

การใช้กากตะกอนจากโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นซีเมนต์
 UTILIZATION SLUDGE FROM POWER PLANT AS CEMENT



นางสาวกัญญากร นันทะ
 นางสาวณัฐนิศา
 นางสาวศรดา สรดา
 บุญพรยอด
 ทิฉาภรณ์
 อิศราภรณ์

ได้ทุนสงเคราะห์พิเศษจาก บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) กองทุนส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ประจำปี ๒๕๕๓

นางสาวกัญญากร นันทะ
 ศาสตราจารย์พิเศษ ดร.ดร.ดร.

ภาควิชาเทคโนโลยีปิโตรเลียม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีพิมพ์ ๒๕๕๓

การใช้กากตะกอนจากโรงไฟฟ้าทดแทนปูนซีเมนต์

UTILIZATION SLUDGE FROM POWER PLANT AS CEMENT



นางสาวชนกนันท์ บุนรอด
นางสาวสุนิสา ทิวาพัฒน์
นางสาวอารดา อัสวานันท์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

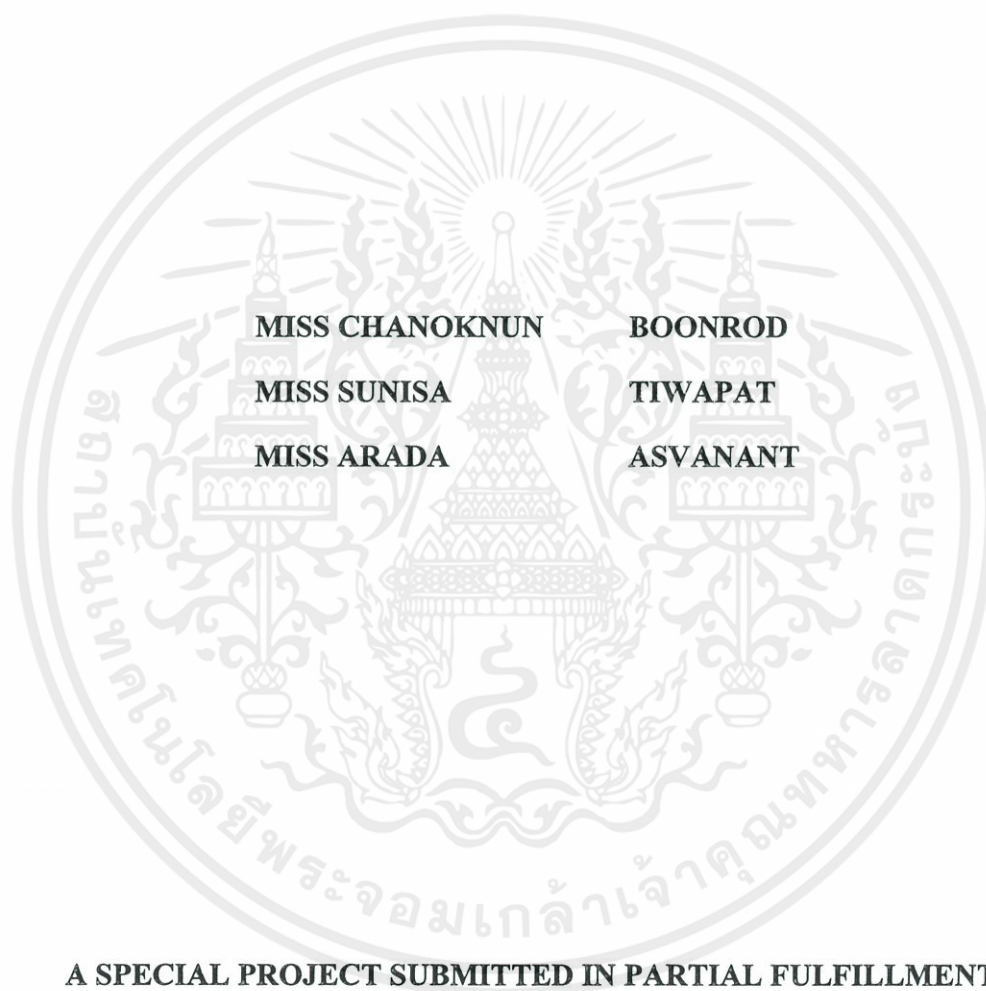
สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2555 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UTILIZATION SLUDGE FROM POWER PLANT AS CEMENT



MISS CHANOKNUN

BOONROD

MISS SUNISA

TIWAPAT

MISS ARADA

ASVANANT

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN ENVIRONMENTAL CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนสิทธิ์ในชื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้ภาคตะกอนจากโรงไฟฟ้าทดแทนปูนซีเมนต์



นางสาวชนกนันท์ บุญรอด

นางสาวสุนิสา ทิวาพัฒน์

นางสาวอรดา อัสวานันท์

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การใช้กากตะกอนจากโรงไฟฟ้าทดแทนปูนซีเมนต์	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชนกนันท์	บุญรอด
	นางสาวสุนิสา	ทิวาพัฒน์
	นางสาวอารดา	อัสวานันท์
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เคมีสิ่งแวดล้อม	
ปีการศึกษา	2555	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.กรองแก้ว	ทิพย์ศักดิ์

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาสมบัติกากตะกอนและหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนกับวัสดุผสมในการทำซีเมนต์ก้อน ใช้กากตะกอน 2 ชนิด คือ กากตะกอนแห้งที่ได้รับมาและกากตะกอนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300°C ทำการแปรอัตราส่วนเป็น 10, 20 และ 30 % โดยนำส่วนผสม ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ทราย และน้ำ ในอัตราส่วน 1:2.75:0.825 โดยน้ำหนัก มาผสมกับกากตะกอนศึกษาสมบัติเบื้องต้นของกากตะกอน ศึกษาหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์ก้อน เมื่อทำการหล่อซีเมนต์ก้อนตามอัตราส่วน แล้วทำการบ่มในน้ำประปา เมื่อซีเมนต์ก้อนมีอายุบ่มที่ 7, 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบค่าการรับกำลังแรงอัด และทดสอบการชะละลายโลหะหนัก (Cd, Cu, Cr และ Pb) ด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) และวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) ผลการทดลอง พบว่า ซีเมนต์ก้อนชุดควบคุมและชุดทดลองที่แปรค่ากากตะกอน มีค่าพีเอชเป็นเบสอยู่ในช่วง 11 - 12 และค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 5 - 7 mS/cm อัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการทำซีเมนต์ก้อน คือ 10 % ซึ่งมีค่าการรับกำลังแรงอัดสูงสุดเทียบกับชุดควบคุม ที่ 28 วันเท่ากับ 253.81 Kg/cm² มีค่าความชื้น 4.73 % เมื่อทดสอบค่าการชะละลายโลหะหนักทุกชนิดมีค่าผ่านมาตรฐานที่กำหนด โดยกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และมาตรฐานตามที่ US EPA กำหนดสามารถนำอัตราส่วนที่เหมาะสมไปประยุกต์ในการผลิตกระถางปลูกต้นไม้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ: กากตะกอนจากโรงไฟฟ้า, ปูนซีเมนต์, WET, TCLP

Special Project Title	Utilization sludge from power plant as cement
Students	Chanoknun Boonrod Sunisa Tiwapat Arada Asvanant
Degree	Bachelor of Science
Program	Environmental Chemistry
Academic Year	2012
Project Advisor	Asst. Prof. Krongkaew Tippayasak

ABSTRACT

The feasibility studies of wastewater treatment sludge from the power plant were used as cement replacement material. For studies sludge properties and optimum ratio between sludge and the compositematerials by sludge was used as dried sludge and oven dried at 300°C. The composite materials (cement, sand and water; 1:2.75:0.825 by weight) were mixed with sludge by varied ratio at 10, 20 and 30 %. The cement blocks were produced and incubated in tap water for 7, 14 and 28 days, then testing for compressive strength were done. Leachability of heavy metals (Cd, Cr, Cu and Pb) were tested by Waste Extraction Test; WET (according to Notification of Ministry of Industry, A.D.2005) and Toxicity Characteristic Leaching Procedure; TCLP (US EPA method 1311).The results showed that cement block: control set, treatment set (cement and varied sludge) had basicidic pH 11 - 12 and conductivity 5-7 mS/cm. The 10 % dried sludge cement blocks were the appropriate ratio compared with the control set. The maximum compressive strength is 253.81 Kg/cm² and the moisture is 4.73 %. All metal leachability were met the standard. Those optimum ratios can be applied to product cement pot.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords: Sludge from Power plant, Cement, WET, TCLP

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่ายด้วยกัน ซึ่งผู้จัดทำโครงการพิเศษนี้จึงขอขอบพระคุณทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ

ขอขอบพระคุณ ผศ.กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้ความเมตตาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำเสนอแนะ แนวคิด และดูแลเอาใจใส่ตลอดจนตรวจสอบ ดิชมผลงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลอ จารุสุทธิรักษ์ และ อาจารย์กัณดินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ อาจารย์กรรมการที่ช่วยชี้แนะข้อบกพร่องและแนวทางการแก้ไข รวมถึงตรวจสอบ ดิชมผลงาน ทำให้โครงการพิเศษนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.คมสัน มาลีสี และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา ชี้แนะ ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และให้ความช่วยเหลือจนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกจนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ โรงไฟฟ้าบีแอลซีพีที่ให้ความอนุเคราะห์ภาคตะกอนใช้ในการดำเนินโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ในสาขาวิชาเคมีสิ่งแวดล้อมทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จตลอดจนบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวมา ทางผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

นางสาวชนกนันท์	บุญรอด
นางสาวสุนิสา	ทิวาพัฒน์
นางสาวอารดา	อัศวานันท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
คำย่อและสัญลักษณ์.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 โรงบำบัดน้ำเสียโรงไฟฟ้า.....	3
2.2 กากตะกอน.....	4
2.3 การนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์.....	5
2.4 โลหะหนัก (Heavy metal).....	8
2.5 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง (Stabilization and Solidification).....	9
2.6 มอร์ตาร์ (Mortar).....	15
2.7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	16
2.8 วัสดุผสม.....	20
2.9 น้ำ.....	21
2.10 การทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็ง.....	23
2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของซีเมนต์ก้อน.....	24
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 เครื่องมือ สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.2 การดำเนินการวิจัย.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 4 ผลวิจัยและอภิปรายผล.....	47
4.1 สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอน.....	47
4.2 สมบัติของซีเมนต์ก้อน.....	51
4.3 การผลิตกระถางซีเมนต์.....	60
4.4 การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต.....	61
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
5.1 สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอน.....	62
5.2 การนำกากตะกอนจากโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์.....	62
5.3 อัตราส่วนกากตะกอนที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์.....	62
5.4 การนำไปใช้ประโยชน์.....	63
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	63
บรรณานุกรม.....	64
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์กากตะกอนและซีเมนต์ก้อน.....	67
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	73
ภาคผนวก ค ค่ามาตรฐาน.....	114
ภาคผนวก ง การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ.....	118
ภาคผนวก จ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	143

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ.....	7
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าขาน้อย.....	8
2.3 ค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียแต่ละประเภท.....	8
2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคในการหล่อแข็ง.....	11
3.1 การวิเคราะห์สมบัติกากตะกอน.....	42
3.2 ปริมาณกากตะกอน ปูนซีเมนต์และส่วนผสมที่อัตราส่วนต่างๆ.....	44
4.1 องค์ประกอบอินทรีย์วัตถุ.....	49
4.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของกากตะกอน.....	50
4.3 ค่าการรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน.....	53
ก-1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการสกัดด้วยวิธี WET และวิธี TCLP.....	70
ข-1 ความชื้นของกากตะกอน.....	73
ข-2 ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของกากตะกอน.....	74
ข-3 องค์ประกอบในกากตะกอนที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF.....	74
ข-4 ขนาดอนุภาคของกากตะกอน.....	75
ข-5 อินทรีย์วัตถุในกากตะกอน.....	78
ข-6 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ในกากตะกอนด้วยวิธี WET.....	79
ข-7 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในกากตะกอนด้วยวิธี WET.....	83
ข-8 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ในกากตะกอนด้วยวิธี TCLP.....	85
ข-9 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในกากตะกอนด้วยวิธี TCLP.....	86
ข-10 ความชื้นของซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	87
ข-11 ความชื้นของซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 14 วัน.....	88
ข-12 ความชื้นของซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	89
ข-13 การรับกำลังแรง อัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	90
ข-14 การรับกำลังแรง อัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 14 วัน.....	92
ข-15 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	93
ข-16 ปริมาณ Cd, Cr และ Cu ในซีเมนต์ก้อน (WET) ที่อายุการบ่ม 7 วัน.....	96
ข-17 ปริมาณ Cd, Cr และ Cu ในซีเมนต์ก้อน (WET) ที่อายุการบ่ม 14 วัน.....	98
ข-18 ปริมาณ Cd, Cr และ Cu ในซีเมนต์ก้อน (WET) ที่อายุการบ่ม 28 วัน.....	101

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ข-19 ปริมาณ Cd และ Cr ในซีเมนต์ก้อน (TCLP) ที่อายุการบ่ม 7 วัน	102
ข-20 ปริมาณ Cd และ Cr ในซีเมนต์ก้อน (TCLP) ที่อายุการบ่ม 14 วัน	104
ข-21 ปริมาณ Cd และ Cr ในซีเมนต์ก้อน (TCLP) ที่อายุการบ่ม 28 วัน	106
ข-22 ปริมาณ Cu และ Pb ในซีเมนต์ก้อนด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 7 วัน	118
ข-23 ปริมาณ Cu และ Pb ในซีเมนต์ก้อนด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 14 วัน	110
ข-24 ปริมาณ Cu และ Pb ในซีเมนต์ก้อนด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 28 วัน	112
ค-1 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์(WET)	114
ค-2 ค่ามาตรฐานของสารอันตราย TCLP ตามที่ US EPA กำหนด	116
ค-3 เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน	117
ง-1 ค่าความเข้มข้นของ Cd, Cr และ Cu ที่อายุการบ่มต่างๆ (WET)	118
ง-2 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแคลเซียมที่อายุการบ่มต่างๆ	123
ง-3 เปรียบเทียบความแตกต่าง Cd ด้วยวิธี Duncan's	123
ง-4 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโครเมียมที่อายุการบ่มต่างๆ	124
ง-5 เปรียบเทียบความแตกต่าง Cr ด้วยวิธี Duncan's	125
ง-6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณทองแดงที่อายุการบ่มต่างๆ	126
ง-7 เปรียบเทียบความแตกต่าง Cu ด้วยวิธี Duncan's	126
ง-8 ค่าความเข้มข้นของ Cd,Cr, Cu และPbที่อายุการบ่มต่างๆ (TCLP)	128
ง-9 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแคลเซียมที่อายุการบ่มต่างๆ	133
ง-10 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโครเมียมที่อายุการบ่มต่างๆ	133
ง-11 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณทองแดงที่อายุการบ่มต่างๆ	134
ง-12 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณตะกั่วที่อายุการบ่มต่างๆ	134
ง-13 เปรียบเทียบความแตกต่างของแคลเซียม ด้วยวิธี Duncan's	135
ง-14 เปรียบเทียบความแตกต่างของโครเมียม ด้วยวิธี Duncan's	137
ง-15 เปรียบเทียบความแตกต่างของทองแดง ด้วยวิธี Duncan's	139
ง-16 เปรียบเทียบความแตกต่างของตะกั่ว ด้วยวิธี Duncan's	141

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium silicate hydrate: C-S-H)	15
3.1 แบบหล่อทำจากกระดาษพลาสติก	46
4.1 ขนาดอนุภาคของกากตะกอน	49
4.2 ค่าความชื้นของซีเมนต์ก้อนที่ผลิตจากกากตะกอนแห้ง และชุดควบคุม	51
4.3 ค่าความชื้นของซีเมนต์ก้อนที่ผลิตจากกากตะกอนที่ผ่านการเผา และชุดควบคุม	51
4.4 ค่าพีเอชของซีเมนต์ก้อน	52
4.5 ค่าการนำไฟฟ้าของซีเมนต์ก้อน	52
4.6 ค่าการรับกำลังแรงอัดของซีเมนต์ก้อนที่ 7, 14 และ 28 วัน	54
4.7 ลักษณะของผิวหน้าบ่ม	54
4.8 ค่าพีเอชของน้ำบ่ม	55
4.9 น้ำหนักซีเมนต์ก้อนก่อนบ่มและหลังบ่ม	55
4.10 ปริมาณแคลเซียมในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี WET	56
4.11 ปริมาณโครเมียมในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี WET	57
4.12 ปริมาณทองแดงในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี WET	57
4.13 ปริมาณแคลเซียมในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP	58
4.14 ปริมาณโครเมียมในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP	58
4.15 ปริมาณทองแดงในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP	59
4.16 ปริมาณตะกั่วที่ในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP	59
4.17 กระดาษซีเมนต์	60
4.18 กระดาษซีเมนต์ที่ผลิตจากอัตราส่วนของกากตะกอน 10 %	60
จ-1 เครื่องทดสอบกำลังอัด	143
จ-2 โต๊ะควบคุมการไหลพร้อมแบบทองเหลืองรูปกรวย	144
จ-3 เครื่องผสมมอร์ตาร์	144
จ-4 แบบหล่อแห้งตัวอย่าง	144

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อและสัญลักษณ์

AAS	อะตอมมิกแอบซอร์พชัน สเปกโทรโฟโตมิเตอร์
m ³	ลูกบาศก์เมตร
g	กรัม
Kg	กิโลกรัม
L	ลิตร
mg	มิลลิกรัม
OM	อินทรีย์วัตถุ
pH	พีเอช หรือ ระดับความเป็นกรดด่าง
°C	องศาเซลเซียส
Ca(OH) ₂	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
C ₂ S	ไคแคลเซียมซิลิเกต
C ₃ S	ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C-S-H	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
SiO ₂	ซิลิกอนไดออกไซด์
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure
WET	Waste Extraction Test

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินเป็นทางเลือกหนึ่งในการผลิตไฟฟ้า เพื่อตอบสนองความต้องการด้านพลังงานที่เพิ่มมากขึ้นในปัจจุบันถ่านหินมีต้นทุนในการผลิตไฟฟ้าต่ำกว่าเชื้อเพลิงอื่น ๆ มีปริมาณสำรองมาก สามารถใช้ได้ไม่ต่ำกว่า 200 ปี และสามารถใช้เทคโนโลยีสะอาดช่วยกำจัดมลพิษจากการใช้ถ่านหินได้ แต่อย่างไรก็ตามโรงไฟฟ้าถ่านหินต้องใช้ระบบควบคุมมลภาวะทางอากาศที่มีราคาสูง เนื่องจากการเผาไหม้ถ่านหินเป็นสาเหตุสำคัญของฝนกรดและภาวะโลกร้อน อีกทั้งประเทศไทยต้องนำเข้าถ่านหินคุณภาพดีจากต่างประเทศและต้องมีระบบการจัดการขนส่งที่ดี

กระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมที่เหมาะสมต้องควบคู่ไปกับการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมที่เข้มงวด เพื่อให้กระบวนการผลิตส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด จึงต้องมีกระบวนการบำบัดของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตด้วย ซึ่งในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการใช้ถ่านหินเป็นวัตถุดิบ โดยการแปรรูปถ่านหินให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า ในกระบวนการผลิตดังกล่าว ทำให้เกิดของเสียที่อยู่ในรูปของน้ำเสีย ทั้งจากบริเวณลานกองถ่านหินและอาคาร โรงไฟฟ้า ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการบำบัดทั้งทางเคมีและชีวภาพ ทำให้เกิดกากตะกอนเป็นจำนวนมาก การนำกากตะกอนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เป็นหลักการลดปริมาณของเสียที่สำคัญรองจากการลดที่แหล่งกำเนิด ข้อเด่นของการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ คือ ลดขั้นตอนการจัดการและให้ผลตอบแทนกลับคืนในสัดส่วนที่สูง กล่าวคือ ผลตอบแทนในทางเศรษฐศาสตร์จากการใช้วัตถุดิบน้อยลง ลดภาระการกำจัดของเสีย เพิ่มมูลค่าทรัพย์สินจากของเสียเหล่านั้น และผลประโยชน์ในทางสิ่งแวดล้อมจากการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ รวมทั้งลดความเสี่ยงที่อาจเกิดจากการขนส่งจากกระบวนการแสวงหาทรัพยากร ดังนั้นการนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่จึงเป็นแนวทางการจัดการของเสียที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2552)

ของเสียที่เกิดจากการบำบัดน้ำเสียจากโรงไฟฟ้า คือ กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ในการประยุกต์ใช้ประโยชน์กากตะกอนมีการนำมาใช้ประโยชน์ในหลายรูปแบบ เช่น กากตะกอนอินทรีย์ที่มีค่าความร้อนสูง มีการนำกากตะกอนประเภทนี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิง หรือนำกากตะกอนที่มีธาตุอาหารไปทำปุ๋ยหมัก ส่วนกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่มีอินทรีย์วัตถุมาก สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม กรุณาแจ้งผู้ดูแลเรื่องเนื้อหา และแจ้งผู้ดูแลเรื่องเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
โรงไฟฟ้ามาใช้ในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เพื่อเพิ่มมูลค่าของกากตะกอน

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการนำกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้าถ่านหิน มาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์
2. เพื่อศึกษาหาอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนกับวัสดุผสมที่เหมาะสมในการทำซีเมนต์ก้อน
3. เพื่อศึกษาสมบัติของกากตะกอน ซึ่งมีศักยภาพและความเป็นไปได้ในการหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ หรือนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. กากตะกอนที่ใช้ในการวิจัยเป็นกากตะกอนแห้งจากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้าถ่านหิน
2. ศึกษาสมบัติทั่วไปของกากตะกอนจากโรงไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นกากตะกอนแห้งที่ได้รับมา และกากตะกอนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300°C
3. ศึกษาการแปรอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์กับกากตะกอนแห้งที่ได้รับมา และกากตะกอนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300°C ในการผลิตซีเมนต์ก้อน ทั้งหมด 4 อัตราส่วนดังนี้ 0, 10, 20 และ 30 %
4. ศึกษาสมบัติของซีเมนต์ก้อนที่ผลิตโดยใช้กากตะกอนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์
5. ศึกษาต้นทุนในการผลิตซีเมนต์ก้อนจากกากตะกอน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงสมบัติ ศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์จากกากตะกอน
2. สามารถนำมาจัดการกากตะกอน โดยเป็นการเพิ่มทางเลือกของการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้า
3. สามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย
4. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับกากตะกอนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โรงบำบัดน้ำเสียโรงไฟฟ้า

โรงบำบัดน้ำเสียโรงไฟฟ้าที่ทำการศึกษารับน้ำเสียมาจาก 2 แหล่ง คือ จากบริเวณลานถ่านหิน และบริเวณอาคารโรงไฟฟ้ามาบำบัดก่อนปล่อยน้ำออกสู่ทะเล สามารถรับน้ำเสียได้ $100 \text{ m}^3/\text{hr}$ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 โรงบำบัดน้ำเสียบริเวณที่มีถ่านหิน

โรงบำบัดน้ำเสียบริเวณที่มีถ่านหินรองรับน้ำเสียที่เกิดจากน้ำฝนชะถ่านหิน ทางท่อระบายน้ำในพื้นที่ดักจับฝุ่น ซึ่งการดำเนินงานขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำในบ่อ และปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา ซึ่งน้ำจะไหลไปยังบ่อถ่านหิน ขนาด $8,000 \text{ m}^3$ รองรับน้ำเสียที่เกิดจากน้ำฝนที่ชะถ่านหินจากหม้อต้มไอน้ำ ทางท่อระบายน้ำในพื้นที่ดักจับฝุ่นแล้วเข้าสู่ถังควบคุมค่าพีเอช ขนาด 100 m^3 ควบคุมค่าพีเอชโดยการเติม โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 10 % ลงไปเพื่อปรับให้เหมาะต่อการสร้างตะกอน และให้มีค่าพีเอชที่สูงขึ้นเหมาะกับการตกตะกอนของโลหะหนัก ทั้งยังเติมผงถ่านกัมมันต์ (Powder activated carbon: PAC) 10 % เพื่อเร่งการสร้างตะกอนจากนั้นน้ำจากถังควบคุมค่าพีเอชไหลลงมายังถังสร้างตะกอนที่มีขนาด 100 m^3 โดยมีการเติมพอลิเมอร์ (Polymer) 0.1% เพื่อสร้างตะกอนน้ำจากถังสร้างตะกอนไหลเข้าถังตกตะกอน ที่มีขนาด $1,800 \text{ m}^3$ โดยมีอัตราการไหลต่ำและคงที่ เพื่อให้ความเร็วในการจมตัวของตะกอนไม่เกิดความแปรปรวนจากนั้นน้ำจากถังตกตะกอนไหลเข้าสู่บ่อพัก ขนาด 100 m^3 และทำการวัดค่าพีเอชและค่าของแข็งแขวนลอยแล้วส่งน้ำไปยังถังปรับพีเอชในโรงบำบัดน้ำเสียรวม

2.1.2 โรงบำบัดน้ำเสียจากอาคารโรงไฟฟ้า

โรงบำบัดน้ำเสียจากอาคารโรงไฟฟ้ารองรับน้ำเสียจากอาคารโรงไฟฟ้าและสิ่งก่อสร้างอื่นที่อยู่ภายในโรงบำบัดน้ำเสียสามารถจุน้ำได้ $105 \text{ m}^3/\text{day}$ วัตถุประสงค์เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ สารแขวนลอย และฆ่าเชื้อโรคในน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่โรงบำบัดน้ำเสียรวม โดยมีการตรวจวิเคราะห์ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (Biological oxygen demand: BOD) สารแขวนลอย และควบคุมค่าพีเอชให้ตรงตามมาตรฐานคุณภาพน้ำก่อนปล่อยน้ำเสียออกไปโดยปั๊มสูบลึงปฏิกลจากสถานที่ต่างๆ เข้าสู่ถังรวมน้ำเสียขนาด 120 m^3 อัตราการไหลสูงสุด $5 \text{ m}^3/\text{hr}$ โดยมีการใช้ปั๊ม 2 ตัว (ปั๊มทำงานและปั๊มสำรอง) เพื่อรองรับน้ำเสียที่ผ่านมาจากเครื่องบดก่อนผ่านตะแกรงคัดแยกซึ่งอัตราการไหลขึ้นอยู่กับแรงโน้มถ่วงของโลกจากนั้นน้ำเสียจากถังรวมน้ำเสียถูกส่งเข้าสู่ถังเติมอากาศซึ่งมีขนาด 55 m^3 โดยทำการเป่าลมเข้าไป และมีการปรับค่าพีเอชให้เหมาะสม

ต่อการทำงานของถัง ใช้เวลา 24 ชั่วโมงในการเติมอากาศ โดยจุลินทรีย์กลุ่มโรติเฟอร์จะใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้ค่าความต้องการออกซิเจนลดลงหลังจากนั้นน้ำเสียถูกส่งไปยังถังตกตะกอน โดยตะกอนของแข็งจมลงสู่ก้นถัง และถูกส่งเข้าสู่ถังเติมอากาศอีกครั้ง ทำให้ตะกอนมีความเข้มข้นมากขึ้น เมื่อตะกอนมีความเข้มข้นมากถูกส่งไปยังถังควบคุมตะกอนที่มีขนาด 4 m³ ส่วนน้ำใสด้านบนของถังตกตะกอนไหลลงเข้าสู่ถังฆ่าเชื้อโรค โดยทำการเติมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ (NaOCl) 10 % เพื่อฆ่าเชื้อโรคน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วถูกส่งไปยังบ่อพักน้ำซึ่งมีขนาด 80 m³ จากนั้นส่งเข้าสู่ถังปรับพีเอชในโรงบำบัดน้ำเสียรวม

2.1.3 โรงบำบัดน้ำเสียรวม

โรงบำบัดน้ำเสียรวมรองรับน้ำเสียที่มาจากโรงบำบัดน้ำเสียทั้งสอง เพื่อนำมาบำบัดก่อนปล่อยลงสู่ทะเลมีความจุ 100 m³ ต่อชั่วโมงน้ำเสียจากบ่อพักน้ำของโรงบำบัดทั้งสองถูกส่งไปยังถังปรับพีเอชโดยปั๊ม มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เมื่อน้ำเป็นกรด และเติมกรดซัลฟิวริก (H₂SO₄) เมื่อน้ำเสียเป็นด่าง และทำการเติม PAC ลงไปเพื่อเร่งการตกตะกอน น้ำจากถังปรับพีเอชไหลลงไปยังถังสร้างตะกอน ซึ่งในถังสร้างตะกอนมีการเติมพอลิเมอร์ลงไปเพื่อให้เกิดตะกอนน้ำเสีย น้ำเสียถูกส่งไปยังบ่อตกตะกอน และเกิดตะกอนในถังตกตะกอน โดยตะกอนที่ได้ถูกส่งไปยังบ่อตะกอนขึ้น ส่วนน้ำด้านบนถึงถูกส่งไปปรับพีเอชอีกครั้ง ทำการตรวจค่าพีเอชและค่าความขุ่น (ค่าพีเอช 5.5 - 9.0 และค่าความขุ่นน้อยกว่า 50 NTU) ส่วนกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียรวม โรงบำบัดน้ำเสียบริเวณถ่านหิน และโรงบำบัดน้ำเสียจากอาคาร โรงไฟฟ้า ถูกนำมาแยกน้ำออกจากกากตะกอน น้ำที่แยกได้ถูกส่งไปยังบ่อปรับค่าพีเอช ส่วนตะกอนที่ถูกแยกน้ำออกแล้วถูกส่งไปบำบัดที่อื่น

2.2 กากตะกอน

โรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทมีการใช้น้ำในกระบวนการผลิต เมื่อกระบวนการผลิตเสร็จสิ้นน้ำเหล่านี้จะถูกรวบรวมเข้าสู่ระบบบำบัดของโรงงาน ทำให้มีกากตะกอนน้ำเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งสมบัติและปริมาณของกากตะกอนแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับประเภทของแหล่งกำเนิดและชนิดของระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งกากตะกอนแต่ละประเภทมีลักษณะดังนี้ (Outwater, 1994)

- กากตะกอนจากถังตกตะกอนขั้นต้นมีสีเทา คล้ายโคลน และมีกลิ่นเหม็น ซึ่งเหมาะต่อการย่อยสลายในสภาวะที่เหมาะสม

- กากตะกอนจากถังตกตะกอนเคมีมีสีดำ ถ้ามีเหล็กมากกากตะกอนมีสีแดง ค่อนข้างเหลว กลิ่นเหม็นแต่ไม่มากเท่ากากตะกอนจากถังตกตะกอนขั้นต้น แต่การไฮเดรตของเหล็กและอลูมิเนียมสามารถทำให้เกิดเจลได้ ย่อยสลายช้ากว่ากากตะกอนจากถังตกตะกอนขั้นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการอ้างอิงเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กากตะกอนจากระบบ Activated sludge มีลักษณะเป็นปุ๋ย สีดำคล้ำ เหมาะต่อการหมักกากตะกอนที่ผ่านการเติมอากาศมีสีไม่คล้ำมากมีแอมโมเนียในการจมตัวช้า กลิ่นไม่เหม็นมากนัก แต่ถ้ากากตะกอนนั้นมีการหมักตัวเป็นเวลานานสามารถทำให้มีกลิ่นเหม็นนำได้

- กากตะกอนจากระบบ Trickle filter มีสีน้ำตาลอ่อน ไม่ค่อยมีอันตราย ย่อยสลายได้ช้ากว่ากากตะกอนชนิดอื่น แต่เติมไปด้วยหนอง

- กากตะกอนจากระบบ Digested sludge มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ และมีปริมาณของก๊าซมากเมื่อย่อยแล้วทำให้กลิ่นอ่อนลง

2.3 การนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์

การนำกากตะกอนกลับมาใช้ประโยชน์เป็นแนวทางการจัดการของเสียที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป โดยสามารถลดปริมาณกากตะกอนจากการลดที่แหล่งกำเนิดได้ สามารถลดขั้นตอนการจัดการหรือลดภาระในการกำจัด เป็นการเพิ่มมูลค่าทรัพยากร ให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์จากการใช้วัตถุดิบน้อยลง และประโยชน์ในทางสิ่งแวดล้อมจากการอนุรักษ์ธรรมชาติ กากตะกอนน้ำเสียที่นำมาใช้ต้องมีสารต่างๆ ในระดับที่ต่ำและไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนและสิ่งแวดล้อม ซึ่งต้องทำการวัดระดับของสารปนเปื้อนในกากตะกอน ในการสูมตัวอย่างกากตะกอนเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะผลที่ได้นั้นสะท้อนถึงคุณภาพของกากตะกอนทั้งหมดพารามิเตอร์ในการวัดคุณภาพของกากตะกอนแสดงดังตารางที่ 2.1 โดยอาจวัดทุกๆ เดือน ปีละสองหน หรือเป็นรายปีก็ได้ (Outwater, 1994) การนำกากตะกอนกลับมาใช้ประโยชน์มีหลายวิธี ดังนี้

2.3.1 การใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน โดยกากตะกอนนั้นต้องมีสมบัติที่เหมาะสม สามารถเป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิต เช่น การใช้เถ้าขานอ้อยเป็นวัสดุป้อนโซลานในงานคอนกรีต เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีซิลิกอนไดออกไซด์ในปริมาณสูง ดังตารางที่ 2.2 (ชัย และคณะ, 2555)

2.3.2 การใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน เป็นทางเลือกหนึ่งในการกำจัดกากตะกอนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทั้งสอดคล้องกับข้อกำหนดในการกำจัดกากตะกอน ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงด้านความร้อนและชีวภาพ (Thermal and biological conversion processes) ได้พลังงานในรูปพลังงานความร้อน เชื้อเพลิงและก๊าซชีวภาพ เช่น การเผาไหม้ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถทำลายสารพิษในกากตะกอน และมีความเป็นไปได้ในการนำพลังงานกลับมาใช้ ค่าความร้อนของกากตะกอนแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2.3 อย่างไรก็ตามยังมีข้อกังวลเกี่ยวกับการปล่อยก๊าซพิษ อุณหภูมิในการเผาไหม้กรณีกากตะกอนมีความชื้นสูง ค่าใช้จ่ายในการเผา และเครื่องมือในการควบคุมอากาศ (Fytilli and Zabaniotou, 2006) เช่น การใช้กากตะกอนน้ำมันดิบร่วมกับขยะที่ผ่านการบำบัดด้วยกรรมวิธีเชิงกลชีวภาพ (Mechanical Biological Treatment: MBT) ในการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่ง หรือ Refuse Derived Fuel 5: RDF-5 (สมชาย, 2551)

2.3.3 การใช้ประโยชน์ด้านเกษตรกรรม กากตะกอนน้ำเสียที่มีไนโตรเจนและฟอสฟอรัสนั้นสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยให้กับพืชได้ แต่กากตะกอนน้ำเสียนั้นอาจมีโลหะหนักซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร ดังนั้นการนำกากตะกอนมาใช้ทางการเกษตรจึงต้องนำไปบำบัดก่อนนำมาใช้ โดยปริมาณของโลหะหนักต้องต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการนำกากตะกอนมาใช้ทางการเกษตรยังมีข้อจำกัดอยู่ เนื่องจากกากตะกอนมีการผลิตขึ้นตลอดทั้งปีและมีปริมาณมาก ในขณะที่การใช้กากตะกอนใช้เพียงหนึ่งถึงสองครั้งต่อปี จึงจำเป็นต้องเก็บกากตะกอนไว้ และยังไม่เป็นที่ยอมรับเช่นการใช้กากตะกอนของโรงไฟฟ้ามาปลูกต้นรำเพย โดยมีดินร่วนปนทราย ขุยมะพร้าว และปุ๋ยคอกเป็นวัสดุปลูก (ภาพตะวัน และคณะ, 2554) การสกัดกรดอะมิโนจากแบคทีเรียจากกากตะกอนน้ำเสียเพื่อใช้ในการผลิตปุ๋ย โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีหลายอย่าง (Liu. et. al., 2009)

2.3.4 การใช้ประโยชน์ด้านการปรับปรุงพื้นที่ การนำของเสียมาปรับปรุงพื้นที่ คือ การนำเอาของเสียทั่วไปเศษวัสดุจากการก่อสร้าง หรือทำลายอาคาร กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแล้ว และกากของเสียอื่นๆ ที่เกิดจากขบวนการเผาไหม้และหมักทำปุ๋ยชีวภาพมาใช้ปรับปรุงพื้นที่ เช่น ถมพื้นที่ที่เป็นหลุม เป็นบ่อถมถนนที่มีความลาดเอียงถมพื้นที่ที่ต้องการยกระดับความสูงเมื่อถมกากของเสียหรือขยะในพื้นที่ดังกล่าวแล้ว สามารถนำพื้นที่นั้นๆ ไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ปลูกต้นไม้ สร้างสวนสาธารณะ หรือสถานที่พักผ่อนหย่อนใจและปลูกสร้างอาคารที่มีความสูงไม่มากนัก

2.3.5 การทำเป็นก้อนแข็ง เป็นการประยุกต์เพื่อใช้ประโยชน์กากตะกอน โดยการนำมาผสมกับสารทำเป็นก้อนแข็ง เช่น ซีเมนต์ โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate) และปูนขาว เป็นต้น มีการเติมทราย น้ำ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มความแข็งแรง โดยสามารถทำเป็นตัวหนอนทางเท้า อิฐ ซีเมนต์บล็อก พื้นคอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น อีกทั้งสารจำพวกซีเมนต์ทำให้ค่าพีเอชของก้อนแข็งสูงขึ้น ช่วยลดการชะละลายของโลหะต่างๆ ได้ อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาการชะละลายของสารปนเปื้อนที่เป็นอันตราย และสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีตอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมบัติของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ

พารามิเตอร์	ก	ข	ค	ง	จ
1. ความชื้น (%)	-	41.0	80.0	7.55	7.11
2. ค่าความร้อน (Kcal/g)	-	-	-	-	2.82
3. พีเอช	6.0	7.27	-	6.25	-
4. การนำไฟฟ้า (mS/cm)	-	-	-	0.297	-
5. อินทรีย์วัตถุ (%)	-	-	-	14.46	-
6. ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cmol/Kg)	-	-	-	24.91	-
7. ไนโตรเจนรูปที่เป็นประโยชน์ (mg/Kg)	-	-	-	13.58	-
8. ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (mg/Kg)	-	-	-	296.28	-
9. โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ (mg/Kg)	-	-	-	36.94	-
10. ซัลเฟอร์ (%)	-	-	-	-	0.36
11. แคลเซียม (mg/Kg)	4	5	3.16	3.96	2.60
12. โครเมียม (mg/Kg)	1,197	1713	26.33	1.45	-
13. ทองแดง (mg/Kg)	5,010	212	187.97	19.13	-
14. นิกเกิล (mg/Kg)	774	1131	37.93	26.55	-
15. ตะกั่ว (mg/Kg)	310	35	61.08	2.8	23.4
16. สังกะสี (mg/Kg)	2,950	628	612.50	2.96	-
17. เหล็ก (mg/Kg)	28,106	-	568.48	-	-
18. สารหนู (mg/Kg)	-	-	15.85	-	0.0029
19. พรอท (mg/Kg)	-	-	3.87	-	0.0026

