

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ใช้
ซีเมนต์จากกระบวนการเผาพร้อมกับตะกั่วทองแดง



นางสาวศศิธร แก้วกันยา

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2538-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF HEAVY METALS IN MORTARS INCORPORATING
CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING COPPER SLAG



Miss Sasitorn Kaewkanya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2006


ISBN 974-14-2538-4

Copyright of Chulalongkorn University

490046

หัวข้อวิทยานิพนธ์ สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะหนักในมอร์ตาที่ใช้
ซีเมนต์จากกระบวนการเผาพร้อมกับตะกรันทองแดง
โดย นางสาวศศิธร แก้วกันยา
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุธา ชาวเขียว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ศรัณย์ เตชะเสน)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศศิธร แก้วกันยา : สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ใช้ซีเมนต์จากกระบวนการเผาพร้อมกับตะกรันทองแดง. (PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF HEAVY METALS IN MORTARS INCORPORATING CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING COPPER SLAG) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ.ดร.มนัสกร ราชอาณาจักร, 183 หน้า.
ISBN 974-14-2538-4

การวิจัยครั้งนี้ ศึกษาผลของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จากกระบวนการเผาพร้อมกับตะกรันทองแดงเป็นวัสดุทดแทนในปริมาณร้อยละ 0 ถึง 3.2 โดยน้ำหนักในวัสดุดิบทั้งหมด เครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ได้แก่ XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer) SEM/EDS (Scanning Electron Microscope / Energy Dispersive X-ray Spectrometer) และ FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) การวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักในแต่ละชั้นใช้วิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก (Sequential Extraction) และทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ตลอดจนการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์

ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีเมนต์เฟสดี พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ ดังผลการศึกษาด้วยวิธีการสกัดแยก พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะถูกสกัดออกมาในขั้นนี้มากกว่าขั้นอื่น (ประมาณร้อยละ 20 ของสารประกอบทั้งหมด) ทั้งนี้สารประกอบโลหะหนักส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่มีความเสถียรสูง (ร้อยละ 80 ของสารประกอบทั้งหมด) จึงมีโอกาสชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้น้อยในสภาพแวดล้อมปกติ ส่วนนิเกิล และวานาเดียมพบในรูปที่มีความเสถียรต่ำ มีการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ง่าย จึงเป็นโลหะที่ต้องระมัดระวังในการควบคุมไม่ให้มีปริมาณของโลหะเหล่านี้สูงเกินไปในระบบ

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณโลหะหนักที่สูงขึ้นในปูนซีเมนต์ มีความสัมพันธ์กับการแปรผันอัตราส่วนตะกรันทองแดงเผาพร้อมที่มากขึ้น แต่ผลการศึกษาลักษณะทางเคมีของซีเมนต์เฟสดี พบว่าสารประกอบโลหะหนักที่มีโครงสร้างเป็นผลึกซึ่งทำการศึกษาด้วยเครื่อง XRD และพันธะของสารประกอบโลหะหนักด้วยเครื่อง FT-IR ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของ ASTM C109/C109M-05 ผลการชะละลายโลหะหนักของมอร์ตาร์ตามมาตรฐานประเทศไทยและ US EPA ของสหรัฐอเมริกา มีค่าต่ำกว่าค่ากำหนดของทั้งสองมาตรฐาน จากผลการศึกษาทั้งหมดทำให้สามารถสรุปได้ว่าสามารถใช้ตะกรันทองแดงเป็นวัสดุทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณร้อยละ 3.2 ของน้ำหนักในวัสดุดิบทั้งหมด

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต *ศศิธร*
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *ด.*
ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4670729021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING



KEYWORD : CO-INCINERATION PROCESS / CO-PROCESSING / COPPER SLAG /
HYDRATION / MORTAR / HEAVY METALS

SASITORN KAEWKANYA : PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF HEAVY METALS IN MORTARS INCORPORATING CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING COPPER SLAG. THESIS ADVISOR: MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 183 pp. ISBN 974-14-2538-4

This research studied hydration of cement from co-incineration process in a full-scale cement kiln using a waste, copper slag, as an alternative raw material that was utilized up to 3.2 % by weight of the raw mix. Analyses were done using X-ray Diffraction Spectrometer (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) combined with Energy Dispersive X-ray Spectrometer (EDS), and also by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). Sequential Extraction was applied to quantitatively examine partitioning of metals into fractions. Furthermore, Compressive strengths and leaching tests of cement mortars were evaluated.

The sequential extraction results showed that approximately 20% of the heavy metals were distributed in Fraction 3 (bound to iron and manganese oxides). Majority of the heavy metals (80%) mostly partitioned into Fraction 5 (residual fraction) indicating that these stable or less leachable metals had entered such phase during cement production. In contrast, Ni and V were found in readily leachable forms, suggesting that the two metals are able to leach more easily to the environment than other metals. Consequently, the amounts of these metals in raw materials need to be controlled to protect the human health and the environment.

Although the concentrations of heavy metals in the cement increased with the increasing amount of copper slag, there were no significance differences in intensities of major crystalline phases in the XRD patterns and FT-IR results of cement mortars at different replacement percentages. The compressive strengths results were satisfactory according to ASTM C109/C109M-05 and the leached metal concentrations did not exceed the limits set by the Notification of Ministry of Industry (2005) and the US regulatory Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Finally, the results led to a conclusion that it is possible to substitute copper slag up to 3.2 % by weight of the raw mix.

Department ..Environmental Engineering....	Student's Signature..... 
Field of Study ..Environmental Engineering..	Advisor's Signature..... 
Academic Year ..2006.....	Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชกรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและตัวอย่างของวัตถุดิบในการวิจัย รวมทั้งการอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงานกับทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ศูนย์เครือข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียอันตราย (CUFE, NRC-EHWM) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัย

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคน (กิฟท์ บัด แบ่ง บิว ตีน ก แอน และเพื่อนร่วมรุ่นทุกคน) ที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ และที่สำคัญที่สุดคือครอบครัวที่คอยสนับสนุนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ข
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ปูนซีเมนต์	6
2.2 กากของเสียอุตสาหกรรม	18
2.3 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมใช้เป็นวัสดุติบและเชื้อเพลิง ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	20
2.4 แหล่งที่มาของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	26
2.5 ผลกระทบของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	28
2.6 พฤติกรรมของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	29
2.7 ตะกรัน.....	40
2.8 ตะกรันทองแดง.....	41
2.9 การชะละลาย	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	48
3.1 ขั้นตอนการวิจัย	48
3.2 ตัวอย่างตะกรันทองแดงและปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัย	48
3.2.1 ตัวอย่างตะกรันทองแดง.....	48
3.2.2 ตัวอย่างปูนซีเมนต์.....	49
3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	49
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์	49
3.3.2 สารเคมี	50
3.4 การดำเนินการวิจัย	50

3.4.1	ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ของตะกรันทองแดง	50
3.4.2	ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์ ..	57
3.4.3	ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์	58
3.4.4	ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์	59
3.4.5	ขั้นตอนที่ 5 การหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด	63
3.4.6	ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ต้า	64
บทที่ 4	ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล	66
4.1	ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง	66
4.1.1	ลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดง	66
4.1.2	ลักษณะทางทางเคมีของตะกรันทองแดง	67
4.2	ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์	72
4.3	ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์	74
4.4	ผลการศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์	75
4.4.1	ผลการศึกษาลักษณะกายภาพและการกระจายตัวของโลหะหนัก	75
4.4.2	ผลตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก	84
4.4.3	ผลการตรวจวัดพันธะของสารประกอบโลหะหนัก	92
4.4.4	ผลการศึกษาชนิดของสารประกอบโลหะหนัก	97
4.5	ผลการหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด	104
4.6	ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ต้า	107
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	109
5.1	สรุปผลการวิจัย	109
5.2	ข้อเสนอแนะและปัญหาอุปสรรคที่พบในงานวิจัย	111
	รายการอ้างอิง	112
	ภาคผนวก	120
	ภาคผนวก ก. ผลการวิเคราะห์ของตะกรันทองแดง	121
	ภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ของปูนซีเมนต์	125
	ภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและการกระจายตัว ของโลหะหนักด้วยเครื่อง SEM/EDS	129
	ภาคผนวก ง. ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึกด้วย เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)	137

ภาคผนวก จ. ผลการวิเคราะห์พื้นระพื้นระของสารประกอบโลหะหนักด้วย เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)	158
ภาคผนวก ฉ. ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบโลหะหนักโดยวิธี Sequential Extraction	167
ภาคผนวก ช. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-05.	177
ภาคผนวก ซ. ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ต้า	180
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	183



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	9
2.2 สรุปสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	12
2.3 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	13
2.4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จร้อยละ 80	16
2.5 ตัวอย่างของเสียที่มักใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	22
2.6 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศเยอรมนี ปี ค.ศ.1999	23
2.7 สัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศเยอรมัน ปี ค.ศ.1999	23
2.8 องค์ประกอบภายในของของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมบางชนิดที่ใช้เป็น วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	27
2.9 ร้อยละการรวมตัวของโลหะบางชนิดในปูนเม็ด จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ	28
2.10 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	29
2.11 ผลกระทบของโลหะหนักในปูนซีเมนต์	30
2.12 การจัดรูปของ As^{+5} ในระบบซีเมนต์	31
2.13 การจัดรูปของ Ba^{+2} ในระบบซีเมนต์	32
2.14 การจัดรูปของ Cd^{+2} ในระบบซีเมนต์.....	33
2.15 การจัดรูปของ Co^{+2} และ Co^{+3} ในระบบซีเมนต์.....	33
2.16 การจัดรูปของ Cr^{+6} และ Cr^{+3} ในระบบซีเมนต์.....	34
2.17 การจัดรูปของ Cu^{+2} ในระบบซีเมนต์.....	35
2.18 การจัดรูปของ Ni^{+2} ในระบบซีเมนต์	36
2.19 การจัดรูปของ Pb^{+2} ในระบบซีเมนต์	37
2.20 การจัดรูปของ V^{+5} ในระบบซีเมนต์	38
2.21 การจัดรูปของ Zn^{+2} ในระบบซีเมนต์	39
2.22 ปริมาณตะกั่วทองแดงที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลก	41
2.23 ลักษณะทางกายภาพและเชิงกลของตะกั่วทองแดง	43
2.24 องค์ประกอบของตะกั่วทองแดงที่ได้จากเตาถลุง	43
3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกั่วทองแดง.....	57

3.2	การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดและการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีในปูนซีเมนต์	59
3.3	การศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์.....	63
3.4	การหล่อก้อนมอร์ต้า การทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ต้า	65
4.1	ผลการศึกษารายองค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วทองแดงด้วยเครื่อง XRF.....	68
4.2	ผลความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกั่วทองแดงตามวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052.....	70
4.3	ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในตะกั่วทองแดงเทียบกับค่ามาตรฐานของปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้.....	71
4.4	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	72
4.5	ผลการศึกษารายองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง XRF.....	75
4.6	สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 วัน และ 28 วัน.....	88
4.7	สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 วันและ 28 วัน (ต่อ).....	89
4.8	สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 วัน และ 28 วัน (ต่อ).....	90
4.9	สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 วัน และ 28 วัน (ต่อ).....	91
4.10	ค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าตามมาตรฐานของ มอก.15-2514	104
4.11	ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในก้อนมอร์ต้าเทียบกับค่ามาตรฐานของปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้.....	107
ก.1	ผลการกระจายขนาดอนุภาคของตะกั่วทองแดงด้วยวิธีผ่านชุดตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ขนาดเบอร์ต่างๆ.....	122
ก.2	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกั่วทองแดง	123
ก.3	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกั่วทองแดงตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548	124
ก.4	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกั่วทองแดงตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311	124
ข.1	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนการเผาพร้อม	

	ตะกอนทองแดงร้อยละต่างๆ	126
ข.2	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนการเผาพร้อม ตะกอนทองแดงร้อยละต่างๆ (ต่อ)	127
ข.3	พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C204-05	128
ข.4	ความถ่วงจำเพาะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188-95 และค่าสูญเสีย น้ำหนักของวัสดุ (LOI) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C114-05	128
จ.1	พันธะของสารประกอบที่เลขคลื่นต่างๆ	160
ฉ.1	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C0	168
ฉ.2	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C18	169
ฉ.3	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C20	170
ฉ.4	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C22	171
ฉ.5	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C24	172
ฉ.6	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C26	173
ฉ.7	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C28	174
ฉ.8	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C30	175
ฉ.9	ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบ ของตัวอย่าง C32	176
ช.1	ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่ 3 และ 7 วัน	178
ช.2	ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่ 14 และ 28 วัน	179
ช.1	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ ในก้อนมอร์ตาร์ตามประกาศ กระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548	181
ช.2	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ ในก้อนมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ของ US EPA SW-846 Method 1311	182

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	7
2.2	10
2.3	11
2.4	15
2.5	17
2.6	25
2.7	26
2.8	44
2.9	46
3.1	54
3.2	56
3.3	62
3.4	64
4.1	66
4.2	67
4.3	70
4.4	74
4.5	77
4.6	77
4.7	78
4.8	78
4.9	79

4.10	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า.....	79
4.11	ผลึกของเอททริงไท์ จากการศึกษาด้วย SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่ กำลังขยาย 7000 เท่า	80
4.12	ผลการศึกษา EDS ผลึกของเอททริงไท์ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่ กำลังขยาย 7000 เท่า	80
4.13	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 7 วัน ที่กำลังขยาย 3500 เท่า	81
4.14	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 14 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า	81
4.15	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า	82
4.16	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า	82
4.17	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า	83
4.18	ผล XRD แสดงสารประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ตัวอย่าง C0 ที่อายุบ่มต่างๆ	86
4.19	ผล XRD แสดงสารประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่มต่างๆ	87
4.20	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C0 C18 และ C32 ด้วยเครื่อง FT-IR.....	92
4.21	รูปแบบสารประกอบของ C_3S C_2S C_3A และ C_4AF จากการศึกษาด้วยเครื่อง FT-IR..	93
4.22	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR	93
4.23	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน เทียบกับมาตรฐานพันธะของสาร $Ca(OH)_2$ และ $Zn(OH)_2$ ด้วยเครื่อง FT-IR	95
4.24	ผลการวิเคราะห์พันธะของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน เทียบกับ มาตรฐานพันธะของคาร์บอนเนต (A) และมาตรฐานพันธะของซัลเฟต (B) ด้วยเครื่อง FT-IR	96
4.25	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก ของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุบ่ม 3 วัน.....	98
4.26	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก ของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	99
4.27	ความเข้มข้นของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก ของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุบ่ม 14 วัน.....	99
4.28	ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก ของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	100

4.29	ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบของทองแดง (รูปบน) และสังกะสี (รูปล่าง) โดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C0 ถึง C32 ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน.....	103
4.30	กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน.....	104
4.31	กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน	105
ก.1	รูปแบบของสารประกอบหลักของตะกั่วทองแดงที่วัดด้วยเครื่อง XRD	122
ค.1	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C18 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 7000 เท่า.....	130
ค.2	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C18 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 7000 เท่า	130
ค.3	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C20 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า.....	131
ค.4	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C20 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า	131
ค.5	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C22 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า.....	132
ค.6	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C22 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า	132
ค.7	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C24 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า.....	133
ค.8	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C24 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า	133
ค.9	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C26 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า.....	134
ค.10	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C26 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า	134
ค.11	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C28 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า.....	135
ค.12	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C28 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า	135
ค.13	ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C30 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า.....	136
ค.14	ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C30 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า	136
ง.1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C0 อายุบ่ม 3 วัน	138
ง.2	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C0 อายุบ่ม 7 วัน	138
ง.3	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C0 อายุบ่ม 14 วัน	139
ง.4	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C0 อายุบ่ม 28 วัน	139
ง.5	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C18 อายุบ่ม 3 วัน	140

ง.36	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 7 วัน	155
ง.37	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 14 วัน	156
ง.38	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 14 วัน	156
ง.39	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 28 วัน	157
ง.40	ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 28 วัน	157
จ.1	ผลการวิเคราะห์พันธะของสาร $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Zn}(\text{OH})_2$ และ CaCO_3 , Cu_2CO_3 และ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, MgSO_4 ด้วยเครื่อง FT-IR	159
จ.2	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C0 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	161
จ.3	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C18 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	161
จ.4	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C20 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	162
จ.5	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C22 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	162
จ.6	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C24 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	163
จ.7	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C26 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	163
จ.8	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C28 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	164
จ.9	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C30 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	164
จ.10	ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เฟสค์ C32 อายุบ่ม 3 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	165

๑.11 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 7 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	165
๑.12 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 14 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	166
๑.13 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR.....	166



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศต่างๆ ได้มุ่งพัฒนาประเทศให้เป็นประเทศอุตสาหกรรม ปัญหาที่เกิดขึ้นตามมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรม คือ ปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งเกิดจากการเพิ่มขึ้นของกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและการขาดระบบการกำจัดกากของเสียที่มีประสิทธิภาพ และในที่สุดก็จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นกากของเสียเหล่านี้จึงจำเป็นต้องมีแนวทางการจัดการที่ดีและถูกต้องเหมาะสมตามหลักวิชาการ

กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่นั้นมักมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในปริมาณที่สูง ซึ่งสามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษได้จากการชะละลายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม โดยปกติในการจัดการกากของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นนั้น ผู้ก่อให้เกิดหรือทางผู้ผลิตกากของเสียจะนำไปฝังยังหลุมฝังกลบนิรภัยเฉพาะสำหรับฝังของเสียอันตราย (Secure Landfill) แต่เนื่องจากข้อจำกัดเกี่ยวกับเนื้อที่ของหลุมฝังกลบที่มีอยู่อย่างจำกัดและยังมีการเพิ่มกฎหมายเข้มงวดเกี่ยวกับการจัดการกากของเสีย ประกอบกับการเพิ่มขึ้นของราคาที่ดินสำหรับฝังกากของเสีย เป็นผลทำให้ค่าใช้จ่ายในการกำจัดกากของเสียสูงขึ้นด้วย

ในการควบคุมสิ่งแวดล้อมเกี่ยวกับการจัดการกับกากของเสีย จึงมีแนวโน้มที่จะมุ่งใช้ประโยชน์ของวัสดุผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนต่างๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของกากโรงงานอุตสาหกรรมและยังเป็นการสงวนทรัพยากรธรรมชาติซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด ทางเลือกหนึ่งในการที่จะลดปริมาณกากของเสียอันตรายที่จะนำมาฝังกลบและการนำพลังงานจากกากของเสียเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่คือวิธีการกำจัดกากของเสียอันตรายโดยการเผา แต่การเผาจะต้องมีการสร้างเตาที่ได้มาตรฐาน มีความร้อนที่สูงมาก เพื่อจะทำให้กากของเสียอันตรายที่เป็นสารประกอบกลายเป็นธาตุที่ไม่มีพิษ ซึ่งการสร้างเตาที่มีคุณภาพในการกำจัดกากของเสียอันตรายได้ดีนั้น จะต้องลงทุนในการก่อสร้างที่สูงมาก อย่างไรก็ตามการเผายังไม่ใช่กระบวนการบำบัดกากของเสียขั้นตอนสุดท้าย นอกจากทำให้เกิดกากของเสียชนิดใหม่ที่มีโลหะหนักความเข้มข้นสูงเกิดขึ้นแล้ว ยังต้องนำไปกำจัดขั้นสุดท้ายต่อไป เช่น การทำให้เป็นของแข็ง (Solidification) และการทำให้เสถียร (Stabilization)

ทางเลือกที่ดีอีกวิธีหนึ่งก็คือการนำกากของเสียอันตรายไปเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ด้วยอุณหภูมิที่สูงเป็นพิเศษของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ประกอบกับช่วงระยะเวลาที่ค่อนข้างนานที่วัตถุดิบจะต้องอยู่ในเตาเผา สภาวะเช่นนี้ถือเป็นสภาวะที่เหมาะสมอย่างยิ่งต่อการเผาทำลายกากของเสียอุตสาหกรรม โดยเตาตะกอนที่เกิดจากการเผาทำลายกากของเสียดังกล่าวจะถูกผสมเข้าเป็นส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์ปูนเม็ด ซึ่งในการเผาร่วมนี้คาดว่าจะทำลายองค์ประกอบของสารอินทรีย์โดยสมบูรณ์ ในขณะที่ส่วนประกอบที่เป็นโลหะหนักไม่ติดไฟซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ได้นั้น อาจจะมีผสมอยู่ในบางส่วนของทั้งผงฝุ่นซีเมนต์ (Cement Kiln Dust หรือ CKD) หรือรวมอยู่ในเม็ดปูน (Cement Clinker) หรือแม้กระทั่งอยู่ในผลิตภัณฑ์สุดท้ายของซีเมนต์ (Trezza และ Scian, 2000)

ในการนำกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นวัสดุเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทน วัตถุประสงค์ของวิธีการเผาร่วมนี้เป็นการรักษาสิ่งแวดล้อม การอนุรักษ์ทรัพยากรและหลักการทางด้านเศรษฐศาสตร์อุตสาหกรรม กล่าวคือทำให้เกิดการแก้ปัญหาทั้งการนำกากของเสียและช่วยลดการหมักไปของทรัพยากรธรรมชาติในเวลาเดียวกัน นอกจากนี้เป็นการจัดการกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ดีแล้วยังได้รับผลตอบแทนของรายได้ที่ได้จากการลดปริมาณการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลักด้วย

ในประเทศต่าง ๆ มีการใช้กากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์กันอย่างแพร่หลาย โดยกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทมีปริมาณของ ซิลิกา แคลเซียม และอลูมินาสูง ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของซีเมนต์ ดังนั้นการนำกากของเสียเหล่านี้มาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จึงได้มีการศึกษาและตรวจสอบกันอย่างกว้างขวาง

ปัจจุบันพบว่าตะกรันทองแดง (Copper Slag) ซึ่งเกิดจากกระบวนการถลุงแร่ทองแดงและถูกพิจารณาว่าเป็นของเสีย แต่สามารถเคลื่อนย้ายเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์หรือใช้ใหม่ได้ตามอนุสัญญาบาเซล ว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายข้ามแดนของของเสียอันตรายและการกำจัด (Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal) เพื่อกำหนดข้อตกลงระหว่างประเทศในการควบคุมการนำเข้า การส่งออก การนำผ่าน พร้อมทั้งการจัดการของเสียอันตรายให้มีความปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอีกทั้งเป็นการป้องกันการขนส่งที่ผิดกฎหมาย ซึ่งประเทศไทยให้สัตยาบันเป็นภาคีสมาชิกเรียบร้อยแล้ว

โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของตะกรันทองแดงประกอบไปด้วย ซิลิกา เหล็ก ในการผลิตให้ได้โลหะทองแดงใน 1 ตัน จะก่อให้เกิดตะกรันทองแดงประมาณ 2.2 ตัน และในแต่ละปีจะมีปริมาณของตะกรันเกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทองแดงทั่วโลกประมาณ 24.6 ล้านตัน และในการจัดการกับตะกรันทองแดงมีหลายวิธี เช่น สกัดโลหะมาใช้ การเพิ่มมูลค่าของตะกรันโดยนำกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตสินค้าอื่นๆ และนำไปทิ้งหลุมขยะ โดยการกำจัดตะกรันทองแดงด้วยการทิ้งตะกรันหรือนำไปฝัง นอกจากจะเป็นการสูญเสียมูลค่าขององค์ประกอบที่สำคัญในตะกรันไปโดยเปล่าประโยชน์แล้วอาจก่อให้เกิดปัญหาการชะละลายของโลหะหนักต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นในการประยุกต์การใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดง เช่น การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และ/หรือ การใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลประโยชน์ที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดควบคู่ไปกับการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์

ปัจจุบันบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) นับว่าเป็นแหล่งกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมที่สำคัญและมีบทบาทในการจัดการกากของเสียทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งปริมาณตะกรันทองแดงที่ทางบริษัทรับมากำจัดมีปริมาณสูง โดยรับจากบริษัท ซุมิโตโม (Sumitomo) ประเทศญี่ปุ่น ประมาณ 120,000 ตันต่อปี องค์ประกอบที่มีอยู่ในตะกรันทองแดงมีศักยภาพที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสียแล้ว ยังสามารถใช้ประโยชน์จากการกำจัดกากของเสียในเวลาเดียวกัน แต่ในตะกรันทองแดงยังมีโลหะหนักอื่นๆ ร่วมอยู่ด้วย และอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ได้จากการเผาไหม้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปูนซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและโลหะหนักอาจส่งผลกระทบจากการใช้ประโยชน์ของปูนซีเมนต์ได้

ในการวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่จะทำให้เกิดความรู้และความเข้าใจในการใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงมาเผาไหม้ในกระบวนการผลิตจริงของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยศึกษาถึงการแปรผันอัตราส่วนของตะกรันทองแดงในวัตถุดิบทั้งหมด (Raw Mix) โดยคำนึงถึงปริมาณโลหะหนักที่มีในปูนซีเมนต์ และหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ใช้ปูนซีเมนต์ที่เกิดจากการเผาไหม้กับตะกรันทองแดงที่อัตราส่วนต่างๆ รวมทั้งการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักของก้อนมอร์ต้าตามมาตรฐานทั้งกฎหมายของประเทศไทยและประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการจัดการความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อมที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมภายใต้สภาวะในการศึกษาของการนำตะกรันทองแดงมาใช้เป็นวัตถุบดแทนเฝ้าร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์
2. ศึกษาผลของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่ได้จากการแปรผันอัตราส่วนของตะกรันทองแดงในกระบวนการเฝ้าร่วม หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน
3. ศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่ได้จากการแปรผันอัตราส่วนของตะกรันทองแดงในกระบวนการเฝ้าร่วม
4. ศึกษาผลของการชะละลายของโลหะหนักของก้อนมอร์ตาร์ที่ได้จากการแปรผันอัตราส่วนของตะกรันทองแดงในกระบวนการเฝ้าร่วม

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากการแปรผันอัตราส่วนของตะกรันทองแดงเป็นวัตถุบดแทนในการเฝ้าร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีขอบเขตดังนี้

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ได้จากกระบวนการผลิตจริงของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี ซึ่งทางบริษัทได้มีการนำตะกรันทองแดงจากบริษัท ซุมิโตโม (Sumitomo) ประเทศญี่ปุ่น
2. ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างปูนซีเมนต์ คือ เดือนกันยายน พ.ศ. 2548 จำนวน 20 ตัวอย่าง เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2548 จำนวน 1 ตัวอย่าง และเดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 จำนวน 1 ตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 22 กะ โดยการแปรผันอัตราส่วนของตะกรันทองแดงในวัตถุบดหลักทั้งหมด จำนวน 9 อัตราส่วน คือร้อยละ 0 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 และ 3.2 ตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ ± 0.1
3. ในการเฝ้าร่วมมีการควบคุมประเภทเชื้อเพลิงที่ใช้ให้มีลักษณะเหมือนกันตลอดการวิจัย
4. การเลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์ในการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดหลักเกณฑ์ในการเลือกตัวอย่าง คือ พิจารณาตัวอย่างที่มีโลหะหนักในปริมาณสูงเกินเกณฑ์การผลิตปูนซีเมนต์ (SQ-A-012) และ/หรือเป็นโลหะหนักที่มีปริมาณสูงสุดในแต่ละอัตราส่วน
5. การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการวิจัย ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 นำมาการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน
6. การหล่อก้อนมอร์ตาร์ ทำการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-05

7. ทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ต้า โดยใช้วิธีการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311 โดยเลือกอายุบ่มที่ 28 วัน

8. การวิจัยในขั้นตอนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง ทดสอบร่วมกับนางสาวปวันรัตน์ สัมมะสุต หัวข้อวิทยานิพนธ์เรื่อง ลักษณะเฉพาะเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดที่เกิดจากกระบวนการเผาพร้อมกับตะกรันทองแดง (Quantitative and Qualitative Characteristics of Heavy Metals in Cement Clinker from Co-incineration Process using Copper Slag)

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงศักยภาพในการนำตะกรันทองแดงเป็นวัตถุดิบทดแทนในการเผาไหม้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์
2. ทราบพฤติกรรมของโลหะหนักในซีเมนต์เฟส
3. ทราบอิทธิพลของโลหะหนักที่มีต่อความแข็งแรงของก้อนมอร์ต้า
4. ทราบแนวโน้มการชะละลายของโลหะหนักจากก้อนมอร์ต้า ที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ปูนซีเมนต์ที่เกิดจากการนำตะกรันทองแดงมาใช้ในกระบวนการเผาไหม้
5. ข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนี้ สามารถนำมาปรับใช้ให้เข้ากับสภาวะการเผาไหม้ของกากของเสียอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ (หินปูนหรือดินปูนขาวกับดินเหนียวหรือหินดาน) จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวนี้จะหมายถึงปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะเริ่มแข็งตัว

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำ จะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสร้างสำหรับงานก่ออิฐหรือหิน หรือปูนฉาบสำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับ หิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะแข็งและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก ตอม่อ เขื่อน กำแพงกันดิน พื้นและถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับพื้น หลังคา สะพาน อาคารและอื่นๆ

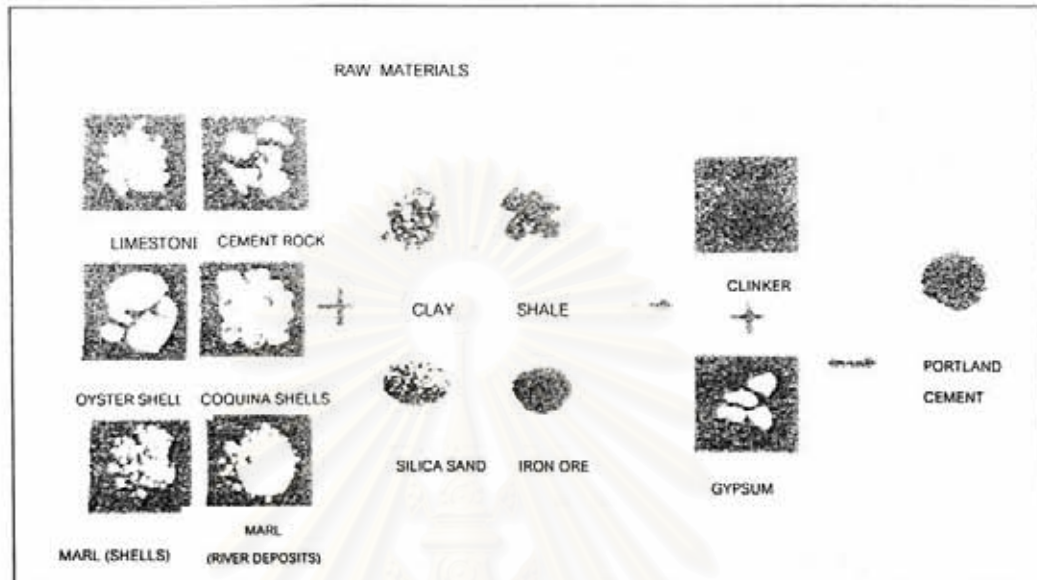
2.1.2 กรรมวิธีผลิตปูนซีเมนต์

2.1.2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

1. ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous Materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ CaCO_3 ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอล์ก (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)
2. ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous Materials) ได้แก่ ดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate) แต่ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทข้างต้นอาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการน้อยไป หรือมีปริมาณของธาตุอื่นเพิ่มเติมมากเกินไป จึงจำเป็นต้องทำการปรับส่วนผสม

ให้พอเหมาะเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ เช่น เพิ่มปริมาณแร่เหล็กซึ่งมีอยู่มากในศิลาแลง เมื่อหินเซลดหรือดินเหนียวที่จะใช้มีปริมาณของเหล็กต่ำ หรือเติมยิปซัม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผลรวมกับปูนเม็ดจากเตาเผา เป็นต้น วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ (วินิต ช่อวิเชียร, 2539)

2.1.2.2 กรรมวิธีผลิต

กรรมวิธีในการผลิตอาจเป็นการผลิตแบบแห้ง (Dry Process) หรือการผลิตแบบเปียก (Wet Process) ในกระบวนการแห้ง วัตถุดิบซึ่งได้แก่ หินปูน ดินดาน แร่เหล็ก ได้รับการทำให้แห้งก่อนการบดและการผสม ส่วนในกระบวนการเปียก วัตถุดิบซึ่งได้แก่ ดินสอพอง ดินเหนียว ได้รับการบดและการผสมเปียก การเลือกกระบวนการผลิตจะต้องคำนึงถึงปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะจ่ายให้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผาถ้าวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นหินซีเมนต์และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติหรือมีความชื้นอยู่น้อยก็อาจทำให้แห้งก่อนโดยใช้ความร้อนที่ออกจากเตาเผา แล้วจึงนำไปบดและผสมกัน ในด้านการควบคุมส่วนประกอบของวัตถุดิบทางเคมี กระบวนการทั้งสองจะไม่แตกต่างกันนัก กระบวนการผลิตแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะกว่า แต่ในการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ กระบวนการผลิตแบบแห้งสามารถควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก

เมื่อนำวัตถุดิบมาบดละเอียดและผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วนที่พอเหมาะแล้ว ส่วนผสมนี้ จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของเตาเผา (Kiln) เตาเผาเปรียบเสมือนหัวใจของโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ เป็นเครื่องจักรที่ใหญ่และแพงที่สุด ทำงานตลอด 24 ชั่วโมงโดยไม่มีการหยุดพัก เตาเผาส่วนใหญ่ ในปัจจุบันนี้ใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้ามีลักษณะรูปทรงกระบอกยาว ประมาณ 50 ถึง 150 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 4 เมตร ภายในบุด้วยอิฐทนไฟเพื่อเก็บความร้อนไว้ภายใน หมุนรอบตัวในแนวเฉียงอย่างช้าๆ ประมาณนาทิละ 1.3 รอบ อุณหภูมิที่ใช้เผาประมาณ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ผสมรวมกันและถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ถูกส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา

ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งจะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียงแคลเซียมออกไซด์ (CaO)

ขั้นตอนที่ 3. เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์ จากหินปูน และดินสอพอง ซิลิกา อลูมินาและเหล็กออกไซด์ จากดินคำหรือดินเหนียวและดินดาน

ขั้นตอนที่ 4. เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์

2. ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO Na_2O TiO_2 P_2O_5 และยิปซัม (ซีซาล แครชรูบตร. 2543) ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.1

สีและรูปร่างของปูนเม็ดจะบ่งถึงการเผา ถ้าเผาได้ที่ตีปูนเม็ดจะมีสีดำปนเขียวเหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวจะแวววาวเป็นจุดๆ ก้อนใหญ่ ส่วนมากจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) ปูนเม็ดที่ยังเผาไม่ไต่จะมีสีน้ำตาล หรือสีน้ำตาลปนหม่นๆ ไม่เป็นมันเหมือนที่เผาได้ที่แล้ว ปูนเม็ดที่เผาเกินพอจะมีสีน้ำตาลเข้มเป็นหม่นๆ การเผาเกินพอไม่เป็นการเสียหายแต่อย่างใด เพียงแต่สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดปูนเม็ดทั้งนี้เพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอมีความแข็งมาก

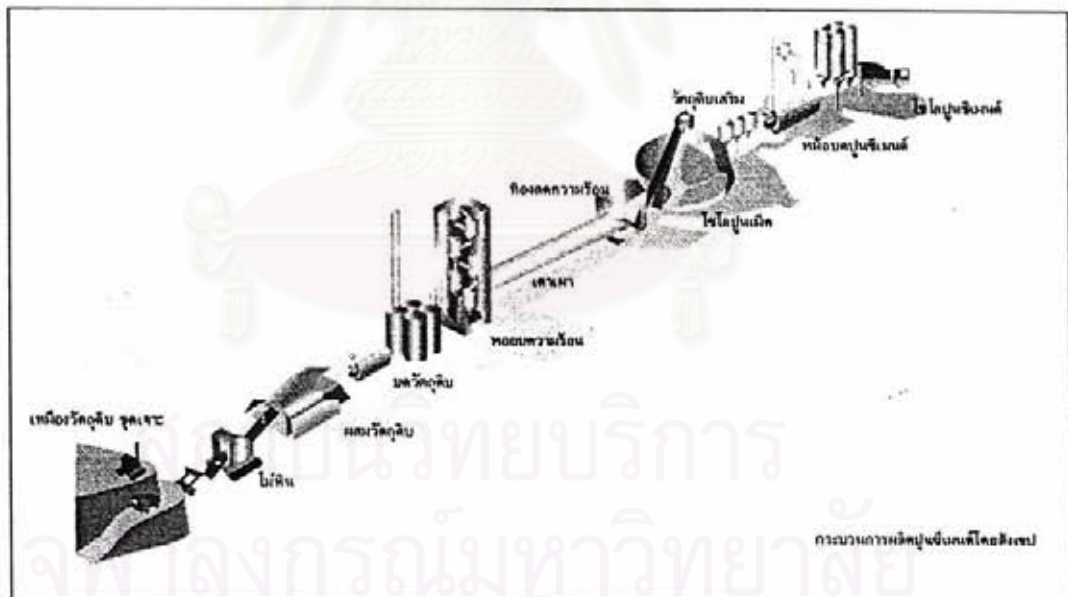
ตารางที่ 2.1 ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ซีซวาลย์ เศรษฐบุต, 2543)

ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60 – 67
SiO ₂	17 – 25
Al ₂ O ₃	3 – 8
Fe ₂ O ₃	0.5 – 6.0
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1 – 5.5
Na ₂ O + K ₂ O	0.5 – 1.3
TiO ₂	0.1 – 0.4
P ₂ O ₅	0.1 – 0.2
SO ₃	1 – 3

หลังจากการลดอุณหภูมิของปูนเม็ดให้เหมาะสมก่อนนำไปบด การลดอุณหภูมิกระทำโดยพ่นลมหรือน้ำเข้าไปในถังลดความเย็น (Clinker Cooler) การทำให้ปูนเม็ดเย็นลงต้องมีการควบคุมอย่างดีเพราะมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ปูนเม็ดที่เย็นตัวแล้วจะถูกนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Grinding Mill) หากปูนเม็ดมีปริมาณของยิปซัมผสมอยู่น้อย ก็ต้องใส่ยิปซัมเพิ่มเข้าไปด้วย โดยให้มีปริมาณของยิปซัมผสมรวมอยู่ประมาณร้อยละ 5 ปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วส่วนมากจะผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 200 ได้เกือบหมด การผสมยิปซัมลงไปด้วยเพื่อทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติในก่อดัวช้าลงเมื่อผสมกับน้ำ เพราะว่าถ้าไม่มียิปซัมเมื่อปูนซีเมนต์ได้ผสมกับน้ำจะก่อดัวเร็วเกินไป จนไม่มีเวลานานพอที่จะเอาไปเทลงแบบได้ ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากกว่าจะทำปฏิกิริยากับน้ำ การก่อดัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้เร็วกว่า ปูนซีเมนต์ที่หยาบอาจทำให้เกิดการเย็นหรือการคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียดได้ ส่วนผงปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้นี้จะถูกบ่มโดยลมนำไปเก็บไว้ในถังเก็บปูนซีเมนต์ (Bulk Storage) ซึ่งเป็นถังทรงกระบอกใหญ่ตั้ง มีผนังปกคลุมมิดชิดกันความชื้นเพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ซีเมนต์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ คือ ผุ่นปูน (Cement Kiln Dust หรือ CKD) ซึ่งเป็นอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมก๊าซขณะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งถูกดักจับโดยอุปกรณ์ดักฝุ่น

2.1.2.3 กรรมวิธีผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี เตาเผามี 6 เตาในโรงงานมีกำลังการผลิตปูนเม็ดรวม 38,500 ตันต่อวัน กระบวนการผลิตนั้นเริ่มต้นจากการระเบิดหินปูน (Limestone) และหินเชล (Shale) จากเหมืองหินในเขตพื้นที่สัมปทาน ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้จะถูกนำมาเข้าเครื่องย่อยขนาดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1 กำปั้นหรือต่ำกว่า 80 มิลลิเมตร ในการผลิตปูนเม็ด 1 ตัน ต้องใช้หินปูนประมาณ 1.6 ตัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ของวัตถุดิบ หลังจากผ่านขั้นตอนของการย่อยขนาดหินที่ได้จะถูกนำมาผสมรวมกับวัตถุดิบพื้นฐานอื่นๆ เช่น แร่เหล็ก (Iron Ore) โดยจะถูกนำมาบดผสมรวมกันจนละเอียดเป็นผงฝุ่นในหม้อบดขนาดใหญ่ (Grinding Mill) จากนั้นทั้งหมดก็จะถูกผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันในไซโลผสมฝุ่นวัตถุดิบ (Homogenizing Silo) ก่อนจะถูกส่งเข้าไปยังหออบความร้อน (Preheater Tower) และไหลเข้าสู่เตาเผา หลังจากผ่านขั้นตอนของเตาเผาแล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าปูนเม็ด ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังห้องลดความร้อนและลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโล สำหรับในกระบวนการขั้นสุดท้ายนั้น ปูนเม็ดจะถูกนำไปบดรวมกับยิปซัมและหินปูนในหม้อบดปูนซีเมนต์ เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ผงตามที่ต้องการ จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บยังไซโลเพื่อรอการบรรจุและส่งไปจำหน่ายต่อไป ดังรูปที่ 2.2 แสดงรูปจำลองกระบวนการผลิตซีเมนต์ของบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)



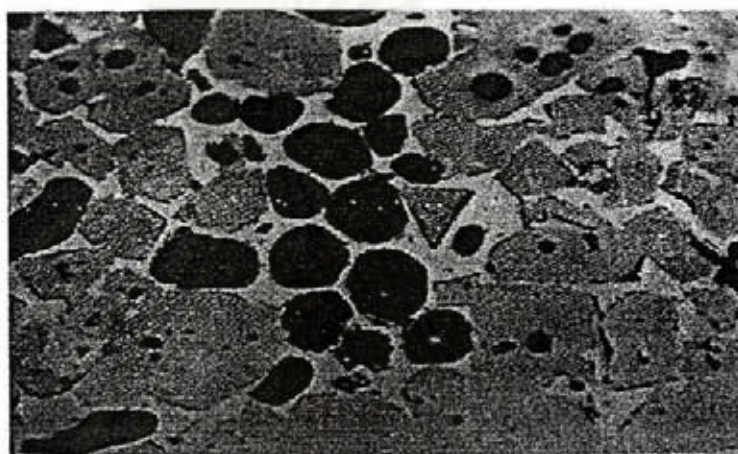
รูปที่ 2.2 รูปจำลองกระบวนการผลิตซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

2.1.3 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.3.1 สารประกอบหลัก

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสี่เทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 ถึง 3 ชั่วโมง และจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก ในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังรับแรงอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิปซัม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35 ถึง 55



รูปที่ 2.3 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม และ C_2S เป็นเม็ดกลมสีดำ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

2. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง βC_2S เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป βC_2S มีคุณสมบัติเฉพาะยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังรับแรงอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณของ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สี่เทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงระหว่างการบดซีเมนต์ ส่วนกำลังรับแรงอัดของ C_3A จะ

พัฒนาขึ้นภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังรับแรงอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณร้อยละ 7 ถึง 15

4. เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมากและก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังรับแรงอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณร้อยละ 5 ถึง 10

สรุปสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐรูปุตร, 2543)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	33-55
ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	15-35
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	7-15
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	5-10

จะเห็นได้ว่า ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบหลักคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ดังนั้นในการศึกษาโดย X-Ray Diffraction Spectrometry จะสนใจที่จะศึกษาสารประกอบทั้งสองชนิดนี้ รวมทั้งสารเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ CSH) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำ เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม (กฤษณ์ จารุทะวาย, 2545) และคุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.3

2.1.2.2 สารประกอบรอง

1. ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$)

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เฟสเกิดกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอัลคาไลออกไซด์ ได้แก่ Na_2O และ K_2O ปริมาณ C_3A และความละเอียดของปูน

ตารางที่ 2.3 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (ซีซวาลย์ เศรษฐบุต, 2543)

คุณสมบัติ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังรับแรงอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังรับแรงอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากไฮเดรชัน (จุลต่อกรัม)	ปานกลาง	น้อย	สูงมาก	ปานกลาง
5. คุณสมบัติอื่น ๆ	500 คุณสมบัติเหมือนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	-	ไม่คงตัวในน้ำ และถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	420 ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

2. ปูนขาวอิสระ (Free Lime หรือ CaO)

ปูนขาวอิสระ เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1. เมื่อวัตถุดิบมีปูนขาวมากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด

2. ปริมาณปูนขาวมีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์ โดยปูนขาวอิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ยูนิทแข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจากปูนขาว

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้แมกนีเซียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับแคลเซียมออกไซด์ คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของ แมกนีเซียมออกไซด์ในปูนซีเมนต์และขนาดของแมกนีเซียมออกไซด์ ถ้าขนาดเล็กมากๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

4. อัลคาไลต์ออกไซด์ (Na_2O และ K_2O)

อัลคาไลต์ออกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภท ที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลต์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายต่อการแก้ไข กรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมทำปฏิกิริยากับอัลคาไลต์ ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต์ต่ำ

2.1.3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากน้ำไปทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

1. อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนต่างๆ ในสารละลาย และไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

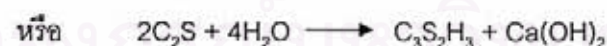
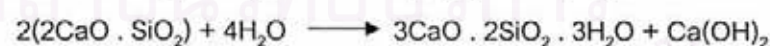
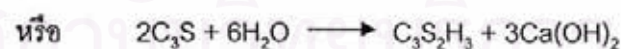
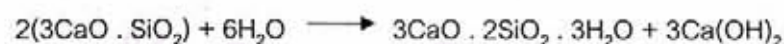
2. การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง (Solid State Reaction) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

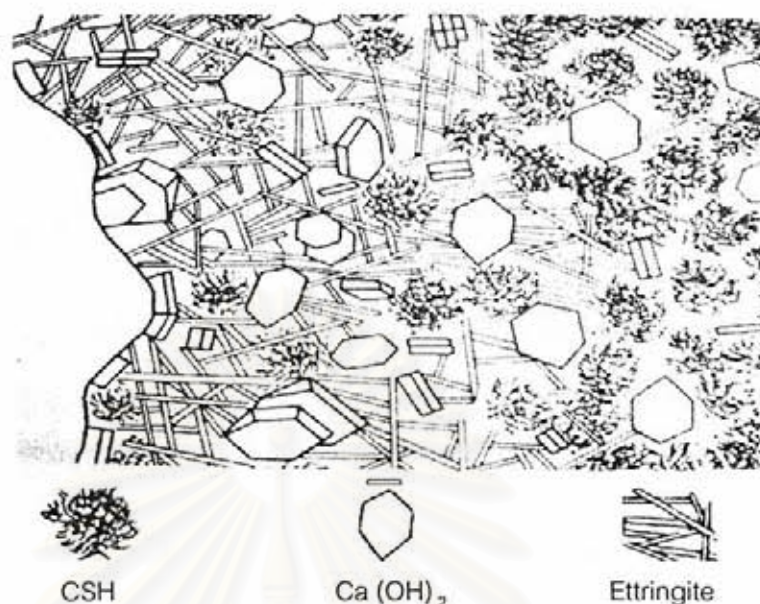
2.1.3.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้



จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจล (Gel) ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตนี้ ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้น

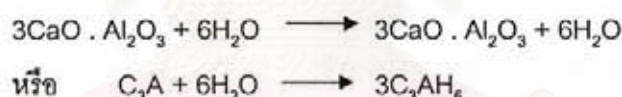
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมีพีเอชประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี



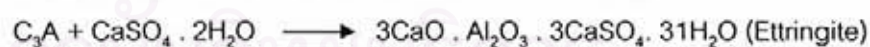
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

2.1.3.2 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดขึ้นที่ทันที และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ



เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้น้อยอย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับ C_3A เกิดชั้นของเอทริงไกท์ (Ettringite หรือ AF₁) บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการ

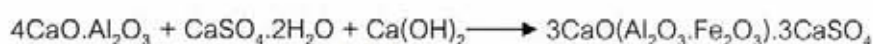


ชั้นของเอทริงไกท์ ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้เกิดการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับการปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของเอทริงไกท์ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือเมื่อเกิดเอทริงไกท์จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้เกิดชั้นของเอทริงไกท์แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิดเอทริงไกท์ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งไอออนของซัลเฟต (Sulphate

ions) มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดเอทริงไกท์ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยนเอทริงไกท์ไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate หรือ AF_m)

2.1.3.3 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้น โดย C_4AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและแคลเซียมไดออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลโฟลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟเฟอร์ไรท์ (Sulphoferrite) ดังสมการ



เวลาที่ใช้เพื่อให้บรรลุร้อยละ 80 ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักทั้ง 4 แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จร้อยละ 80 (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	6
C_4AF	50

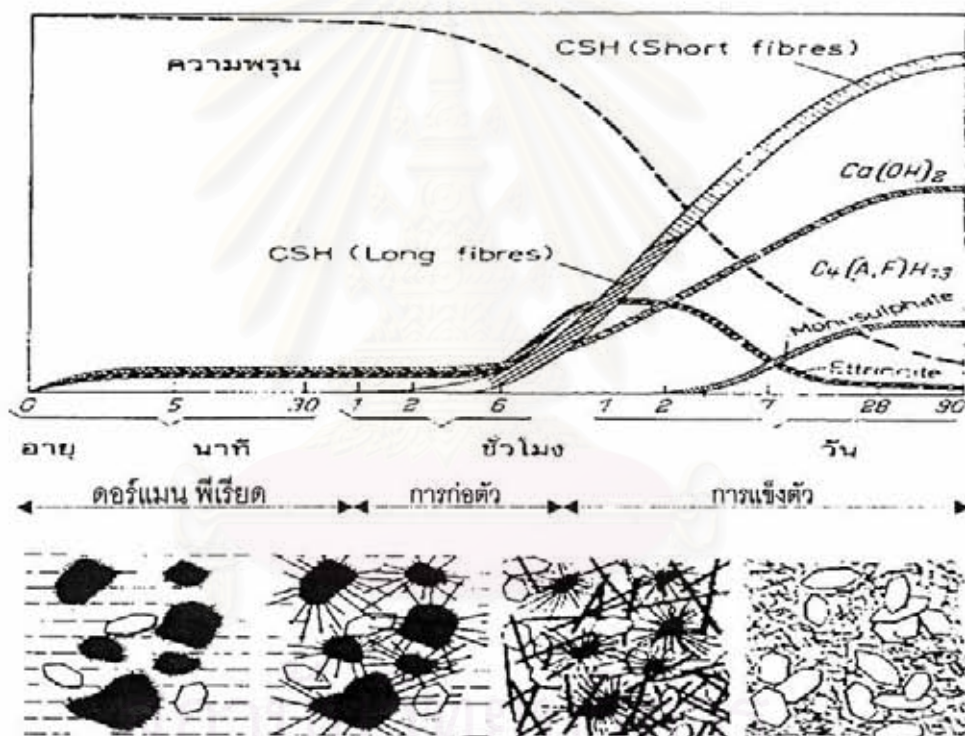
2.1.4 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟส

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิดเจลของ CSH (CSH gel) และเอทริงไกท์เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิดคอร์แมนพีเรียด อันเป็นเวลาที่ยาวนานจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1 ถึง 2 ชั่วโมง ในขณะที่ซีเมนต์เฟสตัวยังเหลวและมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาคอร์แมนพีเรียด ก็จะเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้นและเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เฟส เวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมาก ก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัสจำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ส่งผลให้ซีเมนต์เฟสกลายเป็นของแข็ง นั่นคือ การเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)

แผนภาพแสดงขบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและโครงสร้างของเฟสต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยซีเมนต์จะแสดงด้วยเม็ดสีดำ ในขณะที่แคลเซียมไดออกไซด์จะแสดงด้วยรูปเหลี่ยมผืนผ้าของเอทริงไกท์ แสดงโดยเส้นบาง ๆ สั้น ๆ และ CSH เส้นเข็มมีความยาวพอสมควร จากรูปที่ 2.5 จะพบว่าระหว่างดอร์แมนพีเรียด เม็ดซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก่อให้เกิดแคลเซียมไดออกไซด์และเอทริงไกท์เป็นส่วนใหญ่ หลังจาก 1 ชั่วโมง เจลของ CSH เริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและขยายตัวของเจลของ CSH นี้ก่อให้เกิดการก่อตัว ในขณะที่ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของเฟสต์จะลดลงและกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น

หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้วไฮดรอกซิลเฟตถูกใช้หมดไป อลูมิเนียมและเหล็กไดออกไซด์เริ่มก่อตัวและเอทริงไกท์ถูกเปลี่ยนไปเป็นโมโนซัลเฟต ส่วน C_3S และ C_2S เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยนั้น ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้ จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของเฟสต์ลดลงในระยะยาว



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการเกิดปฏิกิริยาและการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟสต์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะหยุดเมื่อน้ำระเหยหนีออกจากเฟสต์หมดแล้ว ดังนั้นการบ่มซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการสูญเสียน้ำในคอนกรีตจึงนับว่าเป็นสิ่งสำคัญ โดยระยะเวลาในการบ่ม 28 วัน การพัฒนากำลังของคอนกรีตมีโอกาสเพิ่มขึ้นเกือบร้อยละ 100

2.1.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการและคุณสมบัติของซีเมนต์ เฟสท์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสท์ที่แข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

1. อายุของเฟสท์ ยกเว้นคอร์แมนที่เร็ว อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
2. องค์ประกอบของซีเมนต์ จากตารางที่ 2.3 พบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน
3. ความละเอียดของซีเมนต์ ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับน้ำได้มาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา
4. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในช่วงต้น อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ถ้าส่วนผสมมีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ลดลง ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉลี่ยลดลง
5. อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเฟสท์
6. น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือเร่งการก่อตัวมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยลดลงและเพิ่มอัตราตามลำดับ

2.2 กากของเสียอุตสาหกรรม (Industrial waste)

2.2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของเหลือทิ้งจากการผลิตหรือสิ่งของที่ไม่สามารถใช้งานได้ หรือในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งกากของเสียดังกล่าวยังมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไปกากของเสียอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. กากของเสียอันตราย (Hazardous Waste) คือ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตรายที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (พ.ศ.2548) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ สารกัดกร่อน สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สารพิษ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามี

องค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่ง กิโลกรัมของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLIC) ที่กำหนดไว้ และสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

2. กากของเสียที่ไม่อันตราย (Non-Hazardous Waste) คือ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว ที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

2.2.2 การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม

การเพิ่มขึ้นของกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจึงมีความจำเป็นในการจัดการกับของเสียเหล่านั้นอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ในการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม สามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการบำบัดของเสีย เช่น การทำเสถียร/คงรูป การทำให้เป็นกลาง กระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งและการนำเอาของเสียมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Reutilization) เป็นวิธีการหนึ่ง ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเสียที่จะต้องนำไปกำจัด (Treatment) ได้ นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีแหล่งจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมหลายแห่งและสามารถส่งของเสียไปกำจัดได้ เช่น ศูนย์บริการกำจัดกาก ขวางแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร หลุมฝังกลบนิรภัยในจังหวัดราชบุรี ศูนย์บริการกำจัดกาก นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ. ระยอง บริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (General Environmental Conversation Co., Ltd.) หรือ GENCO เตาเผาเขตนิคมอุตสาหกรรมบางปู จังหวัดสมุทรปราการ

นอกจากนี้ยังเกิดการพัฒนาการจัดการของเสียอันตรายในระดับสากล โดยที่ประเทศไทยให้สัตยาบัน (Ratification) เป็นภาคีสมาชิกอนุสัญญาบาเซล เมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2540 และอนุสัญญาฯ มีผลบังคับใช้กับประเทศไทยตั้งแต่วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2541 มติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2540

อนุสัญญาบาเซล ว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายข้ามแดนของของเสียอันตรายและการกำจัด (Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal) เพื่อกำหนดข้อตกลงระหว่างประเทศในการควบคุมการนำเข้า การส่งออก การนำผ่าน พร้อมทั้งการจัดการของเสียอันตรายให้มีความปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอีกทั้งเป็นการป้องกันการขนส่งที่ผิดกฎหมาย ซึ่งสาระสำคัญของอนุสัญญาบาเซล ได้แบ่งบัญชีรายชื่อของเสียเป็น 2 กลุ่ม คือ

1. List A เป็นของเสียที่ควบคุมมีประมาณ 59 ชนิด ได้แก่

- ของเสียประเภทโลหะ 18 ชนิด เช่น สารหนู ตะกั่ว ปรอท แร่ใยหิน แคดเมียม
- ของเสียประเภทอินทรีย์สาร 6 ชนิด เช่น สารเร่งปฏิกิริยาฟลูออรีน
- ของเสียประเภทอินทรีย์สาร 19 ชนิด เช่น น้ำมันดิบ น้ำมันเตา
- ของเสียอื่น ๆ 16 ชนิด เช่น ของเสียจากโรงพยาบาล วัตถุระเบิด

2. List B เป็นของเสียไม่อันตราย เช่น เศษแก้ว ทองแดง กระดาษ ชิ้นส่วน อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งเป็นของเสียไม่อันตรายนั้นได้รับการยกเว้นให้มีการเคลื่อนย้ายเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์หรือใช้ใหม่ได้

อนุสัญญาบาเซลไม่ได้เป็นเพียงมาตรการด้านกฎหมายเท่านั้น แต่ยังเป็นเครื่องมือและกลไกที่ทำให้เกิดการพัฒนากิจการของเสียอันตรายของประเทศภาคสมาชิกให้อยู่ในระดับสากล และควบคุมการค้าขายกากของเสียอันตรายให้เป็นระบบมากขึ้น และช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมจากของเสียอันตรายอีกด้วย (สำนักสนธิสัญญาและยุทธศาสตร์, 2548)

2.3 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในสภาวะปัจจุบัน กระแสการตื่นตัวทางด้านสิ่งแวดล้อมของโลก ได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญในการกำหนดแนวทางในการพัฒนาประเทศกันอย่างกว้างขวาง ทำอย่างไรในการที่จะพัฒนาอุตสาหกรรมให้ควบคู่กับการดูแลรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ตามหลักการในการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน โครงการในการรักษาสภาพแวดล้อมจึงถูกนำเข้ามาใช้ในวงการอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์

การนำกากของเสียที่สามารถเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนได้มาเผาไหม้ร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมานานกว่า 20 ปีแล้ว (Achtembosch และคณะ, 2003) กากของเสียจากอุตสาหกรรมหลายชนิดที่มีความสามารถในการเผาไหม้ได้ดีและให้พลังงานสูง ทำให้มีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ นอกจากนี้เป็นการลดต้นทุนในด้านการผลิต อีกทั้งยังสามารถกำจัดของเสียได้จากการนำมาเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์

2.3.1 ความหมายของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน

โดยทั่วไปแล้ว สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนจะเป็นพวกยางรถยนต์เก่า เศษไม้ น้ำมันเก่าที่ใช้แล้ว และสารละลาย (Spent solvents) สิ่งต่างๆเหล่านี้สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและการทดแทนแร่ต่างๆที่สำคัญในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนที่นำมาใช้จะเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมและสิ่งปฏิกูล เช่น ถ้ำลอยและถ้ำหนัก อิฐทนไฟที่หมดอายุการใช้งานแล้ว สุขภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ยางรถยนต์เก่า เชื้อเพลิงสังเคราะห์ น้ำมันเก่าที่ใช้แล้ว รวมทั้งดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน สิ่งต่างๆเหล่านี้สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี ทั้งนี้จะต้องไม่มีการปนเปื้อนของสารที่เป็นอันตราย เช่น พีซีบี (PCBs หรือ Polychlorinated Biphenyls) วัสดุติดเชื้อจากโรงพยาบาลรวมทั้งขยะครัวเรือนทั่วไปที่ยังไม่ผ่านการคัดแยก และของเสียที่มีคลอรีนเป็นส่วนประกอบ เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ หรือไตรคลอโรเบนซีน ถ้ามีการนำมาเผาไหม้ในเตาเผาปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปจะเกิดไฮโดรเจนคลอไรด์ขึ้น ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นกรดสามารถทำปฏิกิริยากับโพแตสเซียมออกไซด์และโซเดียมออกไซด์ในเตาเผาเกิดเป็นเกลือของอัลคาไลน์ เกลือที่ระเหยได้เหล่านี้จะไปกลั่นตัวในส่วนที่เตาเย็นลง ถ้าของเสียมีความเข้มข้นของคลอไรด์ผสมอยู่มาก ก็อาจเกิดเกลือเหล่านี้ขึ้นในปริมาณที่สูงและสุดท้ายสามารถเข้าไปขัดขวางในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ และตารางที่ 2.5 แสดงตัวอย่างของเสียที่มักใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ถึงแม้ว่าของเสียหลายประเภทจะมีศักยภาพสูงและมีคุณสมบัติที่สามารถนำมาใช้งานในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ดี แต่สิ่งสำคัญที่สุดที่ควรคำนึงถึง คือ ต้องแน่ใจว่าไม่มีส่วนประกอบที่ไม่ต้องการให้มีในของเสียมากเกินไปซึ่งอาจไปยับยั้งคุณสมบัติหรือปฏิกิริยาที่จำเป็นบางอย่างในกระบวนการผลิตได้ ดังนั้นกากของเสียที่จะนำไปใช้ในการเผาไหม้ร่วมกับกระบวนการผลิตซีเมนต์จะต้องผ่านการตรวจสอบอย่างเข้มงวดเสียก่อน

การนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อทดแทนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในการผลิตปูนซีเมนต์นั้น มีข้อพึงระวังที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ จะต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและความปลอดภัยของพนักงานตลอดจนถึงคุณภาพสิ่งแวดล้อมของชุมชนในท้องถิ่น โดยจะต้องมีการจัดการดูแลและควบคุมอย่างเหมาะสม (จุมพล เลิศชูวงศ์, 2546)

2.3.2 ประเภทของกากของเสียอุตสาหกรรมที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์ (ธีระพล ตีรวคิน, 2546)

2.3.2.1 กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่เหมาะสมสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์ มีดังนี้

1. กากของเสียที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ
2. กากของเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ
3. น้ำเสียเข้มข้นสูงซึ่งไม่สามารถกำจัดโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสีย
4. กากของเสียที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ได้

2.3.2.2 กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ไม่เหมาะสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์ มีดังนี้

1. กากของเสียที่มีการกัดกร่อนสูง เช่น กรดเข้มข้น
2. สารกัมมันตรังสี
3. ขยะติดเชื้อ
4. กากของเสียที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงกว่าเกณฑ์กำหนด
5. กากของเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงกว่าเกณฑ์กำหนด

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของเสียที่มักใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ (Environmental Toxicology International, 1992; Trezza และ Scian, 2000; Achternbosch และคณะ, 2003; Ract, Espinosa และ Tenorio, 2003; Shih, Chang และ Chiang, 2003)

ชนิด	วัตถุดิบที่ใช้
วัตถุดิบทดแทน	แฉะเหล็ก ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ เถ้าหนัก เถ้าลอยจากถ่านหิน วัสดุจากการผลิตเหล็ก เถ้าจากการเผา น้ำมันรถยนต์เก่าที่ใช้แล้ว กัลวานิคสลัดจ์ จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า
เชื้อเพลิงทดแทน	เศษไม้ ตัวทำละลาย ของเสียพวกน้ำมัน ยางรถยนต์เก่า เชื้อเพลิงจากการผลิตขยะอุตสาหกรรมเฉพาะ เชื้อเพลิงทดแทนจากขยะชุมชน ขยะกระดาษ ขยะพลาสติก ส่วนผสมในกระดาษและพลาสติก วัสดุรถยนต์ วัสดุสิ่งทอ สารอินทรีย์ที่ใช้แล้ว เนื้อสัตว์และอาหารสัตว์

