

รายงานวิจัย

เรื่อง

การปรับเสถียรตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการให้อยู่ในรูปของ  
ซีเมนต์บล็อก



งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากเงินรายได้ ประเภทส่งเสริมนักวิจัย คณะวิทยาศาสตร์  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยงานดังกล่าวที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตลอดโครงการวิจัยนี้ ตลอดจนการทำรูปเล่มดังที่ปรากฏนี้



ผู้ทำวิจัย

เลขที่.....  
เลขทะเบียน 145619  
รับเดือนปี 10 ส.ค. 2560

b. 05266515  
i. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยเรื่อง การปรับเสถียรตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการให้อยู่ในรูปของซีเมนต์บล็อก  
 คณะผู้วิจัย ผศ.พรชวรณ ศรีนาค

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับเสถียร และการทำเป็นก้อนแข็งตะกอนโลหะหนักจากของเสียห้องปฏิบัติการเคมี 7 ตัวอย่างด้วยวิธียัดจับด้วยซีเมนต์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนของตะกอนของเสียที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด และ ความหนาแน่น ค่าพีเอช และความเข้มข้นของโลหะหนักน้ำชะละลาย จากการศึกษพบว่า อัตราส่วนของตะกอน ต่อซีเมนต์ 0.05, 0.1, 0.15, 0.25, และ 0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ย  $202.23 \pm 31.05$ ,  $164.12 \pm 29.78$ ,  $109.03 \pm 28$ ,  $58.73 \pm 35.77$  และ  $32.81 \pm 21.29$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออัตราส่วนของเสียต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยอยู่ในช่วง  $2.10 \pm 0.06$  -  $1.90 \pm 0.05$  ตันต่อลูกบาศก์เมตร การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชระหว่างการชะละลายของก้อนซีเมนต์ในเวลา  $18 \pm 2$  ชั่วโมงเป็น 5-12 โดยมีปริมาณโลหะ โคโรเนียม ซิลเวอร์ ตะกั่วในน้ำชะละลายของก้อนซีเมนต์ที่อัตราส่วนของเสีย 0.05, 0.1 และ 0.15 มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ( ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540) ส่วนเหล็ก แมงกานีส และคอปเปอร์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานในทุกสัดส่วนตะกอนของเสีย

คำสำคัญ : การปรับเสถียร, การทำเป็นก้อนแข็ง, กำลังรับแรงอัด

งานวิจัยเรื่อง การปรับเสถียรตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการให้อยู่ในรูปของซีเมนต์บล็อกลอก  
 คณะผู้วิจัย ผศ.พรชวรอน ศรีนาค

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปรับเสถียร และการทำเป็นก้อนแข็งตะกอนโลหะหนักจากของเสียห้องปฏิบัติการเคมี 7 ตัวอย่างด้วยวิธียัดจับด้วยซีเมนต์ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ อัตราส่วนของตะกอนของเสียที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด และ ความหนาแน่น ค่าพีเอช และความเข้มข้นของโลหะหนักน้ำชะละลาย จากการศึกษพบว่า อัตราส่วนของตะกอน ต่อซีเมนต์ 0.05, 0.1, 0.15, 0.25, และ 0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดโดยเฉลี่ย  $202.23 \pm 31.05$ ,  $164.12 \pm 29.78$ ,  $109.03 \pm 28$ ,  $58.73 \pm 35.77$  และ  $32.81 \pm 21.29$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ค่าความหนาแน่นลดลงเมื่ออัตราส่วนของเสียต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยอยู่ในช่วง  $2.10 \pm 0.06$ - $1.90 \pm 0.05$  ดันต่อลูกบาศก์เมตร การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชระหว่างการชะละลายของก้อนซีเมนต์ในเวลา  $18 \pm 2$  ชั่วโมงเป็น 5-12 โดยมีปริมาณโลหะ โคโรเมียม ซิลเวอร์ ตะกั่วในน้ำชะละลายของก้อนซีเมนต์ที่อัตราส่วนของเสีย 0.05, 0.1 และ 0.15 มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ( ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540) ส่วนเหล็ก แมงกานีส และคอปเปอร์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานในทุกสัดส่วนตะกอนของเสีย

คำสำคัญ : การปรับเสถียร, การทำเป็นก้อนแข็ง, กำลังรับแรงอัด

Special Project Title Effect of various form of chromium on Stabilization and Solidification with Portland cement

Researcher Asst.Prof. Passawan Srinak

#### Abstract

The 7 samples of chemical sludge were stabilized and solidified with Portland cement ratio (w/c) of 0.05, 0.15, 0.25, and 0.50 The compressive strength of cement mortars were ranging of  $202.23 \pm 31.05$ ,  $164.12 \pm 29.78$ ,  $109.03 \pm 28$ ,  $58.73 \pm 35.77$  and  $32.81 \pm 21.29$  kg/cm<sup>2</sup>, respectively. Mortars densities were ranging of  $2.10 \pm 0.06$ - $1.90 \pm 0.05$  ton/m<sup>3</sup>. The pH of 18 ± 2 hrs of leaching test were changed from 5.0 to 12.0. Heavy metals concentrations in leachates were lower upper limit of standard was set by ...for Cr, Ag and Pb at c/w ratio of 0.05, 0.1 and 0.15 mortars and for Fe, Mn and Cu at all of c/w ratio mortars.

Keyword: Stabilization/Solidification, Chromium, Hydration reaction, Compressive strength

# สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของ โครงการงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....</b>	<b>3</b>
2.1 ของเสียน้ันตราย.....	3
2.2 ปูนซีเมนต์.....	4
2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี.....	5
2.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement : OPC).....	6
2.2.3 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration reaction).....	7
2.2.4 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์.....	10
2.3 โลหะหนัก.....	13
2.3.1 สังกะสี (Zn).....	13
2.3.2 ตะกั่ว (Pb).....	13
2.3.3 โครเมียม (Cr).....	13
2.3.4 ทองแดง (Cu).....	14
2.4 กำลังอัดของคอนกรีต.....	14
2.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength).....	15
2.4.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต.....	16
2.4.1.2 วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัด (ASTM : C109-92).....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การทดสอบการชะละลาย (Leaching test).....	18
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	18
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>21</b>
3.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	21
3.1.1 อุปกรณ์.....	21
3.1.2 สารเคมี.....	21
3.2 ที่มาและลักษณะของตะกอน.....	22
3.2.1 ที่มาของตะกอนของเสีย.....	22
3.2.2 การเตรียมตะกอนเคมี.....	23
3.2.3 การศึกษาสมบัติของตะกอนเคมี.....	23
3.2.4 คุณสมบัติของตะกอนของเสีย.....	24
3.3 การปรับเสถียร โลหะหนักโดยการทำเป็นก้อนซีเมนต์.....	25
3.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต (ASTM : C109-92).....	26
3.5 การทดสอบการชะละลาย.....	27
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองวิจารณ์ผล.....</b>	<b>29</b>
4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของก้อนซีเมนต์.....	29
4.1.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของตะกอนต่อกำลังรับแรงอัด.....	29
4.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของตะกอนของเสียต่อความหนาแน่น.....	30
4.2 การศึกษาสมบัติการชะละลาย.....	31
4.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของตะกอนต่อค่า pH น้ำชะละลาย.....	32
4.2.2 การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย.....	32
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>35</b>
บรรณานุกรม.....	37
ภาคผนวก .....	40

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ .....	5
ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเปอร์เซ็นต์ความชื้น.....	24
ตารางที่ 3.2 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนของเสีย.....	25
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย.....	33
ตารางที่ ก. ผลการวัดค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น.....	
ตารางที่ ข. ค่ามาตรฐานการทดลองกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้า (ASTM : C109 – 92).....	
ตารางที่ ค. ผลการวัดค่า pH หลังการชะละลาย	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงสัดส่วนผสมสารประกอบหลัก CaO, SiO <sub>2</sub> และ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ของปูนซีเมนต์.....	6
รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ .....	9
รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์.....	10
รูปที่ 2.4 ค่า pH และค่า Alkalinity จากการทดสอบการชะละลาย.....	11
รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ โลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่าความเป็นด่างของ ซีลิกอน จากการทดสอบการชะละลาย .....	12
รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine) .....	27
รูปที่ 3.2 เครื่องผสม.....	28
รูปที่ 3.3 แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม.....	28
รูปที่ 3.4 ก้อนซีเมนต์หลังจากถอดแบบหล่อ.....	28
รูปที่ 3.5 การบ่มก้อนมอร์ตาร์ซีเมนต์.....	28
รูปที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนของตะกอนของเสียที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด.....	30
รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนของตะกอนของเสียที่มีผลต่อความหนาแน่น.....	32
รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนของตะกอนต่อค่า pH น้ำชะละลาย.....	33

## นิยามคำศัพท์

AAS	Atomic Absorption Spectroscopy
aq.	aqueous
ASTM	American Society for Testing and Material
g.	กรัม
kg.	กิโลกรัม
mg.	มิลลิกรัม
MPa	เมกะพาสคัล
N	นอร์มอล
OPC	Ordinary Portland Cement
ppm.	Part per million
S/S	Stabilization and Solidification
SD	Standard Deviation
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
U.S. EPA.	United State Environmental Protection Agency
W/C	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์
°C	องศาเซลเซียส
µm.	ไมโครเมตร
กก.	กิโลกรัม
ชม.	ชั่วโมง
ตร.ชม.	ตารางเซนติเมตร
นน.	น้ำหนัก
มม.	มิลลิเมตร
มล.	มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

ในสมัยปัจจุบันการพัฒนาอุตสาหกรรมที่ทันสมัยและความสะดวกสบายได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น ทำให้มนุษย์ต้องศึกษาค้นคว้าและวิจัยในด้านต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ไม่ว่าจะเป็น ด้านการแพทย์ ด้านเคมี ด้านชีววิทยา ด้านฟิสิกส์ ด้านคอมพิวเตอร์ เป็นต้น สิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นสิ่งที่จะนำมาประยุกต์ใช้เพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ซึ่งผลที่ตามมาหลังจากการทำการศึกษา ค้นคว้า วิจัย แล้วนอกจากจะได้ความรู้และความต้องการในงานเหล่านี้ยังส่งผลต่อการก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมาอีกด้วย เช่น การเกิดของเสียอันตราย การทำให้เกิดมลภาวะในด้านต่างๆ เป็นต้น โดยเฉพาะการทำงานวิจัยทางด้านเคมีซึ่งมักจะมีการวิเคราะห์และทำการทดลองสารเคมีที่ประกอบด้วยโลหะหนักในปริมาณที่มาก หากทำการปล่อยทิ้งโดยไม่บำบัดหรือทำการกำจัดอย่างถูกวิธีอาจมีการปนเปื้อนทางสิ่งแวดล้อม

การทดลองนี้เป็นการเก็บกากตะกอนเคมีซึ่งเป็นของเสียอันตรายเคมีในปูนซีเมนต์ซึ่งไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยทำการเก็บรวบรวมของเสียโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยนำของเสียโลหะหนักที่ได้มาทำการปรับค่า พีเอช (pH) ประมาณ 7-8 แล้วปล่อยให้ระเหยจนแห้งเหลือตะกอนซึ่งเป็นการสะดวกต่อการเก็บรวบรวมแล้วนำตะกอนที่ได้มาทำเสถียรให้อยู่ในรูปที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเป็นการตรึง (Immobilize) โลหะหนักไว้ในก้อนซีเมนต์ ทำให้ไม่มีปัญหาในเรื่องของตะกอนของเสียอันตรายที่เกิดจากการบำบัดทางเคมีรวมไปถึงยังสามารถใช้ซีเมนต์ก้อนมาใช้ประโยชน์ในงานก่อสร้างหรืองานต่างๆ ที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมากอีกด้วยการทำเสถียรตะกอนให้อยู่ในรูปของซีเมนต์บล็อกเป็นแนวทางในการบำบัดของเสียประเภทโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการที่เหมาะสม

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาอัตราที่เหมาะสมของตะกอนเคมีที่มีผลต่อการปรับเสถียรเพื่อให้ได้ก้อนแข็ง
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของก้อนซีเมนต์ที่ได้จากการปรับเสถียร

#### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนซีเมนต์ของตะกอนโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมีโดยทำการทดสอบที่อัตราส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 : 2.75 : 0.5 : 0.05

1 : 2.75 : 0.5 : 0.10

1 : 2.75 : 0.5 : 0.15

1 : 2.75 : 0.5 : 0.25

1 : 2.75 : 0.5 : 0.5

2. ทำการทดสอบก้อนซีเมนต์ที่ผ่านการปรับเสถียรด้วยวิธีทางกายภาพ โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ Compressive strength ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน และทำการวัดค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์ที่เกิดจากการปรับเสถียร

3. ทำการทดสอบก้อนซีเมนต์ที่ผ่านการปรับเสถียรด้วยวิธีทางเคมีคือ ทดสอบการชะละลายด้วยวิธี Extraction Procedure ตามวิธีมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการที่ง่าย เหมาะสม และประหยัด
2. ลดปัญหาจากการที่ต้องนำกากตะกอนที่เกิดจากการบำบัดทางเคมีไปทิ้งในที่ปลอดภัย
3. สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับห้องปฏิบัติการเคมี โดยเฉพาะสถานศึกษา โดยไม่ต้องสร้างโรงบำบัดซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เติมน้ำมัน และกำจัดกากตะกอนที่แพง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 ของเสียอันตราย

ของเสียอันตราย (Hazardous Waste) หมายถึง ของเสียที่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสุขภาพของมนุษย์ มีผู้ให้คำจำกัดความของเสียอันตรายต่าง ๆ กันดังนี้ คือ

1. ของเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม (ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของแข็งกึ่งของแข็งของเหลวและก๊าซ) และปนเปื้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม (ทางดิน น้ำ และอากาศ)
2. สิ่งต่าง ๆ ที่ไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจและไม่ไปถูกทิ้งโดยไม่จำกัดไม่ว่าจะทิ้งในน้ำ ดิน หรืออากาศ จะก่อให้เกิดอันตรายต่อพืช มนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม
3. ของเสียใด ๆ ที่ลุกติดไฟได้ ทำให้เกิดโรคติดต่อ สะสมในสิ่งมีชีวิตแล้วก่อให้เกิดมะเร็ง หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมได้

ของเสียอันตราย ตามคำจำกัดความของกรมควบคุมมลพิษหมายถึง ของเสียที่เจือปนด้วยของที่มีความเข้มข้นหรือคุณสมบัติทางกายภาพเคมี หรืออื่น ๆ ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดการตายหรือการเจ็บป่วย ทั้งที่รักษาได้และรักษาไม่ได้ตลอดจนทำให้เกิดหรือมีแนวโน้มทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อม เมื่อไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสมในการบำบัด เก็บกัก ขนส่ง และกำจัด (กรมควบคุมมลพิษ, 2545)

ของเสียอันตรายที่ได้จากชุมชน ได้แก่ ถ่านไฟฉายหมดอายุ กระป๋องสารปราบศัตรูพืช ยาหมดอายุ หลอดไฟหมดอายุหรือใช้แล้ว แบตเตอรี่ที่หมดอายุ โทรทัศน์ที่หมดอายุ วิทยุน้ำมันเครื่องเก่า น้ำมันล้างอัดรูป นอกจากนั้นของเสียอันตรายจากชุมชนอีกประเภทหนึ่งที่ต้องมีการจัดการเฉพาะ ได้แก่ของเสียจากโรงพยาบาล เนื่องจากเป็นแหล่งของเสียที่แพร่เชื้อโรคต่าง ๆ ชุมชนย์ได้อย่างมากมาย ตัวอย่างของเสียจากโรงพยาบาล ได้แก่ เข็มและกระบอกฉีดยา ถ้ำสี พลาสเตอร์ สายยางให้อาหาร สายสวนปัสสาวะอุจจาระ สายน้ำเกลือ สายดูดเสมหะ ชิ้นเนื้อส่วนต่าง ๆ เสมหะเลือด น้ำในช่องท้อง น้ำในไขสันหลัง เป็นหลัก ส่วนของเสียอันตรายที่สำคัญอีกแหล่งหนึ่งคือ ของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรม ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ของสารปราบศัตรูพืช และสารเคมีต่าง ๆ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ตะกอนก้นถังของสารเคมีต่าง ๆ ขยะที่เสียนิยแอสเบสตอสเจือปน กากตะกอนที่มีโลหะหนักเป็นส่วนประกอบจากการประเมินพบว่าโรงงานอุตสาหกรรมจะเป็นแหล่งกำเนิดของเสียอันตรายร้อยละ 90-92 ของปริมาณของเสียทั้งหมด (มัลลิกา, 2542) ที่ถูกทิ้งรวมไปกับขยะมูลฝอย และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