หมายเหตุ ก : การใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนในการผลิตอิฐ (Lin.*et. al.*, 2001)

ข : การใช้กากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมในการผลิตอิฐ (Weng.*et. al.*, 2003)

ค : การใช้กากตะกอนน้ำเสียชุมชนในการสกัดกรดอะมิโนในการผลิตปุ๋ย (Liu. *et. al.*, 2009)

ง : การใช้กากตะกอนน้ำเสียจากโรงไฟฟ้าในการเกษตร (ภาพตะวัน และคณะ, 2554)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
(ประวีรญา, 2546)

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าขานอ้อย

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าขานอ้อย จากจังหวัดลพบุรี	เถ้าขานอ้อย จากจังหวัดราชบุรี
Silicon dioxide (SiO ₂)	20.80	59.30	67.10
Aluminium oxide (Al ₂ O ₃)	5.50	4.50	4.50
Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	3.16	3.40	2.40
Calcium oxide (CaO)	64.97	14.80	3.60
Magnesium oxide (MgO)	1.06	1.80	2.10
Potassium oxide (K ₂ O)	0.55	2.70	4.30
Sulfur trioxide (SO ₃)	2.96	1.60	1.60

ที่มา : ชัย และคณะ, 2555

ตารางที่ 2.3 ค่าความร้อนของกากตะกอนน้ำเสียแต่ละประเภท

ประเภทกากตะกอน	ค่าความร้อน (MJ / Kg of DS)
1. กากตะกอนดิบ	23 – 29
2. กากตะกอนจากถังตกตะกอนเคมี	14 – 18
3. กากตะกอนจากระบบ Activated sludge	16 – 23
4. กากตะกอนจากระบบ Digested sludge	9 – 13
5. กากตะกอนจากระบบ Biological filter sludge	16 – 23

ที่มา : Fytili and Zabaniotou, 2006

2.4 โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 4 K g/dm³ ซึ่งโลหะหนักมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมอย่างมากและยังเป็นต้นกำเนิดโลหะผสมอีกหลายชนิด ซึ่งมีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิต โลหะหนักเป็นสารที่คงตัวไม่สามารถสลายตัวได้ในกระบวนการธรรมชาติ จึงมีบางส่วนตกตะกอนสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมโลหะหนักมีความเป็นพิษแตกต่างกัน ดังนี้ (ชวลิต, 2542)

แคดเมียมมีความหนาแน่น 8.6 Kg/dm³ จุดหลอมเหลว 320 °C มีความแข็ง ทนต่อการกัดกร่อน ใช้ในอุตสาหกรรมชุบผิวเหล็กและอลูมิเนียม ซึ่งเมื่อชุบแล้วจะมีความต้าน เมื่อแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายจะสะสมในร่างกายและปริมาณการสะสมเพิ่มขึ้นตามอายุ มีการประมาณการว่าคนทั่วไปที่มีอายุ 50 ปีมีปริมาณการสะสมในร่างกาย 10 - 60 mg ส่วนเด็กแรกเกิดมีแคดเมียมในร่างกายเพียง

1 mg การสะสมแคดเมียมในร่างกายในปริมาณสูงทำให้คนหรือสัตว์เป็นหมันและเป็นมะเร็งได้นอกจากนี้แล้วยังทำให้เกิดโรคความดันโลหิตสูง

โครเมียมมีความหนาแน่น 6.8 Kg/dm³ จุดหลอมเหลว 1,900 °C ทนต่อการกัดกร่อนและการสึกหรอ สามารถนำไปใช้ในการเคลือบผิวป้องกันสนิม ใช้ทำวัสดุผสมกับเหล็กเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม และใช้เป็นสารเคมีฟอกหนัง โครเมียมทำให้เกิดอาการคันที่ผิวหนัง เป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

ทองแดงมีความหนาแน่น 8.9 Kg/dm³ จุดหลอมเหลว 1,083 °C สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี ทนต่อการสึกหรอและการกัดกร่อน ใช้ทำสายไฟฟ้า เครื่องใช้ไฟฟ้า หัวเร่งบังคับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์ เป็นต้น เมื่อทองแดงอยู่ในรูปของสารประกอบ เช่น คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO₄) สามารถเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ มีอาการอาเจียน เกิดเหน็บชา และสลัดได้

ตะกั่วมีความหนาแน่น 11.2 Kg/dm³ จุดหลอมเหลว 327 °C สามารถนำไปใช้ทำแผ่นตะกั่วในหม้อแบตเตอรี่ โลหะหุ้มสายเคเบิล ฉากป้องกันกัมมันตภาพรังสีต่างๆ ใช้ในอุตสาหกรรมสี ตะกั่วมีความทนต่อการกัดกร่อนของกรด สารประกอบของตะกั่วมีพิษต่อร่างกาย ถ้าร่างกายรับตะกั่วเข้าไปในทันทีทันใดจะทำให้เกิดอาการเป็นพิษอย่างเฉียบพลัน เช่น ปวดท้องรุนแรง อุจจาระมีสีดำ เกิดอาการช็อก ตื่นเต้นง่าย ความจำเสื่อม

เงินมีความหนาแน่น 10.5 Kg/dm³ จุดหลอมเหลว 960 °C นำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีที่สุด ทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดอินทรีย์และโซดาไฟ มนุษย์สามารถรับอันตรายจากเงินได้ทางผิวหนัง การสูดดมการกลืนกิน และดวงตา

สังกะสีมีความหนาแน่น 7.1 Kg/dm³ จุดหลอมเหลว 419 °C สังกะสีมีความทนทานต่อสภาพบรรยากาศ ไม่เกิดการกัดกร่อนแต่ไม่ทนต่อกรดและเกลือ มีการนำสังกะสีไปใช้ในการผลิตชิ้นส่วนต่างๆ เช่น เหล็กแผ่น ลวด ท่อประปา ชิ้นส่วนวิทยุ - โทรทัศน์ เป็นต้น สังกะสีในรูปธาตุไม่ปรากฏความเป็นพิษ แต่มีความเป็นพิษเมื่ออยู่ในรูปสารประกอบ

2.5 การปรับเสถียรและการหล่อแข็ง (Stabilization and Solidification)

การปรับเสถียรและการหล่อแข็งเป็นกระบวนการปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของของเสียและของเสียอันตราย โดยการหล่อแข็งเป็นการเติมวัสดุประสานลงไปของเสียเพื่อทำให้เกิดเป็นก้อนแข็ง ซึ่งอาจเกิดหรือไม่เกิดพันธะทางเคมีระหว่างของเสียและวัสดุประสานได้ ส่วนการปรับเสถียรเป็นการเปลี่ยนของเสียให้อยู่ในรูปทางเคมีที่คงตัวมากขึ้น เพื่อให้มีสมบัติเป็นสารที่ไม่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาหรือสารเนื่อมากขึ้น แต่จะหมายรวมเฉพาะการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เปลี่ยนสารที่มีพิษไปอยู่ในรูปใหม่ที่คงตัว เพื่อสะดวกต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย ลดความเป็นพิษของสารลดอัตราการเคลื่อนตัวของสาร ลดอัตราการละลาย (Solubility) การชะละลายของสารอันตราย (Leaching) ออกสู่สิ่งแวดล้อม (ประภัสสร, 2551)

การปรับเสถียรและการหล่อแข็งไม่ได้เหมาะสมกับของเสียนั้นทุกรายทุกชนิด โดยทั่วไปเหมาะที่จะเป็นทางเลือกในการบำบัดของเสียนั้นที่เป็นสารอินทรีย์/สารระเหย หรือสารอินทรีย์ที่ไม่ระเหย เทคนิคในการหล่อแข็งเพื่อการบำบัดมีหลายเทคนิค ซึ่งในแต่ละเทคนิคจะมีวิธีการที่ต่างกันไปเพื่อความเหมาะสมกับชนิดของวัสดุประสานและชนิดของของเสียที่ต้องการบำบัด ดังนี้

- ก) Cement - based techniques ของเสียถูกผสมลงในปูนซีเมนต์ น้ำ และส่วนผสมอื่นๆ แล้วปล่อยให้แห้งจนแข็งตัวเป็นก้อนซีเมนต์
- ข) Lime - based techniques ของเสียถูกผสมกับปูนขาวและวัสดุที่มีสมบัติเป็นปอชโซลาน เช่น ถ้ำลอย ผงซีเมนต์ที่เตาเผา ซึ่งสามารถแข็งตัวได้เมื่อผสมกับน้ำ
- ค) Thermoplastic techniques นำของเสียมาทำให้แห้ง ให้ความร้อนแล้วผสมสารกระจายตัวอยู่ในพลาสติกที่ร้อน เช่น พาราฟินหรือ พอลิเอทิลีนแล้วปล่อยให้ส่วนผสมเย็นตัวลงและแข็งตัว
- ง) Thermosetting techniques ของเสียในขั้นแรกถูกผสมกับพอลิเมอร์ (Gelling agent เช่น Urea formaldehyde) จากนั้นเติมสารคะคาติสต์ผสมให้เข้ากันก่อนที่สารพอลิเมอร์แข็งตัว
- จ) Encapsulation techniques ของเสียถูกอัดให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคในการหล่อแข็ง

เทคนิคในการหล่อแข็ง	ข้อดี	ข้อเสีย
1. Cement – based techniques	<ul style="list-style-type: none"> - วัสดุที่ใช้มีราคาถูก - มีความทนทานต่อสภาพความเปลี่ยนแปลงทางเคมี - กำจัดของเสียจำพวกโลหะได้ดี - เป็นเทคโนโลยีที่ได้มีการพัฒนาอย่างดีแล้ว 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดสามารถทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ
2. Lime – based techniques	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้วัสดุผสมราคาถูก - เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาอย่างดีแล้ว - การใช้เถ้าลอยมาเป็นส่วนผสมเป็นการกำจัดของเสีย 2 ชนิดโดยกระบวนการเดียวกัน 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่เป็นสารอินทรีย์บางชนิดสามารถทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ซีเมนต์และของเสียที่แข็งตัวถูกชะละลายได้ในสภาวะที่มีค่าพีเอชต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและขนาดของของเสีย รวมทั้งเพิ่มค่าใช้จ่ายในการขนส่งและการฝังกลบ
3. Thermoplastic techniques	<ul style="list-style-type: none"> - สามารถลดการรั่วไหลของสารเคมี - สารละลายที่ใช้ชะล้างมีผลต่อผลิตภัณฑ์น้อยมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพง และใช้แรงงานที่มีความชำนาญ - ของเสียชนิดเปียกจะเป็นตัวลดประสิทธิภาพของกระบวนการ - ไม่สามารถใช้กับสารพวก ออกซิเจน, ดีไฮเดรตซอลท์หรือตัวทำละลายพวกเทอร์โมพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคในการหล่อแข็ง (ต่อ)

เทคนิคในการหล่อแข็ง	ข้อดี	ข้อเสีย
4. Thermosetting techniques	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้สารปริมาณน้อยในการทำให้เกิดพอลิเมอร์ - ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียจะถูกยึดไว้ในพอลิเมอร์อย่างหลวมๆ - โลหะสามารถละลายได้มากในสารที่มีพีเอชต่ำ - การย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์บางตัวทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับที่ฝังกลบ
5. Encapsulation techniques	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตภัณฑ์ที่ได้ป้องกันน้ำได้ดี - ไม่มีการชะล้างของของเสียออกมา เมื่อสารที่ห่อหุ้มอยู่ไม่ถูกทำลาย - ค่าใช้จ่ายในรอบการใช้งานต่ำกว่าวิธีอื่น 	<ul style="list-style-type: none"> - การชะล้างของของเสียจะเกิดหากสารที่ห่อหุ้มถูกทำลาย - ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในกรณีที่กำลังจัดของเสียจำนวนมาก
6. Self-cementing	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องมีการเติมสารช่วยให้ซีเมนต์แข็งตัวเร็วมาก 	<ul style="list-style-type: none"> - สารอินทรีย์บางชนิดสามารถทำลายการแข็งตัวของซีเมนต์ - ส่วนผสมของซีเมนต์และของเสียที่ไม่ได้มีการห่อหุ้มสามารถถูกย่อยสลายและถูกชะล้างได้ ภายใต้สภาวะที่มีพีเอชต่ำ - เพิ่มน้ำหนักและขนาดของของเสียในการขนส่งและค่าใช้จ่ายในการฝังกลบ - ต้องการเครื่องมือที่มีราคาแพงและแรงงานที่มีความชำนาญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำมาใช้

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคในการหล่อแข็ง (ต่อ)

เทคนิคในการหล่อแข็ง	ข้อดี	ข้อเสีย
		- ของเสียที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือซัลเฟตสูงใช้วิธีนี้ไม่ได้
7. Vitrification	<ul style="list-style-type: none"> - ของเสียที่ถูกหลอมด้วยแก้วถูกชะละลายได้น้อยมาก - การบรรจุหรือห่อหุ้มอยู่ในเกณฑ์ดี - ใช้วัสดุที่มีราคาสูง 	<ul style="list-style-type: none"> - อุณหภูมิสูงอาจทำให้ของเสียอื่นระเหยออกมา - ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากสำหรับการให้ความร้อนอุปกรณ์ และต้องการผู้เชี่ยวชาญเฉพาะ - ค่าใช้จ่ายสูงมากสำหรับการกำจัดของเสียทุกชนิด ยกเว้นสารประเภทกัมมันตรังสีและสารที่มีพิษมาก

ที่มา : นฤมล, 2544

2.5.1 กลไกการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง

กลไกของการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง อาศัยกลไกทางกายภาพและทางเคมีที่ส่งผลให้ของเสียอันตรายถูกปกปิดหรือถูกยึดเกาะติดจนแน่นไม่สามารถหลุดออกมาได้ กลไกต่างๆ อาจมีได้ดังต่อไปนี้

1. Microcapsulation ของเสียจะอยู่ในแคปซูล และจะถูกบรรจุไว้ในโครงสร้างผลึกในระดับเล็กมากหรือเรียกว่า Microscopic ของเสียอันตรายถูกย่อยสลายจนได้ขนาดเล็กมากๆ

2. Macroencapsulation ของเสียจะอยู่ในแคปซูลและจะถูกบรรจุไว้ในโครงสร้างในระดับที่ใหญ่กว่าของ Microcapsulation พวกของเสียอันตรายถูกบรรจุภายในแคปซูลด้วยกลไกทางกายภาพมีการแตกสลายในเชิงกายภาพ มีขนาดใหญ่แต่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อิสระ

3. Adsorption เป็นการดูดซับ หรือการดูดติดผิว บนพื้นผิวของแข็ง ซึ่งเป็นการดักทางกายภาพ มีการยึดเกาะกันแบบเคมีไฟฟ้า (Electrochemical bond) โดยวัสดุหรือการปรับเสถียรที่เกิดแรงยึดแบบ Hydrogen bonding หรือแบบ Van der waal ทำให้การรั่วไหลหรือหลุดออกจากผิวของแข็งมีน้อยกว่าของ Macroencapsulation และของ Microcapsulation ซึ่งเป็นจุดเด่นของวิธีนี้

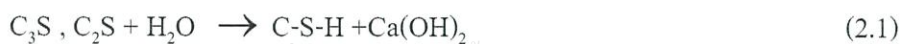
4. Absorption เป็นการดูดซึมหรือการดูดกลืน ของเสียนอันตรายจะถูกดูดซึมเข้าไปอยู่ในตัวดูดซึม คล้ายกับฟองน้ำดูดน้ำเข้าไป วิธีนี้จะใช้สารหรือตัวดูดซึมชนิดต่างๆ ทำการดูดของเหลวออกจากของเสียนอันตราย ทำให้ของเสียนอันตรายอยู่ในสภาพของแข็งมากขึ้น หรือเพิ่มค่าปริมาณของแข็งมากขึ้น ตัวดูดซึมได้แก่ ดิน เถ้าลอย (Fly ash) ผงฝุ่นซีเมนต์ (Cement kiln dust) ผงฝุ่นปูนขาว (Lime kiln dust) ขี้เถ้า หญาฟาง ฟางข้าว เป็นต้น ยังรวมไปถึง Bentonite, Kaolinite, Vermiculite และ Zeolite

5. Precipitation การตกตะกอนผลึกหรือการนำของเสียนอันตรายซึ่งโดยมากเป็นของเสียนอนินทรีย์มาผสมรวมกับสารเคมีที่ทำให้เกิดตะกอนผลึก ถ้าอยู่ในสถานะที่เหมาะสม เช่น มีพีเอชที่เหมาะสม ในที่นี้จะเป็นตะกอนผลึกอนินทรีย์เป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ Hydroxides, Sulfides, Silicates, Carbonates, Phosphates เป็นต้น โดยทั่วไปจะเป็นการกำจัดโลหะหนักด้วยการปรับพีเอช ให้สูงหรือให้เหมาะสมต่อการตกตะกอนผลึก ถ้าตะกอนผลึกนี้มีพีเอชลดลง เช่น ได้ผสมกับกรดจะเกิดปัญหาของเสียนอันตรายหรือสารโลหะหนักละลายออกมาจากผลึก สร้างปัญหาให้สิ่งแวดล้อมต่อไป

6. Detoxification การกำจัดสารพิษหรือความเป็นพิษออกจากของเสียนอันตรายด้วยการเปลี่ยนแปลงจากปฏิกิริยาเคมี เช่น ทำการเปลี่ยนจาก Cr(IV) ซึ่งมีความเป็นพิษมากให้เป็น Cr³⁺ ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยลง ในการเปลี่ยนจาก Cr(IV) ให้เป็น Cr³⁺ อาจใช้ Ferrous sulfate เพียงอย่างเดียว หรือ Ferrous sulfate ร่วมกับ Sodium sulfate ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน

2.5.2 กลไกการตรึงโลหะหนัก

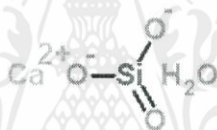
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของปูนซีเมนต์ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว ปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสารประกอบในปูนซีเมนต์ ผลผลิตของปฏิกิริยาไฮเดรชันประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate: C-S-H) ร้อยละ 50 – 90 โดยปริมาตรซึ่งมีหน้าที่เป็นตัวประสาน และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ [Ca(OH)₂] ประมาณร้อยละ 20 – 25 โดยปริมาตร มีคุณสมบัติเป็นด่าง ช่วยป้องกันการเกิดสนิมในเหล็กเสริม เป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีก ถ้ามีสารประกอบที่เหมาะสมร่วมทำปฏิกิริยา เช่น วัสดุปอซโซลาน (นฤมล, 2544) โดยเมื่อมีการเติมวัสดุปอซโซลาน ซึ่งมีองค์ประกอบของซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหลัก มาใช้ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้น มีผลทำให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้น ช่วยเสริมสร้างคอนกรีตให้มีความแข็งแรง ทนทานมากขึ้น (ชัย และคณะ, 2555)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอ้างอิงเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อไอออนของโลหะหนักในของเสียผสมกับซีเมนต์และน้ำ มีความเป็นไปได้ที่ไอออนจะเข้าไปผสมรวมระหว่างเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปฏิกิริยาของไอออนของโลหะหนักในของเสียที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของซีเมนต์มีหลายแบบ เช่น การดูดซับทางเคมี การตกตะกอน การเกิดสารประกอบบนผิวของซีเมนต์ หรือการผสมรวมเข้าไปอยู่ภายในโครงสร้างของซีเมนต์ หรืออาจเกิดหลายๆ แบบพร้อมๆ กันได้ซึ่งเป็นการจับในรูปออกไซด์เดี่ยว หรือออกไซด์รวม

การปรับเสถียรและการหล่อแข็งของโลหะโดยใช้ปูนซีเมนต์ พบว่า การหล่อแข็งมีผลทำให้ตะกั่ว (Pb) ตกตะกอนบนผิวของไฮเดรต ซึ่งเป็นผลของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้โครเมียม (Cr) ผสมเข้าไปอยู่ในไฮเดรตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate: C-S-H) ทำให้แคลเซียม (Ca) เข้าไปอยู่ใน Portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] โดยแคลเซียมเข้าไปแทนที่แคลเซียมและเกิดเป็น $\text{CdCa}(\text{OH})_2$ สำหรับสังกะสี (Zn) สังกะสีเข้าไปอยู่ในอนุภาคของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ด้วยกลไกการดูดซับบนผิวของผลึก ส่วนนิกเกิลอยู่ในรูป $\text{Ni}(\text{OH})_2$ gel ซึ่งผสมอยู่กับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต อย่างไรก็ตามผลของการปรับเสถียรและการหล่อแข็งโลหะหนัก ขึ้นกับปริมาณไฮเดรตที่เกิดขึ้น (ประภัสสร, 2551)



รูปที่ 2.1 แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต(Calcium silicate hydrate: C-S-H)

2.6 มอร์ตาร์(Mortar)

มอร์ตาร์ หมายถึง ของผสมที่ได้จากการผสมวัสดุประสานและมวลรวมละเอียดเข้าด้วยกัน และอาจมีสารผสมเพิ่มหรือสีด้วยก็ได้ เมื่อนำไปใช้งานต้องนำไปผสมน้ำให้ขึ้นเหลวตามวัตถุประสงค์ของงาน โดยให้มีความข้นเหลวที่พอเหมาะตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 1776-2542 ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของมอร์ตาร์ควรมีลักษณะ ดังนี้

- ต้องมีความข้นเหลวที่เหมาะสม ใช้งานได้รวดเร็ว ระยะเวลาการก่อตัวเหมาะสมกับแต่ละประเภทของงาน ไม่ช้าหรือเร็วเกินไป

- สามารถอุ้มน้ำได้ดี เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุก่อหรือผนังที่ฉาบดูน้ำจากมอร์ตาร์มากเกินไป

- สามารถยึดเกาะกับวัสดุก่อหรือผนังฉาบได้ดี

- สามารถทนต่อการขัดถูของเกรียงเพื่อทำให้ผิวหน้าเรียบได้

- มีปริมาณอากาศที่เหมาะสม ถ้าปริมาณอากาศมากเกินไปจะทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อผู้แต่งและเนื้อหาเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีค่าการขยายตัวและหดตัวใกล้เคียงกับวัสดุที่นำมาก่อเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น ไม่ยึดหดตัวมากจนเกิดการแตกร้าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้น เมื่อแข็งตัวแล้วสามารถป้องกันอุณหภูมิและความชื้นได้ดี และมีความสวยงาม

2.7 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ซีเมนต์ (Cement) โดยทั่วไปหมายถึงวัสดุประสานซึ่งสามารถยึดวัสดุชิ้นเล็กๆ เข้าด้วยกัน คำว่าซีเมนต์นี้ยังรวมถึงสารซีเมนต์หลายประเภท แต่สำหรับงานด้านวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้างซีเมนต์หมายถึงวัสดุผงละเอียดสีเทาหรือเทาเข้ม เมื่อผสมน้ำจะสามารถใช้เป็นวัสดุประสานยึดวัสดุประเภท อิฐ หิน และทรายเข้าด้วยกัน (ปริญญา, 2547)

2.7.1 ประวัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่นับได้ว่าเป็นต้นแบบสำหรับการผลิตปูนซีเมนต์ได้คิดค้นขึ้นโดย แอล เจ ไวแคต (L. J. Vicat) ในปี พ.ศ. 2356 (ค.ศ. 1813) โดยการเผาส่วนผสมของหินชอล์ก (Chalk) และดินเหนียวที่ผ่านการบดละเอียด ต่อมาโจเซฟแอสพดิน (Joseph Aspdin) ช่างก่อสร้างชาวเมืองลีดส์ (Leeds) ได้จดสิทธิบัตรการผลิต “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)” ขึ้นเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2367 (ค.ศ. 1824) ซึ่งกระบวนการผลิตประกอบด้วยการใช้หินปูนที่ใช้ซ่อมถนนนำมาทุบให้แตกผสมร่วมกับปูนขาวและดินเหนียว บดให้ละเอียดในน้ำจนกลายเป็นน้ำโคลนข้น (Slurry) จากนั้นนำก้อนปูนขาวผสมดินเหนียวขนาดย่อมส่งเข้าไปเผาในเตาเผา (Kiln) จนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระเหยออกไปหมดได้เป็นเม็ดปูนซีเมนต์ เม็ดปูนซีเมนต์ที่ได้จะนำไปบดละเอียดเพื่อนำไปใช้งานต่อไป โจเซฟแอสพดินได้เรียกปูนซีเมนต์ของเขาว่า “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์” เนื่องจากสีของปูนซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วจะคล้ายกับสีของหินที่ได้มาจากเหมืองหินที่ดอร์เซต (Dorset) เมืองปอร์ตแลนด์ อย่างไรก็ตามคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิตตามวิธีการนี้ยังไม่ดีนัก เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเผายังต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับเผาปูนซีเมนต์ในกระบวนการผลิตในปัจจุบัน

2.7.2 การผลิตปูนซีเมนต์

กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ในปัจจุบันแตกต่างจากเดิมบ้างแต่ยังคงใช้วัสดุหลักที่ใช้ในสมัยแรก และให้ความสำคัญที่คุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ผลิตและประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต การผลิตปูนซีเมนต์มีความแพร่หลายและได้รับความนิยมสูงเนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีปริมาณมากและสามารถหาได้ง่าย

1. วัตถุดิบ วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก คือ

- วัสดุธาตุปูน (Calcareous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม (Calcium) ได้แก่ หินปูน (Limestone) และหินชอล์ก (Chalk)

- วัสดุอาซิลลาเซียส (Argillaceous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (Silicon) และอลูมิเนียม (Aluminium) ได้แก่ ดินเหนียว หินเชลหรือหินดินดาน (Shale) และหินชนวน (Slate)

ในบางครั้ง ดินที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีทั้งออกไซด์ของแคลเซียมและซิลิกอน ได้แก่ ดินมาร์ล (Marl) นอกจากนี้ การผลิตปูนซีเมนต์ยังต้องการวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide) ซึ่งได้จากดินลูกรัง (Laterite) ออกไซด์ของอลูมิเนียมและเหล็กช่วยให้ปฏิกิริยาในการเผาเกิดได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังต้องการยิปซัม (Gypsum) เพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวเร็วเกินไป โดยบดรวมกับปูนเม็ด (Clinker) ในขั้นตอนสุดท้าย

2. กระบวนการผลิตกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์แบ่งออกเป็นสองแบบ คือ กระบวนการผลิตแบบเปียก (Wet process) และกระบวนการผลิตแบบแห้ง (Dry process) เลือกระบวนการผลิตแบบใดขึ้นอยู่กับความชื้นของวัตถุดิบในสภาพธรรมชาติ ความแข็งของวัตถุดิบ และชนิดของวัตถุดิบ ที่ความชื้นช่วงหนึ่งการบดวัตถุดิบให้ละเอียดจะทำให้ยาก จำเป็นต้องขจัดความชื้นที่มีอยู่หรือเพิ่มน้ำให้มีปริมาณมากขึ้น ถ้าวัตถุดิบเป็นดินเหนียวจะมีความชื้นสูง ดังนั้นจึงใช้กระบวนการผลิตแบบเปียก หากวัตถุดิบเป็นหินปูนและหินเชลจะมีความชื้นค่อนข้างต่ำจึงควรใช้กระบวนการผลิตแบบแห้งในปัจจุบันนิยมกระบวนการผลิตแบบแห้งเพราะค่าใช้จ่ายถูกกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียกมาก เตาเผาของระบบแห้งมีขนาดเล็กกว่าระบบเปียก และพลังงานที่ใช้ในการเผาจะน้อยกว่าระบบเปียกมาก

ในกระบวนการผลิตแบบเปียก นำวัตถุดิบผสมกับน้ำตามสัดส่วนที่กำหนดโดยปกติถ้าใช้ดินเหนียวและหินชอล์ก ใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำประมาณ 1:3 จากนั้นบดส่วนผสมให้ละเอียดในหม้อบดละเอียดเปียก (Wash mill) นำน้ำโคลนชั้น (Slurry) ที่ได้ไปผ่านตะแกรงละเอียดแล้วส่งเข้าเตาเผาวัตถุดิบที่ป้อนเข้าเตาเผามีความชื้นประมาณร้อยละ 35 -50

ในกระบวนการผลิตแบบแห้ง นำวัตถุดิบมาบดให้เล็กลงในเครื่องย่อยขั้นต้น (Primary crusher) และเครื่องย่อยขั้นที่สอง (Secondary crusher) ตามลำดับจากนั้นจึงนำวัสดุไปบดละเอียดในหม้อบดวัตถุดิบ (Raw mill) แล้วผสมกันตามสัดส่วนที่ต้องการในไซโลผสมวัตถุดิบ (Blending silo) จากนั้นเพิ่มความร้อนของวัตถุดิบด้วยลมร้อนก่อนส่งเข้าเตาเผาในกรณีของกระบวนการผลิตแบบกึ่งแห้ง (Semi-dry process) นำวัตถุดิบไปทำเป็นเม็ด โดยการเติมน้ำเล็กน้อยและผ่านเข้าเครื่องทำเม็ด (Granulator) ทำให้วัตถุดิบจับเป็นก้อนกลมขนาดประมาณ 12 mm ทั้งนี้เพื่อให้การป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เตาเผาสะดวกขึ้นวัตถุดิบมีความชื้นประมาณร้อยละ 12 ดังนั้นเตาเผาของกระบวนการผลิตแบบแห้งและกึ่งแห้งจึงมีขนาดเล็กกว่าเตาเผาในกรณีกระบวนการผลิตแบบเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- สมบัติของสารประกอบหลักสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S), ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S), ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) เนื่องจากมีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 จึงเป็นตัวกำหนดสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ซึ่งแต่ละชนิดมีสมบัติต่างกันดังนี้ (ปริญญา, 2547)

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate: C_3S) สูตรทางเคมี $3CaO.SiO_2$ มีอยู่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 - 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมสี่เทาแก่ที่อุณหภูมิในเตาเผา $1,250^{\circ}C$ C_3S สามารถสลายตัวได้ ซึ่งการสลายตัวนี้ค่อนข้างช้าและเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า $700^{\circ}C$ C_3S จะมีเสถียรภาพและจะไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อผสม C_3S กับน้ำทำให้เกิดความร้อนปานกลางประมาณ $500 J/g$ ความร้อนที่คายออกมา เรียกว่า ความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชัน C_3S จะทำให้ปูนซีเมนต์รับกำลังได้เร็ว ให้กำลังสูง และเกิดความร้อนมาก

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate: C_2S) สูตรทางเคมี $2CaO.SiO_2$ มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 15 -35 C_2S บริสุทธิ์ มีอยู่ 4 รูปแบบ คือ αC_2S ซึ่งเกิดที่อุณหภูมิ $1,450^{\circ}C$ และเมื่อเย็นตัวลงจะแปรสภาพเป็น αC_2S ซึ่งเปลี่ยนเป็น βC_2S ที่อุณหภูมิต่ำลงและแปลงสภาพเป็น C_2S ที่อุณหภูมิปกติ แต่เนื่องจากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ C_2S อยู่ในสภาพที่ไม่บริสุทธิ์ สารแปลกปลอมอื่นและอัตราการลดลงของอุณหภูมิทำให้การแปลงสภาพจาก βC_2S เป็น C_2S ไม่เกิดขึ้น ดังนั้น βC_2S จะมีเสถียรภาพที่อุณหภูมิปกติ เมื่อผสมกับน้ำ สามารถทำปฏิกิริยาเกิดความร้อนขึ้น มีค่าประมาณ $250 J/g$ C_2S จะทำให้ปูนซีเมนต์รับแรงได้ช้าและเกิดความร้อนน้อย

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate: C_3A) สูตรทางเคมี $3CaO.AL_2O_3$ มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 7 -15 ลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยม มีสีเทาอ่อนปฏิกิริยากับน้ำมีความรุนแรงมากและทำให้ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวทันที ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงมากกว่า $880 J/g$ การพัฒนากำลังของ C_3A จะเร็วมากคือสามารถพัฒนาได้ภายในวันเดียวแต่กำลังประลัยที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ C_3S หรือ C_2S C_3A จะทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัวทันทีที่ผสมกับน้ำ ให้ความร้อนสูง โดยจะทำให้กำลังรับแรงเล็กน้อยในวันแรกและไม่ให้กำลังเพิ่มขึ้นตามเวลา แต่มีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาของ C_3S

4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalciumaluminoferrite: C_4AF) สูตรทางเคมี $3CaO.AL_2O_3.Fe_2O_3$ มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณร้อยละ 5-10 และอยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาและทำให้ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวอย่างรวดเร็วความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าปานกลางประมาณ $420 J/g$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สมบัติของสารประกอบรอง สารประกอบรอง หมายถึง สารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ที่นอกเหนือจากสารประกอบหลักทั้ง 4 อย่าง สารประกอบรองเหล่านี้มีอยู่ในจำนวนที่น้อยก็จริง แต่สารประกอบบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตทั้งขณะที่ยังไม่แข็งตัวและที่แข็งตัวแล้ว (ปริญา, 2547)

1. ยิปซัม (Gypsum) หรือ Calcium sulphate dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) มีการเติมยิปซัมในระหว่างการบดปูนซีเมนต์ เพื่อทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดเป็น Ettringite (Calcium trisulphoaluminate) เพื่อหน่วงการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A เป็นการควบคุมระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ ถ้าไม่ได้เติมยิปซัมปูนซีเมนต์จะก่อตัวอย่างรวดเร็ว ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ปูนซีเมนต์เกิดกำลังอัดสูงสุด และเกิดการหดน้อยที่สุด

2. ปูนขาวอิสระ (Free lime:CaO) โดยทั่วไปปูนซีเมนต์จะมีปูนขาวอิสระอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 - 1.0 เนื่องจากอุณหภูมิของการสลายตัวของ CaCO_3 ประมาณ 900°C แต่อุณหภูมิในการเผาปูนซีเมนต์สูง $1,400-1,600^\circ\text{C}$ จะทำให้ปูนขาวถูกเผาจนเกรียม เป็นผลทำให้ปูนขาวอิสระรวมตัวกับน้ำได้อย่างช้าๆ ซึ่งการรวมตัวของปูนขาวอิสระกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว การรวมตัวดังกล่าวทำให้เกิดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีปริมาณมากขึ้น พฤติกรรมนี้เรียกว่า ความไม่คงตัว สามารถทดสอบความไม่คงตัวได้โดยวิธีการทดสอบเลอชาเตอลิเออร์

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) วัตถุประสงค์สำหรับผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ผสมอยู่เล็กน้อย เมื่อเผาวัตถุดิบจะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะอยู่ในรูปผลึกและรวมตัวกับน้ำได้อย่างช้ามากกินเวลานานปีเช่นเดียวกับปูนขาวอิสระ การรวมตัวกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้วการมีแมกนีเซียมออกไซด์ผสมอยู่อาจทำให้เกิดความไม่คงตัว และเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างแมกนีเซียมกับน้ำช้ามาก ดังนั้นการทดสอบเพื่อหาความไม่คงตัวของแมกนีเซียมออกไซด์จะใช้วิธีการทดสอบอโตเคลฟ เพื่อเร่งปฏิกิริยาให้เกิดเร็วขึ้นซึ่งเป็นการวัดผลรวมของความไม่คงตัวที่เกิดจาก MgO และ CaO

4. ออกไซด์ของอัลคาไล ได้แก่ K_2O และ Na_2O มีอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 - 1.3 ในปูนซีเมนต์ แต่จะมีบทบาทสำคัญในกรณีที่มีมวลรวม ได้แก่ ทราย และหิน สามารถทำซึ่งปฏิกิริยากับอัลคาไลมวลรวมจำพวกนี้เป็นพวกซิลิกาที่ว่องไวและทำปฏิกิริยากับออกไซด์อัลคาไลได้ จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา” (Alkali Silica Reaction) ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดอัลคาไลซิลิกาเจล ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้เกิดคอนกรีตแตกร้าวได้ ในการแก้ปัญหานี้สามารถใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 0.06 โดยคิดเป็นค่าเทียบเท่าปริมาณของ Na_2O) หรือเลี่ยงการใช้มวลรวมที่มีซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา หรือใช้สารปอซโซลานในส่วนผสมของคอนกรีตเป็นต้น

5. ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) มีอยู่ในวัตถุดิบที่ใช้ทำปูนซีเมนต์บางแหล่ง ส่วนมากมาจากหินปูนและมักมีอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.1 ถึง 0.2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สารนี้ทำให้ปูนซีเมนต์

แข็งตัวช้าเนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO นอกจากนี้ถ้ามี P_2O_5 มากพออาจทำให้เกิดความไม่คงตัวเพราะมีปูนขาวอิสระเกิดเพิ่มมากขึ้น ถ้ามีปริมาณ P_2O_5 ผสมอยู่มากควรที่จะลดปริมาณของปูนขาวโดยการลดปริมาณหินปูนจากวัตถุดิบลง

2.8 วัสดุผสม

วัสดุผสม (Aggregates) หรือเรียกว่า มวลรวม จัดเป็นหนึ่งในวัสดุสำคัญที่ใช้กับงานคอนกรีต วัสดุผสม ได้แก่ หินย่อย กรวด ทรายหยาบ ซึ่งเมื่อผสมเข้ากับปูนซีเมนต์แล้วช่วยให้คอนกรีตมีขนาด รูปร่าง ความแข็งแรงตามต้องการ และทำให้คอนกรีตมีราคาถูกลงด้วย (ประณต, 2548)

2.8.1 วัสดุผสม

วัสดุผสมที่นิยมใช้กับงานปูน - คอนกรีต จำแนกออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. วัสดุผสมละเอียด (Fine aggregates) หมายถึง วัสดุผสมที่ส่วนใหญ่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 (ช่องขนาด 4.76 mm) ได้ และอาจมีบางส่วนที่หยาบกว่าผสมอยู่บ้าง แต่จะต้องไม่เกินปริมาณที่กำหนด อย่างไรก็ตามวัสดุผสมชนิดนี้จะต้องไม่เล็กเกินไปจนกลายเป็นฝุ่น เนื่องจากไม่เหมาะต่อการนำมาทำคอนกรีต วัสดุผสมละเอียดในที่นี่ได้แก่ ทรายซึ่งมีทั้งทรายธรรมชาติ และทรายที่ทำเทียมขึ้น ทรายที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปในประเทศไทยเป็นทรายธรรมชาติ ซึ่งมาจากแหล่งต่างๆ กัน แต่ทรายที่นำมาใช้กับงานคอนกรีตและงานก่อสร้างอื่นๆ ควรเป็นทรายน้ำจืดและจะต้องเป็นทรายที่สะอาด ไม่มีดิน เศษวัชพืช เปลือกหอยหรือสิ่งอื่นใดเจือปน เนื่องจากทรายที่สกปรกจะทำให้คอนกรีตที่หล่อมีคุณภาพต่ำลง หรืออาจทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้ ทรายที่เหมาะสมกับงานคอนกรีตจะต้องมีความแข็ง มีเหลี่ยมคมและมีขนาดของเม็ดที่สม่ำเสมอ

ทรายจัดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญอันหนึ่ง ที่ทำให้คอนกรีตมีสมบัติดีหรือไม่ดีก็ได้ เนื่องจากทรายที่สกปรก ซึ่งอาจมีตะกอนหรืออินทรีย์วัตถุปะปนในปริมาณเกินกว่าที่กำหนด สามารถทำให้คุณภาพของคอนกรีตลดลงได้ ดังนั้น ก่อนนำทรายไปใช้ทุกครั้งจึงควรที่จะได้ทำการทดสอบทรายก่อน การทดสอบทรายที่นิยมกันโดยทั่วไป ได้แก่ การทดสอบหาตะกอนหรือโคลน และการทดสอบหาอินทรีย์วัตถุ

2. วัสดุผสมหยาบ (Coarse aggregates) หมายถึง วัสดุผสมที่ส่วนใหญ่จะค้างอยู่บนตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 และอาจมีบางส่วนที่ละเอียดกว่าผสมอยู่บ้างแต่จะต้องไม่เกินปริมาณที่กำหนด วัสดุผสมชนิดนี้ได้แก่ หินย่อยหรือกรวด (Gravel) หรือวัสดุผสมชนิดอื่นที่เหมาะสมแทนก็ได้ หินที่เหมาะสมต่อการทำคอนกรีตมากที่สุด จะต้องคม แกร่ง แข็ง มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ มีผิวขรุขระ ยึดเหนี่ยวตัว และทนทานต่อการสึกหรอได้ดี หินที่นำมาใช้จะต้องสะอาด ไม่มีเศษวัชพืชเจือปน และจะต้องมีขนาดคละกัน กล่าวคือจะต้องมีขนาดของก้อนลดหลั่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 การเก็บรักษาวัสดุผสม

ในการเก็บรักษาวัสดุผสมไม่ว่าจะเป็นทราย กรวด หรือหินย่อยก็ตาม ควรกองเก็บไว้บนที่สะอาด หากมีความจำเป็นที่จะต้องกองบนพื้นดิน ก็จะต้องกองบนพื้นดินที่แข็งและอยู่ในระดับสูงพอสมควร ทั้งนี้เพื่อป้องกันพื้นที่เปียกและ นอกจากนั้นยังควรหลีกเลี่ยงการกองใต้ต้นไม้เพราะใบไม้ที่ร่วงหล่นลงมาปะปน จะทำให้ยากต่อการแยกเอาใบ ไม้ ออกเมื่อต้องการนำวัสดุไปใช้งาน การกองจะต้องกองอย่างมีระเบียบ มีการแยกกองตามชนิดและขนาดของวัสดุ เพื่อป้องกันมิให้ปะปนกัน นอกจากนั้นจะต้องไม่ทิ้งเศษผงหรือสิ่งโสโครกต่างๆ ลงบนกองวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ทราย อ้อย น้ำตาล น้ำหวาน เนื่องจากน้ำตาลหรือน้ำหวาน เมื่อทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์แล้วจะทำให้คอนกรีตไม่แข็งตัว เป็นผลทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหาย ได้ห้ามใช้ทรายบริเวณผิวดินหรือที่มีดินอื่นปะปนอยู่ และทุกครั้งก่อนที่จะนำหินย่อยหรือกรวดไปใช้งานต้องล้างน้ำก่อนเสมอ

2.9 น้ำ

น้ำจัดเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สำคัญต่องานปูน - คอนกรีต เพราะนอกจากจะต้องใช้น้ำเพื่อการผสมปูนหรือผสมคอนกรีตแล้ว ก็ยังมีความจำเป็นที่จะต้องใช้น้ำ เพื่อล้างวัสดุผสมคอนกรีตและบ่มคอนกรีตอีกด้วย (ประณต, 2548)

2.9.1. น้ำสำหรับล้างวัสดุผสม

น้ำที่ใช้ล้างวัสดุผสมควรเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากฝุ่น เกล็ด และสารอินทรีย์อื่นๆ ปะปนอยู่เช่นกัน เพราะสิ่งเหล่านี้สามารถไปเคลือบอยู่บนผิวของวัสดุผสม เป็นผลทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้าลงหรือทำให้กำลังลดลงได้ นอกจากนั้น ยังมีผลทำให้เนื้อคอนกรีตผุกร่อน และเหล็กเสริมในเนื้อคอนกรีตเป็นสนิมได้ง่ายอีกด้วย

2.9.2. น้ำสำหรับผสมคอนกรีต

หน้าที่หลักของน้ำที่ใช้สำหรับผสมคอนกรีต มีดังต่อไปนี้

- ทำให้ปูนซีเมนต์และวัสดุผสมมีความชื้น ทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความชื้นเหลือพอดี สะดวกต่อการเท และเขย่าให้เข้าแบบตามต้องการ

- ทำให้วัสดุผสม ได้แก่ หินย่อย หรือกรวดและทรายที่แห้งให้เปียก เพื่อให้ปูนซีเมนต์เกาะยึดโดยรอบและสามารถแข็งตัวได้ ทำให้วัสดุผสมเหล่านี้ยึดติดแน่นเข้าด้วยกัน

- ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับปูนซีเมนต์ ทำให้มีสมบัติจับตัวเกาะแน่นกับวัสดุผสม อันจะเป็นผลทำให้วัสดุผสมเหล่านี้เกาะตัวเป็นก้อนวัสดุที่แข็งแรง

น้ำไม่เพียงแต่จะช่วยทำให้ส่วนผสมของคอนกรีตมีความชื้นเหลือพอดี ซึ่งทำให้สะดวกต่อการทำงานเท่านั้น แต่น้ำยังช่วยทำให้วัสดุผสมยึดติดแน่นเข้าด้วยกัน มีผลต่อกำลังของคอนกรีตโดยตรง

ดังนั้น การเลือกใช้น้ำที่มีคุณภาพดีในปริมาณที่เหมาะสม สามารถช่วยให้ได้คอนกรีตที่มีคุณภาพดีด้วย สารเคมีที่เจือปนในน้ำสำหรับผสมคอนกรีตมีผลต่อคอนกรีต เช่น

- น้ำตาลหรือไนเตรตไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ผสมคอนกรีต เนื่องจากจะทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้าลงหรือมีกำลังลดลงได้

- น้ำที่มีกรดแทนนิก อินทรีย์วัตถุจากพืชที่ผุเน่า หรือเศษขยะที่มีไขมันปะปนอยู่สามารถทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้าลงและมีกำลังลดลงได้

- น้ำทะเลหรือน้ำกร่อยมีสารคลอไรด์ปะปนอยู่ทำให้เหล็กเป็นสนิมได้ นอกจากนี้ เกลือโซเดียมหรือโพแทสเซียมที่ละลายอยู่จะทำให้หินย่อยบางชนิดที่มีปฏิกิริยาต่อต่างเกิดการขยายตัวอย่างผิดปกติ จึงทำให้เนื้อของแท่งคอนกรีตไม่แน่นหลังจากน้ำได้ระเหยตัวออกไปแล้ว

- คาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตที่ปะปนอยู่ก็เช่นเดียวกัน ถ้ามีปริมาณมากก็จะทำให้คอนกรีตแข็งตัวเร็วเกินไป และมีกำลังของคอนกรีตลดลงได้เช่นกัน

- น้ำที่มีซัลเฟตปะปนเพียงเล็กน้อย สามารถทำให้คอนกรีตมีกำลังลดลงได้เช่นกัน โดยถ้าซัลเฟตปะปนอยู่ในน้ำเกินกว่า 10% จะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงไปมาก จึงไม่ควรนำมาใช้ผสมคอนกรีต

ในการกำหนดคุณภาพของน้ำที่จะนำมาใช้กับงานผสมคอนกรีต ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ถึงแม้จะเป็นข้อกำหนดที่ถูกต้องแล้วก็ตาม แต่มิได้มีการกำหนดปริมาณที่จะสามารถปะปนอยู่ได้ โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากสารต่างๆ เหล่านี้ ถ้ามีปะปนอยู่ในน้ำในปริมาณที่ไม่มากเกินไป ก็จะไม่สามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้น้ำที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ผสมคอนกรีตคือ น้ำประปา หรือน้ำสะอาดจากแหล่งน้ำธรรมชาติ ไม่ควรใช้น้ำที่สามารถดื่มได้มาผสมคอนกรีต

2.9.3. น้ำสำหรับบ่มคอนกรีต

น้ำที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตต้องเป็นน้ำที่สะอาดปราศจากฝุ่น น้ำตาล ไนเตรตบอเรตกรดแทนนิก และสารอินทรีย์อื่นๆ ปะปนอยู่ เพราะสิ่งเหล่านี้มีผลทำให้คอนกรีตแข็งตัวช้าลงหรือการเกิดกำลังลดลงได้ นอกจากนี้ ยังอาจทำให้เกิดรอยเปื้อน และสีบนผิวของคอนกรีตที่ไม่พึงประสงค์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกลือของแร่เหล็กและกรดแทนนิก ซึ่งทำให้เกิดรอยเปื้อนและสีที่ล้างออกค่อนข้างยาก และเมื่อบ่มคอนกรีตนานๆ น้ำที่มีส่วนผสมของสารดังกล่าว สามารถซึมเข้าไปในเนื้อคอนกรีต กรณีที่มีการใช้เหล็กเสริมเข้าไปในซีเมนต์ก้อนเพื่อเพิ่มความแข็งแรง อาจทำให้เกิดสนิมเหล็กได้นอกจากนั้นยังไม่ควรนำน้ำที่มีกลิ่นรุนแรงและไม่พึงประสงค์มาใช้บ่มคอนกรีต เพราะทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของผู้ที่อยู่ใกล้ชิด น้ำที่เหมาะสมต่อการใช้ผสมคอนกรีต อาจไม่เหมาะต่อการนำมาใช้บ่มคอนกรีต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็ง

การทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็งเป็นการทดสอบตามวัตถุประสงค์ของการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง คือ เพื่อปรับปรุงให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงและมั่นคง จำกัดความสามารถในการละลายของสารอันตรายที่อยู่ในของเสี้ยว ลดพื้นที่ผิวของของเสี้ยว และเพิ่มกำลังแรงอัดหรือความมั่นคงทนทาน ผลที่ได้จากการทดสอบหลังผ่านการหล่อแข็งสามารถประเมินประสิทธิภาพผลที่ได้จากการปรับเสถียรและการหล่อแข็งตะกอน โลหะหนัก (ประภัสสร, 2551)

2.10.1 การทดสอบกำลังแรงอัด

การใช้การทดสอบกำลังแรงอัดเพื่อประเมินถึงประสิทธิผลของการปรับเสถียรและการหล่อแข็งนั้นมีการใช้อย่างกว้างขวาง โดยวัสดุที่ถูกทำให้เสถียรและหล่อแข็งต้องมีกำลังแรงอัดที่เหมาะสม โดยสามารถรับน้ำหนักที่กดทับได้ ผลการทดสอบกำลังแรงอัดมีความสัมพันธ์กับประสิทธิผลในการปรับเสถียรของของเสี้ยวประเภทสารอนินทรีย์ เนื่องจากถูกจับอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การทดสอบกำลังแรงอัดยังมีข้อดีอื่นๆ อีกมากมาย ในการประเมินผลที่ได้จากการปรับเสถียร เช่น การทดสอบทำได้รวดเร็วและเครื่องมือที่ใช้ทดสอบหาได้ง่าย การทดสอบกำลังแรงอัดเป็นตัวชี้วัดถึงความทนทานหรือเปราะบางของวัสดุที่ถูกทำให้เสถียร เมื่อกำลังรับแรงอัดของของเสี้ยวอันตรายที่ถูกทำให้เสถียรเพิ่มขึ้นทำให้กระบวนการปรับเสถียรมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะกับสารปนเปื้อนที่เป็นสารอนินทรีย์ ดังนั้นกำลังแรงอัดจึงใช้เป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิผลที่ได้จากการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง (ประภัสสร, 2551) โดยใช้มาตรฐานการทดสอบกำลังแรงอัดตามภาคผนวกที่ 2 ของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540 ซึ่งกำหนดลักษณะของของเสี้ยวที่ผ่านการปรับเสถียรและการหล่อแข็งแล้วต้องมีความสามารถรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 3.5 Kg/cm หรือต้องสามารถรับน้ำหนักที่กดทับด้านบน เมื่ออยู่ในหลุมฝังกลบได้อย่างปลอดภัย (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6, 2540)

2.10.2 การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

วิธีการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักหลายวิธีได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อเลียนแบบกระบวนการชะละลายของของเสี้ยวอันตรายภายในหลุมฝังกลบหรือการกำจัดแบบอื่นๆ เพื่อที่จะประเมินถึงความเสี่ยงที่มีต่อสุขภาพของมนุษย์และ/หรือน้ำใต้ดิน โดยจุดประสงค์พื้นฐานของการทดสอบการชะละลายเพื่อ

(1) แยกประเภทของของเสี้ยวว่าเป็นอันตราย หรือไม่อันตราย ตามกฎหมายกำหนด

(2) เลียนแบบสถานะของของเสี้ยวหรือสภาพพื้นที่ที่มีการชะละลาย เพื่อที่จะประเมินถึงความเป็นไปได้ในการเกิดการชะละลาย

(3) เป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพในการบำบัดของเสี้ยว

2.10.2.1 การทดสอบด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

วิธีการทดสอบการชะละลายอีกวิธีหนึ่ง ได้แก่ วิธี WET ซึ่งผลการทดสอบด้วยวิธี WET จะนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentrations (STLC) สารละลายที่ใช้ในวิธี WET ถูกออกแบบมาให้ใช้เพื่อเลียนแบบการชะละลายภายในหลุมฝังกลบ วิธีนี้จะรายงานผลในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร สิ่งปลูกสร้างหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี WET และวิเคราะห์น้ำสกัดแล้วมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตร ของน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่า STLC ที่กำหนดไว้ ถือว่าสิ่งปลูกสร้างหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว

ค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ต้องมีสารอันตรายในน้ำชะละลายน้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ดังแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค.1 และตารางที่ ค.2

2.10.2.2 การทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

TCLP เป็นวิธีการทดสอบการชะละลายวิธีหนึ่ง ถูกนำมาใช้เมื่อ 7 พฤศจิกายน ค.ศ. 1986 โดยนำมาใช้แทนวิธี Extraction Procedure Toxicity Characteristics (EP Tox) วิธี TCLP ถูกใช้อย่างกว้างขวาง ค่าที่ได้จากวิธี TCLP มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรและนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดเพื่อประเมินประสิทธิผลที่ได้จากการปรับเสถียรและการหล่อแข็ง

ค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ต้องมีสารอันตรายในน้ำชะละลายน้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ ในภาคผนวก ค ตารางที่ ค.3

2.11 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของซีเมนต์ก้อน

ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของซีเมนต์ก้อน ได้แก่

- ทรายถ้ามีตะกอนหรือโคลนมากเกินไปทำให้คอนกรีตแตกร้าว มีกำลังรับแรงอัดลดต่ำลง เนื่องจากตะกอนหรือโคลนจะไปเคลือบผิวของมวลรวมทำให้ลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์กับมวลรวม ทำให้คอนกรีตที่ได้มีการหดตัวสูง และเกิดรอยร้าวเมื่อคอนกรีตแข็งตัว ส่งผลให้มีการชะละลายของสารพิษได้

- อินทรีย์วัตถุมีผลต่อกำลังแรงอัดคอนกรีต ทำให้กำลังแรงอัดคอนกรีตลดลง เพราะทำให้คอนกรีตต้องใช้น้ำมากขึ้นทำให้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อคอนกรีต (W/C) สูงขึ้น หมายถึงกำลังแรงอัดคอนกรีตก็จะลดลงด้วยมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต ซึ่งอาจจะช้ากว่าปกติ และส่งผลให้มีการแตกร้าวในระยะยาวของคอนกรีตเฉพาะจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารใช้งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
กำลังแรงอัดลดต่ำลง น้ำทะเลหรือน้ำกร่อยทำให้เหล็กเสริมสนิมเหล็กได้และเกิดการขยายตัว
ผิดปกติ ทำให้เนื้อคอนกรีตไม่แน่น

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wang (1990)

ผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีในการทำปุ๋ยซีเมนต์เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีการหล่อแข็ง รวมถึงการใช้สารในการหล่อแข็ง Wang ศึกษาการหล่อแข็งของเสี้ยวอิเล็กทรอนิกส์ เช่น โปรทในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีสารประกอบของโปรทโดยการทำคอนกรีตบล็อกจากขยะอิเล็กทรอนิกส์ มีการใช้อโลหะในการเสริมความยืดหยุ่น และเพื่อให้ทนต่อแรงอัด แล้วพิจารณาในเรื่องรูปทรง สารพิษที่อาจรั่วไหลออกมาได้ ความแข็งแรง และผลจากการสั่นสะเทือน ในการศึกษาพัฒนาเทคโนโลยีการทำปุ๋ยซีเมนต์ของ Wang ประสบความสำเร็จ โดยคอนกรีตบล็อกนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ผ่านมาตรฐานของเกณฑ์สำหรับหลุมฝังกลบ

Lin and Weng (2001)

Lin and Weng ศึกษาการผลิตอิฐจากเถ้าจากตะกอนน้ำเสียและดินเหนียว โดยศึกษาผลของการผสมดินเหนียว และเถ้าจากตะกอนน้ำเสียในอัตราส่วน 10 - 50 % และแปรค่าอุณหภูมิในการเผาจากตะกอนน้ำเสียที่ 950, 1,000 และ 1,050 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าจากตะกอนน้ำเสียทำให้ความสามารถในการกักตัวลดลง สัดส่วนและอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของอิฐ โดยการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิและการลดเถ้าจากตะกอนน้ำเสียเป็นผลให้การดูดซึมน้ำลดลงอิฐที่ทำจากเถ้าจากตะกอนน้ำเสียและดินเหนียวมีความทนทานต่อแรงอัดมากกว่าอิฐที่ทำจากดินเหนียวปกติ สัดส่วนที่เหมาะสมของเถ้าสำหรับการผลิตอิฐที่มีคุณภาพอยู่ในช่วง 20 - 40 % โดยน้ำหนักเมื่อศึกษาสมบัติของอิฐทั้งทางกายภาพและทางเคมี พบว่าในกากตะกอนน้ำเสียแห้งก่อนการผสมมีค่าความเข้มข้นของโลหะสูงคือมีโครเมียมเท่ากับ 1,197 mg/Kg ทองแดงเท่ากับ 5,010 mg/Kg เหล็กเท่ากับ 28,106 mg/Kg และสังกะสีเท่ากับ 2,950 mg/Kg สำหรับค่าความเข้มข้นของโลหะหลังการผสมทดสอบด้วยวิธี TCLP พบว่าการเกิดออกไซด์ของโลหะมีค่าลดลงในสารชะละลายที่ทำการชะละลายอิฐที่มีเถ้าจากตะกอนน้ำเสียผสมอยู่ 50 % ระดับการชะละลายมีค่าต่ำกว่าเถ้าจากตะกอนน้ำเสียแห้ง เมื่อทำการทดสอบความแข็งแรงแล้วพบว่า อิฐที่มีเถ้าจากตะกอนน้ำเสียผสมอยู่ 20 % เผาที่อุณหภูมิ 1,000 °C มีค่าความแข็งแรงมากที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ เถ้าจากตะกอนน้ำเสียสามารถนำไปใช้ในการทำอิฐได้ความแข็งแรงสามารถปรับปรุงให้เพิ่มขึ้นได้โดยการควบคุมสภาวะในการปฏิบัติการ เช่น การควบคุมอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Weng, et al. (2003)

Weng ศึกษาการนำกากตะกอนกลับมาใช้เป็นวัสดุเพิ่มในการก่อสร้าง ได้แก่ อิฐ และอิฐมวลเบา เป็นทางเลือกในการลดและกำจัดปัญหาจากตะกอนด้วย วัตถุประสงค์ในการใช้กากตะกอนในการผลิตอิฐ คือ ตรีงโลหะหนักในก้อนหล่อแข็ง การออกซิไดซ์อินทรีย์สาร และการทำลายเชื้อโรค โดยทำการระเหยน้ำออกจากกากตะกอนโดยการเผา เผากากตะกอน 1 ตันที่อุณหภูมิ 250 °C ใช้เวลาในการเผา 2 ชั่วโมง ใช้สัดส่วนกากตะกอนที่แตกต่างกันผสมกับดินเหนียว ใช้แบบหล่อขนาดความยาว 230 mm ความกว้าง 110 mm และความหนา 60 mm มีการใช้เครื่องมือช่วยในการไล่อากาศออกจากส่วนผสมเพื่อลดการแตกของอิฐ หลังจากอิฐก่อตัว 24 ชั่วโมงแล้ว นำอิฐมาอบแห้งที่ 103 °C นาน 24 ชั่วโมงแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 880 - 1,000°C นาน 6 ชั่วโมงตามมาตรฐานของจีน แล้วนำมาผ่านการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการหดตัว การสูญเสียน้ำหนัก การดูดซึมน้ำความหนาแน่น ความแข็งแรงอัดเพื่อตรวจสอบคุณภาพของอิฐ และการทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก (TCLP)

ผลจากการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอน มีผลทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนส่วนผสมของกากตะกอนเป็นตัวบ่งชี้ความต้องการน้ำในการขึ้นรูปอิฐ ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอน ทำให้อิฐมีความต้องการน้ำมากกว่าการใช้ดินเพียงอย่างเดียว ด้านการดูดซึมน้ำโดยทั่วไป โครงสร้างภายในของอิฐต้องมีความหนาแน่นมากพอที่จะป้องกันการซึมน้ำได้ จากการทดลองพบว่า การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อสัดส่วนของกากตะกอนเพิ่มขึ้น ที่สภาวะอุณหภูมิค่า ดังนั้นเมื่ออิฐมีปริมาณกากตะกอนสูง ทำให้การยึดเกาะภายในลดลงจึงส่งผลให้การดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ด้านการหดตัวของอิฐ พบว่า การเพิ่มสัดส่วนกากตะกอนทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความสามารถในการพองตัวและปริมาณสารอินทรีย์ในกากตะกอนมีมากกว่าในดินเหนียว จึงทำให้คุณภาพของอิฐลดลง ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการหดตัวของอิฐ คือ อุณหภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การหดตัวเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นสัดส่วนของกากตะกอนและอุณหภูมิในการเผาเป็นสองปัจจัยสำคัญในการควบคุมสภาวะเพื่อลดการหดตัวในการเผา ด้านการสูญเสียน้ำหนักของอิฐหลังเผา พบว่า การเพิ่มสัดส่วนกากตะกอนและอุณหภูมิส่งผลให้น้ำหนักอิฐลดลงหลังการเผาสำหรับอิฐดินเหนียวปกติมีการสูญเสียน้ำหนักหลังการเผาที่ 800 °C เกณฑ์การสูญเสียน้ำหนักสำหรับอิฐดินเหนียวเท่ากับ 15% เมื่อมีการผสมกากตะกอนการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการสูญเสียอินทรีย์วัตถุในกากตะกอน ด้านความหนาแน่นของอิฐอิฐดินเหนียวมีความหนาแน่น 1.8-2.0 g/cm³ ความหนาแน่นของอิฐเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาณของกากตะกอนที่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสม ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของการดูดซึมน้ำ เมื่อส่วนผสมมีน้ำมากทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง อุณหภูมิในการเผายังส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของอนุภาคของอิฐ โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้นด้วย ด้านกำลังแรงอัดของก้อนอิฐการทดสอบกำลังแรงอัดเป็นการทดสอบที่สำคัญที่สุดสำหรับการประกันคุณภาพทางด้านวิศวกรรม

ความแข็งแรงขึ้นอยู่กับปริมาณของกากตะกอนในอิฐและอุณหภูมิในการเผา ผลการทดสอบการชะละลาย พบว่า มีการชะละลายของโครเมียมและสังกะสี 30 % ของปริมาณกากตะกอน ซึ่งน้อยกว่ากากตะกอนแห้ง และอยู่ในระดับความเข้มข้นที่น้อยกว่ามาตรฐานของไต้หวัน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การเผามีส่วนในการลดปริมาณสารอินทรีย์ ดังนั้น อุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 880 - 960 °C และใช้ปริมาณกากตะกอน 10 – 24 % จะทำให้ได้อิฐที่มีคุณภาพดี

Fytli and Zabaniotou (2006)

Fytli and Zabaniotou ทำการศึกษาแนวทางของกากตะกอนน้ำเสียในยุโรป ในการพิจารณาการจัดการกับน้ำเสียทั่วโลก การกำจัดกากตะกอนน้ำเสียจากเทศบาลส่วนมากจะถูกนำไปใช้ในการเกษตรหรือกำจัดโดยการฝังกลบหรือผ่านการเผา โดยมีปัจจัยหลายอย่างในการเลือกการกำจัด เช่น การสะสมของสารอันตรายในกากตะกอนที่อาจเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร เพราะฉะนั้นการจัดการด้วยวิธีการทางเกษตรถือว่าการจัดการที่ไม่ปลอดภัย โดยทั่วไปการกำจัดกากตะกอนด้วยการฝังกลบเป็นวิธีกำจัดล่าสุดที่กฎหมายของยุโรปกำหนดและต้องมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น การเผาไหม้เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถลดปริมาณของกากตะกอนน้ำเสียได้มาก แต่ค่าใช้จ่ายในการทำความสะดวกอุปกรณ์ควบคุมมลพิษทางอากาศปกติจะมีราคาสูงมาก เทคโนโลยีทางเลือกในการเผาไหม้ เช่น Pyrolysis, Wet oxidation และ Gasification การผสมรวมกันของวิธีการต่างๆ ได้เปรียบว่าการเผาไหม้ในด้านค่าใช้จ่ายในการบำบัดปล่อยควันหรือเถ้า มีแรงผลักดันมากมายในการศึกษาเทคโนโลยีทางเลือกในการกำจัดกากตะกอนน้ำเสีย ประเด็นที่สำคัญที่สุดคือเรื่องของปริมาณของก๊าซและเถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้กากตะกอนน้ำเสียการปล่อยก๊าซพิษและโลหะหนัก

Liu.et. al. (2009)

Liu ได้ทำการศึกษาเทคนิควิธีการสกัดครออะมิโนจากแบคทีเรียที่มีอยู่ในกากตะกอนน้ำเสียชุมชนเพื่อผลิตปุ๋ยโดยทำการวัดปริมาณโลหะในกากตะกอนดิบ ดังนี้ Cd, Cr, Pb, Zn, Cu, Ni, Fe, Mn, As และ Hg โดยทำการวิเคราะห์ด้วย Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) พบว่า มีความเข้มข้นของโลหะในกากตะกอนเท่ากับ 187.97, 612.50, 568.48, 543.98, 37.93, 61.08, 3.16, 26.33, 3.87 mg/Kg ตามลำดับ

ในการทดลองพบว่าโปรตีนของแบคทีเรียในกากตะกอนน้ำเสียสามารถนำไปสกัดเพื่อผลิตปุ๋ยที่มีกรดอะมิโนเป็นส่วนสำคัญ โดยอาศัยกระบวนการทางเคมีหลายอย่าง เริ่มจากทำการย่อยกากตะกอนด้วยกรดไฮโดรคลอริกร้อนเพื่อให้ได้สารละลายโปรตีนออกมา แล้วทำการศึกษาผลจากอุณหภูมิและค่าความเป็นกรด่างของอัตราส่วนของสารสกัดของโปรตีนจากกากตะกอน จากนั้นสารละลายโปรตีนที่ได้ถูกนำมาขยต่อในกรดอะมิโนภายใต้สภาวะร้อน เพื่อศึกษาผลของปริมาณของกรดไฮโดรคลอริก อุณหภูมิในการย่อยและเวลาที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ต่อมาสารละลายกรดอะมิโนจะถูกทำให้บริสุทธิ์โดยการกำจัดสีด้วยด้วยแอกติเวเตดคาร์บอนและสารละลาย

กรดอะซิติก ในที่สุดกรดอะมิโนบริสุทธิ์จะถูกนำไปผลิตปุ๋ย จากผลการทดลองพบว่าสภาวะสูงสุดของการย่อยสามารถสกัดโปรตีนออกมาจากกากตะกอนน้ำเสียคือ ที่อุณหภูมิในการย่อยกากตะกอนเพื่อให้ได้สารสกัดโปรตีนที่ 121°C ที่พีเอช 0.5 โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 5 ชั่วโมง และการย่อยจากสารละลายโปรตีนไปเป็นกรดอะมิโนที่อุณหภูมิ 120°C โดยใช้เวลาการเกิดปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง และใช้อัตราส่วนสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 6 โมลต่อลิตรเท่ากับ 8 mL โดยที่สภาวะสูงสุดสามารถสกัดโปรตีนออกมาได้ 78.5 % และผลิตกรดอะมิโนได้ 10-13 กรัมต่อกากตะกอนแห้ง 100 กรัม ซึ่งปุ๋ยที่ผลิตขึ้นเป็นไปตามมาตรฐาน Amino acid foliar fertilizer ของประเทศจีน เทคโนโลยีใหม่นี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารกำจัดกากตะกอนทั่วไป

สมิตร ส่งพิริยะกิจ (2538)

สมิตร ส่งพิริยะกิจ ศึกษาผลกระทบของความละเอียดจากการบดและการแยกแฉ่าถ่านหิน เหมาะต่อสมบัติของมอร์ตาร์ เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงคุณภาพแฉ่าถ่านหินจากแม่เมาะ เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต โดยทำการบดแฉ่าถ่านหินให้มีความละเอียดมากขึ้น และแยกขนาดแฉ่าถ่านหินด้วยเครื่องไซโคลน หลังจากนั้นทำการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาการก่อตัว ค่าการไหล และกำลังอัดของมอร์ตาร์ จากการบดแฉ่าถ่านหินสามารถแบ่งแฉ่าถ่านหินได้ 2 ประเภท คือ แฉ่าถ่านหินที่บดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง พื้นที่ผิวเท่ากับ 5563 cm²/g และแฉ่าถ่านหินที่บดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พื้นที่ผิวเท่ากับ 17727 cm²/g สำหรับแฉ่าถ่านหินที่คัดแยกขนาดด้วยเครื่องไซโคลน สามารถแบ่งแฉ่าถ่านหินได้ 4 ชนิดตามพื้นที่ผิวเฉลี่ย คือ แฉ่าถ่านหินที่มีพื้นที่ผิว 1927, 2253, 5167 และ 17260 cm²/g รวมกับแฉ่าถ่านหินปกติที่ไม่ได้แยกและมีพื้นที่ผิวเฉลี่ย 3730 cm²/g ในการหล่อตัวอย่างใช้แฉ่าถ่านหินผสมในอัตราส่วนที่ร้อยละ 15, 25 และ 35 ใช้อัตราส่วนวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และแฉ่าถ่านหิน) ต่อทราย 1:2.75 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.59 และ 0.61 สำหรับแฉ่าถ่านหินที่บด และแฉ่าถ่านหินที่แยกตามลำดับ ทำการหล่อตัวอย่างขนาด 5cm² ทำการบ่มที่ระยะเวลา 1, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน จากการทดลองพบว่า การใช้แฉ่าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนต่างๆ ทำให้มอร์ตาร์มีระยะเวลาก่อตัวที่นานขึ้น โดยแฉ่าถ่านหินที่มีความละเอียดกว่าใช้เวลาการก่อตัวสั้นกว่าแฉ่าถ่านหินเดิมซึ่งหยาบกว่า ส่วนค่าการไหลของมอร์ตาร์พบว่า มีแนวโน้มที่มากขึ้นเมื่อใช้แฉ่าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ค่าการไหลมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้อัตราส่วนที่มากกว่าร้อยละ 25 สำหรับแฉ่าถ่านหินที่บด นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าการไหลมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อใช้แฉ่าถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้น และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อใช้แฉ่าถ่านหินที่หยาบแทนที่ปูนซีเมนต์ และสำหรับค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ พบว่า ความละเอียดของแฉ่าถ่านหินมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยมอร์ตาร์มีการพัฒนา กำลังอัดที่รวดเร็วขึ้น เมื่อแฉ่าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น

กนกพร ชัยวุฒิภูกุล และคณะ(2542)

กนกพร ชัยวุฒิภูกุล และคณะ ศึกษาการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ นิกเกิลสังกะสี และแคดเมียมในรูปแบบไนเตรด โดยการทำให้เป็นก้อนด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่สัดส่วน 0.25 และ 0.50 ทำการบ่มก้อนซีเมนต์เป็นเวลา 7 วัน ทดสอบสมบัติการชะละลายของโลหะหนักในซีเมนต์ก้อน พบว่า ที่สัดส่วนโลหะหนักไนเตรดต่อวัสดุประสาน 0.25 โลหะหนักที่มีค่าความเข้มข้นในน้ำสกัดสูงสุด คือ สังกะสี มีค่า 0.435 mg/L รองลงมาเป็นนิกเกิล และแคดเมียม โดยมีค่า 0.888 และ 0.056 mg/L ตามลำดับ ที่สัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรดต่อวัสดุประสาน 0.50 ให้ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดสูงสุด รองลงมาเป็นนิกเกิล และแคดเมียม โดยมีค่า 0.706, 0.058 และ 0.047 mg/L ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานซึ่งกำหนดค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดไว้ไม่เกิน 1mg/Lพบว่าที่สัดส่วนโลหะหนักไนเตรดต่อวัสดุประสาน 0.25 ให้ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิด และโลหะหนักผสมต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานมาก แต่ที่สัดส่วนโลหะหนักไนเตรดต่อวัสดุประสาน 0.50 ค่าความเข้มข้นของสังกะสีในน้ำสกัดของสังกะสีค่อนข้างสูงใกล้เคียงกับเกณฑ์มาตรฐานจึงพิจารณาเลือกสัดส่วนผสมของโลหะหนักไนเตรดต่อวัสดุประสาน 0.25 และหลังจากนั้นศึกษาผลของระยะเวลาบ่มตัวต่อความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัด โดยเพิ่มระยะเวลาบ่มจาก 7 วันเป็น 14 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่า ความเข้มข้นในน้ำสกัดของโลหะหนักแต่ละชนิดมีค่าลดลงแต่ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน เมื่อลดระยะเวลาบ่มตัวจาก 7 วันเป็น 3 และ 1 วัน ตามลำดับ พบว่า ค่าความเข้มข้นในน้ำสกัดของโลหะหนักแต่ละชนิดและโลหะหนักผสมมีค่าสูงขึ้น เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสารพิษ ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดที่เกินมาตรฐาน ได้แก่ นิกเกิลอยู่ที่ระยะเวลาบ่มตัว 1 วัน โดยมีค่า 1.966 mg/L สังกะสีที่ระยะเวลาบ่มตัว 1 และ 3 วัน โดยมีค่า 2.856 และ 2.324 mg/L ตามลำดับ ดังนั้น ถ้าใช้โลหะหนักไนเตรดผสมต่อวัสดุประสาน 0.25 จะได้ก้อนซีเมนต์ที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักไนเตรดแต่ละชนิด ในน้ำสกัดต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานสารพิษ และถ้าเพิ่มระยะเวลาบ่มตัวของก้อนซีเมนต์ให้นานขึ้น (7 - 28 วัน) ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำสกัดจะลดลงอีก

วราภรณ์ กิจชัยนุกูล(2542)

ศึกษาการนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมหลอมโลหะเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อแข็ง เพื่อศึกษาสมบัติการของเสียที่เกิดขึ้น โดยทำการทดสอบความเป็นพิษและองค์ประกอบทางเคมีก่อนนำไปใช้ประโยชน์ เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากของเสียปูนซีเมนต์ และปริมาณน้ำที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำกากของเสียไปใช้เป็นวัสดุผสมในการหล่อแข็ง และเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากของเสียเป็นวัสดุผสมในการหล่อแข็งจากตะกอนเมอร์คิวริคัลไฟด์ของน้ำเสียที่ได้จากการตกตะกอนน้ำเสียในการวิเคราะห์

ซีโอดี จากการทดสอบเบื้องต้นถึงการชะละลายโลหะหนักเพื่อจำแนกประเภทกากของเสีย พบว่า กากของเสียนี้ไม่จัดอยู่ในข่ายกากของเสียอันตราย มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน เนื่องจากมีค่าผลรวมของซิลิกอนออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์มากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณโซเดียมออกไซด์น้อยกว่าร้อยละ 1.5 สำหรับสัดส่วนของกากของเสียต่อปูนซีเมนต์ต่อน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในการหล่อแข็งเพื่อฝังกลบอยู่ที่ 80:20:0.27 โดยน้ำหนัก โดยมีค่าความสามารถในการรับกำลังแรงอัดที่อายุบ่มในน้ำ 28 วัน เป็น 166 Kg/cm^2 เมื่อใช้สัดส่วนนี้ในการตรึงปรอทจากกากตะกอนน้ำทิ้งที่วิเคราะห์ซีโอดี พบว่า สามารถตรึงกากตะกอนที่มีปรอทได้ร้อยละ 0.8 โดยน้ำหนัก โดยที่การชะละลายปรอทไม่เกินมาตรฐานกำหนด

นฤมล สรภักย์วานิช (2544)

ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแบตเตอรี่โดยใช้วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุประสาน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุประสานและปริมาณกากตะกอน ซึ่งแบ่งเป็น 6 กลุ่ม คือ ปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยลิกไนต์ ปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบผสมทราย ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ผสมทราย และปูนซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบผสมเถ้าลอยลิกไนต์ผสมทราย และเพื่อศึกษาการชะละลายของตะกั่ว โดยนำก้อนตัวอย่างมาทดสอบความสามารถในการรับแรงอัด ทดสอบปริมาณการชะละลายของตะกั่วด้วยวิธี Extraction Procedure (EP) และวิธี Accumulated test ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถในการรับแรงอัดและปริมาณการชะละลายของตะกั่วแปรผันตามชนิดของวัสดุประสาน ปริมาณกากตะกอนและระยะเวลาในการบ่ม ชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัสดุประสานและปริมาณกากตะกอน คือ ปูนซีเมนต์ผสมเถ้าลอยลิกไนต์ผสมทราย ที่อัตราส่วน 0.5:0.5:2 เมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอน ค่าความสามารถในการรับแรงอัดลดลง และการชะละลายของตะกั่วเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่ม ค่าความสามารถในการรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และการชะละลายของตะกั่วลดลง โดยอัตราส่วนวัสดุประสานต่อปริมาณกากตะกอนที่เหมาะสม คือ 1:0.025 ที่ระยะเวลาในการบ่มตั้งแต่ 14 วันขึ้นไป

สุรชาติย์ อินทรวงศ์(2545)

ศึกษาและเปรียบเทียบวิธีทดสอบการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนของโรงชุบโลหะ ได้แก่ วิธี TCLP วิธี DIT (Dynamic Leach Test) และวิธีควมคุมพีเอช โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน โดยใช้กากตะกอนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และเถ้าลอยลิกไนต์ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก จากการวิจัยพบว่า การทดสอบด้วยวิธี TCLP สารละลายที่สกัดได้มีค่าความเข้มข้นของโครเมียมต่ำกว่ามาตรฐานที่ US EPA กำหนด คือ ไม่เกิน 5 mg/L สังกะสีและเหล็กไม่มีการกำหนดมาตรฐานแต่อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 1 mg/L และ 1.5 mg/L ตามลำดับ เนื่องจากค่าพีเอชของสารละลายที่สกัดได้มีค่าสูงขึ้นจนอยู่ในช่วง

