้วย

## ไมโครเวฟ (มก./ ล, มก./กก.ถ้ำ)

ตาราง ก-1 ปริมาณโลหะหนักในการทดสอบการชะละลาย (มก./ ล, มก./กก.ถ้ำ)

ชนิดโลหะหนัก	ตัวอย่างวันที่ (กันยายน 2546)	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ ล)	ปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.ถ้ำ)	
สังกะสี (Zn)	17	ครั้งที่ 1	0.097	1.940
		ครั้งที่ 2	0.044	0.880
		ครั้งที่ 3	0.034	0.680
		ค่าเฉลี่ย	0.058	1.160
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.028	0.677
		19	ครั้งที่ 1	0.053
	ครั้งที่ 2	0.06	1.200	
	ครั้งที่ 3	0.053	1.060	
	ค่าเฉลี่ย	0.055	1.100	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.004	0.081	
	20	ครั้งที่ 1	0.156	3.120
	ครั้งที่ 2	0.093	1.860	
ครั้งที่ 3	0.068	1.360		
ค่าเฉลี่ย	0.106	2.120		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.037	0.907		
ตะกั่ว (Pb)	17	ครั้งที่ 1	0.069	1.380
		ครั้งที่ 2	0.086	1.720
		ครั้งที่ 3	0.132	2.640
		ค่าเฉลี่ย	0.096	1.920
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.027	0.652
		19	ครั้งที่ 1	0.107
	ครั้งที่ 2	0.105	2.100	
	ครั้งที่ 3	0.153	3.060	
	ค่าเฉลี่ย	0.121	2.420	
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.027	0.543	
	20	ครั้งที่ 1	0.076	1.520
		ครั้งที่ 2	0.077	1.540
		ครั้งที่ 3	0.099	1.980
		ค่าเฉลี่ย	0.084	1.680
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.013	0.260

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 ปริมาณโลหะหนักในการย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (มก./ล, มก./กก.แห้ง)

ชนิดโลหะหนัก	ตัวอย่างวันที่ (กันยายน 2546)	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล.)			ปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.แห้ง)	
			วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2
สังกะสี (Zn)	15	ครั้งที่ 1	565	339	5650	6780
		ครั้งที่ 2	566	339	5660	6780
		ค่าเฉลี่ย	566	339	5655	6780
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.18	0.00	7.07	0.00
	18	ครั้งที่ 1	620	700	6200	14000
		ครั้งที่ 2	620	701	6200	14020
		ค่าเฉลี่ย	620	701	6200	14010
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.06	0.16	0.00	14.14
	21	ครั้งที่ 1	1737	1383	17370	27660
		ครั้งที่ 2	1741	1378	17410	27560
		ค่าเฉลี่ย	1739	1380	17390	27610
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.72	2.50	28.28	70.71
ตะกั่ว (Pb)	15	ครั้งที่ 1	48	23	480	460
		ครั้งที่ 2	49	17	490	340
		ค่าเฉลี่ย	49	20	485	400
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.38	3.02	7.07	84.85
	18	ครั้งที่ 1	16	20	160	400
		ครั้งที่ 2	17	21	170	420
		ค่าเฉลี่ย	17	20	165	410
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.39	0.78	7.07	14.14
	21	ครั้งที่ 1	72	99	720	1980
		ครั้งที่ 2	67	81	670	1620
		ค่าเฉลี่ย	70	90	695	1800
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	2.57	9.32	35.36	254.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 (ต่อ) ปริมาณโลหะหนักในการย่อยสารด้วยไมโครเวฟ (มก./ล, มก./กก.ถ้ำ)

ชนิดโลหะหนัก	ตัวอย่างวันที่ (กันยายน 2546)	ปริมาณโลหะหนัก			ปริมาณโลหะหนัก	
		(มก./ล.)			(มก./กก.ถ้ำ)	
			วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2
ทองแดง (Cu)	15	ครั้งที่ 1	77	37	770	740
		ครั้งที่ 2	77	37	770	740
		ค่าเฉลี่ย	77	37	770	740
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.04	0.07	0.00	0.00
	18	ครั้งที่ 1	95	76	950	1520
		ครั้งที่ 2	94	75	940	1500
		ค่าเฉลี่ย	95	76	945	1510
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.43	0.17	7.07	14.14
	21	ครั้งที่ 1	86	61	860	1220
		ครั้งที่ 2	86	60	860	1200
		ค่าเฉลี่ย	86	61	860	1210
		ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.05	0.71	0.00	14.14