#### ประเภทของเสียอันตราย

สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติแบ่งประเภทของเสียอันตรายออกเป็น 14

#### ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. น้ำมัน (Oils) ได้แก่ ของเสียจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม น้ำมันหล่อลื่น และสารทำความสะอาดเย็นของเครื่องจักร
2. กากสารอินทรีย์เหลว (Liquid organic residues) ของเสียจากอุตสาหกรรม ปิโตรเคมี และจากอุตสาหกรรมอินทรีย์เคมี ซึ่งส่วนใหญ่มีคุณสมบัติติดไฟได้ หรือมีสารพิษเฉียบ
3. ตะกอนของแข็งสารอินทรีย์ (Organic sludges and solids) กากของเสียจากอินทรีย์เคมีส่วนใหญ่ติดไฟง่ายหรือมีโอกาสคายสารพิษได้ง่าย
4. ตะกอนและของแข็งสารอนินทรีย์ (Inorganic sludges and Soilds) ตะกอนหรือกากของเสียที่มีสารอนินทรีย์ (ยกเว้น โลหะหนัก) เช่น Sulfer, Sudges, Lime sludges, Gypsum
5. ตะกอนและของแข็งโลหะหนัก (Heavy metal sludges and solids) ของเสียที่มีโลหะหนักเฉียบเป็นส่วนใหญ่มากจากระบบบำบัดน้ำเสีย
6. ตัวทำละลาย (Solvents) ได้แก่ ของเสียที่มีตัวทำละลายใช้ในการทำความสะอาดโรงงานหรือเครื่องซ่อมบำรุง ใช้ในกระบวนการผลิต เช่น พลาสติก โยสังเคราะห์ ยา เป็นต้น
7. ของเสียเป็นกรด (Acid waster) มีค่า pH 7 เช่น น้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง โรงงานชุบโลหะที่ใช้น้ำยกรดทำความสะอาด รวมทั้งกรดที่ใช้ในการทำความสะอาดรวมทั้งกรดที่ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ
8. ของเสียที่เป็นด่าง (Alkaline waste) ที่มีค่า pH สูงกว่า 7 เช่น สารละลายโซดาไฟในการชุบโลหะ น้ำยาด่างสำหรับทำความสะอาด สารละลายแอมโมเนียที่ใช้แล้ว
9. ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน (Off speciation products) คือ ผลิตภัณฑ์หรือวัสดุที่ไม่ได้มาตรฐานเสื่อมคุณภาพ หรือไม่ได้มาตรฐาน
10. พีซีบี (Polychlorinated biphenyls, PCB) ของเสียที่มีค่าพีซีบีมากกว่า 50 ppm เช่น จากหม้อแปลงไฟฟ้า
11. กากสารอินทรีย์น้ำ (Aqueous organic residues) ของเสียที่มีสารอินทรีย์เคมีที่มีพิษ เช่น น้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม หรือการล้างจากน้ำยาฆ่าแมลง ยาปราบศัตรูพืช
12. น้ำเสียล้างอัดรูป (Photo waste) ของเสียที่เกี่ยวกับกิจการการถ่ายรูป ล้างและอัดรูป ซึ่งมีน้ำยา (Silver bromide) และอื่น ๆ
13. มูลฝอยชุมชน (Municipal wastes) ของเสียอันตรายจากบ้านเรือน สำนักงานร้านอาหาร เช่น ยาฆ่าแมลง สี น้ำยาล้างห้องน้ำ หลอดไฟนีออน แบตเตอรี่ ยา เป็นต้น
14. มูลฝอยติดเชื้อ (Infection waste) ของเสียติดเชื้อ เช่น น้ำเลือด น้ำหนอง สำลี ผ้าพันแผล เข็มฉีดยา เป็นต้น

## 2.2 ปูนซีเมนต์ (ปริญา และชัย 2547)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับงานที่นำไปใช้

### 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ออกไซด์หลัก (major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (minor oxides) ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไลน์ (Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO<sub>3</sub>) และมีส่วนของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO<sub>2</sub>) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่นซึ่งจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดหรือด่าง (insoluble residue) แสดงองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญญา และชัย 2547)

องค์ประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	C	60-67
SiO <sub>2</sub>	S	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	0.5-6
MgO	M	0.1-4
Na <sub>2</sub> O	N	0.1-1.8
K <sub>2</sub> O	K	0.1-1.8
SO <sub>3</sub>	S'	0.5-3
สารประกอบอื่น ๆ	-	0.5-3
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา(loss on ignition)	LOI	0.1-3
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue)	-	0.2-0.75

ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบ โดยสารประกอบหลัก ๆ ที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่าง คือ

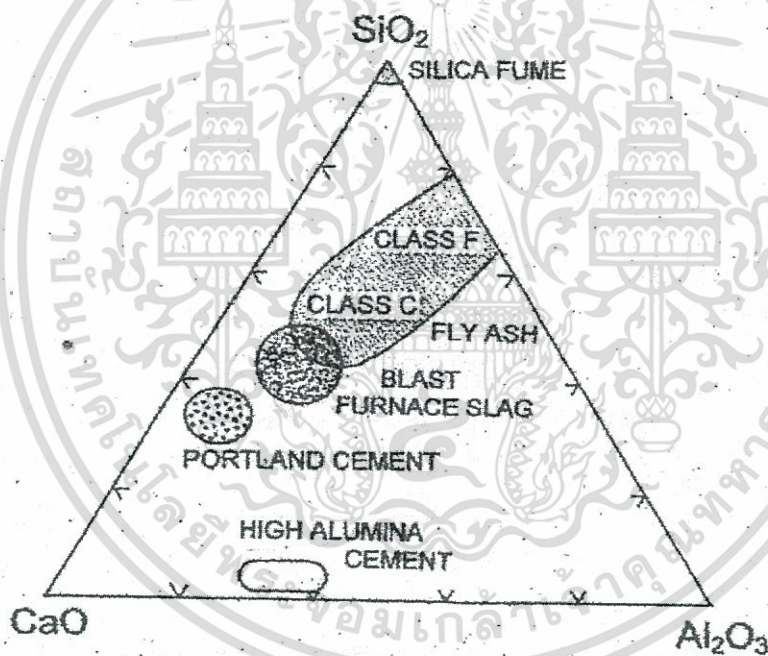
1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (tricalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมี คือ 3CaO.SiO<sub>2</sub> และย่อว่า C<sub>3</sub>S

2. ไดคัลเซียมซิลิเกต (dicalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมี คือ  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  และย่อว่า  $\text{C}_2\text{S}$

3. ไตรคัลเซียมอลูมิเนต (tricalcium aluminate) องค์ประกอบทางเคมี คือ  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  และย่อว่า  $\text{C}_3\text{A}$

4. เตตระคัลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (tetracalcium aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมี คือ  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  และย่อว่า  $\text{C}_4\text{AF}$

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่าองค์ประกอบที่มีปริมาณมากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ร้อยละ 60-67, ซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ร้อยละ 17-25 และ อลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ร้อยละ 3-8 ตามลำดับ ถ้าองค์ประกอบทั้ง 3 ชนิด นี้มีสัดส่วนแตกต่างกันออกไป ก็จะได้วัสดุผสมชนิดใหม่ เช่น ซีเมนต์ที่มีอลูมินาปริมาณสูง (High Alumina Cement) จะมีสัดส่วนอลูมินาสูงกว่าปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 แสดงสัดส่วนผสมสารประกอบหลัก  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ของปูนซีเมนต์ (F.P. Glasser, 1997)

### 2.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland cement : OPC)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใช้กันมากในงานคอนกรีต ซึ่งประมาณร้อยละ 90 เป็นปูนซีเมนต์ประเภทนี้ โดยใช้สำหรับงานคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษมาก และใช้ในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานรากของอาคาร และ ถนน ปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

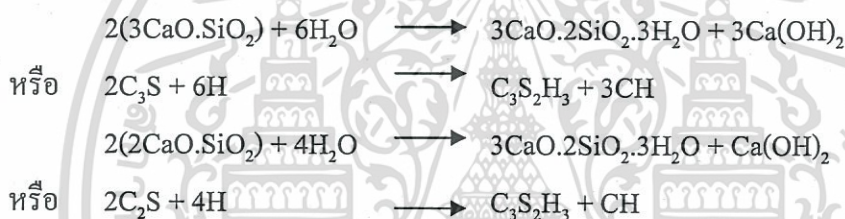
ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว และตราที่ฟิไอเขียว เป็นต้น

### 2.2.3 ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (Hydration reaction)

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะทำให้เกิดความร้อน เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกิริยานี้จะขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ที่มีหลายชนิด โดยที่สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาต่อกันและกัน ทำให้ปฏิกิริยาที่ได้มีความผิดแผกไปบ้างจากปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบบริสุทธิ์แต่ละตัวกับน้ำ ดังนั้นการศึกษาปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างสารประกอบกับน้ำจึงเป็นเรื่องสำคัญและสามารถนำไปอธิบายปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำได้ดี

#### 1. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกต

ไตรคัลเซียมซิลิเกต( $C_3S$ ) และไดคัลเซียมซิลิเกต( $C_2S$ ) เป็นสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้คัลเซียมไฮดรอกไซด์(calcium hydroxide,  $Ca(OH)_2$  หรือ CH) และคัลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium Silicate Hydrate,  $3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O$  หรือ CSH) ดังสมการ



การทำปฏิกิริยาทางเคมีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยา คือ ถ้ามีการทำปฏิกิริยามากก็จะมีการคายความร้อนมาก

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของคัลเซียมซิลิเกตสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3ก.

ขั้นที่ 1 เมื่อผสม  $C_3S$  กับน้ำ คัลเซียมไอออน( $Ca^{2+}$ )และไฮดรอกไซด์ไอออน( $OH^-$ ) จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สารละลายที่ได้มีความเป็นด่างสูงคือมีพีเอชมากกว่า 12 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส(hydrolysis) ซึ่งมีมากในระยะแรกและลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 15 นาทีแรก แต่ปฏิกิริยายังคงดำเนินต่อไป การลดลงของปฏิกิริยาสืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของ  $Ca^{2+}$  และ  $OH^-$  ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้น

ขั้นที่ 2 ระยะสงบ(dormant period) ในช่วงนี้ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อย แต่ยังคงมีอยู่ตลอด โดยเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งที่มีความเข้มข้นของ  $Ca^{2+}$  และ  $OH^-$  สูงพอจะทำให้เกิดการตกผลึกของ CH

ขั้นที่ 3 เมื่อมีการตกผลึกของ CH ในเวลาเดียวกัน  $C_3S$  จะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวของ  $C_3S$  ทำให้ได้ CSH จากนั้นปฏิกิริยาจะเกิดได้ยากขึ้นแต่ยังคงมีต่อไป

ปฏิกิริยาของ  $C_2S$  เป็นทำนองเดียวกันกับ  $C_3S$  แต่ปฏิกิริยาจะเกิดได้ช้ากว่า เพราะ  $C_2S$  ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า  $C_3S$

## 2. ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมอลูมิเนตและเฟอร์ไรต์

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต( $C_3A$ ) ทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างรวดเร็วได้แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต(calcium aluminate hydrate,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$  หรือ  $C_3AH_6$ ) ดังสมการ



ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว จึงจำเป็นต้องเติมยิปซัมเพื่อหน่วงปฏิกิริยา เพราะ  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไอออนได้แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตไฮเดรต (calcium sulfoaluminate hydrate,  $6CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O$  หรือ Ettringite) ดังสมการ



ยิปซัม

Ettringite

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนตกับยิปซัมและน้ำก็สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้น ดังรูปที่ 2.3 ข.

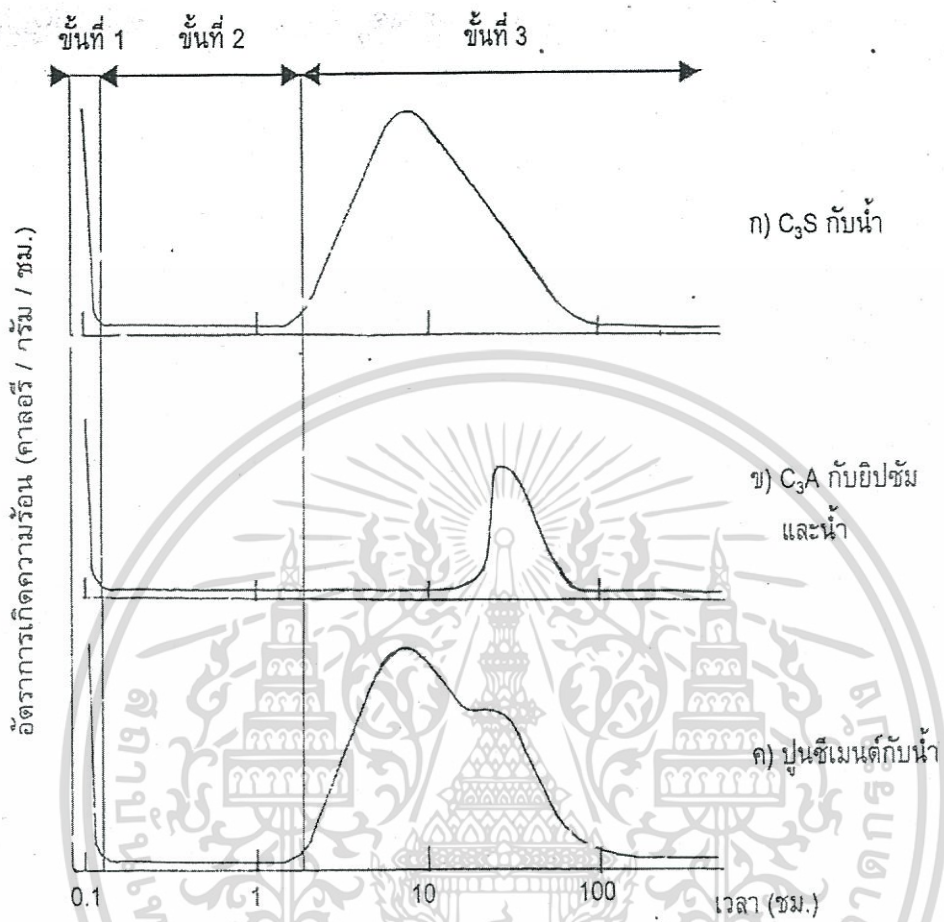
ขั้นที่ 1 ปฏิกิริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอททริงไคต์ที่มีลักษณะยาวคล้ายเข็มรอบ  $C_3A$  ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ยาก จากนั้นปฏิกิริยาจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ขั้นที่ 2 ปฏิกิริยาจะเกิดค่อนข้างน้อยและใช้เวลาหลายชั่วโมง

ขั้นที่ 3 เมื่อซัลเฟตไอออนทำปฏิกิริยาหมด  $C_3A$  จะทำปฏิกิริยากับเอททริงไคต์ทำให้เอททริงไคต์มีซัลเฟตน้อยลง กลายเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟอลูมิเนต(calcium monosulfoaluminate,  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$ ) ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ประมาณ 12-36 ชั่วโมง