ที่เหมาะสมสำหรับการตรึงโลหะไฮดรอกไซด์ และทำให้โลหะไฮดรอกไซด์มีความเสถียรมากขึ้น และมีความสามารถในการละลายลดลง ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของโลหะไฮดรอกไซด์ในสารละลายที่สกัดได้มีค่าต่ำมาก สำหรับการทดสอบด้วยวิธี DIT โดยนำก้อนหล่อแข็งตัวอย่างที่มีอายุในการบ่ม 28 วัน แช่ในสารละลายในขวดพลาสติกขนาด 1 L โดยก้อนหล่อแข็งตัวอย่างอยู่ในตาข่ายพลาสติก และแขวนอยู่ตรงกึ่งกลางของสารละลาย เพื่อให้ก้อนหล่อแข็งตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายทุกทิศทาง ใช้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสของก้อนหล่อแข็งต่อปริมาตรของสารละลายเท่ากับ 1:20 แล้วนำไปวัดค่าพีเอชและวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ซึ่งภายใต้สภาวะการละลายที่ไม่รุนแรง (พีเอชเริ่มต้นของสารละลาย 5 - 6) ความเข้มข้นสะสมของสังกะสีในน้ำละลายตรวจไม่พบ (ความเข้มข้นต่ำกว่า 0.3 $\mu\text{g/L}$) ในขณะที่เหล็กและโครเมียมในน้ำชะในวันที่ 43 ของการทดลองมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 3 - 4 mg/L และ 0.4 mg/L ตามลำดับ ภายใต้สภาวะการละลายที่รุนแรง (พีเอชเริ่มต้นของสารละลาย 3) โลหะหนักทั้ง 3 ชนิดจะถูกชะออกมามากขึ้น สำหรับการทดสอบด้วยวิธีควบคุมพีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดในสารละลายหลังการสกัดมีค่าสูงที่สุดเมื่อพีเอชของสารละลายเท่ากับ 4 และลดลงเมื่อพีเอชของสารละลายสูงขึ้น จากผลการทดลองการทดสอบการชะละลายแต่ละวิธีให้ผลแตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีใดในการทดสอบขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ควรพิจารณาข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธี เลือกให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในการทดสอบ สำหรับวิธี TCLP มีข้อดี คือ ใช้เวลาในการทดสอบน้อย สารละลายเตรียมได้ง่าย ใช้สารละลายในปริมาณน้อย และการใช้กรดอะซิติกเป็นสารละลายเป็นการเลียนแบบสภาวะจริงในหลุมฝังกลบ ส่วนข้อเสีย คือ การบดตัวอย่างไม่สามารถควบคุมขนาดและการกระจายขนาดของอนุภาคได้ ทำให้พื้นที่ผิวของตัวอย่างที่สัมผัสกับสารละลายไม่แน่นอน และการเขย่าสารละลายอย่างแรงทำให้ต่างจากสภาวะจริงในหลุมฝังกลบ (สารละลายมีการเคลื่อนที่รอบก้อนหล่อแข็งน้อย) สำหรับวิธี DIT มีข้อดี คือ การที่ไม่มีการเขย่าทำให้มีความใกล้เคียงกับสภาวะจริงในหลุมฝังกลบ (สารละลายมีการเคลื่อนที่รอบก้อนหล่อแข็งน้อย และถูกทดแทนอยู่เสมอ) และช่วยในการประเมินผลระยะยาวสำหรับการฝังกลบ ส่วนข้อเสีย คือ ใช้ระยะเวลาในการทดสอบนาน ใช้สารละลายในปริมาณมาก และไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานไว้ โดย US EPA และวิธีควบคุมพีเอช มีข้อดี คือ สามารถเปรียบเทียบอิทธิพลของค่าพีเอชที่มีต่อการชะละลาย ในกรณีที่ตัวอย่างสัมผัสกับสารละลายที่มีค่าพีเอชอยู่ในช่วงควบคุมตลอด 24 ชั่วโมง และข้อเสีย คือ การควบคุมพีเอชให้มีความแม่นยำสูงจำเป็นต้องใช้เครื่องมืออัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา (2545)

ศึกษาการหล่อแข็งกากตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก เพื่อพัฒนารูปแบบการหล่อแข็งให้เป็นการหล่อแข็งด้วยปูนซีเมนต์ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตัน ทำให้สามารถนำก้อนหล่อแข็งของเสียอันตรายกลับมาใช้ในงานก่อสร้างได้ โดยศึกษาอัตราส่วนและปริมาณโครเมียมในตะกอนโครเมียมที่เหมาะสม ในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ ล็อกกึ่งบล็อก โดยมีกำลังรับแรงอัดเทียบเท่ามาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก มอก.60 - 2516 ชั้นคุณภาพ ค - 2 และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมาไม่เกินมาตรฐาน ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ด้วยวิธี TCLP ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ซีเมนต์แกลบ และหินฝุ่น ในอัตราส่วน 1:1:7 ผสมรวมกับน้ำร้อยละ 15 ของน้ำหนักส่วนผสมรวม สามารถบำบัดของเสียอันตรายที่เป็นตะกอนโครเมียมด้วยการหล่อแข็งในรูปคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก แบบอินเตอร์ ล็อกกึ่งบล็อก โดยการใช้ตะกอนโครเมียมแทนหินฝุ่นร้อยละ 30 โดยปริมาตร สามารถบำบัดโครเมียมในตะกอนโครเมียมในปริมาณ 19.231 กรัมโครเมียมต่อกิโลกรัมปูนซีเมนต์ซีเมนต์แกลบได้ โดยมีกำลังรับแรงอัด 136.6 Kg/cm^2 ซึ่งไม่น้อยกว่า 85 Kg/cm^2 ตามมาตรฐานคอนกรีตบล็อกเชิงตันรับน้ำหนัก (มอก. 60 - 2516 ชั้นคุณภาพ ค - 2) และมีปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะล้างออกมา 2.930 mg/L ซึ่งไม่เกิน 5 mg/L ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

อรพร จันทรพิญกุล (2545)

ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเผาแกลบเพื่อให้ได้แกลบที่มีความไวต่อปฏิกิริยาและนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในกระบวนการหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์ ซึ่งพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเผาแกลบเพื่อให้ได้แกลบที่มีความไวต่อปฏิกิริยา คือ ทำการเผาที่อุณหภูมิ 650°C เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษากระบวนการหล่อแข็งโครเมียม เหล็ก และสังกะสีไฮดรอกไซด์โดยใช้แกลบที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้โครเมียมไฮดรอกไซด์ เหล็กไฮดรอกไซด์และสังกะสีไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักและใช้แกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักตลอดทั้งการทดลอง และศึกษาผลของแกลบต่อสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของก้อนหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์สังเคราะห์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแกลบเป็นวัสดุประสาน โดยทดสอบระยะเวลาการก่อตัว การพัฒนาความสามารถในการรับแรงอัดและการร้าวไหลของโลหะหนักในระยะสั้น

จากการวิจัยพบว่า การเพิ่มปริมาณแกลบในการแทนที่ปูนซีเมนต์ มีผลทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของของผสมลดลง ส่วนการเติมโครเมียม เหล็กและสังกะสีไฮดรอกไซด์ ทำให้ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นจากเดิม 3.75 ชั่วโมงเป็น 5.25, 4.75 และ 5 ชั่วโมงตามลำดับ และพบว่าระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมโครเมียมและ

เหล็กไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อระดับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ในขณะที่สังกะสีให้ผลที่ตรงกันข้ามกับโครเมียมและเหล็กไฮดรอกไซด์ ด้านความสามารถในการรับกำลังแรงอัดของก้อนหล่อแข็งซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 28 วันเท่ากับ 439 Kg/cm^2 ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบปริมาณร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักมีการรับกำลังแรงอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ทุกระยะการบ่มอย่างไรก็ตามความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งของเสียที่ทุกอัตราส่วนผสมผ่านเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการฝังกลบ (3.5 Kg/cm^2 ที่อายุ 28 วัน) สำหรับการทดสอบการรั่วไหล ซึ่งทดสอบโดยวิธี TCLP พบว่ามีการรั่วไหลของสังกะสีสูงกว่าโครเมียมและเหล็กไฮดรอกไซด์ ในขณะที่การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบไม่ส่งผลต่อการชะละลายของโลหะหนักมากนัก โดยผลการทดสอบวิธี TCLP พบว่าความเข้มข้นของโลหะหนักทั้ง 3 ชนิดคือ โครเมียม เหล็กและสังกะสีในน้ำชะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นที่กำหนดโดย US EPA

คมกริช น่วมจิตร และคณะ (2548)

ศึกษาสมบัติเชิงกายภาพและเชิงกลของอิฐบล็อกธรรมดาและอิฐบล็อกที่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำตาล เพื่อศึกษาหาแนวทางประยุกต์ใช้กากตะกอนจากระบบการผลิตน้ำตาลทรายในการปรับปรุงสมบัติของอิฐบล็อก ซึ่งกากตะกอนน้ำตาลได้จากกระบวนการล้างหม้อกรองน้ำเชื่อมแรงดันสูง (Rotary Pressure Filter: RPF) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการผลิตน้ำตาลรีไฟน์ และน้ำตาลทรายขาว จากการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลมิตรผล โดยการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 กรณี ดังนี้ 1) ตัวอย่างการทดสอบที่ 1 กากตะกอนน้ำตาลที่ผ่านกระบวนการเผา 2) ตัวอย่างการทดสอบที่ 2 กากตะกอนน้ำตาลที่ไม่ผ่านกระบวนการเผา โดยทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยวิธี X-ray Diffraction พบว่า กากตะกอนน้ำตาลมีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ สำหรับกากตะกอนน้ำตาลตัวอย่างที่ 1 มีแคลเซียมซัลไฟด์ 3.04 % และ Larnite 30.70 % ของปูนซีเมนต์ สำหรับกากตะกอนน้ำตาลตัวอย่างที่ 2 มีแคลเซียมซัลไฟด์ 2.44 % และ Larnite 39.00 % แล้วทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนน้ำตาลทั้ง 2 ตัวอย่างต่อทรายต่อหิน โดยหน่วยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราส่วนดังนี้ (0.80:0.20):2:4, (0.60:0.40):2:4, (0.40:0.60):2 :4, (0.20:0.80):2:4 จากการทดสอบการดูดซึมน้ำพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากตะกอนที่ทดแทนปูนซีเมนต์ และค่าการดูดซึมน้ำของทุกส่วนผสมที่ศึกษา ผ่านมาตรฐาน มอก. 58 – 2533 คือ มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 25 จากการทดสอบกำลังแรงอัดที่อายุ 28 วัน พบว่า ในอัตราส่วนที่ศึกษา ที่ 20 % (0.80:0.20):2:4 ค่ากำลังแรงอัดของอิฐบล็อกที่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำตาลรับกำลังแรงอัดได้ดีกว่าอิฐบล็อกธรรมดาทั่วไป ในการเปรียบเทียบราคาค้นทุนการผลิต จากการนำกากตะกอนน้ำตาลทั้ง 2 ตัวอย่างมาแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตอิฐบล็อกพบว่า อิฐบล็อกที่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำตาลตัวอย่างที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตไม่คุ้มทุน

เนื่องจากต้องผ่านกระบวนการเผาที่มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าอิฐบล็อกจากธรรมดาทั่วไปสำหรับอิฐบล็อกจากที่มีส่วนผสมของกากตะกอนน้ำตาลตัวอย่างที่ 2 ในอัตราส่วนที่ 20 % (0.80:0.20):2:4 รับกำลังแรงอัดได้มากกว่าอิฐบล็อกจากธรรมดาทั่วไป และสามารถลดต้นทุนในการผลิตอิฐบล็อกจากได้ 0.80 บาท/ก้อน เมื่อเปรียบเทียบกับอิฐบล็อกจากธรรมดาทั่วไป

รชพล ฅ นคร (2548)

ศึกษาความสามารถในการรับแรงอัดและการร้าวไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก โดยมุ่งเน้นเพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำเถ้ากลับมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก โดยทำการศึกษาอัตราส่วนเถ้ากลับมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก แล้วให้ค่าความสามารถในการรับแรงอัดสูงสุดจากนั้นนำอัตราส่วนที่ได้มาผสมกับกากตะกอนโลหะหนักในอัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก เพื่อทดสอบความสามารถในการรับแรงอัดและทดสอบการร้าวไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก พบว่า ก้อนหล่อแข็งที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลับมาใช้ปริมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดหลังจากอายุการบ่ม 28 วันขึ้นไป โดยมีความสามารถในการรับแรงอัดสูงกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลับมาใช้ที่อายุการบ่ม 28, 56 และ 91 วัน คิดเป็นร้อยละ 8.5, 8.2 และ 9.1 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อปริมาณกากตะกอนโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการรับแรงอัดของก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนักลดลง โดยที่ปริมาณกากตะกอนโลหะหนักในก้อนหล่อแข็งร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่ 28 วัน มีความสามารถในการรับแรงอัดเท่ากับ 94 Kg/cm^2 ซึ่งน้อยกว่าก้อนหล่อแข็งที่ไม่มีการเติมกากตะกอนโลหะหนักที่อายุเท่ากันคิดเป็นร้อยละ 77.7 เมื่อทำการทดสอบการร้าวไหลของโลหะหนักจากก้อนหล่อแข็งด้วยวิธี Multiple Extraction Procedure (MEP) พบว่า ปริมาณกากตะกอนโลหะหนักและค่าพีเอชของสารชะละลายก็ยังมีส่วนต่อการร้าวไหลของโลหะจากก้อนหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก โดยเมื่อแทนที่ก้อนหล่อแข็งด้วยกากตะกอนโลหะหนักร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นสะสมของการชะละลายของ ทองแดงเหล็ก โครเมียมแคดเมียม และ สังกะสี มีค่าเท่ากับ 0.247, 2.348, 0.346, 0.006 และ 0.389 mg/L ตามลำดับ ส่วนตะกั่วไม่สามารถตรวจวัดความเข้มข้นได้ด้วยเครื่อง AAS อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักในสารชะละลายมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จันทร์แก้ว วิฑูรชาติ (2549)

ทำการศึกษาผลของโลหะหนักในระดับความเข้มข้นต่ำที่มีต่อลักษณะสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้จากการทำให้เป็นก้อนหล่อแข็ง และการวิเคราะห์การชะล้าง โลหะหนักที่อยู่ในรูปของออกไซด์ ได้แก่ แคดเมียมออกไซด์ (CdO) โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และนิกเกิลออกไซด์ (NiO) ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น ตั้งแต่ร้อยละ 0.1, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0% โดยน้ำหนัก โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นวัสดุประสาน ใช้แบบหล่อรูปลูกบาศก์ ขนาด $5 \times 5 \times 5$ cm² จากผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างขององค์ประกอบของซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) พบว่าโลหะหนักทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบของซีเมนต์มอร์ตาร์ และได้สารประกอบที่เกิดขึ้นใหม่ ที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับกำลังแรงอัด โดยทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์มีแนวโน้มลดลง ผลการชะล้างโลหะหนักจากซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วยวิธี TCLP พบว่า ซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีโครเมียมปนเปื้อนมากกว่า 0.1 % โดยน้ำหนัก จัดว่าเป็นของเสียอันตราย ส่วนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีแคดเมียม และนิกเกิลปนเปื้อนน้อยกว่า 2.0 % โดยน้ำหนัก ไม่จัดว่าเป็นของเสียอันตราย โดยการเรียงลำดับชนิดของโลหะหนักที่ความเข้มข้นเท่ากันที่ทำให้เกิดการชะล้างของโลหะหนักออกจากซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ต่างกันเป็นดังนี้ โครเมียมทำให้เกิดการชะล้างจากซีเมนต์มอร์ตาร์ได้มากที่สุด รองลงมา คือ แคดเมียม ในขณะที่นิกเกิลเกิดการชะล้างออกจากซีเมนต์มอร์ตาร์ได้น้อยที่สุด

ประภัสสร มณีรัตน์ (2551)

ทำการศึกษาการหล่อแข็งภาคตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ในการหล่อแข็งใช้อัตราส่วนภาคตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5:1, 0.75:1 และ 1:1 โดยน้ำหนักและแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยผงปูนซีเมนต์ในปริมาณ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 % โดยน้ำหนัก โดยทำการทดสอบกำลังแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP ภาคตะกอนหล่อแข็งเพื่อประเมินประสิทธิผลในการปรับเสถียรและการหล่อแข็งภาคตะกอนโลหะหนัก ผลการวิจัยพบว่า อัตราส่วนภาคตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสาน เปรอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์และระยะเวลาการบ่มมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและการชะละลายของโลหะหนักของภาคตะกอนหล่อแข็ง โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนภาคตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานและเปอร์เซ็นต์การใช้ผงปูนซีเมนต์ทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงและการชะละลายของโลหะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการบ่มทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นและการชะละลายของโลหะหนักลดลง ในการทดสอบภาคตะกอนหล่อแข็งทุกส่วนผสมที่ทำการทดลอง ให้ผลผ่านเกณฑ์มาตรฐานในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ซึ่งกำหนดไว้ใน US EPA 40 CFR 261 และผ่านมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และการทดสอบกำลังรับแรงอัดมีผลผ่านเกณฑ์มาตรฐานตาม

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2540 จากส่วนผสมต่างๆ ที่ทำการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนกากตะกอนโลหะหนักต่อวัสดุประสานเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อผงปูนซีเมนต์เท่ากับ 70:30 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากอัตราส่วนผสมนี้มีค่าใช้จ่ายของวัสดุน้อยที่สุดเท่ากับ 4,788 บาท ในการหล่อแข็งกากตะกอนโลหะหนัก 1,000 Kg และในการทดสอบการชะละลายควรทำการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี TCLP และวิธี WET เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาการชะละลายของโลหะหนักจากกากตะกอนหล่อแข็ง

สมชาย มณีวรรณ (2551)

ศึกษาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมของเชื้อเพลิงอัดแท่ง (Refuse Derived Fuel 5: RDF-5) ที่มีส่วนประกอบของขยะที่ผ่านกระบวนการบำบัดด้วยกรรมวิธีเชิงกลชีวภาพ (Mechanical Biological Treatment: MBT) ร่วมกับกากตะกอนน้ำมันดิบ โดยนำมาเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิง RDF-5 ที่มีส่วนประกอบของขยะชุมชนร่วมกับกากตะกอนน้ำมันดิบ ในการผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 ทำการผสมกากตะกอนน้ำมันดิบกับขยะ MBT ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งกากตะกอนน้ำมันดิบถูกนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเหมาะสมจนกากตะกอนน้ำมันดิบกลายเป็นของเหลวหนืดก่อนนำไปผสมให้เข้ากันกับขยะ MBT ซึ่งกากตะกอนน้ำมันดิบช่วยให้การจับตัวกันของอัตราส่วนเชื้อเพลิงเป็นเนื้อเดียวกัน ในการศึกษาอัตราส่วนของกากตะกอนน้ำมันดิบต่อขยะ MBT ใช้อัตราส่วน 5:95, 10:90, 15:85, 20:80 และ 25:75 ตามลำดับ จากนั้นทำการอัดแท่งเชื้อเพลิง RDF-5 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm และยาว 30 mm สมบัติทางกายภาพและความร้อนของ RDF-5 ถูกตรวจสอบในบริบทของตัวแปรที่ต้องการระหว่างกระบวนการผลิตและสมบัติต่างๆ ของเชื้อเพลิง RDF-5 และวิเคราะห์อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างกากตะกอนน้ำมันดิบกับขยะ MBT โดยทำการทดสอบค่าความร้อนตามมาตรฐาน ASTM D 240 ค่าความชื้นตามมาตรฐาน ASTM E 3173 ปริมาณเถ้าตามมาตรฐาน ASTM E 3174 และค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM E 75 ตามลำดับ จากนั้นวิเคราะห์ความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์ของการผลิตและการนำเชื้อเพลิง RDF-5 ไปผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือทางการเงิน คือ ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PBP) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) และอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) ตามลำดับ และประเมินวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิง RDF-5 ที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยการใช้โปรแกรม SimaPro Version 7.2 ด้วยวิธี Eco-indicator 95

จากผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมของกากตะกอนน้ำมันดิบต่อขยะ MBT คืออัตราส่วนที่ 20:80 มีความเป็นไปได้ที่จะนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง RDF-5 มากที่สุดเนื่องจากมีค่าความร้อนเท่ากับ 11,260 Kcal/Kg ค่าความชื้นร้อยละ 5.93 มีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 806 Kg/m³ (ค่าความร้อนสูงกว่าค่าความร้อนมาตรฐานที่ 5,000 Kcal/Kg ปริมาณความชื้นไม่เกินร้อยละ 10

และค่าความหนาแน่นมากกว่า 600 Kg/m^3 ตามมาตรฐานการผลิตเชื้อเพลิง RDF-5) และมีปริมาณของเถ้าร้อยละ 4.74 ตามลำดับ ส่วนการประเมินความเหมาะสมทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่าระยะเวลาคืนทุนของเชื้อเพลิง RDF-5 เท่ากับ 3.87 ปี มูลค่าปัจจุบันสุทธิเท่ากับ 172 ล้านบาท และอัตราผลตอบแทนภายในเท่ากับร้อยละ 20.55 ตามลำดับ และแนวโน้มของผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อมจากการประเมินวัฏจักรชีวิตของเชื้อเพลิง RDF-5 คือผลกระทบจากโลหะหนัก เท่ากับ 2,972 Pt รองลงมา คือ ผลกระทบจากภาวะฝนกรด (Acidification) เท่ากับ 724 Pt ผลกระทบจากหมอกควัน (Winter smog) เท่ากับ 335 Pt และผลกระทบจากภาวะก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse) เท่ากับ 248 Pt ตามลำดับ ดังนั้นจากการประเมินผลการวิจัยนี้พบว่าเชื้อเพลิง RDF-5 ที่มีส่วนประกอบของกากตะกอนน้ำมันดิบร่วมกับขยะ MBT เป็นหนึ่งในทางเลือกที่น่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงพลังงานทดแทนและแก้ปัญหาการจัดการขยะมูลฝอย นอกจากนี้ช่วยปรับปรุงคุณภาพสิ่งแวดล้อมของโลกให้ดีขึ้น

อุษณีย์ อุยะเสถียร และคณะ (2552)

ศึกษาลักษณะสมบัติและความเป็นพิษต่อพืชของกากตะกอนน้ำเสียชุมชนจากโรงบำบัดน้ำเสียหนองแขมเพื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการเกษตร โดยทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของกากตะกอนและทดสอบการงอกของเมล็ดพืช กากตะกอนน้ำเสียที่ได้รับมามี 3 ชนิด คือ กากตะกอนที่ไม่ได้ย่อยสลาย กากตะกอนที่ย่อยสลายแล้ว และปุ๋ยหมักที่ผลิตจากกากตะกอน จากผลการศึกษาพบว่า กากตะกอนทั้ง 3 ชนิดมีปริมาณโพแทสเซียมต่ำกว่ามาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ มีปริมาณทองแดงและนิกเกิลสูงกว่ามาตรฐานกากตะกอนที่นำไปใช้เพื่อการเกษตร สำหรับผลการทดสอบการงอกเมล็ดที่ทดสอบโดยการใช้น้ำสกัดจากกากตะกอนทั้ง 3 ชนิดและใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุมมาเพาะเมล็ดผัก 2 ชนิด คือ เมล็ดกวางตุ้งคั้น และเมล็ดผักกาดขาวปลี พบว่า การงอกเมล็ดและความยาวรากเฉลี่ยของผักทั้ง 2 ชนิดที่เพาะในน้ำสกัดจากปุ๋ยหมักที่ผลิตจากกากตะกอน เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากปุ๋ยหมักที่ผลิตจากกากตะกอนถูกย่อยสลายจนสมบูรณ์มากกว่ากากตะกอนอีก 2 ชนิด ซึ่งกระบวนการหมักทำปุ๋ยทำให้เกิดการย่อยสลายอินทรีย์สาร ให้ธาตุอาหารที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ และมีการควบคุมสมบัติของปุ๋ยให้มีความเหมาะสมต่อพืช นอกจากนี้เมื่อการหมักปุ๋ยสมบูรณ์มากเท่าใด ทำให้สามารถลดสารประกอบที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชลดลงได้

เอกชัย ลิ้มพัฒนสกุล(2553)

ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตอิฐตัวหนอนจากกากตะกอนน้ำเสีย และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิต โดยทำการวิเคราะห์ส่วนประกอบของกากตะกอนน้ำเสียโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometer พบว่า กากตะกอนมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญในการทำอิฐตัวหนอน ได้แก่ อลูมิเนียม 10.10 % เหล็ก 0.88 % ซิลิกอน 4.38 % และแคลเซียม 1.16 % และทำการ

วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนน้ำเสีย โดยวิธีหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน (Total Threshold Limit Concentration: TTLC) และวิธีหาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Waste Extraction Test: WET) พบว่า ปริมาณของโครเมียม (Cr) แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) ตะกั่ว (Pb)ปรอท (Hg) สารหนู (As) แบเรียม (Ba) นิกเกิล (Ni) และสังกะสี (Zn) มีค่าไม่เกินมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 จึงสามารถนำกากตะกอนนี้ไปใช้เป็นวัสดุทดแทนในการผลิตอิฐตัวหนอนได้ ในการทดลองทำอิฐตัวหนอน วัสดุที่ใช้ในการผลิตอิฐตัวหนอน ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หินฝุ่น และกากตะกอนน้ำเสีย ใช้อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อหินฝุ่นต่อกากตะกอนน้ำเสีย ได้แก่ ชุดควบคุม (1:5:0), S1 (1:4:1) และ S2 (1:3:2) ใช้ระยะเวลาในการบ่ม 14 วัน จากนั้นทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้านความต้านทานแรงอัดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก (มอก. 2035 - 2534) ผลการทดสอบ พบว่า อิฐตัวหนอนทั้ง 3 แบบ มีค่าการรับแรงอัดลดลงตามปริมาณการใช้กากตะกอนน้ำเสียที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน มอก.2035 - 2534 ที่กำหนดไว้ โดยอัตราส่วน S2 เป็นอัตราส่วนที่มีความเหมาะสมในการทำการผลิต โดยมีต้นทุนการผลิตเท่ากับ 1.70 บาท/ก้อน สามารถประหยัดต้นทุนการผลิตได้ 0.08 บาท/ก้อน หรือคิดเป็น 5 % จากต้นทุนการผลิตต่อก้อน

กำลังการผลิตของเครื่องอัดอิฐตัวหนอน สามารถทำการผลิตได้สูงสุด 3,000 ก้อนต่อ 8 ชั่วโมง หรือ 900,000 ก้อนต่อปี ซึ่งกำลังความสามารถของเครื่องหนึ่งเครื่องสามารถนำเอากากตะกอนน้ำเสียมาใช้ทดแทนได้เพียง 900 ตันต่อปี แต่ปริมาณของกากตะกอนน้ำเสียที่ถูกส่งมากำจัดมีปริมาณเฉลี่ย 750 ตันต่อเดือน หรือ 9,000 ตันต่อปี หากต้องการนำกากตะกอนน้ำเสียทั้งหมดมาผลิตเป็นอิฐตัวหนอน ต้องใช้เครื่องอัดอิฐตัวหนอนทั้งหมด 10 เครื่อง และเพิ่มจำนวนพนักงานเพื่อมาประจำกับเครื่องจักร ซึ่งหากใช้เครื่องอัดอิฐตัวหนอนที่มีขนาดใหญ่ และกำลังการผลิตที่มากกว่านี้ จะทำให้ได้ผลผลิตที่มากขึ้น และประหยัดต้นทุนรวมถึงแรงงานได้มากกว่า

ภาพตะวัน ชลาชัยและคณะ (2554)

ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์กากตะกอนของโรงไฟฟ้ามาปลูกต้นรำแพย โดยวัสดุปลูก ได้แก่ ดินร่วนปนทราย ขุยมะพร้าว และปุ๋ยคอก ในอัตราส่วน 3:1.5:1 มาผสมกับกากตะกอน โดยแปรอัตราส่วนวัสดุปลูกและกากตะกอนทำการวิเคราะห์ความชื้น ค่าพีเอช ค่าการนำไฟฟ้า อินทรีย์วัตถุ ในโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งโลหะหนัก ศึกษาอัตราการเติมกากตะกอนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของต้นรำแพย และเมื่อครบกำหนด 90 วัน จึงทำการวัดดัชนีการเจริญเติบโตโดยใช้พารามิเตอร์ ได้แก่ ความยาวราก ความสูงส่วนเหนือราก น้ำหนักแห้ง และพื้นที่ผิวใบ พบว่าทุกอัตราส่วนมีสมบัติทั่วไปที่เหมาะสมในการเพาะปลูกต้นรำแพย ปริมาณโลหะหนักในวัสดุปลูกและกากตะกอนไม่เกินค่ามาตรฐานกากตะกอนเพื่อการเกษตร

ของสหรัฐอเมริกา (40 CFR Part 503.13) และมาตรฐานคุณภาพดินเพื่อการอยู่อาศัยและการเกษตรกรรมของประเทศไทย (พ.ศ 2547)

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2555)

ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต โดยรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งได้แก่ เถ้าถ่านหิน เถ้าแกลบ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าชานอ้อย เถ้าปาล์มน้ำมัน และวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเศษคอนกรีตที่ทิ้งแล้ว จากการศึกษาพบว่า เหตุผลหลักที่นิยมใช้เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมในงานคอนกรีตมากกว่านำไปใช้ในงานประเภทอื่นเนื่องจาก (1) การใช้เถ้าเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์บางส่วนในงานคอนกรีตทำให้สามารถใช้เถ้าได้จำนวนมาก (2) เทคโนโลยีที่ใช้ในงานคอนกรีตเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ซับซ้อนมาก (3) ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่มีประสิทธิภาพสูงมากในการยึดสารอันตรายต่างๆ ที่อาจมีในเถ้าให้อยู่ในเนื้อคอนกรีต ไม่แพร่กระจายหรือแพร่กระจายออกมาจากคอนกรีตได้น้อยมาก (4) จากงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศให้ผลตรงกันว่า เถ้าจากโรงงานอุตสาหกรรมมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสม มีความละเอียดสูง มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ไม่มากเกินไป สามารถทำให้คอนกรีตมีคุณภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ สารเคมี และวัสดุที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) รุ่น: AA nalyt 200 ยี่ห้อ Perkin Elmer
2. เครื่องวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค (Mastersizer X) รุ่น MSX ยี่ห้อ Malvern
3. เครื่องทดสอบกำลังอัดรุ่น KC-2000 ยี่ห้อ TTR-080G ดังรูปที่ จ-1
4. โต๊ะควบคุมการไหลพร้อมแบบทองเหลืองรูปกรวย (Flow Table) ดังรูปที่ จ-2
5. เครื่องผสมมอร์ตาร์ดังรูปที่ จ-3
6. แบบหล่อตัวอย่างทำด้วยวัสดุที่ซีเมนต์ไม่ยึดเกาะ (Briquet gang mold) ขนาด 5×5×5 ซม. ดังรูปที่ จ-4
7. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ
8. เครื่องเขย่าสาร (Orbital shaker)
9. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น: 860 ยี่ห้อ: Consort
10. เครื่องให้ความร้อน (hot plate)
11. เครื่องกรองลดความดัน
12. เครื่องชั่งความละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง รุ่น: Aux 220 ยี่ห้อ: Zhimadzu
13. ตะแกรงร่อนขนาด 10 mesh
14. เกรียงเหล็ก
15. อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo ERBA
2. เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot H_2O$) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo ERBA
3. กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Conc. H_2SO_4) บริษัท Carlo ERBA
4. แบเรียมไดฟีนิลามีนซัลเฟต (Barium Diphenylamine Sulfonate: BDS) อินดิเคเตอร์เกรดเอกสารนี้เป็นเอก บริษัท ACROS ทรัพยากรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ
5. กรดซิตริก (Citric acid, $C_6H_8O_7$) บริษัท Carlo ERBA
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เกรดวิเคราะห์ บริษัท Carlo ERBA

7. สารละลายกรดแอซติก (CH_3COOH) บริษัท Carlo ERBA
8. สารละลายมาตรฐานแคดเมียมเข้มข้น 1000 ppm (1000 ppm Cd) เกรด AR บริษัท คริสตัล มาร์
9. สารละลายมาตรฐานโครเมียมเข้มข้น 1000 ppm (1000 ppm Cr) เกรด AR บริษัท คริสตัล มาร์
10. สารละลายมาตรฐานทองแดงเข้มข้น 1000 ppm (1000 ppm Cu) เกรด AR บริษัท คริสตัล มาร์
11. สารละลายมาตรฐานตะกั่วเข้มข้น 1000 ppm (1000 ppm Pb) เกรด AR บริษัท คริสตัล มาร์

3.2 การดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมตัวอย่างกากตะกอน

การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตมอร์ตาร์ มีวิธีการเตรียมตัวอย่างกากตะกอน โดยมีการแบ่งกากตะกอนออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติกากตะกอน

นำกากตะกอนมา 500 g ไปผึ่งให้แห้ง โดยการเทกากตะกอนลงบนเสื่อน้ำมันแล้วเกลี่ยให้ทั่ว เพื่อให้กากตะกอนแห้งอย่างทั่วถึง นำผึ่งบริเวณแดดฟ้าของตึกจุฬาลงกรณ์ 1 เมื่อกากตะกอนแห้งแล้ว จะมีลักษณะเป็นเนื้อละเอียด จากนั้นนำมาบดด้วยครก แล้วร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 2 mm (10 mesh) นำกากตะกอนที่ได้เก็บไว้ในถุงซิปลพลาสติก ในการศึกษากากตะกอนนำกากตะกอนที่ได้ในส่วนที่ 1 แบ่งออกเป็นสองส่วนๆ ละประมาณ 200 g ส่วนแรกสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ได้เลย ส่วนที่สองนำเผาที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นก่อนการนำไปวิเคราะห์

ส่วนที่ 2 ใช้ในการผลิตมอร์ตาร์โดยนำไปทดแทนในส่วนของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมผลิตมอร์ตาร์ต่อไป

3.2.2 การศึกษาสมบัติกากตะกอน

การนำกากตะกอนมาใช้ในการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตมอร์ตาร์ จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์สมบัติของกากตะกอนเพื่อให้ทราบถึงความเป็นอันตรายและความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์สมบัติกากตะกอน

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	วิธีการ/เครื่องมือวิเคราะห์
1. ความชื้น (Moisture)	วิธีการชั่งน้ำหนัก
2. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	โดยเครื่องวัดพีเอช
3. การนำไฟฟ้า (Conductivity)	โดยเครื่องวัดการนำไฟฟ้า
4. ขนาดของอนุภาค	โดยเครื่องหาขนาดของอนุภาค
5. โลหะหนักในกากตะกอน (Heavy Metal) แคดเมียม (Cd), โครเมียม (Cr), ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb)	Waste extraction test(ประกาศกระทรวง อุตสาหกรรม,2548) Toxicity characteristic leaching procedure (US EPA,1992.SW-846 Method 1311)
6. อินทรีย์วัตถุในกากตะกอน (Organic Matter)	วิธีของ Walkleyและ Black, 1947 (กรมพัฒนาที่ดิน, 2547)รายละเอียดการ ทดลองแสดงในภาคผนวก ก - 1
7. อนินทรีย์วัตถุในกากตะกอน (Inorganic Matter) ซิลิกอน (Si), เหล็ก (Fe), แคลเซียม (Ca) และ อลูมิเนียม (Al)	เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-ray fluorescence spectrometry)รายละเอียดการ ทดลองแสดงในภาคผนวก ก - 2

- **Waste Extraction Test (WET)** เป็นวิธีการทดสอบการชะโลหะหนัก ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 รายละเอียดการทดลองแสดงอยู่ในภาคผนวก ก - 3

- **Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)** เป็นวิธีการทดสอบการชะละลายโลหะหนักที่ US EPA กำหนดขึ้นในปี ค.ศ.1986 ตามกฎหมาย HSWA (Hazardous and solid waste amendment) รายละเอียดการทดลองแสดงอยู่ในภาคผนวก ก - 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การเตรียมอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนกับวัสดุผสมมอร์ตาร์

การทดลองศึกษาหาอัตราส่วนของกากตะกอนที่เหมาะสมในการนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในการผลิตมอร์ตาร์ ทำการทดลองโดยแบ่งกากตะกอนได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 สูตร A, B และ C ใช้กากตะกอนหนึ่งในการผลิต ส่วนที่ 2 สูตร D, E และ F ใช้กากตะกอนที่ผ่านการเผาที่ 300 °C ในการผลิต โดยแต่ละส่วนแปรค่าอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนในปูนซีเมนต์เป็น 3 อัตราส่วน ดังนี้ 10, 20 และ 30 % และใช้ปูนซีเมนต์ในการผลิตโดยไม่มีส่วนผสมของกากตะกอน โดยทำการนำกากตะกอนและวัสดุผสมมอร์ตาร์มาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 3.2

3.2.4 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของมอร์ตาร์

ในการก่อซีเมนต์ปริมาณน้ำที่นำมาผสมมีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากการผสมซีเมนต์ถ้าส่วนผสมมีความชื้นหรือเหลวเกินไปจะทำให้ซีเมนต์ไม่เกิดการก่อตัว หรือการก่อตัวของซีเมนต์นั้นจะไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐาน ซึ่งการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เป็นไปตาม ASTM : C 230 - 61T รายละเอียดการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของมอร์ตาร์แสดงอยู่ในภาคผนวก ก-4

3.2.5 การหล่อมอร์ตาร์

การหล่อ คือการนำเอาวัสดุที่เป็นของเหลวเทลงไปในแบบหล่อ ให้วัสดุเหล่านั้นเกาะยึดผิวด้านในของแบบหล่อให้ทั่ว เมื่อวัสดุนั้นจับตัวกันเป็นของแข็ง แกะแบบหล่อออก รูปที่ปรากฏให้เห็นจะมีความเหมือนกับรูปต้นแบบ แต่เป็นผลงานอีกชิ้นหนึ่ง ซึ่งในการวิจัยทำการหล่อโดยใช้แม่พิมพ์หล่อขนาด 5×5×5 cm ที่ทำจากวัสดุที่ซีเมนต์ไม่ยึดเกาะ เมื่อซีเมนต์ก่อตัวแล้วนำออกจากแบบหล่อเพื่อนำไปวิเคราะห์และทดสอบความแข็งแรงต่อไปซึ่งวิธีการหล่อมอร์ตาร์ มีขั้นตอนดังนี้

1. ก่อนการบรรจุซีเมนต์ลงในแบบหล่อขนาด 5×5×5 cm ใช้น้ำมันพืชทาบางๆ ด้านที่สัมผัสซีเมนต์เตรียมไว้จากนั้นค่อยๆ อัดซีเมนต์ลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงของแบบหล่อ (2.5 cm) ระยะเวลาเสร็จสิ้นถึงจุดนี้ ควรใช้เวลาไม่เกิน 2 ½ นาที แล้วใช้แท่งกระทุ้งมาตรฐานกระทุ้งให้ได้ 32 ครั้ง ภายในเวลา 10 วินาที
2. จากนั้นใส่ซีเมนต์มอร์ตาร์ลงในแบบที่เหลือจนเต็ม และกระทุ้งอีก 32 ครั้งภายใน 10 วินาที เสร็จแล้วปาดผิวหน้าให้เรียบ ใช้ผ้าชุบน้ำประปาพอมหมาดๆ คลุมและตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง
3. เมื่อครบเวลาจึงแกะแบบนำก้อนตัวอย่างไปบ่มในน้ำประปา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ปริมาณกากตะกอนปูนซีเมนต์และส่วนผสมที่อัตราส่วนต่างๆ*

ชื่อสูตร การทดลอง	อัตราส่วนของกากตะกอนที่ใช้ ทดแทนปูนซีเมนต์ (%)	กากตะกอน (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ทราย (กรัม)	น้ำ (mL)
ชุดควบคุม	0	0	200	550	165
A	10	20	180	550	165
B	20	40	160	550	165
C	30	60	140	550	165
D	10	20	180	550	165
E	20	40	160	550	165
F	30	60	140	550	165

หมายเหตุ *ปริมาณส่วนผสมในการผลิตมอร์ตาร์ขนาด 5×5×5 cm จำนวน 3 ก้อน

A, B, C ใช้กากตะกอนแห้ง

D, E, F ใช้กากตะกอนที่ผ่านการเผา

3.2.6 การทดสอบเชิงกล

การทดสอบเชิงกลเป็นการทดสอบหาสมบัติด้านความแข็ง(Hardness) และความแข็งแรง (Strength) โดยเป็นสิ่งบ่งบอกว่าวัสดุต่างๆ สามารถรับหรือทนแรงดัน หรือทนพลังงานภายนอกได้มากน้อยเพียงใด และวัสดุต่างๆสามารถนำไปใช้งานได้ตามมาตรฐาน ทำการทดสอบเชิงกลโดยการทดสอบหาค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ ในการทดสอบหาค่ากำลังอัดสามารถทำการทดสอบได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด ทำการทดสอบกับตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 7, 14, 28 วัน ตามลำดับ โดยนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำก่อนเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ให้คลุมด้วยผ้าหมาดไว้จนถึงเวลาทำการทดสอบ การทดสอบให้ทำการเดินเครื่องทดสอบกำลังอัดเพิ่มแรงอัดอย่างสม่ำเสมอกระทั่งตัวอย่างแตก และนำเวลาที่ใช้ในการอัดตัวอย่างจนกระทั่งตัวอย่างแตกไปคำนวณหาค่าแรงอัด และนำค่าที่ได้มาเทียบกับค่ามาตรฐานมอก.15 เล่ม 12 ปี 2528 ซึ่งวิธีการทดสอบแรงอัดมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เมื่อทำการหลอมมอร์ตาร์และทำการบ่มแล้วจะทำการทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน ตามลำดับ โดยการนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำ หากนำขึ้นมาก่อนเวลาทดสอบ 24 ชั่วโมง ให้คลุมด้วยผ้าหมาดไว้จนถึงเวลาทดสอบ เช็ดผิวตัวอย่างให้แห้ง ปิดเม็ดทรายที่ติดผิวหน้าออก

2. ก่อนนำตัวอย่างเข้าเครื่องทดสอบแรงอัดให้วัดขนาดหน้าตัด ความสูง และชั่งน้ำหนักของตัวอย่างแต่ละก้อนและบันทึกไว้

3. การทดสอบให้เดินเครื่องทดสอบเพิ่มแรงอัดอย่างสม่ำเสมอกระทั่งตัวอย่างแตก เวลาที่นับจากการเริ่มให้แรงอัดกับตัวอย่างจนกระทั่งแตกจะต้องอยู่ภายในช่วงเวลา 20-80 วินาที จากนั้นนำค่าแรงอัดไปหาค่ากำลังรับแรงอัด

ค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ซีเมนต์มอร์ตาร์หาได้จากสมการ

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

โดยที่

f_c = กำลังรับแรงอัดประลัย (Kg/cm²)

P = แรงอัด (Kg)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (cm²)

3.2.7 การทดลองผลิตกระถาง

การทดลองผลิตกระถางเป็นการทดลองเพื่อนำกากตะกอนมาใช้ประโยชน์ ในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ โดยใช้อัตราส่วนกากตะกอนที่เหมาะสมจากการผลิตซีเมนต์ก้อน ซึ่งวิธีการทดลองผลิตกระถางมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมปูนซีเมนต์ กากตะกอน ทราย และน้ำ เตรียมโดยให้มีอัตราส่วนแปรตามปริมาณของปูนซีเมนต์ ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เท่ากับ 1,500 g
2. ทำการผสมส่วนผสมตาม ข้อ 1 ให้เข้ากันด้วยเครื่องผสม
3. เทส่วนผสมลงในแบบหล่อกระถางที่ทำไว้ โดยแบบหล่อทำจากกระถางพลาสติก 2 ขนาด คือ กระถางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 และ 5 นิ้ว ใช้เทปปิดกั้นกระถางพลาสติก เพื่อไม่ให้ส่วนผสมรั่วออกจากแบบหล่อ ใส่สายยางไว้ตรงรูที่เจาะไว้ เมื่อเทส่วนผสมลงไปเพื่อเป็นพื้นกระถางแล้ว นำกระถางที่มีขนาดเล็กกว่าลงไป แล้วจึงเทส่วนผสมที่เหลือกลงไปทำผนังกระถางตามขนาดที่ต้องการดังรูปที่ 3.5
4. รอให้ส่วนผสมก่อตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะกระถางที่ได้ออกจากแบบหล่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แบบหล่อทำจากกระถางพลาสติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้ามาใช้ในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ เพื่อศึกษาสมบัติของกากตะกอน ซึ่งมีศักยภาพในการหมุนเวียนกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ หรือนำไปเป็นวัตถุดิบเพื่อเพิ่มมูลค่าของกากตะกอน โดยศึกษาหาอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนกับวัสดุผสมที่เหมาะสมในการทำซีเมนต์ก้อน โดยแบ่งเป็นกากตะกอนแห้งที่ได้รับมา และกากตะกอนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 °C และเก็บรักษากากตะกอนที่ได้ไว้ในถุงพลาสติก ซึ่งผลการศึกษาประกอบด้วยสมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนสมบัติของซีเมนต์ก้อน การทดลองการนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตกระถาง และการวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิต

4.1 สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอน

4.1.1 สมบัติทางกายภาพและทางเคมี

กากตะกอนแห้งที่ได้รับมามีลักษณะเป็นผง และเป็นก้อนเล็กๆ สีเทา ไม่มีกลิ่น สำหรับกากตะกอนที่ผ่านการเผาที่ 300 °C มีลักษณะเป็นผง เบา สีเทาอ่อนกว่ากากตะกอนแห้งที่ได้รับมา และไม่มีกลิ่น

ค่าความชื้นของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่เผามีค่า 12.37 ± 0.64 % และ 8.12 ± 0.44 % ตามลำดับ ซึ่งกากตะกอนที่เผามีค่าความชื้นเนื่องจากกากตะกอนที่เผาสามารถดูดความชื้นในบรรยากาศได้ ค่าพีเอชของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผาเท่ากับ 7.01 ± 0.03 และ 6.43 ± 0.10 ตามลำดับ ค่าการนำไฟฟ้าของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผาเท่ากับ 36.10 ± 0.56 และ 73.5 ± 0.46 mS/cm ตามลำดับ

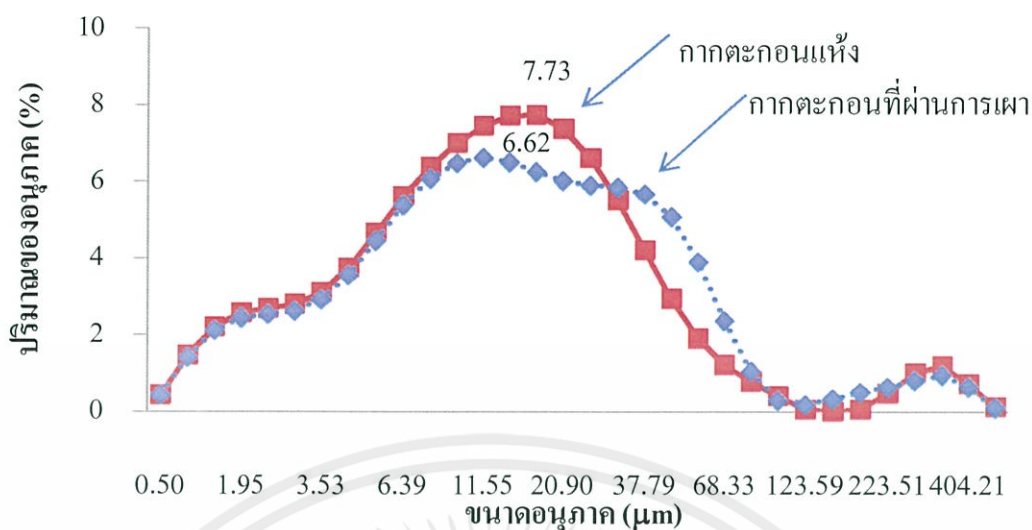
จากผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของกากตะกอนแห้งและกากตะกอนที่ผ่านการเผา โดยเครื่องวิเคราะห์หาขนาดอนุภาค (Mastersizer X) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ตั้งแต่ขนาด 0.50 – 600.00 μm พบว่า ขนาดอนุภาคที่มีจำนวนมากของกากตะกอนแห้งอยู่ในช่วงขนาด 15 – 18 μm ประมาณ 7.73 % มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย 0.7712 m^2/g แต่ขนาดอนุภาคที่มีจำนวนมากของกากตะกอนที่เผาอยู่ในช่วงขนาด 12 – 14 μm ประมาณ 6.62 % มีพื้นที่ผิวเฉลี่ย 0.7314 m^2/g ซึ่งขนาด

ของอนุภาคของกากตะกอนที่ผ่านการเผามีขนาดเล็กกว่าขนาดของกากตะกอนแห้งเล็กน้อย
เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณี
เนื่องจากการเผาที่ 300 °C ทำให้ความชื้นในกากตะกอนสามารถระเหยได้ ทำให้ขนาดอนุภาค
เปลี่ยนไป และทำให้พื้นที่ผิวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นด้วย

องค์ประกอบอนินทรีย์วัตถุของกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผา ทำการวิเคราะห์ โดยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ แสดงในตารางที่ 4.1 พบว่า มีองค์ประกอบหลัก คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และองค์ประกอบรอง คือ อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ซึ่งเป็น องค์ประกอบส่วนหนึ่งของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น แคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมอลูมิเนต โดยกากตะกอนแห้งมี SiO_2 และ Al_2O_3 เท่ากับ 56.4 และ 27.4 % ตามลำดับ ส่วนกากตะกอนที่ผ่านการเผามี SiO_2 และ Al_2O_3 เท่ากับ 56.8 และ 28.6 % ตามลำดับ จากผลการศึกษา พบว่า เปรอร์เซ็นต์ ของ SiO_2 และ Al_2O_3 ของกากตะกอนที่ผ่านการเผามีมากกว่ากากตะกอนแห้ง เนื่องจากกากตะกอนที่ผ่านการเผามีส่วนที่ระเหยได้ เช่น น้ำ และอินทรีย์วัตถุที่สลายง่ายถูกกำจัดออกโดยความร้อน ทำให้องค์ประกอบในกากตะกอนที่ผ่านการเผามีปริมาณมากกว่ากากตะกอนแห้ง จากผลการวิเคราะห์ องค์ประกอบอนินทรีย์วัตถุในกากตะกอนทั้งสองชนิด มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) มากกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากตารางที่ 2.2 ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานดัง สมการที่ 2.2 ได้มากขึ้น ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate: C-S-H) มากขึ้น สามารถช่วยลดผลกระทบจากการแยกตัวได้ และจากปริมาณของซัลเฟอร์ ไตรออกไซด์ที่มีปริมาณน้อยมาก (0.77 และ 0.50 %) ทำให้ส่วนผสมมีระยะเวลาในการก่อตัวลดลง (ชัย และคณะ, 2555)

จากการวิเคราะห์อินทรีย์วัตถุในกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผาเท่ากับ 2.19 ± 0.06 และ $1.25 \pm 0.04\%$ ซึ่งอยู่ในช่วงที่มีอินทรีย์วัตถุค่อนข้างต่ำถึงปานกลาง ในการเผากาก ตะกอนใช้อุณหภูมิที่ 300°C ซึ่งไม่สามารถกำจัดอินทรีย์วัตถุให้หมดไปได้ แต่ทำให้สลายตัวได้เพียง บางส่วน แต่ปริมาณอินทรีย์วัตถุที่มีถือว่าไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานของซีเมนต์ก้อน สำหรับ ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนแห้ง และกากตะกอนที่ผ่านการเผา ทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP และวิธี WET มีปริมาณแคดเมียม, โครเมียม, ทองแดง และตะกั่วดังตารางที่ 4.2 จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนผ่านเกณฑ์ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม และ US EPA กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ขนาดอนุภาคของกากตะกอน

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบอนินทรีย์วัตถุ

สารประกอบ	กากตะกอนแห้ง		กากตะกอนที่ผ่านการเผา	
	Kcps	%	Kcps	%
Na ₂ O	0.2	1.51	0.1	0.98
MgO	0.3	0.953	0.2	0.54
Al ₂ O ₃	8	27.4	10.4	28.6
SiO ₂	17.5	56.4	21.7	56.8
P ₂ O ₅	0.1	0.3	0.2	0.34
SO ₃	0.4	0.77	0.4	0.5
K ₂ O	4.1	2.19	4.9	2.13
CaO	2.4	1.4	2.8	1.33
TiO ₂	5.7	2.63	6.9	2.6
Cr ₂ O ₃	-	-	0.6	0.17
Fe ₂ O ₃	35	5.23	39.1	4.8
CuO	3.3	0.3	3.2	0.24

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบอนินทรีย์วัตถุ (ต่อ)

สารประกอบ	กากตะกอนแห้ง		กากตะกอนที่ผ่านการเผา	
	Kcps	%	Kcps	%
ZnO	2.1	0.16	2.8	0.17
SrO	8.5	0.2	10.6	0.2
ZrO ₂	9.5	0.31	12.1	0.32
Compton	-	0.9	-	0.9
Rayleigh	-	1.07	-	1.09

หมายเหตุ *Kcps : Kilocounts per second

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของกากตะกอน

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์		ค่ามาตรฐาน	
	กากตะกอนแห้ง	กากตะกอนที่ผ่านการเผา		
ความชื้น (%)	12.37 ± 0.64	8.12 ± 0.44	-	
พีเอช	7.01 ± 0.03	6.43 ± 0.10	-	
การนำไฟฟ้า (mS/cm)	36.10 ± 0.56	73.5 ± 0.46	-	
อินทรีย์วัตถุ (%)	2.19 ± 0.06	1.25 ± 0.04	-	
แคดเมียม (mg/Kg)	วิธี TCLP	ND	ND	1
	วิธี WET	ND	1.51 ± 0.65	1
โครเมียม (mg/Kg)	วิธี TCLP	9.29 ± 1.59	4.90 ± 1.75	5
	วิธี WET	7.77 ± 0.45	7.05 ± 0.72	5
ทองแดง (mg/Kg)	วิธี TCLP	9.36 ± 1.01	4.11 ± 0.75	-
	วิธี WET	8.42 ± 0.29	7.10 ± 1.23	25
ตะกั่ว (mg/Kg)	วิธี TCLP	7.19 ± 2.70	3.39 ± 3.63	5
	วิธี WET	6.20 ± 0.46	4.93 ± 0.38	5

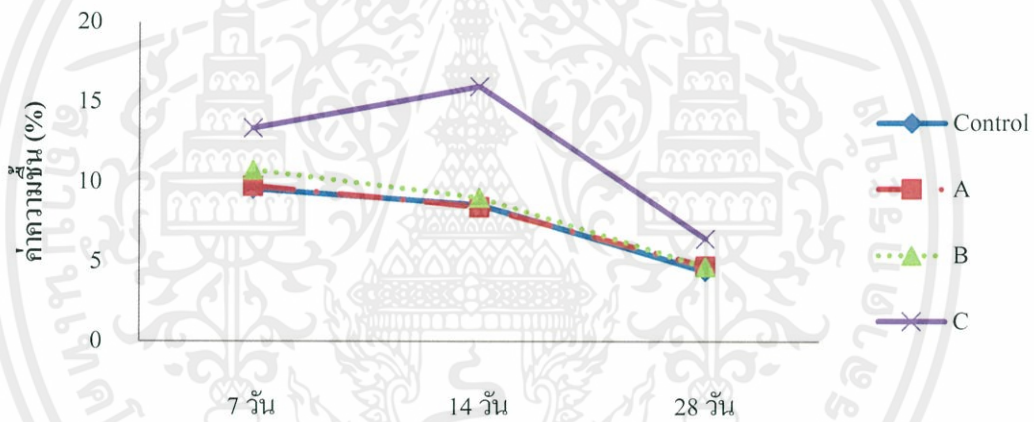
หมายเหตุ ND : Non-detectable

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

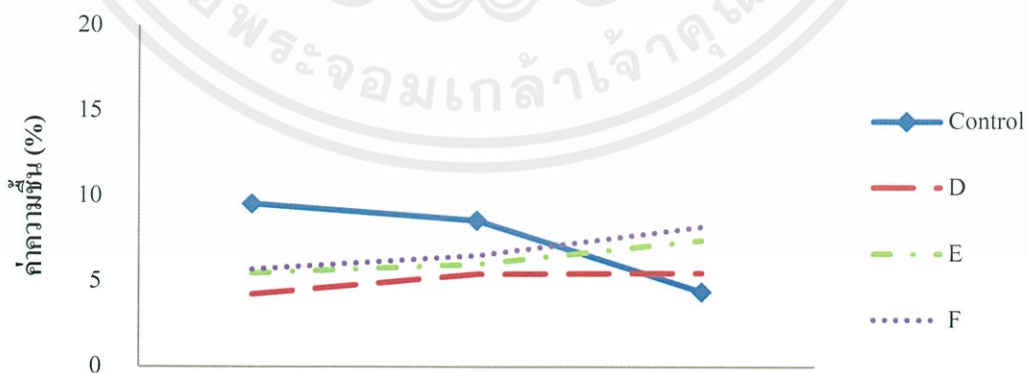
4.2 สมบัติของซีเมนต์ก้อน

4.2.1 สมบัติทางกายภาพ

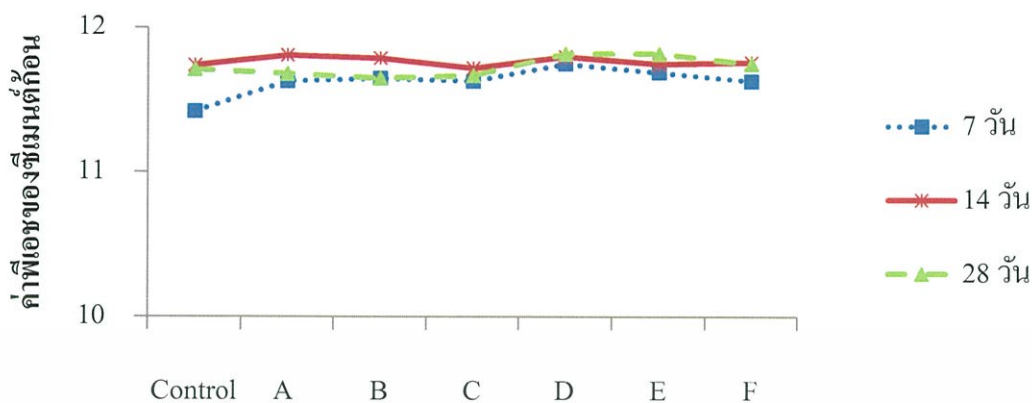
จากผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความชื้นพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของกากตะกอนทดแทนปูนซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์ก้อนมีความชื้นเพิ่มมากขึ้นทั้งกากตะกอนแห้งและกากตะกอนที่ผ่านการเผา จากกราฟรูปที่ 4.2 เมื่อซีเมนต์ก้อนมีอายุในการบ่มครบ 7 วัน ชุด C ซึ่งมีปริมาณกากตะกอนแห้งผสมอยู่ 30 % มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นสูงสุด ชุด B และชุด A มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่ำกว่าชุด C ตามลำดับ เช่นเดียวกับชุด D, E และ F ในกราฟรูปที่ 4.3 เนื่องจากในช่วงอายุในการบ่ม 7, 14 และ 28 วัน ปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้ซีเมนต์ก้อนมีการดูดซึมน้ำเข้าภายในเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อทำการบ่มนานวันมากขึ้น อัตราการดูดซึมน้ำเข้าสู่ซีเมนต์ก้อนลดน้อยลง สำหรับค่าพีเอชของซีเมนต์ก้อนมีค่าเป็นเบส ไม่แตกต่างกันมากในช่วง 7, 14 และ 28 วัน ดังรูปที่ 4.4 และค่าการนำไฟฟ้าของซีเมนต์ก้อนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกากตะกอนดังรูปที่ 4.5



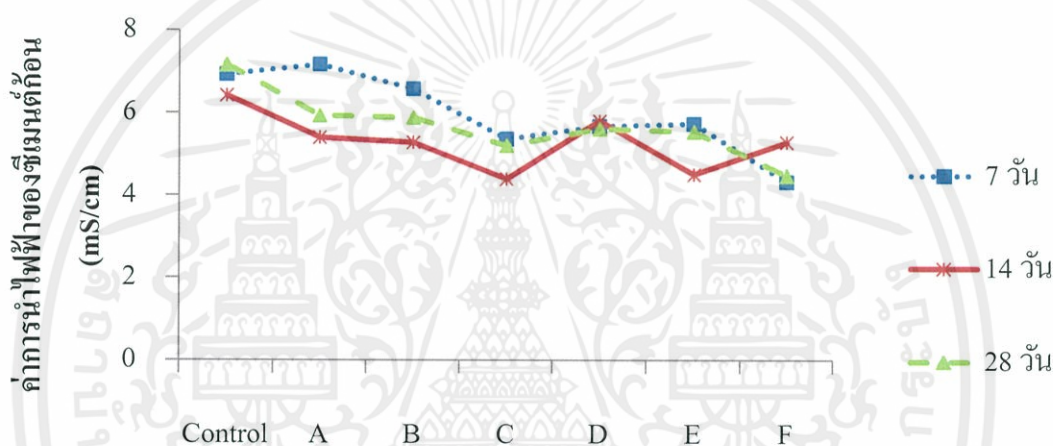
รูปที่ 4.2 ค่าความชื้นของซีเมนต์ก้อนที่ผลิตจากกากตะกอนแห้ง และชุดควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 14 วัน เท่านั้น ไม่แนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.3 ค่าความชื้นของซีเมนต์ก้อนที่ผลิตจากกากตะกอนที่ผ่านการเผา และชุดควบคุม



รูปที่ 4.4 ค่าพีเอชของซีเมนต์ก้อน



รูปที่ 4.5 ค่าการนำไฟฟ้าของซีเมนต์ก้อน

4.2.2 สมบัติเชิงกล

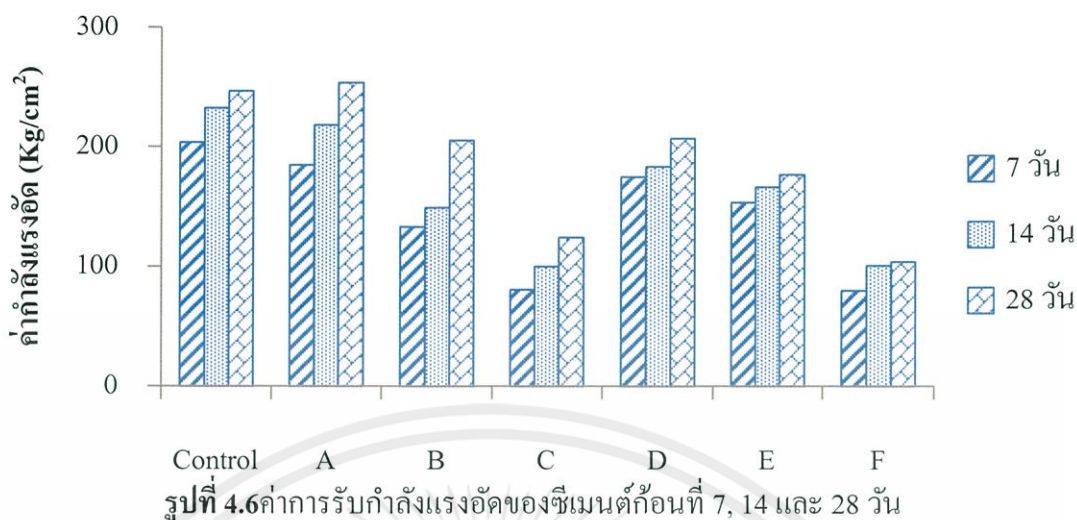
จากการทดสอบการรับกำลังแรงอัดของซีเมนต์ก้อน พบว่า การเพิ่มปริมาณกากตะกอนจาก 0 % เป็น 10, 20 และ 30 % มีผลทำให้ค่าการรับกำลังแรงอัดลดลง โดยที่ซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการบ่มที่ 7 และ 14 วัน ทุกชุดการทดลองมีค่าการรับกำลังแรงอัดน้อยกว่าชุดควบคุม แต่ซีเมนต์ก้อนชุด A ที่ผ่านการบ่มที่ 28 วัน เมื่อเทียบกับชุดควบคุมมีค่าการรับกำลังแรงอัดมากกว่าชุดควบคุม และผ่านเกณฑ์กำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 เนื่องจากการเพิ่มปริมาณกากตะกอนเข้าไปในส่วนผสม กากตะกอนสามารถเคลือบบนผิวของปูนซีเมนต์ ซึ่งมีผลในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดช่องว่างภายในโครงสร้างซีเมนต์ก้อนมากขึ้น เป็นผลให้มีค่าการรับกำลังแรงอัดลดน้อยลง เมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้นสามารถทำให้ซีเมนต์ก้อนมีค่าการรับกำลังแรงอัดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วยอุดช่องว่างภายในโครงสร้าง ทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น (ประภัสสร, 2551)

ในการผสมส่วนผสมในการหล่อซีเมนต์ก้อน ปฏิกริยาระหว่างองค์ประกอบทางเคมีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับน้ำ (ปฏิกิริยาไฮเดรชัน) ทำให้ซีเมนต์ก้อนสามารถก่อตัวได้ และเปลี่ยนรูปเป็นของแข็งชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติในการรับแรงอัดได้ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นในส่วนผสมนั้น โดยปริมาณความร้อนส่วนใหญ่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S ที่คายความร้อนสูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ ความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลต่อการรับแรงอัด ทำให้อุณหภูมิภายในส่วนผสมสูงกว่าอุณหภูมิภายนอก ความแตกต่างของอุณหภูมิสามารถทำให้เกิดรอยร้าว ส่งผลให้การรับแรงอัดลดลง ในการใช้กากตะกอนในส่วนผสม สามารถช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยกากตะกอนในส่วนผสมทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลง ส่งผลให้ความร้อนเกิดลดลงทำให้ซีเมนต์ก้อนมีความแข็งแรงมากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณกากตะกอนที่เพิ่มเข้าไป

ตารางที่ 4.3 ค่าการรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน

ตัวอย่าง	ค่ากำลังแรงอัด (Kg/cm^2) $\bar{X} \pm SD$ (n = 3)		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
Control	203.78 \pm 10.53	232.58 \pm 19.80	246.87 \pm 14.80
A	184.75 \pm 12.62	218.47 \pm 8.56	253.81 \pm 11.99
B	133.04 \pm 8.48	149.34 \pm 5.76	205.48 \pm 23.13
C	80.63 \pm 0.84	99.90 \pm 2.22	124.42 \pm 8.03
D	174.94 \pm 3.72	183.64 \pm 10.07	207.01 \pm 13.29
E	153.51 \pm 9.98	166.27 \pm 3.65	176.81 \pm 12.55
F	79.77 \pm 3.35	100.72 \pm 2.16	103.96 \pm 5.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ค่าการรับกำลังแรงอัดของซีเมนต์ก้อนที่ 7, 14 และ 28 วัน

4.2.3 สมบัติทางเคมี

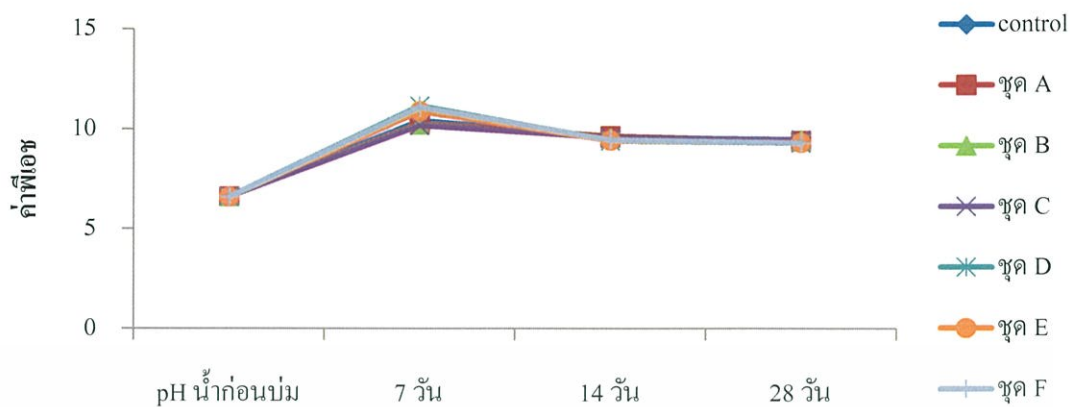
ในการบ่มซีเมนต์ก้อนโดยใช้น้ำประปาพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปลักษณะผิวหน้าของน้ำมีฝุ่นบางๆ เป็นฝ้าลอยอยู่ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในบรรยากาศละลายในน้ำที่ใบบ่มแล้วทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่มีในซีเมนต์ก้อน เกิดแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย สีขาวขุ่นลอยอยู่บนผิวน้ำ

จากกราฟรูปที่ 4.8 ที่อายุในการบ่ม 7 วัน ค่าพีเอชของน้ำสูงขึ้นจากเดิม เนื่องจากองค์ประกอบภายในซีเมนต์ก้อนมีการละลายออกมาได้ เกิดเป็น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ จึงมีผลทำให้ค่าพีเอชเป็นเบส และที่อายุในการบ่ม 14 และ 28 วัน ค่าพีเอชของน้ำลดลงเพราะอัตราในการเกิดปฏิกิริยาระหว่าง $\text{Ca}(\text{OH})_2$ กับ H_2CO_3 จากการละลายของ CO_2 ในบรรยากาศเกิดเป็น CaCO_3 ลดลง ทำให้ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ในน้ำที่บ่มลดลงและเนื่องจากฝ้าของ CaCO_3 กั้นการละลายของ CO_2 ลงในน้ำบ่มช่วง 14 – 28 วันได้ ทำให้ค่าพีเอชไม่ลดลงมากเท่ากับในช่วง 7 วันแรก



รูปที่ 4.7 ลักษณะของผิวน้ำบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่ไปภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาตจากคณะผู้บริหาร
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ศึกษาเพื่อทำ และต้องอ้างอิงถึงต้นตอของเอกสารที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ค่าพีเอชของน้ำบ่ม

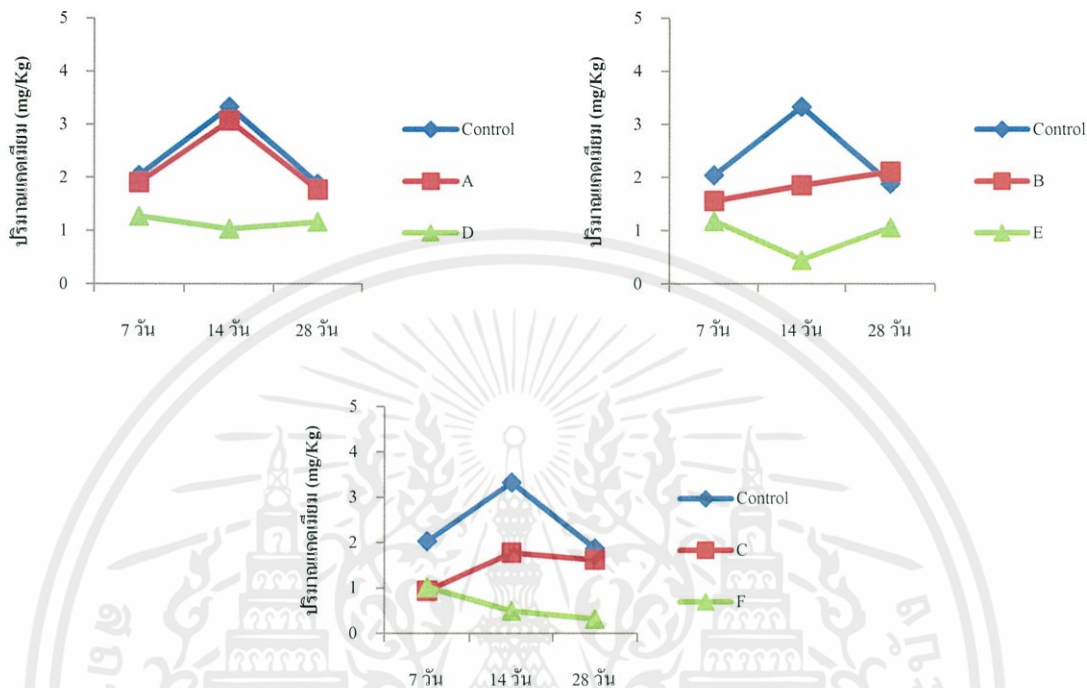
ค่าการดูดซึมน้ำ จากกราฟรูปที่ 4.9 น้ำหนักของซีเมนต์ก่อนหลังบ่มเพิ่มขึ้นจากเดิมทุกชุดการทดลอง โดยเฉพาะชุด D, E และ F ที่มีส่วนผสมของกากตะกอนที่ผ่านการเผา ซึ่งมีช่วงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากกว่าชุด A, B และ C ที่มีส่วนผสมของกากตะกอนแห้ง เนื่องจากกากตะกอนที่ผ่านการเผามีส่วนของน้ำที่ระเหยออกไป ทำให้ชุด D, E และ F ดูดซึมน้ำได้มากกว่าชุดกากตะกอนแห้ง ซึ่งน้ำที่ดูดซึมเข้าไปมีส่วนทำให้เกิดการกักเซาะของน้ำภายในซีเมนต์ก้อน และเพิ่มอัตราการละลายของสารต่างๆ ที่อยู่ภายในซีเมนต์ก้อนได้



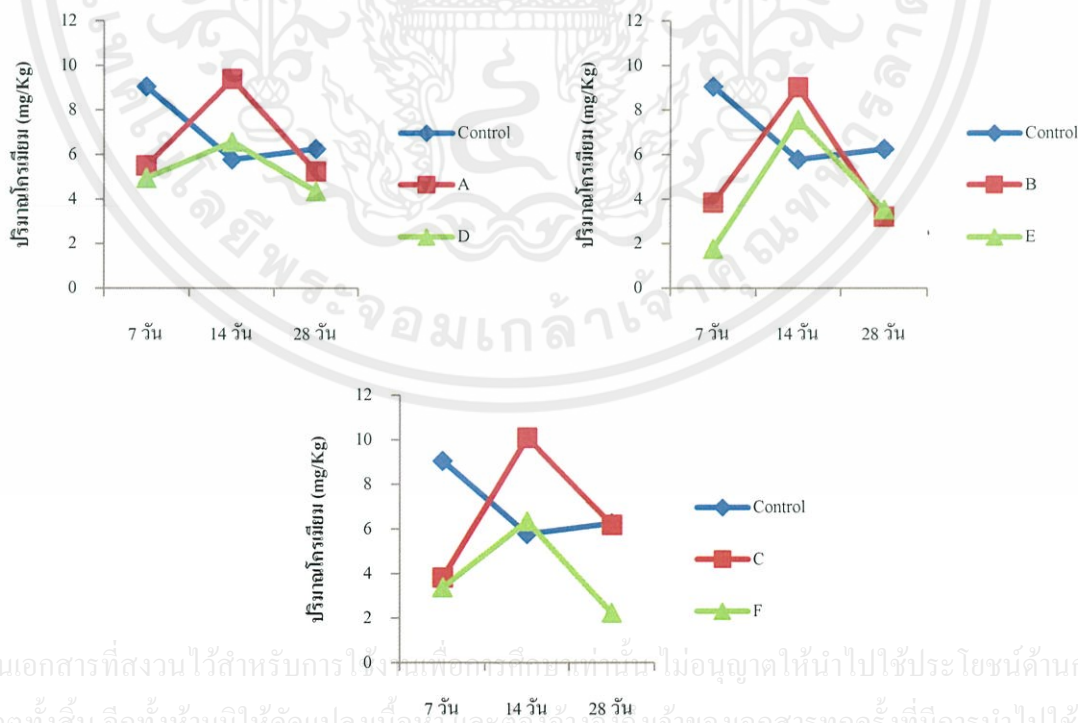
รูปที่ 4.9 น้ำหนักซีเมนต์ก้อนก่อนบ่มและหลังบ่ม

จากรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 แสดงความเข้มข้นแคลเซียม โครเมียม และทองแดงที่สกัดด้วยวิธี WET และรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.16 แสดงความเข้มข้นแคลเซียม โครเมียม ทองแดง และตะกั่วที่สกัดด้วยวิธี TCLP ที่ระยะในการบ่มต่างๆ พบว่า ทุกชุดการทดลองมีผลของความเข้มข้นจากการชะละลายโลหะหนักผ่านค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอนินทรีย์สำหรับการทดสอบด้วย

วิธี WET ที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ.2548 (ตารางที่ ค.1 ภาคผนวก ค) และผ่านค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ตามที่ US EPA กำหนด (ตารางที่ ค.3 ภาคผนวก ค)

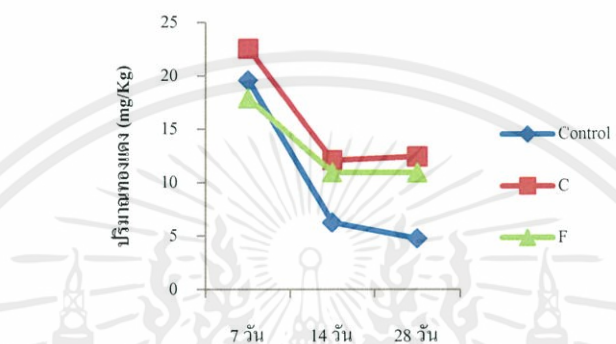
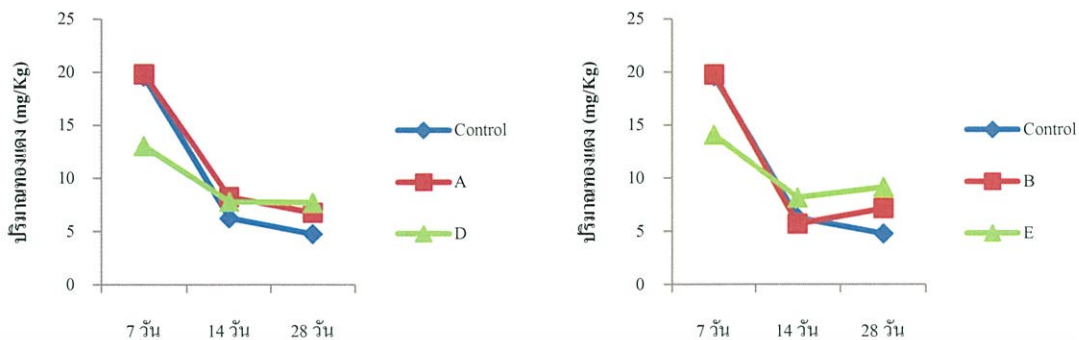