2.3.3 แนวโน้มการใช้กากของเสียอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา การใช้ของเสียในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์มีเพิ่มมากขึ้นในหลายประเทศ สัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศเยอรมนีปี ค.ศ. 1999 แสดงในตารางที่ 2.6 ในระหว่างปี 1990 ถึงปี ค.ศ. 1998 มีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ของประเทศต่างๆ เป็นสัดส่วนดังนี้คือ เบลเยียมร้อยละ 18 ฝรั่งเศสร้อยละ 52.4 สวิตเซอร์แลนด์ร้อยละ 25 อังกฤษร้อยละ 20 และเยอรมนีร้อยละ 15 (Mokrzycki และ Bochenczyk, 2003) และตารางที่ 2.7 แสดงสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศเยอรมนีปี ค.ศ. 1999 จากตารางสรุปได้ว่ามีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนประมาณ

ร้อยละ 23 ของเชื้อเพลิงทั้งหมดและต่อมาในปี ค.ศ. 2001 พบว่า ในประเทศเยอรมนีมีการใช้เชื้อเพลิงทดแทนประมาณร้อยละ 30 ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด โดยมีการนำไปใช้ร่วมกับขยะจากอุตสาหกรรมและขยะชุมชนอีกประมาณ 420,000 ตัน ในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ จะเห็นได้ว่าการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต

ตารางที่ 2.6 สัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศเยอรมนีปี ค.ศ. 1999 (Achterbosch และคณะ, 2003)

วัตถุดิบที่ป้อน		ปริมาณที่ป้อนสำหรับการผลิตปูนเม็ด (ตันต่อปี)
วัตถุดิบหลัก	หินปูน	35,695,913
	ดินเหนียวปนปูน	10,000,000
	ดินเหนียวรวมกับเบนโทไนต์/คาร์บอนิลไนต์	1,985,000
	ทราย	1,240,000
วัตถุดิบทดแทน	วัสดุจากการผลิตเหล็ก	170,000
	แฉะเหล็ก	117,000
	เถ้าจากกระบวนการเผา	240,000
	เถ้าลอยจากถ่านหิน	212,039
	ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ	140,000

ตารางที่ 2.7 สัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์ในประเทศเยอรมนีปี ค.ศ. 1999 (Achterbosch และคณะ, 2003)

เชื้อเพลิงที่ป้อน		ปริมาณที่ป้อนสำหรับการผลิตปูนเม็ด (ตันต่อปี)
เชื้อเพลิงหลัก	ถ่านหินแข็ง (Hard Coal)	980,000
	ถ่านหินสีน้ำตาล (Brown Coal)	2,140,000
	ถ่านโค้กน้ำมัน (Oil Coke)	312,903
เชื้อเพลิงทดแทน	ยางรถยนต์เก่า (Used Types)	236,000
	น้ำมันที่ทิ้งแล้ว (Waste Oil)	181,000
	เศษไม้ (Scrap Wood)	77,000
	สัดส่วนของเสียจากการค้า ชุมชน และอุตสาหกรรม	290,000

2.3.4 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีเตาเผาขยะอุตสาหกรรมที่สามารถรองรับปริมาณกากของเสียที่เกิดขึ้นทั้งประเทศได้ ดังนั้น เตาเผาปูนซีเมนต์ จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่น่าจะมีความเหมาะสมในด้านสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นการนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

2.3.4.1 โครงการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิต

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541 ทางบริษัทฯ ได้ริเริ่มโครงการพัฒนาเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนอย่างจริงจัง และเมื่อปลายปี พ.ศ. 2544 ที่ผ่านมามีได้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานประเภท 101 จากกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ซึ่งนั่นก็หมายถึงการอนุญาตอย่างเป็นทางการจากหน่วยงานภาครัฐให้สามารถดำเนินโครงการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้

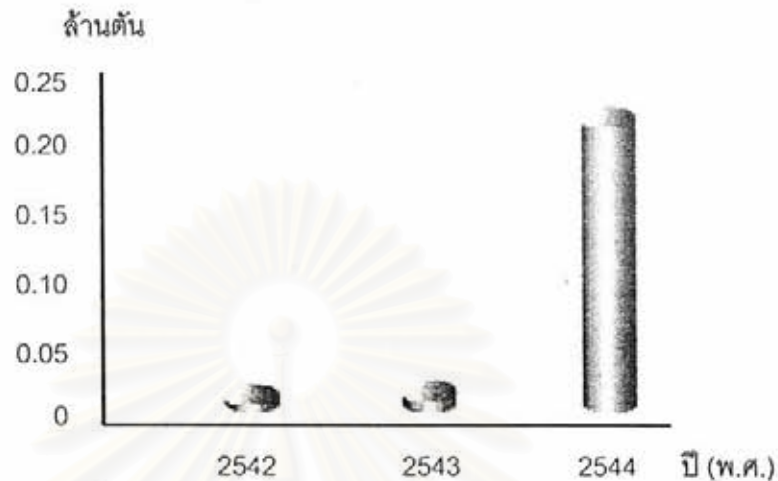
ด้วยหลักการของการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรธรรมชาติให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนั้น การนำกากของเสียหรือสิ่งปฏิกูลจากภาคอุตสาหกรรมมาใช้เป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทน (Alternative Fuels Raw Materials หรือ AFR) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดในอนาคตต่อไปได้

2.3.4.2 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมในกระบวนการผลิต (Waste Co-Processing)

นับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2542 เป็นต้นมา สิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ได้จากภาคเกษตรกรรมและภาคอุตสาหกรรมจำนวนมากกว่า 220,000 ตัน ได้ถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต ทั้งนี้ผลการศึกษาจากทางสถาบันวิจัยสภาวะสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ด้วยการสนับสนุนโครงการโดยปูนซีเมนต์นครหลวงในปี พ.ศ. 2544 พบว่าประเทศไทยมีปริมาณกากของเสียอุตสาหกรรมจำนวนมากกว่า 3 ล้านตัน ซึ่งส่วนใหญ่ขาดการจัดการที่เป็นระบบ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก และดังนั้นการนำกากของเสียอุตสาหกรรมดังกล่าวมาใช้ในกระบวนการผลิต จึงนับว่าเป็นโอกาสดีที่เตาเผาปูนซีเมนต์จะมีส่วนช่วยในการแก้ไขปัญหาในการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมที่นับวันจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในรูป 2.6 จะเห็นได้ว่ามีตัวเลขแสดงการนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาใช้ร่วมในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น

จากการทดลองนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาทดแทนเชื้อเพลิงและวัตถุดิบ ในส่วนของเชื้อเพลิง ให้เศษไม้ ยางรถยนต์เก่า น้ำมันใช้แล้ว เชื้อเพลิงสังเคราะห์ (Synthetic Fuels) ผงถ่าน

(Activated Carbon) หรือแม้กระทั่งเศษธนูบัตร เป็นต้น ในส่วนของวัตถุดิบทดแทนได้มีการทดลองใช้ถ่านลอย ถ่านหัก อิฐทนไฟที่หมดอายุการใช้งาน สุขภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ ดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน รวมทั้งตะกรันทองแดงที่กำลังได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เนื่องจากมีปริมาณของ ซิลิกา แคลเซียม และอลูมินาสูงจึงถูกพิจารณาในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์

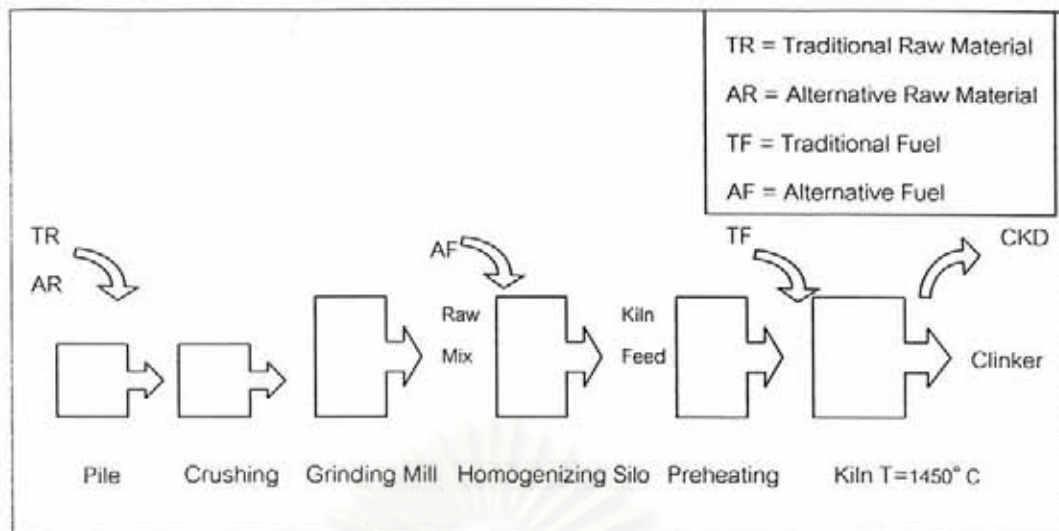


รูปที่ 2.6 ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงและวัตถุดิบทดแทนของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ในปี พ.ศ. 2542 ถึงปี พ.ศ. 2544

2.3.4.3 ข้อมูลกระบวนการการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลัก (Traditional) และทดแทน (Alternative) เข้าสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

ข้อมูลจากกระบวนการการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี เชื้อเพลิงทดแทนที่เข้ามาส่วนใหญ่มักเป็นกากของเสียในรูปของแข็ง เช่น กากข้าวโพดและแกลบ มีปริมาณประมาณ 10 ถึง 20 ตันต่อวัน ส่วนเชื้อเพลิงหลักซึ่งคือถ่านหิน และลิกไนต์มีปริมาณประมาณ 1,000 ตันต่อวัน

สำหรับวัตถุดิบ เชื้อเพลิง ทั้งประเภทหลักและทดแทนมีการป้อนเข้าสู่กระบวนการใน 3 จุดด้วยกัน จุดแรกคือกองวัตถุดิบก่อนการย่อยขนาดเป็นชิ้นเล็กๆ (Pile) จะมีการเติมวัตถุดิบหลักและวัตถุดิบทดแทนที่จุดนี้ วัตถุดิบทดแทน เช่น ตะกรันทองแดง ตัวเร่งปฏิกิริยา ถ่านลอยและถ่านหัก และจุดที่สองคือขั้นการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันของวัตถุดิบและเชื้อเพลิง (Homogenizing) โดยจะเติมเชื้อเพลิงทดแทนที่จุดนี้ จุดที่สามคือก่อนเข้าเตาเผา (Kiln) จะมีการเติมเชื้อเพลิงหลักในจุดนี้ ซึ่งทางฝ่ายตรวจสอบคุณภาพของทางบริษัทจะมีการสุ่มตรวจตัวอย่างชั่วโมงละ 1 ครั้งบริเวณจุดต่างๆของกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบให้ได้ตามมาตรฐาน ลักษณะการป้อนวัตถุดิบ เชื้อเพลิง ทั้งประเภทหลักและทดแทนสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รายละเอียดจุดที่มีการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทั้งประเภทหลักและทดแทนเข้าสู่กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

2.4 แหล่งที่มาของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

แหล่งที่มาของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาจากการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนร่วมในกระบวนการผลิต โดยจะขึ้นอยู่กับประเภทและองค์ประกอบภายในที่มีของของเสีย นั้นๆ จากตารางที่ 2.8 พบว่าองค์ประกอบภายในของของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมบางชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีส่วนประกอบของโลหะหนักหลายชนิด ทำให้อาจเกิดการปนเปื้อนของโลหะหนักเหล่านี้ในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์เอง หรือแม้กระทั่งในฝุ่นปูน ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของซีเมนต์และจากการใช้ประโยชน์ของซีเมนต์ได้ ทำให้เกิดการรวมตัวของโลหะบางชนิดในซีเมนต์ ตารางที่ 2.9 แสดงร้อยละการรวมตัวจากการทดลองในห้องปฏิบัติการจากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นได้ว่าโลหะหนักบางชนิดมีความสามารถในการรวมตัวอยู่ในซีเมนต์ในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากในเตาเผาจริง ความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลักและวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนจะแปรผันกับปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุม เช่น ปัจจัยทางธรณีวิทยา และกระบวนการในการเกิดของเสีย ทั้งนี้ยังมีความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างชนิดของกากของเสียที่นำมาเผาพร้อมและทำให้โลหะหนักมีความสามารถในการรวมตัวอยู่ในซีเมนต์ที่ต่างกันไปด้วย

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบภายในของของเสียอันตรายและกากอุตสาหกรรมบางชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

กากอุตสาหกรรม	น้ำหนักของส่วนประกอบพื้นฐาน (ร้อยละ)		น้ำหนักของส่วนประกอบอื่นๆ		ร้อยละสูงสุดในการเติมที่เป็นไปได้	อ้างอิง
ได้จากการเผา น้ำมันรถยนต์เก่าที่ใช้แล้ว	CaO	21.34	MnO	ร้อยละ 13.35		Trezza และ Scian, 2000
	SiO ₂	3.8	TiO ₂	ร้อยละ 0.04		
	Al ₂ O ₃	1.64	Ba	158 มก. /กก.		
	Fe ₂ O ₃	2.32	Cr	737 มก. /กก.		
			Cu	1,426 มก. /กก.		
			Pb	23,632 มก. /กก.		
			Sn	390 มก. /กก.		
			Sr	214 มก. /กก.		
			Zn	114,483 มก. /กก.		
กัลวานิคสลัดจ์จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า	Ca	43.19	Cu	ร้อยละ 2.41	ร้อยละ 2	Ract, Espinosa และ Tenório, 2003
	Si	9.02	Ni	ร้อยละ 1.22		
	Al	2.33	Sr	ร้อยละ 0.21		
	Fe	1.88	Cr	ร้อยละ 0.14		
			Sn	ร้อยละ 0.12		
ได้จากเตาเผาขยะชุมชน	CaO	27.2	MgO	ร้อยละ 1.6	น้อยกว่าร้อยละ 5	Shih, Chang และ Chiang, 2003
	SiO ₂	29.4	Na ₂ O	ร้อยละ 3.6		
	Al ₂ O ₃	18	K ₂ O	ร้อยละ 0.9		
	Fe ₂ O ₃	13.3				
สลัดจ์จากโรงชุบโลหะ	CaO	26	K ₂ O	ร้อยละ 0.24		Stegemann และ Buenfeld, 2003
	SiO ₂	6.3	MnO	ร้อยละ 0.41		
	Al ₂ O ₃	4.3	Ba	575 มก. /กก.		
	Fe ₂ O ₃	35	Cd	1,030 มก. /กก.		
			Cr	41,700 มก. /กก.		
			Cu	96,300 มก. /กก.		
			Ni	62,400 มก. /กก.		
			Pb	5,290 มก. /กก.		
			Zn	227,000 มก. /กก.		

ตารางที่ 2.9 ร้อยละการรวมตัวของโลหะบางชนิดในปูนเม็ด จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ

ชนิดของโลหะ	ปริมาณโลหะที่รวมตัวอยู่ในปูนเม็ด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	อ้างอิง
แคดเมียม	51	Sprung, 1985
	22	Murat และ Sorrentino, 1996
โครเมียม	99	Sprung, 1985
	84	Murat และ Sorrentino, 1996
ทองแดง	99.3	Ract, Espinosa และ Tenorio, 2003
นิกเกิล	97	Sprung, 1985
ตะกั่ว	0	Murat และ Sorrentino, 1996
	37.1	Andrade และคณะ, 2003
วานาเดียม	69.6	Andrade และคณะ, 2003
สังกะสี	53	Murat และ Sorrentino, 1996
	75	Caponero และ Tenorio, 2000
	86	Andrade และคณะ, 2003

2.5 ผลกระทบของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ผลกระทบของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโลหะหนักชนิดนั้นๆ โดยส่วนใหญ่โลหะหนักเหล่านี้ก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงในกระบวนการผลิตสามารถก่อให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้ มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด เป็นต้น ตารางที่ 2.10 แสดงผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

เมื่อโลหะหนักส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์แล้ว จะก่อให้เกิดผลกระทบในปูนซีเมนต์ด้วย เช่น การก่อตัวช้าลง เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว ลดความแข็งแรงในช่วงแรก ปรับปรุงความแข็งแรงในระยะแรก หรือแม้กระทั่งมีอิทธิพลต่อสีของปูน (Siam City Cement Public Company Limited, 2005) ผลกระทบของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 ผลกระทบของโลหะหนักต่อการผลิตปูนซีเมนต์ (Dalton และคณะ, 2004)

ชนิดของโลหะ	สมบัติและผลกระทบต่อการผลิตซีเมนต์
สารหนู	โดยทั่วไปจะเข้าไปอยู่ในปูนเม็ด แต่ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการผลิตซีเมนต์
แคดเมียม	ความเข้มข้นของแคดเมียมในปูนเม็ดจะลดลงเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ในเตาเผาเพิ่มขึ้น
โครเมียม	ลดอุณหภูมิของการก่อตัว C_3S ได้ ถ้ามีปริมาณมากกว่าร้อยละ 3 มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่าร้อยละ 2.5 ถึง 5 โดยน้ำหนัก
ทองแดง	มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปที่ก่อตัวขึ้น (ออกไซด์ เกลือ หรือซัลไฟด์)
ตะกั่ว	เป็นโลหะที่ระเหยได้ และสามารถสะสมในปูนเม็ดโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบหากมีปริมาณน้อยกว่า 70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
ปรอท	เป็นโลหะที่ระเหยได้ง่ายมากและคาดว่ามีการหลุดออกไปกับก๊าซทางปล่องควัน ส่วนความรู้เรื่องผลกระทบต่อการผลิตปูนเม็ดยังไม่มีการศึกษาที่เพียงพอ
สังกะสี	ความแตกต่างของรูปที่ก่อตัวขึ้น สามารถก่อให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้ มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่าร้อยละ 2.5 ถึง 5 โดยน้ำหนัก
วานาเดียม	เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ดและลดความสามารถในการบดได้

2.6 พฤติกรรมของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

พฤติกรรมของโลหะหนักในระบบซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงในการเผาว่ามั้นในปัจจุบันยังไม่ได้มีการยืนยันที่แน่ชัด มีเพียงความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซีเมนต์และโลหะหนัก ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 4 กลุ่ม คือ การดูดติด (Sorptions) การตกผลึก (Precipitation) การรวมตัวเข้ากับโครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ (Lattice Inclusion) และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบในซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่ละลายน้ำได้จำกัด (Li และคณะ, 2001; Achternbosch และคณะ, 2003)

ตารางที่ 2.11 ผลกระทบของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

ผลกระทบ	ชนิดของโลหะหนัก
การก่อตัวช้าลง	ตะกั่ว สังกะสี สารหนู ทองแดง แคดเมียม และ ฟลูออรีน
เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว	โครเมียม นิกเกิล และ สารจำพวกฮาโลเจน
ลดความแข็งแรงในช่วงแรก	ตะกั่ว สังกะสี ฟอสฟอรัส โบรอน และ แมกนีเซียม
ปรับปรุงความแข็งแรงในระยะแรก	โครเมียม นิกเกิล วานาเดียม แบเรียม และ ฟลูออรีน
มีอิทธิพลต่อสีของปูน	โครเมียม แมกนีเซียม ไทเทเนียม โคบอลต์ และ วานาเดียม

ในกรณีการศึกษาผลกระทบระหว่างซีเมนต์และโลหะหนักในการทำให้เสถียรโดยการทำก้อนแข็ง มีความเป็นไปได้ คือ การดูดติด (Sorptions) เป็นกลไกที่สารถูกดูดซับ และ/หรือดูดซึมบนผิวหน้าหรือเข้าไปในรูพรุนของซีเมนต์ อาจเกิดได้ทั้งลักษณะทางกายภาพและเคมี การตกผลึก (Precipitation) เป็นกลไกที่สารเกิดปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ ซัลไฟด์ ซิลิเกต คาร์บอนเนต ฟอสเฟต เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้น้อยลง และเกิดการตกตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนนั้นๆ ซึ่งมักจะเกิดที่พีเอชมีค่าสูง และเกิดในกรณีของการห่อหุ้ม (Encapsulation) เป็นกลไกที่ทำให้สารถูกจับเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของซีเมนต์ สามารถเกิดได้ทั้งลักษณะทางกายภาพ (Lagrega, Buckingham และ Evans, 2001)

ในช่วงชั่วโมงแรกๆปฏิกิริยาไฮเดรชันจะส่งผลให้เกิดการตกตะกอนชั้นต้นของโลหะไฮดรอกไซด์และตามมาด้วยระยะที่เกิดการสร้างสารประกอบเชิงซ้อน เช่น โมโนซิลเฟต เอทริงไท์ และ CSH เนื่องจากพีเอชของสารละลายเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากจากการเกิดปฏิกิริยาหลักของปูนซีเมนต์ ดังนั้นโลหะหนักทั้งหลายจะตกตะกอนอยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์ในทันที ในขณะที่ผิวหน้าของซีเมนต์จะดูดติดโลหะหนักที่ไม่เกิดการตกตะกอน (Yousuf และคณะ, 1995)

เมื่อโลหะหนักมีการรวมตัวเข้ากับซีเมนต์หลังปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้ว ยังมีผลต่อเนื่องไปอีก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการชะละลายของซีเมนต์ จะไม่เกิดขึ้นแค่ระยะช่วงอายุการใช้งานเท่านั้น แต่ยังสามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการรื้อถอนทำลายอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การศึกษาสถานะภาพที่สมบูรณ์ของโลหะหนักโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ เป็นหัวข้อที่น่าสนใจที่เกี่ยวกับเสถียรภาพของโลหะหนักในระบบซีเมนต์ ที่มีผลต่อการชะละลายออกมาสู่สิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษาเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจ และ

สามารถช่วยให้เหล็กเลี้ยงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นอย่างคาดไม่ถึง เมื่อมีการใช้กากของเสียอุตสาหกรรมที่มีปริมาณของโลหะหนักปนเปื้อนอยู่มาเผาพร้อมในเตาเผาปูนซีเมนต์ ซึ่งนอกจากจะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ออกมาแล้ว ยังผลต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

พฤติกรรมการเกิดพันธะของธาตุในซีเมนต์เพสต์ ซึ่งจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของธาตุหรือโลหะหนักต่างกัน ภายใต้เงื่อนไขในสภาวะที่พีเอชต่างกันด้วย ซึ่งสรุปได้ดังนี้

2.6.1 สารหนู (As)

ในสภาวะที่เป็นต่าง รูปที่เสถียรของสารหนูจะเป็นอาร์เซไนต์ (AsO_3^{3-}) ในกรณีที่ไม่มีการเติมฟอสเฟตหรืออาร์เซนิต (AsO_4^{3-}) ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพปรีดออกซ์เป็นหลัก อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีปริมาณซิลิเกตค่อนข้างสูงในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัว สารหนูในรูปของอาร์เซไนต์ยังไม่มีการพิสูจน์ที่แน่ชัด สารหนุมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิไลเซชันครั้งแรกกับพันธะของไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในระบบซีเมนต์ หากสารหนุมีปริมาณสูง จะส่งผลให้เกิดการตกผลึกของ CaHAsO_3 (Dutre และ Vandecasteele, 1995) สำหรับการแทนที่ซิลิเกตของอาร์เซไนต์ในเอททริงไกท์จะเกิดโดยการดูดติดและการรวมตัวกัน ส่วนการรวมตัวกันของอาร์เซไนต์กับโมโนซิลิเกตยังไม่สามารถยืนยันได้ (Van der Hoek, Bonouvrie และ Comans, 1994) การชะละลายของสารหนูจะเกิดขึ้นได้ง่าย ในช่วงพีเอชสูงในสภาวะของไฮดรอกไซด์ มีความเป็นไปได้ที่จะมีการชะละลายเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชเท่ากับ 11 (Garavaglia และ Caramuscio, 1994) แต่ทั้งนี้ยังไม่มีการยืนยันที่แน่ชัด การจัดรูปของ As^{5+} ในระบบซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 การจัดรูปของ As^{5+} ในระบบซีเมนต์ (Van der Hoek, Bonouvrie และ Comans, 1994; Dutre และ Vandecasteele, 1995)

As	การจัดรูปของ As^{5+} ในระบบซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13		$\text{Ca(OH)}_2[\text{S}]$				$[\text{S}], [\text{I}]$		
12		$\text{Ca(OH)}_2[\text{S}]$			I*			
11					I*			•
7					•			•
2								H_3AsO_4

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.2 แบเรียม (Ba)

แบเรียมมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรกกับพันธะของ CSH การรวมตัวของผลึกแบเรียมยังไม่ได้รับการพิสูจน์ โดยการศึกษาของ Garavaglia และ Caramuscio (1994) พบว่า ที่พีเอช 11.5 ถึง 1.2 ความสามารถในการละลายของ $BaSO_4$ มีค่าน้อยมาก มีการสันนิษฐานว่า จะเกิด $BaCO_3$ และ $BaSO_4$ ที่พีเอชมากกว่า 11.5 และน้อยกว่า 11.5 ตามลำดับ (Cocke, 1990) การจัดรูปของ Ba^{+2} ในซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.13 ตารางที่ 2.13 การจัดรูปของ Ba^{+2} ในซีเมนต์ (Cocke, 1990; Garavaglia และ Caramuscio, 1994)

Ba	การจัดรูปของ Ba^{+2} ในระบบซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	Aft	Minor phase	Solution
13	$Ba(CO)_3$		$BaSO_4$	*				
12	$Ba(CO)_3$		$BaSO_4$	*				
11			$BaSO_4$	*				
9			$BaSO_4$	$C_0.2SH[I^*]$				
>1			$BaSO_4$					
1								Ba^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.3 แคดเมียม (Cd)

แคดเมียมมีพฤติกรรมที่สามารถเป็นได้ทั้งสภาวะกรดและด่าง ภายใต้สภาวะที่เป็นด่างสูง (พีเอชมากกว่า 12.5) แคดเมียมจะอยู่ในรูป CdO_2^{+2} ส่วนภายใต้สภาวะที่เป็นกลางและกรด (พีเอชน้อยกว่า 8) แคดเมียมจะอยู่ในรูป Cd^{+2} ในช่วงพีเอชระหว่าง 8 ถึง 12 แคดเมียมจะตกตะกอนในรูป ไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต ในระบบซีเมนต์ CdO จะเป็นตัวห่วงวงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งสารประกอบแคดเมียมรูปแบบอื่นๆ จะมีผลกระทบที่แตกต่างกันไป แคดเมียมจะมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรกกับพันธะของไฮดรอกไซด์ ที่พีเอชสูงแคดเมียมจะมีความเสถียร ซึ่งเป็นผลมาจากการรวมตัวของ $Cd(OH)_2$ ใน C_2SH (Cartledge, Eaton และ Tittlebaum, 1991) การจัดรูปของแคดเมียมกับไฮดรอกไซด์จะอยู่ในสภาวะที่เสถียร ส่วนการจัดรูปเป็นแคดเมียมคาร์บอเนตได้ศึกษาโดย Gougar, Scheetz และ Roy (1996) พบว่า การดูดติดเล็กน้อยของแคดเมียมบน Tobermorite (C_2SH) อย่างไรก็ตาม อาจนำไปสู่การแยกสลายขององค์ประกอบและเกิดการจัดรูปของ $CdCO_3$ ที่ พีเอชเท่ากับ 6.8 หรือ 6.4 ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางแคดเมียมถูกพิจารณาว่าไม่เสถียร การจัดรูปของ Cd^{+2} ในระบบซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 การจัดรูปของ Cd^{+2} ในระบบซีเมนต์ (Carledge, Eaton และ Tittlebaum, 1991; Gougar, Scheetz และ Roy, 1996)

Cd	การจัดรูปของ Cd^{+2} ในระบบซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13				[I]*,[E]				CdO_2 [?]
12		$Cd(OH)_2$						
11	$Cd(CO)_3$			$C_1SH[I^*]$				
10	$Cd(CO)_3$			$C_{0.66}SH[I^*]$				
9	$Cd(CO)_3$			$C_{0.2}SH[I^*]$				
<7-8								Cd^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.4 โคบอลต์ (Co)

ที่พีเอชสูงกว่า 6 รูปที่เสถียรของโคบอลต์คือ $CoCO_3$, $Co(OH)_2$ และ Co_3O_4 ภายใต้สภาวะที่เป็นต่างสูง Co^{+2} จะอยู่ในรูปของ $HCoO_2^-$ และ Co^{+2} โคบอลต์มีบทบาทสำคัญในโมโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก การแทนที่ของ Al^{+3} โดย Co^{+3} และ Ca^{+2} โดย Co^{+2} เป็นผลึกในเอททริงไกท์ มีการศึกษาพบว่า การดูดติดของ Co บน C_2SH แต่ไม่มีการรวมตัวเป็นผลึกเกิดขึ้น (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) ที่พีเอชน้อยกว่า 6 การเคลื่อนที่ของโคบอลต์คาดว่า จะเกิดขึ้นทุกกรณี การจัดรูปของ Co^{+2} , Co^{+3} ในซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 การจัดรูปของ Co^{+2} และ Co^{+3} ในระบบซีเมนต์ (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996)

Co	การจัดรูปของ Co^{+2} , Co^{+3} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbo-nates	Hydro-xides	Sulfates	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13				$Co^{+3}, Co^{+2}[S]$	*	$Co^{+3}, Co^{+2}[I]$	Co_3O_4	$HCoO_2^-$
12		$Co(OH)_3$		$Co^{+3}, Co^{+2}[S]$	*		Co_3O_4	
11		$Co(OH)_3$		$C_1SH [I^*]$	*		Co_3O_4	
10	$Co(CO)_3$			$C_{0.66}SH [I^*]$	*		Co_3O_4	
9	$Co(CO)_3$			$C_{0.2}SH [I^*]$	*		Co_3O_4	
<6								Co^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.5 โครเมียม (Cr)

โครเมียมมีพฤติกรรมที่สามารถเป็นได้ทั้งสภาวะกรดและด่าง ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง (พีเอชมากกว่า 11) โครเมียมจะอยู่ในรูป Cr^{6-} และมีการจัดรูปเป็นโครเมตไอออน CrO_4^{2-} ที่มีความสามารถในการละลายสูง แต่ความสามารถในการดูดซับ Cr^{6-} ของซีเมนต์เพสต์น้อยมาก จึงต้องมีการเติมเกลือของ Fe^{2+} และเกิดการตกตะกอนเป็น $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (Garavaglia และ Caramuscio, 1994) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด (พีเอชน้อยกว่า 3) โครเมียมจะอยู่ในสารละลายในรูป CrOH^{2-} ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงวาเลนซ์ สารละลาย Cr_2O_3 หรือ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ แทบจะไม่ละลาย และมีเสถียรภาพจะอยู่ในช่วงพีเอชระหว่าง 3 ถึง 11 หรือภายใต้เงื่อนไขสภาวะที่มีความเป็นด่างสูง (พีเอชน้อยกว่า 13.5) โครเมียมจะมีบทบาทสำคัญใน CSH เอททริงไกท์และโมโนซิลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก จากการรวมตัวของ Cr^{3+} ในโครงสร้างผลึกโดยการแทนที่ Al^{3+} (Glasser, 1997; Polletini, Pomi และ Sirini, 2002) ในทางตรงกันข้าม การรวมตัวของ Cr^{6-} ในแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (AF₁ และ AF_m) อย่างไรก็ตาม ประจุลบของโครเมตแข่งขันกับประจุคลอไรด์ ซัลเฟตและคาร์บอเนต เพื่อแทนที่ตำแหน่งเดียวกันในโครงสร้างผลึก การรวมตัวของ Cr^{3+} ใน C_2SH ซึ่งแทนที่ Si^{4+} ยังไม่มีการพิสูจน์ที่แน่ชัด (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) การรวมตัวของ Cr^{3+} ในโครงสร้างของ Chabazite ($\text{C}_0.2\text{SH}$) ความสามารถในการละลายของ Cr^{3+} เกิดขึ้นที่พีเอชต่ำกว่า 11 เล็กน้อย และมีความไม่เสถียรเกิดขึ้นเล็กน้อยที่พีเอชมากกว่า 3 ตารางที่ 2.16 แสดงการจัดรูปของ Cr^{6-} และ Cr^{3+} ในระบบซีเมนต์

ตารางที่ 2.16 การจัดรูปของ Cr^{6-} และ Cr^{3+} ในระบบซีเมนต์ (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996; Polletini, Pomi และ Sirini, 2002)

Cr	การจัดรูปของ Cr^{6-} และ Cr^{3+} ในระบบซีเมนต์ *							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbo-nates	Hydro-xides	Sulfates	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13		$\text{Cr}(\text{OH})_3$		$\text{Cr}^{3+}[\text{I}]^*$	$\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6-}[\text{I}]$	$\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6-}[\text{I}]$	Cr_2O_3	Cr^{6-}
12		$\text{Cr}(\text{OH})_3$		$\text{Cr}^{3+}[\text{I}]^*$	$\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6-}[\text{I}]$		Cr_2O_3	Cr^{6-}
11		$\text{Cr}(\text{OH})_3$		$\text{C}_1\text{SH}[\text{I}^*]$	$\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6-}[\text{I}]$		Cr_2O_3	
10				$\text{C}_{0.66}\text{SH}[\text{I}^*]$	$\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6-}[\text{I}]$		Cr_2O_3	
9				$\text{C}_{0.2}\text{SH}[\text{I}^*]$	$\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6-}[\text{I}]$		Cr_2O_3	
<3								CrOH^{2-}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.6 ทองแดง (Cu)

ความสามารถในการละลายของทองแดงขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนेटที่มีในสารละลาย ในกรณีที่ไม่มีการคาร์บอนेट ทองแดงจะอยู่ในรูป CuO_2^{-2} ที่พีเอชมากกว่า 11 การละลายภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเริ่มต้นที่พีเอช 7 ในช่วงพีเอชระหว่าง 7 ถึง 11 ทองแดงจะอยู่ในรูป CuO หรือ Cu(OH)_2 ในกรณีที่มีคาร์บอนेट ทองแดงจะตกตะกอนอยู่ในรูป Malachite หรือ $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ที่พีเอชมากกว่า 7 โดยทองแดงมีบทบาทสำคัญใน CSH เอททริงโกท์และโมโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก สันนิษฐานว่าทองแดงรวมตัวกับ CSH เกิดเป็นผลึกขึ้น (Polletini, Pomi และ Sirini, 2002) ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ทองแดงอยู่ในรูป Brochantite ($\text{Cu}_2\text{SO}_4(\text{OH})_6$) และเกิดการรวมตัวของ Cu^{+2} กับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite ($\text{C}_{0.2}\text{SH}$) ยังไม่มีพิสูจน์ที่แน่ชัดของรูปแบบปฏิกิริยาเอททริงโกท์และโมโนซัลเฟตกับทองแดง ที่พีเอชน้อยกว่า 7 คาดว่าทองแดงจะไม่เสถียร ปฏิกิริยาไฮเดรชันอาจถูกหน่วงจากการเคลือบเม็ดซีเมนต์ของ Cu(OH)_2 เพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาของ C_3A และการเกิดโครงสร้างผลึกของพอร์ตแลนด์ไฮดรอกไซด์ การจัดรูปของ Cu^{+2} ในระบบซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 การจัดรูปของ Cu^{+2} ในระบบซีเมนต์ (Polletini, Pomi และ Sirini, 2002)

Cu	การจัดรูปของ Cu^{+2} ในระบบซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13				[I] *	*	*		CuO_2^{-2}
12	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	Cu(OH)_2		[I] *	*			CuO_2^{-2}
11	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	Cu(OH)_2		$\text{C}_1\text{SH}[\text{I}^*]$	*		CuO	
10	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	Cu(OH)_2		$\text{C}_{0.66}\text{SH}[\text{I}^*]$	*		CuO	
9	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	Cu(OH)_2		$\text{C}_{0.2}\text{SH}[\text{I}^*]$	*		CuO	
<7								Cu^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.7 ปรอท (Hg)

ในสารละลายที่พีเอชน้อยกว่า 7 ปรอทจะละลายได้สูงและอยู่ในรูป HgCl_4^{-2} หรือ Hg^{-2} เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ปรอทจะอยู่ในรูป HgO หรือเข้าสู่สภาวะที่มีความเสถียร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยารีดอกซ์ ในระบบซีเมนต์ปรอทจะอยู่ในรูป HgO (Cocke, 1990) HgO รวมอยู่ใน CSH และเอททริงโกท์ (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) เมื่อปฏิกิริยาที่ผิวหน้าเพิ่มขึ้นคาดว่าจะทำให้มีการละลายของปรอทในทุกกรณี

2.6.8 นิกเกิล (Ni)

นิกเกิลมีพฤติกรรมที่สามารถเป็นได้ทั้งสภาวะกรดและด่าง ในช่วงพีเอชระหว่าง 9 ถึง 11 นิกเกิลจะอยู่ในรูป $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ที่มีความเสถียร ในช่วงที่มีความเป็นด่างสูง นิกเกิลจะอยู่ในรูป HNO_2 ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย ในช่วงที่เป็นกลางและเป็นกรดจะอยู่ในรูป Ni^{+2} นิกเกิลมีบทบาทสำคัญในโมโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก จากการศึกษาของ Scheidegger และคณะ ในปี 2000 พบว่า นิกเกิลสามารถแทนที่แคลเซียมในเอททริงไกท์ มีการสันนิษฐานว่าเจล $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ถูกรวมตัวหรือถูกดูดซับใน C_2SH (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) นิกเกิลสามารถรวมตัวใน Tobermorite (C_2SH) และ Faujasite ($\text{C}_{0.2}\text{SH}$) โดยปกติ NiCO_3 เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร และที่พีเอชน้อยกว่า 8 นิกเกิลมีการละลายได้รวดเร็ว (Achterbosh และคณะ, 2003) การจัดรูปของ Ni^{+2} ในระบบซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 การจัดรูปของ Ni^{+2} ในระบบซีเมนต์ (Gougar Scheetz และ Roy, 1996;

Scheidegger และคณะ, 2000; Achterbosh และคณะ, 2003))

Ni	การจัดรูปของ Ni^{+2} ในระบบซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	AFI	Minor phase	Solution
13				[S].[E]	*	[I]	Ni-Al-LDH	HNO_2
12		$\text{Ni}(\text{OH})_2$		[S].[E]	*			
11		$\text{Ni}(\text{OH})_2$		C_2SH [I]	*			
10		$\text{Ni}(\text{OH})_2$		$\text{C}_{0.66}\text{SH}$ [I*]	*			
9		$\text{Ni}(\text{OH})_2$		$\text{C}_{0.2}\text{SH}$ [I*]	*			
<8								Ni^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.9 ตะกั่ว (Pb)

สภาวะที่มีซัลเฟตและคาร์บอเนตในสารละลายมีความเป็นกรดสูงเท่านั้น ตะกั่วจะละลายอยู่ในรูป Pb^{+2} อย่างไรก็ตาม ถ้าความเข้มข้นของซัลเฟตลดลง Pb^{+2} จะละลายได้ที่พีเอชเท่ากับ 5 ในระบบพันธะซีเมนต์ (Cement Bond System) มีเพียงตะกั่วรูป Pb^{+2} เท่านั้นที่สามารถตรวจพบได้ ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดเกี่ยวกับพฤติกรรมของ Pb^{+3} และ Pb^{+4} ตะกั่วจะมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรกกับพันธะของไฮดรอกไซด์ สารประกอบของตะกั่วจะเป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการดูดติดของตะกั่วกับพันธะไฮดรอกไซด์ มีการสันนิษฐานไว้ว่า ตะกั่วไม่มีการรวมตัวใน C_2SH แต่มีการตกตะกอนบนผิวหน้าในรูปของเกลือเชิงซ้อน (Complex Salts) เช่น ไฮดรอกไซด์ ซัลเฟต หรือคาร์บอเนต (Cartledge, Eaton

และ Tittlebaum, 1991; Cocke และคณะ, 1992; Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) โดยทั่วไป ในระบบซีเมนต์ ความสามารถในการละลายของตะกั่วซัลเฟตมีค่าน้อยมาก คาดว่าจะเกิดการชะละลายของตะกั่วได้ที่พีเอชเท่ากับ 5 ตารางที่ 2.19 แสดงการจัดรูปของ Pb^{+2} ในระบบซีเมนต์ ตารางที่ 2.19 การจัดรูปของ Pb^{+2} ในระบบซีเมนต์ (Cartledge, Eaton และ Tittlebaum, 1991, 1991; Cocke และคณะ, 1992; Gougar, Scheetz และ Roy, 1996)

Pb	การจัดรูปของ Pb^{+2} ในระบบซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13		$Pb(OH)_2$		[S],[E] *			PbO	
12		$Pb(OH)_2$					PbO	
11	$Pb(CO)_3$.				
9	$Pb(CO)_3$			$C_0_2SH[I^*]$				
5	$Pb(CO)_3$							
5-1			$PbSO_4^*$					Pb^{+2} .
<1								Pb^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.10 โมลิบดีนัม (Mo)

ในสารละลาย โมลิบดีนัมจะเคลื่อนที่ได้เมื่ออยู่ในรูปโมลิบดินเนต (MoO_4^{2-}) ในทุกๆ ช่วงของพีเอช และอยู่ในรูป $HMoO_4^-$ ที่พีเอชเป็นกรด ในระบบซีเมนต์ที่มีความเข้มข้นของโมลิบดีนัมสูง อาจเกิดการตกตะกอนในรูป $CaMoO_4$ ส่วนโมลิบดินเนตอาจรวมตัวกับเฮททริงไกท์ แต่ไม่มีการรวมตัวของโมลิบดีนัมที่เด่นชัด ทั้งนี้มีการยืนยันว่ามีการรวมตัวเกิดขึ้นในโมโนซัลเฟต (Kindness และคณะ, 1994) ไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึงความสามารถในการชะละลายภายใต้สภาพอากาศทั่วไป

2.6.11 แทลเลียม (Tl)

ทุกๆ พีเอช แทลเลียมจะอยู่ในรูป Tl_2O สามารถละลายได้สูงในช่วงที่เป็นด่างและมีความเป็นพิษมาก ไม่มีเอกสารใดศึกษาเรื่องพันธะของแทลเลียมในระบบซีเมนต์ ความสัมพันธ์ของอัตราการชะละลายในน้ำน้อยมาก และ Tl^+ มีการรวมตัวกับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite (C_0_2SH) เมื่อปฏิกิริยาที่ผิวหน้าเพิ่มมากขึ้น คาดว่าจะทำให้มีการชะละลายของแทลเลียมในทุกกรณี (Achterbosh และคณะ, 2003)

2.6.12 วาเนเดียม (V)

ในสารละลาย วาเนเดียมจะอยู่ในรูป $H_2VO_4^-$, HVO_4^{2-} หรือ VO_4^{3-} ที่พีเอชมากกว่า 3 ในช่วงที่มีความเป็นกรดสูง วาเนเดียมจะอยู่ในรูป VO^{+2} วาเนเดียมมีความเป็นพิษเล็กน้อยและมีบทบาทสำคัญใน CSH ของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก จากการศึกษพบว่า การรวมตัวของวาเนเดียมใน CSH เอททริงไกท์หรือโมโนซัลเฟตมีเพียงเล็กน้อย (Heimann และคณะ, 1992) เมื่อพื้นที่สัมผัสมากขึ้น การชะละลายของวาเนเดียมคาดว่าจะเกิดขึ้นที่พีเอช 9 (Achtembosh และคณะ, 2003) การจัดรูปของ V^{5+} ในระบบซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.20

ตารางที่ 2.20 การจัดรูปของ V^{5+} ในระบบซีเมนต์ (Heimann และคณะ, 1992; Achtembosh และคณะ, 2003)

V	การจัดรูปของ V^{5+} ในระบบซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13				[I] *	[I] *	[I] *		VO_4^{3-}
12-9				[I] *	[I] *			HVO_4^{2-}
<9								$H_2VO_4^-$, VO^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

2.6.13 สังกะสี (Zn)

ในสารละลาย สังกะสีมีพฤติกรรมที่สามารถเป็นได้ทั้งสภาวะกรดและด่าง ในช่วงพีเอชระหว่าง 8 ถึง 12 สังกะสีจะอยู่ในรูป ZnO หรือ $Zn(OH)_2$ ที่มีความเสถียร ซึ่งความสามารถในการละลายได้ของ ZnO ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 3 มก./ล. ถ้ามีปริมาณที่สูงกว่านี้จะตกตะกอนในรูป ZnO หรือ β - $Zn(OH)_2$ ส่วน $ZnCO_3$ จะเกิดขึ้นในช่วงพีเอชเป็นกลางประมาณ 7 ถึง 8 ในช่วงที่มีความเป็นด่างสูง สังกะสีจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ หรือ ZnO_2^{2-} ถ้าพีเอชน้อยกว่า 7 จะอยู่ในรูป Zn^{+2} สังกะสีมีบทบาทสำคัญใน CSH เอททริงไกท์ และโมโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก ในเอททริงไกท์ สังกะสีสามารถรวมตัวกับแคลเซียม และใน CSH สังกะสีจะถูกดูดซับในรูปไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนต การรวมตัวโครงสร้างผลึกถูกสันนิษฐานว่าไม่เกิดขึ้น (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) ทั้งนี้การตกตะกอนโดยตรงในรูป $CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$ มีการยืนยันว่า สังกะสีมีการรวมตัวใน $C_{0.66}SH$

สังกะสีมีการรวมตัวกับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite และ Zeolite-P ($C_{0.5}SH$) มีงานวิจัยที่สนับสนุนว่ามีการจัดรูปเป็น Hemimorphite หรือ $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ เมื่อความ

เข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้น (Ziegler และคณะ, 2001) การชะละลายของสังกะสีเพิ่มขึ้นอย่างมาก ที่
 ที่เอชประมาณ 7 การจัดรูปของ Zn^{+2} ในระบบซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.21
 ตารางที่ 2.21 การจัดรูปของ Zn^{+2} ในระบบซีเมนต์ (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996; Ziegler
 และคณะ, 2001)

pH	การจัดรูปของ Zn^{+2} ในระบบซีเมนต์						
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E)						
	Carbonates	Hydroxides	CSH	AFm	AFt	Minor phase	Solution
13		$CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$	[S].[E]	*	[I]	$Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$	ZnO_2^{-2}
12		$Zn(OH)_2$	[S].[E]	*		ZnO	
11		$Zn(OH)_2$	C_1SH [I]	*		ZnO	
10		$Zn(OH)_2$	$C_{0.96}SH$ [I*]	*		ZnO	
9		$Zn(OH)_2$	$C_{0.2}SH$ [I*]	*		ZnO	
7-8	$ZnCO_3$						
<7							Zn^{+2}

* ไม่มีการยืนยันแน่ชัด

ความเป็นไปได้ของโลหะในการยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มี 3 รูปแบบ คือ Calcium Complexation Surface Adsorption และ Protective Coating/Osmotic Bursting โดย
 แบบแรกในระบบ Pure System ของ Ca_3SiO_5 และ Ca_2SiO_4 ความเข้มข้นของแคลเซียมใน
 สารละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการตกตะกอนของ CSH ถ้าบางโลหะสามารถเกิด Complexation
 กับแคลเซียมในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เกิดการจัดรูปเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ
 หรือ Chelating Calcium ทำให้แคลเซียมในสารละลายลดลง การเกิด CSH ก็จะน้อยลงตามไป
 ด้วย รูปแบบต่อมา คือ โลหะจะดูดติดอยู่ที่ผิวของซีเมนต์ ทำให้ขัดขวางการสัมผัสระหว่างซีเมนต์
 กับน้ำ ดังนั้นจึงเป็นการยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชัน รูปแบบสุดท้ายที่อาจเป็นไปได้ คือ โลหะจะไป
 เกาะติดที่ผิวของซีเมนต์แต่น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เล็กน้อยซึ่งจัดว่าเป็นตัวหน่วง
 กลไกนี้เรียกว่า Protective Coating/Osmotic Bursting ทำให้ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา
 ไฮเดรชันเป็นไปได้ช้าแต่ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยา เพราะว่าเมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดแรงดันจาก
 ด้านในของเม็ดซีเมนต์ ผลักให้โลหะหลุดออกทำให้น้ำสัมผัสกับซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป
 ได้อย่างต่อเนื่องในอัตราปกติ (Bishop, Bott และ Barron, 2003)



ต้นฉบับไม่มีหน้านี้

NO THIS PAGE IN ORIGINAL

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.8 ตะกรันทองแดง (Copper Slag)

2.8.1 ความหมายและแหล่งกำเนิด

ตะกรันทองแดง เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากโรงงานผลิตทองแดงจากการถลุงทองแดงโดยนำเอาสินแร่ที่ขุดได้มาร่อนแยกดินทรายออกก่อนที่จะนำไปถลุงในเตาดถลุง ในกระบวนการถลุงแร่ นอกจากจะได้โลหะทองแดงออกมาแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นที่ไม่ถูกกลดออกซิเจนเป็นโลหะ ส่วนประกอบดังกล่าวจะรวมตัวกันเป็นตะกรันทองแดง และเกิดจากเตาหลอมของการผลิตทองแดงด้วยความร้อน หรือเกิดจากการถลุงทองแดงที่ผสมแร่ซัลไฟด์บางชนิด ในส่วนการถลุงโลหะนี้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มี 2 สภาวะคือ โลหะทองแดงที่มีส่วนผสมแร่ซัลไฟด์สูงจะอยู่ในรูปของซัลไฟด์ (Sulfides) และตะกรันที่อยู่ในรูปออกไซด์ (Oxides) ในการผลิตให้ได้โลหะทองแดงใน 1 ตัน จะก่อให้เกิดตะกรันทองแดงประมาณ 2.2 ตันและในแต่ละปีจะมีปริมาณของตะกรันนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตทองแดงทั่วโลกประมาณ 24.6 ล้านตัน ปริมาณที่มากนี้ไม่สามารถทำการกำจัดโดยการฝังได้ทั้งหมด เนื่องจากข้อจำกัดของพื้นที่ฝังกลบ ในช่วง 20 ปีที่ผ่านมา มีการพยายามถึงความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงอย่างกว้างขวาง (Gorai, Jana และ Premchand, 2003) ส่วนใหญ่ปริมาณตะกรันทองแดงที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลก แสดงในตารางที่ 2.22

ตารางที่ 2.22 ปริมาณตะกรันทองแดงที่เกิดขึ้นในแต่ละภูมิภาคของโลก (Gorai, Jana และ Premchand, 2003)

ภูมิภาค	ปริมาณของตะกรันทองแดง (Copper Slag) ต่อปี (ล้านตัน)
เอเชีย	7.26
อเมริกาเหนือ	5.90
ยุโรป	5.56
อเมริกาใต้	4.18
แอฟริกา	1.23

2.8.2 การประโยชน์ของตะกรันทองแดง

การนำไปใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงขึ้นอยู่กับชนิดของตะกรัน การจัดการกับตะกรันทองแดงมีหลายวิธีและนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการกล่าวไว้ว่า การใช้ตะกรันทองแดงเป็นส่วนหนึ่งในงานขัดผิว ขัดวัสดุ งานตัด กระเบื้อง แก้วและวัสดุใช้มุงหลังคา นอกจากนี้ยังมีศักยภาพการใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงเป็นส่วนหนึ่งในการแทนที่ในซีเมนต์และมวลรวมในงานคอนกรีตและงานแอสฟัลต์คอนกรีต (Al-Jabri และคณะ, 2006)

คุณสมบัติที่ดีบางประการของตะกรันทองแดงสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุผสมในงานปูทางแอสฟัลต์ การกำจัดตะกรันทองแดงด้วยการนำไปทิ้งหลุมขยะเป็นการสูญเสียมูลค่าของโลหะหนักไปโดยเปล่าประโยชน์และอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมตามมาได้ คุณสมบัติที่ดีหลายประการทั้งทางกายภาพและลักษณะเชิงกลของตะกรันทองแดงจึงทำให้มีการใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น การสกัดโลหะหนัก การเตรียมเป็นวัสดุที่มีค่าในผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ การแทนที่ซีเมนต์ในงานคอนกรีต การถมที่ วัสดุโรยทาง งานขัดผิว มวลรวม ผลิตภัณฑ์ กระเบื้อง เป็นต้น (Gorai, Jana และ Premchand, 2003)

การใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงของ Tixier, Arino-Moreno และ Mobasher ในปี 1996 โดยใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตซีเมนต์ การใช้แทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต การถมที่ วัสดุโรยทาง ซึ่งจะช่วยให้ง่ายรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

Toshiki, Osamu และ Kenji ทำการศึกษาในปี 2000 พบว่าตะกรันทองแดงถูกนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดงานคอนกรีต โดยอธิบายถึงความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีตมีค่ามากขึ้น ในการประยุกต์การใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดง ตัวอย่างเช่น การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานคอนกรีต และ/หรือ การใช้เป็นวัสดุเติมในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นผลประโยชน์ที่ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดควบคู่ไปกับการลดต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ (Mobasher, Arino และ Devaguptapu, 1996)

2.8.3 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกลของตะกรันทองแดง (Physical and Mechanical Properties)

ตะกรันทองแดงที่มีลักษณะเป็นผลึกแน่น (Air-cooled Copper Slag) จะมีสีดำ ใสเหมือนแก้ว ความถ่วงจำเพาะจะมีค่าแปรผันตามปริมาณของเหล็ก ตั้งแต่ 2.8 จนถึง 3.8 หน่วยน้ำหนักค่อนข้างจะสูงกว่าวัสดุมวลคละต่างๆไป ความสามารถในการดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ ส่วนตะกรันทองแดงที่มีลักษณะผลึกที่เบา (Granulated Copper Slag) จะมีรูพรุนมากกว่า จึงทำให้มีความถ่วงจำเพาะที่ต่ำกว่าและความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงกว่าตะกรันทองแดงที่มีลักษณะเป็นผลึกแน่น ตะกรันทองแดงที่มีลักษณะผลึกที่เบาจะถูกทำให้มีรูปร่างของอนุภาคเป็นเหลี่ยมมุมที่สม่ำเสมอโดยส่วนใหญ่จะมีขนาด ระหว่าง 4.75 และ 0.075 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถผ่านรูตะแกรงเบอร์ 200 ได้ ตะกรันที่หลอมเหลวจะถูกนำออกจากเตาหลอมที่อุณหภูมิ 1,000-1,300 องศาเซลเซียส ถ้านำตะกรันที่หลอมเหลวมาทำให้เย็นลงทันที จะได้ตะกรันทองแดงที่มีลักษณะใสคล้ายแก้วเกิดขึ้น (Gorai, Jana และ Premchand, 2003; Shi และ Qian, 2000) ลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกลของตะกรันทองแดง ดังแสดงในตารางที่ 2.23

ตารางที่ 2.23 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกลของตะกรันทองแดง (Gorai, Jana และ Premchand, 2003)

ลักษณะทางกายภาพและลักษณะเชิงกล	ข้อมูล
ลักษณะทั่วไป	สีดำ สีเหมือนแก้ว มีรูพรุน (ตะกรันที่มีลักษณะผลึกที่เบาจะมีรูพรุน มากกว่าตะกรันที่มีลักษณะแน่น)
ร้อยละการดูดซึม	0.13
ความหนาแน่นรวม (ปอนด์ต่อลูกบาศก์ฟุต)	144-162
สภาพการนำไฟฟ้า (ไมโครโหนดต่อเซนติเมตร)	500
ความถ่วงจำเพาะ	2.8-3.8
ความชื้น	น้อยกว่าร้อยละ 5
ร้อยละการสูญเสียการกัดกร่อน	24.1
ร้อยละการสูญเสียความอยู่ตัวของโซเดียมซัลเฟต	0.90
มุมของแรงเสียดทานภายใน	40-53

2.8.4 ส่วนประกอบทางเคมี (Chemical composition)

ส่วนประกอบหลักของตะกรันทองแดง คือ เหล็ก ซิลิกา อลูมินาและแคลเซียมออกไซด์ โดยปริมาณของทองแดงมีค่าเพียงร้อยละ 0.5 ถึง 2 (Gorai, Jana และ Premchand, 2003) ตะกรันที่เกิดจากเตาดลุงทองแดงจะมีปริมาณของทองแดงมีค่าเพียงร้อยละ 1 ถึง 2 โดยอาจจะอยู่ในรูปของโลหะทองแดงเอง (Metallic Copper) รูปของแร่เหล็กผสมทองแดงชนิดหนึ่ง (Delafossite) และส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปแร่คิวพรัสออกไซด์เป็นแร่ทองแดง (Copper Silicate หรือ Cuprite) (Mobasher, Arino และ Devaguptapu, 1996)

องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันทองแดงแปรผันตามวิธีถลุง โดยองค์ประกอบในตะกรันที่เกิดจากการถลุง (Shi และ Qian, 2000) แสดงในตารางที่ 2.24

ตารางที่ 2.24 องค์ประกอบของตะกรันทองแดงที่ได้จากเตาดลุง (Shi และ Qian, 2000)

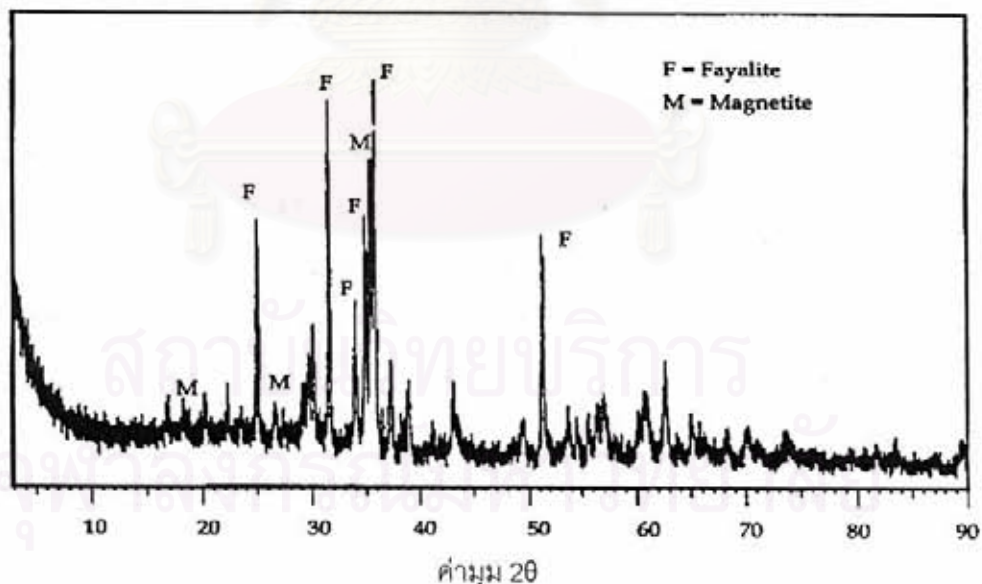
องค์ประกอบของตะกรัน	ปริมาณ (ร้อยละ)
Fe (เช่น FeO และ Fe ₃ O ₄)	30-40
SiO ₂	35-40
Al ₂ O ₃	สูงถึง 10
CaO	สูงถึง 10

นอกจากองค์ประกอบหลักที่สำคัญของตะกรันทองแดงตั้งที่กล่าวมาแล้ว แต่ต้องตระหนักว่า เนื่องจากตะกรันทองแดงมีโลหะทองแดงเป็นส่วนประกอบ ยังมีโลหะหนักที่มีความเป็นพิษปนเปื้อนอยู่ เช่น นิกเกิล ตะกั่ว แมงกานีส แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม สังกะสี และอาร์เซนิก เป็นต้น (Gorai, Jana และ Premchand, 2003; Zain และคณะ, 2004; Alter และคณะ, 2006) ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้มีความสามารถในการชะละลายหรือปะปนในสิ่งแวดล้อมและก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อความเป็นพิษของโลหะหนักนั้นๆ ได้ หากไม่ได้รับการจัดการที่ดีและเหมาะสม

2.8.5 ลักษณะโครงสร้างของตะกรันทองแดง (Slag Characterization)

จากการศึกษาในระดับจุลภาค (Microscopic Observations) ซึ่งให้เห็นว่า ส่วนใหญ่ตะกรันทองแดงมีโครงสร้างเป็นผลึก ในตะกรันออกไซด์ต่างๆ เช่น ซิลิกา อลูมินา ปูนขาวและแมกนีเซียม ซึ่งมีปริมาณของออกไซด์ทั้งหมดมากถึงร้อยละ 95 หรือมากกว่า การศึกษารูปแบบของตะกรันทองแดงโดยใช้เครื่องมือ XRD พบว่า $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, Fe_3O_4 และ $\text{Ca}(\text{Fe}\text{Mg})(\text{SiO}_3)_2$ เป็นรูปแบบหลักในตะกรัน (Kiyak และคณะ, 1999) โดยที่โลหะหนักจะเสถียรมากที่สุดเมื่ออยู่ในรูปออกไซด์และซิลิเกต วัสดุก่อสร้างจากการใช้ตะกรันทองแดงจึงมีความทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดี

การวิเคราะห์รูปแบบของตัวอย่างตะกรันทองแดง โดยใช้เครื่องมือ XRD พบว่า แมกนีไทต์ (Magnetite หรือ Fe_3O_4) และฟายาลไลท์ (Fayalite หรือ Fe_2SiO_4) ซึ่งเป็นรูปแบบหลักของตะกรัน (Mobasher, Arino และ Devaguptapu, 1996) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 รูปแบบหลักของตะกรันทองแดงที่วัดด้วยเครื่อง XRD



รูปที่ 2.8 รูปแบบหลักของตะกรันทองแดงที่วัดด้วยเครื่อง XRD (Mobasher, Arino และ Devaguptapu, 1996)

2.8.6 ปฏิกริยาไฮเดรชันของตะกั่วทองแดงในงานคอนกรีต

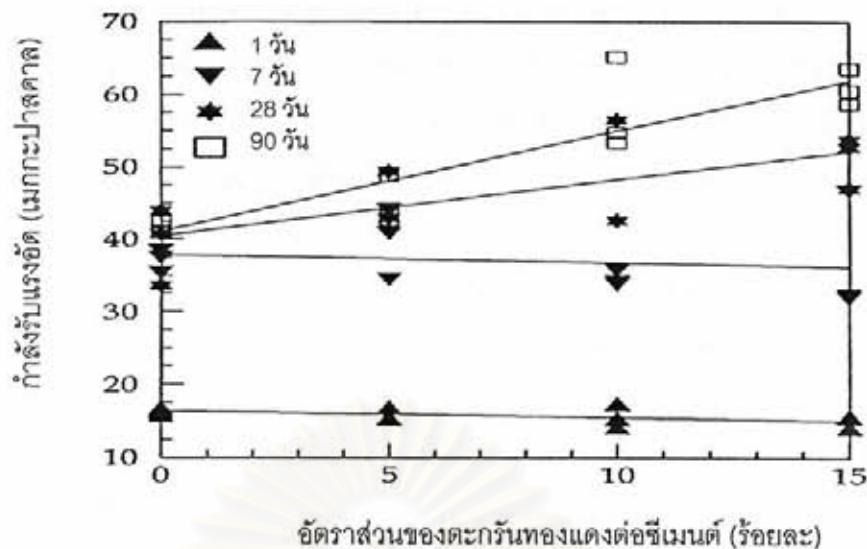
การศึกษาผลของปฏิกริยาไฮเดรชันของตะกั่วทองแดงที่นำมาใช้เป็นวัสดุในงานคอนกรีตพบว่าสามารถใช้ตะกั่วทองแดงเป็นส่วนหนึ่งในการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ถึงร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ผลที่ได้ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของกำลังรับแรงอัดของปฏิกริยาไฮเดรชันจนถึง 90 วัน และมีลักษณะทางโครงสร้างที่หนาแน่นขึ้น (Mobasher, Arino และ Devaguptapu, 1996)

การนำตะกั่วทองแดงที่มีปริมาณของโลหะหนัก เช่น ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี มาทำให้เสถียรโดยการทำเป็นก้อนแข็งร่วมกับซีเมนต์ (Cement-Based Solidification/Stabilization Process) พบว่า เมื่อใช้ตะกั่วทองแดงแทนที่ซีเมนต์มากกว่าร้อยละ 10 จะทำให้เกิดการหน่วงปฏิกริยาไฮเดรชันของโลหะหนักบางตัว เช่น ทองแดง ตะกั่ว สังกะสี จะหน่วงระยะเวลาการก่อตัวเริ่มแรกและระยะเวลาในการก่อตัวสุดท้ายของซีเมนต์ โดยไปขัดขวางการทำปฏิกริยาไฮเดรชันเป็นผลทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณตะกั่วทองแดงนั่นเอง นอกจากนี้กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าใช้ตะกั่วทองแดงแทนที่ซีเมนต์จะมีค่าต่ำกว่าของก้อนมอร์ต้าที่ใช้ซีเมนต์เพียงอย่างเดียว อาจมีสาเหตุเนื่องมาจากการหน่วงปฏิกริยาไฮเดรชันของโลหะหนักบางตัวทำให้ไปขัดขวางการก่อตัวได้ (Zain และคณะ, 2004)