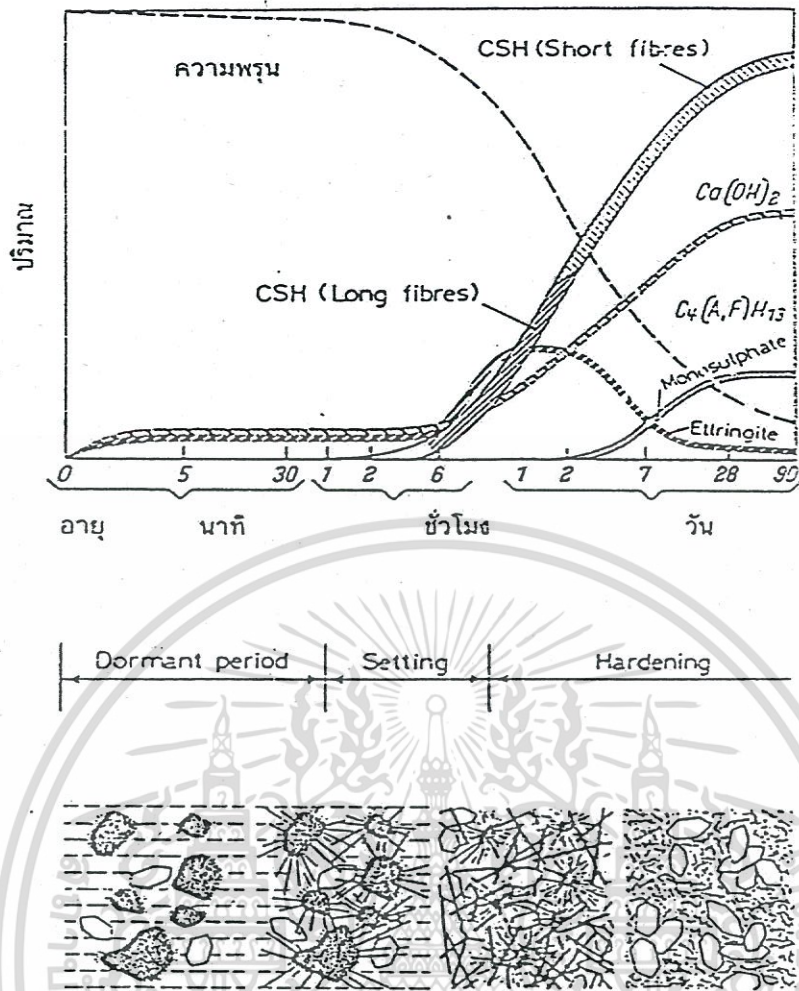
เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot C_4AF$ ) จะเกิดปฏิกิริยาคัลลัสกับ  $C_3A$  แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาน้อยกว่า ซึ่งสารประกอบเฟอร์ริกออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ , F) จะทำปฏิกิริยาคัลลัสกับอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ , A) และสามารถแทนที่กันได้ ยิปซัมจะหน่วงปฏิกิริยาของ  $C_4AF$  มากกว่า  $C_3A$  โดยปฏิกิริยาระหว่าง  $C_4AF$  และยิปซัมจะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ( $6CaO(Al_2O_3, Fe_2O_3) \cdot 3SO_3 \cdot 32H_2O$ ) ซึ่งมีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายกับเอททริงไคต์ และสามารถเปลี่ยนเป็นแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ (ปริญา และชัย 2547)

ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) คือ ส่วนที่ใช้เรียกเมื่อทำการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและการพัฒนา โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ (วินิต, 2525)

2.2.4 กลไกการยึดจับโลหะหนักในวัสดุซีเมนต์

ปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ที่เกิดภายในรูปพรุนของ โครงสร้างภายในของเสี้ยแข็งตัวที่เกาะติด บนผนังของรูปพรุนและทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์โลหะหนักจะถูกล้อมอยู่ใน ของแข็งหรืออยู่ในรูปพรุนหรือเกาะติดอยู่ที่ผิวรูปพรุนและที่ค่า pH สูง ๆ โลหะหนักที่สะสมตัวอยู่ใน รูปไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของเสี้ยที่แข็งตัวในรูปแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือเกลือ ที่ไม่ละลายน้ำโดยแทรกตัวอยู่ตามรูปพรุนและเกาะติดอยู่ตามผนังของซีเมนต์ที่แข็งตัว จากการยึดตัว ของโลหะหนักในซีเมนต์ทำได้ดีและยากที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัว ดังกล่าว

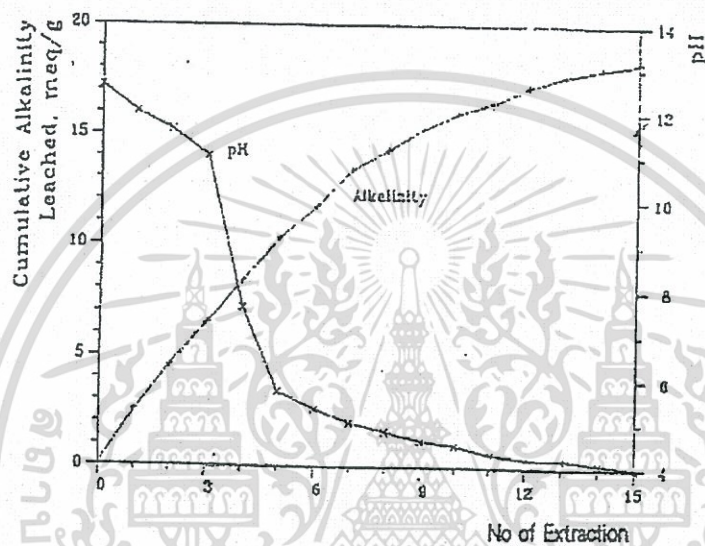
Bishop (1988) ได้ทำการศึกษาการการชะละลายโลหะหนักจากของเสี้ยที่ผ่านกระบวนการ ทำให้เป็นก้อนซีเมนต์ (Cement based Solidification) โดยใช้ของเสี้ยสังเคราะห์เป็นโลหะไฮดรอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซค์ของแคะเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยได้ศึกษาถึง Buffering capacity ของวัสดุที่แข็งตัวจากการกำจัดโลหะหนักและกลไกการยึดจับโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ในของเสียที่ถูกทำให้แข็งตัว (Solidified wastes) สรุปผลการวิจัยดังนี้

### 1. ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity)

จากการทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) กับของเสียที่แข็งตัวในซีเมนต์ โดยทำการชะละลายของเสียที่แข็งตัวด้วยกรดแอสติก แล้วทำการชะละลายต่อกันอีก 15 ครั้ง ตรวจวัดค่า pH และทำการวัดค่าความเป็นด่าง (alkalinity) แล้วนำไปเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.4



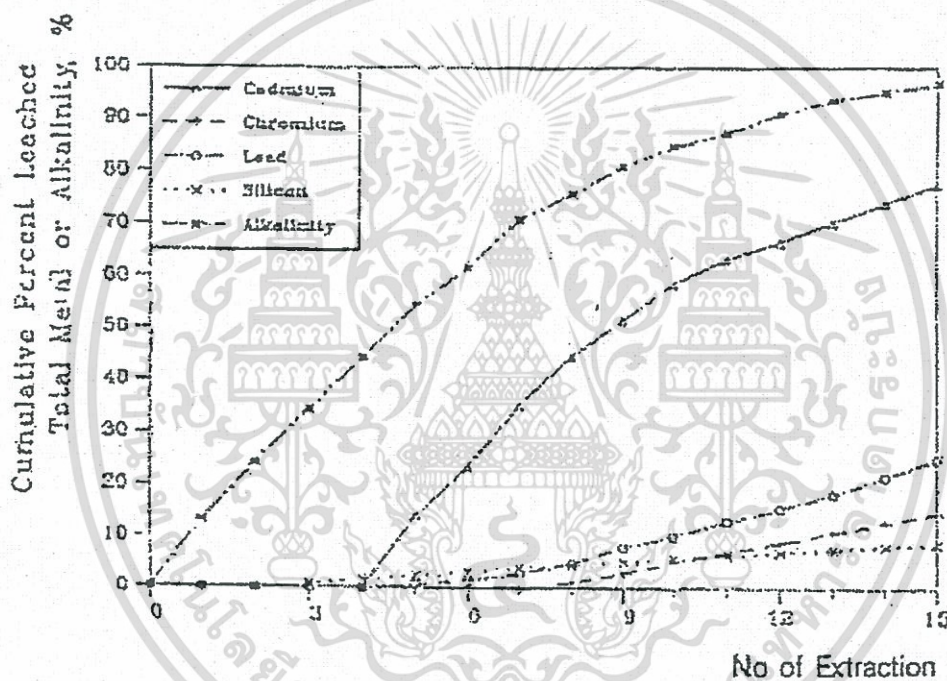
รูปที่ 2.4 ค่า pH และค่า Alkalinity จากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)

จากกราฟเมื่อทำการชะละลายของเสียแข็งตัวหลายครั้งพบว่า ค่า pH ของกรดที่ผ่านการชะละลายแล้วมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนเกือบคงที่ในครั้งที่ 15 ส่วนค่าความเป็นด่างสะสม (Cumulative Alkalinity) จะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยในครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายได้จะเหลือน้อยมากประมาณ 1.7% ของค่าความเป็นด่างสะสมทั้งหมด โดยความเป็นด่างจะถูกชะละลายออกมามากในช่วงต้นและลดลงตามลำดับจนถึงครั้งที่ 15 ค่าความเป็นด่างสะสมถึงการชะละลายในครั้งที่ 15 มีค่าเท่ากับ 18.3 meq/g ซึ่งถือเป็นค่า Buffering Capacity ของของเสียแข็งตัว ค่าความเป็นด่างที่ถูกชะละลายออกมาในแต่ละครั้ง จะเป็นตัวควบคุมค่า pH ของการชะละลายโดยการสะเทินกรดแอสติกที่ใช้ในการทดลองให้เป็นกลาง

### 2. กลไกการยึดจับโลหะหนัก

จากรูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลาย (แคะเมียม โครเมียม ตะกั่ว) กับค่าความเป็นด่าง และซิลิกอน ซึ่งจะถูกละลายมากขึ้นเมื่อค่า pH ลดลงต่ำกว่า 6 จากการทดลองที่ผ่านมาหลาย ๆ ครั้งทำให้ทราบว่าโลหะหนักจะอยู่ในโครงสร้างของของเสีย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็งตัวในรูปต่าง ๆ เช่นอยู่ในรูปของโครงสร้างภายในของของเสี้ยแข็งตัว ถูกเกาะติดบนผนังของ รูพรุนและทำปฏิกิริยาเคมีกับสารประกอบในซีเมนต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแคดเมียม (Cd) จะถูกชะละลายออกมาได้มากกว่าโครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ซึ่งจะถูกระบายออกมาได้น้อยกรณีที่โลหะหนักถูกล้อมอยู่ในของแข็งหรืออยู่ในรูพรุน หรือเกาะติดอยู่ที่ผิวของรูพรุนแล้ว โลหะหนักเหล่านั้นควรจะถูกระบายออกมาคล้ายกับการชะละลายค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) จากรูปที่ 2.5 เส้นกราฟของแคดเมียมสะสมที่ถูกชะล้างออกมาจะคล้ายคลึงกับเส้นกราฟของค่าความเป็นด่างสะสมที่ถูกชะล้างออกมา ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าแคดเมียมจะอยู่ในของแข็งที่แข็งตัวในรูปแคดเมียมไฮดรอกไซด์โดยอยู่และเกาะติดตามผนังตามรูพรุน



รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายกับค่า

ความเป็นด่างของ ซีลิกอน จากการทดสอบการชะละลาย (Bishop, 1988)

ภายหลังการทดลอง Leaching Test ได้วิเคราะห์หาน้ำหนักแห้งของสารทั้งหมดพบว่า หลังจากการทดสอบการชะละลาย 15 ครั้ง ปริมาณสารถูกชะละลายประมาณ 50-70% ของปริมาณทั้งหมดก่อนการทดลอง แต่ยังมีโลหะเหลืออยู่ โดยแคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว เหลืออยู่ 50, 80 และ 75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และยังมีโลหะหนักที่เป็นสารประกอบโดยปกติในซีเมนต์ ได้แก่ อลูมิเนียม เหล็ก และซิลิกอนเหลืออยู่ 90, 98 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และแคดเมียมเหลืออยู่ 8 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์ที่แข็งตัวสามารถยึดจับโลหะได้ดีและยากที่จะทำการชะละลายโลหะหนักออกจากซีเมนต์ที่แข็งตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 โลหะหนัก

### 2.3.1 สังกะสี (Zn)

สังกะสี เป็นโลหะสีขาวปนฟ้าอ่อน ไม่มีกลิ่น เมื่อได้รับความร้อนจะกลายเป็นฟุ้ง มีน้ำหนักโมเลกุล 65.38 มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวเท่ากับ 907 และ 419.58 องศาเซลเซียส ตามลำดับมีความถ่วงจำเพาะ 7.14 ไม่ละลายน้ำแต่ละลายในกรดและด่าง

สังกะสี สามารถพบได้จากหลายแห่งด้วยกัน เช่น อุตสาหกรรมการผลิต เหล็ก และเหล็กกล้า การผลิตถ่านไฟฉาย เป็นต้น สังกะสีสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางการหายใจ การสัมผัส และการกิน ส่วนอันตรายที่เป็นอาการอย่างเฉียบพลัน เช่น ถ้าสัมผัสทางผิวหนังอาจทำให้เกิดการระคายเคืองหรือผิวหนังแห้งได้ ถ้าได้รับทางกายหายใจ คือสัมผัสกับฝุ่นสังกะสีมาก ๆ จะมีอาการไอและมีเสมหะ อาจมีอาการคล้ายไข้หวัด หนาวสั่น ปวดศีรษะได้ ส่วนอันตรายเรื้อรังถ้าสัมผัสเป็นระยะเวลานาน ๆ มีรายงานในสัตว์ทดลองสังกะสีสามารถก่อมะเร็งได้ แต่ยังไม่มีการศึกษามากพอในมนุษย์

### 2.3.2 ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่ว เป็นโลหะชนิดหนึ่ง ซึ่งมีสมบัติโดยทั่วไปคือ สีอ่อน มีสีน้ำเงินปนเทา เป็นโลหะหนักหลอมเหลวได้ ทำให้อ่อนและดัดแปลงให้มีรูปร่างต่างได้ ตามต้องการและสามารถกลายเป็นไอได้ที่อุณหภูมิสูง ๆ ตะกั่วใช้ในอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

1. สารประกอบตะกั่วอนินทรีย์ เช่น โลหะตะกั่ว ตะกั่วอะซิเตต ตะกั่วซัลเฟต ตะกั่วซัลไฟด์ และตะกั่วออกไซด์

2. สารประกอบอินทรีย์ของตะกั่ว เช่น ตะกั่วเตตาเอทิล และตะกั่วเตตราเมทิล เป็นต้น ตะกั่วเป็นโลหะที่ปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมของมนุษย์เป็นอย่างมาก ซึ่งมาจากกิจกรรมของมนุษย์ แหล่งใหญ่ที่ทำให้ตะกั่วเข้าสู่สิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ได้แก่ ถัง เหมือง ไอเสีย จากท่อไอเสียของยานพาหนะเพราะส่วนใหญ่ใช้ตะกั่วเอทิล และตะกั่วเมทิลผสมน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินและรถยนต์ เพื่อช่วยให้เครื่องยนต์เดินเรียบ ในทางอื่น ๆ อีก เช่น โรงงานอุตสาหกรรม โดยผสมกับโลหะต่าง ๆ ผลิตเป็นแบตเตอรี่อุตสาหกรรมสิ่งพิมพ์ ทำสี เครื่องปั้นดินเผา และอุตสาหกรรมเคมี

การเข้าสู่ร่างกายของตะกั่ว จะแตกต่างกันตามชนิดของตะกั่วโดยสารประกอบ อนินทรีย์ ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ 2 ทาง คือทางปาก และทางจมูก สำหรับทางปากโดยการกิน และดื่ม อาหาร หรือน้ำที่ปนเปื้อนตะกั่ว ยาที่มีส่วนผสมของตะกั่วทางจมูก ได้แก่ จะสูดเอาควิน ไอระเหย และฝุ่น ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายและปอด และแพร่กระจายไปทั่วร่างกาย

ความเป็นพิษ ถ้าร่างกายได้รับการสะสมสารตะกั่วเป็นเวลานานถึงระดับอันตราย อาจก่อให้เกิดความผิดปกติต่อระบบย่อยและระบบประสาท เช่น ในเด็กสมองเล็กผิดปกติในผู้ใหญ่ทำลายประสาทส่วนปลาย แขนขาจะมีกล้ามเนื้ออ่อนแรง