รูปที่ 4.10 ปริมาณแคดเมียมในซีเมนต์ก่อนที่สกัดด้วยวิธี WET

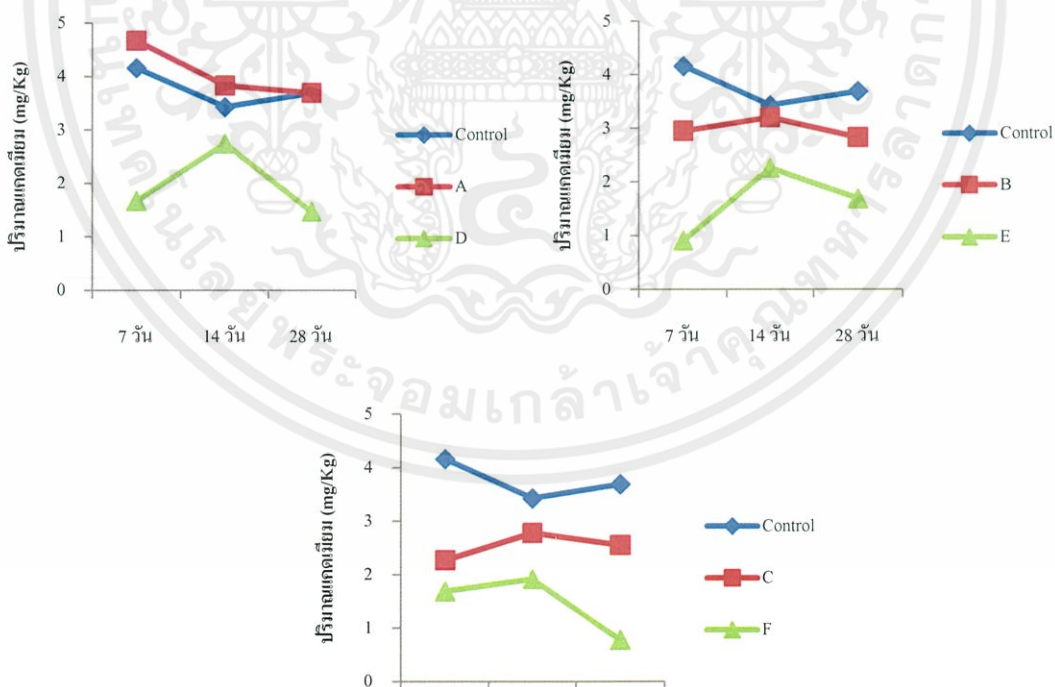


รูปที่ 4.11 ปริมาณโครเมียมในซีเมนต์ก่อนที่สกัดด้วยวิธี WET

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

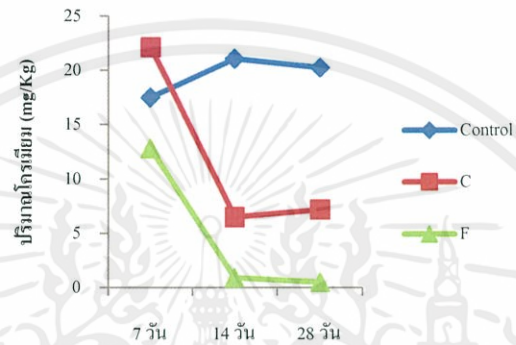
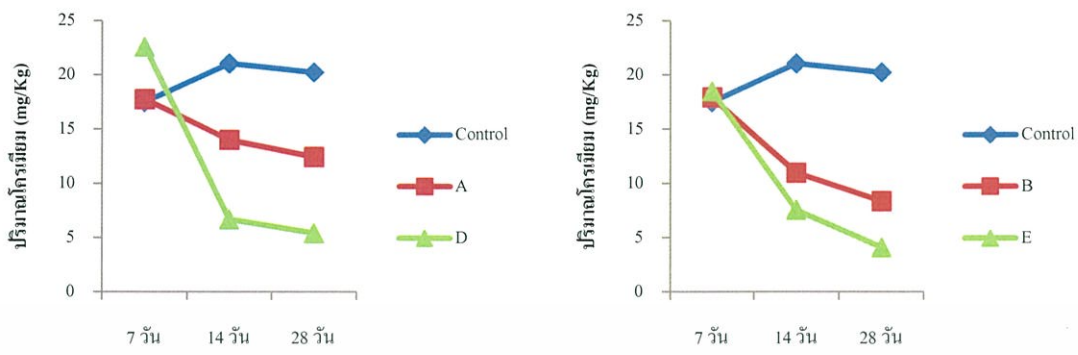


รูปที่ 4.12 ปริมาณทองแดงในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี WET

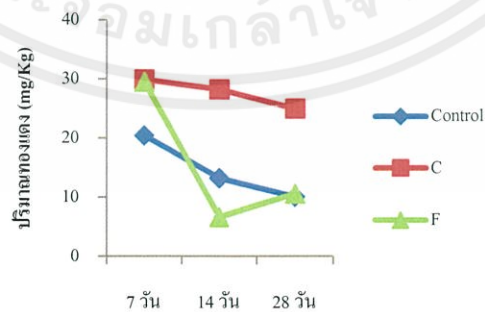
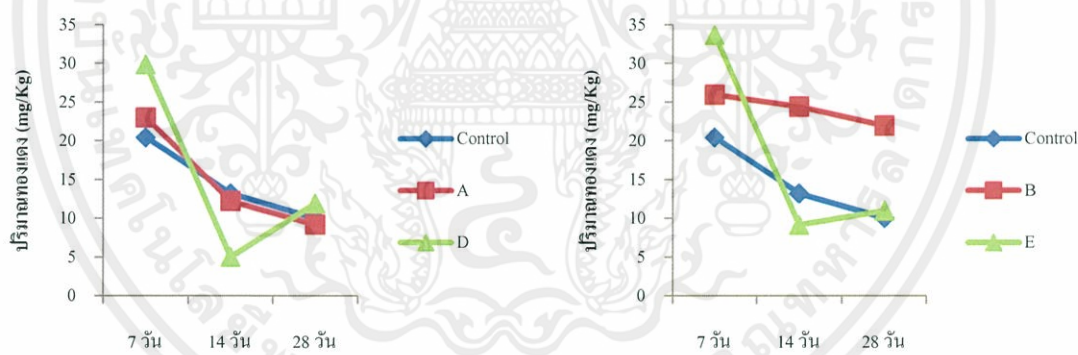


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 ปริมาณแคดเมียมในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP

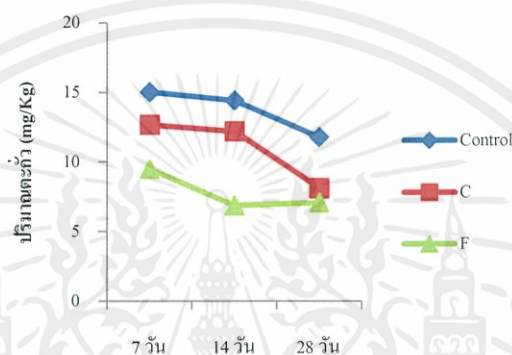
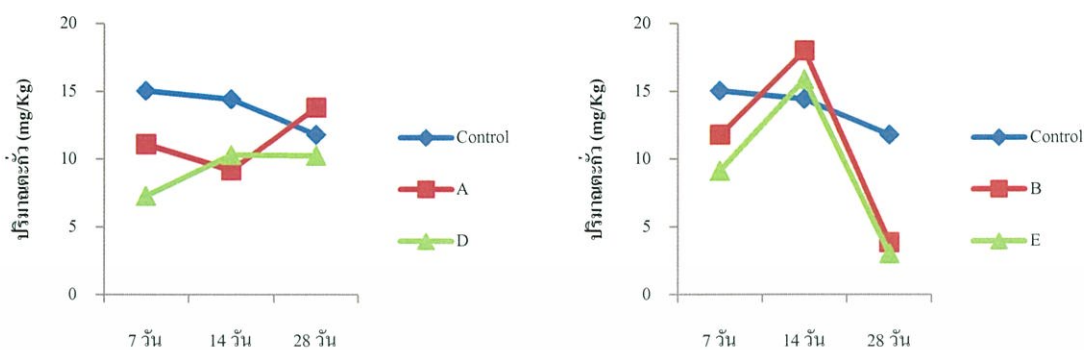


รูปที่ 4.14 ปริมาณ โครเมียมในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP



รูปที่ 4.15 ปริมาณ ทองแดงในซีเมนต์ก้อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดเบสลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ปริมาณตะกั่วในซีเมนต์ก่อนที่สกัดด้วยวิธี TCLP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การผลิตกระถางซีเมนต์

จากการทดสอบค่าการรับกำลังแรงอัด พบว่า การเพิ่มกากตะกอนแห้งในการทดแทนปูนซีเมนต์ที่ปริมาณกากตะกอนแห้ง 10 % (ชุด A) มีค่าการรับกำลังแรงอัดสูงสุด และผ่านเกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน (ตารางที่ ค.4 ภาคผนวก ค) จึงใช้อัตราส่วนกากตะกอนแห้งที่ 10% มาทำการทดลองผลิตกระถาง โดยแบ่งเป็น 2 ชุด คือ ชุดควบคุม โดยมีส่วนผสมคือ ปูน 1,500 g ทราย 4,125 g และน้ำ 1,237.50 mL และชุดทดลอง โดยมีส่วนผสมคือ ปูน 1,350 g กากตะกอนแห้ง 150 g ทราย 4,125 g และน้ำ 1,237.50 mL เมื่อครบเวลาจึงนำออกจากแบบหล่อ จากการทดลองผลิตกระถางครั้งที่ 1 พบว่า กระถางชุดควบคุมแตกทั้ง 2 ใบ และกระถางชุดทดลองแตก 1 ใบ อีก 1 ใบ แตกขณะที่ทำการเจาะรูที่ก้นกระถาง จึงได้ทำการทดลองผลิตกระถางเป็นครั้งที่ 2 โดยในครั้งที่ 2 ได้รอเวลาให้ตัวกระถางแห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมงแล้วจึงแกะออกจากแบบหล่อ ซึ่งในการทดลองครั้งที่ 2 เมื่อแกะกระถางออกจากแบบหล่อแล้วกระถางที่ได้ไม่มีการแตก มีรอยร้าวบริเวณข้างกระถางเล็กน้อย



รูปที่ 4.17 กระถางซีเมนต์



รูปที่ 4.18 กระถางซีเมนต์ที่ผลิตจากอัตราส่วนของกากตะกอน 10 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยัง

4.4 การวิเคราะห์ราคาคັมนทุนในการผลิต

จากการทดลองใช้กากตะกอนเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ พบว่า ปริมาณกากตะกอนที่เหมาะสมคือ 10 % เมื่อนำมาวิเคราะห์หาราคาคັมนทุนในการผลิต การใช้กากตะกอนปริมาณ 1 ตัน เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ สามารถลดคັมนทุนในการผลิตได้เป็นจำนวน 3,000 บาท โดยคิดจากปูนซีเมนต์ถุงละ 150 บาท หนัก 50 Kg (ราคา ณ กันยายน 2555) และถือว่าไม่มีคັมนทุนจากการใช้กากตะกอน ซึ่งกากตะกอน 1 ตันสามารถผลิตกระถางได้ประมาณ 20,000 ใบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงไฟฟ้ามาใช้ในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์โดยศึกษาหาอัตราส่วนระหว่างกากตะกอนกับวัสดุผสมที่เหมาะสมในการทำซีเมนต์ก้อน โดยใช้อัตราส่วนวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอน) ต่อทรายต่อน้ำ เท่ากับ 1:2.75:0.825 โดยกากตะกอนแบ่งเป็นกากตะกอนแห้งที่ได้รับมา และกากตะกอนที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300°C ซึ่งสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

5.1 สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอน

ผลการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของกากตะกอนสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ เนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอนคล้ายปูนซีเมนต์ในด้านองค์ประกอบอนินทรีย์ และด้วยองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุที่มีปริมาณน้อย ทำให้มีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ และขนาดอนุภาคที่มีพื้นที่ผิวเล็กมากช่วยในการตรึงโลหะหนักไว้ได้

5.2 การนำกากตะกอนจากโรงไฟฟ้ามาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด (Cd, Cr, Cu และ Pb) ในซีเมนต์ก้อน พบว่า เมื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ ค่าการชะละลายโลหะหนักของทุกชุดการทดลองมีปริมาณต่ำและมีค่าผ่านมาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอนินทรีย์สำหรับการทดสอบด้วยวิธี WET ที่กำหนดโดยกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และผ่านค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ตามที่ US EPA กำหนด

5.3 อัตราส่วนกากตะกอนที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

อัตราส่วนที่เหมาะสมในการหล่อซีเมนต์ก้อน คือ ชุด A ซึ่งมีอัตราส่วนของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ต่อกากตะกอนแห้ง) ต่อทรายต่อน้ำ เท่ากับ (0.9: 0.1) : 2.75 : 0.825 ชุด A ให้ค่าการรับกำลังแรงอัดที่ 28 วันผ่านเกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน และมีปริมาณโลหะหนักที่ทำการทดสอบการชะละลายด้วยวิธี WET และวิธี TCLP ผ่านค่ามาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 และ US EPA กำหนด ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนของกากตะกอนและระยะเวลาในการบ่มซีเมนต์ก้อนมีความสัมพันธ์กับค่าการรับกำลังแรงอัด กล่าวคือ เมื่อเพิ่ม

เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณี
อัตราส่วนกากตะกอนต่อปูนซีเมนต์มีผลทำให้ค่าการรับกำลังแรงอัดลดลง และเมื่อเพิ่ม
ระยะเวลาในการบ่มมีผลทำให้ค่าการรับกำลังแรงอัดเพิ่มขึ้น

5.4 การนำไปใช้ประโยชน์

การประยุกต์ใช้ประโยชน์ของการนำกากตะกอนมาใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ สามารถทำได้โดยผลิตเป็นกระถางสำหรับปลูกพืช

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ในการนำกากตะกอนไปผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ควรมีการทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้นๆ และศึกษาการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี WET และวิธี TCLP
2. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ในการนำกากตะกอนผลิตเป็นกระถางปลูกพืช เพื่อศึกษาผลกระทบของโลหะหนักที่อาจมีต่อการเจริญเติบโตพืช



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

กนกพร ชัยวุฒิภูกุล และอรรรดิวิทย์ชัชววรรณธรรม. 2542. “การศึกษาสมบัติการชะละลายของซีเมนต์ที่มีโลหะหนักเจือปนในปริมาณสูง.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือการวิเคราะห์ตัวอย่างดิน น้ำ ปุ๋ย ปิษ วัสดุปรับปรุงดิน และการวิเคราะห์เพื่อตรวจรับรองมาตรฐานสินค้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. 2547

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2552. คู่มือแนวทางการจัดการของเสียหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว. กรุงเทพฯ : สำนักบริหารจัดการกากอุตสาหกรรม กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2552.

คมกริช น่วมจิตร, เขาวลิต เนตรสกุล และ ธนากร ประทุมเกตุ. 2548. “การศึกษาและพัฒนาอิฐบล็อกจากกากตะกอนน้ำตาล.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี.

จันทร์แก้ว วิฑูรชาติ. 2549. “ผลของโลหะหนักในระดับความเข้มข้นต่ำที่มีผลต่อลักษณะสมบัติซีเมนต์มอร์ต้าที่ได้จากการทำให้เป็นก้อนหล่อแข็ง และการวิเคราะห์การชะล้าง.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชวลิต เชียงกุล. 2542. โลหะวิทยา. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : บริษัท ส.เอเชียเพลส จำกัด.

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ วีรชาติ ตั้งจิรภัทร. 2555. การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ชชพล ณ นคร. 2548. “สมบัติของก้อนหล่อแข็งจากตะกอนโลหะหนักที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบดำเป็นวัสดุประสาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

นฤมล สรรักษ์วานิช. 2544. “การหล่อแข็งจากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานผลิตแบตเตอรี่ด้วยวัสดุประสาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิดล.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2547. ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรุงเทพฯ : สมาคมคอนกรีตไทย (ส.ค.ท.)

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ. 2540. (13 พฤศจิกายน 2540). ราชกิจจานุเบกษา.

เล่มที่ 114, ตอนพิเศษ 106 ง

ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548. (25 มกราคม 2549). ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 123, ตอนพิเศษ 11 ง.

ประณต กุลประสูตร. 2548. เทคนิคงานปูน-คอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประภัสสร มณีรัตน์. 2551. “การหล่อเชิงคากตะกอนโลหะโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และผงปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิดล.

ประริญา รำไพ. 2546. “การศึกษาศักยภาพคากตะกอนน้ำเสียอุตสาหกรรมประเภทอนินทรีย์สารเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่ง” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ภาพตะวัน ชลาชัย, มยุรี ชัญพลา และ อาริสรา วงศ์ชัย. 2554. “การใช้ประโยชน์คากตะกอนจากโรงไฟฟ้า.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วารภรณ์ กิจชัยนุกูล, ศศิธร พุทธวงษ์ และภาวิณี ชัยประเสริฐ. 2542. “การนำคากของเสียจากอุตสาหกรรมหล่อหลอมโลหะเพื่อใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์ในการหล่อเชิง.” วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.22(2) : 79-94

ศิริวัฒน์ ไชยชนะ. 2538. ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : เอส. เอส. บุกส์เฮ้าส์.

สมิตร ส่งพิริยะกิจ. 2538. “ผลกระทบของความละเอียดจากการบดและแยกแ้วด้านหินแม่เมาะต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุรชาติพิย์ อินทรวงศ์. 2545. “การเปรียบเทียบวิธีการชะละลายโลหะหนักจากก้อนหล่อเชิงของเสียที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแ้วลอยลิกไนต์เป็นวัสดุประสาน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุภชัย อิศรางกูร ณ อยุธยา. 2545. “การหล่อเชิงคากตะกอนโครเมียมในรูปคอนกรีตบล็อก.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนา
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป
 ชุมชนและชนบท บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยมหิดล.

- สมชาย มณีวรรณ. 2551. “การพัฒนาเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบเชิงกลชีวภาพร่วมกับกากตะกอนน้ำมันดิบ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- อรพร จันทรเพ็ญกุล. 2545. “การหล่อแข็งโลหะไฮดรอกไซด์สังเคราะห์โดยใช้ซีเมนต์ที่มีความไวต่อปฏิกิริยาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- อุษณีย์ อุยะเสถียร, สิริพร เอกวรรณกุลศิริและปพิชญา ศรีเทพ. 2552. “การศึกษาลักษณะสมบัติและความเป็นพิษต่อพืชของกากตะกอนน้ำเสียชุมชน เพื่อนำไปใช้ในการเกษตร.” **Environment and Natural Resources Journal.** 7(1) : หน้า 25 -35
- เอกชัย ลิ้มพัฒนสกุล. 2553. “การศึกษาประสิทธิภาพในการนำกากตะกอนน้ำเสียมาผลิตเป็นอิฐตัวหนอนกรณีศึกษา: บริษัท แวกซ์ กาเบิ้ล รีไซเคิล เซ็นเตอร์ จำกัด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการสิ่งแวดล้อม)คณะพัฒนาสังคมและสิ่งแวดล้อม, สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.
- Fytilli, D and Zabaniotou, A. 2006. “Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods.” **Department of Chemical Engineering.** 12(1): 116-140.
- Lin, D.F. and Weng, C.H. 2001. “Use of sewage sludge ash as brick material.” **Journal of Environmental Engineering.** 127(10) : 922-927.
- Liu. et. al. 2009. “Novel technology for sewage sludge utilization : Preparation of amino acid chelated trace element(AACTE) fertilizer. ” **Journal of Hazardous Materials.** 171(1-3) : 1159-1167.
- Outwater, A.B. 1994. **Reuse of Sludge and Minor Residuals.** USA : CRC Press taylor& Francis group.
- Wang, L.K. 2009. **Heavy Metal in the Environmental.** USA: CRC Press taylor& Francis group
- Weng, C.H., Lin, D.F. and Chiang, P.C. 2003. “Utilization of sludge as brick materials.” **Advances in Environmental Research.** 7(2003) : 679-685.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์กากตะกอนและซีเมนต์ก้อน

ก-1 การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุ

การวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุใช้วิธีของ Walkley & Black โดยใช้โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) เป็นตัวออกซิไดซ์ ที่มากเกินไปทำปฏิกิริยากับตัวรีดิวซ์ในอินทรีย์คาร์บอน นั่นคือเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$) ทำเบลนจ์ซ้ำอีกครั้งโดยไม่รวมตัวอย่าง ปริมาณของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมไดโครเมตในเบลนจ์จะนำมาคำนวณความเข้มข้นที่แท้จริงของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตได้

การวิเคราะห์ทำได้โดยการนำตัวอย่างมาแล้วเติมโพแทสเซียมไดโครเมต 1 N 10 mL เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 15 mL เขย่าเบาๆ 1-2 นาที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น 50 mL ทิ้งไว้ให้เย็น หยดอินดิเคเตอร์ (Barium diphenylamine sulfonate indicator : BDS) นำไปไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.5 N เพื่อหาปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือจากปฏิกิริยา จนกระทั่งสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงหรือสีม่วงปนน้ำเงินเป็นสีเขียวใสที่จุดยุติ แล้วคำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอน และอินทรีย์วัตถุจากปริมาณของโพแทสเซียมไดโครเมตและเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้

คำนวณปริมาณอินทรีย์คาร์บอนเป็นร้อยละ โดยใช้สูตร

$$\text{เปอร์เซ็นต์อินทรีย์วัตถุ} = \frac{B-T}{B} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{3}{10^3} \times \frac{100}{W} \times 10 \quad (\text{ก-1})$$

เมื่อ B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตเบลนจ์ (mL)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตตัวอย่าง (mL)

N = นอร์มอลิตีของสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (N)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-2 การหาชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (X-Ray Fluorescence Spectrometry)

เทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่าง ทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลวและสารแขวนลอยได้โดยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์อาศัยหลักการของการที่เมื่อรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงไปกระทบชิ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการปล่อยโฟตอนออกมา (Fluorescence) เนื่องจากโฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากธาตุต่างชนิดในชิ้นงานจะมีความยาวคลื่น (พลังงาน) เฉพาะสำหรับธาตุนั้นๆ จึงทำให้สามารถบ่งชี้ชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างได้ ทั้งนี้ปริมาณโฟตอนที่เปล่งออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณของธาตุนั้นในสารตัวอย่าง ข้อมูลนี้จึงสามารถนำมาวิเคราะห์หาปริมาณของธาตุแต่ละชนิดได้

การเตรียมตัวอย่างในการหาชนิดและปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างที่เป็นของแข็ง ทำได้ดังนี้

- ชั่งกากตะกอนที่ไม่เผา (Sample 1) 0.5170 g
ชั่ง Boric Acid Powder 4.5228 g
ชั่งกากตะกอนที่เผา (Sample 2) 0.5517 g
ชั่ง Boric Acid Powder 4.5136 g
- นำตัวอย่างกากตะกอนและ Boric acid powder (ทำแยกกันในแต่ละตัวอย่าง) ใส่ในเครื่องปั่นเหวี่ยงเพื่อผสมตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำตัวอย่างที่ผสมเสร็จใส่ในภาชนะที่จะนำไปใช้อัด
- นำตัวอย่างเข้าเครื่องอัด โดยใช้แรงอันที่ 150 KN ทิ้งไว้ 5 นาที นำออกจากเครื่องอัดเพื่อทำการตรวจวิเคราะห์ต่อไป

ก-3 การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก

การทดสอบด้วยวิธี Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP)

การทดสอบการชะละลายของโลหะหนัก ด้วยวิธี TLCPmethod 1311 (US EPA,1992: Online) มีขั้นตอนดังนี้

1. สำหรับของเสียที่มีปริมาณของแข็งน้อยกว่า 0.5 % ให้กรองของเหลวออกจากของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 - 0.8 μm แล้วนำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์

2. สำหรับของเสียที่มีของแข็งมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 % ให้กรองของเหลวออกจากของแข็งแล้วนำของเหลวไปวิเคราะห์ ส่วนของแข็งทำการบดให้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่ใหญ่กว่า

9.5 mm แล้วนำมาทดสอบเพื่อเลือกสารสกัด โดย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น สารสกัดชนิดที่ 1 เป็นสารที่เตรียมจาก 5.7 mL ของกรดอะซิติกเข้มข้นผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 11.4 mL กับ 64.3 mL ของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 N ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร

128.6 mL นำสารทั้งสองผสมเข้าด้วยกันและทำให้เจือจาง โดยเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเท่ากับ 1 L คนจนกระทั่งพีเอชมีค่าคงที่ ทำการตรวจสอบพีเอชหากพีเอชสูงกว่า 4.93 ± 0.05 ให้เติมกรดอะซิติกเข้มข้น หากพีเอชต่ำกว่า 4.93 ± 0.05 ให้เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 N สารสกัดชนิดที่ 1 เมื่อเตรียมเสร็จแล้วหากยังไม่ได้ใช้งานจะต้องเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดและจะต้องใช้ภายในเวลา 48 ชั่วโมง

- สารสกัดชนิดที่ 2 เป็นสารสกัดที่ได้จากการนำ 5.7 mL ของกรดอะซิติกเข้มข้น ผสมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 11.4 mL และทำให้เจือจางโดยการเติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรเป็น 1 L ทำการตรวจสอบพีเอชหากสูงกว่า 2.88 ± 0.05 ให้เติมกรดอะซิติกเข้มข้น หากพีเอชต่ำกว่า 2.88 ± 0.05 ให้เติมน้ำกลั่น สารสกัดชนิดที่ 2 เมื่อเตรียมเสร็จแล้วหากยังไม่ได้ใช้งานจะต้องเก็บในภาชนะที่ปิดมิดชิดและจะต้องใช้ภายใน 48 ชั่วโมง

3. ในการเลือกสารสกัด ให้นำของแข็งจำนวน 5 g ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่มากกว่า 9.5 mm ผสมกับน้ำกลั่น 96.5 mL กวนเป็นเวลา 5 นาที ถ้าพีเอชน้อยกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 แต่ถ้า พีเอชมากกว่า 5 ให้เติม 3.5 mL ของกรดไฮโดรคลอริก 1 N แล้วให้ความร้อน 50°C เป็นเวลา 10 นาที เมื่อทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้ว พีเอชน้อยกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 ถ้าพีเอชมากกว่า 5 ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 2 สำหรับของเสียที่เป็นสารระเหยได้ ให้ใช้สารสกัดชนิดที่ 1 เท่านั้น

4. นำตัวอย่างมาปริมาณหนึ่งและใช้สารสกัดในปริมาณ 20 เท่าของน้ำหนักตัวอย่าง ถ้ามีสารระเหยง่ายต้องใช้ภาชนะบรรจุพิเศษ นำตัวอย่างที่ใส่สารสกัดแล้วมาเขย่าด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนรอบ (Rotary agitator) อัตรา 30 ± 2 รอบต่อนาที เป็นเวลา 18 ± 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำตัวอย่างมากรองแยกของเหลวออกจากของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูพรุน $0.6 - 0.8 \mu\text{m}$ นำของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการย่อยด้วยกรด จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET)

การทดสอบการชะละลายของโลหะหนักด้วยวิธี WET มีขั้นตอนดังนี้ (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2548)

1. นำตัวอย่างสารที่มีของเสียอันตรายปนอยู่มารอบคให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กกว่า 2 mm
2. นำอนุภาคที่ได้ไปผสมกับสารสกัด ในสัดส่วนของสารสกัด คือ 10 mm ของสารสกัด ต่อ 1 g ของของแข็ง (10:1 โดยน้ำหนัก) ในวิธี WET ให้ใช้สารละลาย 0.2 M โซเดียมซิเตรทที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เป็นสารสกัด โดยเตรียมได้จากการนำสารละลายกรดซิตริกในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอชให้เป็น 0.5 ด้วยสารละลาย 4.0 N โซเดียมไฮดรอกไซด์ [สำหรับการทดสอบการชะละลายของเฮกซะวาเลนต์โครเมียม (Cr(VI)) ให้ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นสารสกัด]
3. ผสมรวมกันในขวดพลาสติกเพื่อป้องกันการดูดซับที่ผนังของภาชนะและนำไปเขย่า ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
4. นำตัวอย่างในขวดพลาสติกมากรองด้วยกระดาษกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง $0.45 \mu\text{m}$
5. นำของเหลวที่ผ่านการกรองมาทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก ถ้าผลการวิเคราะห์ที่มีปริมาณโลหะหนักเกินมาตรฐาน แสดงว่าไม่ผ่านเกณฑ์การหล่อแข็งของเสียอันตราย

ตารางที่ ก-1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างการสกัดด้วยวิธี WET และวิธี TCLP

หัวข้อ	วิธี WET	วิธี TCLP
วัตถุประสงค์	ตรวจสอบความเป็นอันตรายของสิ่งปฏิกูลที่ไม่ใช่แล้วว่ามีสารอันตรายปนเปื้อนหรือไม่	ตรวจสอบความเป็นอันตรายเพื่อประเมินประสิทธิผลที่ได้จากการหล่อแข็ง
สารสกัด	Sodium citrate	Acetic acid
เวลาในการสกัด	48 ชั่วโมง	18 ชั่วโมง
ปริมาณสารสกัด : ตัวอย่าง	10:01	20:01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-4 การหาความชื้นเหลือ

การหาความชื้นเหลือเป็นการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการผสมมอร์ตาร์ ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

1. เตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์มาตรฐานจากซีเมนต์ 1 ส่วน และทรายมาตรฐาน 2.75 ส่วนโดยน้ำหนักคลุกเคล้าให้เข้ากันดี
2. เตรียมโต๊ะควบคุมการไหลให้พร้อมโดยการฉีดส่วนต่างๆ ให้แห้งสนิท วางแบบทองเหลือง (Mold) ลงตรงศูนย์กลางของจานกลม
3. ผสมซีเมนต์ส่วนหนึ่งให้พอดีกับที่จะบรรจุลงในแบบ ด้วยอัตราส่วนของน้ำที่ต่ำสุด (ควรเริ่มที่ 10 %) คลุกเคล้าให้ทั่วกันดี แล้วจึงนำมาใส่ลงในแบบโดยการแบ่งใส่เป็นสองชั้นๆ ละครึ่งแบบ แต่ละชั้นให้กระทุ้งมาตรฐานขนาด 1"×2"×1/2" จำนวน 20 ครั้ง เมื่อครบสองชั้นแล้ว จึงปาดมอร์ตาร์ส่วนเกินออกให้พอดีปากแบบ นำส่วนเกินออกไปให้พ้นจาน จากนั้นจึงค่อยๆ ยกแบบขึ้นตรงๆ อย่างระมัดระวัง ซึ่งจะเหลือแต่กองซีเมนต์มอร์ตาร์ปกติเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มจนถึงสุดตรงนี้ไม่ควรเกิน 60 วินาที หลังการผสม
4. หมุนลูกเบ็ยวของโต๊ะควบคุมการไหล เพื่อให้จานเลื่อนสูงขึ้น 1/2" แล้วกระแทกลงกับแกนด้วยน้ำหนักของตัวเองให้ได้ 25 ครั้ง ภายในระยะเวลา 15 ± 1 วินาที
5. เมื่อครบจำนวนครั้งแล้ว ทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่กระจายออกไปรอบๆ โดยวัดตามแนวเส้นที่ขีดไว้บนจานทั้งหมด 4 แนวรวมเป็น 4 ค่าบันทึกผล
6. การวัดการกระจาย วัดจากการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมอร์ตาร์ที่กระจาย โดยวัดเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเดิม โดยคำนวณหาอัตราการกระจายได้จากสมการที่ ก-2

$$\text{อัตราการกระจาย} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \times 100\% \quad (\text{ก-2})$$

โดย D_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่กระจายบนจาน

D_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐานของแบบกรวยทองเหลือง

โดยปกติอัตราการกระจายที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 105 – 115 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก-5 การผสมมอร์ตาร์

การผสมมอร์ตาร์ ทำได้ 2 วิธีคือ

1. ผสมด้วยมือ ให้คลุกเคล้าซีเมนต์ส่วนผสมเข้าด้วยกันบนภาชนะที่สะอาด ราบเรียบ และไม่ดูดซึมน้ำ เมื่อผสมได้ที่แล้วให้เกลี่ยรวมกันเป็นกองและทำแอ่งตรงกลาง ค่อยๆรินน้ำด้วยปริมาณที่คำนวณมาได้ลงตรงกลางแอ่ง ใช้เกรียงเหล็กตัวส่วนผสมรอบนอกเข้าไปในแอ่งให้หมดภายใน 30 วินาที แล้วปล่อยให้ส่วนผสมดูดน้ำอีก 30 วินาที แล้วจึงใช้มือที่สวมถุงมืออย่างผสมคลุกเคล้าให้เป็นมอร์ตาร์ภายในเวลาประมาณ 90 วินาที
2. ผสมด้วยเครื่องมอร์ตาร์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้
 - 1) เทน้ำทั้งหมดลงในหม้อผสม
 - 2) เทซีเมนต์ตามลงไป แล้วเปิดเครื่องด้วยความเร็วต่ำ (140 ± 5 rpm) เป็นเวลา 30 วินาที
 - 3) เติมหทรายที่เตรียมไว้ลงไปลงในหม้อผสมช้าๆ เททรายให้หมดภายใน 30 วินาที
 - 4) หยุดเครื่องและเปลี่ยนเป็นความเร็วปานกลาง (285 ± 10 rpm) เดินเครื่องทิ้งไว้ 1 นาที
 - 5) หยุดเครื่องอีก เพื่อพักมอร์ตาร์ไว้ 90 วินาที โดยที่ภายใน 15 วินาทีแรกให้รีบปาดส่วนที่เลอะข้างๆหม้อผสมลงให้หมด แล้วปิดฝา
 - 6) เมื่อครบเวลาพัก จึงเดินเครื่องต่อด้วยความเร็วปานกลางเท่าเดิมต่อไปอีก 30 วินาที เป็นอันจบกระบวนการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์

ตารางที่ ข-1 ความชื้นของกากตะกอน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%)	เฉลี่ย	SD
กากตะกอน แห้ง	1	3.8459	3.4057	12.93	12.37	0.64
	2	4.9441	4.4271	11.68		
	3	4.2476	3.7752	12.51		
กากตะกอน ที่ผ่านการเผา	1	49.6748	46.0524	7.87	8.12	0.44
	2	34.4628	31.7255	8.63		
	3	39.431	36.5574	7.86		

ตัวอย่างการคำนวณ

หาความชื้นของกากตะกอน (%) ของกากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 จากสูตร

$$M (\%) = \left(\frac{W-D}{D} \right) \times 100 \quad (\text{ข-1})$$

โดยที่ W = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)

D = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

M = ความชื้นของกากตะกอน (%)

$$M (\%) = \left(\frac{3.8459 - 3.4057}{3.4057} \right) \times 100$$

$$M (\%) = 12.93$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ใช้เฉพาะงานวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 หมายเหตุ ส่วนตัวอย่างอื่นๆ คำนวณในลักษณะเดียวกัน
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-2 ค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของกากตะกอน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	pH	pH เฉลี่ย	SD	Conduct (mS/cm)	Conduct (mS/cm) เฉลี่ย	SD
กากตะกอน แห้ง	1	6.97	7.01	0.03	36.2	36.1	0.56
	2	7.03			36.6		
	3	7.03			35.5		
กากตะกอน ที่ผ่านการเผา	1	6.55	6.43	0.10	74.0	73.5	0.46
	2	6.37			73.4		
	3	6.38			73.1		

ตารางที่ ข-3 องค์ประกอบในกากตะกอนที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์ (XRF)

สารประกอบ	กากตะกอนแห้ง		กากตะกอนที่ผ่านการเผา	
	Kcps	%	Kcps	%
Na ₂ O	0.20	1.51	0.10	0.98
MgO	0.30	0.95	0.20	0.54
Al ₂ O ₃	8.00	27.40	10.40	28.60
SiO ₂	17.50	56.40	21.70	56.80
P ₂ O ₅	0.10	0.30	0.20	0.34
SO ₃	0.40	0.77	0.40	0.50
K ₂ O	4.10	2.19	4.90	2.13
CaO	2.40	1.40	2.80	1.33
TiO ₂	5.70	2.63	6.90	2.60
Cr ₂ O ₃	-	-	0.60	0.17
Fe ₂ O ₃	35.00	5.23	39.10	4.80
CuO	3.30	0.30	3.20	0.24
ZnO	2.10	0.16	2.80	0.17
SrO	8.50	0.20	10.60	0.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

หมายเหตุ: Kcps = Kilocounts per second

ตารางที่ ข-4 ขนาดอนุภาคของกากตะกอน

ขนาดอนุภาค (μm)	ปริมาณอนุภาคของกากตะกอนแห้ง (%)					ปริมาณอนุภาคของกากตะกอนที่ผ่านการเผา (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
0.50	0.30	0.48	0.46	0.31	0.10	0.43	0.42	0.39	0.42	0.02
1.32	1.07	1.68	1.61	1.08	0.33	1.47	1.42	1.32	1.46	0.08
1.60	1.62	2.53	2.42	1.61	0.50	2.2	2.13	1.98	2.19	0.11
1.95	1.91	2.96	2.81	1.88	0.57	2.54	2.47	2.29	2.55	0.13
2.38	2.04	3.09	2.90	1.95	0.56	2.62	2.57	2.38	2.65	0.13
2.90	2.19	3.20	2.97	2.00	0.53	2.69	2.68	2.47	2.72	0.12
3.53	2.52	3.54	3.25	2.21	0.53	2.96	3.01	2.77	3.00	0.13
4.30	3.10	4.23	3.88	2.65	0.58	3.57	3.67	3.39	3.59	0.14
5.24	3.91	5.21	4.83	3.28	0.67	4.47	4.60	4.27	4.44	0.17
6.39	4.77	6.21	5.86	3.94	0.75	5.43	5.54	5.18	5.34	0.18
7.78	5.47	6.94	6.73	4.43	0.80	6.16	6.19	5.85	6.03	0.19
9.48	6.08	7.43	7.48	4.76	0.79	6.65	6.54	6.25	6.56	0.21
11.55	6.61	7.70	8.06	4.95	0.76	6.89	6.61	6.36	6.90	0.27
14.08	7.00	7.79	8.38	5.01	0.69	6.87	6.49	6.15	7.06	0.36