2.8.7 ผลของตะกั่วทองแดงต่อความแข็งแรงของคอนกรีต

การทดสอบมอร์ต้าที่ใช้ตะกั่วทองแดงแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 15 อายุบ่มที่ 1 7 28 และ 90 วัน พบว่า ในช่วง 1 วัน กำลังรับแรงอัดจะลดลง ขณะที่หลังจากอายุบ่ม 7 วันผ่านไป กำลังรับแรงอัดจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปจนถึงอายุบ่มที่ 90 วัน ทุกๆ อัตราส่วนที่ใช้ตะกั่วทองแดงแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จากการลดลงของความพรุนคาพิวลารีจะทำให้โครงสร้างภายในมีความหนาแน่นขึ้น ซึ่งมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต่อไปและพบว่ามี การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของกำลังรับแรงอัดจนถึง 1 ปี (Mobasher, Arino และ Devaguptapu, 1996; Tixier, Devaguptapu และ Mobasher, 1996) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ผลของกำลังรับแรงอัดในคอนกรีตที่เกิดจากการใช้ตะกั่วทองแดง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.9 ผลของกำลังรับแรงอัดในคอนกรีตที่เกิดจากการใช้ตะกั่วทองแดง (Mobasher, Arino และ Devaguptapu, 1996; Tixier, Devaguptapu และ Mobasher, 1996)

2.9 การชะละลาย

ในการทดสอบการชะละลายสามารถแบ่งได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ ความสามารถในการชะละลายขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักนั้นๆ ในการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในก้อนอมอร์ตานี้จะเปรียบเทียบกับความสามารถในการชะละลายโลหะหนักทั้งกฎหมายของประเทศไทยและประเทศสหรัฐอเมริกา มีวิธีดังนี้

2.9.1 มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว (พ.ศ. 2548)

ปัจจุบันประเทศไทยใช้มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์หลุมฝังกลบ น้ำสกัดใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท 0.2 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 5.0 ± 0.1 เมื่อวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่ประกาศนี้แล้วเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดกับค่ามาตรฐานกำหนด หากมีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด ต้องมีเข้มงวดในการจัดการสารอันตรายนั้นๆ อย่างถูกวิธีต่อไป

2.9.2 มาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311

มาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 เป็นมาตรฐานของประเทศสหรัฐอเมริกา ในประเทศต่างๆ นิยมใช้ในการทดสอบหาปริมาณโลหะหรือวัตถุพิษของสารอันตราย โดยเป็นวิธีที่ออกแบบมาเพื่อหาการชะละลายของทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง และของเหลว ซึ่งเป็นการจำลองการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Landfill) เมื่อวิเคราะห์น้ำสกัดแล้วเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักในน้ำสกัดกับค่ามาตรฐานกำหนด หากมีปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัดมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด ต้องมีการจัดการสารอันตรายนั้นๆ ต่อไป

การศึกษาที่ผ่านมามีผลของการทดสอบการชะละลาย (Leaching Test) เมื่อทดสอบการชะละลายโลหะหนักในตะกรันทองแดงด้วย Toxic Characteristic Leach Procedure หรือ TCLP พบว่ามีค่าต่ำกว่าและผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ตะกรันทองแดงจึงถูกพิจารณาว่าเป็นของเสียที่ไม่อันตราย (Alter, 2005)

Zain และคณะ, 2004 ศึกษาการนำตะกรันทองแดงมาทำเป็นก้อนแข็งในการฝังกลบ พบว่าการทดสอบการชะละลายด้วย Toxic Characteristic Leach Procedure หรือ TCLP พบว่าความสามารถในการชะละลายออกมาของโลหะหนักในตะกรันทองแดงและในก้อนมอร์ตามีค่าต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด

ถึงแม้ว่าตะกรันทองแดงถูกพิจารณาว่าเป็นของเสียที่ไม่อันตราย แต่ถ้าหากมีปริมาณที่มากและไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้อง ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ที่มีอยู่ในตะกรันความสามารถในการชะละลายออกมาของโลหะหนักในตะกรันจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา ตะกรันทองแดงถูกนำมาใช้แทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ไม่มีการนำตะกรันทองแดงมาเผาร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างแน่ชัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาตะกรันทองแดงซึ่งเป็นวัตถุอันตรายทดแทนมาเผาร่วมกับกระบวนการผลิตจริง ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการแปรผันอัตราส่วนของตะกรันทองแดงในวัตถุดิบทั้งหมด (Raw Mix) โดยคำนึงถึงปริมาณโลหะหนักที่มีในปูนซีเมนต์ และทำการทดสอบในด้านต่างๆ หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ งานวิจัยนี้จึงเป็นกรณีศึกษาเพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจในศักยภาพของตะกรันทองแดงการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งนอกจากเป็นการกำจัดกากของเสียอุตสาหกรรมแล้ว ยังสามารถนำกากของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกด้วย

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในการวิจัยนี้ แบ่งขั้นตอนการศึกษาเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกักรันทองแดง
- ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์
- ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีในปูนซีเมนต์
- ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เฟส
- ขั้นตอนที่ 5 การหล่อก้อนมอร์ตาร์และการทดสอบกำลังรับแรงอัด
- ขั้นตอนที่ 6 ทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์

3.2 ตัวอย่างตะกักรันทองแดงและปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 ตัวอย่างตะกักรันทองแดง

การวิจัยครั้งนี้ ตะกักรันทองแดงที่จะใช้เผาร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ได้มาจากบริษัท ซุมิโตโม (Sumitomo) ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นบริษัทถลุงแร่ทองแดง

ทางบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ดำเนินการมาประมาณ 1 ปี ในการนำตะกักรันทองแดงมาใช้ร่วมในกระบวนการผลิตจริงในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ ปริมาณตะกักรันที่รับมาประมาณ 120,000 ตันต่อปี ช่วงระยะเวลา 3 เดือนต่อครั้ง ครั้งละประมาณ 30,000 ตันต่อเดือน

อัตราส่วนของวัตถุดิบโดยประมาณที่ใช้ในการผลิตปูนเม็ดประกอบด้วย หินปูน (Limestone) ร้อยละ 85 หินเชลอะลูมินาสูง (Shale Mix) ร้อยละ 12 หินเชลซิลิกาสูง (Shale Core) ร้อยละ 1.5 และแร่เหล็ก (Iron Ore) ร้อยละ 1.5 ในการศึกษาครั้งนี้ นำตะกักรันทองแดงมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนแร่เหล็กและซิลิกา เนื่องจากตะกักรันทองแดงมีปริมาณของเหล็กและซิลิกาสูง จึงสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบทดแทนเผาร่วมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยแปรผันอัตราส่วนของตะกักรันทองแดงในวัตถุดิบทั้งหมด จำนวน 9 อัตราส่วน คือ ร้อยละ 0 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 และ 3.2 ตามลำดับ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ ± 0.1

3.2.2 ตัวอย่างปูนซีเมนต์

ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในครั้งนี้ ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) โดยจะทำการเก็บตัวอย่างจากกระบวนการผลิตจริงในโรงงานผลิตที่มีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนร่วมกับวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลักในกระบวนการผลิต

ในการเก็บตัวอย่างมีวิธีการเก็บเป็นแบบกะ (Batch) ระยะเวลาที่เก็บตัวอย่างปูนซีเมนต์ คือ เดือนกันยายน พ.ศ. 2548 จำนวน 20 ตัวอย่าง เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2548 จำนวน 1 ตัวอย่าง และเดือนมีนาคม พ.ศ. 2549 จำนวน 1 ตัวอย่าง จำนวนตัวอย่างทั้งหมด 22 กะ

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และการหล่อก้อนมอร์ตาร์ นำตัวอย่างปูนเม็ดที่ผ่านการบดแล้วมาผสมกับยิปซัมในอัตราส่วนผงปูนต่อยิปซัม เท่ากับ 96 ต่อ 4 โดยอัตราส่วนที่ใช้จะเป็นอัตราส่วนจริงที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์โดยทั่วไป เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมือนกับที่จำหน่ายในท้องตลาด

ในงานวิจัยนี้มีการควบคุมเชื้อเพลิงให้มีลักษณะเหมือนกันทุกอัตราส่วน โดยเชื้อเพลิงหลัก (Traditional Fuel) คือ ลิกไนต์ บิทูมินัส และถ่านหิน ส่วนเชื้อเพลิงทดแทน (Alternative Fuel) ประกอบด้วยกากลิกไนต์ และส่วนผสมของกากอาหารสัตว์ ได้แก่ กากผลิตภัณฑอาหารสัตว์ กากข้าวโพด แกลบ และเศษผงผลิตภัณฑสำหรับบรจุอาหารสัตว์

3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
2. เตาอบวัสดุ
3. ตะแกรงแยกขนาด
4. เครื่องบดปูนเม็ด
5. แบบหล่อซีเมนต์
6. เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต
7. เตาเผา (Furnace)
8. เครื่องแอร์เพอร์มิอะบิลิตีแบบเบลน (The Blaine Air Permeability Apparatus)
9. เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)
10. เครื่องวัดพีเอช (pH Meter)
11. เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester)
12. เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer)

13. เครื่อง SEM/EDS (Scanning Electron Microscope/ Energy Dispersive X-ray Spectrometer)
14. เครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
15. เครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer)
16. เครื่อง XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer)
17. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง

3.3.2 สารเคมี

1. กรดอะซิติก (HOAc)
2. กรดไนตริก (HNO₃)
3. กรดบอริก (H₃BO₃)
4. กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)
5. กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
6. กรดซัลฟิวริก (H₂SO₄)
7. แมกนีเซียมคลอไรด์ (MgCl₂)
8. โพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr)
9. โซเดียมอะซิเตต (NaOAc)
10. ไฮดรอกซิลามีน ไฮโดรคลอไรด์ (NH₂·OH.HCl)
11. แอมโมเนียมอะซิเตต (NH₄OAc)
12. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H₂O₂)
13. กรดไฮโดรเจนเปอร์คลอไรด์ (HClO₄)
14. สารละลายมาตรฐาน 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของโลหะหนักผสม

3.4 การดำเนินการวิจัย

- #### 3.4.1 ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง
- การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง ทำการทดลอง

จำนวน 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง

1. วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดง

1.1 ลักษณะทั่วไป (Appearance)

เป็นการศึกษาลักษณะทั่วไปของตะกรัน โดยใช้หลักการสังเกต เช่น สี รูปร่าง

เป็นต้น

1.2 การกระจายขนาดคละ (Size Distribution)

การวิเคราะห์การกระจายขนาดคละของตะกรันทองแดง การทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-06 ด้วยวิธีผ่านชุดตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) โดยการร่อนตัวอย่างตะกรันผ่านตะแกรงขนาดเบอร์ต่างๆ ได้แก่เบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) เบอร์ 8 (2.36 มิลลิเมตร) เบอร์ 10 (2 มิลลิเมตร) เบอร์ 30 (600 ไมโครเมตร) เบอร์ 50 (300 ไมโครเมตร) เบอร์ 100 (150 ไมโครเมตร) และ เบอร์ 200 (75 ไมโครเมตร) ตามลำดับ แล้วชั่งน้ำหนักตะกรันที่ค้างอยู่บนตะแกรงแต่ละขนาด แล้วนำผลที่ได้ไปเขียนกราฟเพื่อหาขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ย และค่าสัมประสิทธิ์การกระจายขนาดคละ (Coefficient of Uniformity, C_u) ของตัวอย่างตะกรัน ซึ่งสามารถวิเคราะห์อนุภาคได้ละเอียดถึง 75 ไมโครเมตร

1.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ทำโดยทราบน้ำหนักตะกรันจำนวนหนึ่งที่รู้น้ำหนักแน่นขนแทนที่ในน้ำมันก๊าด การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM C188-95

2. วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของตะกรันทองแดง

2.1 พีเอช (pH)

วัดค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยเครื่องวัดพีเอช (pH Meter)

2.2 ความชื้น (Moisture Content)

นำตัวอย่างมาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ระยะเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง แล้วหาอัตราส่วนของน้ำที่หายไปต่อปริมาณของน้ำทั้งหมด การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM C114-05

2.3 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition หรือ LOI)

การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา แสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่มีในวัสดุ การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM C114-05 วิธีการทดสอบทำโดยการเผาตัวอย่างตะกรันที่อุณหภูมิ 950 ± 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

2.4 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปออกไซด์ ด้วยเครื่อง XRF นำตัวอย่างจำนวน 5 กรัม ผสมกรดบอริกร้อยละ 5 ของน้ำหนักตัวอย่าง บดให้ละเอียดแล้วนำไปใส่แบบพิมพ์ แล้วกดให้แน่น จากนั้นนำตัวอย่างในแบบพิมพ์ไปวิเคราะห์

2.5 รูปแบบของสารประกอบ

ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 5 กรัม สิ่งที่ได้จากการวัดเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม 2θ และ Relative Intensity นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะแต่ละชนิดได้

2.6 ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (Total Heavy Metals)

ทำการย่อยสลายตัวอย่างด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester)

โดยใช้วิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052

ขั้นตอนการย่อยสลายตะกอนด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ มีรายละเอียดดังนี้

1. ชั่งปูนซีเมนต์หนัก 0.5 กรัม แล้วใส่ลงในหลอดเวสเซล
2. นำมาเติมกรดไนตริกจำนวน 9 ± 0.1 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริก จำนวน 2 ± 2 มิลลิลิตร เพื่อสร้างเสถียรภาพของโลหะหนักบางชนิด เช่น Ag Ba Sb Fe และ Al เป็นต้น และกรดไฮโดรฟลูออริกจำนวน 3 ± 0.1 มิลลิลิตร
3. ปิดฝาหลอดเวสเซล แล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 – 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 5.5 นาที ช่วงที่ 2 คือ ช่วงอุณหภูมิคงที่ 180 องศาเซลเซียสใช้เวลา 9.5 นาที และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงลดอุณหภูมิใช้เวลา 5-15 นาที
4. เมื่อครบกำหนด นำหลอดเวสเซลออกจากเครื่องทิ้งไว้ให้เย็น เติมกรดบอริกจำนวน 37 มิลลิลิตร
5. ปิดฝาหลอดเวสเซลแล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 – 160 องศาเซลเซียสใช้เวลา 13 นาที ช่วงที่ 2 คือช่วงอุณหภูมิคงที่ 160 องศาเซลเซียสใช้เวลา 6 นาที และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงลดอุณหภูมิใช้เวลา 5-15 นาที
6. เมื่อครบกำหนดนำหลอดเวสเซลออกจากเครื่องทิ้งไว้ให้เย็น ได้สารละลายใสจากนั้นนำไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP

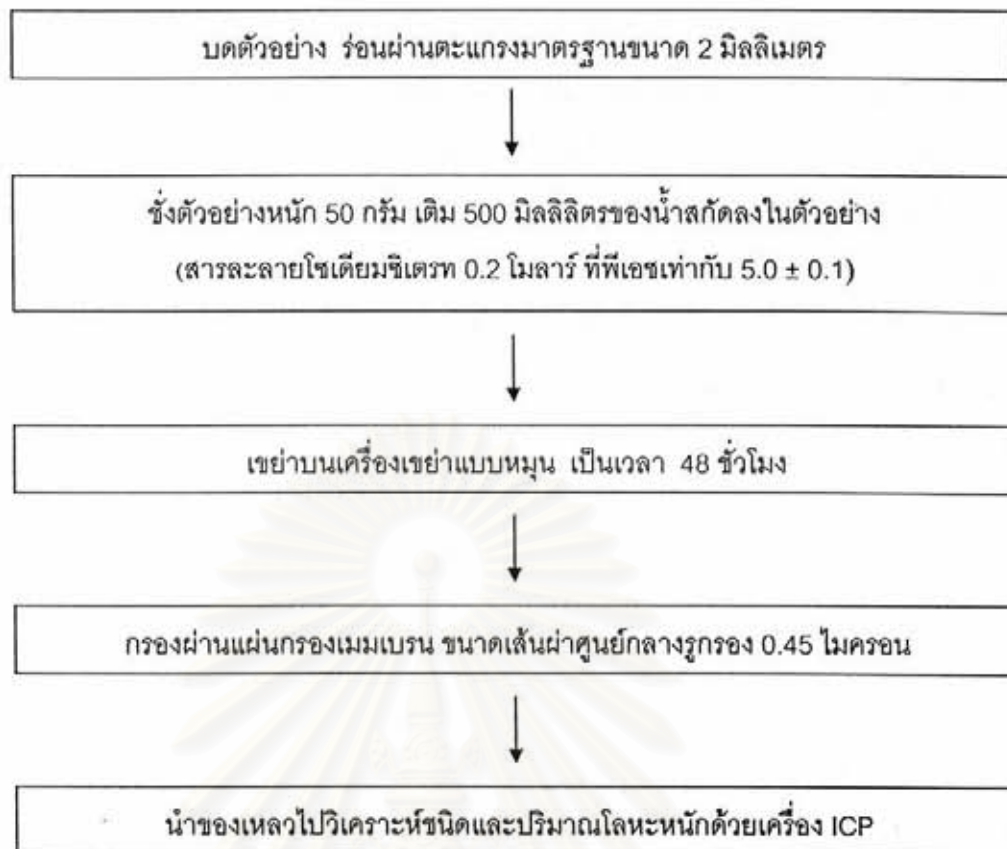
2.7 ทดสอบการชะละลาย (Leaching Test)

2.7.1 มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

การทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์หลุมฝังกลบ สำหรับสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้วที่มีลักษณะเป็นของแข็งที่สามารถบดได้ จะต้องนำไปร่อน หรือไปบด เพื่อให้สามารถร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานขนาด 2 มิลลิเมตร (เบอร์ 10) ก่อนนำไปสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) หากมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) น้อยกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) แสดงถึงของเสียที่ไม่เป็นอันตราย

วิธี Waste Extraction Test (WET) มีขั้นตอนดังนี้

1. ให้ใช้สารละลายโซเดียมซิเตรท (sodium citrate) ความเข้มข้น 0.2 โมลาร์ ที่พีเอชเท่ากับ 5.0 ± 0.1 เตรียมโดยนำสารละลายกรดซิตริกในปริมาณที่เหมาะสมมาปรับพีเอชให้เป็น 5.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 4.0 นอร์มัล
 2. สารละลายกรดซิตริก สามารถเตรียมได้โดยนำเอากรดซิตริกไปละลายในน้ำกลั่น (deionized water)
 3. นำตัวอย่าง 50 กรัมใส่ลงในภาชนะที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกประเภทโพลีเอทิลีน (ควรใช้ภาชนะที่ทำจากแก้วเมื่อต้องการวิเคราะห์หาสารอินทรีย์อันตราย) ภาชนะที่ใช้ในการสกัด ควรผ่านการล้าง (rinsed) อย่างต่อเนื่องด้วยสารละลายกรดไนตริก ซึ่งสามารถเตรียมได้จากการนำเอาสารละลายกรดไนตริกมาผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยปริมาตร
 4. เติมน้ำสกัด 500 มิลลิลิตรลงในตัวอย่าง เมื่อเสร็จแล้วให้ทำการปิดฝาภาชนะอย่างรวดเร็ว และนำไปเขย่าโดยใช้ table shaker หรือ overhead stirrer หรือ rotary extractor ซึ่งสามารถทำให้ของผสมอยู่ในสภาพถูกกวนผสมอยู่ตลอดเวลา (vigorously agitated suspension) เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
 5. จากนั้นนำเอาของผสมไปกรอง หรืออาจปั่นด้วยแรงเหวี่ยง (centrifuged) แล้วมากรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน โดยใช้ thick-walled suction flask ที่สะอาด สำหรับของแข็งขนาดหยาบสามารถใช้ Pressure filtration แทน vacuum filtration ได้ สำหรับของแข็งขนาดเล็กอาจต้องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบถึง $10,000 \times G$ ก่อนนำไปกรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน (membrane filter) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.45 ไมครอน
 6. ควรปรับอุณหภูมิในระหว่างการสกัดให้อยู่ระหว่าง 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส
 7. ในกรณีที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ (metal elements) เท่านั้น ให้ถ่ายสารละลายที่กรองได้จาก ข้อ 5. ลงในขวดโพลีเอทิลีน และปรับสภาพให้เป็นกรดด้วยกรดไนตริก จนความเข้มข้นของกรดในสารละลายผสม (สารละลายที่กรองได้จากข้อ 5. ผสมกับกรดไนตริก) เป็นร้อยละ 5 โดยปริมาตร (ให้ปรับสภาพให้เป็นกรดทันทีหลังจากผ่านการกรอง)
 8. นำเอาของเหลวที่ผ่านการกรองไปทำการวิเคราะห์หาค่าของสารนั้นด้วยเครื่อง ICP
- แผนผังการทดสอบการชะละลายของตะกอนทองแดงตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 สามารถสรุปได้ดังรูป 3.1



รูป 3.1 แผนผังการทดสอบการชะละลายของตะกั่วทองแดงตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

2.7.2 มาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method Method 1311

ในการทดสอบการชะละลายของตะกั่วทองแดงตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP) ซึ่งเป็นวิธีออกแบบมาเพื่อหาการชะละลายของทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว ซึ่งเป็นการจำลองการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Landfill) มีวิธีทดสอบดังต่อไปนี้

1. การเตรียมน้ำสกัด

น้ำสกัดชนิดที่ 1 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 64.3 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้อง พีเอชจะมีค่าประมาณ 4.93 ± 0.05

น้ำสกัดชนิดที่ 2 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้องพีเอชจะมีค่าประมาณ 2.88 ± 0.05

2. การเลือกน้ำสกัดให้เหมาะสมในกรณีปริมาณของแข็งในตัวอย่าง $\geq 0.5\%$

2.1 แบ่งตัวอย่างที่เป็นของแข็งขนาด ≤ 1 มิลลิเมตร จำนวน 500 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watchglass) นำไปกวนด้วยแมกเนติกสเตอร์เลอร์เป็นเวลา 5 นาที วัดและจดค่าพีเอช ถ้า พีเอช < 5.0 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1

2.2 ถ้าพีเอช ≥ 5.0 เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา นำไปให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและตรวจวัดค่าพีเอช ถ้าพีเอช < 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1 แต่ถ้าพีเอช > 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 2

3. วิธีการทดสอบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. หากตัวอย่างเป็นของเหลวหรือมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่อง ICP

2. หากตัวอย่างมีของแข็งปนอยู่ในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 0.5 ให้นำมาทดสอบด้วยวิธีดังต่อไปนี้

2.1 นำตัวอย่างจำนวน 100 กรัม ใส่ลงในขวดโพลีโพรพิลีน

2.2 เลือกน้ำสกัดที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการทดสอบดังที่กล่าวไว้แล้วด้านบนเติมลงในขวด แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

2.3 เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator) ที่มีอัตราการหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง

2.4 กรองสารละลายจากการสกัด (Leachate) ด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

2.5 นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วมาทำการปรับค่าพีเอชให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไตรคลอริกจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP

แผนผังการทดสอบการชะละลายของตะกัณฑ์ทองแดงตามมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 สามารถสรุปได้ดังรูป 3.2



รูป 3.2 แผนผังการทดสอบการชะละลายของตะกั่วทองแดงตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311

สรุปตารางการศึกษาในขั้นตอนที่ 1. ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกั่วทองแดง แสดงในตารางที่ 3.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกั่วทองแดง

หัวข้อที่ศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
<u>ลักษณะทางกายภาพ</u> 1. ลักษณะทั่วไป 2. การกระจายตัวขนาดคละ 3. ความถ่วงจำเพาะ	การสังเกต ASTM C136-06 วิธีผ่านตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ASTM C188-95
หัวข้อที่ศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
<u>ลักษณะทางเคมี</u> 1. พีเอช 2. ความชื้น 3. การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุ 4. องค์ประกอบทางเคมี 5. รูปแบบของสารประกอบ 6. ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด 7. การชะละลาย	เครื่องวัดพีเอช ASTM C114-05 ASTM C114-05 เครื่อง XRF เครื่อง XRD เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ ของ US EPA SW-846 Method 3052 เครื่อง ICP -ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) เครื่อง ICP - US EPA SW-846 Method 1311 เครื่อง ICP

3.4.2 ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์

การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ จะทำซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง ทำการย่อยสลายตัวอย่างด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยใช้วิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 ทดสอบเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 2.6

3.4.3 ชั้นตอนที่ 3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์

การศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ จะทำซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง การเลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์ ในการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดหลักเกณฑ์ในการเลือกตัวอย่าง คือ พิจารณาตัวอย่างที่มีโลหะหนักในปริมาณสูงเกินเกณฑ์การผลิตปูนซีเมนต์ (SQ-A-012) และ/หรือเป็นโลหะหนักที่มีปริมาณสูงสุดในแต่ละอัตราส่วน

3.4.3.1 วิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์

1. ความละเอียด (Fineness)

ทดสอบโดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มิอะบิลิตีแบบเบลน (The Blaine Air Permeability Apparatus) โดยวัดในค่าของพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM C204-05 โดยวัดระยะเวลาที่อากาศปริมาตรแน่นอนจำนวนหนึ่งไหลผ่านชั้นอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ได้บรรจุให้มีความพรุน (Porosity) ตามที่กำหนด อากาศจะผ่านชั้นปูนซีเมนต์ที่ละเอียดได้ยากกว่าและใช้เวลามากกว่า สามารถคำนวณความละเอียดของปูนซีเมนต์ได้จากระยะเวลาที่อากาศไหลผ่านชั้นปูนซีเมนต์ โดยเปรียบเทียบกับค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาตรฐานที่รู้ค่าความละเอียด มาตรฐานกำหนดค่าความละเอียดต่ำสุดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาไม่ต่ำกว่า 2,800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม

2. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

โดยทราบน้ำหนักปูนซีเมนต์จำนวนหนึ่งที่รู้น้ำหนักแน่นอนแทนที่ในน้ำมันก๊าด การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM C188-95

3.4.3.2 วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์

1. ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition หรือ LOI)

การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา แสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่มีในวัสดุ การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM C114-05 วิธีการทดสอบทำโดยการเผาตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 950±50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

2. องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปออกไซด์ ด้วยเครื่อง XRF นำตัวอย่างประมาณ 5 กรัม บดให้ละเอียด และนำไปใส่แบบพิมพ์แล้วกดให้แน่น จากนั้นนำตัวอย่างในแบบพิมพ์ไปวิเคราะห์

สรุปตารางการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดและการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีในปูนซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดและการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีในปูนซีเมนต์

หัวข้อที่ทำการศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
การศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด	เครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟของ US EPA SW-846 Method 3052 เครื่อง ICP
การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี <ol style="list-style-type: none"> 1. ความละเอียด 2. ความตึงจำเพาะ 3. การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุ 4. องค์ประกอบทางเคมี 	ASTM C204-05 ASTM C188-95 ASTM C114-05 เครื่อง XRF

3.4.4 ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เฟส

การศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เฟส จะทำซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละการทดลอง

3.4.4.1 การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เฟส

นำตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ มาผสมน้ำในอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ผสมให้เข้ากัน เทใส่ถุงพลาสติกที่มีซิปล็อค ทำการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน เมื่อครบกำหนดแล้ว นำตัวอย่างมาทำการบดให้ละเอียด ทำการไล่ความชื้นโดยใช้อะซิโตน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเข้าตู้ดูดความชื้น (Desiccator) รอไว้เพื่อนำไปใช้ต่อไป

3.4.4.2 การศึกษาสารประกอบของโลหะหนักในซีเมนต์เฟส

1. การศึกษาลักษณะกายภาพและการกระจายของโลหะหนัก

การหาลักษณะกายภาพและการกระจายตัวของโลหะหนักตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือเครื่อง SEM เพื่อสังเกตลักษณะอนุภาคในโครงสร้างซีเมนต์เฟสระดับจุลภาค (Microstructure) และเมื่อต้องการตรวจสอบถึงรายละเอียดของปริมาณและชนิดที่โลหะหนักที่แน่นอนในจุดที่สนใจ จำเป็นต้องทำการหาองค์ประกอบที่เป็นธาตุด้วย EDS หรือ Energy Dispersive X-ray Spectrometer การเตรียมตัวอย่างทำโดยนำตัวอย่างมาทำให้แตก (Crack) แล้วนำมาติดบนกระดาษคาร์บอนบนแป้นยึดอลูมิเนียมและนำไปตรวจวัดต่อไป

2. ตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก

ตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก (Mineralogical Composition) ด้วยเครื่อง XRD โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 5 กรัม สิ่งที่ได้จากการวัดเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม 2θ และ Relative Intensity แล้วนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะแต่ละชนิดได้

3. ตรวจวัดพันธะของสารประกอบโลหะหนัก

ตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 0.005 กรัม และใช้ปริมาณของโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) 0.050 กรัม กำหนดความถี่ 200 ครั้งต่อการวัด 1 ครั้ง สิ่งที่ได้จากการวัดคือ Absorbance ของสารประกอบต่างๆ นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี เพื่อทราบชนิดของสารประกอบที่อยู่ในตัวอย่าง

4. ตรวจวัดชนิดของสารประกอบโลหะหนัก

โดยใช้วิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักหรือ Sequential Extraction ตามแบบของ Tessier, Campbell และ Bisson ที่ศึกษาไว้เมื่อปี 1979 ซึ่งสารประกอบโลหะหนักแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายได้ในน้ำสกัดที่แตกต่างกัน จากนั้นนำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP

ขั้นตอนการทดลองการสกัดสารประกอบโลหะหนัก แบ่งเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 การสกัดด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) เพื่อแยกสารที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนง่าย

- 1.1 ชั่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่บดเป็นผงหนัก 1 กรัม ใส่ลงในหลอดพลาสติกชนิดพีวีเอส
- 1.2 เติมแมกนีเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ที่พีเอช 7 จำนวน 8 มิลลิลิตร
- 1.3 นำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 1.4 นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออก เก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

ขั้นที่ 2 การสกัดด้วยโซเดียมอะซิเตด ($NaOAc$) เพื่อแยกพันธะคาร์บอนเนต

- 2.1 นำกากที่เหลือจากข้อ 1.4 มาเติมโซเดียมอะซิเตด ความเข้มข้น 1 โมลาร์ (ปรับพีเอชให้เป็น 5 ด้วยกรดอะซิติก) จำนวน 8 มิลลิลิตร
- 2.2 นำไปเข้าเครื่องเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง
- 2.3 นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออกเก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

ขั้นที่ 3 การสกัดด้วยไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) เพื่อแยกพันธะเหล็ก และแมงกานีสเชื่อมออกไซด์

3.1 นำกากที่เหลือจากข้อ 2.3 มาเติมไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.04 โมลาร์ ในกรดอะซิติก 25% ปริมาตรโดยปริมาตร จำนวน 20 มิลลิลิตร

3.2 นำไปต้มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 96 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.3 นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออกเก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

ขั้นที่ 4 การสกัดด้วยแอมโมเนียมอะซิเตต (NH_4OAc) เพื่อแยกพันธะสารอินทรีย์และ ซัลไฟด์

4.1 นำกากที่เหลือจากข้อ 3.3 นำมาเติมกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ จำนวน 3 มิลลิลิตร

4.2 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (ปรับพีเอชให้เป็น 2 ด้วยกรดไนตริก) จำนวน 5 มิลลิลิตร

4.3 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง กวน เป็นครั้งคราว

4.4 เติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30% (ปรับพีเอชให้เป็น 2 ด้วยกรดไนตริก) จำนวน 3 มิลลิลิตร

4.5 รอให้เย็น จากนั้นนำมาเติมแอมโมเนียมอะซิเตต ความเข้มข้น 3.2 โมลาร์ ในกรดไนตริก 20% ปริมาตรโดยปริมาตร จำนวน 5 มิลลิลิตร

4.6 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กวน เป็นครั้งคราว

4.7 นำตัวอย่างมาเจือจางให้เป็น 20 มิลลิลิตร นำไปเข้าเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออกเก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

ขั้นที่ 5 การสกัดกากที่เหลืออยู่ (Residual Phase) นำกากที่เหลือจากข้อ 4.7 ไปย่อยสลายด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดไฮโดรเจนเปอร์คลอไรด์ (HClO_4) นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิ 120 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 190 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นเติมกรดไนตริก 5 นอร์มัล จำนวน 5 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 70 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วนำมาเจือจางด้วยกรดไนตริก 5 % จำนวน 25 มิลลิลิตร

โดยในขั้นที่ 5 จะใช้ปริมาณโลหะหนักทั้งหมดจากขั้นตอนที่ 2 การศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์ลบผลรวมการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักจากขั้นที่ 1 ถึง 4

เมื่อสิ้นสุดการสกัดแยกทุกขั้นตอน นำน้ำที่ได้จากการสกัดแต่ละขั้นไปวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ซึ่งสามารถระบุได้โลหะหนักแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายได้ในน้ำสกัดที่ต่างชนิดกัน

แผนผังขั้นตอนการสกัดด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก สามารถสรุปได้ดังรูป 3.3



รูป 3.3 แผนผังแสดงขั้นตอนการสกัดด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก
สรุปตารางการศึกษามวลของโลหะหนักในซีเมนต์เฟลด์ แสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์

หัวข้อที่ทำการศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
1. การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์	อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.485 ต่อ 1 ระยะเวลาในการบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน
2. ลักษณะกายภาพและการกระจายตัวของโลหะหนัก	เครื่อง SEM/EDS
3. รูปแบบสารประกอบของโลหะหนักที่เป็นผลึก	เครื่อง XRD
4. พันธะของสารประกอบโลหะหนัก	เครื่อง FT-IR
5. ชนิดของสารประกอบของโลหะหนัก	Sequential Extraction เครื่อง ICP

3.4.5 ขั้นตอนที่ 5 การหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ทำการหล่อก้อนมอร์ต้า โดยบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน ในแต่ละอายุบ่มจะทำ 3 ซ้ำ และทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-05

1. นำปูนเม็ดที่ผ่านการบดแล้วผสมกับยิปซัม โดยอัตราส่วนผงปูนต่อยิปซัมเท่ากับ 96 ต่อ 4

2. นำปูนเม็ดที่ผสมยิปซัมแล้วมาผสมทราย ในอัตราส่วน 1 ต่อ 2.75 และนำไปผสมกับน้ำในอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.485

3. ผสมให้เข้ากัน เทลงในแบบหล่อขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยแบ่งการเทเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 32 ครั้งใน 10 วินาที แบ่งเป็น 4 รอบ

4. เมื่อทำการกระทุ้งครบทุกช่องแล้วให้เทซีเมนต์มอร์ต้าที่เหลือลงในแบบหล่อให้เต็ม แล้วทำการกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วให้ซีเมนต์ก้อนมอร์ต้าสูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย

5. ใช้เกรียงปาดให้ผิวหน้าเรียบ

6. เมื่อหล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ในแบบหล่อ 24 ชั่วโมง ก่อนแกะแบบออก

7. นำไปทำการบ่มขึ้นที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน

8. นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

แผนผังการหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด สามารถสรุปได้ดังรูป 3.4



รูป 3.4 แผนผังการหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด

3.4.6 ขั้นตอนที่ 6 การทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ต้า

นำก้อนมอร์ต้าที่อายุบ่ม 28 วัน จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 3.4.5 มาทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานดังต่อไปนี้

3.4.6.1 มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

การวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตราย โดยนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) ของก้อนมอร์ต้า นำของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ทดสอบเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 2.7.1

3.4.6.2 มาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311

เป็นวิธีที่ออกแบบมาเพื่อหาการชะละลายของทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็งและของเหลว ซึ่งเป็นการจำลองการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Landfill) จากนั้นนำของเหลวไปวิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ทดสอบเช่นเดียวกันกับหัวข้อ 2.7.2

สรุปตารางการศึกษาการหล่อก่อนมอร์ต้า การทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ต้าในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การหล่อก่อนมอร์ต้า การทดสอบกำลังรับแรงอัดและการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ต้า

หัวข้อที่ทำการศึกษา	มาตรฐาน/วิธี/เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์
การหล่อก่อนมอร์ต้า การทดสอบกำลังรับแรงอัด	ASTM C109/C109M-05 ระยะเวลาในการบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน
การชะละลายของก้อนมอร์ต้า ที่อายุบ่ม 28 วัน	-ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม (พ.ศ. 2548) เครื่อง ICP - US EPA SW-846 Method 1311 เครื่อง ICP

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง

4.1.1 ลักษณะทางกายภาพของตะกรันทองแดง

1. ลักษณะทั่วไป (Appearance)

เมื่อสังเกตลักษณะทั่วไปของตะกรันทองแดงที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าตะกรันที่ได้จากการถลุงแร่ทองแดงมีลักษณะเป็นก้อนแข็งมีเหลี่ยมมุม สีดำมันวาว มีรูพรุนและเปราะ ทั้งนี้ลักษณะที่เปราะ เนื่องจากตะกรันทองแดงถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วหลังจากเตาหลอมด้วยการฉีดพ่นน้ำแรงดันสูง ทำให้โครงสร้างผลึกของอนุภาคไม่สามารถฉีกตัวได้อย่างแข็งแรง ตะกรันทองแดงที่ได้นี้เรียกว่า Granulated Slag นอกจากนี้เมื่อนำเม็ดตะกรันทองแดงมาทุบให้แตก จะมีสีทองแดงปรากฏอยู่ชัดเจน

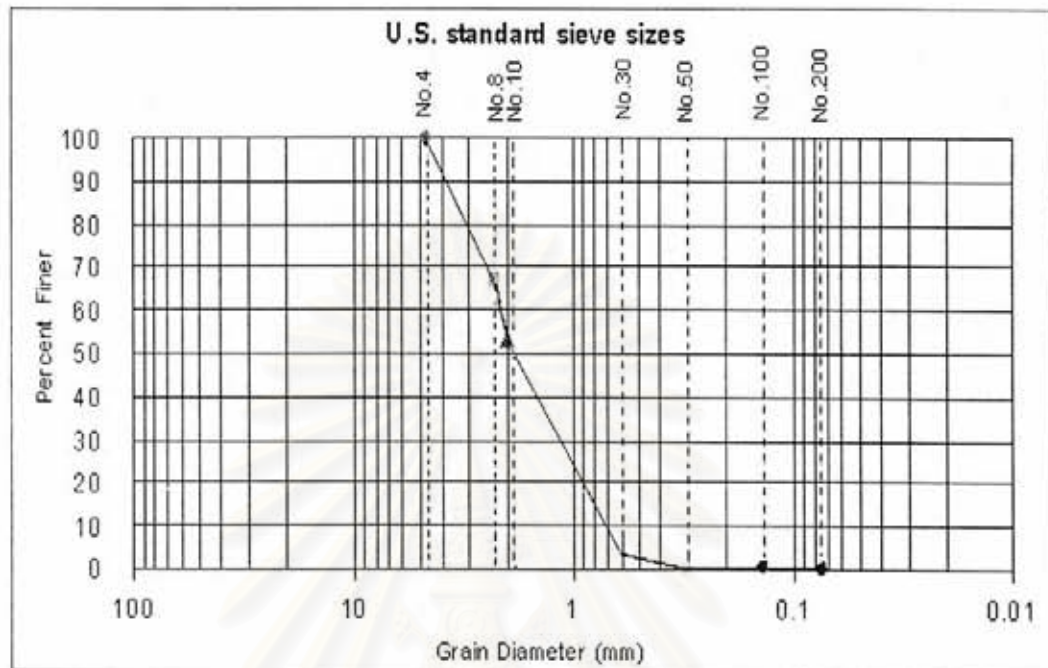


รูปที่ 4.1 ตะกรันทองแดง

2. การกระจายขนาดคละ (Size Distribution)

การทดสอบหาการกระจายขนาดคละของตะกรันทองแดง ทดสอบตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-06 ผลที่ได้พบว่า ตะกรันทองแดงมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) เท่ากับ 1.98 มิลลิเมตร และมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายขนาดคละ (Coefficient of Uniformity, C_u) หรือค่า D_{60}/D_{10} เท่ากับ 3.125 จากการศึกษาในปี 1986 ของ Emery พบว่า ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 0.075 ถึง 4.75

มิลลิเมตร โดยกราฟการกระจายขนาดคละ แสดงในรูปที่ 4.2 และผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ ก.1 (ภาคผนวก ก.)



รูปที่ 4.2 กราฟการกระจายขนาดคละของตะกอนทองแดง

3. ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

เมื่อนำตะกอนทองแดงมาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188-95 พบว่า มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.35 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการวิจัยที่ผ่านมาของ Zain และคณะ (2004) โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 3.40 ถึง 3.60 และการศึกษาของ Douglas, Mainwaring และ Hemmings ในปี 1991 โดยมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.39 ผลที่ได้วิเคราะห์ได้ว่า การมีค่าความถ่วงจำเพาะที่สูงนี้อาจมาจากการรวมตัวกันของธาตุที่มีมวลโมเลกุล (Molecular Weight) สูง เช่น เหล็ก ซิลิกา และอลูมินา ซึ่งเห็นได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทองแดงด้วยเครื่อง XRF ที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.1.2 ลักษณะทางเคมีของตะกอนทองแดง

1. พีเอช (pH)

เมื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ด้วยเครื่องวัดพีเอช (pH Meter) พบว่า มีค่าเท่ากับ 8.72

2. ความชื้น (Moisture Content)

จากการทดสอบความชื้นตามมาตรฐาน ASTM C114-05 พบว่า ตะกรันทองแดงมีค่าความชื้นเท่ากับร้อยละ 3.845 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในปี 1986 ของ Emery ที่รายงานไว้ว่า มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5

3. ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition หรือ LOI)

เมื่อทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาตะกรัน ตามมาตรฐาน ASTM C114-05 ซึ่งแสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่มีในวัสดุ ผลที่ได้คือ การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.133 โดยน้ำหนัก ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Zain และคณะ ในปี 2004 ที่ได้ค่าน้อยกว่า 1 และงานวิจัยของ Al-jabri และคณะ ในปี 2005 ที่ได้ค่าเท่ากับ 0 ทั้งนี้เนื่องจากตะกรันทองแดงได้ผ่านกระบวนการถลุงแร่ทองแดง ซึ่งกระทำที่อุณหภูมิสูงมากคือมากกว่า 1200 องศาเซลเซียส ในขณะที่ LOI เป็นการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 950±50 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลให้ตะกรันทองแดงมีปริมาณ LOI ที่ต่ำมากคือ มีค่าประมาณ 0 นั่นเอง

4. องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันในรูปออกไซด์ด้วยเครื่อง XRF พบว่า สารประกอบหลักที่มีในวัสดุ ได้แก่ เหล็ก (Fe_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียม (CaO) โดยมีปริมาณของเหล็กสูงที่สุดถึงร้อยละ 53.55 รองลงมาคือซิลิกา อลูมินาและแคลเซียมตามลำดับ องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งมีองค์ประกอบหลักของตะกรันทองแดงที่ได้ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Mobasher, Arino และ Devaguptapu (1996) และการศึกษาของ Shi และ Qian (2000) จากตารางจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบทางเคมีนี้เป็นสารประกอบหลักเช่นเดียวกับในปูนซีเมนต์ แสดงความเป็นไปได้ในการนำตะกรันทองแดงมาใช้เป็นวัสดุทดแทนเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้นั่นเอง แต่ทั้งนี้เนื่องจากตะกรันทองแดงยังมีองค์ประกอบของโลหะหนักหลายชนิดรวมอยู่ด้วย โดยโลหะหนักที่มีอยู่ในปริมาณสูงคือ สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเบื้องต้น เช่น ผลของการชะละลายของโลหะหนัก หรือการนำไปใช้ประโยชน์ของตะกรันทองแดงในงานต่างๆ ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้นำตะกรันทองแดงเป็นวัสดุทดแทนในการเผาพร้อมในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ จึงต้องมีการศึกษาและตรวจสอบถึงผลกระทบของโลหะหนักที่อาจจะเกิดขึ้นต่อคุณภาพและการนำไปใช้งานของปูนซีเมนต์ต่อไป

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกอนทองแดงด้วยเครื่อง XRF

สารประกอบ	ความเข้มข้น (ร้อยละ)	สารประกอบ	ความเข้มข้น (ร้อยละ)
Fe ₂ O ₃	53.55	ZnO	1.05
SiO ₂	31.19	CuO	0.69
Al ₂ O ₃	3.59	MoO ₃	0.31
CaO	1.83	PbO	0.18
SO ₃	1.39	MnO	0.06
K ₂ O	1.23	Cr ₂ O ₃	0.05
MgO	1.16	NiO	0.03
Na ₂ O	0.28	BaO	0.03
TiO ₂	0.22	V ₂ O ₅	0.01
P ₂ O ₅	0.13	LOI	0.133
		รวมทั้งหมด	97.11

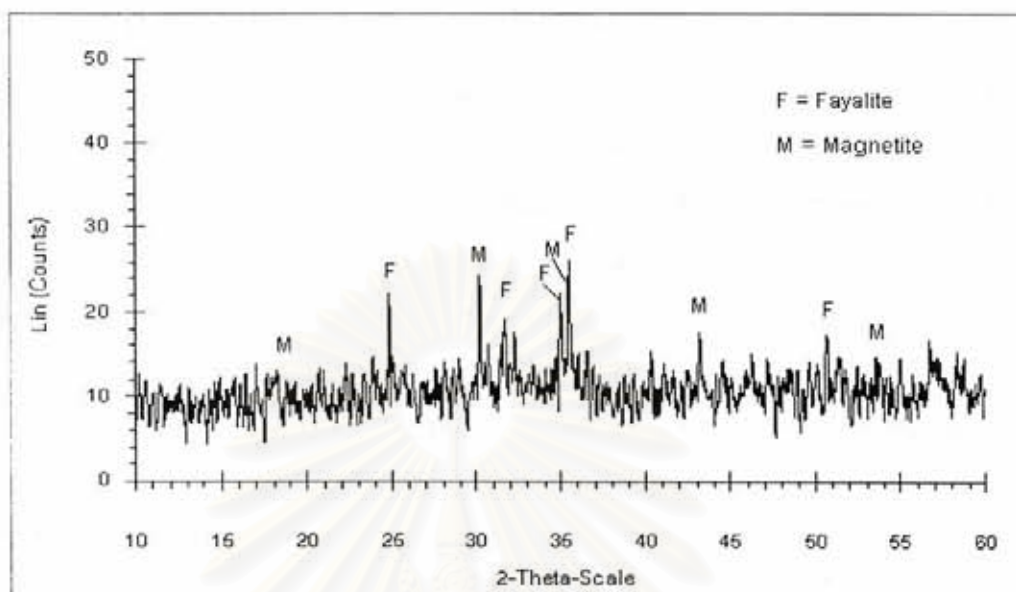
5. รูปแบบของสารประกอบ

การวิเคราะห์รูปแบบของสารประกอบในตะกอนทองแดง โดยใช้เครื่องมือ XRD พบว่า สารประกอบหลักคือ ฟายาลไลท์ (Fayalite หรือ Fe₂SiO₄) และแมกนีไทต์ (Magnetite หรือ Fe₃O₄) ซึ่งเป็นรูปแบบหลักของตะกอนทองแดงที่พบสอดคล้องกับการศึกษาของ Mobasher, Arino และ Devaguptapu (1996) รูปแบบของสารประกอบในตะกอนทองแดง ดังแสดงในรูปที่ 4.3

6. ชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมด (Total Heavy Metals)

จากการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในตะกอนทองแดงด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยใช้วิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 และตรวจวัดด้วยเครื่อง ICP พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ มีปริมาณที่แตกต่างกัน โดยมีความเข้มข้นของสังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) ในปริมาณสูง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นเท่ากับ 9127 และ 6983 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ หรือเมื่อเทียบเป็นร้อยละของความเข้มข้นจะได้ 0.91 และ 0.69 ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการ

ตรวจวัดองค์ประกอบในตะกอนทองแดงด้วยเครื่อง XRF ที่แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อส่วนค่าเฉลี่ย ความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 รูปแบบของสารประกอบหลักของตะกอนทองแดงที่วัดด้วยเครื่อง XRD

ตารางที่ 4.2 ความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนทองแดงตามวิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052

ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก. /กก.)	ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก. /กก.)
As	232.990	Zn	9127.699
Cd	24.100	Ag	< 0.003
Cr	69.781	Ba	75.494
Cu	6983.279	Co	< 0.010
Hg	<0.004	Ga	< 0.040
Ni	98.332	Mn	284.231
Pb	1576.328	Se	< 0.102
Tl	< 0.247	Sr	2.224
V	21.737		

7. ทดสอบการชะละลาย (Leaching Test)

ผลการทดสอบการชะละลายของตะกอนทองแดง พบว่าปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานทั้งตามมาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ที่สกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) เทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) และมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP) แสดงถึงความเป็นของเสียที่ไม่อันตราย เช่นเดียวกับการศึกษาที่ผ่านมาในงานของ Alter (2006) ซึ่งเมื่อทดสอบการชะละลายโลหะหนักด้วยวิธี TCLP พบว่ามีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ตะกอนทองแดงจึงถูกพิจารณาว่าเป็นของเสียที่ไม่อันตราย

ถึงแม้ว่าตะกอนทองแดงถูกพิจารณาว่าเป็นของเสียที่ไม่อันตราย แต่ถ้าหากมีปริมาณที่มากและไม่ได้รับการจัดการที่ถูกต้อง ความเป็นพิษของโลหะหนักต่างๆ ที่มีอยู่ในตะกอนและความสามารถในการชะละลายของโลหะหนักในตะกอนทองแดงจะส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในตะกอนทองแดงเทียบกับค่ามาตรฐานของปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้

ชนิดโลหะหนัก	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มก. /ล.)	ค่าที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง (มก. /ล.)	
		WET	TCLP
As	5	0.075	0.096
Cd	1	0.045	0.072
Cr	5	0.09	0.303
Cu	25*	4.575	8.729
Hg	0.2	< 0.004	< 0.004
Ni	20*	1.570	2.570
Pb	5	0.728	1.645
Tl	7*	< 0.247	< 0.247
V	24*	4.053	5.675
Zn	250*	5.876	12.745
Ag	5	< 0.003	< 0.003
Ba	100	1.547	2.606
Co	80*	< 0.010	< 0.010
Se	1	< 0.102	< 0.102

หมายเหตุ: * คือ "ไม่มีค่ามาตรฐานกำหนดไว้สำหรับ TCLP"

4.2 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์

หลังจากการวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์ด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) โดยใช้วิธีมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 3052 และวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP แล้วทำการเลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์ในการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดจากหลักเกณฑ์ในการเลือกตัวอย่าง คือ พิจารณาตัวอย่างที่มีโลหะหนักในปริมาณสูงเกินเกณฑ์ในการผลิตปูนซีเมนต์ (S-QA-012) และ/หรือเป็นตัวอย่างที่มีชนิดและปริมาณของโลหะหนักสูงสุดในแต่ละอัตราส่วน ผลค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักที่ได้หลังจากเลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์เพื่อทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป แสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งมี 9 อัตราส่วนคือร้อยละ 0 1.8 2.0 2.2 2.4 2.6 2.8 3.0 และ 3.2 ตามลำดับ ตัวอย่างที่เลือกเป็นตัวแทนของแต่ละอัตราส่วน แทนด้วย C0 C18 C20 C22 C24 C26 C28 C30 และ C32 ตามลำดับ ส่วนผลค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักของตัวอย่างทั้งหมด แสดงในตารางที่ ข.1 และตารางที่ ข.2 (ภาคผนวก ข.) ส่วนในรูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ เพื่อให้เห็นแนวโน้มที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

ชนิดโลหะ	เกณฑ์ของซีเมนต์*	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆ ของปูนซีเมนต์ (มก. /กก.)								
		C0	C18	C20	C22	C24	C26	C28	C30	C32
As	120	11.599	18.847	17.618	20.682	18.217	24.660	25.679	27.260	30.273
Cd	2.5	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	< 0.009	2.024	< 0.009	< 0.009	< 0.009
Cr	750	15.893	19.476	18.524	19.568	30.564	22.263	20.558	25.180	33.283
Cu	150	43.306	85.821	76.644	88.191	97.675	147.763	159.281	184.005	204.035
Hg	2.0	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Ni	500	9.198	18.121	16.399	20.246	25.009	24.682	17.125	21.233	25.167
Pb	500	10.595	13.992	12.907	17.543	18.369	27.392	24.774	26.342	28.387
Tl	5	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247	< 0.247
V	200	16.143	33.173	34.088	33.974	32.177	38.754	33.047	36.559	39.705
Zn	500	74.475	208.362	202.470	255.736	238.817	337.700	374.184	380.239	395.859
Ag	-	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003
Ba	-	17.003	48.371	43.514	55.650	46.409	59.588	58.091	69.751	61.876
Co	-	4.253	7.761	5.268	7.036	6.792	6.606	11.850	7.655	9.919
Ga	-	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004	< 0.004
Mn	-	41.874	81.144	70.614	77.012	85.436	121.773	129.646	159.510	167.312
Se	-	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102	< 0.102
Sr	-	25.270	35.396	41.626	56.560	64.177	80.036	87.089	92.294	82.515

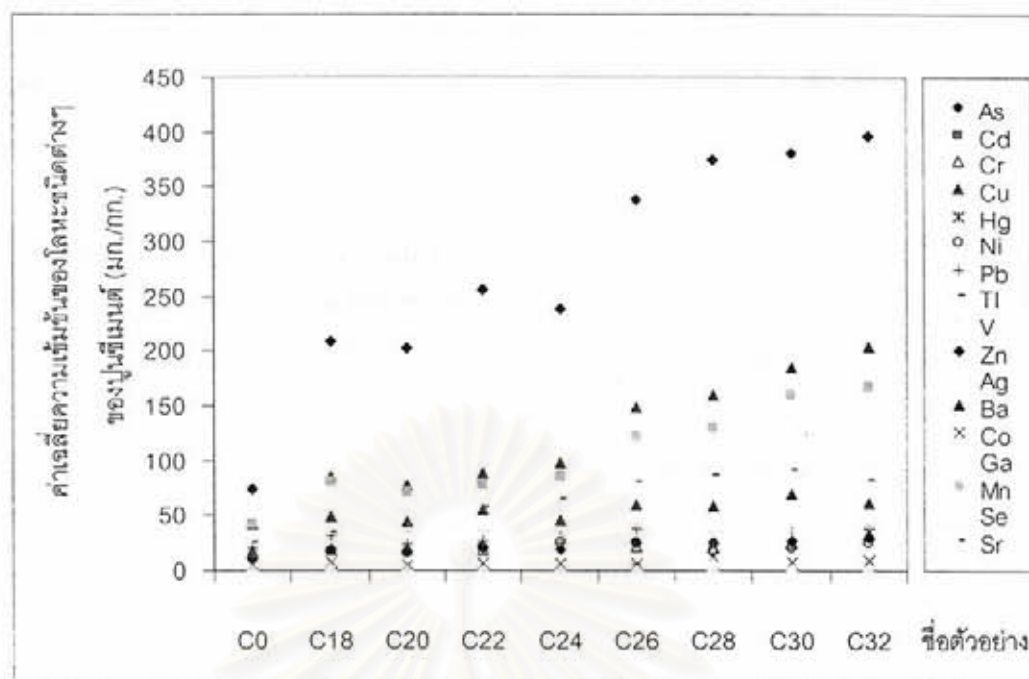
หมายเหตุ: 1. * คือ "เกณฑ์การผลิตปูนซีเมนต์ (S-QA-012) บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) หน่วย มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม"

2. ขีดเส้นใต้ คือ "ค่าที่เกินเกณฑ์การผลิตปูนซีเมนต์"

ในที่นี้ขอยกตัวอย่างในการเลือกตัวอย่างจากค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักของ ตัวอย่างทั้งหมดในตารางที่ ข.1 และตารางที่ ข.2 (ภาคผนวก ข.) เช่น ที่อัตราส่วน C0 ของตัวอย่าง วันที่ 13/03/49 และ 22/11/48 พบว่า ส่วนใหญ่ตัวอย่างวันที่ 22/11/48 มีชนิดและปริมาณของ โลหะหนักสูงกว่าตัวอย่างวันที่ 13/03/49 มีเพียง Ni V และ Ba ที่มีปริมาณของโลหะหนักน้อยกว่า ตัวอย่างวันที่ 13/03/49 ดังนั้นจึงเลือกตัวอย่างวันที่ 22/11/48 ซึ่งเป็นตัวแทนของอัตราส่วน C0 มา ทำการศึกษาในหัวข้อต่อไป จากการสรุปตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดแสดงใน ตารางที่ 4.4 พบว่า ปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตะกรัน ทองแดงที่ใช้ในการเผาพร้อมเพิ่มขึ้น โดยทองแดงมีค่าความเข้มข้นเกินเกณฑ์ในการผลิตปูนซีเมนต์ ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) คือ C28 C30 และ C32 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 159 184 และ 204 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ โดยเกณฑ์การผลิตของทองแดงในปูนซีเมนต์เท่ากับ 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งนี้เป็นผลมาจากการใช้ตะกรันทองแดงเป็นวัตถุดิบทดแทน ซึ่งเมื่อ วิเคราะห์องค์ประกอบหลักด้วยเครื่อง XRF และหาชนิดและปริมาณโลหะหนักทั้งหมดในตะกรัน ทองแดงด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) ที่แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ทองแดงมีความเข้มข้นในปริมาณสูง จึงเป็นผลให้ความเข้มข้นของทองแดงมีค่าความ เข้มข้นสูงเกินเกณฑ์การผลิตเมื่อนำตะกรันทองแดงมาเผาพร้อมในตั้งแต่ C28 เป็นต้นไป แต่ใน งานวิจัยนี้ได้มีการเผาพร้อมสูงถึง C32 ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์และเสี่ยงต่อ การชะละลายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมได้ จึงต้องมีการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมี ของปูนซีเมนต์ต่อไป

เมื่อเลือกตัวอย่างจากผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์แล้ว จากนั้นนำตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ได้มาศึกษาผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีซึ่งจะ กล่าวในหัวข้อต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนต่างๆ

4.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์

4.3.1 ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์

4.3.1.1 ความละเอียด (Fineness)

เมื่อทดสอบโดยใช้เครื่องแอร์เพอร์มิอิมิตีแบบเบลน (The Blaine Air Permeability Apparatus) โดยวัดในค่าของพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อกรัม การทดสอบใช้มาตรฐาน ASTM C204-05 ผลที่ได้แสดงในตารางที่ ข.3 (ภาคผนวก ข.) พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำสุดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาไม่ต่ำกว่า 2,800 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตัวอย่างปูนซีเมนต์ทั้งหมดมีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน และมีค่าที่ใกล้เคียงกันซึ่งอยู่ในช่วง 3419 ถึง 3535 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ทั้งนี้ขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์มาก โดยขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมากจนเกินไปก็จะทำปฏิกิริยากับความชื้นที่มีในอากาศ ทำให้เกิดการเสื่อมคุณภาพได้ง่ายก่อนนำไปใช้งานได้

4.3.1.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

เมื่อนำปูนซีเมนต์มาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C188-95 ผลที่ได้แสดงในตารางที่ ข.4 (ภาคผนวก ข.) พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.129 ถึง 3.155 ซึ่ง

ค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งจะอยู่ในช่วง 3.10 ถึง 3.20 (ศิริวัฒน์ไชยชนะ, 2542) ซึ่งโดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะจะมีค่าโดยประมาณ เท่ากับ 3.15 (วินิตช่อวิเชียร, 2544)

4.3.2 ลักษณะทางเคมีของปูนซีเมนต์

4.3.2.1 ค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition หรือ LOI)

เมื่อทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผापูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C114-05 ผลที่ได้แสดงในตารางที่ ข.3 (ภาคผนวก ข.) พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุมีค่าเท่ากับ 0.749 ถึง 1.524 ซึ่งแสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่มีในวัสดุ หรือปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในปูนซีเมนต์ ตลอดจนความชื้นทั้งหมด ซึ่งตามปกติการสูญเสียน้ำหนักไม่ควรเกินกว่าร้อยละ 3 (วินิต ช่อวิเชียร, 2544) และสอดคล้องในงานวิจัยของ Zain และคณะ (2004) ที่รายงานไว้ว่า มีค่าไม่เกินร้อยละ 2

4.3.2.2 องค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)

ผลการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง XRF แสดงในตารางที่ 4.5 พบว่าสารประกอบหลักที่มีในวัสดุ ได้แก่ แคลเซียม (CaO) ซิลิกา (SiO₂) อลูมินา (Al₂O₃) และเหล็ก (Fe₂O₃) ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ยังมีองค์ประกอบของโลหะหนักรวมอยู่ด้วย โดยโลหะหนักที่มีอยู่ในปริมาณสูงคือ สังกะสี (ZnO) และทองแดง (CuO) ซึ่งอาจมีผลกระทบกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและหน่วงการก่อตัวได้ (Murat และ Sorrentino, 1996; Zain และคณะ, 2004)

4.4 ผลการศึกษาผลของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์

4.4.1 ผลการศึกษาลักษณะกายภาพและการกระจายตัวของโลหะหนัก

จากการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน มาศึกษาลักษณะกายภาพและการกระจายตัวของโลหะหนักด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM) ร่วมกับ Energy Dispersive X-ray Spectrometer หรือ EDS เพื่อช่วยในการศึกษาหาองค์ประกอบที่เป็นธาตุ ผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM/EDS สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.5 ถึงรูปที่ 4.17 โดยจะยกตัวอย่างอัตราส่วนที่มีความแตกต่างของปริมาณโลหะหนักชัดเจนคือ C0 และ C32 ส่วนผลการวิเคราะห์ของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ ค.1 ถึงรูปที่ ค.14 (ภาคผนวก ค.)