### 2.3.3 โครเมียม (Cr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โลหะโครเมียมมักใช้ในการชุบเคลือบโลหะเพื่อกันสนิม และให้เงางาม เป็นโลหะผสมใช้ฟอกหนัง เป็นส่วนผสมของสีย้อมวัสดุต่าง ๆ

การเข้าสู่ร่างกาย โครเมียมอาจหายใจเอาไอของกรดเข้าไป หรือโดยทางปาก จากกรากินอาหารหรือน้ำดื่มที่มีโครเมียมปนเปื้อนอยู่

ความเป็นพิษกรดโครมิกหรือสารโคเมตสามารถทำลายเนื้อเยื่อเฉพาะแห่งโดยทำลายสภาพทางธรรมชาติของโปรตีน ทำให้กลายเป็นแผลพุพองตามผิวหนังที่เรียกว่า Chromic holes ทำให้มีการระคายเคืองของตาและทางเดินหายใจ ถ้าได้รับสารโคเมตทางปาก เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะทำให้ปวดท้องกระเพาะลำไส้เป็นแผลอักเสบ อ่อนเพลีย และปวดเมื่อยตามข้อ มีตับอักเสบ โครเมตอาจก่อให้เกิดการกลายพันธุ์ และสารกอมะเร็งเพราะไปรบกวนการสร้างดีเอ็นเอ มักพบในคนอายุ 50-70 ปี

#### 2.3.4 ทองแดง (Cu)

ทองแดงมีลักษณะเป็นก้อนโลหะสีแดง ไม่มีกลิ่น มีน้ำหนักโมเลกุล 63.55 มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวเป็น 2,595 และ 1,083 องศาเซลเซียส และมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 8.92 (เมื่อเทียบกับน้ำ = 1)

ทองแดงสามารถพบได้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมทำอัลลอยด์ชนิด บรอนซ์ และทองเหลือง ทำตัวนำอิเล็กทรอนิกส์ ทำกระสุนปืน ทำการเตรียมเกลือทองแดง อุตสาหกรรมผลิตสารกำจัดศัตรูพืช เป็นต้น ทองแดงสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ทางการหายใจ และทางการกิน โดยอาการที่เป็นอันตรายเฉียบพลัน เช่น การสัมผัสผิวหนังทำให้เกิดการละลายคายเคือง ถ้าได้รับทางการหายใจ จะทำให้เกิดไข้โลหะ ซึ่งจะมีอาการมีรสขมโลหะในปาก เป็นไอน้ำในลำคอ ไอเจ็บหน้าอก ส่วนอันตรายเรื้อรังทำให้เกิดการระคายเคืองจมูก และทำให้จมูกเป็นแผลได้ ทำให้เป็นโรคภูมิแพ้ที่ผิวหนังโดยจะมีอาการผื่นแดงและคัน ถ้าได้รับเป็นระยะเวลานาน และความเข้มข้นมากอาจทำลายตับ

#### 2.4 กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 3 ประการ คือ

##### 1. กำลังของมอลต้า

กำลังมอลต้ามีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยกำลังมอร์ตานี้ขึ้นอยู่กับความพรุนในเนื้อมอร์ต้า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และ Degree of Hydration แต่ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและความพรุน จะถูกควบคุมด้วยอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากำลังของมอร์ต้าขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของมวลรวม เช่น การเปลี่ยนแปลงขนาดคละ ปริมาณ กำลังลักษณะผิว ขนาดใหญ่สุด การดูดซึม และแร่ธาตุต่าง ๆ จะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตไม่มาก

นักการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังดึงน้อยกว่ากำลังอัด โดยอัตราส่วนกำลังดึงต่อกำลังอัดของคอนกรีต จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เพิ่มขึ้น

## 2. กำลังและ โมดูลัสยืดหยุ่นของมวลรวม

สำหรับกำลังมอร์ต๋าที่กำหนดให้ ความสามารถต้านแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับกำลังของ หินและแรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ต๋า แต่โดยทั่วไปกำลังของมวลรวมจะสูงเป็นหลายเท่า ของกำลังมอร์ต๋า ดังนั้นแรงยึดเหนี่ยวจะเป็นตัวควบคุมการแตกของคอนกรีต

สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่กำหนดให้ กำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงเมื่อน้ำหนัก ใหญ่ขึ้น เพราะน้ำหนักใหญ่จะก่อให้เกิดน้ำใต้ดินมากขึ้นทำให้แรงยึดเหนี่ยวของมวลรวมกับมอร์ ต๋าตกลง

ขนาดของมวลรวมจะส่งผลต่อกำลังของคอนกรีตที่มีสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่ำหรือปาน กลางมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่สูง การเพิ่มปริมาณมวลรวมในส่วนผสมจะเป็นการเพิ่มกำลัง อัดรวมทั้งใช้หินที่มี โมดูลัสยืดหยุ่นสูงจะทำให้กำลังของคอนกรีตดีขึ้น

## 3. แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมอร์ต๋ากับผิวของมวลรวม

แรงยึดเหนี่ยวนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพ เช่น รูปร่าง ลักษณะผิวของมวลรวม และ ลักษณะทางเคมี คือ ปฏิกริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับแร่ธาตุต่าง ๆ ในเนื้อมวลรวม

นอกจากนี้ทิศทางในการหล่อและการให้น้ำหนักจะมีผลต่อกำลังเช่นกัน โดยจะมีผลต่อ กำลังดึงมากกว่ากำลังอัดด้วยเหตุผลที่ว่า จะเกิดช่องว่างทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลรวมหยาบ กับมอร์ต๋าต่ำลง

### 2.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength)

คุณสมบัติของคอนกรีตที่อยู่ในสภาพเหลวจะมีความสำคัญในขณะก่อสร้างเท่านั้น แต่ คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วจะมีไปตลอดการใช้งานของคอนกรีตนั้น คุณสมบัติที่สำคัญ ของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วซึ่งเป็นตัวนิยามกำหนดในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไปคือ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) เนื่องจากกำลังรับแรงอัดอื่น ๆ เช่น กำลังรับแรงดึง (Tensile Strength) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) มักจะนิยามกำหนดให้เป็นสัดส่วนโดยตรง กับกำลังรับแรงอัด ดังนั้นคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงที่จะมีกำลังรับแรงอื่น ๆ สูงไปด้วย

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตโดยทั่วไปมักจะกำหนดให้ใช้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เป็น ข้อกำหนดในการออกแบบ นั่นคือที่อายุดังกล่าวกำลังรับแรงอัดจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าที่ต้องการ แต่ สำหรับงานคอนกรีตบางประเภทที่กำหนดให้ใช้กำลังรับแรงอัดที่อายุอื่น ๆ เป็นข้อกำหนดในการ ออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตโดยทั่วไปคือ กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) เนื่องจาก กำลังรับแรงอัดอื่น ๆ เช่น การรับแรงดึง (Tensile Strength) กำลังรับแรงดัด (Flexural Strength) มักจะนิยามกำหนดให้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังรับแรงอัด ดังนั้นคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดสูงก็ จะมีกำลังรับแรงอื่น ๆ สูงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วางกรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีต โดยทั่วไปมักจะกำหนดให้ใช้กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน เป็นข้อกำหนดในการออกแบบ นั่นคือที่อายุดังกล่าวกำลังรับแรงอัดจะต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าที่ต้องการ แต่สำหรับงานคอนกรีตบางประเภทที่กำหนดให้กำลังรับแรงอัดอยู่ที่ช่วงอายุต้น ๆ เป็นข้อกำหนดในการออกแบบก็ควรจะใช้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเป็นค่าอ้างอิงก่อนหลังจากนั้นจึงใช้สัมประสิทธิ์ตัวคูณซึ่งหามาจากหลักการของการพัฒนากำลังรับแรงอัดปรับค่ากำลังอัดที่ 28 วันให้เป็นกำลังรับแรงอัดที่อายุตามต้องการ

#### 2.4.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

##### 1. คุณสมบัติของวัสดุผสม

ปูนซีเมนต์เป็นปัจจัยที่สำคัญมากเพราะปูนแต่ละประเภทให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ และแม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกันแต่ถ้าความละเอียดแตกต่างกันแล้วอัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตจะแตกต่างกันไปด้วย

น้ำที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใส และปริมาณของสารเคมีและเกลือแร่ที่ผสมอยู่ในน้ำที่มีเกลือคลอไรด์ผสมอยู่ จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตในระยะต้นสูง น้ำขุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณสารแขวนลอยนั้น

##### 2. การทำคอนกรีต

- การขังตวงผสมหากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการขังตวงโดยน้ำหนักซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงไป

อัตราส่วนผสม จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรงโดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์การผสมคอนกรีตต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เฟสกระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลได้เต็มที่ ดังนั้นการผสมคอนกรีตหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึง จะมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

- การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการอัดแน่น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีตเพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะที่ล้าเลียงหรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัว หากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูโพรงขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าน้อยลงได้ หรือหากทำให้คอนกรีตแน่นตัวที่ไม่เหมาะสมก็สามารถทำให้เกิดการแยกตัวขึ้นในเนื้อคอนกรีตได้ ส่งผลให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ

##### 3. การบ่มคอนกรีต

ความชื้น จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำนั้นจะค่อยเป็นค่อยไป นับตั้งแต่ปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำเป็นซีเมนต์เฟสและซีเมนต์เฟสจะเพิ่มกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ถ้ามีความชื้นอยู่ตลอดเวลา ถ้าซีเมนต์เฟสไม่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความชื้นอยู่คอนกรีตจะไม่มีกำลั้เพิ่มกำลั้อัดอีกต่อไป ในทางปฏิบัติเรามักจะบ่มคอนกรีตจนถึงอายุ 28 วัน ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงทำการบ่มด้วยความชื้นทันที

- อุณหภูมิ ถ้าหากอุณหภูมิในขณะบ่มสูงก็จะทำให้อัตราการเพิ่มกำลั้ของคอนกรีตถูกเพิ่มให้เร็วขึ้นทำให้คอนกรีตมีกำลั้สูงกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า

- เวลาที่ใช้ในการบ่ม ถ้าหากบ่มคอนกรีตให้อยู่ในความชื้นตลอดเวลาได้ยาวนานเท่าใดก็จะยิ่งได้กำลั้ของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

4. การทดสอบ

- ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ การใช้แท่งทดสอบที่ขนาดและลักษณะต่างกันมีผลทำให้กำลั้ของคอนกรีตเกิดความแตกต่าง

- ความชื้นในแท่งทดสอบ ในขณะที่จะทำการทดสอบถ้าหากแท่งทดสอบมีความชื้นก็จะทำให้ค่ากำลั้ที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้งกว่า

- อัตราการกดในการทดสอบกำลั้อัดถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้อัตราการกดสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

5. ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมไว้ในวัสดุประกอบ (CaO)

- ปัจจัยที่มีผลต่อกำลั้รับแรงอัดที่ถูกนำมาพิจารณาได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน แคลเซียมออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญมีอยู่ในสารเกิดปฏิกิริยาสำคัญ 4 ตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั่นคือ C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A และ C<sub>4</sub>AF

2.4.1.2 วิธีการทดสอบกำลั้รับแรงอัด (ASTM : C109-92)

1. วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะรับแรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสแบบหล่อ

2. เช็ดผิวหน้าทั้งสองด้าน

3. ใช้แรงกดทับแท่งตัวอย่าง โดยผิวหน้าของเครื่องมือทั้งสองด้านที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่าง

จะต้องเรียบและตัวอย่างจะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่องจนก่อนคอนกรีตเกิดความเสียหาย และค่ากำลั้รับแรงอัดที่ได้ของระยะเวลาที่บ่มต่างกัน เภณฑ์มาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 กำหนดคือมีค่ากำลั้รับแรงอัดไม่ต่ำกว่า 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

4. บันทึกค่าสูงสุด

5. การคำนวณ

1. วิธีการคำนวณค่ากำลั้รับแรงอัด

วิธีการคำนวณ

ค่ากำลั้รับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีต

$$F_c = P/A$$

เมื่อ

$$F_c = \text{กำลั้รับแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีต (กก/ตร.ซม)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \text{แรงอัด (กก.)}$$

$$A = \text{พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตร.ซม.)}$$

## 2. วิธีการคำนวณค่าความหนาแน่น

วิธีการคำนวณ

ค่าความหนาแน่นของแท่งคอนกรีต

$$D = M/V$$

เมื่อ

$$D = \text{ค่าความหนาแน่นของแท่งคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)}$$

$$M = \text{น้ำหนักของแท่งคอนกรีต (กก.)}$$

$$V = \text{ปริมาตรของแท่งคอนกรีต (ลบ.ม.)}$$

### 2.4.2 การทดสอบการชะละลาย (Leaching test)

การทดสอบการชะละลายแบ่งออกได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์คุณภาพของสารที่ต้องทดสอบ โดยใช้ปริมาณตัวอย่างสารวิธีการเตรียมสารตัวอย่างและเครื่องมือที่แตกต่างกัน

ในอดีตการทดสอบการชะละลายของสารนิยมใช้ทั้งวิธี Batch tests และ Column tests ปัจจุบันการออกแบบเครื่องมือ Batch tests จะใช้ทดสอบการชะละลายของเสียก่อนที่จะนำไปกำจัด โดยการฝังกลบ U.S.EPA (1988) ได้กำหนดวิธี Toxicant Extraction Procedure (TEP) เป็นวิธีที่ใช้บังคับต่อมาได้มีการพัฒนาและปรับปรุงเป็นวิธีการเป็นวิธี Extraction Procedure (EP) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

### 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดของเสีย โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ดังนี้

Shively และคณะ (1986) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับโลหะ 4 ชนิด คือ อาร์เซนิก แคดเมียม โครเมียม และตะกั่ว โดยการทำให้เป็นก้อนจากนั้นจึงทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด (compressive Strength) และการชะละลาย (Leaching tests) ของโลหะหนักแต่ละชนิดและโลหะหนักผสมทั้ง 4 ชนิดผสมกันจากนั้นทำการทดสอบกำลังแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 14 วันพบว่าเมื่อใช้อาร์เซนิกและแคดเมียมในการกำจัดด้วยการทำให้เป็นก้อน จะทำให้กำลังแรงอัดของแท่งซีเมนต์ลดลงทั้งกรณีที่ใช้ค่าอัตราส่วนผสมน้ำต่อซีเมนต์ (W/C) เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ของเสียผสมจะลดกำลังแรงอัดเฉพาะค่า W/C 0.5 ส่วนโครเมียม และตะกั่วจะไม่ผลต่อกำลังรับแรงอัด สำหรับค่าความสามารถในการถูกชะละลายของโลหะหนักแต่ละชนิดและโลหะหนักทั้ง 4 ชนิดผสม พบว่าความเข้มข้นของน้ำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกัดโลหะหนักอยู่เกณฑ์มาตรฐานของ U.S.EPA ทั้งกรณีที่ใช้ W/C 0.5 และ 1.0 โดยค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่ม W/C จาก 0.5 เป็น 1.0

Shin และคณะ (1988) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการกำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมชุบโลหะ โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ อัตราส่วนของทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณของเสียและปริมาณตัวตกตะกอน (Precipitator) พบว่าการชะละลายของโครเมียมและสังกะสีจะลดลง เมื่อลดค่าอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และเพิ่มปริมาณของตัวตกตะกอน สำหรับค่ากำลังแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มตัว 14 วันจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดค่าอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณของเสียที่กำจัดและทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี Anova Analysis พบว่าอัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์จะมีผลในการถูกชะละลายของโครเมียม สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์จะมีผลต่อความสามารถถูกชะละลายของสังกะสี และค่ากำลังแรงอัดของแท่งซีเมนต์ ส่วนการวิเคราะห์โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าใช้จ่าย ค่าความสามารถในการถูกชะละลายของโครเมียมและสังกะสีที่ต่ำกว่ามาตรฐานมาตรฐานของ U.S.EPA ซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 5 ppm ของโครเมียมและสังกะสี และค่ากำลังอัดของซีเมนต์แท่งที่สูงกว่า 10 กก./ตร.ซม. จะได้อัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับกำจัดตกตะกอนแห้ง 30 กรัม นั่นคือ อัตราส่วนผสมของทรายต่อปูนซีเมนต์ น้ำต่อปูนซีเมนต์ และปริมาณตัวตกตะกอนเท่ากับ 1, 1.5 และ 1.075 กรัมตามลำดับ