ตาราง ก-3 ปริมาณโลหะหนักในการทดสอบการชะละลาย (มก./ล, มก./กก.ถ้ำ) ของถ้ำ  
รวมที่ได้จากตัวอย่างถ้ำทั้ง 7 วัน

ถ้ำรวม 7 วัน	ปริมาณโลหะหนัก (มก./ล.)			ปริมาณโลหะหนัก (มก./กก.ถ้ำ)		
	Zn	Pb	Cu	Zn	Pb	Cu
	0.086	0.095	0.133	1.720	1.900	2.660
	0.063	0.125	0.085	1.260	2.500	1.700
	0.075	0.088	0.102	1.500	1.760	2.040
ค่าเฉลี่ย	0.075	0.103	0.107	1.493	2.053	2.133
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.012	0.020	0.024	0.230	0.393	0.487

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

## รายละเอียด และสมบัติของก้อนคอนกรีต

ตาราง ง-1 รายละเอียดของก้อนคอนกรีต

ชุดตัวอย่าง	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	%เถ้า/ซีเมนต์	เถ้า (ก.)	ซีเมนต์ (ก.)	ทราย (ก.)	น้ำ (มล.)
7A	7					
14A	14	0	0	100	200	50
28A	28					
7B	7					
14B	14	5	5	95	200	50
28B	28					
7C	7					
14C	14	10	10	90	200	50
28C	28					
7D	7					
14D	14	20	20	80	200	50
28D	28					
7E	7					
14E	14	33	33	67	200	50
28E	28					
7F	7					
14F	14	50	50	50	200	50
28F	28					
7G	7					
14G	14	10	20	180	100	50
28G	28					
7H	7					
14H	14	10	25	225	50	50
28H	28					
7I	7					
14I	14	10	50	250	0	50
28I	28					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-2 สมบัติของก้อนคอนกรีต

ชุดตัวอย่าง	กว้าง (ซม.)	ยาว (ซม.)	สูง (ซม.)	ปริมาตร (ม <sup>3</sup> × 10 <sup>6</sup> )	น้ำหนัก (กก.)	ความหนาแน่น (ตัน /ม <sup>3</sup> )	กำลังรับแรงอัด (กก. /ซม <sup>2</sup> )
7A	5.07	4.98	5.11	129.02	0.2542	1.97	235.33
14A	5.05	4.98	5.12	128.76	0.2588	2.01	262.25
28A	5.10	5.13	5.01	131.08	0.2677	2.04	278.80
7B	5.04	5.13	5.01	129.53	0.2560	1.98	181.15
14B	4.99	5.03	5.07	127.26	0.2599	2.04	202.20
28B	5.03	5.11	5.08	130.57	0.2591	1.98	228.58
7C	4.92	4.99	5.13	125.95	0.2499	1.98	170.30
14C	5.03	4.91	5.02	123.98	0.2496	2.01	185.66
28C	5.10	5.01	5.00	127.76	0.2562	2.01	180.45
7D	5.01	5.02	5.09	128.01	0.2553	1.99	172.10
14D	4.98	5.11	5.10	129.78	0.2679	2.06	173.84
28D	5.12	4.94	5.04	127.48	0.2618	2.05	175.45
7E	4.97	5.06	5.02	126.24	0.2489	1.97	20.76
14E	5.07	4.99	5.03	127.26	0.2530	1.99	18.13
28E	5.03	5.02	5.11	129.03	0.2597	2.01	45.12
7F	5.01	5.07	5.15	130.81	0.2649	2.03	2.15
14F	4.95	5.05	5.17	129.24	0.2540	1.97	3.30
28F	5.05	5.05	5.01	127.77	0.2553	2.00	5.82
7G	4.93	4.98	5.05	123.98	0.2422	1.95	223.96
14G	5.02	4.97	5.07	126.49	0.2526	2.00	226.07
28G	4.98	5.06	5.12	129.02	0.2596	2.01	229.25
7H	5.06	5.08	5.13	131.87	0.2617	1.98	164.26
14H	5.01	5.02	5.03	126.51	0.2599	2.05	184.67
28H	5.00	5.03	5.07	127.51	0.2543	1.99	184.95
7I	4.99	5.00	5.18	129.24	0.2568	1.99	257.85
14I	5.08	4.99	5.08	128.77	0.2542	1.97	218.16
28I	4.97	5.09	5.20	131.55	0.2634	2.00	245.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก จ**  
**การเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำชะละลายก่อน และหลัง**  
**การทดสอบการชะละลายก้อนคอนกรีต**

