

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำเสถียรภาพและการหล่อแข็ง
ถ้ำลอยจากเตาเผาขยะอันตรายด้วยซีเมนต์



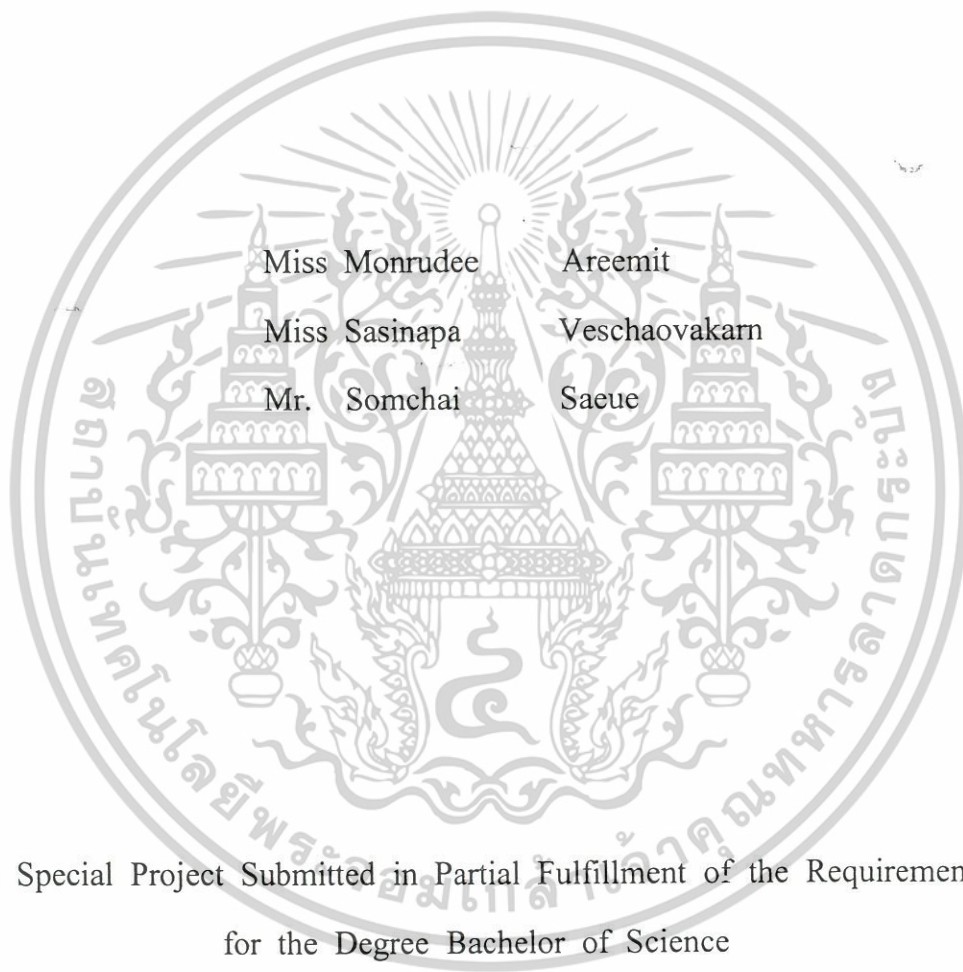
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **62145**
วัน,เดือน,ปี **31 ก.ค. 2549**

b. 11610122
i.

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Factor affecting Cement-based Stabilization / Solidification of Fly Ash
from Hazardous Waste Incinerator



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement
for the Degree Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำเสถียรภาพและการหล่อแข็งใล้ลออกจาก
เตาเผาขยะอันตรายด้วยซีเมนต์

นักศึกษา 1. นางสาว มลฤดี อารีย์มิตร
2. นางสาว ศศินภา เวสส์เซวการ
3. นาย สมชาย แซ่ฮ้อ

ภาควิชา เคมี

สาขาวิชา เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ชลด จารุสุทธิรักษ์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม Dr.Jochen Amrehn

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ดร. สุวรรณี จรรยาพูน ประธานกรรมการ	
ผศ. ดร. ชมพูนุท ไชยรักษ์ กรรมการ	
ดร. ชลด จารุสุทธิรักษ์ กรรมการ	



(ผศ.ดร. ประยงค์ ควงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการทำเสถียรภาพและการหล่อแข็งใถ้ลออกจากเตาเผาขยะอันตรายด้วยซีเมนต์	
นักศึกษา	1. นางสาว มลฤดี	อารีย์มิตร
	2. นางสาว ศศินภา	เวสต์เซวการ
	3. นาย สมชาย	แจ้ฮื้อ
ภาควิชา	เคมี	
สาขาวิชา	เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ชโล จารุศุทธิรักษ์	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	Dr.Jochen Amrehn	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำเสถียรภาพและทำก้อนแข็งใถ้ลออกจากเตาเผาขยะอุตสาหกรรมด้วยวิธีจับยึดด้วยซีเมนต์ ได้แก่ อัตราส่วนใถ้ลล่อยต่อซีเมนต์ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ ระยะเวลาบ่มตัว ปริมาณคลอไรด์ในรูปแคลเซียมคลอไรด์ และปริมาณซัลเฟตในรูปแคลเซียมซัลเฟต จากการศึกษาองค์ประกอบในค่าโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) พบว่าใถ้ลมีองค์ประกอบหลักของแคลเซียม (Ca), คลอไรด์ (Cl) และซัลเฟต (S) ซึ่งสารดังกล่าวเกิดขึ้นจากกระบวนการบำบัดก๊าซพิษหลังการเผา ผลการทดสอบการชะละลายของใถ้ลล่อยพบโลหะหนักในปริมาณสูง ได้แก่ แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb) และ เหล็ก (Fe) จากการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของก้อนคอนกรีต พบว่าการลดอัตราส่วนใถ้ลล่อยต่อซีเมนต์ (FA/CE) 80:20 เป็น 70:30 และ 60:40 และการเพิ่มอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ (S/W) 60:40 เป็น 65:35 และ 70:30 รวมทั้งการเพิ่มขึ้นของระยะเวลาบ่มตัว จาก 3 วัน เป็น 7, 14 และ 28 วัน ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและการชะละลายของโลหะหนักลดลง โดยค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตทุกก้อน มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานคือ 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และค่าการชะละลายโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐานที่ระบุไว้ และที่อัตราส่วนใถ้ลล่อยต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม คือ 60:40 และ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่เหมาะสม ได้แก่ 70:30 การเพิ่มปริมาณคลอไรด์ในรูปแคลเซียมคลอไรด์ ส่งผลให้การก่อตัวของก้อนคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ค่าของกำลังรับแรงอัดจะลดลง และลดปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมาเมื่อระยะเวลาบ่มตัวนานขึ้น ในขณะที่การเพิ่มปริมาณซัลเฟตในรูปของแคลเซียมซัลเฟต การก่อตัวของก้อนคอนกรีตช้าลงเช่นเดียวกับการเพิ่มคลอไรด์ จะให้ผลของกำลังรับแรงอัด รวมทั้งค่าการชะละลายของโลหะหนักมีค่าลดลงที่ระยะเวลาบ่มตัวมากขึ้น

คำสำคัญ : การปรับเสถียร, คลอไรด์, ซัลเฟต, เตาเผาขยะอันตราย, ใถ้ลล่อย, หล่อแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Factors affecting cement-based stabilization / solidification of fly ash from hazardous waste incinerator	
Name	Miss Monrudee	Areemit
	Miss Sasinapa	Veschaovakarn
	Mr. Somchai	Saeue
Department	Chemistry	
Faculty	Science	
Major Program	Environmental Resource Chemistry	
Academic Year	2004	
Project Advisor	Dr. Chalor	Jarusutthirak
Project Co-Advisor	Dr. Jochen	Amrehn

ABSTRACT

Factors affecting cement-based stabilization/solidification (S/S) of fly ash from hazardous waste incinerator were investigated. They included fly ash to cement (FA/CE) ratio, solid to water (S/W) ratio, chloride content as calcium chloride (CaCl_2) and sulfur content as calcium sulfate (CaSO_4). The study of fly ash composition using X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) showed that calcium, chloride and sulfur were major components in fly ash. These elements possibly occurred during cleaning process of flue gas after incineration. Leaching test of fly ash exhibited 4 major heavy metals containing in fly ash, including cadmium (Cd), chromium (Cr), lead (Pb), and iron (Fe). Physical and chemical tests of stabilized concrete blocks indicated that a decrease of FA/CE ratio from 80:20 to 70:30 and 60:40, an increase of S/W ratio from 60:40 to 65:35 and 70:30, as well as an increase of curing period from 3 to 7, 14 and 28 days improved compressive strength of concrete blocks and reduced the concentration of forementioned heavy metals which were below the standard limits. The optimum FA/CE ratio and S/W ratio obtained from the experiments were 60:40 and 70:30, respectively. The increase of chloride content as CaCl_2 caused rapid setting time of concrete, but reduced compressive strength and reduce the leachability of heavy metal at long curing period. On the other hand, the increase of sulfate content as CaSO_4 the results of compressive strength and leachability of heavy metal were similar as those of chloride content. However, it retarded concrete setting.

Keywords: Chloride, Fly ash, Incinerator, Solidification, Stabilization, Sulfate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือในการให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่างๆ ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ ในการแก้ปัญหาเป็นอย่างดีจาก ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ

ขอขอบพระคุณ Dr. Jochen Amrehn ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ในการให้คำปรึกษา ข้อมูลที่มีประโยชน์ และอนุเคราะห์ความช่วยเหลือในการจัดส่งเอกสารที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณ ศูนย์บริหารจัดการวัสดุเหลือใช้อุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม เขตอุตสาหกรรม นิคมอุตสาหกรรมบางปู และบริษัทอีสแควร์ สิ่งแวดล้อมและวิศวกรรม จำกัด และบริษัทร่วมการค้า อินเทอร์เน็ต-เอ็มอีดับเบิลยู ในการอนุเคราะห์เอกสารจากเขาเผ่าเพื่อใช้สำหรับการทดลอง รวมทั้งสนับสนุนอุปกรณ์ทั่วไปในการวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการตรวจสอบ โครงการพิเศษในครั้งนี้ทุกท่านที่กรุณาเสนอแนะ และแก้ไขเพิ่มเติมทำให้โครงการนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณพี่ๆเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือเกี่ยวกับอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณพี่ๆเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ ที่คอยให้ความรู้ และความช่วยเหลือเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ และช่วยให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่น้องและเพื่อน ๆ ที่ให้ความรัก ความห่วงใย คอยช่วยเหลือในด้านปัจจัยต่างรวมทั้งให้กำลังใจตลอดมา

นางสาว มลฤดี อารีย์มิตร

นางสาว ศศินภา เวสส์ชาวการ

นาย สมชาย แซ่ฮ้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามคำศัพท์

AAS	=	Atomic Absorption Spectroscopy
ASTM	=	American Society for Testing and Material
FA	=	Fly Ash
FA/CE	=	อัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์
FGC	=	Flue gas cleaning product
S/W	=	อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ
TCLP	=	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
µm	=	ไมโครเมตร
U.S. EPA.	=	United State Environmental Protection Agency
W/C	=	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์
XRFs	=	X-ray Fluorescence Spectroscopy



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
นิยามคำศัพท์	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 ของเสียอันตราย	5
2.1.1 ประเภทของเสียอันตราย	6
2.1.2 กระบวนการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน	7
2.2 การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง	7
2.2.1 การปรับเสถียร	8
2.2.2 การทำก้อนแข็ง	9
2.2.3 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์	11
2.2.4 ปูนซีเมนต์	14
2.2.5 คอนกรีต	19
2.3 เตาเผา	21
2.3.1 ประเภทของมลพิษทางอากาศจากเตาเผาขยะ	22
2.3.2 เทคนิคการบำบัดมลพิษทางอากาศ	22
2.4 ถ้ำลอย/คุณสมบัติถ้ำลอย	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ผลของคลอไรด์และซัลเฟตต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง	26
2.5.1 ผลของแคลเซียมคลอไรด์	26
2.5.2 ผลของแคลเซียมซัลเฟต	27
2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต	29
2.6 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	29
2.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด	29
2.6.2 การทดสอบการชะละลาย	33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย	37
3.1 แผนการดำเนินการวิจัย	37
3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	38
3.3 การวิเคราะห์เถ้าลอยด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy	38
3.4 การปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง	40
3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต	42
3.6 การทดสอบการชะละลาย	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	46
4.1 คุณลักษณะเถ้าลอย	46
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย	46
4.1.2 การทดสอบการชะละลายเถ้าลอย	47
4.2 การปรับเสถียรและทำก้อนแข็งเถ้าลอยโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์	47
4.2.1 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด	48
4.2.2 การศึกษาอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์	48
4.2.3 การศึกษาระยะเวลาการบ่มตัวก้อนแข็งเถ้าลอย	51
4.2.4 การศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายเถ้าลอย	51
4.3 ผลของคลอไรด์ต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งเถ้าลอย	56
4.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การทดสอบการชะละลายของก้อนคอนกรีต	58
4.4 ผลของซัลเฟตต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งถ้ำลอย	60
4.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต	60
4.4.2 การทดสอบการชะละลายของก้อนคอนกรีต	62
4.5 การพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม	64
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการทดลอง	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
บรรณานุกรม	67
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด	70
ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง	71
ภาคผนวก ค หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด หึ่ง หรือฝังสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วทำยประภาสกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบปริมาณ โลหะหนักในเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ	26
ตารางที่ 2.2 ตารางการเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย	34
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer	46
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำชะสกัดที่ได้จากการชะละลายเถ้าลอย	47



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงค่า pH และ ค่า Alkalinity จากการทดสอบการชะละลาย	11
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย กับค่าความเป็นด่างของซิลิคอน จากการทดสอบการชะละลาย	12
รูปที่ 2.3 กราฟ pC-pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียมและตะกั่ว	13
รูปที่ 2.4 แสดงภาพขยายของถ้ำลอย	24
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงความเสียหายของคอนกรีตจากซัลเฟต	28
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนโดยรวมของงานวิจัย	37
รูปที่ 3.2 ภาพแสดงถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา	38
รูปที่ 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectroscopy	39
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงเครื่อง X-ray fluorescence spectrophotometer	39
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงก้อนคอนกรีตหลังจากถอดแบบหล่อ	41
รูปที่ 3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการหล่อและบ่มก้อนคอนกรีต	41
รูปที่ 3.7 ภาพแสดงเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด	42
รูปที่ 3.8 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัด	43
รูปที่ 3.9 ภาพแสดงเครื่อง Atomic Absorption Spectroscopy	44
รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย	45
รูปที่ 4.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งถ้ำลอยที่อัตราส่วนระหว่างของแข็งค่อน้ำต่างๆกับ อัตราส่วนถ้ำลอยต่อซีเมนต์เป็น (ก) 60:40, (ข) 70:30 และ (ค) 80:20	49
รูปที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งถ้ำลอยที่อัตราส่วนระหว่างถ้ำลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ กับอัตราส่วนของแข็งค่อน้ำ (ก) 60:40, (ข) 65:35 และ (ค) 70:30	50
รูปที่ 4.3 ปริมาณ Cd ที่ถูกชะในอัตราส่วนถ้ำลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่ อัตราส่วนของแข็งค่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ที่ CI 22.3%	52
รูปที่ 4.4 ปริมาณ Cr ที่ถูกชะในอัตราส่วนถ้ำลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่ อัตราส่วนของแข็งค่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ที่ CI 22.3%	53
รูปที่ 4.5 ปริมาณ Fe ที่ถูกชะในอัตราส่วนถ้ำลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่ อัตราส่วนของแข็งค่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ที่ CI 22.3%	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.6 ปริมาณ Pb ที่ถูกชะในอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ที่ C1 22.3%	53
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบคลอไรด์ที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เป็น (ก) 60:40, (ข) 70:30 และ (ค) 80:20	57
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าการชะละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ของคลอไรด์ที่เปอร์เซ็นต์ ต่างๆ ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เป็น 60:40 และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40	59
รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบซัลเฟตที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ ต่างๆ	61
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าการชะละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ของซัลเฟตที่เปอร์เซ็นต์ ต่างๆ ที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เป็น 60:40 และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40	63
รูปที่ 4.20 ค่ากำลังรับแรงอัดก้อนแข็งเถ้าลอยที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ กับอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ (ก) 60:40, (ข) 65:35 และ (ค) 70:30 ของ ค่าซัลเฟต 23.6%	68

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัญหามลพิษจากขยะกำลังเป็นปัญหาสำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทยเนื่องจากปริมาณขยะที่เพิ่มสูงขึ้นในทุกๆปีโดยเฉลี่ยวันละ 470 ตันต่อวัน หรืออัตราเฉลี่ยร้อยละ 1 ต่อปี (กรมควบคุมมลพิษ, 2545) ขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในแต่ละวันนั้นหน่วยงานของรัฐได้ทำการกำจัดด้วยวิธีการต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทและองค์ประกอบของขยะมูลฝอย วิธีการโดยทั่วไปที่ใช้ในการกำจัดขยะมูลฝอยชุมชนได้แก่ การขุดหลุมฝังกลบและการเผา เป็นต้น ส่วนขยะของเสียอันตรายโดยเฉพาะขยะอุตสาหกรรม ทำการกำจัดตามสภาพและคุณลักษณะของของเสียนั้นๆ ได้แก่ การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure Landfill) การเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูง (Incineration) และการนำกลับมาใช้ใหม่ (Reuse/Recycle)

เนื่องจากขยะอุตสาหกรรมบางประเภทที่มีลักษณะให้ความร้อนสูง หรือสามารถละลายกลายเป็นของเหลวได้ง่าย เช่น สารปรอทหรือสารพิษบางชนิด ตัวทำละลายอินทรีย์ ไม่เหมาะสมกับการนำไปฝังกลบ จำเป็นต้องทำการกำจัดโดยการนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ขยะของเสียเหล่านั้นเปลี่ยนสภาพกลายเป็นเถ้า แล้วจึงนำเถ้าไปฝังกลบอย่างปลอดภัยต่อไป นอกจากนี้วิธีการเผายังเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูง และสามารถกำจัดขยะของเสียได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการเผาขยะถึงแม้จะเป็นการลดปริมาณขยะได้หลายเท่าตัว แต่อาจก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น มลภาวะทางอากาศ จากก๊าซต่างๆที่เกิดขึ้นรวมทั้งฝุ่นเถ้าขยะที่ถูกปล่อยออกมาจากภายนอก ในที่นี้จะกล่าวถึงปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการเผาขยะ ได้แก่ ปัญหาเถ้าลอย (Fly ash, FA) และผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (Flue gas cleaning products, FGC) ซึ่งได้จากการเผาขยะของเสียอันตราย เถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษจึงถูกจัดเป็นของเสียอันตรายประเภทหนึ่งที่ต้องมีการกำจัดอย่างถูกวิธี เพราะถ้าทำการฝังกลบเพียงอย่างเดียวอาจก่อให้เกิดการปนเปื้อนแหล่งน้ำใต้ดินได้ ซึ่งมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของประชาชน

วิธีการจัดการเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษก่อนนำไปฝังกลบที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป คือ วิธีการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization/Solidification) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใส่วัสดุประสาน หรือสารปรับเสถียร ซึ่งวิธีการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งนั้นมีข้อดีหลายประการ เช่น ลดพื้นที่ที่ใช้ในการฝังกลบ ลดความเป็นพิษของเถ้าลอย เป็นต้น สารที่ใช้กันในการทำก้อนอยู่ทั่วไป คือ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เป็นต้น (Donatella et al., 2004) แต่วัสดุประสานที่

นิยมใช้คือปูนซีเมนต์เนื่องจากสามารถจับยึดได้ดีกับของเสียนินทรีย์โดยเฉพาะพวกโลหะหนัก นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรงทนทานต่อสิ่งแวดล้อมภายนอก และทนแรงกระแทกได้ดี (เกรียงศักดิ์, 2546)

เถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FA/FGC) มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เนื่องจากองค์ประกอบที่หลากหลายของขยะอันตราย ที่ถูกส่งไปกำจัดโดยการเผา โดยคุณสมบัติของเถ้าลอยที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง เช่น ปริมาณอัตราส่วนของแข็ง (ปูนซีเมนต์+เถ้าลอย) ต่อน้ำ (S/W) และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์จะเปลี่ยนแปลง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลต่อความแข็งแรงของก้อนแข็งที่ทำการปรับเสถียร และความสามารถในการยึดจับโลหะหนัก การที่คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษเปลี่ยนแปลงนั้น เกิดจากการใช้สารเคมีบำบัดก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นกรดที่ปล่อยออกจากเตาเผา เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดแคลเซียมซัลเฟต และแคลเซียมคลอไรด์ขึ้น ส่งผลต่อการแข็งตัวของก้อนแข็งที่ทำการปรับเสถียรคือ ถ้ามีแคลเซียมคลอไรด์ในปริมาณน้อยจะช่วยลดความเป็นพิษของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษได้ดี และก้อนแข็งที่ปรับเสถียรมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น (Poon *et al.*, 2003) ถ้ามีมากไปอาจจะทำให้ซีเมนต์ที่ผสมแล้วแข็งตัวได้เร็ว (Means *et al.*, 1995) ส่วนแคลเซียมซัลเฟตมีผลให้เกิดการกัดกร่อนและทำอันตรายต่อซีเมนต์ที่เกิดการแข็งตัวแล้ว หรือก้อนแข็งที่ทำการปรับเสถียรอาจเกิดการขยายตัวแตกร้าวได้ง่าย (US EPA, 1988)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ โดยมุ่งเน้นศึกษาผลกระทบจากแคลเซียมคลอไรด์และแคลเซียมซัลเฟตที่เป็นองค์ประกอบของFA/FGC รวมทั้งศึกษาถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำก้อนแข็ง ได้แก่ อัตราส่วนของของแข็งต่อน้ำ(S/W) และอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ (FA/Cement) ก้อนแข็งที่ทำการปรับเสถียรแล้ว จะถูกทดสอบด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมี เพื่อให้มั่นใจได้ว่าก้อนซีเมนต์ที่จะนำไปฝังกลบนั้น มีคุณสมบัติที่เหมาะสม คือทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก และสารอันตรายต่าง ๆ ที่อยู่ในก้อนซีเมนต์ไม่หลุดออกมาปนเปื้อนกับสิ่งแวดล้อมได้โดยง่าย

1.2 วัตถุประสงค์ ของงานวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบในเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FA/FGC) ที่มีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำก้อนแข็งเถ้าลอยจากเตาเผาขยะอุตสาหกรรมด้วยซีเมนต์

3. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง เพื่อให้ได้ก้อนแข็งจากการปรับเสถียรที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด
4. ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของก้อนแข็งที่ทำการปรับเสถียรแล้ว

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการศึกษองค์ประกอบของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FA / FGC) โดยใช้วิธี X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRF)
2. ทำการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งเถ้าลอย โดยนำเถ้าลอยจากโรงงานเผาขยะอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรม และศึกษาปัจจัยหลักของการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งเถ้าลอยปัจจัยที่ทำการศึกษา ได้แก่
 - อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำ (S/W) โดยทำการแปรค่าด้วยอัตราส่วน 60:40, 60:35 และ 70:30
 - อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ (FA/Cement) โดยทำการแปรค่าที่อัตราส่วน 60:40, 70:30 และ 80:20
3. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่อยู่ในเถ้าลอยและ ผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FA/FGC) ที่มีผลต่อการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งโดยปัจจัยที่ทำการศึกษา คือ
 - ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) โดยทำการแปรค่า ปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ โดยใช้ปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 10% และ 20% จากปริมาณคลอไรด์ที่พบในตัวอย่างครั้งแรกที่ทำการวิเคราะห์
 - ปริมาณแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) โดยทำการแปรค่า ปริมาณแคลเซียมซัลเฟต โดยใช้ปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 10% และ 20% จากปริมาณซัลเฟตที่พบในตัวอย่างครั้งแรกที่ทำการวิเคราะห์
4. ทำการทดสอบก้อนแข็งที่ผ่านการปรับเสถียรด้วยวิธีทางกายภาพ โดยการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งเถ้าลอย (Compressive Strength) ที่ระยะเวลาบ่มตัว 3, 7, 14 และ 28 วัน
5. ทำการทดสอบก้อนแข็งที่ผ่านการปรับเสถียรด้วยวิธีทางเคมี คือ ทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Extraction Procedure ตามวิธีมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พศ. 2540) เมื่อเวลาผ่านไป 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นนำน้ำชะที่ได้ไปทำการตรวจวัดโลหะหนักด้วย Atomic Absorption Spectrophotometer ซึ่งปริมาณโลหะหนักที่ทำการศึกษาคือ แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb) และ เหล็ก (Fe)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง
2. เป็นแนวทางในการลดความเป็นพิษของถ้ำลอยอันเกิดจากเตาเผาขยะอุตสาหกรรม
3. เป็นแนวทางในการนำถ้ำลอยจากเตาเผาขยะอุตสาหกรรมกลับมาใช้ประโยชน์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ของเสียอันตราย

ของเสียอันตราย (Hazardous Waste) หมายถึง สิ่งที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ มีผู้ให้คำจำกัดความ ของเสียอันตรายไว้ต่าง ๆ กันดังนี้ คือ

- (1) ของเสียที่ถูกปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแข็ง กึ่งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ) และปนเปื้อนสิ่งแวดล้อม (ทางน้ำ อากาศ และดิน)
- (2) สิ่งต่าง ๆ ที่ไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจและเมื่อถูกนำไปทิ้งโดยไม่ได้กำจัดไม่ว่าจะทิ้งในน้ำ ดิน หรือ อากาศ จะก่อให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ พืช สัตว์ และสิ่งแวดล้อม
- (3) ของเสียใด ๆ ซึ่งลุกติดไฟได้ ทำให้เกิดโรคติดต่อ, สะสมในสิ่งมีชีวิตแล้วก่อให้เกิดมะเร็ง หรือเกิดการผ่าเหล่าได้