พัทธยศ และโกลิน (2542) ได้ทำการศึกษากำจัดโลหะหนัก 4 ชนิด ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ โลหะหนักนิกเกิล สังกะสี ตะกั่ว และแคดเมียม โดยกระบวนการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้โลหะหนักในเตรทผสมทั้ง 4 ชนิด ต่อวัสดุประสานที่สัดส่วน 0.25 และ 0.5 ทำการบ่มซีเมนต์เป็นระยะเวลา 7 วัน และจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโลหะหนักในซีเมนต์ก้อน พบว่าที่สัดส่วนของโลหะหนักในเตรทเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 0.5 ทำให้การบ่มซีเมนต์ที่ระยะเวลา 7 วัน กำลังแรงอัดจะลดลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มจาก 7 วัน เป็น 28 วันกำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย โดยกำลังแรงอัดของก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักทั้งหมดมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน (ช่วง 17 – 158 กก./ตร.ซม)

เมื่อทำการศึกษาสมบัติการชะละลาย (กนกพร และอรรถวิทย์, 2542) พบว่าค่าการชะละลายของโลหะหนักในก้อนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักในเตรทสูงขึ้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของโลหะหนักในเตรท และค่าการชะละลายของโลหะหนักในเตรทลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มเวลาบ่มจาก 7 วัน เป็น 28 วัน โดยค่าการชะละลายของโลหะหนักของโลหะหนักทุกชนิดทุกตัวอยู่ในมาตรฐานกรมโรงงานอุตสาหกรรม ยกเว้น  $Zn(NO_3)$  ที่สัดส่วน W/C 0.5 เวลาบ่ม 7 วันมีค่าใกล้เคียงค่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้ของเสียเป็นโลหะหนักผสมหลายชนิด เพื่อให้แน่ใจว่าโลหะหนักทุกชนิดของน้ำชะในก้อนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน จึงเลือกใช้ W/C 0.25 โดยใช้เวลาบ่ม 7 วัน ในการทดลองนี้ของเสียเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์

Leangon (1993) ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการทำให้เป็นก้อนของกากตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง และกากตะกอนจากโรงงานเซรามิกคอนคักเตอร์ และใช้วัสดุประสาน 5 ชนิดที่นำมาใช้ทดลอง ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เถ้าแกลบ เถ้าลอย ลิกไนต์ และซิลิฟลูม จากการทดสอบกระบวนการทำให้เป็นก้อนโดยใช้วัสดุประสานผสมกันในอัตราส่วนต่าง ๆ ศึกษาคุณสมบัติของก้อนของเสียแข็งตัว อาทิ กำลังรับแรงอัด การชะละลายและค่าใช้จ่ายในการกำจัด พบว่าวัสดุประสานที่เหมาะสมสำหรับการกำจัดกากตะกอนมีดังนี้

ปูนซีเมนต์ : เถ้าจากแกลบ : เถ้าลอยลิกไนต์

- |  |     |   |     |   |     |
|--|-----|---|-----|---|-----|
| 1. กากตะกอนจากโรงงานฟอกหนัง            | 0.7 | : | 0.2 | : | 0.1 |
| 2. กากตะกอนจากโรงงานเซรามิกคอนคักเตอร์ | 0.7 | : | 0.1 | : | 0.2 |

Rajan K.และคณะ (1995) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนของของเสียโลหะหนักโดยใช้เถ้าลอย โดยการหาระยะเวลาบ่ม กำลังรับแรงอัด (compressive strength) ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะ โดยการทดลองผสมโลหะไนเตรทคือ  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Ba^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  และ As (v) ไม่ใช่ไนเตรด เถ้าลอยมีปริมาณมากในอุตสาหกรรม และมีราคาที่ถูกเหมาะที่จะผสมไปในซีเมนต์เพื่อการทำลายฤทธิ์ของโลหะหนัก พบว่า ความเป็นด่างของของเสียนี้สามารถยึดโลหะหนักที่เป็นพิษไว้ในโครงสร้างได้ การชะละลายของโลหะหนักมีค่าต่ำเนื่องจากมี  $CaO$  และ  $CaSO_4$  ในปริมาณที่สูง เมื่อพีเอชที่สูงสามารถทำลายฤทธิ์ของโลหะหนักได้ โดยการฟอร์มตัวเป็น คาร์บอเนต, ซัลเฟต, ออกไซด์, หรือสารประกอบไฮดรอกไซด์

Chong Yoon Rha และคณะ (1999) ทำการวิจัยเกี่ยวกับของโครเมียมไอออน และเลดไอออนต่อความคงตัวและความแข็งของ slag paste ระหว่างกระบวนการปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็งโดยการศึกษากิจกรรมของโครเมียมไอออนและเลดไอออนต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของ slag paste โดยใช้  $Na_2SiO_3$  5% ของ โลหะใช้เป็นตัวกระตุ้นสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ โลหะหาความคงตัวของ paste ที่แข็งตัวที่มีการใช้เถ้าลอยและยับยั้งแทนซีเมนต์ด้วย โดยหากำลังรับแรงอัด (compressive strength) และการชะละลาย (Leaching tests) พบว่า เลดไอออนจะหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ยับยั้งจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและทำให้เลดไอออนถูกชะออกมอลดลง ส่วนโครเมียมไอออนเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน และทำให้เกิด aluminate hydrates ต่อมาคือปฏิกิริยาไฮเดรชันไฮเดรชันลดลง โดยที่สูญเสียไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) ไปเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโครเมียม จึงทำให้ความเป็นด่างลดลง ซึ่งการปรับเสถียรของโครเมียมไอออนส่วนใหญ่จะเข้าไปแทนที่อยู่ในโครงสร้างผลึกของแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 อุปกรณ์

1. เครื่องเหล็ก
2. แท่งกระทุ้ง (Tamper)
3. ถูมมือยาง
4. กระดาษกรองใยแก้วเบอร์ 42
5. กระดาษกรองขนาดรูลุน 0.45 ไมโครเมตร
6. แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม.
7. เครื่องวัดพีเอช
8. เครื่องชั่ง สามารถอ่านค่าได้ละเอียด 0.1 กรัม
9. เครื่องผสม
10. เครื่องกรองสุญญากาศ
11. เครื่องปั่นเหวี่ยง (rotary agitation device)
12. เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine) ยี่ห้อ Controls Microprocessor Digital System
13. เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ บริษัท Shimudzu รุ่น AA-680
14. เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

##### 3.1.2 สารเคมี

1. สารละลายกรดอะซิติกเข้มข้น (glacial  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) เกรดวิเคราะห์
2. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น (conc.  $\text{HNO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์
3. สารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 1 นอร์มอล (1 N  $\text{HNO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์
4. กรดไฮโดรคลอริก(1+1 HCl)
5. สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์
6. สารละลายมาตรฐานคอปเปอร์
7. สารละลายมาตรฐานเหล็ก
8. สารละลายมาตรฐานนิกเกิล
9. สารละลายมาตรฐานแมงกานีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. สารละลายมาตรฐานตะกั่ว
11. สารละลายมาตรฐานสังกะสี
12. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์
13. กรดซัลฟิวริก( $H_2SO_4$ )
14. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (OPC)
15. น้ำกลั่น

### 3.2 ที่มาและลักษณะของตะกอน

#### 3.2.1 ที่มาของตะกอนของเสีย

ตะกอนเคมีได้มาจากการทำการทดลองจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์และห้องปฏิบัติการตีพิมพ์วิทยาศาสตร์ซึ่งตะกอนต่างๆ จะมาจากการทำการทดลองในปฏิบัติการต่างๆ หลังจากทำการทดลองเสร็จสิ้นแล้วก็เกิดของเสียขึ้นซึ่งจะทำให้ผู้ที่ทำการทดลองทั้งตามเกลลอนที่ทางห้องปฏิบัติการได้ทำการจัดเตรียมไว้ให้ซึ่งแต่ละเกลลอนก็จะมีของเสียที่แตกต่างกันออกไปดังนี้

- 1) ตะกอนจากตัวอย่างที่ 1 ตัวอย่างคือ Anal 1 lab6

ที่มาจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์และในเกลลอนที่ 31 ซึ่งมาจากการปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1 การทดลองที่ 6 เรื่องการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็ก (II) และเหล็ก (III) โดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยของเสียที่เกิดขึ้นในการทำการทดลองครั้งนี้คือ Mn และ Fe

- 2) ตะกอนจากตัวอย่างที่ 2 ตัวอย่างคือ Anal 1 lab 10

ที่มาจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์และจากเกลลอนที่34และ35 ซึ่งจากการปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1 การทดลองที่ 10 เรื่องการหาปริมาณนิกเกิลโดยวิธีตกตะกอน โดยของเสียที่เกิดขึ้นในการทำการทดลองนี้คือ Ni, Dimethylglyoxime (DMG), Citric acid

- 3) ตะกอนจากตัวอย่างที่ 3 ตัวอย่างคือ Anal 1 Lab4 (2546)

ที่มาจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์และจากเกลลอนที่ 27 ซึ่งมาจากการปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1 ของปีการศึกษา 2546 การทดลองที่ 4 เรื่อง การหาปริมาณคลอไรด์โดยการไทเทรตแบบตกตะกอนซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองนี้คือ  $AgCrO_4$ ,  $AgCrO_7$  และ Nitrobenzene

- 4) ตะกอนจากตัวอย่างที่ 4 ตัวอย่างคือ Anal 1 lab 4 (2547)

ที่มาจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์และจากเกลลอนที่ 36 ซึ่งมาจากการปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1 ของปีการศึกษา 2547 การทดลองที่ 4 เรื่อง การหาปริมาณคลอไรด์โดยการไทเทรตแบบตกตะกอนซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองนี้คือ  $AgCrO_4$  และ  $AgCrO_7$

- 5) ตะกอนจากตัวอย่างที่ 5 ตัวอย่างคือ S<sub>2</sub>32-33

ที่มาจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์พระเทพจากแคลลอนที่ 32 และ 33 ซึ่งมาจากการปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1 การทดลองที่ 8 เรื่องการหาปริมาณของตะกั่วโดยการไทเทรตปฏิกิริยารีดอกซ์ซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองนี้คือ  $\text{Cr}^{3+}, \text{Pb}^{2+}$

6) ตะกอนจากตัวอย่างที่ 6 ตัวย้อยคือ Mn

ที่มาจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์วิทยาศาสตร์ การปฏิบัติการเคมีเครื่องมือวิเคราะห์ 1 การทดลองที่ 3 เรื่องการหาปริมาณแมงกานีส เข็ม แกน กานีส และสังกะสีในสารละลาย โดยใช้ไอออนฟลูออไรด์เป็นสารกำบังซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองนี้คือ แมงกานีส(Mn) และสังกะสี (Zn)

7) ตะกอนจากตัวอย่างที่ 7 ตัวย้อยคือ Cu

ที่มาจากห้องปฏิบัติการตีพิมพ์วิทยาศาสตร์ การปฏิบัติการเคมีเครื่องมือวิเคราะห์ 1 การทดลองที่ 5 เรื่องการหาปริมาณทองแดง โดยวิธีไอโอโดเมทรีซึ่งของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลองนี้คือ ทองแดง (Cu)

### 3.2.2 การเตรียมตะกอนเคมี

การเตรียมตะกอนเคมีเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียที่ได้จากห้องทดลองทางเคมี หลักในการทำเติมสารละลาย NaOH เพื่อทำการปรับค่า pH ให้มีค่าน้อยกว่า 7 เกิดเป็นเกลือของโลหะหนักมีค่าการละลายต่ำและเกิดแยกตัวออกจากน้ำเสีย

วิธีการทดลอง

1. เติสารละลายที่ได้จากห้องทดลองทางเคมีลงในภาชนะที่เตรียมไว้เพื่อทำการตากตะกอนเคมี ทำการล้างภาชนะที่ใส่สารละลายด้วยน้ำกลั่นซ้ำ 2-3 ครั้ง
2. ทำการวัดค่า pH ของสารละลาย ถ้าสารละลายมีค่า  $\text{pH} < 7$  ให้ทำการเติมสารละลาย NaOH เพื่อทำการปรับค่า pH ให้มีค่า  $\text{pH} \geq 7$
3. นำสารละลายหลังจากทำการปรับค่า pH แล้วไปทำการตากจนแห้ง เกิดเป็นเกลือของโลหะหนัก จากนั้นทำการบันทึกลักษณะทางกายภาพ และลักษณะของตะกอน

### 3.2.3 การศึกษาสมบัติของตะกอนเคมี

1) การวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ความชื้น

วิธีการทดลอง

1. ทำการชั่งน้ำหนักของขามระเหย หลังจากนั้นใส่ตะกอนเคมี 1 กรัม แล้วนำไปทำการชั่งน้ำหนักของขามระเหยและตะกอนเคมี
2. นำไปทำการอบที่อุณหภูมิ  $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$  ทิ้งให้เย็นในเคซิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำตะกอนเคมีและขามระเหยที่ได้หลังจากอบไปทำการชั่งน้ำหนักนำค่าที่ได้ไปทำการคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น

## 2) การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในตะกอนเคมี

### วิธีการทดลอง

1. ชั่งตะกอนเคมีหนัก 1 กรัมใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตรทำการละลายด้วยน้ำกลั่น 100 ml
2. เติมกรดไนตริก(conc.HNO<sub>3</sub>) 1.5 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปทำการระเหยบน hot plate จนได้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร
3. ตั้งทิ้งไว้จนเย็นแล้วเติมกรดไนตริก (conc.HNO<sub>3</sub>) 2.5 มิลลิลิตร จากนั้นทำการปิดด้วยกระดาษฟิวส์แล้วไปทำการระเหยบน hot plate จนเหลือปริมาตร 5 มิลลิลิตร
4. ตั้งทิ้งไว้จนเย็นแล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก (1+1) 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร นำไปให้ความร้อนบน hot plate นาน 15 นาที จากนั้นนำสารละลายที่ได้ มาทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร
5. นำไปทำการวัดค่าความเข้มข้นด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

### 3.2.4 คุณสมบัติของตะกอนของเสีย

การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นได้จากการนำตะกอนของเสียที่อุณหภูมิ 103 -105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักตะกอนไม่เปลี่ยนแปลงผลแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความเปอร์เซ็นต์ความชื้น

ตัวอย่างที่	แหล่งที่มา	เปอร์เซ็นต์ความชื้น
1	Anal 1 Lab6	11.13%
2	Anal 1 Lab10	14.62%
3	Anal 1 Lab4(2546)	26.78%
4	Anal 1 Lab4(2547)	17.80%
5	Anal 1 Lab8	16.68%
6	ตึกวิทยาศาสตร์	31.30%
7	ตึกวิทยาศาสตร์	22.55%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักในตะกอนของเสีย

ตัวอย่าง ที่	ที่มาของตะกอน	โลหะหนัก	ปริมาณโลหะหนักในตะกอนของเสีย(mg)			
			อัตราส่วนของตะกอน			
			0(blank)	0.05	.01	0.15
	Anal 1 Lab6	Fe	0	0.0064	0.0128	0.0191
	Anal 1 Lab10	Ni	0	0.1261	0.2521	0.3782
	Anal 1 Lab4(2546)	Cr	0	0.5994	1.1987	1.7981
		Ag	0	0.0133	0.0264	0.0399
	Anal 1 Lab4(2547)	Cr	0	0.5225	1.0452	1.5678
		Pb	0	0.0017	0.0034	0.0052
	Anal 1 Lab8	Cr	0	0.5225	1.0452	1.5678
	ศึกษาศาสตร์	Mn	0	0.0053	0.0106	0.0159
	ศึกษาศาสตร์	Cu	0	0.0749	0.1496	0.2246