ตาราง จ การเปรียบเทียบค่า pH ของน้ำชะละลายก่อน และหลัง  
 การทดสอบการชะละลายก้อนคอนกรีต

ตัวอย่างก้อน คอนกรีต	ค่า pH		ตัวอย่างก้อน คอนกรีต	ค่า pH	
	ก่อนชะ ละลาย	หลังชะ ละลาย		ก่อนชะ ละลาย	หลังชะ ละลาย
7A	5	11.86	7F	5	11.88
14A	5	12.11	14F	5	12.08
28A	5	12.05	28F	5	12.20
7B	5	11.77	7G	5	11.69
14B	5	11.80	14G	5	12.30
28B	5	11.63	28G	5	11.99
7C	5	12.00	7H	5	12.02
14C	5	12.35	14H	5	12.22
28C	5	11.94	28H	5	11.94
7D	5	11.86	7I	5	11.98
14D	5	12.05	14I	5	12.04
28D	5	12.01	28I	5	12.20
7E	5	11.90			
14E	5	12.03			
28E	5	11.72			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ฉ

### ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535

เรื่อง กำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน

อาศัยอำนาจตามความในข้อ 14 แห่งกฎกระทรวงฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2535) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 ที่ระบุว่า “ห้ามระบายน้ำทิ้งออกจากโรงงานเว้นแต่ได้ทำการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างจนน้ำทิ้งนั้นมีลักษณะเป็นไปตามที่รัฐมนตรีกำหนดโดยประกาศในราชกิจจานุเบกษา แต่ทั้งนี้ต้องไม่ใช่วิธีทำให้เจือจาง (Dilution)” รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม จึงออกประกาศกำหนดคุณลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ดังนี้

ข้อ 1 คำจำกัดความน้ำทิ้ง หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบกิจการ โรงงานอุตสาหกรรม ที่จะระบายลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม และให้หมายความรวมถึงน้ำเสียจากการใช้น้ำของคนงาน รวมทั้งจากกิจกรรมอื่นใน

ข้อ 2 น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงาน ต้องมีคุณสมบัติดังนี้

(1) ความเป็นกรดและด่าง (pH) มีค่าไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0

(2) ทีดีเอส (TDS หรือ Total Dissolved Solids) ต้องมีค่าตั้งแต่ 2.1 ค่าทีดีเอส ไม่มากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร 2.2 น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำที่มีค่าความเค็ม (Salinity) มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรค่า ทีดีเอส ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่า ทีดีเอส ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำได้ไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

(3) สารแขวนลอย (Suspended Solids) ไม่มากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างจากที่กำหนดไว้ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 150 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (4) โลหะหนักมีค่าดังนี้

- 4.1 ปรอท (Mercury) ไม่มากกว่า 0.005 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.2 เซเลเนียม (Selenium) ไม่มากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.3 แคดเมียม (Cadmium) ไม่มากกว่า 0.03 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.4 ตะกั่ว (Lead) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.5 อาร์เซนิก (Arsenic) ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.6 โครเมียม (Chromium)
  - 4.6.1 Hexavalent Chromium ไม่มากกว่า 0.25 มิลลิกรัมต่อลิตร
  - 4.6.2 Trivalent Chromium ไม่มากกว่า 0.75 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.7 บารีียม (Barium) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.8 นิกเกิล (Nickel) ไม่มากกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.9 ทองแดง (Copper) ไม่มากกว่า 2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.10 สังกะสี (Zinc) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
- 4.11 แมงกานีส (Manganese) ไม่มากกว่า 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร

(5) ซัลไฟด์ (Sulphide) คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อ

ลิตร

(6) ไฮยาไนต์ คิดเทียบเป็นไฮโดรเจนไซยาไนด์ ( $HCN$ ) ไม่มากกว่า 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

(7) ฟอรัลดีไฮด์ (Formaldehyde) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(8) สารประกอบฟีนอล (Phenols Compound) ไม่มากกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

(9) กสอริโนอีตระ

(10) เพสตีไซค์ (Pesticide) ไม่ต้องมี

(11) อุณหภูมิ ไม่มากกว่า 40 องศาเซลเซียส

(12) สี ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

(13) กลิ่น ต้องไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

(14) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease) ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 15 มิลลิกรัมต่อลิตร

(15) ค่า บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเวลา 5 วัน ไม่มากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่า 60 มิลลิกรัมต่อลิตร

(16) ค่าทีเคเอ็น (TKN หรือ Total Kjeldahl Nitrogen) ไม่มากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจแตกต่างกันที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม ตามที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด แต่ต้องไม่มากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร

(17) ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ไม่มากกว่า 120 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออาจ แตกต่างจากที่กำหนดไว้ ขึ้นกับปริมาณน้ำทิ้ง แหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรม แต่ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข้อ 3 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมตามข้อ 2 ให้ดำเนินการ ดังต่อไปนี้

(1) การตรวจสอบค่าความเป็นกรดและด่างของน้ำทิ้ง ให้ใช้เครื่องวัดความเป็นกรดและ ด่างของน้ำ (pH Meter)

(2) การตรวจสอบค่า ทีดีเอส ให้ใช้วิธีการระเหยแห้ง ระหว่างอุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ในเวลา 1 ชั่วโมง

(3) การตรวจสอบค่าสารแขวนลอย ให้ใช้วิธีการกรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (Glass Fiber Filter Disc)

(4) การตรวจสอบค่าโลหะหนัก ให้ใช้วิธีการดังนี้

4.1 การตรวจสอบค่าสังกะสี โครเมียม ทองแดง แคลเซียม แมกนีเซียม ตะกั่ว นิกเกิล และ แมงกานีส ให้ใช้วิธีอะตอมมิก แอบซอร์ปชัน สเปกโตรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิด ไครเรคเอนสไพเรชัน (Direct Aspiration) หรือวิธีพลาสมา อีมิตชัน สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลี คัพเพิลด์ พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.2 การตรวจสอบค่าอาร์เซนิก และเซเลเนียม ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตเมตรี (Atomic Absorption Spectrophotometry) ชนิดไฮไดรด์ เจเนอเรชัน (Hydride Generation) หรือวิธีพลาสมา อีมิตชัน สเปกโตรสโคปี (Plasma Emission Spectroscopy) ชนิดอินดักทีฟลีคัพเพิลด์ พลาสมา (Inductively Coupled Plasma : ICP)

4.3 การตรวจสอบค่าปรอท ให้ใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชัน โคลด์ แวปอร์ เทคนิค (Atomic Absorption Cold Vapour Technique)

(5) การตรวจสอบค่าซัลไฟด์ ให้ใช้วิธีการไตเตรท (Titrate)