ของเสียอันตราย ตามคำจำกัดความของกรมควบคุมมลพิษหมายถึง ของเสียที่เจือปนด้วยของที่มีความเข้มข้นหรือคุณสมบัติทางด้านกายภาพเคมี หรืออื่น ๆ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการตายหรือการเจ็บป่วย ทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้ม จะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้มีการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกักขนส่ง และกำจัด (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

ของเสียอันตรายจากชุมชน ได้แก่ ถ่านไฟฉายหมดอายุ ระเบิดสารปราบศัตรูพืช ยาหมดอายุ หลอดไฟหมดอายุหรือชำรุดแล้ว แบตเตอรี่หมดอายุ โทรทัศน์ วิทยุ น้ำมันเครื่องเก่า น้ำมันล้างอัดรูป นอกจากนั้นของเสียอันตรายจากชุมชนอีกประเภทหนึ่งที่ต้องมีการจัดการเฉพาะได้แก่ ของเสียจากโรงพยาบาล เนื่องจากเป็นของเสียที่เป็นแหล่งแพร่เชื้อโรคชนิดต่างๆ ผู้มนุษย์ได้เป็นอย่างมาก ตัวอย่างของเสียจากโรงพยาบาล ได้แก่ เข็มและกระบอกฉีดยา สำลี พลาสเตอร์ สายยางให้อาหาร สายสวนปัสสาวะอุจจาระ สายน้ำเกลือ สายดูดเสมหะ ชิ้นเนื้อส่วนต่างๆ เสมหะ เลือด น้ำในช่องท้อง น้ำในไขสันหลัง เป็นต้น ส่วนของเสียอันตรายที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งคือของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ของสารปราบศัตรูพืช และสารเคมีต่างๆ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ตะกอนก้นถังกลั่นน้ำยาเคมีต่างๆ ขยะที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปนเปื้อน กากตะกอนที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบ จากการประเมินพบว่าโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นแหล่งกำเนิดของเสียอันตรายร้อยละ 90-92 ของปริมาณของเสียทั้งหมด (มัลลิกา, 2542) ถูกทิ้งรวมไปกับขยะมูลฝอยทั่วไป และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ประเภทของเสียอันตราย

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ แบ่งประเภทของเสียอันตรายเป็น 14 ประเภท ได้แก่

1. น้ำมัน (Oils) ได้แก่ ของเสียจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และพวกน้ำมันหล่อลื่น สารทำ ความเย็นของเครื่องจักร
2. กากสารอินทรีย์เหลว (Liquid Organic Residues) ของเสียเหลวจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และจากอุตสาหกรรมอินทรีย์เคมี ซึ่งส่วนใหญ่มีคุณสมบัติติดไฟได้ หรือมีสารพิษเฉียบปน
3. ตะกอนและของแข็งสารอินทรีย์ (Organic Sludges and Solids) กากของเสียจากอินทรีย์เคมีส่วนใหญ่ติดไฟได้หรือมีโอกาสคายสารพิษได้ง่าย
4. ตะกอนและของแข็งสารอนินทรีย์ (Inorganic Sludges and Solids) กากตะกอนหรือกากของเสียที่มีสารอนินทรีย์ (ยกเว้น โลหะหนัก) เช่น Sulfer Sludge, Lime Sludge, Gypsum
5. ตะกอนและของแข็งโลหะหนัก (Heavy Metal Sludges and Solids) ของเสียที่มีโลหะหนักเฉียบปนส่วนใหญ่มาจากระบบบำบัดน้ำเสีย
6. ตัวทำละลาย (Solvents) ได้แก่ ของเสียที่มีตัวทำละลายใช้ในการทำความสะอาดโรงงาน หรือการซ่อมบำรุง ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น พลาสติก โยสังเคราะห์ ยา เป็นต้น
7. ของเสียเป็นกรด (Acid Wastes) มีค่า pH ต่ำกว่า 7 เช่น น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง โรงงานชุบโลหะ ที่ใช้น้ำยากรดสำหรับทำความสะอาดรวมทั้งกรดที่ใช้แล้วในกระบวนการต่าง ๆ
8. ของเสียเป็นด่าง (Alkaline Wastes) มีค่า pH สูงกว่า 7 เช่น สารละลายโซดาไฟในการชุบโลหะ น้ำยาด่างสำหรับทำความสะอาด สารละลายแอมโมเนียที่ใช้แล้ว
9. ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน (Off Specification Products) คือผลิตภัณฑ์หรือวัสดุที่ไม่ได้มาตรฐานเสื่อมคุณภาพ หรือหมดอายุการใช้งาน
10. พีซีบี (Poly Chlorinated Biphenyls , PCB) ของเสียที่มีพีซีบีมากกว่า 50 ppm เช่น จากหม้อแปลงไฟฟ้า, Capacitor เป็นต้น
11. กากสารอินทรีย์น้ำ (Aqueous Organic Residues) ของเสียที่มีสารอินทรีย์เคมีที่มีพิษ เช่น น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม หรือจากการล้างน้ำยาฆ่าแมลง ยาปราบวัชพืช
12. น้ำเสียล้างอัดรูป (Photo Wastes) ของเสียที่เกี่ยวข้องกับกิจการการถ่ายรูป ล้างและอัดรูป ซึ่งมีน้ำยา Silver Bromide และอื่น ๆ
13. มูลฝอยชุมชน (Municipal Wastes) ของเสียอันตรายจากบ้านเรือน สำนักงาน ร้านอาหาร เช่น ขยะฆ่าแมลง สี ขี้ มูลล้างห้องน้ำ หลอดไฟนีออน แบตเตอรี่ ยา เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. มูลฝอยติดเชื้อ (Infectious Wastes) ของเสียดูดเชื้อ เช่น น้ำเลือด น้ำหนอง ลำไส้ ผ่าพันแผล เข็มฉีดยา เป็นต้น

2.1.2 กระบวนการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการทำให้เป็นก้อน

1. Cement Based ของเสียจะถูกผสมลงในซีเมนต์น้ำและส่วนผสมอื่น ๆ และปล่อยให้แห้งจนแข็งตัว เป็นก้อนซีเมนต์

2. Pozzolanic (Lime Based) ของเสียจะถูกผสมกับปูนขาว และวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นพอลิไซลัน เช่น เถ้าลอย, ผงซีเมนต์ที่เตาเผา เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติแข็งตัวได้เมื่อผสมน้ำผสมน้ำแล้วปล่อยให้แห้งตัว

3. Thermoplastic นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมให้กระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น Bitumen, Paraffin หรือ Polyethylene ปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว

4. Organic Polymer ของเสียในขั้นแรกจะถูกผสมกับสารพอลิเมอร์ (Gelling agents หรือ urea formaldehyde) และเติมสารก่ตะกอนผสมให้เข้ากันก่อนที่สารพอลิเมอร์จะแข็งตัว

5. Surface Encapsulation ของเสียจะถูกอัดให้เกาะตัวแน่นแล้วเคลือบผิวนอกของของเสียที่ถูกบดอัดด้วยการเคลือบ เช่น Polyethylene หรือ Organic resins

6. Self-Cementing สารที่มีคุณสมบัติเป็นสารซีเมนต์ เช่น แคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมซิลิไฟด์ ที่เกิดจากการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรม ได้แก่ การกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์สามารถนำมาใช้ผสมกับตะกอนของเสียเพื่อหล่อให้แข็งตัวได้ โดยวัสดุที่ได้จะมีคุณสมบัติที่ง่ายต่อการเคลื่อนย้ายและมีความสามารถให้น้ำซึมได้น้อย

7. Glasification and Production of Synthetic Minerals or Ceramics สารที่เป็นอันตรายมาก เช่น กากสาร กัมมันตภาพรังสี สามารถจะนำมาผสมกับทรายแล้วหลอมให้กลายเป็นส่วนผสมของแก้วหรือ Synthetic silicate minerals เพื่อป้องกันไม่ให้สารอันตรายนั้นถูกชะละลายด้วยน้ำสามารถนำไปกำจัดต่อไปโดยไม่ต้องมีขบวนการหุ้มหรือบรรจุเป็นครั้งที่ 2

2.2 การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง (Stabilization and Solidification)

ในการกำจัดของเสียอันตรายด้วยการฝังกลบบนพื้นที่หนึ่ง อาจส่งผลกระทบต่อน้ำใต้ดินได้ แต่ถ้านำวิธีการปรับเสถียรและการทำก้อนแข็งมาใช้จะช่วยป้องกันการเกิดชะของเสีย ซึ่งมีข้อดีดังนี้

- 1) ช่วยป้องกันการละลายของสารปนเปื้อนออกมา
- 2) ช่วยลดขนาดพื้นที่ผิวของของเสีย
- 3) ช่วยเสริมสภาพของเสียด้านกายภาพให้อยู่ในสภาพดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) มีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม

การปรับเสถียรและการทำก้อนแข็ง เป็นกระบวนการกำจัดของเสียอันตรายให้หมดสิ้น วิธีปรับเสถียรจะมีการใส่สารเคมีหรือวัสดุอื่น ๆ ผสมกับของเสียอันตรายเพื่อไม่ให้สารอันตรายกระจัดกระจายออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อลดความเป็นพิษของของเสียอันตราย ส่วนวิธีการทำก้อนแข็งเป็นกระบวนการทำให้ของเสียแข็งตัว คือทำให้ของเสียถูกเปลี่ยนแปลงสภาพทางกายภาพ

2.2.1 การปรับเสถียร (Stabilization)

การปรับเสถียรกากของเสีย เป็นการผสมสารเคมีที่เหมาะสมเข้ากับของเสีย เพื่อให้เกิดโครงสร้างที่ของเสียถูกจับไว้ ทำให้ของเสียถูกชะล้างละลายได้น้อยลง การปรับเสถียรกากของเสียอันตรายนี้เป็นการเตรียมของเสียเพื่อนำไปฝังกลบอย่างปลอดภัย ตัวอย่างของการปรับเสถียร ได้แก่ การผสมปูนซีเมนต์กับตะกอนโลหะหนักแล้วนำมาหล่อเป็นก้อน ตะกอนที่ผ่านการปรับเสถียรแล้วต้องนำมาทดสอบสมบัติการถูกชะล้าง (Leaching Test) ภายใต้สภาวะมาตรฐานก่อนนำไปฝังกลบ สารละลายที่ผ่านการชะล้างของเสียแล้วจะต้องมีสารปนเปื้อนต่ำกว่าปริมาณที่กำหนดไว้

การปรับเสถียรจะใช้วิธีการเติมสารปรับเสถียรซึ่งที่ใช้กันอยู่มีหลายชนิดที่สำคัญคือ **ซีเมนต์**

จะก่อรูปเป็นก้อนแข็งภายในเป็นผลึกในรูปของ Calcium alumino - silicate มีข้อดีหลายอย่าง เช่น สามารถเก็บสารอันตรายอยู่ในก้อนซีเมนต์ได้ยาวนาน ไม่ต้องทราบถึงความสามารถในการตกตะกอนผลึกที่ pH เท่าใด มีความแข็งแรงทนทานต่อสภาพอากาศร้อน ฝน หนาว ใค้ดี ทนแรงกระแทกได้ และการจัดการดำเนินการผสมสารปนเปื้อนกับซีเมนต์กระทำได้ง่าย แต่อาจมีปัญหว่า ของเสียอันตรายบางชนิด เมื่อผสมกับซีเมนต์จะไม่สามารถก่อเป็นก้อนแข็งได้ และอาจเกิดความร้อนสูงด้วย

Pozzolans

เช่น เถ้าลอย ขี้เถ้า ผงฝุ่นซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้ Pozzolans มีโครงสร้างทางเคมีที่เรียกว่า amorphous alumino-silicates โดย Pozzolans เมื่อนำมาผสมกับปูนขาวและน้ำจะทำให้ได้วัสดุซีเมนต์ที่เรียกผลของก้อนแข็งนี้ว่า Pozzolanic concrete ดังนั้น Pozzolans ก็จะทำหน้าที่ปรับเสถียรของเสียอันตรายและก่อให้เกิดเป็นก้อนคอนกรีต จะเหมาะสมกับการจับตัวกับสารปนเปื้อนอินทรีย์และยังสามารถกำจัดสารปนเปื้อนอินทรีย์ได้ด้วย

ปูนขาว

มีสูตรทางเคมีคือ Ca(OH)_2 นิยมเรียกว่า Lime เมื่อนำมาผสมกับของเสียอันตรายจะได้ปฏิกิริยาเคมีที่ Calcium hydroxide ทำปฏิกิริยากับวัสดุในของเสีย

2.2.2 การทำก้อนแข็ง (Solidification)

การทำก้อนแข็ง เป็นกระบวนการที่ใส่สารที่ก่อให้เกิดความแข็งแรงตัวโดยทำการใส่วัสดุก่อนให้แข็งตัวผสมกับของเสียอันตรายทำให้มีความแข็งแรงรับแรงกดได้มากขึ้น และสามารถช่วยลดความสามารถของน้ำซึมผ่านได้ วัสดุที่ช่วยก่อให้เกิดการแข็งตัว ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เป็นต้น ส่งผลให้ของเสียอันตรายมีเสถียรภาพดีขึ้น

2.2.2.1 กลไกของระบบการปรับเสถียรและการทำงานแข็ง

กลไกของระบบการปรับเสถียรและการทำงานแข็ง อาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมี ที่ส่งผลให้ของเสียอันตรายถูกปกปิดหรือถูกยึดติดจนแน่นไม่สามารถหลุดออกมาได้ กลไกต่าง ๆ มีดังนี้

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

แยกรายละเอียดแต่ละประเภทได้ดังนี้

1) Microencapsulation

ของเสียจะอยู่ในแคปซูลและจะถูกบรรจุไว้ในโครงสร้างผลึกในระดับเล็กมากหรือ เรียกว่าระดับ microscopic ของเสียอันตรายถูกย่อยสลายจนได้ขนาดเล็กมากๆ ตัวอย่างของกลไกนี้เกิดขึ้นกับของเสียอันตรายที่เป็นน้ำมัน ได้ถูกผสมกับเถ้าลอย ปูนขาว และ ซีเมนต์ จนทำให้กากน้ำมันอยู่ภายในช่องว่างของแคปซูลนี้

2) Macroencapsulation

ของเสียจะอยู่ในแคปซูล และจะถูกบรรจุไว้ภายในโครงสร้างในระดับใหญ่กว่าของ Microencapsulation พวกของเสียอันตรายถูกบรรจุอยู่ภายในแคปซูลด้วยกลไกทางกายภาพ มีการแตกสลายในเชิงกายภาพ มีขนาดใหญ่แต่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อิสระ ตัวอย่างของกลไกนี้เกิดขึ้นกับของเสียอันตรายที่เป็นน้ำมัน ได้ถูกผสมกับเถ้าลอย ปูนขาว และซีเมนต์ จนทำให้กากน้ำมันอยู่ภายในช่องว่างของแคปซูลนี้

3) Adsorption

Adsorption เป็นการดูดซับ การดูดแนบหรือการดูดติดผิวบนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นการดักทางกายภาพ มีการยึดเกาะกันแบบเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) โดยวัสดุหรือสารปรับเสถียรที่เกิดแรงยึดแบบ Hydrogen bonding หรือแบบ Van der waal ทำให้การรื้อไหลหรือหลุดออกจากผิวของแข็งมีน้อยกว่าของ Macroencapsulation และของ Microencapsulation ซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีนี้
 หนึ่ง ในการปรับเสถียรของของเสียนทรีย์ด้วยวิธีนี้ได้ใช้ดินเหนียวดัดแปลงอินทรีย์ (Organically modified clay) ซึ่งได้นำพวกอินทรีย์ประจุบวกแทนพวกอนินทรีย์ประจุบวกหรือเรียกดินเหนียวชนิดนี้ว่า Organophilic clay ถ้าไม่ได้นำดินเหนียวมาทำการดัดแปลงอินทรีย์ก็จะเรียกดินเหนียวชนิดนี้ว่า Organophobic clay

4) Absorption

Absorption เป็นการดูดซึม หรือการดูดกลืน ของเสียนทรีย์ ของเสียนทรีย์จะถูกดูดซึมเข้าไปภายในตัวดูดที่คล้ายกับฟองน้ำดูดเข้าไป วิธีนี้จะใช้สารหรือตัวดูดซึมชนิดต่างๆทำการดูดระงับเหลวออกจากของเสียนทรีย์อยู่ในสภาพของแข็งมากขึ้น หรือเพิ่มค่าปริมาณของแข็งมากขึ้น พวกตัวดูดซึม ได้แก่ ถ้ำลอสย ผงฟู เซซีเยนซ์ ผงฝุ่นปูนขาว ซีลีออย หล้าฟาง ฟางข้าว เป็นต้น ยังรวมไปถึง Bentonite Kaolinite Vermiculite และ Zeolite

5) Precipitation

การตกตะกอนผลึกหรือการนำพวกของเสียนทรีย์โดยมากเป็นของเสียนทรีย์มาผสมรวมกับสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนผลึก ถ้าอยู่ในสภาพที่เหมาะสม เช่น มี pH เหมาะสม ในที่นี้จะเกิดตะกอนผลึกอนินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ Hydroxides, Sulfides, Silicates, Carbonates, Phosphates เป็นต้น โดยทั่วไปจะเป็นการกำจัดโลหะหนัก ด้วยการปรับ pH ลดลงเช่น ได้ผสมกับกรดจะเกิดปัญหาของเสียนทรีย์หรือสารโลหะหนักละลายออกมาจากผลึก สร้างปัญหาให้สิ่งแวดล้อมต่อไป

6) Detoxification

การกำจัดสารพิษหรือความเป็นพิษออกจากของเสียนทรีย์ด้วยการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมี เช่น ทำการเปลี่ยนจาก Cr^{+6} ซึ่งมีความเป็นพิษมากให้เป็น Cr^{+3} ซึ่งมีพิษน้อย ในการเปลี่ยนจาก Cr^{+6} ให้เป็น Cr^{+3} อาจใช้ Ferrous Sulfate กับ Sodium Sulfate

2.2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของการทำก้อนแข็ง

ในการทำก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ต้องคำนึงถึงปัจจัยต่อไปนี้คือ ปริมาณน้ำ ปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณสารที่เติมลงไปต่าง ๆ เช่น ถ้ำลอสย เป็นต้น เพราะมีมากไปก็ไม่ดีอาจทำให้การก่อตัวของ

ปูนซีเมนต์ยาก เช่น ปริมาณน้ำมากไปอาจทำให้เหลว ในทางกลับกันถ้ามีปริมาณปูนซีเมนต์หรือสารที่เติมลงไปเป็นวัสดุประสานมากเกินไป อาจทำให้แข็งตัวได้เร็วเกินไปทำให้เวลาทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าน้อยลงเพราะจะทำให้วัตถุแตกง่าย หรือถ้ามีน้อยไปก็ส่งผลในทางกลับกัน ดังนั้นการเติมส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ จึงต้องมีปริมาณที่เหมาะสม

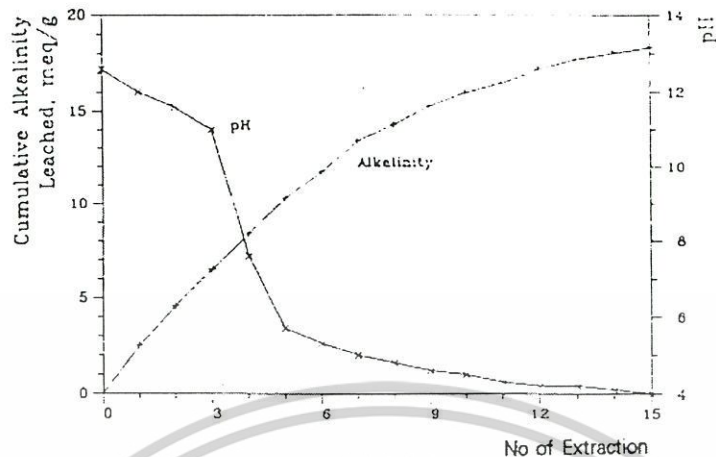
2.2.3 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดภายในรูพรุนของโครงสร้างภายในของเสียแข็งตัวที่เกาะติดบนผนังของรูพรุนและทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ โลหะหนักจะถูกล้อมอยู่ในของแข็งหรืออยู่ในรูพรุน หรือเกาะติดผิวรูพรุน และที่พีเอชสูงๆ โลหะหนักที่สะสมในรูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ หรืออยู่ในของเสียที่แข็งตัวในรูปแอมเมียมไฮดรอกไซด์ หรือเกลือที่ไม่ละลายน้ำโดยแทรกตัวตามรูพรุนและเกาะติดอยู่ตามผนังของซีเมนต์ที่แข็งตัว จากการจับยึดโลหะหนักในซีเมนต์สามารถทำได้ดีและยากที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวดังกล่าว

Bishop (1988) : ได้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการชะละลายโลหะหนักจากของเสียที่ผ่านกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement based Solidification) โดยใช้ของเสียสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอกไซด์ของแอมเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง Buffering Capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนัก และกลไกการยึดจับโลหะหนักชนิดต่างๆ ในของเสียที่ถูกทำให้แข็งตัว (Solidified Wastes) สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)

จากการทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) กับของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์ โดยทำการชะละลายของเสียแข็งตัวด้วยกรดแอสซิดิก แล้วทำการชะละลายติดต่อกันอีกเป็นจำนวนทั้งหมด 15 ครั้ง ตรวจวัดค่า pH และความเป็นด่าง (Alkalinity) แล้วนำไปเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟ pH และ ค่า Alkalinity จากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อทำการชะละลายของเสียแข็งตัวหลาย ๆ ครั้งพบว่า ค่า pH ของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสม (Cumulative Alkalinity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในครั้งที่ 15 กิโลกรัมเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยมากประมาณ 1.7% ของค่าความเป็นด่างสะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างจะถูกชะล้างออกมามากในช่วงต้นและลดลงตามลำดับจนถึงครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างสะสมถึงการชะล้างในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 18.3 meq/g ซึ่งถือเป็นค่า Buffering Capacity ของของเสียแข็งตัว ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะล้างออกมาแต่ละครั้งนี้จะเป็นตัวควบคุม pH ของการชะล้างโดยการสะเทินกรดแอสซิดิกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง

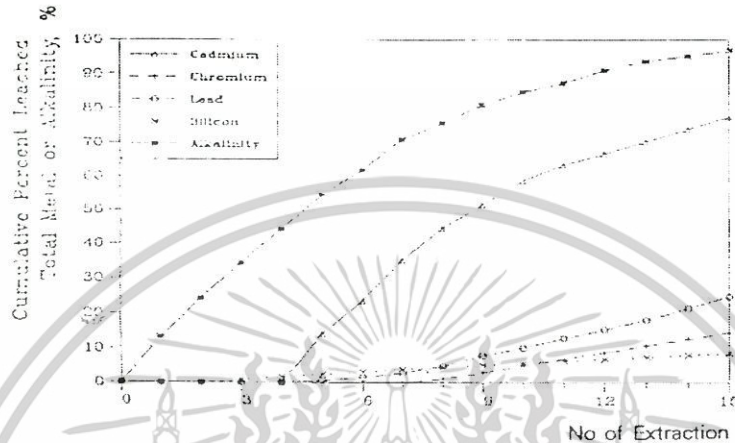
2) กลไกการยึดจับโลหะหนัก

จากกราฟรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย (แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่าง และซิลิกอน ซึ่งจะถูกระบายมากขึ้นเมื่อค่า pH ลดลงต่ำกว่า 6

จากการทดลองที่ผ่านมาหลาย ๆ ครั้งทำให้ทราบว่าโลหะหนักอาจจะอยู่ในโครงสร้างของของเสียแข็งตัวในรูปแบบต่าง ๆ เช่นอยู่ในรูพรุนของโครงสร้างภายในของของเสียแข็งตัว ถูกเกาะติดบนผนังของรูพรุนและทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นแคดเมียม (Cd) จะถูกระบายออกมาได้มากกว่า โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ซึ่งถูกชะล้างออกมาได้น้อย

กรณีที่โลหะหนักถูกล้อมอยู่ในของแข็งหรืออยู่ในรูพรุน หรือเกาะติดผิวรูพรุนแล้วโลหะหนักเหล่านั้นควรจะถูกระบายออกมามากคล้ายกับการชะละลายค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) จากรูป

ที่ 2.2 เส้นกราฟของแคดเมียมสะสมที่ถูกชะล้างออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะล้างออกมา ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่า แคดเมียมจะอยู่ในของเสี้ยวที่แข็งตัวในรูปแคดเมียม ไฮดรอกไซด์ โดยอยู่ตามรูพรุนและเกาะติดอยู่ตามผนังของรูพรุน

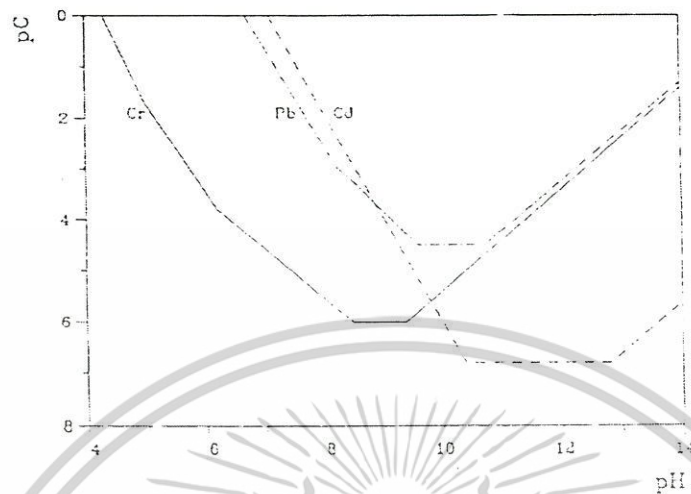


รูปที่ 2.2 กราฟปริมาณ โลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่าง ของซิลิกอน จากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)

สำหรับโครเมียมและตะกั่ว นั้น เมื่อพิจารณาดูเส้นกราฟแล้วจะมีรูปแบบของการถูกชะละลายคล้ายคลึงกับซิลิกอน ซึ่งเป็นสารที่อยู่ในส่วนประกอบของปูนซีเมนต์และทราย ดังนั้นจึงเชื่อว่าโครเมียมและตะกั่วจะถูกยึดติดอยู่ในโครงสร้างของซิลิกอนมากกว่าเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่อยู่ในรูพรุน การชะละลายของโครเมียม และการชะละลายตะกั่วค่อนข้างยากจะเกิดขึ้นเฉพาะที่ pH ต่ำ ๆ และต่ำกว่า pH ในการชะละลายแคดเมียม ดังนั้นแสดงว่าโลหะทั้งสองนี้จะเกาะติดอย่างแข็งแรงภายในโครงสร้างที่ซับซ้อนของซิลิกาและจะถูกชะละลายออก ต่อเมื่อโครงสร้างของซิลิกานี้ถูกทำลาย

กราฟรูปที่ 2.3 แสดง pC-pH diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคดเมียมโครเมียมและตะกั่ว ในสารละลายที่มีค่า ionic strength 0.75 M พบว่าในขณะที่เริ่มผสมปูนซีเมนต์และส่วนผสมอื่น ๆ ค่า pH จะมีค่าสูงประมาณ 12-13 ซึ่งทำให้แคดเมียมส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ และอยู่ในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นของแข็งอยู่ในรูพรุนของซีเมนต์ ส่วนโครเมียมและตะกั่วอาจจะละลายน้ำได้ และมีส่วนในปฏิกิริยากับซิลิกา จากสาเหตุดังกล่าวนี้จึงอธิบายได้ว่าแคดเมียมจะถูกชะละลายออกมาได้เช่นเดียวกับค่าความเป็นด่าง ส่วนโครเมียมและตะกั่วจะถูกชะล้างออกมาโดยขึ้นกับการละลายของซิลิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 กราฟ pC - pH Diagram สำหรับไฮดรอกไซด์ของแคลเซียม โครเมียมและตะกั่ว
(Bishop, 1988)

ภายหลังการทดลอง Leaching Test ได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของสารทั้งหมดพบว่า หลังจากการทดลองชะล้าง 15 ครั้ง ปริมาณสารถูกชะล้างออกไปประมาณ 50-70% ของปริมาณ ทั้งหมดก่อนการทดลอง แต่ยังมีโลหะหนักเหลืออยู่ โดยมีแคลเซียม โครเมียม และตะกั่ว เหลืออยู่ 50, 85 และ 75% ตามลำดับ และยังมีโลหะที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และ Silicon เหลืออยู่ 90, 98 และ 80% ตามลำดับ และแคลเซียมเหลืออยู่ 8% ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดจับโลหะหนักได้ดีและยาก ที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัวดังกล่าว

ข้อดี-ข้อเสียการทำให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์

ข้อดี

1. สารที่เติมลงในส่วนผสมมีเพียงพอสำหรับอัตราส่วนที่ใช้
2. เทคนิคการผสมซีเมนต์ และการกำจัดได้มีการพัฒนามาอย่างดีแล้ว
3. วิธีการนี้จะสามารถทนต่อสารเคมีได้หลายชนิดในตะกอนของแข็งได้เป็นอย่างดี
4. เครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการมีอยู่แล้ว
5. ความแข็งแรงและความสามารถในการให้น้ำซึมผ่านของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแข็งตัว สามารถปรับได้โดยการควบคุมปริมาณปูนซีเมนต์ที่เติมลงในของเสีย
6. วัสดุที่ใช้มีราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อเสีย

1. ไม่เหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์บางชนิดซึ่งจะทำลายกลไกการแข็งตัวของซีเมนต์
2. ผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่า pH ต่ำ
3. การเพิ่มน้ำหนักของของเสียโดยการหล่อด้วยซีเมนต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการขนส่งของเสียในการไปกำจัดเพิ่มขึ้น

2.2.4 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ อันได้แก่ หินปูน ดินเหนียว ในสัดส่วนที่ถูก ผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิด ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้น ในขณะที่เริ่มแข็งตัว ปูนซีเมนต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

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

เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการวิจัยนี้เป็นปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ เรียก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ดังนั้นปูนซีเมนต์ที่เลือกใช้ คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทราย และ น้ำ จะได้เป็นมอร์ตาร์ ซึ่งนำไปใช้เป็น ปูนก่อ สำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือ ปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหินกรวด ทรายและน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีตได้แก่ ฐานรากตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้นถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับพื้น หลังคา สะพาน อาคาร อุโมงค์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะประกอบด้วยส่วนผสมที่สำคัญดังนี้

1. Calcareous Material ได้แก่ หินปูน (Limestone) และดินสอพอง (Chalk)
2. Argillaceous Materials ได้แก่ ชิลิกา อลูมินา ซึ่งอยู่ในรูปของดินดำหรือดินเหนียว (Clay) และ ดินดาน
3. Iron Oxide Materials ได้แก่ แร่เหล็ก หรือ สีลาแดง

2.2.4.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

แบ่งออกเป็น 5 ประเภท คือ

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาสำหรับการทำคอนกรีต หรือ ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในการก่อสร้างตามปกติทั่วไปที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศที่รุนแรง หรือในที่ที่มีอันตรายจากซัลเฟต หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำ
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อน กำแพงดินหนา ๆ ปูนประเภทนี้จะให้กำลังรับแรงต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทแรก
3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งเร็ว หรือ ซูเปอร์ซีเมนต์ จะให้กำลังรับแรงสูงในระยะแรก มีเนื้อเป็นผงละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา ผลิตโดยการเปลี่ยนส่วนผสม หรือเติมสารอื่น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว ทำคอนกรีตในอากาศหนาว
4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ อัตราการเกิดกำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้า ๆ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตเหลว (Mass Cement)
5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง เป็นปูนซีเมนต์ที่มีไตรซิลิเอมอลูมินेट (C_3A) ต่ำ เพื่อป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกทำลายคอนกรีตใ้กำลังการอัดซ้ำ ใช้กับโครงสร้างที่อยู่ในที่ที่มีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำหรือดินที่มีค่าสูง ปูนนี้จะใช้เวลาการแข็งตัวช้ากว่าประเภทแรก
6. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น ๆ
 - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กากเตาถลุง เป็นปูนที่ทำขึ้นโดยการบดกากหรือเม็ดตะกรันเตาถลุง กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เข้าด้วยกันจนเป็นผงละเอียด มีอิมพัชเม้นต์อยู่ด้วย ซึ่งกากตะกรันเป็นของเหลือที่ได้จากขบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม โดยทั่วไปปูนชนิดนี้จะก่อตัวและแข็งตัวช้า ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดในระยะแรก น้อยกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา เหมาะสำหรับการก่อสร้างทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ปอซโซลาน เป็นปูนที่สร้างขึ้นโดยการบดปูนเม็ดของปูนธรรมดากับวัสดุจำพวกปอซโซลานิก ซึ่งวัสดุปอซโซลาน อาจได้มาจากธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ ส่วนทำเทียม ได้แก่ ดินเหนียว หรือ ดินดานเผา ผงถ่านหิน เป็นต้น ปูนนี้จะให้คอนกรีตที่มีการขยายตัวน้อย มีความเก็บน้ำสูง ให้ความร้อนในการทำปฏิกิริยากับน้ำต่ำ
- ปูนซีเมนต์ลูมิน่าสูง
- ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง
- ปูนซีเมนต์ขยายตัว

2.2.4.2 คุณสมบัติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (ประณต, 2538)

ปูนที่ผลิตได้ต้องมีคุณภาพสม่ำเสมอ และเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด
ความละเอียด

ขนาดของอนุภาคของผงปูนซีเมนต์ มีความสำคัญต่ออัตราการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนกับน้ำ นอกเหนือไปจากส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ผงปูนซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคละเอียดกว่า จะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำได้มากกว่า อัตราการทำปฏิกิริยากับน้ำจึงเร็วกว่า มีผลให้อัตราการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์พาสต์เร็วกว่า ทำให้คอนกรีตเกิดกำลังรับแรงอัดในระยะแรกได้เร็วกว่า อย่างไรก็ตามถ้าผงปูนละเอียดมากไป ก็จะทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศก่อนและจับตัวเป็นก้อน ซึ่งทำให้คุณภาพของปูนซีเมนต์เสียได้ นอกจากนี้ ความละเอียดยังมีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีตสดด้วย

การก่อตัวและการแข็งตัว

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมรวมกับน้ำ จะได้ซีเมนต์พาสต์มีลักษณะนุ่มเหลว บั้นง่าย ถ้าปล่อยให้แห้งโดยไม่รบกวน ในไม่ช้าซีเมนต์พาสต์จะสูญเสียความไม่คืนตัวและถึงสถานะที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้โดยปราศจากการแตกหัก การเปลี่ยนสถานะนี้เรียกว่าการก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ตามปกติ การก่อตัว เริ่มเป็นก้อนแข็งมีขึ้นภายในเวลา 2-3 ชม. ซึ่งจะเกิดการแข็งตัวตามมา โดยอาจใช้เวลาเป็นเดือนหรือปี ขึ้นอยู่กับอัตราการทำปฏิกิริยาเคมี

ความอยู่ตัว

เมื่อผลิตปูนซีเมนต์โดยให้มีปริมาณของสารประกอบตรงตามกำหนดแล้ว จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรมากนัก นั่นคือ ปูนซีเมนต์ที่ใช้ให้ความคงตัวนั่นเอง ความไม่อยู่ตัวทำให้เกิดการขยายตัวในเนื้อซีเมนต์ เนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับผลึกในส่วนประกอบของ

ปูนซีเมนต์เป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้มีอัตราหรือคอนกรีตเกิดการแตกร้าวชำรุด โดยปกติจะเกิดจากการที่มีปริมาณฮิปซัม ปูนขาว หรือแมกนีเซียมออกไซด์มากเกินไป

ความแข็งแรง

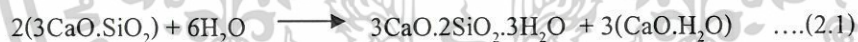
ความแข็งแรงเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของปูนซีเมนต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าปูนซีเมนต์ที่จะนำไปใช้มีคุณภาพดีหรือไม่ ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ไม่สามารถใช้คาดหมายถึงกำลังต้านทานของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะกำลังต้านทานของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นมากมาย ความแข็งแรงของปูนเกิดจากการยึดเกาะกันของซีเมนต์เฟสท์ ซึ่งก็จะขึ้นกับปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในปูนและความละเอียดของผงปูน

การก่อตัวผิปกติ

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เฟสท์และได้รับความชื้นเหลวตามมาตรฐานแล้ว จะแข็งตัวเร็วกว่าปกติโดยไม่เกิดความร้อนมาก การก่อตัวแบบนี้จะไม่ทำให้คุณภาพคอนกรีตเสียไป แต่ถ้าหากการก่อตัวแบบนี้เป็นมาก ก็จะทำให้ต้องใช้น้ำในการผสมคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งก็จะทำให้ความแข็งแรงของคอนกรีตลดลงมีการหดตัวเมื่อแห้งเกิดการแตกร้าว

2.2.4.3 ปฏิกริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ ปฏิกริยาเคมีระหว่างสารประกอบในปูนกับน้ำจะเริ่มขึ้น เรียกว่า ปฏิกริยาไฮเดรชัน สารประกอบ C_3S และ C_2S ที่อยู่ในผงปูนซีเมนต์จะทำปฏิกริยากับน้ำได้ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ (2.1-2.3)



สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท ทำให้ซีเมนต์เฟสท์เกิดเป็นวุ้น มีคุณสมบัติเป็นตัวประสาน มีความเหนียวคล้ายกาว ก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ อาจจะทำปฏิกริยาต่อไปอีกกับวัสดุที่มีธาตุซิลิกา และ อลูมินา ผสมอยู่ เช่นวัสดุปอชโซลาน

สารประกอบ C_3A จะปฏิกริยากับน้ำได้ทันที ซึ่งอาจทำให้เกิดการก่อตัวผิปกติ แต่ในผงปูนซีเมนต์มีฮิปซัมผสมรวมอยู่จึงทำให้ปฏิกริยาไฮเดรชันช้าลง เช่นเดียวกับสารประกอบ C_4AF ที่ จะทำปฏิกริยาอย่างช้าๆ

ความร้อนที่ได้จากการที่ปูนทำปฏิกิริยากับน้ำเรียกว่า “heat of hydration” วัดเป็นแคลอรีต่อกรัมของปูนซีเมนต์ สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาให้ความร้อนประมาณ 85 – 100 แคลอรีต่อกรัม ตามระยะเวลาภายหลังการผสม ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้บางส่วนจะหนีคอนกรีตออกมา แต่บางส่วนจะอยู่ภายในเนื้อคอนกรีต ถ้าความร้อนที่เกิดภายในเนื้อคอนกรีตมีค่าสูง คอนกรีตอาจจะเสียวความแข็งแรงได้ และ ความร้อนนี้จะทำให้เกิด หน่วยแรงต่างๆ ภายในเนื้อคอนกรีตซึ่งเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าว

การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จะหยุดเมื่อน้ำระเหยออกจากเพสท์หมดแล้ว ดังนั้น การบ่มซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีต จึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ เวลาที่ใช้ในปฏิกิริยาให้เป็นอย่างสมบูรณ์ขึ้นอยู่กับปริมาณของปูนในส่วนผสม ชนิดของปูน ความละเอียดของปูน อุณหภูมิ และอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่ำกว่า 0.55 โดยน้ำหนัก จะขึ้นอยู่กับกาให้น้ำจากภายนอกด้วย ถ้าบ่มคอนกรีตที่ใช้กันตามธรรมดา เป็นเวลา 1 เดือน โดยให้อยู่ในสภาวะมาตรฐานของห้องทดลอง จะพบว่าปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับน้ำกว่าร้อยละ 80 อย่างไรก็ตามสภาพในสนาม คอนกรีตจะแห้งภายในเวลาไม่กี่วัน หลังจากนั้นปูนยังจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ต่อไปได้โดยอาศัยน้ำที่ซึมจากใต้ดิน หรือจากความชื้นในขณะฝนตก ดังนั้นภายใต้ภาวะแวดล้อมธรรมดาการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำยังคงมีต่อไปอีกหลายปี

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

- (1) อายุของเพสท์ยกเว้นช่วง Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- (2) องค์ประกอบของซีเมนต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละตัวจะมีค่าต่างกัน
- (3) ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูง จะมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา
- (4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในช่วงต้นอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์จะไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ผลก็คือ ทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉลี่ยและดิกิริการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง
- (5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่เกิดการแห้งตัวของเพสท์
- (6) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัว จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 คอนกรีต

คอนกรีตจัดเป็นวัสดุก่อสร้าง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นหินเทียมที่มนุษย์สร้างขึ้น เป็นของผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับวัสดุผสมคละ เช่น กรวด ทรายต่าง ๆ ทำให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานแทรกตามเม็ดทรายและก้อนหิน รวมตัวกันเป็นก้อนคอนกรีตแบบหล่อ และจะแข็งตัวเมื่ออายุประมาณ 24 ชม. ทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อย ๆ ตามอายุ คอนกรีตที่ดีจะเป็นผลมาจากการที่อนุภาคของวัสดุผสมคละทุกอนุภาคในส่วนผสมถูกเคลือบไว้ด้วยซีเมนต์เพสต์ ซึ่งประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ และอากาศ ช่องว่างระหว่างอนุภาคเอง ก็จะถูกหุ้มไว้ด้วยเช่นกัน

คอนกรีตใช้เป็นวัสดุโครงสร้างได้ดีกว่าวัสดุอื่น ๆ เพราะสามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะ และขนาดได้ตามต้องการ ในเนื้อคอนกรีตจะแบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆคือ ซีเมนต์เพสต์ และ วัสดุผสม คอนกรีตธรรมดาทั่วไปที่ไม่ใช้สารกระจายกักฟองอากาศจะมีปริมาณของซีเมนต์เพสต์ประมาณ 25 – 40 %

คอนกรีตที่ดี

ต้องมีคุณสมบัติเป็นที่พอใจทั้งในสภาพคอนกรีตเหลว เริ่มตั้งแต่การผสม การลำเลียงจาก เครื่องผสม การเทลงแบบ การอัดแน่น และคอนกรีตแข็งตัวแล้ว

คอนกรีตไม่ดี

ความชื้นเหลวไม่เหมาะสมในการใช้งาน แข็งตัวแล้วมีรูโพรงและไม่เป็นเนื้อเดียวกันทั้ง โครงสร้าง

สรุปว่าการที่จะทำคอนกรีตให้ดี ต้องเข้าใจองค์ประกอบต่าง ๆ คือ

1. ต้องมีความรู้ในเรื่องคุณสมบัติของวัสดุและหลักการออกแบบ
2. ต้องทราบสภาพทั่วไปของหน่วยงานก่อสร้าง
3. วัสดุดิบต้องมีคุณภาพมาตรฐานที่กำหนด
4. การชั่งตวงส่วนผสมทุกชนิด ต้องถูกต้อง
5. การผสม การลำเลียง การเท การอัดแน่น ต้องเหมาะสมถูกต้อง
6. การบ่มคอนกรีตเป็นไปด้วยความสม่ำเสมอ
7. การควบคุมงานถูกต้องทุกขั้นตอน

ปัจจัยที่มีผลต่อคอนกรีต

ปัจจัยของการผันแปรกำลังอัดคอนกรีตในโครงสร้างที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งหรืออาจเป็นการผสมกันของหลาย ๆ สาเหตุได้แก่

1. ใช้สัดส่วนที่ไม่เหมาะสม
2. ควบคุมปริมาณน้ำไม่ดีพอ
3. ควบคุมปริมาณฟองอากาศไม่ดีพอ
4. การผสมไม่ดีพอ
5. มีสารอินทรีย์ต่าง ๆ มากเกินข้อกำหนด
6. ใช้หินทรายที่สกปรก
7. ใช้น้ำยาผสมคอนกรีตที่ไม่มีประสิทธิภาพ
8. ไม่ได้ปรับความชื้นในมวลรวม
9. การอัดแน่นไม่ถูกต้อง
10. การบ่มไม่เพียงพอ
11. การลำเลียงและการทดสอบไม่ถูกต้อง
12. อุณหภูมิผันแปรไป

ความเสียหายของคอนกรีต

คอนกรีตในโครงสร้างต่างๆอาจเกิดความเสียหาย หรือขาดความทนทาน อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม หรือสภาพการใช้งานที่ไม่ถูกต้องเหมาะสม ความเสียหายเกิดขึ้นเมื่อเริ่มใช้งานหรือบางครั้งเกิดขึ้นหลังจากการใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง และความเสียหายนี้อาจเกิดขึ้นมาจากหลายสาเหตุภายในหรือภายนอกคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 สาเหตุ คือ

- ด้านกายภาพ เช่น ความเสียหายอันเนื่องมาจากความร้อน ความเย็น การเปียก และแห้งสลับกันไป น้ำหนักบรรทุกมากเกินไป ความล้า อุบัติเหตุ
 - ด้านเคมี เช่น การซึมผ่านของสารเคมีเข้ามากัดกร่อนคอนกรีตและเสริมเหล็ก การกระทำของแบคทีเรีย
 - ด้านกล เช่น การเสียดสีจนเกิดความเสียหาย การกัดกร่อนโดยแรงลม
- ขอบเขตของความเสียหายขึ้นกับองค์ประกอบเฉพาะที่มาเกี่ยวข้องอันได้แก่ คุณภาพของคอนกรีต ความหนาแน่นของคอนกรีต และความรุนแรงของสภาพแวดล้อม เป็นต้น

2.3 เตาเผา (Incinerator)

การบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพและเคมี ไม่สามารถทำลายของเสียอันตรายบางชนิดได้ เช่น น้ำมันสารปราบศัตรูพืชบางชนิด ตัวทำละลายอินทรีย์ สารเคมีที่เสื่อมคุณภาพ จึงจำเป็นต้องทำการกำจัดโดยการนำมาเผาที่อุณหภูมิสูงเพื่อให้ของเสียเปลี่ยนสภาพเป็นเถ้า แล้วนำเถ้านี้ไปฝังกลบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาของเสียอันตรายต้องเผาที่อุณหภูมิสูงถึง 1,000-1,200 °C และต้องมีส่วนเผาไอก๊าซเข้าเพื่อให้มีมลสารเหลือน้อยที่สุด เตาเผาจะต้องมีการปรับอัตราส่วนเชื้อเพลิงและอากาศที่เหมาะสม นอกจากนี้จะต้องมีเครื่องฟอกอากาศเข้า เช่น เครื่องดักฝุ่น เครื่องกำจัดไอกรดต่าง ก่อนปล่อยอากาศออกสู่สิ่งแวดล้อมเตาเผาเป็นห้องขนาดใหญ่ วางเป็นมุมเอียงและหมุนรอบตัวช้าๆ ปล่อยวัตถุดิบให้ไหลมาในช่องทางด้านต่ำสวนทางกับไฟที่พุ่งเข้าไปโดยน้ำมันเป็นเชื้อเพลิง เตาจนวัตถุดิบเข้มตัวที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,500 °C

ในที่นี้ใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) เป็นเตาเผาที่มีรูปร่างทรงกระบอกยาว วางนอนลาดเอียงประมาณ 1°-2° เตาเผาทรงกระบอกจะหมุน 0.5 ถึง 2 รอบต่อนาที โดยหมุนรอบแกนในแนวแกนยาว เตาเผานี้มีช่องใส่ของเสียและมีช่องใส่อากาศเข้าเตาเผาทางด้านหน้าตัดขวาง ส่วนปลายสุดของเตาเผาจะมีช่องถ่านกากออกมาจากเตาเผา และมีช่องระบายก๊าซออกเช่น ก๊าซ CO, CO₂, N₂, O₂ ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น ขั้นตอนของการเผาภายในเตาเผาจะเกิดขึ้น 4 กระบวนการดังนี้ 1) ทำแห้ง (Drying) 2) ทำการเปลี่ยนรูป (Transformation) 3) ทำการเผาไหม้ (Combustion) 4) ทำการเผาให้เป็นเถ้า (Incineration)

เตาเผาแบบนี้สามารถใช้กับของเสียทั้งรูปของเหลว ของแข็งและก๊าซ ประกอบด้วยเตาหมุนและส่วนเผาอากาศที่เกิดจากการผสมผสานของเสียในเตา การหมุนของเตาจะทำให้การเผาไหม้ของเสียเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้เตาเผายังมีกลไกเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน การเกิดปฏิกิริยาเคมีและเกิดก๊าซสำหรับใช้ในกระบวนการต่อไป อุณหภูมิในการเผาไหม้ของเสียอันตรายอยู่ในช่วง 1,100 °C

เตาเผาแบบหมุนสามารถใช้กำจัดตัวทำละลายฮาโลเจนและอินทรีย์สารที่ไม่มีฮาโลเจน สารประกอบอินทรีย์คลอรีน ของเสียประเภทน้ำมัน ดินปนเปื้อนและของติดเชื้อ และยังสามารถกำจัด PCB การน้ำมันดิน (Tars) Obsolete Munitions ของพวกโพลีไวนิลคลอไรด์ และตะกอนจากกระบวนการสกัดตัวทำละลายใหม่ (Solvent Reclamation) จากประสิทธิภาพที่สูงและสามารถบำบัดของเสียได้ทุกรูปแบบ ทำให้เตาเผาแบบหมุนนี้ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นกับของเสียอันตรายผสม ส่วนข้อจำกัดก็คือ อาจเกิด Thermal Shock จึงต้องมีการบำรุงรักษาอย่างดี และมีค่าใช้จ่ายสูงในการติดตั้ง

ข้อดีและข้อเสียของเตาเผาแบบหมุนมีดังนี้

ข้อดี

1. ขี้เถ้าจากการเผาไหม้มีคุณภาพดีกว่า
2. สามารถป้อนของเสียได้อย่างต่อเนื่อง
3. จะเผาของเสียโดยผ่านการหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สามารถตั้งเวลาการทำงานจากความเร็วจนของตัวหมุนได้
5. อัตราการเสียนี้อยู่ที่ 50%

ข้อเสีย

1. ต้องการพื้นที่มาก
2. การปล่อยมลพิษทางอากาศจะมีมากกว่าแบบแรก เนื่องจากการเป่าลมแรง และปั่นป่วนสูง
3. มีปัญหาในการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องที่ท้ายเตาเผา
4. ค่าลงทุนสูง
5. เกิดเสียงและแรงสั่นสะเทือน

2.3.1 ประเภทของมลพิษทางอากาศจากเตาเผาขยะ

ประเภทของมลพิษทางอากาศ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. Criteria Pollutants เป็นสารมลพิษที่ยอมให้มีได้ในบรรยากาศในปริมาณที่ไม่เกินกำหนด มาตรฐานคุณภาพอากาศ ได้แก่ CO , SO_2 , NO_2 , O_3 , Particulate Matter (PM_{10}) และ Pb
2. Noncriteria Pollutants เป็นสารมลพิษที่ควรตระหนักถึงอันตราย แต่ยังไม่มีการกำหนดไว้ในมาตรฐานคุณภาพอากาศ

มลพิษที่มีปริมาณสูงสามารถจำแนก ได้ดังนี้

- 1) Nitrogen Oxide (NO_x) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง N_2 กับ O_2 ในอากาศระหว่างการเผาไหม้ซึ่งมีความร้อนสูง เป็นสาเหตุของการเกิดฝนกรด
- 2) Sulfur Dioxide (SO_2) เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อตา จมูกและคอ และทำให้เกิดฝนกรด
- 3) Carbonmonoxide (CO) เกิดขึ้นจากการเผาไหม้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ เมื่อปริมาณออกซิเจนไม่เพียงพอจะทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบินเกิดออกซีฮีโมโกลบิน ทำให้ร่างกายขาดออกซิเจนเกิดอาการปวดศีรษะ
- 4) Particulate Matter (PM_{10}) เกิดขึ้นจากกระบวนการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ มีผลต่อทัศนวิสัยการมองเห็น และมีผลต่อสุขภาพ

2.3.2 เทคนิคการบำบัดมลพิษทางอากาศ

1. เทคโนโลยีในการบำบัด NO_x

- Selective catalytic reduction (SCR) โดยการฉีดพ่นแอมโมเนียเข้าไปในก๊าซพิษที่ออกมา เพื่อรีดิวซ์ NO_x ให้กลายเป็นไนโตรเจนโดยใช้โลหะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น Cu, Fe, Cr, Ni เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Selective non catalytic reduction โดยการฉีดพ่นแอมโมเนียเข้าไปในเตาเผาโดยตรงที่อุณหภูมิ 1,300 – 2,200 ° F

2. เทคโนโลยีในการบำบัด Acid Gas

- Source separation of chlorine and sulfur containing wastes แยกขยะที่มีคลอรีนและซัลเฟอร์อยู่มาออก จะทำให้ลดไฮโดรคลอริกและซัลเฟอร์ไดออกไซด์ได้
- Dry scrubbers โดยป้อนสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตและปูนขาวเข้าไปในตัวหัวฉีดให้ทำปฏิกิริยากับ Acid Gas เช่น HCl, SO₂ เป็นต้น Acid Gas จะถูกดูดซับที่ผิวของหยดสารละลายและทำปฏิกิริยาเกิดสารที่เป็นกลางเช่น แคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) %, แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl₂) โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) อนุภาคเหล่านี้จะถูกกำจัดในถังดักจับอนุภาคฝุ่นต่อไปพร้อมกับเถ้าลอย

2.4 เถ้าลอย (Fly Ash)

เถ้าลอยเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolana) อย่างหนึ่งตาม ASTM C595 ซึ่งในความหมายของสารปอซโซลาน (Pozzolana) นั้นหมายถึง วัสดุซึ่งตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นสารเชื่อมประสานได้ (นฤมิตร, 2538) โดยส่วนใหญ่เถ้าลอยจะถูกเก็บรวบรวมโดยอุปกรณ์ทำให้เกิดเย็นลงและอุปกรณ์บำบัดแก๊สจากการเผาไหม้ แล้วถูกลำเลียงผ่านสายพานเพื่อเก็บไว้ในบ่อ หรือ ห้องเก็บเถ้า ในที่นี้เราจะกล่าวถึงเถ้าลอยจากเตาเผาขยะอันตราย เถ้าลอยจะลอยตัวปะปนมาพร้อมกับไอร้อนไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าบริเวณปล่องควัน และจะถูกดูดจับรวมไว้ใน Ash Hopper ซึ่งจะถูกเก็บรวบรวมและส่งมาตามท่อ เพื่อนำมาผสมกับปูนซีเมนต์และน้ำในอัตราส่วนที่เหมาะสม บ่มจนแข็ง แล้วจึงนำไปฝังกลบต่อไป

2.4.1 ลักษณะของเถ้าลอย

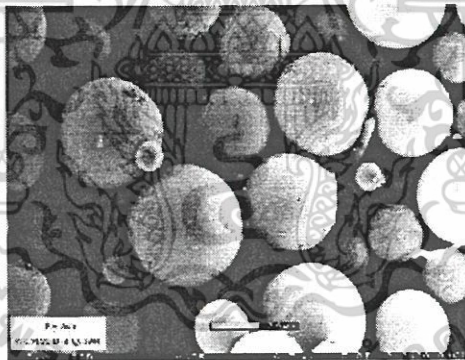
เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีลักษณะค่อนข้างเป็นทรงกลม บางครั้งอาจพบเป็นรูพรุนซึ่งมีน้ำหนักเบาลอยน้ำได้หรืออาจพบในลักษณะที่มีรูปร่างไม่แน่นอนดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจะต่างจากซีเมนต์ที่มีรูปร่างลักษณะเป็นแท่งหรือเหลี่ยม ขนาดของอนุภาคจะอยู่ระหว่าง 1-1000 μm โดย 50 % ของเถ้าลอยจะมีขนาดน้อยกว่า 100 ไมโครเมตร (μm) และด้วยการที่เถ้าลอยเป็นอนุภาคทรงกลมที่เล็กละเอียดจึงทำหน้าที่ลดช่องว่างที่เป็นโพรงอากาศในซีเมนต์ได้ดี ทำให้มีความแข็งแรงระยะยาว เถ้าลอยเมื่อสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติ จะสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสาร Ca(OH)₂ และเกิดเป็นสารใหม่ที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน เถ้าลอยมีส่วนประกอบหลักเป็น

ซิลิกา อลูมินาและเนื่องจากเถ้าลอยที่ได้เป็นเถ้าลอยที่มาจากเตาเผาขยะอันตรายจึงมีสารจำพวก Polychlorinated dibenzo-p-dioxins อยู่ด้วย เถ้าลอยมีคุณสมบัติไม่คงที่ เนื่องจากขยะที่เข้ามาเผาในแต่ละวันแตกต่างกันออกไป และในแต่ละชนิดของขยะแต่ละประเภทที่ถูกเผาจะมีองค์ประกอบต่างๆกันไป ดังแสดงในตารางที่ 2.1

จากตารางที่ 2.1 พบว่าขยะที่มาจากแหล่งที่ต่างกัน มีองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FA / FGC) ต่างกัน หรือแม้แต่วัสดุที่มาจากแหล่งเดียวกันก็มีองค์ประกอบที่ต่างกัน เนื่องจากขยะหลากหลายประเภทและมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน ทำให้มีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง (Stabilization / Solidification)

2.4.2 คุณสมบัติของเถ้าลอยในการเพิ่มประสิทธิภาพปูนซีเมนต์

1. เพิ่มความสามารถในการใช้งาน (Workability)
2. การทำให้ถนนเกิดเสถียรภาพ (Road Stabilization)
3. ลดการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัว (Shrinkage Crack Reduction)
4. ลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration Reaction)
5. ทำให้คอนกรีตมีอายุยืนขึ้น (Increase Durability)



รูปที่ 2.4 ภาพขยายของเถ้าลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆ

ธาตุองค์ประกอบ ในเถ้า	แหล่งขยะที่มาของเถ้าลอย (+FGC)					แหล่งขยะที่มาของเถ้าหนัก	
	อุตสาหกรรม (1)	โรงพยาบาล (2)	ชุมชน (3)	ชุมชน (4)	การผ่านการบำบัดก๊าซพิษ (5)	ชุมชน (6)	โรงพยาบาล (7)
Zn	310000	3528.2	4386	5000-8000	17000	50-500	201
Pb	140	706.4	1496	100-300	3100	50-300	<80
Cu	315	4441	313	-20	500	50-200	1084
Ni	106	164.9	60.8	-	-	-	332
Fe	1350	6293	25777	-	6200	2700	4659
Hg	-	-	52	1-3	9	0.01-0.1	-
Al	-	-	-	-	26000	5600	8393
Cr	-	-	-	10-100	190	2-10	168
Cd	-	-	25.5	100-300	140	0.5-5	<8
Cl	-	-	-	30000-50000	17000	1000-6000	<0.01
SO ₄	-	-	-	30000-80000	6000	8000-18000	0.09

ที่มา : (1) Fitch, J.R. and Cheeseman, C.R (2003)

(2) Idris, A. and Saed, K. (2002)

(3) Youcaf *et al.* (2002)

(4),(5) Kosson *et al.* (1993)

(6) Chandler *et al.* (1994)

(7) Filipponi *et al.* (1988)

2.5 ผลของคลอไรด์และซัลเฟตต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

ในการเผาขยะอุตสาหกรรมจะเกิดก๊าซพิษที่ก่อให้เกิดอันตราย จึงจำเป็นต้องทำการบำบัด โดยใช้สารเคมีบางชนิดเช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH_2) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (Flue gas cleaning products , FGC) เกิดขึ้น เช่น แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) และ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งมีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

2.5.1 ผลของแคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2)

- คลอไรด์จากเถ้าลอย

โดยทั่วไปคลอไรด์จากเถ้าลอยจะอยู่ในรูปแคลเซียมคลอไรด์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และนอกจากนี้ยังใช้เป็นสารตัวเติมที่แข็งแรงปฏิกิริยาระหว่างคอนกรีตกับน้ำ ช่วยให้ระยะเวลาการบ่มตัวน้อยลง ลดระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์ ก้อนซีเมนต์จะแข็งตัวเร็วขึ้น ในการใช้สารเคมีเป็นสารตัวเติมนั้นควรใส่ในรูปสารละลาย จะช่วยให้ทำงานได้ดีขึ้นถ้ามีแคลเซียมคลอไรด์ ในปริมาณน้อยจะช่วยลดความเป็นพิษของเถ้าลอย (FA) และผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FGC) ได้ดี

เมื่อมีปริมาณแคลเซียมคลอไรด์ปริมาณมาก สิ่งที่เกิดขึ้นได้หลังจากทำการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง คือ สีของก้อนซีเมนต์จะเข้ม นอกจากนี้ยังทำให้กำลังคัดของคอนกรีต (Tensile Strength) และกำลังรับแรงดิ่ง (Flexural Strength) จะลดลง ก้อนซีเมนต์เมื่อเกิดการแข็งตัวได้เร็ว อาจมีการเปราะได้ง่าย (Abram, 1989)

- คลอไรด์จากสิ่งแวดล้อมภายนอก

นอกจากนี้แล้วยังมีคลอไรด์ที่อยู่ในคอนกรีตเอง เช่น ในน้ำที่ใช้ผสม หิน ทราย คุ้งงไรก็ตาม ได้มีการกำหนดมาตรฐานไว้สำหรับปริมาณคลอไรด์ที่ยอมรับได้ในคอนกรีตสด แต่ปัญหาของคลอไรด์ที่กระทบต่อความทนทานของคอนกรีตนั้น ส่วนมากจะมาจากภายนอกคอนกรีตในช่วงที่ใช้งาน ซึ่งคลอไรด์จะเข้าสู่คอนกรีตได้โดยวิธีต่อไปนี้

1. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตที่แห้งของน้ำที่มีคลอไรด์
2. การแพร่ของไอออนของคลอไรด์จากภายนอกที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าภายในคอนกรีต
3. การซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตของน้ำที่มีคลอไรด์ โดยแรงดันของน้ำ

สถานะของคลอไรด์ในคอนกรีต

คลอไรด์เมื่ออยู่ในคอนกรีตนั้น จะมีคลอไรด์บางส่วนที่ถูกจับยึด โดยกลไกดังต่อไปนี้

- 1) Chemical binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น ผลผลิตของ C_3A และ C_4AF ในรูปของ $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ หรือ $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ หรือแม้แตอยู่ในโครงสร้างของผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- 2) Physical Binding คลอไรด์บางส่วนจะสามารถถูกยึดด้วยแรงทางกายภาพ ได้บนผิวของผลผลิตไฮเดรชัน เช่น C-S-H และ C-A-H เป็นต้น อีกทั้งยังสามารถถูกยึดอยู่บนผิวของวัสดุที่เป็นของแข็งที่ไม่มีปฏิกิริยา คลอไรด์ส่วนที่ไม่ถูกจับยึดเรียกว่า คลอไรด์อิสระ ซึ่งจะ มีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่ อยู่ช่องว่างของคอนกรีต คลอไรด์อิสระนี้เป็นส่วนของคลอไรด์ที่สามารถแพร่เข้าไปยัง คอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่า และ เป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นด่างในคอนกรีตลดลง ดังนั้นถ้าสามารถจับยึดคลอไรด์ไว้เป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถยืดเวลาของการเกิดสนิมในเหล็กเสริมออกไปได้

2.5.2 ผลของแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$)

- ซัลเฟตจากเต้าลอย

ผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (Flue gas cleaning products , FGC) ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ แคลเซียมซัลเฟต ถ้ามีแคลเซียมซัลเฟตอยู่ในปริมาณที่มากจะชะลอการแข็งตัว และเป็นสาเหตุให้เกิดการพองตัวในซีเมนต์ที่ทำการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งแล้วก่อให้เกิดการแตกร้าวและความแข็งแรงลดลง

- ซัลเฟตจากสิ่งแวดล้อมภายนอก

นอกจากนี้ยังมีซัลเฟตจากภายนอกที่ทำอันตรายต่อก่อนแข็งอีกดังแสดงดังรูปที่ 2.5 คือ เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของสารละลายสามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์พอสต์ในคอนกรีตได้ด้วยอย่างของเกลือซัลเฟตที่พบมากในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อคอนกรีต เช่น โซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต ซึ่งโดยธรรมชาติ

ซัลเฟตแต่ละชนิดจะมีความสามารถการละลายน้ำไม่เท่ากันคือ

- 1) คัลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร
- 2) โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร
- 3) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร

จะเห็นได้ว่า แมกนีเซียมซัลเฟตมีความสามารถละลายน้ำได้มากกว่า $CaSO_4$ ถึง 250 เท่า ดังนั้นจะทำอันตรายต่อคอนกรีตได้มากกว่า

ลักษณะการสัมผัสของซัลเฟตและคอนกรีต

แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

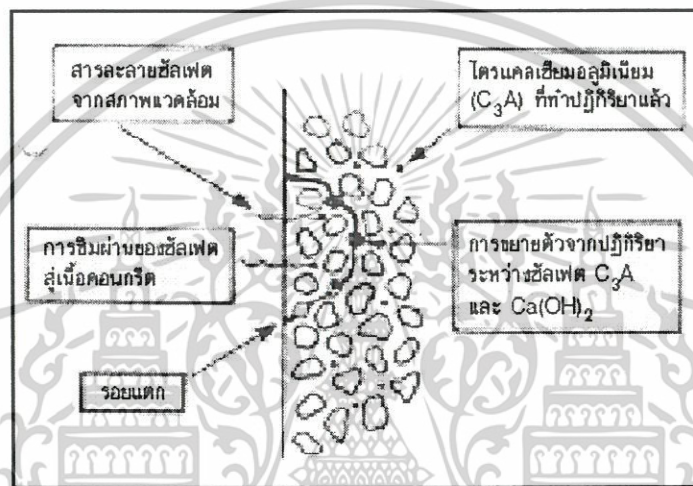
1) สภาพอยู่นิ่ง เมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างซัลเฟตกับองค์ประกอบทางเคมีในปูนซีเมนต์แล้ว

ปฏิกิริยา

จะสิ้นสุดเมื่อถึงจุดสมดุลย์

2) สภาพเคลื่อนไหว ปฏิกิริยาจะเกิดอยู่ตลอดเวลา เพราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาสิ่งที่เกิดจะถูกชะล้าง

ไป



และมีซัลเฟตเข้ามาใหม่ตลอดเวลาจะไม่ถึงจุดสมดุลในกรณีนี้

รูปที่ 2.5 ความเสียหายของคอนกรีตจากซัลเฟต (ที่มา : ชีจวาล, 2536)

กลไกการทำลายของซัลเฟต

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟต สามารถทำได้โดยการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์มอร์ต้าหรือคอนกรีตไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต

- กลไกการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต

กลไกนี้เริ่มต้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างโซเดียมซัลเฟตกับ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการ 2.4 ทำให้ได้โซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งทำให้ค่า pH ของซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นเป็น 13.5 ซึ่งมากกว่าค่า pH ของสารละลาย CH อิมมัตว ดังนั้นจึงเป็นการรักษาเสถียรภาพของ C-S-H และ Ettringite ไม่ให้ทำปฏิกิริยาหายไปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น สารยิปซัม (CSH_2) ที่ได้จากสมการ 2.4 จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต (C_4AH_{13}), โมโนซัลเฟต (C_4ASH) และไตรแคลเซียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

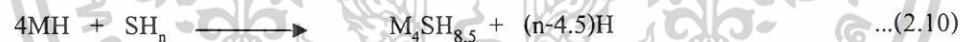
อลูมินา (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ได้ Secondary Ettringite อีก ดังแสดงในสมการ 2.5 ถึง 2.7 เนื่องจากโดยธรรมชาติแล้ว Ettringite มีความหนาแน่นต่ำกว่า ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นผลที่เกิดจากการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและการแตกร้าวของคอนกรีต



โดยที่ $C = CaO$, $N = Na_2O$, $M = MgO$, $S = SiO_2$, $S = SO_3$, $H = H_2O$

- กลไกการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟต

กลไกการทำลายเริ่มต้นจากปฏิกิริยาในสมการ 2.8 และดำเนินไปเรื่อย ๆ จนถึงสมการที่ 2.10 อย่างไรก็ตาม MH ที่เกิดขึ้นนี้ไม่เหมือนกับ NH ตรงที่ความสามารถในการละลายน้ำที่น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่า 10.5 ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettringite ไม่มีเสถียรภาพ



2.5.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายโดยซัลเฟต

- 1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟต ตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต ถ้ามีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงก็จะมีการทำลายที่รุนแรงมากขึ้น
- 2) ความชื้นน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความชื้นน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตซึมผ่านเข้าไปในคอนกรีตได้ยากขึ้น ทำให้ระดับความรุนแรงลดลง
- 3) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF น้อยจะมีแนวโน้มที่จะต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และ C_4AF สูง
- 4) ถ้าสามารถลดปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตได้ก็จะช่วยลดความรุนแรงได้ด้วย อาจทำได้โดยใช้สารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

- 1) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A และอัตราส่วน C_3S ต่อ C_2S ต่ำ นั่นคือปูนซีเมนต์ชนิดที่ 5 หรือที่เรียกว่า ปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟต
- 2) การใช้สารปอซโซลานทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วน ซึ่งจะช่วยลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ รวมทั้งลด C_3A และยังสามารถช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้กับคอนกรีตได้ด้วย
- 3) ลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูงขึ้น
- 4) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เฟสที่ไม่มากเกินไป
- 5) ในกรณีที่ต้องสัมผัสกับซัลเฟตที่รุนแรงอาจต้องใช้วิธีเคลือบผิวคอนกรีตเพื่อป้องกันโครงสร้าง

2.6 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

2.6.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

คุณสมบัติของคอนกรีตที่ยังอยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญในขณะก่อสร้างเท่านั้น แต่คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีไปตลอดการใช้งานของคอนกรีตนั้น ๆ คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วซึ่งนิยมนำมาใช้เป็นตัวกำหนดในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไป คือ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) เนื่องจากกำลังรับแรงอื่นๆ เช่น กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) มักจะนิยมนำมาให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังรับแรงอัด ดังนั้นคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงก็จะมีกำลังรับแรงอื่นๆ สูงตามไปด้วย

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไปมักจะกำหนดให้ใช้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ นั่นคือที่อายุดังกล่าวกำลังรับแรงอัดจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าที่ต้องการ แต่สำหรับงานคอนกรีตบางประเภทที่กำหนดให้ใช้กำลังรับแรงอัดที่อายุอื่นๆ เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ ก็ควรจะใช้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเป็นค่าอ้างอิงก่อนหลังจากนั้นจึงใช้สัมประสิทธิ์ตัวคูณซึ่งหามาจากหลักการของการพัฒนา กำลังรับแรงอัดปรับค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน ให้เป็นกำลังรับแรงอัดที่อายุอื่นๆ ที่ต้องการ

2.6.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

1) คุณสมบัติของวัสดุผสม

- **ปูนซีเมนต์** เป็นปัจจัยที่สำคัญมาก เพราะปูนแต่ละประเภทจะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และแม้ว่าจะเป็นปูนประเภทเดียวกันแต่ถ้าความละเอียดต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วย

- น้ำ น้ำมีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ในน้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูงน้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

2) การทำคอนกรีต

- การชั่งตวงผสม หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

- อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรงโดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์

- การผสมคอนกรีต จะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้น การผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

- การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะที่ล้นเลียง หรือ เท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัว หากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้ หรือหากใช้วิธีทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสม ก็สามารทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

3) การบ่มคอนกรีต

- ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

- อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่มจะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตถูกเร่งให้เร็วขึ้น ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิต่ำกว่า

- เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ชื้นอยู่ตลอดเวลาได้ยิ่งนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

4) การทดสอบ

- ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ การใช้แท่งทดสอบที่ขนาดและลักษณะต่างกันจะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความแตกต่าง
- ความชื้นในแท่งทดสอบ ในขณะที่จะทำการทดสอบถ้าหากแท่งทดสอบมีความชื้นก็จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้งกว่า
- อัตราการกด ในการทดสอบกำลังอัด ถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

5) ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในวัสดุประสาน (CaO)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดที่ถูกนำมาพิจารณาได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญซึ่งมีอยู่ในสารเกิดปฏิกิริยาสำคัญ 4 ตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั่นคือ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF จากการสังเกตผลทดลองสรุปได้ว่า เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน การเพิ่มของแคลเซียมออกไซด์โดยรวมในคอนกรีตจะทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยทำให้ปริมาณแคลเซียมออกไซด์โดยรวมลดลง เนื่องจากเถ้าลอยมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นปริมาณของเถ้าลอยที่แทนที่ปูนซีเมนต์จึงมีผลสำคัญต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในระยะยาวไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับปริมาณซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2)

2.6.1.2 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัด

- วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะใช้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสแบบหล่อ
- เช็ดผิวหน้าทั้งสองด้าน
- ใช้แรงกดทับแท่งตัวอย่าง โดยผิวหน้าของเครื่องมือทั้ง 2 ด้าน ที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบ และตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่องจนก่อนคอนกรีตเกิดความเสียหาย
- บันทึกค่าสูงสุด

และค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ของระยะเวลาที่บ่มต่างๆกันตามเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 กำหนด คือ มีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2.6.2 การทดสอบการชะละลาย (Leaching Test)

การทดสอบการชะละลายแบ่งออกได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์คุณภาพของสารที่ต้องการทดสอบ โดยใช้ปริมาณตัวอย่างสาร วิธีการเตรียมสารตัวอย่าง และเครื่องมือที่แตกต่าง

ในอดีตการทดสอบการชะละลายของสารนิยมนำมาใช้ทั้งวิธี Batch tests และ Column tests ปัจจุบันการออกแบบเครื่องมือสำหรับ Batch tests จะใช้กับการทดสอบการชะละลายของของเสียก่อนที่จะนำไปกำจัดโดยการฝังกลบ U.S.EPA (1988) ได้กำหนดวิธี Toxicant Extraction Procedure (TEP) เป็นวิธีที่ใช้บังคับ ต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการเป็นวิธี Extraction Procedure (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน สืบเนื่องจากตารางที่ 2.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบวิธีการทดสอบการชะละลาย (Extraction Test Procedures)

การทดสอบการชะละลาย	Standard Leach Test	(US EPA) Toxicant Extraction Procedure	ASTM Method A	Extraction Procedure ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6
1. ปริมาณสารตัวอย่าง	28.6 กรัมตัวอย่างสาร (ส่วนที่เป็นของแข็ง)	ไม่ระบุน้ำหนักค่าสุด	350 กรัม	น้ำหนักอย่างน้อย 100 กรัม (0.5% ของแข็ง)
2. การเตรียมตัวอย่างสาร	แยกของเหลวโดยใช้ 0.45 μm pressure filtration	แยกของเหลวโดยวิธี centrifugation หรือ filtration	4 : 1	บดจนมีขนาด 9.5 มม.
3. อัตราส่วนของเหลวต่อของแข็ง	10 : 1 ถึง 7 : 1	10 : 1 ถึง (เริ่มต้น 8 : 1)	ASTM type IV water	20 : 1 (เริ่มต้น 16 : 1)
4. สารที่ใช้ทดสอบการชะละลาย (Extraction Solution)	buffered acetic acid หรือ น้ำกลั่น	acetic acid หรือ Sodium hydroxide	ไม่กำหนด	0.5 N acetic acid , 4 มล/ก ของตัวอย่างสาร
5. การควบคุม pH		4.8-5.2	ขูดปากกว้าง (ปิดฝา)	4.8-5.2
6. ภาวะที่ใช้ทดสอบ	ภาชนะปิด	ไม่กำหนด	reciprocating shaker 48 ซม.	เครื่องกวนหรือเครื่องมือที่เทียบเท่า
7. วิธีการผสมและระยะเวลาการทดสอบ	rotating shaker 24 ชม.	mechanical stirring 24 ชม.		เครื่องกวนต่อเนื่อง 24 ชม.
8. การแยกของเหลวและของแข็ง	กรองผ่านกรองใยแก้ว ขนาด 0.45 μm	Centrifugation หรือกรองผ่านกรองขนาด 0.45 μm	กรองผ่านกรองขนาด 0.45 μm โดยใช้เครื่องกรองแบบความดันหรือแบบสุญญากาศ	กรองผ่านกรอง 0.45 μm

ที่มา : Perket และ Webster, 1981

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shively *et al.* (1986) : ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการกำจัดโลหะหนักโดยการทำให้เป็นก้อนและทดสอบการชะละลายโลหะหนัก (Leaching Tests) และกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) โดยทดสอบโลหะหนัก 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ คือ การทดสอบความเข้มข้นของน้ำสกัดจากของเสียทั้ง 4 ชนิด ทั้งกรณีที่ใช้อัตราส่วนผสมน้ำ : ซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนผสมของน้ำจาก 0.5 เป็น 1.0 การละลายโลหะหนักออกจากของเสียแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเมื่อเริ่มการสกัดโลหะหนัก แคดเมียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในซีเมนต์จะทำหน้าที่ทำลายฤทธิ์ของกรดที่ใช้สกัดให้เป็นกลาง ทำให้ค่าพีเอช มีค่ามากกว่า 10.0 และมีการละลายของสารในซีเมนต์เพียงเล็กน้อย ในช่วงที่สองจะมีการละลายของโลหะหนักสูงสุด ค่า pH มีค่า < 6.0 การสกัดแต่ละครั้งจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณโลหะหนักในของเสีย

และจะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาการบ่ม 14 วัน พบว่าเมื่อใช้อาร์เซนิก และแคดเมียม มากำจัดโดยการทำให้เป็นก้อนจะทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่า W/C 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังรับแรงอัดเฉพาะค่า W/C 0.5 ส่วนโครเมียม และตะกั่ว จะไม่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

Leangon (1993) : ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาหาวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนของกากตะกอน จากโรงงานฟอกหนัง และกากตะกอนจากโรงงานเซรามิกคอนกรีตเคอร์ และใช้วัสดุประสาน 5 ชนิดที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าจากแกลบ เถ้าลอย ลิกไนต์ และซิลิกาฟูมจากการทดสอบกระบวนการทำให้เป็นก้อน โดยใช้วัสดุประสานผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของก้อนของเสียแข็งตัว อาทิ กำลังรับแรงอัด การชะละลายและค่าใช้จ่ายในการกำจัด พบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกำจัดกากตะกอนดังกล่าวมีดังนี้

	ปูนซีเมนต์ :	เถ้าจากแกลบ :	เถ้าลอยลิกไนต์
1. กากตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง	0.7	: 0.2	: 0.1
2. กากตะกอนจากโรงงานเซรามิกคอนกรีตเคอร์	0.7	: 0.1	: 0.2

โดยสามารถกำจัดกากตะกอนได้สูงสุดในอัตราส่วน กากตะกอน : วัสดุประสาน 0.64 และ 1.37 ตามลำดับ

Fuessle *et al.* (1992) : ได้ทำการศึกษาการทำลายฤทธิ์ของฝุ่นจากเตาหลอมที่ใช้ ไฟฟ้าอาร์ค โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ และส่วนผสมอื่น ได้แก่ เถ้าลอยและซิลิกาฟูม ศึกษาเปรียบเทียบผลของการเติมเถ้าลอยและซิลิกาฟูม ที่อัตราส่วนผสมของวัสดุประสานต่อของเสีย 0.12 และ 0.2 โดยใช้ระยะเวลาบ่ม 60 วันและ 335 วัน จากผลการทดสอบการชะละลายโดยวิธี TCLP พบว่า ที่ระยะเวลาบ่ม 60 วัน การใช้เถ้าลอยเป็นส่วนผสมของวัสดุประสานจะช่วยให้ประสิทธิภาพการบำบัด สูงกว่าการใช้ซิลิกาฟูมเป็นส่วนผสม ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย ได้แก่ แคดเมียม โครเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับที่ระยะเวลาบ่ม 335 วัน ซิลิกาฟูมทำให้ประสิทธิภาพ ในการบำบัดสูงกว่าการใช้เถ้าลอยโดยเฉพาะแคดเมียม ตะกั่ว และนิกเกิล

พรเทพและวสันต์ (2546) : ทำการศึกษาเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาลด้วยวิธียัดจับ ซีเมนต์ได้แปรค่าส่วนผสมของเถ้าในการหล่อคอนกรีตต่อซีเมนต์ คือ 0:100, 5:95, 10:90, 20:80, 33:67 และ 50:50 ตามลำดับ และใช้สัดส่วนของเถ้าในการหล่อคอนกรีตต่อซีเมนต์ คือ 0:100, 5:95, 10:90 20:80, 33:67 และ 50:50 ตามลำดับ โดยใช้ทรายเป็นสองเท่าของปริมาณเถ้าและซีเมนต์รวมกัน และใช้น้ำ 50 มิลลิลิตร และทำการหล่อก้อนซีเมนต์แล้วถอดแบบภายใน 24 ชั่วโมง บ่มต่อจนครบ 7 14 และ 28 วัน

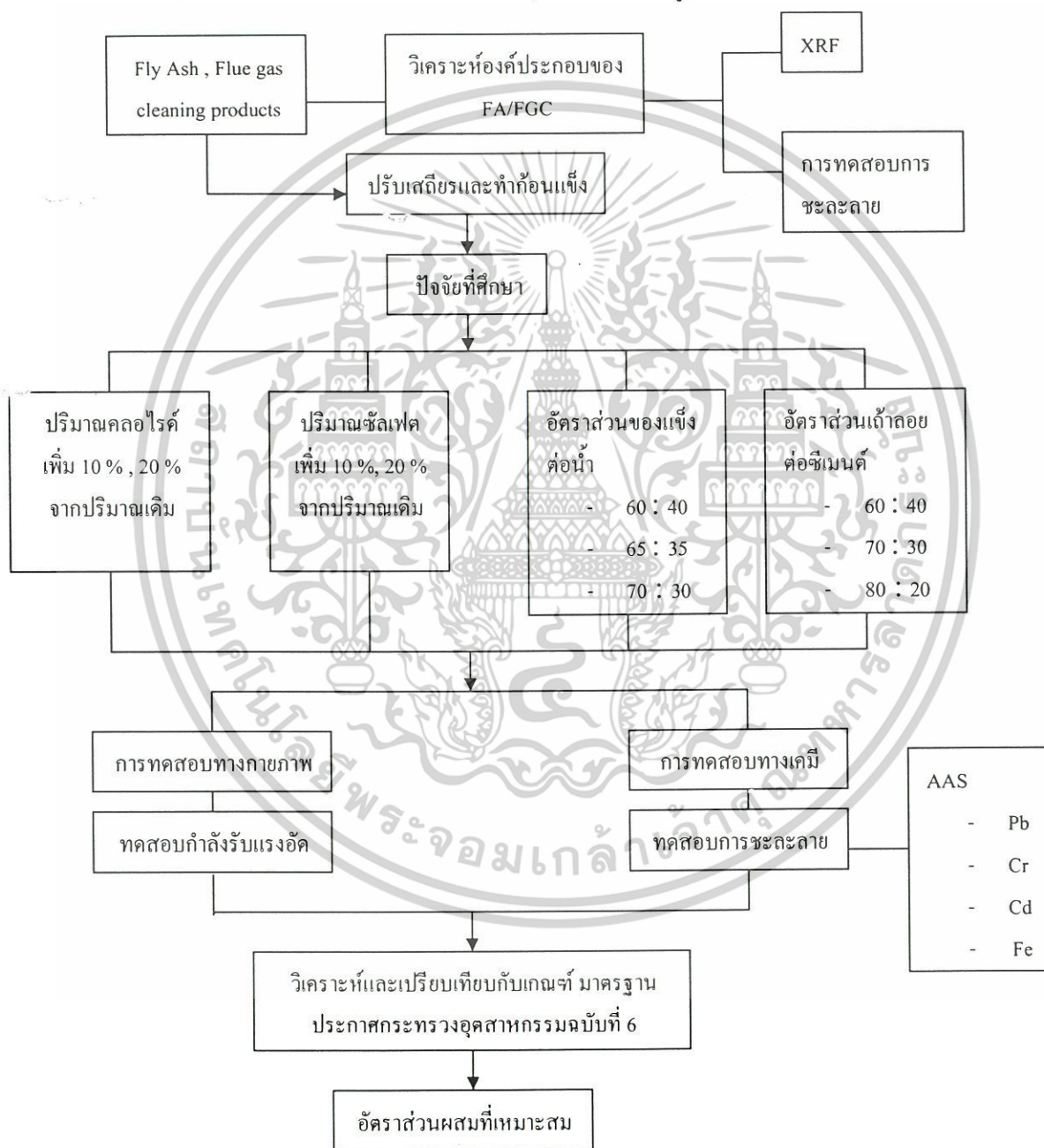
จากการศึกษา พบว่าค่าการรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต จะมีค่าลดลงตามเปอร์เซ็นต์ (%) เถ้าใน ซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมของเถ้าต่อซีเมนต์ คือ 40 % และการศึกษาอิทธิพลของจำนวนวัน ในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต โดยทำการบ่มที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ค่า กำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 แผนการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาได้มีขั้นตอนการทำงานหลักๆดังแสดงได้ในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนโดยรวมของงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

ถ้ำลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FA/FGC) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 นำมาจากถุงคัก จีบอนุภาคฝุ่น (Baghouse) จากโรงงานเผาขยะอุตสาหกรรมแห่งหนึ่ง โดยขยะที่นำมาเผาในแต่ละวันจะแตกต่างกัน ทำให้องค์ประกอบของธาตุในถ้ำลอยแตกต่างกันด้วย



รูปที่ 3.2 ถ้ำลอยที่ใช้ในการศึกษา

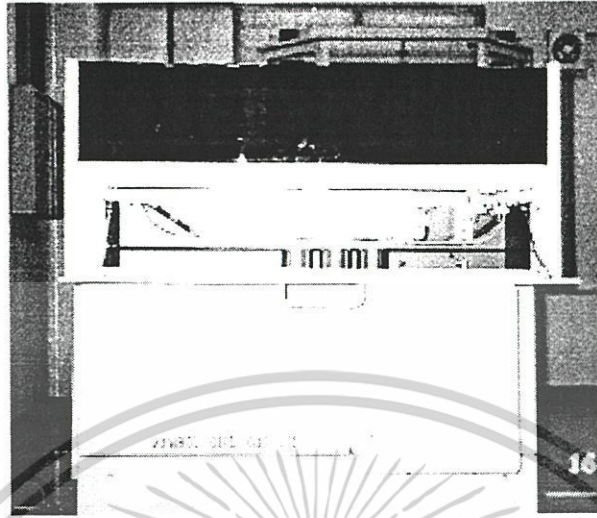
3.3 การวิเคราะห์ถ้ำลอย

3.3.1 การวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy มีวัตถุประสงค์เพื่อหาองค์ประกอบของถ้ำ และปริมาณโลหะหนักที่มีอยู่ในถ้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) นำถ้ำขยะตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรู 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 โดยใช้เครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 3.3

ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray fluorescence spectroscopy สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 เครื่อง X-ray fluorescence spectroscopy

นำถ้ำ 2.5 กรัม ผสมกับกรวดบอริก 2.5 กรัม
แล้วบดด้วยเครื่อง Grinding vessel

นำมาใส่ Pallet แล้วอัดให้แน่น
ด้วย เครื่อง Palletizing

วิเคราะห์องค์ประกอบของ
ถ้ำด้วยเครื่อง XRFs

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการวิเคราะห์ถ้ำด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectroscopy

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง

นำเถ้าลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ (FA/ FGC) จากชุดักจับอนุภาคฝุ่นมาผสมกับวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์) ตามอัตราส่วนต่างๆที่เหมาะสม คือ 60:40, 70:30 และ 80:20 โดยอัตราส่วนของของแข็งต่อน้ำคือ 60:40, 65:35 และ 70:30 และทำการบ่มที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วันจากนั้นนำไปทำการทดสอบด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีต่อไป

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) แบบหล่อลูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม.
- 2) เครื่องผสม
- 3) เกรียงเหล็ก
- 4) เหล็กกระทุ้งปลายมน
- 5) ไม้บรรทัดเหล็ก

วัสดุ

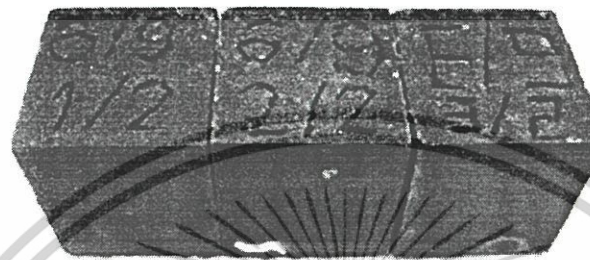
- 1) เถ้าลอย
- 2) ปูนซีเมนต์
- 3) น้ำกลั่น

วิธีการทดลอง

- 1) ชั่งน้ำหนัก เถ้าลอย ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนที่ต้องการ ตวงน้ำกลั่นใส่กระบอกลงในปริมาณที่ต้องการ ทำการแปรค่าปริมาณคลอไรด์ ซัลเฟตโดยใช้สัดส่วนผสมคลอไรด์ ซัลเฟตต่อของแข็ง
- 2) ผสมเถ้าลอย และส่วนผสมลงในเครื่องผสม (Mixer) จากนั้นทำการปั่นกวนผสมกันด้วยเครื่องปั่นกวนด้วยอัตราเร็วที่คงที่ เป็นเวลา 30 วินาที
- 3) จากนั้นใช้ไม้เหล็กขูดรอบ ๆ ภาชนะและตรวจดูความหนืด ถ้ามีความหนืดมากเกินไป ให้ทำการคำนวณน้ำเติมเพิ่มลงไปครั้งละ 5 % ของปริมาตรที่เติมในครั้งแรก
- 4) เมื่อคอนกรีตมีความหนืดที่เหมาะสมแล้ว ทำการเติมคอนกรีตลงในแบบหล่อขนาด 5x5x5 ลบ. ซม. การหล่อแบ่งเป็น 3 ชั้น หนาประมาณชั้นละ 1.7 ซม. จากนั้นทำการกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งปลายมน ประมาณ 25 ครั้ง
- 5) เติมคอนกรีตชั้นที่ 2 และ 3 แต่ละชั้นกระทุ้ง 25 ครั้งด้วยเช่นกัน
- 6) ปาดหน้าคอนกรีตให้เรียบ จากนั้นใช้เกรียงขูดขอบแบบหล่อซ้ำอีกครั้ง แล้วใช้พลาสติกห่อหุ้ม แบบหล่อ แล้วคว่ำวันที่ทำและสูตร ที่ใช้ในการทดลอง เมื่อแห้งจะได้ก้อนคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

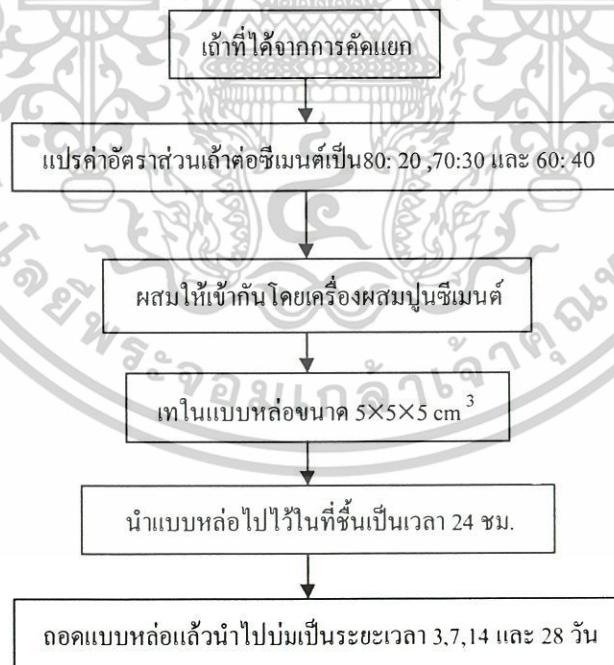
- 7) บ่มจนครบ 3, 7, 14, 28 วัน แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตและการชะละลายต่อไป
- 8) ทำเช่นเดียวกับข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนสัดส่วนของของแข็งต่อน้ำ (S/W) etailoyต่อซีเมนต์ (FA/Cement) แคลเซียมคลอไรด์และแคลเซียมซัลเฟต



BK310104_1630

รูปที่ 3.5 ก้อนคอนกรีตหลังจากถอดแบบหล่อ

ขั้นตอนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งแสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการหล่อและบ่มก้อนคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต.

นำก้อนซีเมนต์ที่ได้จากการปรับเสถียรแล้ว หลังจากทำการบ่มเป็นเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน มาทำการทดสอบหาลังรับแรงอัดเพื่อดูความแข็งแรงของก้อนซีเมนต์ และหาระยะเวลาของการบ่มว่าที่ระยะเวลาการบ่มเท่าไร จะสามารถทนแรงอัดได้สูงที่สุด

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) เครื่องทดสอบแรงอัดคอนกรีต (Compression Machine) แบบเกลียวหมุนโยกด้วยมือ
- 2) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper)
- 3) เครื่องชั่งละเอียด 1 กรัม

วิธีทดสอบ

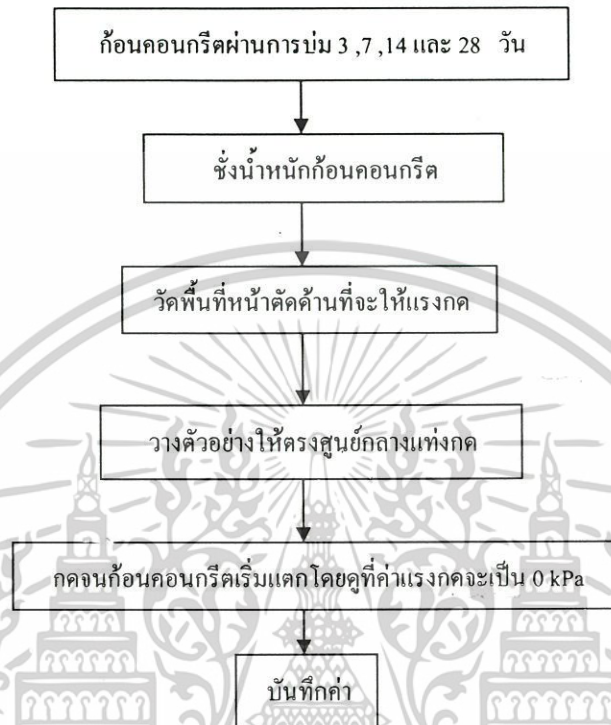
- 1) นำก้อนซีเมนต์ตัวอย่างที่จะทดสอบชั่งน้ำหนักเพื่อคำนวณความหนาแน่นโดยหารด้วยปริมาตรของก้อนตัวอย่าง พื้นที่หน้าตัดที่ด้านที่สัมผัสกับเครื่องคังแสดงในรูปที่ 3.7
- 2) ทำความสะอาดพื้นผิวของแท่นกดเครื่องทดสอบ
- 3) วางแท่งตัวอย่างทดสอบโดยวางให้ตรงแนวศูนย์กลางของแท่นกดแท่นบน และ แท่นล่าง
- 4) ทำการเดินเครื่องทดสอบ โดยเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอ ไม่ควรปรับอัตราการเพิ่มแรงกดในระหว่างที่แท่งตัวอย่างถึงบริเวณใกล้เคียงตัวอย่างจนถึงจุดวิบัติ (Critical point)
- 5) ทำการจดจนกระทั่งแท่งคอนกรีตตัวอย่างแตก พร้อมบันทึกค่าแรงสูงสุดไว้



รูปที่ 3.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression Machine)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัด แสดง ได้ดังภาพที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.6 การทดสอบการชะละลาย

นำก้อนซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบหาลังรับแรงอัดแล้วมาทำการทดสอบทางเคมี คือการชะละลาย ด้วยวิธีมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พศ. 2540) ทำได้โดยใช้กรดกำมะถันและกรดไนตริก เป็นตัวสกัดโลหะหนักทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมงจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนัก โดยใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy)

เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) ตะแกรงร่อน
- 2) บีกเกอร์ ขนาด 50 มิลลิลิตร
- 3) เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน
- 4) ขวดวัดปริมาตร
- 5) กระจกบอกตวงขนาด 1000 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

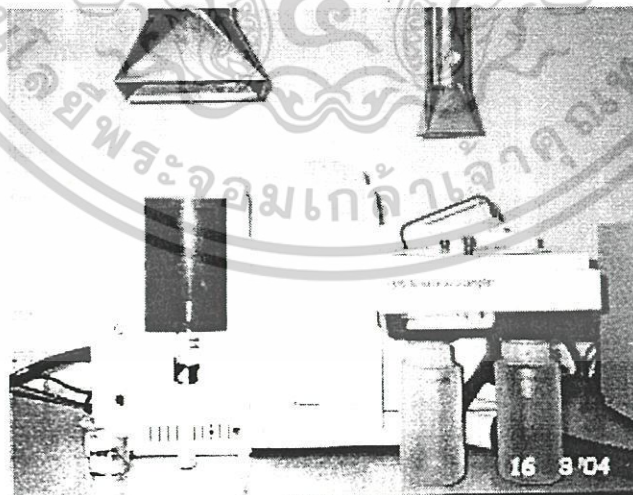
- 6) แผ่นกรองใยแก้ว ขนาดรู 0.45 ไมครอน (μ)
- 7) เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

สารเคมี

- 1) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- 2) กรดไนตริก (HNO_3)
- 3) น้ำกลั่น

วิธีทดสอบ

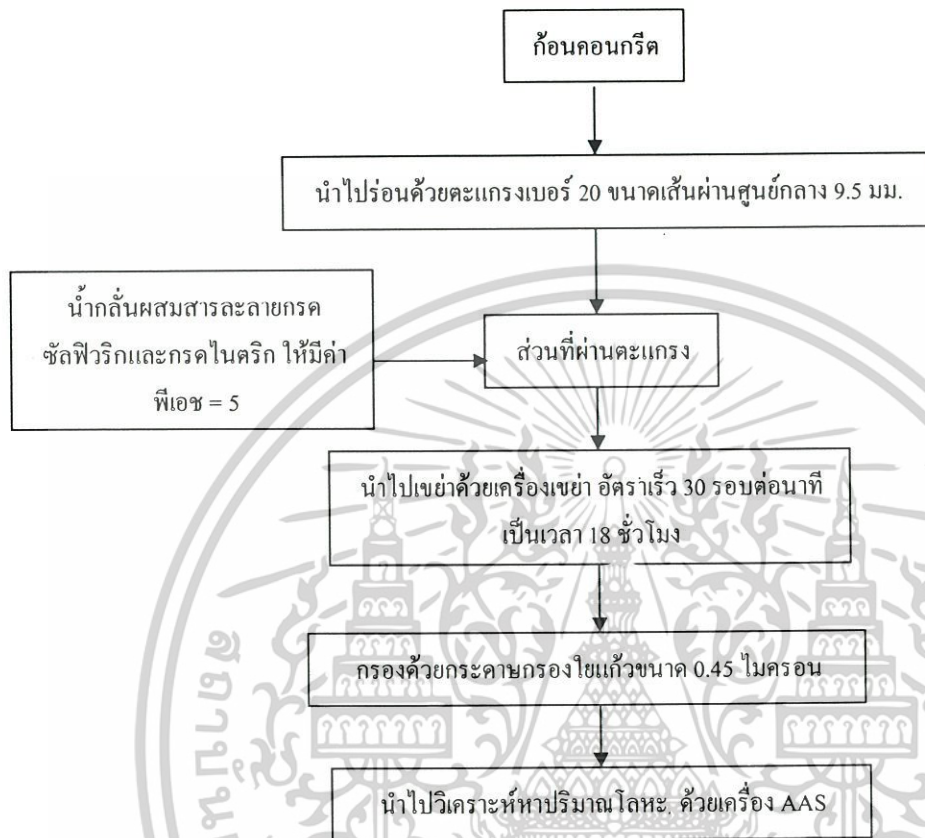
- 1) นำตัวอย่างถั่วลอมวาร์อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มม.
- 2) เตรียมน้ำสกัด (Leachant) โดยใช้สารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) ผสมกับน้ำกลั่น จนค่าความเป็นกรดต่าง พีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของผสมให้เป็น 2,000 มิลลิลิตร
- 3) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1 หนัก 100 กรัม เติมน้ำสกัดที่เตรียมได้จากข้อ 2 จำนวน 2,000 มิลลิลิตร
- 4) เขย่าด้วยเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ $25^{\circ}C$ เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
- 5) กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
- 6) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ โดยใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy)



รูปที่ 3.9 เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย แสดงได้ดังภาพที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

– การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของเถ้าลอย และซีเมนต์ (ภาคผนวก ข-19) รวมถึงศึกษาความสามารถในการบำบัดเถ้าลอยโดยกระบวนการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง โดยทำการศึกษาผลของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ (FA/CE) และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ (S/W) โดยแปรค่าอัตราส่วนผสมของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ที่ 60:40, 70:30 และ 80:20 และของแข็งต่อน้ำที่ 60:40, 65:35 และ 70:30 นอกจากนี้ยังทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง คือ คลอไรด์ และซัลเฟต โดยทำการแปรค่าคลอไรด์จากเดิม 10% และ 20% และแปรค่าซัลเฟตเพิ่มขึ้นจากเดิมเป็น 10% และ 20% จากนั้นนำเถ้าลอยที่เป็นก้อนแข็งบ่มที่ระยะเวลาบ่มตัว 3, 7, 14 และ 28 วัน ไปทดสอบกำลังรับแรงอัด และค่าการชะละลายของโลหะหนัก 4 ชนิด ได้แก่ แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb), และ เหล็ก (Fe)

4.1 คุณลักษณะเถ้าลอย

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบของเถ้าลอยถูกวิเคราะห์โดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) ได้ผลการวิเคราะห์เป็นค่าร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย ดังแสดงในตาราง 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ											
	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Ba	Pb
1	3.70	0.43	1.67	6.64	23.30	2.02	61.20	2.65	0.70	0.64	0.27	0.47
2	2.68	0.43	1.17	5.35	25.70	1.13	48.00	18.60	0.45	0.41	1.21	0.28
3	3.31	0.48	1.51	6.41	18.00	1.72	57.00	11.50	0.68	0.63	0.76	0.45
ค่าเฉลี่ย	3.23	0.45	1.45	6.13	22.33	1.62	55.41	10.92	0.61	0.56	0.75	0.41
SD	0.42	0.02	0.21	0.56	3.22	0.37	5.51	6.52	0.11	0.11	0.38	0.09

จากตารางพบว่าเถ้าลอยประกอบไปด้วย แคลเซียม และคลอไรด์ในปริมาณสูง โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 55.41% และ 22.3% ตามลำดับ เนื่องจากในการควบคุมมลพิษทางอากาศ จะใช้วิธี Dry

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Scrubbers ด้วยสารละลายปูนขาว $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เข้าไปทำปฏิกิริยากับก๊าซที่เป็นกรด ได้แก่ HCl , SO_2 เกิดสารประกอบ CaCl_2 และ CaSO_4 จึงทำให้พบธาตุแคลเซียม และคลอไรด์ ในแก๊สละลายปริมาณสูง

4.1.2 การทดสอบการชะละลายแก๊ส

การทดสอบการชะละลายสำหรับการทดลอง ถือตามเกณฑ์มาตรฐานของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำชะสัปดาห์ที่ได้จากการชะละลาย ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ซึ่งประกอบด้วย ปริมาณโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตาราง โดยสังเกตได้ว่าค่าโลหะหนัก แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb), และเหล็ก (Fe) มีค่าสูงกว่าค่าโลหะหนักตัวอื่น ๆ และในการศึกษาครั้งนี้ไม่มีการทำซ้ำเนื่องจากได้มีการทดลองทำซ้ำก่อนหน้านี้ พบว่าค่าปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมา มีปริมาณที่ใกล้เคียงกันมาก รวมถึงการชะละลายในส่วนอื่น ๆ ที่จะทำการศึกษาต่อไป แม้ว่าค่าโลหะหนักบางตัวยังไม่เกินค่ามาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เช่น โครเมียม และ ตะกั่ว (ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ส่วนแคดเมียมที่ถูกชะออกมาพบว่า มีค่าเกินมาตรฐาน (ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร) และเหล็กที่ไม่ได้ระบุค่าไว้ในมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 เนื่องจากโลหะหนักดังกล่าวนี้ เมื่อถูกชะออกมามีปริมาณมากกว่าโลหะหนักตัวอื่น ๆ และโลหะเหล่านี้สามารถแสดงความเป็นพิษได้เมื่อถูกชะละลายลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน ดังนั้นจึงทำการทดลองศึกษาค่าโลหะหนักดังกล่าวมาข้างต้น

ตารางที่ 4.2 : ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำชะสัปดาห์ที่ได้จากการชะละลายแก๊ส

โลหะหนัก	ค่าโลหะหนักที่ถูกชะออกมา (mg/l)
Cd	1.890
Cr	1.700
Pb	2.300
Fe	1.725
Cu	0.330
Zn	0.260
Ag	0.045

4.2 การปรับเสถียรและทำก้อนแข็งแก๊สโดยการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างเถ้าลอยที่ได้จากเตาเผาขยะอุตสาหกรรม ถูกนำมาทำการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง ด้วยซีเมนต์โดยทำการแปรค่าอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เป็น 60:40, 70:30 และ 80:20 และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40, 65:35, 70:30 นำไปบ่มที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นนำก้อนแข็งเถ้าลอยที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพ โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำ, อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ และระยะเวลาการบ่มตัวที่จำนวนวันต่างๆ ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด (ศึกษาวิธีคำนวณได้ที่ภาคผนวก ก) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 การศึกษาอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

จากการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งเถ้าลอยโดยใช้อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40, 65:35 และ 70:30 โดยให้อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อซีเมนต์คงที่ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ได้ผลดังรูปที่ 4.1 (ก), (ข), และ (ค) ตามลำดับ

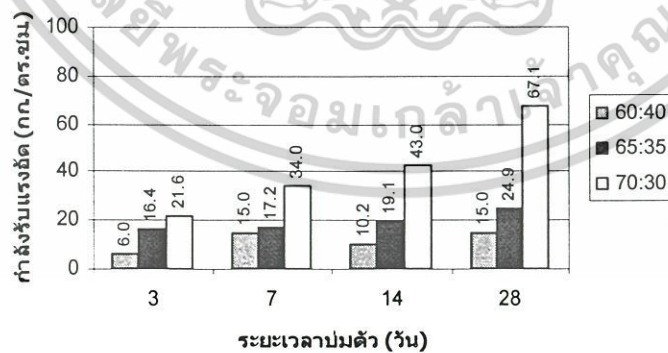
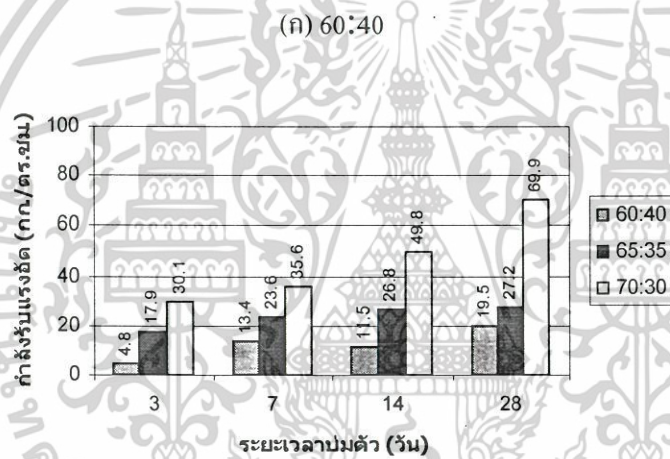
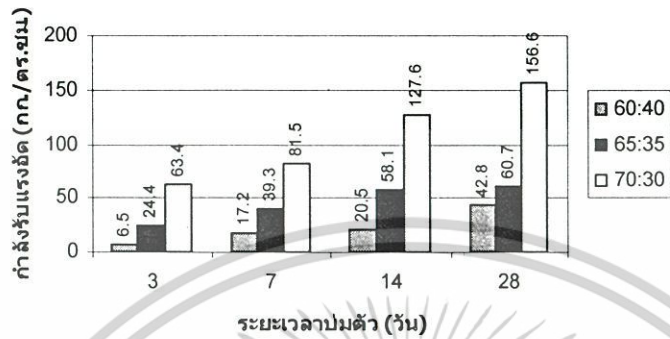
จากรูปที่ 4.1 พบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจาก โพรงอากาศที่เกิดจากการจมตัวของส่วนผสม ซึ่งส่วนผสมจะจมตัวลงจนกระทั่งแรงต้านทานการจมตัวมากกว่าน้ำหนักรวมของของแข็งทั้งหมด น้ำซึ่งเบาที่สุดจะถูกดันขึ้นมาด้านบน บางส่วนจะถูกกักไว้ได้มวลรวมของส่วนผสม เมื่อคอนกรีตแข็งตัวบริเวณเหล่านี้จะเกิดเป็นโพรงอากาศ จึงทำให้อ่อนคอนกรีตไม่แข็งแรง ดังนั้นอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำที่ดีที่สุดคือ 70:30 และจากการสังเกตการก่อตัวของซีเมนต์พบว่าที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 60:40 เหลวมาก ก่อตัวได้ช้า อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดของ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ยังอยู่ภายใต้มาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4.2.2 การศึกษาอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์

จากการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งเถ้าลอย โดยใช้อัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เป็น 60:40, 70:30 และ 80:20 โดยให้อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำคงที่ โดยจะทำการเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ได้ผลดังรูปที่ 4.2 (ก), (ข), และ (ค) ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำทุกค่าที่ทำการทดลอง เมื่อทำปริมาณเถ้าลอยเพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งเถ้าลอยจะลดต่ำลง ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณซีเมนต์ในก้อนกริตที่มาก ส่งผลให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ดี การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้เกิดโครงสร้างแบบ crystalline ซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงต่อก่อนคอนกรีต (ชัชวาล, 2536) และในเถ้าลอยมีองค์ประกอบของสารหลายชนิดที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด เช่น โลหะหนัก กลอไรด์ หรือ ซัลเฟต ซึ่งทำให้ความสามารถในการพัฒนากำลังรับแรงอัด และเวลาในการก่อตัวลดต่ำลง (Means, et. al., 1995) ดังนั้นค่ากำลังรับแรงอัดที่ดีที่สุดคืออัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ 60:40 อย่างไรก็ตาม

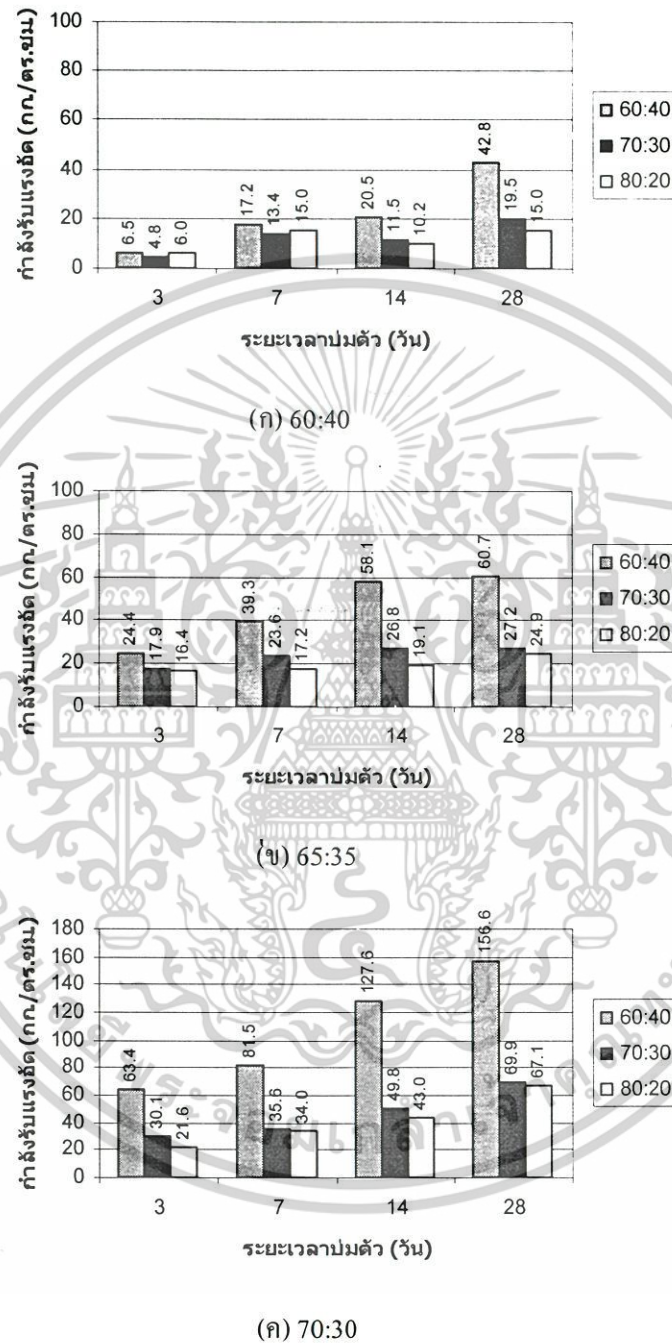
ค่ากำลังรับแรงอัดของทุกๆ อัตราส่วนมีค่าเกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



(ค) 80:20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งเถ้าลอยที่อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำต่าง ๆ กับอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์เป็น (ก) 60:40, (ข) 70:30 และ (ค) 80:20 ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งเถ้าลอยที่อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่าง ๆ กับอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ (ก) 60:40, (ข) 65:35 และ (ค) 70:30 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การศึกษาระยะเวลาการบ่มตัวก่อนแข็งเกล้าลอย

การทดลองนี้ได้ดำเนินการศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มตัวต่อกระบวนการทำให้เป็นก้อน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเกล้าลอยต่อซีเมนต์เป็น 60:40, 70:30 และ 80:20 และอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำ เป็น 60:40, 65:35 และ 70:30 ทำการทดลองโดยบ่มก้อนแข็งเกล้าลอยที่ระยะเวลาการบ่มตัว 3, 7, 14 และ 28 วัน จากนั้นนำไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด ได้ผลดังรูปที่ 4.1 และ 4.2

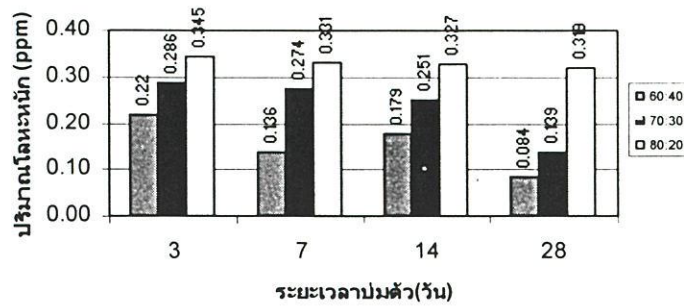
เมื่อระยะเวลาบ่มตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์สมบูรณ์ขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งเกล้าลอยเป็นไปอย่างต่อเนื่อง จากค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ พบว่าทั้งที่ระยะเวลาในการบ่มตัว 3, 7, 14 และ 28 วัน ต่างมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ คือ ไม่น้อยกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4.2.4 การศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายเกล้าลอย

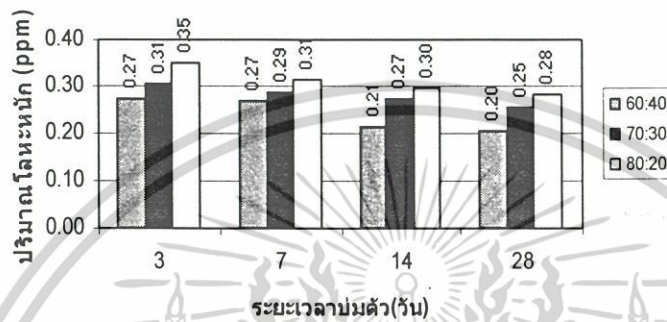
หลังจากทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ต่อกำลังรับแรงอัดก้อนแข็งเกล้าลอยดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2 จากนั้นจึงทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก โดยใช้มาตรฐานวิธีการสกัดสารตามหลักเกณฑ์ในทำยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) (ภาคผนวก ก) และทำการวิเคราะห์โลหะหนักในน้ำชะละลายด้วยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) โดยโลหะหนักที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ตะกั่ว (Pb) และ เหล็ก (Fe) เนื่องจาก การวิเคราะห์องค์ประกอบของเกล้าลอยพบว่าโลหะหนักทั้งสี่ตัวนี้มีปริมาณมากในเกล้าลอย ซึ่งค่าโลหะที่ชะละลายออกมาแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ถึง 4.6

จากรูป ที่ 4.3 ถึง 4.6 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ได้จากการชะละลาย พบว่าปริมาณ Cd, Cr และ Pb ในน้ำชะละลายจะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเกล้าลอยเพิ่มขึ้น จากการศึกษาอัตราส่วนเกล้าลอยต่อซีเมนต์ที่มีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาน้อยที่สุดคือ 60:40 เนื่องจากปริมาณซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้โลหะหนักถูกจับยึดในโครงผลึกแบบ crystalline เมื่อนำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับแคลเซียมซิงลิเกตและแคลเซียมอลูมิเนต เกิดเป็นแคลเซียมซิงลิเกตไฮเดรต โครงสร้างของซีเมนต์จะสม่ำเสมอและจับยึดโลหะหนักไว้ได้ดี นอกจากนี้ที่ระยะเวลาบ่มตัวเพิ่ม พบว่าโลหะหนักที่ถูกชะออกมามีปริมาณลดลง เนื่องจากโลหะหนักถูกยึดจับในโครงสร้างของซีเมนต์ได้ดีขึ้น

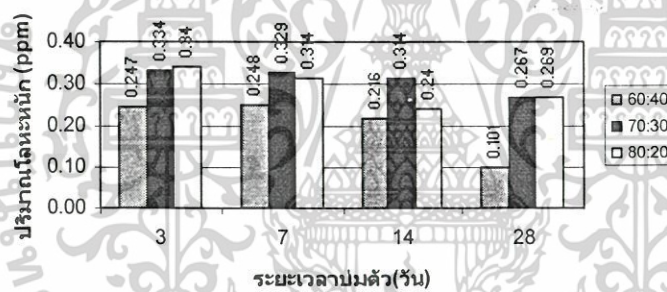
แต่อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าหลังจากทำการชะละลายปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาได้ มีค่าไม่เกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) คือ แคดเมียม (Cd) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม (Cr) 5 มิลลิกรัมต่อลิตร, ตะกั่ว (Pb) 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ เหล็ก (Fe) ไม่ได้ระบุไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6



(ก) 60:40



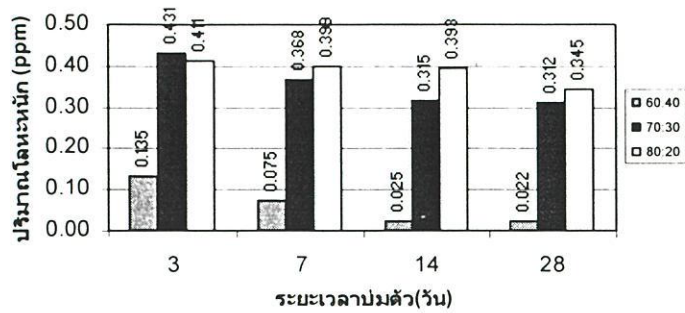
(ข) 65:35



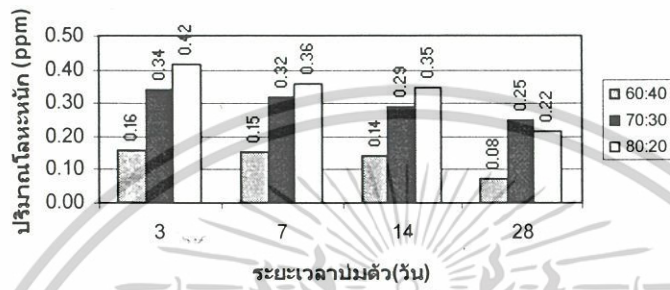
(ค) 70:30

รูปที่ 4.3 ปริมาณ Cd ที่ถูกชะในอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ตามลำดับ ที่ C1 22.3%

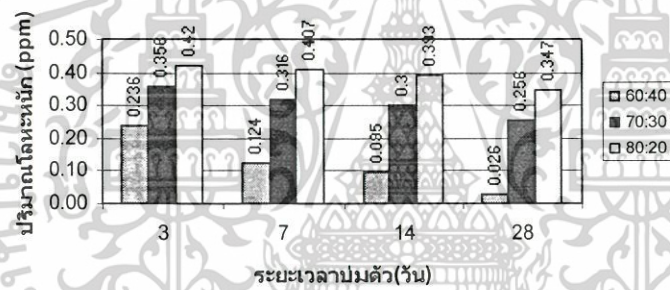
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 60:40



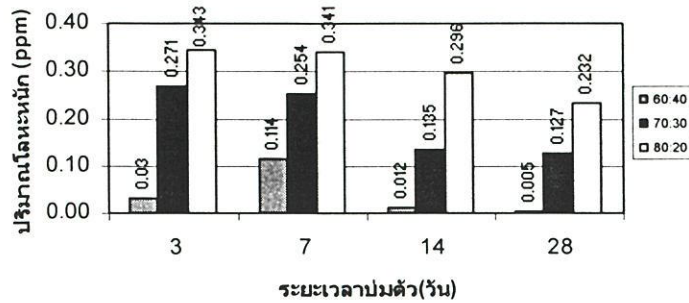
(ข) 65:35



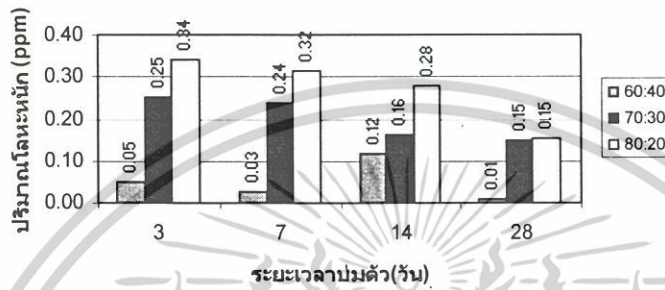
(ค) 70:30

รูปที่ 4.4 ปริมาณ Cr ที่ถูกชะ ในอัตราส่วนแก้วลยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ตามลำดับ ที่ C1 22.3%

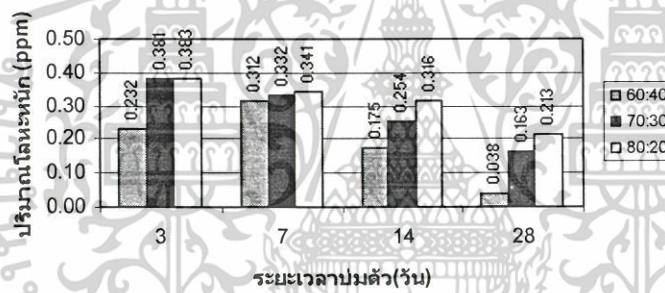
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 60:40



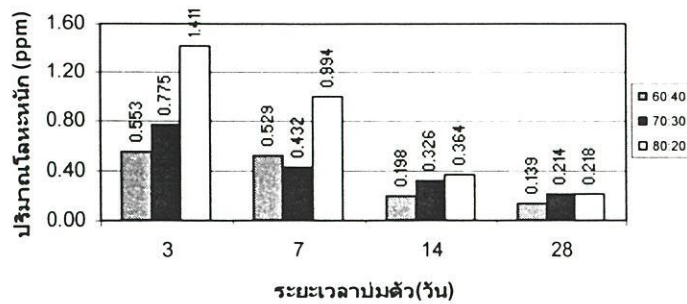
(ข) 65:35



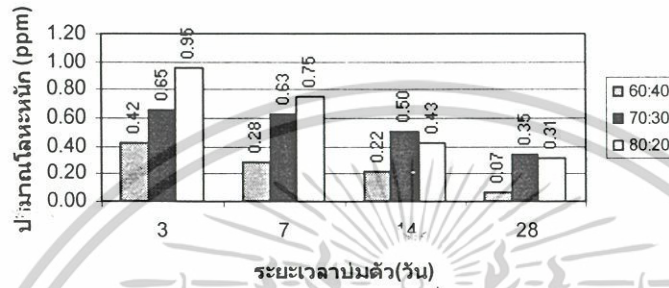
(ค) 70:30

รูปที่ 4.5 ปริมาณ Fe ที่ถูกชะในอัตราส่วนถ้ำล่อยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ตามลำดับ ที่ C1 22.3%

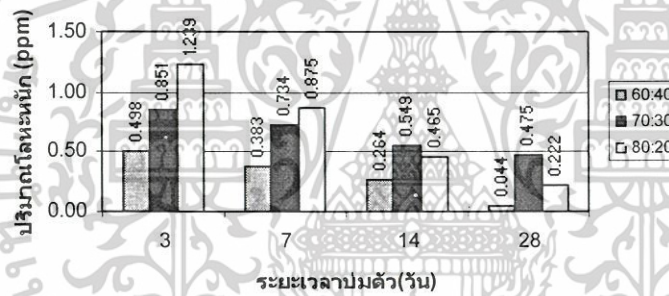
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) 60:40



(ข) 65:35



(ค) 70:30

รูปที่ 4.6 ปริมาณ Pb ที่ถูกชะในอัตราส่วนแก้วลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ ที่ อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ เป็น (ก) 60:40, (ข) 65:35, (ค) 70:30 ตามลำดับ ที่ CI 22.3%

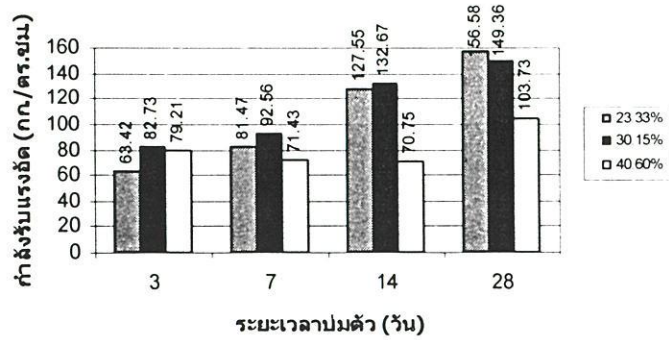
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของคลอไรด์ต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งเถ้าลอย

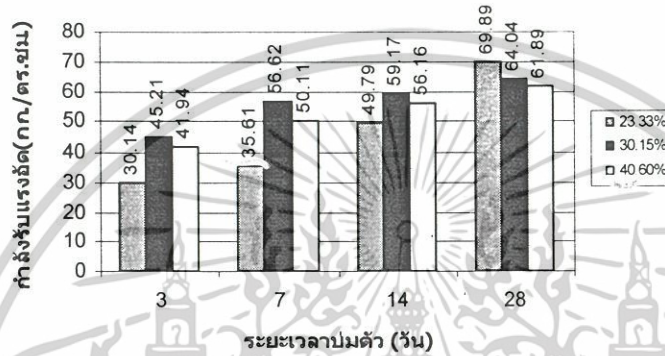
4.3.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต

การทดลองนี้ทำการศึกษาผลของคลอไรด์ (Cl) ในเถ้าลอยที่มีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง โดยมีส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมก้อนแข็งเถ้าลอย ได้แก่ เถ้าลอย ซีเมนต์ น้ำ และใช้แคลเซียมคลอไรด์ (CaCl_2) เป็นสารเคมีที่ใช้เติมในเถ้าลอยเพื่อปรับให้มีเปอร์เซ็นต์คลอไรด์เพิ่มจากเดิมที่มีอยู่เป็น 10% และ 20% จากปริมาณคลอไรด์ที่พบในตัวอย่างครั้งแรกที่ทำการวิเคราะห์ หลังจากเตรียมก้อนแข็งเถ้าลอยแล้วทำการบ่มที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ศึกษาปัจจัยทางกายภาพคือ อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำ, อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด รวมถึงระยะเวลาการบ่มตัวที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด (ศึกษาค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนต่าง ๆ ได้ที่ ภาคผนวก ข-7 ถึง ข-9) ดังนั้นทำการเปรียบเทียบกราฟ CI เบื้องต้น 22.3% (ภาคผนวก ข-1) และ CI เพิ่มขึ้น 10% เป็น 30.15 % (ภาคผนวก ข-2) และ CI เพิ่มขึ้น 20% เป็น 40.60 % (ภาคผนวก ข-3) ดังรูป 4.7

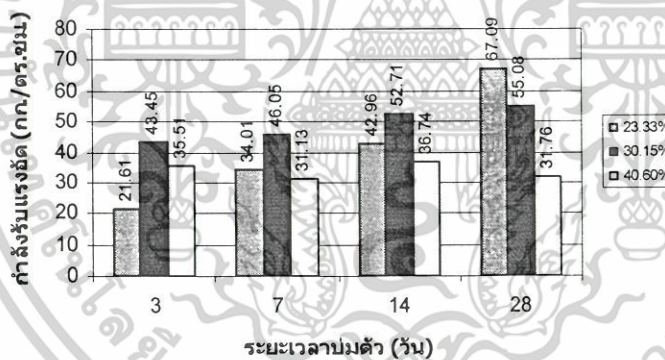
จากรูปที่ 4.7 เมื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของเปอร์เซ็นต์คลอไรด์ ที่อัตราส่วนต่างๆ เมื่อทำการแปรผันเปอร์เซ็นต์คลอไรด์ที่ 22.3, 30.15% และ 40.60% มีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 30.15% เพิ่มขึ้นเนื่องจากคลอไรด์เป็นสารตัวเติมที่ใช้เร่งปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำมีผลทำให้เกิดกลไก Chemical binding คลอไรด์บางส่วนจะถูกจับโดยผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันในรูปของ $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ หรือ $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ จึงทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงมากยิ่งขึ้น แต่ที่เปอร์เซ็นต์คลอไรด์ 40.60% จะมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากคลอไรด์เป็นสารตัวเติมที่ใช้เร่งปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์กับน้ำเมื่อเพิ่มมากเกินไปจะทำให้ ก้อนซีเมนต์แข็งตัวเร็วแต่เปราะง่าย เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ไม่สมบูรณ์ และจากการสังเกตการก่อตัวของซีเมนต์พบว่าที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 70:30 กวนผสมได้ง่าย และก่อตัวได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่าในทุกๆ อัตราส่วนมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้ คือ ไม่น่ากว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



(ก) 60:40



(ข) 70:30



(ค) 80:20

รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบคผลโรดท์ที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่างๆ

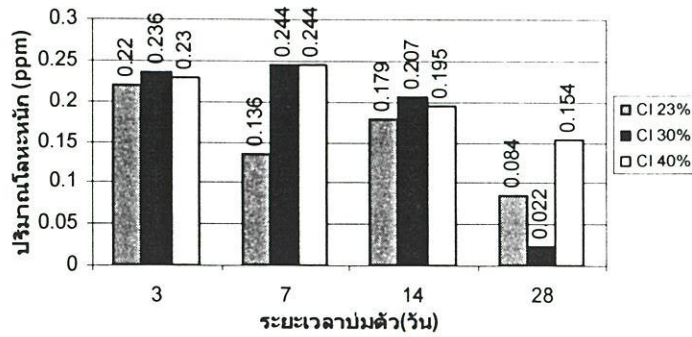
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดสอบการชะละลายของก้อนคอนกรีต

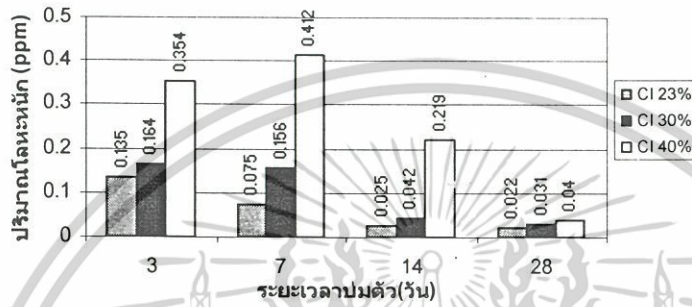
ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนัก โดยนำก้อนที่ผ่านการทดสอบทางกายภาพมาทำการสกัดน้ำชะละลาย จากนั้นนำไปทดสอบหาค่าโลหะหนักด้วย AAS (ศึกษาค่าการชะละลายโลหะหนักที่อัตราส่วนคลอไรด์ต่าง ๆ ที่ ภาวะผนวก ข-13 ถึง ข-15) ได้ผลดังรูปที่ 4.8

จากรูปที่ 4.8 พบว่าที่เปอร์เซ็นต์คลอไรด์ 40% มีแนวโน้มที่ค่าการชะละลายของโลหะหนักทั้ง 4 ตัว มีค่าสูงกว่าที่เปอร์เซ็นต์คลอไรด์ต่ำ เนื่องจากการทดลองมีการเติม CaCl_2 ซึ่งเป็นเกลือที่สามารถละลายน้ำได้ เมื่อทำการผสมแล้วลอย ซีเมนต์และน้ำ จะเกิดเกลือที่ไม่ละลายบางส่วนในระหว่างที่คอนกรีตก่อตัว เมื่อน้ำถูกใช้หมดไปในระหว่างขั้นตอนการบ่มเกลือจะตกผลึกในก้อนคอนกรีตจะเกิดพันธะระหว่างส่วนผสมกับเกลือ แต่เป็นการจับตัวกันอย่างหลวมๆไม่เป็นพันธะเคมี ดังนั้น ของผสมทั้งหมดจึงไม่เป็นเนื้อเดียวกันและเมื่อนำก้อนคอนกรีตไปทดสอบการชะละลายเกลือจะละลายน้ำอีกครั้ง ทำให้เกิดคลอไรด์อิสระจะมีสภาพเป็นสารละลายอยู่ในน้ำที่อยู่ตามช่องว่างของคอนกรีต ซึ่งสามารถแพร่เข้าไปยังคอนกรีตที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์อิสระต่ำกว่าเป็นส่วนที่ทำให้ความเข้มข้นในคอนกรีตลดลง จึงส่งผลให้โลหะหนักที่อยู่ในรูปโลหะไฮดรอกไซด์ถูกชะออกมาได้มากขึ้น และเมื่อระยะเวลาบ่มตัวมากขึ้น พบว่าที่เปอร์เซ็นต์คลอไรด์ต่างๆ การชะละลายของโลหะหนักทั้ง 4 ตัวจะมีแนวโน้มลดลงเช่นเดียวกัน เนื่องจากโลหะหนักได้ยึดติดในโครงสร้างของซีเมนต์ได้ดีขึ้น

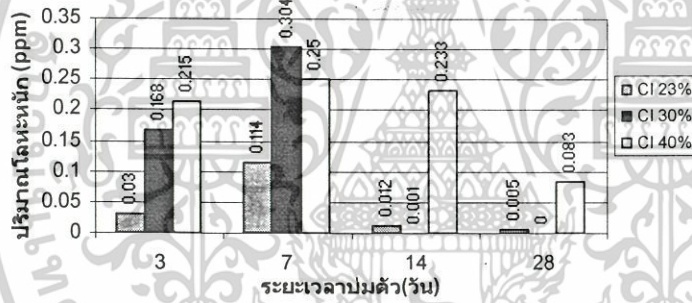
อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าหลังจากทำการชะละลายปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะออกมาได้ มีค่าไม่เกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) คือ แคดเมียม (Cd) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม (Cr) 5 มิลลิกรัมต่อลิตร, ตะกั่ว (Pb) 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และ เหล็ก (Fe) ไม่ได้ระบุไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6



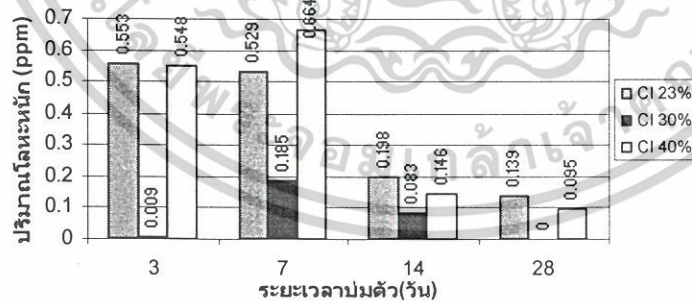
(ก) Cd



(ข) Cr



(ค) Fe



(ง) Pb

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าการชะละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ของคลอไรด์ที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ที่อัตราส่วนเกล็ดลอยต่อซีเมนต์เป็น 60:40 และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

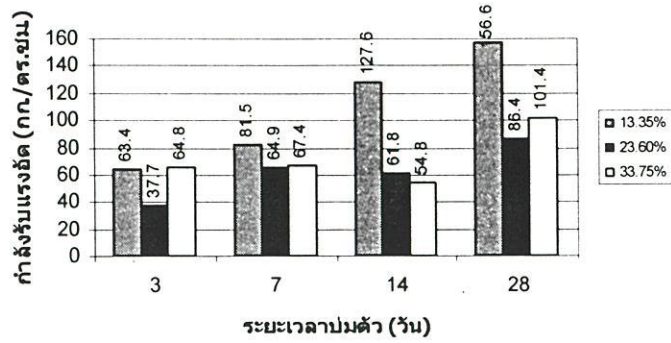
4.4 ผลของซัลเฟตต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งเถ้าลอย

4.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีต

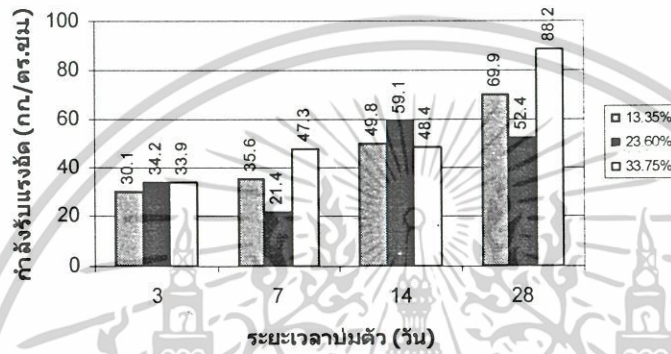
การทดลองนี้ทำการศึกษาผลของซัลเฟต (SO_4) ในเถ้าลอยที่มีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งโดยทำการแปรค่าโดยการเติมแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) โดยมีส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมก้อนแข็งเถ้าลอย ได้แก่ เถ้าลอย, ซีเมนต์, น้ำ และใช้แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เป็นสารเคมีที่ใช้เติมในเถ้าลอยเพื่อปรับให้มีเปอร์เซ็นต์ซัลเฟตเพิ่มจากเดิมที่มีอยู่ หลังจากเตรียมก้อนแข็งเถ้าลอยแล้ว ทำการบ่มที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน ศึกษาปัจจัยทางกายภาพคือ อัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อน้ำ, อัตราส่วนของเถ้าลอยต่อซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด รวมถึงระยะเวลาการบ่มตัวที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด (ศึกษากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนต่าง ๆ ได้ที่ ภาคผนวก ข-10 ถึง ข-12) ดังนั้นทำการเปรียบเทียบกราฟ SO_4 เบื้องต้น 13.35% (ภาคผนวก ข-4) และ SO_4 เพิ่มขึ้น 10% เป็น 23.6 % (ภาคผนวก ข-5) และ SO_4 เพิ่มขึ้น 20% เป็น 33.75 % (ภาคผนวก ข-6) ดังรูป 4.9

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟตมากขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัด ลดลง เนื่องจากซัลเฟตจะรวมตัวกับไตรแคลเซียมอลูมิเนตแล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปแคลเซียมอลูมิเนตซัลเฟต ซึ่งสารตัวนี้จะเคลือบอนุภาคซีเมนต์และหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง และจากการสังเกตการก่อตัวของซีเมนต์พบว่า ที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 65:35 กวนผสมได้ง่าย และมีการก่อตัวดี

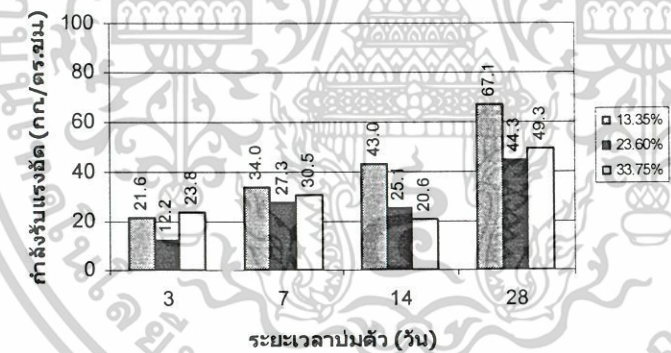
อย่างไรก็ตาม ค่ากำลังรับแรงอัดของทุก ๆ อัตราส่วนมีค่าเกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร



(ก) 60:40



(ข) 70:30



(ค) 80:20

รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบซัลเฟตที่เปอร์เซ็นต์ต่าง ๆ ของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

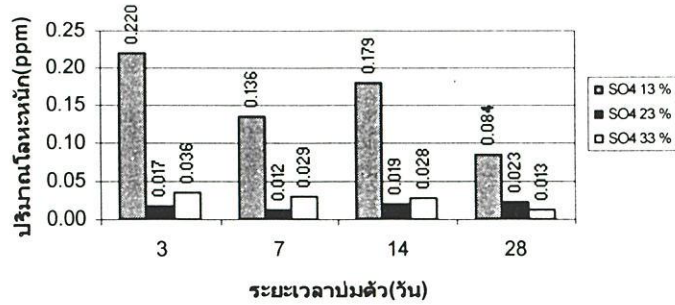
4.4.2 การทดสอบการชะละลายของก้อนคอนกรีต

ทำการศึกษาการชะละลายของโลหะหนัก โดยนำก้อนที่ผ่านการทดสอบทางกายภาพมา ทำการสกัดน้ำชะละลาย จากนั้นนำไปทดสอบหาค่าโลหะหนักด้วย AAS (ศึกษาค่าการชะละลาย โลหะหนักที่อัตราส่วนซัลเฟตต่าง ๆ ที่ ภาคผนวก ข-16 ถึง ข-18) ได้ผลดังรูปที่ 4.10

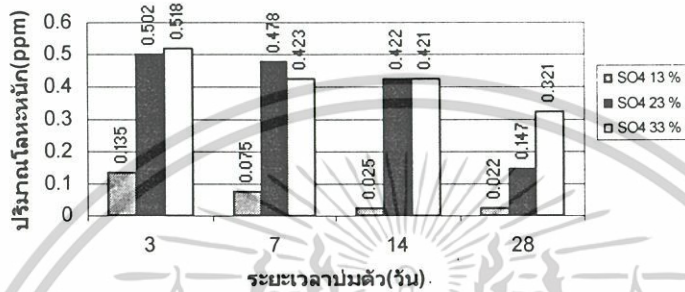
จากรูปพบว่า การเพิ่มปริมาณซัลเฟตทำให้ค่าการชะละลายของ Cd ลดลง อาจเนื่องมาจาก ซัลเฟตทำการจับยึด Cd ได้ดี โลหะหนักจึงหลุดออกมาได้น้อยลง ขณะที่ค่าการชะละลายของ Cr, Fe, และ Pb เมื่อมีการเพิ่มปริมาณซัลเฟต มีแนวโน้มที่มีค่ามากขึ้น เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์ซัลเฟต ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งทำให้การจับยึดของโลหะหนักในโครงสร้าง ของซีเมนต์ลดลง ดังนั้นโลหะหนักที่ถูกชะออกมาจากการทดสอบการชะละลายจึงมากขึ้น และ ปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นยังเป็นสาเหตุให้เกิดการพองตัวในซีเมนต์ที่ทำการปรับเสถียรและทำก้อน แข็งแล้วก่อให้เกิดการแตกร้าวและความแข็งแรงลดลง

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาพบว่าหลังจากทำการชะละลายปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะ ออกมาได้ มีค่าไม่เกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พศ.2540) คือ แคดเมียม (Cd) 1 มิลลิกรัมต่อลิตร, โครเมียม (Cr) 5 มิลลิกรัมต่อลิตร, ตะกั่ว (Pb) 5 มิลลิกรัมต่อ ลิตร และ เหล็ก (Fe) ไม่ได้ระบุไว้ในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6

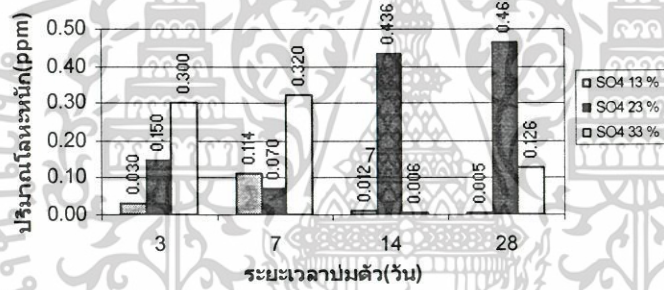
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



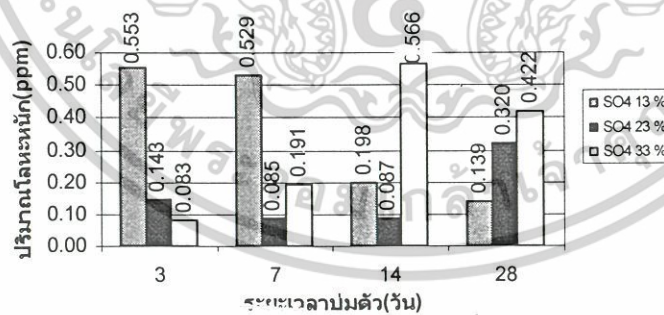
(ก) Cd



(ข) Cr



(ค) Fe



(ง) Pb

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบค่าการชะละลายโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ของซัลเฟตที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ ที่อัตราส่วนเกลือต่อซีเมนต์เป็น 60:40 และอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การพิจารณาเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสม

การพิจารณาเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการบำบัดแก้ลอยและผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษนั้น จะพิจารณาจากเกณฑ์มาตรฐานสิ่งปฏิกูลที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน ซึ่งกำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเกณฑ์มาตรฐานสารพิษจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 โดยพิจารณาโลหะหนักเฉพาะ โครเมียม แคดเมียม ตะกั่ว และเหล็ก (ไม่ได้ระบุในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม แต่ที่ศึกษาเพราะมีปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายแก้ลอย มากกว่าค่าโลหะหนักตัวอื่นๆ) ซึ่งกำหนดคุณสมบัติของสารพิษจะต้องมีปริมาณโครเมียม ไม่เกิน 5 มิลลิกรัมต่อลิตร, แคดเมียม และตะกั่ว ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการศึกษาโดยแปรค่าอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40, 65:35 และ 70:30 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนการทดสอบการชะละลายที่ปริมาณของแข็งมาก โลหะหนักจะชะออกมาได้น้อยที่สุด อัตราส่วนที่เหมาะสมของของแข็งต่อน้ำ คือ 70:30 และแปรค่าอัตราส่วนของแก้ลอยต่อซีเมนต์ ในอัตราส่วนเป็น 60:40, 70:30 และ 80:20 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณแก้ลอยในซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการชะละลายที่ปริมาณแก้ลอยมาก โลหะหนักจะชะออกมาได้มากขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมของแก้ลอยต่อซีเมนต์ คือ 60:40

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบในถ้ำลอย และผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ ที่มีผลต่อการปรับเสถียรและทำก้อนแข็งของถ้ำลอยจากเตาเผาขยะอุตสาหกรรม และการทำลายฤทธิ์โลหะหนักด้วยวิธีการทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์ (Cement-Based Solidification) รวมทั้งทำการทดลองศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการทำก้อนแข็งถ้ำลอย, ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการปรับเสถียรและทำก้อนแข็ง เพื่อให้ได้ก้อนแข็งที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด และศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางเคมีของก้อนแข็งที่ทำการปรับเสถียรแล้ว ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีของถ้ำลอย และผลิตภัณฑ์จากการบำบัดก๊าซพิษ โดยใช้เครื่อง X-ray Fluorescence Spectroscopy (XRFs) พบว่า ถ้ำมีองค์ประกอบสำคัญ 4 ชนิด คือ Ca, Cl, S, Pb, Fe โดยมีปริมาณอยู่ในช่วง 48.0-61.20%, 18.0-25.70%, 5.35-6.41%, 0.28-0.47%, 2.65-18.60% ตามลำดับ และค่าการชะละลายโลหะหนัก พบว่ามีปริมาณ Cd, Cr, Pb และ Fe เป็นปริมาณมาก ซึ่งเป็นปริมาณ 1.89, 1.70, 2.30, 1.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

2. จากการศึกษาโดยแปรค่าอัตราส่วนของแข็งต่อน้ำเป็น 60:40, 65:35 และ 70:30 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น ส่วนการทดสอบการชะละลายที่ปริมาณของแข็งมาก โลหะหนักจะชะออกมาได้น้อยที่สุด อัตราส่วนที่เหมาะสมของของแข็งต่อน้ำ คือ 70:30

3. จากการศึกษาโดยแปรค่าอัตราส่วนของถ้ำลอยต่อซีเมนต์ ในอัตราส่วนเป็น 60:40, 70:30 และ 80:20 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งจะมีค่าลดลง เมื่อปริมาณถ้ำลอยในซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนการชะละลายที่ปริมาณถ้ำลอยมาก โลหะหนักจะชะออกมาได้มากขึ้น อัตราส่วนที่เหมาะสมของถ้ำลอยต่อซีเมนต์ คือ 60 :40

4. จากการศึกษาอิทธิพลของจำนวนวันในการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งถ้ำลอย โดยทำการบ่มที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน พบว่า ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนแข็งถ้ำลอยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการบ่มมากขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ของระยะเวลาที่บ่มต่างๆกัน มีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมกำหนด คือ มีค่ากำลังรับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเซนติเมตร ส่วนค่าการชะละลายของโลหะหนักทั้ง 4 ตัวมีค่าไม่เกินมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมที่ระบุไว้เช่นเดียวกัน

5. จากการศึกษาอิทธิพลของคลอไรด์ เมื่อเพิ่มปริมาณคลอไรด์ให้มากกว่าที่มีอยู่เดิมเป็น 10% และ 20% พบว่าการเพิ่มคลอไรด์ในปริมาณหนึ่ง ทำให้การก่อตัวสามารถเกิดขึ้นได้เร็วขึ้น และค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มคลอไรด์มากเกินไป ทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง และโลหะหนักถูกชะออกมาได้มาก

6. จากการศึกษาอิทธิพลของซัลเฟตพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณซัลเฟตให้มากกว่าที่มีอยู่เดิมเป็น 10% และ 20% พบว่าการก่อตัวจะช้า ปร่าง่ายกว่า ทำให้มีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ และโลหะหนักถูกชะออกมาได้มาก

7. จากการศึกษาทั้งหมดพบว่าที่อัตราส่วนของแข็งต่อน้ำ 70:30 และอัตราส่วนเถ้าลอยต่อซีเมนต์ 60:40 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองโดยศึกษาถึงโลหะหนักชนิดอื่น ๆ ในเถ้าลอยจากขยะอุตสาหกรรมและในน้ำชะลาย จากโรงงานหรือแหล่งเผาขยะอุตสาหกรรมแหล่งอื่น
2. ศึกษาการเปรียบเทียบวิธีการชะละลายตามมาตรฐานต่าง ๆ ได้แก่ US.EPA., หรือ มาตรฐานของยุโรป
3. การศึกษาเถ้าขยะประเภทอื่นๆ นอกเหนือจากเถ้าจากเตาเผาขยะอุตสาหกรรม เช่น เถ้าจากเตาเผาขยะชุมชน เป็นต้น
4. ศึกษาปัจจัยอื่นๆที่มีผลคุณสมบัติต่อก่อนคอนกรีต เช่น CaO เป็นต้น เพราะจากผลการวิเคราะห์ XRF พบในปริมาณมาก
5. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายฤทธิ์ โดยใช้สารเติม (Additives)
6. ศึกษาการทำลายฤทธิ์ของตะกอนโลหะหนัก โดยเปลี่ยนวัสดุประสานเป็น ปูนซีเมนต์ผสมทราย ปูนขาวผสมเถ้าแกลบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. 2545. การจัดการของเสียอันตรายในรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย พ.ศ. 2544, กรุงเทพฯ, 100.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2540. ประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม เรื่อง หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือ ฟังสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (ฉบับที่6) พ.ศ.2540 กรุงเทพฯ :กระทรวงอุตสาหกรรม;2546
- เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์. 2546. ของเสียอันตราย, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต.
- ชัชวาล เศรษฐบุตร. 2536. โครงสร้างคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ.
- ทนง ศิริกาญจนโรจน์ และสมเลิศ พิภพเนศ. 2530. การใช้ซีเมนต์ลอยเป็นวัสดุผสมเติมลงในการผลิตซีเมนต์บดอัด และกระเบื้องแผ่นยิปซัม. กรุงเทพฯ.
- นฤมิตร คินีมาน. 2538. การนำตะกอนโลหะหนักจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียซีโอटीให้เป็นการด้วยปูนซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์, วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประณต กุลประสูตร. 2538. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : อมรินทร์พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และอินทรชัย หอวิจิตร. 2538. การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเมนต์ลอยแม่เมาะ. กรุงเทพฯ.
- พรเทพ มั่นกตัญญู และวสันต์ โพธิ์เต็ง. 2546. การปรับเสถียรเถ้าจากเตาเผาขยะโรงพยาบาลด้วยวิธีการยึดจับด้วยซีเมนต์, วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- มัลลิกา ปัญญาคะโป. 2542. เอกสารประกอบวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. "ของเสียอันตราย", คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. 2542. ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี, กรุงเทพฯ.
- สมนึก ตั้งเดิมศิริกุล. 2542. การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมนึก กาญจนวงศ์. 2537. **ปฏิบัติงานทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี**, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตนนทบุรี.

อัจฉรา สรรพกิจจางง และคณะ. 2545. **คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของคอนกรีตผสมเถ้าลอย
ลิกไนต์สำหรับงานคอนกรีตบดอัด**, กรุงเทพฯ: กรมทางหลวง.

Bishop, P.L. 1988. Leaching of Inorganic Hazardous Constituents from Stabilized/ Solidified
Hazardous Waste, **Haz. Waste**. Vol 5: 129 – 143.

Botta, D., Dotelli, G., Biancardi, R. and Renato, P. 2004. **Cement clay pastes for stabilization
/ solidification of 2 – chloroaniline**, Italy.

Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hjelmar, O., Hartlen, J., Kosson, D.S., van der Sloot, H. and
Vehlow, J. 1994. **An international perspective on characterization and
management of residues from municipal solid waste incineration**, Summary
Report of the IAWG, c/o Compass Environmental Inc., 2253 Belmont Ct., Burlington,
Ontario Canada.

Fillipponi, L., Mangialardi T., Pigal, L. and Sirini, P. 1988. **Mechanical and leaching properties
of cement solidified Hospital solid waste incinerator fly ash**, *J. Waste Management* 18
(1998):99-106.

Fitch, J.R. and Cheeseman C.R., 2003. Character is ation of environmentally exposed cement-
based stabilized/solidified industrial waste. **Journal of Hazardous Material A101**:
239-255.

Fuessle, R.W. and Taylor, M.A. 1992 . Comparison of Fly Ash Versus Silica Fume Stabilization :
Short-Term Results. **Hazardous Waste & Hazardous Materials**. Vol 9.

Idris, A. and Saed, K. 2002. Characteristics of slag produced from incinerated hospital waste.
Journal of Hazardous Materials B93: 201-208.

Kosson, D.S., Kosson, T.T. and Van der Sloot, H. 1993. **Evaluation of Solidification/
Stabilizatio Treatment Processes for Municipal Waste Combustion Residues**, NTIS
PB93-229 870/AS.I. I. Abram, 1989. **In Nonlinear Optics in Solids**; Springer-Verlag
:Aalborg, Denmark, pp 190-212.

Leangon, K. 1993. **Solidification of Hazardous Waste By Cement-Based Techniques**, Thesis
No. EV –93 -10 Asean Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Mean, J.F. et al. 1995. **The application of Solidification/ Stabilization to Waste Materials**, CRC Press, Florida.
- Poon , C.S., Qiao, X.C. and Lin, Z.S. 2003. Pozzolanic properties of reject fly ash in blended cement pastes. **Cement and Concrete Research**. 33:1857-1865.
- Shively, W., Bishop, P. D. and Brown, T. 1986. Leaching Tests of Heavy Metals Stabilized with Portland Cement **Journal WPCE** 58: 234-241.
- U.S.Environmental Protection Agency,1988. Stabilization/Solidification of CERCLA and RCRA Wastes.EPA/625/6-89/022. **Hazardous Waste Engineering Research Laboratory**, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Youcaf, Z., Lijie, S. and Guojian, L. 2002.Chemical stabilization of MSW incinerator fly ashes. **Journal of Hazardous Materials B95**: 47-63.
- <http://www.cement.ca/cement.nsf/searchFinal/D712B5D8CE00F5A3852568>
- http://www.dcchem.co.kr/english/product/p_basic/p_basic03.htm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณค่ากำลังรับแรงอัด

วิธีการคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีต

วิธีการคำนวณ

ค่ากำลังรับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีต หาได้จาก

$$f_c = P/A$$

เมื่อ

f_c = กำลังอัดประลัยของแท่งคอนกรีต (กก./ซม.²)

P = แรงอัด (กก.)

A = พื้นที่ตัวอย่างของตัวอย่าง (ตร.ซม.)



ภาคผนวก ข ข้อมูลผลการทดลอง

ตารางที่ ข-1 ข้อมูลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบเถ้าลอยที่มีปริมาณคลอไรด์ 22.33% ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ											
	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Ba	Pb
1	3.70	0.43	1.67	6.64	23.30	2.02	61.20	2.65	0.70	0.64	0.27	0.47
2	2.68	0.43	1.17	5.35	25.70	1.13	48.00	18.60	0.45	0.41	1.21	0.28
3	3.31	0.48	1.51	6.41	18.00	1.72	57.00	11.50	0.68	0.63	0.76	0.45
ค่าเฉลี่ย	3.23	0.45	1.45	6.13	22.33	1.62	55.41	10.92	0.61	0.56	0.75	0.41
SD	0.42	0.02	0.21	0.56	3.22	0.37	5.51	6.52	0.11	0.11	0.38	0.09

ตารางที่ ข-2 ข้อมูลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบเถ้าลอยที่มีปริมาณคลอไรด์ 30.15% ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ											
	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Ba	Pb
1	1.97	0.36	1.04	4.74	30.00	1.08	47.90	17.20	0.42	0.37	1.00	0.23
2	1.74	0.35	1.02	4.49	30.30	0.90	47.60	17.30	0.45	0.38	1.08	0.23
ค่าเฉลี่ย	1.86	0.36	1.03	4.62	30.15	0.99	47.75	17.25	0.43	0.37	1.04	0.23
SD	0.12	0.00	0.01	0.13	0.15	0.09	0.15	0.05	0.01	0.00	0.04	0.00

ตารางที่ ข-3 ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบตัวอย่างที่มีปริมาณคลอไรด์ 40.60% ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ											
	Na	Mg	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Ba	Pb
1	1.75	0.36	0.98	3.87	39.00	1.39	52.00	6.88	0.44	0.37	0.48	0.26
2	1.49	0.45	0.99	4.00	42.20	1.43	49.90	7.06	0.41	0.36	0.50	0.25
ค่าเฉลี่ย	1.62	0.40	0.99	3.94	40.60	1.41	50.95	6.97	0.42	0.36	0.49	0.26
SD	0.13	0.04	0.01	0.07	1.60	0.02	1.05	0.09	0.01	0.01	0.01	0.00

ตารางที่ ข-4 ข้อมูลการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟต 13.35% ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ																	
	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO4	Cl	K2O	CaO	TiO2	NiO	Fe2O3	CuO	ZnO	Br	SrO	BaO	PbO
1	2.84	0.55	0.24	1.90	0.31	12.10	19.10	0.98	47.20	0.12	0.08	16.90	0.35	0.31	0.07	0.03	0.89	0.19
2	3.84	0.54	0.19	2.65	0.63	14.60	16.80	1.68	57.80	0.19	0.20	2.27	0.53	0.48	0.13	0.03	0.83	0.31
ค่าเฉลี่ย	3.34	0.54	0.22	2.28	0.47	13.35	17.95	1.33	52.50	0.15	0.14	9.59	0.44	0.40	0.10	0.03	0.86	0.25
SD	0.50	0.01	0.02	0.38	0.15	1.25	1.15	0.35	5.30	0.04	0.06	7.32	0.09	0.08	0.03	0.00	0.03	0.06

ตารางที่ ข-5 ข้อมูลการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟต 23.60% ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ																	
	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO4	Cl	K2O	CaO	TiO2	NiO	Fe2O3	CuO	ZnO	Br	SrO	BaO	PbO
1	3.29	0.58	0.22	2.62	0.48	22.80	14.00	1.63	54.10	0.17	0.17	1.33	0.45	0.42	0.12	0.04	-	0.27
2	3.17	0.53	0.22	2.21	0.42	24.40	13.00	1.40	52.10	0.16	0.16	3.61	0.40	0.37	0.10	0.03	-	0.24
ค่าเฉลี่ย	3.23	0.56	0.22	2.42	0.45	23.60	13.50	1.52	53.10	0.17	0.17	2.47	0.43	0.39	0.11	0.04	-	0.26
SD	0.06	0.02	0.00	0.21	0.03	0.80	0.50	0.11	1.01	0.00	0.00	1.14	0.03	0.02	0.01	0.00	-	0.01

ตารางที่ ข-6 ข้อมูลการวิเคราะห์หาปริมาณซัลเฟต 33.75% ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ																		
	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	SO4	Cl	K2O	CaO	TiO2	MnO	Fe2O3	CuO	ZnO	Br	SrO	BaO	PbO	
1	2.08	0.48	0.17	1.61	0.31	31.60	10.60	1.19	51.60	0.13	0.13	1.06	0.35	0.32	0.09	0.05	-	0.21	
2	1.98	0.46	0.16	1.53	0.29	35.90	10.00	1.11	48.20	0.12	0.12	0.97	0.32	0.29	0.08	0.05	-	0.19	
ค่าเฉลี่ย	2.03	0.47	0.16	1.57	0.30	33.75	10.30	1.15	49.90	0.12	0.12	1.02	0.34	0.31	0.08	0.05	-	0.20	
SD	0.05	0.01	0.00	0.04	0.01	2.15	0.30	0.04	1.70	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.00	0.00	-	0.01	

ตารางที่ ข-7 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณคลอไรด์ในแก้วลอย 22.33%)

Recipe		Compressive Strength (kg/cm ²)			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	6.46	17.24	20.45	42.78
	65/35	24.36	39.29	58.12	60.74
	70/30	63.42	81.47	127.55	156.58
70/30	60/40	4.80	13.41	11.49	19.51
	65/35	17.89	23.56	26.82	27.18
	70/30	30.14	35.61	49.79	69.89
80/20	60/40	5.95	14.98	10.24	15.01
	65/35	16.38	17.20	19.09	24.85
	70/30	21.61	34.01	42.96	67.09

ตารางที่ ข-8 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณคลอไรด์ในแก้วลอย 30.15%)

Recipe		Compressive Strength (kg/cm ²)			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	7.15	14.69	17.99	20.41
	65/35	8.44	8.54	13.12	17.55
	70/30	26.07	35.88	57.84	67.61
70/30	60/40	4.49	7.20	12.15	14.86
	65/35	12.33	15.79	19.76	30.48
	70/30	45.21	56.62	59.17	64.04
80/20	60/40	7.89	10.46	13.01	15.40
	65/35	19.39	18.04	28.51	38.98
	70/30	43.45	46.05	52.71	55.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-9 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณคลอไรด์ในเนื้อลอม 40.60%)

Recipe		Compressive Strength (kg/cm ²)			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	7.69	11.67	16.77	12.05
	65/35	21.92	19.51	35.78	52.25
	70/30	79.21	71.43	70.75	103.73
70/30	60/40	7.05	8.40	12.18	19.77
	65/35	26.49	35.44	38.37	49.40
	70/30	41.94	50.11	56.16	61.89
80/20	60/40	12.24	7.10	15.18	18.22
	65/35	20.01	19.55	18.04	26.81
	70/30	35.51	31.13	36.74	31.76

ตารางที่ ข-10 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณซัลเฟตในเนื้อลอม 13.35%)

Recipe		Compressive Strength (kg/cm ²)			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	6.46	17.24	20.45	42.78
	65/35	24.36	39.29	58.12	60.74
	70/30	63.42	81.47	127.55	156.58
70/30	60/40	4.80	13.41	11.49	19.51
	65/35	17.89	23.56	26.82	27.18
	70/30	30.14	35.61	49.79	69.89
80/20	60/40	5.95	14.98	10.24	15.01
	65/35	2.79	17.20	19.09	24.85
	70/30	21.61	34.01	42.96	67.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณซัลเฟตในเถ้าลอย 23.60%)

Recipe		Compressive Strength (kg/cm ²)			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	15.91	17.98	22.54	27.59
	65/35	23.67	35.99	46.43	55.87
	70/30	37.65	64.85	61.83	86.35
70/30	60/40	9.68	12.83	13.36	18.69
	65/35	19.17	18.94	32.64	36.16
	70/30	34.21	21.42	59.09	52.41
80/20	60/40	4.02	0.79	11.82	8.58
	65/35	7.71	9.13	20.57	20.08
	70/30	12.18	27.33	25.06	44.33

ตารางที่ ข-12 ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณซัลเฟตในเถ้าลอย 33.75%)

Recipe		Compressive Strength (kg/cm ²)			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	24.76	23.94	33.94	38.58
	65/35	38.11	37.69	75.18	88.61
	70/30	64.75	67.35	54.81	101.41
70/30	60/40	15.79	13.84	23.81	26.76
	65/35	27.99	30.21	46.81	55.49
	70/30	33.88	47.31	48.44	88.16
80/20	60/40	12.70	9.18	18.19	18.02
	65/35	11.44	12.70	14.59	23.06
	70/30	23.77	30.48	20.59	49.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะจากก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่างๆ (ปริมาณคลอไรด์ 22.33%)

Recipe		ค่าการชะละลายโลหะหนัก (mg/l)															
		Cd				Cr				Pb				Fe			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	0.220	0.136	0.179	0.160	0.135	0.075	0.025	0.022	0.553	0.529	0.198	0.139	0.030	0.114	0.012	0.005
	65/35	0.271	0.269	0.212	0.204	0.158	0.152	0.143	0.075	0.420	0.280	0.220	0.067	0.048	0.026	0.118	0.008
	70/30	0.247	0.248	0.216	0.101	0.236	0.124	0.095	0.026	0.498	0.363	0.264	0.044	0.232	0.312	0.175	0.038
70/30	60/40	0.286	0.274	0.251	0.139	0.431	0.368	0.315	0.110	0.775	0.432	0.326	0.214	0.271	0.254	0.135	0.127
	65/35	0.306	0.286	0.271	0.254	0.343	0.318	0.290	0.250	0.654	0.628	0.499	0.345	0.250	0.240	0.164	0.150
	70/30	0.334	0.329	0.314	0.267	0.356	0.316	0.300	0.256	0.851	0.734	0.549	0.240	0.381	0.332	0.254	0.163
80/20	60/40	0.345	0.331	0.327	0.319	0.411	0.399	0.393	0.295	1.411	0.994	0.364	0.218	0.343	0.341	0.296	0.232
	65/35	0.351	0.312	0.297	0.281	0.417	0.358	0.347	0.216	0.954	0.754	0.426	0.194	0.343	0.316	0.277	0.154
	70/30	0.340	0.314	0.240	0.769	0.420	0.407	0.393	0.250	1.239	0.875	0.465	0.222	0.383	0.341	0.316	0.213

ตารางที่ ข-14 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะจากก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่างๆ (ปริมาณคลอไรด์ 30.15%)

Recipe		ค่าการชะละลายโลหะหนัก (mg/l)															
		Cd				Cr				Pb				Fe			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	0.236	0.244	0.207	0.022	0.164	0.156	0.042	0.018	0.009	0.185	0.083	nd	0.168	0.304	0.001	nd
	65/35	0.301	0.276	0.354	0.215	0.351	0.365	0.044	0.200	0.223	0.354	0.412	0.180	0.254	0.220	0.215	0.031
	70/30	0.246	0.263	0.247	0.362	0.216	0.244	0.220	0.071	0.251	0.363	0.225	nd	0.065	0.070	0.067	0.034
70/30	60/40	0.286	0.296	0.271	0.023	0.348	0.361	0.307	0.022	0.321	0.296	0.231	0.006	0.291	0.283	0.170	nd
	65/35	0.311	0.310	0.355	0.215	0.396	0.393	0.354	0.220	0.373	0.541	0.254	0.012	0.417	0.307	0.210	0.008
	70/30	0.347	0.281	0.312	0.266	0.320	0.340	0.379	0.204	0.543	0.493	0.357	0.029	0.333	0.360	0.190	0.175
80/20	60/40	0.340	0.346	0.349	0.039	0.435	0.447	0.218	0.030	0.398	0.323	0.113	0.098	0.295	0.377	0.105	0.074
	65/35	0.335	0.367	0.359	0.045	0.431	0.479	0.496	0.260	0.450	0.370	0.230	0.150	0.311	0.371	0.366	0.118
	70/30	0.341	0.376	0.314	0.301	0.455	0.465	0.182	0.300	0.498	0.395	0.321	0.259	0.369	0.383	0.210	0.002

ตารางที่ ข-15 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะจากก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณคลอไรด์ 40.60%)

Recipe		ค่าการชะละลายโลหะหนัก (mg/l)															
		Cd				Cr				Pb				Fe			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	0.230	0.244	0.195	0.154	0.354	0.412	0.219	0.054	0.548	0.664	0.146	0.030	0.215	0.250	0.233	0.083
	65/35	0.263	0.221	0.251	0.211	0.310	0.099	0.017	0.053	1.214	0.547	0.530	0.052	0.259	0.176	0.156	0.051
	70/30	0.191	0.192	0.193	0.15	0.054	0.082	0.043	0.025	0.612	0.621	0.417	0.025	0.035	0.040	0.009	0.005
70/30	60/40	0.369	0.295	0.319	0.215	0.429	0.367	0.395	0.130	0.017	0.554	0.369	0.003	0.309	0.230	0.229	0.190
	65/35	0.354	0.306	0.275	0.155	0.454	0.467	0.385	0.142	0.050	0.386	0.518	0.025	0.408	0.466	0.227	0.221
	70/30	0.311	0.285	0.313	0.152	0.347	0.360	0.371	0.213	0.543	0.666	0.255	0.140	0.356	0.360	0.217	0.150
80/20	60/40	0.326	0.346	0.349	0.396	0.383	0.447	0.431	0.094	0.326	0.354	0.328	nd	0.366	0.361	0.220	0.107
	65/35	0.319	0.345	0.339	0.291	0.418	0.436	0.438	0.246	0.238	0.408	0.238	nd	0.402	0.304	0.349	0.210
	70/30	0.342	0.331	0.345	0.404	0.446	0.438	0.450	0.254	0.116	0.326	0.365	nd	0.362	0.448	0.490	0.175

ตารางที่ ข-16 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะจากก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณซัลเฟต 13.35%)

Recipe		ค่าการชะละลายโลหะหนัก (mg/l)															
		Cd				Cr				Pb				Fe			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	0.220	0.136	0.179	0.160	0.135	0.075	0.025	0.022	0.553	0.529	0.198	0.139	0.030	0.114	0.012	0.005
	65/35	0.271	0.269	0.212	0.204	0.158	0.152	0.143	0.075	0.420	0.280	0.220	0.067	0.048	0.026	0.118	0.008
	70/30	0.247	0.248	0.216	0.101	0.236	0.124	0.095	0.026	0.498	0.383	0.264	0.044	0.232	0.312	0.175	0.038
70/30	60/40	0.286	0.274	0.251	0.139	0.431	0.368	0.315	0.110	0.775	0.432	0.326	0.214	0.271	0.254	0.135	0.127
	65/35	0.306	0.286	0.271	0.254	0.343	0.318	0.290	0.250	0.654	0.628	0.499	0.345	0.250	0.240	0.164	0.150
	70/30	0.334	0.329	0.314	0.267	0.356	0.316	0.300	0.256	0.851	0.734	0.549	0.240	0.381	0.332	0.254	0.163
80/20	60/40	0.345	0.331	0.327	0.319	0.411	0.399	0.393	0.295	1.411	0.994	0.364	0.218	0.343	0.341	0.296	0.232
	65/35	0.351	0.312	0.297	0.281	0.417	0.358	0.347	0.216	0.954	0.754	0.426	0.194	0.343	0.316	0.277	0.154
	70/30	0.340	0.314	0.240	0.269	0.420	0.407	0.393	0.250	1.239	0.875	0.465	0.222	0.383	0.341	0.316	0.213

ตารางที่ ข-17 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะจากก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณซัลเฟต 23.60%)

Recipe		ค่าการชะละลายโลหะหนัก (mg/l)															
		Cd				Cr				Pb				Fe			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	0.017	0.012	0.019	0.023	0.502	0.478	0.422	0.147	0.143	0.085	0.087	0.320	0.150	0.070	0.436	0.462
	65/35	0.052	0.056	0.034	0.037	0.736	0.653	0.480	0.136	0.622	0.561	0.970	0.248	0.025	0.022	0.547	0.127
	70/30	0.029	0.026	0.024	0.020	0.574	0.461	0.254	0.159	0.302	0.289	0.418	0.105	0.109	0.388	0.193	0.413
70/30	60/40	0.086	0.090	0.035	0.040	0.512	0.476	0.352	0.335	0.102	0.142	0.49	0.49	0.089	0.032	0.020	0.019
	65/35	0.265	0.268	0.039	0.037	0.412	0.359	0.298	0.270	0.543	0.142	0.369	0.466	0.282	0.258	0.014	0.006
	70/30	0.110	0.119	0.034	0.034	0.433	0.358	0.321	0.280	0.242	0.239	0.214	0.553	0.087	0.096	0.057	0.094
80/20	60/40	0.006	0.003	0.002	0.009	0.422	0.410	0.397	0.350	0.882	0.985	1.159	0.773	0.429	0.312	0.322	0.114
	65/35	0.006	0.011	0.014	0.038	0.432	0.343	0.235	0.220	0.767	0.96	1.136	0.662	0.372	0.365	0.361	0.093
	70/30	0.021	0.015	0.023	0.050	0.470	0.454	0.397	0.360	1.263	1.358	1.348	0.663	0.410	0.404	0.434	0.106

ตารางที่ ข-18 ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะจากก้อนคอนกรีตที่อัตราส่วนต่าง ๆ (ปริมาณซัลเฟต 33.75%)

Recipe		ค่าการชะละลายโลหะหนัก (mg/l)															
		Cd				Cr				Pb				Fe			
FA:Cement	Solid:Water	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน
60/40	60/40	0.036	0.029	0.028	0.013	0.518	0.423	0.421	0.321	0.083	0.191	0.566	0.422	0.300	0.320	0.006	0.126
	65/35	0.081	0.080	0.071	0.041	0.856	0.657	0.522	0.498	1.020	0.019	0.055	0.568	0.026	0.023	0.031	0.223
	70/30	0.042	0.043	0.038	0.033	0.611	0.563	0.553	0.271	0.463	0.695	0.855	0.531	0.385	0.008	0.230	0.242
70/30	60/40	0.105	0.097	0.091	0.040	0.745	0.533	0.512	0.412	0.204	0.465	0.225	0.743	0.061	0.104	0.105	0.041
	65/35	0.268	0.268	0.266	0.046	0.698	0.523	0.412	0.332	0.202	0.297	0.855	0.847	0.595	0.278	0.300	0.063
	70/30	0.130	0.260	0.256	0.033	0.612	0.512	0.411	0.328	0.188	0.255	0.492	0.783	0.340	0.131	0.208	0.107
80/20	60/40	0.039	0.012	0.008	nd	0.544	0.521	0.412	0.338	0.851	0.591	0.802	0.564	0.838	0.324	0.362	0.114
	65/35	0.042	0.021	0.020	0.018	0.412	0.390	0.311	0.302	1.158	1.587	1.357	0.629	0.398	0.378	0.386	0.135
	70/30	0.056	0.022	0.016	0.014	0.582	0.530	0.412	0.406	1.240	1.126	0.546	1.221	0.481	0.423	0.213	0.426

ตารางที่ ข-19 ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบซีเมนต์ด้วยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer

จำนวนครั้งที่ วิเคราะห์	ร้อยละขององค์ประกอบ									
	Mg	Si	S	K	Ca	Fe	Cu	Ti	Mn	Sr
1	0.93	9.92	3.08	0.96	78.70	4.54	0.24	0.25	0.08	0.08



ภาคผนวก ก

หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปนื้อกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ท้ายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540)

ข้อ 1 การทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปนื้อกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามที่กำหนดในภาคผนวกที่ 1 ให้ผู้ประกอบการโรงงานดำเนินการ โดยวิธีการบำบัด (Treatment) หรือการกำจัด (Disposal) วิธีการใดวิธีการหนึ่ง หรือหลายวิธีต่อเนื่องกัน (Chain treatments) ขึ้นกับลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปนื้อกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วนั้น 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 การแยกด้วยเครื่องแยกน้ำและน้ำมัน (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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
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 ติดตั้งปฏิกิริยาชนิดฟิล์มตรึง (Attached film reactors)
 - 1.4.2 ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge)
 - 1.4.3 ระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion)
 - 1.4.4 การหมัก (Composting)
 - 1.4.5 ระบบบ่อฝัง (Stabilization ponds)
 - 1.4.6 การย่อยสลายทางชีวภาพแบบอยู่กับที่ (In situ biological decomposition)
 - 1.4.7 การทำลายพิษทางชีวภาพ (Biological detoxification)
- 1.5 การบำบัด หรือการกำจัดโดยกระบวนการใช้ความร้อน (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 การเผาในเตาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (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 การทำเป็นโพลิเมอร์ (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 ผู้ประกอบการโรงงานสามารถใช้วิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิกูล หรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วโดยวิธีการอื่น ๆ ที่ต่างไปจากที่กำหนดไว้ในข้อ 1.1 ถึงข้อ 1.7 หรือวิธีการอื่น 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) หรือ การแลกเปลี่ยนของเสีย (Wastes exchange) เพื่อใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต ตลอดจนการใช้บริการการดำเนินการต่าง ๆ ดังกล่าวของบุคคลอื่นแทน

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

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ 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 เติมด้วยน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic acid rain extraction fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดต่างพีเอช (pH) ของส่วนผสม (Mixture) มีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

(3) เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (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 หรือวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้งตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ.2539) ลงวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ.2539 ในกรณีที่เกิดการวิเคราะห์ของสารละลายจากการสกัด (Leachate) มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน ให้ดำเนินการทำลายฤทธิ์ใหม่ เพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่กำหนดไว้

ตาราง ก-1 ค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด
(Leachant หรือ Extraction fluid)

ชนิดของสาร	ปริมาณความเข้มข้น	
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
เอลดริน (Endrin)	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลออร์ (Heptachlor and its epoxide)	0.008	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซาคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซาคลอโรบิวตาไดอิน (Hexachlorobutadien)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซาคลอโรอีเทน (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
เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 ค่ามาตรฐานปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด
(Leachant หรือ Extraction fluid) (ต่อ)

ชนิดของสาร	ปริมาณความเข้มข้น
ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	2.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4-ไนโตรโทลูอีน (2,4-Nitrotoluene)	0.13 มิลลิกรัมต่อลิตร
เพนตาคลอโรฟีนอล (Pentachlorophenol)	100.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไพริดีน (Pyridine)	5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม (Selenium)	1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน (Silver)	5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร
เตตราคลอโรเอทิลีน (Tetrachloroethylene)	0.7 มิลลิกรัมต่อลิตร
ทอกซาฟีน (Toxaphene)	0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene)	0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,5-Trichlorophenol)	100.0 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 บัญชีลักษณะและคุณสมบัติของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วตามท้ายประกาศ
กระทรวงอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้