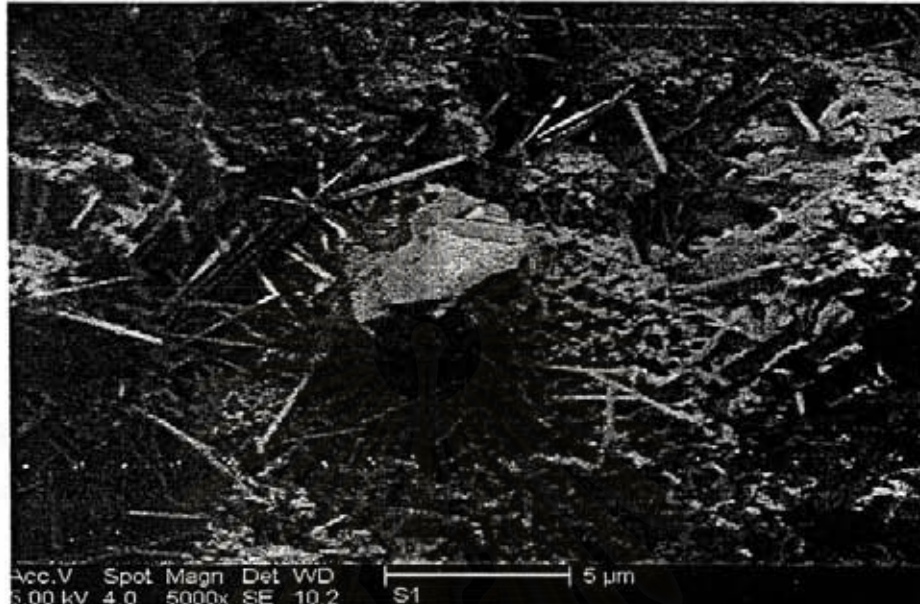
ตารางที่ 4.5 ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง XRF

สารประกอบ	ความเข้มข้น (ร้อยละ)								
	C0	C18	C20	C22	C24	C26	C28	C30	C32
CaO	61.43	59.90	60.76	59.44	61.25	60.85	61.73	59.39	60.07
SiO ₂	20.03	21.05	20.05	22.02	20.36	21.25	20.66	22.82	21.68
Al ₂ O ₃	6.91	6.28	6.11	5.92	5.55	4.92	6.65	5.73	5.56
Fe ₂ O ₃	4.53	4.36	4.72	4.89	4.25	4.46	4.03	4.44	4.99
MgO	2.35	3.51	3.45	2.75	3.24	3.86	2.68	2.98	3.08
K ₂ O	0.54	0.49	0.53	0.45	0.47	0.38	0.37	0.35	0.39
TiO ₂	0.27	0.31	0.26	0.21	0.24	0.25	0.23	0.19	0.20
Na ₂ O	0.19	0.17	0.19	0.15	0.16	0.17	0.16	0.15	0.17
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
SO ₃	2.36	2.39	2.41	2.41	2.43	2.34	2.24	2.39	2.30
ZnO	69.81	188.58	198.21	230.31	215.06	228.70	346.67	343.46	381.17
CuO	39.87	75.76	71.77	80.54	103.67	127.59	142.75	191.39	239.24
MnO	30.99	58.10	73.59	61.97	82.89	96.83	102.25	116.20	123.94
SrO	21.12	39.70	49.83	32.94	45.61	51.52	49.83	67.57	73.49
MoO ₃	21.37	39.65	48.52	28.45	39.84	53.28	44.93	57.99	65.93
PbO	12.75	27.41	40.54	53.00	47.30	49.28	52.66	61.52	59.89
LOI	0.892	0.986	1.042	1.291	1.524	0.963	0.749	1.138	1.011
รวม	99.53	99.50	99.58	99.59	99.54	99.51	99.58	99.67	99.56

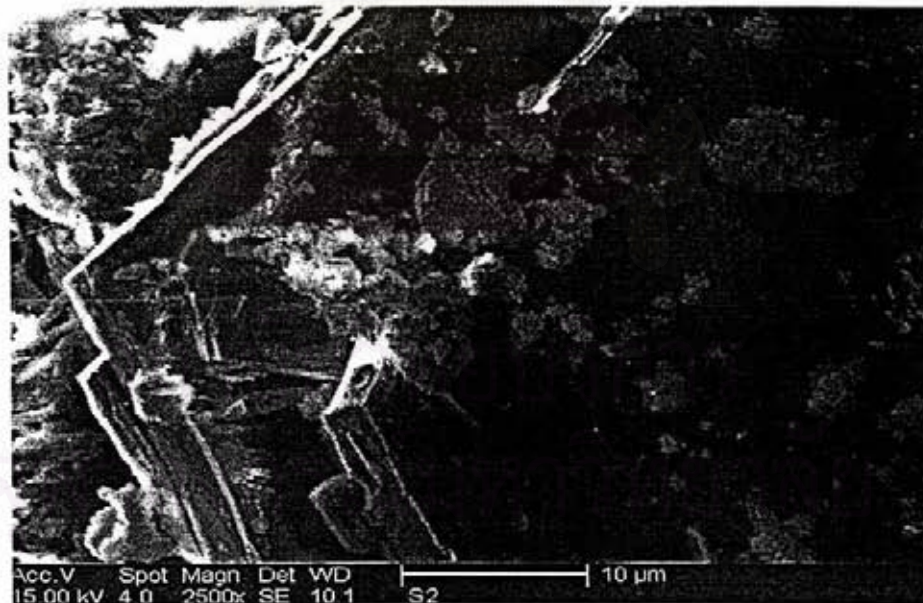
หมายเหตุ: ขีดเส้นใต้ คือ "สารประกอบของโลหะหนักที่มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกิโลกรัม"

ผลการศึกษาด้วย SEM ของซีเมนต์เฟส C0 อายุป้อม 3 วัน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า ในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางกายภาพของซีเมนต์เฟส ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะพบเอทริงไท์เป็นผลึกหกเหลี่ยมมีลักษณะคล้ายเส้นเข็ม และผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเป็นแผ่นหกเหลี่ยมดังแสดงรูปที่ 4.6 ส่วนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะมีลักษณะเป็นกลุ่มเส้นใย โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการขยายตัวและก่อตัวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความพรุนของซีเมนต์เฟสลดลงในระยะยาว และกำลังเริ่มพัฒนาขึ้น (Spence, 1993; Shondeep, Sharkar และ Wheeler, 2001; Erdem, Gunay และ Donat, 2003) สังเกตได้จากรูปที่ 4.7 เมื่อซีเมนต์เฟสอายุป้อม 28 วัน จะมีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ได้ชัดเจน สามารถยืนยันได้จากผลการศึกษา SEM ด้วย EDS แสดงในรูปที่ 4.8 โดยจะมีอัตราส่วนของ Ca/Si มีค่าอยู่ในระหว่าง 1.25 ถึง 1.30 (Shondeep, Sharkar และ Wheeler, 2001) ส่วนเอทริงไท์จะมีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากจะ

ถูกเปลี่ยนไปเป็นโมโนซิลิเกตนั่นเอง ทั้งนี้การศึกษา SEM ด้วย EDS ไม่พบโลหะหนักกระจายตัวในซีเมนต์เพสต์ที่ C0 อาจเป็นผลจากความเข้มข้นของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์มีน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดได้



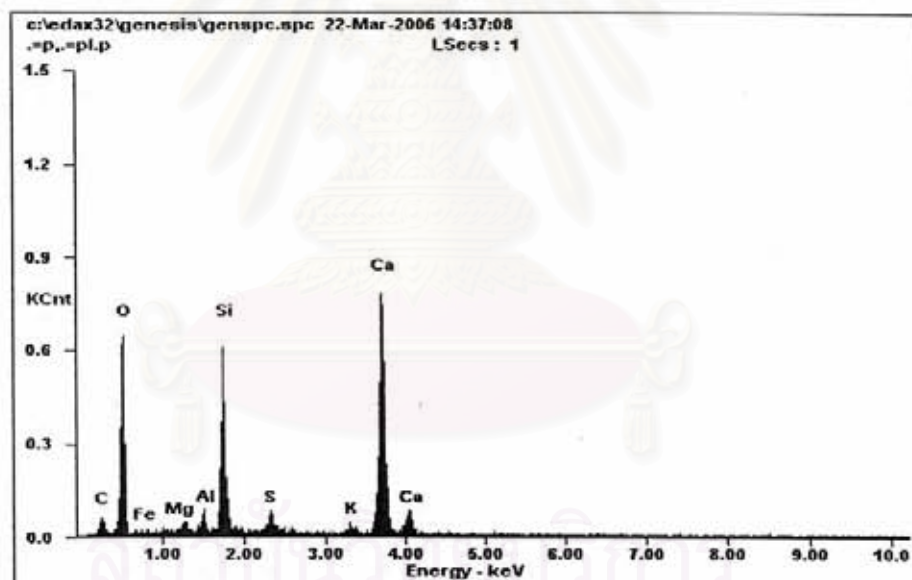
รูปที่ 4.5 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C0 อายุบ่ม 3 วันที่กำลังขยาย 5000 เท่า



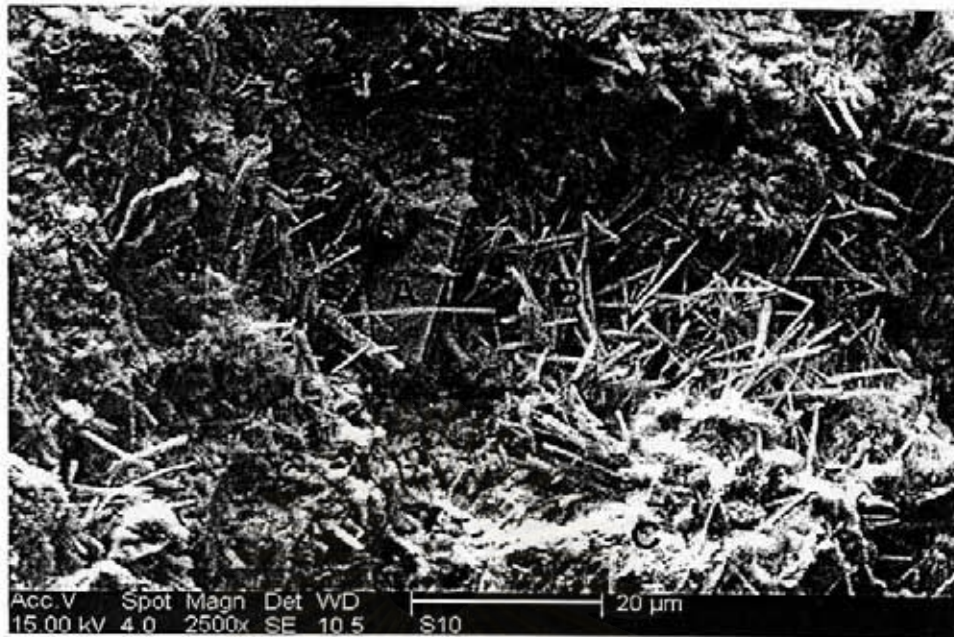
รูปที่ 4.6 ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากการศึกษาด้วย SEM ของซีเมนต์เพสต์ C0 ที่อายุบ่ม 3 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



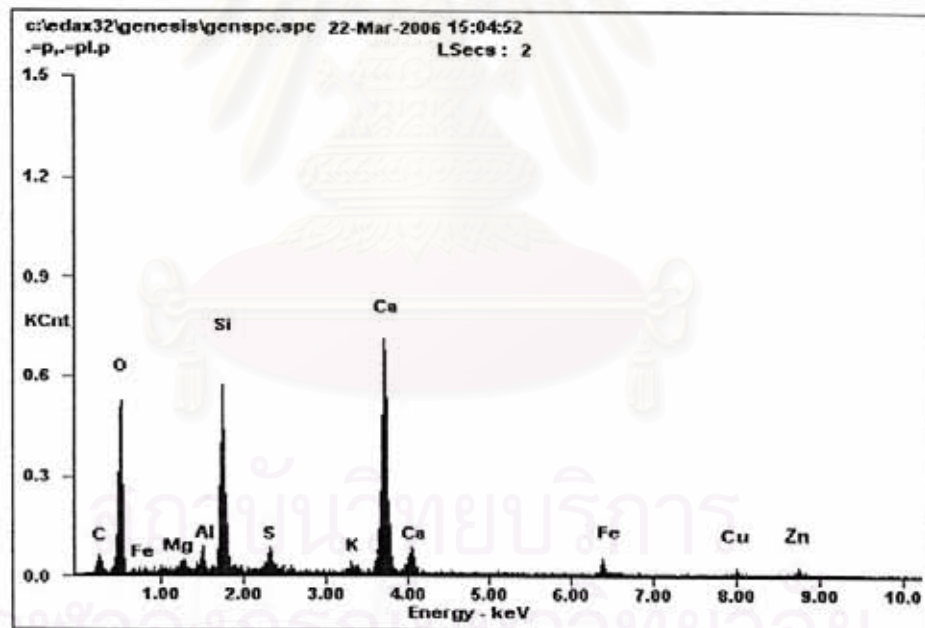
รูปที่ 4.7 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C0 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า แสดงแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต



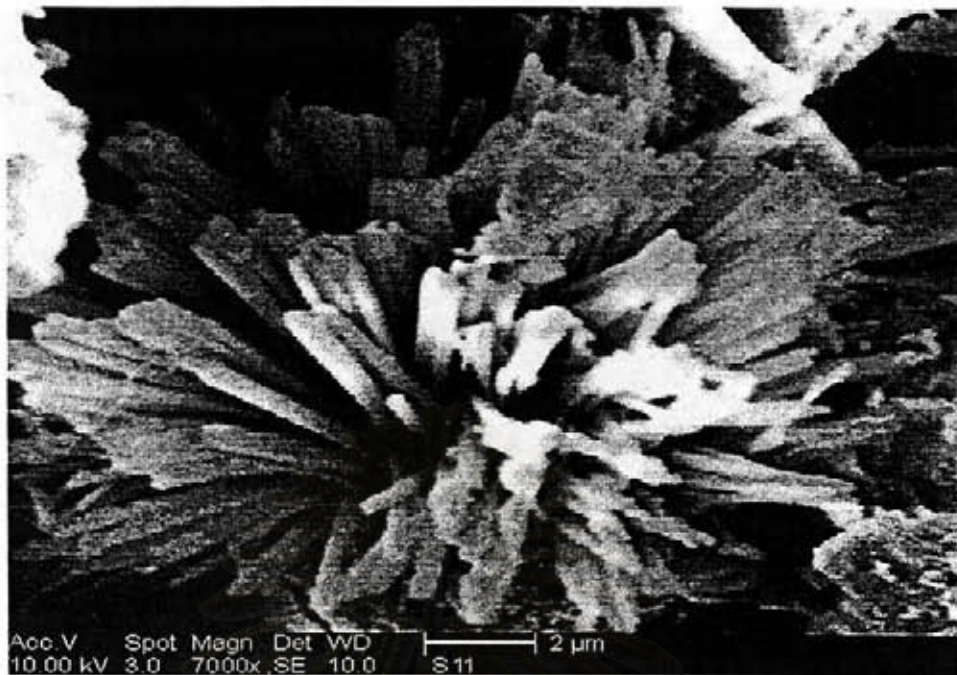
รูปที่ 4.8 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C0 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



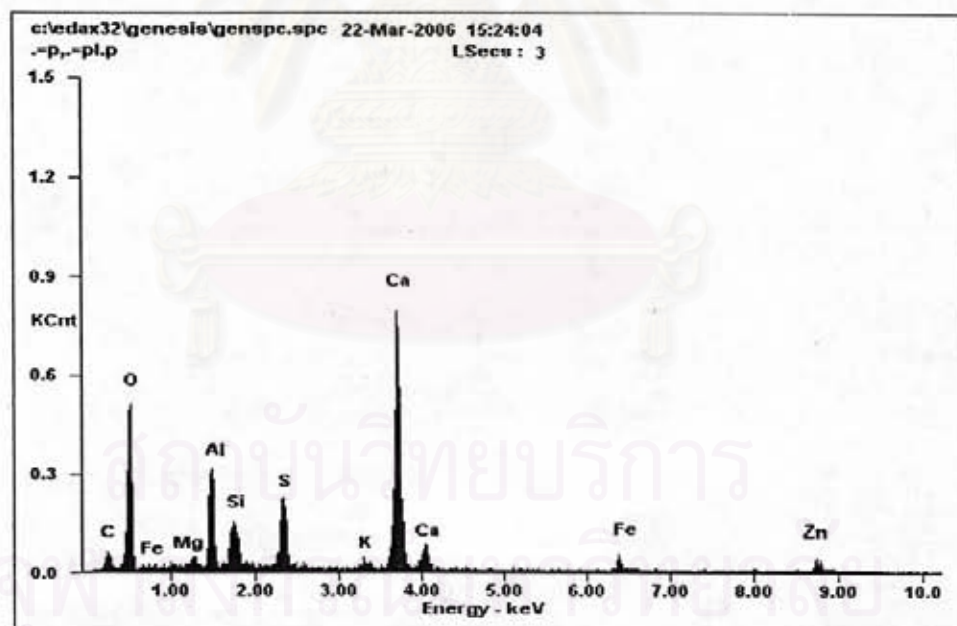
รูปที่ 4.9 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า (สัญลักษณ์ A = $\text{Ca}(\text{OH})_2$, B = Ettringite และ C = CSH)



รูปที่ 4.10 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



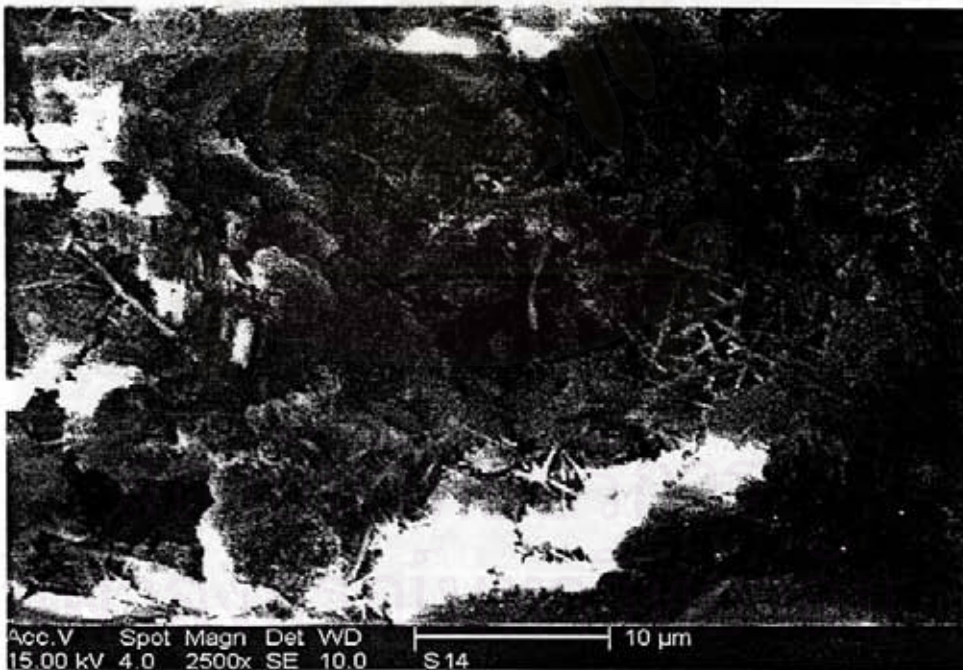
รูปที่ 4.11 ผลึกของเอทริงไทท์ จากการศึกษาด้วย SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่กำลังขยาย 7000 เท่า



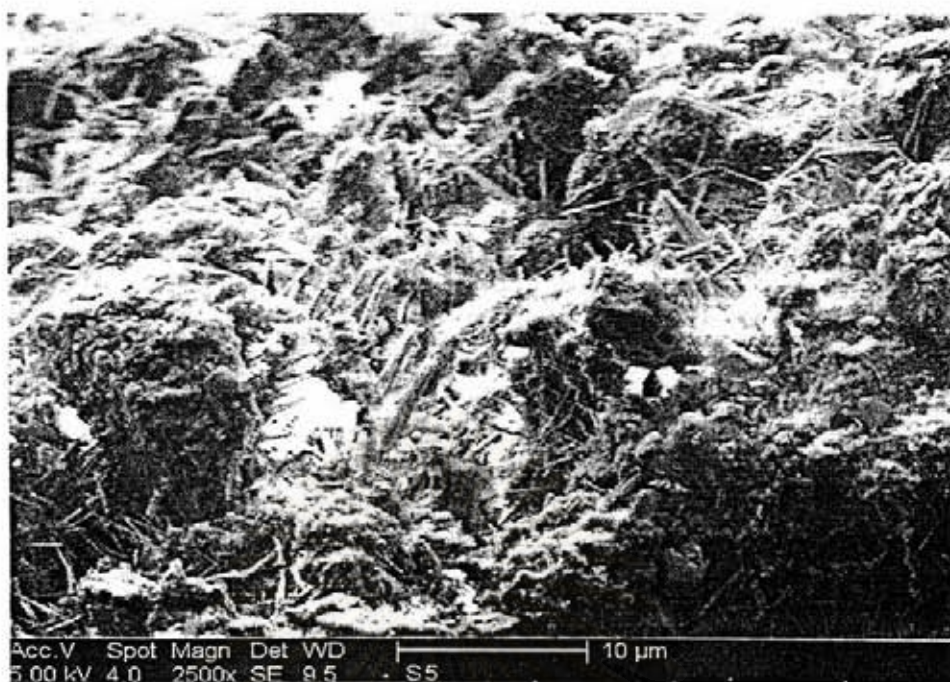
รูปที่ 4.12 ผลการศึกษา EDS ผลึกของเอทริงไทท์ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่กำลังขยาย 7000 เท่า



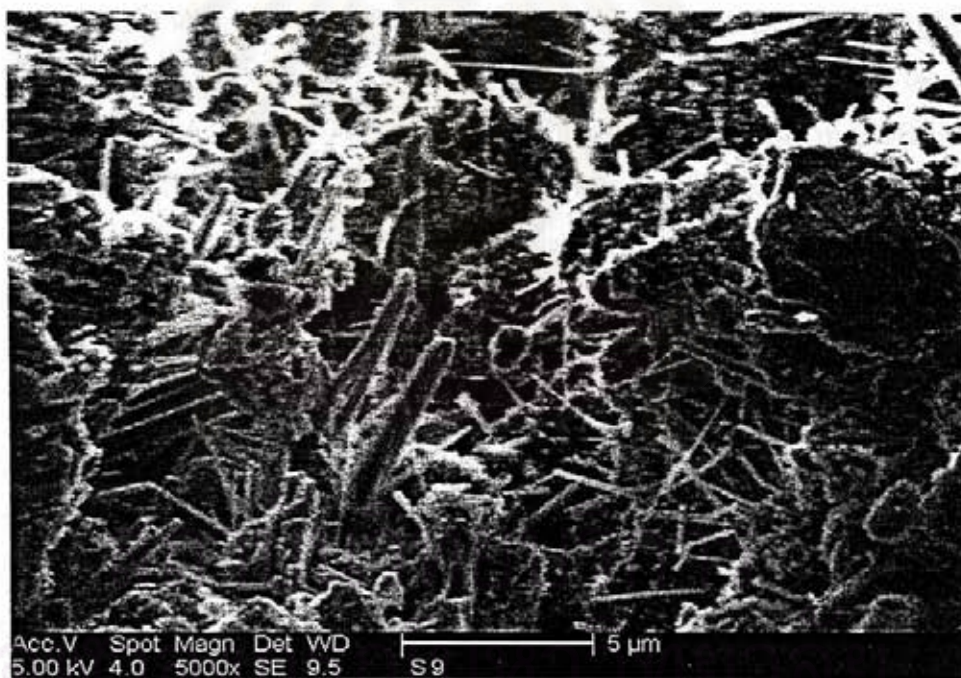
รูปที่ 4.13 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 7 วัน ที่กำลังขยาย 3500 เท่า



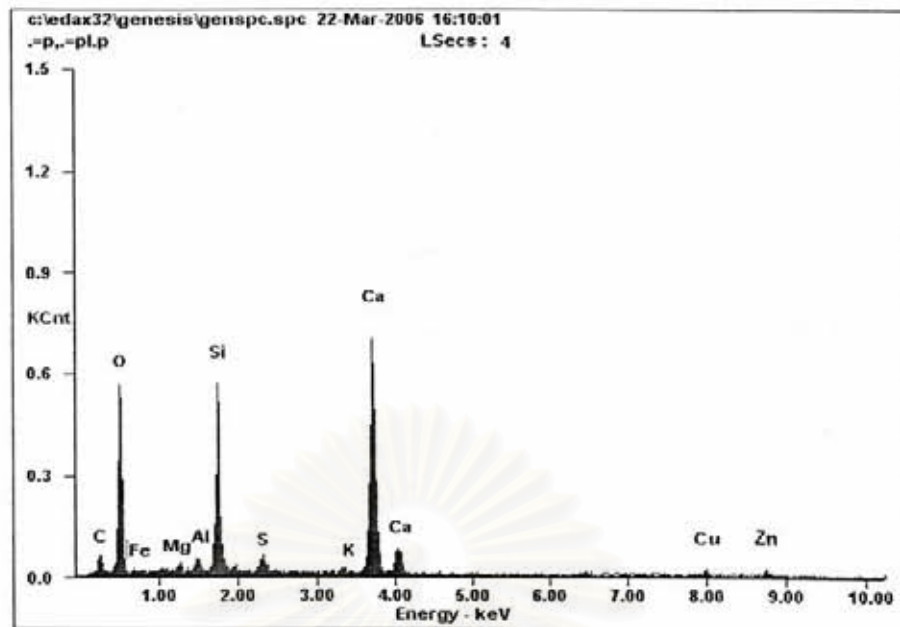
รูปที่ 4.14 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 14 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



รูปที่ 4.15 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



รูปที่ 4.16 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 5000 เท่า



รูปที่ 4.17 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C32 อายุบ่ม 28 วันที่กำลังขยาย 5000 เท่า

ผลการศึกษาด้วย SEM ของซีเมนต์เฟส C32 อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน ในรูปที่ 4.9 4.13 4.14 4.15 และรูปที่ 4.16 ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเช่นเดียวกับซีเมนต์เฟส C0 โดยพบว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำหน้าที่เป็นตัวประสาน จะเกิดการขยายตัวและก่อตัวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และพบว่าในผลึกของเอทริงไกท์ในซีเมนต์เฟส C32 อายุบ่ม 3 วัน ที่กำลังขยาย 7000 เท่า ที่แสดงในรูปที่ 4.12 มีกระจายตัวของสังกะสี เห็นได้จากผลการศึกษา SEM ด้วย EDS ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า สังกะสีจะเข้าไปรวมอยู่ในผลึกเอทริงไกท์ (Bonen และ Sarkar, 1994; Achtembosch, 2003) โดยจะไปแทนที่ Ca^{2+} และ Al^{3+} ทำให้โลหะหนักถูกจับไว้ในโครงสร้างซีเมนต์ (Albino และคณะ, 1996; Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) ในการศึกษา SEM ด้วย EDS ในซีเมนต์เฟส C32 อายุบ่ม 28 วัน ในรูปที่ 4.17 พบการกระจายตัวของสังกะสีและทองแดง คาดว่า โลหะหนักเหล่านี้จะเข้าไปรวมอยู่ในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Stephan และคณะ ในปี 1998 จากการใช้ EDS ตรวจวัด โลหะหนักพบว่า โลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และอาจเป็นไปได้ด้วยกลไก การดูดติด (Sorption) การรวมตัว (Incorporation) การแทนที่ไอออนต่างๆ (Substitution) และการห่อหุ้ม (Encapsulation) เป็นต้น (Achtembosch, 2003; Mijno และคณะ, 2004)

นอกจากนี้ยังพบการกระจายตัวของสังกะสีจะรวมอยู่ในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จากการศึกษา SEM ด้วย EDS ในซีเมนต์เฟส C30 อายุบ่ม 28 วันด้วย เห็นได้จากรูปที่ ค.14 (ภาคผนวก ค.) ส่วนผลการศึกษา SEM และ EDS ของตัวอย่างซีเมนต์เฟสอัตราส่วนอื่นๆ แสดง

ในรูปที่ ค.1 ถึงรูปที่ ค.14 (ภาคผนวก ค.) ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพเช่นเดียวกับ C0 และ C32 แต่ไม่พบโลหะหนักกระจายตัวอยู่ในซีเมนต์เลย อาจเนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์มีน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดได้นั่นเอง

4.4.2 ผลตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก

จากการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 มาตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก (Mineralogical Composition) ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) โดย เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม 2θ และ Relative Intensity เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะแต่ละชนิดได้ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดแสดงในรูปที่ ง.1 ถึงรูปที่ ง.38 (ภาคผนวก ง.)

จากการวิเคราะห์โดย XRD ในรูปที่ 4.18 และ 4.19 พบว่า สารประกอบหลักที่อยู่ในรูปควอทซ์ (Crystalline Phase) เห็นได้จากกราฟที่มี Peak สูงเด่นชัด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไดรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์นั่นเอง โดยไตรแคลเซียมซิลิเกต มีค่า Diffraction Peak ที่สังเกตได้ชัดเจนที่ 29.48° และ 50.90° ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซึ่งเป็นผลจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีค่า Diffraction Peak ที่สังเกตได้ชัดเจนที่ 18.14° 34.14° และ 47.14° และงานวิจัยของ Shondeep, Sharkar และ Wheeler ในปี 2001 ที่พบว่าแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่า Diffraction Peak ที่ 18° ส่วนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเช่นกันนั้นไม่พบ Diffraction Peak เนื่องจากอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous Phase) (Stephan และคณะ, 1998; Achtembosh และคณะ, 2003)

สรุปลักษณะโดยรวมของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ที่ Diffraction Peak ต่างๆ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pakawat Sancharoen (2003) และ Asavapisit, Naksrichum และ Harnwajanawong (2005)

การพัฒนาของสารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ทุกๆ อายุบ่ม พบว่า เมื่ออายุบ่มที่เพิ่มขึ้น จะมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและมีไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดรแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ลดลง (Spence, 1993; Stephan และคณะ, 1998) เนื่องจาก C_3S และ C_2S เป็นสารตั้งต้นถูกใช้ไปในปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 วัน จะตรวจพบผลึกของเอพทริงไกท์ ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12} \cdot 26H_2O$) ได้ชัดเจน เช่นเดียวกับงานวิจัยในปี 2003 ของ Erdem, Gunay และ Donat ที่พบผลึกนี้ในรูป $Ca_6Al_2O_6(SO_4)_3 \cdot 32H_2O$ Diffraction Peak ที่ 16°

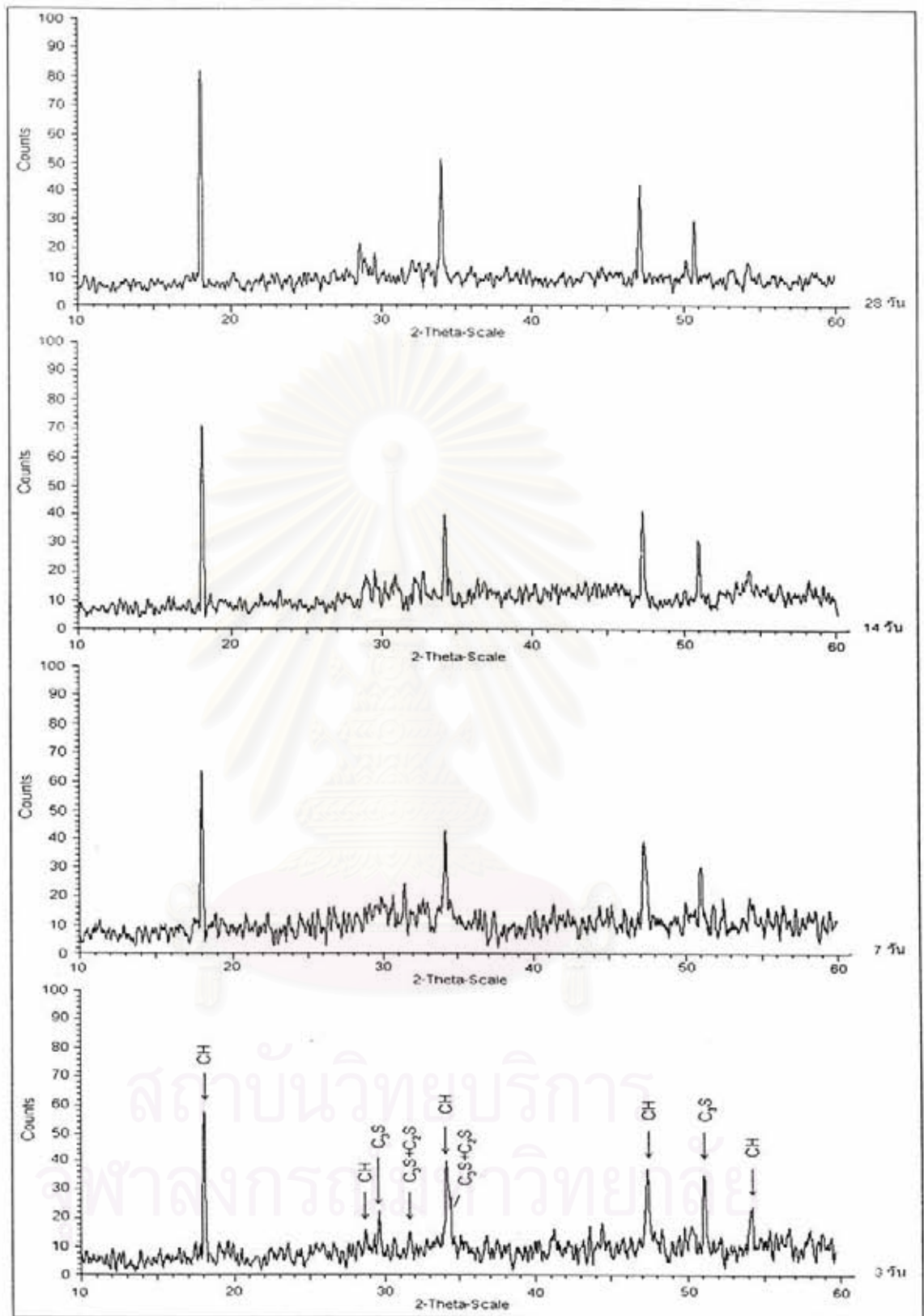
และ $41-42^{\circ}$ และเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นจนถึง 28 วัน ไม่พบผลึกของเอททริงไกท์แต่จะพบผลึกของโมโนซัลเฟตแทน ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_0.5\text{O}_2(\text{OH})_9$) เนื่องจากไอออนของซัลเฟตถูกใช้หมดไปจนเอททริงไกท์จะเปลี่ยนไปเป็นโมโนซัลเฟต ซึ่งจะมีปริมาณน้อยจึงไม่สามารถตรวจวัดได้ สอดคล้องกับผลการศึกษาด้วย SEM ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว นอกจากผลึกของสารประกอบหลักที่ตรวจวัดได้ และยังพบสารประกอบไฮโดรการ์เนต (Hydrogarnet, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Fe}_{0.8}\text{SiO}_{12}\text{H}_9$) และสตราทลิงไกท์ (Stratlingite, $\text{Ca}_7\text{Al}_2\text{SiO}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) เป็นสารประกอบที่อยู่ในรูปผลึก (Crystalline Components) ของปูนซีเมนต์หลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Spence, 1993)

จะเห็นได้ว่า สารประกอบหลักจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันทุกตัวอย่าง แต่แตกต่างกันตรงที่ค่าความเข้มที่วัดได้ อาจเนื่องจากการมีสารประกอบโลหะหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนของตะกั่วทองแดงที่นำมาผสมรวม ในการทดลองนี้ได้ยกตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีความแตกต่างของอัตราส่วนของตะกั่วทองแดงที่ใช้ในการผสมรวมที่ชัดเจนคือ C0 และ C32 มาอธิบายดังนี้

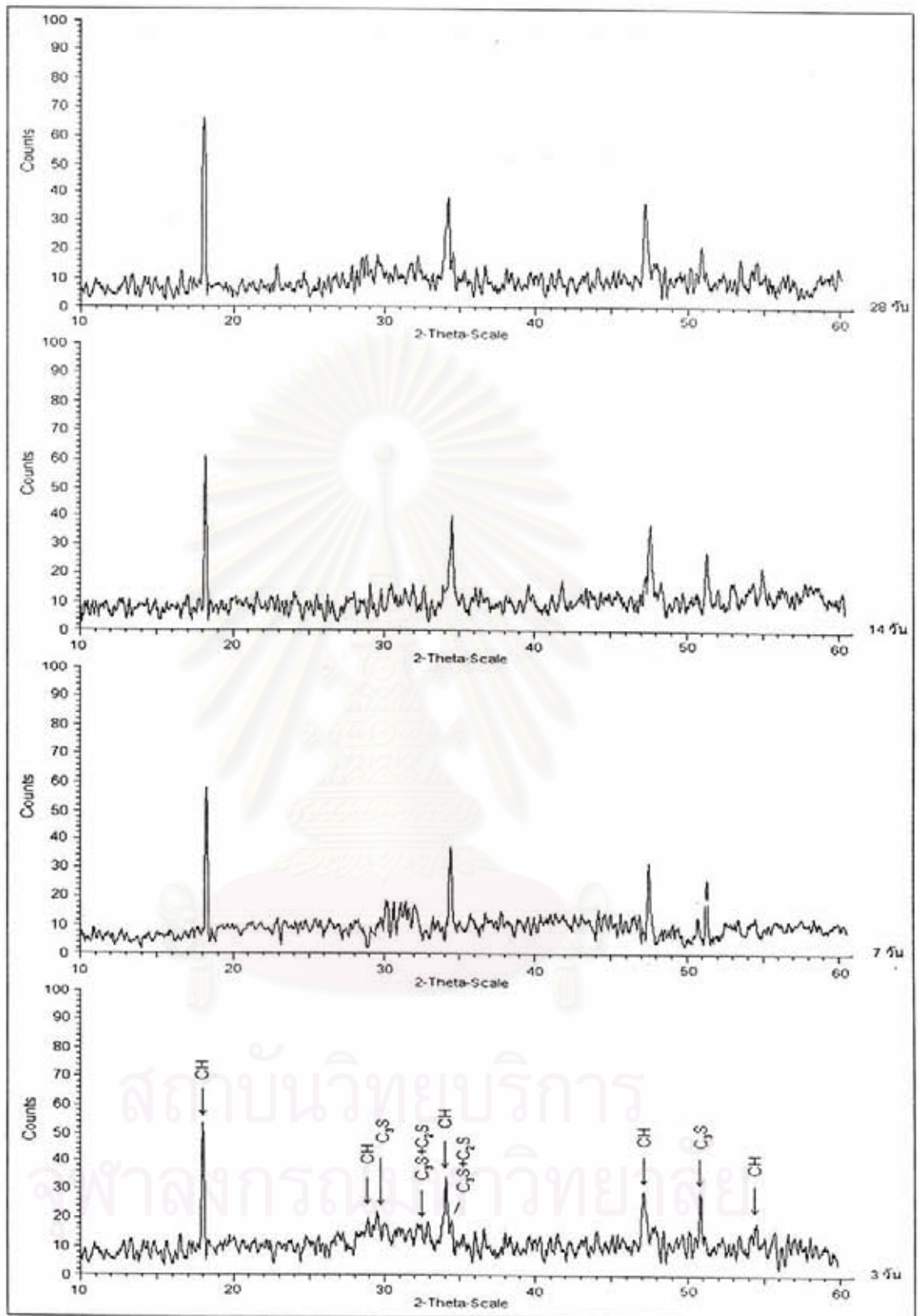
การพิจารณาถึงการลดลงของสารประกอบเริ่มต้นในซีเมนต์เพสต์และการเพิ่มขึ้นของสารประกอบจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ทราบถึงการดำเนินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการผสมรวมตะกั่วทองแดงที่อัตราส่วนต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นอย่างไร

จากรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 เมื่อเปรียบเทียบ C0 และ C32 ทุกๆอายุบ่ม พบว่าตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C0 จะมีค่าของความเข้มของไดรแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าของ C32 อาจเนื่องมาจากโลหะหนักจะเข้าไปขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในหลายงานวิจัยพบว่า ทองแดง สารหนู แคดเมียม ตะกั่ว และสังกะสี จะหน่วงการก่อตัว (Murat และ Sorrentino, 1996; Stephan และคณะ, 1999; Achtembosh และคณะ, 2003) โลหะหนักจะเข้าไปแทนที่ไอออนของ Ca^{2+} ในซีเมนต์เกิดเป็นสารประกอบใหม่ ทำให้อัตราการเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณลดลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงตามไปด้วย เช่น $\text{Zn}(\text{OH})_2$ สารประกอบโลหะหนักที่พบดังที่แสดงในตาราง 4.6 ถึงตารางที่ 4.9

ส่วนสารประกอบโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในซีเมนต์เพสต์ จากการวัดด้วยเครื่อง XRD แสดงในตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.9 พบว่าสารประกอบโลหะหนักที่อาจเป็นไปได้ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) โดยรูปแบบของสารประกอบที่ตรวจวัดได้ คือสังกะสี ทองแดงและแมงกานีส โดยที่ C32 ทุกๆ อายุบ่ม จะพบสารประกอบโลหะหนักมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ ซึ่งเป็นผลมาจากการตรวจวัดการย่อยสลายปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง ICP ในหัวข้อ 4.2 ซึ่งพบว่ามีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงที่สุดนั่นเอง ส่วน C0 ไม่สามารถตรวจวัดรูปแบบของสารประกอบได้ อาจเนื่องมาจากความเข้มข้นของโลหะหนักมีปริมาณน้อย



รูปที่ 4.18 ผล XRD แสดงสารประกอบหลักของซีเมนต์เฟสด้วย C0 ที่อายุบ่มต่างๆ



รูปที่ 4.19 ผล XRD แสดงสารประกอบหลักของซีเมนต์เพสต์ตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่มต่างๆ

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เฟสด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 วัน และ 28 วัน

ชื่อตัวอย่าง	สารประกอบในซีเมนต์เฟสที่อายุบ่ม	
	3 วัน	28 วัน
C0	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
C18	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ CuO $\text{Zn}(\text{OH})_2$	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Zn}_4(\text{CO}_3)(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
C20	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ CuO $\text{Zn}(\text{OH})_2$	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เฟสด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 วัน และ 28 วัน (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	สารประกอบในซีเมนต์เฟสที่อายุบ่ม	
	3 วัน	28 วัน
C22	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ MnCO_3	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_3)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Zn}_4(\text{CO}_3)(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
C24	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ MnCO_3	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_3)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
C26	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ CuFeS_2 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ MnCO_3	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_3)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

ตารางที่ 4.8 สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 วัน และ 28 วัน (ต่อ)

ชื่อตัวอย่าง	สารประกอบในซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม	
	3 วัน	28 วัน
C28	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ CuFeS_2 ZnFe_2O_4 FeMnO_3	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
C30	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ CuFeS_2 ZnFe_2O_4 FeMnO_3	Ca_3SiO_5 Ca_2SiO_4 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_8$ $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$ $\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

ตารางที่ 4.9 สรุปผลการวิเคราะห์สารประกอบในซีเมนต์เฟสด้วยเครื่อง XRD ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน ของตัวอย่าง C32

อายุบ่ม (วัน)	สารประกอบในซีเมนต์เฟส
3	Ca_3SiO_5 , Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ CuFeS_2 , ZnFe_2O_4 , FeMnO_3
7	Ca_3SiO_5 , Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ CuFeS_2 , ZnFe_2O_4
14	Ca_3SiO_5 , Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_6$, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$, $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$
28	Ca_3SiO_5 , Ca_2SiO_4 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{OH})_6\text{S}_{0.5}\text{O}_2(\text{OH})_3$ $\text{Ca}_3\text{AlFe}(\text{SiO}_4)(\text{OH})_6$, $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$, $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $\text{CuSiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$, $\text{Ca}(\text{MnO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

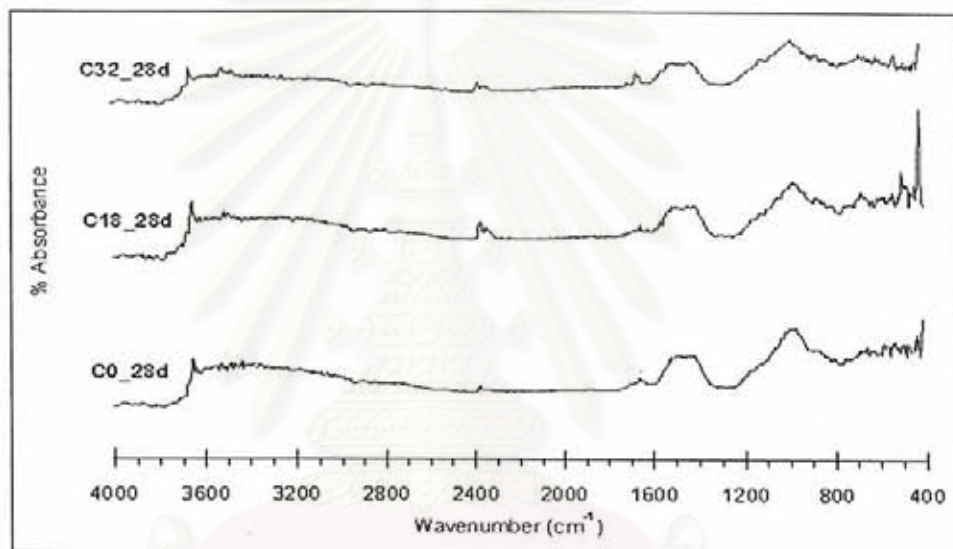
จากผลการวิเคราะห์ พบว่าโลหะหนักจึงมีผลต่อโครงสร้างภายในของซีเมนต์เฟส โดยเกิดเป็นสารประกอบโลหะหนักที่ซับซ้อนเกิดขึ้น ทั้งนี้ผลกระทบของโลหะหนักที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะหนักนั้นๆ ซึ่งการปรากฏสารประกอบของโลหะหนักที่พบในตัวอย่างส่งผลกระทบต่อค่าเดินไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน อาจส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการละลายของโลหะหนักได้ แต่ทั้งนี้ยังไม่สามารถยืนยันรูปแบบของสารประกอบโลหะหนักที่ซับซ้อนนี้ได้ชัดเจน เนื่องจากในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษารูปแบบของสารประกอบโลหะหนักโดยเลือกที่จะสนใจโลหะหนักชนิดใดชนิดหนึ่งที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักปริมาณสูงในปูนซีเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ตัวอย่างปูนซีเมนต์มีโลหะหนักหลายชนิดรวมกันและมีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักไม่สูงพอที่เครื่อง XRD ที่สามารถตรวจวัดได้ครบทุกชนิด

4.4.3 ผลการตรวจวัดพันธะของสารประกอบโลหะหนัก

การศึกษาพันธะของสารประกอบโลหะหนักโดยใช้รังสีอินฟราเรดด้วยเครื่อง FT-IR เป็นการตรวจวัดในเชิงคุณภาพที่ใช้ในการวิเคราะห์พันธะของสารประกอบที่มีอยู่ในโครงสร้างปูนซีเมนต์

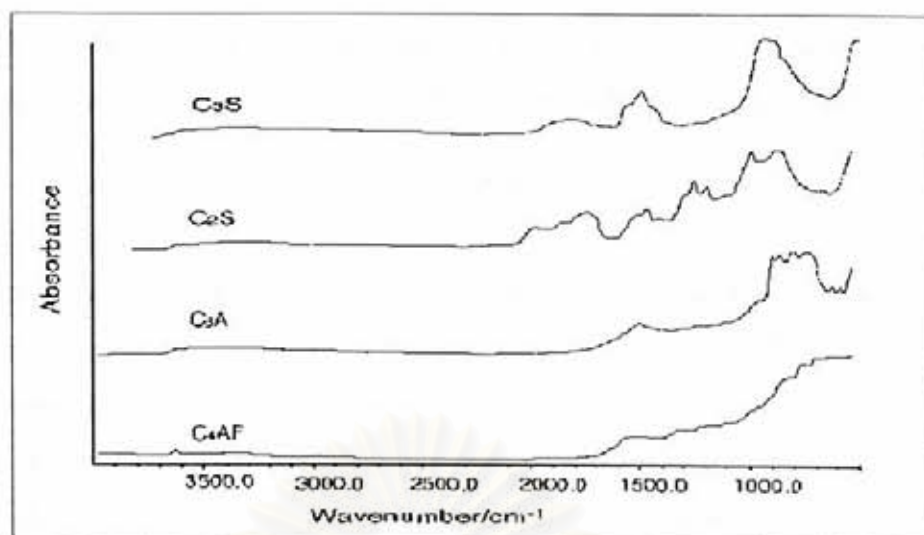
ผลจากการนำตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C0 ถึง C32 ที่อายุบ่ม 3 714 และ 28 วัน มาวิเคราะห์พันธะของสารประกอบโลหะหนักด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) สรุปรูปกราฟความถี่ที่วัดได้ แสดงดังรูปที่ 4.20 ถึงรูปที่ 4.24 โดยแกนนอน (x) คือค่าเลขคลื่น และแกนตั้ง (y) คือค่า Absorbance (%) ส่วนกราฟความถี่ที่วัดได้ในแต่ละตัวอย่าง แสดงในรูปที่ ๑.2 ถึงรูปที่ ๑.13 (ภาคผนวก ๑.)

ในที่นี้จะยกตัวอย่าง C0 C18 และ C32 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มีปริมาณของโลหะหนักแตกต่างกัน ในการศึกษาผลของโลหะหนักต่อพันธะของสารประกอบที่มีในซีเมนต์เพสต์

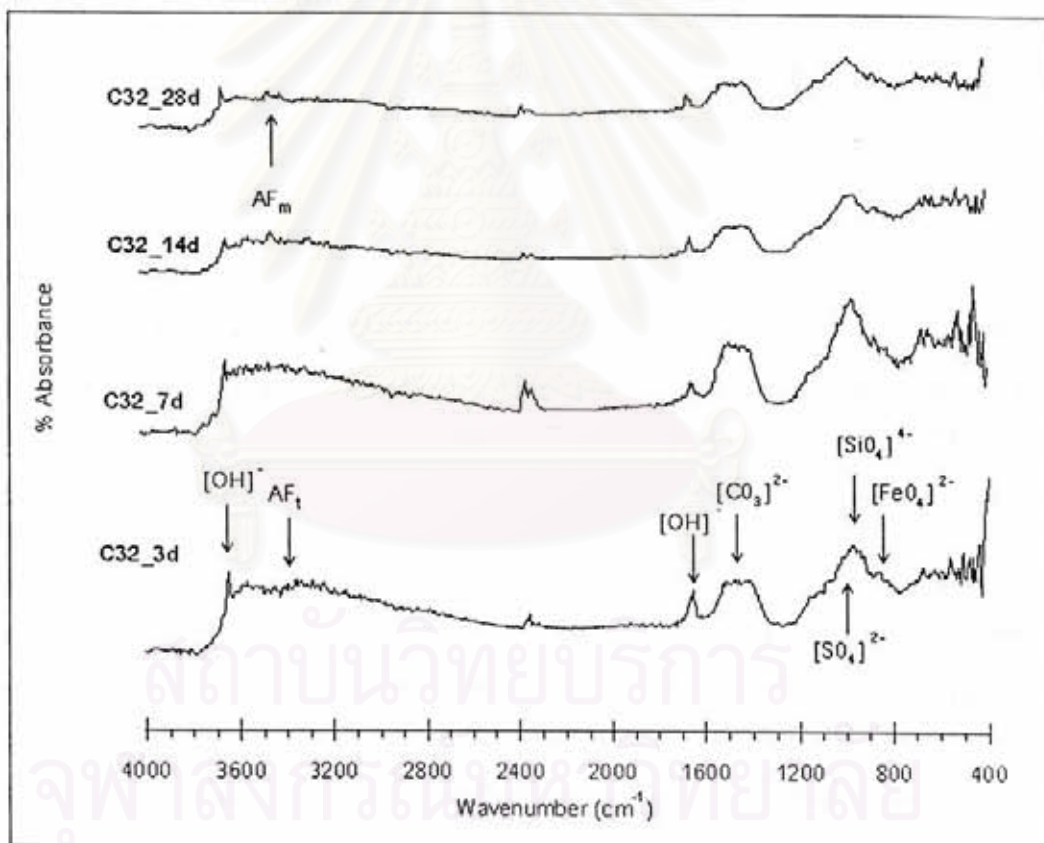


รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C0 C18 และ C32 ด้วยเครื่อง FT-IR

จากรูปที่ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์รูปแบบหลักของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C0 C18 และ C32 จะเห็นได้ว่า รูปแบบที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนต่างก็มีลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกัน และมีลักษณะคล้ายกับรูปแบบสารประกอบของ C_3S และ C_2S จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR ในการศึกษาของ Hughes และคณะ (1995) ที่แสดงในรูปที่ 4.21 ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของกราฟความถี่พันธะของสารประกอบในปูนซีเมนต์ แต่กราฟรูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์มีลักษณะที่ต่างไปบ้าง ทั้งนี้เนื่องจาก C_3S C_2S C_3A และ C_4AF เป็นสารตั้งต้นและจะถูกใช้ไปเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่จากผลการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.21 รูปแบบสสารประกอบของ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR (Hughes และคณะ, 1995)



รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3, 7, 14 และ 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR

ในการศึกษาถึงผลของโลหะหนักต่อพันธะของสารประกอบในซีเมนต์เพสต์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยจะอธิบายตัวอย่าง C32 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูงที่สุด

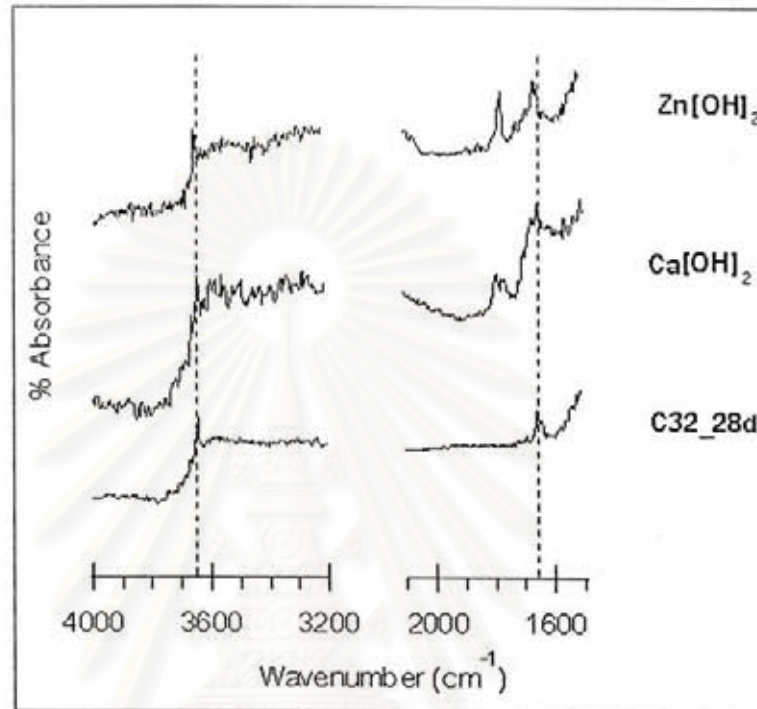
จากรูปที่ 4.22 แสดงผลการวิเคราะห์รูปแบบหลักของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน จะเห็นได้ว่า รูปแบบที่เกิดขึ้นมีลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกัน ส่วนผลการศึกษาที่อายุบ่มแตกต่างกัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงไปของเลขคลื่นของซิลเฟต พบว่าที่อายุบ่ม 3 วันและ 7 วัน มีเลขคลื่นพันธะซิลเฟตของเอทริงไกท์ (AF_1) อยู่ในช่วงเลขคลื่น 3400-3600 ในขณะที่อายุบ่ม 14 วันและ 28 วัน พบโมโนซิลเฟตแทน (AF_m) ที่เลขคลื่น 3500 ซึ่งอยู่ในช่วงคลื่นที่อ้างอิงกับข้อมูลของ Spence (1993) แสดงในตารางที่ 4.1 (ภาคผนวก จ.) ซึ่งสนับสนุนผลการทดลองด้วยเครื่อง SEM และ XRD ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

ทั้งนี้เนื่องจากเลขคลื่นที่อ้างอิงจากข้อมูลต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นการสังเคราะห์สารบริสุทธิ์ขึ้นมาวิจัย และทำการศึกษาแยกแต่ละพันธะ เพื่อหาเลขคลื่นของพันธะที่ชัดเจน แต่ในการวิจัยครั้งนี้ตัวอย่างที่ใช้เป็นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่มีหลายพันธะรวมอยู่ด้วยกัน อีกทั้งบางพันธะจะมีเลขคลื่นซ้อนทับกัน (Overlap) จึงสามารถบอกเพียงช่วงของเลขคลื่นที่เกิดขึ้นได้

ในการศึกษาครั้งนี้ จะทดลองโดยการนำสาร $Ca(OH)_2$ และ $Zn(OH)_2$ มาวิเคราะห์เป็นมาตรฐานพันธะของไฮดรอกซิล (OH)⁻ และสาร $CaCO_3$ และ Cu_2CO_3 มาวิเคราะห์เป็นมาตรฐานพันธะของคาร์บอเนต (CO_3)²⁻ และสาร $Al_2(SO_4)_3$ และ $MgSO_4$ มาวิเคราะห์เป็นมาตรฐานพันธะของซัลเฟต (SO_4)²⁻ ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบเลขคลื่นที่ได้กับข้อมูลของ Nakamoto (1986) Spence (1993) Hughes และคณะ (1995) และ Mollah และคณะ (2000) จะเห็นได้ว่า สารที่นำมาวิเคราะห์มีเลขคลื่นใกล้เคียงกับเอกสารที่อ้างอิง โดยแสดงในรูปที่ จ.1 และตารางที่ จ.1 (ภาคผนวก จ.)

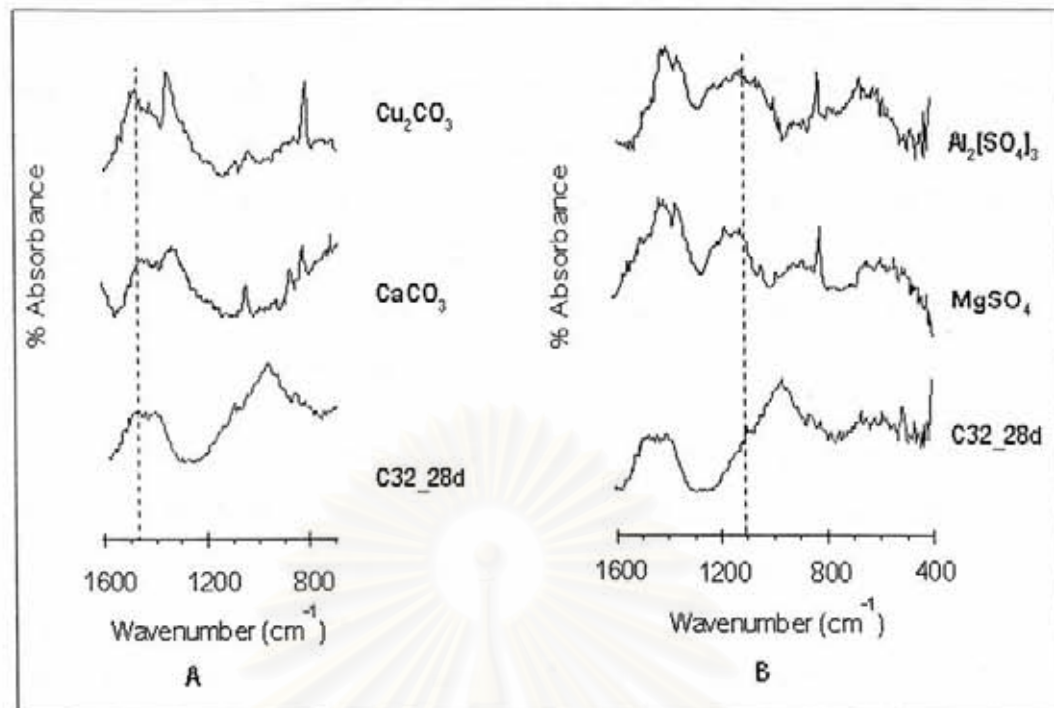
จากรูปที่ 4.23 เป็นการนำสาร $Ca(OH)_2$ และ $Zn(OH)_2$ มาวิเคราะห์เป็นมาตรฐานพันธะของไฮดรอกซิล (OH)⁻ พบว่า $Ca(OH)_2$ มีพันธะของไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่น 3652 และ 1650 ส่วน $Zn(OH)_2$ มีพันธะของไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่น 3650 และ 1657 ผลจากการนำสารทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์ พบว่า มีลักษณะโดยรวมคล้ายคลึงกันและเลขคลื่นใกล้เคียงกับข้อมูลของ Nakamoto (1986) Spence (1993) Hughes และคณะ (1995) และ Mollah และคณะ (2000) ดังแสดงในตารางที่ จ.1 (ภาคผนวก จ.) และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่ามีพันธะของไฮดรอกซิล ที่เลขคลื่น 3647 และ 1655 โดยพันธะของไฮดรอกซิลนั้น นอกจากจะเป็นสารประกอบของน้ำแล้ว ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เห็นได้จากการตรวจวัด

ด้วยเครื่อง XRD และ SEM ทั้งนี้เลขคลื่นที่เลื่อนไป เนื่องมาจากพันธะของไฮดรอกซิลไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก ทำให้ควบคุมการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ (Mollah และคณะ, 2000) สำหรับโลหะหนักที่เกิดพันธะกับไฮดรอกซิล พบสารประกอบโลหะหนักอยู่ในรูป $Zn(OH)_2$ และ $CaZn(OH)_6 \cdot 2H_2O$ ที่ได้จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD



รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน เทียบกับมาตรฐานพันธะของสาร $Ca(OH)_2$ และ $Zn(OH)_2$ ด้วยเครื่อง FT-IR

จากรูปที่ 4.24 (A) เป็นการนำสาร $CaCO_3$ และ Cu_2CO_3 เป็นมาตรฐานพันธะของคาร์บอเนต (CO_3)²⁻ พบว่า $CaCO_3$ มีพันธะของคาร์บอเนตที่เลขคลื่น 1485 871 และ 713 ส่วน $MgSO_4$ มีพันธะของคาร์บอเนตที่เลขคลื่น 1504 1496 867 และ 719 ผลจากการนำสารทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์ พบว่า มีเลขคลื่นใกล้เคียงกับข้อมูลของ Nakamoto (1986) Spence (1993) และ Hughes และคณะ (1995) ในตารางที่ ๑.1 (ภาคผนวก ๑.) และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบว่า มีพันธะของคาร์บอเนตเป็นช่วงกว้าง (Broad band) ซึ่งอยู่ในช่วงเลขคลื่น 1350 ถึง 1550 สำหรับโลหะหนักที่เกิดพันธะกับคาร์บอเนต จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักอยู่ในรูป $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$, $MnCO_3$ และ $Zn_4(CO_3)(OH)_6 \cdot H_2O$



รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์พันธะของสารประกอบในซีเมนต์เฟส C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน เทียบกับมาตรฐานพันธะของคาร์บอเนต (A) และมาตรฐานพันธะของซัลเฟต (B) ด้วยเครื่อง FT-IR

จากรูปที่ 4.24 (B) เป็นการนำสาร $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ และ MgSO_4 เป็นมาตรฐานพันธะของซัลเฟต (SO_4)²⁻ พบว่า $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ มีพันธะของซัลเฟต ที่เลขคลื่น 1118 1145 991 605 และ 451 ส่วน MgSO_4 มีพันธะของซัลเฟต ที่เลขคลื่น 1105 1126 991 611 และ 457 ผลจากการนำสารทั้งสองชนิดมาวิเคราะห์ พบว่า มีเลขคลื่นใกล้เคียงกับข้อมูลของ Nakamoto (1986) Spence (1993) และ Hughes และคณะ (1995) ดังแสดงในตารางที่ ๑.1 (ภาคผนวก ๑.) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตัวอย่าง C32 พบช่วงเลขคลื่น 1000-1150 ทั้งนี้มีความไม่ชัดเจนของพันธะซัลเฟตเนื่องจากเลขคลื่นจะใกล้เคียงกับเลขคลื่นของพันธะซิลิเกต โดยตัวอย่างที่อายุบ่ม 28 วันจะมีปริมาณการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตสูงซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นจึงสังเกตเห็นพันธะของซิลิเกตชัดเจนกว่า

ลักษณะของเลขคลื่นที่เลื่อนไป อาจเป็นผลมาจากการแทนที่ของไอออนโลหะหนักในพันธะของสารประกอบ (Xin และคณะ, 2004) ดังเช่นการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักอยู่ในรูป $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$ สอดคล้องกับผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแยกที่มีการชะละลายของโลหะหนักหลายชนิดออกมาในขั้นที่ 4 (สำหรับการสกัดโลหะที่มีพันธะกับซัลไฟด์)

นอกจากนี้พบว่า ตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน มีพันธะของซิลิเกต (SiO_4)⁴⁻ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีมากในปูนซีเมนต์ โดยจะพบในช่วงเลขคลื่น 900-1000 cm^{-1} ใกล้เคียงกับข้อมูลของ Nakamoto (1986) พบที่เลขคลื่น 970 และ 925 และ Spence (1993) พบที่เลขคลื่น 956 813 และ 527 ดังแสดงในตารางที่ ๑.1 (ภาคผนวก ๑.) ทั้งนี้อัตราการก่อตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน สามารถทำให้เลขคลื่นที่เลื่อนไปได้ (Mollah และคณะ, 2000) และสำหรับโลหะหนักที่เกิดพันธะกับซิลิเกต จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักซึ่งจะอยู่ในรูป $\text{CuSiO}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{Zn}_3\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\cdot\text{H}_2\text{O}$

ส่วนพันธะของเหล็ก (FeO_4)²⁻ ของตัวอย่าง C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน พบในช่วงเลขคลื่น 790-830 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลของ Nakamoto (1986) พบที่เลขคลื่น 832 ดังแสดงในตารางที่ ๑.1 (ภาคผนวก ๑.) และการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักอยู่ในรูป ZnFe_2O_4 ทั้งนี้ยังมีโลหะหนักอีกหลายชนิดที่สามารถเกิดพันธะกับเหล็ก ดังผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีสกัดแยกที่มีการชะละลายของโลหะหนักหลายชนิดออกมาในขั้นที่ 3 (การสกัดโลหะหนักที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์)

จากผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบด้วยเครื่อง FT-IR ในซีเมนต์เพสต์ของ C0 ถึง C32 ที่อัตราส่วนแตกต่างกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์มีปริมาณน้อย ทั้งนี้การระบุเลขคลื่นของพันธะต่างๆทำได้ยาก เนื่องจากมีการซ้อนทับกันของเลขคลื่นของหลายพันธะ

4.4.4 ผลการศึกษาชนิดของสารประกอบโลหะหนัก

โดยใช้วิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักหรือ Sequential Extraction ตามแบบของ Tessier, Campbell และ Bisson ที่ศึกษาไว้เมื่อปี 1979 ซึ่งมีหลักการที่ว่า สารประกอบโลหะหนักแต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายได้ในน้ำสกัดที่แตกต่างกัน และสามารถบอกได้ในเชิงปริมาณ โดยวิธีสกัดนี้เป็นการเพิ่มความชัดเจนของสารประกอบที่พบในปูนซีเมนต์จากผลการศึกษาชนิดของสารประกอบโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นผลึก จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD และผลการศึกษาพันธะของสารประกอบโลหะหนักจากการตรวจวัดด้วยเครื่อง FT-IR เนื่องจากขีดความสามารถอันจำกัดของเครื่องมือในการแยกแยะความถี่ของกราฟที่อาจเกิดการซ้อนทับกันและการถูกบดบังขององค์ประกอบที่ชัดเจนกว่าได้

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารประกอบของโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนัก ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างระหว่าง C0 และ C32 เพื่อให้เห็นถึงความชัดเจนที่เกิดขึ้น โดยสรุปได้ดังรูปที่ 4.25 ถึงรูปที่ 4.28 ส่วนข้อมูลเป็นร้อยละในแต่ละชั้นของการสกัดแยกแสดงดังตารางที่ ๑.1 ถึงตารางที่ ๑.9 (ภาคผนวก ๑.)