(6) การตรวจสอบค่าไซยาไนด์ ให้ใช้วิธีกลั่นและตามด้วยวิธีไพริดีน บาร์บิทูริกแอซิด (Pyridine-Barbituric Acid)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (7) การตรวจสอบค่าฟอรัมาลดีไฮด์ ให้ใช้วิธีเทียบสี (Spectrophotometry)
- (8) การตรวจสอบค่าสารประกอบฟีนอล ให้ใช้วิธีกลั่น และตามด้วยวิธี 4-อะมิโนแอนติไพรีน (Distillation, 4-Aminoantipyrine)
- (9) การตรวจสอบค่าคลอรีนอิสระ ให้ใช้วิธีไอโอดิเมตริก (Iodometric Method)
- (10) การตรวจสอบค่าสารที่ใช้ป้องกัน หรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ ให้ใช้วิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas-Chromatography)
- (11) การตรวจสอบอุณหภูมิของน้ำ ให้ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
- (12) การตรวจสอบค่าน้ำมันและไขมัน ให้ใช้วิธีสกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
- (13) การตรวจสอบค่าไนไตรต์ ให้ใช้วิธีอะไซด์ โมดิฟิเคชัน (Azide Modification) ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน ติดต่อกัน หรือวิธีการอื่นที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมให้ความเห็นชอบ
- (14) การตรวจสอบค่าไนโตรเจน ให้ใช้วิธีเจลดาล์ (Kjeldahl)
- (15) การตรวจสอบค่าซีโอดี ให้ใช้วิธีย่อยสลาย โดยโปตัสเซียม ไดโครเมต (Potassium Dichromate Digestion)

ข้อ 4 การตรวจสอบค่ามาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามข้อ 3 จะต้องเป็นไปตามคู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย ของสมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย หรือ Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater ซึ่ง American Public Health Association, American Water Work Association และ Water Environment Federation ของสหรัฐอเมริกา ร่วมกันกำหนดให้ด้วย

ประกาศ ณ วันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

ไชยวัฒน์ สินสุวงศ์

(นายไชยวัฒน์ สินสุวงศ์)

รัฐมนตรีว่าการกระทรวงอุตสาหกรรม

(นายเสถียร วีระวงศ์)

เจ้าหน้าที่บริหารงานธุรการ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข**  
**หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปนื้อกฏ  
 หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว**  
**ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)**

ข้อ 1 การทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามที่กำหนดในภาคผนวกที่ 1 ให้ผู้ประกอบกิจการ โรงงานดำเนินการ โดยวิธีการบำบัด (Treatment) หรือการกำจัด (Disposal) วิธีการใดวิธีการหนึ่ง หรือหลายวิธีต่อเนื่องกัน (Chain treatments) ขึ้นกับลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปนื้อกฏหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วนั้น ๆ ซึ่งต้องได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรม หรือผู้ซึ่งอธิบดีกรมโรงงานอุตสาหกรรมมอบหมาย ดังต่อไปนี้