ตารางที่ ข-4 ขนาดอนุภาคของกากตะกอน (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (μm)	ปริมาณอนุภาคของกากตะกอนแห้ง (%)					ปริมาณอนุภาคของกากตะกอนที่ผ่านการเผา (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
17.15	7.14	7.70	8.36	4.95	0.61	6.68	6.34	5.74	7.00	0.48
20.90	6.90	7.37	7.85	4.80	0.48	6.45	6.26	5.35	6.67	0.59
25.46	6.27	6.74	6.84	4.55	0.30	6.3	6.21	5.2	6.04	0.61
31.01	5.33	5.68	5.52	4.13	0.18	6.21	6.06	5.29	5.11	0.49
37.79	4.27	4.20	4.15	3.51	0.06	5.99	5.7	5.32	3.95	0.34
46.03	3.33	2.59	2.89	2.71	0.37	5.32	5.01	4.92	2.73	0.21
56.09	2.66	1.33	1.71	1.86	0.69	4.08	3.85	3.77	1.63	0.16
68.33	2.17	0.69	0.78	1.16	0.83	2.56	2.43	2.12	0.88	0.23
83.26	1.67	0.43	0.23	0.64	0.78	1.21	1.21	0.74	0.43	0.27
101.44	0.95	0.22	0.03	0.25	0.49	0.25	0.59	0.03	0.17	0.28
123.59	0.12	0.04	0.00	0.12	0.06	0.00	0.54	0.01	0.05	0.31
150.57	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.61	0.37	0.03	0.31
183.44	0.14	0.00	0.00	0.17	0.08	0.00	0.51	1.00	0.06	0.50
223.51	1.39	0.00	0.00	0.30	0.80	0.00	0.26	1.66	0.10	0.89

ตารางที่ ข-4 ขนาดอนุภาคของกากตะกอน (ต่อ)

ขนาดอนุภาค (μm)	ปริมาณอนุภาคของกากตะกอนแห้ง (%)					ปริมาณอนุภาคของกากตะกอนที่ผ่านการเผา (%)				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
272.31	2.99	0.00	0.00	0.46	1.73	0.00	0.00	2.41	0.15	1.39
331.77	3.56	0.00	0.00	0.55	2.06	0.00	0.00	2.84	0.18	1.64
404.21	2.15	0.00	0.00	0.37	1.24	0.00	0.00	1.92	0.12	1.11
492.47	0.35	0.00	0.00	0.05	0.20	0.00	0.00	0.28	0.02	0.16

ตารางที่ ข-5 อินทรีย์วัตถุในกากตะกอน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนัก กากตะกอน	ปริมาตร FAS (mL)	อินทรีย์วัตถุ (%)	ค่าเฉลี่ย	SD
กากตะกอน แห้ง	1	1.0049	9.20	2.23	2.19	0.06
	2	1.0069	9.40	2.13		
	3	1.0060	9.20	2.23		
เบลนจ์		-	13.80	-		
กากตะกอน ที่ผ่านการเผา	1	1.0092	13.60	1.30	1.25	0.04
	2	1.0015	13.80	1.23		
	3	1.0069	13.80	1.22		
เบลนจ์		-	16.90	-		

ตัวอย่างการคำนวณ

หาปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) ของกากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 จากสูตร

$$OM (\%) = \frac{MBT \cdot N}{B} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{3}{1000} \times \frac{100}{W} \times 10 \quad (ข-2)$$

โดยที่ N = ความเข้มข้นของโพแทสเซียมไดโครเมต (N)

B = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับเบลนจ์ (mL)

T = ปริมาตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ไทเทรตกับตัวอย่าง (mL)

W = น้ำหนักแห้งตัวอย่าง (g)

$$OM (\%) = \frac{1920 - 13.80 (1)}{9.20} \times \frac{100}{77} \times \frac{100}{58} \times \frac{3}{1000} \times \frac{100}{0.1389} \times 10$$

$$OM = 2.19 \%$$

หมายเหตุ ส่วนตัวอย่างอื่นๆ คำนวณในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

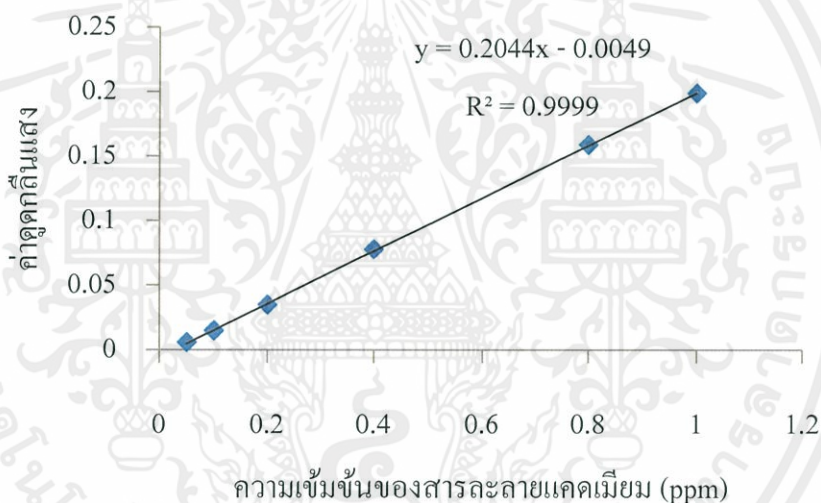
ตารางที่ ข-6 ปริมาณแคดเมียม (Cd)และโครเมียม (Cr) ในกากตะกอนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธีWET

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
กากตะกอนแห้ง	1	10.0454	12.37	8.9394	ND	-	-	0.168	7.831	7.77 ± 0.45
	2	10.0070	12.37	8.9052	ND	-		0.163	7.299	
	3	10.0153	12.37	8.9126	ND	-		0.171	8.191	
กากตะกอนที่ผ่านการเผา (300°C)	1	10.0238	8.12	9.2712	ND	-	-	0.165	7.227	7.05 ± 0.72
	2	10.0169	8.12	9.2648	ND	-		0.169	7.663	
	3	10.0157	8.12	9.2637	ND	-		0.156	6.261	
เบลงค์		-	-	-	0.002			0.098		

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การสร้างกราฟมาตรฐานแคดเมียม

ความเข้มข้นของสารละลายแคดเมียม (ppm)	ค่าดูดกลืนแสง
0.05	0.006
0.10	0.015
0.20	0.035
0.40	0.078
0.80	0.159
1.00	0.199



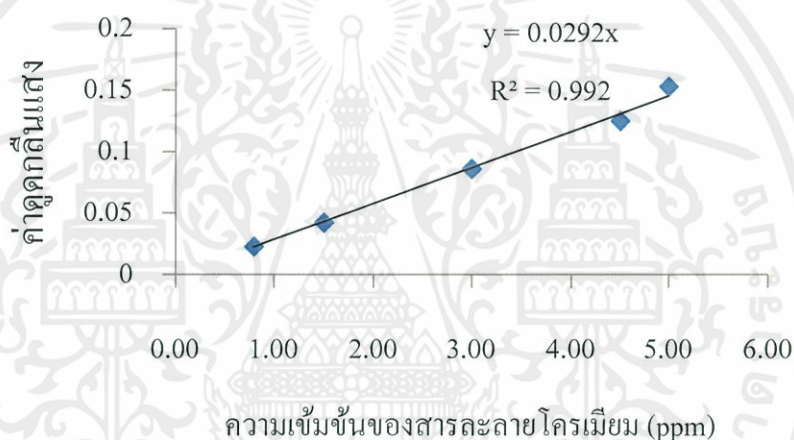
หมายเหตุ วิธีการคำนวณอยู่ในตัวอย่างการคำนวณปริมาณโครเมียมในกากตะกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

1. การสร้างกราฟมาตรฐานโครเมียม

ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียม (ppm)	ค่าดูดกลืนแสง
0.80	0.023
1.50	0.042
3.00	0.086
4.50	0.125
5.00	0.153



2. หาปริมาณทองแดงในกากตะกอน (mg/L) ของกากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 จากข้างต้น กากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 มีความเข้มข้นของโครเมียม 0.168 ppm ถ้าต้องการความเข้มข้นของโครเมียมจริง หาได้จากสมการ $Y = X - B$

เมื่อ $Y =$ ความเข้มข้นของโครเมียมจริง (mg/L)

$X =$ ความเข้มข้นของโครเมียมของกากตะกอน (mg/L)

$B =$ ความเข้มข้นของโครเมียมของแบลคค์ (mg/L)

จะได้ $Y = 0.168 - 0.098$

$Y = 0.070$ mg/L

ใช้สารสกัด 10 mL เจือจาง 10 เท่า ดังนั้นในสารสกัด 100 mL มีปริมาณโครเมียมเท่ากับ

ในสารละลาย 10 mL มีโครเมียมอยู่ 0.070 mg/L

ถ้าสารละลาย 100 mL มีโครเมียมอยู่ $\frac{0.070 \times 100}{100} = 0.70$ mg/L

ดังนั้น กากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 มีโครเมียมอยู่ 0.70 mg/L

3. หาปริมาณโครเมียมในกากตะกอน (mg/Kg) ของกากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1

จากข้างต้น กากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 มีความเข้มข้นของโครเมียม 0.168 ppm หมายความว่า

ในสารละลาย	1000	mL	มีทองแดงอยู่	0.168 mg
ถ้าสารละลาย	100	mL	มีทองแดงอยู่	$\frac{0.168 \times 100}{1000} = 0.017 \text{ mg}$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาลบกับค่าของสารสกัดเบสได้ค่า 0.017 – 0.010 = 0.007 mg

เนื่องจากสารที่วัดทำการเจือจางเป็น 10 เท่า แสดงว่าความเข้มข้นของโครเมียมจริงเท่ากับ 0.07 mg

แต่นำหนักกากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 ที่เท่ากับ 8.9394 g ดังนั้น

ในกากตะกอน	8.9394	g	มีโครเมียมอยู่	0.070 mg
ถ้ากากตะกอน	1000	g	มีโครเมียมอยู่	$\frac{0.070 \times 1000}{8.9394} = 7.83 \text{ mg/Kg}$

ดังนั้น กากตะกอนแห้ง ครั้งที่ 1 มีโครเมียมอยู่ 7.83 mg/Kg

หมายเหตุ ส่วนตัวอย่างอื่นๆ คำนวณในลักษณะเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

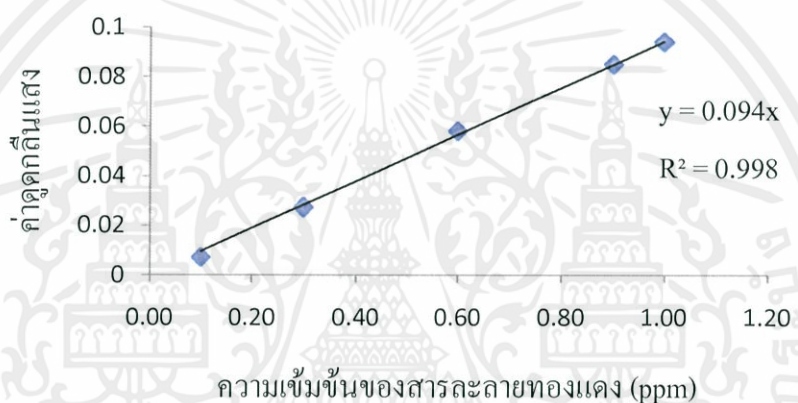
ตารางที่ ข-7 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในกากตะกอนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี WET

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
กากตะกอน แห้ง	1	10.0454	12.37	8.9394	0.179	8.614	8.75 ± 0.31	0.103	6.712	6.20 ± 0.46
	2	10.0070	12.37	8.9052	0.183	9.096		0.097	6.064	
	3	10.0153	12.37	8.9126	0.178	8.527		0.095	5.834	
กากตะกอน ที่ผ่านการเผา (300°C)	1	10.0238	8.12	9.2712	0.177	8.090	6.83 ± 1.19	0.089	4.962	4.93 ± 0.38
	2	10.0169	8.12	9.2648	0.155	5.721		0.092	5.289	
	3	10.0157	8.12	9.2637	0.164	6.693		0.085	4.534	
แบลคค์		-	-	-	0.102			0.043		

ตัวอย่างการคำนวณ

การสร้างกราฟมาตรฐานทองแดง

ความเข้มข้นของสารละลายทองแดง (ppm)	ค่าดูดกลืนแสง
0.10	0.007
0.30	0.027
0.60	0.058
0.90	0.085
1.00	0.094



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-8 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ในกากตะกอนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
กากตะกอนแห้ง	5.0002	12.37	4.45	ND	-	-	0.080	7.87	8.69 ± 0.72
	5.0009	12.37	4.45	ND	-		0.085	8.99	
	5.0004	12.37	4.45	ND	-		0.086	9.21	
กากตะกอนที่ผ่านการเผา (300°C)	5.0007	8.12	4.63	0.008	1.51	1.51 ± 0.65	0.075	6.49	4.90 ± 1.75
	5.0001	8.12	4.62	0.011	2.16		0.059	3.03	
	5.0007	8.12	4.63	0.005	0.86		0.069	5.19	
เบลงค์	-	-	-	0.001			0.045		

ตารางที่ ข-9 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในกากตะกอนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
กากตะกอน แห้ง	5.0002	12.37	4.45	0.058	9.44	9.36 ± 1.01	0.085	7.19	7.19 ± 2.70
	5.0009	12.37	4.45	0.053	8.31		0.097	9.89	
	5.0004	12.37	4.45	0.062	10.34		0.073	4.49	
กากตะกอน ที่ผ่านการเผา (300°C)	5.0007	8.12	4.63	0.031	3.24	4.11 ± 0.75	0.087	7.35	3.39 ± 3.63
	5.0001	8.12	4.62	0.037	4.54		0.065	2.59	
	5.0007	8.12	4.63	0.037	4.54		0.054	0.22	
เบลงค์	-	-	-	0.016			0.053		

ตารางที่ ข-10 ความชื้นของซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	เฉลี่ย	SD
Control	1	2.0059	1.8265	9.82	9.57	0.22
	2	1.5616	1.4268	9.45		
	3	1.7122	1.5646	9.43		
A	1	1.9254	1.7418	10.54	9.74	0.69
	2	1.8417	1.6842	9.35		
	3	1.3244	1.2114	9.33		
B	1	1.8745	1.6973	10.44	10.76	0.35
	2	1.9956	1.7956	11.14		
	3	1.7924	1.6193	10.69		
C	1	1.5537	1.3706	13.36	13.37	0.68
	2	1.4220	1.2467	14.06		
	3	1.8681	1.6577	12.69		
D	1	1.6024	1.5380	4.19	4.24	0.26
	2	1.6188	1.5487	4.53		
	3	1.5329	1.4737	4.02		
E	1	1.3433	1.2748	5.37	5.50	0.16
	2	1.8535	1.7577	5.45		
	3	1.5063	1.4253	5.68		
F	1	1.2369	1.1733	5.42	5.73	1.23
	2	1.1812	1.1031	7.08		
	3	1.5978	1.5263	4.68		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-11 ความชื้นของซีเมนต์ก่อนที่อายุการบ่ม 14 วัน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	เฉลี่ย	SD
Control	1	1.8586	1.7167	8.27	8.59	0.82
	2	2.4991	2.2818	9.52		
	3	2.0489	1.8975	7.98		
A	1	2.0872	1.9275	8.29	8.43	0.30
	2	1.8028	1.6656	8.24		
	3	1.5870	1.4590	8.77		
B	1	1.6377	1.5018	9.05	9.03	0.13
	2	2.2470	2.0639	8.87		
	3	2.4530	2.2468	9.18		
C	1	1.6456	1.5221	8.11	7.83	2.39
	2	3.1347	2.8479	10.07		
	3	3.0840	2.9285	5.31		
D	1	1.8499	1.7528	5.54	5.45	0.14
	2	1.6744	1.5903	5.29		
	3	1.9753	1.8721	5.51		
E	1	1.8314	1.7409	5.20	6.02	0.82
	2	1.5851	1.4952	6.01		
	3	1.4124	1.3219	6.85		
F	1	1.8793	1.7648	6.49	6.53	0.86
	2	2.0255	1.9164	5.69		
	3	1.5829	1.4738	7.40		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-12 ความชื้นของซีเมนต์ก่อนที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	เฉลี่ย	SD
Control	1	1.4322	1.3723	4.36	4.41	0.04
	2	2.1050	2.0159	4.42		
	3	1.3794	1.3206	4.45		
A	1	1.3616	1.2979	4.91	4.73	0.22
	2	1.0701	1.0241	4.49		
	3	1.0783	1.0289	4.80		
B	1	1.5494	1.4811	4.61	4.69	0.074
	2	1.3110	1.2515	4.75		
	3	1.2994	1.2409	4.71		
C	1	1.0369	0.9749	6.36	6.45	0.22
	2	0.9567	0.8966	6.70		
	3	1.1891	1.1188	6.28		
D	1	1.6012	1.5432	3.76	5.49	1.80
	2	1.3565	1.2873	5.38		
	3	1.2804	1.1928	7.34		
E	1	1.1430	1.0735	6.47	7.42	2.13
	2	1.4525	1.3222	9.85		
	3	1.4089	1.3302	5.92		
F	1	1.2046	1.0684	12.75	12.30	0.80
	2	1.1136	0.9874	12.78		
	3	1.3333	1.1971	11.38		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-13 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักก้อน ซีเมนต์ (Kg)	อายุบ่ม (days)	แรงอัด (KN)	แรงอัด (Kg)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Ksc)	SD
Control	1	26.0200	0.2711	7	46.45	4997.69	192.07	203.78	10.53
	2	25.1402	0.2662	7	49.82	5341.37	212.46		
	3	25.5928	0.2680	7	49.34	5292.42	206.79		
A	1	24.7423	0.2592	7	38.92	4229.77	170.95	184.75	12.62
	2	25.2602	0.2630	7	45.92	4943.64	195.71		
	3	25.2706	0.2613	7	43.93	4740.70	187.60		
B	1	25.2004	0.2576	7	28.74	3191.60	126.65	133.04	8.48
	2	25.2304	0.2577	7	29.56	3275.22	129.81		
	3	25.1601	0.2577	7	32.64	3589.33	142.66		
C	1	25.4608	0.2644	7	17.52	2047.36	80.41	80.63	0.81
	2	25.4000	0.2642	7	17.36	2031.04	79.96		
	3	25.8622	0.2666	7	18.12	2108.55	81.53		

ตารางที่ ข-13 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักก้อน ซีเมนต์ (Kg)	อายุบ่ม (days)	แรงอัด (KN)	แรงอัด (Kg)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Ksc)	SD
D	1	25.3807	0.2611	7	40.33	4373.57	172.32	174.94	3.72
	2	26.2108	0.2671	7	43.50	4696.85	179.20		
	3	25.8343	0.2682	7	41.35	4477.59	173.32		
E	1	26.7276	0.2670	7	34.66	3795.33	142.00	153.51	9.98
	2	26.3462	0.2627	7	38.68	4205.30	159.62		
	3	25.9669	0.2621	7	37.91	4126.77	158.92		
F	1	28.5907	0.2868	7	19.13	2211.55	77.35	79.77	3.35
	2	25.3713	0.2584	7	16.94	1988.21	78.36		
	3	27.8943	0.2763	7	20.31	2331.89	83.60		

ตารางที่ ข-14 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 14 วัน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักก้อนซีเมนต์ (Kg)	อายุบ่ม (days)	แรงอัด (KN)	แรงอัด (Kg)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Ksc)	SD
Control	1	26.0344	0.2675	14	62.57	6641.64	255.11	232.58	19.80
	2	25.7434	0.2568	14	52.47	5611.62	217.98		
	3	25.7435	0.2669	14	54.15	5782.95	224.64		
A	1	27.0400	0.2817	14	55.81	5952.24	220.13	218.47	8.56
	2	26.0792	0.2637	14	55.26	5896.15	226.09		
	3	27.2863	0.2777	14	53.42	5708.51	209.21		
B	1	25.7454	0.2552	14	34.74	3803.49	147.73	149.34	5.76
	2	24.9799	0.2541	14	35.59	3890.17	155.73		
	3	25.4923	0.2560	14	33.58	3685.19	144.56		
C	1	25.3512	0.2563	14	21.64	2467.53	97.33	99.90	2.22
	2	26.7806	0.2574	14	24.03	2711.26	101.24		
	3	26.4607	0.2540	14	23.68	2675.57	101.11		
D	1	25.7223	0.2629	14	41.74	4517.36	175.62	183.64	10.07
	2	24.9000	0.2609	14	45.04	4853.90	194.94		
	3	25.2606	0.2597	14	42.12	4556.11	180.36		

ตารางที่ ข-14 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 14 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักก้อนซีเมนต์ (Kg)	อายุบ่ม (days)	แรงอัด (KN)	แรงอัด (Kg)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Ksc)	SD
E	1	24.6900	0.2559	14	36.74	4007.45	162.31	166.27	3.65
	2	24.9796	0.2570	14	38.35	4171.64	167.00		
	3	25.6217	0.2585	14	40.03	4342.97	169.50		
F	1	25.6823	0.2505	14	22.30	2534.83	98.70	100.72	2.16
	2	25.5725	0.2477	14	23.27	2633.76	102.99		
	3	25.2302	0.2453	14	22.30	2534.83	100.47		

ตารางที่ ข-15 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักก้อนซีเมนต์ (Kg)	อายุบ่ม (days)	แรงอัด (KN)	แรงอัด (Kg)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Ksc)	SD
Control	1	26.3471	0.2676	28	57.69	6143.97	233.19	246.87	14.80
	2	25.4917	0.2654	28	58.64	6240.85	244.82		
	3	26.0036	0.2652	28	64.4	6828.27	262.59		

ตารางที่ ข-15 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 28 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักก้อนซีเมนต์ (Kg)	อายุบ่ม (days)	แรงอัด (KN)	แรงอัด (Kg)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Ksc)	SD
A	1	26.8660	0.2820	28	60.66	6446.86	239.96	253.81	11.99
	2	27.4222	0.2787	28	67.55	7149.51	260.72		
	3	27.5917	0.2810	28	67.99	7194.38	260.74		
B	1	25.2303	0.2513	28	46.13	4965.06	196.79	205.48	23.13
	2	25.4612	0.2529	28	44.37	4785.57	187.96		
	3	25.9588	0.2573	28	56.42	6014.45	231.69		
C	1	26.6959	0.2616	28	28.15	3131.43	117.30	124.42	8.03
	2	26.5318	0.2582	28	29.40	3258.90	122.83		
	3	26.4732	0.2574	28	32.00	3524.06	133.12		
D	1	25.0901	0.2666	28	44.66	4815.15	191.91	207.01	13.29
	2	24.3512	0.2657	28	49.25	5283.24	216.96		
	3	24.2403	0.2650	28	47.87	5142.51	212.15		
E	1	25.3512	0.2663	28	44.72	4821.27	190.18	176.81	12.55
	2	25.2204	0.2658	28	40.71	4412.32	174.95		
	3	25.7318	0.2658	28	39.15	4253.23	165.29		

ตารางที่ ข-15 การรับกำลังแรงอัดซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 28 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	ครั้งที่	พื้นที่ (cm ²)	น้ำหนักก้อนซีเมนต์ (Kg)	อายุบ่ม (days)	แรงอัด (KN)	แรงอัด (Kg)	กำลังรับแรงอัด (Ksc)	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Ksc)	SD
F	1	28.4065	0.2764	28	24.50	2759.19	97.13	103.96	5.99
	2	25.6540	0.2587	28	24.69	2778.57	108.31		
	3	25.9590	0.2559	28	24.54	2763.27	106.45		

ตัวอย่างการคำนวณ

หาค่ากำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ซีเมนต์ก้อน ที่อายุการบ่ม 7 วัน Control ครั้งที่ 1 จากสูตร

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (\text{ข-3})$$

โดยที่ f_c = กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย (Kg/cm²)

P = แรงอัด (Kg)

A = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (cm²)

$$f_c = \frac{4373.57}{26.0200}$$

$f_c = 172.32 \text{ Kg/cm}^2$ หมายถึง ส่วนตัวอย่างอื่นๆ คำนวณในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ ข-16 ปริมาณแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี WET ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	10.0981	9.57	9.2161	-0.030	2.39	2.04 ± 0.45	0.184	9.33	9.06 ± 6.63	0.336	11.393	19.60 ± 16.65
control	10.0037	9.57	9.1300	-0.032	2.19		0.240	15.55		0.310	8.653	
control	10.0340	9.57	9.1576	-0.038	1.53		0.119	2.29		0.586	38.766	
A 1	10.1692	9.74	9.2666	-0.033	2.05	1.91 ± 0.15	0.159	6.58	5.5 ± 3.48	0.341	11.871	19.83 ± 14.40
A 2	10.2662	9.74	9.3550	-0.034	1.92		0.113	1.60		0.572	36.451	
A 3	10.0340	9.74	9.1434	-0.036	1.75		0.174	8.31		0.333	11.156	
B 1	10.1461	10.76	9.1604	-0.037	1.64	1.56 ± 0.12	0.124	2.84	3.84 ± 0.89	0.536	33.295	19.77 ± 11.71
B 2	10.1829	10.76	9.1937	-0.039	1.41		0.136	4.13		0.351	13.052	
B 3	10.2493	10.76	9.2536	-0.037	1.62		0.140	4.54		0.351	12.968	
C 1	10.0437	13.37	8.8592	-0.043	1.02	0.94 ± 0.23	0.138	4.52	3.82 ± 0.98	0.392	18.173	22.53 ± 9.36
C 2	10.1153	13.37	8.9224	-0.042	1.12		0.136	4.26		0.375	16.139	
C 3	10.0844	13.37	8.8951	-0.046	0.67		0.122	2.70		0.527	33.277	

ตารางที่ ข-16 ปริมาณแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี WET ที่อายุการบ่ม 7 วัน (ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	10.0784	4.24	9.6685	-0.041	1.14	1.27 ± 0.17	0.149	5.27	4.95 ± 1.19	0.370	14.377	13.03 ± 1.56
D 2	10.3421	4.24	9.9214	-0.040	1.21		0.157	5.95		0.364	13.405	
D 3	10.0365	4.24	9.6283	-0.038	1.45		0.133	3.64		0.340	11.321	
E 1	10.0997	5.50	9.5732	-0.040	1.25	1.18 ± 0.06	0.114	1.67	1.77 ± 0.99	0.366	14.102	14.08 ± 0.73
E 2	10.1270	5.50	9.5991	-0.041	1.15		0.125	2.81		0.373	14.793	
E 3	10.1230	5.50	9.5953	-0.041	1.15		0.106	0.83		0.359	13.340	
F 1	10.0146	5.73	9.4719	-0.040	1.27	1.02 ± 0.43	0.128	3.17	3.38 ± 0.19	0.384	16.153	17.89 ± 1.53
F 2	10.0020	5.73	9.4599	-0.040	1.27		0.131	3.49		0.406	18.499	
F 3	10.0003	5.73	9.4583	-0.047	0.53		0.131	3.49		0.411	19.031	
Blank				-0.052			0.098			0.231		

ตารางที่ ข-17 ปริมาณแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ในซีเมนต์ก่อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี WET ที่อายุการบ่ม 14 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	10.0091	8.59	9.2173	-0.024	3.25	3.33 ± 0.23	0.168	7.59	5.79 ± 1.97	0.198	5.533	6.26 ± 0.66
control	10.0046	8.59	9.2132	-0.021	3.58		0.154	6.08		0.210	6.838	
control	10.0011	8.59	9.2100	-0.025	3.15		0.132	3.69		0.206	6.406	
A 1	10.0032	8.43	9.2255	-0.026	3.04	3.07 ± 0.06	0.187	9.65	9.39 ± 1.59	0.227	8.672	8.27 ± 0.38
A 2	10.0039	8.43	9.2261	-0.026	3.03		0.169	7.70		0.220	7.912	
A 3	10.0037	8.43	9.2260	-0.025	3.14		0.198	10.84		0.223	8.238	
B 1	10.0003	9.03	9.1721	-0.032	2.40	1.85 ± 0.61	0.215	12.76	9.01 ± 3.24	0.211	6.978	5.7 ± 1.21
B 2	10.0056	9.03	9.1769	-0.036	1.96		0.164	7.19		0.189	4.577	
B 3	10.0025	9.03	9.1741	-0.043	1.20		0.163	7.09		0.198	5.559	
C 1	10.0014	15.98	8.6234	-0.037	1.97	1.78 ± 0.44	0.216	13.68	10.09 ± 3.39	0.245	11.364	12.09 ± 0.63
C 2	10.0096	15.98	8.6305	-0.036	2.09		0.181	9.62		0.255	12.514	
C 3	10.0052	15.98	8.6267	-0.043	1.28		0.158	6.96		0.254	12.403	

ตารางที่ ข-17 ปริมาณแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี WET ที่อายุการบ่ม 14 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	10.6223	5.45	10.0733	-0.042	1.19	1.03 ± 0.14	0.173	7.45	6.58 ± 2.48	0.204	5.659	7.81 ± 1.92
D 2	10.0255	5.45	9.5073	-0.045	0.95		0.134	3.79		0.236	9.361	
D 3	10.0393	5.45	9.5204	-0.045	0.95		0.179	8.51		0.227	8.403	
E 1	10.1703	6.02	9.5928	-0.048	0.63	0.45 ± 0.16	0.150	5.42	7.57 ± 2.47	0.216	7.193	8.16 ± 1.14
E 2	10.0177	6.02	9.4489	-0.050	0.42		0.195	10.27		0.236	9.419	
E 3	10.1251	6.02	9.5502	-0.051	0.31		0.165	7.02		0.222	7.853	
F 1	10.0081	6.53	9.3946	-0.047	0.75	0.50 ± 0.34	0.148	5.32	6.36 ± 1.69	0.248	10.751	10.95 ± 0.90
F 2	10.1657	6.53	9.5426	-0.053	0.10		0.150	5.45		0.244	10.165	
F 3	10.0043	6.53	9.3911	-0.048	0.64		0.176	8.31		0.259	11.926	
Blank				-0.054			0.098			0.147		

ตารางที่ ข-18 ปริมาณแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี WET ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	10.0035	8.59	9.2122	-0.063	2.39	1.88 ± 0.45	0.088	6.51	6.26 ± 1.27	0.184	4.016	4.78 ± 1.32
control	10.0052	8.59	9.2137	-0.069	1.74		0.073	4.88		0.205	6.295	
control	10.0043	8.59	9.2129	-0.071	1.52		0.096	7.38		0.184	4.016	
A 1	10.0056	8.43	9.2277	-0.066	2.06	1.77 ± 0.25	0.106	8.45	5.24 ± 2.81	0.212	7.044	6.79 ± 0.63
A 2	10.0023	8.43	9.2247	-0.070	1.63		0.065	4.01		0.203	6.071	
A 3	10.0035	8.43	9.2258	-0.070	1.63		0.058	3.25		0.214	7.262	
B 1	10.0054	9.03	9.1767	-0.065	2.18	2.11 ± 0.66	0.045	1.85	3.20 ± 1.79	0.205	6.320	7.16 ± 0.82
B 2	10.0098	9.03	9.1808	-0.072	1.42		0.051	2.51		0.213	7.189	
B 3	10.0037	9.03	9.1752	-0.060	2.72		0.076	5.23		0.220	7.956	
C 1	10.0074	15.98	8.6286	-0.069	1.85	1.62 ± 0.50	0.097	8.00	6.18 ± 1.62	0.253	12.285	12.44 ± 0.27
C 2	10.0066	15.98	8.6279	-0.068	1.97		0.077	5.68		0.257	12.749	
C 3	10.0031	15.98	8.6248	-0.076	1.04		0.070	4.87		0.253	12.290	

ตารางที่ ข-18 ปริมาณแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี WET ที่อายุการบ่ม 28 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	10.0055	5.45	9.4884	-0.073	1.26	1.16 ± 0.11	0.077	5.16	4.36 ± 0.75	0.232	8.958	7.73 ± 1.10
D 2	10.0069	5.45	9.4897	-0.074	1.16		0.063	3.69		0.212	6.850	
D 3	10.0098	5.45	9.4925	-0.075	1.05		0.068	4.21		0.217	7.374	
E 1	10.0071	6.02	9.4389	-0.075	1.06	1.06 ± 0.21	0.051	2.44	3.53 ± 1.17	0.230	8.793	9.15 ± 0.31
E 2	10.0081	6.02	9.4398	-0.073	1.27		0.060	3.39		0.235	9.322	
E 3	10.0056	6.02	9.4375	-0.077	0.85		0.073	4.77		0.235	9.325	
F 1	10.0087	6.53	9.3952	-0.079	0.64	0.32 ± 0.28	0.062	3.62	2.24 ± 1.20	0.266	12.666	10.93 ± 1.55
F 2	10.0051	6.53	9.3918	-0.084	0.11		0.043	1.60		0.245	10.435	
F 3	10.0073	6.53	9.3939	-0.083	0.21		0.042	1.49		0.238	9.687	
Blank				-0.085			0.028			0.147		

ตารางที่ ข-19 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ความชื้น	น้ำหนักที่ได้จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	5.0098	9.57	4.5722	-0.017	4.59	4.16 ± 0.76	0.143	17.06	17.51 ± 0.76
control	5.0067	9.57	4.5694	-0.017	4.60		0.149	18.38	
control	5.0034	9.57	4.5664	-0.023	3.28		0.143	17.08	
A 1	5.0099	9.74	4.5652	-0.013	5.48	4.67 ± 1.04	0.151	18.84	17.75 ± 1.09
A 2	5.0087	9.74	4.5642	-0.022	3.51		0.141	16.65	
A 3	5.0056	9.74	4.5613	-0.015	5.04		0.146	17.76	
B 1	5.0047	10.76	4.5185	-0.024	3.10	2.95 ± 0.46	0.150	18.81	17.92 ± 0.80
B 2	5.0052	10.76	4.5190	-0.023	3.32		0.145	17.70	
B 3	5.0092	10.76	4.5226	-0.027	2.43		0.143	17.25	
C 1	5.0025	13.37	4.4125	-0.025	2.95	2.27 ± 0.68	0.160	21.53	22.13 ± 1.25
C 2	5.0044	13.37	4.4142	-0.028	2.27		0.169	23.56	
C 3	5.0063	13.37	4.4159	-0.031	1.59		0.159	21.29	

ตารางที่ ข-19 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 7 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	5.0059	4.24	4.8023	-0.030	1.67	1.67 ± 0.42	0.185	24.99	22.57 ± 2.12
D 2	5.0009	4.24	4.7975	-0.028	2.08		0.169	21.68	
D 3	5.0062	4.24	4.8026	-0.032	1.25		0.166	21.03	
E 1	5.0005	5.50	4.7398	-0.034	0.84	0.91 ± 0.12	0.158	19.62	18.49 ± 1.00
E 2	5.0074	5.50	4.7464	-0.034	0.84		0.151	18.12	
E 3	5.0008	5.50	4.7401	-0.033	1.05		0.149	17.72	
F 1	5.0033	5.73	4.7321	-0.027	2.32	1.69 ± 0.92	0.135	14.79	12.82 ± 1.72
F 2	5.0010	5.73	4.7300	-0.028	2.11		0.120	11.63	
F 3	5.0068	5.73	4.7355	-0.035	0.63		0.122	12.04	
Blank	-			-0.038			0.065		

ตารางที่ ข-20 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และโครเมียม (Cr) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 14 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักภาค (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	4.8969	8.59	4.5095	-0.046	4.21	3.43 ± 0.68	0.162	21.51	21.07 ± 0.97
control	4.9924	8.59	4.5975	-0.051	3.05		0.165	21.75	
control	5.0053	8.59	4.6094	-0.051	3.04		0.157	19.96	
A 1	5.0066	8.43	4.6174	-0.050	3.25	3.83 ± 0.66	0.134	14.94	14.01 ± 2.41
A 2	5.0070	8.43	4.6177	-0.048	3.68		0.138	15.81	
A 3	5.0001	8.43	4.6114	-0.044	4.55		0.117	11.28	
B 1	5.0090	9.03	4.5941	-0.047	3.92	3.20 ± 0.76	0.112	10.23	10.97 ± 2.48
B 2	5.0025	9.03	4.5882	-0.050	3.27		0.128	13.73	
B 3	5.0013	9.03	4.5871	-0.054	2.40		0.106	8.94	
C 1	5.0025	15.98	4.3132	-0.050	3.48	2.78 ± 0.70	0.098	7.65	6.49 ± 1.29
C 2	5.0021	15.98	4.3129	-0.056	2.09		0.087	5.10	
C 3	5.0091	15.98	4.3189	-0.053	2.78		0.094	6.71	

ตารางที่ ข-20 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และ โครเมียม (Cr) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 14 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักภาค (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cr จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cr (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	5.0054	5.45	4.7467	-0.052	2.74	2.74 ± 0	0.107	8.85	6.67 ± 2.33
D 2	5.0041	5.45	4.7455	-0.052	2.74		0.098	6.95	
D 3	5.0099	5.45	4.7510	-0.052	2.74		0.085	4.21	
E 1	5.0060	6.02	4.7218	-0.057	1.69	2.26 ± 0.53	0.097	6.78	7.55 ± 0.75
E 2	5.0010	6.02	4.7170	-0.054	2.33		0.104	8.27	
E 3	5.0094	6.02	4.7250	-0.052	2.75		0.101	7.62	
F 1	5.0047	6.53	4.6979	-0.055	2.13	1.92 ± 0.21	0.078	2.77	0.92 ± 1.65
F 2	5.0028	6.53	4.6961	-0.057	1.70		0.063	-0.43	
F 3	5.0047	6.53	4.6979	-0.056	1.92		0.067	0.43	
Blank				-0.065			0.065		

ตารางที่ ข-21 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และ โครเมียม (Cr) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	5.0068	8.59	4.6107	-0.053	3.90	3.69 ± 0.37	0.155	19.52	20.25 ± 5.46
control	5.0022	8.59	4.6065	-0.056	3.26		0.135	15.20	
control	5.0032	8.59	4.6074	-0.053	3.91		0.185	26.04	
A 1	5.0003	8.43	4.6115	-0.057	3.04	3.69 ± 0.94	0.148	18.00	12.43 ± 4.97
A 2	5.0013	8.43	4.6125	-0.049	4.77		0.104	8.46	
A 3	5.0012	8.43	4.6124	-0.056	3.25		0.115	10.84	
B 1	5.0006	9.03	4.5864	-0.057	3.05	2.83 ± 0.38	0.101	7.85	8.35 ± 0.45
B 2	5.0039	9.03	4.5895	-0.057	3.05		0.104	8.50	
B 3	5.0043	9.03	4.5898	-0.060	2.40		0.105	8.71	
C 1	5.0053	15.98	4.3157	-0.062	2.09	2.55 ± 0.61	0.095	6.95	7.19 ± 6.15
C 2	5.0052	15.98	4.3156	-0.061	2.32		0.070	1.16	
C 3	5.0017	15.98	4.3126	-0.057	3.25		0.123	13.45	

ตารางที่ ข-21 ปริมาณแคดเมียม (Cd) และ โครเมียม (Cr) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 28 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cd จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cd (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	5.0171	5.45	4.7578	-0.066	1.05	1.47 ± 0.37	0.090	5.25	5.40 ± 2.95
D 2	5.0099	5.45	4.7510	-0.063	1.68		0.105	8.42	
D 3	5.0084	5.45	4.7495	-0.063	1.68		0.077	2.53	
E 1	5.0055	6.02	4.7213	-0.064	1.48	1.69 ± 0.21	0.088	4.87	4.09 ± 0.68
E 2	5.0045	6.02	4.7203	-0.062	1.91		0.082	3.60	
E 3	5.0097	6.02	4.7252	-0.063	1.69		0.083	3.81	
F 1	5.0117	6.53	4.7045	-0.066	1.06	0.78 ± 0.32	0.067	0.43	0.50 ± 0.12
F 2	5.0005	6.53	4.6940	-0.069	0.43		0.067	0.43	
F 3	5.0014	6.53	4.6948	-0.067	0.85		0.068	0.64	
Blank				-0.071			0.065		

ตารางที่ ข-22 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 7 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	5.0098	9.57	4.57	0.226	21.215	20.43 ± 1.99	0.106	11.59	15.03 ± 3.90
control	5.0067	9.57	4.57	0.212	18.164		0.118	14.23	
control	5.0034	9.57	4.57	0.229	21.899		0.141	19.27	
A 1	5.0099	9.74	4.57	0.233	22.781	23.01 ± 1.66	0.105	11.39	11.10 ± 2.64
A 2	5.0087	9.74	4.56	0.227	21.472		0.115	13.58	
A 3	5.0056	9.74	4.56	0.242	24.773		0.091	8.33	
B 1	5.0047	10.76	4.52	0.240	24.566	25.96 ± 2.63	0.115	13.72	11.80 ± 4.11
B 2	5.0052	10.76	4.52	0.260	28.989		0.085	7.08	
B 3	5.0092	10.76	4.52	0.239	24.322		0.119	14.59	
C 1	5.0025	13.37	4.41	0.254	28.328	29.90 ± 1.71	0.110	12.92	12.69 ± 0.39
C 2	5.0044	13.37	4.41	0.269	31.716		0.107	12.23	
C 3	5.0063	13.37	4.42	0.260	29.666		0.110	12.91	

ตารางที่ ข-22 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 7 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	5.0059	4.24	4.80	0.271	29.569	29.86 ± 1.88	0.080	5.62	7.29 ± 2.20
D 2	5.0009	4.24	4.80	0.264	28.140		0.084	6.46	
D 3	5.0062	4.24	4.80	0.282	31.858		0.100	9.79	
E 1	5.0005	5.50	4.74	0.283	32.491	33.67 ± 1.56	0.062	1.90	9.14 ± 13.10
E 2	5.0074	5.50	4.75	0.286	33.078		0.059	1.26	
E 3	5.0008	5.50	4.74	0.297	35.442		0.168	24.26	
F 1	5.0033	5.73	4.73	0.282	32.332	29.51 ± 2.96	0.139	18.17	9.51 ± 8.03
F 2	5.0010	5.73	4.73	0.254	26.427		0.091	8.03	
F 3	5.0068	5.73	4.74	0.270	29.775		0.064	2.32	
Blank	-	-	-	0.129			0.053		

ตารางที่ ข-23 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในซีเมนต์ก่อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 14 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	4.8969	8.59	4.51	0.180	14.414	13.203 ± 1.50	0.081	11.75	14.42 ± 2.44
control	4.9924	8.59	4.60	0.168	11.528		0.104	16.53	
control	5.0053	8.59	4.61	0.178	13.668		0.097	14.97	
A 1	5.0066	8.43	4.62	0.160	9.746	12.21 ± 2.49	0.129	21.87	9.17 ± 11.00
A 2	5.0070	8.43	4.62	0.183	14.726		0.041	2.82	
A 3	5.0001	8.43	4.61	0.171	12.144		0.041	2.82	
B 1	5.0090	9.03	4.59	0.198	18.066	24.40 ± 5.62	0.088	13.06	18.01 ± 4.55
B 2	5.0025	9.03	4.59	0.236	26.372		0.129	22.01	
B 3	5.0013	9.03	4.59	0.247	28.776		0.115	18.97	
C 1	5.0025	15.98	4.31	0.228	26.198	28.20 ± 1.75	0.072	10.20	12.20 ± 1.87
C 2	5.0021	15.98	4.31	0.242	29.447		0.082	12.52	
C 3	5.0091	15.98	4.32	0.240	28.942		0.088	13.89	

ตารางที่ ข-23 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 14 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	5.0054	5.45	4.75	0.128	2.739	5.05 ± 4.19	0.071	9.06	10.3 ± 1.38
D 2	5.0041	5.45	4.75	0.127	2.529		0.076	10.11	
D 3	5.0099	5.45	4.75	0.162	9.893		0.084	11.79	
E 1	5.0060	6.02	4.72	0.159	9.319	9.18 ± 0.12	0.073	9.53	15.89 ± 8.26
E 2	5.0010	6.02	4.72	0.158	9.116		0.147	25.23	
E 3	5.0094	6.02	4.72	0.158	9.101		0.089	12.91	
F 1	5.0047	6.53	4.70	0.141	5.534	6.60 ± 2.82	0.050	4.68	6.88 ± 1.93
F 2	5.0028	6.53	4.70	0.161	9.795		0.067	8.30	
F 3	5.0047	6.53	4.70	0.136	4.470		0.064	7.66	
Blank	-	-	-	0.115			0.028		

ตารางที่ ข-24 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ(mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
control	5.0068	8.59	4.61	0.180	11.061	10.05 ± 1.39	0.071	9.98	11.79 ± 5.34
control	5.0022	8.59	4.61	0.168	8.466		0.107	17.80	
control	5.0032	8.59	4.61	0.178	10.635		0.060	7.60	
A 1	5.0003	8.43	4.61	0.160	6.722	9.18 ± 2.49	0.119	20.38	13.80 ± 5.87
A 2	5.0013	8.43	4.61	0.183	11.707		0.080	11.92	
A 3	5.0012	8.43	4.61	0.171	9.106		0.067	9.11	
B 1	5.0006	9.03	4.59	0.231	22.239	21.94 ± 3.50	0.035	2.18	3.85 ± 2.71
B 2	5.0039	9.03	4.59	0.245	25.275		0.036	2.40	
B 3	5.0043	9.03	4.59	0.213	18.301		0.057	6.97	
C 1	5.0053	15.98	4.32	0.228	22.940	24.95 ± 1.76	0.081	12.98	8.11 ± 5.39
C 2	5.0052	15.98	4.32	0.242	26.184		0.035	2.32	
C 3	5.0017	15.98	4.31	0.240	25.739		0.064	9.04	

ตารางที่ ข-24 ปริมาณทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ในซีเมนต์ก้อนที่ผ่านการวิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP ที่อายุการบ่ม 28 วัน(ต่อ)

ตัวอย่าง	น้ำหนักกาก (g)	เปอร์เซ็นต์ ความชื้น	น้ำหนักที่ได้ จากการคำนวณ (g)	Cu จากกราฟ(mg/L)	ปริมาณ Cu (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)	Pb จากกราฟ (mg/L)	ปริมาณ Pb (mg/Kg)	ค่าเฉลี่ย (mg/Kg)
D 1	5.0171	5.45	4.76	0.182	11.140	11.92 ± 1.72	0.062	7.78	10.24 ± 5.00
D 2	5.0099	5.45	4.75	0.180	10.735		0.101	16.00	
D 3	5.0084	5.45	4.75	0.195	13.896		0.058	6.95	
E 1	5.0055	6.02	4.72	0.186	12.073	11.01 ± 1.65	0.032	1.48	3.04 ± 1.71
E 2	5.0045	6.02	4.72	0.172	9.110		0.048	4.87	
E 3	5.0097	6.02	4.73	0.185	11.851		0.038	2.75	
F 1	5.0117	6.53	4.70	0.181	11.053	10.57 ± 0.43	0.062	7.86	7.09 ± 0.85
F 2	5.0005	6.53	4.69	0.178	10.439		0.054	6.18	
F 3	5.0014	6.53	4.69	0.177	10.224		0.059	7.24	
Blank	-	-	-	0.129			0.025		

ภาคผนวก ค

ค่ามาตรฐาน

ตารางที่ ค-1 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์ที่สกัดด้วยวิธี WET

สารอินทรีย์	ค่ามาตรฐาน (mg/L)
สารหนูและ/หรือสารประกอบของสารหนู	5.0
แบเรียมและ/หรือสารประกอบของแบเรียม	100
เบริลเลียมและ/หรือสารประกอบของเบริลเลียม	0.75
แคดเมียมและ/หรือสารประกอบของแคดเมียม	1.0
สารประกอบของโครเมียมเฮกซะวาเลนต์	5.0
โครเมียมและ/หรือสารประกอบของโครเมียมไตรวาเลนต์	5.0
โคบอลต์และ/หรือสารประกอบของโคบอลต์	80
ทองแดงและ/หรือสารประกอบของทองแดง	25
สารประกอบเกลือของฟลูออไรด์	180
ตะกั่วและ/หรือสารประกอบของตะกั่ว	5.0
ปรอทและ/หรือสารประกอบปรอท	0.2
โมลิบดีนัมและ/หรือสารประกอบ โมลิบดีนัม	350
นิกเกิลและ/หรือสารประกอบนิกเกิล	20
ซีลีเนียมและ/หรือสารประกอบซีลีเนียม	1.0
เงินและ/หรือสารประกอบเงิน	5.0
ซาล์วและ/หรือสารประกอบซาล์ว	7.0
วานาเดียมและ/หรือสารประกอบวานาเดียม	24
สังกะสีและ/หรือสารประกอบสังกะสี	250

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก-1 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายประเภทสารอินทรีย์ที่สกัดด้วยวิธี WET(ต่อ)

สารอินทรีย์	ค่ามาตรฐาน (mg/L)
แอลดริน (Aldrin)	0.14
คลอเดน (Chlordane)	0.25
ดีดีที ดีดีอี หรือ ดีดีดี (DDT, DDE, DDD)	0.1
2,4 - ดี (2,4 - Dichlorophenoxyacetic acid)	10
ดีลดริน (Dieldren)	0.8
ไดออกซิน(Dioxin (2,3,7,8 - TCDD))	0.001
เอนดริน (Endrin)	0.02
เฮปตาคลออร์(Heptachlor)	0.47
คีโปน (Kepone)	2.1
ลินเดน (Lindane)	0.4
เมททอกซีคลออร์(Methoxychlor)	10
ไมเร็กซ์(Mirex)	2.1
เพนตาคลอโรฟีนอล(Pentachlorophenol)	1.7
โพลีคลอริเนตเต็ด ไบฟีนิล (Polychlorinated biphenyls (PCBs))	5.0
ทอกซาฟีน(Toxaphene)	0.5
ไตรคลอโรเอทิลีน(Trichloroethylene)	204
ซิลเว็กซ์(Silvex ; 2,4,5 - Trichlorophenoxypropionic acid)	1.0

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม, 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-2 ค่ามาตรฐานของสารอันตรายในการทดสอบด้วยวิธี TCLP ตามที่ US EPA กำหนด

สารอันตราย	ค่ามาตรฐาน (mg/L)	สารอันตราย	ค่ามาตรฐาน (mg/L)
Arsenic	5.0	Hexachlorobenzene	0.13
Barium	100.0	Hexachlorobutadiene	0.5
Benzene	0.5	Hexachloroethane	3.0
Cadmium	1.0	Lead	5.0
Carbon tetrachloride	0.5	Lindane	0.4
Chlordane	0.03	Mercury	0.2
Chlorobenzene	100.0	Methoxychlor	10.0
Chloroform	6.0	Methyl ethyl ketone	200.0
Chromium	5.0	Nitrobenzene	2.0
O – Cresol	200.0	Pentachlorophenol	100.0
m – Cresol	200.0	Pyridine	5.0
p – Cresol	200.0	Selenium	1.0
Cresol	200.0	Silver	5.0
2,4 – D*	10.0	Tetrachloroethylene	0.7
1,4 – Dichlorobenzene	7.5	Toxaphene	0.5
1,2 – Dichloroethane	0.5	Trichloroethylene	0.5
1,1 – Dichloroethylene	0.7	2,4,5 – Trichlorophenol	400.0
2,4 – Dinitrotoluene	0.13	2,4,5 – Trichlorophenol	2.0
Endrin	0.02	2,4,5 – TP (Silvex)**	1.0
Heptachlor	0.008	Vinyl chloride	0.2

ที่มา : Environment, Health and Safety Online, (n.d.): Online

หมายเหตุ : * Dichlorophenol compound

** Trichlorophenol compound

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค-3 เกณฑ์กำหนดกำลังอัดของก้อนลูกบาศก์มอร์ตาร์มาตรฐาน

อายุการบ่ม	กำลังอัด (Kg/cm ²)				
	ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 2	ประเภทที่ 3	ประเภทที่ 4	ประเภทที่ 5
1 วันในอากาศชื้น	-	120	-	-	-
1 วันในอากาศชื้น 2 วันในน้ำ	85	70	210	-	-
1 วันในอากาศชื้น 6 วันในน้ำ	150	130	-	55	65
1 วันในอากาศชื้น 27 วันในน้ำ	245	245	-	140	210

ที่มา : ศิริวัฒน์, 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

ง-1 การวิเคราะห์ทางสถิติของแคดเมียมโครเมียม และทองแดงที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET

ตารางที่ ง-1 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม(Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD
7 วัน	Control	1	2.39	2.04	0.45	9.33	9.06	6.63	11.393	19.60	16.65
		2	2.19			15.55			8.653		
		3	1.53			2.29			38.766		
	A	1	2.05	1.91	0.15	6.58	5.50	3.48	11.871	19.83	14.40
		2	1.92			1.60			36.451		
		3	1.75			8.31			11.156		
	B	1	1.64	1.56	0.12	2.84	3.84	0.89	33.295	19.77	11.71
		2	1.41			4.13			13.052		
		3	1.62			4.54			12.968		

ตารางที่ ง-1 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม(Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD
7 วัน	C	1	1.02	0.94	0.23	4.52	3.82	0.98	18.173	22.53	9.36
		2	1.12			4.26			16.139		
		3	0.67			2.70			33.277		
	D	1	1.14	1.27	0.17	5.27	4.95	1.19	14.377	13.03	1.56
		2	1.21			5.95			13.405		
		3	1.45			3.64			11.321		
	E	1	1.25	1.18	0.06	1.67	1.77	0.99	14.102	14.08	0.73
		2	1.15			2.81			14.793		
		3	1.15			0.83			13.340		
	F	1	1.27	1.02	0.43	3.17	3.38	0.19	16.153	17.89	1.53
		2	1.27			3.49			18.499		
		3	0.53			3.49			19.031		
14 วัน	Control	1	3.25	3.33	0.23	7.59	5.79	2.0	5.533	6.26	0.66
		2	3.58			6.08			6.838		
		3	3.15			3.69			6.406		

ตารางที่ ง-1 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม(Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD
14 วัน	A	1	3.04	3.07	0.06	9.65	9.39	1.6	8.672	8.27	0.38
		2	3.03			7.70			7.912		
		3	3.14			10.84			8.238		
	B	1	2.40	1.85	0.61	12.76	9.01	3.2	6.978	5.70	1.21
		2	1.96			7.19			4.577		
		3	1.20			7.09			5.559		
	C	1	1.97	1.78	0.44	13.68	10.09	3.4	11.364	12.09	0.63
		2	2.09			9.62			12.514		
		3	1.28			6.96			12.403		
	D	1	1.19	1.03	0.14	7.45	6.58	2.5	5.659	7.81	1.92
		2	0.95			3.79			9.361		
		3	0.95			8.51			8.403		
	E	1	0.63	0.45	0.16	5.42	7.57	2.5	7.193	8.16	1.14
		2	0.42			10.27			9.419		
		3	0.31			7.02			7.853		

ตารางที่ 1-1 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD
14 วัน	F	1	0.75	0.50	0.34	5.32	6.36	1.70	10.751	10.95	0.90
		2	0.10			5.45			10.165		
		3	0.64			8.31			11.926		
28 วัน	Control	1	2.39	1.88	0.45	6.51	6.26	1.27	4.016	4.78	1.32
		2	1.74			4.88			6.295		
		3	1.52			7.38			4.016		
	A	1	2.06	1.77	0.25	8.45	5.24	2.81	7.044	6.79	0.63
		2	1.63			4.01			6.071		
		3	1.63			3.25			7.262		
	B	1	2.18	2.11	0.66	1.85	3.20	1.79	6.320	7.16	0.82
		2	1.42			2.51			7.189		
		3	2.72			5.23			7.956		
	C	1	1.85	1.62	0.50	8.00	6.18	1.62	12.285	12.44	0.27
		2	1.97			5.68			12.749		
		3	1.04			4.87			12.290		

ตารางที่ ง-1 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) และทองแดง (Cu) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD
28 วัน	D	1	1.26	1.16	0.11	5.16	4.36	0.75	8.958	7.73	1.10
		2	1.16			3.69			6.850		
		3	1.05			4.21			7.374		
	E	1	1.06	1.06	0.21	2.44	3.53	1.17	8.793	9.15	0.31
		2	1.27			3.39			9.322		
		3	0.85			4.77			9.325		
	F	1	0.64	0.32	0.28	3.62	2.24	1.20	12.666	10.93	1.55
		2	0.11			1.60			10.435		
		3	0.21			1.49			9.687		

การวิเคราะห์ทางสถิติของแคดเมียม ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 = ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณแคดเมียมไม่แตกต่างกัน

H_1 = ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชนิด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณแคดเมียมแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-2 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแคดเมียมที่อายุการบ่มต่างๆ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	35.359	20	1.768	15.644	0.000
Within Groups	4.747	42	0.113		
Total	40.105	62			

ตารางที่ ง-3 เปรียบเทียบความแตกต่าง ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

Duncan^a

ชนิดของ ซีเมนต์ก้อน	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
F ที่ 28 วัน	3	0.3200							
E ที่ 14 วัน	3	0.4533	0.4533						
F ที่ 14 วัน	3	0.4967	0.4967						
C ที่ 7 วัน	3		0.9367	0.9367					
F ที่ 7 วัน	3		1.0233	1.0233	1.0233				
D ที่ 14 วัน	3		1.0300	1.0300	1.0300				
E ที่ 28 วัน	3		1.0600	1.0600	1.0600				
D ที่ 28 วัน	3			1.1567	1.1567	1.1567			
E ที่ 7 วัน	3			1.1833	1.1833	1.1833			
D ที่ 7 วัน	3			1.2667	1.2667	1.2667	1.2667		
B ที่ 7 วัน	3			1.5567	1.5567	1.5567	1.5567	1.5567	
C ที่ 28 วัน	3				1.6200	1.6200	1.6200	1.6200	
B ที่ 14 วัน	3					1.7733	1.7733	1.7733	
C ที่ 14 วัน	3					1.7800	1.7800	1.7800	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงงานของเอกสารนี้โดยมิได้รับอนุญาต

ตารางที่ ง-3 เปรียบเทียบความแตกต่าง ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (ต่อ)

ชนิดของ ซีเมนต์ก้อน	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
B ที่ 14 วัน	3						1.8533	1.8533	
Con. ที่ 28 วัน	3						1.8833	1.8833	
A ที่ 7 วัน	3							1.9067	
Con. ที่ 7 วัน	3							2.0367	
B ที่ 28 วัน	3							2.1067	
A ที่ 14 วัน	3								3.0700
Con. ที่ 14 วัน	3								3.3267
Sig.		0.549	0.057	0.058	0.068	0.054	0.056	0.095	0.355

หมายเหตุ Con. = Control

จากตารางที่ ง-2 พบว่า ค่า Sig. มีค่า 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน

การวิเคราะห์ทางสถิติของโครเมียม ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 = ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณ โครเมียม ไม่แตกต่างกัน

H_1 = ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณ โครเมียมแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-4 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณ โครเมียมที่อายุการบ่มต่างๆ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	341.022	20	17.051	2.923	0.002
Within Groups	245.022	42	5.834		
Total	586.044	62			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-5 เปรียบเทียบความแตกต่าง ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

Duncan^a

ชนิดซีเมนต์ ก่อน	N	Subset for alpha = 0.05					
		1	2	3	4	5	6
E ที่ 7 วัน	3	1.7700					
F ที่ 28 วัน	3	2.2367	2.2367				
B ที่ 28 วัน	3	3.1967	3.1967	3.1967			
F ที่ 7 วัน	3	3.3833	3.3833	3.3833			
E ที่ 28 วัน	3	3.5333	3.5333	3.5333			
C ที่ 7 วัน	3	3.8267	3.8267	3.8267			
B ที่ 7 วัน	3	3.8367	3.8367	3.8367			
D ที่ 28 วัน	3	4.3533	4.3533	4.3533	4.3533		
D ที่ 7 วัน	3	4.9533	4.9533	4.9533	4.9533	4.9533	
A ที่ 28 วัน	3	5.2367	5.2367	5.2367	5.2367	5.2367	
A ที่ 7 วัน	3	5.4967	5.4967	5.4967	5.4967	5.4967	5.4967
Con. ที่ 14 วัน	3	5.7867	5.7867	5.7867	5.7867	5.7867	5.7867
C ที่ 28 วัน	3	6.1833	6.1833	6.1833	6.1833	6.1833	6.1833
Con ที่ 28 วัน	3	6.2567	6.2567	6.2567	6.2567	6.2567	6.2567
F ที่ 14 วัน	3	6.3600	6.3600	6.3600	6.3600	6.3600	6.3600
D ที่ 14 วัน	3		6.5833	6.5833	6.5833	6.5833	6.5833
E ที่ 14 วัน	3			7.5700	7.5700	7.5700	7.5700
B ที่ 14 วัน	3				9.0133	9.0133	9.0133
Con. ที่ 7 วัน	3				9.0567	9.0567	9.0567
A ที่ 14 วัน	3					9.3967	9.3967
C ที่ 14 วัน	3						10.0867
Sig.		0.060	0.074	0.073	0.051	0.065	0.056

จากตารางที่ ง-4 พบว่า ค่า Sig. มีค่า 0.002 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ

ซีเมนต์ก่อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณโครเมียมแตกต่างกัน ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ทางสถิติของทองแดง ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี WET

สมมติฐานทางสถิติ

 H_0 = ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณทองแดงไม่แตกต่างกัน H_1 = ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณทองแดงแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-6 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณทองแดงที่อายุการบ่มต่างๆ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	1735.730	20	86.787	2.498	0.006
Within Groups	1459.291	42	34.745		
Total	3195.021	62			

ตารางที่ ง-7 เปรียบเทียบความแตกต่าง ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range test

Duncan^a

ชนิด	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
Con. ที่ 28 วัน	3	4.7757				
B ที่ 14 วัน	3	5.7047				
Con. ที่ 14 วัน	3	6.2590	6.2590			
A ที่ 28 วัน	3	6.7923	6.7923			
B ที่ 28 วัน	3	7.1550	7.1550			
D ที่ 28 วัน	3	7.7273	7.7273			
D ที่ 14 วัน	3	7.8077	7.8077			
E ที่ 14 วัน	3	8.1550	8.1550	8.1550		
A ที่ 14 วัน	3	8.2740	8.2740	8.2740		
E ที่ 28 วัน	3	9.1467	9.1467	9.1467	9.1467	
F ที่ 28 วัน	3	10.9293	10.9293	10.9293	10.9293	
F ที่ 14 วัน	3	10.9473	10.9473	10.9473	10.9473	
C ที่ 14 วัน	3	12.0937	12.0937	12.0937	12.0937	12.0937
C ที่ 28 วัน	3	12.4413	12.4413	12.4413	12.4413	12.4413
D ที่ 7 วัน	3	13.0343	13.0343	13.0343	13.0343	13.0343

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

ตารางที่ ง-7 เปรียบเทียบความแตกต่าง ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range test (ต่อ)

ชนิด	N	Subset for alpha = 0.05				
		1	2	3	4	5
E ที่ 7 วัน	3	14.0783	14.0783	14.0783	14.0783	14.0783
F ที่ 7 วัน	3		17.8943	17.8943	17.8943	17.8943
Con. ที่ 7 วัน	3			19.6040	19.6040	19.6040
B ที่ 7 วัน	3				19.7717	19.7717
A ที่ 7 วัน	3				19.8260	19.8260
C ที่ 7 วัน	3					22.5297
Sig.		0.117	0.051	0.050	0.068	0.071

จากตารางที่ ง-6 พบว่า ค่า Sig. มีค่า 0.006 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ ซีเมนต์
ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณทองแดงแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง-2การวิเคราะห์ทางสถิติของแคดเมียม โครเมียม ทองแดงและตะกั่ว ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

ตารางที่ ง-8ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม(Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก่อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD	Pb	Mean	SD
7 วัน	Control	1	4.59	4.16	0.76	17.06	17.51	0.76	21.215	20.43	1.99	11.59	15.03	3.90
		2	4.60			18.38			18.164			14.23		
		3	3.28			17.08			21.899			19.27		
	A	1	5.48	4.67	1.04	18.84	17.75	1.09	22.781	23.01	1.66	11.39	11.10	2.64
		2	3.51			16.65			21.472			13.58		
		3	5.04			17.76			24.773			8.33		
	B	1	3.10	2.95	0.46	18.81	17.92	0.80	24.566	25.96	2.63	13.72	11.80	4.11
		2	3.32			17.70			28.989			7.08		
		3	2.43			17.25			24.322			14.59		

ตารางที่ ๖-8 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม(Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD	Pb	Mean	SD
7 วัน	C	1	2.95	2.27	0.68	21.53	22.13	1.25	28.328	29.90	1.71	12.92	12.69	0.39
		2	2.27			23.56			31.716			12.23		
		3	1.59			21.29			29.666			12.91		
	D	1	1.67	1.67	0.42	24.99	22.57	2.12	29.569	29.86	1.88	5.62	7.29	2.20
		2	2.08			21.68			28.140			6.46		
		3	1.25			21.03			31.858			9.79		
	E	1	0.84	0.91	0.12	19.62	18.49	1.00	32.491	33.67	1.56	1.90	9.14	13.10
		2	0.84			18.12			33.078			1.26		
		3	1.05			17.72			35.442			24.26		
	F	1	2.32	1.69	0.92	14.79	12.82	1.72	32.332	29.51	2.96	18.17	9.51	8.03
		2	2.11			11.63			26.427			8.03		
		3	0.63			12.04			29.775			2.32		
14 วัน	Control	1	4.21	3.43	0.68	21.51	21.07	0.97	14.414	13.20	1.50	11.75	14.42	2.44
		2	3.05			21.75			11.528			16.53		
		3	3.04			19.96			13.668			14.97		

ตารางที่ ๖-8 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD	Pb	Mean	SD
14 วัน	A	1	3.25	3.83	0.66	14.94	14.01	2.41	9.746	12.21	2.49	21.87	9.17	11.00
		2	3.68			15.81			14.726			2.82		
		3	4.55			11.28			12.144			2.82		
	B	1	3.92	3.20	0.76	10.23	10.97	2.48	18.066	24.40	5.62	13.06	18.01	4.55
		2	3.27			13.73			26.372			22.01		
		3	2.40			8.94			28.776			18.97		
	C	1	3.48	2.78	0.70	7.65	6.49	1.29	26.198	28.20	1.75	10.20	12.20	1.87
		2	2.09			5.10			29.447			12.52		
		3	2.78			6.71			28.942			13.89		
	D	1	2.74	2.74	0.00	8.85	6.67	2.33	2.739	5.05	4.19	9.06	10.32	1.38
		2	2.74			6.95			2.529			10.11		
		3	2.74			4.21			9.893			11.79		
	E	1	1.69	2.26	0.53	6.78	7.55	0.75	9.319	9.18	0.12	9.53	15.89	8.26
		2	2.33			8.27			9.116			25.23		
		3	2.75			7.62			9.101			12.91		

ตารางที่ 8-8 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD	Pb	Mean	SD
14 วัน	F	1	2.13	1.92	0.21	2.77	0.92	1.65	5.534	6.60	2.82	4.68	6.88	1.93
		2	1.70			-0.43			9.795			8.30		
		3	1.92			0.43			4.470			7.66		
28 วัน	Control	1	3.90	3.69	0.37	19.52	20.25	5.46	11.061	10.05	1.39	9.98	11.79	5.34
		2	3.26			15.20			8.466			17.80		
		3	3.91			26.04			10.635			7.60		
	A	1	3.04	3.69	0.94	18.00	12.43	4.97	6.722	9.18	2.49	20.38	13.80	5.87
		2	4.77			8.46			11.707			11.92		
		3	3.25			10.84			9.106			9.11		
	B	1	3.05	2.83	0.38	7.85	8.35	0.45	22.239	21.94	3.50	2.18	3.85	2.71
		2	3.05			8.50			25.275			2.40		
		3	2.40			8.71			18.301			6.97		
	C	1	2.09	2.55	0.61	6.95	7.19	6.15	22.940	24.95	1.76	12.98	8.11	5.39
		2	2.32			1.16			26.184			2.32		
		3	3.25			13.45			25.739			9.04		

ตารางที่ ๘-8 ค่าความเข้มข้นของแคดเมียม (Cd) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb) ที่อายุการบ่มต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP (ต่อ)

ที่อายุการบ่ม	ชนิดของซีเมนต์ก้อน	ครั้งที่	Cd	Mean	SD	Cr	Mean	SD	Cu	Mean	SD	Pb	Mean	SD
28 วัน	D	1	1.05	1.47	0.37	5.25	5.40	2.95	11.140	11.92	1.72	7.78	10.24	5.00
		2	1.68			8.42			10.735			16.00		
		3	1.68			2.53			13.896			6.95		
	E	1	1.48	1.69	0.21	4.87	4.09	0.68	12.073	11.01	1.65	1.48	3.04	1.71
		2	1.91			3.60			9.110			4.87		
		3	1.69			3.81			11.851			2.75		
	F	1	1.06	0.78	0.32	0.43	0.50	0.12	11.053	10.57	0.43	7.86	7.09	0.85
		2	0.43			0.43			10.439			6.18		
		3	0.85			0.64			10.224			7.24		

การวิเคราะห์ทางสถิติของแคลเซียม ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 = ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณแคลเซียมไม่แตกต่างกัน

H_1 = ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-9 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณแคลเซียมที่อายุการบ่มต่างๆ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	67.628	20	3.381	9.500	0.000
Within Groups	14.949	42	0.356		
Total	82.578	62			

จากตารางที่ ง-9 พบว่า ค่า Sig. มีค่า 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน

การวิเคราะห์ทางสถิติของโครเมียม ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 = ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณโครเมียมไม่แตกต่างกัน

H_1 = ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณโครเมียมแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-10 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณโครเมียมที่อายุการบ่มต่างๆ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	2825.600	20	141.280	21.094	0.000
Within Groups	274.604	41	6.698		
Total	3100.204	61			

จากตารางที่ ง-10 พบว่า ค่า Sig. มีค่า 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชุด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณโครเมียมแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ทางสถิติของทองแดง ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 = ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณทองแดงไม่แตกต่างกัน

H_1 = ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชนิด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณทองแดงแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-11 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณทองแดงที่อายุการบ่มต่างๆ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	5008.633	20	250.432	40.701	0.000
Within Groups	258.421	42	6.153		
Total	5267.055	62			

จากตารางที่ ง-11 พบว่า ค่า Sig. มีค่า 0.000 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 ยอมรับ H_1 คือ ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชนิด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณทองแดงแตกต่างกัน

การวิเคราะห์ทางสถิติของตะกั่ว ที่วิเคราะห์ด้วยวิธี TCLP

สมมติฐานทางสถิติ

H_0 = ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณตะกั่วไม่แตกต่างกัน

H_1 = ซีเมนต์ก้อนอย่างน้อย 2 ชนิด ที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณตะกั่วแตกต่างกัน

ตารางที่ ง-12 ค่าวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณตะกั่วที่อายุการบ่มต่างๆ

ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	867.070	20	43.353	1.438	0.158
Within Groups	1266.055	42	30.144		
Total	2133.124	62			

จากตารางที่ ง-12 พบว่า ค่า Sig. มีค่า 0.158 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงยอมรับ H_0 ปฏิเสธ H_1 คือ ซีเมนต์ก้อนแต่ละชนิดที่อายุการบ่มต่างๆ มีปริมาณตะกั่วไม่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13-13 เปรียบเทียบความแตกต่างของเคดเมียม ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

Duncan^a

ชนิด	N	Subset for alpha = 0.05												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
F ที่ 28 วัน	3	0.7800												
F ที่ 7 วัน	3	0.9100	0.9100											
D ที่ 28 วัน	3	1.4700	1.4700	1.4700										
D ที่ 7 วัน	3	1.6667	1.6667	1.6667	1.6667									
F ที่ 7 วัน	3	1.6867	1.6867	1.6867	1.6867									
E ที่ 28 วัน	3	1.6933	1.6933	1.6933	1.6933									
F ที่ 14 วัน	3		1.9167	1.9167	1.9167	1.9167								
E ที่ 14 วัน	3			2.2567	2.2567	2.2567	2.2567							
C ที่ 7 วัน	3			2.2700	2.2700	2.2700	2.2700							
C ที่ 28 วัน	3			2.5533	2.5533	2.5533	2.5533	2.5533						
D ที่ 14 วัน	3				2.7400	2.7400	2.7400	2.7400	2.7400					
C ที่ 14 วัน	3				2.7833	2.7833	2.7833	2.7833	2.7833	2.7833				
B ที่ 28 วัน	3					2.8333	2.8333	2.8333	2.8333	2.8333				

ตารางที่ ง-13 เปรียบเทียบความแตกต่างของแคะเมียม ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (ต่อ)

ชนิด	N	Duncan ^a									
		Subset for alpha = 0.05									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B ที่ 7 วัน	3					2.9500	2.9500	2.9500	2.9500		
B ที่ 14 วัน	3						3.1967	3.1967	3.1967	3.1967	
Con. ที่ 14 วัน	3							3.4333	3.4333	3.4333	
A ที่ 28 วัน	3							3.6867	3.6867	3.6867	3.6867
Con. ที่ 28 วัน	3							3.6900	3.6900	3.6900	3.6900
A ที่ 14 วัน	3							3.8267	3.8267	3.8267	3.8267
Con. ที่ 7 วัน	3								4.1567	4.1567	4.1567
A ที่ 7 วัน	3									4.6767	4.6767
Sig.		0.107	0.075	0.062	0.056	0.075	0.105	0.052	0.063	0.090	0.075

ตารางที่ ง-14เปรียบเทียบความแตกต่างของโครเมียม ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

Duncan^{a,b}

Subset for alpha = 0.05

ชนิด	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
F ที่ 28 วัน	2	0.4300								
F ที่ 14 วัน	3	0.9233	0.9233							
E ที่ 28 วัน	3	4.0933	4.0933	4.0933						
D ที่ 28 วัน	3		5.4000	5.4000						
C ที่ 14 วัน	3			6.4867	6.4867					
D ที่ 14 วัน	3			6.6700	6.6700					
C ที่ 28 วัน	3			7.1867	7.1867					
E ที่ 14 วัน	3			7.5567	7.5567					
B ที่ 28 วัน	3			8.3533	8.3533	8.3533				
B ที่ 14 วัน	3				10.9667	10.9667	10.9667			
A ที่ 28 วัน	3					12.4333	12.4333			
F ที่ 7 วัน	3					12.8200	12.8200			
B ที่ 14 วัน	3						14.0100	14.0100		
Con. ที่ 7 วัน	3							17.5067	17.5067	

ตารางที่ ง-14 เปรียบเทียบความแตกต่างของโครเมียม ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (ต่อ)

Duncan^{a,b}

ชนิด	N	Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
A ที่ 7 วัน	3							17.7500	17.7500	17.7500
B ที่ 7 วัน	3							17.9200	17.9200	17.9200
E ที่ 7 วัน	3							18.4867	18.4867	18.4867
Con. ที่ 28 วัน	3								20.2533	20.2533
Con. ที่ 14 วัน	3								21.0733	21.0733
C ที่ 7 วัน	3								22.1267	22.1267
D ที่ 7 วัน	3									22.5667
Sig.		0.113	0.053	0.091	0.071	0.062	0.202	0.067	0.067	0.056

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบความแตกต่างของทองแดง ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test

ชนิด	N	Duncan ^a								
		Subset for alpha = 0.05								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
D ที่ 14 วัน	3	5.0537								
F ที่ 14 วัน	3	6.5997	6.5997							
A ที่ 28 วัน	3	9.1783	9.1783	9.1783						
E ที่ 14 วัน	3	9.1787	9.1787	9.1787						
Con. ที่ 28 วัน	3		10.0540	10.0540						
F ที่ 28 วัน	3		10.5720	10.5720						
E ที่ 28 วัน	3		11.0113	11.0113						
B ที่ 28 วัน	3			11.9237						
A ที่ 14 วัน	3			12.2053						
Con. ที่ 14 วัน	3			13.2033						
Con. ที่ 7 วัน	3				20.4260					
B ที่ 28 วัน	3				21.9383	21.9383				
A ที่ 7 วัน	3				23.0087	23.0087				
B ที่ 14 วัน	3				24.4047	24.4047	24.4047			

ตารางที่ 15 เปรียบเทียบความแตกต่างของทองแดง ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test(ต่อ)

		Duncan ^a							
ชนิด	N	Subset for alpha = 0.05							
		1	2	3	4	5	6	7	8
C ที่ 28 วัน	3				24.9543	24.9543	24.9543		
B ที่ 7 วัน	3					25.9590	25.9590	25.9590	
C ที่ 14 วัน	3						28.1957	28.1957	
F ที่ 7 วัน	3							29.5113	29.5113
D ที่ 7 วัน	3							29.8557	29.8557
C ที่ 7 วัน	3							29.9033	29.9033
E ที่ 7 วัน	3								33.6703
Sig.		0.068	0.061	0.095	0.050	0.082	0.094	0.088	0.066

ภาคผนวก จ
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ จ-1 เครื่องทดสอบกำลังอัด

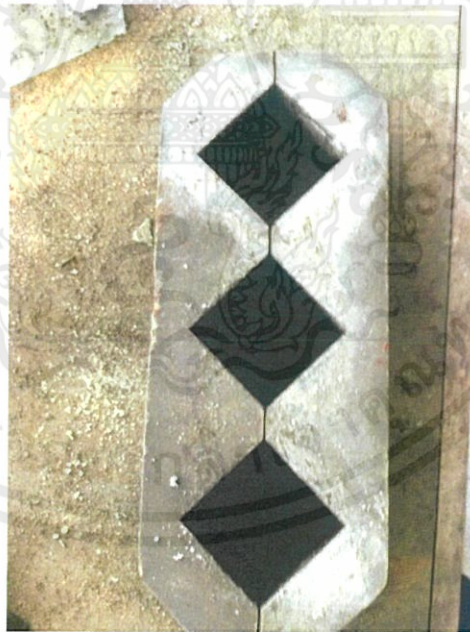


รูปที่ จ-2 โต๊ะควบคุมการไหลพร้อมแบบทองเหลืองรูปกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารที่ตรงตามการนำไปใช้



รูปที่ จ-3 เครื่องผสมมอร์ตาร์



รูปที่ จ-4 แบบหล่อแท่งตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้