โดยที่การสกัดในแต่ละชั้นตอนมีความหมายดังนี้

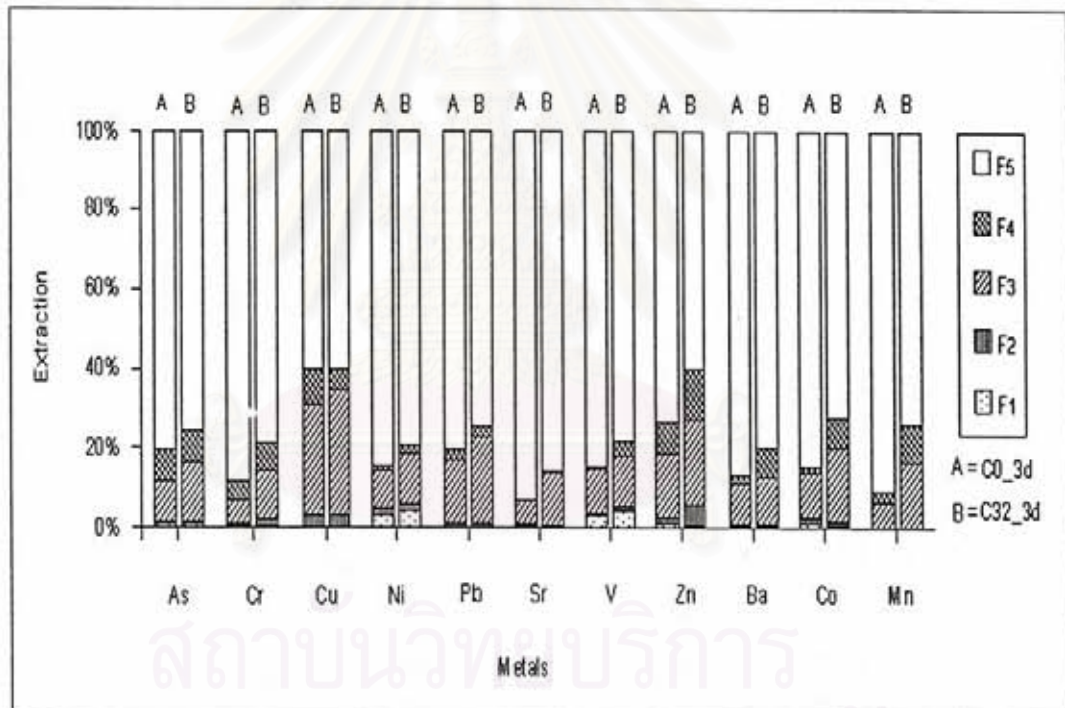
ชั้นที่ 1 คือ การสกัดพันธะโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย

ชั้นที่ 2 คือ การสกัดโลหะที่มีพันธะคาร์บอเนต

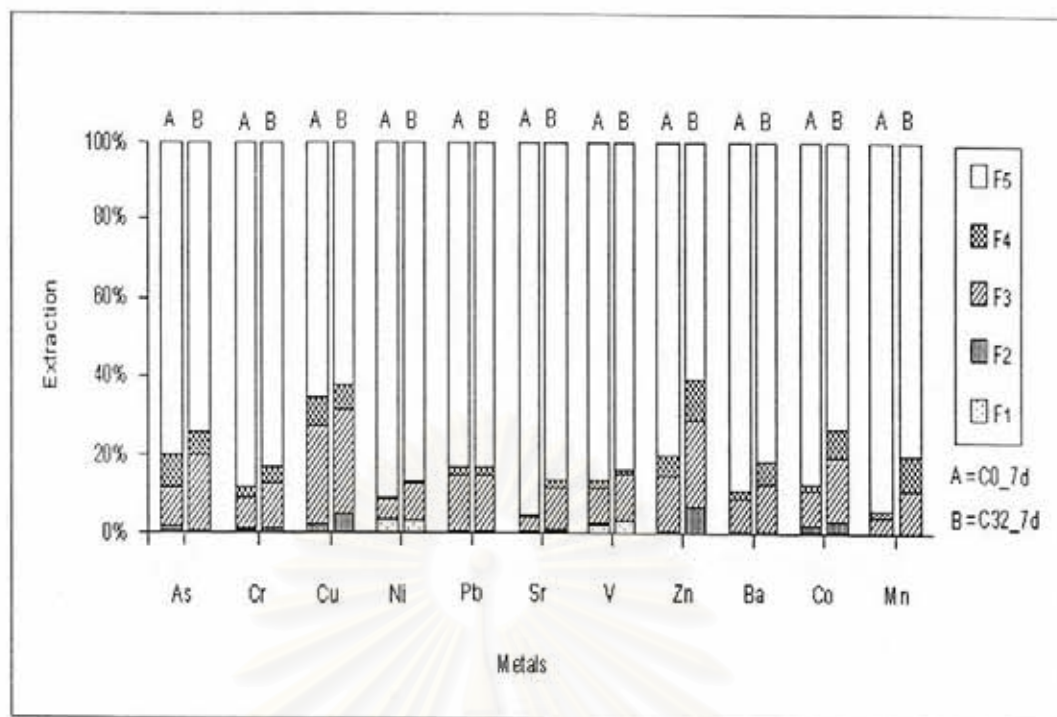
ชั้นที่ 3 คือ การสกัดโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์

ชั้นที่ 4 คือ การสกัดโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์

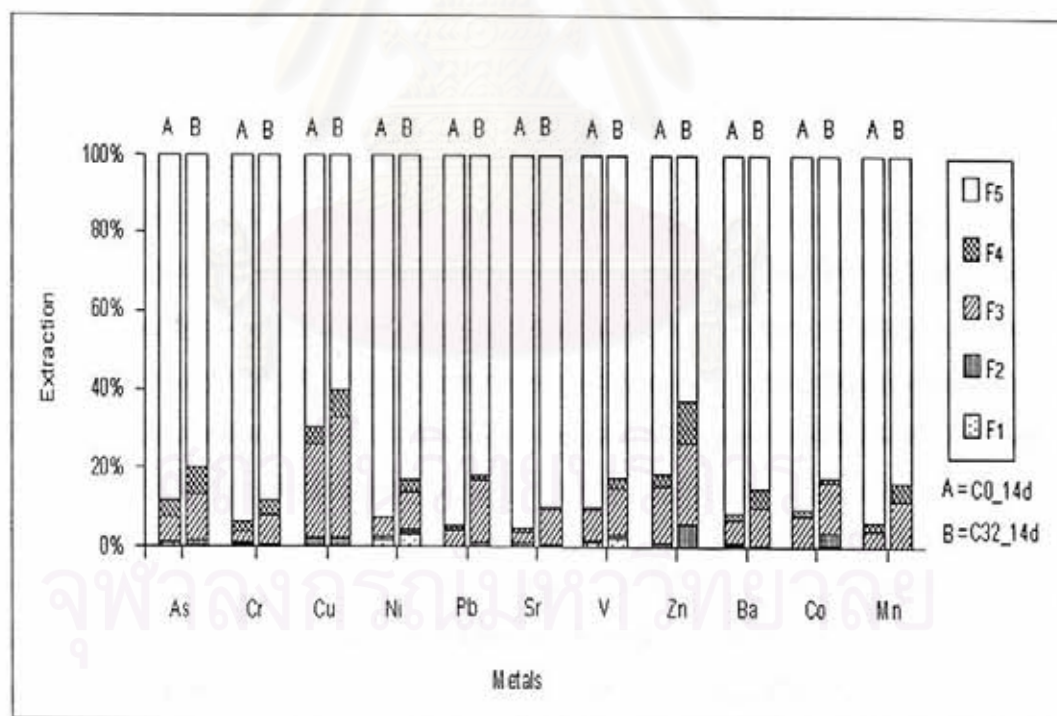
ชั้นที่ 5 คือ สารประกอบโลหะที่เหลือ (Residual Fraction)



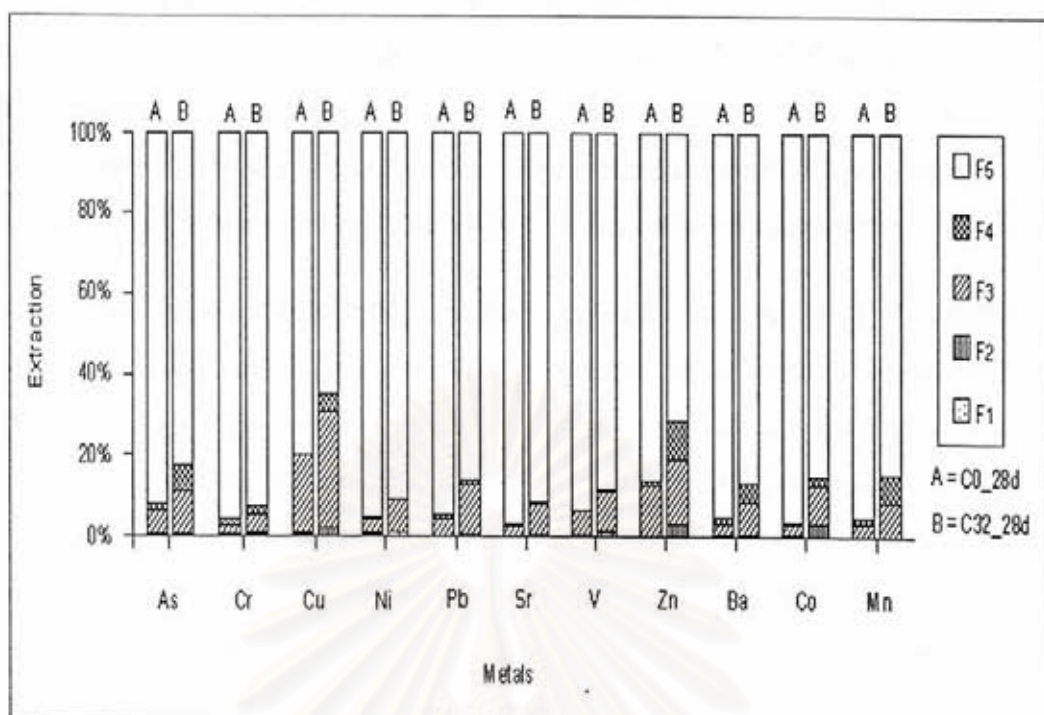
รูปที่ 4.25 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุปม 3 วัน



รูปที่ 4.26 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุบ่ม 7 วัน



รูปที่ 4.27 ความเข้มข้นของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุบ่ม 14 วัน



รูปที่ 4.28 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักในรูปร้อยละด้วยวิธีสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักของตัวอย่าง C0 และ C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน

จากผลการวิเคราะห์ในชั้นที่ 1 สำหรับการสกัดพันธะโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่ายที่พีเอชในการสกัดเท่ากับ 7 พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ไม่ถูกชะละลายออกมาในชั้นนี้ (ไม่เกินร้อยละ 2) ส่วนนิกเกิล (Ni) และวานาเดียม (V) จะถูกชะละลายออกมาในชั้นนี้ (ประมาณร้อยละ 5) สารประกอบของโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้มีพันธะโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่ายจึงมีความเสถียรต่ำ (Tessier, Campbell และ Bisson, 1979) โดย Achtembosh และคณะ (2003) พบว่า ที่พีเอชน้อยกว่า 8 นิกเกิลมีการชะละลายอย่างรวดเร็ว และการชะละลายของวานาเดียม จะเกิดขึ้นที่พีเอชน้อยกว่า 9 ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังและควรควบคุมความเข้มข้นในการนำวัตถุที่มีโลหะหนักเหล่านี้ก่อนเข้าสู่ระบบการผลิตปูนซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์ในชั้นที่ 2 สำหรับการสกัดโลหะที่มีพันธะคาร์บอเนตที่พีเอชในการสกัดเท่ากับ 5 พบว่า ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) และโคบอลต์ (Co) มีการชะละลายออกมาในชั้นนี้มากกว่าโลหะหนักชนิดอื่น (ประมาณร้อยละ 5) แสดงว่าโลหะหนักจะอยู่ในรูปของพันธะคาร์บอเนต สอดคล้องกับผลการศึกษารูปแบบสารประกอบของโลหะหนักที่เป็นผลึกด้วยเครื่อง XRD ที่พบสารประกอบโลหะหนักในรูป $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ และ $\text{Zn}_4(\text{CO}_3)(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ แต่ไม่พบ

สารประกอบโลหะหนักของโคบอลต์ เนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นในปริมาณน้อยกว่าทองแดง และสังกะสี และพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ไม่ถูกชะละลายออกมาในขั้นนี้ (ไม่เกินร้อยละ 3) โดยในช่วงพีเอชการสกัดนี้ยากที่จะชะละลายโลหะหนักในรูปคาร์บอเนต เนื่องจากพีเอชที่เปลี่ยนไปหลังการสกัด มีค่าเพิ่มมากขึ้นจาก 5 ไปถึง 9 ซึ่งเป็นพีเอชในช่วงเดียวกันกับในระบบซีเมนต์ ทำให้ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ชะละลายออกมาในขั้นนี้มีค่าต่ำนั่นเอง (Li และคณะ, 2001)

ผลการวิเคราะห์ในขั้นที่ 3 สำหรับการสกัดโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ที่พีเอชในการสกัดเท่ากับ 2 พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ เนื่องจากมีการชะละลายของโลหะหนักทุกชนิดออกมาในขั้นนี้มากกว่าขั้นอื่น (ประมาณร้อยละ 10-30) เนื่องจากในระบบซีเมนต์มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหลัก โลหะหนักจึงมีโอกาสไปจับกับพันธะเหล็กออกไซด์ โดยการสกัดแยกสารประกอบที่พันธะนี้ ทำให้มีการชะละลายของโลหะหนักออกมาปริมาณมากด้วย เช่นเดียวกับในงานวิจัยที่ผ่านมาของ Tessier, Campbell และ Bisson ที่ศึกษาไว้ในปี 1979 และงานของ Li และคณะ ในปี 2001 พบว่า โลหะหนักส่วนใหญ่มีการชะละลายออกมากที่สุดในการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักขั้นที่ 3 โดยเฉพาะทองแดง และสังกะสี และจากการศึกษาด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักของทองแดงและสังกะสีที่อยู่ในรูป $ZnFeO_4$ เนื่องจากมีปริมาณความเข้มข้นสูงกว่าโลหะหนักชนิดอื่น

ผลการวิเคราะห์ในขั้นที่ 4 สำหรับการสกัดโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์ที่พีเอชในการสกัดเท่ากับ 2 ในงานพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะมีการชะละลายออกมาในขั้นนี้ประมาณร้อยละ 10 ดังนั้นเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมปกติ ความสามารถของการชะละลายโลหะหนักจึงมีปริมาณน้อย และจากการศึกษาด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักของทองแดงที่เกิดพันธะกับซัลไฟด์ ที่อยู่ในรูป $CuFeS_2$ และ $Cu_3(SO_4)(OH)_4$ ส่วนสารประกอบโลหะหนักที่มีพันธะกับสารอินทรีย์จะมีโอกาสเกิดได้น้อยมาก เนื่องจากในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องให้ความร้อนสูงมาก คาดว่าจะทำลายองค์ประกอบของสารอินทรีย์โดยสมบูรณ์

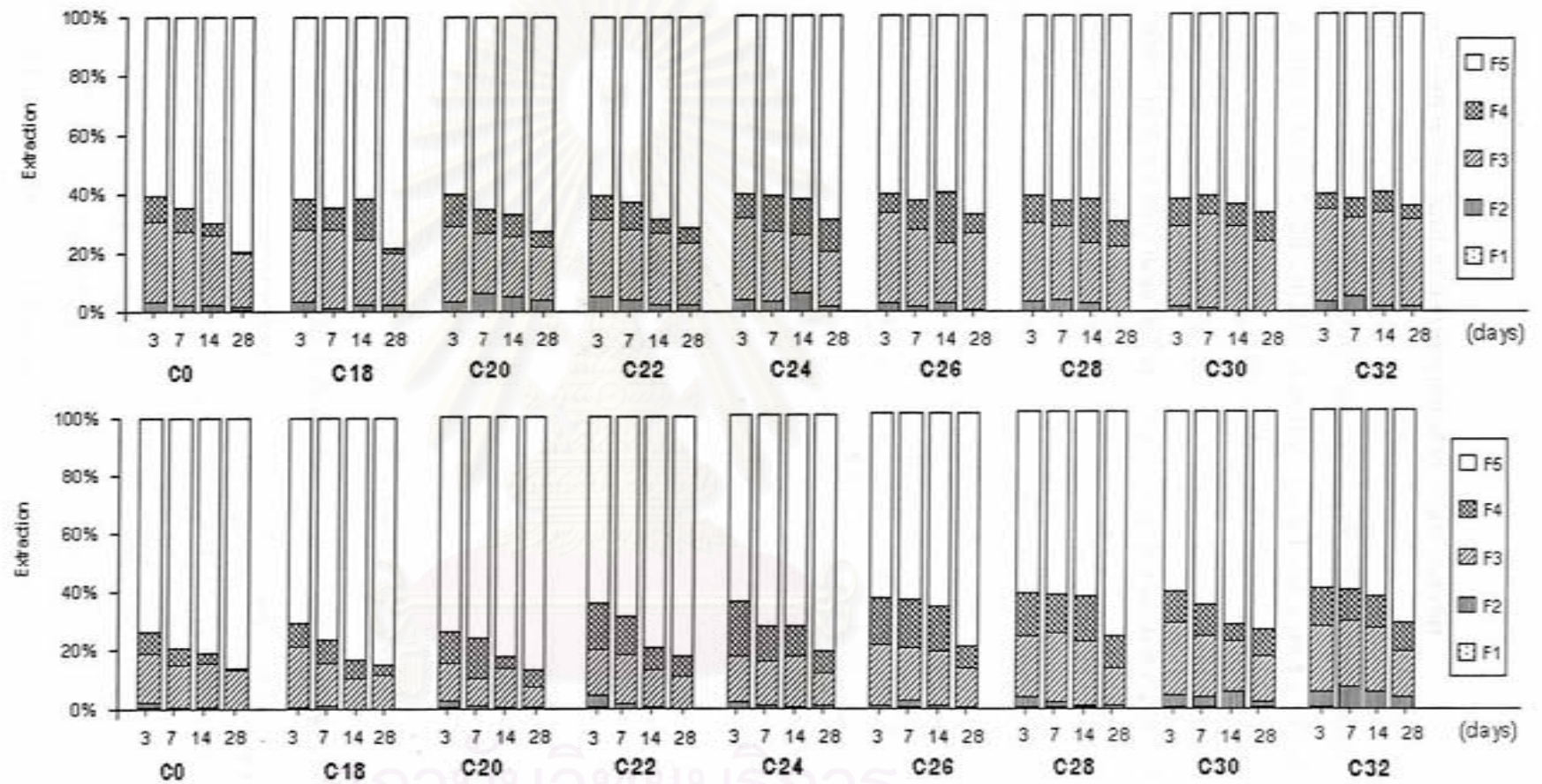
ผลการวิเคราะห์ในขั้นที่ 5 สารประกอบโลหะหนักที่เหลือ (Residual Fraction) พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 80 จะเหลืออยู่ในขั้นนี้ แสดงว่าโลหะหนักมีความเสถียรสูงและยากต่อการชะละลายภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ ดังการศึกษาของ Tessier, Campbell และ Bisson ที่ศึกษาไว้ในปี 1979 และในปี 2006 ในงานวิจัยของ Wan และคณะ ที่สรุปไว้ว่า โลหะหนักที่เหลืออยู่ในขั้นนี้จะไปรวมตัวเป็นสารประกอบที่เชิงซ้อนในโครงสร้างของระบบซีเมนต์

ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบของโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะหนักทั้งหมด จากการแปรผันอัตราส่วนตะกั่วทองแดงที่เพิ่มขึ้นในตัวอย่าง C0 ถึง C32 มีแนวโน้มของการชะละลายที่เพิ่มมากขึ้น เมื่อแปรผันอัตราส่วนของตะกั่วทองแดงที่เพิ่มมากขึ้น ยกตัวอย่างจากผลของการสกัดโลหะหนักในแต่ละชั้นของทองแดงและสังกะสี ดังแสดงในรูปที่ 4.29 นอกจากนี้พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอายุบ่มและความสามารถในการชะละลายออกมาในแต่ละชั้นจะแปรผกผันกัน แสดงถึงความเสถียรของโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของโลหะหนักกับระบบซีเมนต์มีมากขึ้นนั่นเอง

จากผลการวิเคราะห์ สามารถสรุปได้ว่า โลหะหนักส่วนใหญ่มีแนวโน้มที่จะอยู่ในรูปที่มีพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์จึงมีการชะละลายออกมาในชั้นที่ 3 มากกว่าชั้นอื่น และโลหะหนักบางส่วนจะอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์ ทั้งนี้ภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ การชะละลายของสารประกอบโลหะหนักทั้งหมดจะเกิดได้ยาก แสดงถึงความเสถียรสูงของโลหะหนักในซีเมนต์ และจากผลการวิเคราะห์ของซีเมนต์เพสต์ในช่วงอายุบ่มที่แตกต่างกัน และสรุปได้ว่าโลหะหนักส่วนใหญ่มีความเสถียรสูง และมีความเสถียรสูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น คาดว่าโลหะหนักอาจไปทำปฏิกิริยารวมอยู่ในระบบซีเมนต์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนยากต่อการชะละลายได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

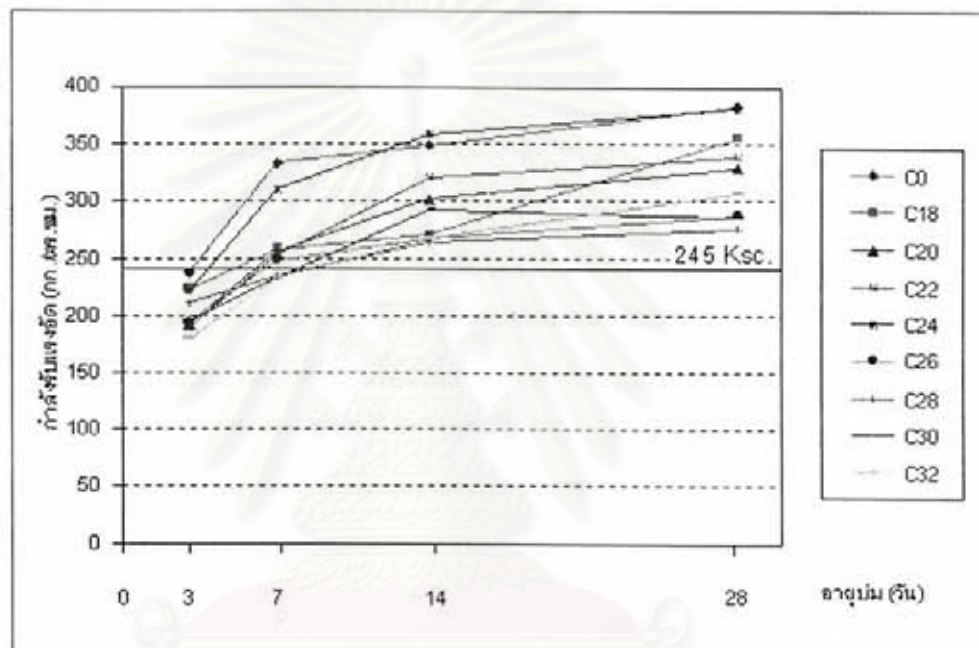


รูปที่ 4.28 ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบของทองแดง (รูปบน) และสังกะสี (รูปล่าง) โดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C0 ถึง C32 ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน

4.5 ผลการหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากการหล่อก้อนมอร์ต้าที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน นำมาทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-05 แสดงในตาราง ข.1 ถึงตารางที่ ข.2 (ภาคผนวก ข.)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่อายุบ่มต่างๆของทุกตัวอย่าง ดังแสดงรูปที่ 4.30 พบว่า กำลังรับแรงอัดที่อายุบ่ม 3 7 และ 28 วัน มีค่าเกินมาตรฐานของมอก.15-2514 ทุกตัวอย่าง โดยค่ามาตรฐานนี้แสดงในตารางที่ 4.10 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2517) ส่วนอายุบ่ม 14 วัน ไม่มีค่ามาตรฐาน ซึ่งในการวิจัยนี้ศึกษาเพื่อให้เห็นแนวโน้มของการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่เกิดขึ้น

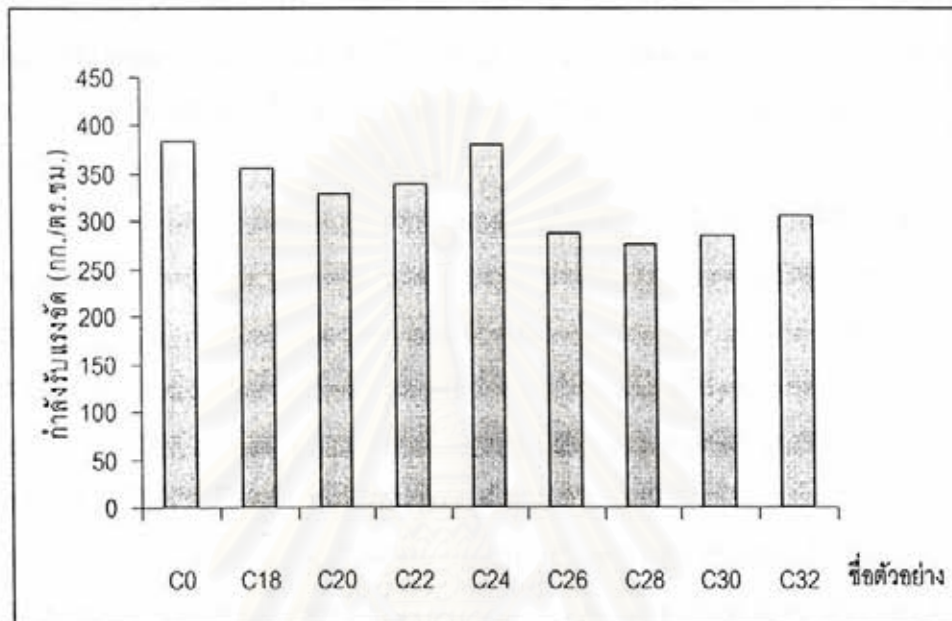


รูปที่ 4.30 กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าอัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 3 7 14 และ 28 วัน

ตารางที่ 4.10 ค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัดของมอร์ต้าตามมาตรฐานของ มอก.15-2514

อายุก้อนมอร์ต้า	ค่ามาตรฐานของกำลังรับแรงอัด (กก. / ตร.ซม.)	ค่าความคลาดเคลื่อนของอายุที่ขอมให้ (ชั่วโมง)
1 วันในอากาศชื้นและ 2 วันในน้ำ	85	±1
1 วันในอากาศชื้นและ 6 วันในน้ำ	150	±3
1 วันในอากาศชื้นและ 27 วันในน้ำ	245	±12

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นได้ว่า ก้อนมอร์ตาร์ C0 จะมีค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด เมื่อร้อยละของ ตะกรันทองแดงในวัสดุดิบทั้งหมดเพิ่มขึ้น กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงแต่มีลักษณะไม่เป็นแนวโน้ม สังกัดได้จากตั้งแต่ C18 จนถึง C32 เพื่อให้เห็นการลดลงของกำลังรับแรงอัดจากการแทนที่ ตะกรันทองแดงในวัสดุดิบทั้งหมด จึงนำกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ดังแสดง ในรูปที่ 4.31 มาอธิบายดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.31 กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์อัตราส่วนต่างๆ ที่อายุบ่ม 28 วัน

เมื่ออัตราส่วนของตะกรันทองแดงที่ใช้ในการเผาพร้อมเพิ่มขึ้น ปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการลดลงของกำลังรับแรงอัดตั้งแต่ C18 ถึง C32 ที่ให้เห็นว่า ผลกระทบของโลหะหนักมีผลต่อกำลังรับแรงอัดให้มีค่าต่ำลงได้ ทั้งนี้ไม่สามารถสรุปได้ชัดเจนว่าโลหะหนักมีผลกระทบกำลังรับแรงอัด เนื่องจากเมื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเท่ากับร้อยละ ± 10 นั้น พบว่า กำลังรับแรงอัดของทุกอัตราส่วนมีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่า ในการศึกษาครั้งนี้ ปริมาณโลหะหนักที่มีในปูนซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์นั่นเอง และกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์มีค่าเกินมาตรฐานของมอก. 15-2514 ทุกตัวอย่าง ดังนั้นอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ตะกรันทองแดงในวัสดุดิบทั้งหมด จึงมีความเป็นไปได้ถึงตัวอย่าง C32 นอกจากนี้ยังต้องทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในหัวข้อต่อไป

ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่นำมาทำเป็นก้อนมอร์ตานี้ มีโลหะหนักหลายชนิดรวมอยู่ด้วยกัน ในการศึกษาครั้งนี้จึงไม่สามารถบ่งบอกถึงผลของโลหะหนักที่ชี้เฉพาะได้ โดยอาจประเมินได้จากการมีโลหะหนักที่มีปริมาณมากกว่าชนิดอื่นๆ คือ สังกะสีและทองแดง จากเอกสารอ้างอิงพบว่าสังกะสีและทองแดงจะไปหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดการก่อตัวช้าลงและลดความแข็งแรงของก้อนมอร์ตานี้ในระยะแรก และในระยะสุดท้ายสังกะสีจะช่วยให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นได้ (Murat และ Sorrentino, 1996; Zain และคณะ, 2004) นอกจากนี้จากการตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD พบสารประกอบโลหะหนักที่อยู่ในรูป $Zn(OH)_2$ และ $CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O$ ซึ่งจะมีผลต่อการหน่วงการก่อตัวของก้อนมอร์ตานี้ได้ (Spence, 1993; Asavapisit, Naksrichum และ Harnwajanawong, 2005; Lieber, 1969)

มีรายงานที่กล่าวถึงผลกระทบของโลหะหนักที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดให้มีค่าต่ำลง ดังเช่น แคดเมียม ตะกั่วและสังกะสีจะหน่วงการก่อตัวและทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง (Murat และ Sorrentino, 1996) กำลังรับแรงอัดมีค่าลดลง อาจเนื่องมาจากโลหะหนักจะขัดขวางการก่อตัว ทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ไม่สมบูรณ์ ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดมีค่าลดลงได้ (Shi Chang และ Chaing, 2003; Zain และคณะ, 2004) และนอกจากนี้ยังพบว่า โคบอลต์ แมงกานีส สตรอนเชียม ฟอสฟอรัสและโบรอน มีผลทำให้กำลังรับแรงอัดลดลงได้

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตานี้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของมอก. 15-2514 แสดงถึงความสามารถในการนำตะกั่ว ทองแดงมาเป็นวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบทั้งหมดในกระบวนการเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ต้า

นำก้อนมอร์ต้าของตัวอย่าง C0 ถึง C32 ที่อายุบ่ม 28 วัน จากการศึกษาในหัวข้อ 4.5 มาทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ที่สกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) เทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) และตาม US EPA SW-846 Method 1311 สรุปเปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ส่วนค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในก้อนมอร์ต้าที่อัตราส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ ข.1 ถึงตารางที่ ข.2 (ภาคผนวก ข.)

ตารางที่ 4.11 ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในก้อนมอร์ต้าเทียบกับกับค่ามาตรฐานของปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้

ชนิดโลหะหนัก	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มก. /ล.)	ค่าที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง (มก. /ล.)	
		WET	TCLP
As	5	0.032-0.254	0.056-0.462
Cd	1	< 0.009	< 0.009
Cr	5	0.006-0.024	0.020-0.062
Cu	25*	0.010-0.245	0.125-0.541
Hg	0.2	< 0.004	< 0.004
Ni	20*	0.012-0.095	0.015-0.119
Pb	5	0.012-0.136	0.013-0.331
Tl	7*	< 0.247	< 0.247
V	24*	0.008-0.028	0.010-0.031
Zn	250*	0.048-0.617	0.085-1.745
Ag	5	< 0.003	< 0.003
Ba	100	0.013-0.109	0.109-0.374
Co	80*	0.007-0.036	0.013-0.059
Se	1	< 0.102	< 0.102
Ga	-	< 0.040	< 0.040
Mn	-	0.001-0.009	0.003-0.021
Sr	-	0.051-0.767	0.045-0.767

หมายเหตุ: * คือ "ไม่มีค่ามาตรฐานกำหนดไว้สำหรับ TCLP"

จากตารางที่ 4.11 พบว่าโลหะหนักที่ชะละลายออกมามีปริมาณน้อยและมีค่าต่ำกว่าทั้งสองมาตรฐาน โลหะหนักที่พบมากที่สุดคือ สังกะสี เนื่องจากในระบบซีเมนต์ ซึ่งมีความเป็นด่างสูงนั้น จะสามารถตรึงโลหะหนักไว้และลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ ทั้งนี้ความสามารถในการชะละลายนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ด้วย (Spence, 1993; Zieger และ Johnson, 2001; Asavapisit, Naksrichum และ Hamwajanawong, 2005)

จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ สรุปได้ว่า ผลของโลหะหนักหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ พบว่า ตัวอย่างที่มีการนำตะกรันทองแดงมาใช้ในกระบวนการเผาพร้อมกับตัวอย่างที่ไม่มีการนำตะกรันทองแดงมาใช้ในกระบวนการเผาไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนและการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าทุกตัวอย่างผ่านเกณฑ์มาตรฐานของมอก. 15-2514 ทุกอายุบ่ม ส่วนผลของการชะละลายของก้อนมอร์ต้า พบว่า โลหะหนักจะชะละลายออกมาในปริมาณน้อยและมีค่าต่ำกว่าทั้งมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สามารถนำตะกรันทองแดงมาเป็นวัตถุดิบทดแทนในวัตถุดิบทั้งหมดในการเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการวิจัยสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ใช้ซีเมนต์จากกระบวนการเผาพร้อมกับตะกรันทองแดง สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตะกรันทองแดง พบว่า สารประกอบหลัก ได้แก่ เหล็ก (Fe_2O_3) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียม (CaO) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักเช่นเดียวกับในปูนซีเมนต์ แสดงความเป็นไปได้ในการนำตะกรันทองแดงมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ แต่ทั้งนี้ตะกรันทองแดงยังมีองค์ประกอบของโลหะหนักหลายชนิดรวมอยู่ด้วย โดยโลหะหนักที่มีอยู่ในปริมาณสูงคือ สังกะสี (Zn) และทองแดง (Cu) ดังนั้นจึงต้องมีการตรวจสอบเบื้องต้น เช่น การชะละลายของโลหะหนัก ซึ่งผลการทดสอบการชะละลาย พบว่า ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในตะกรันทองแดงเทียบกับค่ามาตรฐานของปริมาณโลหะหนักที่ยอมรับได้ มีค่าต่ำกว่าทั้งมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP) แสดงถึงความเป็นของเสียที่ไม่อันตราย

5.1.2 ผลการศึกษานิวคลีและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์ด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟ (Microwave Digester) พบว่า ปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของตะกรันทองแดงที่ใช้ในการเผาเพิ่มขึ้น โดยทองแดงมีค่าความเข้มข้นเกินเกณฑ์ในการผลิตปูนซีเมนต์ (S-QA-012) ที่อัตราส่วน C28 C30 และ C32 ตามลำดับ

5.1.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ พบว่า ทุกอัตราส่วน มีลักษณะทางกายภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ส่วนลักษณะทางเคมีจากการตรวจวัดองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง XRF สอดคล้องกับผลการศึกษานิวคลีและปริมาณของโลหะหนักทั้งหมดในปูนซีเมนต์

5.1.4 ผลการศึกษาลักษณะกายภาพและการกระจายตัวของโลหะหนักด้วยเครื่อง SEM/EDS พบว่า อัตราส่วน C32 มีการกระจายตัวของสังกะสี เห็นได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง EDS สรุปได้ว่า สังกะสีจะเข้าไปรวมอยู่ในผลึกเอทริงไกท์ และพบการกระจายตัวของสังกะสีและทองแดง โดยโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้จะเข้าไปรวมอยู่ในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และอัตราส่วน C30 พบการกระจายตัวของสังกะสี แต่ที่อัตราส่วนอื่นๆไม่พบโลหะหนักกระจายตัวอยู่ในซีเมนต์เฟส เนื่องจากความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยเกินไป ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดได้

5.1.5 ผลตรวจวัดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึกด้วยเครื่อง XRD พบว่า โลหะหนักมีผลต่อโครงสร้างภายในของซีเมนต์เฟส โดยเกิดเป็นสารประกอบโลหะหนักที่ซับซ้อนเกิดขึ้น การพบสารประกอบของโลหะหนักในตัวอย่างจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานไปของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้อัตราการเกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณลดลง

5.1.6 ผลการตรวจวัดพันธะของสารประกอบโลหะหนักด้วยเครื่อง FT-IR ในซีเมนต์เฟสของ C0 ถึง C32 พบว่า รูปแบบที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เฟสที่อัตราส่วนต่างกันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนลักษณะของเลขคลื่นที่เลื่อนไป เป็นผลมาจากการแทนที่ของไอออนโลหะหนักในพันธะของสารประกอบ

5.1.7 ผลการศึกษาชนิดของสารประกอบโลหะหนัก โดยวิธี Sequential Extraction พบว่า เมื่อแปรผันอัตราส่วนของตะกั่วทองแดงที่เพิ่มมากขึ้นแนวโน้มของการชะละลายที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ เนื่องจากมีการชะละลายออกมาในขั้นที่ 3 มากกว่าขั้นอื่น (ประมาณร้อยละ 10-30 ของสารประกอบทั้งหมด) ดังนั้นสรุปได้ว่า โลหะหนักจะเหลืออยู่ในขั้นที่ 5 (Residual Fraction) ประมาณร้อยละ 80 ของสารประกอบทั้งหมด ทั้งนี้ภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ การชะละลายของสารประกอบโลหะหนักทั้งหมดจะเกิดได้ยาก แสดงถึงความเสถียรสูงของโลหะหนักในซีเมนต์ และจากผลการวิเคราะห์ของซีเมนต์เฟสในช่วงอายุบ่มที่แตกต่างกัน และมีความเสถียรสูงขึ้นเมื่อมีอายุบ่มเพิ่มขึ้น โดยโลหะหนักจะรวมอยู่ในระบบซีเมนต์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนยากต่อการชะละลายได้

5.1.8 ผลการหล่อก้อนมอร์ต้าและการทดสอบกำลังรับแรงอัด พบว่า ผลกระทบโลหะหนักต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่มีการนำตะกั่วทองแดงมาใช้ในกระบวนการเผาพร้อมกับตัวอย่างที่ไม่มีการนำตะกั่วทองแดงมาใช้ในกระบวนการเผาไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน และผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าผ่านเกณฑ์มาตรฐานของมอก.15-2514 ทุกตัวอย่าง

5.1.9 ผลการทดสอบการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ตา พบว่า โลหะหนักที่ชะละลายออกมามีปริมาณน้อย เนื่องจากในระบบซีเมนต์ซึ่งมีความเป็นด่างสูงนั้น จะสามารถตรึงโลหะหนักไว้และลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้ภายใต้สภาพแวดล้อมปกติ จึงมีค่าต่ำกว่าทั้งมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 และมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311

จากผลการวิจัยทั้งหมด สรุปได้ว่า พฤติกรรมของโลหะหนักหลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ที่มีการนำตะกรันทองแดงมาใช้ในกระบวนการเผาพร้อมกับตัวอย่างที่ไม่มีการนำตะกรันทองแดงมาใช้ในกระบวนการเผาไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและผลของการชะละลายของก้อนมอร์ตามีค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสามารถนำตะกรันทองแดงมาเป็นวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบทั้งหมดในกระบวนการเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้สูงถึงร้อยละ 3.2 โดยน้ำหนัก

5.2 ข้อเสนอแนะและปัญหาอุปสรรคที่พบในงานวิจัย

5.2.1 ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์จากกระบวนการผลิตจริง การแปรผันอัตราส่วนตะกรันทองแดงที่เผาพร้อมในอัตราส่วนที่สูง จะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ จึงไม่สามารถเพิ่มอัตราส่วนตะกรันทองแดงได้สูงตามที่ต้องการ ทำให้ผลการวิจัยในบางเรื่องทำได้ไม่ชัดเจน เช่น การศึกษาสถานะภาพของโลหะหนักในปูนเม็ดด้วยเครื่อง XRD FT-IR และ SEM/EDS เนื่องจากโลหะหนักมีปริมาณความเข้มข้นน้อยเกินไป ทำให้การตรวจวัดบางครั้งไม่สามารถตรวจวัดเจอ ทำให้ผลการทดลองไม่สามารถสรุปผลออกมาได้อย่างชัดเจนเท่าที่ควร

5.2.2 ควรมีการจำลองเตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดเล็กขึ้นมาใช้งาน เพื่อที่จะสามารถควบคุมการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในปริมาณที่ต้องการได้ อีกทั้งสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กฤษณ์ จารุทะวีย์. 2545. การใช้แก๊สลอยเส้นใยปาล์มและแก๊สลอยของชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จุมพล เลิศชูวงศ์. 2546. SCCC's Industrial Waste Disposal Services. ธุรกิจการจัดการของเสียและพลังงานควรปรับตัวอย่างไร. กรุงเทพมหานคร: แสงสว่างการพิมพ์.
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (ซีแพค).
- ธีระพล ตีรวิน. 2546. ทางเลือกของการกำจัดกากอุตสาหกรรมด้วยมาตรฐานสากล. ธุรกิจการจัดการของเสียและพลังงานควรปรับตัวอย่างไร. กรุงเทพมหานคร: แสงสว่างการพิมพ์.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.diw.go.th/editwebdesign/html/versionthai/laws/27.pdf>
[27 เมษายน 2549]
- วินิต ช่อวีเชียร. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิริยา เทวนุกูล. 2546. การใช้ตะกอนดินเหนียวเป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริวัฒน์ ไชยชนะ, ผศ. 2542. ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 2. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สนธิสัญญาและยุทธศาสตร์, สำนัก. อนุสัญญาบาเซลว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายข้ามแดนของของเสียอันตรายและการกำจัด[ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www2.diw.go.th/treaty/basel.htm>[28 มิถุนายน 2548]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- Achtembosch, M., Brautigam, K. R., Hartlieb, N., Kupsch, C., Richers, U., and Stemmermann, P. (2003). Heavy Metals in Cement and Concrete Resulting from the Co-incineration of Wastes in Cement Kilns with Regard to the Legitimacy of Waste Utilization. ITAS-Project.
- Albino, V., Cioffi, R., Marroccoli, M., and Santoro, L. (1996). Evaluation of solid waste stabilization process. Journal of Hazardous Materials. 51: 241-252.
- Al-Jabri, K. S., Taha, R. A., Al-Hashmi, A., and Al-Harthy, A. S. (2006). Effect of copper slag and cement by-pass dust addition on mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials.
- Alter, H. (2005). The Composition and Environmental hazard of Copper slags in the context of the Basel Convention. Resources, Conservation and Recycling. 43: 353-360.
- Andrade, F. R. D., Maringolo, V., and Kihara, Y. (2003). Incorporation of V, Zn and Pb into the Crystalline Phases of Portland Clinker. Cement and Concrete Research. 33: 63-71.
- Arjunan, P., Silsbee, M. R., and Roy, D. (1999). Sulfoaluminate-belite Cement from Low-calcium Fly Ash and Sulfur-rich and other Industrial By-products. Cement and Concrete Research. 29: 1305-1311.
- Asavapisit, S., Naksrichum, S., and Harnwajanawong, N. (2005). Strength, leachability and microstructure characteristics of cement-based solidified plating sludge. Cement and Concrete Research. 35: 1042-1049.
- Bishop, M., Bott, S. G., and Barron, A. R. (2003). A New Mechanism for Cement Hydration Inhibition: Solid-State Chemistry of Calcium Nitritotris (methylene) triphosphonate. Chemistry of Materials. 15(16): 3074-3088.
- Caponero, J., and Tenorio, J. A. S. (2000). Laboratory testing of the use of phosphate-coating sludge in cement clinker. Resources, Conservation and Recycling. 29: 169-179.
- Cartledge, F. K., Eaton, H. C., and Tittlebaum, M. E. (1991). Solidification of salts of arsenic, chromium and lead using cement and various additives. Journal of Hazardous Materials. 28(1-2): 230-231.

- Cocke, D. L. (1990). The binding chemistry and leaching mechanisms of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization systems. Journal of Hazardous Materials. 24: 231-253.
- Dalton, J. L., Gardner, K. H., Seager, T. P., Weimer, M. L., Spear, J. C. M., and Magee, B. J. (2004). Properties of Portland cement made from contaminated sediments. Resources, Conservation and Recycling. 41(3): 227-241.
- Douglas, E., and Mainwaring, PR. (1985). Hydration and pozzolanic activity of nonferrous slags. Am Ceramic Soc Bull. 64:700-706.
- Douglas, E., Mainwaring, PR., and Hemmings, R. T. (1991). Pozzolanic Properties of Canadian Non-Ferrous Slags. In V. M. Molhotra (ed.), Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete: Proceeding Third International Conference: 1525-1549.
- Dutre, V., and Vandecasteele, C. (1995). Solidification/stabilisation of arsenic-containing waste: Leach tests and behavior of arsenic in the leachate. Waste Management. 15(1): 55-62.
- Emery, J. J. (1986). Manitoba slags, deposits, characterization, modifications, potential utilization. Geotechnical Engineering Limited. [Online]. Available from: <http://www.google.com>[2005, June 13]
- Environmental Toxicology International, Inc. (ETI). (1992). All Fired Up Burning Hazardous Waste in Cement Kilns. ETI, Seattle, WA.
- Erdem, E., Guna, M. E., and Donat, R. (2003). Hydration and mechanical properties of Portland cement containing eloxal waste from aluminium industry. Journal of Materials Processing Technology. 136: 35-38.
- Espinosa, D. C. R., and Tenorio, J. A. S. (2000). Laboratory Study of Galvanic Sludge's Influence on the Clinkerization Process. Resources, Conservation and Recycling. 31: 71-82.
- Garavaglia, R., and Caramuscio, P. (1994). Coal Fly-Ash Leaching Behaviour and Solubility Controlling Solids. In: Goumans, J.J.J.M.; Van der Sloot, H. A., Aalbers, Th. G. : Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. Studies in Environmental Science, Bd. 60, Utrecht, Elsevier Science BV.

- Glasser, F. P. (1997). Fundamental aspects of cement solidification and stabilization. Journal of Hazardous Materials, 52: 151-170.
- Gorai, B., Jana, R. K., and Premchand (2003). Characteristics and utilisation of copper slag: a review. Resources, Conservation and Recycling, 39: 299-313.
- Gougar, M. L. D., Scheetz, B. E., and Roy, D. M. (1996). Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization. A review. Waste Management, 16(4): 295-303.
- Heimann, R. B., Conrad, D., Florence, L. Z., Neuwirth, M., Ivey, D. G., Mikula, R. J., and Lam, W. W. (1992). Leaching of simulated heavy metal wastestabilized/solidified in different cement matrices. Journal of Hazardous Materials, 31(1): 39-57.
- Hughes, T. L., Methven, C. M., Jones, T. G. J., Pelham, S. E., Fletcher, P., and Hall, S. (1995). Determining Cement Composition By Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Advn Cem Bas Mat, 2: 91-104.
- Kindness, A., Lachowski, E. E., Minocha, A. K., and Glasser, F. P. (1994). Immobilization and fixation of molybdenum (VI) by Portland cement. Waste Management, 14(2): 97-102.
- Kiyak, B., Ozer, A., Altundogan, S. H., Erdem, M., and Tumen, F. (1999). Cr (VI) reduction in aqueous solution by using copper smelter slag. Waste Management, 19: 333-338.
- Lagrega, M. D., Buckingham, P. L., and Evans, J. C. (2001). Hazardous Waste Management. 2 nd ed. Singapore. McGraw-Hill.
- Li, X. D., Poon, C. S., Sun, H., Lo, I. M. C., and Kirk, D. W. (2001). Heavy Metal Speciation and Leaching Behaviors in Cement based Solidified/Stabilized Waste Materials. Journal of Hazardous Materials, A82: 215-230.
- Li, X. D., Zhang, Y. M., Poon, C. S., and Lo, I. M. C. (2001). Study of Zinc in Cementitious Material Stabilised/Solidified Wastes by Sequential Chemical Extraction and Microstructural Analysis. Chemical Speciation and Bioavailability, 13(1): 1-7.
- Manz, M., and Castro, L. J. (1997). The environmental Hazard caused by smelter slag from the Sta. Maria de la Paz mining district in Maxico. Environmental Pollution, 98(1): 7-13.

- Mijno, V., Catalan, L. J. J., Martin, F., and Bollinger, J. C. (2004). Compositional changes in cement-stabilized waste during leach tests-comparison of SEM/EDX with predictions from geochemical speciation modeling. Journal of Colloid and Interface Science. 1(21): 1-13.
- Mobasher, B. M., Arino, A. M., and Devaguptapu, R. (1996). Effect of Copper slag on the Hydration of blended Cementitious Mixtures. Proceedings, ASCE, Materials Engineering Conference, Materials for the New Millinium, ed. K. Chong. : 1677-1686.
- Mokrzycki, E., and Bochenczyk, A. U. (2003). Alternative Fuels for the Cement Industry. Applied Energy. 74: 95-100.
- Mollah, M. Y. A., Weng, Y., Robert, S., and David, L. C. (2000). A Fourier Transform Infrared Spectroscopic Investigation of the early hydration of Portland cement and the Influence of sodium lignosulfonate. Cement and Concrete Research. 30: 267-273.
- Monshi, A., and Asgarani, M.K. (1999). Producing Portland cement from Iron and Steel Slags and Limestone. Cement and Concrete Research. 29: 1373-1377.
- Murat, M., and Sorrentino, F. (1996). Effect of large additions of Cd, Pb, Cr, Zn, to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement. Cement and Concrete Research. 26(3): 377-385.
- Nakamoto, K. (1986). Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds. Marquette University.
- Pakawat Sancharoen. (2003). Utilization of municipal solid waste incinerator fly ash as a partial cement replacement in concrete. Master's Thesis, Inter-Department program in Environmental Management. Graduate School, Chulalongkorn University.
- Polletini, A., Pomi, R., and Sirini, P. (2002). Fractional factorial design to investigate the influence of heavy metals and anions on acid neutralization behavior of cement-based products. Environmental Science and Technology. 36(7):1584-91.
- Ract, P. G., Espinosa, D. C. R., and Tenorio, J. A. S. (2003). Determination of Cu and Ni Incorporation Ratios in Portland cement Clinker. Waste Management. 23: 281-285.

- Sakai, S., and Hiraoka, M. (2000). Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal processes. Waste Management. 20(2): 249-258.
- Scheidegger, A. M., Wieland, E., Scheinort, A. C., Dahn, R., and Spieler, P. (2000). Spectroscopic evidence for the formation of layered Ni-Al double hydroxide in cement. Environmental Science and Technology. 34:4545-4548.
- Shen, H., and Forssberg, E. (2003). An Overview of recovery of Metals from Slags. Waste Management. 23: 933-949.
- Shi, C., and Qian, J. (2000). High performance cementing materials from industrial slags: a review. Resources Conservation and Recycling. 29: 195-207.
- Shih, P. H., Chang, J. E., and Chiang, L. C. (2003). Replacement of Raw Mix in Cement Production with Municipal Solid Waste Incineration Ash. Cement and Concrete Research. 33: 1831-1836.
- Siam City Cement Public Company Limited. (2005). Environmental Care. Environmental Initiatives[Online]. Available from: <http://www.siamcitycement.com> [2005, June 12]
- Shondeep, L., Sharkar, and Wheeler, J. (2001). Microstructure development in an ultrafine cement –Part 2. Cement and Concrete Research. 31: 125-128.
- Spence, R. D. (1993). Chemistry and Microstructure of Solidified Waste Forms. ACS National Meeting. New York City.
- Sprung, S. (1985). Technological Problem in Pyroprocessing Cement Clinker: Cause and Solution. 1 st ed. Dusseldorf.
- Stegemann, J. A.; and Buenfeld, N. R. (2003). Prediction of Unconfined Compressive Strength of Cement Paste Containing Industrial Wastes. Waste Management. 23: 321-332.
- Stephan, D., Maleki, H., Knofel, D., Eber, B., and Hardtl, R. (1998). Influence of Cr Ni and Zn on the properties of pure clinker phases Part 1. C₃S. Cement and Concrete Research. 29: 545-552.
- Stephan, D., Mallmann, R., Knofel, D., and Hardtl, R. (1999). High intakes of Cr, Ni, and Zn in clinker Part 2. Influence on the hydration properties. Cement and Concrete Research. 29: 1959-1967.

- Tixier, R., Arino-Moreno, A., and Mobasher, B. (1996). Properties of cementitious mixture modified by copper slag. Symposium: HH, Structure-Property Relationships in Hardened cement paste and composites. Tucson, Arizona, USA: Minerals Research and Recovery.
- Tixier, R., Devaguptapu, R., and Mobasher, B. (1996). The Effect of Copper slag on the Hydration and Mechanical Properties of Cementitious Mixtuers. Cement and Concrete Research. 27(10): 1569-1580.
- Toshiki, A., Osamu, K., and Kenji, S. (2000). Concrete with copper slag fine aggregate. J Soc Mater Sci Jpn. 49:1097-1102.
- Tessier, A., Campbell, P. G. C., and Bisson, M. (1979). Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Matals. Analytical Chemistry. 51(7): 844-851.
- Trezza, M. A., and Scian, A. N. (2000). Burning Wastes as an Industrial Resource: Their Effect on Portland cement clinker. Cement and Concrete Research. 30: 137-144.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2005). Method 3052: Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices. SW-846 Manual [Online]. Available from: <http://www.epa.gov>[2005, July 22]
- Van der Hoek, E. E., Bonouvrie, P. A., and Comans, R. N. J. (1994). Sorption of As and Se on mineral components of fly ash: Relevance for leaching processes. Applied Geochemistry. 9(4): 403-412.
- Wan, X., Wang, W., Ye, T., Guo, Y., and Gao, X. (2006). A study on the chemical and mineralogical characterization of MSWI fly ash using a sequential extraction procedure. Journal of Hazardous Materials. B134: 197-201.
- Xin, C., Jun, C., Lingchao, L., Futian, L., and Bing, T. (2004). Study on the hydration of Ba-bearing Calcium Sulphoaluminate in the presence of Gypsum. Cement and Concrete Research. 34: 2009-2013.
- Yousuf, M., Mollah, A., Vemmpati, R. K., Lin, T.C., and Cocke, D. L. (1995). The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems. Waste Management. 15: 137-148.

- Zain, M. F. M., Islam, M. N., Radin, S. S., and Yap, S. G. (2004). Cement-based Solidification for the safe disposal of blasted copper slag. Cement and Concrete Composites. 26: 845–851.
- Ziegler, F., and Johnson, C. A. (2001). The solubility of calcium zincate $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Cement and Concrete Research. 31(9): 1327-1332.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



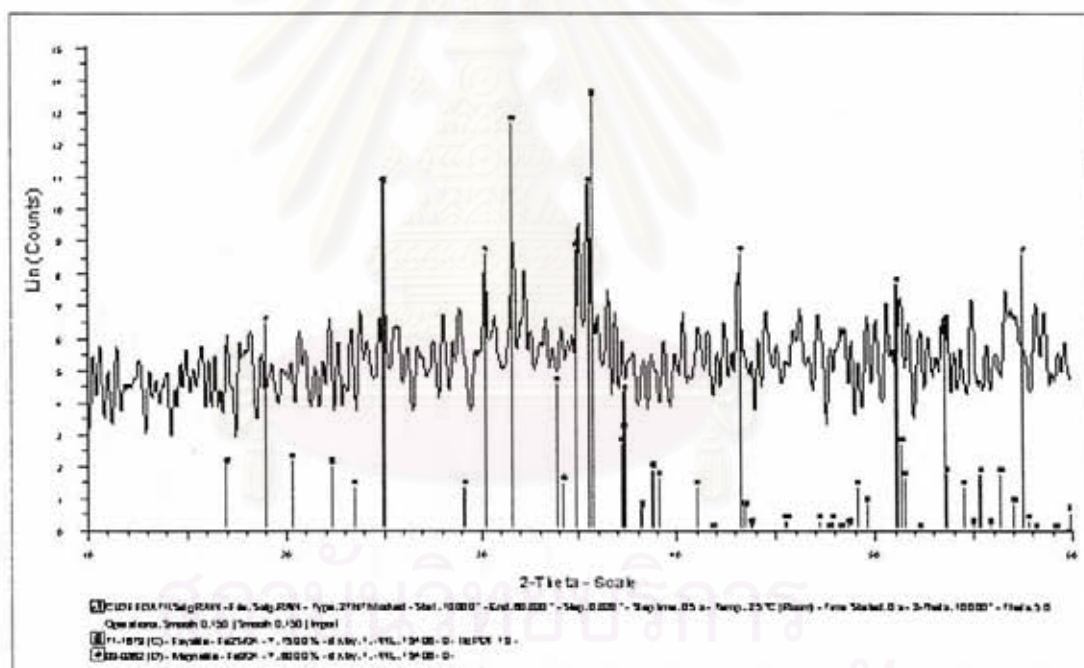
ภาคผนวก ก.

ผลการวิเคราะห์ของตะกรันทองแดง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการกระจายขนาดอนุภาคของตะกรันทองแดงด้วยวิธีผ่านชุดตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) ขนาดเบอร์ต่างๆ

ขนาดเบอร์ตะแกรง	ขนาดอนุภาค	ร้อยละสะสมที่ผ่านตะแกรง	D ₅₀	D ₆₀ /D ₁₀
4	4.75 มิลลิเมตร	100	1.98 มิลลิเมตร	2.25/0.72=3.125
8	2.36 มิลลิเมตร	67.85		
10	2.00 มิลลิเมตร	52.68		
30	600 ไมโครเมตร	3.72		
50	300 ไมโครเมตร	0.57		
100	150 ไมโครเมตร	0.43		
200	75 ไมโครเมตร	0.25		



รูปที่ ก.1 รูปแบบของสารประกอบหลักของตะกรันทองแดงที่วัดด้วยเครื่อง XRD

ตารางที่ ก.2 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนทองแดง

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนทองแดง (มก. / กก.)																
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	V	Zn	Ag	Ba	Co	Ga	Mn	Se	Sr
1	213.362	23.144	71.915	6756.410	<0.004	94.873	1616.409	< 0.247	18.120	9010.491	< 0.003	72.919	< 0.010	< 0.040	286.485	< 0.102	1.521
2	233.435	25.108	73.732	6998.033	<0.004	86.430	1454.848	< 0.247	22.634	9441.633	< 0.003	66.185	< 0.010	< 0.040	270.501	< 0.102	2.289
3	252.174	24.048	63.695	7195.395	<0.004	113.692	1657.726	< 0.247	24.457	9130.973	< 0.003	87.378	< 0.010	< 0.040	295.708	< 0.102	2.863
เฉลี่ย	232.990	24.100	69.781	6983.279	<0.004	98.332	1576.328	< 0.247	21.737	9194.366	< 0.003	75.494	< 0.010	< 0.040	284.231	< 0.102	2.224
SD.	15.848	0.803	4.367	179.518	0.000	11.395	87.540	0.000	2.664	181.631	0.000	8.842	0.000	0.000	10.413	0.000	0.550

ตารางที่ ก.3 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนทองแดงตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนทองแดง (มก. / ล.)													
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	V	Zn	Ag	Ba	Co	Se
1	0.065	0.029	0.096	3.638	< 0.004	2.103	0.769	< 0.247	4.113	5.822	< 0.003	1.523	< 0.010	< 0.102
2	0.081	0.043	0.067	2.622	< 0.004	1.491	0.504	< 0.247	3.967	6.867	< 0.003	2.085	< 0.010	< 0.102
3	0.079	0.062	0.108	7.465	< 0.004	1.117	0.091	< 0.247	4.079	4.938	< 0.003	1.034	< 0.010	< 0.102
เฉลี่ย	0.075	0.045	0.090	4.575	< 0.004	1.570	0.728	< 0.247	4.053	5.876	< 0.003	1.547	< 0.010	< 0.102
SD.	0.007	0.014	0.017	2.085	0.000	0.406	0.279	0.000	0.062	0.788	0.000	0.429	0.000	0.000

ตารางที่ ก.4 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนทองแดงตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311

ครั้งที่	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะหนักชนิดต่างๆ ในตะกอนทองแดง (มก. / ล.)													
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	V	Zn	Ag	Ba	Co	Se
1	0.097	0.071	0.249	7.505	< 0.004	2.051	1.983	< 0.247	5.433	14.582	< 0.003	2.201	< 0.010	< 0.102
2	0.108	0.069	0.230	8.438	< 0.004	3.055	1.365	< 0.247	5.515	13.146	< 0.003	3.224	< 0.010	< 0.102
3	0.082	0.077	0.430	10.243	< 0.004	2.603	1.589	< 0.247	6.077	10.506	< 0.003	2.392	< 0.010	< 0.102
เฉลี่ย	0.096	0.072	0.303	8.729	< 0.004	2.570	1.645	< 0.247	5.675	12.745	< 0.003	2.606	< 0.010	< 0.102
SD.	0.011	0.003	0.090	1.137	0.000	0.411	0.255	0.000	0.286	1.688	0.000	0.444	0.000	0.000



ภาคผนวก ข.