- 1.1 การบำบัดโดยวิธีฟิสิกส์ (Physical treatment) ได้แก่
  - 1.1.1 การเหวี่ยงแยก (Centrifugation)
  - 1.1.2 การกลั่นแยกด้วยไอน้ำ (Steam distillation and Steam stripping)
  - 1.1.3 การกรองผ่านตัวกรองหลายชั้น (Multi-media filtration)
  - 1.1.4 การกรอง แยกด้วยเยื่อเมมเบรน (Reverse osmosis, Micro-/Ultra-filtration)
  - 1.1.5 การทำระเหย (Evaporation)
  - 1.1.6 การแยกด้วยฟองอากาศ (Air flotation)
  - 1.1.7 การแยกด้วยแรงโน้มถ่วง (Gravity thickening)
  - 1.1.8 การแยกด้วยเครื่องแยกน้ำมันและน้ำมัน (Oil/water separator or Coalescence separator)
- 1.2 การบำบัดโดยวิธีเคมี-ฟิสิกส์ (Physical/chemical treatment) ได้แก่
  - 1.2.1 การชะล้างดิน (Soil washing)
  - 1.2.2 การแยกด้วยอากาศ (Air stripping)
  - 1.2.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon adsorption)
  - 1.2.4 การจับตัวตกตะกอน (Precipitation/Flocculation)
  - 1.2.5 การแยกด้วยอากาศละลายน้ำ และสารเคมี (Dissolved air flotation)
  - 1.2.6 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange)
  - 1.2.7 การสกัดของเหลวด้วยของเหลว (Liquid/liquid extraction)
  - 1.2.8 การกรองรีดน้ำ (Filter press, dewatering, vacuum filtration and belt-press filtration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3 การบำบัดโดยวิธีเคมี (Chemical treatment) ได้แก่
  - 1.3.1 การปรับค่าความเป็นกรดด่างและทำให้เป็นกลาง (Neutralization and pH adjustment)
  - 1.3.2 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน รีดักชัน (Oxidation/reduction reactions)
  - 1.3.3 การทำลายความเป็นพิษด้วยก๊าซโอโซน หรือรังสีเหนือม่วง (Ozonation and UV/Ozonation)
  - 1.3.4 การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis)
  - 1.3.5 การตกตะกอน (Precipitation)
  - 1.3.6 การทำลายคลอรีนอิสระ (Dechlorination)
  - 1.3.7 การทำลายสารประกอบฮาโลเจน (Dehalogenation)
- 1.4 การบำบัดโดยวิธีชีวภาพ (Biological treatment) ได้แก่
  - 1.4.1 ถึงปฏิกิริยาชนิดฟิล์มตรึง (Attached film reactors)
  - 1.4.2 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)
  - 1.4.3 ระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion)
  - 1.4.4 การหมัก (Composting)
  - 1.4.5 ระบบบ่อเลี้ยง (Stabilization ponds)
  - 1.4.6 การย่อยสลายทางชีวภาพแบบอยู่กับที่ (In situ biological decomposition)
  - 1.4.7 การทำลายพิษทางชีวภาพ (Biological detoxification)
- 1.5 การบำบัด หรือการกำจัด โดยกระบวนการใช้ความร้อน (Thermal processes for treatment and/or disposal) ได้แก่
  - 1.5.1 การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Wet-air oxidation)
  - 1.5.2 การฉีดเผาในรูปของเหลว (Liquid injection incineration)
  - 1.5.3 การเผาในเตาเผาซีเมนต์ และการเผาในเตาหมุน (Cement kiln incineration and Rotary kiln incineration)
  - 1.5.4 การเผาในเตาแบบฟลูอิด ไคซ์เบด (Fluidized bed incineration)
  - 1.5.5 การทำระเหยด้วยแสงแดด (Solar evaporation)
- 1.6 การบำบัดโดยกระบวนการปรับเสถียร กระบวนการตรึงสาร กระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Stabilization/fixation/solidification processes) ได้แก่
  - 1.6.1 การหลอมในแก้วหลอม (Molten glass)
  - 1.6.2 การตรึงด้วยสารเคมี (Chemical fixation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6.3 การทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยสารประสาน (Pozzolan and cement-based solidification)

1.6.4 การห่อหุ้มด้วยสารเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic encapsulation)

1.6.5 การทำเป็น โพลีเมอร์ (Polymer encapsulation)

1.7 การบำบัด หรือการกำจัดแบบ land treatment and/or disposal ได้แก่

1.7.1 การทำลายฤทธิ์ในหน้าดิน (Land farming)

1.7.2 การพ่นรดน้ำ (Spray irrigation)

1.7.3 การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Engineered, secured landfill)

1.7.4 การเก็บบนพื้นดินระยะยาว (Above ground long-term storage)

1.7.5 การฉีดลงชั้นน้ำใต้ดินลึก (Deepwell injection)

1.8 ผู้ประกอบการ โรงงานสามารถใช้วิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วโดยวิธีการอื่น ๆ ที่ต่างไปจากที่กำหนดไว้ในข้อ 1.1 ถึงข้อ 1.7 หรือใช้วิธีการอื่น ๆ ที่สามารถพิสูจน์ได้ว่าได้ผลเทียบเท่า หรือดีกว่าวิธีที่กำหนดไว้ หรือเป็นวิธีการที่ลดปริมาณของสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วซึ่งจะต้องนำไปกำจัด ได้โดยการปรับสภาพหรือคุณสมบัติของสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วนั้น ให้นำมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Reuse/recycle) ได้อย่างปลอดภัย ได้แก่ การนำกลับคืนมาใช้ของตัวทำละลาย (Solvent recovery) น้ำมัน (Oil recovery) กรด (Acid regeneration) และ โลหะ (Metals recovery) หรือการทำเชื้อเพลิงผสม (Fuels blending) เพื่อใช้ในการเผาไหม้ในเตาเผาอุตสาหกรรมประเภทอื่นๆ (Co-incineration in industrial kilns/furnaces) หรือการแลกเปลี่ยนของเสีย (Wastes exchange) เพื่อใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต ตลอดจนการใช้บริการการดำเนินการต่าง ๆ ดังกล่าวของบุคคลอื่นแทน

ข้อ 2 สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่ผ่านการปรับเสถียร (Stabilization) และการทำให้เป็นก้อนแข็ง (Solidification) แล้ว จะต้องมีความสมบัติดังต่อไปนี้

2.1 สามารถรับแรงอัด (Unconfined compressive strength) ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-1633 และ D-2166 ได้ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบนเมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบ (Secured landfill) ได้อย่างปลอดภัย

2.2 มีความหนาแน่นไม่ต่ำกว่า 1.15 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

2.3 มีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) เป็นไปตามเกณฑ์ในการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) เพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช้แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์ และปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์ ตามวิธีการที่ระบุในข้อ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก่อนการนำไปฝังกลบ

ข้อ 3 การสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ extraction fluid) ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

3.1 การสกัดสารเพื่อทดสอบหาปริมาณสารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable) จากสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว และเพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิกูลและวัสดุที่ไม่ใช่แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์แล้วนั้น ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

3.1.1 หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วเป็นของเหลว หรือมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 3.2

3.1.2 หากตัวอย่างสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว มีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.5 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) บดตัวอย่างสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ให้เป็นผง แล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

(2) นำตัวอย่างที่ได้จาก (1) หนัก 100 กรัม เติมน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดด่างพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

(3) เขย่าบนเครื่องคววนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

(4) กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

(5) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 3.2

3.2 การวิเคราะห์หาค่าสารอันตรายต่างๆ ในของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วจากข้อ 3.1.1 หรือข้อ 3.1.2 ให้ใช้วิธีมาตรฐาน US EPA SW 846 หรือวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ.2539 ในกรณีที่ผลการวิเคราะห์ของสารละลายจากการสกัด (Leachate) มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน ให้ดำเนินการทำลายฤทธิ์ใหม่ เพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด  
(Leachant หรือ Extraction fluid)

อาร์ซีนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Barium)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เบนซีน (Benzene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอเดน (Chlordane)	0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ออร์โธ-ครีซอล (ortho-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมทา-ครีซอล (meta-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
พารา-ครีซอล (para-Cresol)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ครีซอล (ทั้งหมด) (Cresol (total))	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2-4 ดี (2-4D)	10.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,4 - ไดคลอโรเบนซีน (1,4 - Dichlorobenzene)	7.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,2 - ไดคลอโรอีเทน (1,2 - Dichloroethane)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,1 - ไดคลอโรเอทิลีน (1,1 - Dichloroethylene)	0.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
เอดริน (Endrin)	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลออร์ (Heptachlor and its epoxide)	0.008	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรบิวตาไดเอิน (Hexachlorobutadien)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรอีเทน (Hexachloroethen)	3.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead(total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ลินเดน (Lindane)	0.4	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมธอกซีคลออร์ (Methoxychlor)	10.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4-ไนโตรโทลูอิน (2,4-Nitrotoluene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไพรีดีน (Pyridine)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม (Selenium)	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน (Silver)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เตตราคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	0.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
ทอกซาเฟน (Toxaphene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,5-Trichlorophenol)	400.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6-Trichlorophenol)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5-ทีพี (ซิลเว็กซ์) (2,4,5-TP (Silvex))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไวนิล คลอไรด์ (Vinyl chloride)	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร

ที่มา บัญชีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปนเปื้อนหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามท้ายประกาศ  
กระทรวงอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้