### 3.3 การปรับเสถียรโลหะหนักโดยการทำเป็นก้อนซีเมนต์

เป็นการนำตะกอนโลหะหนักที่ได้จากการบำบัดมาทำการปรับเสถียร โดยทำการผสมกับวัสดุประสาน น้ำ ปูนซีเมนต์ โดยอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อตะกอนโลหะหนักเป็นปูน : ทราช : น้ำ : ตะกอนของเสีย 1 : 2.75 : 0.5 : 0.05, 1 : 2.75 : 0.5 : 0.10, 1 : 2.75 : 0.5 : 0.15, 1 : 2.75 : 0.5 : 0.25 และ 1 : 2.75 : 0.5 : 0.5 ซึ่งอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อตะกอนจากนั้นนำไปทำการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วัน

#### วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักตะกอน ทราช ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนที่ต้องการ โดยใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อปริมาณตะกอนเคมีเป็น ปูน : ทราช : น้ำ : ตะกอนของเสีย 1 : 2.75 : 0.5 : 0.05, 1 : 2.75 : 0.5 : 0.10, 1 : 2.75 : 0.5 : 0.15, 1 : 2.75 : 0.5 : 0.25 และ 1 : 2.75 : 0.5 : 0.5
2. ทำการผสมวัสดุต่างๆ ด้วยเครื่องผสมปูนซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนต่างๆ ดังข้อ 1 ใช้เวลาในการกวนผสมนาน 30 วินาที เมื่อทำการผสมเข้ากันดีแล้วทำการเติมน้ำเป็นตัวผสมของปริมาตรทั้งหมด
3. เมื่อคอนกรีตมีความหนืดพอเหมาะแล้วนำมาเทลงในแบบหล่อขนาด 5\*5\*5 cm<sup>3</sup> การหล่อคอนกรีตแบ่งเป็น 2 ชั้น โดยมีความหนาชั้นละประมาณ 2.5 เซนติเมตรในการทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหล่อในชั้นที่ 1 เมื่อเทคอนกรีตได้ในความสูงที่กำหนดเสร็จแล้วทำการกระทุ้ง 25 ครั้ง ด้วยแท่งเหล็กกระทุ้งเพื่อให้ซีเมนต์ที่ได้ไม่เกิดฟองอากาศ

4. ในชั้นที่สองทำด้วยวิธีเดียวกันกับในชั้นที่หนึ่งและทำการกระทุ้งอีกรอบ
5. ทำการปาดหน้าคอนกรีตด้วยเกรียงให้เรียบ แล้วใช้พลาสติกห่อทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงเมื่อแห้งก็จะได้ก้อนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองจากนั้นทำการระบุรายละเอียดเกี่ยวกับตัวอย่างก้อนซีเมนต์
6. นำก้อนซีเมนต์ไปบ่มต่อจนครบระยะบ่ม 7 วัน โดยนำก้อนซีเมนต์ที่ได้ใส่ถุงพลาสติกไว้และก่อนที่จะบ่มได้ตามที่เรารต้องการแล้วให้ทำการเปิดถุงพลาสติกก่อนจะนำไปทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด 1 วันเพื่อให้ก้อนซีเมนต์แห้งสนิท
7. นำก้อนซีเมนต์ไปชั่ง วัดพื้นที่หน้าตัดเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่น
8. นำก้อนซีเมนต์ที่ได้ไปทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดและการชะละลายต่อไป

### 3.4 ทดสอบกำลังรับแรงอัดคอนกรีต (ASTM : C109-92)

นำก้อนคอนกรีตหลังจากทำการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วันมาทำการทดสอบการรับแรงอัดเพื่อดูความแข็งแรงของก้อนซีเมนต์

#### วิธีการทดสอบ

1. นำก้อนซีเมนต์ที่จะทำการทดสอบชั่งน้ำหนักเพื่อทำการคำนวณหาค่าความหนาแน่น โดยนำน้ำหนักที่ได้หารด้วยปริมาตรของก้อนซีเมนต์ตัวอย่าง พื้นที่หน้าตัดด้านที่สัมผัสกับเครื่องชั่งอย่างละเอียด
2. ทำความสะอาดพื้นผิวของแท่งกดของเครื่องทดสอบ
3. วางก้อนซีเมนต์ตัวอย่าง โดยวางให้อยู่แนวศูนย์กลางของแท่งกดแท่งบนและแท่งกดแท่งล่าง
4. ทำการเดินเครื่องทดสอบ โดยเพิ่มแรงกดอย่างสม่ำเสมอ
5. ทำการกดจนแท่งคอนกรีตแตก ทำการบันทึกค่าแรงสูงสุด



รูปที่ 3.1 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compression testing Machine)

### 3.5 การทดสอบการชะละลาย

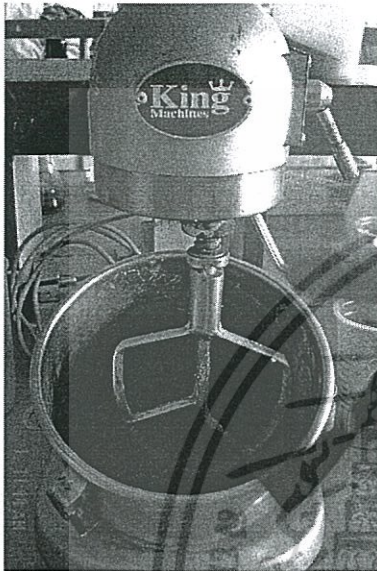
นำก้อนซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดแล้วมาทำการทดสอบทางเคมี คือการชะละลายด้วยวิธีมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ทำโดยใช้กรดกำมะถันและกรดไนตริก เป็นตัวสกัดโลหะหนักโดยทำการสกัดทิ้งไว้ 18 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก โดยใช้วิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy)

#### วิธีการทดสอบ

1. นำตัวอย่างก้อนซีเมนต์ที่ผ่านการทดสอบกำลังรับแรงอัดมาทำการทุบให้ละเอียดแล้วนำมาทำการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 9.5 มิลลิเมตร
2. เตรียมน้ำสกัด (Leachant) โดยใช้สารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในอัตราส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) ผสมกับน้ำกลั่นจนมีค่า pH ของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของผสมให้เป็น 2,000 มิลลิลิตร
3. นำตัวอย่างจากข้อ 1 มา 10 กรัม เติมน้ำสกัดที่เตรียมจากข้อ 2 200 มิลลิลิตร
4. เขย่าด้วยเครื่องแบบหมุน ที่อัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 28 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

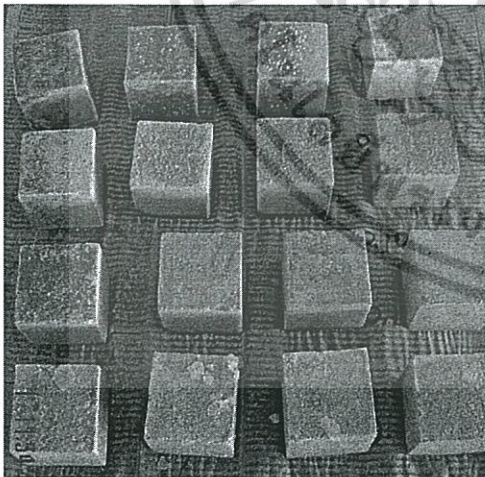
5. กรองสารละลายที่ได้จากการสกัด (Leachant) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วขนาด 0.45 ไมครอน นำของเหลวที่กรองได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรสโกปี (Atomic Absorption Spectroscopy) (มาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (2540))



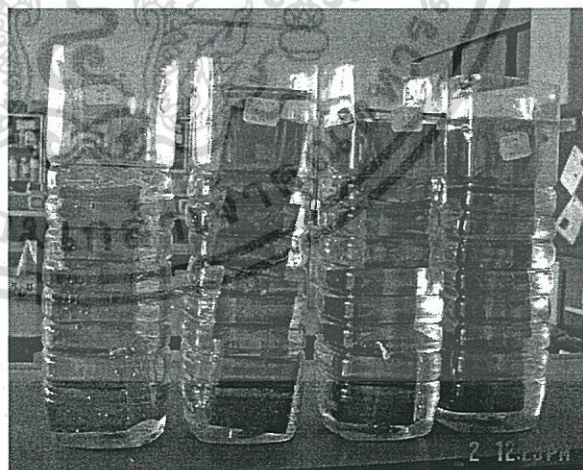
รูปที่ 3.2 เครื่องผสม



รูปที่ 3.3 แบบหล่อตัวอย่าง ขนาด 5 x 5 x 5 ลบ.ซม.



รูปที่ 3.4 ก้อนซีเมนต์หลังจากถอดแบบหล่อ



รูปที่ 3.5 การบ่มก้อนมอร์ตาร์ซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองวิจารณ์ผล

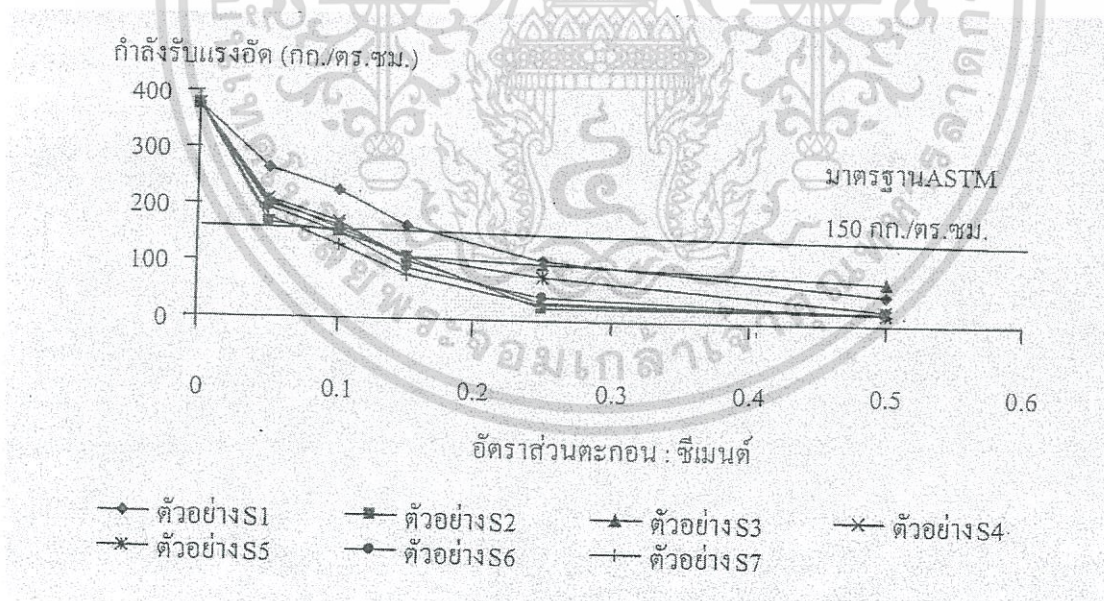
การทดลองนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการปรับเสถียรตะกอนของเสียจากห้องปฏิบัติการเคมีโดยการทำให้เป็นก้อนซีเมนต์ โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติการชะละลายเพื่อหาอัตราส่วนตะกอนของเสียต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์

#### 4.1 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของก้อนซีเมนต์

##### 4.1.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของตะกอนต่อกำลังรับแรงอัด

จากการทดลองเตรียมก้อนซีเมนต์โดยนำตะกอนของเสียทั้ง 7 ตัวอย่างที่ได้จากการตกตะกอนโลหะหนักด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำแต่ละตัวอย่างมาทำการแปรค่าอัตราส่วนตะกอนของเสียต่อซีเมนต์ 0.05, 0.1, 0.15, 0.25 และ 0.5 โดยให้อัตราส่วนของทรายและน้ำคงที่ จากนั้นทำการผสมและทำการบ่มเป็นระยะเวลา 7 วันก่อนนำตัวอย่างก้อนซีเมนต์ที่ได้ไปทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก.)

กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)



รูปที่ 4.1 ผลของอัตราส่วนของตะกอนของเสียที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด

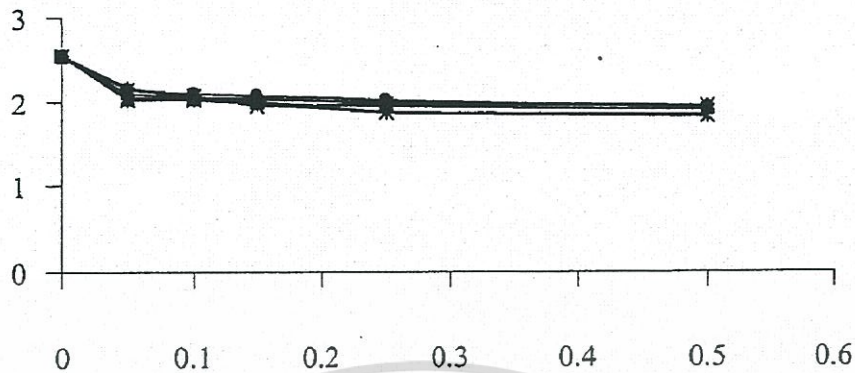
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่า ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ของก้อนซีเมนต์ มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของตะกอนที่เพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนของตะกอนต่อซีเมนต์ 0.05, 0.1, 0.15, 0.25 และ 0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยทั้ง 7 ตัวอย่างอยู่ในช่วง  $202.23 \pm 31.05$ ,  $164.12 \pm 29.78$ ,  $109.03 \pm 28.08$ ,  $58.73 \pm 35.77$  และ  $32.81 \pm 21.29$  กก./ตร.ซม. ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนของเสียเป็นผลึกโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโลหะไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเปราะ และสามารถดูดความชื้นได้ดี และสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในแต่ละการทดลองรวมตัวอยู่กับตะกอนของเสียที่นำมาทำการปรับเสถียร เมื่อนำมาทำการปรับเสถียร ทำให้มีผลึกของโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดขึ้นในก้อนซีเมนต์ และบริเวณโดยรอบ ซึ่งจะขัดขวางการยึดจับของซีเมนต์ทดสอบกับวัสดุประสานที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดทราย (วินิต, 2525) และทำให้ก้อนซีเมนต์ที่เกิดขึ้นมีความสามารถในการดูดความชื้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดลดลง เมื่อทำการเทียบกับมาตรฐานกำลังรับแรงอัดของก้อนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับการก่อสร้าง (ASTM:C109-92(ตาราง ข.) ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน เท่ากับ 150 กก./ตร.ซม. พบว่าที่อัตราส่วนที่ 0.1 และ 0.05 มีความสามารถในการรับแรงอัดเกินกว่ามาตรฐานสามารถนำไปใช้ฝังกลบของเสียอันตราย ยกเว้นตัวอย่างที่ 7 ที่อัตราส่วน 0.1 ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัด 128.01 กก./ตร.ซม. มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเนื่องมาจากการปรับค่า pH ของเสียด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณที่สูงมากกว่าตัวอย่างอื่น เมื่อทำการระเหยน้ำออกทำให้เกิดผลึกของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีลักษณะใส และดูดความชื้นได้ดี ปนอยู่มากในตะกอนตัวอย่างและทำให้ก้อนซีเมนต์ขึ้นไม่แห้งส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง เมื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (2540) ซึ่งกำหนดมาตรฐานของซีเมนต์จากของเสียเท่ากับ 3.5 กก./ตร.ซม. พบว่าก้อนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วนของตะกอน 0.05- 0.5 มีค่ากำลังรับแรงอัดเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนด

#### 4.1.2 การศึกษาผลของอัตราส่วนของตะกอนของเสียต่อความหนาแน่น

จากการทดลองพบว่าตะกอนของเสียทั้ง 7 ตัวอย่างเมื่อทำการศึกษาความสามารถในการปรับเสถียรที่อัตราส่วนของตะกอนของเสีย 0.05, 0.1, 0.15, 0.25 และ 0.5 ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์มีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยโดยเฉลี่ยทั้ง 7 ตัวอย่าง  $2.10 \pm 0.06$ ,  $2.04 \pm 0.03$ ,  $1.99 \pm 0.04$ ,  $1.94 \pm 0.06$  และ  $1.90 \pm 0.05$  ตัน/ลบ.ม. ตามลำดับตามอัตราส่วนตะกอนของเสียที่เพิ่มสูงขึ้น ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.2 (ดูรายละเอียดในภาคผนวก ก)

ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)



อัตราส่วนตะกอน : ซีเมนต์

◆ ตัวอย่าง S1    ■ ตัวอย่าง S2    ▲ ตัวอย่าง S3    ✕ ตัวอย่าง S4  
 \* ตัวอย่าง S5    ● ตัวอย่าง S6    + ตัวอย่าง S7

รูปที่ 4.2 ผลของอัตราส่วนของตะกอนของเสียที่มีผลต่อความหนาแน่น

การลดลงของค่าความหนาแน่นเป็นผลเนื่องจากในระหว่างเกิดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันน้ำที่ใช้ในการละลายตะกอนจะถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา ดังสมการ 4.1 -4.3

ไตรแคลเซียมซิลิเกต



ไดไตรแคลเซียมซิลิเกต



ไตรแคลเซียมอลูมินา (C<sub>3</sub>A)



เป็นผลที่ทำให้เกิดเกลือที่มีความหนาแน่นต่ำเกาะตัวกันอย่างหลวมๆ อยู่ในก้อนซีเมนต์ ซึ่งเกลือที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการเกาะตัวของซีเมนต์เฟสที่ที่เกิดขึ้น และจะเข้ายึดเกาะกับเม็ดทราย ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์มีค่าลดลง

#### 4.2 การศึกษาสมบัติการชะละลาย

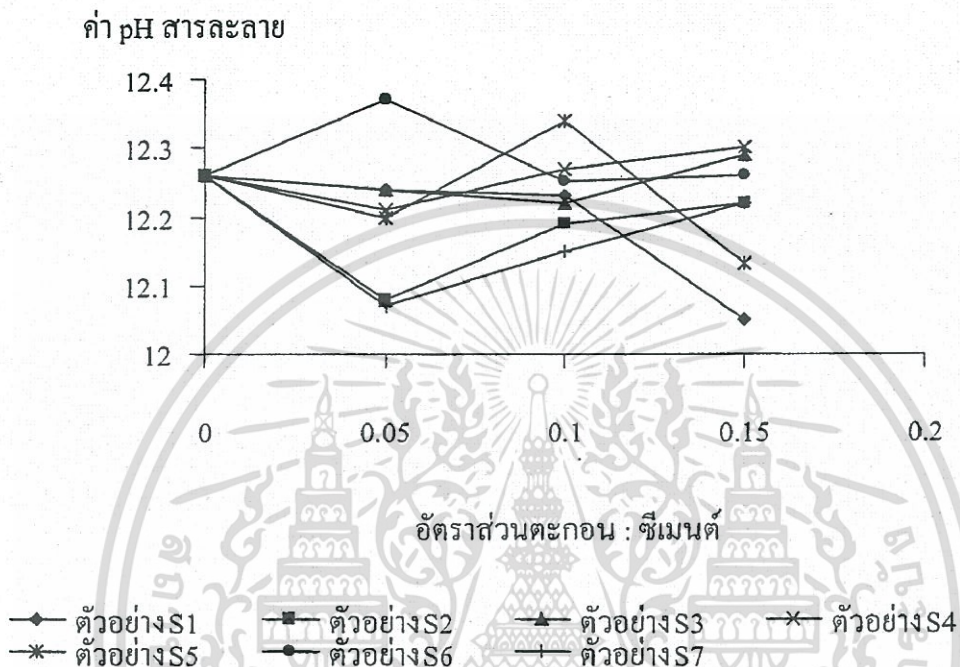
จากการศึกษาการชะละลายตะกอนโลหะหนักจากห้องปฏิบัติการเคมีที่ผ่านการปรับเสถียรด้วยซีเมนต์ โดยใช้สัดส่วนของปูน : ทราย : น้ำ คงที่เป็น 1:2.75:0.5 ตามลำดับ และทำการแปลค่า

สัดส่วนของตะกอนเป็น 0.05, 0.1, 0.15, 0.25 และ 0.5 ได้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การศึกษาผลของอัตราส่วนของตะกอนต่อค่า pH น้ำชะละลาย

กรดกำมะถัน และกรดไนตริกในอัตราส่วน 80:20 โดยน้ำหนักทำการปรับค่า pH เริ่มของน้ำชะละลายเท่ากับ 5 นำสารละลายที่ได้ไปทำการทดสอบการชะละลายก้อนซีเมนต์ที่ผ่านการปรับเสถียรที่อัตราส่วนตะกอนของเสีย 0.05, 0.1 และ 0.1 เป็นเวลา  $18 \pm 2$  ชั่วโมง ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3 (ดูรายละเอียดในตาราง ภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนของตะกอนต่อค่า pH น้ำชะละลาย

จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนตะกอนของเสียแต่ละชนิดไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH หลังการชะละลาย แต่มีการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำชะละลายเริ่มต้นจาก 5 เปลี่ยนไปเป็น 12 เนื่องจากในขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ขึ้นในก้อนซีเมนต์กรดจะค่อยๆ ชะละลายแคลเซียมไฮดรอกไซด์ออกมาส่งผลทำให้ความเป็นกรดของน้ำชะละลายลดลงและค่า pH เพิ่มขึ้น

#### 4.2.2 การศึกษาความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย

เมื่อนำก้อนซีเมนต์ที่ผ่านการปรับเสถียรมีส่วนผสมตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 มาทำการศึกษาปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6(2540)

จากการทดลองพบว่าไม่มีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักของตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดลองและทุกอัตราส่วนมีค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลายเกินกว่าค่ามาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6(ภาคผนวก ง.) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย

ตัวอย่าง	โลหะหนัก	ความเข้มข้นของตะกอนโลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำชะละลาย(ppm)			
			อัตราส่วนของตะกอน			
			0	0.05	0.1	0.15
1	Fe	1.0453	0	0.0501	0.1001	0.1601
2	Ni	22.0543	0	0.0868	0.1909	0.4601
3	Cr	88.2266	0	0.2084	0.3219	0.4932
	Ag	2.0517	0	0.5031	1.5444	1.7595
4	Cr	5.4730	0	0.1365	0.2364	0.3697
	Pb	1.6337	0	0.2842	0.5142	0.9104
5	Cr	88.8177	0	0.9848	3.1723	4.1572
	Pb	0.2930	0	0.1709	0.3419	0.4701
6	Mn	0.7277	0	0.0935	0.1914	0.2759
7	Cu	11.7537	0	0.0113	0.0170	0.0263

ตะกอนที่มีโครเมียม (Cr) เป็นองค์ประกอบพบใน ตัวอย่างที่ S3, S4 และ S5 ซึ่งมีปริมาณโครเมียม (Cr) ในตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 แสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาปริมาณโครเมียมในน้ำชะละลายพบว่าปริมาณความเข้มข้นของโครเมียม (Cr) ในน้ำชะละลายมีค่าที่สูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนตะกอนของเสียเพิ่มสูงขึ้น ดังตารางที่ 4.4 โดยปริมาณโครเมียมในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ S3, S4 และ S5 อยู่ในช่วง 0.2084-0.4932, 0.1365-0.3697 และ 0.9848-4.1572 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ในตัวอย่างที่ S5 มีปริมาณโครเมียมในน้ำชะละลายสูงที่สุดเป็นผลมาจากในตะกอนของเสียมีปริมาณโครเมียมกับค่ามาตรฐานความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำชะละลาย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน โดยในตัวอย่าง S3 และ S4 มีค่าต่ำมาก

ตะกอนที่มีซิลเวอร์ (Ag) เป็นองค์ประกอบพบในตัวอย่างที่ S3 และ S4 ซึ่งมีปริมาณซิลเวอร์ (Ag) ในตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 แสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาปริมาณซิลเวอร์ (Ag) ในน้ำชะละลายพบว่าความเข้มข้นในน้ำชะละลายมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนตะกอนของเสียสูงขึ้น โดยปริมาณซิลเวอร์ (Ag) ในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ S3 และ S4 มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.503-1.7595 และ 0.2842-0.9104 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับใน ตัวอย่างที่ S3 มีปริมาณซิลเวอร์ (Ag) สูงกว่าตัวอย่างที่ 4 เนื่องจากตะกอนของเสียมีปริมาณซิลเวอร์ (Ag) สูงกว่าตัวอย่างที่ S4

ตะกอนที่มีเหล็ก (Fe) เป็นองค์ประกอบพบใน ตัวอย่างที่ S1 ซึ่งมีปริมาณเหล็ก (Fe) ใน ตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 แสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาปริมาณเหล็ก (Fe) ในน้ำชะละลายพบว่าความเข้มข้นในน้ำชะละลายมีค่า สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนตะกอนของเสียสูงขึ้น โดยปริมาณเหล็ก (Fe) ในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ 1 มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.0501-0.1601 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตะกอนที่มีนิกเกิล (Ni) เป็นองค์ประกอบพบใน ตัวอย่างที่ S2 ซึ่งมีปริมาณนิกเกิล (Ni) ใน ตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 แสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาปริมาณนิกเกิล (Ni) ในน้ำชะละลายพบว่าความเข้มข้นในน้ำชะละลายมีค่า สูงขึ้นเมื่ออัตราส่วนตะกอนของเสียสูงขึ้น โดยปริมาณนิกเกิล (Ni) ในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ S2 มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.0868-0.4601 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตะกอนที่มีตะกั่ว (Pb) เป็นองค์ประกอบพบใน ตัวอย่างที่ S5 ซึ่งมีปริมาณตะกั่ว (Pb) ใน ตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 แสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาปริมาณตะกั่ว (Pb) ในน้ำชะละลายพบว่าความเข้มข้นในน้ำชะละลายมีค่า สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนตะกอนของเสียสูงขึ้น โดยปริมาณตะกั่ว (Pb) ในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ 5 มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.1709-0.4701 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตะกอนที่มีแมงกานีส (Mn) เป็นองค์ประกอบพบใน ตัวอย่างที่ S6 ซึ่งมีปริมาณแมงกานีส (Mn) ในตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 แสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาปริมาณแมงกานีส (Mn) ในน้ำชะละลายพบว่าความเข้มข้นในน้ำชะละลายมีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนตะกอนของเสียสูงขึ้น โดยปริมาณแมงกานีส (Mn) ในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ S6 มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.0935-0.2759 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตะกอนที่มีทองแดง (Cu) เป็นองค์ประกอบพบในตัวอย่างที่ S7 ซึ่งมีปริมาณทองแดง (Cu) ในตะกอนของเสียที่อัตราส่วน 0.05, 0.1 และ 0.15 แสดงในตารางที่ 3.2

จากการศึกษาปริมาณทองแดง (Cu) ในน้ำชะละลายพบว่าความเข้มข้นในน้ำชะละลายมีค่า สูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนตะกอนของเสียสูงขึ้น โดยปริมาณทองแดง (Cu) ในน้ำชะละลายของตัวอย่างที่ S7 มีค่าความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0.0113-0.0236 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการศึกษาอัตราส่วนตะกอนของเสียต่อซีเมนต์ที่มีผลต่อค่าความเข้มข้นในน้ำชะละลาย พบว่าอัตราส่วนตะกอนของเสียต่อซีเมนต์ที่สูงขึ้น มีผลทำให้ค่าความเข้มข้นในน้ำชะละลายมีค่า สูงขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากอัตราส่วนของเสียที่สูงขึ้นส่งผลทำให้ปริมาณของโลหะหนักในก้อน ซีเมนต์มีปริมาณสูงขึ้นทำให้ถูกชะละลายออกมามากได้มากขึ้น ทุกตัวอย่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับ มาตรฐานน้ำชะของซีเมนต์จากของเสีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2540)

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็งด้วยซีเมนต์ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ค่า pH ของสารละลาย ปริมาณตะกอนที่ส่งผลต่อความหนาแน่น และความสามารถในการทำละลายฤทธิ์ของโลหะหนักด้วยวิธีทำให้เป็นก้อนซีเมนต์เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการปรับเสถียรและการทำให้เป็นก้อนแข็ง ซึ่งสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. จากการศึกษาอัตราส่วนของตะกอนที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัด พบว่าเมื่อสัดส่วนของตะกอนที่เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อทำการเทียบกับค่ามาตรฐาน (ASTM : C109-92) มีค่ามาตรฐานเท่ากับ 150 กก./ตร.ซม. พบว่าที่อัตราส่วน 0.1 และ 0.05 มีค่าเกินกว่ามาตรฐานสามารถนำไปทำการฝังกลบสำหรับขอเสียอันตรายและเมื่อทำการเทียบกับมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 มีค่ามาตรฐานเท่ากับ 3.5 กก./ตร.ซม. พบว่าทุกอัตราส่วนมีค่าเกินกว่ามาตรฐาน

2. จากผลการศึกษาอัตราส่วนของตะกอนของเสียที่มีผลต่อค่า pH พบว่าอัตราส่วนของตะกอนที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ของน้ำชะละลาย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจาก  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮเดรชัน

3. จากการศึกษาอัตราส่วนของตะกอนของเสียที่มีผลต่อความหนาแน่น พบว่าเมื่ออัตราส่วนของตะกอนที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของก้อนซีเมนต์มีแนวโน้มลดลง

4. จากการศึกษาความสามารถในการทำละลายฤทธิ์ของโลหะหนัก และอัตราส่วนตะกอนของเสียที่ส่งผลต่อความเข้มข้นโลหะในน้ำชะละลาย พบว่าจากการปรับเสถียรมีความสามารถทำให้ค่าความเข้มข้นของโลหะซิลเวอร์ (Ag), โครเมียม (Cr) และตะกั่ว (Pb) ที่ออกมากับน้ำชะละลายต่ำกว่าค่ามาตรฐานกำหนดที่ 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่ออัตราส่วนของตะกอนเพิ่มสูงขึ้นส่งผลทำให้ค่าความเข้มข้นโลหะในน้ำชะละลายมีค่าสูงขึ้น

#### ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาค่า pH ของการชะละลายในช่วงเวลา 18±2 ชั่วโมงเพื่อเป็นการศึกษาความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ของก้อนซีเมนต์ที่ส่งผลต่อค่า pH ของน้ำชะละลายให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจึงเป็นผลทำให้ความสามารถในการชะละลายของน้ำชะละลายลดต่ำลง

2. ควรมีการศึกษาความสามารถในการปรับเสถียรโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการตกตะกอนด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเป็นการลดขั้นตอนในการดำเนินงานและประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

3. ควรมีการศึกษาถึงผลของสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในแต่ละการทดลอง ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดเพื่อทำการแยกสารอินทรีย์และปรับปรุงให้คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่สูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- กนกพร และ อรรถวิทย์. 2542. การศึกษาสมบัติการชะละลายของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเงินปนใน ปริมาณสูง, ปรินญาณีพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- กระทรวงอุตสาหกรรม. 2540. หลักเกณฑ์และวิธีการทำลายฤทธิ์ กำจัด ทิ้ง หรือฝังสิ่งปฏิภูลหรือ วัสดุที่ใช้แล้วและประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540), กระทรวง อุตสาหกรรม
- กุสุมา เอกสารโอรจน์, พัฒน์ธิดา ทองขาว และ สิริหนูช วิรัชวรินทร์. 2545. การตกตะกอน โปรทซัลไฟด์จากน้ำเสียสังเคราะห์และสมบัติของก้อนซีเมนต์ที่มีโปรทซัลไฟด์เจือปน. ปรินญาณีพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จันทพร สุนทรเลิศวนิช, สายสุนีย์ จำรัส และสิรินันท์ กันศิริ. 2546. การกำจัดโครเมียมและ ตะกั่วจากน้ำเสียห้องปฏิบัติการโดยวิธีรีดักชัน-พรีซิพิเตชัน และกระบวนการ เฟอร์ไรท์. ปรินญาณีพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชมพูนุท ไชยรักษ์. 2548. การปรับเสถียรและการทำเป็นก้อนแข็ง. เอกสารประกอบ การเรียน วิชา การกำจัดมูลฝอยและของเสียอันตราย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- บัญญัติ จันท์สุวรรณ และ ไพบูลย์ มานพจนทโรจน์. 2546. การศึกษาระดับปฏิกิริยา ไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์โดยวิธีการบ่มที่แตกต่างกัน. ปรินญาณีพนธ์ วิศวกรรม วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ประณต กุลประสูตร. 2538. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : อมรินทร์พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง
- ปรินญาณี จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และ คอนกรีต. กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย.
- พัทรยศ และ โภคิน. 2542. การศึกษาสมบัติกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนใน ปริมาณสูง, ปรินญาณีพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม(ต่อ)

- มัลลิกา ปัญญาคะโป. 2542. เอกสารประกอบวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. “ของเสียอันตราย”,  
คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- วินิต ช่อวินิจ 2525. คอนกรีตเทคโนโลยี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 1 ข้อกำหนดคุณภาพ. พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 4, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2539.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2518. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 9 การหาระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกโดยใช้เข็ม  
แบบไวแคต, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2518.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, มอก. 15-2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม  
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์, เล่ม 12 วิธีทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ไฮ  
ดรอลิก. พิมพ์เพิ่มเติมครั้งที่ 2, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2540.
- สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม, 2547 มาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 151-2547 กระทรวง  
อุตสาหกรรม
- American Society for testing and Materials.2000, ASTM C 109/C 109M - 99: Stand Method of  
Testing for Compressive Strength of Hydrulic Cement Motars(Using 2-in. or [50-  
mm] cube Specimens). Annual Book of ASTM Standards. Section 4. Vol.04.01. page  
84-89.
- Bishop, P.L. 1988. Leaching of Inorganic Hazardous consituents form Stabilized/Solidified  
Hazardous Waste, Haz. Waste. Vol 5 : 129-143
- Brett Cohen and Jame G. Petrie, 2005. **The application of batch extraction tests for  
the characterization of solidified ferro alloy waste products.** p.222-224.
- Chong Yoon Rha , Seong Keun Kang and Chang Eun Kim. 2000. **Investigation of the  
stability of hardened slag pastefor the stabilizationrsolidification of wastes  
containing heavy metal ions.**p.255-267.
- Choon-Keun Park, 2000. **Hydration and solidification of hazardous wastes containing  
heavy metals using modified cementitious materials.**p.429-435.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม(ต่อ)

- F.P. Glasser, 1997. **Fundamental aspects of cement solidification and stabilization.**  
p.151-170.
- Leangon, K. 1993. **Solidification of Hazardous Waste By Cement-Based Techniques**, Thesis  
No. EV-93-10 Asean Institute of Technology, Bangkok, Thailand
- Rajan K. VempatL M. Yousuf A. Mollah, Anil K. Chinthala and David L. Cocke. 1995.  
**Solidification/Stabilization of toxic metal wastes using coke and coal combustion by-  
products.**p.433-440.
- Shin, H.S. and Sujiwattahana, P.**Factor Affecting Solidification of Hazardous Materials.**  
**Hazardous Waste Detection Control Treatment** pp. 1549-1560, 1988
- Shively, W., Bishop, P.D. and Brown, T. 1986. **Leaching Tests of Heavy Metals Stabilized  
with Portland Cement** *Journal WPCE* 58.p.234-241.
- S.Wang and C.Vipulanandan, 2000. **Solidification/stabilization of Cr(VI) with cement  
Leachability and XRD analyses.**p.385-389.
- U.S. Environment Protection Agency. 1992, TCLP test Method 1311: **Toxicity  
Characteristic Leaching Procedures.** Test Methods for Evaluating Solid Waste:  
Physical/Chemical Methods (SW-846). p. 33.
- U.S. Environmental protection Agency, 1988. **Stabilization/Solidification of CERCLA and  
RCRA Waste.** EPA/625/6-89/022. **Hazardous Waste Engineering Research  
Laboratory**, U.S. Environmental protection Agency, Cincinnati, Ohio

## ภาคผนวก

ตารางที่ ก. ผลการวัดค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น

ตัวอย่าง	อัตราส่วน ตะกอน	ครั้งที่	ความ สูง (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังรับ แรงอัด(กก. นิวตัน)	พื้นที่ หน้าตัด (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	กำลังรับแรง อัด(กก./ตร. ซม.)
2	0.05	1	5.12	284.28	44.6	26.94	137.91	2.06	168.93
		2	5.15	285.44	42.9	26.62	137.12	2.08	164.5
		3	5.20	285.79	43.2	25.91	134.46	2.12	170.13
	0.1	1	5.17	285.65	39.2	26.63	137.65	2.08	150.21
		2	5.18	278.07	39.4	26.47	137.12	2.03	152.19
		3	5.14	272.33	40.23	26.73	137.38	1.98	153.57
	0.15	1	5.20	271.51	29.00	26.73	138.99	1.95	110.71
		2	5.20	272.77	27.90	26.57	138.17	1.97	107.15
		3	5.16	268.09	28.04	26.06	134.47	1.99	111.20
	0.25	1	5.04	256.72	5.30	26.16	131.86	1.94	20.67
		2	5.02	254.93	6.10	26.37	132.38	1.93	23.60
		3	4.98	252.18	5.90	26.32	131.05	1.92	22.87
	0.5	1	5.02	256.48	5.90	27.2	136.52	1.88	22.23
		2	4.98	254.63	5.3	27.04	134.66	1.89	20.02
		3	5.04	256.64	5.50	27.09	136.54	1.88	20.91
3	0.05	1	5.17	276.41	53.95	25.95	134.18	2.06	212.13
		2	5.15	272.83	51.94	25.60	131.84	2.07	207.13
		3	5.11	273.42	52.71	26.77	135.27	2.02	200.93
	0.1	1	5.19	278.51	41.31	26.25	137.65	2.02	160.59
		2	5.1	271.9	39.8	26.16	133.43	2.04	155.23
		3	5.16	279.43	40.77	26.47	136.57	2.04	157.18
	0.15	1	5.14	273.85	28.30	26.32	135.21	2.02	109.72
		2	5.04	278.81	28.70	26.88	135.5	2.02	108.95
		3	5.05	271.03	29.30	26.73	135.00	2.06	111.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. ผลการวัดค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น(ต่อ)

ตัวอย่าง	อัตราส่วน ตะกอน	ครั้งที่	ความ สูง (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังรับ แรงอัด(กก. นิวตัน)	พื้นที่ หน้าตัด (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	กำลังรับแรง อัด(กก./ตร. ซม.)	
3(ต่อ)	0.25	1	5.18	263.01	25.00	25.86	133.95	1.96	98.65	
		2	5.17	261.81	26.10	25.91	133.94	1.95	102.79	
		3	5.16	262.62	25.70	25.86	133.42	1.96	101.41	
	0.5	1	5.17	258.49	18.00	25.76	133.16	1.94	71.27	
		2	5.12	258.34	19.30	26.12	133.69	1.93	75.40	
		3	5.16	261.87	18.60	26.01	134.21	1.95	72.97	
4	0.05	1	5.20	281.73	54.25	26.25	137.91	2.04	210.87	
		2	5.14	281.82	52.81	26.25	136.32	2.07	205.29	
		3	5.17	279.35	54.17	26.57	135.39	2.06	210.13	
	0.1	1	5.16	305.2	45.80	26.83	138.45	2.20	147.19	
		2	5.14	278.29	46.70	26.16	134.49	2.14	182.16	
		3	5.22	292.99	47.10	26.52	138.44	2.12	181.23	
	0.15	1	5.13	261.78	23.35	26.11	133.94	1.95	99.07	
		2	5.16	264.79	26.61	25.06	133.42	1.98	109.79	
		3	5.10	264.44	25.50	26.23	135.78	1.93	99.20	
	0.25	1	5.11	266.16	9.10	26.52	135.53	1.96	35.01	
		2	5.20	267.08	8.30	26.21	136.31	1.95	32.31	
		3	5.18	266.92	8.70	26.26	136.05	1.96	33.81	
	0.5	1	5.17	263.69	5.10	26.37	136.37	1.93	19.73	
		2	5.20	264.15	4.90	26.31	136.82	1.93	19.00	
		3	5.16	263.23	5.70	26.42	136.33	1.93	22.01	
	5	0.05	1	5.18	294.62	52.10	27.14	140.60	1.93	195.89
			2	5.14	297.74	51.90	26.78	137.64	1.99	197.76
			3	5.12	295.95	53.20	26.88	137.65	2.15	201.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. ผลการวัดค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น(ต่อ)

ตัวอย่าง	อัตราส่วน ตะกอน	ครั้งที่	ความ สูง (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังรับ แรงอัด(กก. นิวตัน)	พื้นที่ หน้าตัด (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	กำลังรับแรง อัด(กก./ตร. ซม.)
5(ต่อ)	0.1	1	5.18	271.07	40.89	26.06	134.98	2.01	160.13
		2	5.20	274.21	42.40	26.11	135.78	2.02	165.71
	0.15	1	5.18	271.99	28.7	26.37	136.57	1.99	111.06
		2	5.15	274.29	28.10	27.09	139.52	1.97	105.09
		3	5.17	272.62	27.90	26.37	136.32	1.99	109.9
	0.25	1	4.97	237.39	20.20	25.50	126.71	1.87	80.83
		2	5.04	238.25	19.80	25.50	128.52	1.85	79.23
		3	5.02	265.94	19.20	25.49	127.99	1.85	76.86
	0.5	1	5.17	250.32	7.10	26.37	136.31	1.83	27.09
		2	5.20	248.54	6.90	26.21	136.30	1.82	26.86
		3	5.22	243.33	6.20	26.21	136.83	1.81	21.14
	6	0.05	1	5.17	285.31	51.20	26.41	136.54	2.06
2			5.18	306.98	50.40	27.10	140.34	2.19	189.77
3			5.17	292.34	49.70	26.21	135.53	2.16	193.49
0.1		1	5.28	277.52	38.40	26.41	138.84	2.07	154.69
		2	5.14	276.94	38.35	25.75	132.34	2.09	151.97
		3	5.16	271.93	36.80	25.30	130.54	2.08	148.42
0.15		1	5.13	271.75	23.10	25.54	131.02	2.07	92.29
		2	5.1	269.77	22.60	26.0	131.05	2.06	88.70
		3	5.17	270.26	21.50	25.50	131.40	2.05	86.03
0.25		1	4.97	268.93	11.10	26.73	132.84	2.02	42.37
		2	4.95	268.02	10.90	26.72	132.30	2.03	41.63
		3	5.00	269.46	10.20	26.23	133.64	2.02	39.68
0.5		1	5.15	264.78	5.10	26.83	138.19	1.92	19.40
		2	5.20	262.34	4.70	26.11	135.78	1.93	18.37
		3	5.12	263.45	4.90	26.62	136.31	1.93	18.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. ผลการวัดค่ากำลังรับแรงอัด และความหนาแน่น(ต่อ)

ตัวอย่าง	อัตราส่วน ตะกอน	ครั้งที่	ความ สูง (ซม.)	น้ำหนัก (กรัม)	กำลังรับ แรงอัด(กก. นิวตัน)	พื้นที่ หน้าตัด (ตร.ซม.)	ปริมาตร (ลบ.ซม.)	ความหนาแน่น (ตัน/ลบ.ม.)	กำลังรับแรง อัด(กก./ตร. ซม.)
7	0.05	1	5.12	278.98	46.94	26.73	136.85	2.04	179.18
		2	5.25	288.57	46.59	26.83	140.87	2.05	177.21
		3	5.15	272.82	45.79	26.99	135.99	1.96	173.15
	0.1	1	5.17	294.13	33.90	26.93	128.45	2.17	128.45
		2	5.17	307.27	34.54	26.63	132.20	2.23	132.20
		3	5.17	294.69	32.50	26.88	123.38	2.12	123.38
	0.15	1	5.14	269.54	20.1	26.99	138.71	1.94	75.99
		2	5.12	266.93	19.10	26.42	135.26	1.97	73.77
		3	5.12	267.95	21.20	26.73	136.85	1.96	80.93
	0.25	1	5.22	262.52	7.10	26.83	140.05	1.87	27.00
		2	5.2	261.93	7.90	27.00	140.00	1.87	29.86
		3	5.24	262.04	6.80	26.73	140.60	1.86	25.96
	0.5	1	5.18	253.19	5.00	26.52	137.37	1.84	19.24
		2	5.16	252.95	4.90	26.57	137.12	1.84	18.82
		3	5.12	251.34	4.70	26.47	135.52	1.85	18.12

ตารางที่ ข. ค่ามาตรฐานการทดลองกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ต้า (ASTM : C109 - 92)

อายุของแท่งตัวอย่าง	ประเภทของซีเมนต์		
	1	2	3
1 วันในอากาศชื้น (kg/cm <sup>3</sup> )	-	-	120
1 วันในอากาศชื้น, 2 วันในน้ำ (kg/cm <sup>2</sup> )	85	70	210
1 วันในอากาศชื้น, 6 วันในน้ำ (kg/cm <sup>2</sup> )	150	130	-
1 วันในอากาศชื้น, 27 วันในน้ำ (kg/cm <sup>2</sup> )	245	245	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค. ผลการวัดค่า pH หลังการชะละลาย

ตัวอย่าง	อัตราส่วน ตะกอน	ค่า pH ของสารละลาย			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยง เบนมาตรฐาน
		ครั้งที่				
		1	2	3		
1	0	12.26	12.28	12.24	12.26	0.02
	0.05	12.23	12.24	12.24	12.24	0.01
	0.1	12.22	12.24	12.24	12.23	0.01
	0.15	11.82	12.15	12.18	12.05	0.19
2	0	12.26	12.28	12.24	12.26	0.02
	0.05	12.05	12.07	12.12	12.08	0.04
	0.1	12.17	12.21	12.2	12.19	0.02
	0.15	12.22	12.21	12.24	12.22	0.02
3	0	12.26	12.28	12.24	12.26	0.02
	0.05	12.27	12.25	12.21	12.24	0.03
	0.1	12.22	12.21	12.24	12.22	0.02
	0.15	12.28	12.28	12.31	12.29	0.02
4	0	12.26	12.28	12.24	12.26	0.02
	0.05	12.22	12.27	12.14	12.21	0.07
	0.1	12.25	12.27	12.28	12.27	0.02
	0.15	12.29	12.3	12.31	12.3	0.01
5	0	12.26	12.28	12.24	12.26	0.02
	0.05	12.22	12.19	12.2	12.2	0.02
	0.1	12.13	12.14	12.14	12.34	0.01
	0.15	12.09	12.15	12.16	12.13	0.04
6	0	12.26	12.28	12.24	12.26	0.02
	0.05	12.4	12.33	12.37	12.37	0.04
	0.1	12.29	12.21	12.24	12.25	0.04
	0.15	12.27	12.28	12.22	12.26	0.03
7	0	12.26	12.28	12.24	12.26	0.02
	0.05	12.05	12.09	12.07	12.07	0.02
	0.1	12.19	12.12	12.14	12.15	0.04
	0.15	12.2	12.18	12.27	12.22	0.05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

ค่ามาตรฐานสารที่ถูกละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม

ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2540

เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

สารที่ถูกละล้างได้ (Leachable substance) เป็นสารซึ่งเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และวิธีวิเคราะห์ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนด แล้วมีปริมาณโลหะหนัก หรือวัตถุพิษในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่งต่อไปนี้

อาร์เซนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Barium)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เบนซีน (Benzene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (Cadmium (total))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอเดน (Chlordane)	0.03	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอโรเบนซีน (Chlorobenzene)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
คลอโรฟอร์ม (Chloroform)	6.0	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
1,4-ไดคลอโรอีเทน (1,4 Dichloroethane)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
1,1-ไดคลอโรเอทิลีน (1,1 Dichloroethylene)	0.7	มิลลิกรัมต่อลิตร
เอลดริน (Endrin)	0.02	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮปตาคลอไรด์ (Heptachlor and its epoxide)	0.008	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรเบนซีน (Hexachlorobenzene)	0.13	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรบิวตาไดอีน (Hexchlorobutdiene)	0.5	มิลลิกรัมต่อลิตร
เฮกซะคลอโรอีเทน (Hexchloroethane)	3.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลินเดน (Lindane)	0.4	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมธอกซีคลอรั (Methoxychlor)	10	มิลลิกรัมต่อลิตร
เมทิล เอทิล คีโตน (Methyl ethyl ketone)	200.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไนโตรเบนซีน (Nitrobenzene)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4-ไนโตรโทลูอีน (Nitortoluene)	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 (2,5,5, Trichlorophenol)	400.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,6-ไตรคลอโรฟีนอล (2,4,6, Trichlorophenol)	2.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
2,4,5-ทีพี (ซิลเว็กซ์) (2,4,5-TP (Silvex))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ไวนิล คลอไรด์ (Vinyl Chloride)	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้