ผลการวิเคราะห์ของปูนซีเมนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนการเผาไหม้ตะกั่วแดงร้อยละต่างๆ

อัตราส่วน	วันที่เก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆของปูนซีเมนต์ (มก. / กก.)																
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	V	Zn	Ag	Ba	Co	Ga	Mn	Se	Sr
0	13/3/49	9.481	< 0.009	11.593	35.386	< 0.004	12.729	8.092	< 0.247	20.167	67.301	< 0.003	21.835	2.907	< 0.040	38.843	< 0.102	23.385
	22/11/48	11.599	< 0.009	15.893	43.306	< 0.004	9.198	10.595	< 0.247	16.143	74.475	< 0.003	17.003	4.253	< 0.040	41.874	< 0.102	25.270
	SD.	1.059	0.000	2.150	3.960	0.000	1.766	1.252	0.000	2.012	3.587	0.000	2.416	0.673	0.000	1.515	0.000	0.943
1.8	26/9/48	18.847	< 0.009	19.476	85.821	< 0.004	18.121	13.992	< 0.247	33.173	208.362	< 0.003	48.371	7.761	< 0.040	81.144	< 0.102	35.396
2	27/9/48	17.618	< 0.009	18.524	76.644	< 0.004	16.399	12.907	< 0.247	34.088	202.470	< 0.003	43.514	5.268	< 0.040	70.614	< 0.102	41.626
2.20	25/9/48	18.032	< 0.009	19.154	70.417	< 0.004	20.852	13.297	< 0.247	32.442	212.958	< 0.003	46.026	7.362	< 0.040	67.522	< 0.102	45.601
	28/9/48	20.682	< 0.009	19.568	88.191	< 0.004	20.246	17.543	< 0.247	33.974	255.736	< 0.003	55.650	7.036	< 0.040	77.012	< 0.102	56.560
	SD.	1.325	0.000	0.207	8.887	0.000	0.303	2.123	0.000	0.766	21.389	0.000	4.812	0.163	0.000	4.745	0.000	5.479
2.4	24/9/48	18.217	< 0.009	30.564	97.675	< 0.004	25.009	18.369	< 0.247	32.177	238.817	< 0.003	46.409	6.792	< 0.040	85.436	< 0.102	64.177
2.6	17/9/48	14.167	< 0.009	21.164	102.039	< 0.004	24.007	20.893	< 0.247	30.848	297.664	< 0.003	47.942	5.414	< 0.040	104.852	< 0.102	73.998
	19/9/48	19.076	< 0.009	25.034	98.561	< 0.004	20.495	13.639	< 0.247	34.989	322.734	< 0.003	57.600	6.563	< 0.040	95.798	< 0.102	71.128
	20/9/48	17.703	< 0.009	20.528	128.334	< 0.004	18.944	19.322	< 0.247	31.931	299.656	< 0.003	47.611	6.333	< 0.040	97.715	< 0.102	76.174
	21/9/48	24.660	2.024	22.263	147.763	< 0.004	24.682	27.392	< 0.247	38.754	337.700	< 0.003	59.588	6.606	< 0.040	121.773	< 0.102	80.036
	23/9/48	22.336	< 0.009	21.548	136.797	< 0.004	19.541	19.587	< 0.247	35.367	296.144	< 0.003	54.091	7.331	< 0.040	111.283	< 0.102	72.282
SD.	1.162	0.806	0.358	5.483	0.000	2.571	3.903	0.000	1.693	20.778	0.000	2.749	0.363	0.000	5.245	0.000	3.877	

หมายเหตุ : ตัวเอียง คือ ตัวแทนของแต่ละอัตราส่วน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนการเผาพร้อมตะกั่วของแควร้อยละต่างๆ (ต่อ)

อัตราส่วน	วันที่เก็บตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของโลหะชนิดต่างๆของปูนซีเมนต์ (มก. / กก.)																
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	V	Zn	Ag	Ba	Co	Ga	Mn	Se	Sr
2.8	11/9/48	20.154	< 0.009	20.857	136.395	< 0.004	19.680	15.297	< 0.247	33.321	316.406	< 0.003	69.389	9.362	< 0.040	116.940	< 0.102	80.206
	12/9/48	17.968	< 0.009	21.198	141.426	< 0.004	23.064	19.026	< 0.247	32.236	343.152	< 0.003	63.045	9.557	< 0.040	114.767	< 0.102	83.591
	16/9/48	19.718	< 0.009	20.553	156.136	< 0.004	21.601	14.733	< 0.247	36.590	309.607	< 0.003	52.336	8.551	< 0.040	106.394	< 0.102	66.678
	18/9/48	19.144	< 0.009	19.693	128.830	< 0.004	22.160	17.864	< 0.247	36.090	343.993	< 0.003	59.444	11.690	< 0.040	109.084	< 0.102	79.431
	22/9/48	25.679	< 0.009	20.558	159.281	< 0.004	17.125	24.774	< 0.247	33.047	374.184	< 0.003	58.091	11.850	< 0.040	129.646	< 0.102	87.089
	SD.	3.268	0.000	0.433	15.225	0.000	2.518	3.455	0.000	1.522	15.095	0.000	0.677	0.080	0.000	10.281	0.000	3.829
3.0	9/9/48	27.260	< 0.009	25.180	184.005	< 0.004	21.233	26.342	< 0.247	36.559	380.239	< 0.003	69.751	7.655	< 0.040	159.510	< 0.102	92.294
	10/9/48	19.760	< 0.009	23.202	176.821	< 0.004	20.808	24.666	< 0.247	33.786	357.809	< 0.003	64.879	12.581	< 0.040	126.402	< 0.102	85.393
	13/9/48	22.581	< 0.009	27.873	171.769	< 0.004	24.522	17.932	< 0.247	29.192	355.570	< 0.003	54.080	8.442	< 0.040	138.356	< 0.102	85.845
	15/9/48	21.426	< 0.009	27.167	180.990	< 0.004	18.617	21.359	< 0.247	34.089	369.780	< 0.003	54.305	10.920	< 0.040	113.821	< 0.102	78.113
	SD.	0.577	0.000	0.353	4.611	0.000	2.953	1.713	0.000	2.449	7.105	0.000	0.113	1.239	0.000	12.268	0.000	3.866
3.2	14/9/48	30.273	< 0.009	33.283	204.035	< 0.004	25.167	28.387	< 0.247	39.705	395.859	< 0.003	61.876	9.919	< 0.040	167.312	< 0.102	82.515

หมายเหตุ : ตัวเอียง คือ ตัวแทนของแต่ละอัตราส่วน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.3 พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C204-05

ชื่อตัวอย่าง	เวลาที่ของเหลวในมานอมิเตอร์ ลดต่ำลงมา (วินาที)	พื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ (ตร.ซม. /ก.)
C0	53.695	3535
C18	51.977	3478
C20	49.935	3409
C22	53.331	3523
C24	51.203	3452
C26	52.456	3494
C28	50.552	3430
C30	53.270	3521
C32	50.229	3419

$$S = \frac{S_s \times \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}}$$

เมื่อ S = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างปูนซีเมนต์ (ตร.ซม. ต่อกรัม)

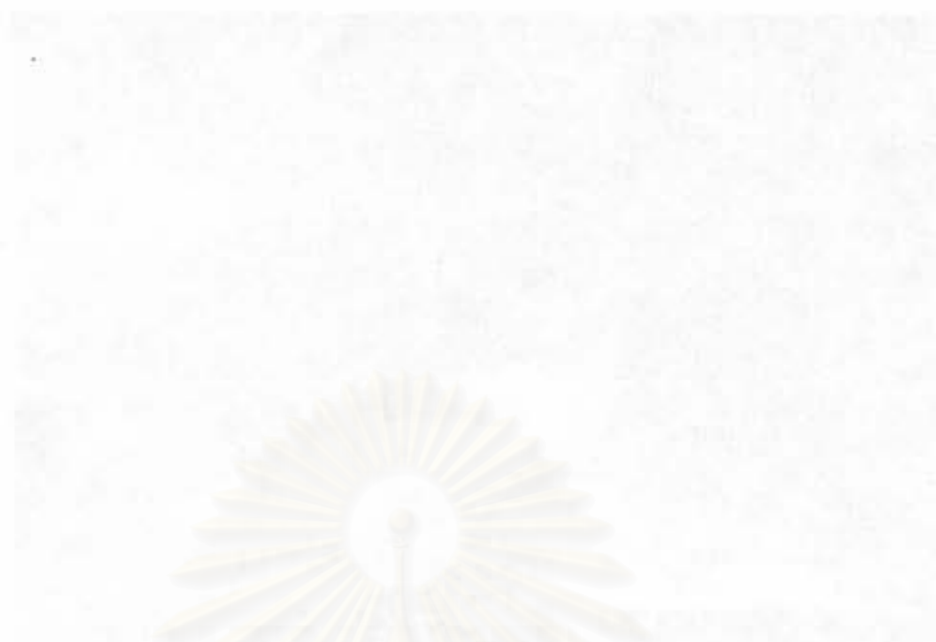
S_s = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างมาตรฐาน (เท่ากับ 3,200 ตร.ซม. ต่อกรัม)

T = เวลาที่ของเหลวในมานอมิเตอร์ลดต่ำลงมา (วินาที)

T_s = เวลาที่ของเหลวในมานอมิเตอร์ลดต่ำลงมาเมื่อทดสอบกับตัวอย่างมาตรฐาน (เท่ากับ 44 วินาที)

ตารางที่ ข.4 ความถ่วงจำเพาะทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C188-95 และค่าสูญเสีย
น้ำหนักของวัสดุ (LOI) ของตัวอย่างปูนซีเมนต์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C114-05

ชื่อตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ ของปูนซีเมนต์	ค่าสูญเสีย น้ำหนักของวัสดุ
C0	3.132	0.892
C18	3.151	0.986
C20	3.154	1.042
C22	3.147	1.291
C24	3.129	1.524
C26	3.161	0.963
C28	3.152	0.749
C30	3.147	1.138
C32	3.155	1.011



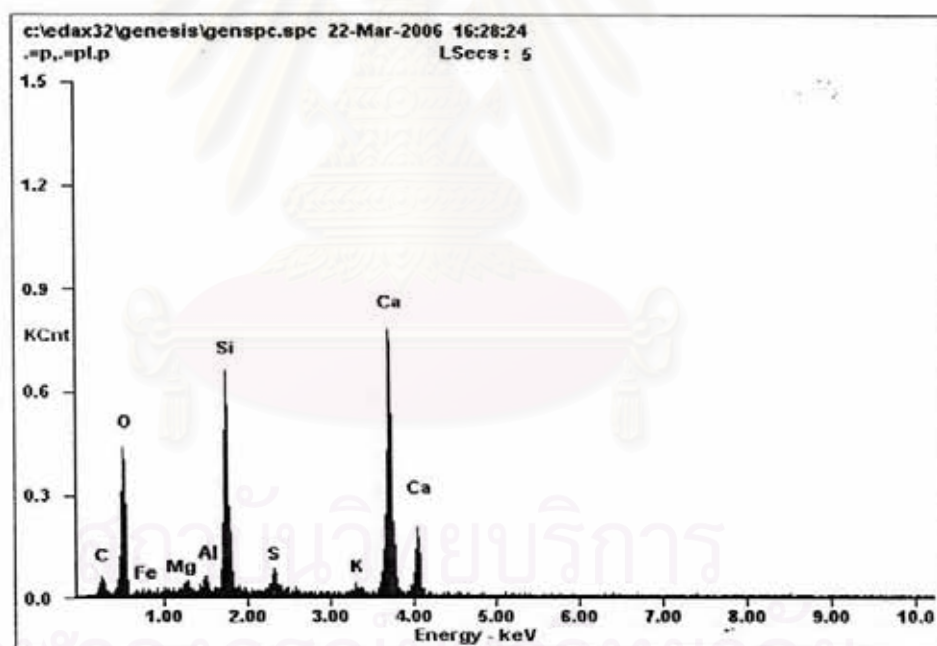
ภาคผนวก ค.

ผลการวิเคราะห์ลักษณะกายภาพและการกระจายตัว
ของโลหะหนักด้วยเครื่อง SEM/EDS

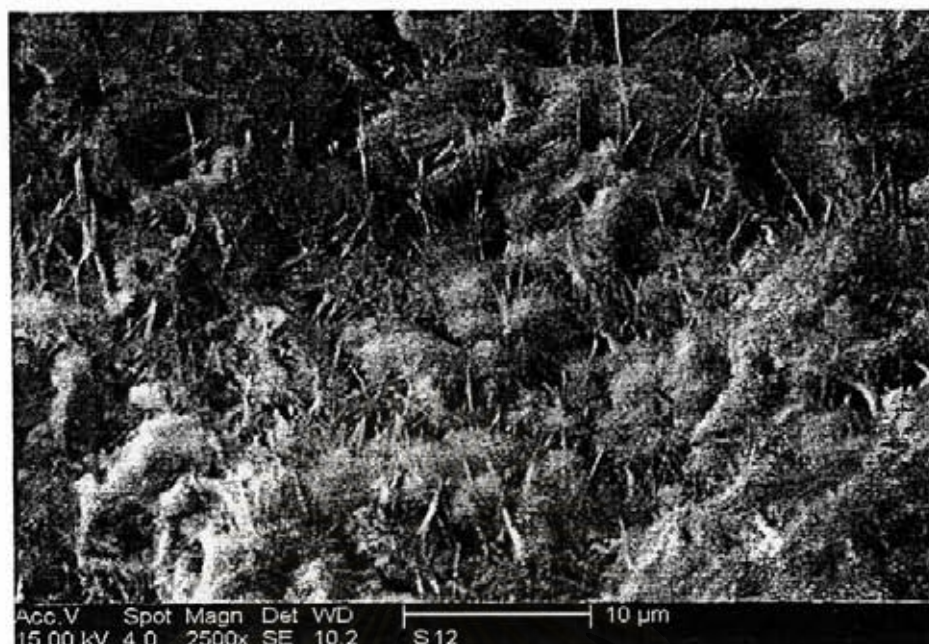
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



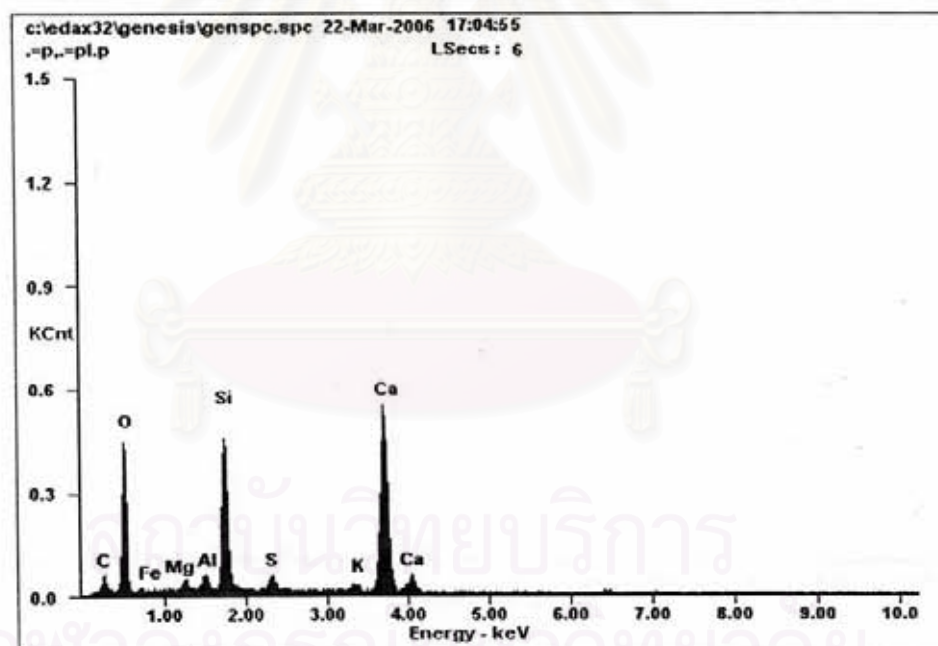
รูปที่ ค.1 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C18 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 7000 เท่า



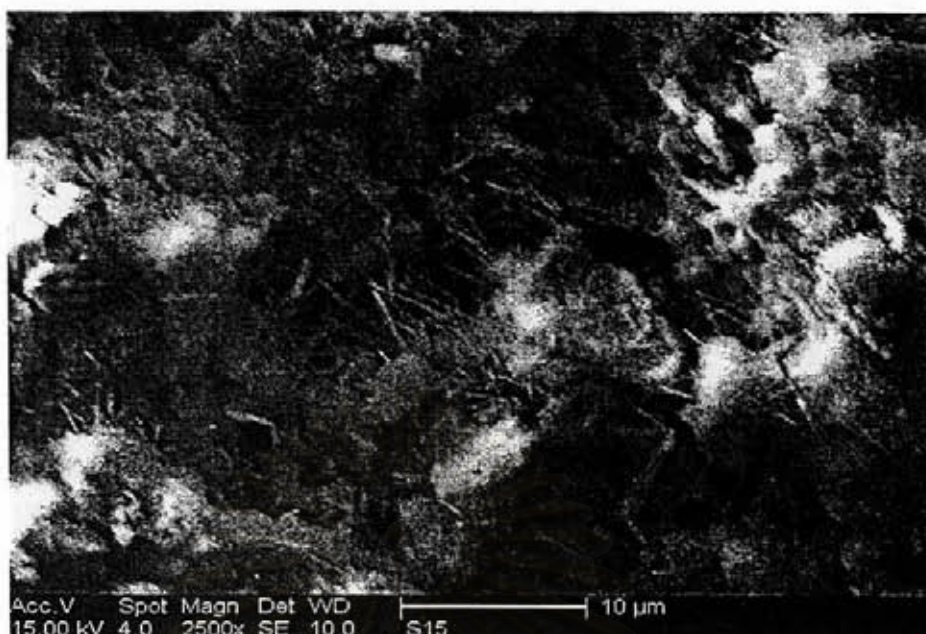
รูปที่ ค.2 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C18 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 7000 เท่า



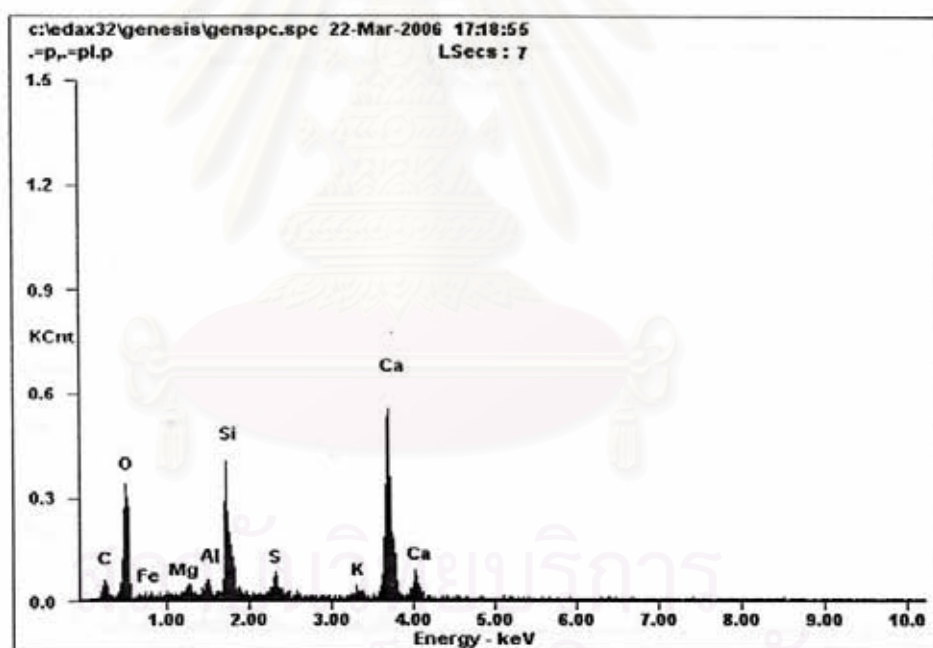
รูปที่ ค.3 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C20 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



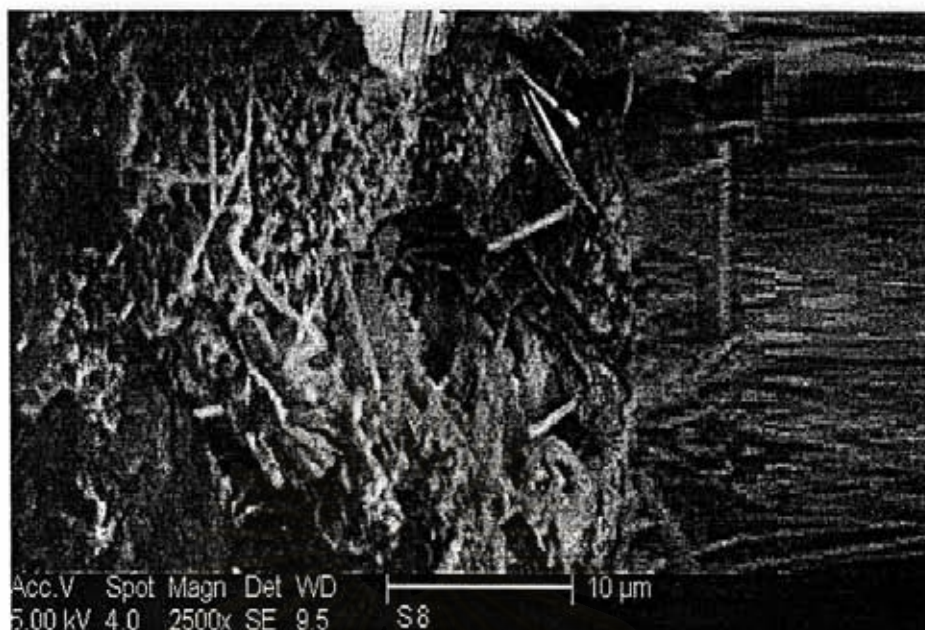
รูปที่ ค.4 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C20 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



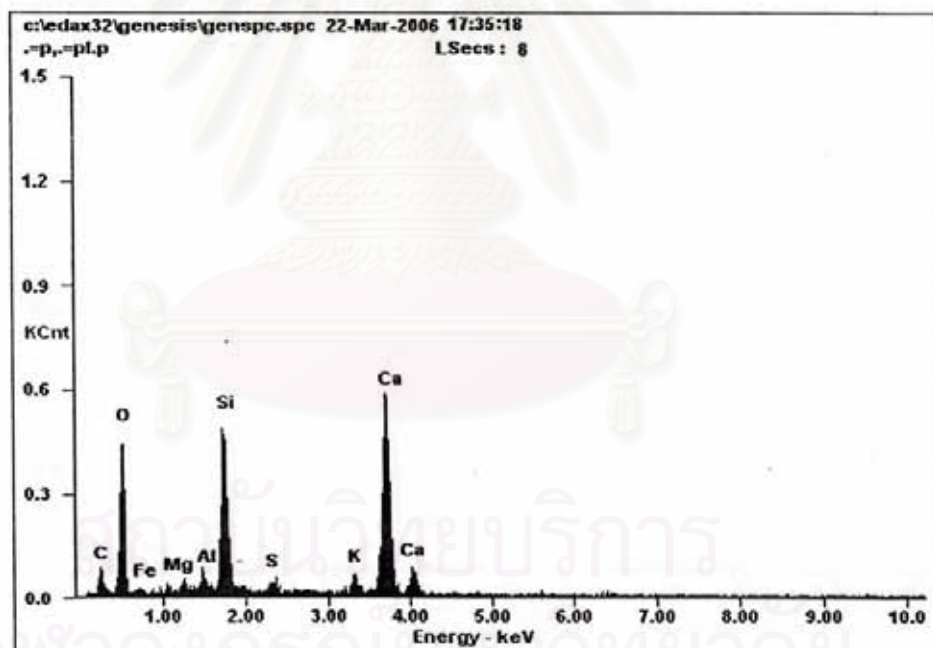
รูปที่ ค.5 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C22 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



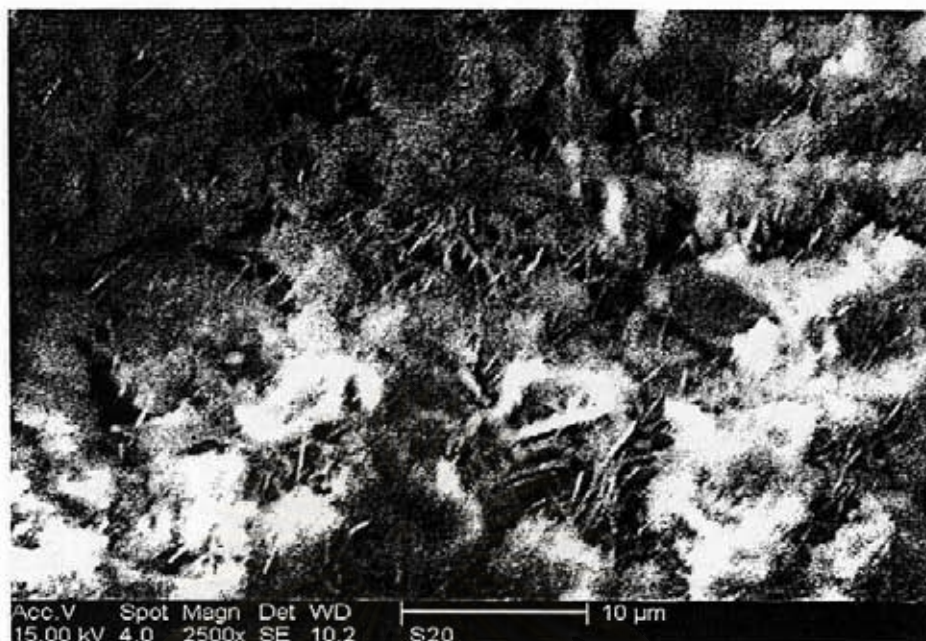
รูปที่ ค.6 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C22 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



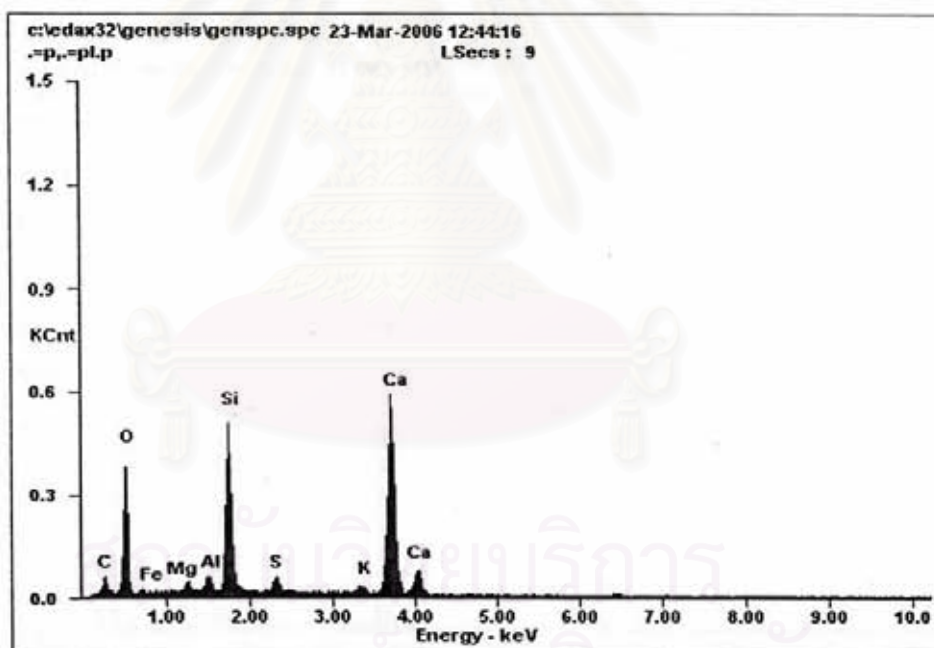
รูปที่ ค.7 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C24 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



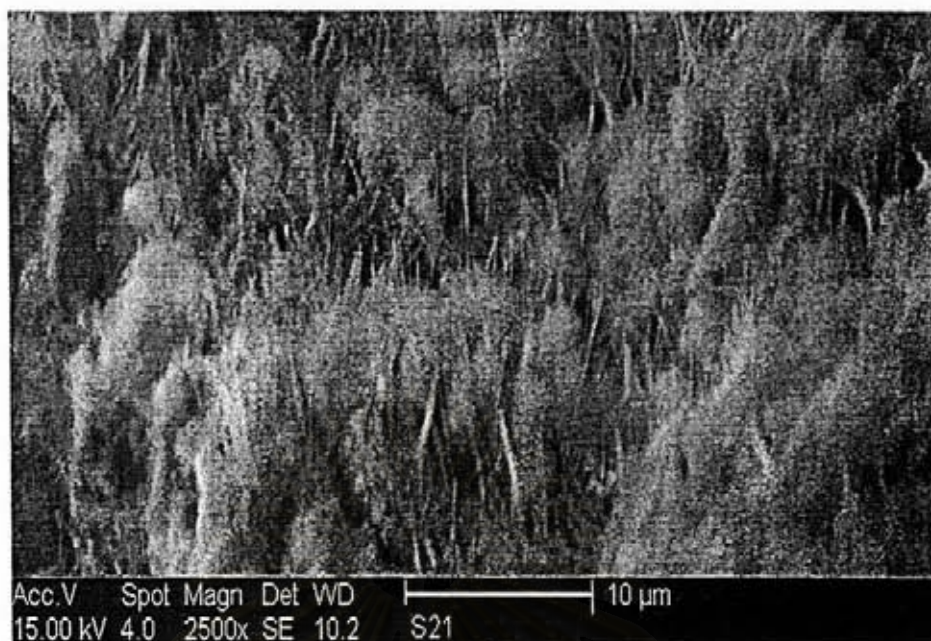
รูปที่ ค.8 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C24 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



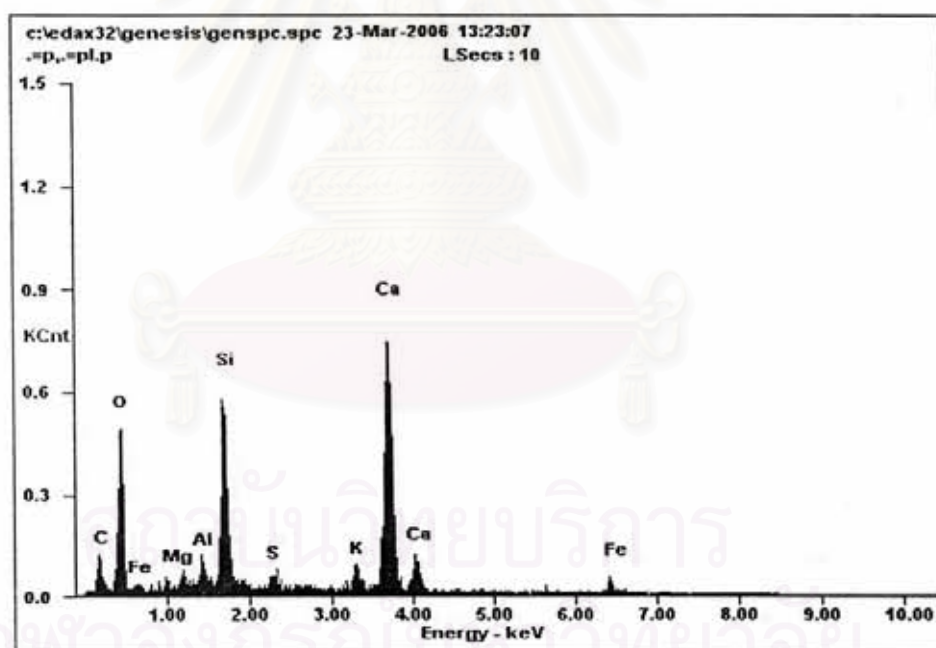
รูปที่ ค.9 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เพสต์ C26 อายุบ่ม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



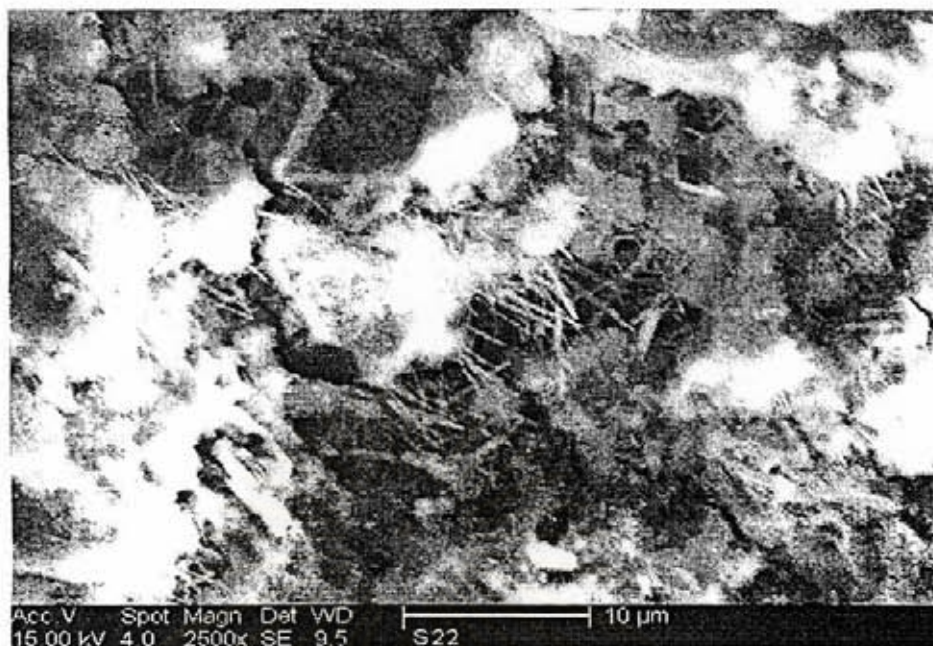
รูปที่ ค.10 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เพสต์ C26 อายุบ่ม 28 วัน ที่กำลังขยาย 2500 เท่า



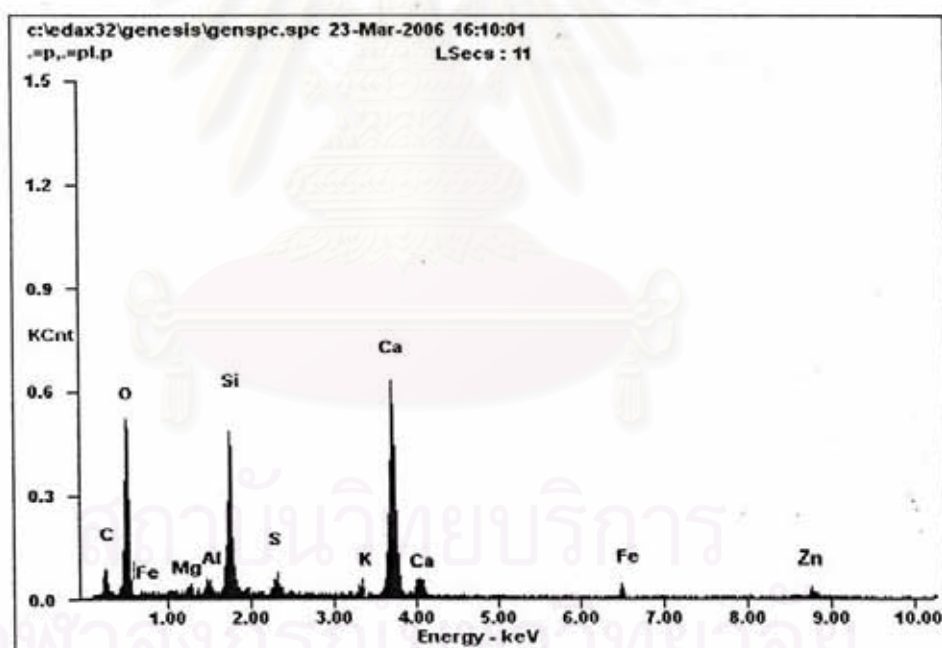
รูปที่ ค.11 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C28 อายุปม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า




รูปที่ ค.12 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C28 อายุปม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



รูปที่ ค.13 ผลการศึกษา SEM ของซีเมนต์เฟส C30 อายุปม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



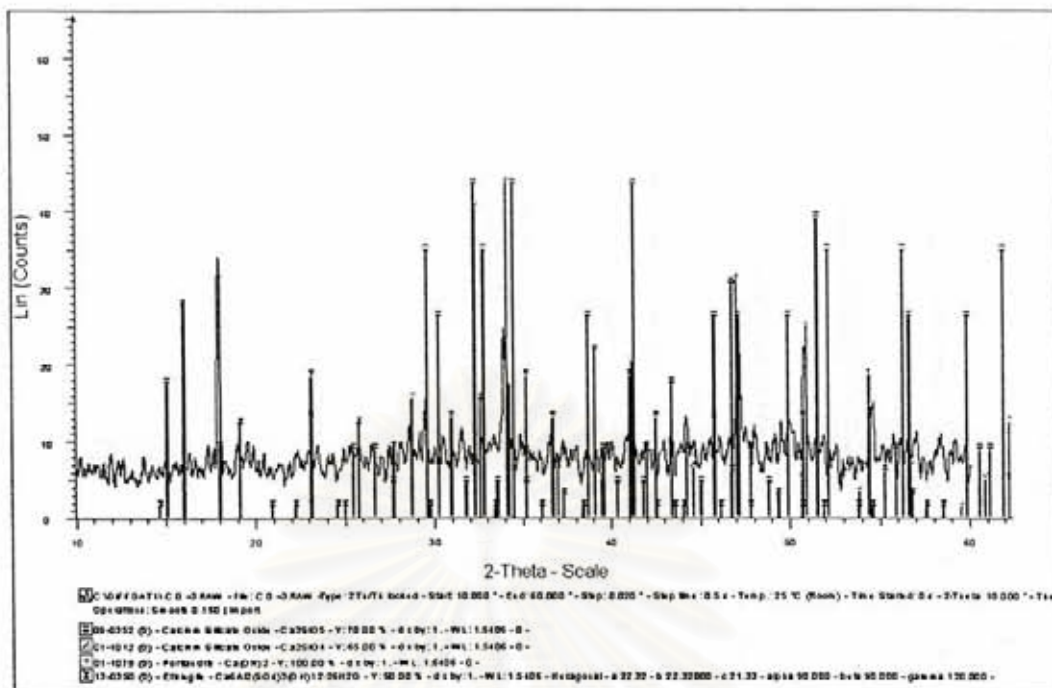
รูปที่ ค.14 ผลการศึกษา EDS ของซีเมนต์เฟส C30 อายุปม 28 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า



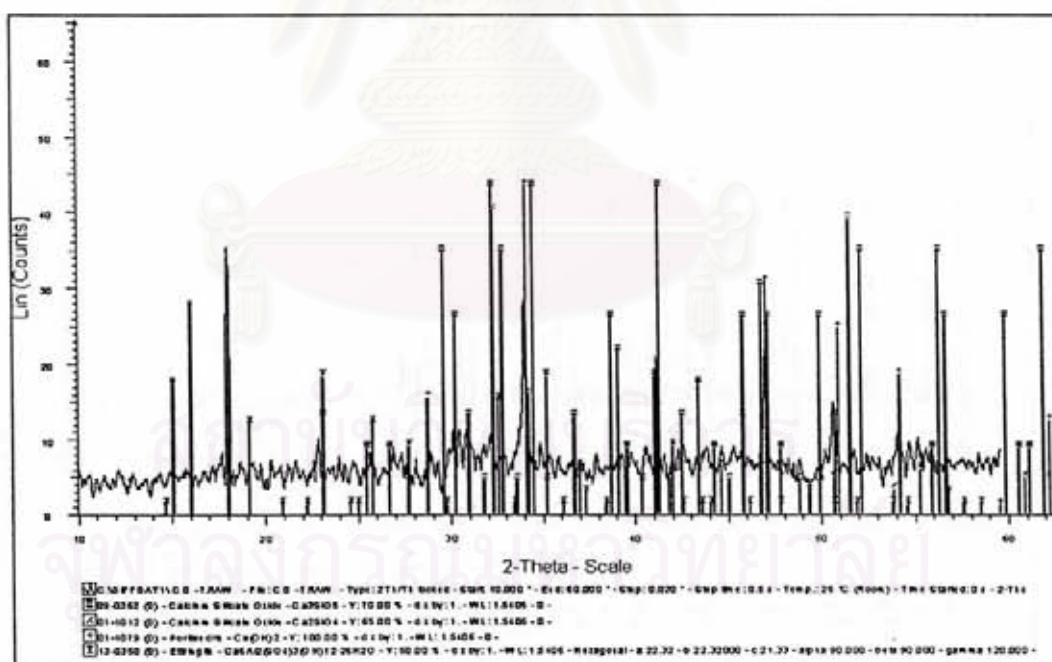
ภาคผนวก ง.

ผลการวิเคราะห์สารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก
ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

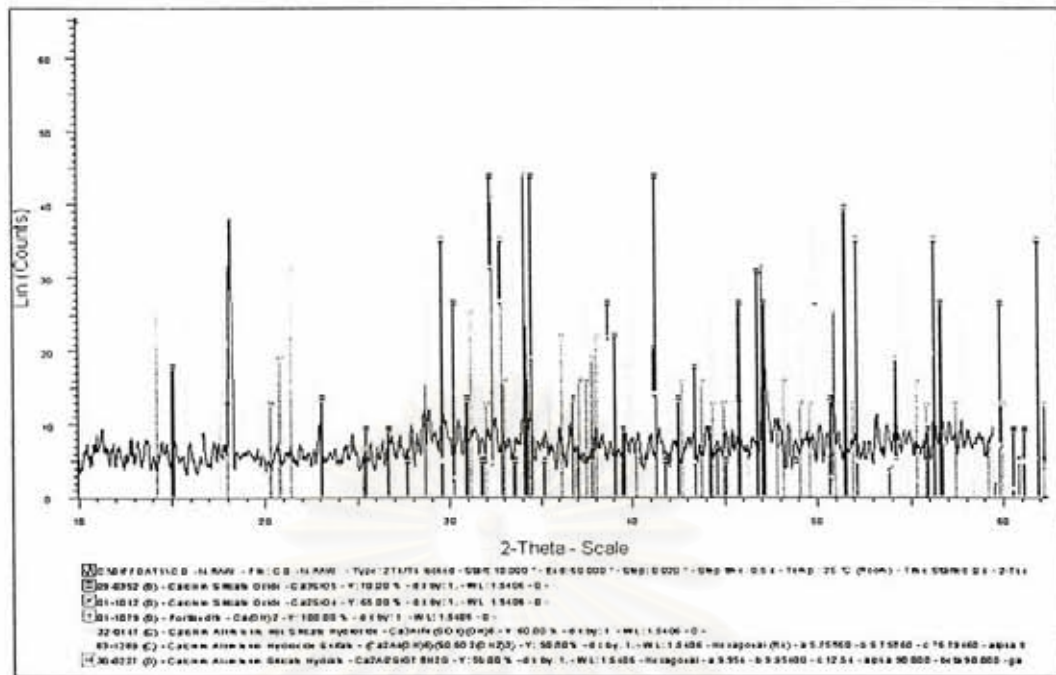
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



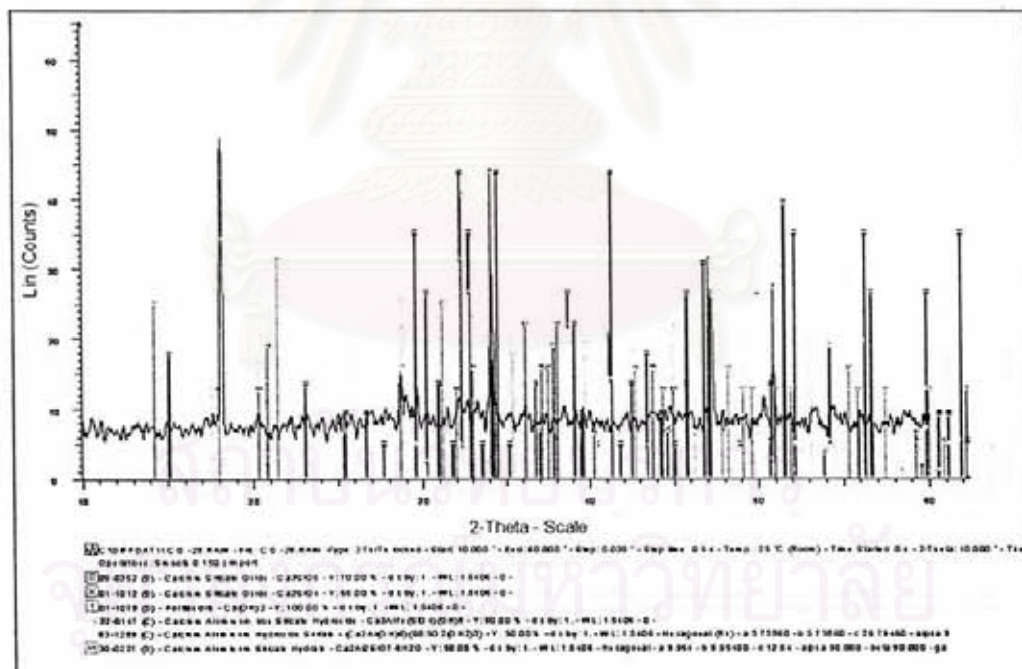
รูปที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง CO อายุบ่ม 3 วัน



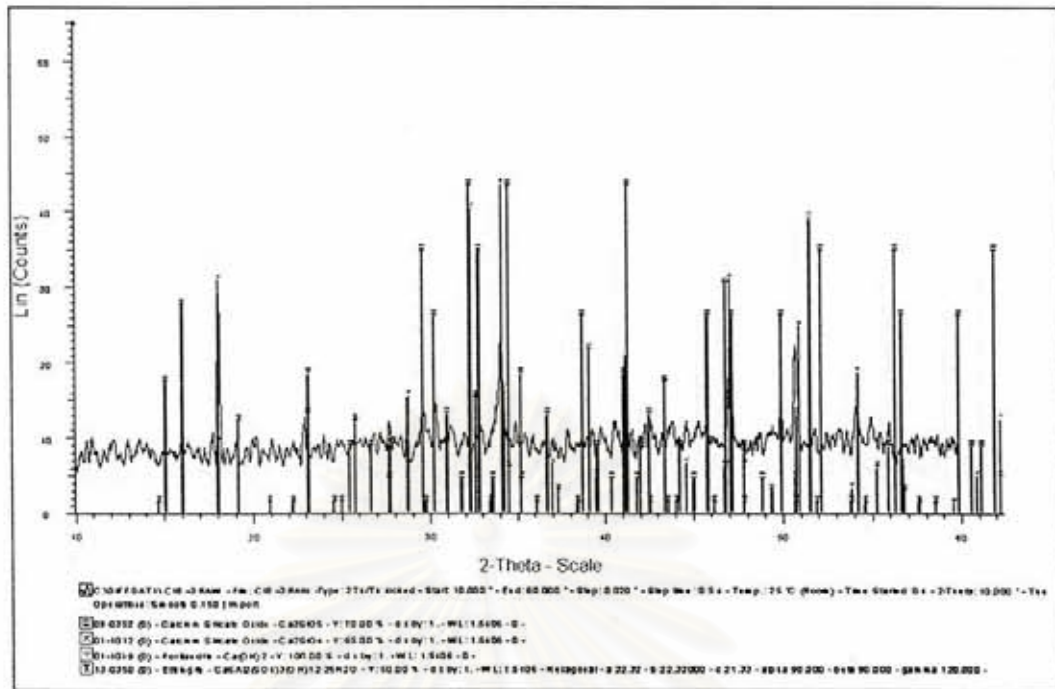
รูปที่ ง.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง CO อายุบ่ม 7 วัน



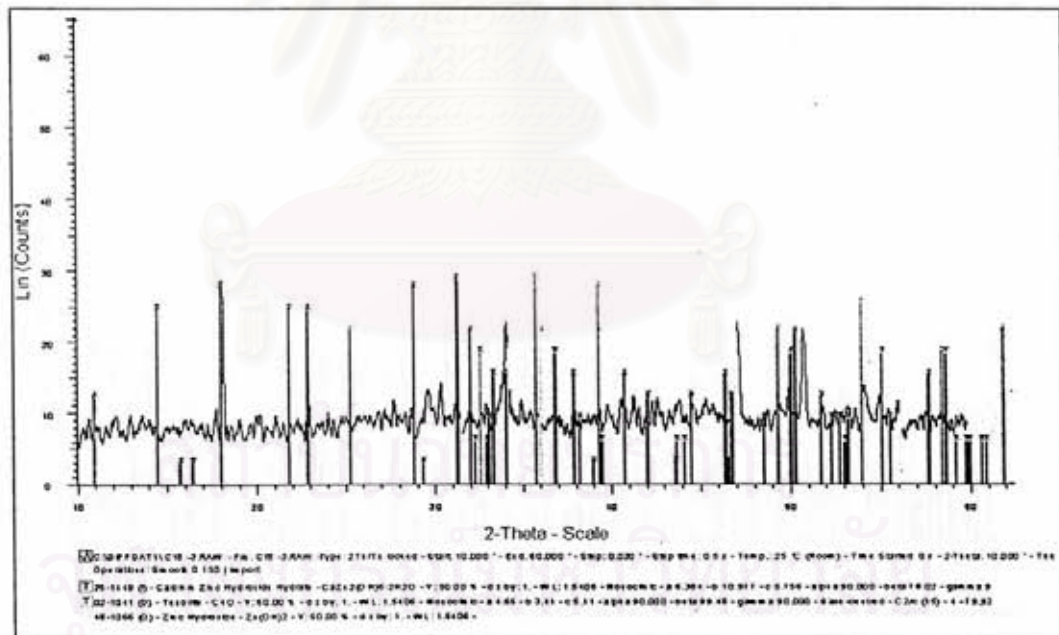
รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง CO อายุบ่ม 14 วัน



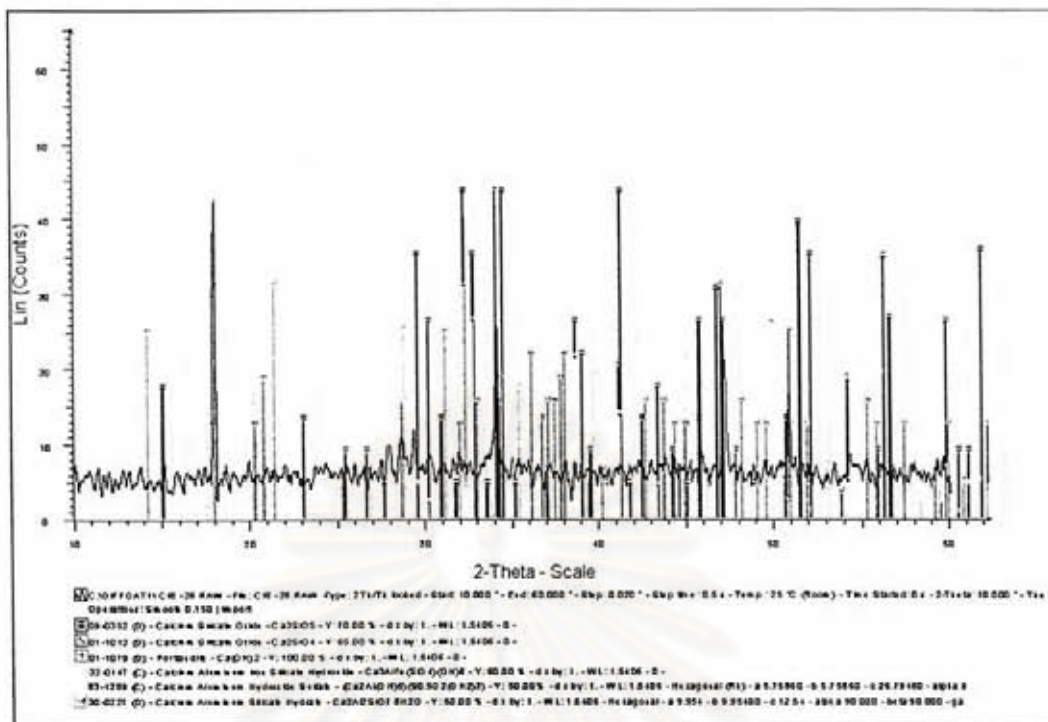
รูปที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง CO อายุบ่ม 28 วัน



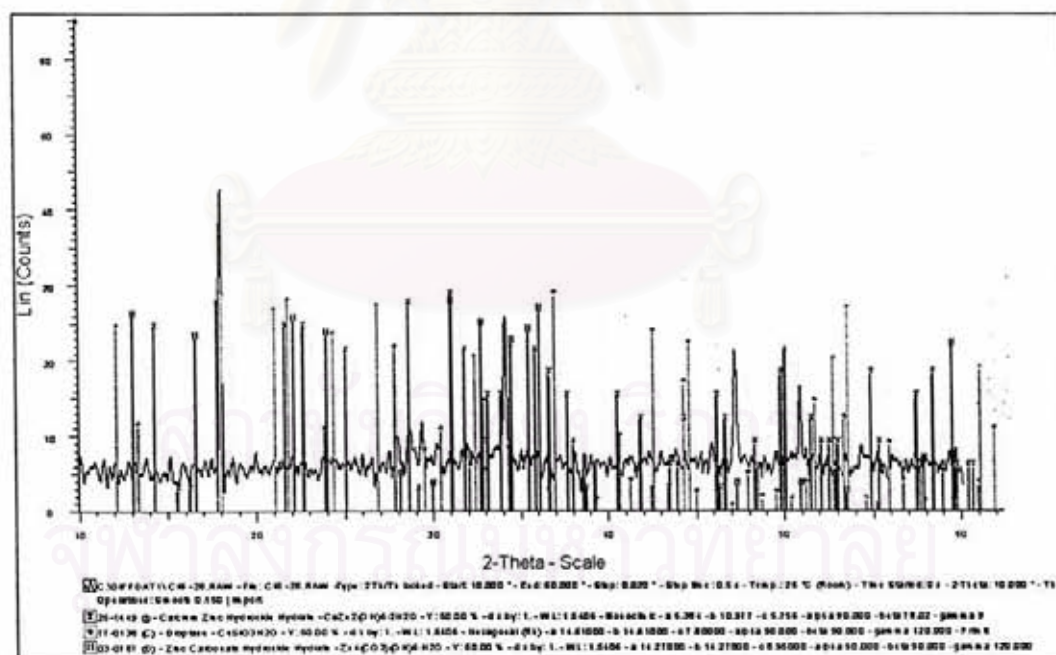
รูปที่ ๖.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C18 อายุบ่ม 3 วัน



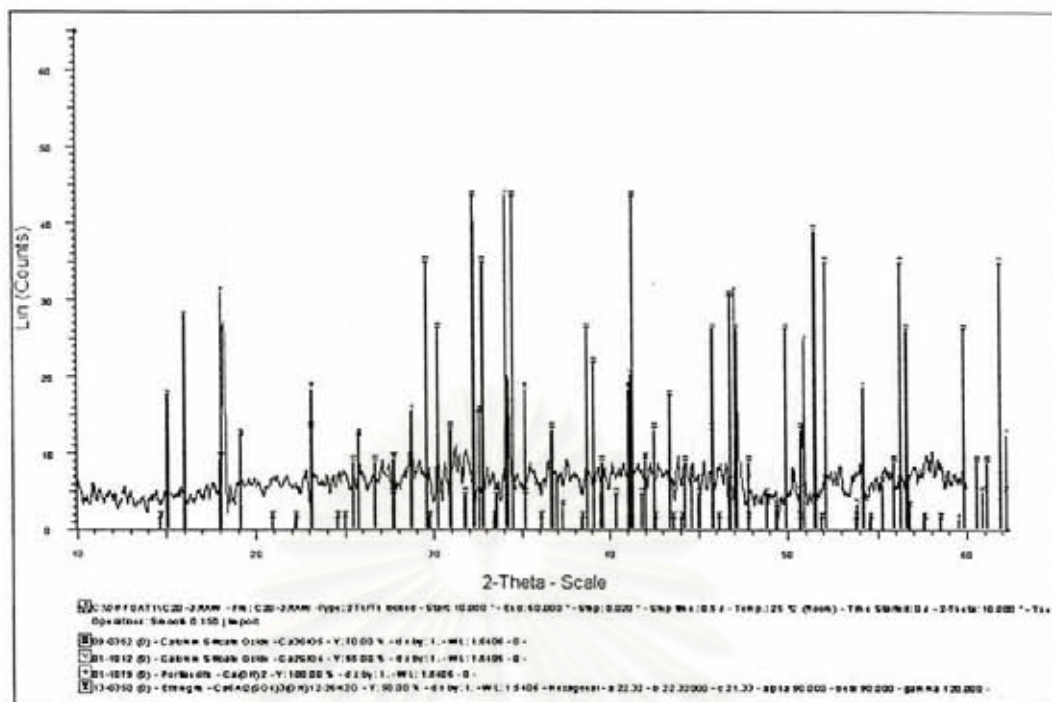
รูปที่ ๖.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C18 อายุบ่ม 3 วัน



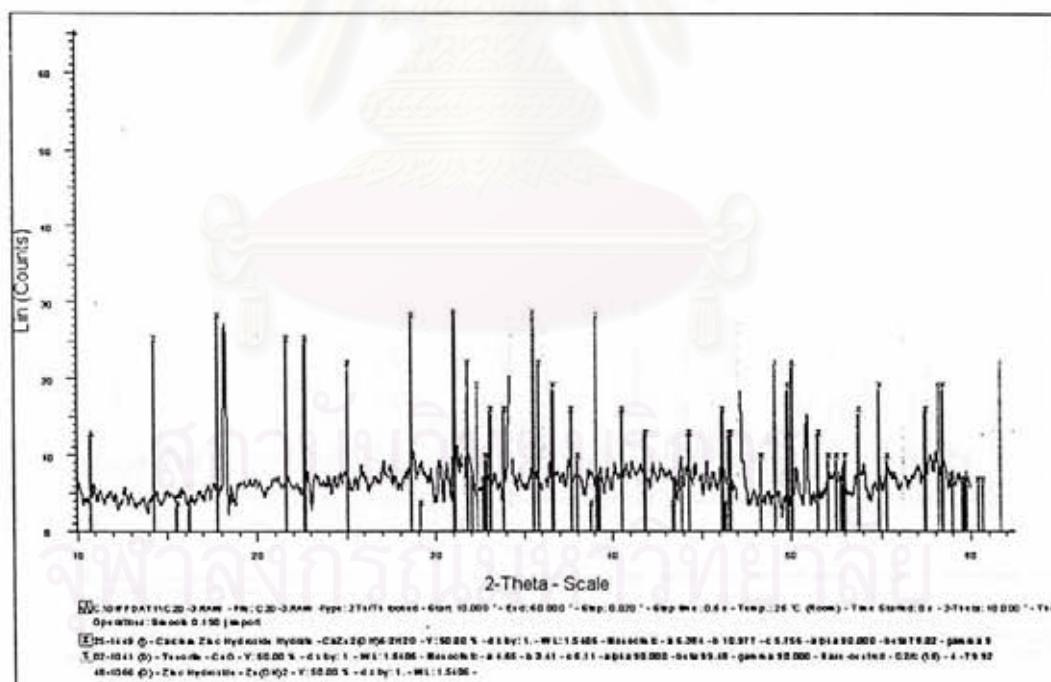
รูปที่ 7.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C18 อายุบ่ม 28 วัน



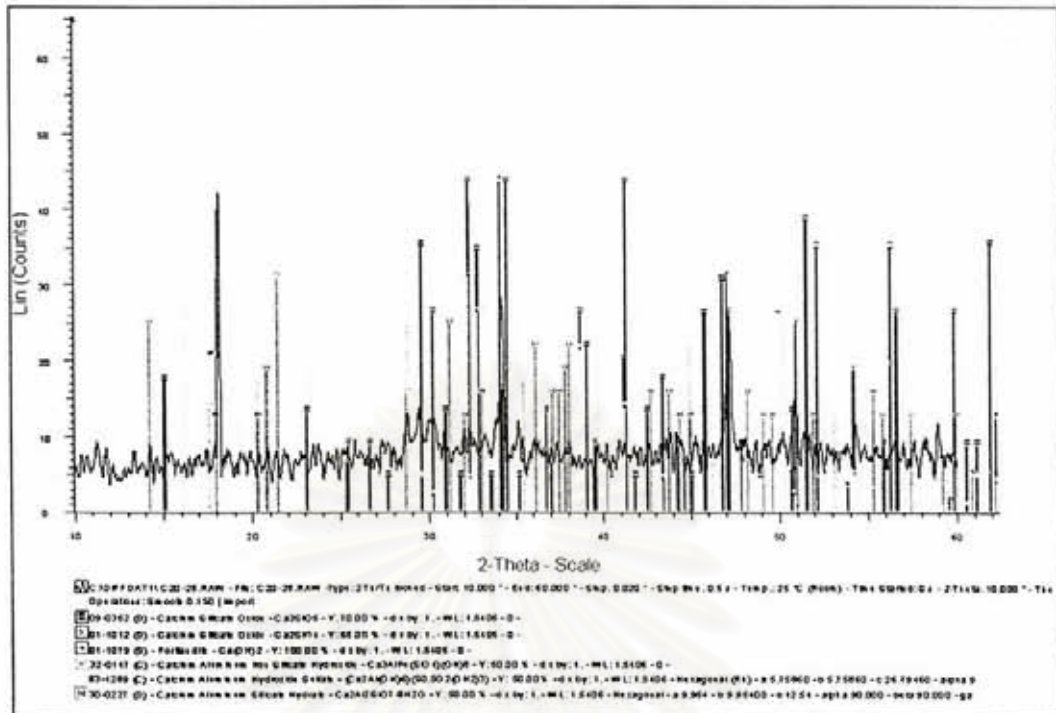
รูปที่ 7.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบไลอเนนิกในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C18 อายุบ่ม 28 วัน



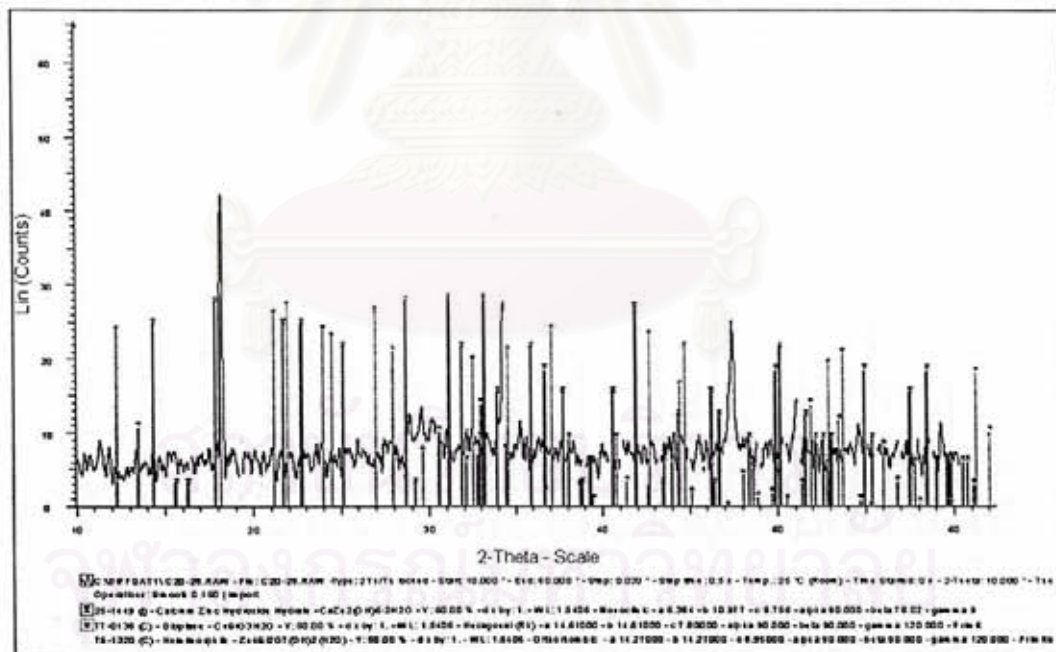
รูปที่ 9.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C20 อายุบ่ม 3 วัน



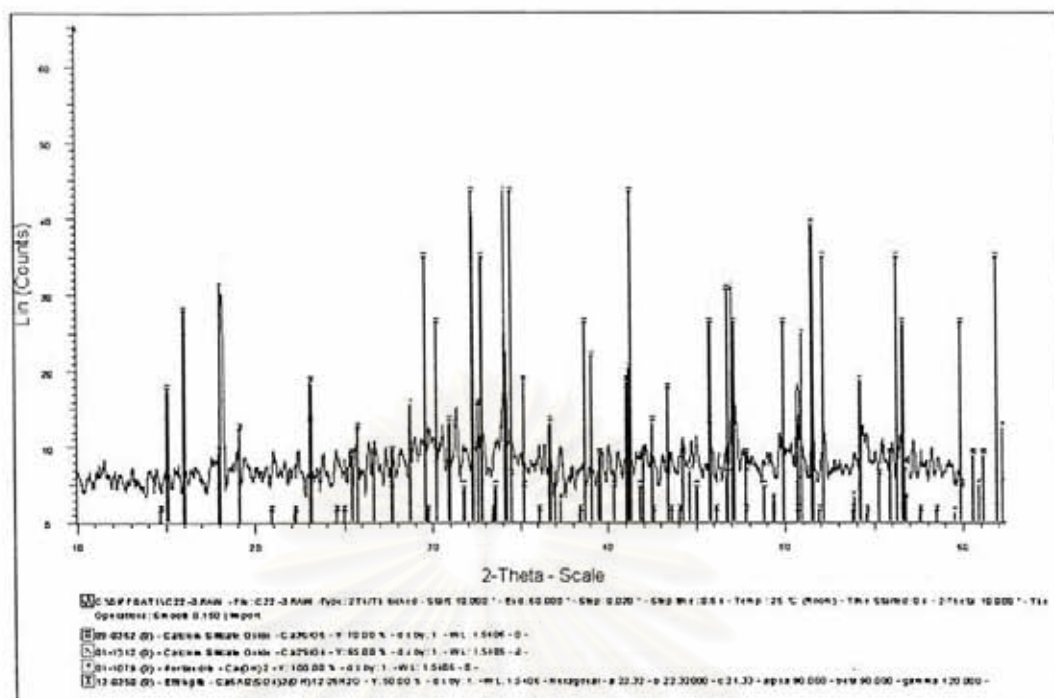
รูปที่ 9.10 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบไลโซหนักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C20 อายุบ่ม 3 วัน



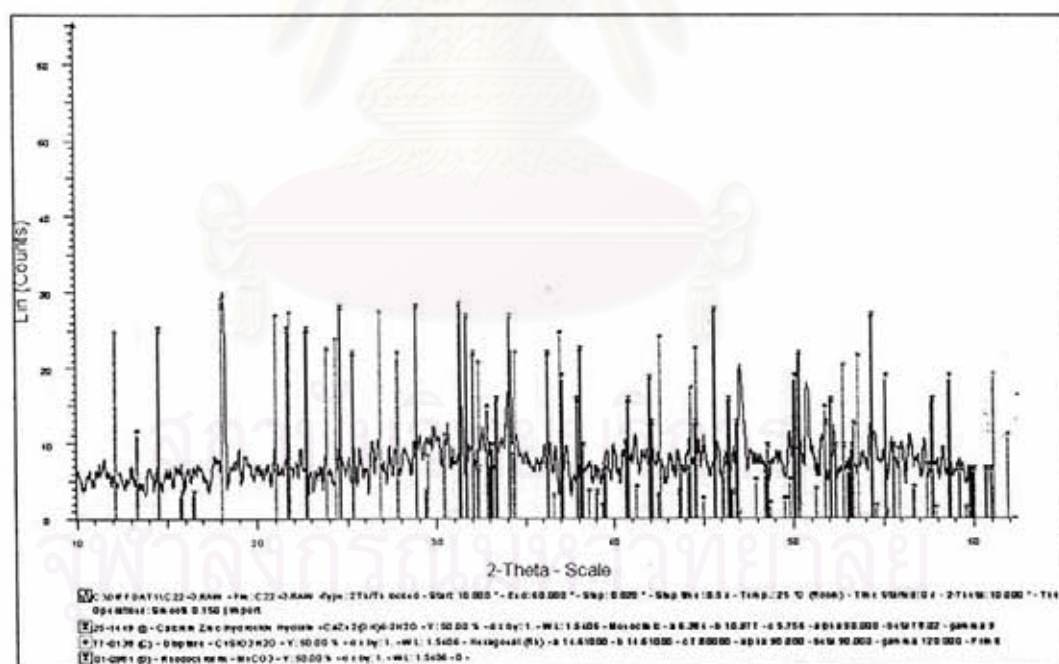
รูปที่ 11 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสดีของตัวอย่าง C20 อายุบ่ม 28 วัน



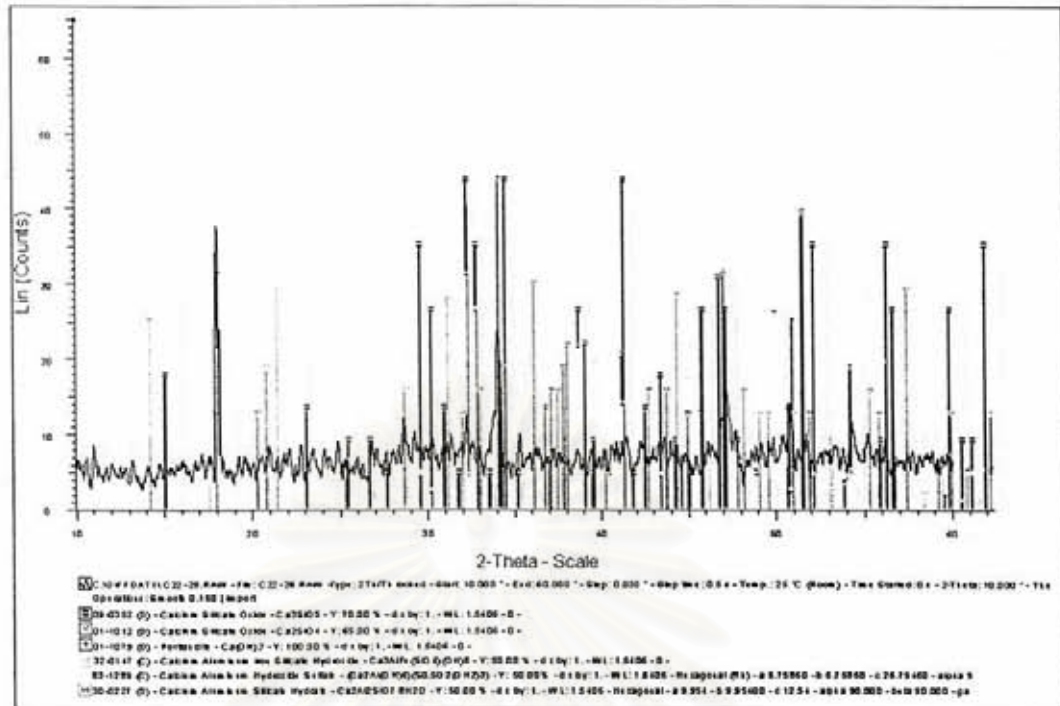
รูปที่ 12 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสดีของตัวอย่าง C20 อายุบ่ม 28 วัน



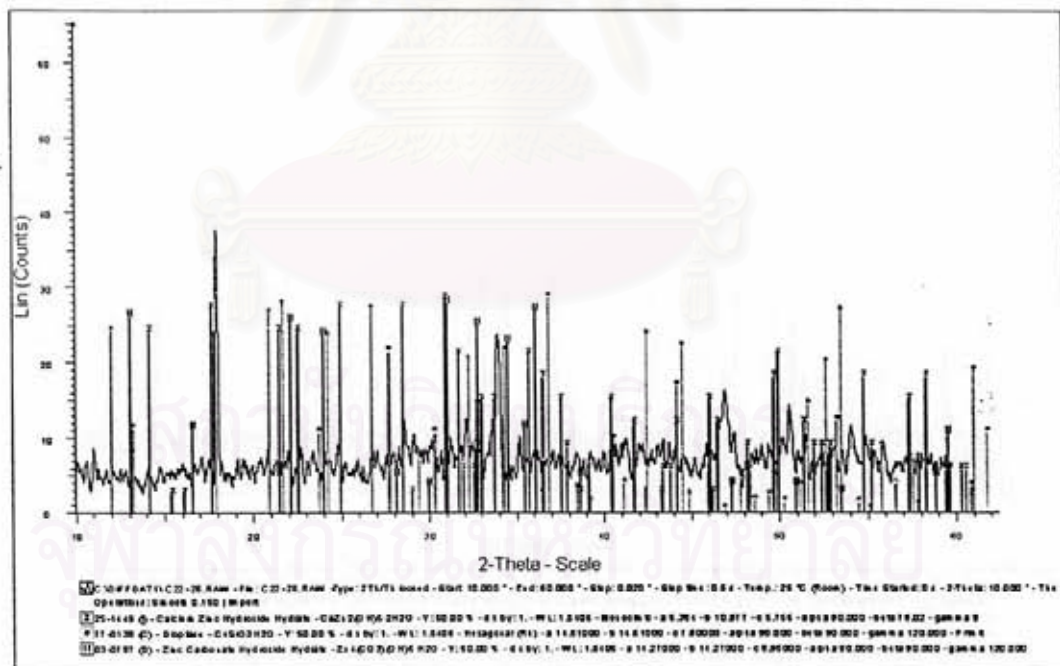
รูปที่ ง.13 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C22 อายุบ่ม 3 วัน



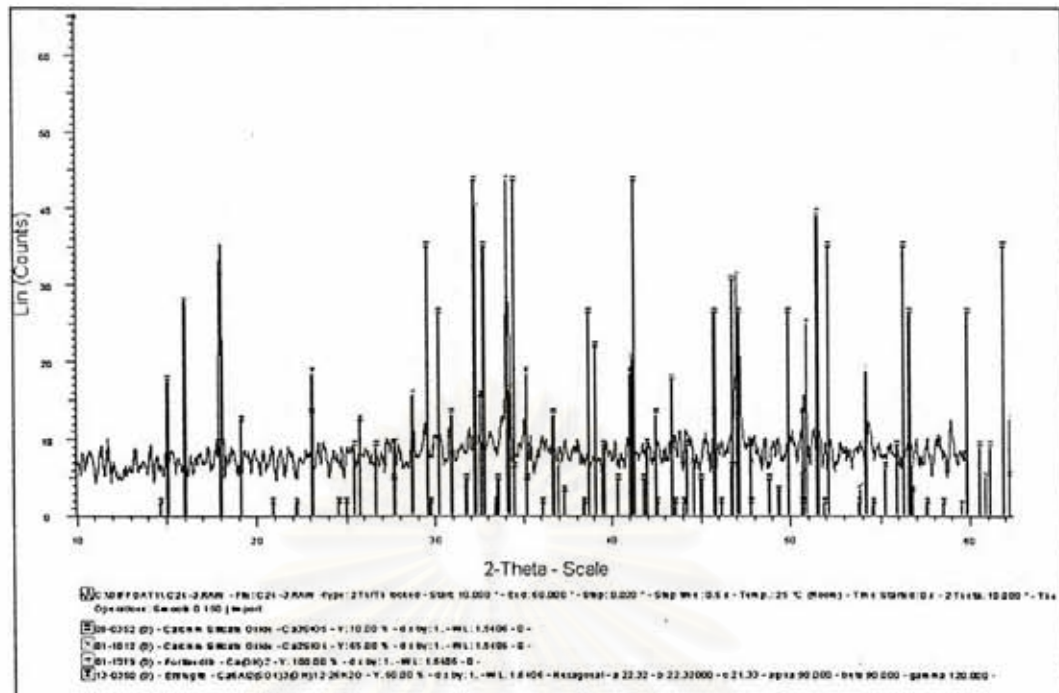
รูปที่ ง.14 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C22 อายุบ่ม 3 วัน



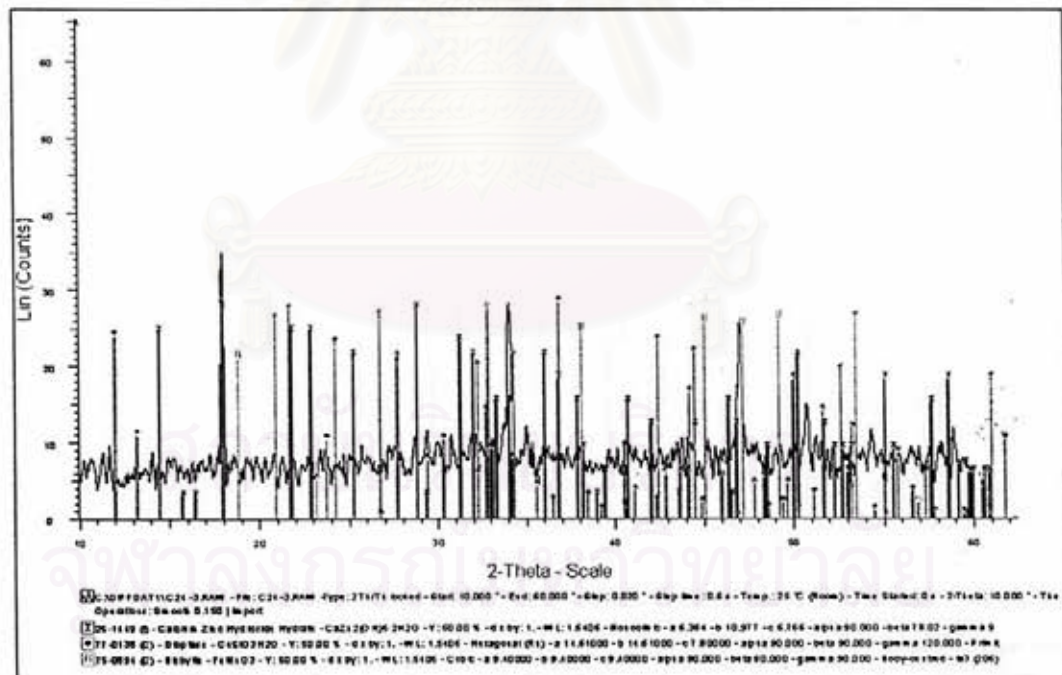
รูปที่ ง.15 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C22 อายุบ่ม 28 วัน



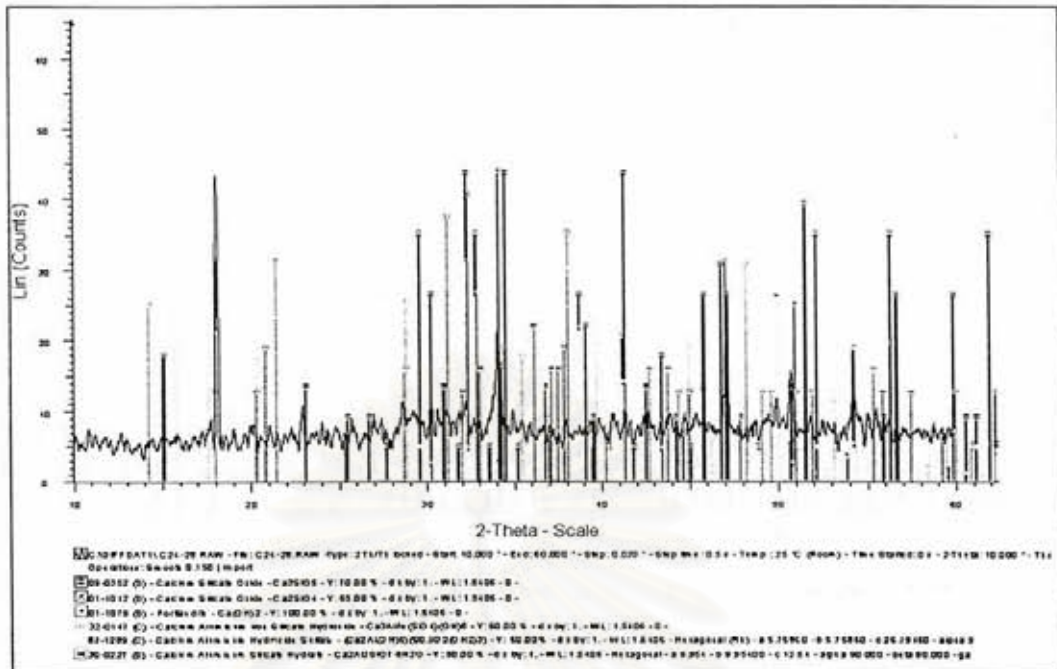
รูปที่ ง.16 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C22 อายุบ่ม 28 วัน



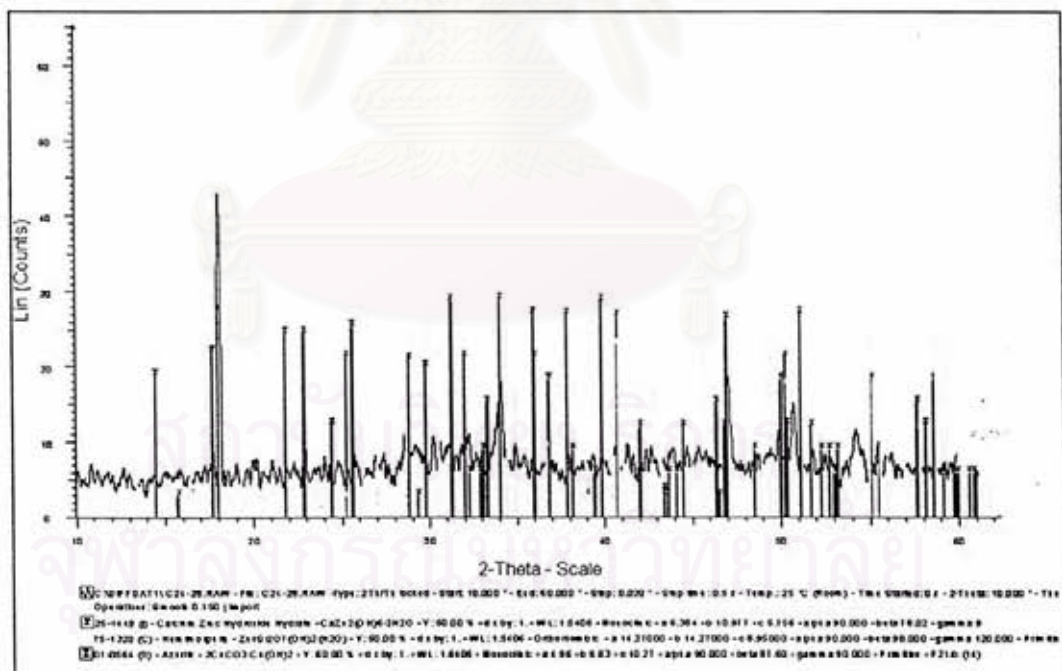
รูปที่ 17 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C24 อายุบ่ม 3 วัน



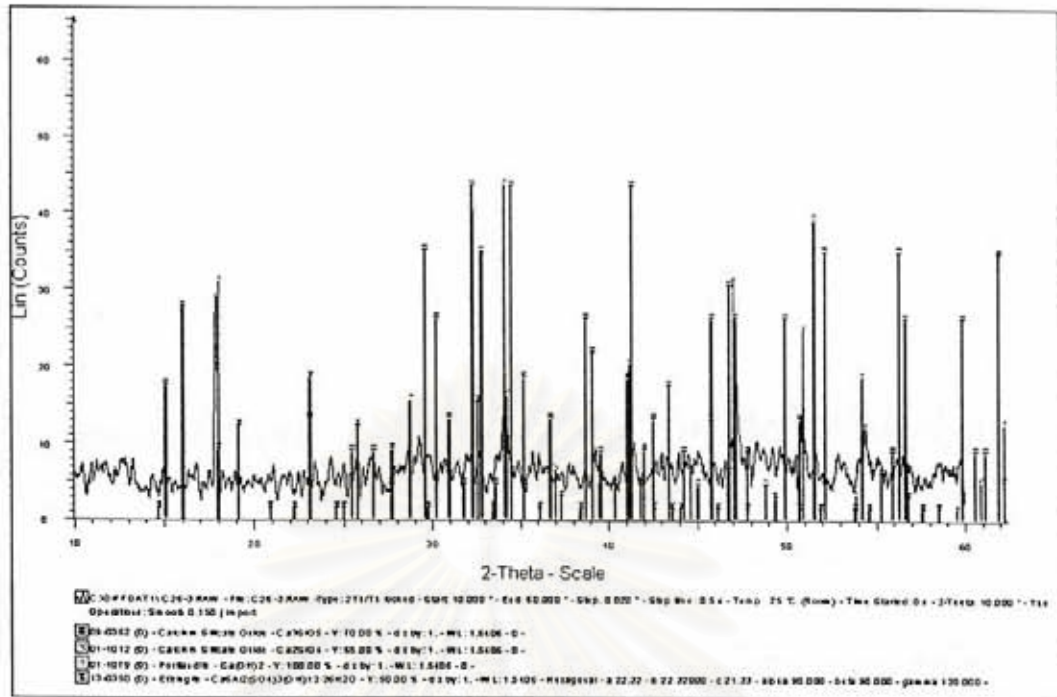
รูปที่ 18 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C24 อายุบ่ม 3 วัน



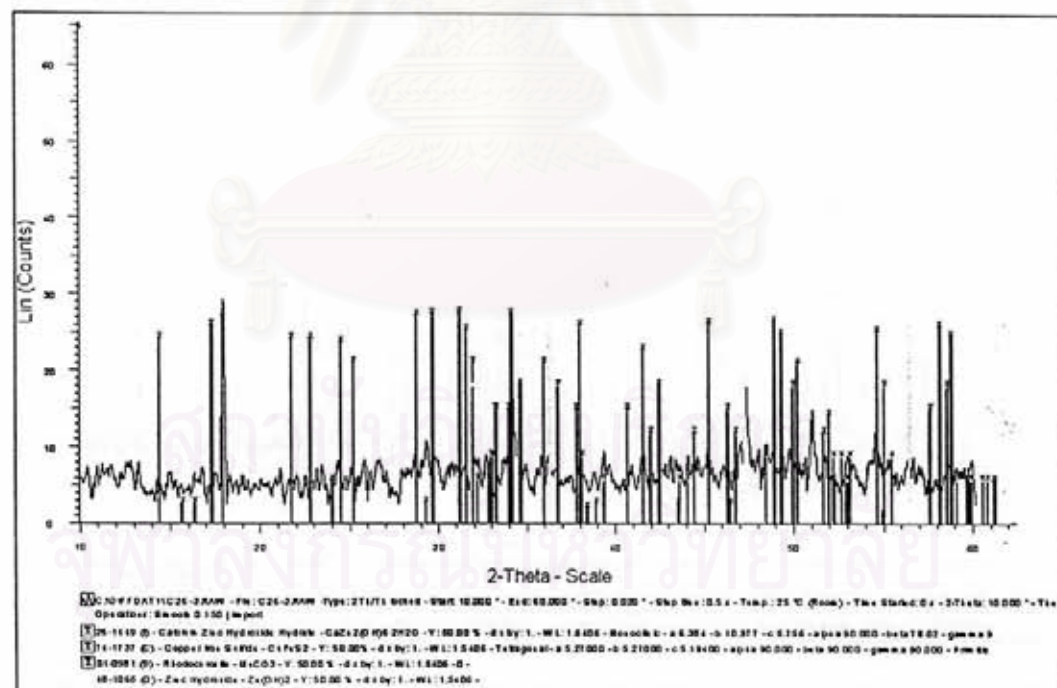
รูปที่ ง.19 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C24 อายุบ่ม 28 วัน



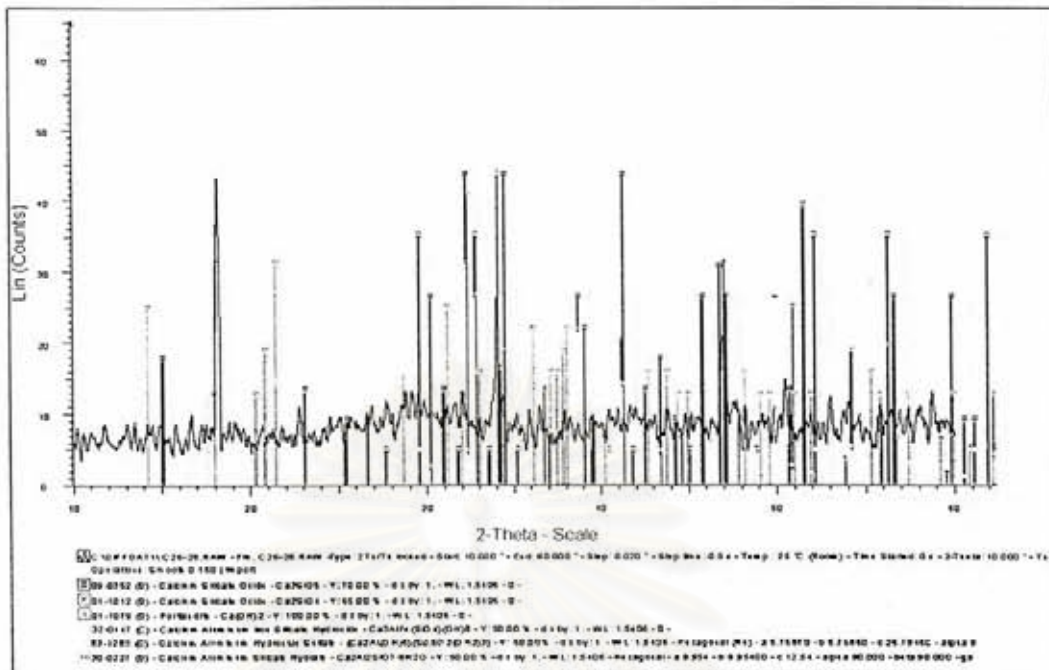
รูปที่ ง.20 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C24 อายุบ่ม 28 วัน



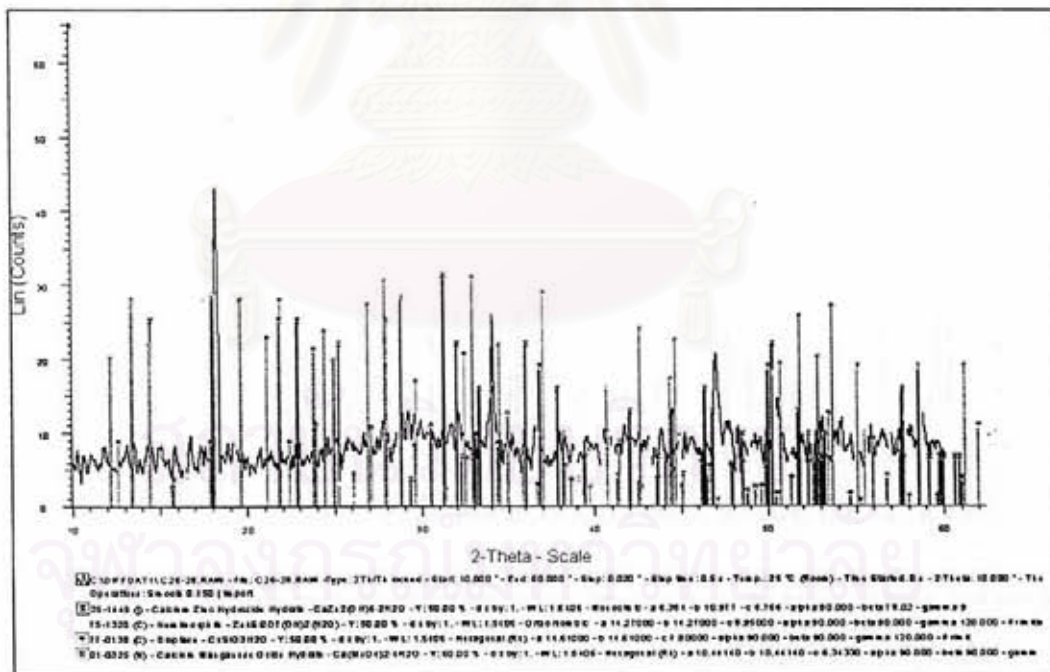
รูปที่ ง.21 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C26 อายุปม 3 วัน



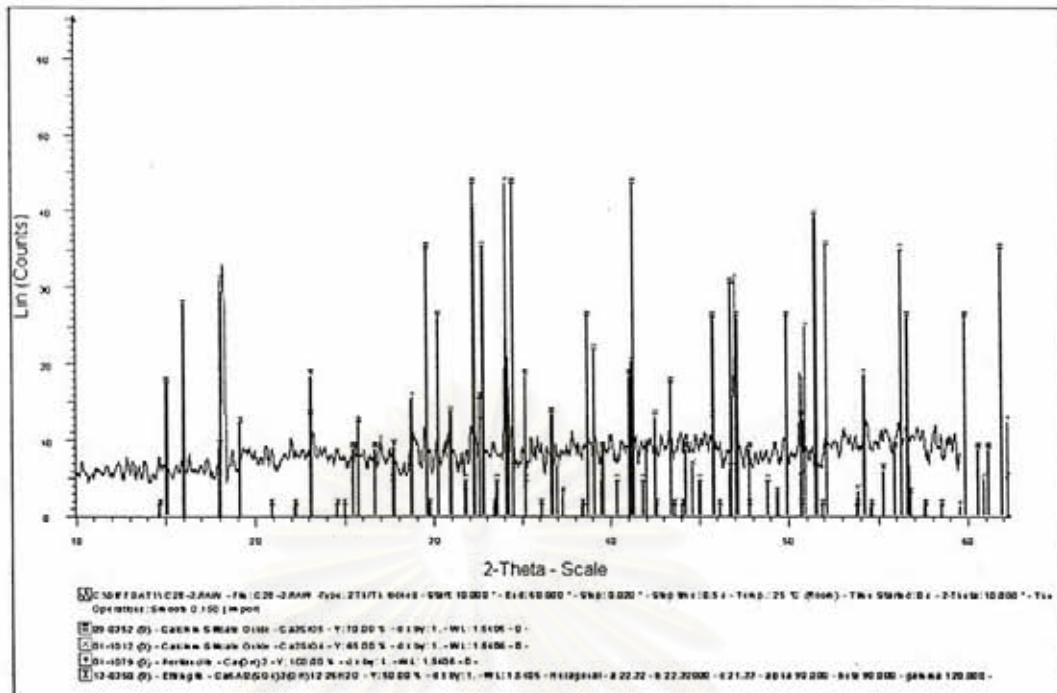
รูปที่ ง.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C26 อายุปม 3 วัน



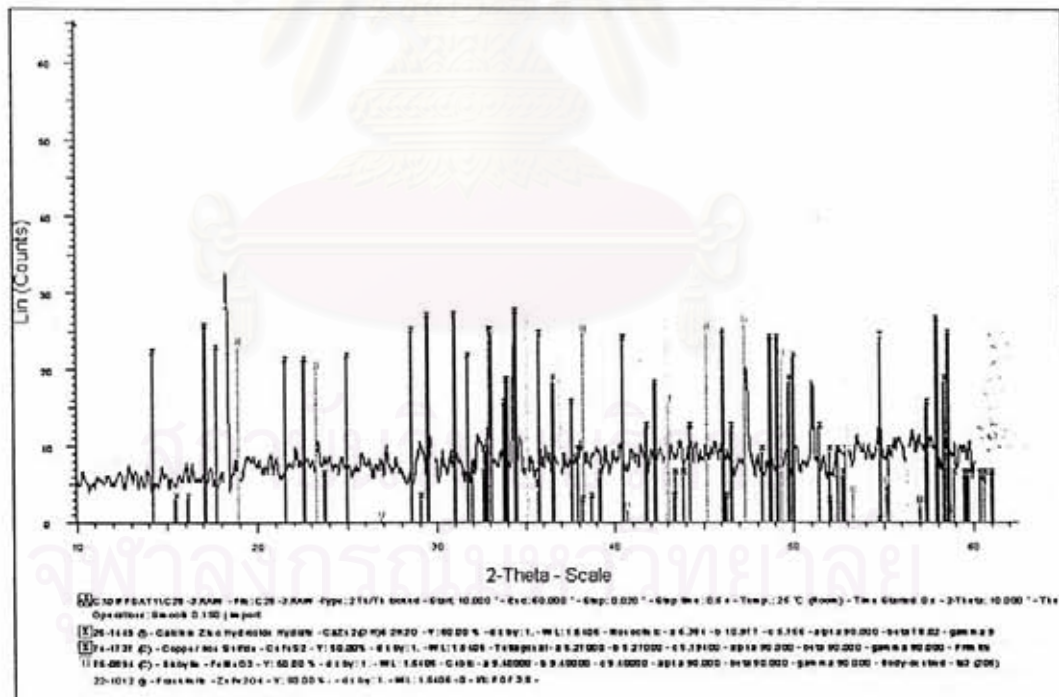
รูปที่ ง.23 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C26 อายุบ่ม 28 วัน



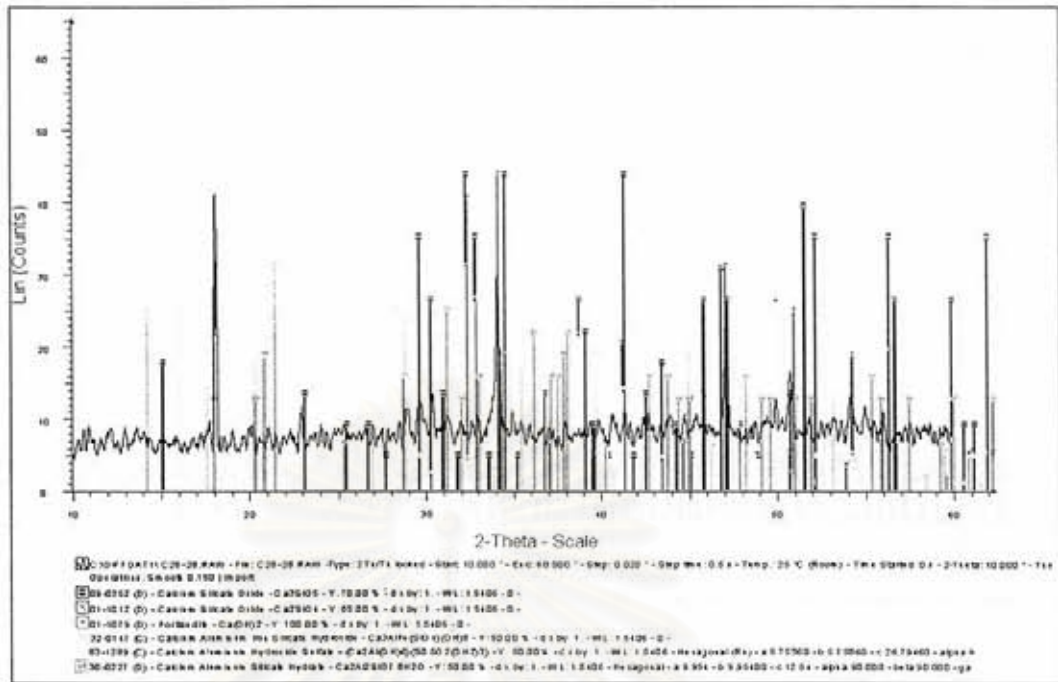
รูปที่ ง.24 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C26 อายุบ่ม 28 วัน



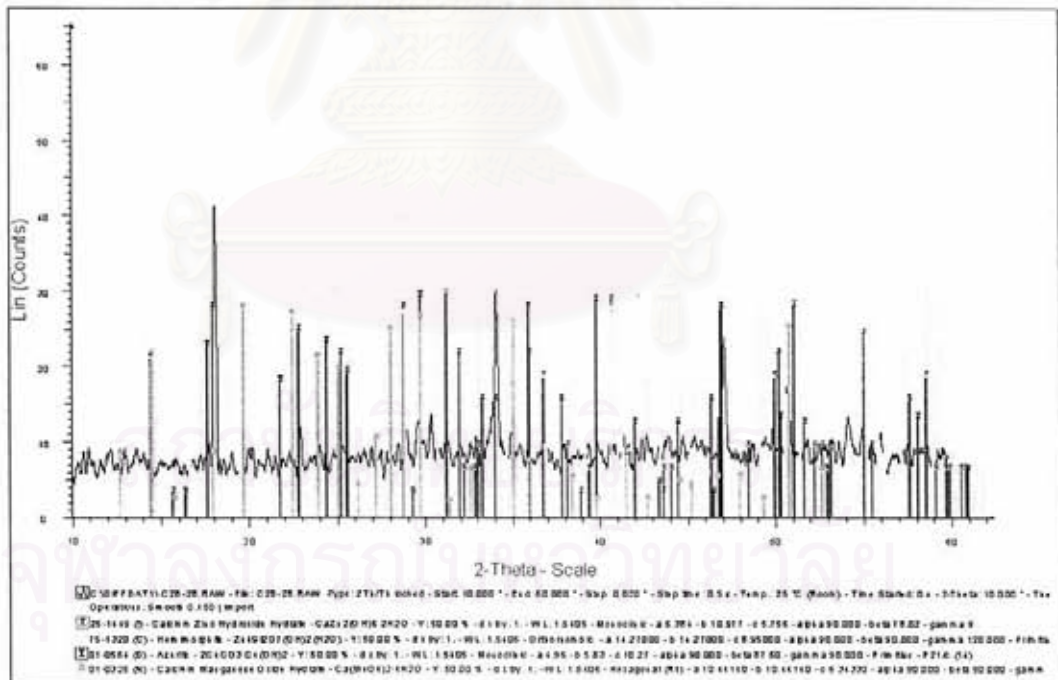
รูปที่ ๒.๒๕ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C28 อายุบ่ม 3 วัน



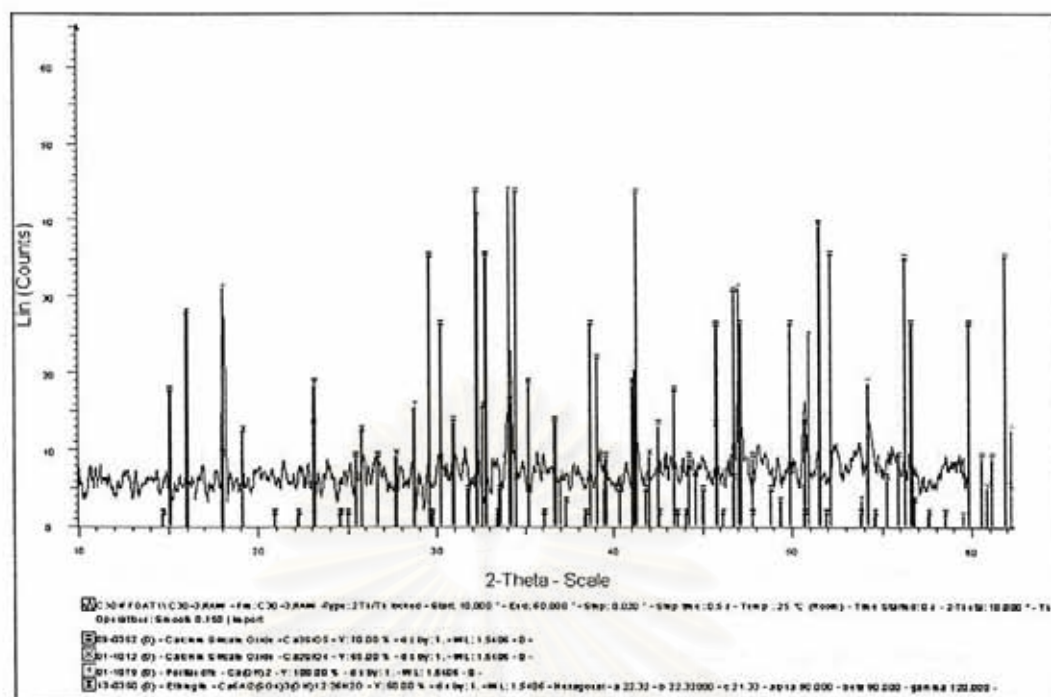
รูปที่ ๒.๒๖ ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C28 อายุบ่ม 3 วัน



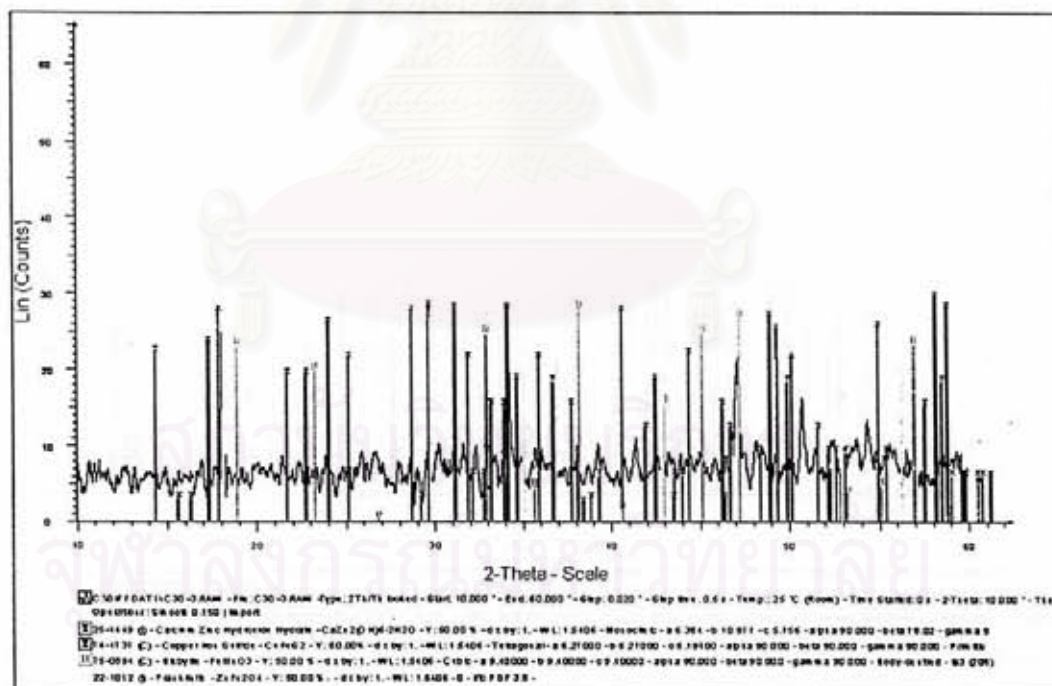
รูปที่ ง.27 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C28 อายุบ่ม 28 วัน



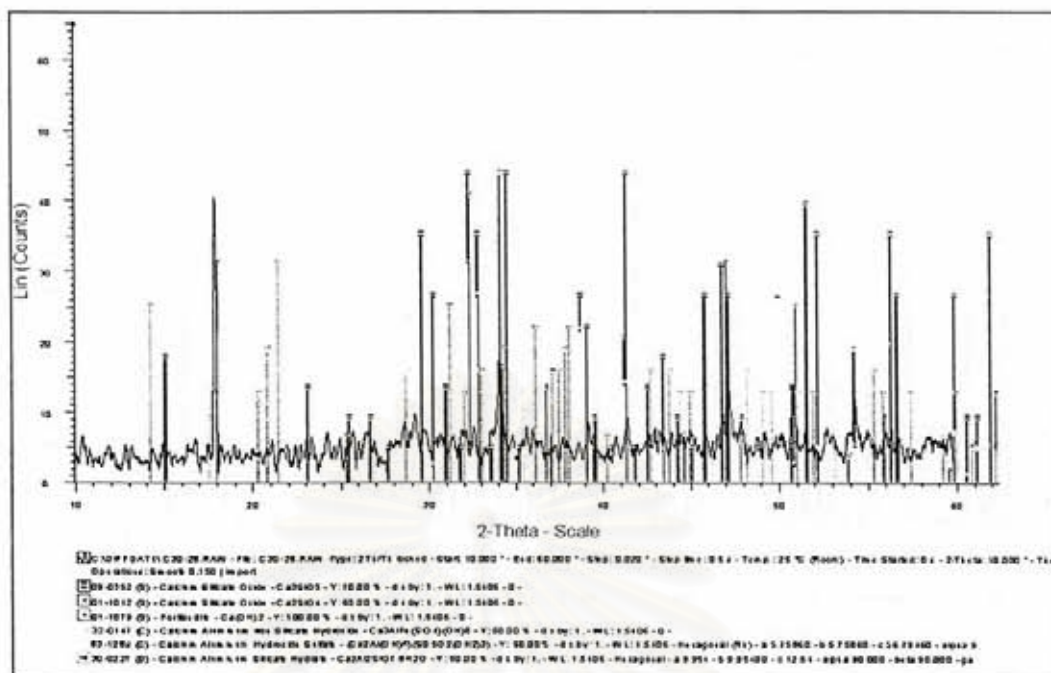
รูปที่ ง.28 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C28 อายุบ่ม 28 วัน



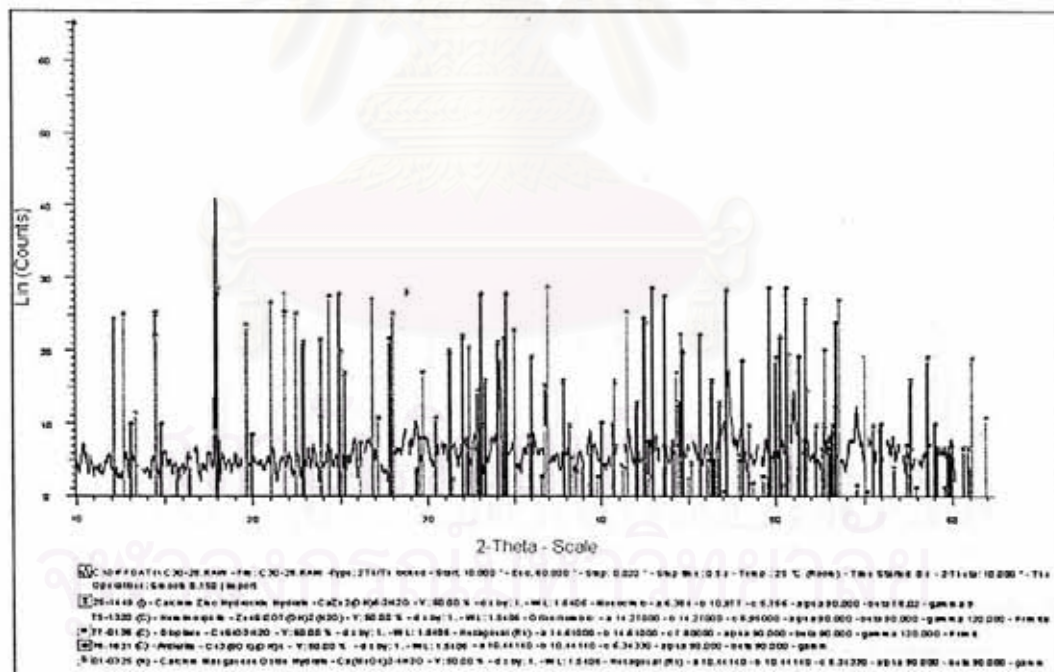
รูปที่ ง.29 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C30 อายุ 3 วัน



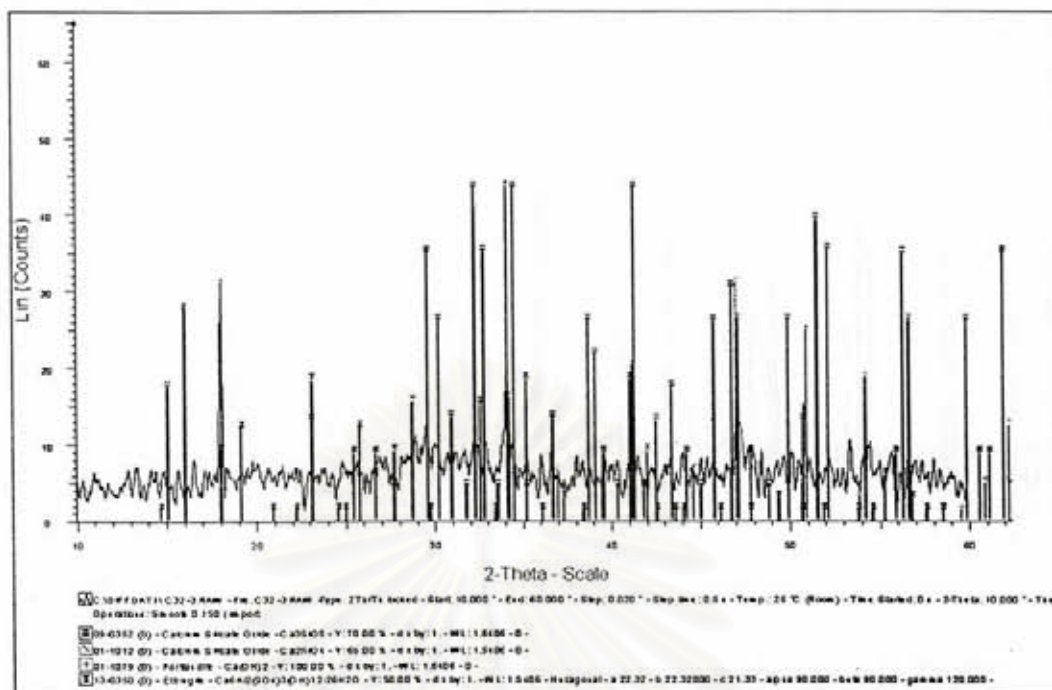
รูปที่ ง.30 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ของตัวอย่าง C30 อายุ 3 วัน



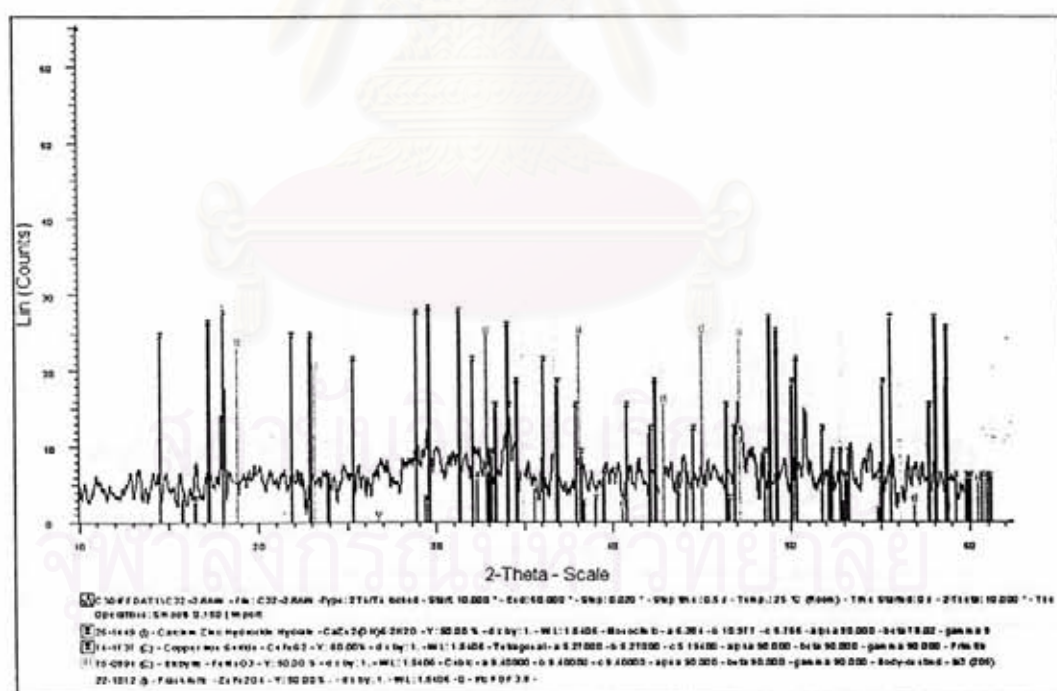
รูปที่ 3.31 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C30 อายุบ่ม 28 วัน



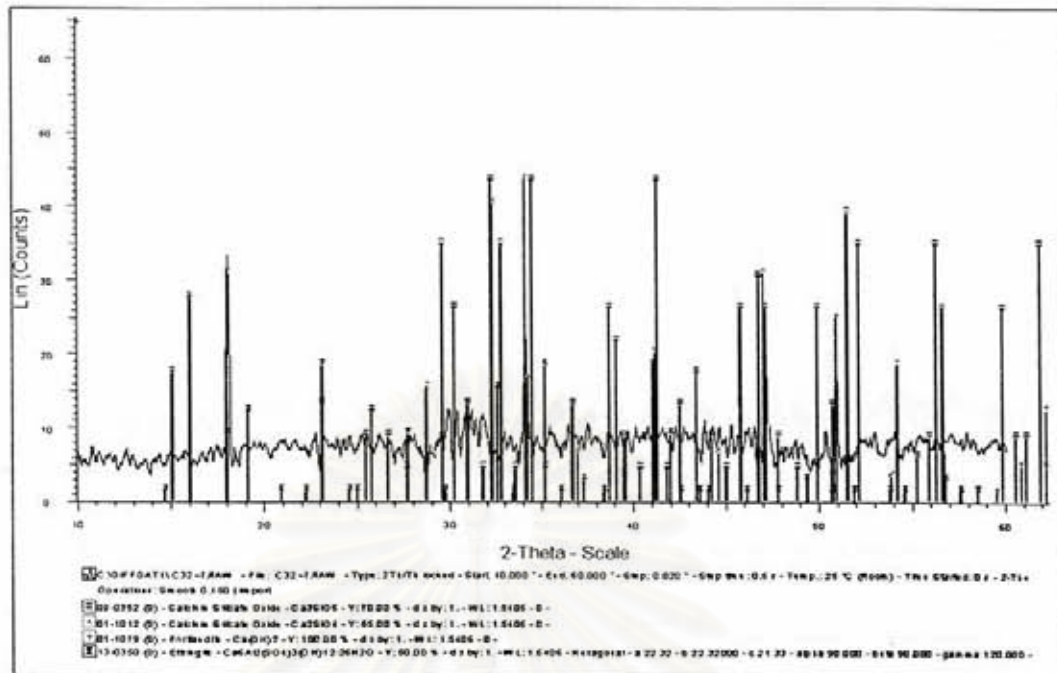
รูปที่ 3.32 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C30 อายุบ่ม 28 วัน



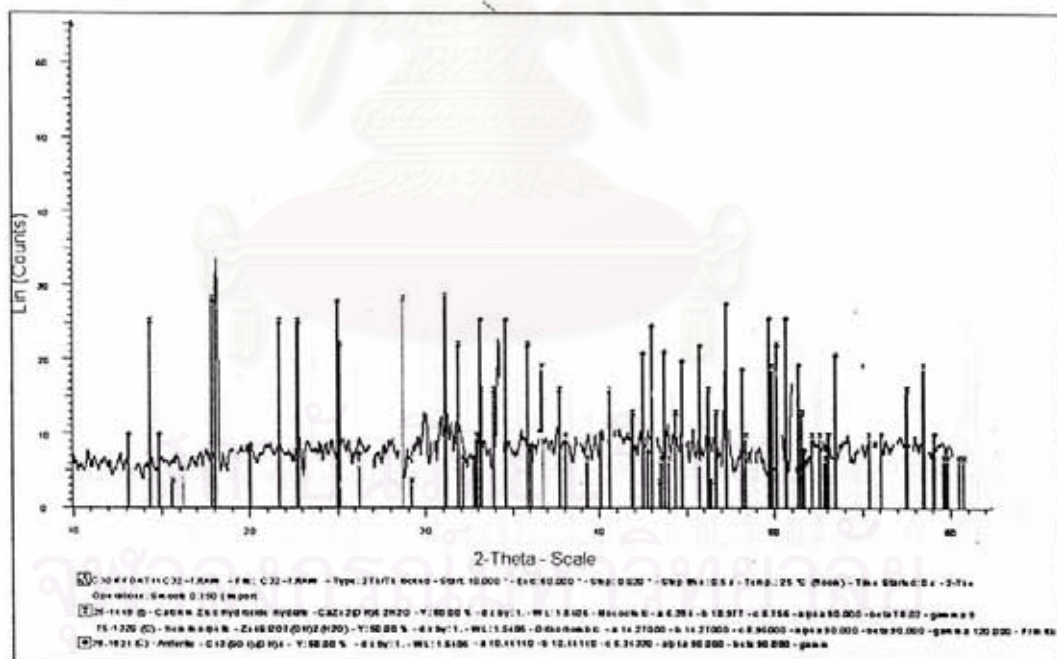
รูปที่ ง.33 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 3 วัน



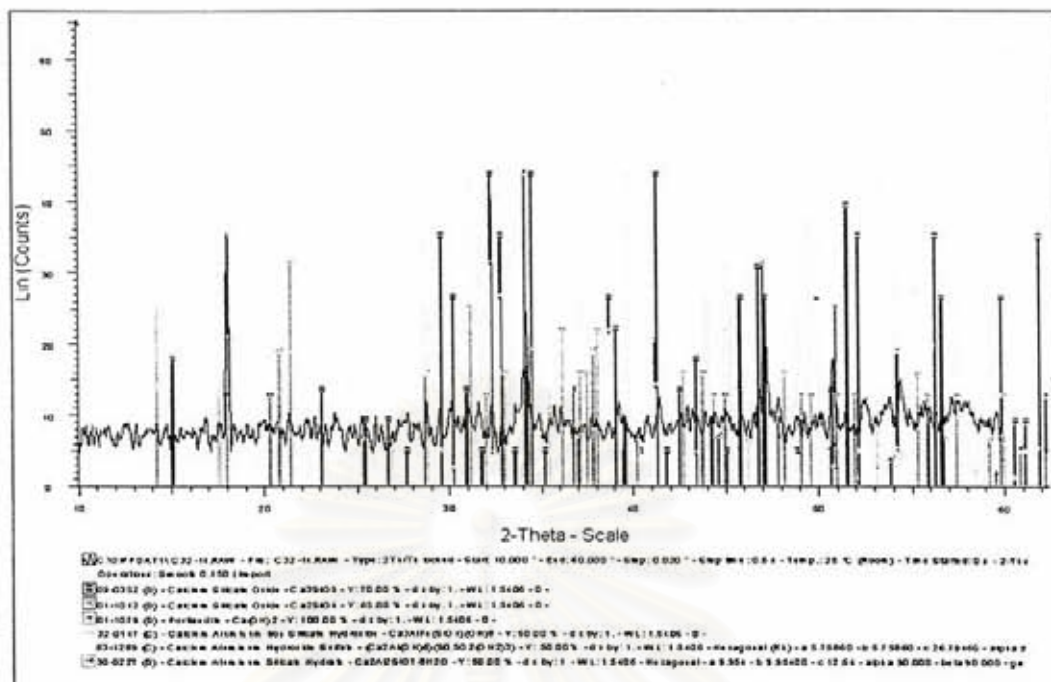
รูปที่ ง.34 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 3 วัน



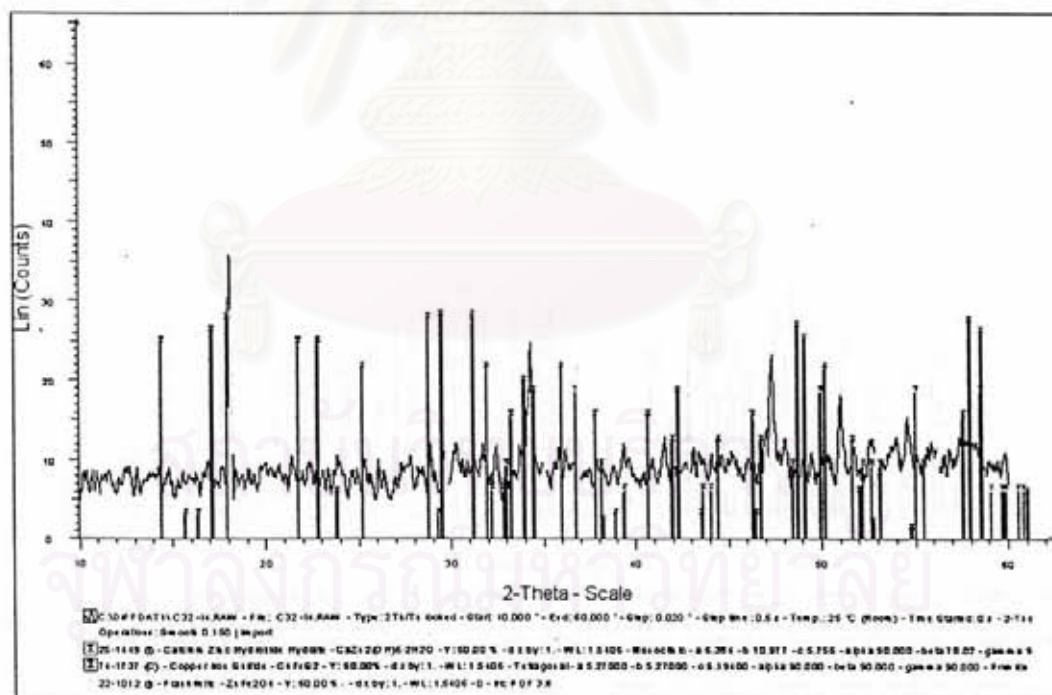
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 7 วัน



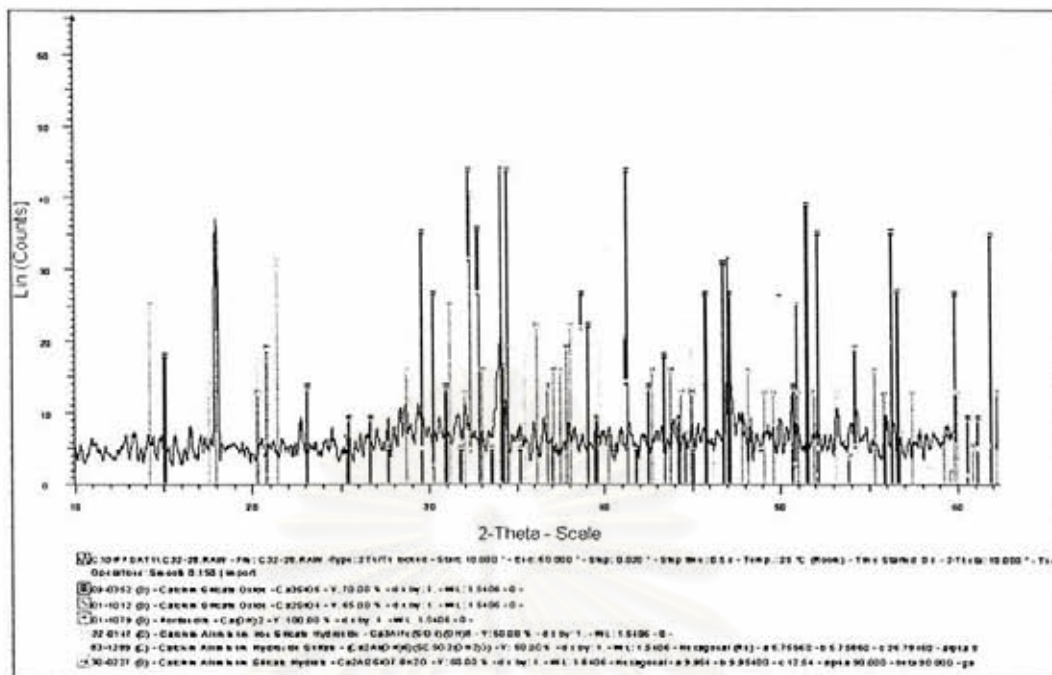
รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสของตัวอย่าง C32 อายุบ่ม 7 วัน



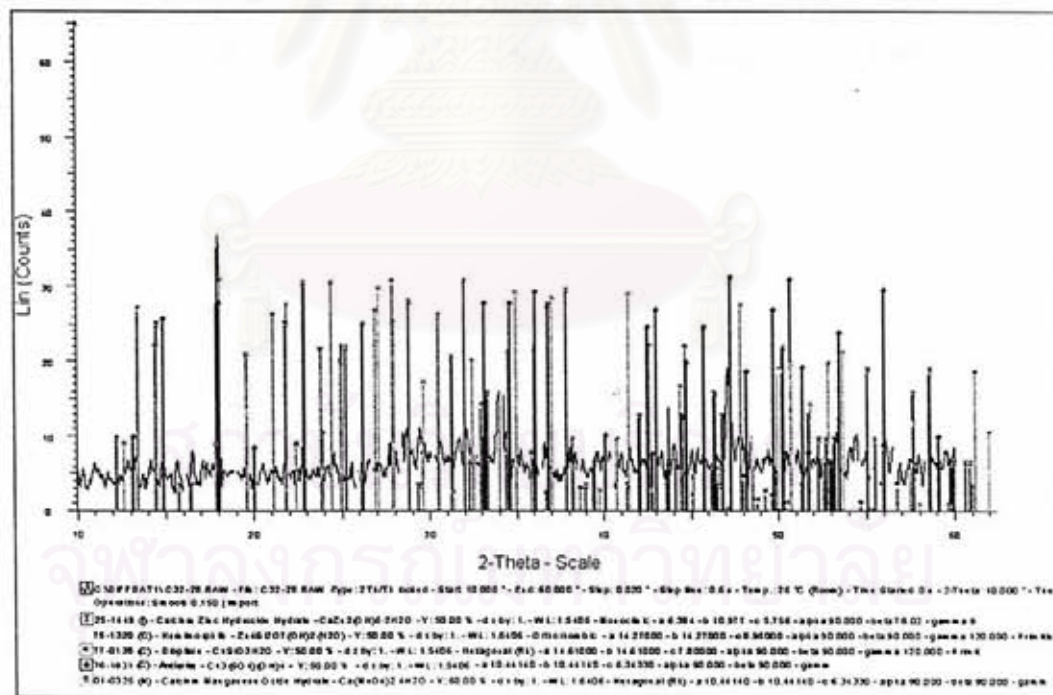
รูปที่ 3.37 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุ 14 วัน



รูปที่ 3.38 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุ 14 วัน



รูปที่ 3.39 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบหลักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุ 28 วัน



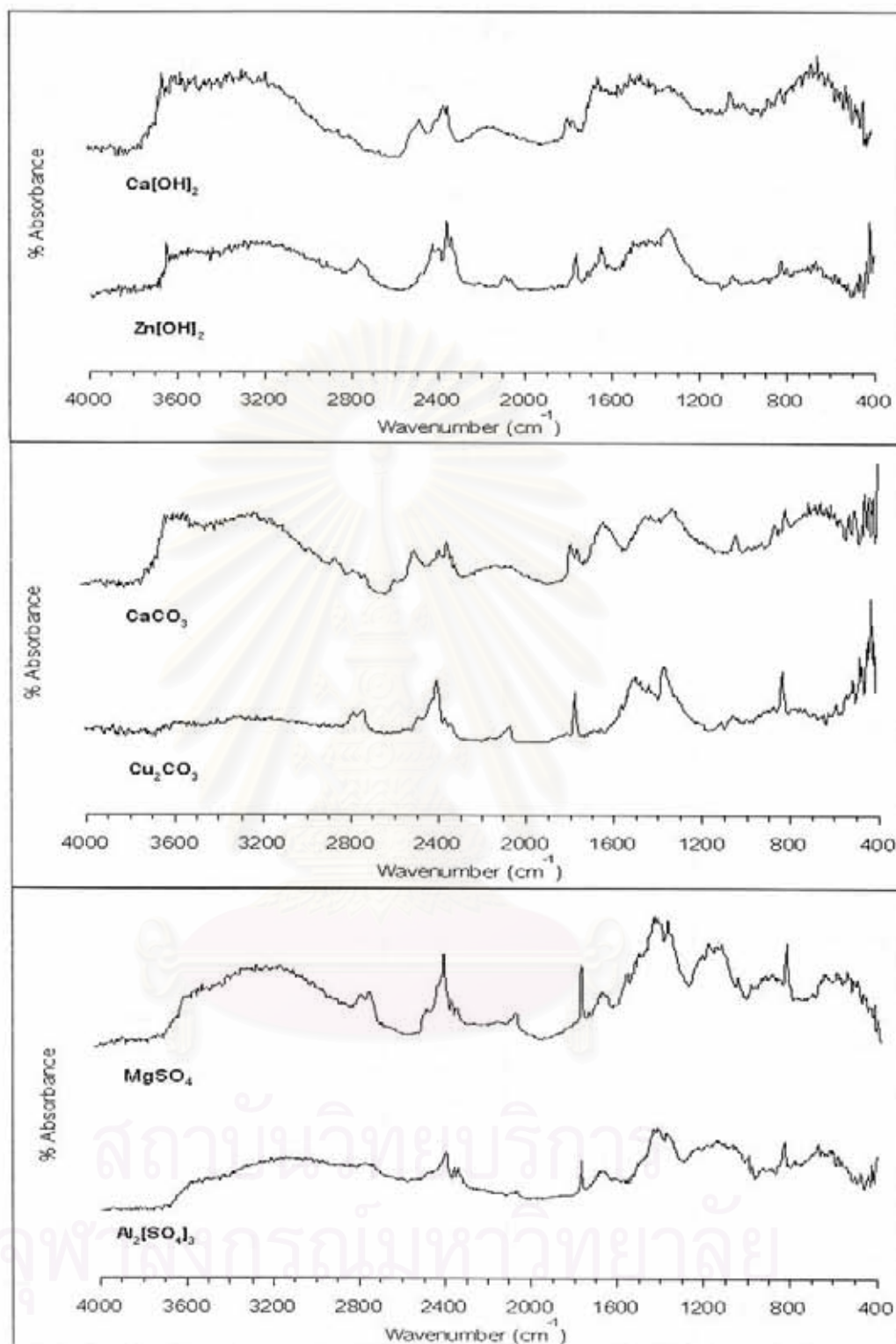
รูปที่ 3.40 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRD แสดงสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เฟสค์ของตัวอย่าง C32 อายุ 28 วัน



ภาคผนวก จ.

ผลการวิเคราะห์พันธะของสารประกอบโลหะหนัก
ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

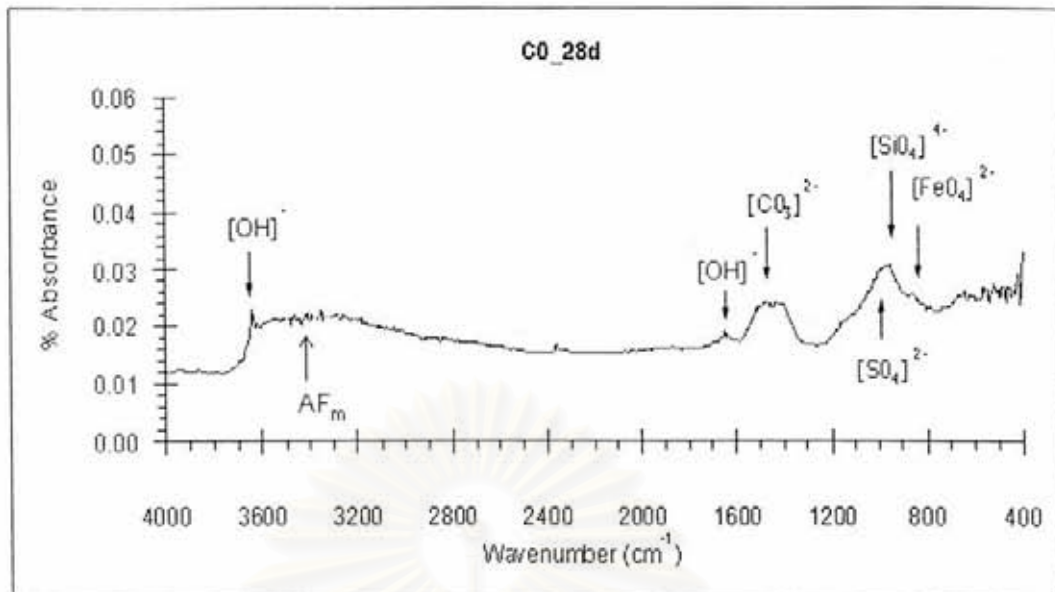
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



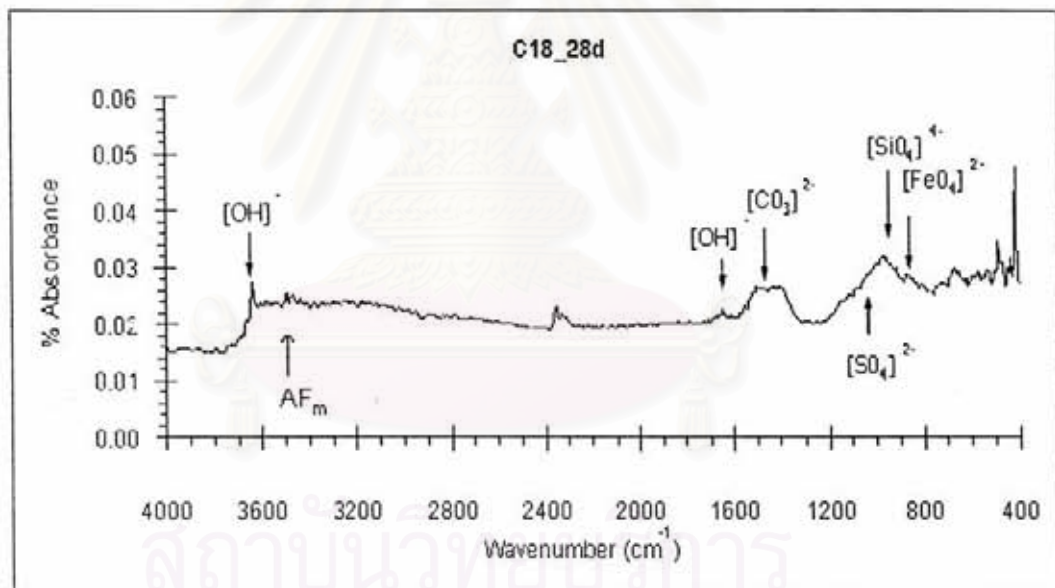
รูปที่ ๑.1 ผลการวิเคราะห์พันธะของสาร Ca(OH)_2 , Zn(OH)_2 และ CaCO_3 , Cu_2CO_3 และ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, MgSO_4 ด้วยเครื่อง FT-IR

ตารางที่ ๑.1 พันธะของสารประกอบที่เลขคลื่นต่างๆ

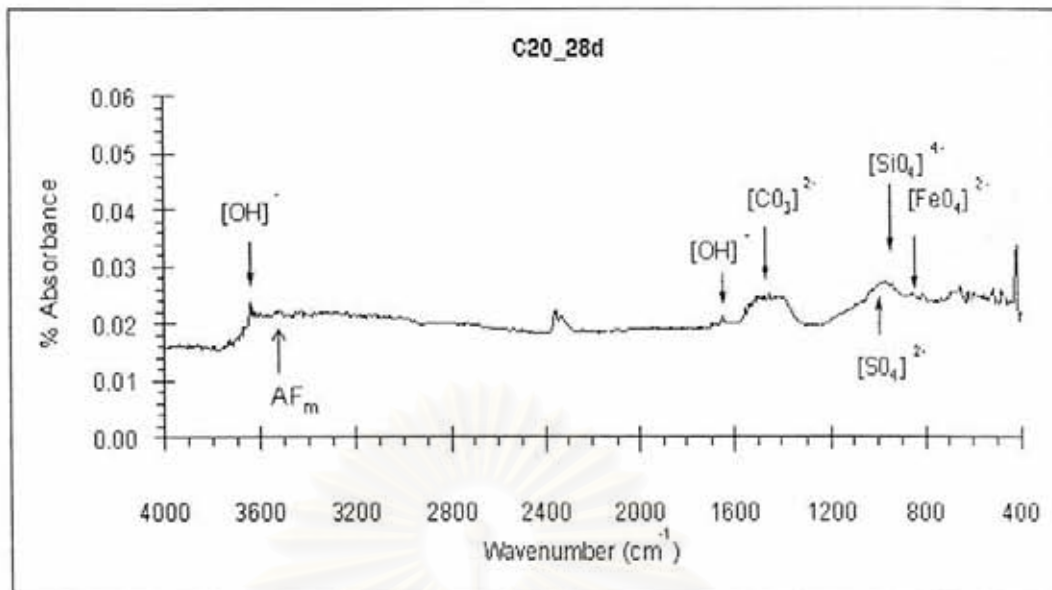
พันธะของ สารประกอบ	สาร	เลขคลื่น (Wavenumber, cm^{-1})				อ้างอิง
(OH) ⁻	Ca(OH) ₂ Zn(OH) ₂	3637.4				Nakamoto, 1986
		3100-3700	1650			Spence, 1993
		3646,3696				Hughes และคณะ, 1995
		3645	1622			Mollah และคณะ, 2000
		3652	1650			ผลการวิเคราะห์
		3650	1657			ผลการวิเคราะห์
(CO ₃) ²⁻	CaCO ₃ Cu ₂ CO ₃		1429-1492	879	706	Nakamoto, 1986
		1504	1429-1492	866	711	Spence, 1993
			1458	876,849	714	Hughes และคณะ, 1995
			1485	871	713	ผลการวิเคราะห์
		1504	1496	867	719	ผลการวิเคราะห์
(SO ₄) ²⁻	Al ₂ (SO ₄) ₃ MgSO ₄	1105	983	611	450	Nakamoto, 1986
		1120, 1145				Spence, 1993
		1105, 1117		604		Hughes และคณะ, 1995
		1100-1150				Mollah และคณะ, 2000
		1118, 1145	387	605	451	ผลการวิเคราะห์
		1105, 1126	991	611	457	ผลการวิเคราะห์
(SiO ₄) ⁴⁻	-	970	925			Spence, 1993
		956	813	527	340	Nakamoto, 1986
(FeO ₄) ²⁻	-	832	790	340	322	Nakamoto, 1986
C ₃ S	-	952	525			Spence, 1993
		935	521			Hughes และคณะ, 1995
C ₂ S	-	991	879	847	509	Hughes และคณะ, 1995
Ettringite (AF ₇)	-	3635	3420	1120		Spence, 1993
Monosulphate (AF _m)	-	3675, 3540		1100		Spence, 1993
		,3100	3500	,1170		



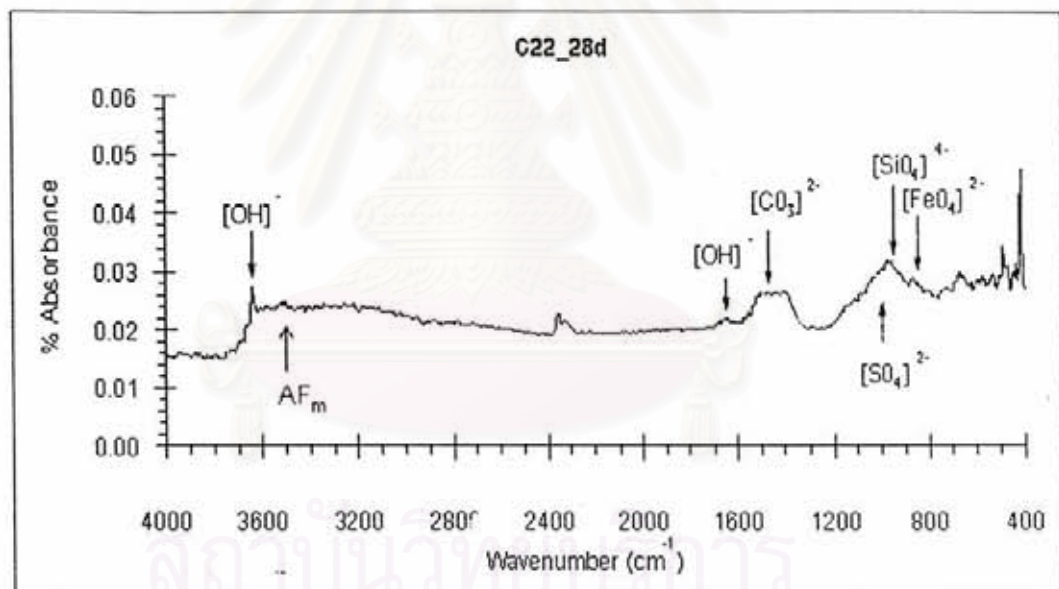
รูปที่ ๑.2 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C0 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



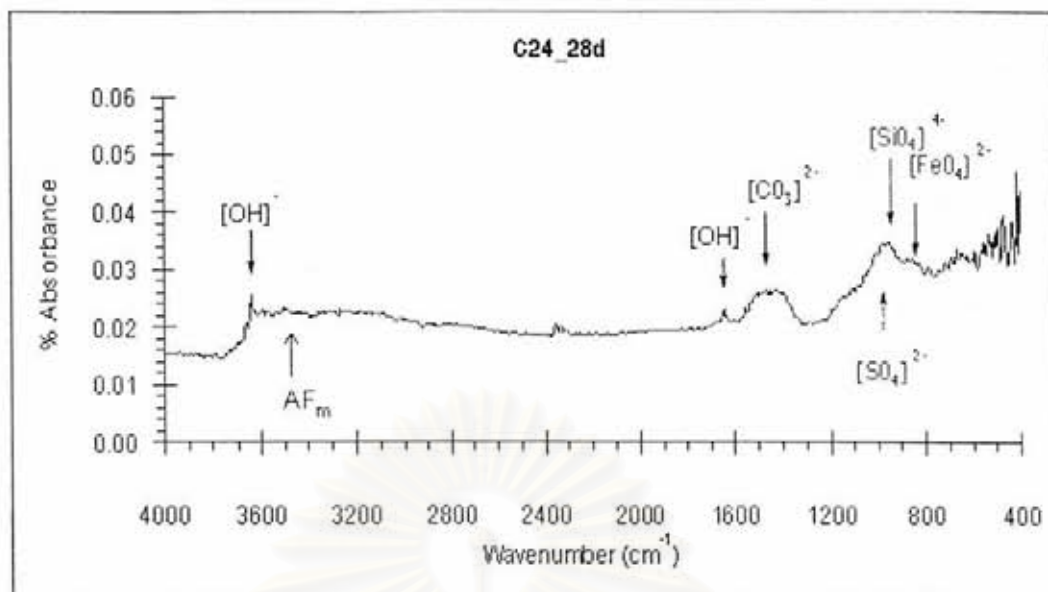
รูปที่ ๑.3 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C18 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



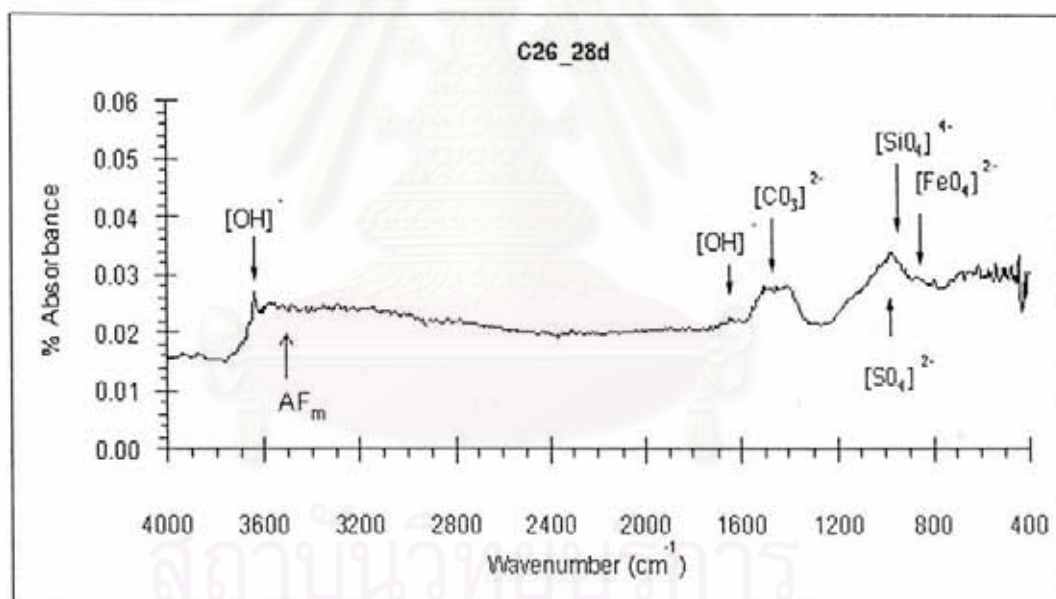
รูปที่ ๑.4 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่งซีเมนต์เฟส C20 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



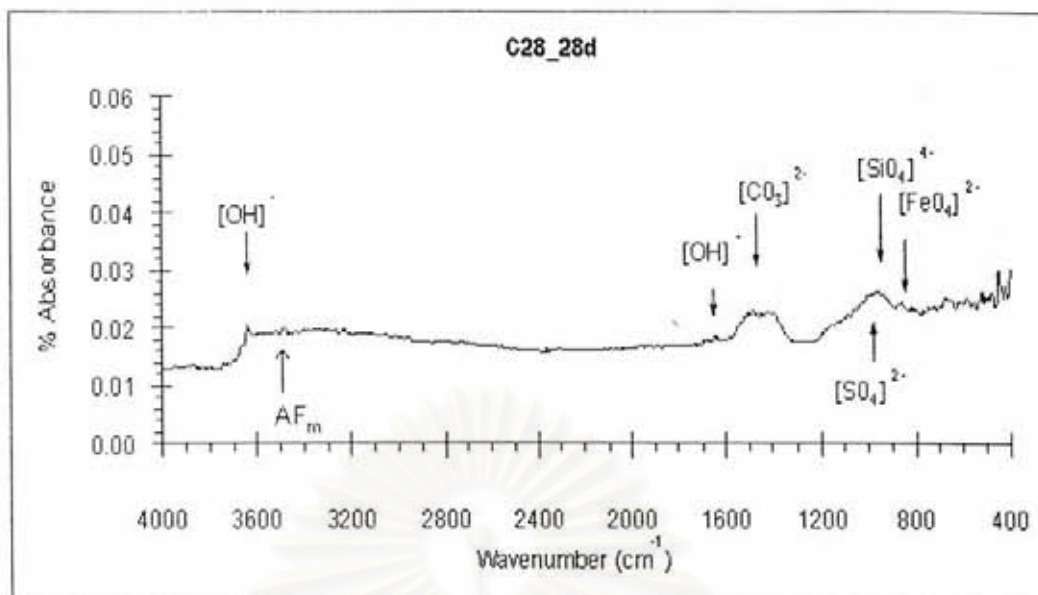
รูปที่ ๑.5 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่งซีเมนต์เฟส C22 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



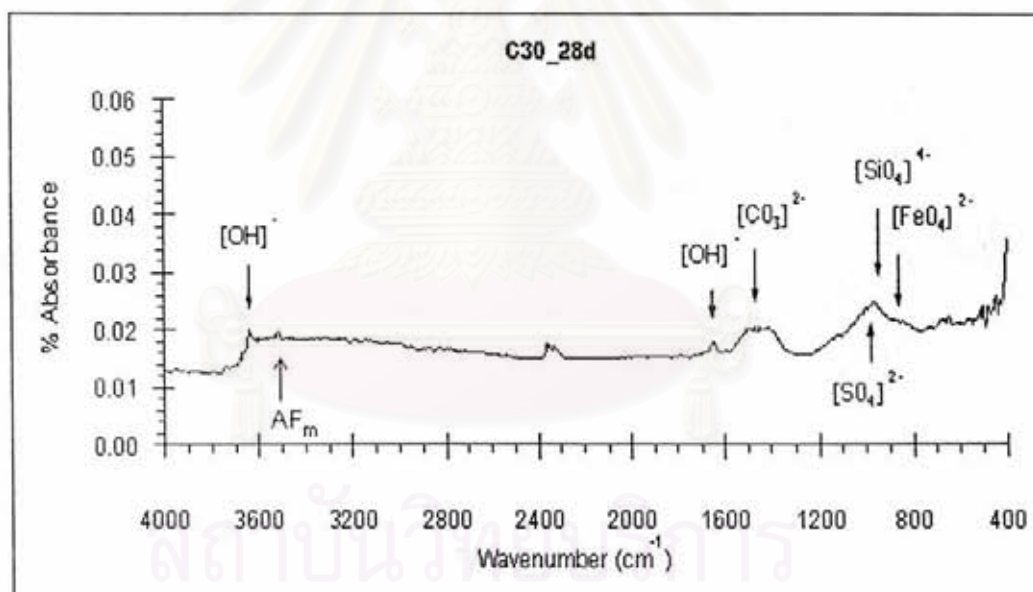
รูปที่ ๑.6 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C24 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



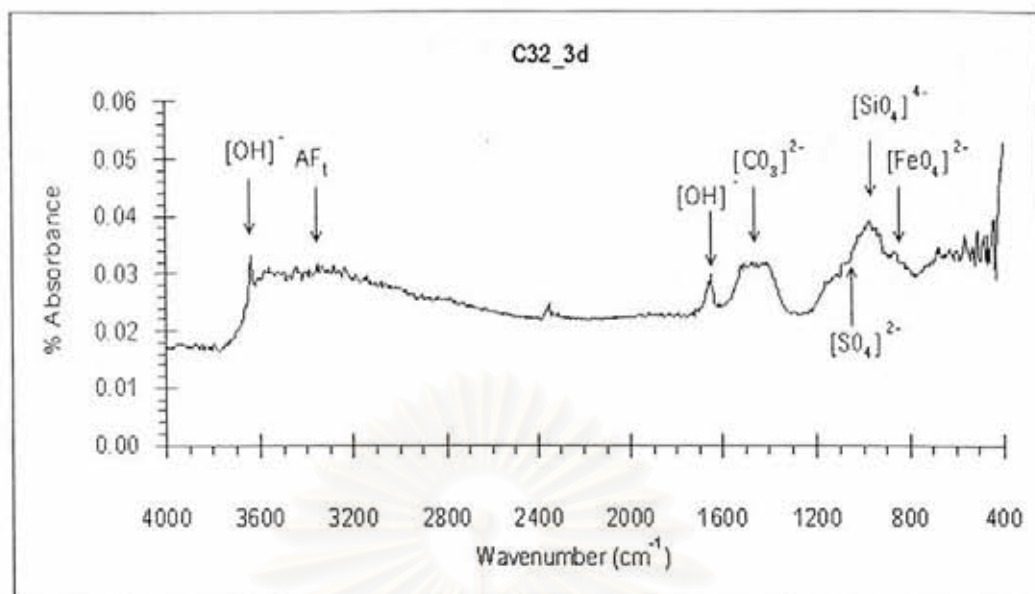
รูปที่ ๑.7 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C26 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



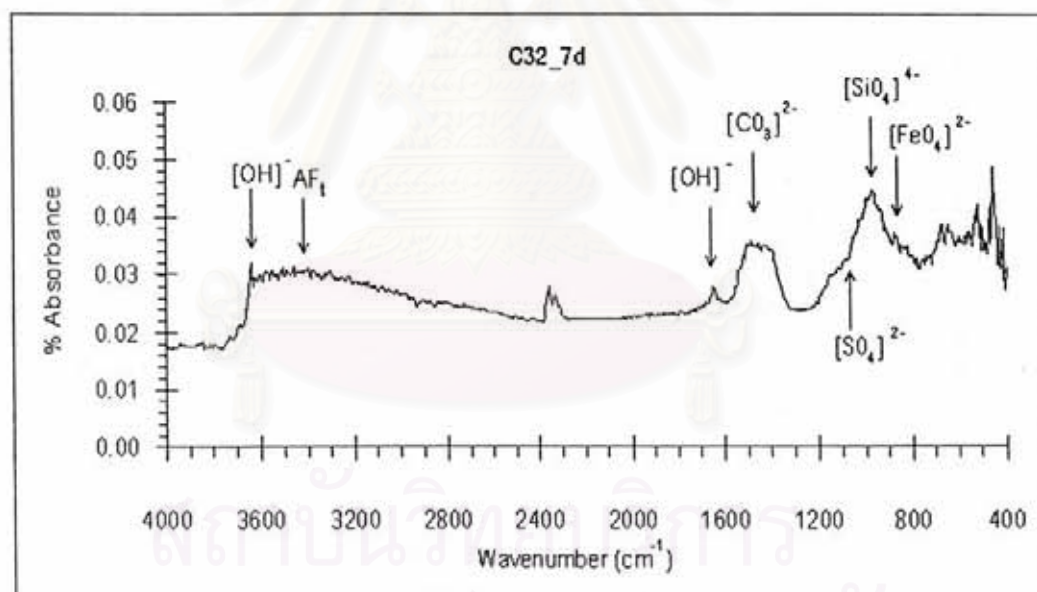
รูปที่ ๑.8 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C28 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



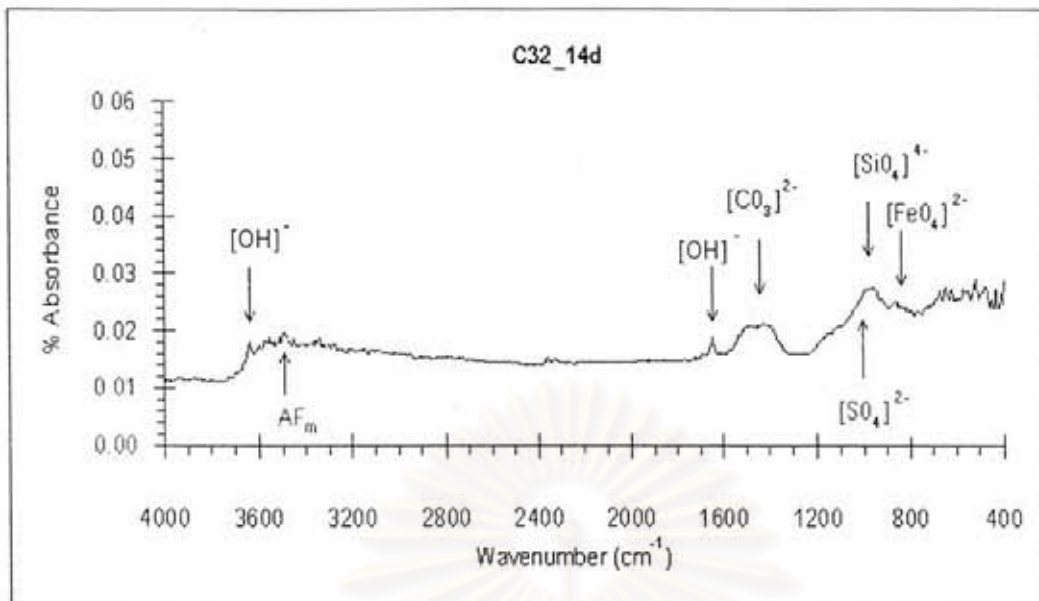
รูปที่ ๑.9 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C30 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



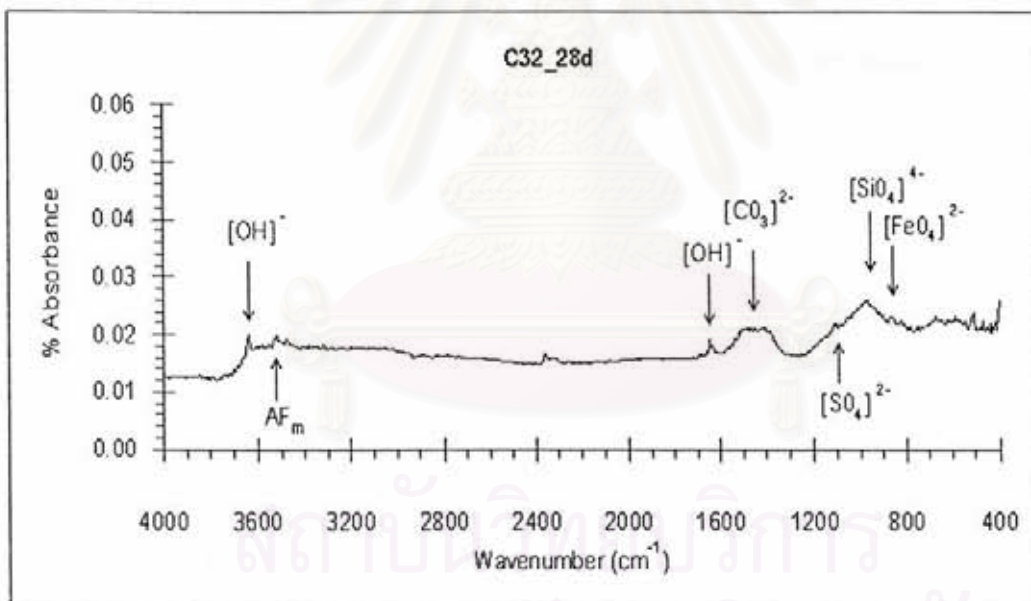
รูปที่ ๑.10 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 3 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



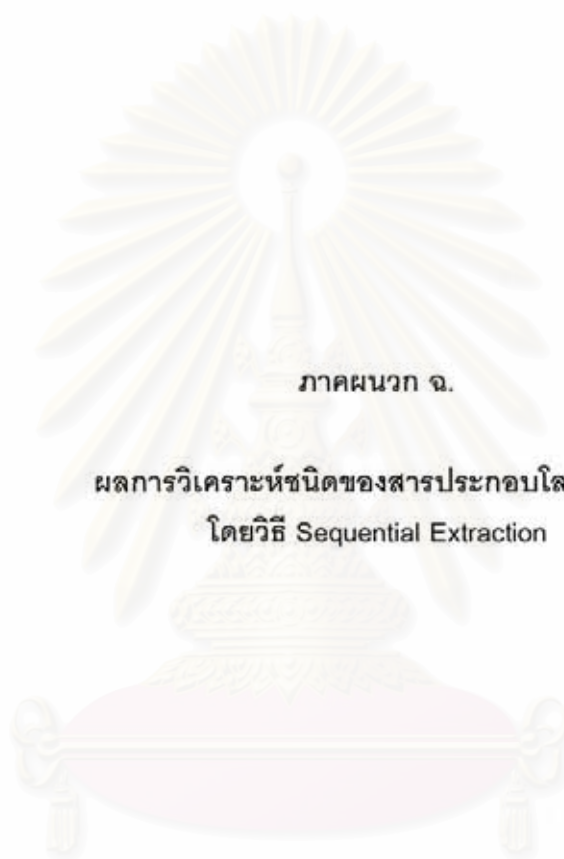
รูปที่ ๑.11 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 7 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



รูปที่ ๑.12 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 14 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



รูปที่ ๑.13 ผลการวิเคราะห์รูปแบบพันธะของสารประกอบในตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ C32 อายุบ่ม 28 วัน ด้วยเครื่อง FT-IR



ภาคผนวก จ.

ผลการวิเคราะห์ชนิดของสารประกอบโลหะหนัก
โดยวิธี Sequential Extraction

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C0

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	0.946	0.938	0.881	0.102	V	1	3.077	2.432	1.516	0.186
	2	0.815	0.658	0.517	0.366		2	0.308	0.253	0.236	0.459
	3	9.956	10.267	6.126	6.331		3	11.349	9.071	7.708	5.845
	4	7.883	8.635	4.207	1.328		4	1.126	1.878	0.632	0.412
	5	80.400	79.502	88.269	91.874		5	84.140	86.366	89.908	93.097
Cr	1	0.349	0.470	0.301	0.311	Zn	1	0.830	0.100	0.105	0.117
	2	0.471	0.985	0.448	0.087		2	1.782	0.634	0.650	0.066
	3	6.327	7.485	3.399	2.078		3	16.271	14.211	14.425	12.703
	4	4.689	2.549	2.108	1.922		4	7.795	5.639	3.632	1.006
	5	88.164	88.511	93.744	95.602		5	73.323	79.415	81.189	86.108
Cu	1	0.155	0.090	0.182	0.273	Ba	1	0.668	0.485	0.295	0.048
	2	3.067	2.256	2.283	1.174		2	0.745	0.529	0.819	0.420
	3	27.928	25.321	23.580	19.010		3	9.686	7.669	5.614	2.995
	4	8.664	7.540	4.326	0.323		4	2.467	2.530	1.674	1.311
	5	60.187	64.793	69.630	79.220		5	86.434	88.786	91.597	95.225
Ni	1	3.131	3.270	1.926	0.681	Co	1	0.707	4.804	0.040	0.171
	2	1.986	0.893	0.690	0.512		2	2.025	1.152	0.102	0.285
	3	9.404	4.424	4.724	3.370		3	11.121	8.510	7.831	2.932
	4	1.297	0.751	0.230	0.385		4	1.171	1.917	1.664	0.857
	5	84.182	92.005	91.086	95.052		5	84.975	83.618	90.363	95.755
Pb	1	0.026	0.012	0.027	0.034	Mn	1	0.114	0.119	0.134	0.118
	2	1.501	0.251	0.129	0.070		2	0.015	0.013	0.009	0.010
	3	15.306	11.001	5.674	4.441		3	6.346	4.108	4.368	2.997
	4	2.845	1.238	0.292	0.635		4	2.707	1.524	1.838	1.856
	5	80.322	87.498	93.878	94.819		5	90.819	94.235	93.651	95.020
Sr	1	0.527	0.349	0.134	0.012	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	0.716	0.349	0.902	0.023	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	11.542	7.653	5.027	4.647	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	0.267	0.332	0.673	0.261	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	86.948	91.317	93.264	95.056	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.

ตารางที่ ๑.2 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C-18

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	1.112	1.394	0.436	0.229	V	1	4.907	4.033	3.535	2.428
	2	1.293	0.946	0.511	0.455		2	2.259	2.092	1.064	0.876
	3	10.694	15.506	14.727	5.968		3	12.693	10.161	10.726	5.422
	4	6.286	6.527	5.047	3.743		4	2.106	2.353	1.289	0.522
	5	80.615	75.628	79.280	89.605		5	78.035	81.361	83.386	90.751
Cr	1	0.229	0.492	0.224	0.250	Zn	1	0.443	0.349	0.343	0.368
	2	0.387	0.296	0.267	0.362		2	1.184	1.567	0.786	0.722
	3	10.905	11.520	6.087	2.521		3	19.939	14.461	9.795	11.084
	4	7.465	4.861	4.523	1.498		4	8.327	7.321	6.313	3.368
	5	81.014	82.832	88.899	95.368		5	70.108	76.303	82.763	84.458
Cu	1	0.037	0.066	0.086	0.079	Ba	1	0.630	0.212	0.433	0.234
	2	3.211	1.136	2.120	2.102		2	0.952	0.248	0.627	0.844
	3	25.351	26.446	22.139	17.887		3	11.149	7.017	7.928	3.110
	4	10.071	7.835	13.944	1.439		4	3.639	3.979	2.130	1.392
	5	61.330	64.517	61.710	78.493		5	83.630	88.545	88.883	94.419
Ni	1	3.149	2.059	1.699	1.178	Co	1	0.633	1.141	0.424	0.226
	2	0.856	0.419	0.856	0.376		2	4.107	2.402	0.907	1.187
	3	9.682	5.483	4.594	4.216		3	10.576	11.896	8.073	7.943
	4	1.534	2.169	1.541	1.123		4	1.417	0.542	0.564	0.834
	5	84.779	89.870	91.311	93.106		5	83.268	84.019	90.031	89.810
Pb	1	0.009	0.026	0.008	0.018	Mn	1	0.089	0.089	0.085	0.091
	2	1.299	1.116	0.610	0.565		2	0.029	0.006	0.009	0.008
	3	16.862	10.516	12.170	8.030		3	13.406	8.728	5.760	5.406
	4	1.567	0.673	1.212	0.783		4	4.250	3.391	4.045	1.813
	5	80.263	87.669	86.000	90.604		5	82.226	87.786	90.101	92.682
Sr	1	0.689	0.231	0.287	0.537	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	0.428	0.573	0.464	0.412	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	9.321	6.879	5.480	4.351	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	0.515	0.452	0.524	0.101	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	89.048	91.866	93.245	94.598	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.

ตารางที่ ๑.3 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C20

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	0.566	0.682	0.161	1.214	V	1	4.099	3.756	1.212	1.418
	2	0.074	0.353	0.363	0.316		2	0.171	0.111	1.091	0.641
	3	10.292	15.759	14.050	6.470		3	9.197	9.503	6.178	6.500
	4	10.135	5.798	9.940	8.383		4	3.242	1.950	3.938	3.321
	5	78.932	77.408	75.486	83.616		5	83.291	84.680	87.580	88.120
Cr	1	0.190	0.401	0.397	0.147	Zn	1	0.276	0.328	0.127	0.146
	2	0.337	0.163	0.337	0.072		2	2.021	1.119	0.305	0.156
	3	10.585	10.654	8.958	2.727		3	12.529	9.304	13.626	7.331
	4	8.279	4.962	2.908	1.293		4	11.295	13.387	3.811	5.080
	5	80.609	83.821	87.400	95.761		5	73.879	75.862	82.131	87.288
Cu	1	0.043	0.121	0.102	0.074	Ba	1	0.284	1.081	0.076	0.205
	2	3.091	6.088	5.116	4.076		2	1.148	0.850	0.222	0.481
	3	26.250	20.653	20.887	18.383		3	12.354	9.553	5.930	5.266
	4	10.460	8.152	7.185	4.848		4	4.373	4.863	3.936	1.562
	5	60.156	64.986	66.710	72.619		5	81.841	83.652	89.836	92.487
Ni	1	4.540	2.830	3.280	1.101	Co	1	0.668	0.248	0.666	0.262
	2	1.206	1.283	0.891	0.445		2	2.137	0.520	0.922	1.687
	3	10.415	5.703	7.127	5.539		3	13.347	10.810	12.661	8.886
	4	2.225	1.538	1.137	0.587		4	1.282	0.882	0.823	0.666
	5	81.613	88.646	87.565	92.329		5	82.567	87.541	84.929	88.499
Pb	1	0.017	0.205	0.043	0.312	Mn	1	0.076	0.077	0.055	0.106
	2	1.325	0.883	0.962	0.910		2	0.003	0.032	0.010	0.042
	3	14.528	7.754	6.032	5.816		3	11.083	12.783	9.794	6.649
	4	1.766	1.098	1.288	0.742		4	4.989	3.481	2.026	1.347
	5	82.364	90.061	91.675	92.220		5	83.849	83.628	88.116	91.855
Sr	1	0.965	0.861	0.866	0.415	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	0.238	0.920	0.407	0.749	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	12.933	9.819	4.888	5.419	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	0.445	0.095	0.303	0.187	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	85.419	88.304	93.537	93.231	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.

ตารางที่ จ.4 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C22

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	0.664	0.688	0.495	0.214	V	1	4.242	3.950	1.938	0.932
	2	0.097	0.352	0.263	0.165		2	0.712	0.357	0.914	0.104
	3	13.292	11.759	9.050	6.470		3	12.197	9.503	9.178	7.500
	4	10.135	5.798	5.940	3.383		4	3.099	2.756	2.212	1.418
	5	75.812	81.403	84.251	89.768		5	79.751	83.435	85.758	90.046
Cr	1	0.293	0.501	0.420	0.213	Zn	1	0.860	0.126	0.160	0.107
	2	0.416	0.242	0.124	0.077		2	3.877	1.753	0.504	0.071
	3	11.516	9.370	9.828	3.882		3	15.201	16.252	12.458	10.760
	4	11.279	7.962	2.419	1.566		4	15.772	12.943	7.647	6.601
	5	76.497	81.926	87.209	94.263		5	64.291	68.926	79.231	82.462
Cu	1	0.158	0.090	0.184	0.208	Ba	1	0.080	0.081	0.024	0.204
	2	5.067	4.230	2.273	2.174		2	1.080	0.593	0.228	0.138
	3	26.031	23.640	24.583	21.067		3	11.944	7.846	5.972	5.314
	4	8.150	9.402	4.370	5.359		4	5.800	4.003	3.624	2.520
	5	60.594	62.638	68.589	71.192	5	81.096	87.476	90.151	91.824	
Ni	1	4.964	2.654	5.375	4.170	Co	1	0.706	1.501	0.455	0.140
	2	1.463	1.283	0.662	0.245		2	2.481	0.846	0.368	0.314
	3	6.445	5.959	4.954	5.753		3	13.766	11.574	15.885	11.151
	4	2.038	1.477	1.236	0.718		4	1.710	2.965	2.796	0.575
	5	85.089	88.627	87.773	89.114		5	81.336	83.114	80.497	87.819
Pb	1	0.099	0.211	0.044	0.122	Mn	1	0.073	0.087	0.059	0.060
	2	1.319	0.801	0.624	0.811		2	0.081	0.069	0.043	0.028
	3	14.540	7.106	7.054	5.385		3	14.083	10.783	11.794	9.649
	4	1.114	1.010	1.263	0.750		4	2.991	3.954	2.092	1.392
	5	82.927	90.873	91.015	92.932		5	82.772	85.107	86.012	88.870
Sr	1	0.079	0.163	0.603	0.192	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	0.279	0.870	0.337	0.180	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	10.173	10.077	7.734	5.669	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	1.522	1.840	1.784	1.745	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	87.947	87.050	89.542	92.214	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.

ตารางที่ ๑.5 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C24

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	0.169	0.298	0.929	0.396	V	1	4.912	3.183	3.869	2.757
	2	0.380	0.673	0.056	1.426		2	2.103	1.162	1.219	1.417
	3	14.759	14.500	10.801	5.626		3	10.196	8.577	7.475	6.720
	4	12.464	4.126	4.312	3.934		4	3.667	3.010	3.437	1.638
	5	72.228	80.403	83.902	88.618		5	79.122	84.068	84.000	87.469
Cr	1	0.446	0.255	0.140	0.177	Zn	1	0.235	0.193	0.181	0.199
	2	1.097	0.311	0.407	0.840		2	2.021	1.342	0.475	0.739
	3	13.707	9.853	9.302	4.907		3	15.542	14.091	17.110	11.196
	4	6.744	6.663	4.337	2.324		4	18.403	11.866	9.649	7.617
	5	78.006	82.917	85.814	91.752		5	63.800	72.508	72.585	80.248
Cu	1	0.036	0.122	0.084	0.034	Ba	1	0.189	0.540	0.478	0.482
	2	4.098	3.169	6.091	2.088		2	0.592	0.647	0.529	0.478
	3	27.770	24.117	20.157	18.681		3	14.289	11.035	8.600	9.053
	4	7.886	12.032	11.773	10.577		4	4.417	5.001	3.607	2.210
	5	60.210	60.560	61.895	68.620		5	80.513	82.778	86.787	87.777
Ni	1	4.079	4.163	3.603	1.192	Co	1	0.043	0.305	1.204	0.167
	2	0.279	0.870	0.337	0.180		2	1.055	1.036	2.035	2.601
	3	10.173	10.077	7.734	5.669		3	11.237	14.016	10.902	5.713
	4	1.522	1.840	1.784	1.745		4	4.025	2.644	7.012	3.125
	5	83.947	83.050	86.542	91.214		5	83.641	81.998	78.847	88.394
Pb	1	0.111	0.016	0.183	0.109	Mn	1	0.084	0.082	0.078	0.087
	2	0.901	0.464	1.886	0.635		2	0.001	0.010	0.003	0.015
	3	19.192	20.481	13.777	10.213		3	17.861	10.234	7.163	6.648
	4	1.508	1.445	1.221	2.301		4	7.670	5.418	4.500	2.468
	5	78.289	77.594	82.934	86.743		5	74.383	84.255	88.255	90.782
Sr	1	4.852	3.524	4.066	1.754	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	2.598	0.692	1.541	0.518	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	8.073	5.098	5.535	4.508	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	2.820	1.753	2.643	1.419	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	81.657	88.933	86.214	91.801	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.

ตารางที่ จ.6 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C26

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	0.510	0.205	0.060	0.658	V	1	4.683	3.950	3.521	1.253
	2	0.969	0.899	1.783	0.081		2	2.722	2.004	1.046	0.141
	3	13.851	15.943	6.197	8.926		3	8.853	8.545	6.970	5.809
	4	6.062	1.304	2.561	1.794		4	2.266	3.641	2.858	2.875
	5	78.608	81.650	89.398	88.542		5	81.476	81.859	85.606	89.922
Cr	1	0.349	0.470	0.301	0.311	Zn	1	0.001	0.255	0.216	0.248
	2	0.471	0.985	0.448	0.087		2	1.042	2.688	0.907	0.419
	3	6.327	7.485	3.399	2.078		3	20.257	17.335	17.796	12.613
	4	4.689	2.549	2.108	1.922		4	15.837	16.302	15.899	7.661
	5	88.164	88.511	93.744	95.602		5	62.864	63.420	65.181	79.058
Cu	1	0.054	0.048	0.047	0.066	Ba	1	0.211	0.463	0.241	0.272
	2	3.043	2.039	3.027	1.043		2	0.254	0.579	0.156	0.206
	3	30.532	25.775	20.228	25.543		3	15.599	11.503	9.883	5.988
	4	5.878	9.292	16.652	6.482		4	5.832	6.687	4.685	3.954
	5	60.493	62.845	60.046	66.867		5	78.104	80.768	85.035	89.581
Ni	1	4.057	4.050	3.508	2.341	Co	1	0.178	1.512	0.657	0.932
	2	1.582	0.693	0.527	0.276		2	5.478	0.860	2.994	1.623
	3	10.952	11.554	5.389	4.548		3	12.521	7.346	9.806	9.487
	4	2.054	1.749	1.722	1.710		4	0.466	1.260	1.179	0.986
	5	81.355	81.955	88.853	91.126		5	81.357	89.022	85.364	86.973
Pb	1	0.229	0.551	0.366	0.542	Mn	1	0.087	0.099	0.086	0.089
	2	1.654	1.307	0.732	0.461		2	0.009	0.017	0.012	0.007
	3	16.521	10.780	14.576	8.729		3	12.025	14.637	7.425	6.967
	4	1.885	1.512	1.889	1.126		4	3.356	2.016	4.557	4.645
	5	79.711	85.850	82.417	89.142		5	84.523	83.231	87.920	88.292
Cd	1	0.040	0.530	0.552	0.226	Sr	1	0.131	0.123	0.104	0.307
	2	0.982	0.756	0.526	0.175		2	0.961	0.126	0.146	0.053
	3	1.211	1.410	0.938	0.770		3	8.732	7.354	6.918	7.562
	4	1.051	0.567	0.576	0.509		4	2.742	2.822	1.195	1.025
	5	96.016	95.975	96.408	97.720		5	87.434	89.576	91.638	91.053

หมายเหตุ: Hg Tl Ag Ga และ Se ไม่สามารถตรวจวัดได้ เนื่องจากความเข้มข้นมีค่าต่ำกว่า detection limit

ตารางที่ จ.7 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C28

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	0.511	0.065	0.334	0.026	V	1	4.730	4.401	3.719	2.289
	2	0.390	0.437	0.326	0.040		2	1.712	1.061	1.831	0.125
	3	24.137	19.743	23.273	16.554		3	10.337	11.090	11.899	9.009
	4	10.743	7.622	4.901	3.426		4	2.254	3.764	1.763	1.468
	5	64.221	72.131	71.167	79.955		5	80.967	79.684	80.788	87.110
Cr	1	0.466	0.517	0.046	0.046	Zn	1	0.575	0.517	0.340	0.229
	2	1.680	1.325	0.733	0.245		2	3.002	1.772	0.640	0.555
	3	12.134	13.730	15.190	8.204		3	20.436	22.803	21.232	13.063
	4	6.158	6.337	4.164	2.893		4	14.879	13.030	14.959	10.373
	5	79.562	78.092	79.866	88.611		5	61.107	61.878	62.829	75.780
Cu	1	0.023	0.054	0.032	0.027	Ba	1	0.084	0.016	0.018	0.095
	2	3.089	4.075	3.049	0.064		2	0.110	0.104	0.079	0.143
	3	27.014	25.128	20.557	21.781		3	16.041	10.372	13.021	9.485
	4	9.021	7.969	14.452	8.681		4	4.960	4.961	3.965	1.928
	5	60.854	62.775	61.910	69.448		5	78.804	84.547	82.916	88.348
Ni	1	4.953	3.024	4.334	3.003	Co	1	0.108	0.670	0.579	0.729
	2	1.596	2.496	1.675	1.199		2	3.287	3.770	2.820	1.354
	3	10.874	9.580	7.400	5.083		3	24.666	18.152	15.297	9.341
	4	4.344	3.228	4.825	2.768		4	6.672	2.887	1.072	6.522
	5	78.233	81.672	81.765	87.947		5	65.267	74.521	80.233	82.053
Pb	1	0.248	0.185	0.180	0.095	Mn	1	0.081	0.063	0.067	0.083
	2	1.029	0.639	0.384	0.391		2	0.011	0.010	0.000	0.004
	3	24.512	19.991	15.602	13.906		3	19.461	17.645	14.001	9.115
	4	1.695	2.516	1.598	1.966		4	8.952	11.922	7.476	6.692
	5	72.516	76.669	82.236	83.642		5	71.495	70.361	78.456	84.106
Sr	1	0.131	0.123	0.104	0.307	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	1.270	0.126	0.146	0.053	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	11.732	9.354	7.918	5.962	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	2.742	2.822	3.195	1.025	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	84.126	87.576	88.638	92.653	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.

ตารางที่ ๑.8 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C30


ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	1.759	1.192	0.192	0.139	V	1	4.674	3.181	3.212	2.440
	2	1.520	0.198	0.082	0.363		2	0.851	0.427	0.769	0.145
	3	12.124	4.488	11.575	6.254		3	12.549	9.194	11.470	7.352
	4	6.079	6.933	5.058	4.070		4	2.505	3.010	2.410	0.608
	5	78.518	87.189	83.093	89.174		5	79.421	84.187	82.139	89.455
Cr	1	0.143	0.331	0.297	0.222	Zn	1	0.337	0.344	0.228	0.300
	2	0.233	0.167	0.393	0.223		2	4.145	3.202	5.265	2.257
	3	10.962	5.737	4.948	3.358		3	24.327	20.355	17.340	14.951
	4	8.458	5.796	2.860	1.321		4	10.442	11.033	5.649	8.802
	5	80.205	87.969	91.502	94.876		5	60.749	65.067	71.519	73.690
Cu	1	0.009	0.084	0.091	0.094	Ba	1	0.517	0.336	0.305	0.257
	2	2.105	1.084	0.108	0.079		2	0.710	0.744	0.031	0.505
	3	26.788	31.636	28.781	23.640		3	13.215	9.920	11.681	9.230
	4	9.371	6.187	7.320	9.729		4	5.837	5.693	4.154	2.505
	5	61.727	61.009	63.701	66.458		5	79.721	83.307	83.830	87.503
Ni	1	4.750	3.504	3.678	2.732	Co	1	0.151	0.043	0.360	0.901
	2	1.622	1.144	0.655	0.155		2	1.759	1.080	0.901	2.075
	3	8.941	5.728	7.111	3.543		3	13.476	10.532	11.345	8.468
	4	1.472	1.458	1.239	0.629		4	0.969	0.489	0.530	0.879
	5	83.215	88.166	87.318	92.941		5	83.645	87.856	86.864	87.678
Pb	1	0.016	0.029	0.293	0.163	Mn	1	0.080	0.072	0.077	0.076
	2	2.238	0.582	0.450	0.485		2	0.003	0.011	0.008	0.012
	3	15.113	18.006	12.795	7.373		3	8.201	8.722	6.179	7.149
	4	2.811	0.707	1.014	1.556		4	3.422	4.305	2.012	1.265
	5	79.822	80.677	85.448	90.422		5	88.293	86.891	91.724	91.498
Sr	1	0.240	0.316	0.496	0.224	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	0.964	0.347	0.147	0.126	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	11.922	7.188	9.448	6.617	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	0.986	0.368	0.178	0.745	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	85.888	91.781	89.731	92.289	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.

ตารางที่ ๑.9 ร้อยละของความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะหนักจากวิธีสกัดแยกสารประกอบของตัวอย่าง C32

ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)				ชนิดโลหะ	ชั้นที่	อายุบ่ม (วัน)			
		3	7	14	28			3	7	14	28
As	1	1.399	0.209	0.275	0.201	V	1	4.261	3.147	2.362	1.380
	2	0.457	0.578	1.668	0.438		2	0.971	0.343	0.971	0.478
	3	14.864	19.090	11.331	10.672		3	13.290	12.048	11.770	9.520
	4	8.053	6.295	7.422	6.499		4	3.416	1.079	2.957	0.174
	5	75.226	73.829	79.304	82.190		5	78.063	83.384	81.940	88.448
Cr	1	0.737	0.079	0.253	0.984	Zn	1	0.457	0.121	0.200	0.178
	2	1.360	1.226	0.501	0.225		2	5.133	7.038	5.643	3.555
	3	12.091	11.435	7.218	4.227		3	21.623	21.734	20.899	15.341
	4	7.030	4.217	3.502	2.380		4	12.581	10.517	10.384	9.678
	5	78.782	83.043	88.526	92.184		5	60.206	60.591	62.873	71.248
Cu	1	0.007	0.058	0.022	0.068	Ba	1	0.862	0.432	0.426	0.247
	2	3.107	5.039	2.045	2.046		2	0.459	0.253	0.308	0.131
	3	31.126	26.646	31.172	28.800		3	11.845	12.071	9.434	8.103
	4	5.330	6.466	6.568	4.564		4	7.412	5.878	4.823	4.880
	5	60.429	61.791	60.192	64.522		5	79.421	81.366	85.010	86.639
Ni	1	4.353	3.130	3.052	1.426	Co	1	0.988	1.004	0.676	0.098
	2	1.566	0.405	1.451	0.123		2	0.889	2.198	3.239	3.369
	3	12.786	9.153	9.286	7.530		3	18.701	16.140	12.646	9.626
	4	2.336	0.612	3.220	0.180		4	7.214	7.746	1.336	2.151
	5	78.960	86.700	82.991	90.742		5	72.209	72.912	82.103	84.756
Pb	1	0.100	0.256	0.609	0.728	Mn	1	0.092	0.088	0.091	0.083
	2	1.308	0.629	0.761	0.347		2	0.002	0.004	0.007	0.002
	3	21.788	14.163	15.556	11.947		3	16.206	10.851	11.312	8.299
	4	2.369	1.807	1.425	0.942		4	9.905	9.075	5.229	7.329
	5	74.434	83.145	81.648	86.035		5	73.794	79.982	83.361	84.287
Sr	1	0.468	0.799	0.785	0.889	Cd	1-5	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	2	0.399	0.329	0.074	0.210	Hg		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	3	12.772	11.054	8.745	6.940	Tl		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	4	0.776	1.793	0.705	0.465	Ag		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
	5	85.585	86.025	89.691	91.495	Ga		Nd.	Nd.	Nd.	Nd.
					Se	Nd.	Nd.	Nd.	Nd.		

หมายเหตุ: Nd. = Not detected.



ภาคผนวก ซ.

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด
ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M-05

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ซ.1 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ 3 และ 7 วัน

ชื่อ ตัวอย่าง	CM 3 Days วันที่หล่อแบบ: ...25/11/48... วันที่ทดสอบ: ...28/11/48..							ชื่อ ตัวอย่าง	CM 7 Days วันที่หล่อแบบ: ...29/11/48... วันที่ทดสอบ: ...6/12/48..						
	แรง (kN)			เฉลี่ย	SD.	ปรับ แก้	Kg/cm ²		แรง (kN)			เฉลี่ย	SD.	ปรับ แก้	Kg/cm ²
	1	2	3						1	2	3				
C0	55.43	58.91	58.43	57.59	1.54	57.98	236.41	C0	79.63	82.12	81.33	81.03	1.04	81.71	333.18
C18	55.00	55.38	53.65	54.68	0.74	55.03	224.38	C18	65.23	61.20	61.52	62.65	1.83	63.10	257.30
C20	46.82	45.28	48.65	46.92	1.38	47.17	192.33	C20	65.12	59.35	61.74	62.07	2.37	62.52	254.91
C22	46.45	47.71	45.14	46.43	1.05	46.68	190.34	C22	61.31	59.51	63.10	61.31	1.47	61.74	251.75
C24	52.97	54.22	54.62	53.94	0.70	54.28	221.32	C24	75.12	74.83	76.23	75.39	0.60	76.01	309.92
C26	47.42	46.93	47.62	47.32	0.29	47.58	194.01	C26	59.73	57.87	63.82	60.47	2.49	60.90	248.31
C28	52.55	50.77	51.27	51.53	0.75	51.84	211.38	C28	54.97	55.84	60.15	56.99	2.26	57.37	233.92
C30	46.07	48.12	47.54	47.24	0.86	47.50	193.68	C30	56.84	54.12	59.34	56.77	2.13	57.15	233.01
C32	42.24	45.74	44.24	44.07	1.43	44.29	180.59	C32	57.42	57.83	55.71	56.99	0.92	57.37	233.92

หมายเหตุ: สูตรในการปรับแก้ค่าได้จากการสอบเทียบเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด = ((ค่าเฉลี่ย, kN) X 1.0127)-0.3424

สูตรในการคำนวณกำลังรับแรงอัด = (ค่าปรับแก้, kN) X 1.000

25 X 9.81

ตารางที่ ข.2 ผลของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ที่ 14 และ 28 วัน

ชื่อ ตัวอย่าง	CM 14 Days วันที่หล่อแบบ:2/12/48...วันที่ทดสอบ: ..16/12/48..							ชื่อ ตัวอย่าง	CM 28 Days วันที่หล่อแบบ:24/11/48...วันที่ทดสอบ: ..22/12/48..						
	แรง (kN)			เฉลี่ย	SD.	ปรับ แก้	Kg/cm ²		แรง (kN)			เฉลี่ย	SD.	ปรับ แก้	Kg/cm ²
	1	2	3						1	2	3				
C0	81.69	87.32	85.31	84.77	2.33	85.51	348.65	C0	92.35	92.60	94.24	93.06	0.84	93.90	382.89
C18	70.81	63.82	62.62	65.75	3.61	66.24	270.10	C18	92.96	85.20	81.00	86.39	4.95	87.14	355.32
C20	69.64	77.57	72.28	73.16	3.30	73.75	300.71	C20	76.42	84.66	79.14	80.07	3.43	80.75	329.25
C22	75.62	78.83	79.64	78.03	1.74	78.68	320.81	C22	83.50	80.53	82.84	82.29	1.27	82.99	338.40
C24	85.55	89.90	86.26	87.24	1.91	88.00	358.83	C24	92.11	92.40	93.30	92.60	0.51	93.44	380.99
C26	66.51	63.22	65.30	65.01	1.36	65.49	267.05	C26	68.42	73.72	67.73	69.96	2.68	70.50	287.47
C28	65.28	64.34	63.27	64.30	0.82	64.77	264.10	C28	67.70	68.40	65.80	67.30	1.10	67.81	276.50
C30	70.73	72.65	69.94	71.11	1.14	71.67	292.22	C30	71.55	69.41	67.82	69.59	1.53	70.13	285.97
C32	71.53	62.72	60.80	65.02	4.67	65.50	267.07	C32	76.21	70.24	76.95	74.47	3.00	75.07	306.10

หมายเหตุ: สูตรในการปรับแก้ค่าได้จากการสอบเทียบเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด = ((ค่าเฉลี่ย, kN) X 1.0127)-0.3424

สูตรในการคำนวณกำลังรับแรงอัด = (ค่าปรับแก้, kN) X 1.000

25 X 9.81



ภาคผนวก ซ.

ผลการทดสอบการชะละลาย
ของโลหะหนักในก้อนมอร์ต้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ ในก้อนมอร์ตตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

อัตราส่วน	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ ในก้อนมอร์ต (มก. / ล.)																
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	V	Zn	Ag	Ba	Co	Ga	Mn	Se	Sr
C0	0.041	< 0.009	0.007	0.010	< 0.004	0.012	0.012	< 0.247	0.008	0.079	< 0.003	0.013	0.021	< 0.040	0.001	< 0.102	0.072
C18	0.056	< 0.009	0.018	0.025	< 0.004	0.021	0.081	< 0.247	0.013	0.121	< 0.003	0.024	0.007	< 0.040	0.005	< 0.102	0.051
C20	0.131	< 0.009	0.013	0.026	< 0.004	0.014	0.032	< 0.247	0.015	0.463	< 0.003	0.054	0.013	< 0.040	0.003	< 0.102	0.045
C22	0.012	< 0.009	0.007	0.031	< 0.004	0.034	0.059	< 0.247	0.013	0.180	< 0.003	0.099	0.016	< 0.040	0.007	< 0.102	0.261
C24	0.070	< 0.009	0.006	0.125	< 0.004	0.068	0.115	< 0.247	0.028	0.048	< 0.003	0.079	0.031	< 0.040	0.008	< 0.102	0.080
C26	0.032	< 0.009	0.014	0.134	< 0.004	0.095	0.105	< 0.247	0.022	0.131	< 0.003	0.047	0.015	< 0.040	0.005	< 0.102	0.131
C28	0.137	< 0.009	0.012	0.245	< 0.004	0.048	0.051	< 0.247	0.010	0.230	< 0.003	0.101	0.029	< 0.040	0.006	< 0.102	0.632
C30	0.148	< 0.009	0.022	0.129	< 0.004	0.062	0.128	< 0.247	0.016	0.260	< 0.003	0.069	0.036	< 0.040	0.009	< 0.102	0.326
C32	0.254	< 0.009	0.024	0.237	< 0.004	0.079	0.136	< 0.247	0.019	0.617	< 0.003	0.109	0.031	< 0.040	0.008	< 0.102	0.767

ตารางที่ ๒.2 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ ในก้อนมอร์ต้าตามมาตรฐานของ US EPA SW-846 Method 1311

อัตราส่วน	ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นการชะละลายของโลหะชนิดต่างๆ ในก้อนมอร์ต้า (มก. / ล.)																
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Tl	V	Zn	Ag	Ba	Co	Ga	Mn	Se	Sr
C0	0.056	< 0.009	0.020	0.125	< 0.004	0.015	0.040	< 0.247	0.011	0.223	< 0.003	0.109	0.013	< 0.040	0.003	< 0.102	0.177
C18	0.147	< 0.009	0.045	0.296	< 0.004	0.026	0.078	< 0.247	0.010	0.561	< 0.003	0.314	0.017	< 0.040	0.004	< 0.102	0.225
C20	0.097	< 0.009	0.056	0.119	< 0.004	0.038	0.013	< 0.247	0.012	1.105	< 0.003	0.137	0.021	< 0.040	0.011	< 0.102	0.831
C22	0.092	< 0.009	0.053	0.254	< 0.004	0.051	0.219	< 0.247	0.019	0.221	< 0.003	0.309	0.018	< 0.040	0.009	< 0.102	0.703
C24	0.071	< 0.009	0.042	0.105	< 0.004	0.028	0.105	< 0.247	0.021	0.085	< 0.003	0.239	0.014	< 0.040	0.012	< 0.102	0.177
C26	0.063	< 0.009	0.062	0.207	< 0.004	0.076	0.127	< 0.247	0.019	1.338	< 0.003	0.367	0.020	< 0.040	0.017	< 0.102	0.225
C28	0.274	< 0.009	0.035	0.286	< 0.004	0.101	0.295	< 0.247	0.021	0.923	< 0.003	0.309	0.024	< 0.040	0.013	< 0.102	0.324
C30	0.154	< 0.009	0.057	0.440	< 0.004	0.119	0.140	< 0.247	0.029	1.061	< 0.003	0.209	0.059	< 0.040	0.021	< 0.102	0.467
C32	0.462	< 0.009	0.043	0.541	< 0.004	0.108	0.331	< 0.247	0.031	1.745	< 0.003	0.374	0.032	< 0.040	0.019	< 0.102	0.926

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศศิธร แก้วกันยา เกิดเมื่อวันที่ 13 เดือนกันยายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) จากภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย