

ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้
กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต



นางสาวฤทัยรัตน์ แพรอด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2699-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**PHYSICAL PROPERTIES AND SOME HEAVY METALS IN MORTARS
INCORPORATING CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING
INDUSTRIAL WASTES AS ALTERNATIVE FUELS AND RAW MATERIALS**



Miss Ruethairat Paerod

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2005

ISBN 974-53-2699-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้จากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต
โดย	นางสาวฤทัยรัตน์ แพรอด
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชอาณาจักร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ศิเรก ลาวัญย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชเรศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชอาณาจักร)

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

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์)

ฤทธิ์รัดน้ำ แพรอด : ลักษณะทางกายภาพและชนิดของโลหะหนักในมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิต. (PHYSICAL PROPERTIES AND SOME HEAVY METALS IN MORTARS INCORPORATING CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS USING INDUSTRIAL WASTES AS ALTERNATIVE FUELS AND RAW MATERIALS) อ.ที่ปรึกษา : อ. ดร.มนัสกร ราชากรกิจ, 172 หน้า. ISBN 974-53-2699-2

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโลหะหนักในซีเมนต์พิเศษที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากการใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากการใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน และศึกษาผลการชะละลายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อมหลังสิ้นอายุการใช้งาน

ผลการทดลองพบโลหะหนัก 11 ชนิดในปูนซีเมนต์ ได้แก่ แบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) ซีลีเนียม (Se) สตรอนเชียม (Sr) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) โดยมีปริมาณของแมงกานีสสูงที่สุดคือ 315 ถึง 501 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาคือ สตรอนเชียมมีปริมาณ 148 ถึง 303 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปริมาณโลหะหนักที่พบจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบหลักเป็นส่วนใหญ่ รองลงมาเป็นวัตถุดิบทดแทนที่เติมเข้าไปในกระบวนการผลิต

ผลการศึกษาสถานะภาพของโลหะหนักในซีเมนต์พิเศษพบว่า โลหะหนักจะมีการสร้างพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ และเมื่ออายุขุมเพิ่มขึ้นจะพบว่าการสร้างพันธะจะเปลี่ยนแปลงเป็นพันธะใหม่ที่มีความแข็งแรงมากขึ้น

ผลการศึกษากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์พบว่า ส่วนใหญ่จะมีกำลังรับแรงอัดน้อยกว่ามาตรฐานคือ 285.51 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (28 เมกะพาสคัล) ที่อายุขุม 28 วัน เนื่องจากบดตัวอย่างปูนซีเมนต์เอง แต่พบว่าทองแดงน่าจะมีผลในการลดความแข็งแรงของก้อนมอร์ตาร์ เนื่องจากทองแดงมีผลในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดการก่อตัวช้าลง และยังคงลดความแข็งแรงของก้อนมอร์ตาร์ในช่วงแรก นอกจากนี้ยังส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่ามาตรฐาน น่าจะมีผลมาจากแบเรียมและวาเนเดียม ซึ่งแบเรียมและวาเนเดียมมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงในระยะแรก

ผลการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ไม่พบโลหะหนักที่มีค่าเกินมาตรฐาน ส่วนการทดสอบการชะละลายตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA พบเพียงซีลีเนียมเท่านั้นที่มีค่าเกินมาตรฐาน คือมีค่าตั้งแต่ 1.5 ถึง 4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ปีการศึกษา.....2548.....

ลายมือชื่อนิสิต.....กฤษณ์ ทรัพย์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ดร......

4670461821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : HEAVY METALS / CEMENT MORTARS / ALTERNATIVE FUELS /

ALTERNATIVE RAW MATERIALS

RUETHAIRAT PAEROD : PHYSICAL PROPERTIES AND SOME HEAVY METALS
IN MORTARS INCORPORATING CEMENT FROM CO-INCINERATION PROCESS
USING INDUSTRIAL WASTES AS ALTERNATIVE FUELS AND RAW
MATERIALS. THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIT, Ph.D.,
172 pp. ISBN 974-53-2699-2

This research investigated selected heavy metals in cement paste and compressive strength in mortars incorporating cement from co-incineration process using industrial wastes as alternative fuels and raw materials. Additionally leachate study of heavy metals to environmental at the end of life of concrete was conducted.

The heavy metals such as Barium, Cobalt, Chromium, Copper, Manganese, Nickel, Lead, Selenium, Strontium, Vanadium, and Zinc were found in cement with Manganese and Strontium having the highest concentrations. Amount of Manganese was found at 315 to 501 mg/kg and Strontium 148 to 303 mg/kg. It was also found that the amounts of heavy metals depended on primary raw materials and alternative raw materials used in the process.

The results on fates of heavy metals showed that the heavy metals tended to incorporate with iron and manganese oxide. As curing progressed, the bond of the heavy metals became stronger.


Most of the mortar specimens did not perform well on the compressive strength tests since their compressive strengths were lower than the 28-day standard of 285.51 kilograms per square centimeter (28 MPa). This may be due to the presence of high concentrations of Copper that retarded hydration, thus delaying setting time and decreasing early strength. In contrast, high concentrations of Barium and Vanadium were found to improve early strength, resulting in higher compressive strengths.

The result of leaching test following the Notification No.6 of the Ministry of Industry (1997) showed that no heavy metal concentrations in the leachates exceeded the standards. However, selenium was found at 1.5 to 4.0 mg/L which exceeded the standard of 1 mg/L when TCLP was performed.

Department.....Environmental Engineering.....

Student's signature...Ruethairat Paerod...

Field of study.....Environmental Engineering.....

Advisor's signature.....

Academic Year.....2005.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.มนัสกร ราชกรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ตลอดเวลาอันมีค่ายิ่งในการให้คำปรึกษา ข้อคิดเห็น และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งการช่วยตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดในการทำวิจัย จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน สำหรับข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้ถูกต้องสมบูรณ์

ขอขอบคุณโรงงานปูนซีเมนต์นครหลวง จ.สระบุรี ที่อนุเคราะห์ตัวอย่าง สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัย รวมทั้งพี่ ๆ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีต และห้องปฏิบัติการ Inductively Coupled Plasma Spectroscopy ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการของเสียดันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ โครงการศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียดันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการ X-Ray Diffraction Spectrometer ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ รวมทั้งคุณจิระประภา เนียมปาน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการที่คอยให้คำปรึกษาและดูแลอย่างดี

ขอขอบคุณคุณธนพล เพ็ญรัตน์ และคุณชาริพย์ พันธุ์เมธาฤทธิ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในการทำวิจัย รวมทั้งเพื่อน ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการของเสียดันตรายที่คอยให้คำปรึกษาและกำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้

ทุนในการทำวิจัยบางส่วน ได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ครู อาจารย์ ญาติพี่น้อง ทุก ๆ ท่าน และเพื่อน ๆ ทุกคน ที่ได้ให้การสนับสนุนและคอยช่วยเหลือรวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิจัยครั้งนี้มาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปูนซีเมนต์.....	5
2.1.1 วัตถุดิบ.....	5
2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	6
2.1.3 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.1.4 สารประกอบหลัก.....	7
2.1.5 สารประกอบรอง.....	8
2.1.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	10
2.1.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต.....	10
2.1.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต.....	11
2.1.9 ปฏิกิริยาของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์.....	12
2.1.10 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์.....	12
2.1.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	13
2.2 มวลรวม.....	13
2.2.1 ประเภทมวลรวม.....	14
2.2.2 คุณสมบัติทั่วไป.....	14
2.3 น้ำ.....	16
2.3.1 ความสำคัญของน้ำ.....	16
2.3.2 สิ่งเจือปน.....	16

	หน้า
2.3.3 ตะกอน.....	16
2.3.4 สารอนินทรีย์.....	17
2.3.5 สารละลายอินทรีย์.....	17
2.3.6 ข้อจำกัดทั่วไปเกี่ยวกับน้ำผสมคอนกรีต.....	18
2.4 ความหมายของวัสดุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน.....	18
2.5 การใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมเป็นวัสดุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	20
2.6 แหล่งที่มาของโลหะหนักในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	24
2.7 สถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	26
2.7.1 สารหนู.....	26
2.7.2 พลวง.....	27
2.7.3 แบเรียม.....	28
2.7.4 พรอท.....	28
2.7.5 ซีลีเนียม.....	28
2.7.6 แทลเลียม.....	29
2.7.7 โคบอลต์.....	29
2.7.8 ตะกั่ว.....	30
2.7.9 แคดเมียม.....	31
2.7.10 โครเมียม.....	31
2.7.11 ทองแดง.....	32
2.7.12 โมลิบดีนัม.....	33
2.7.13 นิกเกิล.....	34
2.7.14 วานาเดียม.....	35
2.7.15 สังกะสี.....	35
2.7.16 ดีบุก.....	36
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 แผนการวิจัย.....	38
3.1.1 การวางแผนการทดลอง.....	38
3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง.....	38
3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	38
3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	38

	หน้า
3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.3 การเตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์.....	39
3.4 การดำเนินการทดลอง.....	40
3.5 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	49
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	50
4.1 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์.....	50
4.2 ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์.....	52
4.2.1 ผลการศึกษาสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึกโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD).....	52
4.2.2 ผลการศึกษาสารประกอบโลหะหนักที่ถูกชะละลายโดยวิธี การสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction).....	55
- แบริยม.....	55
- โคบอลต์.....	55
- โครเมียม.....	58
- ทองแดง.....	59
- แมงกานีส.....	61
- นิกเกิล.....	62
- ตะกั่ว.....	64
- ซีลีเนียม.....	65
- สตรอนเชียม.....	66
- วานเดียม.....	67
- สังกะสี.....	69
4.2.4 ผลการศึกษาลักษณะการจับตัวของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	71
4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์.....	74
4.4 ผลการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์.....	77
4.5 เปรียบเทียบสถานภาพของโลหะหนักก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา ไฮเดรชัน.....	82
4.5.1 ผลการเปรียบเทียบสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึกโดยใช้ เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD).....	82

4.5.2	ผลการเปรียบเทียบสารประกอบของโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction).....	86
4.5.3	ผลการเปรียบเทียบสถานภาพของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ.....		94
5.1	สรุปผลวิจัย.....	94
5.2	ปัญหาและอุปสรรค.....	95
5.3	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	95
รายการอ้างอิง.....		96
ภาคผนวก.....		101
ภาคผนวก ก	ข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์.....	102
ภาคผนวก ข	ข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในวัตถุดิบและเชื้อเพลิง.....	105
ภาคผนวก ค	ข้อมูลการวิเคราะห์ซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD).....	116
ภาคผนวก ง	ข้อมูลสารประกอบโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD).....	144
ภาคผนวก จ	ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์โดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction).....	127
ภาคผนวก ฉ	ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์.....	149
ภาคผนวก ช	ผลการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์.....	165
ภาคผนวก ซ	วิธีการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์.....	168
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		172

สารบัญญัตินำ

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
ตารางที่ 2.2	สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
ตารางที่ 2.3	สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์.....	9
ตารางที่ 2.4	ขอบเขตและผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำ.....	19
ตารางที่ 2.5	ตัวอย่างการก่อกองอุตสาหกรรมโดยทั่ว ๆ ไป ที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิง ในกระบวนการผลิตซีเมนต์.....	22
ตารางที่ 2.6	ตัวอย่างองค์ประกอบของของเสียอันตรายที่ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน.....	22
ตารางที่ 2.7	ตัวอย่างการแสดงสัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์ ในประเทศเยอรมัน ปี ค.ศ. 1999.....	23
ตารางที่ 2.8	ตัวอย่างการแสดงสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์ ในประเทศเยอรมัน ปี ค.ศ. 1999.....	23
ตารางที่ 2.9	ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์.....	24
ตารางที่ 2.10	การรวมตัวเป็นร้อยละของโลหะหนักบางชนิดในซีเมนต์ซึ่งได้มาจาก การทดลองแบบควบคุมในห้องปฏิบัติการ.....	25
ตารางที่ 2.11	การจัดรูปของ As^{+5} ในซีเมนต์.....	27
ตารางที่ 2.12	การจัดรูปของ Ba^{+2} ในซีเมนต์.....	28
ตารางที่ 2.13	การจัดรูปของ Co^{+2} , Co^{+3} ในซีเมนต์.....	29
ตารางที่ 2.14	การจัดรูปของ Pb^{+2} ในซีเมนต์.....	30
ตารางที่ 2.15	การจัดรูปของ Cd^{+2} ในซีเมนต์.....	31
ตารางที่ 2.16	การจัดรูปของ Cr^{+6} , Cr^{+3} ในซีเมนต์.....	32
ตารางที่ 2.17	การจัดรูปของ Cu^{+2} ในซีเมนต์.....	33
ตารางที่ 2.18	การจัดรูปของ Ni^{+2} ในซีเมนต์.....	34
ตารางที่ 2.19	การจัดรูปของ V^{+5} ในซีเมนต์.....	35
ตารางที่ 2.20	การจัดรูปของ Zn^{+2} ในซีเมนต์.....	36
ตารางที่ 4.1	เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในปูนซีเมนต์กับค่ามาตรฐานของ ปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่โรงงานยอมรับได้.....	51

ตารางที่ 4.2	สารประกอบโลหะหนักที่พบในซีเมนต์เพสต์ จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD).....	54
--------------	--	----



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 รูปร่างลักษณะของ C_3S (ผลึกรูป 6 เหลี่ยม) และ C_2S (เม็ดกลมสีดำ).....	8
รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก.....	9
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต.....	11
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์.....	41
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์.....	45
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหล่อก้อนมอร์ตาร์และการทดสอบกำลังรับแรงอัด.....	47
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของก้อนซีเมนต์ตัวอย่าง ตามประกาศกระทรวง อุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540).....	48
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของก้อนซีเมนต์ตัวอย่าง ตามวิธี SW-486 Method 1311 ของ U.S. EPA	49
รูปที่ 4.1 ชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันในช่วง ระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง.....	52
รูปที่ 4.2 ร้อยละของการชะละลายของแบเรียม (Ba) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	55
รูปที่ 4.3 ร้อยละของการชะละลายของโคบอลต์ (Co) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	57
รูปที่ 4.4 ร้อยละของการชะละลายของโครเมียม (Cr) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	58
รูปที่ 4.5 ร้อยละของการชะละลายของทองแดง (Cu) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	60
รูปที่ 4.6 ร้อยละของการชะละลายของแมงกานีส (Mn) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	61
รูปที่ 4.7 ร้อยละของการชะละลายของนิกเกิล (Ni) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	63
รูปที่ 4.8 ร้อยละของการชะละลายของตะกั่ว (Pb) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	64
รูปที่ 4.9 ร้อยละของการชะละลายของซีลีเนียม (Se) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	65
รูปที่ 4.10 ร้อยละของการชะละลายของสตรอนเชียม (Sr) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	66
รูปที่ 4.11 ร้อยละของการชะละลายของวานาเดียม (V) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	68
รูปที่ 4.12 ร้อยละของการชะละลายของสังกะสี (Zn) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง.....	69
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน จากการวิเคราะห์ โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	71
รูปที่ 4.14 โครงสร้างของเหล็กในซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน จากการ วิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	72

รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope และ EDS ของตัวอย่างวันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60.....	72
รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope และ EDS ของตัวอย่างวันที่ 07/02/48 ที่อายุบ่ม 7 วัน.....	73
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope และ EDS ของตัวอย่างวันที่ 07/02/48 ที่อายุบ่ม 28 วัน.....	73
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุบ่ม.....	75
รูปที่ 4.19 ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540).....	78
รูปที่ 4.20 ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยการทดสอบตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S.EPA.....	80
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างปูนเม็ด วันที่ 26/10/47 ก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	82
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/47 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	83
รูปที่ 4.23 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างวันที่ 26/10/47 ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	86
รูปที่ 4.24 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างวันที่ 26/10/47 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	86
รูปที่ 4.25 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างวันที่ 22/01/48 ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	87
รูปที่ 4.26 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างวันที่ 22/01/48 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	88
รูปที่ 4.27 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างวันที่ 03/02/48 ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	89
รูปที่ 4.28 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง ตัวอย่างวันที่ 03/02/48 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน.....	89
รูปที่ 4.29 โครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ดที่กำลังขยาย 500 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	91
รูปที่ 4.30 ลักษณะผลึกซึ่งอาจเป็นแคลเซียมออกไซด์ที่กำลังขยาย 2500 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	91

หน้า

รูปที่ 4.31 โครงสร้างของซีเมนต์เพชรวันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังขยาย 3000 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)...	92
รูปที่ 4.32 โครงสร้างของเหล็กในซีเมนต์เพชรวันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM).....	92



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ได้กล่าวถึงการกำจัดของเสียอันตรายในประเทศไทย โดยที่ของเสียอันตรายสามารถแบ่งออกเป็น 4 หมวดหลัก ๆ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ สารที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ เช่น สารหนู แร่ใยหิน แคดเมียม โครเมียม ตะกั่วปรอท ซีลีเนียม และเงิน เป็นต้น (กรมโรงงาน, 2540) ซึ่งความเป็นพิษของสารเหล่านี้สามารถถูกชะละลายและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมได้ กากอุตสาหกรรมหลายชนิดมีโลหะที่เป็นอันตรายในปริมาณมากจะมีความเป็นไปได้สูงที่ถูกจำแนกให้เป็นของเสียอันตราย ถ้าถูกจำแนกว่าเป็นของเสียอันตรายก็จะถูกนำไปฝังยังหลุมฝังกลบนิรภัย แต่เนื่องจากพื้นที่ฝังกลบมีอยู่อย่างจำกัด การจัดการของเสียอันตรายจึงเป็นเรื่องที่ยุ่ยาก ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณของหลุมฝังกลบและการนำพลังงานจากของเสียกลับมาใช้ใหม่ ทางเลือกอย่างหนึ่งก็คือ การเผา แต่อย่างไรก็ตามการเผาไม่ใช่ขั้นตอนสุดท้ายของการบำบัดของเสีย อภิสิทธิ์ พันธุ์พุกภัย (2545) ศึกษาพบว่า การเผาเศษหนังสือพิมพ์ที่มีปริมาณโครเมียมเฉลี่ยเท่ากับ 31.1 มิลลิกรัม/กรัม ที่อุณหภูมิ 400 800 และ 1200 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าโครเมียมทั้งหมดที่อยู่ในเศษหนังสือพิมพ์ยังคงอยู่ในเถ้าที่ก้นเตาเผา เมื่อนำเถ้าที่ได้จากการเผาไปทำการชะละลายพบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดเกินมาตรฐาน (ค่ามาตรฐานของโครเมียมในน้ำสกัดเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) แต่เมื่อนำเถ้าที่ได้จากการเผาไปทำเป็นก้อนแข็งแล้วนำไปทำการชะละลาย พบว่าปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งทำให้เห็นว่าของเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักสูงเมื่อถูกนำมาเผาแล้ว จะต้องนำไปกำจัดขั้นสุดท้าย เช่น การนำไปปรับเสถียรหรือการทำให้เป็นก้อนแข็งก่อนแล้วนำไปฝังกลบยังหลุมฝังกลบนิรภัยเพื่อที่จะไม่ให้เกิดการชะละลายออกสู่สิ่งแวดล้อม

การเผาของเสียอุตสาหกรรมรวมกับการผลิตปูนซีเมนต์ เป็นการรักษาและอนุรักษ์ทรัพยากรสิ่งแวดล้อม วิธีการเผาของเสียในเตาผลิตปูนซีเมนต์เป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรมในการเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตซีเมนต์ ของเสียอุตสาหกรรมหลายชนิดมีปริมาณซิลิกา แคลเซียม และอลูมินาในปริมาณมาก ซึ่งเป็นส่วนประกอบของซีเมนต์ ดังนั้นการนำของเสียมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตซีเมนต์จึงได้มีการตรวจสอบกันอย่างแพร่หลาย (Singh และคณะ, 1996; Arjunan, Silsbee และ Roy, 1999; Monshi และ Asgarani, 1999; Singh และ Garg, 1999) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาพร้อม ๆ กัน ทั้งการบำบัดของเสีย และการใช้ทรัพยากร

อย่างสิ้นเปลือง การใช้กากอุตสาหกรรมเพื่อเป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตซีเมนต์เกิดขึ้นจริงในหลาย ๆ ประเทศ เพราะไม่เพียงแต่เป็นการจัดการของเสียอย่างเหมาะสมเท่านั้น แต่ยังเป็นรายได้ทางเศรษฐศาสตร์ที่ได้รับจากการส่งพลังงานกลับมาใช้ใหม่อีกด้วย การเผาจะใช้อุณหภูมิสูงที่ 1,450 องศาเซลเซียส เวลาเก็บกัก 20 ถึง 30 นาที ส่วนประกอบที่เป็นสารอินทรีย์คาดว่าจะถูกทำลายโดยสมบูรณ์ในขณะที่ส่วนประกอบที่เป็นโลหะจะไม่ติดไฟ และคาดว่าแบ่งตัวไปอยู่ในฝุ่นซีเมนต์ (Cement Kiln Dust หรือ CKD) หรือรวมอยู่ในเม็ดปูน (Cement Clinker) ของผลิตภัณฑ์ซีเมนต์ (Trezza และ Scian, 2000) ดังนั้นการเผาของเสียร่วมกับซีเมนต์สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นการกำจัดขั้นสุดท้าย เพราะไม่ต้องการการปรับเสถียรหรือการหล่อเป็นก้อนแข็งและการฝังในหลุมฝังกลบ

แม้ว่าจะมีข้อดีหลายประการดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น แต่การเผาของเสียอันตรายจากโรงงานอุตสาหกรรมในเตาเผาปูนซีเมนต์ก็ยังมีเรื่องที่น่ากังวลเกิดขึ้นคือ อาจจะเป็นการเสี่ยงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชน เนื่องจากยังขาดความเข้าใจทางด้านวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับความเสถียรของโลหะหนักในซีเมนต์ และพฤติกรรมของโลหะในเม็ดปูนที่เกิดจากขั้นตอนการตกผลึก ซึ่งเป็นตัวแปรพื้นฐานของการประเมินผลดีและความเสี่ยงของการเผาของเสียอันตราย ซึ่งเป็นการยากที่จะพูดถึงการจํารูปของโลหะในของเสียอันตราย พฤติกรรมของโลหะแต่ละชนิดจะแตกต่างกันภายใต้อุณหภูมิสูงประมาณ 1,200 ถึง 1,500 องศาเซลเซียส แต่มีการยอมรับโดยทั่วไปว่าธาตุที่อยู่ในของเสียอันตรายที่ใช้เป็นวัตถุดิบหรือเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตซีเมนต์ จะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาจลน์ในเตาเผาซีเมนต์ ความหนืดของของเหลว ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันและสถานะสมดุล ซึ่งเป็นสภาวะของโครงสร้างปูนซีเมนต์ (Butt และ Timashev, 1976) สิ่งเหล่านี้ไม่ได้มีจุดมุ่งหมายที่จะไปลดคุณภาพของคุณสมบัติของซีเมนต์ในอนาคต การพิจารณาในด้านลบอาจจะกระตุ้นให้ประชาชนมีความเข้าใจผิดเกี่ยวกับความปลอดภัยในการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีโลหะหนักรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้จะมีผลกระทบต่อความคุ้มค่าในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่เผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นหน้าที่และความรับผิดชอบของบริษัทผลิตปูนซีเมนต์ที่จะต้องหาคำตอบที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือตามหลักวิทยาศาสตร์เพื่อตอบคำถามแก่ประชาชน

การวิจัยในครั้งนี้ได้รวมการทดลองทั้งที่สามารชมองเห็นด้วยตาเปล่า และไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เพื่อทราบถึงการกระจายตัวของโลหะหนักในปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ และจะมีวิธีการอย่างไรที่จะทำให้โลหะหนักรวมตัวกับปูนซีเมนต์อย่างมั่นคง โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในปูนซีเมนต์จะมีผลต่อคุณสมบัติของโครงสร้างหรือไม่ โครงสร้างที่สร้างจากปูนซีเมนต์ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักจะมีผลต่อสิ่งแวดล้อมหรือไม่หลังจากโครงสร้างถูกทำลาย การนำปูนซีเมนต์ที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักมาใช้ในการก่อสร้างจะมีผลกระทบต่อสุขภาพหรือไม่ เพื่อที่จะหาคำตอบของคำถามเหล่านี้ จึงมีแผนการในการนำปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากการนำกาก

อุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนมาตรวจสอบด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ต่าง ๆ และทำการชะละลายตามกฎหมายทั้งของประเทศไทยและประเทศสหรัฐอเมริกา เพื่อให้เกิดความรู้ที่เป็นประโยชน์ และนำไปสู่ความเข้าใจในเรื่องการจัดรูปโลหะหนักในซีเมนต์ รวมทั้งความเสถียรของโลหะแต่ละชนิดในปูนซีเมนต์ เพื่อที่จะเป็นแนวทางในการจัดการความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้ นอกจากนี้ผลงานวิจัยนี้จะให้ข้อมูลที่น่าเชื่อถือต่อสาธารณชน และมีบทบาทสำคัญในการสนับสนุนความสำเร็จทางด้านธุรกิจเพื่อให้ความเข้าใจที่ถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาพฤติกรรมของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากการใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมตัวกับน้ำ
- 2) เพื่อศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากการใช้กากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน
- 3) เพื่อศึกษาการชะละลายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม หลังจากสิ้นอายุการใช้งาน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาพฤติกรรมของโลหะหนักและคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากการนำกากอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิต โดยมีขอบเขตดังนี้

- 1) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นำมาจากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างตั้งแต่เดือนกันยายน 2547 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2548 จำนวน 30 กะ (1 กะ เท่ากับ 1 ตัวอย่าง ใช้เวลาในการเก็บตัวอย่าง 1 วัน)
- 2) สถานที่ดำเนินงานวิจัย คือ ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 3) ศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ โดยใช้เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตาม U.S. EPA Method 3052 ทำการย่อยสลายปูนซีเมนต์จำนวน 30 ตัวอย่าง หลังจากนั้นจะนำสารละลายใส่ที่ผ่านการย่อยแล้วไปทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)
- 4) ศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ โดยเลือกปูนซีเมนต์มาทำการทดลองจำนวน 9 ตัวอย่าง หลักเกณฑ์การพิจารณาในการเลือกตัวอย่าง คือ เลือกตัวอย่างที่มีโลหะหนักที่เป็นพิษตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โลหะหนักที่มีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ และโลหะหนักที่มีปริมาณสูงจากการศึกษาในข้อ 3) มาผสมน้ำเป็นซีเมนต์เพสต์ แล้ว

ทำการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 28 และ 60 วัน เมื่อครบกำหนดนำไปบดให้ละเอียดเพื่อหาสารประกอบของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) และวิธี Sequential Extraction จากนั้นศึกษาลักษณะการจับตัวของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยใช้ซีเมนต์เพสต์ที่เป็นก้อน

5) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ตาร์ โดยเลือกปูนซีเมนต์ที่มีความแตกต่างของชนิดและปริมาณโลหะหนักจำนวน 15 ตัวอย่าง หลักเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์เช่นเดียวกับข้อ 4) นำมาหล่อก้อนมอร์ตาร์แล้วทำการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 28 และ 60 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มจะนำมาทำการทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์โดยใช้การทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐาน ASTM C 109-95 เพื่อศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของมอร์ตาร์

6) ทดสอบการชะละลายของโลหะหนักออกสู่สิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธีการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA โดยตัวอย่างที่ทดสอบจะนำมาจากก้อนมอร์ตาร์ในข้อ 5) โดยเลือกอายุบ่มที่ 28 วัน และทำการตรวจสอบความเข้มข้นของโลหะที่ออกมาคือน้ำชะโดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ เช่น หินปูน หรือ ดินปูนขาว กับ ดินเหนียว หรือ หินดินดาน จนรวมตัวผสมกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่จะกล่าวถึงนี้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะก่อตัวและแข็งตัว เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรมในปัจจุบัน เพราะเมื่อนำไปผสมกับทราย และน้ำ จะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือหิน และปูนฉาบ สำหรับงานฉาบปูน เป็นต้น หากนำไปผสมกับรวมกับ หิน กรวด ทราย และน้ำ จะได้คอนกรีต (Concrete) เมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความทนทานคล้ายหิน เพื่อนำไปใช้ในงานก่อสร้าง เช่น อุโมงค์ ฐานราก เขื่อน อาคาร และอื่น ๆ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.1 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่สำคัญซึ่งใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์อาจจำแนกได้ 2 ประเภท คือ

1) ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous Material) ซึ่งอยู่ในรูปของ CaCO_3 หินปูน (limestone) ดินสอพองหรือชอล์ก (Chalk) และดินขาว (Marl)

2) ประเภทที่ให้ซิลิกอน (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous Material) ได้แก่ หินดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินดำหรือดินเหนียว (Clay) และหินชนวน (Slate)

วัตถุดิบทั้ง 2 ประเภทข้างต้นเนื่องจากมีธาตุที่ต้องการน้อยไป หรือมีปริมาณธาตุอื่นมากกว่าที่จำเป็น อาจจะต้องมีการปรับส่วนผสมให้พอเหมาะ เพื่อให้ปูนซีเมนต์มีประสิทธิภาพตามที่ต้องการ เช่น การเติมแร่เหล็กจากศิลาแลง เมื่อมีแร่เหล็กน้อยเกินไป หรือเติมขี้ผึ้งเพื่อเป็นสารหน่วงการก่อตัวของซีเมนต์ เป็นต้น

2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ถูกเผาในหม้อเผา ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำจะระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง CaO

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ ระหว่าง CaO จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ จากดินดำหรือดินเหนียว และดินดาน

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่าง ๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัวลง

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1) ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90 % ของน้ำหนักซีเมนต์

2) ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO Na_2O TiO_2 P_2O_5 และยิบซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เสรฐบุตร, 2543)

ออกไซด์		เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (%)
ออกไซด์หลัก	CaO	60 – 67
	SiO_2	17 – 25
	Al_2O_3	3 – 8
	Fe_2O_3	0.5 – 6
ออกไซด์รอง	MgO	0.1 – 5.5
	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	0.5 – 1.3
	TiO_2	0.1 – 0.4
	P_2O_5	0.1 – 0.2
	SO_3	1.0 – 3.0

2.1.3 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ ได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ดในรูปของผลึกละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.2

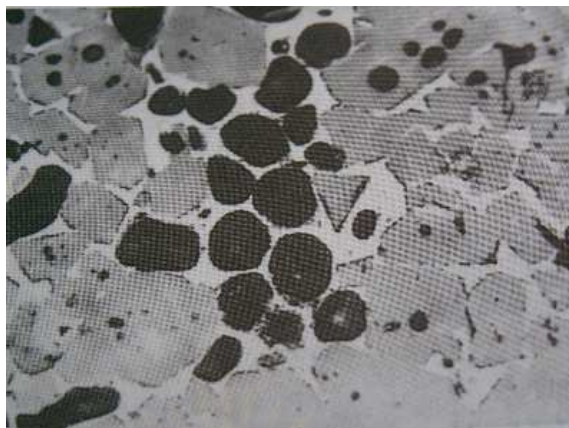
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

2.1.4 สารประกอบหลัก

ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 ถึง 3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35 – 55 %

ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดย C_2S มีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง $\beta\text{C}_2\text{S}$ เท่านั้นที่อยู่ตัว ณ อุณหภูมิทั่วไป $\beta\text{C}_2\text{S}$ มีคุณสมบัติเฉพาะยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนา กำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15 – 35 %



รูปที่ 2.1 รูปร่างลักษณะของ C_3S (ผลึกรูป 6 เหลี่ยม) และ C_2S (เม็ดกลมสีดำ)
(ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) เป็นสารประกอบที่รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash set ทำได้โดยการเติมยิบซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1–2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7–15 %

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5–10 %

คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2.2

2.1.5 สารประกอบรอง

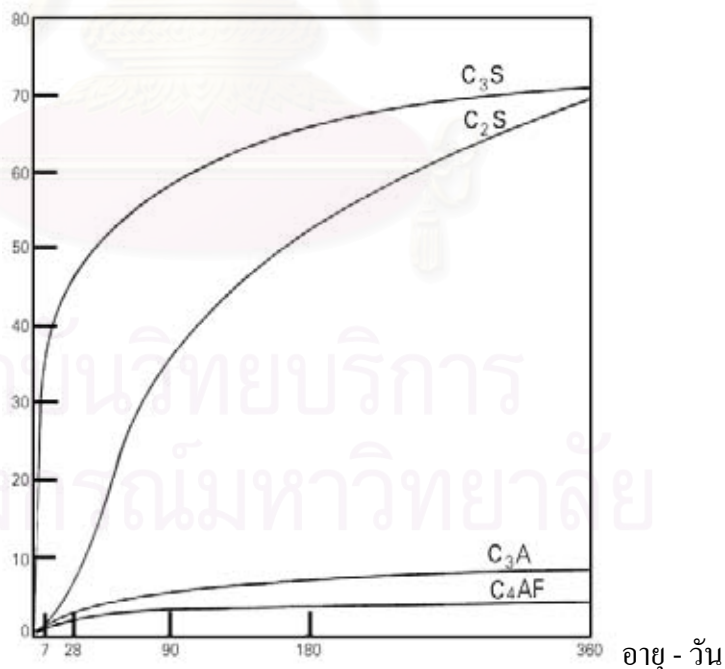
ยิบซั่ม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมเวลาการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิบซั่มที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เฟสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิบซั่มที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

- 1) อัลคาไลท์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O และ K_2O
- 2) ปริมาณ C_3A
- 3) ความละเอียดของปูน

ตารางที่ 2.3 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

คุณสมบัติ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2) การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3) กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4) ความร้อนจากไฮเดรชัน	ปานกลาง (500 J/g)	น้อย (250 J/g)	สูงมาก (850 J/g)	ปานกลาง (420 J/g)
5) คุณสมบัติอื่น ๆ	เหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์		ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)



รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

Free Lime (CaO) เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1) เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด

2) ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่าง ๆ ไม่สมบูรณ์

Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้า ๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ จะมี MgCO_3 ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO คือ ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว

อัลคาไลต์ออกไซด์ (Na_2O , K_2O) อัลคาไลต์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลต์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหาย ยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับ อัลคาไลต์ ควรจะเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต์ต่ำ

2.1.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นใน 2 ลักษณะคือ

1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนในสารละลายและไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น

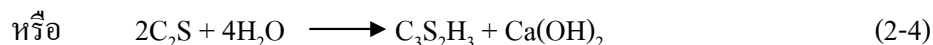
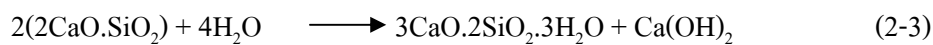
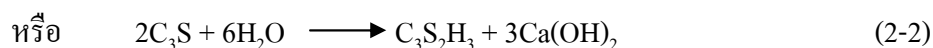
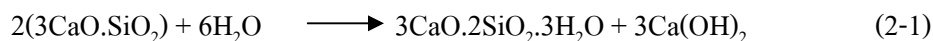
2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย ปฏิกิริยานี้เรียกว่า “Solid State Reaction”

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

2.1.7 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อให้เกิด Ca(OH)_2 และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังสมการต่อไปนี้



จากปฏิกิริยานี้ จะเกิดเจลซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ CSH แทน Calcium Silicate Hydrate ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร รูปที่ 2.3 แสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี



CSH

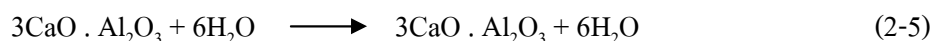
 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 

Ettringite

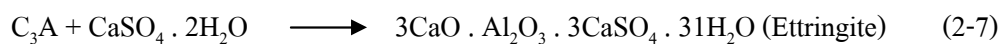
รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

2.1.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการที่ 2-5 และ 2-6



เพื่อหวังไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิบซั่ม ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) เข้าไปในระหว่างกระบวนการบดซีเมนต์ ยิบซั่มจะทำปฏิกิริยากับ C_3A ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการที่ 2-7



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้เกิดการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S และ C_2S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A กล่าวคือเมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้เกิดชั้นของ Ettringite แยกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ชั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่ง Sulphate Ions มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate

2.1.9 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_4AF นี้จะเกิดในช่วงต้นโดย C_4AF จะมีปฏิกิริยากับยิบซั่ม และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ Sulphoaluminate และ Sulphoferrite ดังสมการที่ 2-8



2.1.10 การพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยรวมของสารประกอบหลักทั้ง 4 นั้น จะเกิด CSH Gel และ Ettringite เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์ จะเป็นการหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งอธิบายการเกิด “Domant Period” เป็นเวลาที่ค่อนข้างจะไม่มีอะไรเกิดขึ้นเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์ยังเหลว และมีความสามารถเทได้

เมื่อสิ้นสุดช่วงเวลา “Domant Period” จะเริ่มเข้าสู่จุดแข็งตัวเริ่มต้น (Initial Set) และเป็นช่วงที่ CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์แตกตัวออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 2 เท่าของเม็ดซีเมนต์ก่อนปฏิกิริยา ผลก็คือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ และเกิดผิวสัมผัสก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ เมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่เกิด

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมาก่อให้เกิดความเข้มข้นของจุดสัมผัส และจำกัดการเคลื่อนที่ของเม็ดซีเมนต์ ส่งผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง นั่นคือ การเข้าสู่จุดแข็งตัวสุดท้าย (Final Set)

2.1.11 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

- 1) อายุของเพสต์ ยกเว้น Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน
- 2) องค์ประกอบของซีเมนต์
- 3) ความละเอียดของซีเมนต์ ยิ่งซีเมนต์มีความละเอียดสูงก็ทำให้เกิดผิวสัมผัสกับน้ำได้มากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว
- 4) อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ จะมีผลกระทบมากต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงหลังเท่านั้น เพราะอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง
- 5) อุณหภูมิ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของซีเมนต์เพสต์
- 6) น้ำยาผสมคอนกรีต น้ำยาหน่วงหรือเร่งการก่อตัวมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยลดลง และเพิ่มอัตรา ตามลำดับ

2.2 มวลรวม

มวลรวมหรือวัสดุผสม (Aggregates) คือ วัสดุเฉื่อย ได้แก่ หิน ทราย และกรวด ที่เป็นส่วนผสมสำคัญของคอนกรีต เนื่องจากมวลรวมมีปริมาตร 70 – 80 % ของปริมาณส่วนผสมทั้งหมด ดังนั้นคุณภาพของมวลรวมส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของคอนกรีต

ในอดีตมวลรวมเป็นเพียงแค่วัสดุเฉื่อย ที่ใช้เป็นตัวแทรกประสานกระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์เท่านั้น แต่ปัจจุบันพบว่ามวลรวมยังทำหน้าที่อื่นที่สำคัญ คือ ประการแรกเนื่องจากมวลรวมเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่มีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นในส่วนผสมของคอนกรีตจึงควรใช้ปริมาณมวลรวมให้พอเหมาะเพื่อที่จะให้ปริมาณปูนที่ลดลง ประการต่อมาคุณสมบัติของมวลรวมจะช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน (Durability) และมีปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก (Volume Stability) รวมทั้งยังทำหน้าที่ต้านทานน้ำหนักที่กดลงบนคอนกรีตด้วย กำลังและคุณสมบัติทางกายภาพอีกหลายประการของมวลรวม มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต ทั้งในสภาพที่เป็นคอนกรีต

เหลวและคอนกรีตแข็งตัวแล้ว ดังนั้นการเลือกใช้มวลรวมที่เหมาะสม ไม่เพียงแต่เป็นการประหยัด แต่ยังช่วยให้คอนกรีตมีคุณภาพดีอีกด้วย

2.2.1 ประเภทของมวลรวม

เราสามารถแบ่งมวลรวมตามแหล่งกำเนิดได้ 2 กลุ่ม

1) มวลรวมที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Mineral Aggregate) เกิดจากขบวนการกัดกร่อนและเสียดสีตามธรรมชาติ

2) มวลรวมที่มนุษย์สร้างขึ้น (Artificial Aggregate) เช่น มวลรวมเบาบางประเภทที่ได้จากเผาหิน เป็นต้น

ถ้าแบ่งมวลรวมตามความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักจะแบ่งได้ 3 กลุ่ม คือ

1) มวลรวมเบา (Lightweight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 300 – 1,100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2) มวลรวมปกติ (Normal Weight Aggregate) มีความหนาแน่นตั้งแต่ 2,400 – 3,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3) มวลรวมหนัก (Heavyweight Aggregate) มีความหนาแน่นมากกว่า 4,000 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

หรือถ้าแบ่งมวลรวมตามขนาด เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1) มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) ได้แก่ หินหรือกรวดที่มีขนาดตั้งแต่ 4.5 มิลลิเมตรขึ้นไป หรือค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4

2) มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือสามารถผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200

ส่วนผสมที่มีขนาดเล็กกว่ามวลรวมละเอียดซึ่งมีอยู่จำนวนมากในส่วนผสมคอนกรีต สามารถแบ่งได้เป็น

ดินตะกอน จะมีขนาดประมาณ 0.07 มิลลิเมตร

ดินเหนียว จะมีขนาดอยู่ในช่วง 0.02 – 0.06 มิลลิเมตร

2.2.2 คุณสมบัติทั่วไป

มวลรวมที่ดีเมื่อผสมเป็นคอนกรีตแล้ว จะต้องทำให้คอนกรีตนั้นมีความสามารถเทได้ง่าย แข็งแรงทนทาน และราคาประหยัด นอกจากนี้มวลรวมควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ คือ

1) ความแข็งแรง (Strength)

มวลรวมจะต้องมีความสามารถรับแรงกดได้ไม่น้อยกว่ากำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ซึ่งปกติมวลรวมที่ใช้โดยทั่วไปจะมีความสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าคอนกรีตมาก คือจะรับแรงกดได้ 700 ถึง 3,500 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวม

2) ความต้านทานต่อแรงกระแทกและการเสียดสี (Impact and Abrasion Resistance)

ความสามารถในการต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสีของมวลรวม มักจะถูกใช้เป็นตัวชี้บอกถึงคุณภาพของมวลรวม คุณสมบัตินี้มีความสำคัญมากสำหรับมวลรวมที่ใช้ผสมทำคอนกรีตจะต้องถูกกระทำจากการกระแทกหรือขัดสี เช่น งานผิวถนน พื้นโรงงาน และพื้นสนามบิน เป็นต้น ดังนั้นมวลที่ใช้ได้ดีจะต้องมีความแข็งแรง และเนื้อแน่น ปราศจากอนุภาคที่อ่อนนุ่มหรือเป็นรูพรุนหรือแตกละเอียดง่าย

3) ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี (Chemical Stability)

มวลรวมจะต้องไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับปูนซีเมนต์ หรือกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ในบางพื้นที่มวลรวมบางประเภทจะทำปฏิกิริยากับด่าง (Alkalis) ในปูนซีเมนต์ เกิดเป็นวุ้นและขยายตัวก่อให้เกิดรอยร้าวในคอนกรีต ซึ่งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า Alkalis – Aggregate Reaction (AAR)

4) รูปร่างและลักษณะผิว (Particle Shape and Surface Texture)

รูปร่างและลักษณะผิวของมวลรวมจะมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของคอนกรีตสดมากกว่าคุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว มวลรวมที่ผิวหยาบหรือมีรูปร่างแบนและยาว จะต้องการปริมาณซีเมนต์เพสต์มากกว่ามวลรวมรูปร่างกลมหรือเหลี่ยมที่ระดับความสามารถเท่าได้เดียวกัน

5) ส่วนคละ (Gradation)

ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเท่าได้ และปริมาณส่วนผสมของปูนซีเมนต์ในคอนกรีต การทำคอนกรีตที่ดีนั้นแต่ละก้อนของมวลรวมจะถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ไม่ว่า มวลรวมนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม นอกจากนี้มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดจะต้องมีสัดส่วนที่เหมาะสม เมื่อนำมาผสมกันแล้วมวลรวมที่มีขนาดเล็กจะต้องเข้าไปบรรจุอยู่ในช่องว่างระหว่างก้อนมวลรวมที่มีขนาดใหญ่ให้มากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดซีเมนต์เพสต์ในการใช้ซีเมนต์รวมเข้าด้วยกัน รวมทั้งอุดช่องว่างระหว่างมวลรวม ดังนั้นการใช้มวลรวมที่มีขนาดคละเหมาะสมจะทำให้ประหยัดปูนซีเมนต์

2.3 น้ำ

ปริมาณและคุณภาพของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต คุณภาพของน้ำมีความสำคัญมากเพราะสิ่งเจือปนต่าง ๆ ในน้ำอาจจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่นเวลาการแข็งตัว กำลังอัด ทำให้สีของคอนกรีตไม่สม่ำเสมอและอาจก่อให้เกิดการกัดกร่อน เหล็กเสริม ดังนั้นจึงควรเลือกน้ำให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสม

2.3.1 ความสำคัญของน้ำ

น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตคอนกรีต โดยทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- 1) ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน รวมทั้งทำให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้
- 2) ใช้บ่มคอนกรีตให้มีกำลังเพิ่มขึ้น
- 3) ใช้ล้างมวลรวมที่สกปรก

ดังนั้นจึงต้องการน้ำที่มีคุณภาพดี และปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีต กฎเกณฑ์ทั่วไปของน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีต คือ น้ำที่ดื่มได้นับเป็นน้ำที่ใช้ในงานคอนกรีตได้เสมอ ส่วนปริมาณน้ำผสม นอกจากจะมีผลต่อความสามารถในการใช้งานของคอนกรีตแล้ว ยังมีผลต่อกำลังและความทนทานของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วด้วย

2.3.2 สิ่งเจือปน

ถ้าในน้ำที่ผสมคอนกรีตมีสิ่งเจือปนอยู่มากเกินระดับหนึ่งอาจก่อปัญหาทางด้านคุณภาพ อันได้แก่

- 1) กำลังและความทนทานของคอนกรีตลดลง
- 2) เวลาการก่อตัวเปลี่ยนแปลงไป
- 3) คอนกรีตอาจเกิดการหดตัวมากกว่าปกติ
- 4) อาจจะมีการละลายของสารประกอบภายในคอนกรีตออกมาแข็งตัวบนผิวนอก

สิ่งเจือปนที่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของคอนกรีตมี 3 ประเภท คือ ตะกอน สารละลายอนินทรีย์ และสารละลายอินทรีย์ หากมีสารเหล่านี้เจือปนปริมาณน้อยก็จะไม่ก่อให้เกิดผลเสียร้ายแรง

2.3.3 ตะกอน หากน้ำมีปริมาณตะกอนเกินกว่า 2,000 ส่วนต่อล้าน (ppm) อาจจะต้องทำให้ใช้น้ำมากกว่าปกติ การหดตัวของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น หรือทำให้เกิดขี้เกลือบริเวณผิวของ

คอนกรีต (Efflorescence) ดังนั้นถ้าเราใช้ปูนมาก ควรปล่อยให้ตกตะกอนเสียก่อน แต่ตะกอนของเหล็กรหรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ มักไม่ตกตะกอน และในระหว่างการผสมคอนกรีตสารอินทรีย์เหล่านี้จะเริ่มละลายตัว ส่งผลให้ซีเมนต์มีการก่อตัวและแข็งตัวที่ช้าลง นอกจากนี้ยังอาจจะทำให้เกิดฟองอากาศปริมาณมาก จนกำลังของคอนกรีตลดลงหรือในทางตรงกันข้าม บางครั้งอาจจะมีผลกระทบกระเทือนต่อการทำงานของสารกักกระจายฟองอากาศ

2.3.4 สารอินทรีย์ ตามปกติเราสามารถใช้น้ำที่มีสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นไม่เกิน 2,000 ส่วนต่อล้านได้อย่างปลอดภัย ยกเว้นสารละลายบางชนิดเช่น โซเดียมซัลไฟด์เพียง 100 ส่วนต่อล้านก็อาจก่อให้เกิดปัญหาได้ ในทางตรงกันข้ามสามารถใช้น้ำทะเลซึ่งมีเกลือละลายอยู่ถึง 35,000 ส่วนต่อล้าน ทำคอนกรีตได้หากให้ความระมัดระวังอย่างเต็มที่ ในบางครั้งเรายังใช้ประโยชน์โดยใช้สารละลายเป็นสารผสมเพิ่ม เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซึ่งใช้เป็นตัวเร่งการก่อตัว สารละลายคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนตจะทำให้ซีเมนต์ก่อตัวเร็วขึ้น แต่หากใช้สารละลายของคาร์บอเนตหรือซัลเฟตมากเกินไปอาจทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้

สารละลายของเกลืออนินทรีย์บางชนิด อาจทำให้การก่อตัวและแข็งตัวช้าลง เช่น เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว แมงกานีส และดีบุก เช่นเดียวกับฟอสเฟต อาร์ซีเนตและบอเรต เราสามารถอนุมานความเข้มข้นของสารละลายเหล่านี้ได้ถึง 500 ส่วนต่อล้าน สารละลายที่มีความเข้มข้นสูงในระดับดังกล่าวจะพบได้ เช่น น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งไม่ได้ผ่านระบบบำบัดสิ่งสกปรกหรือน้ำที่ซึมออกมาจากเหมืองแร่

เราสามารถใช้น้ำที่มีความเป็นกรดโดยไม่มีผลเสียต่อคอนกรีต แต่หากระดับ pH ของน้ำอยู่ต่ำถึง 3.0 ก็มักก่อให้เกิดปัญหา น้ำที่มีความเป็นด่างสูง เช่น มีปริมาณโซเดียมหรือโปตัสเซียมไฮดรอกไซด์เกิน 500 ส่วนต่อล้าน อาจก่อให้เกิดปัญหาการก่อตัวอย่างรวดเร็วและกำลังของคอนกรีตลดลง

น้ำทะเล ประกอบด้วยเกลือซัลเฟต และคลอไรด์ของโซเดียมและแมกนีเซียม ดังนั้น จึงทำให้คอนกรีตก่อตัวและแข็งตัวเร็วขึ้น เมื่ออายุ 28 วัน กำลังอัดจะลดลงเพราะเกลือซัลเฟตจะทำให้การตกผลึกของ Ettringite ช้าลง นอกจากนี้ไอออนของคลอไรด์มีผลต่อการสึกกร่อนของเหล็กเสริม จึงไม่ควรใช้น้ำทะเลสำหรับคอนกรีตอัดแรง หรือแม้แต่คอนกรีตธรรมดา ก็ควรหลีกเลี่ยง

2.3.5 สารละลายอินทรีย์ สารอินทรีย์ทำให้น้ำมีสี และทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ช้าลง สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดในน้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมมักมีผลเสียต่อปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือก่อให้เกิดฟองอากาศในปริมาณที่สูง ตามปกติจึงต้องระมัดระวังการใช้น้ำจากโรงงานอุตสาหกรรมยกเว้น กรณีที่น้ำได้ผ่านโรงบำบัดน้ำเสียซึ่งจะลดสารอินทรีย์ลงในระดับที่ปลอดภัย

วิธีสังเกตอย่างง่ายว่าน้ำนั้นใช้ผสมคอนกรีตได้หรือไม่ มีดังนี้
ความสะอาด น้ำต้องไม่มีสารเน่าเปื่อย ปฏิกูล หรือตะไคร่น้ำ
สี น้ำจะต้องใส ถ้ามีสีแสดงว่าน้ำมีสารแขวนลอยต่าง ๆ มาก
กลิ่น น้ำต้องไม่มีกลิ่นเน่า ถ้ามีกลิ่นมักจะมีสารอินทรีย์ปนอยู่มาก
รส น้ำต้องไม่มีรส ถ้ามีรสกร่อยหรือเค็ม แสดงว่ามีเกลือแร่อยู่มาก ถ้ามีรสเปรี้ยว
 แสดงว่าเป็นกรด และถ้าฝาด แสดงว่าเป็นด่าง แต่โดยทั่วไปความเป็นกรดหรือด่างของน้ำมักไม่
 มากจนสามารถชิมแล้วรู้ได้

2.3.6 ข้อกำหนดทั่วไปเกี่ยวกับน้ำผสมคอนกรีต

ข้อกำหนดทั่วไปที่เกี่ยวกับน้ำผสมคอนกรีต จะต้องมิชอบเขตระดับความเข้มข้นไม่
 เกินค่าดังต่อไปนี้

ปริมาณของแข็ง ไม่มากกว่า	2,000 ส่วนต่อล้านส่วน
ปริมาณซัลเฟต ไม่มากกว่า	1,000 ส่วนต่อล้านส่วน
ปริมาณคลอไรด์ ไม่มากกว่า	500 ส่วนต่อล้านส่วน
ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH)	อยู่ในช่วง 6 – 8

นอกจากนี้ยังมีข้อกำหนดขอบเขตความเข้มข้นของสิ่งเจือปนโดยละเอียด ดังตาราง
 ที่ 2.4

2.4 ความหมายของวัตถุติดและเชื้อเพลิงทดแทน

โดยทั่วไปวัตถุติดและเชื้อเพลิงทดแทนที่นำมาใช้จะเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมและ
 สิ่งปฏิกูล เช่น ใต้ออยและใต้อินก อีฐทนไฟที่หมดอายุการใช้งานแล้ว สุกภัณฑ์ที่ไม่ได้คุณภาพ
 ยางรถยนต์เก่า เชื้อเพลิงสังเคราะห์ น้ำมันเก่าที่ใช้แล้ว รวมทั้งดินที่ปนเปื้อนน้ำมัน สิ่งต่าง ๆ
 เหล่านี้สามารถใช้เป็นวัตถุติดในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี

ข้อจำกัดของสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่นำมาใช้ทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ คือ
 จะต้องไม่มีการปนเปื้อนของสารที่เป็นอันตราย เช่น พีซีบี (PCBs ; Polychlorinated Biphenyls)
 วัสดุติดเชื้อจากโรงพยาบาล รวมทั้งขยะครัวเรือนทั่วไปที่ยังไม่ผ่านการคัดแยก เป็นต้น

สำหรับการปนเปื้อนประเภทอื่น ๆ เช่น คลอรีน ซัลเฟอร์ และโลหะหนักนั้น ได้มีเกณฑ์
 มาตรฐานการปนเปื้อนที่ยอมรับได้สำหรับสารแต่ละชนิดไว้ โดยเกณฑ์ที่กำหนดนี้ได้รับการ
 เห็นชอบและผ่านการรับรองจากหน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้อง

อย่างไรก็ตาม สิ่งสำคัญที่ต้องตระหนักถึง คือ ค่าพลังงานความร้อนของเชื้อเพลิงทดแทน
 จะต้องมีความเหมาะสม คือจะต้องควบคุมอุณหภูมิความร้อนในการเผาปูนเม็ดให้คงที่ เพื่อให้ได้

ปูนเม็ดที่มีส่วนผสมทั้งหมดรวมเป็นเนื้อเดียวกัน นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของเชื้อเพลิงทดแทนจะต้องไม่เป็นอุปสรรคต่อการทำงานของเตาเผาปูนซีเมนต์ด้วยเช่นกัน

การนำกากของเสียจากอุตสาหกรรมมาใช้เพื่อทดแทนวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในการผลิตปูนซีเมนต์นั้นมีข้อพึงระวังที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ จะต้องไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยและความปลอดภัยของพนักงานตลอดจนถึงคุณภาพสิ่งแวดล้อมของชุมชนในท้องถิ่น พร้อมทั้งมีการจัดการดูแลและควบคุมอย่างเหมาะสม (จุมพล เลิศชูวงศา, 2546)

ตารางที่ 2.4 ขอบเขตและผลกระทบของสิ่งเจือปนในน้ำ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2543)

สิ่งเจือปน	ความเข้มข้นสูงสุด (ส่วนต่อล้านส่วน)	ผลกระทบ/ตัวอย่าง
ตะกอน	2,000	- ตะกอนดินเหนียว สารอินทรีย์
เหล็ก	500 – 1,000	- เพิ่มฟองอากาศ
เกลือคาร์บอเนต	1,000	- ลดเวลาการก่อตัว
เกลือไบคาร์บอเนต	400 – 1,000	- 400 ส่วนต่อล้าน สำหรับเกลือไบคาร์บอเนตของแคลเซียมและแมกนีเซียม
โซเดียมซัลเฟต	10,000	- อาจเพิ่มกำลังระยะแรก แต่ลดกำลังระยะยาว
แมกนีเซียมซัลเฟต	40,000	
โซเดียมคลอไรด์	20,000	- ลดเวลาการก่อตัว
แคลเซียมคลอไรด์	50,000	- เพิ่มกำลังระยะแรก
แมกนีเซียมคลอไรด์	40,000	- ลดกำลังสูงสุด
เกลือของเหล็ก	40,000	
ฟอสเฟต, อาร์ซีเนต และโบเรต	500	- ลดเวลาการก่อตัว
เกลือของสังกะสี ทองแดง ตะกั่ว	500	
แมงกานีส และดีบุก		
กรดอินทรีย์	10,000	- pH ไม่ต่ำกว่า 3.0
โซเดียมไฮดรอกไซด์	500	
โซเดียมซัลไฟด์	100	- ควรหล่อคอนกรีตทดสอบ
น้ำตาล	500	- มีผลต่อการก่อตัว

ประเภทของกากของเสียอุตสาหกรรมที่เหมาะสมและไม่เหมาะสมสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์ (ธีระพล ตีรวสิน, 2546)

- 1) กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่เหมาะสมสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์
 - กากของเสียที่มีไฮโดรคาร์บอนเป็นส่วนประกอบ
 - กากของเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบ
 - น้ำเสียเข้มข้นสูงซึ่งไม่สามารถกำจัดโดยใช้ระบบบำบัดน้ำเสีย
 - กากของเสียที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ได้
- 2) กากของเสียจากอุตสาหกรรมที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเผากำจัดในเตาผลิตปูนซีเมนต์
 - กากของเสียที่มีการกัดกร่อนสูง เช่น กรดเข้มข้น เป็นต้น
 - สารกัมมันตรังสี
 - ขยะติดเชื้อ
 - กากของเสียที่มีความเข้มข้นของคลอไรด์สูงเกินกว่าเกณฑ์กำหนด
 - กากของเสียที่มีความเข้มข้นของโลหะหนักสูงเกินกว่าเกณฑ์กำหนด

2.5 การใช้ประโยชน์จากกากอุตสาหกรรมเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คำนิยามของของกากอุตสาหกรรมทำให้คนทั่วไปรู้สึกว่ามันเป็นสิ่งที่ไม่มีประโยชน์ แต่ในความเป็นจริงแล้วกากอุตสาหกรรมหลาย ๆ ชนิดมีคุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ กลยุทธ์การจัดการของเสียในการนำมาเผารวมกับปูนซีเมนต์เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนมีมานานกว่า 20 ปี (Achterbosch และคณะ, 2003) ตารางที่ 2.5 แสดงกากอุตสาหกรรมโดยทั่ว ๆ ไปที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในซีเมนต์

ตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบของกากอุตสาหกรรมที่ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทน เพื่อให้ทราบเหตุผลที่ชัดเจนว่าทำไมกากอุตสาหกรรมจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบทดแทนในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เมื่อพิจารณาจากตารางจะเห็นได้ชัดเจนว่าของเสียเหล่านี้มีส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เช่น ซิลิกา แคลเซียม และอลูมินา ด้วยเหตุนี้การนำกากอุตสาหกรรมมาแทนที่วัตถุดิบที่ใช้อยู่เป็นสิ่งที่สามารถกระทำได้ และมีการใช้กันอย่างแพร่หลาย ตารางที่ 2.7 เป็นตัวอย่างแสดงสัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์ในประเทศเยอรมัน ปี ค.ศ. 1999

ในทำนองเดียวกัน แม้ว่ากฎหมายของสหรัฐอเมริกาได้กำหนดว่าเชื้อเพลิงทดแทนจากกากอุตสาหกรรมให้พลังงานเพียง 5,000 Btu/ปอนด์ (U.S. EPA, 1991) อ้างถึงใน Environmental

Toxicology International, 1992) แต่โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงจากกากอุตสาหกรรมให้พลังงานมากกว่า 10,000 Btu/ปอนด์ (Peter และคณะ, 1986) ด้วยเหตุผลนี้การนำเชื้อเพลิงในตารางที่ 2.5 มาทดแทนเชื้อเพลิงหลักเป็นไปได้อย่างสมเหตุสมผล ในแต่ละปีมีการนำกากอุตสาหกรรมมาเผาในเตาเผาซีเมนต์เพื่อทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิลจำนวน 1.8 พันล้านปอนด์ (Costner และ Thronton, 1990) ตารางที่ 2.8 เป็นตัวอย่างการแสดงสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์ในประเทศเยอรมัน ปี ค.ศ. 1999 (Achterbosch และคณะ, 2003)

แม้ว่าของเสียหลายชนิดจะมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้ในการผลิตซีเมนต์ สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องระมัดระวัง คือ กากอุตสาหกรรมอาจจะมีส่วนประกอบที่ไม่ต้องการซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาได้ ในการดำเนินงานจะต้องมีความเข้าใจผลที่เกิดขึ้นจากส่วนประกอบที่ไม่ต้องการในการเผาเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น เมื่อของเสียอันตรายมีคลอรีนเป็นองค์ประกอบ เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์ หรือไตรคลอโรเบนซีน เมื่อนำมาเผาพร้อมกับซีเมนต์ในเตาเผาจะก่อให้เกิดไฮโดรเจนคลอไรด์ ซึ่งเป็นก๊าซที่เป็นกรดสามารถทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมและโซเดียมออกไซด์ในเตาเผาเกิดเป็นเกลืออัลคาไลน์ (Alkaline Salt) เกลือที่ระเหยได้มีแนวโน้มที่จะควบแน่นในส่วนหล่อเย็นของเตาเผา ถ้าของเสียมีปริมาณคลอไรด์ที่มีความเข้มข้นสูง การจัดรูปเป็นเกลืออัลคาไลน์ก็มีความเป็นไปได้สูง และในที่สุดจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบเตาเผา ซึ่งเป็นผลเสียในกระบวนการผลิตซีเมนต์ ด้วยเหตุนี้ปริมาณคลอไรด์ในของเสียจึงต้องมีการตรวจสอบอย่างเข้มงวดในการผลิตซีเมนต์

นอกจากสารประกอบคลอไรด์ ยังอาจมีส่วนประกอบอื่นๆ ที่ไม่ต้องการซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อการผลิตซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.9 ซึ่งนอกเหนือจากผลกระทบต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์เองแล้วสารเจือปนเหล่านี้อาจจะทำให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพในระยะยาว

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างกากอุตสาหกรรมโดยทั่วไป ที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Environmental Toxicology International, 1992; Trezza และ Scian, 2000; Achternbosch และคณะ, 2003; Ract, Espinosa และ Tenório, 2003; Shih และคณะ, 2003)

ประเภท	วัตถุดิบที่ป้อน
วัตถุดิบทดแทน	แร่เหล็ก ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ เถ้าหนัก เถ้าลอยจากถ่านหิน วัสดุจากการผลิตเหล็ก เถ้าจากการเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้แล้ว และ กัลวานิคสตัคจี้จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า
เชื้อเพลิงทดแทน	เศษไม้ ตัวทำลายละลาย น้ำมันเครื่องที่ใช้แล้ว ยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว เชื้อเพลิงจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม เชื้อเพลิงจากขยะชุมชน กระดาษและพลาสติกที่ใช้งานแล้ว สิ่งทอ อาหารสัตว์

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างองค์ประกอบของของเสียอันตรายที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทน

ของเสีย	ส่วนประกอบ (% โดยน้ำหนัก)	% สูงสุดที่สามารถเป็นไปได้ในกรณี	อ้างอิง
เถ้าจากการเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้แล้ว	CaO = 21.34% , SiO ₂ = 3.80% , Al ₂ O ₃ = 1.64% และ Fe ₂ O ₃ = 2.32%	ไม่มีข้อมูล	Trezza และ Scian, 2000
กัลวานิคสตัคจี้จากโรงงานชุบด้วยไฟฟ้า	Ca = 43.19% , Si = 9.02% , Al = 2.33% และ Fe = 1.88%	2%	Ract และคณะ, 2003
เถ้าจากเตาเผาขยะชุมชน	CaO = 27.02, SiO ₂ = 29.4% , Al ₂ O ₃ = 18.0% และ Fe ₂ O ₃ = 2.32%	< 5%	Shih และคณะ, 2003

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างการแสดงสัดส่วนของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์ในประเทศ
เยอรมัน ปี ค.ศ. 1999 (Achterbosch และคณะ, 2003)

วัตถุดิบที่ป้อน		ปริมาณที่ป้อนเข้าไปในเตาเผา ซีเมนต์(ตัน/ปี)
วัตถุดิบหลัก	หินปูน	35,695,913
	ดินเหนียวปนปูน	10,000,000
	ดินเหนียวรวมกันเบนโทไนต์/คาร์โอล์ไนต์	1,985,000
	ทราย	1,240,000
วัตถุดิบทดแทน	วัสดุจากการผลิตเหล็ก	170,000
	แร่เหล็ก	117,000
	เถ้าจากกระบวนการเผา	240,000
	เถ้าลอยจากถ่านหิน	212,039
	ทรายที่ใช้เป็นแบบหล่อ	140,000

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างการแสดงสัดส่วนของเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปในเตาเผาซีเมนต์ในประเทศ
เยอรมัน ปี ค.ศ. 1999 (Achterbosch และคณะ, 2003)

เชื้อเพลิงที่ป้อน		ปริมาณที่ป้อนเข้าไปในเตาเผา ซีเมนต์(ตัน/ปี)
เชื้อเพลิงหลัก	ถ่านหินแข็ง	980,000
	ถ่านหินสีน้ำตาล	2,140,000
	น้ำมันจากถ่านหิน	312,903
เชื้อเพลิงทดแทน	ยางรถยนต์ที่ใช้งานแล้ว	236,000
	น้ำมันที่ใช้แล้ว	181,000
	เศษไม้	77,000
	ขยะชุมชนและกากอุตสาหกรรม	290,000

ตารางที่ 2.9 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์ (Dalton และคณะ, 2004)

โลหะหนัก	ผลกระทบต่อการผลิตซีเมนต์และคุณสมบัติของซีเมนต์
สารหนู โครเมียม	โดยทั่วไปจะรวมเข้าไปในเม็ดปูน ไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์ ลดความหนืดของปูนซีเมนต์เหลว สามารถลดอุณหภูมิของการจัดรูปเป็น C_3S ถ้ามีมากกว่า 3 % และมีผลกระทบต่อความสามารถในการเผา และการเกิดปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในเม็ดปูนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณโลหะสูง (2.5 ถึง 5 % โดยน้ำหนัก) มากกว่าในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
ทองแดง ตะกั่ว	ผลกระทบขึ้นอยู่กับการจัดรูป (ออกไซด์, เกลือ หรือซัลไฟด์) เป็นโลหะหนักที่ระเหยได้ สามารถสะสมในเม็ดปูนโดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบถ้ามีปริมาณน้อยกว่า 70 ส่วนต่อล้านส่วน
ปรอท	เป็นโลหะหนักที่ระเหยได้ง่าย สามารถหลุดออกมาจากที่ดักจับก๊าซได้ ปริมาณเพียงเล็กน้อยสามารถทำให้เกิดผลกระทบต่อการผลิตปูนซีเมนต์ได้
สังกะสี	การจัดรูปที่แตกต่างกันสามารถทำให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน ปริมาณที่เพิ่มขึ้นในเตาเผา จะลดความพรุนของเม็ดปูน และลดความสามารถในการบด มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผา และปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในเม็ดปูนเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะถ้ามีปริมาณโลหะสูง (2.5 ถึง 5 % โดยน้ำหนัก) มากกว่าในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
วานาเดียม	เมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นในเตาเผา จะลดความพรุนของเม็ดปูน และลดความสามารถในการบด

2.6 แหล่งที่มาของโลหะหนักในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2.10 แสดงการรวมตัวเป็นร้อยละของโลหะหนักบางชนิดในซีเมนต์ซึ่งได้มาจากการทดลองแบบควบคุมในห้องปฏิบัติการ จากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นได้ว่าโลหะหนักบางชนิดมีความสามารถในการแผ่ตัวอยู่ในซีเมนต์ในปริมาณสูง อย่างไรก็ตามจากข้อมูลในตารางที่ 2.5 ถึง 2.8 ยังมีข้อจำกัดในการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากในเตาเผาจริงความเข้มข้นของโลหะหนักทั้งของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงหลักและวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนจะแปรผันกับปัจจัยที่ไม่ได้ควบคุม เช่น ปัจจัยทางธรณีวิทยา และกระบวนการในการเกิดของเสีย จากเหตุผลนี้จึงไม่ใช่เรื่องแปลกที่วัตถุดิบในการใช้ที่หนึ่งจะมีความสำคัญแตกต่างกับการใช้อีกที่หนึ่ง

ตารางที่ 2.10 การรวมตัวเป็นร้อยละของโลหะหนักบางชนิดในซีเมนต์ซึ่งได้มาจากการทดลองแบบควบคุมในห้องปฏิบัติการ

โลหะหนัก	การรวมตัว (%โดยน้ำหนัก)		อ้างอิง	หมายเหตุ
	ซีเมนต์	ผงปูน		
แคดเมียม	51	NA	Sprung, 1985	อ้างอิงใน Espinosa และ Tenório, 2000
โครเมียม	99	NA	Sprung, 1985	อ้างอิงใน Ract และคณะ, 2003
	84	NA	Murat และ Sorrention, 1996	อ้างอิงใน Espinosa และ Tenório, 2000 ; ใช้ CrCl_3 ในการศึกษา
ทองแดง	99.3	NA	Ract และคณะ, 2003	
นิกเกิล	97	NA	Sprung, 1985	อ้างอิงใน Espinosa และ Tenório, 2000
ตะกั่ว	37.1	NA	Andrade และคณะ, 2003	ใช้ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ในการศึกษา
	25	NA	Sprung และ Rechenberg, 1994	อ้างอิงใน Andrade และคณะ, 2003
	72-79	NA	Locher, 1989	
	97	NA	Gerger, 1994	
	100	NA	Kirchner, 1986	
วานาเดียม	69.6	NA	Andrade และคณะ, 2003	ใช้ NH_4VO_3 ในการศึกษา
สังกะสี	86	NA	Andrade และคณะ, 2003	ใช้ ZnO ในการศึกษา
	75	NA	Caponero และ Tenório, 2000	อ้างอิงใน Espinosa และ Tenório, 2000

NA (Not Available) = ไม่มีข้อมูล

นอกเหนือจากที่มาของโลหะหนักอีกสิ่งที่สำคัญและที่ควรจะให้ความสนใจ คือ สถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์และความเสถียรของโลหะหนัก ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

2.7 สถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในภาพรวมเกี่ยวกับความเข้าใจสถานภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ สิ่งที่สำคัญคือต้องเข้าใจปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างโลหะกับปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม การดูดติด (Sorption) การตกผลึก (Precipitation) การรวมเข้าใน โครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบของปูนซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบใหม่ที่การละลายน้ำได้ในปริมาณจำกัด พฤติกรรมของโลหะแต่ละตัวในระบบซีเมนต์ (Cementitious System) ทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน มีแนวโน้มที่แตกต่างกัน ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับโลหะมีอิทธิพลอย่างมากไม่เพียงแต่เฉพาะคุณภาพหรือคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังมีผลต่อเนื่องไปยังขั้นอื่น ๆ อีกด้วย ยกตัวอย่างเช่น ความเสถียรของโลหะหนักที่รวมตัวกับปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ผสมน้ำจะมีอิทธิพลต่อคุณภาพและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ แต่เมื่อนำปูนซีเมนต์ไปผสมน้ำเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลในเรื่องความเสถียรของโลหะหนักโดยเฉพาะความสามารถในการชะละลายในขณะที่ใช้งานและสิ้นอายุการใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าสถานภาพของโลหะหนักหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นสิ่งที่น่าศึกษาเพื่อให้เกิดความเข้าใจและสามารถนำความรู้ที่ได้มาใช้ได้จริง

เนื่องจากการศึกษาการแพร่รวมของกากอุตสาหกรรมกับปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะศึกษากลไกพันธะของธาตุในปูนซีเมนต์ที่ยังไม่ผสมกับน้ำ ส่วนความเข้าใจในเรื่องกลไกพันธะของธาตุในซีเมนต์ที่ผสมน้ำแล้วยังไม่ชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษากลไกพันธะของธาตุในซีเมนต์ที่ผสมน้ำแล้ว ซึ่งปฏิกิริยาในแต่ละชั้นของซีเมนต์ที่ผสมน้ำจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของธาตุแตกต่างกัน สามารถสรุปปฏิกิริยาระหว่างโลหะและธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์ที่ผสมน้ำในเรื่องนี้ที่เฉพาะได้ดังนี้

2.7.1 สารหนู (As)

ในตัวกลางที่เป็นค่ารูปที่เสถียรของสารหนูจะเป็นอาร์เซไนต์ (AsO_3^{3-}) หรืออาร์เซเนต (AsO_4^{3-}) โดยทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับสภาพรีดอกซ์เป็นหลัก อย่างไรก็ตามเนื่องจากมีปริมาณซัลเฟตในซีเมนต์ค่อนข้างสูง ในซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวสารหนูในรูปของอาร์เซไนต์ไม่น่าจะเป็นรูปที่เสถียร การเพิ่ม pH จะเป็นการเพิ่มโปรตรอนแก่อาร์เซเนตจนกระทั่งเกิดกรดอาร์เซนิก (H_3AsO_4) ที่ pH 12 ดังนั้นในระบบซีเมนต์หลังทำปฏิกิริยากับน้ำ สภาพแวดล้อมโดยรวมจะมีไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) อาร์เซนิกจะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) คือเมื่ออยู่ในซีเมนต์

สำหรับของเสียที่มีปริมาณสารหนูสูง กระบวนการปรับเสถียรอาจเกิดจากการที่สารหนูถูกยึดจับไว้ในซีเมนต์ด้วยการตกผลึกโดยตรงของ CaHAsO_3 ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ (Dutre

และ Vandecasteele, 1995) การเกิดพันธะนี้ยังไม่ได้รับพิสูจน์ว่าเกิดการรวมตัวกับโครงสร้างผลึกหรือการรวมตัวทางฟิสิกส์ และเป็นสารประกอบของแคลเซียมกับอาร์เซไนต์หรืออาร์เซเนตสำหรับการแทนที่ในโครงสร้างของ Ettringite โดยอาร์เซเนตในระบบสารเดี่ยว (Pure System) พบว่าเป็นไปได้ทางทฤษฎีแต่ยังไม่มีการยืนยัน (Van der Hoek และคณะ, 1994) มีการวิจัยพบว่าในเต้าลอยของถ่านหินมีอาร์เซนิกในรูป As^{+5} เมื่อหล่อแข็งและทำการชะละลาย พบว่ามีการชะละลายออกมาซึ่งเป็นลักษณะประจำตัวของการดูดซับ (Sorption) ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดที่ผิวของ Portlandite หรือ Ettringite ในทางตรงกันข้ามการชะละลายของอาร์เซนิกจะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อเกิดประจุลบของ Oxoanion ในช่วง pH สูง เช่นในตัวอย่างที่มีของไฮดรอกไซด์มาก มีความเป็นไปได้ที่จะมีการชะละลายเริ่มขึ้นเมื่อ pH 11 แต่ยังไม่มีการยืนยันที่แน่ชัด การจัดรูปของ As^{+5} ในซีเมนต์แสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 การจัดรูปของ As^{+5} ในซีเมนต์ (Van der Hoek และคณะ, 1994; Dutre และ Vandecasteele, 1995)

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

2.7.2 พลวง (Sb)

ในปฏิกิริยาไฮเดรชันการเกิดพันธะกับพลวงยังไม่ได้รับการพิสูจน์ มีการคาดคะเนว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน พลวงจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมได้สารประกอบ $Ca_3(SbO_4)_2$ ซึ่งเป็นรูปที่เสถียร พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจะคล้ายคลึงกับสารหนู คืออยู่ในช่วง pH สูง จะมีความสามารถในการละลายสูงเมื่ออยู่ในรูปออกไซด์ ในตัวอย่างที่เป็นด่างประจุลบของ Oxoanion จะอยู่ในรูป SbO_2^- ความเสถียรของพลวงน่าจะมีผลมาจากการดูดติด ซึ่งยังไม่มีการตรวจสอบในซีเมนต์ที่ผสมน้ำแล้ว ส่วนการรวมตัวในโครงสร้างผลึกยังไม่ได้รับการพิสูจน์

2.7.3 แบเรียม (Ba)

แบเรียมเป็นธาตุที่มีบทบาทสำคัญใน CSH ของปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก การรวมตัวของผลึกแบเรียมยังไม่ได้รับการพิสูจน์ อาจมีการแลกเปลี่ยนใน Zeolite ตามที่ Garavaglia และคณะ (1994) ได้ศึกษาไว้ว่าความสามารถในการละลายที่น้อยมากของ $BaSO_4$ เป็นตัวควบคุมความเข้มข้นของแบเรียมใน Elution Test ที่ pH 1.2 ถึง 11.5 การจัดรูปของ Ba^{+2} ในซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 การจัดรูปของ Ba^{+2} ในซีเมนต์ (Garavaglia และคณะ, 1994)

Ba	การจัดรูปของ Ba^{+2} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน							
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			$BaSO_4$	$C_{0.2}SH[I?]$				
>1			$BaSO_4$					
1								Ba^{+2}

2.7.4 พรอท (Hg)

ที่ pH น้อยกว่า 7 พรอทจะละลายน้ำได้สูงและอยู่ในรูป $HgCl_4^{-2}$ หรือ Hg^{+2} เมื่อ pH เพิ่มขึ้นจะจัดรูปเป็น HgO หรือพรอทที่มีความเสถียร ซึ่งขึ้นอยู่กับปฏิกิริยารีดอกซ์ ในซีเมนต์ พรอทจะอยู่ในรูป HgO (Cocke, 1990) HgO รวมอยู่ใน CSH และ AFt (Gougar, Scheetz และ Roy, 1996) เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวเพิ่มขึ้นคาดว่าจะทำให้มีการชะละลายของพรอทในทุกกรณี

2.7.5 ซีลีเนียม (Se)

ในสารละลายซีลีเนียมจะอยู่ในรูปกรดซีลีนิคหรือซีลีไนต์ (SeO_3^{-2}) ในช่วง pH สูง เมื่อตรวจสอบ The Elution Behavior ของแกลลอย มีการเคลื่อนที่ซึ่งมีผลมาจากการดูดซับของซีลีไนต์ (Van der Hoek และคณะ, 1994) เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวเพิ่มขึ้นคาดว่าจะทำให้มีการชะละลายของซีลีเนียมในทุกกรณี

2.7.6 แทลเลียม (Tl)

ที่ pH สูง แทลเลียมจะอยู่ในรูป Tl_2O สามารถละลายได้สูงในช่วงที่เป็นด่างและมีความเป็นพิษมาก ไม่มีเอกสารใดศึกษาเรื่องพันธะของแทลเลียมในระบบซีเมนต์ ความสัมพันธ์ของอัตราการชะละลายเล็กน้อยในการผสมกับน้ำถูกเสนอว่าเป็นการดูดซับที่ Hydrate Phases เป็นที่รู้กันว่า Tl^+ มีการรวมตัวกับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite ($C_{0.2}SH$ Analogue) เมื่อเกิดปฏิกิริยาที่ผิวเพิ่มขึ้นคาดว่าจะทำให้มีการชะละลายของแทลเลียมในทุกกรณี

2.7.7 โคบอลต์ (Co)

พฤติกรรมทางเคมีของโคบอลต์ในสารละลายสามารถสังเกตเห็นเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนที่ค่า pH ประมาณ 6 ที่ pH สูงกว่านี้ รูปที่เสถียรของโคบอลต์คือ $CoCO_3$, $Co(OH)_2$ และ Co_3O_4 ภายใต้สภาวะที่เป็นด่างสูง Co^{+2} เปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของ $HCoO_2^-$ ที่ pH ต่ำกว่า 6 Co^{+2} จะเป็นสารละลาย โคบอลต์มีความสำคัญใน AFm ในปฏิกิริยาไฮเดรชันช่วงแรก การแทนที่ผลึกทางเคมีของ Al^{+3} โดย Co^{+3} และ Ca^{+2} โดย Co^{+2} ใน AFt มีความเป็นไปได้ในระบบเดี่ยว (Pure Systems) มีการสังเกตเห็นการดูดติดของ Co บน C_2SH โดยไม่มีการรวมตัวกับผลึกเกิดขึ้น (Gougar และคณะ, 1996) ในทางตรงกันข้ามเป็นที่รู้กันว่า Co^{+2} มีการรวมตัวกับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite ($C_{0.2}SH$ Analogue) ความไม่เสถียรของโคบอลต์อาจจะถูกจำกัดโดยการก่อตัวของ Gyrolith Gel ($C_{0.66}SH$) ในระหว่าง Diffusion-Controlled Neutralization ที่ pH น้อยกว่า 6 ความไม่เสถียรคาดว่าจะเกิดขึ้นทุกกรณี การจัดรูปของ Co^{+2} , Co^{+3} ในซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 การจัดรูปของ Co^{+2} และ Co^{+3} ในซีเมนต์ (Gougar และคณะ, 1996)

Co	การจัดรูปของ Co^{+2} , Co^{+3} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน							
pH	Carbonates	Hydroxides	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}

2.7.8 ตะกั่ว (Pb)

ในระบบพันธะซีเมนต์ (Cement Bond System) มีเพียงตะกั่วรูป Pb^{+2} เท่านั้นที่สามารถตรวจพบได้ ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดเกี่ยวกับพฤติกรรมของ Pb^{+3} และ Pb^{+4} ตะกั่วมีบทบาทสำคัญในสภาวะแวดล้อมของไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก มีการสันนิษฐานไว้ว่าตะกั่วไม่มีการรวมตัวใน C_2SH แต่มีการตกตะกอนบนผิวหน้าในรูปของเกลือเชิงซับซ้อน (Salt Complex) เช่น ไฮดรอกไซด์ ซัลเฟต หรือคาร์บอเนต (Cartledge และคณะ, 1991; Cocke และคณะ, 1992; Gougar และคณะ, 1996) จากการทดสอบ Elution Test พบว่ามี $Pb(OH)_2$ อยู่ในเกล็ดลอยถ่านหิน (Garavaglia และคณะ, 1994) ในการทดลอง Hydrothermal ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด จะสังเกตเห็นการดูดติดของตะกั่วปริมาณเล็กน้อยบน Tobermolite (C_1SH Analogue) ซึ่งทำให้เกิดการสลายตัวและการจัดรูปของคาร์บอเนต (ที่ pH 5.5 หรือ 6) เป็นที่รู้กันว่ามี การรวมตัวของตะกั่วในโครงสร้างของ Zeolite (analogue of $C_{0.2}SH$) ความทนทานของตะกั่วในระบบซีเมนต์ต่อการชะละลายภายใต้สภาพการกัดกร่อนได้รับอิทธิพลจากความเสถียรของตะกั่วซัลเฟต ซึ่งถ้าซัลเฟตถูกกำจัดคาดว่าจะเกิดการชะละลายได้ที่ pH 5 การชะละลายของตะกั่วอธิบายโดย ภัทกรกตานุสรณ์ (2546) พบว่าการเพิ่มสัดส่วนตะกอนจากอุตสาหกรรมที่มีตะกั่วในการทำเป็นก้อนแข็ง ทำให้กำลังอัดลดลงและมีปริมาณตะกั่วในน้ำสกัดเพิ่มขึ้นที่ pH 11 ถึง 12.5 ตารางที่ 2.14 แสดงการจัดรูปของ Pb^{+2} ในซีเมนต์

ตารางที่ 2.14 การจัดรูปของ Pb^{+2} ในซีเมนต์ (Cartledge และคณะ, 1991; Cocke และคณะ, 1992; Garavaglia และคณะ, 1994; Gougar และคณะ, 1996)

Pb	การจัดรูปของ Pb^{+2} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน							
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	$Pb(CO)_3$			$C_{0.2}SH[I?]$				
5	$Pb(CO)_3$							
5-1			$PbSO_4?$					$Pb^{+2}?$
<1								Pb^{+2}

2.7.9 แคดเมียม (Cd)

ภายใต้สภาวะที่เป็นด่างสูง ($\text{pH} > 12.5$) แคดเมียมจะอยู่ในรูป CdO_2^{-2} ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางและกรด ($\text{pH} < 8$) จะอยู่ในรูป Cd^{+2} แคดเมียมจะตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์และคาร์บอเนต ในซีเมนต์ CdO จะทำให้เกิดการหน่วงของปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบแคดเมียมอื่น ๆ จะมีผลกระทบที่แตกต่างกัน แคดเมียมจะมีบทบาทสำคัญในสภาวะแวดล้อมของไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก ความเสถียรของ Cd ที่ pH สูง เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวในการรวมตัวทางฟิสิกส์ของ Cd(OH)_2 ใน C_2SH จะเห็นได้ชัดเจนว่า Cd(OH)_2 เร่งการรวมตัวทางฟิสิกส์ ของ Nucleation ของ C_2SH (Cartledge และคณะ, 1991) การจัดรูปเป็นไฮดรอกไซด์จะทำให้แคดเมียมอยู่ในสภาพที่เสถียร ส่วนการจัดรูปเป็นแคดเมียมคาร์บอเนตได้รับการอธิบายโดย Gougar และคณะ (1996) ในการทดลอง Hydrothermal ตรวจพบการดูดติดเล็กน้อยของ Cd บน Tobermolite (C_1SH) มีการสลายตัวและการจัดรูปของ CdCO_3 ที่ pH 6.8 หรือ 6.4 เป็นที่รู้กันว่ามีกรรวมตัวของแคดเมียมใน Zeolite (Analogue of $\text{C}_{0.2}\text{SH}$) ความไม่เสถียรของ Cd มีความเป็นไปได้ที่จะเกี่ยวข้องกับการจัดรูปของ $\text{C}_{0.66}\text{SH}$ ในระหว่าง Diffusion-Controlled Neutralization อย่างไรก็ตามยังไม่ได้มีการพิสูจน์ ภายใต้สภาวะที่เป็นกลางแคดเมียมถูกพิจารณาว่าไม่เสถียร การจัดรูปของ Cd^{+2} ในซีเมนต์ แสดงใน ตารางที่ 2.15

ตารางที่ 2.15 การจัดรูปของ Cd^{+2} ในซีเมนต์ (Cartledge และคณะ, 1991; Gougar และคณะ, 1996)

Cd	การจัดรูปของ Cd^{+2} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	Aft	Minor phase	Solution
13				[S],[E]?				CdO_2^{-2}
12		Cd(OH)_2						
11	Cd(CO)_3			$\text{C}_1\text{SH}[I?]$				
10	Cd(CO)_3			$\text{C}_{0.66}\text{SH}[I?]$				
9	Cd(CO)_3			$\text{C}_{0.2}\text{SH}[I?]$				
<7-8	Cd(CO)_3							Cd^{+2}

2.7.10 โครเมียม (Cr)

ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง ($\text{pH} > 11$) โครเมียมจะอยู่ในรูป Cr^{+2} และมีการจัดรูปเป็นโครเมตไอออน CrO_4^{-2} ที่มีความสามารถในการละลายสูง ซีเมนต์มีความสามารถในการดูดซับ Cr^{+6} ได้น้อย ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ($\text{pH} < 3$) โครเมียมจะอยู่ในสารละลายในรูป CrOH^{+2} ซึ่งมี

การเปลี่ยนแปลง วาเลนซ์ ความสามารถในการคงตัวจะสูง เมื่อสารละลาย Cr_2O_3 หรือ $\text{Cr}(\text{OH})_3$ อยู่ในช่วงระหว่างหรือภายใต้เงื่อนไขการลดลงเล็กน้อยของตัวกลางที่มีความเป็นด่างสูง ($\text{pH} < 13.5$) โครเมียมจะมีบทบาทสำคัญใน CSH และ AFt หรือ AFm ของปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก การรวมตัวของ Cr^{+3} ในโครงสร้างผลึกโดยการแทนที่ Al^{+3} (Polletini และคณะ, 2002; Glasser, 1997) ในทำนองเดียวกันการรวมตัวของ Cr^{+6} ในแคลเซียมอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (AFt และ AFm) ประจุลบของโครเมียมแข่งขันกับประจุคลอไรด์ ซัลเฟต และคาร์บอเนต เพื่อแย่งแทนที่ตำแหน่งเดียวกันในโครงสร้างผลึก มีการสงสัยว่ามีการรวมตัวของ Cr^{+3} เล็กน้อยแทนที่ Si^{+4} ใน C_2SH (Gougar และคณะ, 1996) เป็นที่รู้กันว่ามีการรวมตัวของ Cr^{+3} ในโครงสร้างของ Chabazite ($\text{C}_{0.2}\text{SH}$ Analogue) ความสามารถในการละลายของ Cr^{+3} เกิดขึ้นที่ pH ต่ำกว่า 11 เล็กน้อย มีความไม่เสถียรเกิดขึ้นเล็กน้อยในระหว่าง Diffusion-Controlled Neutralization ที่ pH มากกว่า 3 การชะละลายของตะกั่วอริบายโดย ภัทร กฤตานุสรณ์ (2546) พบว่าการเพิ่มสัดส่วนตะกั่วจากอุตสาหกรรมที่มีโครเมียมในการทำเป็นก้อนแข็ง ทำให้กำลังอัดลดลงและมีปริมาณโครเมียมในน้ำสกัดเพิ่มขึ้นที่ pH 11 ถึง 12.5 ตารางที่ 2.16 แสดงการจัดรูปของ Cr^{+6} , Cr^{+3} ในซีเมนต์

ตารางที่ 2.16 การจัดรูปของ Cr^{+6} , Cr^{+3} ในซีเมนต์ (Gougar และคณะ, 1996; Glasser, 1997; Polletini และคณะ, 2002)

Cr	การจัดรูปของ Cr^{+6} , Cr^{+3} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน							
pH	Carbonates	Hydroxides	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}

2.7.11 ทองแดง (Cu)

ความสามารถในการละลายของทองแดงในสารละลายขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอเนต ถ้าขาดคาร์บอเนตทองแดงจะอยู่ในรูป CuO_2^{-2} ที่ pH มากกว่า 11 การละลายภายใต้สภาวะที่เป็นกรดเริ่มต้นที่ pH 7 ในระหว่าง pH 7 ถึง 11 ทองแดงจะอยู่ในรูป CuO หรือ $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ถ้ามีคาร์บอเนตทองแดงจะตกผลึกในรูป Malachite $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ ที่ pH มากกว่า 7 ทองแดงจะมี

บาทบาทสำคัญใน AFt AFm และ CSH ของปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรก มีการสันนิษฐานว่าการรวมตัวกับผลึกทางเคมีของทองแดงใน CSH (Polletini และคณะ, 2002) ยังไม่มีการตรวจสอบในระยะยาว มีการยืนยันการแทนที่ของ Ca^{+2} โดย Cu^{+2} ใน Tobermorite (C_1SH Analogue) ในทางตรงกันข้ามทองแดงไม่มีการรวมตัวที่ pH 6.5 ภายใต้อิทธิพลของกรดแก่ที่ความเข้มข้นสูง ๆ ทองแดงอยู่ในรูป Brochanite ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$) เป็นที่รู้กันว่า Cu^{+2} เกิดการรวมตัวกับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite ($\text{C}_{0.2}\text{SH}$ analogue) แม้ว่าความไม่เสถียรของทองแดงอาจจะถูกจำกัดโดยการจัดรูปของ Gyrolith gel ($\text{C}_{0.66}\text{SH}$) ในระหว่าง Diffusion-Controlled Neutralization ยังไม่มีการตรวจสอบการแสดงความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาของ AFm และ AFt กับทองแดง ที่ค่า pH น้อยกว่า 7 คาดว่าทองแดงจะไม่เสถียร ปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์อาจถูกหน่วงจากการเคลือบของเม็ดซีเมนต์เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของ $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ทำให้ปฏิกิริยาของ C_3A และโครงสร้างผลึกของ Portlandite ถูกยับยั้ง มีการตรวจสอบพฤติกรรมการชะละลายของแก้วลอยในถ่านหินพบว่าทองแดงอยู่ใน Tenorite (CuO) (Garavalia และคณะ, 1994) การจัดรูปของ Cu^{+2} ในซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.17

ตารางที่ 2.17 การจัดรูปของ Cu^{+2} ในซีเมนต์ (Garavalia และคณะ, 1994; Polletini และคณะ, 2002)

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

2.7.12 โมลิบดีนัม (Mo)

ในสารละลายโมลิบดีนัมสามารถถูกชะละลายได้ เมื่ออยู่ในรูปโมลิบดินेट MoO_4^{-2} ในช่วงที่ pH สูง และอยู่ในรูป HMoO_4^- ในช่วงที่เป็นกรด ในซีเมนต์ที่มีความเข้มข้นของโมลิบดีนัมสูงอาจจะเกิดการตกตะกอนในรูป CaMoO_4 ส่วนโมลิบดินेटถูกรวมตัว ใน ettringite (AFt) อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าไม่มีการรวมตัวของโมลิบดีนัมที่สำคัญเกิดขึ้น ในทาง

ตรงกันข้ามมีการยืนยันว่ามีการรวมตัวอย่างมากใน AFm (Kindness และคณะ, 1994) ไม่มีเอกสารใดกล่าวถึงความสามารถในการชะละลายในสภาพอากาศทั่วไป

2.7.13 นิกเกิล (Ni)

ในช่วง pH ระหว่าง 9 ถึง 11 Ni(OH)_2 เป็นรูปที่เสถียร ในช่วงที่มีความเป็นด่างสูงนิกเกิลจะอยู่ในรูป HNiO_2^- ซึ่งเป็นสารละลาย ในช่วงที่เป็นกลางและเป็นกรดจะอยู่ในรูป Ni^{+2} นิกเกิลมีบทบาทสำคัญใน AFm ของปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ในชั้นแรก ในระบบซีเมนต์นิกเกิลจะอยู่ในรูป Ni-Al ไฮดรอกไซด์ 2 ชั้น (Layered Double Hydroxide) ตามงานวิจัยของ Scheidegger และคณะ (2000) เป็นที่รู้กันว่านิกเกิลสามารถแทนที่แคลเซียมใน Ettringite มีการสันนิษฐานว่า Ni(OH)_2 Gel ถูกรวมตัวหรือถูกดูดซับใน C_2SH (Gougar และคณะ, 1996) นิกเกิลสามารถรวมตัวใน Tobermorite (C_1SH Analogue) ในจำนวนมาก ที่ความเข้มข้นสูงภายใต้สภาวะความเป็นกรดแก่นิกเกิลจะอยู่ในรูปอสัณฐาน ความสามารถในการชะละลายของนิกเกิลอาจจะถูกจำกัดโดยการจัดรูปของ Gyrolith gel ($\text{C}_{0.66}\text{SH}$) ในระหว่าง Diffusion-Controlled Neutralization เป็นที่รู้กันว่านิกเกิลมีการรวมตัวกับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite ($\text{C}_{0.2}\text{SH}$ Analogue) โดยปกติ NiCO_3 เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร ในการชะละลายแล้วลอยถ่านหิน พบ $\text{NiCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Garavaglia และคณะ, 1994) และที่ค่า pH ต่ำกว่า 8 นิกเกิลมีการชะละลายได้รวดเร็ว การจัดรูปของ Ni^{+2} ในซีเมนต์แสดงในตารางที่ 2.18

ตารางที่ 2.18 แสดงการจัดรูปของ Ni^{+2} ในซีเมนต์ (Garavaglia และคณะ, 1994; Gougar และคณะ, 1996; Scheidegger และคณะ, 2000)

Ni	การจัดรูปของ Ni^{+2} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน							
pH	Carbonates	Hydroxides	Sulfates	CSH	AFm	Aft	Minor phase	Solution
13				[S],[E]	?	[I]	Ni-Al-LDH	HNiO_2^-
12		Ni(OH)_2		[S],[E]	?			
11		Ni(OH)_2		C_1SH [I]	?			
10		Ni(OH)_2		$\text{C}_{0.66}\text{SH}$ [I?]	?			
9		Ni(OH)_2		$\text{C}_{0.2}\text{SH}$ [I?]	?			
<8								Ni^{+2}

2.7.14 วานเดียม (V)

ในสารละลาย วานเดียมจะอยู่ในรูป H_2VO_4^- , HVO_4^{2-} หรือ VO_4^{3-} ที่ pH มากกว่า 3 ในช่วงที่มีความเป็นกรดสูงจะอยู่ในรูป VO^{+2} วานเดียมมีความเป็นพิษเล็กน้อย และมีบทบาทสำคัญใน CSH ของปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ในช่วงแรก มีการตรวจพบการรวมตัวของวานเดียมปริมาณเล็กน้อยใน CSH AFt หรือ AFm (Heimann และคณะ, 1992) การชะละลายของวานเดียมคาดว่าจะเกิดขึ้นที่ pH 9 การจัดรูปของ V^{+5} ในซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.19

ตารางที่ 2.19 การจัดรูปของ V^{+5} ในซีเมนต์ (Heimann และคณะ, 1992)

V	การจัดรูปของ V^{+5} ในซีเมนต์							
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การดูดติด (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน							
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}

2.7.15 สังกะสี (Zn)

ในช่วง pH ระหว่าง 8 ถึง 12 ZnO หรือ Zn(OH)_2 เป็นรูปที่เสถียร ซึ่งความสามารถในการละลายได้ของ ZnO ที่ช่วง pH ดังกล่าวจะไม่เกิน 3 ส่วนในล้านส่วน ถ้ามีปริมาณที่สูงกว่านี้จะตกตะกอนในรูป ZnO หรือ $\beta\text{-Zn(OH)}_2$ ส่วน ZnCO_3 จะเกิดขึ้นในช่วง pH เป็นกลาง 7 ถึง 8 ในช่วงที่มีความเป็นด่างสูงสังกะสีจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ ZnO_2^{2-} ถ้า pH น้อยกว่า 7 จะอยู่ในรูป Zn^{+2} สังกะสีมีบทบาทสำคัญใน AFm AFt และ CSH ของปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์ในช่วงแรก ใน AFt สังกะสีสามารถรวมตัวกับแคลเซียม ใน CSH สังกะสีจะถูกดูดซับในรูปไฮดรอกไซด์หรือคาร์บอเนต การรวมตัวโครงสร้างผลึกถูกสันนิษฐานว่าไม่เกิดขึ้น (Gougar และคณะ, 1996) มีการตกตะกอนโดยตรงในรูป $\text{CaZn}_2(\text{OH})_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีการยืนยันว่าสังกะสีมีการรวมตัวใน $\text{C}_{0.66}\text{SH}$ เป็นที่รู้กันว่าสังกะสี มีการรวมตัวกับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite และ Zeolite-P ($\text{C}_{0.2}\text{SH}$ analogue) มีงานวิจัยที่สนับสนุนว่ามีการจัดรูปเป็น Hemimorphite $\text{Zn}_4\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ เมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้น (Ziegler และคณะ, 2001) การชะละลายของสังกะสีเพิ่มขึ้นอย่างมากในระหว่าง Diffusion-Controlled Neutralization ที่ pH 7 การจัดรูปของ Zn^{+2} ในซีเมนต์ แสดงในตารางที่ 2.20

ตารางที่ 2.20 การจัดรูปของ Zn^{+2} ในซีเมนต์ (Gougar และคณะ, 1996; Ziegler และคณะ, 2001)

pH	การจัดรูปของ Zn^{+2} ในซีเมนต์						
	ชนิดของพันธะแบ่งเป็น การคูตติค (S) การรวมตัว (I) และการห่อหุ้ม (E) อยู่ใน						
	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		$Zn(OH)_2$	$C_{0.66}SH$ [I?]	?		ZnO	
9		$Zn(OH)_2$	$C_{0.2}SH$ [I?]	?		ZnO	
7-8	$ZnCO_3$						
<7							Zn^{+2}

2.7.16 ดีบุก (Sn)

ดีบุกในสารละลายจะอยู่ในรูป SnO_2 เกือบตลอดทุก pH ที่ค่า pH มากกว่า 12 ดีบุกจะอยู่ในรูปที่ละลายได้คือ SnO_3^{-2} ดีบุกจะเสถียรใน CSH (Gougar และคณะ, 1996) เนื่องจากความสามารถในการละลายได้เล็กน้อยของ SnO_2 จึงทำให้ดีบุกไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ความรู้ความเข้าใจในปฏิกิริยาที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าระหว่างโลหะและซีเมนต์ผสมน้ำที่ได้กล่าวไว้ด้านบน เป็นประโยชน์อย่างมากในการที่จะช่วยให้เกิดความเข้าใจปรากฏการณ์ที่มองไม่เห็นว่ามีผลกระทบต่อคุณภาพ และคุณสมบัติของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้ว อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาระหว่างซีเมนต์และโลหะ 4 อย่างที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งเป็นหลักฐานที่ยืนยันการเสื่อมลงของคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของซีเมนต์คือความแข็งแรงของซีเมนต์

ความเป็นไปได้ของโลหะในการยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์มี 3 รูปแบบ คือ calcium Complexation, Surface Adsorption และ Protective Coating/Osmotic Brusting (Bishop และคณะ, 2003) แบบแรกในระบบสารเดี่ยว (Pure System) ของ Ca_3SiO_5 และ Ca_2SiO_4 ความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการตกตะกอนของ C-S-H ถ้าบางโลหะสามารถเกิด Complexation กับแคลเซียมในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะก่อให้เกิดการจัดรูปเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ หรือ Chelating Calcium ทำให้แคลเซียมในสารละลายลดลง การเกิด C-S-H ก็จะน้อยลงตามไปด้วย (Bishop และคณะ, 2003) รูปแบบที่ 2 คือโลหะจะคูตติค

อยู่ที่ผิวของซีเมนต์ ทำให้ขัดขวางการสัมผัสระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นจึงเป็นการยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Bishop และคณะ, 2003) กลไกสุดท้ายที่อาจเป็นไปได้คือโลหะจะไปเกาะติดที่ผิวของซีเมนต์แต่น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้เล็กน้อยซึ่งจัดว่าเป็นตัวหน่วง กลไกนี้เรียกว่า Protective Coating/Osmotic brusting ทำให้ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นไปได้ช้าแต่ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยา เพราะว่า เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดแรงดันจากด้านในของเม็ดซีเมนต์ ผลักให้โลหะหลุดออกทำให้น้ำสัมผัสกับซีเมนต์เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไปได้อย่างต่อเนื่องในอัตราปกติ (Bishop และคณะ, 2003)

สำหรับตัวอย่างของการยับยั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยการเกิดกลไกต่าง ๆ ตามที่หาได้จากบทความ ยกตัวอย่างกรณีของสารประกอบตะกั่วและสังกะสี โดยทั่วไปสารประกอบตะกั่วจะเป็นตัวหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน และหาได้ยากมากในกรณีที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลของการหน่วงเชื่อว่าเป็นคุณสมบัติการดูดซับของตะกั่ว สันนิษฐานจากไฮดรอกไซด์ไม่ทำปฏิกิริยากับเม็ดปูน ในทำนองเดียวกันสังกะสีเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าเพราะถูกเคลือบด้วย $Zn(OH)_2$ บนเม็ดซีเมนต์

นอกเหนือจากความเข้าใจในเรื่องโลหะหนักมีผลอย่างไรกับปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์แล้ว ความเข้าใจในเรื่องสารประกอบของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจเพราะจะทำให้ทราบถึงความเสถียรของโลหะหนักแต่ละชนิดได้ ซึ่งสามารถศึกษาได้โดยใช้วิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ในแต่ละขั้นตอนจะสามารถบอกได้ว่าโลหะหนักอยู่ในรูปสารประกอบแบบใด และสามารถบ่งบอกถึงความเสถียรของโลหะหนักได้ เช่น การศึกษาสถานะภาพของโลหะหนักจากสลัดจ์ของโรงงานแผงวงจรไฟฟ้า ซึ่งมีปริมาณของทองแดง ตะกั่ว และสังกะสีสูง แล้วนำมาปรับเสถียรและทำเป็นก้อนแข็งแล้ว พบว่าการสกัดแบบต่อเนื่อง ทำให้ทราบว่าทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี มากกว่า 80 % ถูกชะละลายออกมาในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งแสดงว่าทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี อยู่ในรูปของโลหะไฮดรอกไซด์ที่ตกตะกอนอยู่ที่ผิวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งมีความเสถียรต่ำ (Li และคณะ, 2000)

ดังที่กล่าวมาแล้วไม่เฉพาะความเข้าใจในด้านคุณภาพเท่านั้นแต่ยังรวมด้านปริมาณของพฤติกรรมแบ่งของธาตุที่มีปริมาณเล็กน้อยซึ่งยังไม่มีการศึกษาที่สมบูรณ์ เนื่องจากข้อจำกัดของกลยุทธ์ในการทดลอง การศึกษาสถานะภาพของโลหะในซีเมนต์เพสต์ ความแข็งแรงของมอร์ตาร์ รวมทั้งความเสถียรของโลหะหนัก จะทำให้เข้าใจผลกระทบของโลหะต่อคุณภาพของซีเมนต์และสิ่งแวดลอม ถ้าโลหะมีความเสถียรจะไม่มีผลคุกคามต่อคุณภาพของซีเมนต์และสิ่งแวดลอม ในทางตรงกันข้ามถ้าการรวมตัวของโลหะไม่เสถียรอาจจะทำให้เกิดการทำลายคุณสมบัติของคอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์และมีความสำคัญต่อการชะละลายออกสู่สิ่งแวดลอม

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

3.1.1 การวางแผนการทดลอง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- 1) การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง
- 2) การเตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์
- 3) การดำเนินการทดลอง
- 4) การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้ทำการทดลองศึกษาสภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์หลังจากทำปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมตัวกับน้ำ การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ และการทดสอบการชะละลาย โดยได้แบ่งการทดลองเป็นขั้นตอน คือ

- ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์
- ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาสภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์
- ขั้นตอนที่ 3 การหล่อก้อนมอร์ตาร์และการทดสอบกำลังอัด
- ขั้นตอนที่ 4 ทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์

3.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- ตะแกรงแยกขนาด เบอร์ 200
- เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
- แบบหล่อซีเมนต์
- เตาอบ
- เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต
- เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope)
- เครื่อง XRD (X-Ray Diffraction Spectrometer)
- เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectroscope)
- เครื่องย่อยสลายตัวอย่างด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester)
- เครื่องกวนเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator)

- เครื่อง pH Meter

3.2.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- กรดไฮโดรคลอริก (HCl)
- กรดบอริก (H_3BO_3)
- กรดไนตริก (HNO_3)
- กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
- กรดไฮโดรฟลูออริก (HF)
- แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$)
- โซเดียมอะซิเตด (NaOAc)
- ไฮดรอกซีลามีน ไฮโดรคลอไรด์ ($NH_2.OH.HCl$)
- แอมโมเนียมอะซิเตด (NH_4OAc)
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2)
- สารละลายมาตรฐานของ Ag As Ba Be Cd Co Cr Cu Ga Hg In Mn Ni Pb Se

Sr Tl V และ Zn

3.3 การเตรียมตัวอย่างปูนซีเมนต์

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นตัวอย่างที่ได้จากบริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ซึ่งอยู่ในรูปเม็ดปูน ดังนั้นจึงต้องทำการเตรียมตัวอย่างให้เป็นปูนซีเมนต์โดยการบดเม็ดปูนให้มีลักษณะเป็นผงจากนั้นจึงนำไปผสมกับยิบซัม ($CaSO_4.2H_2O$) เพื่อหวังปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดซาลง ในอัตราส่วนผงปูนต่อยิบซัม เท่ากับ 96 : 4 โดยอัตราส่วนที่ใช้จะเป็นอัตราส่วนจริงที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์โดยทั่วไป เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมือนกับที่จำหน่ายในท้องตลาด ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้งานได้จริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

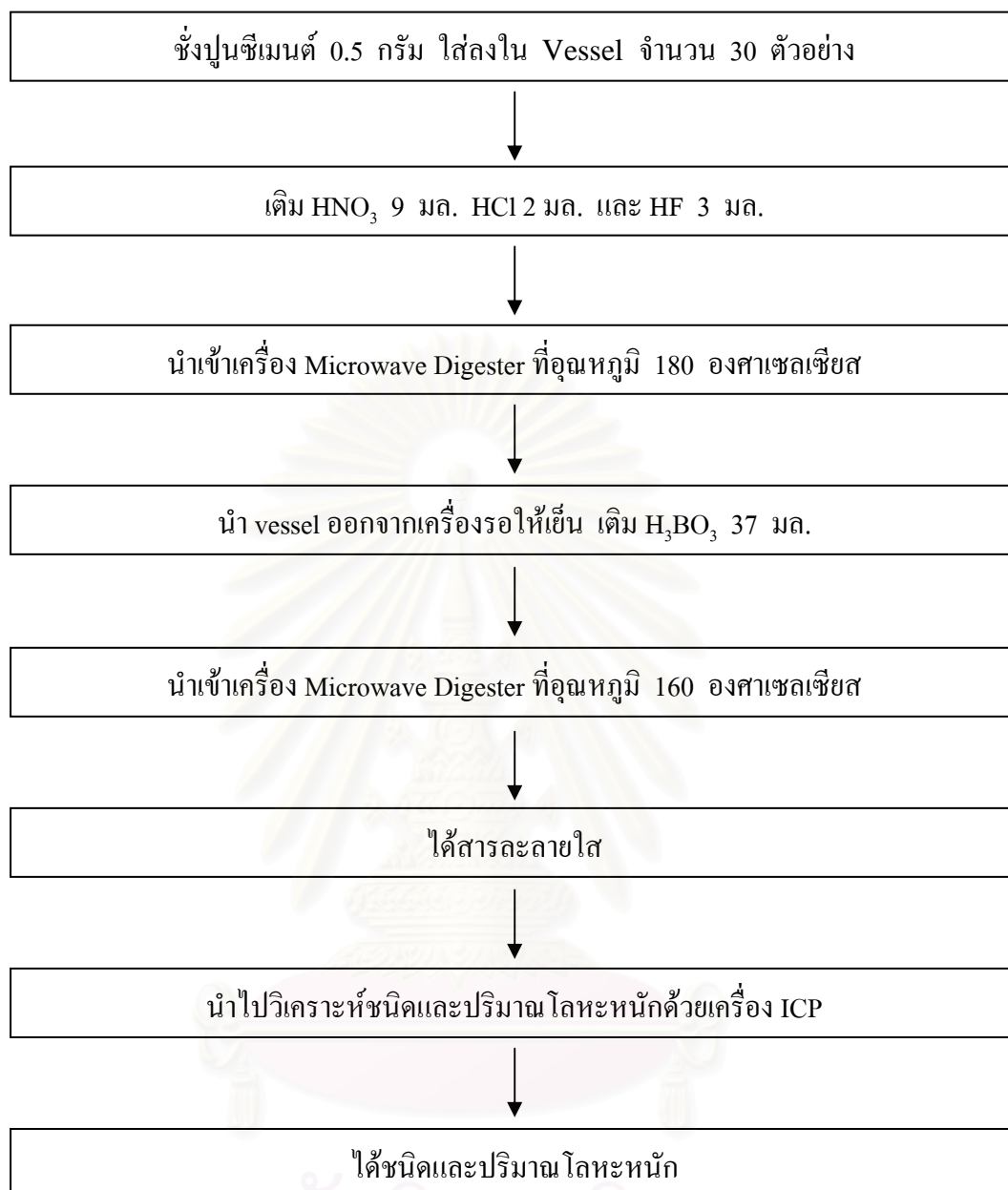
3.4 การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

นำปูนซีเมนต์มาทำการย่อยด้วยเครื่อง Microwave Digester ตาม U.S. EPA Method 3052 จำนวน 30 ตัวอย่าง หลังจากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscopy (ICP) ขั้นตอนการทดลองมีดังนี้

1. ชั่งปูนซีเมนต์หนัก 0.5 กรัม แล้วใส่ลงใน vessel ที่ทำจาก fluoropolymer
2. นำมาเติมกรดไนตริกจำนวน 9 ± 3 มิลลิลิตร กรดไฮโดรคลอริกจำนวน 2 ± 2 มิลลิลิตร เพื่อสร้างเสถียรภาพของโลหะหนักบางชนิด เช่น Ag Ba Sb Fe และ Al เป็นต้น และกรดไฮโดรฟลูออริกจำนวน 3 ถึง 4 ± 0.1 มิลลิลิตร ขึ้นกับปริมาณซิลิกา
3. ปิดฝา Vessel แล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึง 180 องศาเซลเซียสใช้เวลา 5.5 นาที ช่วงที่ 2 คือช่วงอุณหภูมิกคงที่ 180 องศาเซลเซียสใช้เวลา 9.5 นาที และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงลดอุณหภูมิใช้เวลา 5 ถึง 15 นาที
4. เมื่อครบกำหนด นำ Vessel ออกจากเครื่องทิ้งไว้ให้เย็น เติมกรดบอริกจำนวน 37 มิลลิลิตร
5. ปิดฝา Vessel แล้วนำเข้าเครื่องย่อยสลายสารด้วยไมโครเวฟที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึง 160 องศาเซลเซียสใช้เวลา 13 นาที ช่วงที่ 2 คือช่วงอุณหภูมิกคงที่ 160 องศาเซลเซียสใช้เวลา 6 นาที และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงลดอุณหภูมิใช้เวลา 5 ถึง 15 นาที
6. เมื่อครบกำหนดนำ Vessel ออกจากเครื่องทิ้งไว้ให้เย็น ได้สารละลายใส
7. นำไปทำการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณโลหะหนัก

วิธีการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 จะนำสารละลายใสที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP โลหะที่สนใจมีจำนวน 19 ชนิด ประกอบด้วย Ag As Ba Be Cd Co Cr Cu Ga Hg In Mn Ni Pb Se Sr Tl V และ Zn ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาสภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

นำตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่เตรียมไว้ทั้ง 30 ตัวอย่าง มาผสมน้ำในอัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.485 : 1 จากนั้นผสมให้เข้ากัน เทใส่ถุงพลาสติกที่มีซิปล็อค ทำการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 28 และ 60 วัน เมื่อครบกำหนดแล้วนำตัวอย่างมาทำการบดให้ละเอียดแล้วไล่ความชื้นเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยใช้อะซิโตน นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีความชื้นหลงเหลืออยู่ หลังจากนั้นนำไปเข้าสู่ตู้ดูดความชื้น (Desiccator) รอไว้เพื่อนำไปใช้ต่อไป

การศึกษาสถานะภาพของโลหะหนัก

สถานะภาพของโลหะหนักที่ทำการศึกษายกแบ่งเป็นการศึกษาสารประกอบของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ และลักษณะการจับตัวของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ โดยการใช้เครื่องมือและวิธีการในการทดสอบดังนี้

1) เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) สำหรับวัดชนิดสารประกอบโลหะหนักที่มีลักษณะเป็นผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ซึ่งรังสีเอกซ์จะเลี้ยวเบนด้วยมุมต่าง ๆ ที่เป็นค่าเฉพาะตัวและประกอบกันเป็นชุดของเส้นสเปกตรัม (diffractogram) ขึ้นกับโครงสร้างผลึก ทั้งนี้สามารถเทียบลักษณะของ X-ray diffraction pattern กับฐานข้อมูลที่มีอยู่ได้ โดยใช้ปริมาณตัวอย่างในการตรวจวัดประมาณ 0.5 กรัม สิ่งที่ได้ออกจากการวัดคือ กราฟความถี่ของสารประกอบต่าง ๆ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า 2θ (Degrees) และ Relative Intensity

2) วิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) สำหรับวัดชนิดสารประกอบโลหะหนัก โดยวิธีการสกัดแยกสารประกอบโลหะซึ่งละลายได้ในน้ำสกัดที่ต่างชนิดกัน เป็นการเพิ่มความชัดเจนของสารประกอบที่ต้องการศึกษา ในการศึกษาจะใช้วิธีสกัดตามแบบของ Tessier และคณะ (1979) (อ้างถึงใน Li, 2001) โดยมีขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนการทดลองการสกัดโลหะหนักโดยวิธี sequential extraction

สามารถแบ่งขั้นตอนย่อยออกได้เป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การสกัดด้วยแมกนีเซียมคลอไรด์ เพื่อแยกสารที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนง่าย

1.1 ชั่งตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่บดเป็นผงหนัก 5 กรัมใส่ลงในหลอดพลาสติก

ชนิดฟิวจ์

1.2 เติมแมกนีเซียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 M จำนวน 40 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1:8)

1.3 นำไปเข้าเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

1.4 นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออกเก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

2. การสกัดด้วยโซเดียมอะซิเตด เพื่อแยกพันธะคาร์บอเนต

2.1 นำกากที่เหลือจากข้อ 1.4 มาเติมโซเดียมอะซิเตดความเข้มข้น 1 M จำนวน 40 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 8)

2.1 ปรับ pH ให้เท่ากับ 5 ด้วยกรดอะซิติก

2.2 นำไปเข้าเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

2.3 นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออกเก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

3. การสกัดด้วยไฮดรอกซีลามีไฮโดรคลอไรด์ เพื่อแยกพันธะหลักและแมงกานีสออกไซด์

3.1 นำกากที่เหลือจากข้อ 2.4 เทใส่บีกเกอร์ จากนั้นเติมไฮดรอกซีลามีไฮโดรคลอไรด์ ความเข้มข้น 0.04 M ในกรดอะซิติก 25 % โดยปริมาตร จำนวน 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 20)

3.2 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 96 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3.3 นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออกเก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

4. การสกัดด้วยแอมโมเนียมอะซิเตด เพื่อแยกพันธะสารอินทรีย์ และซัลไฟด์

4.1 นำกากที่เหลือจากข้อ 3.3 มาเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 30 % จำนวน 100 มิลลิลิตร (อัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายเท่ากับ 1:20)

4.2 นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง

4.3 รอให้เย็น เติมแอมโมเนียมอะซิเตดความเข้มข้น 3.2 M ในกรดไนตริก 20% โดยปริมาตร

4.4 นำไปเข้าเครื่องกวนเขย่าแบบหมุนเป็นเวลา 30 นาที

4.5 นำออกมาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เทน้ำใสออกเก็บไว้วิเคราะห์ต่อ

5. ส่วนที่เหลือจากการสกัด

5.1 นำผลการทดสอบปริมาณโลหะหนักทั้งหมดที่พบในปูนซีเมนต์จากการย่อยสลายเครื่อง Microwave Digester ลบออกด้วยผลการสกัดในขั้นตอนที่ 1 ถึง 4

วิธีการวิเคราะห์ นำน้ำที่ได้ในแต่ละขั้นตอนไปเข้าเครื่อง ICP เพื่อตรวจสอบสารประกอบของโลหะหนัก

3) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM-6400 Scanning Electron Microscope: SEM) สำหรับตรวจสอบลักษณะการจับตัวกันและการกระจายตัวของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ในระดับ Microstructure โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะถูกยึดติดในแท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกเล็กๆ และฉาบผิวด้วยโลหะผสมระหว่างทองคำกับแพลเลเดียม (Gold-Palladium Alloy) หลักการทำงานจะมีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (primary electron) โดยจะควบคุมจำนวนอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง ๆ (high voltage) โดยใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) โฟกัสให้อิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงาน และเมื่ออิเล็กตรอนตกกระทบ ชิ้นงานจะได้สัญญาณแบบต่าง ๆ เช่น สัญญาณจากอิเล็กตรอนในชิ้นงานที่หลุดออกมา (secondary electron) อิเล็กตรอนที่กระดอนกลับ (backscattered electron) หรือ x-ray สัญญาณแต่ละชนิดจะถูกตรวจวัดโดย detector แต่ละชนิด และแปลผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแปลเป็นภาพและกราฟในที่สุด

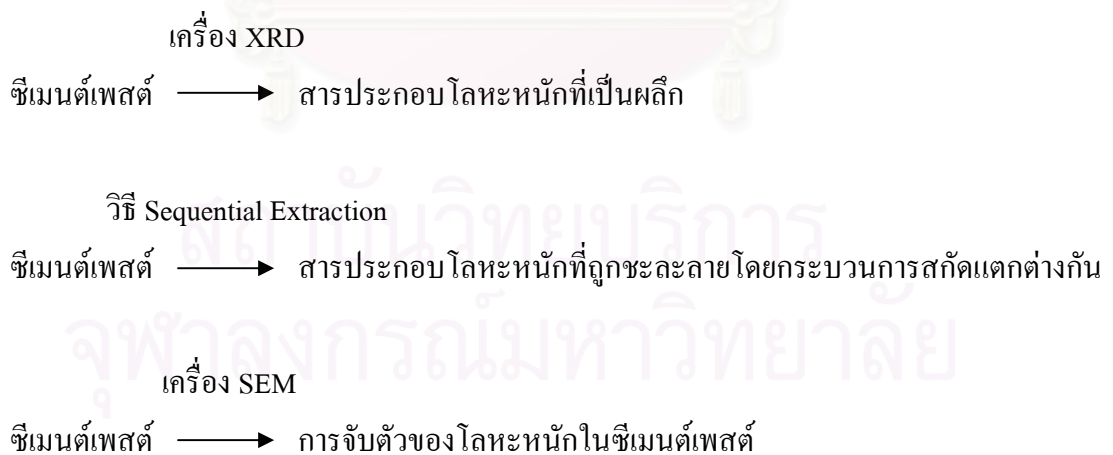
ตัวอย่างในการศึกษาโดยใช้เครื่อง XRD จะเลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณโลหะหนักสูงจากข้อมูลการศึกษาในขั้นที่ 1 จำนวน 9 ตัวอย่าง ระยะเวลาในการบ่ม 5 อายุ ซึ่งการศึกษาโดยเครื่อง XRD จะทำการศึกษาตัวอย่างจำนวน 45 ตัวอย่าง ส่วนการทดสอบด้วยเครื่อง SEM จะเลือกตัวอย่างที่มีปริมาณโลหะหนักสูงมาทำการตรวจวัด ส่วนวิธี Sequential Extraction จะทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างชุดเดียวกับการศึกษาด้วยเครื่อง XRD จำนวน 9 ตัวอย่าง ระยะเวลาในการบ่ม 5 อายุ เช่นเดียวกัน ทำการศึกษาจำนวน 2 ชั่วโมง และมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน ดังนั้นวิธี Sequential Extraction จะทำการศึกษาตัวอย่างทั้งสิ้นจำนวน 360 ตัวอย่าง รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และการศึกษาสถานภาพของโลหะหนัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์



การศึกษาสถานภาพของโลหะหนัก



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์

ขั้นตอนที่ 3 การหล่อก้อนมอร์ตาร์และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

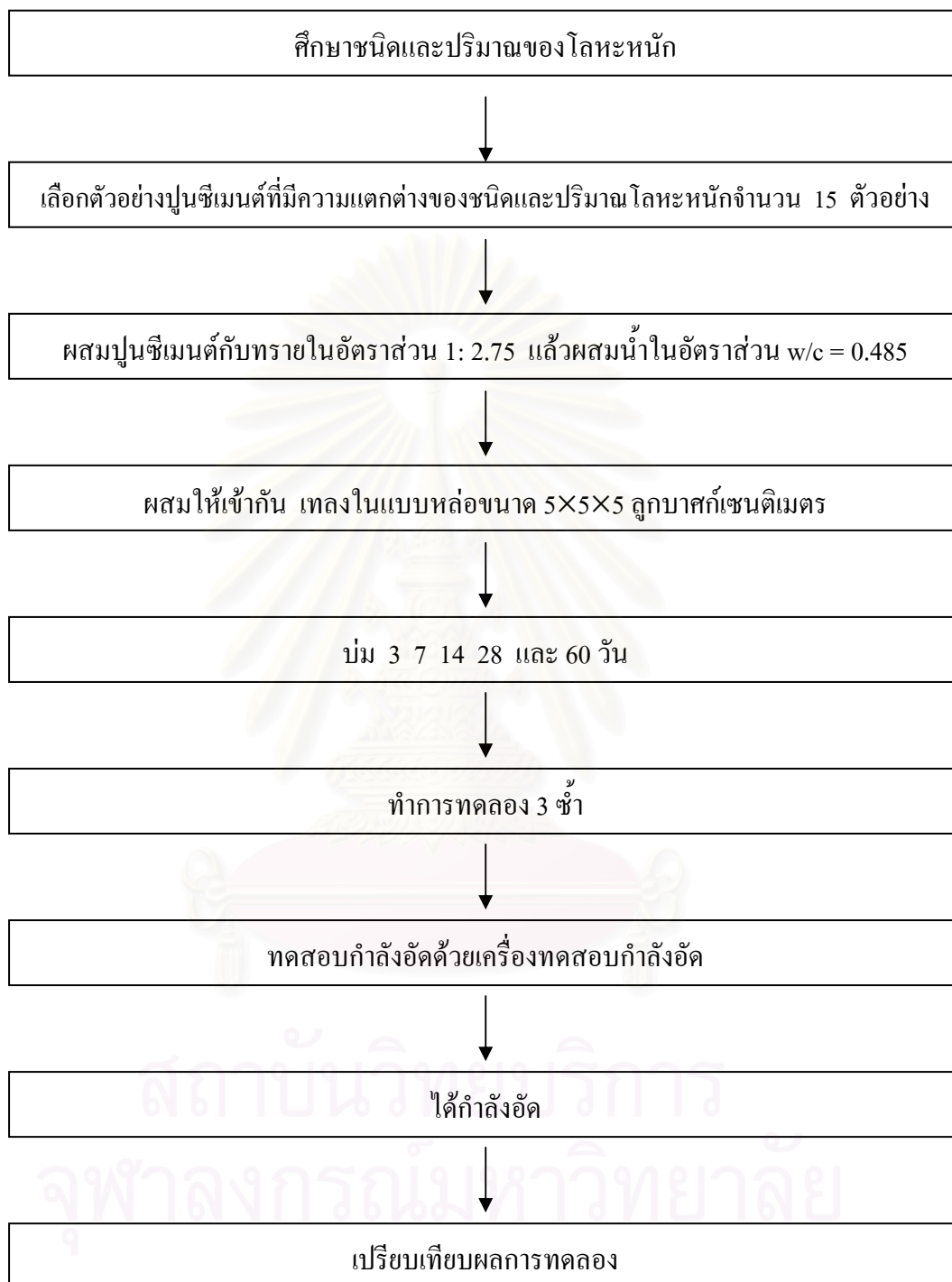
ศึกษาข้อมูลชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 เลือกตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณและชนิดโลหะแตกต่างกันจำนวน 15 ตัวอย่าง โดยใช้หลักเกณฑ์ในการพิจารณา คือ เลือกตัวอย่างที่มีโลหะหนักที่เป็นพิษตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โลหะหนักที่มีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ และโลหะหนักที่มีปริมาณสูงจากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 มาทำการหล่อก้อนมอร์ตาร์โดยบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 28 และ 60 วัน ในแต่ละอายุบ่มจะทำ 3 ซ้ำ และทดสอบกำลังอัดจะทำตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M - 95 ดังนั้นในการศึกษาการหล่อก้อนมอร์ตาร์จะใช้ตัวอย่างในการศึกษา 225 ตัวอย่าง และการทดสอบกำลังรับแรงอัดก็จะใช้ตัวอย่าง 225 ตัวอย่างเช่นเดียวกัน ซึ่งมีวิธีดังนี้และสรุปได้ดังรูปที่ 3.3

1. นำปูนซีเมนต์มาผสมทราย ในอัตราส่วน 1 : 2.75 และนำไปผสมกับน้ำในอัตราส่วน น้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.485
2. ผสมให้เข้ากัน เทลงในแบบหล่อขนาด 5×5×5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยแบ่งการเทเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 32 ครั้งใน 10 วินาที แบ่งเป็น 4 รอบ
3. เมื่อทำการกระทุ้งครบทุกช่องแล้วให้เทซีเมนต์มอร์ตาร์ที่เหลือลงในแบบหล่อให้เต็ม แล้วทำการกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วให้ซีเมนต์มอร์ตาร์สูงกว่าแบบหล่อเล็กน้อย
4. ใช้เกรียงปาดให้ผิวหน้าเรียบ
5. เมื่อหล่อเสร็จเรียบร้อยแล้วทิ้งไว้ในแบบหล่อ 24 ชั่วโมง ก่อนแกะแบบออก
6. นำไปทำการบ่มที่ระยะเวลา 3 7 14 28 และ 60 วัน
7. เมื่อครบกำหนดนำมาวัดขนาดหน้าตัด ความสูง และชั่งน้ำหนักของมอร์ตาร์แต่ละก้อน
8. นำไปทดสอบกำลังอัด
9. เปรียบเทียบผลของโลหะหนักที่มีต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์
10. การคำนวณ

บันทึกแรงอัดสูงสุดที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบ คำนวณหากำลังอัด จากสมการที่ 3.1

$$f_u = P/A \quad (3.1)$$

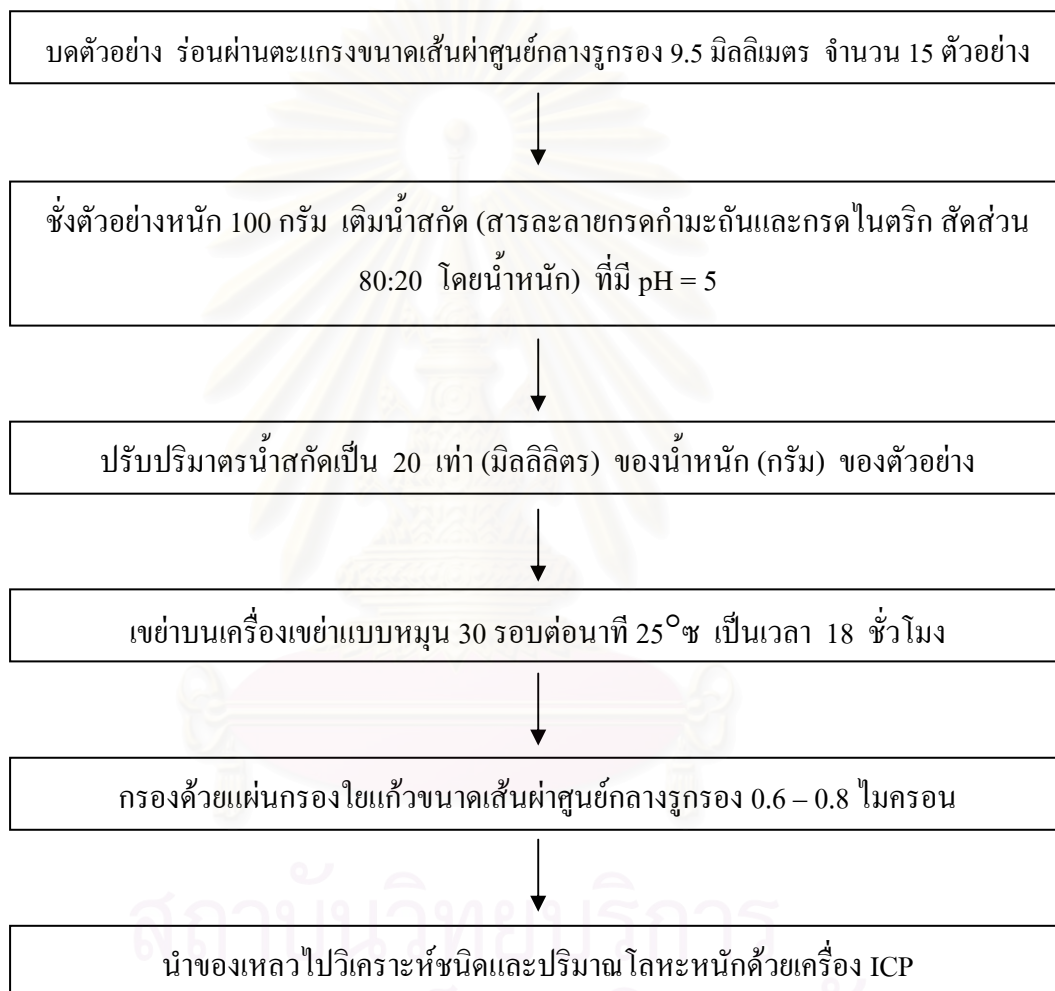
เมื่อ	f_u	คือ	กำลังอัดประลัย (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)
	P	คือ	แรงอัดประลัย (กิโลกรัม)
	A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเซนติเมตร)



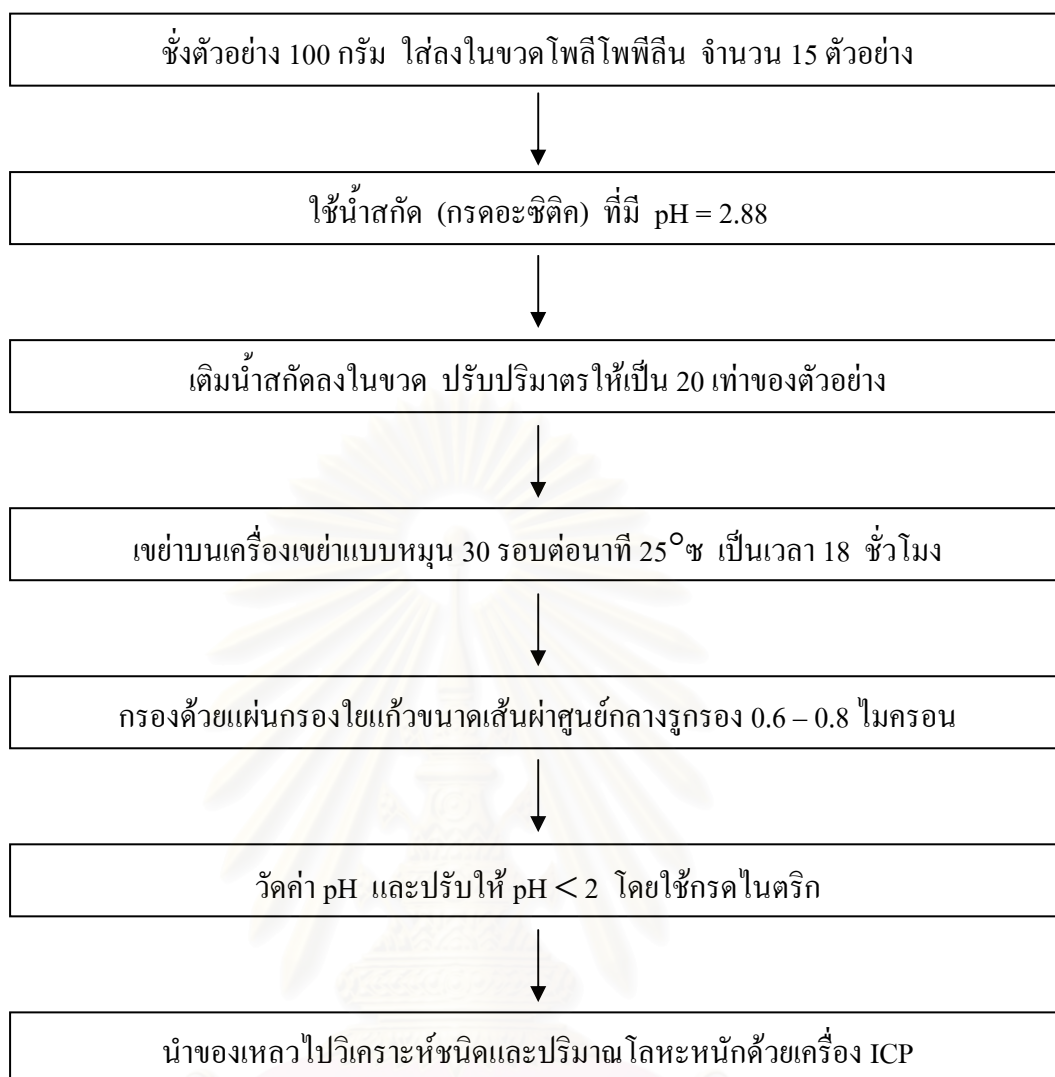
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหล่อก้อนมอร์ตาร์และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ขั้นตอนที่ 4 การทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์

นำก้อนมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ในขั้นตอนที่ 3 มาทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และตามวิธี SW-846 Method 1311 U.S. EPA ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 ส่วนขั้นตอนการทดสอบชะละลายโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ข ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาการชะละลายรวมทั้งสิ้น 30 ตัวอย่าง แบ่งเป็นการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมจำนวน 15 ตัวอย่าง และตาม U.S. EPA จำนวน 15 ตัวอย่างเช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์ ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์ ตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA

3.5 วิเคราะห์ผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการวิจัยจะทำการเปรียบเทียบสถานภาพของโลหะหนักก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน เปรียบเทียบผลของโลหะหนักแต่ละชนิดที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ รวมทั้งเปรียบเทียบผลการชะละลายระหว่างประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) กับวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA ว่าผลการชะละลายของโลหะที่ได้มีแนวโน้มในทางเดียวกันหรือไม่และทำการเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานว่ามีค่าเกินกำหนดหรือไม่ ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการนำมาปรับปรุงการควบคุมปริมาณการเติมวัตถุเติมและเชื้อเพลิงที่เหมาะสม โดยไม่ให้เกิดผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์และสิ่งแวดล้อม รวมทั้งสร้างความมั่นใจต่อผู้บริโภคในการซื้อปูนซีเมนต์ไปใช้งาน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

ผลการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ จากการวิเคราะห์โลหะทั้งหมดจำนวน 19 ธาตุซึ่งที่กล่าวไปแล้วในขั้นตอนการทดลอง พบว่ามีโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่น่าสนใจจำนวน 11 ธาตุ คือ แบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) ซีลีเนียม (Se) สตรอนเชียม (Sr) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) ส่วนที่เหลืออีก 7 ธาตุมีปริมาณน้อยมากคือ น้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ได้แก่ เงิน (Ag) สารหนู (As) แบริลเลียม (Be) แคดเมียม (Cd) แกลเลียม (Ga) ปรอท (Hg) และเทลลูเรียม (Te) ส่วนอีกหนึ่งธาตุที่เหลือคือ อินเดียม (In) ไม่มีข้อมูลเนื่องจากความผิดพลาดในการตรวจวัดทำให้ไม่มีผลการทดลอง ดังข้อมูลในภาคผนวก ก. และรูปที่ 4.1 ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์โดยรวมได้ดังนี้คือ มีแมงกานีสในปริมาณสูงที่สุดมีค่าอยู่ในช่วง 315 ถึง 501 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม รองลงมาเป็น สตรอนเชียม มีค่าอยู่ในช่วง 148 ถึง 303 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากข้อมูลและกราฟที่ได้จะเห็นได้ว่าในแต่ละวันจะมีชนิดและปริมาณโลหะหนักที่แตกต่างกัน โดยสามารถแบ่งเป็นช่วงได้ 4 ช่วง คือ ช่วงแรกตัวอย่างปูนซีเมนต์วันที่ 14/09/47 ถึง 21/10/47 ช่วงที่สองคือวันที่ 22/10/47 ถึง 26/10/47 ช่วงที่สามคือวันที่ 06/01/48 ถึง 01/02/48 และช่วงสุดท้ายคือวันที่ 03/02/48 ถึง 09/02/48 ในช่วงแรกพบว่ามีปริมาณแมงกานีสสูงที่สุด รองลงมาเป็นสตรอนเชียม และถัดไปเป็น วาเนเดียม โครเมียม และสังกะสี ตามลำดับ ส่วนในช่วงที่สองพบว่า มีปริมาณแมงกานีสสูงที่สุดรองลงมาเป็นสตรอนเชียม และถัดไปเป็นสังกะสี ทองแดง และวาเนเดียม ตามลำดับ ในช่วงที่สามพบว่ามีปริมาณแมงกานีสสูงที่สุด ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าในช่วงแรกและช่วงที่สอง รองลงมาเป็นสตรอนเชียม และถัดไปเป็น แบเรียม วาเนเดียม และสังกะสี ตามลำดับ ส่วนในช่วงสุดท้ายจะพบว่ามีแมงกานีสในปริมาณสูงที่สุด รองลงมาเป็นสังกะสี และถัดไปเป็นสตรอนเชียม แบเรียม และวาเนเดียม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้นำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลชนิดและปริมาณโลหะหนักของวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตในภาคผนวก ข ซึ่งศึกษาโดยคุณรุจยา บุญญานูวัตร ซึ่งแบ่งวัตถุดิบและเชื้อเพลิงที่เข้าสู่กระบวนการผลิตออกเป็น 4 ชนิดหลัก ๆ ดังนี้

- 1) วัตถุดิบหลัก ได้แก่ หินปูน แร่เหล็ก หินเซลอะลูมินาสูง และหินเซลซิลิกาสูง
- 2) วัตถุดิบทดแทน ได้แก่ ถ้ำลอย ถ้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งต่างเป็นกากของเสียจากอุตสาหกรรมที่เข้าร่วมในการผลิต

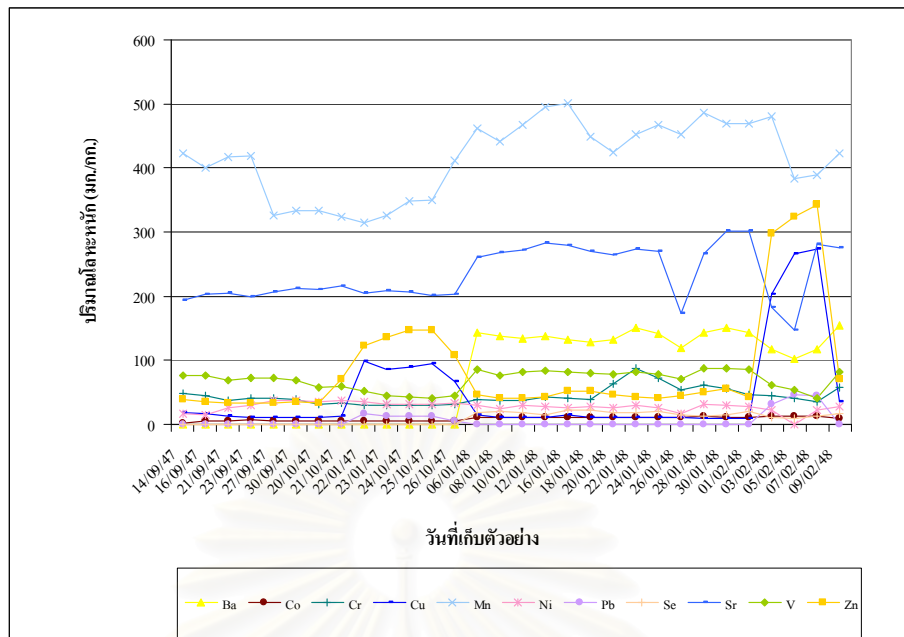
3) เชื้อเพลิงหลัก ได้แก่ Main Burner (ส่วนผสมของถิกไนต์ บิทูมินัส และถ่านหิน) ซึ่งทำให้เกิดการเผาไหม้ในเตาเผา

4) เชื้อเพลิงทดแทน ได้แก่ กากถิกไนต์ และส่วนผสมของกากอาหารสัตว์ ได้แก่ กากผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ กากข้าวโพด แกลบ และเศษถูผลิตภัณฑ์(บรรจุอาหารสัตว์)

จากข้อมูลในภาคผนวก ก และ ข พบว่าโลหะหนักที่พบในปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่ เช่น แบเรียม โคบอลต์ โครเมียม ทองแดง แมงกานีส นิกเกิล ตะกั่ว ซีลีเนียม วาเนเดียม และสังกะสี น่าจะมีผลมาจากวัตถุดิบหลัก รองลงมาคือมีผลมาจากวัตถุดิบทดแทน ส่วนสตรอนเชียม น่าจะมีผลมาจากเชื้อเพลิงหลัก รองลงมาคือวัตถุดิบทดแทน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณโลหะหนักที่ตรวจพบส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐาน ยกเว้นทองแดงที่มี 3 ตัวอย่างจากทั้งหมด 30 ตัวอย่างที่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ใช้เป็นเกณฑ์ในการผลิตปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากมีปริมาณของทองแดงที่เกินมาตรฐานมีผลต่อคุณภาพของปูนซีเมนต์ ดังนั้นควรจะมีการตรวจสอบวัตถุดิบหลัก และวัตถุดิบทดแทนก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้ปูนซีเมนต์ที่ผลิตได้มีค่าทองแดงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในปูนซีเมนต์กับค่ามาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่โรงงานยอมรับได้ (บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด มหาชน)

โลหะหนัก	ค่ามาตรฐานที่โรงปูนยอมรับได้ (mg/kg)	ค่าที่ตรวจวัดได้จากการทดลอง (mg/kg)
As	< 120	< 0.09 - 19
Cd	< 2.5	< 0.1
Cr	< 750	29 - 73
Cu	< 150	9 - 274
Hg	< 2	< 0.003
Ni	< 500	14 - 38
Pb	< 500	< 0.11 - 17
Tl	< 5	< 0.24
V	< 200	40 - 88
Zn	< 500	33 - 342



รูปที่ 4.1 ชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละวันในช่วงระยะเวลาของการเก็บตัวอย่าง

4.2 ผลการศึกษาสถานะภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์

4.2.1 ผลการศึกษาสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึกโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

การวิเคราะห์ใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์จำนวน 9 ตัวอย่าง โดยเลือกมาจากการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่มีในปูนซีเมนต์จากขั้นตอนที่ 4.1 หลักเกณฑ์การพิจารณาในการเลือกตัวอย่าง คือ เลือกตัวอย่างที่มีโลหะหนักที่เป็นพิษตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โลหะหนักที่มีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ และโลหะหนักที่มีปริมาณสูง โดยตัวอย่างที่เลือกจำนวน 9 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างวันที่ 22/10/47 26/10/47 06/01/48 16/01/48 18/01/48 22/01/48 03/02/48 05/02/48 และ 07/02/48 จากนั้นนำตัวอย่างมาทำเป็นซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน แล้วนำมาทำการศึกษาสารประกอบของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ซึ่งผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก จากนั้นทำการเลือกตัวอย่างที่มีการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบที่ชัดเจนจำนวน 4 ตัวอย่าง คือตัวอย่างวันที่ 26/10/47 06/01/48 18/01/48 และ 07/02/48 มาทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับฐานข้อมูลซึ่งได้ผลการทดลองแสดงดังภาคผนวก ง สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้ จากรูปที่ ง.1 เป็นตัวอย่างปูนซีเมนต์ของวันที่ 26/10/47 พบว่าอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นจะมี Ca(OH)_2 เพิ่มขึ้น และมี C_3S และ C_2S ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่ามีแมงกานีส (Mn) สตรอนเชียม (Sr) วาเนเดียม (V) และ สังกะสี (Zn) ในรูปของออกไซด์ ที่อายุบ่ม 3 วันพบ CuCr_2O_4

$V_2O_5 \cdot 5H_2O$ และ ZnO ที่อายุบ่ม 7 วันพบ $Sr_3Mn_2O_7$ ที่อายุบ่ม 14 วันพบ $Ca_3Mn_2O_7$ ที่อายุบ่ม 28 วันพบ Cu_5Zn_8 Ni_6Zn_4O $SrMnO_3$ Sr_2MnSiO_7 และ ZnO_2 และที่อายุบ่ม 60 วันพบ $Cu_{0.85}Mn_{0.15}Cr_2S_4$ SrV_6O_{11} และ $SrZn_2Si_2O_7$

รูปที่ ง.2 เป็นตัวอย่างปูนซีเมนต์ของวันที่ 06/01/48 พบว่าอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นจะมี $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้น และมี C_3S และ C_2S ลดลงเช่นเดียวกันกับตัวอย่างวันที่ 26/10/47 ที่อายุบ่ม 3 วันพบ $CuCrMnO_4$ และ $SrMnO_3$ ที่อายุบ่ม 7 วันพบ $SrMnO_3$ ที่อายุบ่ม 14 วันพบ Al_8Cr_3 ที่อายุบ่ม 28 วันพบ $MnSiO_3$ Ca_2SiO_4 และ $Fe_{0.716}V_{1.284}O_4$ และที่อายุบ่ม 60 วันพบ Ca_2MnO_4 $FeMnO_3$ $Fe_3Mn_2Si_3O_{12}$ FeV_2O_4 และ Mn_3O_4

รูปที่ ง.3 เป็นตัวอย่างปูนซีเมนต์ของวันที่ 18/01/48 พบว่าอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นจะมี $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้น และมี C_3S และ C_2S ลดลงเช่นเดียวกัน ที่อายุบ่ม 3 วันพบ $CaZn_2Si_2O_7$ และ $SrMnO_3$ ที่อายุบ่ม 7 วันพบ $CaZn_2Si_2O_7 \cdot H_2O$ Sr_2MnO_4 และ $ZnMnO_3$ ที่อายุบ่ม 14 วันพบ MnO $MnSiO_3$ ZnO ที่อายุบ่ม 28 วันพบ $CaMnSi_2O_6$ และที่อายุบ่ม 60 วันพบ $Ca_3MnSi_3O_{12}$ $CuV_2O_6 \cdot 2H_2O$ และ V_2O_3

รูปที่ ง.4 เป็นตัวอย่างปูนซีเมนต์ของวันที่ 07/02/48 พบว่าอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นจะมี $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้น และมี C_3S และ C_2S ลดลงเช่นเดียวกัน ที่อายุบ่ม 3 วันพบ $CaMnSi_2O_6$ $CaCuO_2$ และ $Sr_3Al_4O_9 \cdot 2H_2O$ ที่อายุบ่ม 7 วันพบ $CaMnSi_2O_6$ $CuCrMnO_4$ และ ZnO ที่อายุบ่ม 14 วันพบ $CuMn_6SiO_{12}$ $CuCrMnO_4$ $Sr_3Al_3O_{51}$ $SrAl_2Si_4O_{12} \cdot 6H_2O$ และ ZnO ที่อายุบ่ม 28 วันพบ $CaMnSi_4O_{10}$ $Sr_3Al_3O_{51}$ $SrAl_3O_5(OH)$ และ ZnO ส่วนที่อายุบ่ม 60 วันพบ $CaMnSiO_6$ $Sr_2Al_2SiO_7$ และ ZnO

จากผลการทดลองทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่ามี $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้นอย่างมาก และมี C_3S และ C_2S ลดลงตามอายุบ่มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเครื่อง XRD สามารถวัดได้เฉพาะสารประกอบที่เป็นผลึกจึงทำให้ตรวจพบ $Ca(OH)_2$ เพิ่มขึ้นตามอายุบ่ม ส่วนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตไม่ได้เป็นผลึกเครื่อง XRD จึงไม่สามารถตรวจวัดได้ นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ที่พบจะอยู่ในรูปออกไซด์ และรวมตัวกับแคลเซียม สามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สารประกอบโลหะหนักที่พบในซีเมนต์เพสต์ จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

อายุป้อม (วัน)	วันที่			
	26/10/47	06/01/48	18/01/48	07/02/48
3	CuCr ₂ O ₄ , V ₂ O ₅ .5H ₂ O และ ZnO	CuCrMnO ₄ และ SrMnO	CaZn ₂ Si ₂ O ₇ และ SrMnO ₃	CaMnSi ₂ O ₆ , CaCuO ₂ และ Sr ₃ Al ₄ O ₉ .2H ₂ O
7	Sr ₃ Mn ₂ O ₇	SrMnO ₃	CaZn ₂ Si ₂ O ₇ .H ₂ O , Sr ₂ MnO ₄ และ ZnMnO ₃	CaMnSi ₂ O ₆ , CuCrMnO ₄ และ ZnO
14	Ca ₃ Mn ₂ O ₇	Al ₈ Cr ₅	MnO , MnSiO ₃ และ ZnO	CuMn ₆ SiO ₁₂ , CuCrMnO ₄ , Sr ₃ Al ₃₂ O ₅₁ , SrAl ₂ Si ₄ O ₁₂ . 6H ₂ O และ ZnO
28	Cu ₅ Zn ₈ , SrMnO ₃ , Ni.6Zn ₄ O และ ZnO ₂	MnSiO ₃ , Ca ₂ SiO ₄ และ Fe _{0.716} V _{1.284} O ₄	CaMnSi ₂ O ₆	CaMnSi ₄ O ₁₀ , Sr ₃ Al ₃₂ O ₅₁ , SrAl ₃ O ₅ (OH) และ ZnO
60	Cu _{0.85} Mn _{0.15} Cr ₂ S ₄ , SrV ₆ O ₁₁ และ SrZn ₂ Si ₂ O ₇	Ca ₂ MnO ₄ , FeMnO ₃ , Mn ₃ O ₄ Fe ₃ Mn ₂ Si ₃ O ₁₂ และ FeV ₂ O ₄	Ca ₃ MnSi ₃ O ₁₂ , CuV ₂ O ₆ .2H ₂ O และ V ₂ O ₃	CaMnSiO ₆ , Sr ₂ Al ₂ SiO ₇ และ ZnO

4.2.2 ผลการศึกษาสารประกอบโลหะหนักที่ถูกชะละลายโดยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง

(Sequential Extraction)

การวิเคราะห์สารประกอบของโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง ใช้ตัวอย่างในการวิเคราะห์เป็นตัวอย่างชุดเดียวกันกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ผลการวิเคราะห์สารประกอบของโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง ได้ทำการสรุปแยกเป็นโลหะแต่ละชนิด ดังรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.12 ส่วนข้อมูลเป็นร้อยละในแต่ละขั้นของการสกัดแบบต่อเนื่องแสดงดังภาพผนวก จ

โดยที่การสกัดในแต่ละขั้นตอนมีความหมายดังนี้

ขั้นที่ 1 คือ การสกัดพันธะโลหะที่เกิดการแลกเปลี่ยนได้ง่าย

ขั้นที่ 2 คือ การสกัดโลหะที่มีพันธะคาร์บอเนต

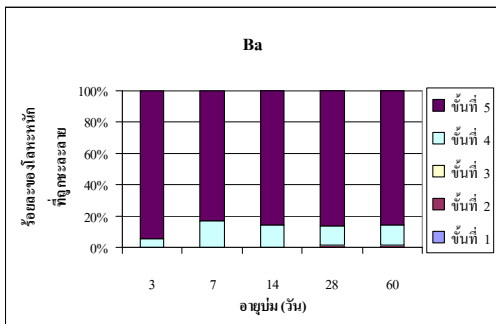
ขั้นที่ 3 คือ การสกัดโลหะที่มีพันธะกับเหล็กและแมงกานีสออกไซด์

ขั้นที่ 4 คือ การสกัดโลหะที่มีพันธะกับสารอินทรีย์และซัลไฟด์

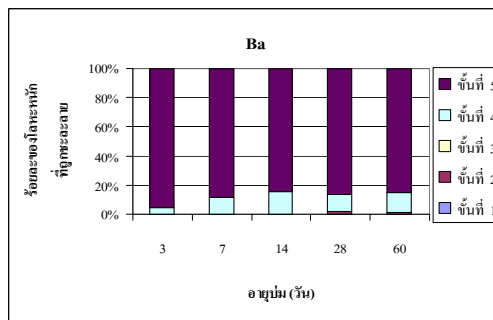
ขั้นที่ 5 คือ โลหะที่เหลือจากทุกขั้นตอน (Residual Fraction)

แบเรียม (Ba) จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าแบเรียม มีการชะละลายในขั้นตอนที่ 4 ประมาณ 4.5 % ถึง 7 % แสดงว่าแบเรียมอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์ เมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นมีการชะละลายออกมาในขั้นที่ 2 เล็กน้อย ซึ่งแสดงว่าแบเรียมมีการสร้างพันธะคาร์บอเนต ที่อายุบ่ม 14 28 และ 60 วัน แต่โดยรวมประมาณ 80 % จะไม่มีการชะละลายออกมา ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบเรียมมีความเสถียร

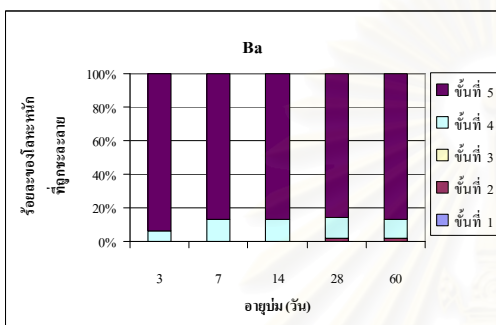
โคบอลต์ (Co) จากรูปที่ 4.3 พบว่าโคบอลต์มีการชะละลายออกมาไม่ถึง 1 % ในขั้นที่ 1, 2 และ 4 ส่วนในขั้นที่ 3 มีการชะละลายออกมาน้อยกว่า 7 % การชะละลายในขั้นนี้แสดงว่าโคบอลต์มีการสร้างพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ แต่โดยรวมประมาณ 90 % โคบอลต์อยู่ในขั้นตอนที่ 5 ซึ่งแสดงว่าโคบอลต์มีความเสถียรสูง และเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้นจะพบว่าโลหะถูกชะละลายในขั้นที่ 3 ลดลง แสดงว่าโคบอลต์มีการสร้างพันธะใหม่ที่มีความเสถียรสูงขึ้น



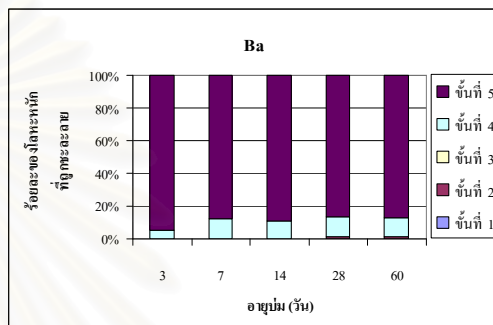
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 06/01/48



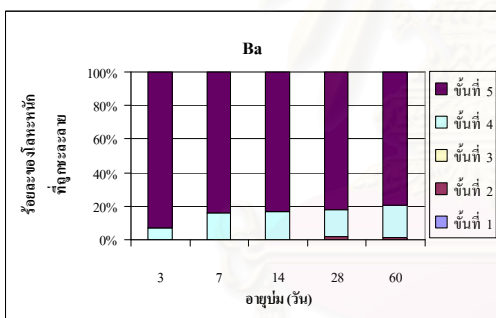
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 16/01/48



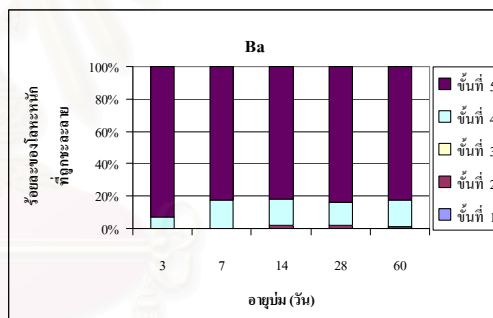
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 18/01/48



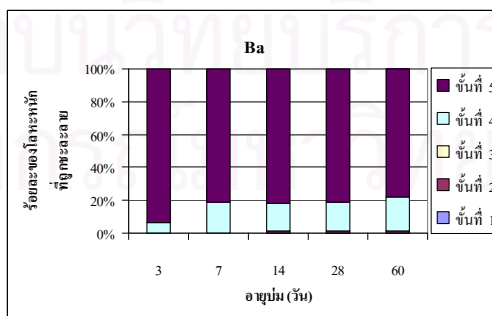
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/01/48



(จ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48

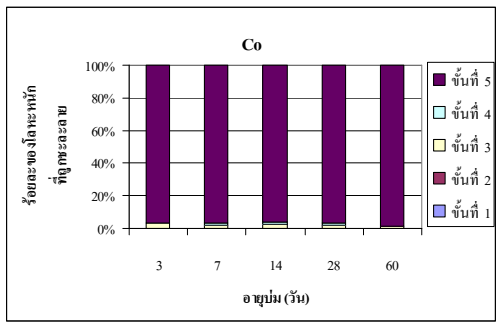


(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 05/02/48



(ช) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

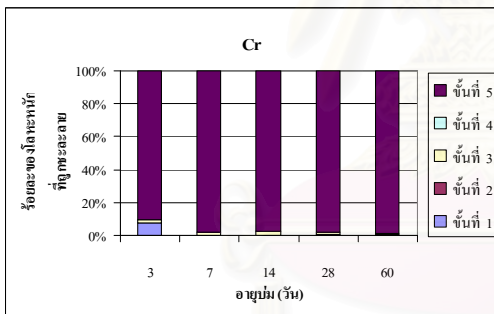
รูปที่ 4.2 ร้อยละของการชะละลายของแบเรียม (Ba) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง



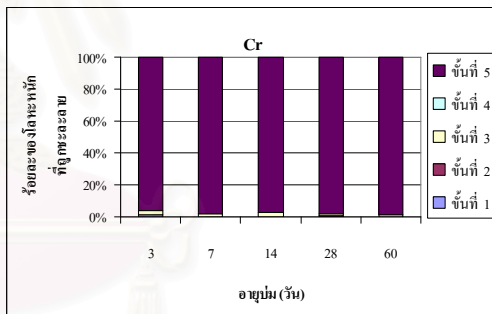
(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ วันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.3 ร้อยละของการชะละลายของโคบอลต์ (Co) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

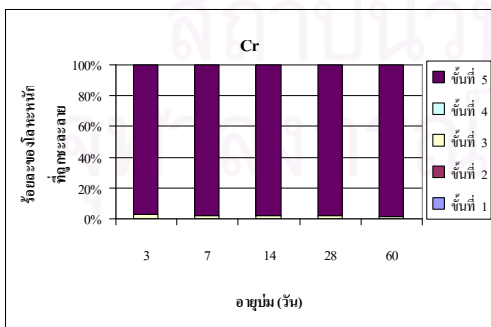
โครเมียม (Cr) จากรูปที่ 4.4 พบว่าโครเมียมมีการชะละลายออกมาไม่ถึง 1 % ในชั้นที่ 1, 2 ยกเว้นในวันที่ 22/10/47 ที่โครเมียมถูกชะละลายในชั้นตอนที่ 1 สูงที่อายุบ่ม 3 วัน ประมาณ 7% และ ในชั้นที่ 3 มีโครเมียมมีการชะละลายน้อยกว่า 4% ส่วนในชั้นที่ 4 ไม่มีการชะละลายออกมา แสดงให้เห็นว่าโครเมียมมีความเสถียรสูงเนื่องจากส่วนใหญ่อยู่ประมาณ 90 % อยู่ในชั้นตอนที่ 5 นอกจากนี้ยังพบว่าโครเมียมมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น



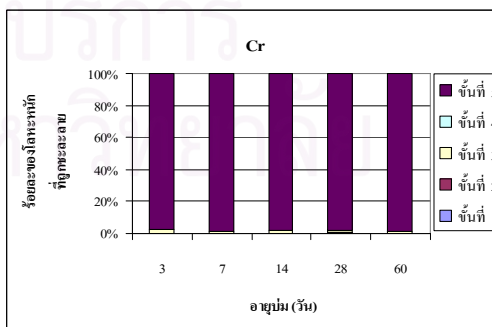
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/10/47



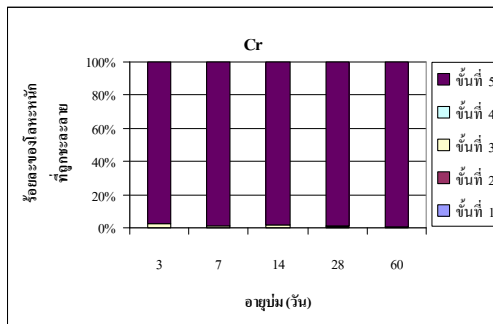
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 26/10/47



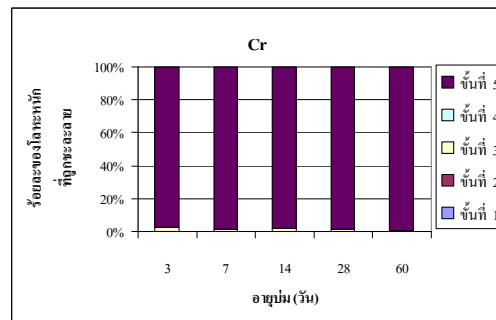
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 06/01/48



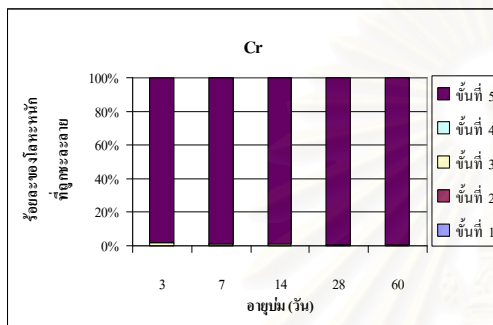
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 16/01/48



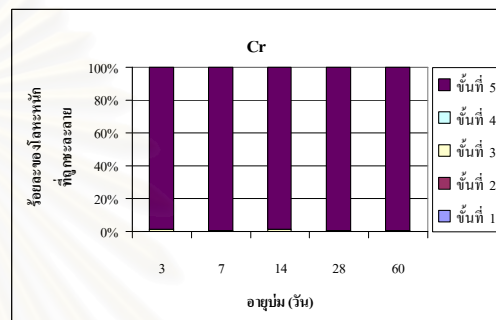
(จ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 18/01/48



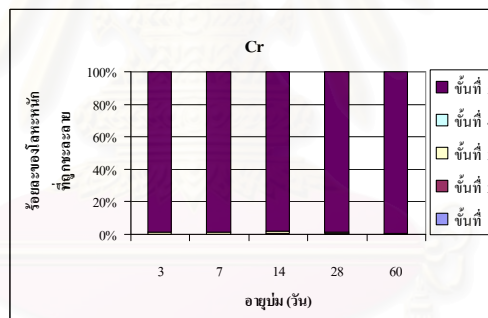
(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/01/48



(ช) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48



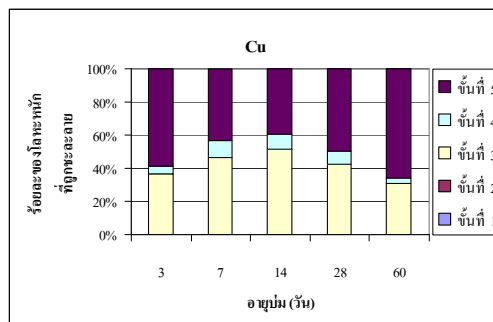
(ซ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 05/02/48



(ณ) ซีเมนต์เพสต์ วันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.4 ร้อยละของการชะละลายของโครเมียม (Cr) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

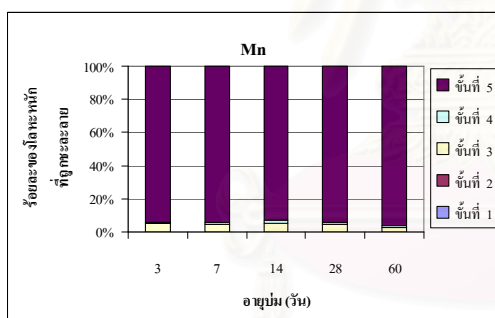
ทองแดง (Cu) จากรูปที่ 4.5 พบว่าทองแดงมีการชะละลายออกมาสูงสุดในชั้นที่ 3 ประมาณ 30 % ถึง 60 % และมีการชะละลายในชั้นที่ 4 ประมาณ 2 % ถึง 12 % แสดงให้เห็นว่าทองแดงอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ส่วนใหญ่ และยังอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์บางส่วน ผลการศึกษาที่ผ่านมาในหัวข้อ 2.7.11 ซึ่งกล่าวว่า ความสามารถในการชะละลายของทองแดงขึ้นอยู่กับปริมาณของคาร์บอนเนต ถ้ามีคาร์บอนเนตทองแดงจะมีความเสถียร แต่จากผลการทดลองไม่พบว่าทองแดงถูกชะละลายในชั้นตอนที่ 2 ดังนั้นจึงแสดงว่าทองแดงไม่ได้เกิดพันธะคาร์บอนเนต ทำให้ทองแดงมีความเสถียรต่ำ



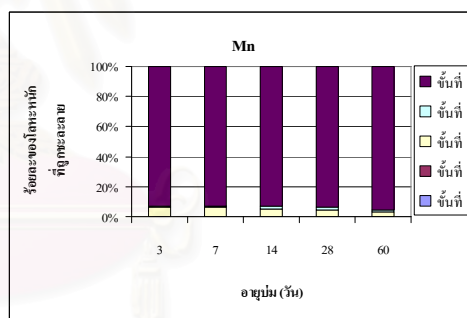
(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.5 ร้อยละของการชะละลายของทองแดง (Cu) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

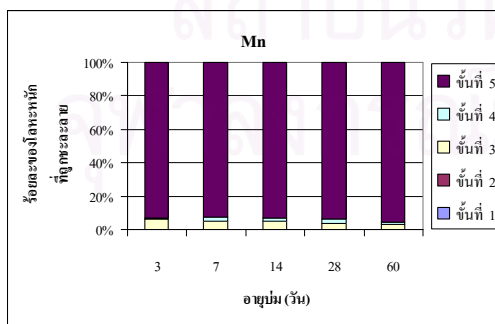
แมงกานีส (Mn) จากรูปที่ 4.6 พบว่าแมงกานีสมีการชะละลายออกมาในชั้นที่ 3 ประมาณ 2 % ถึง 7 % และมีการชะละลายในชั้นที่ 4 น้อยกว่า 2.5 % แสดงให้เห็นว่าแมงกานีสอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์บางส่วน รวมทั้งอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์เล็กน้อย แต่ส่วนใหญ่แมงกานีสมากกว่า 90 % ไม่ถูกสกัดออกมา แสดงว่าแมงกานีสมีความเสถียรสูง



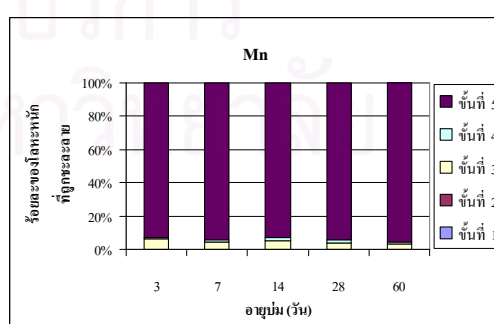
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/10/47



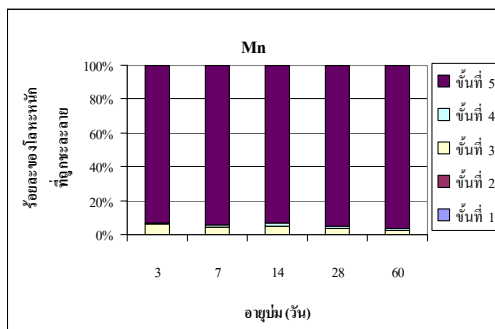
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 26/10/47



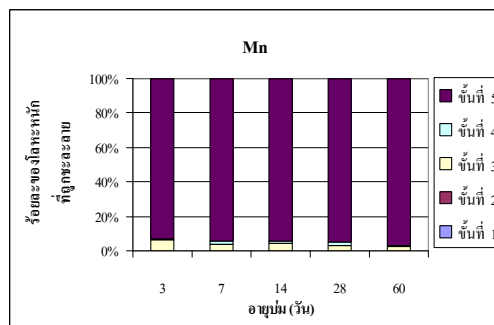
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 06/01/48



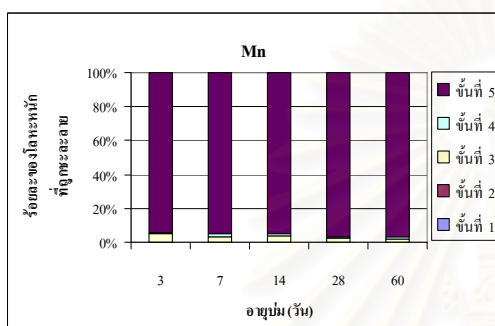
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 16/01/48



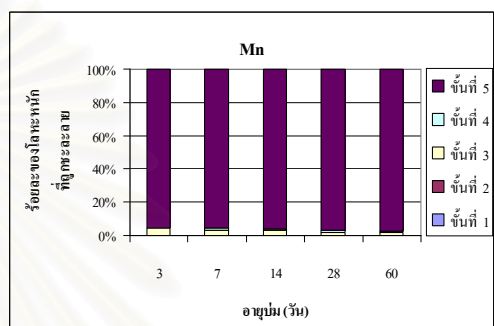
(จ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 18/01/48



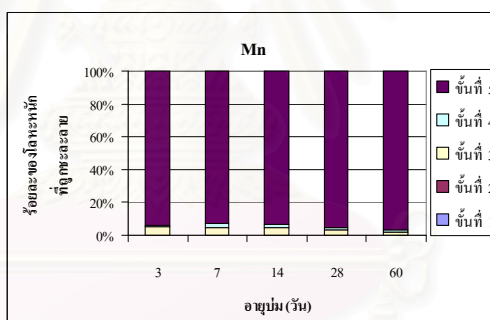
(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/01/48



(ช) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48



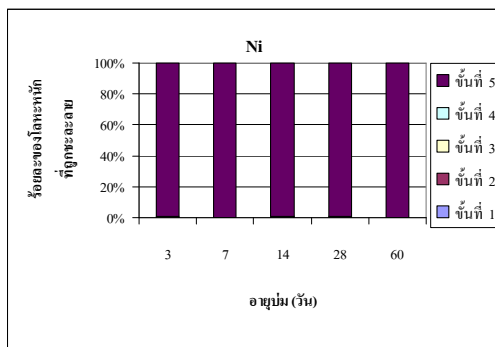
(ฅ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 05/02/48



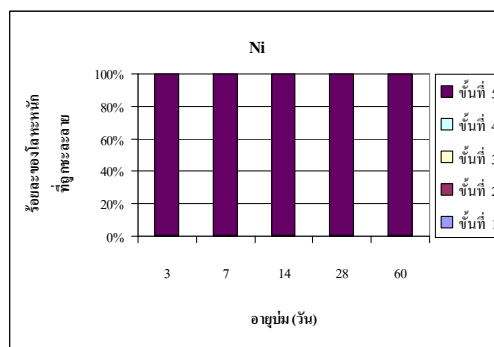
(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.6 ร้อยละของการชะละลายของแมงกานีส (Mn) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

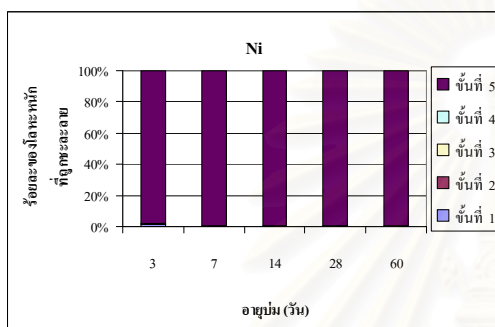
นิกเกิล (Ni) จากรูปที่ 4.7 พบว่านิกเกิลมีการชะละลายออกมาในชั้นที่ 1 ถึง 4 น้อยกว่า 1 % ดังนั้นนิกเกิลจึงมีความเสถียรสูง จากผลการศึกษาที่ผ่านมาในหัวข้อ 2.7.13 พบว่ารูปที่เสถียรของนิกเกิล คือ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ซึ่งพันธะของไฮดรอกไซด์ไม่ได้อยู่ในขั้นตอนการสกัดทั้ง 4 ชั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้



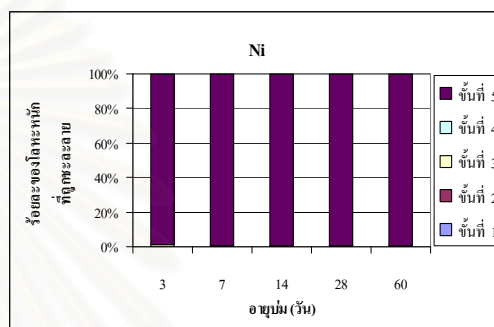
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/10/47



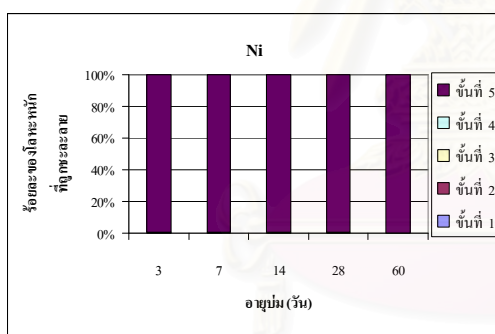
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 26/10/47



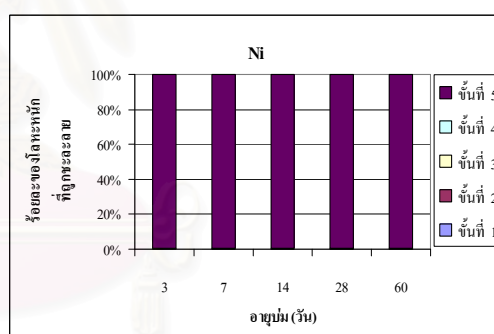
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 06/01/48



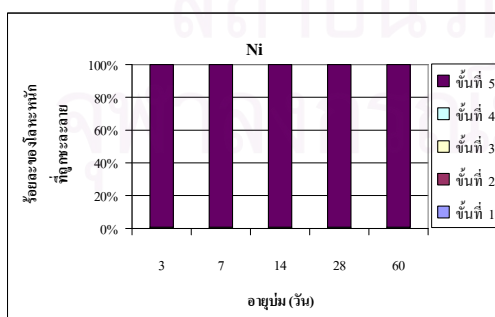
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 16/01/48



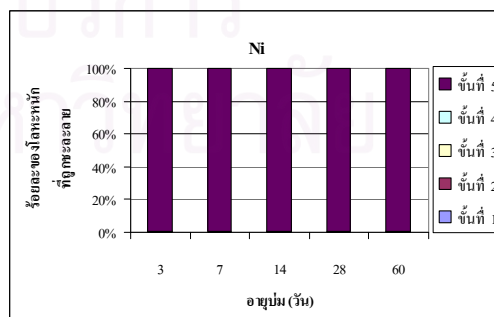
(จ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 18/01/48



(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/01/48



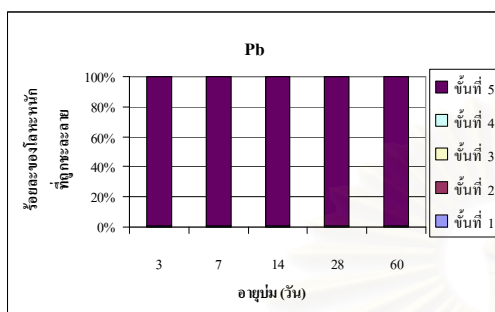
(ช) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48



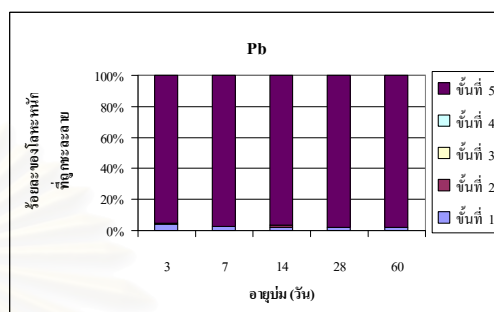
(ซ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.7 ร้อยละของการชะละลายของนิกเกิล (Ni) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

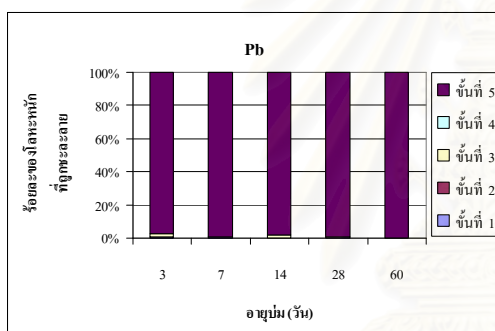
ตะกั่ว (Pb) จากรูปที่ 4.8 พบว่าตะกั่วมีความเสถียรสูงมีการชะละลายออกมาในชั้นที่ 1 2 และ 3 น้อยกว่า 1.5 % ส่วนในชั้นที่ 4 ไม่พบการชะละลาย ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาในหัวข้อ 2.7.8 ซึ่งกล่าวไว้ว่า ความเสถียรของตะกั่วเกิดจากการที่ตะกั่วอยู่ในรูปของตะกั่วซัลเฟต ซึ่งพันธะซัลเฟตไม่ได้อยู่ในขั้นตอนการสกัดทั้ง 4 ชั้นดังที่กล่าวไปแล้ว



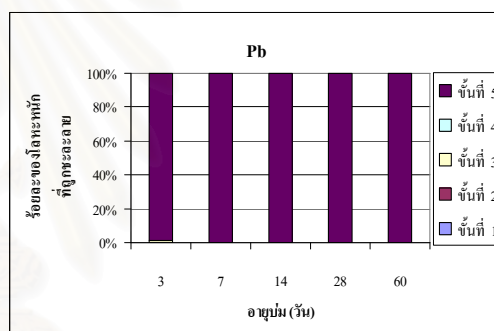
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/10/47



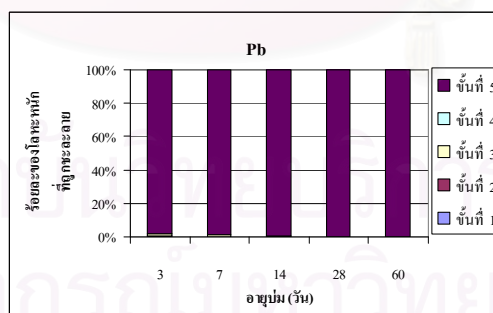
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 26/10/47



(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48



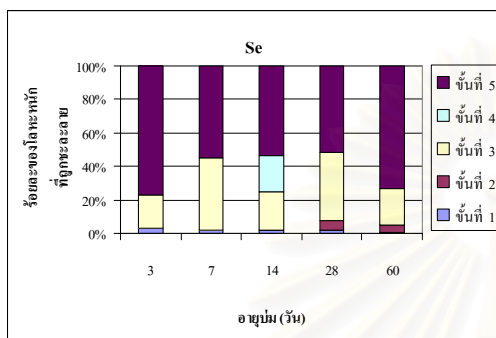
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 05/02/48



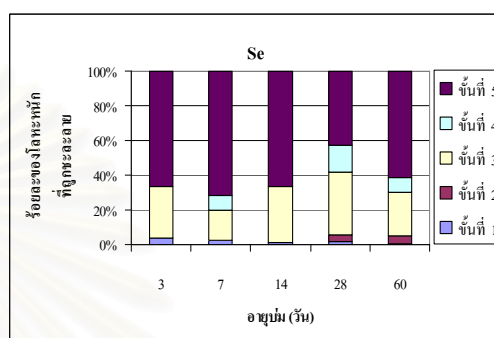
(จ) ซีเมนต์เพสต์ วันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.8 ร้อยละของการชะละลายของตะกั่ว (Pb) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

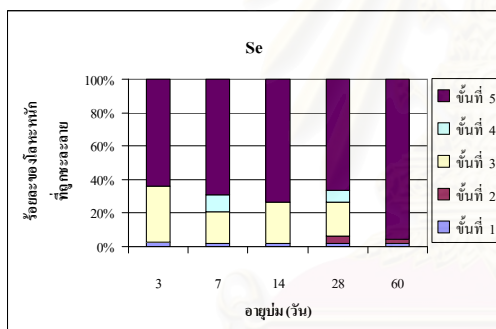
ซีลีเนียม (Se) จากรูปที่ 4.9 พบว่าซีลีเนียมมีการชะละลายออกมาสูงสุดในชั้นที่ 3 ประมาณ 7 % ถึง 80 % และมีการชะละลายในชั้นที่ 4 ประมาณ 2 % ถึง 20 % แสดงให้เห็นว่าซีลีเนียมส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ และยังอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์บางส่วน แต่เมื่ออายุปมเพิ่มขึ้นการสร้างพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ลดลง แสดงว่าซีลีเนียมมีการสร้างพันธะใหม่เกิดขึ้น ซึ่งมีความเสถียรสูงขึ้น



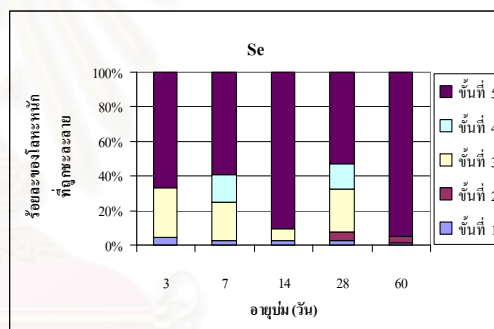
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 06/01/48



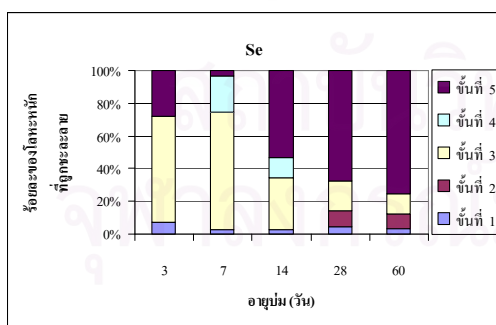
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 16/01/48



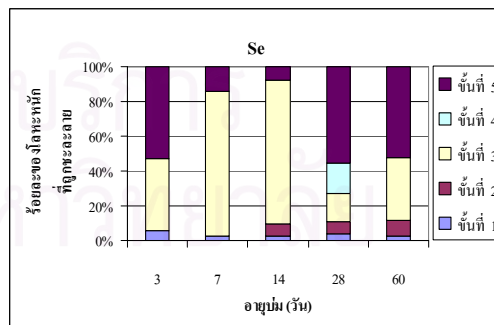
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 18/01/48



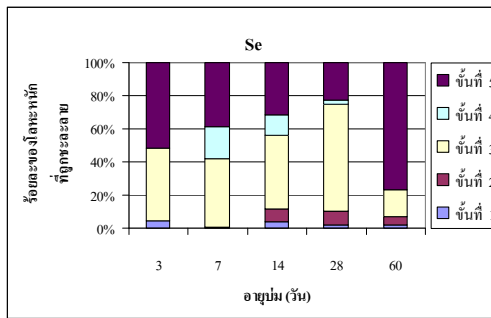
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/01/48



(จ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48



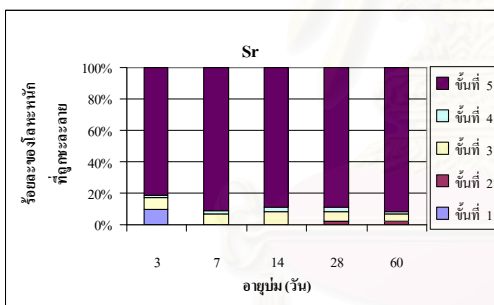
(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 05/02/48



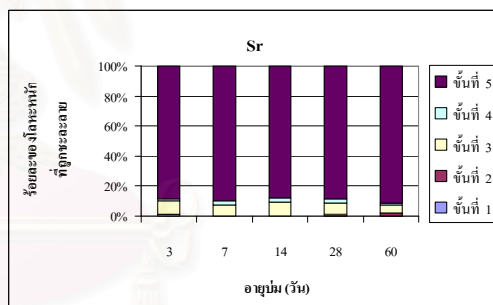
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.9 ร้อยละของการชะละลายของซีลีเนียม (Se) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

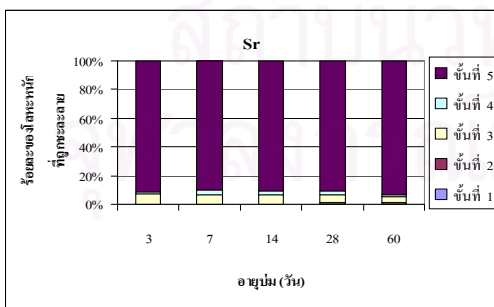
สตรอนเชียม (Sr) จากรูปที่ 4.10 พบว่าสตรอนเชียมมีการชะละลายออกมาในชั้นที่ 3 ประมาณ 3 % ถึง 14 % มีการชะละลายในชั้นที่ 4 ประมาณ 1 % ถึง 8 % และมีการชะละลายในชั้นที่ 2 ประมาณ 1 % ถึง 3 % แสดงให้เห็นว่าสตรอนเชียมอยู่ในรูปของสารประกอบเกลือหรือแมงกานีสออกไซด์บางส่วน และยังอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์เล็กน้อย ดังนั้น สตรอนเชียมจึงมีความเสถียรสูง และมีความเสถียรเพิ่มขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น



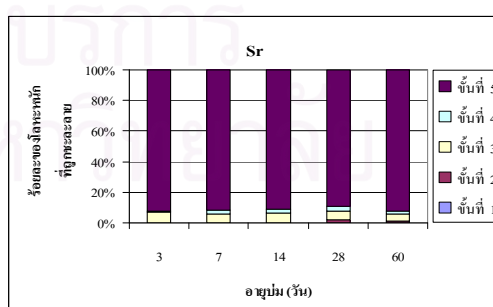
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/10/47



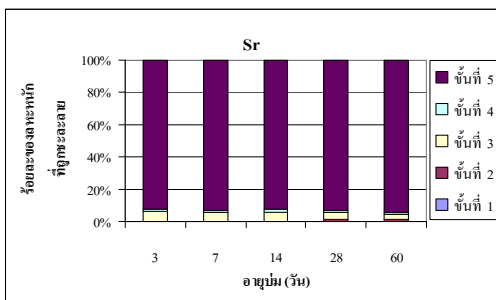
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 26/10/47



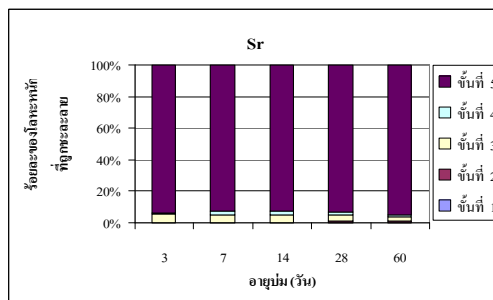
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 06/01/48



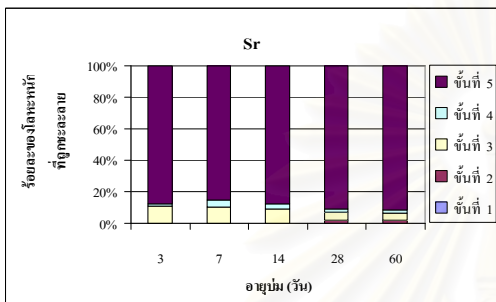
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 16/01/48



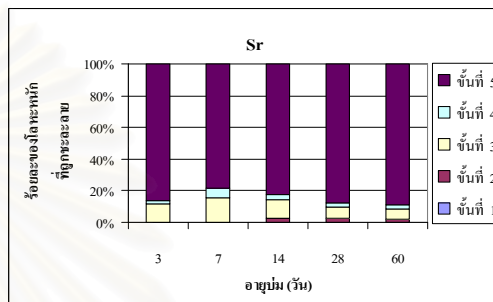
(จ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 18/01/48



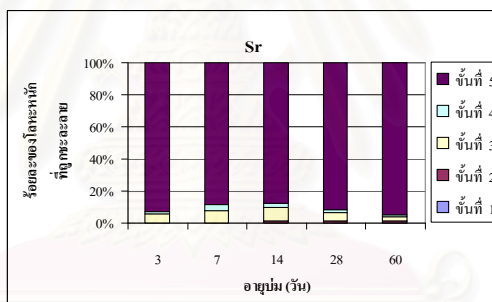
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/01/48



(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48



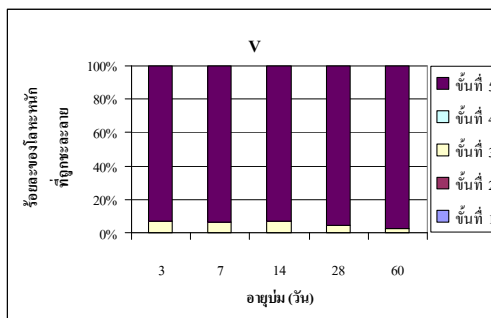
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 05/02/48



(ด) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.10 ร้อยละของการชะละลายของสตรอนเชียม (Sr) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

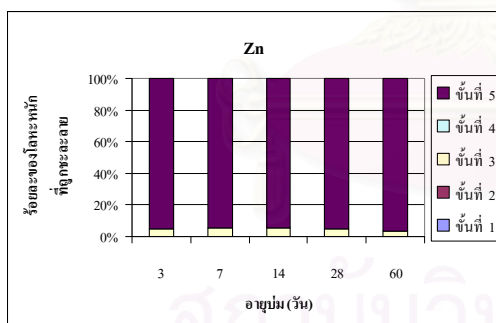
วานเนเดียม (V) จากรูปที่ 4.11 พบว่าวานเนเดียมมีการชะละลายออกมาในชั้นที่ 3 ประมาณ 2% ถึง 11% และมีการชะละลายในชั้นที่ 1 และ 2 น้อยกว่า 1% แสดงให้เห็นว่า วานเนเดียมอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์เล็กน้อย ดังนั้นวานเนเดียมมีความเสถียรสูง และมีแนวโน้มในการชะละลายได้น้อยลงเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น



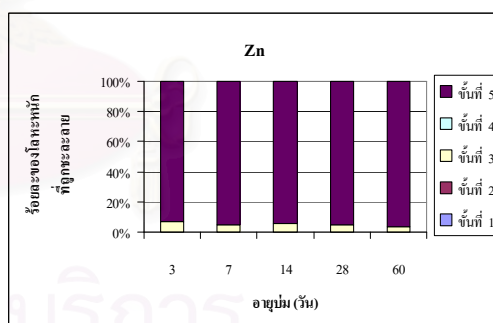
(ฉ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

รูปที่ 4.11 ร้อยละของการชะละลายของวาเนเดียม (V) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

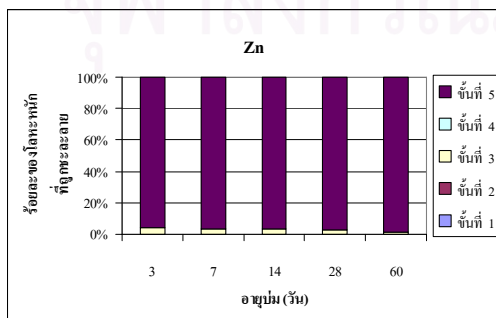
สังกะสี (Zn) จากรูปที่ 4.12 พบว่าสังกะสีมีการชะละลายออกมาในชั้นที่ 3 ประมาณ 1% ถึง 7% และมีการชะละลายในชั้นที่ 1 น้อยกว่า 1% แสดงให้เห็นว่าสังกะสีอยู่ในรูปของสารประกอบเหล็กและแมงกานีสออกไซด์จำนวนเล็กน้อย และการชะละลายในชั้นตอนที่ 3 มีแนวโน้มลดลงเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น แสดงว่าสังกะสีจึงมีการสร้างพันธะใหม่ที่มีความเสถียรสูงขึ้นเมื่ออายุบ่มเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมาในหัวข้อ 2.7.15 ซึ่งพบว่าสังกะสีจะมีความเสถียรเมื่ออยู่ในรูปของ ZnO หรือ Zn(OH)₂ ดังนั้นจึงพบว่าสังกะสีส่วนใหญ่ไม่ถูกสกัดออกมา



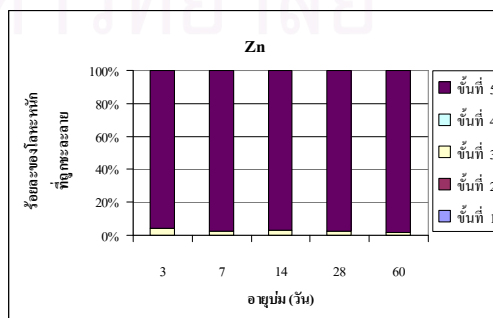
(ก) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/10/47



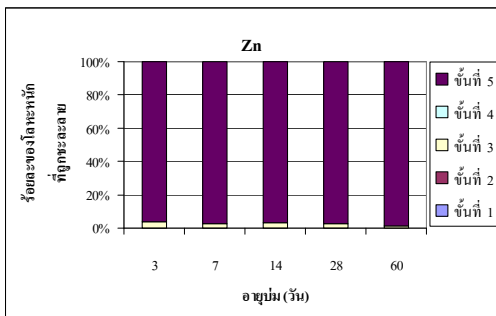
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 26/10/47



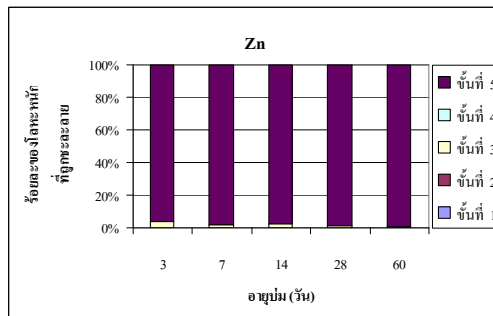
(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 06/01/48



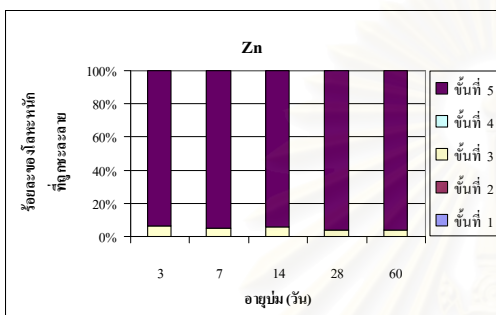
(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 16/01/48



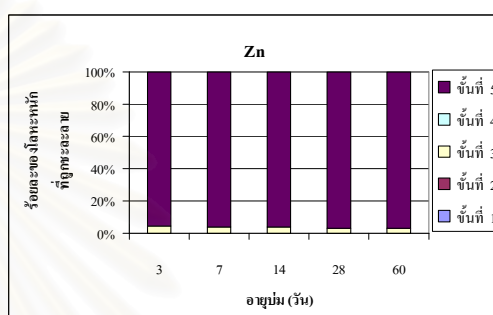
(จ) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 18/01/48



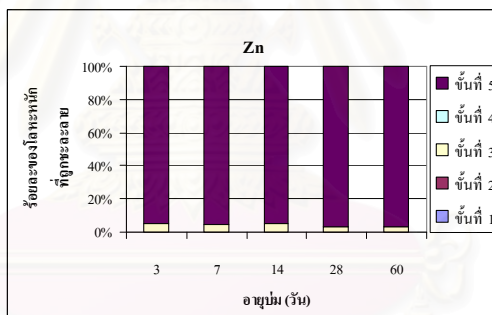
(ข) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 22/01/48



(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 03/02/48



(ค) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 05/02/48



(ง) ซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่เก็บวันที่ 07/02/48

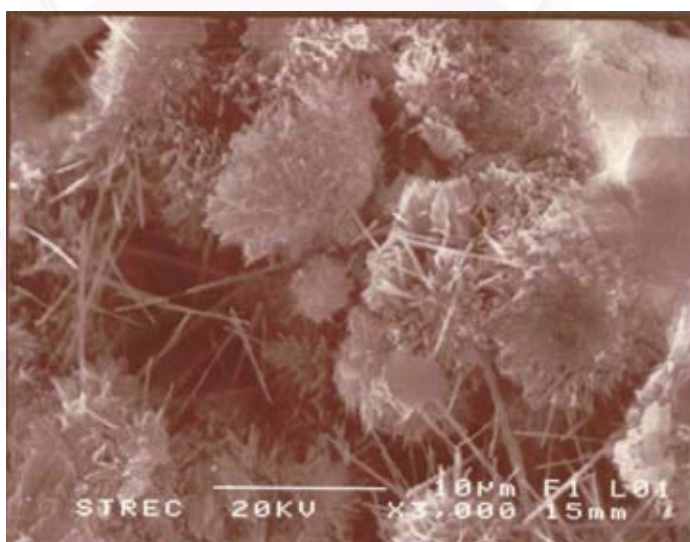
รูปที่ 4.12 ร้อยละของการชะละลายของสังกะสี (Zn) ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง

จากผลการศึกษาศาสตร์ประกอบของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) สรุปได้ว่า โลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่มีพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ และอยู่ในรูปของสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์บางส่วน เนื่องจากส่วนใหญ่จะมีการชะละลายในขั้นตอนที่ 3 และ 4 โดยเฉพาะทองแดงและซีลีเนียมที่มีการชะละลายในขั้นตอนนี้สูง ซึ่งแสดงว่ามีความเสถียรปานกลาง แต่โลหะหนักส่วนมากจะอยู่ในขั้นตอนที่ 5 มากกว่า 90% ซึ่งในขั้นนี้แสดงว่าโลหะหนักมีความเสถียร และสามารถสรุปได้ว่าเมื่ออายุขุมเพิ่มขึ้น โลหะหนักจะมีความเสถียรสูงขึ้น จากการสังเกตเห็นว่าการชะละลายในขั้นตอนที่ 1 ถึง 4 ลดลง

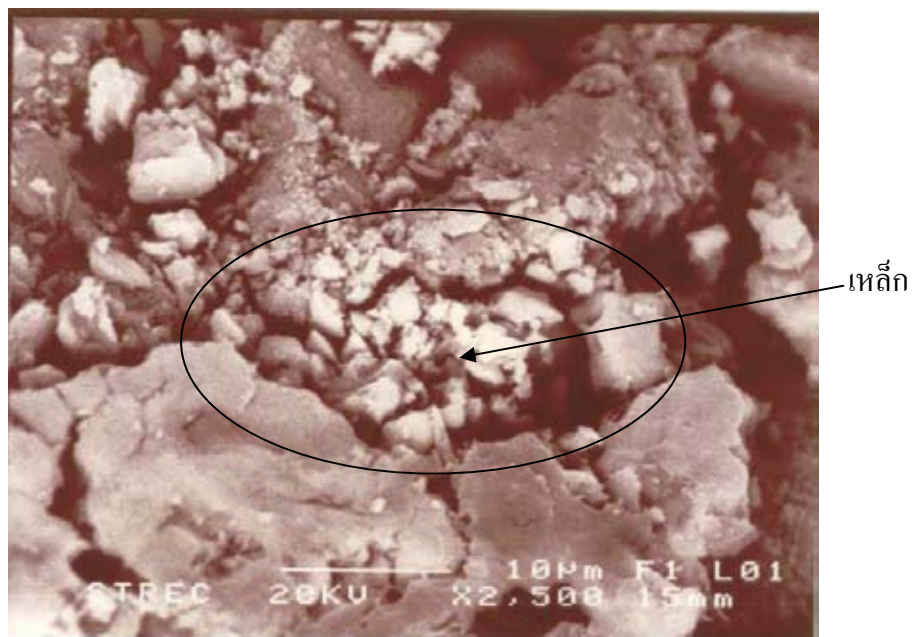
จากการวิเคราะห์สถานะภาพของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) และวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) มีผลการทดลองที่สอดคล้องกัน สามารถสรุปได้ว่าพบโลหะหนักในรูปที่มีพันธะกับเหล็ก แมงกานีสออกไซด์ วาเนเดียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ นอกจากนี้ยังพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ในซีเมนต์เพสต์มีความเสถียรสูง และมีความเสถียรสูงขึ้นเมื่อมีอายุบ่มเพิ่มขึ้น

4.2.3 ผลการศึกษาลักษณะการจับตัวของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

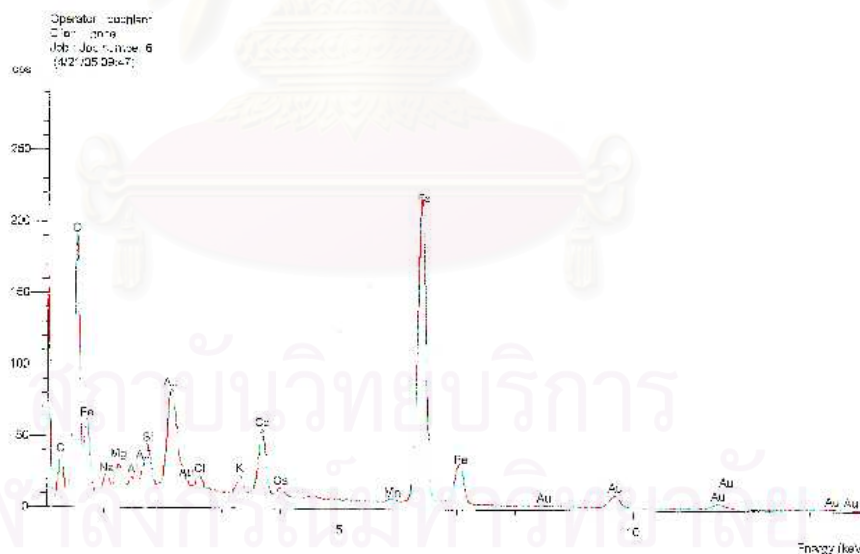
ผลการทดลองไม่พบลักษณะการจับตัวของโลหะหนัก ดังรูปที่ 4.13 แสดงโครงสร้างของซีเมนต์เพสต์ รูปที่ 4.14 และ รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างของเหล็กในซีเมนต์เพสต์ และการวิเคราะห์ธาตุของตัวอย่างวันที่ 26/10/47 ที่อายุบ่ม 60 วัน ซึ่งในบริเวณที่พบเหล็กมีโอกาที่จะพบโลหะหนักได้สูง แต่ก็ไม่พบโลหะหนัก รูปที่ 4.16 และ 4.17 เป็นการวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วัน ของตัวอย่างวันที่ 07/02/48 ซึ่งตัวอย่างในวันนี้มีปริมาณโลหะหนักสูง แต่จากผลการทดลองก็ปรากฏว่าไม่พบโลหะหนักเช่นเดียวกัน ดังนั้นอาจจะสันนิษฐานได้ว่าโลหะหนักในปูนซีเมนต์มีกระจายตัวอยู่ทั่วไปในซีเมนต์เพสต์ ทำให้เครื่อง SEM ไม่สามารถตรวจวัดได้ และนอกจากนี้ตัวอย่างที่นำไปทดสอบใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อย โอกาสในการที่จะพบจึงน้อยลง ดังนั้นจึงไม่สามารถสรุปลักษณะการจับตัวของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ได้ว่าเป็นอย่างไร



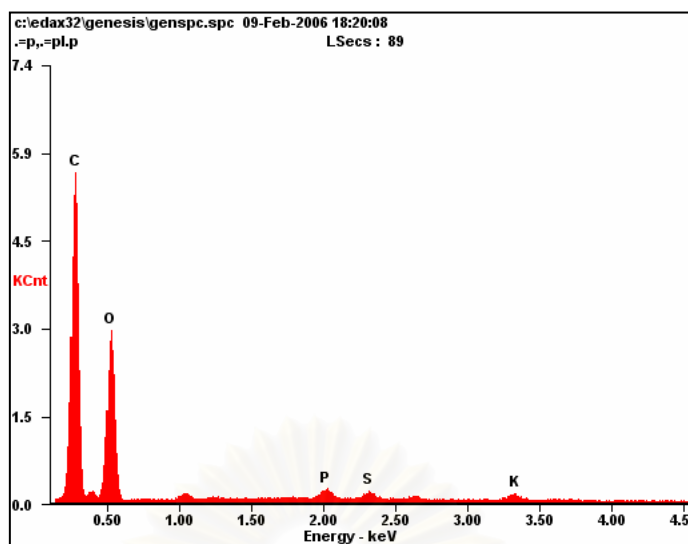
รูปที่ 4.13 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



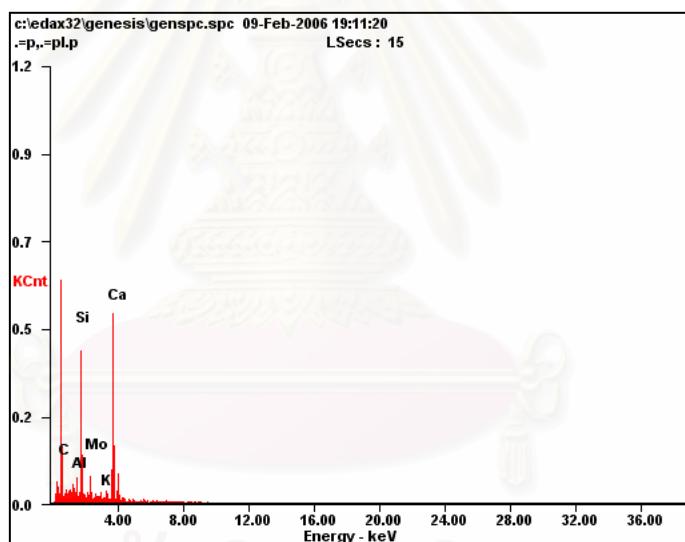
รูปที่ 4.14 โครงสร้างของเหล็กในซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์เพสต์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope และ EDS ของตัวอย่างวันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน



รูปที่ 4.16 การวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์เฟสได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope และ EDS ของตัวอย่างวันที่ 07/02/48 ที่อายุบ่ม 7 วัน

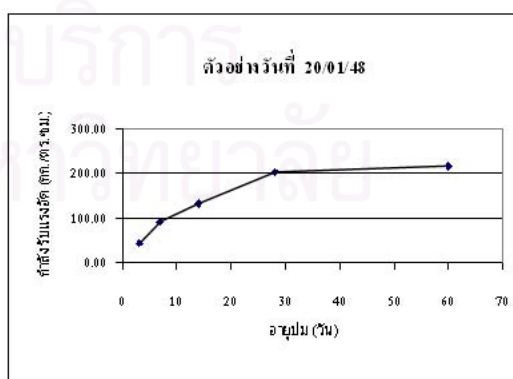
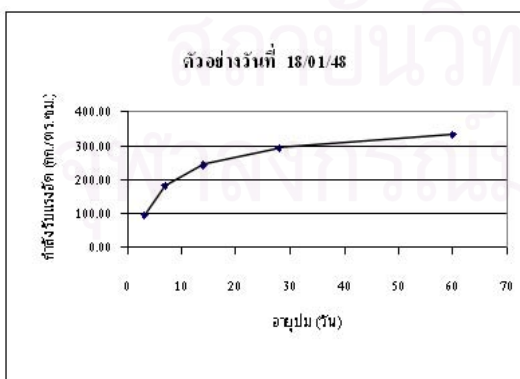
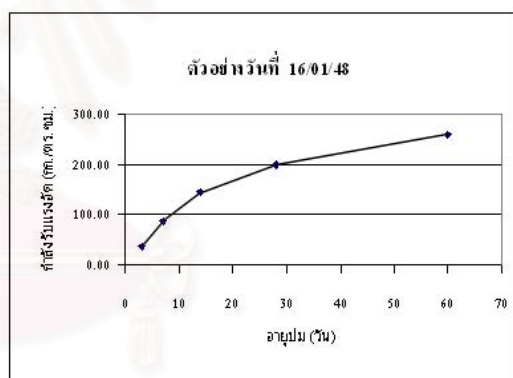
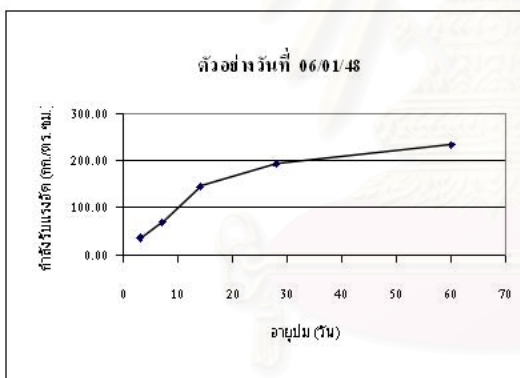
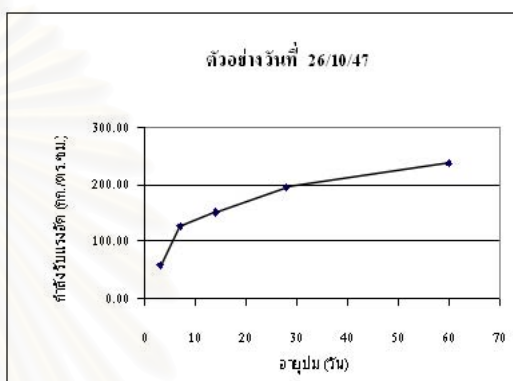
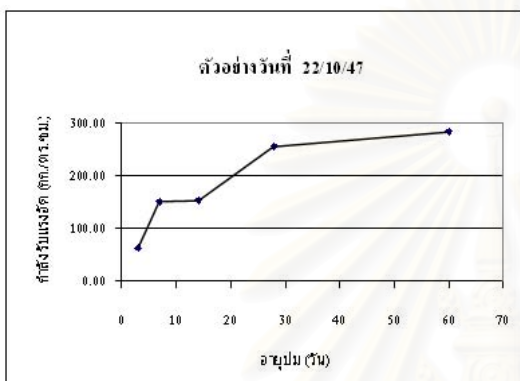
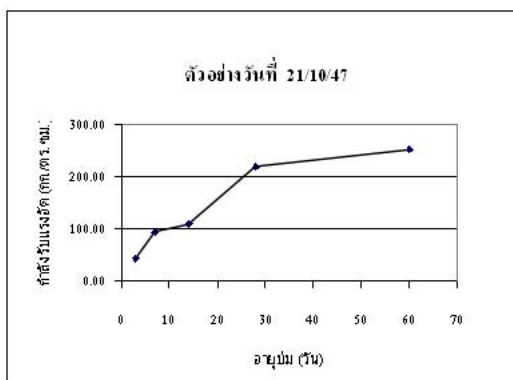
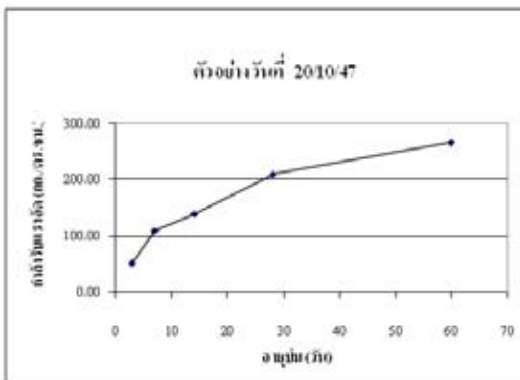


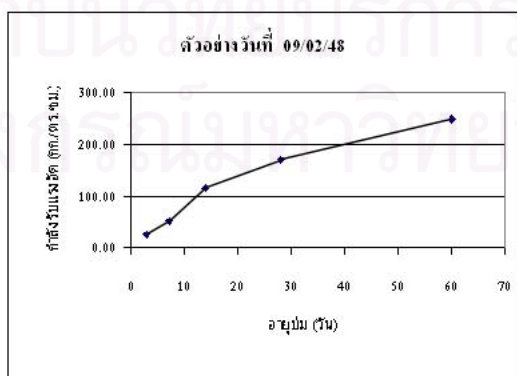
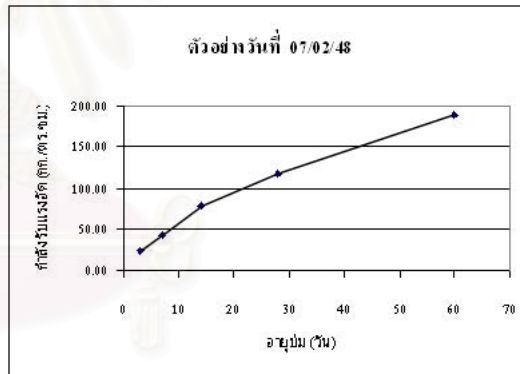
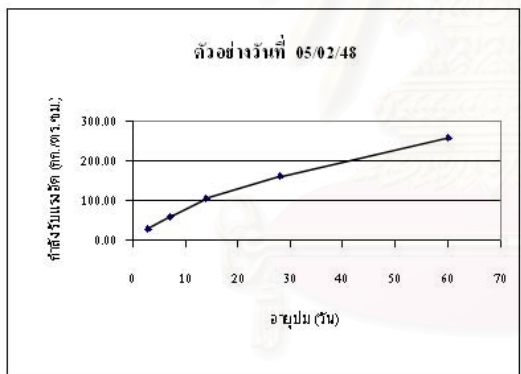
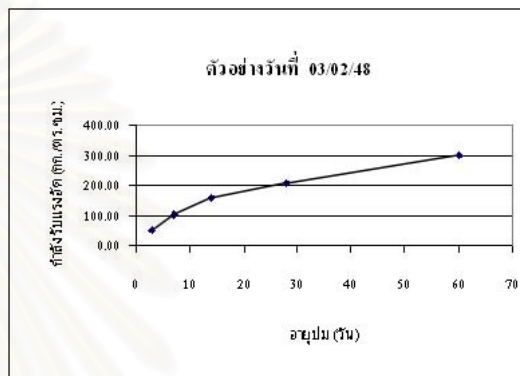
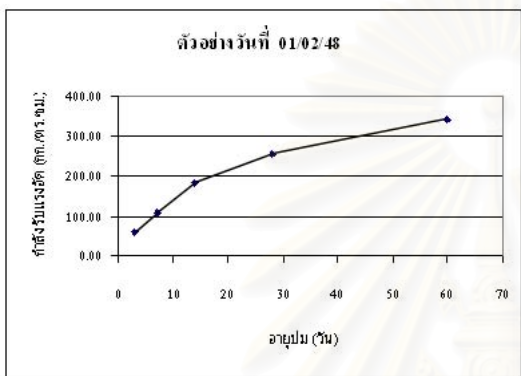
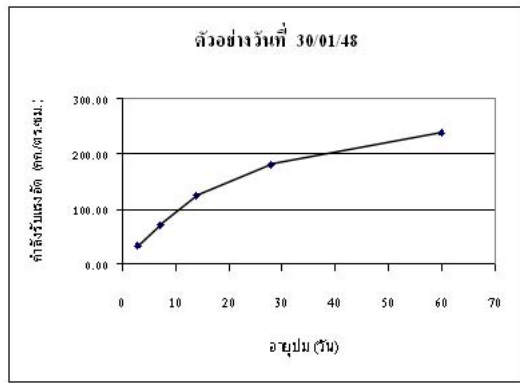
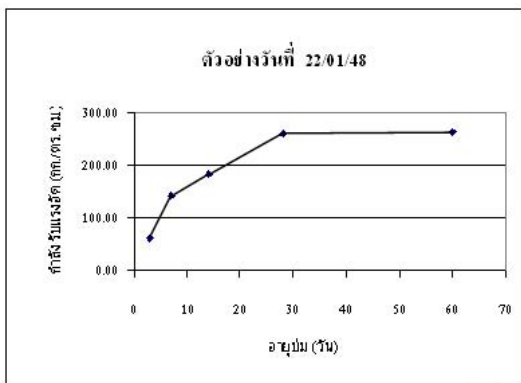
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ในซีเมนต์เฟสได้จากเครื่อง Scanning Electron Microscope และ EDS ของตัวอย่างวันที่ 07/02/48 ที่อายุบ่ม 28 วัน

4.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์

การทดสอบนี้ใช้ปูนซีเมนต์จำนวน 15 ตัวอย่าง โดยเลือกมาจากผลการศึกษาชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่มีในปูนซีเมนต์จากขั้นตอนที่ 4.1 หลักเกณฑ์การพิจารณาในการเลือกตัวอย่าง คือ เลือกตัวอย่างที่มีโลหะหนักที่เป็นพิษตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) โลหะหนักที่มีผลต่อคุณสมบัติของซีเมนต์ และโลหะหนักที่มีปริมาณสูง โดยตัวอย่างที่เลือกจำนวน 15 ตัวอย่าง คือ ตัวอย่างวันที่ 20/10/47 21/10/47 22/10/47 26/10/47 06/01/48 16/01/48 18/01/48 20/01/48 22/01/48 30/01/48 01/02/48 03/02/48 05/02/48 07/02/48 และ 09/02/48 มาทำการหล่อก้อนมอร์ตาร์และทดสอบกำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก จ และผังรูปที่ 4.18 พบว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่ามาตรฐานที่กำหนดคือ 28 เมกะพาสคัล หรือ 285.51 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรที่อายุบ่ม 28 วัน (มอก. 15 เล่ม 1-2547) เนื่องจากตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้ทำการบดตัวอย่างเอง ทำให้ความละเอียดที่ได้น้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากโรงงาน แต่มีข้อน่าสังเกตว่าในตัวอย่างที่พบว่ามีกำลังรับแรงอัดต่ำจะพบว่ามีปริมาณของทองแดงสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ เช่น ในตัวอย่างวันที่ 05/02/48 มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุบ่ม 28 วันเท่ากับ 160.04 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 พบว่ามีปริมาณของทองแดง 266.63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และตัวอย่างวันที่ 07/02/48 มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ย 117.85 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 พบว่ามีปริมาณของทองแดง 274 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากข้อมูลที่ได้ น่าจะสามารถสรุปได้ว่าทองแดงมีผลต่อกำลังอัดของก้อนมอร์ตาร์ เนื่องจากทองแดงผลในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้เกิดการก่อตัวที่ช้าลง และยังลดความแข็งแรงของก้อนมอร์ตาร์ในช่วงแรก นอกจากนี้ยังส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้น (Polletini และคณะ, 2002; Zain และคณะ, 2004)

ส่วนในตัวอย่างที่พบว่ามีกำลังรับแรงอัดสูง น่าจะมีผลมาจากแบเรียมและวานาเดียม เนื่องจากพบว่ามีปริมาณสูง เช่นในตัวอย่างวันที่ 18/01/48 และ 22/01/48 จากผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 พบว่ามีปริมาณแบเรียม 128 และ 151 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบวานาเดียมมีปริมาณ 80 และ 81 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ ซึ่งแบเรียมและวานาเดียมมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงในระยะแรก ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้รวดเร็ว ดังนั้นจึงน่าส่งผลให้ มีกำลังรับแรงอัดที่สูง (Garagaglia และคณะ, 1994; Utton และคณะ, 2003; Heimann และคณะ, 1992)





รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุปม

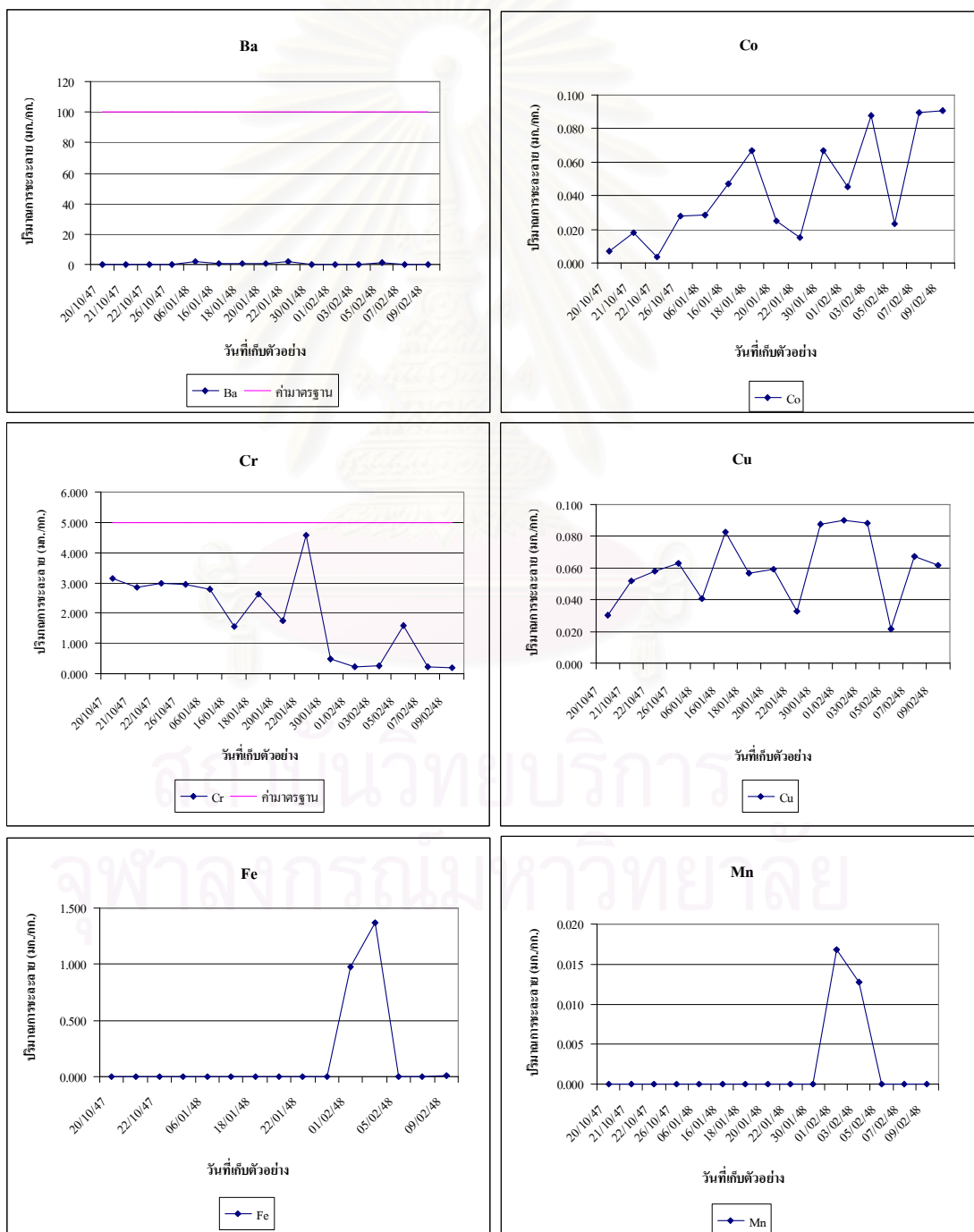
4.4 ผลการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์

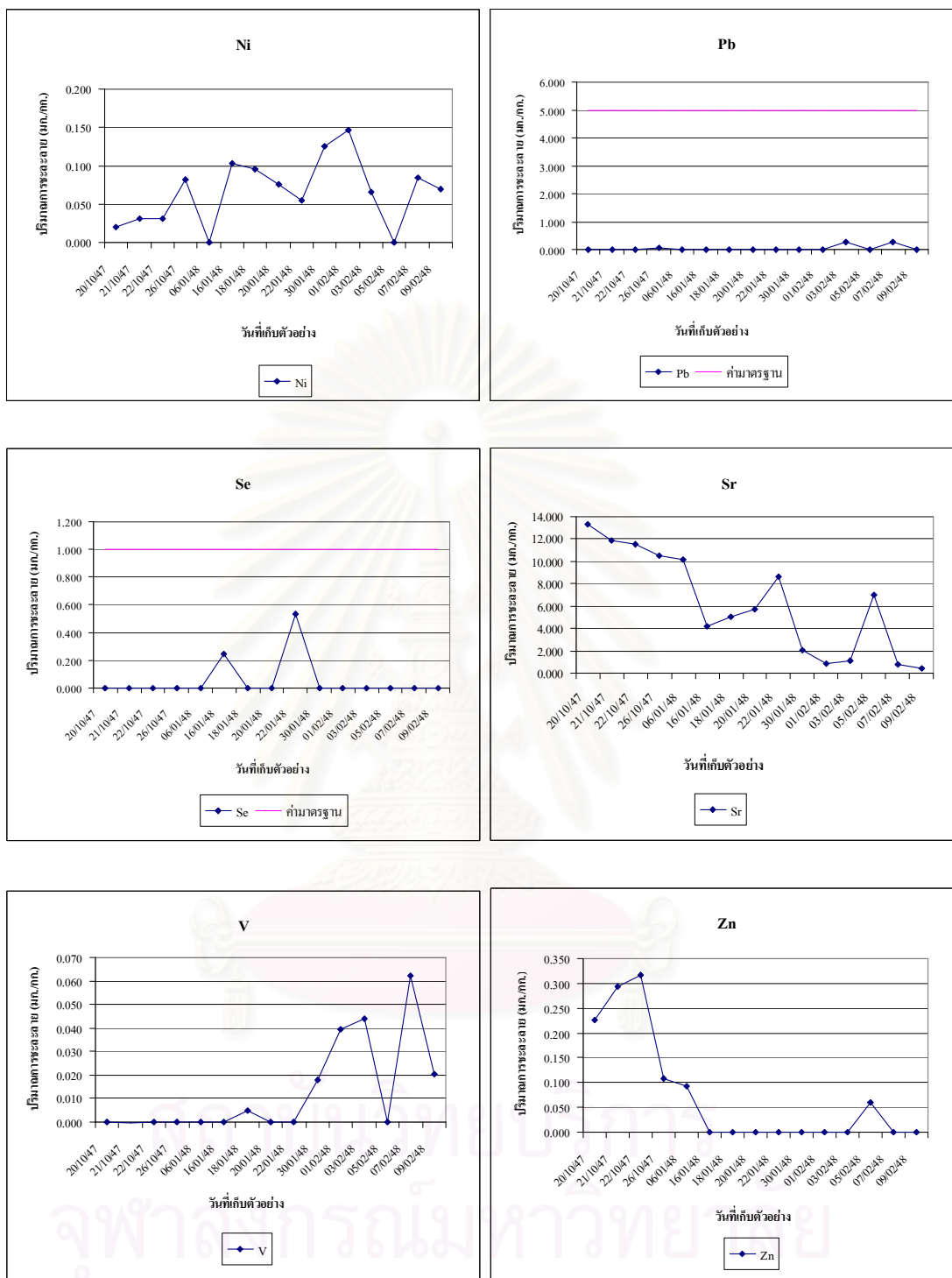
การทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน ทำการทดสอบ 2 วิธีคือการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และการทดสอบการชะละลายตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S.EPA ซึ่งการทดสอบทั้ง 2 วิธีนี้ใช้สำหรับตรวจสอบสิ่งที่สงสัยว่าจะอาจจะเป็นของเสียอันตรายทั้งที่ผ่านการปรับเสถียรแล้วและยังไม่ได้ปรับเสถียร ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ข และรูปที่ 4.19 และ 4.20 จากรูปที่ 4.19 เป็นการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) พบว่า โลหะหนักที่มีการชะละลายมากที่สุดคือโครเมียม มีค่าตั้งแต่ 0.2 ถึง 4.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับโครเมียมทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายเท่ากับ 0.3 % ถึง 10.3 % โลหะหนักที่มีความสามารถในการชะละลายรองลงมาคือสตรอนเชียมมีการชะละลายออกมา 0.4 ถึง 13.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับสตรอนเชียมทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายเท่ากับ 0.2 % ถึง 6.3 % ถัดไปคือแบเรียมมีการชะละลายออกมา 0.6 ถึง 1.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับแบเรียมทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายเท่ากับ 0.5 % ถึง 1.3 % ส่วนโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว วานาเดียม และสังกะสีมีการชะละลายออกมาน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับปริมาณที่มีทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายน้อยกว่า 1 %

รูปที่ 4.20 เป็นการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์ ตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S.EPA พบว่า โลหะหนักที่มีการชะละลายมากที่สุดคือซีลีเนียม มีค่าตั้งแต่ 1.5 ถึง 4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับซีลีเนียมทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายเท่ากับ 8.7 % ถึง 37.8 % ซึ่งมีการชะละลายเกินค่ามาตรฐานที่กำหนดคือ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (U.S. EPA) ส่วนโลหะหนักที่มีความสามารถในการชะละลายรองลงมาคือสตรอนเชียมมีการชะละลายออกมา 15.1 ถึง 20.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับสตรอนเชียมทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายเท่ากับ 5.6 % ถึง 12.7 % ลำดับต่อไปคือโครเมียมมีการชะละลายออกมา 1.5 ถึง 4.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับโครเมียมทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายเท่ากับ 3.4 % ถึง 11.9 % ถัดไปคือแบเรียมมีการชะละลายออกมา 3.3 ถึง 6.4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับแบเรียมทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายเท่ากับ 2.5 % ถึง 5.5 % ส่วนโคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล วานาเดียม และสังกะสีมีการชะละลายออกมาน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อคิดเทียบกับปริมาณที่มีทั้งหมดในปูนซีเมนต์มีการชะละลายน้อยกว่า 3 %

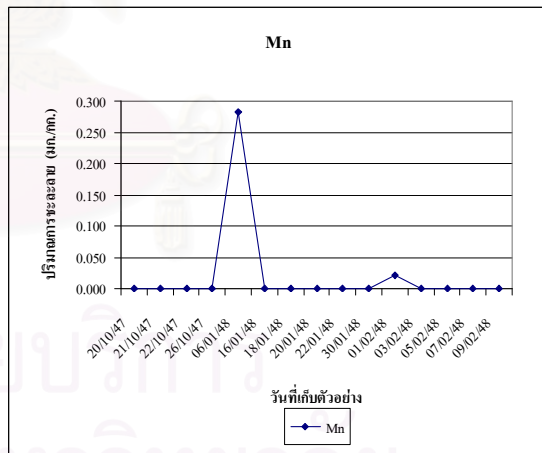
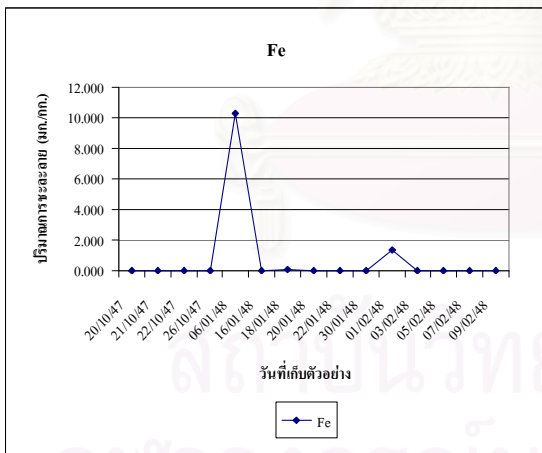
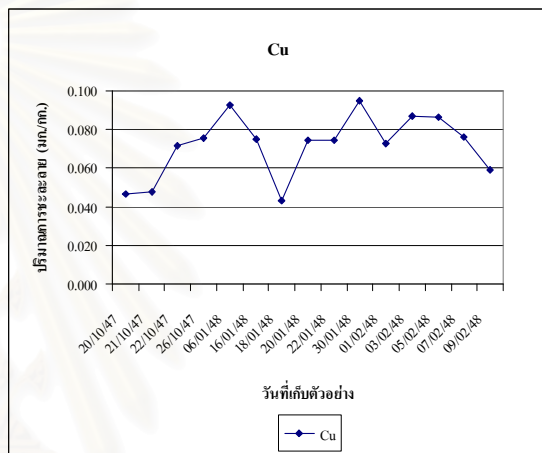
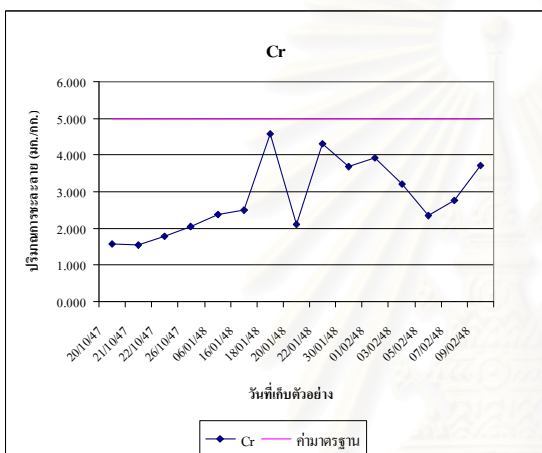
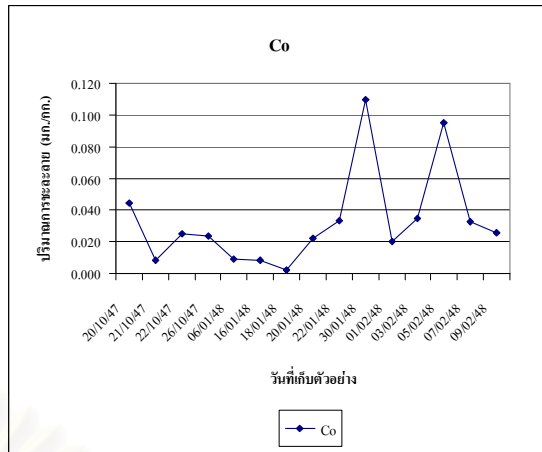
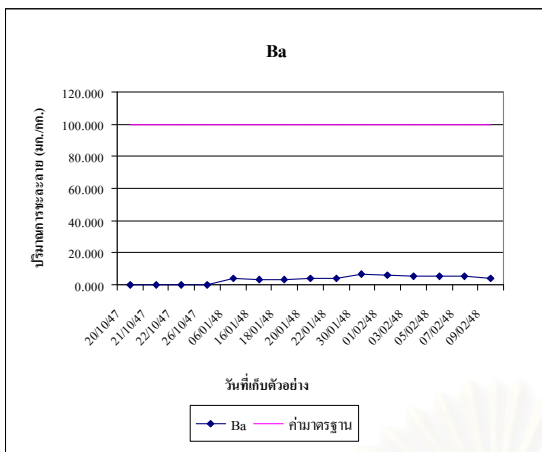
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้ง 2 วิธี ซึ่งมีขั้นตอนการชะละลายเหมือนกันแต่มีความแตกต่างกันที่น้ำสกัด โดยการทดสอบทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ใช้กรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) ที่มีค่า pH เท่ากับ 5 เป็นน้ำสกัด ส่วนการทดสอบการชะละลายตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA ใช้กรดอะซิติกที่มีค่า pH เท่ากับ 2.88 เป็นน้ำสกัด ผลการเปรียบเทียบปรากฏว่าการ

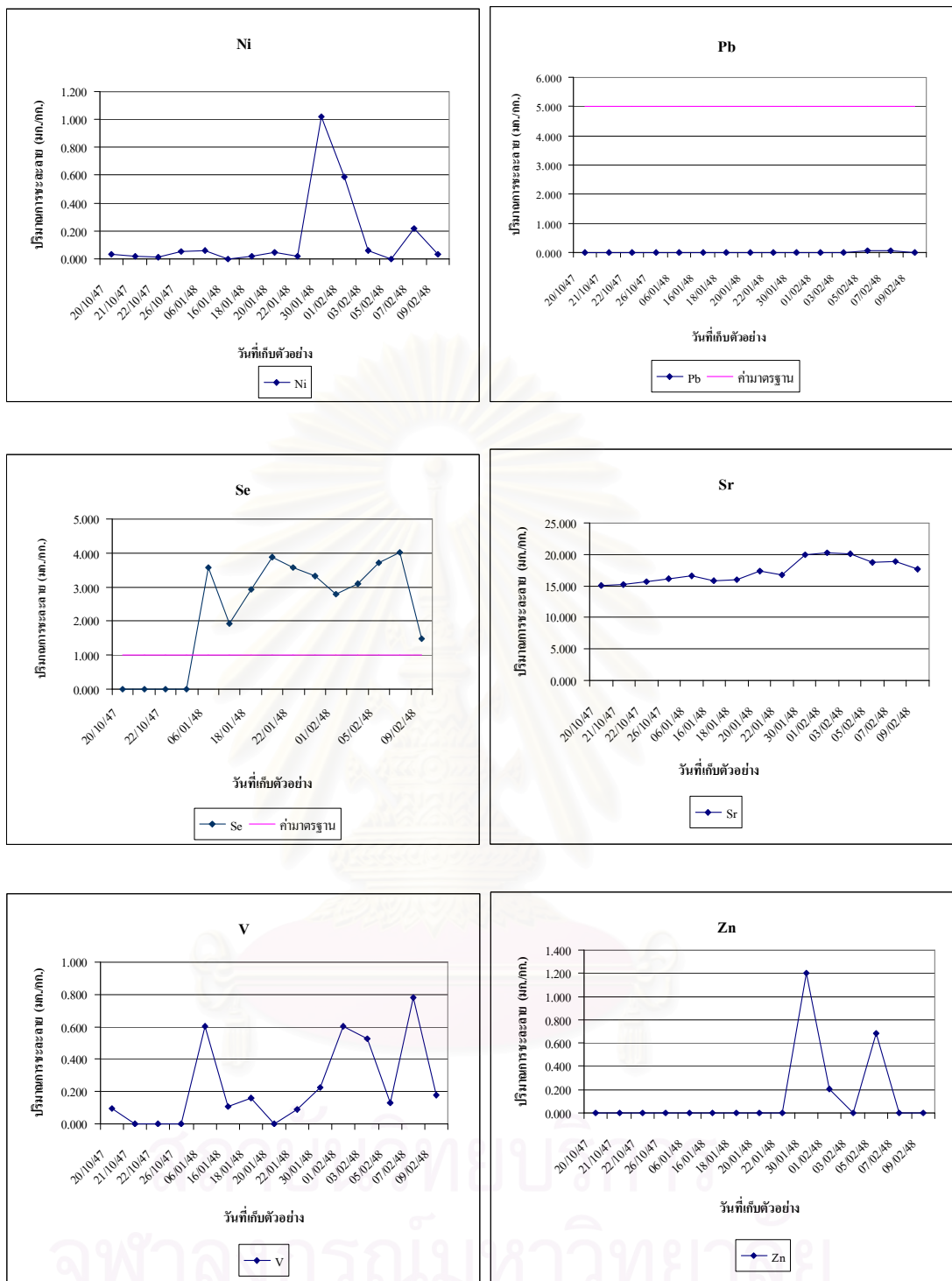
ทดสอบการชะละลายตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA โลหะหนักมีการชะละลายออกมาในปริมาณที่สูงกว่าการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) นอกจากนี้ยังพบว่า การชะละลายตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA มีซีลีเนียมถูกชะละลายออกมาเกินค่ามาตรฐานที่กำหนด เนื่องจากซีลีเนียมมีความเสถียรต่ำกว่าโลหะอื่น ๆ ที่ทำการทดสอบดังผลการทดลองในขั้นตอนที่ 4.2.2 ดังนั้นควรที่จะมีการตรวจสอบวัตถุคิบและเชื้อเพลิงที่เข้าสู่กระบวนการผลิตไม่ให้มีค่าของซีลีเนียมสูงเนื่องจากอาจเกิดการชะละลายส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อคอนกรีตสิ้นสุดอายุการใช้งาน





รูปที่ 4.19 ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วันโดยการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)





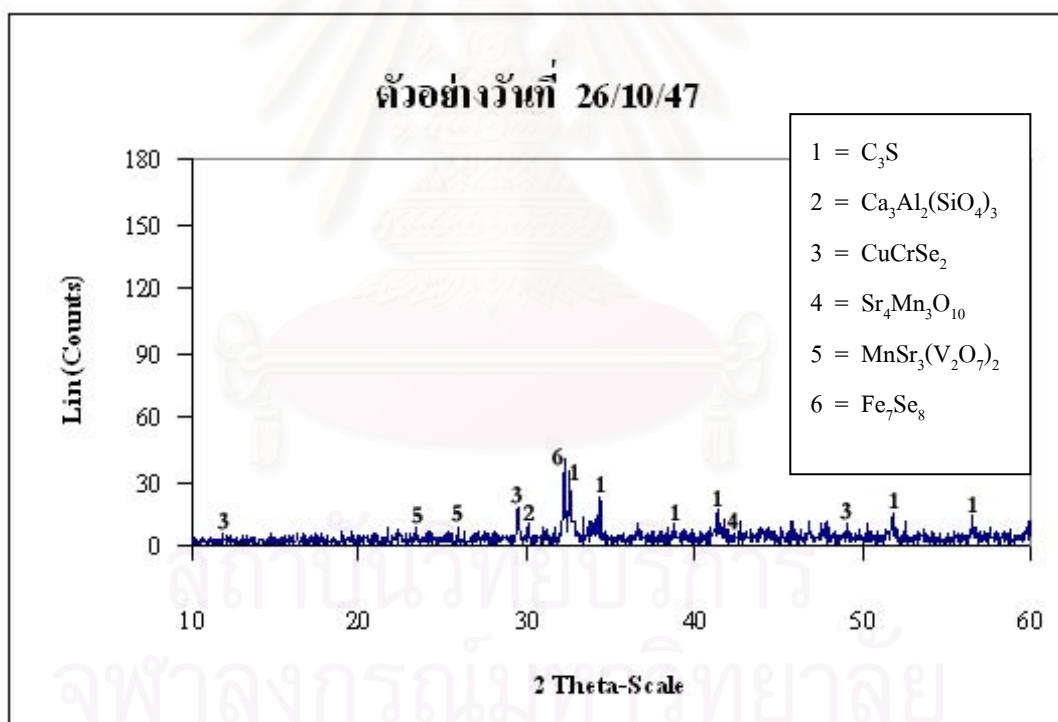
รูปที่ 4.20 ปริมาณการชะละลายของโลหะหนักในก้อนมอร์ตาร์ที่อายุบ่ม 28 วัน โดยการทดสอบตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S.EPA

4.5 เปรียบเทียบสถานะภาพของโลหะหนักก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

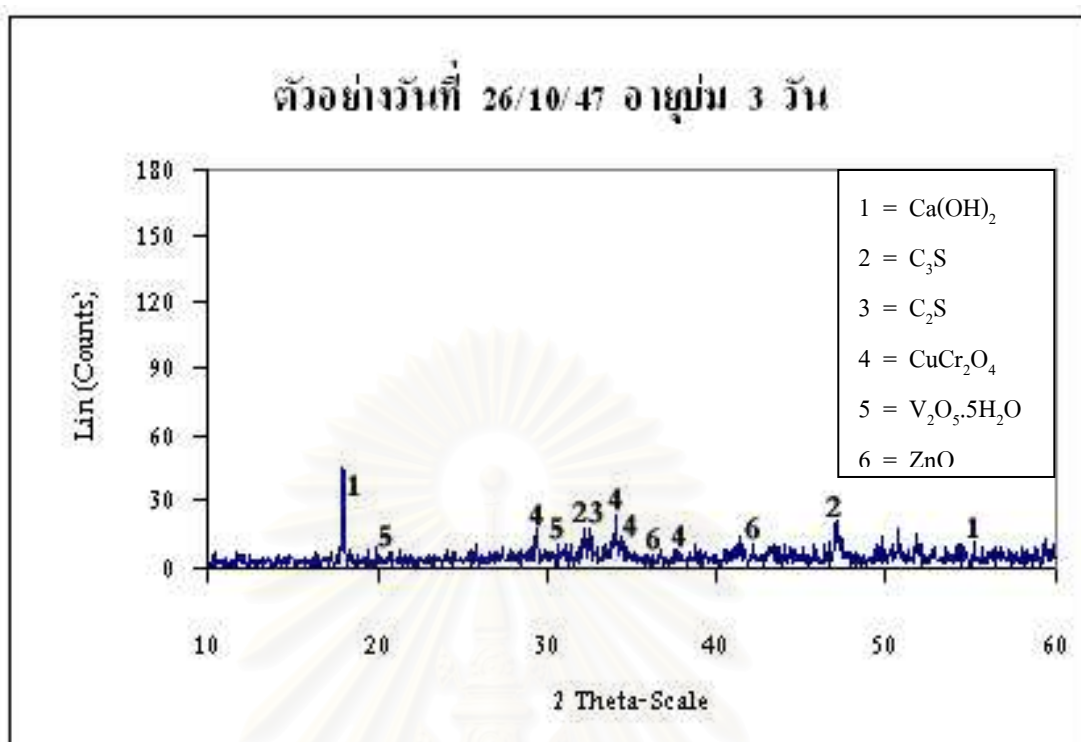
ผลการวิเคราะห์สถานะภาพของโลหะหนักหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.2 แต่เพื่อที่จะได้ทราบว่าโลหะหนักมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรระหว่างก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับคุณรุจยา บุญญานูวัตร ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์สถานะภาพของโลหะหนักก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยใช้ตัวอย่างในการทดสอบเป็นตัวอย่างชุดเดียวกัน ดังนั้นจึงเลือกผลการวิเคราะห์บางส่วนมาทำการเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลการวิเคราะห์เป็นดังนี้

4.5.1 ผลการเปรียบเทียบสารประกอบของโลหะหนักที่เป็นผลึกโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

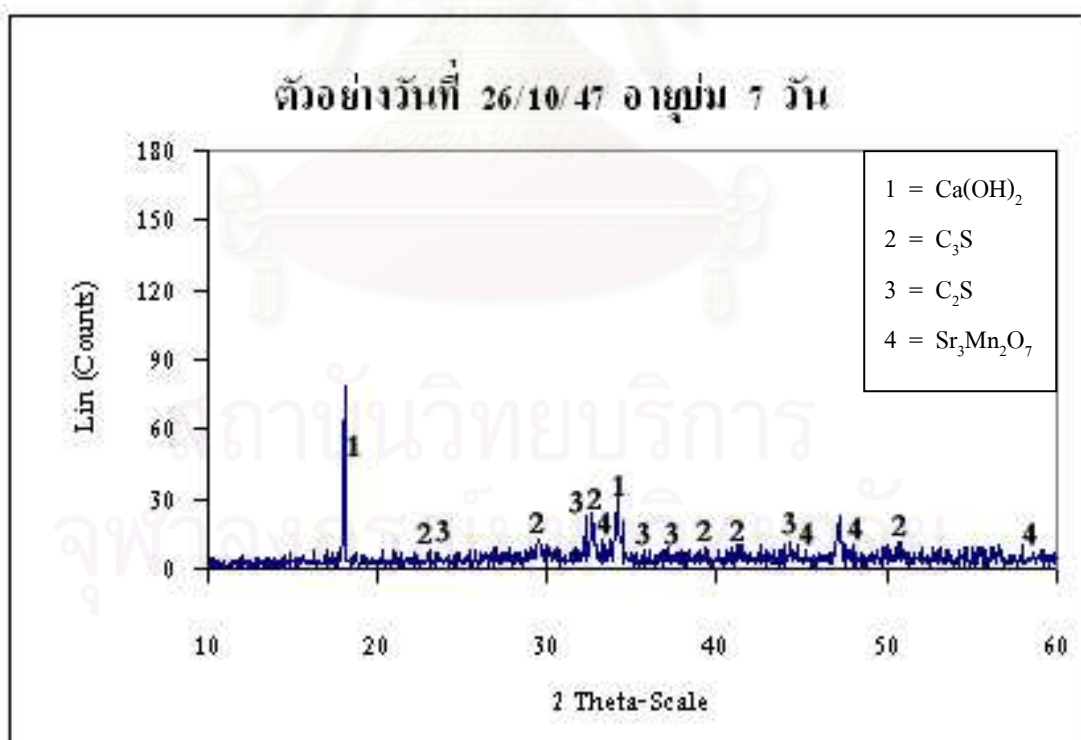
การเปรียบเทียบสารประกอบของโลหะหนักที่เป็นผลึกโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) เลือกตัวอย่างวันที่ 26/10/48 มาเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.21 และ 4.22 และ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้



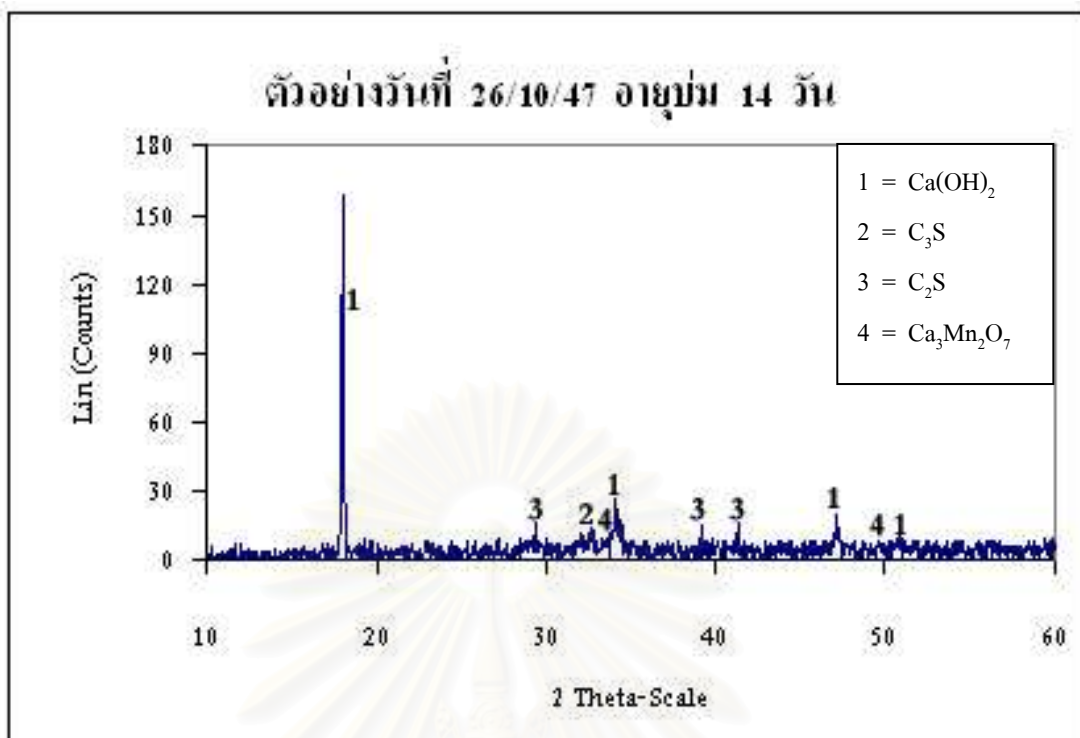
รูปที่ 4.21 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างปูนเม็ด วันที่ 26/10/47 ก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



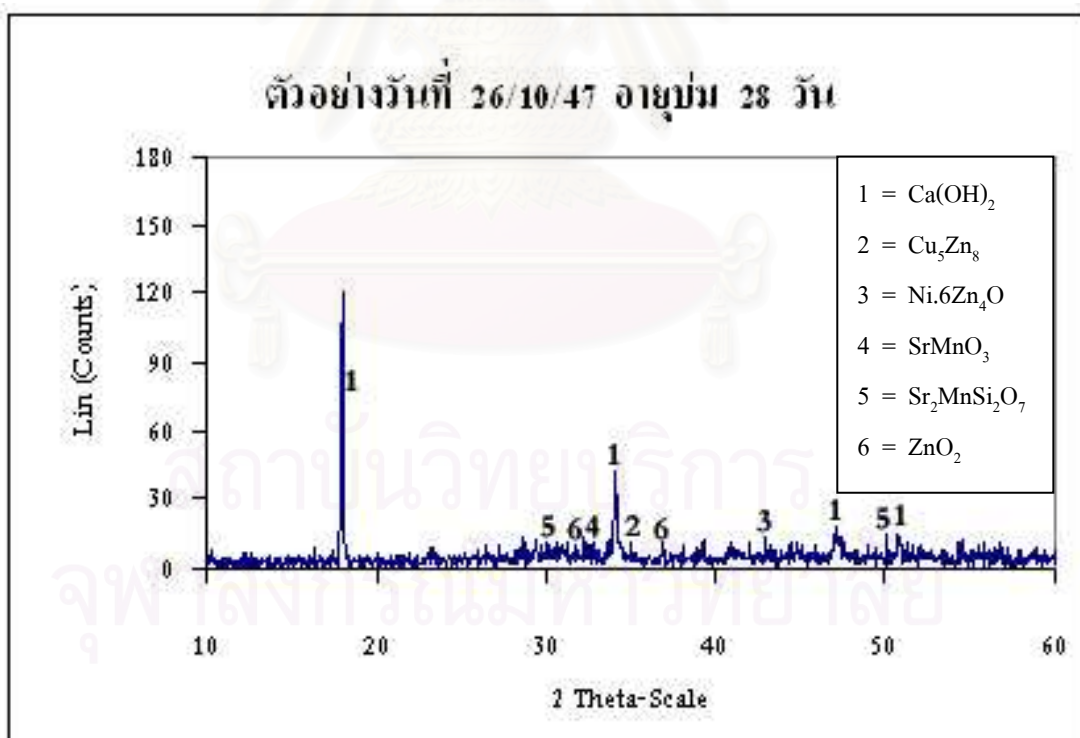
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



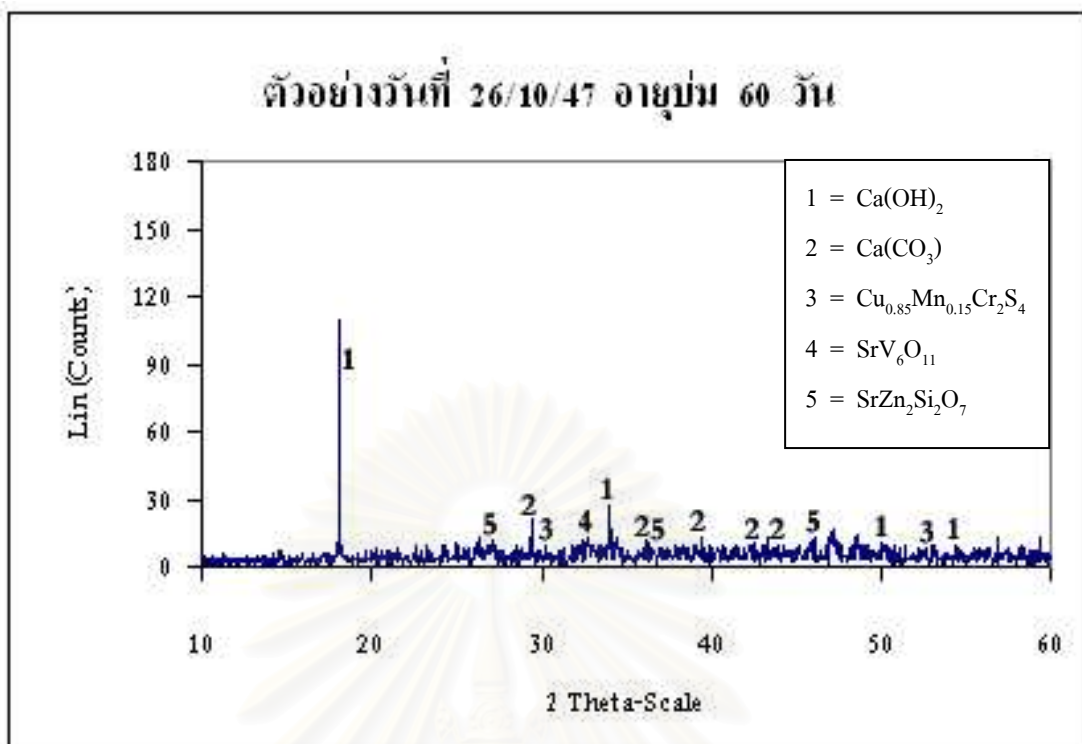
(ข) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน



(ง) อายุบ่ม 28 วัน



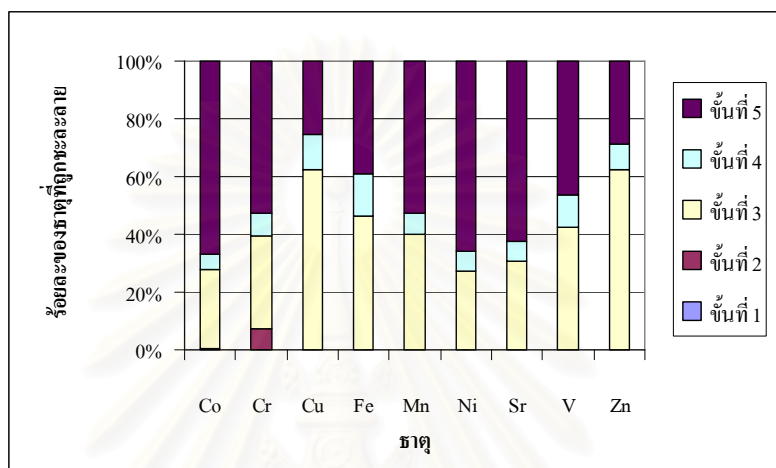
(จ) อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/47 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

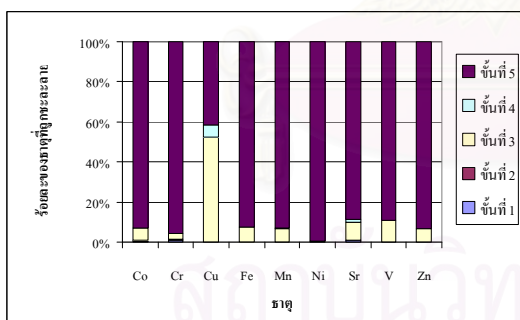
ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer ของตัวอย่างวันที่ 26/10/47 ก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปรากฏว่าพบ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$ $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ CuCrSe_2 Fe_7Se_8 $\text{MnSr}_3(\text{V}_2\text{O}_7)_2$ และ $\text{Sr}_4\text{Mn}_3\text{O}_{10}$ ส่วนหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าอายุบ่มที่เพิ่มขึ้นจะมี $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เพิ่มขึ้น และมี C_3S และ C_2S ลดลง นอกจากนี้ที่อายุบ่ม 3 วันพบ CuCr_2O_4 $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ และ ZnO ที่อายุบ่ม 7 วันพบ $\text{Sr}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ ที่อายุบ่ม 14 วันพบ $\text{Ca}_3\text{Mn}_2\text{O}_7$ ที่อายุบ่ม 28 วันพบ Cu_5Zn_8 $\text{Ni}_6\text{Zn}_4\text{O}$ SrMnO_3 $\text{Sr}_2\text{MnSiO}_7$ และ ZnO_2 และที่อายุบ่ม 60 วันพบ $\text{Cu}_{0.85}\text{Mn}_{0.15}\text{Cr}_2\text{S}_4$ จะเห็นว่าโลหะหนักก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีการเปลี่ยนแปลงพันธะเกิดขึ้น แต่ก็พบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่เกิดพันธะกับแมงกานีสออกไซด์ทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

4.5.2 ผลการเปรียบเทียบสารประกอบของโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction)

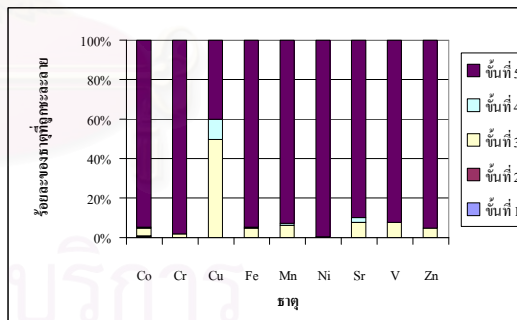
การเปรียบเทียบสารประกอบของโลหะหนักโดยวิธีการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) เลือกตัวอย่างวันที่ 26/10/47 22/01/48 และวันที่ 03/02/48 มาทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.23 ถึง 4.28



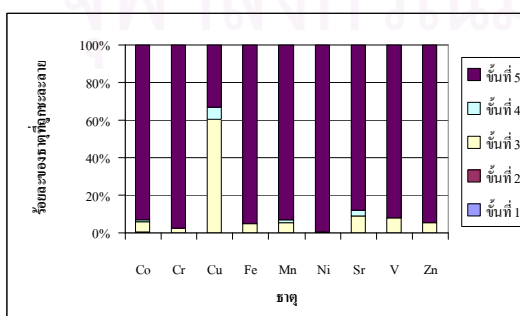
รูปที่ 4.23 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องตัวอย่างวันที่ 26/10/47 ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



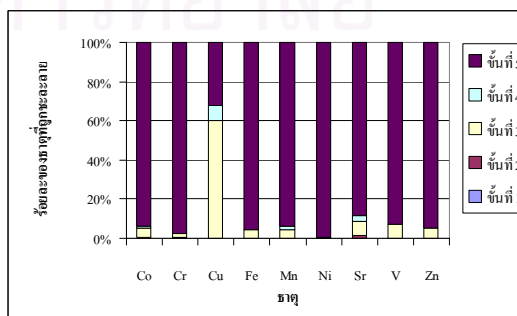
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



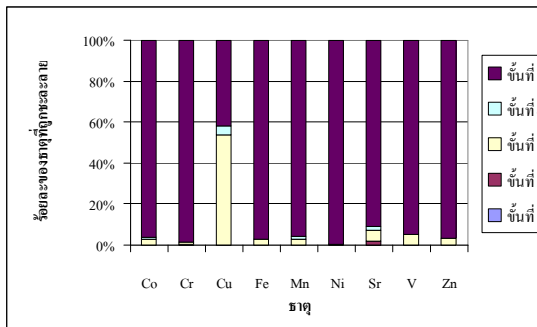
(ข) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน



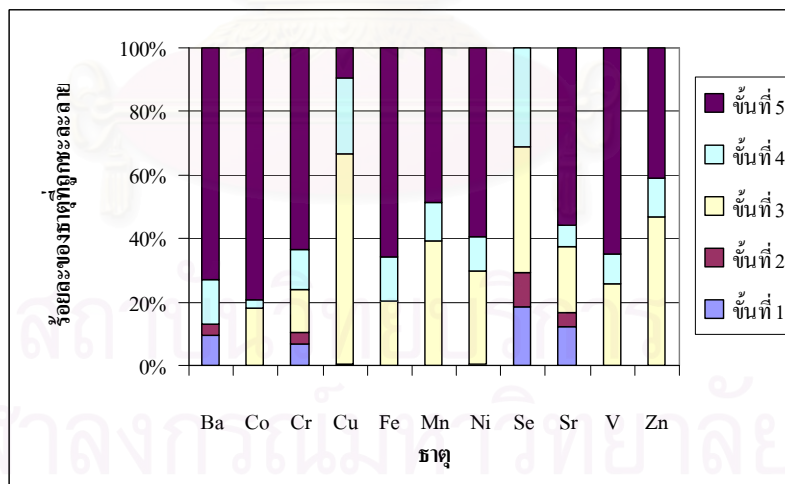
(ง) อายุบ่ม 28 วัน



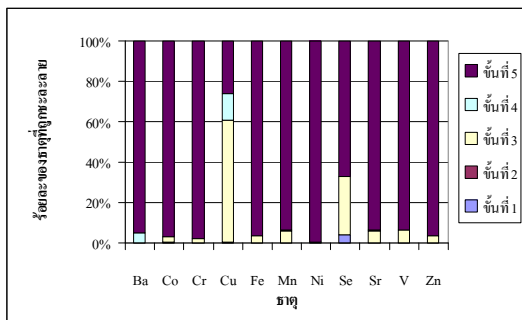
(จ) อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.24 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องตัวอย่างวันที่ 26/10/47 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

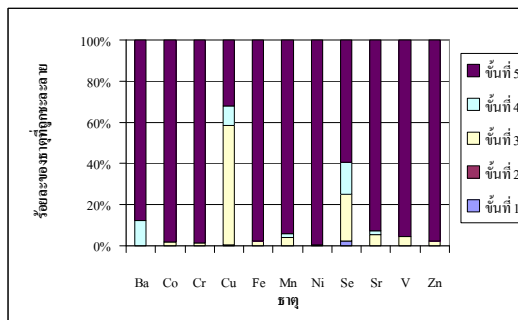
จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 เป็นตัวอย่างของวันที่ 26/10/47 พบว่าก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โลหะหนักถูกชะละลายออกมาในชั้นตอนที่ 3 ประมาณ 40 % และถูกชะละลายในชั้นตอนที่ 4 ประมาณ 10 % แสดงว่าโลหะหนักสร้างพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ และอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์บ้างเล็กน้อย ส่วนหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ประมาณ 90 % อยู่ในชั้นตอนที่ 5 คือไม่ถูกชะละลายออกมา ยกเว้นทองแดง แสดงว่าโลหะหนักมีการเปลี่ยนแปลงพันธะใหม่เป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมากขึ้น



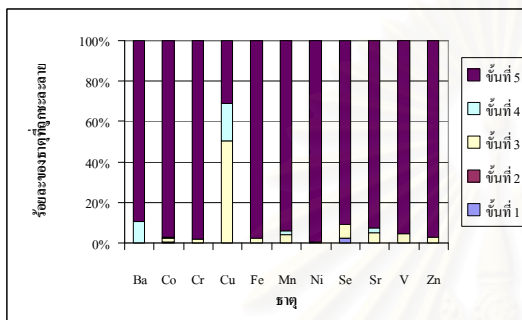
รูปที่ 4.25 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องตัวอย่างวันที่ 22/01/48 ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



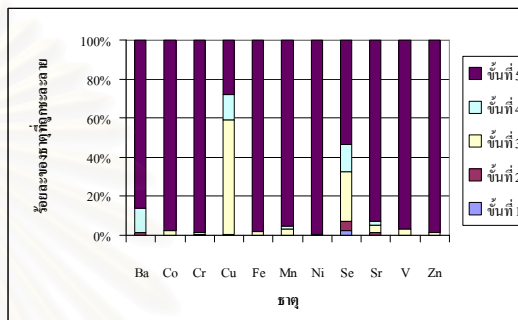
(ก) อายุ 3 วัน



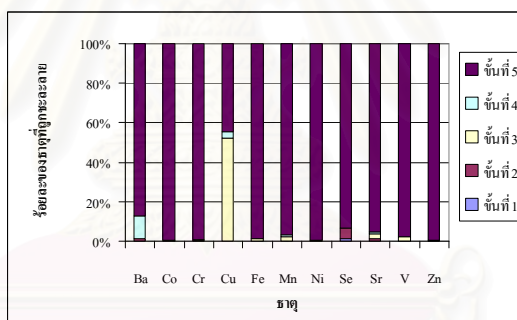
(ข) อายุ 7 วัน



(ค) อายุ 14 วัน



(ง) อายุ 28 วัน

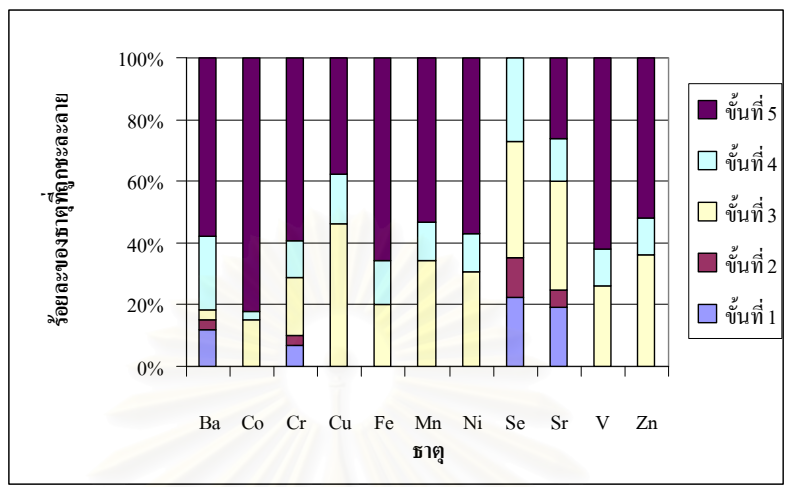


(จ) อายุ 60 วัน

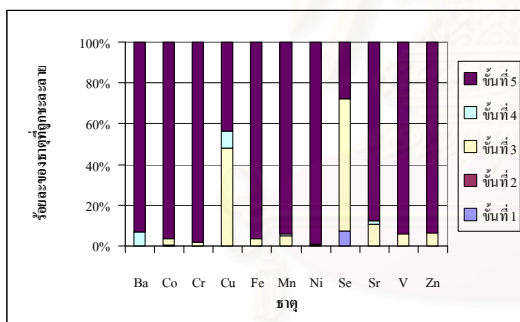
รูปที่ 4.26 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องตัวอย่างวันที่ 22/01/48 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 เป็นตัวอย่างของวันที่ 22/01/48 พบว่าก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โลหะหนักถูกชะละลายออกมาในชั้นตอนที่ 3 ประมาณ 30 % และถูกชะละลายในชั้นตอนที่ 4 ประมาณ 10 % แสดงว่าโลหะหนักสร้างพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ และอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์บ้างเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีแบเรียม โครเมียม ซิลิเนียม และสตรอนเชียมชะละลายออกมาในชั้นตอนที่ 1 และ 2 อีกด้วย แสดงว่าโลหะหนักเหล่านี้บางส่วนมีการสร้างพันธะที่มีการแลกเปลี่ยนง่ายและพันธะคาร์บอนตซึ่งมีความเสถียรต่ำ ส่วนหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ประมาณ 90 % อยู่ในชั้นตอนที่ 5

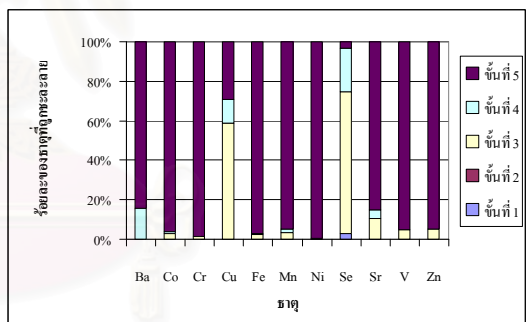
คือไม่ถูกชะละลายออกมา ยกเว้นทองแดงและซีลีเนียม แสดงว่าหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โลหะหนักก็มีความเสถียรสูงขึ้น



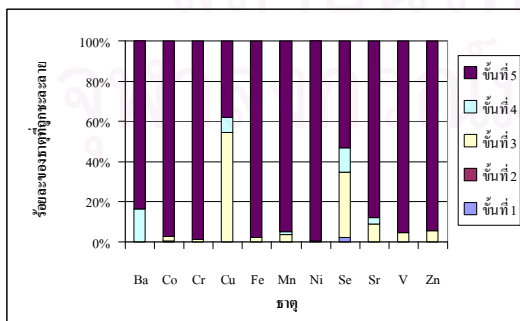
รูปที่ 4.27 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องตัวอย่างวันที่ 03/02/4/8 ก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน



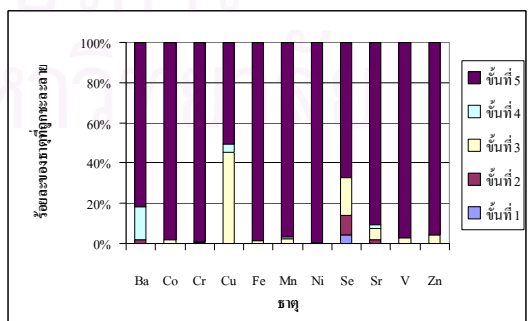
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



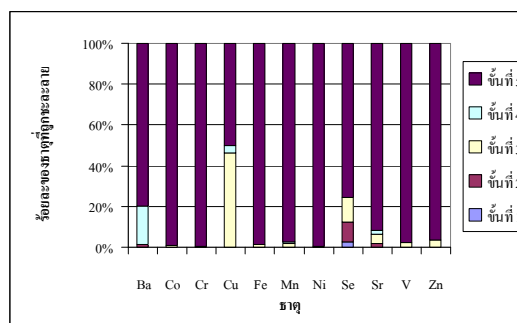
(ข) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน



(ง) อายุบ่ม 28 วัน



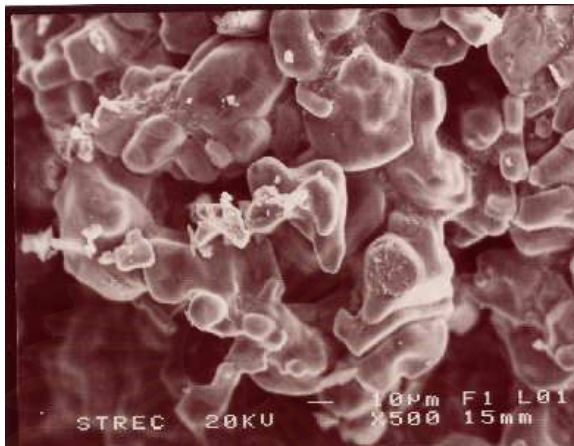
(จ) อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.28 ร้อยละของการชะละลายของธาตุต่าง ๆ ในกระบวนการสกัดแบบต่อเนื่องตัวอย่างวันที่ 03/02/48 หลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

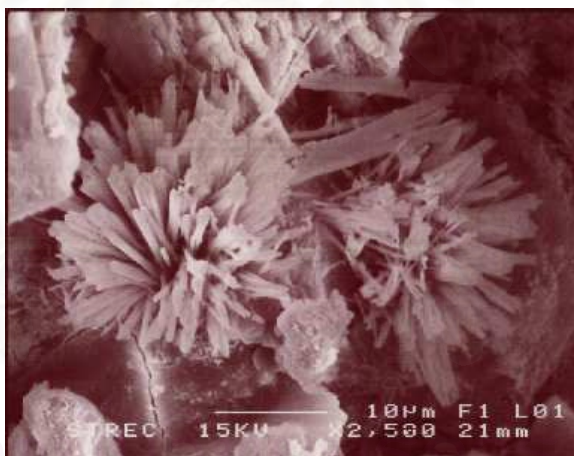
จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 เป็นตัวอย่างของวันที่ 03/02/48 พบว่าก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โลหะหนักถูกชะละลายออกมาในชั้นตอนที่ 3 ประมาณ 30 % และถูกชะละลายในชั้นตอนที่ 4 ประมาณ 10 % แสดงว่าโลหะหนักสร้างพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ และอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์บ้างเล็กน้อย นอกจากนี้ยังมีแบเรียม โครเมียม ซีลีเนียม และสตรอนเชียมชะละลายออกมาในชั้นตอนที่ 1 และ 2 อีกด้วย แสดงว่าโลหะหนักเหล่านี้บางส่วนมีการสร้างพันธะที่มีการแลกเปลี่ยนง่ายและพันธะคาร์บอนेटซึ่งมีความเสถียรต่ำ เช่นเดียวกับตัวอย่างวันที่ 22/01/48 ส่วนหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่ประมาณ 90 % อยู่ในชั้นตอนที่ 5 คือไม่ถูกชะละลายออกมา ยกเว้นทองแดงและซีลีเนียม แสดงว่าหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โลหะหนักมีความเสถียรสูงขึ้น

จากการเปรียบเทียบตัวอย่างทั้ง 3 พบว่าก่อนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโลหะหนักจะสร้างพันธะกับเหล็กหรือแมงกานีสออกไซด์ และอยู่ในรูปสารอินทรีย์หรือซัลไฟด์บ้างเล็กน้อย เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแล้วโลหะหนักจะมีการสร้างพันธะใหม่ที่มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นสรุปได้ว่าหลังการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะพบว่าโลหะหนักส่วนใหญ่มีความเสถียรมากขึ้น

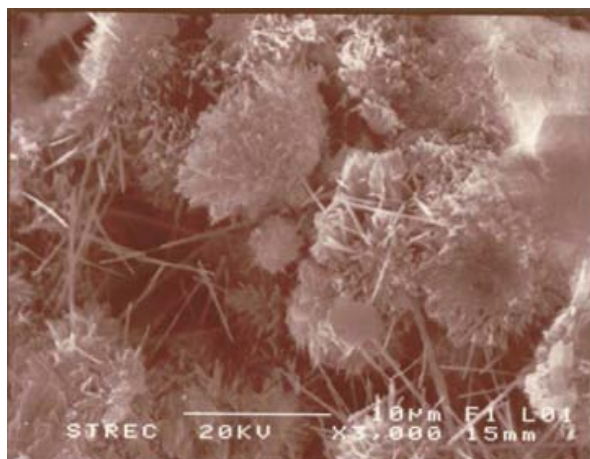
4.5.3 ผลการเปรียบเทียบสถานภาพของโลหะหนักโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



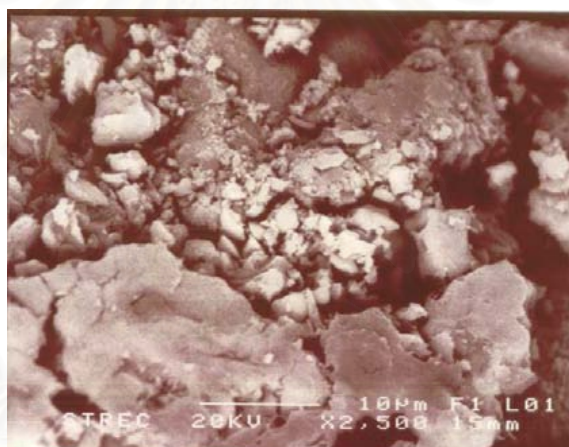
รูปที่ 4.29 โครงสร้างที่ผิวภายในปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 500 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.30 ลักษณะผลึกซึ่งอาจเป็นแคลเซียมออกไซด์ ที่กำลังขยาย 2500 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.31 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังขยาย 3000 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)



รูปที่ 4.32 โครงสร้างของเหล็กในซีเมนต์เพสต์วันที่ 26/10/48 ที่อายุบ่ม 60 วัน กำลังขยาย 2500 เท่า จากการวิเคราะห์โดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวอย่างปูนเม็ดก่อนเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ไม่พบโลหะหนัก ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.29 เป็นลักษณะพื้นผิวภายในของปูนเม็ด ที่กำลังขยาย 500 เท่า ลักษณะที่สังเกตได้คือปูนเม็ดมีผิวขรุขระและมีความมน เมื่อตรวจสอบหาลงค์ประกอบในภาพพบว่ามืองค์ประกอบของแคลเซียมสูง มีซิลิกาและออกซิเจนในปริมาณที่น้อยกว่า และรูปที่ 4.30 เป็นลักษณะของผลึกซึ่งอาจเป็นแคลเซียมออกไซด์ ที่กำลังขยาย 2500 เท่า ซึ่งจากการตรวจสอบองค์ประกอบ พบว่ามีปริมาณของแคลเซียม และออกซิเจนสูง เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ตัวอย่างหลังปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังรูปที่ 4.31 เป็นลักษณะโครงสร้างของ

ซีเมนต์เพสต์ ที่กำลังขยาย 3000 เท่า เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะพบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และ Ettringite และรูปที่ 4.32 เป็นโครงสร้างของเหล็กในซีเมนต์เพสต์ จากการตรวจสอบพบองค์ประกอบพบว่ามีปริมาณเหล็ก และออกซิเจนสูง การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ทั้งก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันพบเพียงองค์ประกอบพื้นฐานทั่วไปของปูนซีเมนต์ เช่น แคลเซียม ออกซิเจน เหล็ก และซิลิกา เท่านั้น ไม่พบโครงสร้างของโลหะหนัก อาจจะเป็นเนื่องจากปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์มีปริมาณน้อยกว่า 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และมีกระจายตัวอยู่ทั่วไปในปูนซีเมนต์ ทำให้เครื่องไม่สามารถตรวจวัดได้ นอกจากนี้ตัวอย่างที่นำไปทดสอบใช้ปริมาณเพียงเล็กน้อย โอกาสในการที่จะพบจึงน้อยลง ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบลักษณะการจับตัวของโลหะหนักก่อนและหลังเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาชนิดและปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์ ตรวจพบว่ามีโลหะหนักในปูนซีเมนต์จำนวน 11 ธาตุ คือ แบเรียม (Ba) โคบอลต์ (Co) โครเมียม (Cr) ทองแดง (Cu) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) ซีลีเนียม (Se) สตรอนเชียม (Sr) วาเนเดียม (V) และสังกะสี (Zn) โดยโลหะหนักที่มีปริมาณสูงที่สุด คือ แมงกานีส รองลงมา คือ สตรอนเชียม โดยชนิดและปริมาณของโลหะหนักที่พบจะมีความแตกต่างกันเป็นช่วง ๆ ซึ่งมีผลมาจากวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิต

2. ผลการศึกษาสถานภาพของโลหะหนักในซีเมนต์เพสต์ ผลปรากฏว่าโลหะหนักส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบของเหล็กและแมงกานีสออกไซด์ นอกจากนั้นยังอาจจะอยู่ในรูปของสารประกอบวานาเดียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ เมื่ออายุบ่มสูงขึ้นพบว่าโลหะหนักมีการสร้างพันธะที่มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น

3. ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ พบว่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดคือ 28 เมกะพาสคัล หรือ 285.51 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร (มอก. 15 เล่ม 1-2547) เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองทำการบดเอง ทำให้ความละเอียดที่ได้มีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ที่ผลิตจากโรงงาน นอกจากนี้มีข้อสังเกตว่าในตัวอย่างที่พบว่ามีกำลังรับแรงอัดต่ำจะพบว่ามีปริมาณของทองแดงสูงกว่าตัวอย่างอื่น ๆ ดังนั้นทองแดงมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ต่ำลง ส่วนในตัวอย่างที่มีกำลังรับแรงอัดสูงพบว่ามีแบเรียมและวานาเดียมในปริมาณสูง ดังนั้นแบเรียมและวานาเดียมมีผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าสูงขึ้น

4. ผลการชะละลายของก้อนมอร์ตาร์ พบว่าการทดสอบตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ไม่มีโลหะหนักที่มีการชะละลายเกินมาตรฐานที่กำหนด ส่วนการทดสอบการชะละลายตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA พบเพียงซีลีเนียมเท่านั้นที่มีค่าเกินมาตรฐานที่กำหนดคือ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

5. ผลการทดลองยังสรุปได้ว่าการทดสอบการชะละลายตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA โลหะหนักมีการชะละลายออกมาในปริมาณที่สูงกว่าการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. งานวิจัยที่ศึกษาเป็นการนำตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่มีการเผาโดยใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนซึ่งเป็นการดำเนินระบบแบบปกติของโรงปูนและนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปขายจริงในท้องตลาด ดังนั้นจึงมีปริมาณโลหะหนักน้อย การวิจัยในบางเรื่องจะทำได้ไม่ชัดเจน เช่น การศึกษาสภาพของโลหะหนักในซีเมนต์ด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) หรือ Scanning Electron Microscope (SEM) ทำให้การตรวจวัดต่าง ๆ บางครั้งไม่สามารถตรวจวัดเจอเนื่องจากโลหะหนักมีปริมาณที่น้อยและมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในปูนซีเมนต์ ทำให้ผลการทดลองไม่สามารถที่จะสรุปผลออกมาได้อย่างชัดเจนเท่าที่ควร ดังนั้นควรจะมีการเผาปูนซีเมนต์โดยใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนที่มีปริมาณโลหะที่สูงมากกว่านี้ หรือจะทำการแปรเปลี่ยนค่าวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนหลายค่า เพื่อที่จะให้เห็นผลการทดลองที่ชัดเจนขึ้น

2. ตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่นำมาทำการศึกษาคควรที่จะมีการเก็บตัวอย่างที่สม่ำเสมอ โดยกำหนดระยะเวลาการเก็บที่แน่นอน เช่น อาทิตย์ละ 2 ครั้ง เป็นต้น เพื่อให้ผลการทดลองที่ออกมามีความน่าเชื่อถือสูงขึ้น

3. ตัวอย่างเม็ดปูนที่ทางโรงปูนเก็บให้บางครั้งมีปริมาณน้อย ซึ่งตัวอย่างบางชุดเป็นตัวอย่างที่มีปริมาณโลหะหนักสูง น่าจะถูกเลือกมาทำการวิจัยแต่ไม่สามารถที่จะเลือกตัวอย่างชุดดังกล่าวได้เนื่องจากมีปริมาณไม่เพียงพอในการทำวิจัย

4. ปูนซีเมนต์ในการทำวิจัยในครั้งนี้มาจากการบดปูนเม็ดและผสมยิบซั่มเอง ดังนั้นความละเอียดของปูนซีเมนต์ที่ได้จึงน้อยกว่าของทางโรงปูน ซึ่งทำให้ผลการทดลองที่ได้มีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าปกติ ทำให้ความน่าเชื่อถือในการวิจัยน้อยลง

5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. ควรจะมีการจำลองเตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดเล็กขึ้นมาใช้งาน เพื่อที่จะสามารถควบคุมการเติมวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในปริมาณที่ต้องการได้ เนื่องจากขอตัวอย่างจากโรงงานจริงไม่สามารถที่จะทำการแปรเปลี่ยนค่าวัตถุดิบและเชื้อเพลิงได้ในปริมาณที่ต้องการ เพราะที่ปูนซีเมนต์ที่โรงงานผลิตขึ้นจะต้องสามารถจำหน่ายได้จริงในท้องตลาด

2. ควรมีการศึกษาถึงอิทธิพลของโลหะหนักบางตัวที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ เช่น ทองแดง แบเรียม และวานาเดียม เพื่อให้เกิดความชัดเจนในการพัฒนาคุณภาพของปูนซีเมนต์ต่อไป

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- จุมพล เลิศขวงศา. 2546. SCCC's Industrial Waste Disposal Services. ใน ธุรกิจการจัดการของเสียและพลังงานควรปรับตัวอย่างไร. กรุงเทพมหานคร: แสงสว่างการพิมพ์.
- ��ชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2543. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. กรุงเทพมหานคร: ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง (ซีแพค).
- ธีระพล ตีรวสิน. 2546. ทางเลือกของการกำจัดกากอุตสาหกรรมด้วยมาตรฐานสากล. ใน ธุรกิจการจัดการของเสียและพลังงานควรปรับตัวอย่างไร. กรุงเทพมหานคร: แสงสว่างการพิมพ์.
- ปูนซีเมนต์นครหลวง. 2548. ค่ามาตรฐานของปริมาณโลหะหนักในปูนซีเมนต์. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- ภัทร กฤตานุสรณ์. 2546. อิทธิพลของสัดส่วนน้ำต่อซีเมนต์ต่อการทำเป็นก้อนแข็งของตะกอนโลหะหนักจากระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุไม่ใช้แล้ว. [Online] แหล่งที่มา: http://www.diw.go.th/diw_web/html/versionthai/laws/laws.asp [15 พฤศจิกายน 2547]
- รุจยา บุญญานูวัตร. 2548. ลักษณะเชิงปริมาณและคุณภาพของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ที่เกิดจากกระบวนการเผาพร้อมกับกากอุตสาหกรรม. (เอกสารไม่ตีพิมพ์)
- วินิต ช่อวิเชียร. 2544. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 9. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อภิสิทธิ์ พันธุ์ฤกษ์. 2545. การกำจัดเศษหนังสือพิมพ์ที่มีโครเมียมปนด้วยวิธีการเผาและกำจัดเถ้าโดยทำให้เป็นก้อนด้วยซีเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2547. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์. เล่ม 1. [Online] แหล่งที่มา: http://www.tisi.go.th/standard/comp_tha.html [3 มีนาคม 2549]

ภาษาอังกฤษ

- Achternbosch, 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[Online]. Available from: <http://www.itas.fzk.de/deu/lit/2003/acua03b.pdf>[2004, November 28]
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard specification for mortar cement. C1329-96. Annual book of ASTM standard vol. 04.02 section 4: 519-521.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test methods for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in or [50-mm] cube specimens). C109/109M-95. Annual book of ASTM standard vol. 04.01 section 4: 69-73.
- 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(1): 63-71.
- Arjunan, P., Silsbee, M. R. and Roy, D. M. 1996. Sulfoaluminate-belite cement from low-calcium fly ash and sulfur-rich and other industrial by-product. Cement and Concrete Research 29(8): 1305-1311.
- Bishop, M., Bott, S. G., and Barron, A. R. 2003. A New Mechanism for Cement Hydration Inhibition: Solid-State Chemistry of Calcium Nitrilotris(methylene)triphosphonate. Chemistry of Materials 15(16): 3074-3088.
- Butt, Y. M. and Timashev, V. V. 1974. The mechanism of clinker formation process and the modification of its structure. In : Int. Congr. Chem. Cem. 6, Moscow. Proceedings of the International Congress of Cement Chemistry, Moscow, Vol. 1, 1976 : 64- 102. (Scientific Institute of Cement Chemistry)
- 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 mechanism of hazardous substances in cementitious solidification/stabilization system. Journal of Hazardous Materials 24: 231-235.

- Cocke, D. L., Mollah, M. Y. A., Parga, J. R., Hess, T. R., and Ortego, J. D. 1992. An XPS and SEM/EDS characterization of leaching effects on lead- and zinc-doped Portland cement. Journal of Hazardous Materials 30(1): 83-95.
- Costner, P. and Thornton, J. 1990. Plying with Fire: Hazardous Waste Incineration. Greenpeace U.S.A., Washington, DC.
- 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.
- 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.
- 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(1): 71-82.
- Glasser, F. P. 1997. Fundamental aspects of cement solidification and stabilization. Journal of Hazardous Materials 52: 151-170.
- Gougar, M. L. D., Scheetz, B. E., and Roy, D. M. 1996. Ettringite and C-S-H Portland cement phases for waste ion immobilization. Waste Management 16(4): 295-303.
- 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., and Aalbers, Th. G., 1994. Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. Studies in Environmental Science. Bd 60. Utrecht.Elsevier Science BV.
- 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 waste stabilized/solidified in different cement matrices. Journal of Hazardous Materials 31(1): 39-57.
- Kindness, A., Lachowski, E. E., Minocha A. K., Galsser, F. P. 1994. Immobilization and fixation of molybdenum(VI) by Portland cement. Waste Management 14(2): 97-102.
- Kirchner G., Behavior of heavy-metals during cement clinker burning. Zement-Kalk-Gips. 39(10): 555-557.
- Li, X.D., Poon, C.S., Sun, H., Lo, I.M.C., Kirk, D.W. 2000. Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials. Hazardous Materials 82(3): 215-230.

- Locher, F.W. 1989. Development of environmental protection in the industry. Zement-Kalk-Gips. 3: 120:127.
- Mantus, E. K. 1992. All Fired Up Burning Hazardous Waste in Cement Kilns. Washington: Environmental Toxicology International.
- Monshi, A., and Asgarani, M. K. 1999. Producing Portland cement from iron and steel slags and limestone. Cement and Concrete Research 29(9): 1373-1377.
- Murat, M., Sorrentino, F. 1996. Effect of large intake of Cd Pb Cr Zn to cement raw meal on the mineralogical composition of clinker. Cement and Concrete Research 26: 337-385.
- Peter, P., Higgins, G.M., Chadbourne. 1986. Hazardous waste as a supplemental fuel for cement kilns. Paper presents at the 12th National Waste Processing Conference. Held 1986 in Denver, CO. Sponsored by the American Society of Mechanical Engineers.
- Polettini, 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(3): 281-285
- Scheidegger, A. M., Wieland, E., Scheinost, A. C., Dahn, R., and Spieler, P. 2000. Spectroscopic Evidence for the Formation of Layered Ni-Al Double Hydroxides in Cement. Environmental Science and Technology.
- Shih, P., Chang, J., and Chiang, L. 2003. Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash. Cement and Concrete Research 33(11): 1831-1836.
- Singh, M., and Garg, M. 1999. Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes. Cement and Concrete Research 29(3): 309-314.
- Singh, M., Upadhayay, S. N., and Prasad, P. M. 1996. Preparation of special cements from red mud. Waste Management 16(8): 665-670.
- Sprung, S., Rechenberg, W. 1994. The reaction of lead and zinc in the burning of cement clinker. Zement-Kalk-Gips. 5: 258-263.
- 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(1): 137-144.

- U.S.Environmental Protection Agency. 1992. Toxicity Characteristic Leaching Proceduer[Online]
Available from: <http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/1311.pdf>[2004,
December 3]
- U.S. Environmental Protection Agency. 1996. Microwave assisted acid digestion of siliceous
and organically based matrices[Online]. Available from:
<http://www.epa.gov/epaoswer/hazwaste/test/pdfs/3052.pdf>[2004, December 12]
- 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.
- 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 ($\text{CaZn}_2(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$).
Cement and Concrete Research 31(9): 1327-1332.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

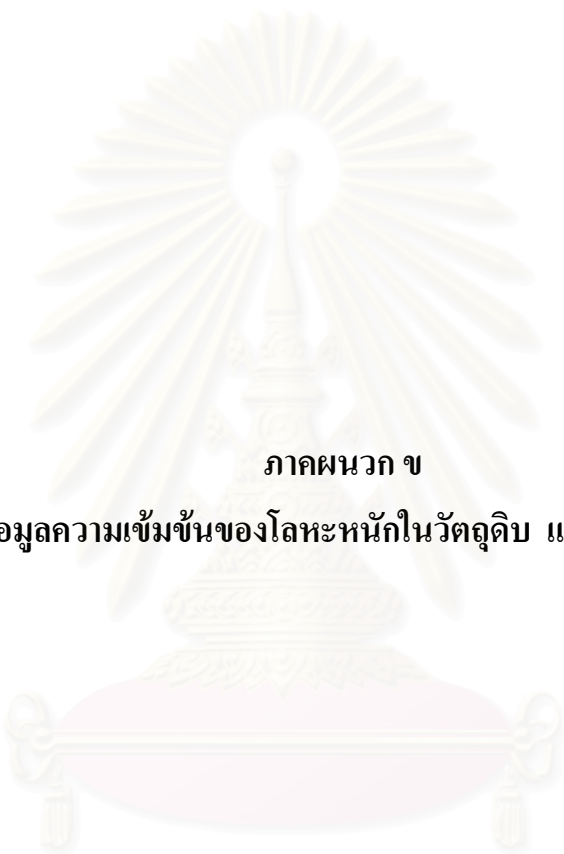
ตารางที่ ก.1 ข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

Sample	Ag	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	Hg	In	Mn	Ni	Pb	Se	Sr	Tl	V	Zn
14/09/47	0.0702	< 0.09	< 0.0034	< 0.00067	< 0.01	2.3407	48.1543	17.7409	2434.9789	< 0.0398	< 0.00376	na	422.4689	15.9300	< 0.11	< 0.1023	193.1161	< 0.2467	75.7280	38.3837
16/09/47	0.1074	< 0.09	< 0.0034	< 0.00067	< 0.01	4.6616	45.4258	15.9478	5924.9584	< 0.0398	< 0.00376	na	399.7832	14.9153	< 0.11	< 0.1023	202.6962	< 0.2467	76.6107	35.2698
21/09/47	0.0987	< 0.09	< 0.0034	< 0.00067	< 0.01	5.7772	38.1239	13.4632	8874.1542	< 0.0398	< 0.00376	na	417.5741	26.5563	< 0.11	< 0.1023	204.7563	< 0.2467	68.4898	33.3266
23/09/47	0.1022	< 0.09	< 0.0034	< 0.00067	< 0.01	7.7690	41.5346	12.0746	12664.5745	< 0.0398	< 0.00376	na	418.7905	30.3694	< 0.11	< 0.1023	199.8041	< 0.2467	72.1500	33.1452
27/09/47	0.1093	< 0.09	< 0.0034	< 0.00067	< 0.01	5.3931	41.3053	11.6991	13435.5880	< 0.0398	< 0.00376	na	325.3748	36.6704	< 0.11	< 0.1023	207.4562	< 0.2467	71.9577	34.2526
30/09/47	0.0562	< 0.09	< 0.0034	< 0.00067	< 0.01	5.5581	38.3839	10.4873	13996.8879	< 0.0398	< 0.00376	na	332.6501	38.0925	< 0.11	< 0.1023	212.9163	< 0.2467	69.8671	36.2879
20/10/47	0.0207	< 0.09	0.0500	< 0.00067	< 0.01	5.5581	32.0637	11.0523	10772.5499	< 0.0398	< 0.00376	na	334.4155	34.9600	< 0.11	< 0.1023	211.1915	< 0.2467	58.6102	33.2304
21/10/47	0.0202	< 0.09	0.0500	< 0.00067	< 0.01	5.3235	32.6178	12.9544	12046.3074	< 0.0398	< 0.00376	na	324.5910	38.0992	< 0.11	< 0.1023	215.3536	< 0.2467	58.9688	70.5513
22/01/47	0.0207	< 0.09	0.0500	< 0.00067	< 0.01	6.2592	29.2266	98.5248	12023.6452	< 0.0398	< 0.00376	na	315.4871	35.7414	17.0474	< 0.1023	205.1194	< 0.2467	52.1962	122.2579
23/01/47	0.0820	< 0.09	0.0500	< 0.00067	< 0.01	5.5134	30.5404	86.5276	10686.5313	< 0.0398	< 0.00376	na	325.7699	31.0476	12.1857	< 0.1023	208.9255	< 0.2467	45.0947	135.5410
24/10/47	0.0571	< 0.09	0.0500	< 0.00067	< 0.01	4.9029	30.1041	89.0603	9965.8725	< 0.0398	< 0.00376	na	349.3284	31.5210	12.8235	< 0.1023	206.6536	< 0.2467	42.5463	146.3381
25/10/47	0.0392	< 0.09	0.0500	< 0.00067	< 0.01	5.4999	29.3695	95.0847	9882.2495	< 0.0398	< 0.00376	na	350.5781	31.2355	13.3622	< 0.1023	201.0137	< 0.2467	41.0100	146.4536
26/10/47	0.0755	< 0.09	0.0500	< 0.00067	< 0.01	5.2913	32.2498	66.1825	9607.9766	< 0.0398	< 0.00376	na	411.3542	33.2721	6.1536	< 0.1023	202.8015	< 0.2467	45.4068	107.3001
06/01/48	0.0202	< 0.09	144.0045	< 0.00067	< 0.01	11.4266	38.2216	14.6228	18107.3651	< 0.01	< 0.0033	na	462.4789	30.5344	< 0.11	18.3079	260.4719	< 0.112	85.1720	47.1700
08/01/48	0.0202	< 0.09	137.7915	< 0.00067	< 0.01	11.0267	37.4020	10.4608	18155.9874	< 0.01	< 0.0033	na	440.8505	24.1178	< 0.11	20.5638	269.1275	< 0.112	75.5577	41.3296
10/01/48	0.0202	< 0.09	133.6688	< 0.00067	< 0.01	11.2402	37.4750	10.7891	17527.1539	< 0.01	< 0.0033	na	466.9270	29.1050	< 0.11	18.3242	272.4126	< 0.112	81.2962	41.6270
12/01/48	0.0202	< 0.09	137.5650	< 0.00067	< 0.01	11.7972	43.2794	11.8546	18391.6984	< 0.01	< 0.0033	na	496.3029	28.5544	< 0.11	15.2981	283.4572	< 0.112	83.2289	42.2551

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

Sample	Ag	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	Hg	In	Mn	Ni	Pb	Se	Sr	Tl	V	Zn
16/01/48	0.0202	< 0.09	131.7210	< 0.00067	< 0.01	10.6955	40.9372	15.4009	17361.5965	< 0.01	< 0.0033	na	501.9412	26.7282	< 0.11	22.3380	279.6873	< 0.112	81.0881	51.7133
18/01/48	0.0202	< 0.09	127.7666	< 0.00067	< 0.01	10.3524	38.4145	11.8206	17103.9863	< 0.01	< 0.0033	na	449.3845	27.1515	< 0.11	23.1642	269.5480	< 0.112	80.4279	51.5535
20/01/48	0.0202	< 0.09	131.3789	< 0.00067	< 0.01	10.3781	62.8755	10.7385	16842.8434	< 0.01	< 0.0033	na	424.4057	26.9362	< 0.11	19.2139	264.1259	< 0.112	77.9038	45.8980
22/01/48	0.0202	< 0.09	150.5405	< 0.00067	< 0.01	10.5425	88.4710	11.3700	17469.0947	< 0.01	< 0.0033	na	453.5207	29.7174	< 0.11	18.4356	274.5688	< 0.112	81.2246	42.2543
24/01/48	0.0202	< 0.09	141.6500	< 0.00067	< 0.01	10.6922	73.4361	10.5936	17262.5564	< 0.01	< 0.0033	na	466.9907	26.5612	< 0.11	21.3803	270.1407	< 0.112	77.9033	41.0626
26/01/48	0.0202	< 0.09	118.7462	< 0.00067	< 0.01	12.0136	53.7677	10.5487	18989.9066	< 0.01	< 0.0033	na	452.6848	17.2650	< 0.11	14.8156	172.8043	< 0.112	71.6241	45.3583
28/01/48	0.0202	< 0.09	143.0744	< 0.00067	< 0.01	12.5069	61.2824	10.1662	20048.4513	< 0.01	< 0.0033	na	486.2975	31.3287	< 0.11	13.6578	265.7882	< 0.112	87.8927	49.8239
30/01/48	0.0202	< 0.09	151.3536	< 0.00067	< 0.01	11.9282	56.2932	10.0395	19918.2483	< 0.01	< 0.0033	na	469.6169	30.0792	< 0.11	14.9600	302.6839	< 0.112	88.1569	55.3774
01/02/48	0.0202	< 0.09	142.9828	< 0.00067	< 0.01	10.5954	46.9625	9.5851	17811.3923	< 0.01	< 0.0033	na	470.4235	27.9622	< 0.11	20.8621	302.7776	< 0.112	86.5031	42.0241
03/02/48	0.0202	< 0.09	117.6527	< 0.00067	2.8024	13.8100	44.6766	202.3338	24054.9514	< 0.01	< 0.0033	na	480.9130	22.8591	31.9749	11.5161	181.6838	< 0.112	61.6099	297.4598
05/02/48	0.0202	18.9934	101.7375	< 0.00067	2.7019	12.9886	41.0881	266.6263	23719.5040	< 0.01	< 0.0033	na	384.6944	< 0.04	46.8790	9.8528	147.8763	< 0.112	54.3499	323.3040
07/02/48	0.0202	19.3159	116.9402	< 0.00067	< 0.01	13.1956	34.9375	274.1197	23841.2732	< 0.01	< 0.0033	na	389.1653	21.9529	44.4203	12.3992	280.5550	< 0.112	40.7633	342.4414
09/02/48	0.0202	< 0.09	155.0411	< 0.00067	< 0.01	10.2350	56.9984	35.1466	17985.8971	< 0.01	< 0.0033	na	423.2855	27.2383	< 0.11	16.5159	276.0000	< 0.112	81.5023	70.2887

na (not available) = ไม่มีข้อมูล



ภาคผนวก ข
ข้อมูลความเข้มข้นของโลหะหนักในวัตถุดิบ และเชื้อเพลิง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในหินปูน และ หินเชลอะลูมินาสูง

ชนิด ของ โลหะ หนัก	หินปูน (Limestone)				หินเชลมีอะลูมินาสูง (Shale Mix)			
	ความเข้มข้น สูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้น ต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้น สูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้น ต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./กก.)	SD.			(มก./กก.)	SD.
As	15.706	< 0.0652	3.106	4.992	25.227	0.000	4.650	8.968
Ba	367.849	< 0.0034	76.130	131.357	487.429	372.603	428.767	28.012
Cd	< 0.0089	< 0.0089	0.000	0.000	< 0.0089	< 0.0089	0.000	0.000
Co	< 0.0104	< 0.0104	0.000	0.000	< 0.0104	< 0.0104	0.000	0.000
Cr	91.042	< 0.0064	8.212	17.959	189.494	26.590	94.572	40.493
Cu	27.803	< 0.0073	3.217	6.920	14.691	< 0.0073	2.748	3.879
Ga	4.220	< 0.0398	0.833	1.198	8.955	4.013	6.885	1.354
Mn	424.693	63.689	204.559	92.451	253.657	122.011	206.612	36.959
Ni	< 0.0514	< 0.0514	0.079	0.402	23.335	7.057	10.631	5.774
Pb	< 0.0686	< 0.0686	0.000	0.000	< 0.0686	< 0.0686	0.000	0.000
Se	77.319	< 0.1023	41.411	23.519	10.910	< 0.1023	1.490	3.427
Sr	172.224	4.555	98.428	44.593	97.464	20.933	47.256	17.347
V	16.130	< 0.0069	1.682	3.501	80.024	38.919	55.097	14.644
Zn	202.498	1.601	51.410	65.741	236.549	179.231	200.470	17.344

ตารางที่ ข.2 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในหินเชลซิติกา
สูง และแร่เหล็ก

ชนิด ของ โลหะ หนัก	หินเชลซิติกาสูง (Shale Core)				แร่เหล็ก (Iron Ore)			
	ความเข้มข้น สูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้น ต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้น สูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้น ต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./กก.)	SD.			(มก./กก.)	SD.
As	32.215	0.000	5.659	9.071	653.611	12.908	99.736	197.398
Ba	500.771	366.323	457.922	37.112	1301.719	33.010	875.960	691.501
Cd	< 0.0089	< 0.0089	0.000	0.000	29.779	< 0.0089	5.424	9.758
Co	< 0.0104	< 0.0104	0.000	0.000	128.390	0.000	61.700	45.260
Cr	45.852	23.874	30.327	5.832	572.665	32.075	260.241	134.201
Cu	< 0.0073	< 0.0073	0.000	0.000	6853.879	2.944	977.988	2242.926
Ga	8.336	3.740	6.577	1.273	57.474	22.480	27.709	11.565
Mn	213.195	105.637	127.981	29.218	16620.321	82.300	6352.543	4565.893
Ni	6.218	0.220	2.343	1.571	124.994	< 0.0514	65.257	41.327
Pb	< 0.0686	< 0.0686	0.000	0.000	1282.134	0.000	213.043	443.498
Se	1.182	< 0.1023	0.099	0.327	< 0.1023	< 0.1023	0.000	0.000
Sr	89.055	55.836	69.766	8.662	113.410	0.000	43.100	38.444
V	56.686	34.919	46.267	6.591	1044.849	< 0.0069	361.927	242.019
Zn	227.000	151.095	193.568	18.947	7206.037	54.820	1227.109	2444.698

ตารางที่ ข.3 ความเข้มข้นสูงสุดและต่ำสุดและค่าเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่อยู่ในวัตถุบ
ทดแทน และเชื้อเพลิงทดแทน

ชนิด ของ โลหะ หนัก	วัตถุบทดแทน				เชื้อเพลิงทดแทน			
	ความเข้มข้น สูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้น ต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย		ความเข้มข้น สูงสุด (มก./กก.)	ความเข้มข้น ต่ำสุด (มก./กก.)	ค่าเฉลี่ย	
			(มก./ กก.)	SD.			(มก./ กก.)	SD.
As	16.299	< 0.0652	2.015	4.849	21.300	< 0.0652	2.215	5.828
Ba	223.911	12.353	140.426	80.108	157.960	< 0.0034	65.686	66.152
Cd	< 0.0089	< 0.0089	0.000	0.000	< 0.0089	< 0.0089	0.000	0.000
Co	8.189	< 0.0104	3.510	3.345	< 0.0104	< 0.0104	0.000	0.000
Cr	16.880	0.987	10.762	4.630	2.193	< 0.0064	1.001	0.859
Cu	5.351	< 0.0073	1.979	2.027	8.506	2.232	5.071	2.604
Ga	6.716	< 0.0398	0.927	1.848	< 0.0398	< 0.0398	0.000	0.000
Mn	386.447	82.352	211.404	81.991	16.792	7.221	10.296	3.086
Ni	24.562	< 0.0514	9.399	9.934	< 0.0514	< 0.0514	0.000	0.000
Pb	< 0.0686	< 0.0686	0.000	0.000	< 0.0686	< 0.0686	0.000	0.000
Se	39.711	< 0.1023	9.215	13.100	16.951	< 0.1023	1.413	4.685
Sr	466.973	18.013	201.666	152.969	11.528	0.000	3.120	2.919
V	33.863	2.056	19.158	11.506	11.184	< 0.0069	5.376	4.842
Zn	156.053	8.851	64.600	57.303	197.501	17.314	123.521	51.504

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 ความเข้มข้นเฉลี่ยของโลหะชนิดต่างๆ ที่พบในเชื้อเพลิงหลัก

ชนิดของโลหะหนัก	ความเข้มข้นเฉลี่ยของเชื้อเพลิงหลัก (มก./กก.)
As	0.00
Ba	0.00
Cd	0.00
Cr	0.00
Cu	138.50
Mn	252.75
Ni	41.50
Pb	0.00
Sr	1114.67
V	0.00
Zn	193.50

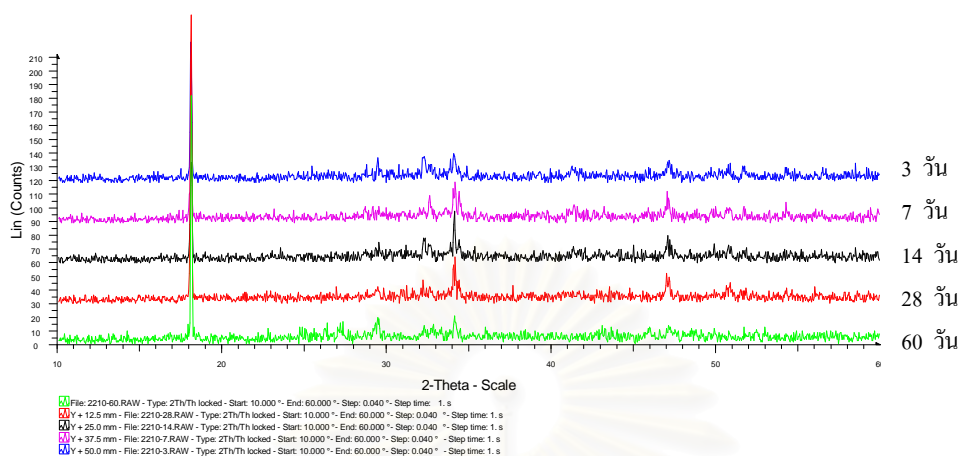
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



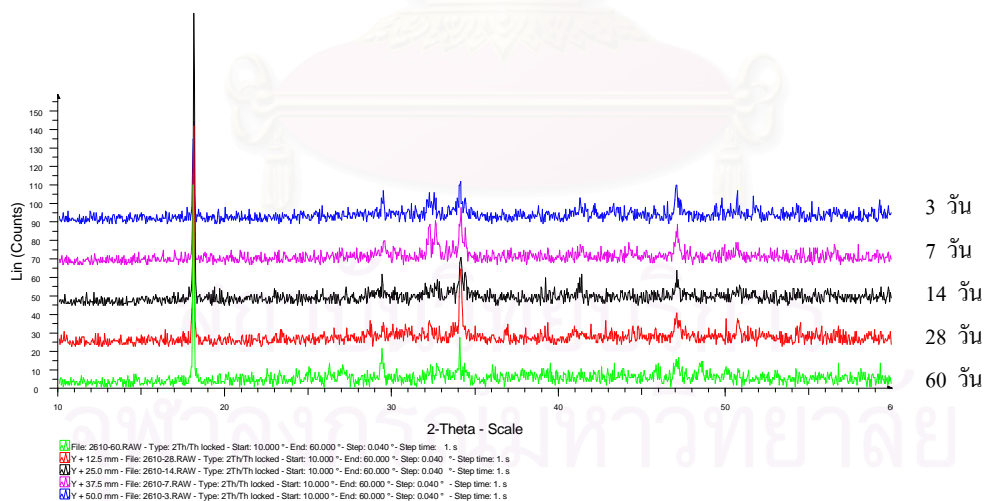
ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์

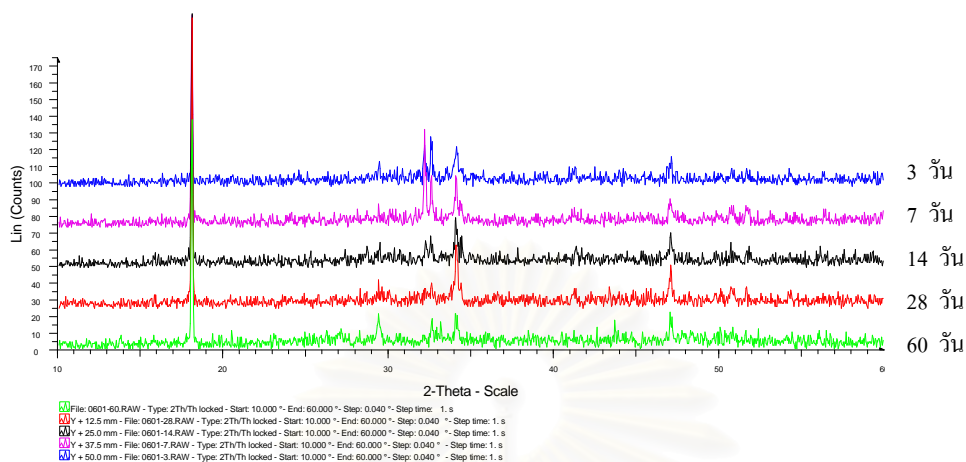
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



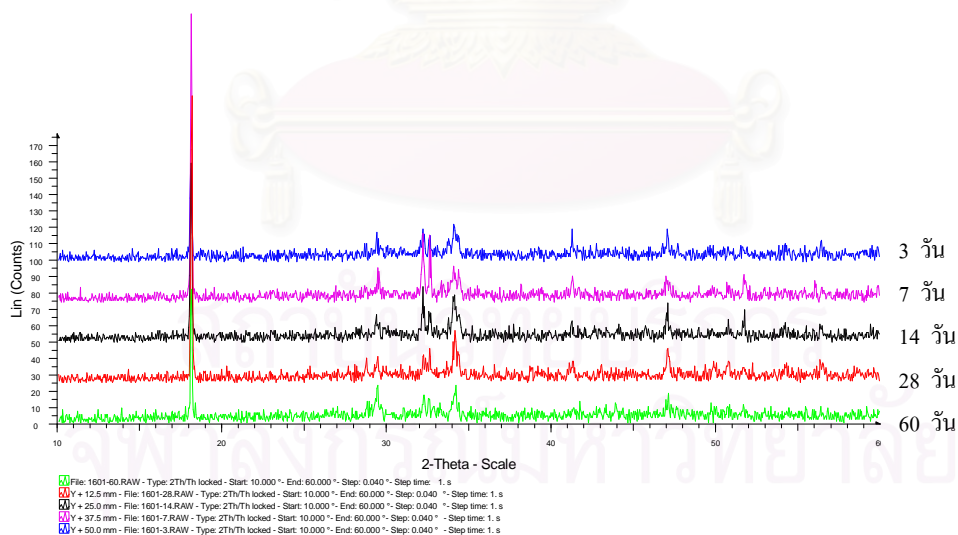
รูปที่ ค.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 22/10/47



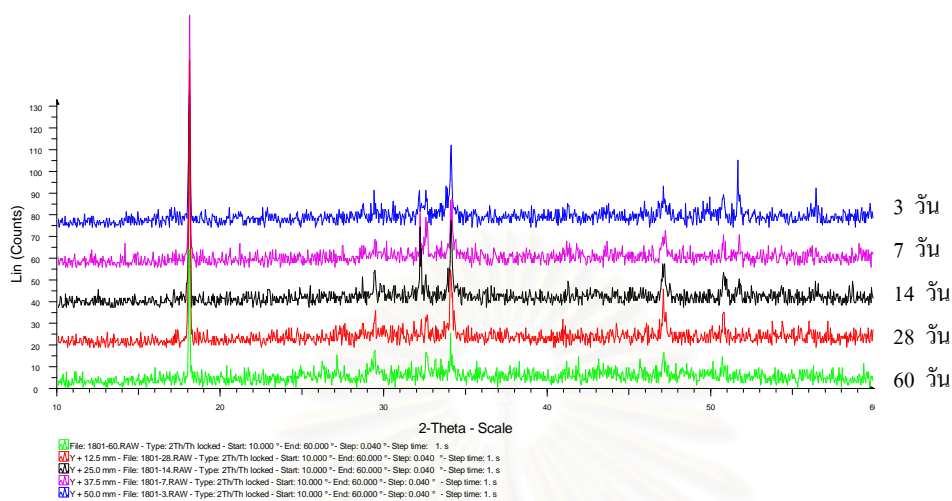
รูปที่ ค.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 26/10/47



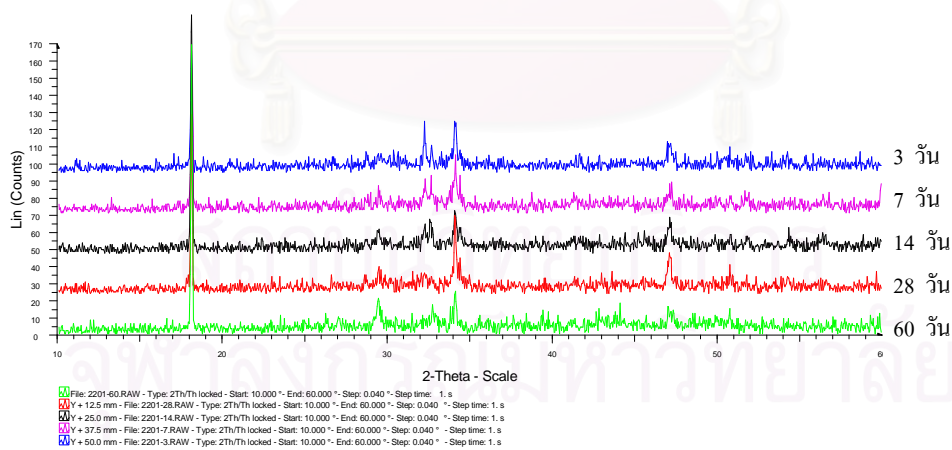
รูปที่ ค.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 06/01/48



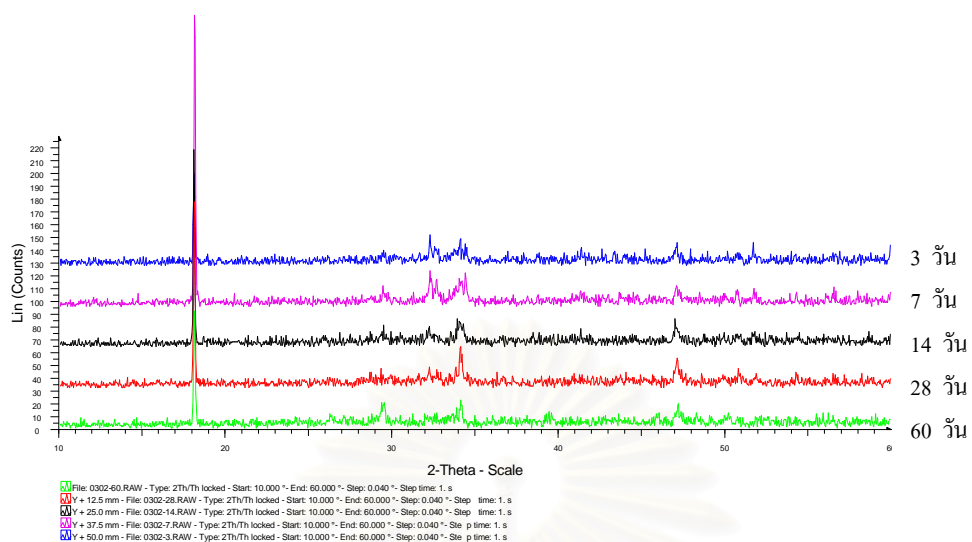
รูปที่ ค.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 16/01/48



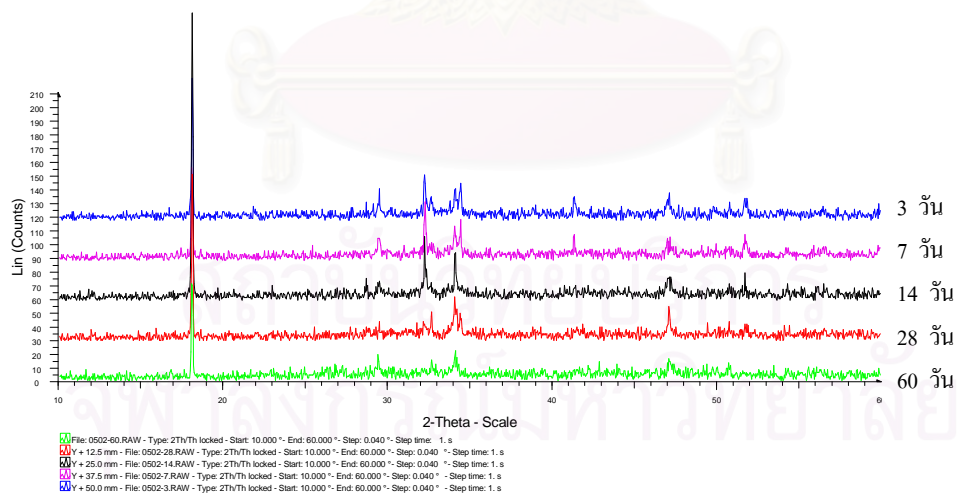
รูปที่ ค.5 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 18/01/48



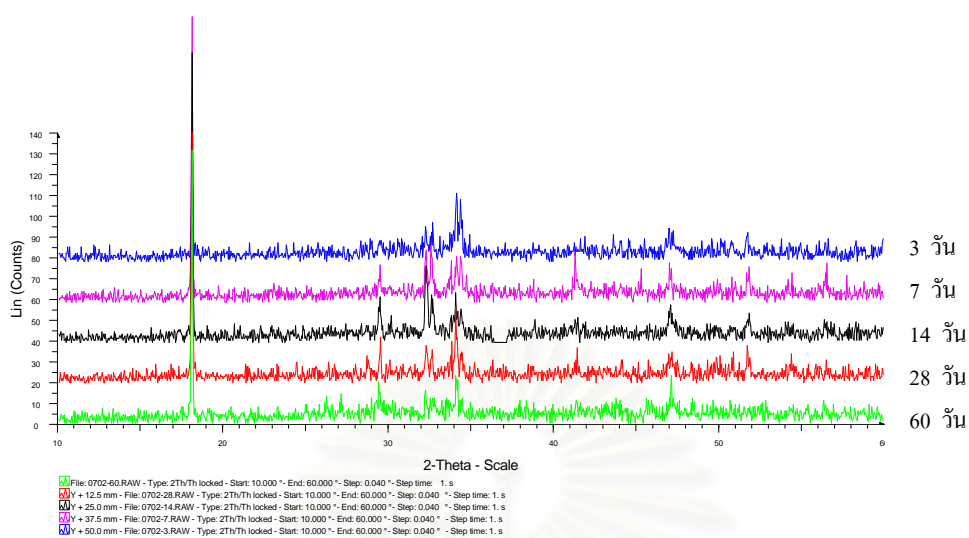
รูปที่ ค.6 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 22/01/48



รูปที่ ค.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 03/02/48



รูปที่ ค.8 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 05/02/48



รูปที่ ค.9 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของซีเมนต์เพสต์ที่อายุบ่ม 3 7 14 28 และ 60 วัน ตัวอย่างวันที่ 07/02/48

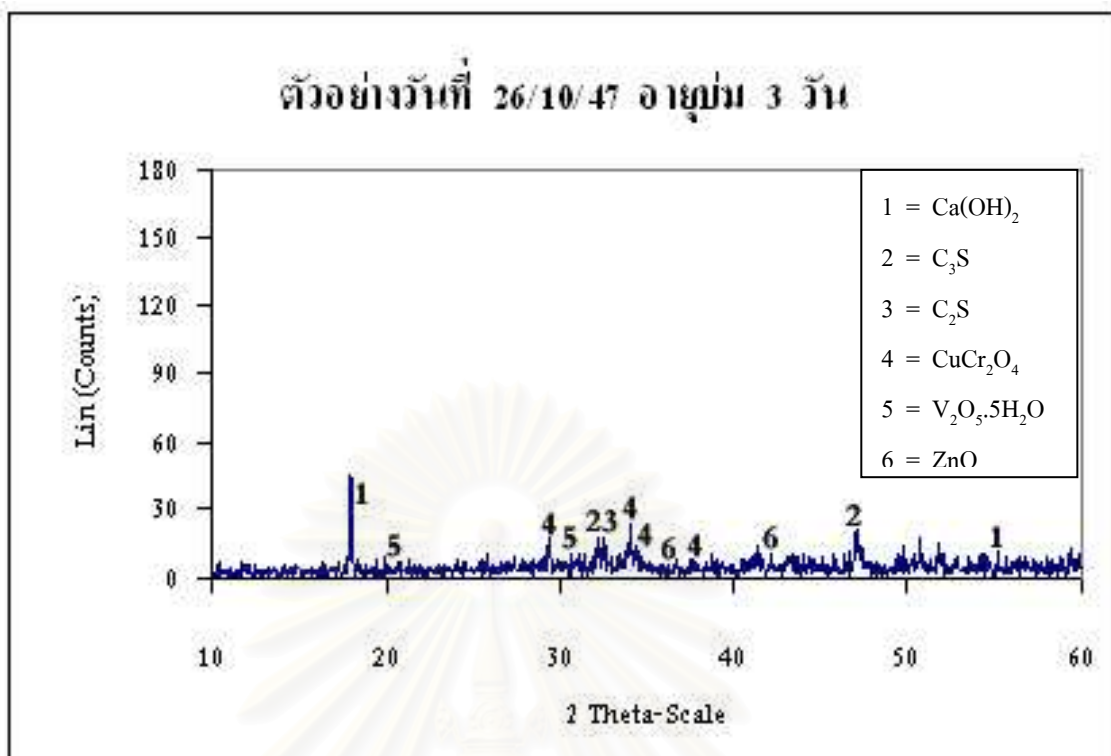
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



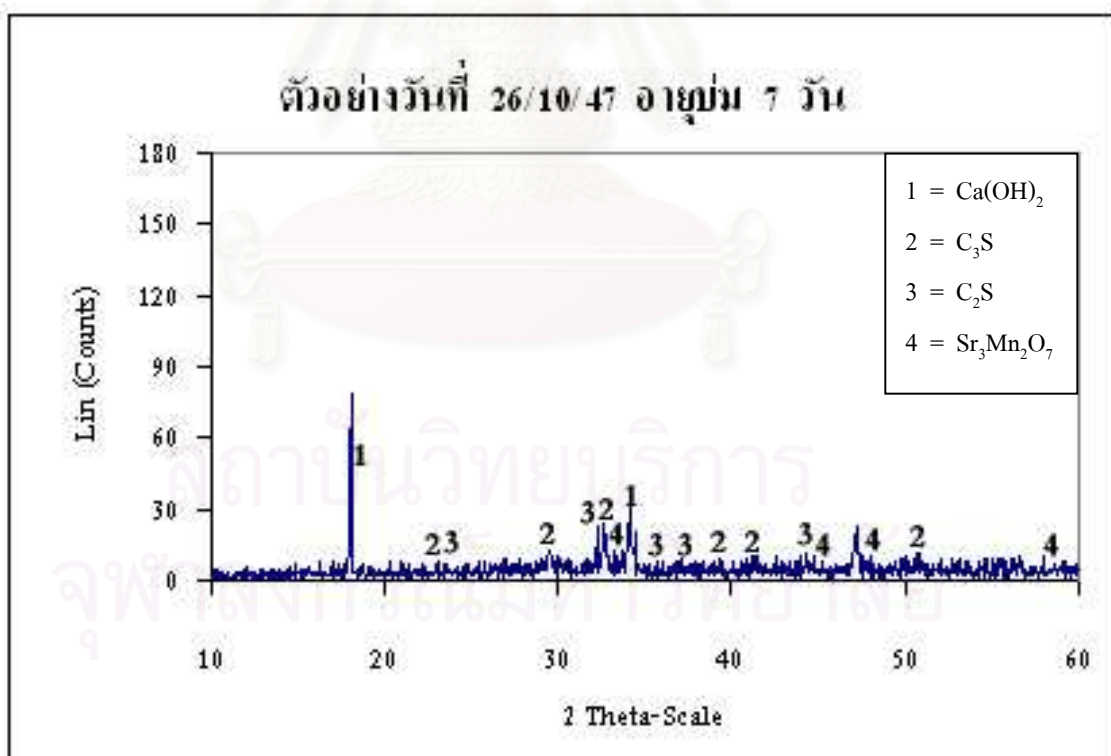
ภาคผนวก ง

ข้อมูลสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึกในซีเมนต์เพสต์ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง
X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD)

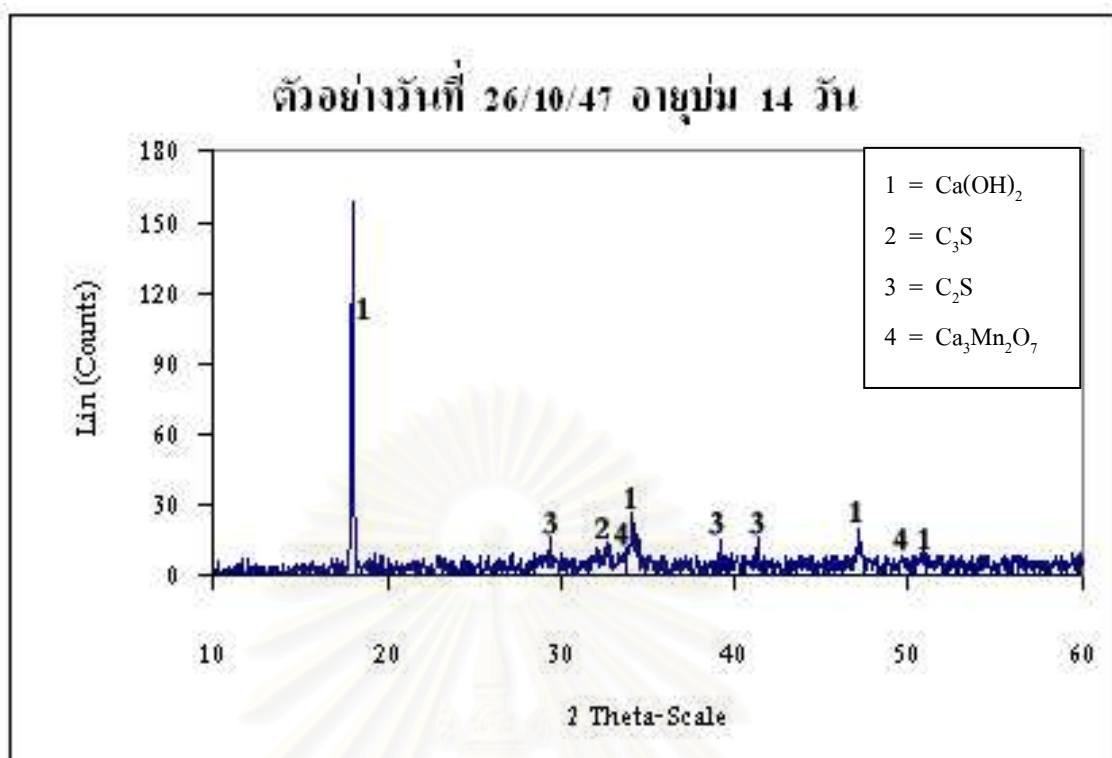
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



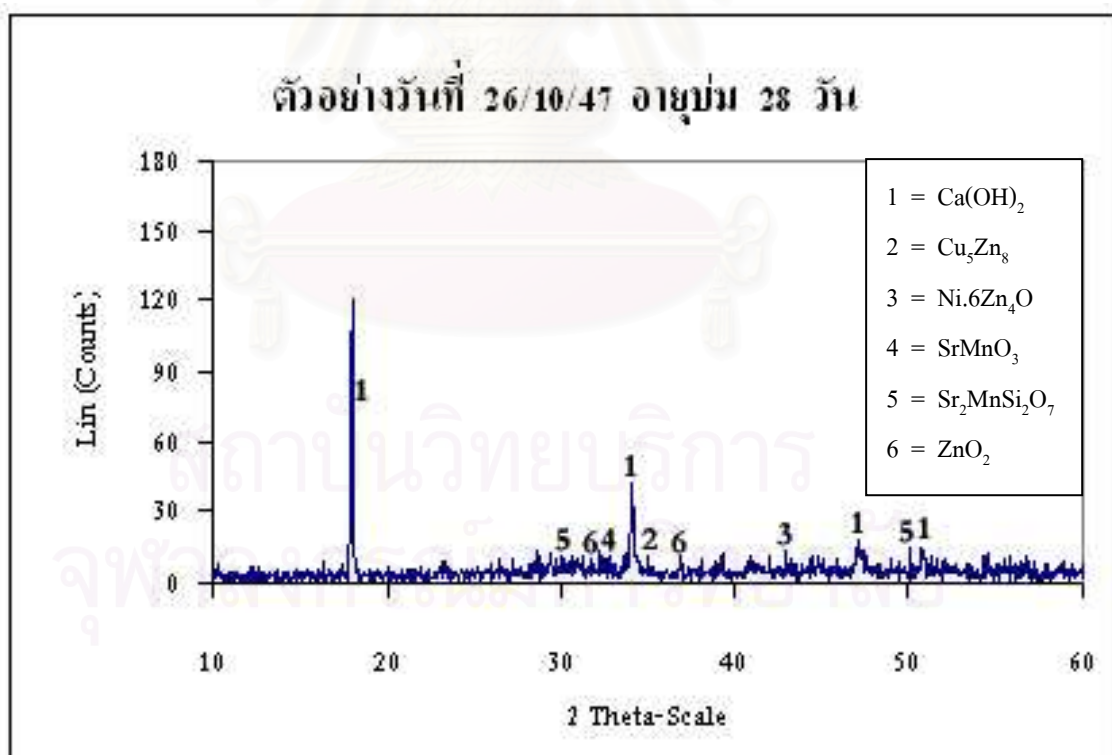
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



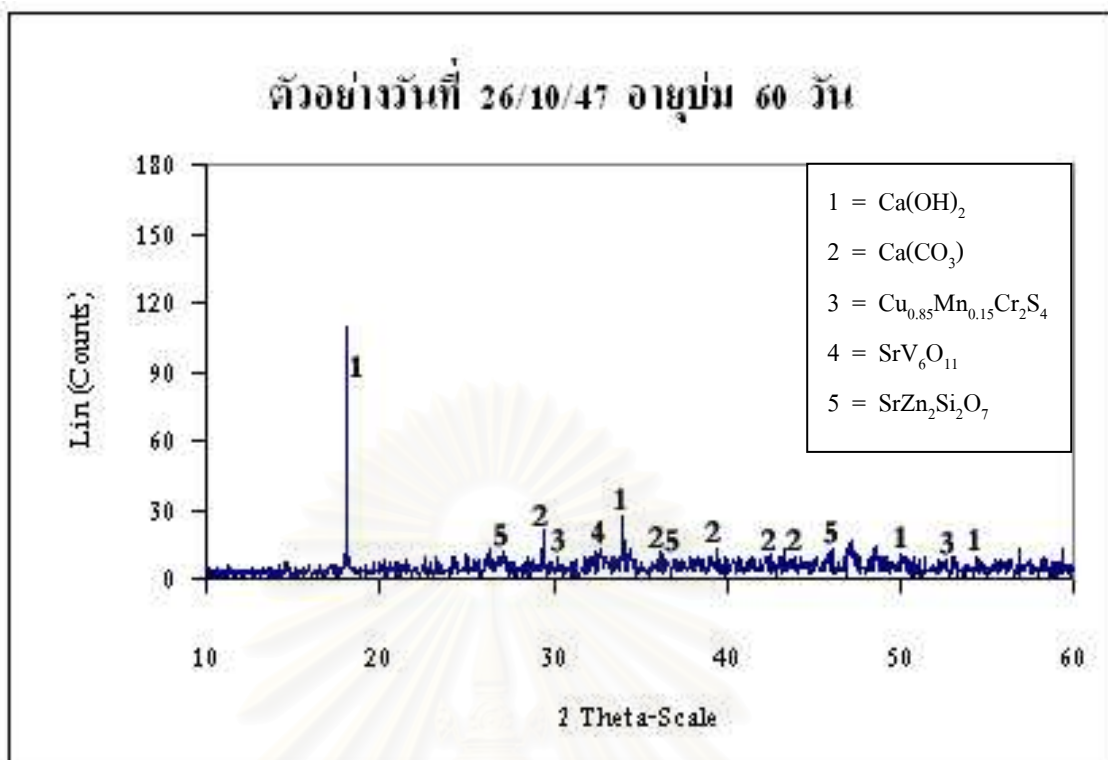
(ข) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน

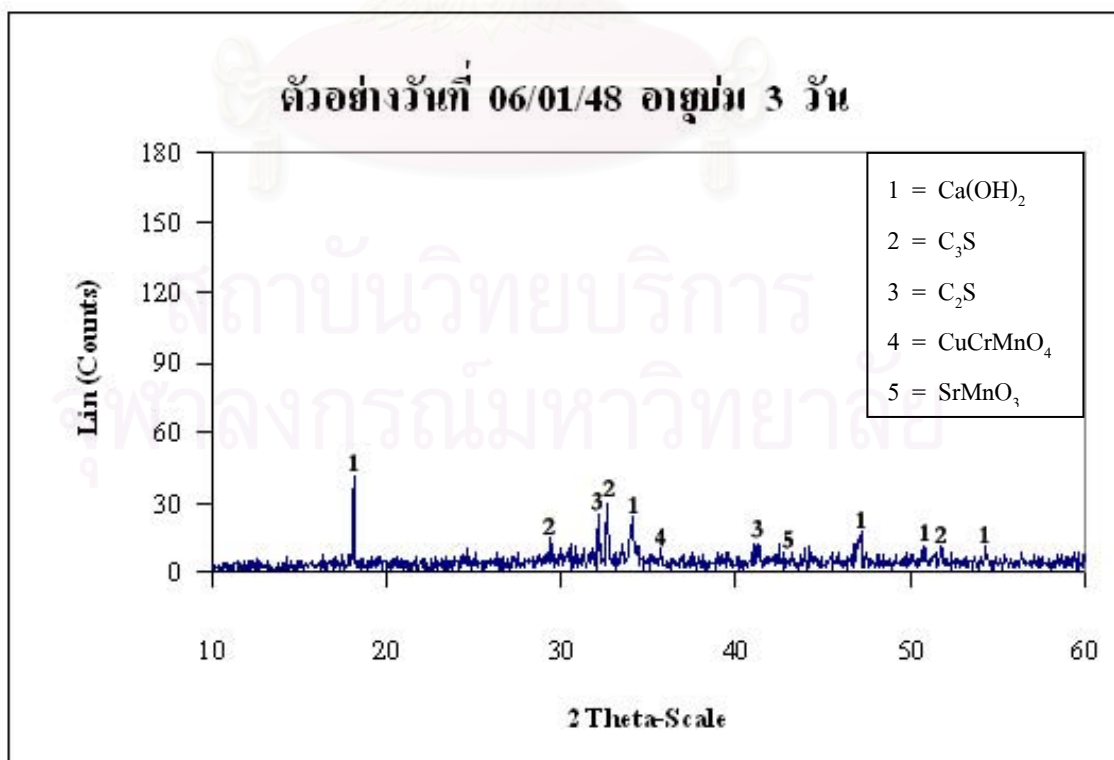


(ง) อายุบ่ม 28 วัน

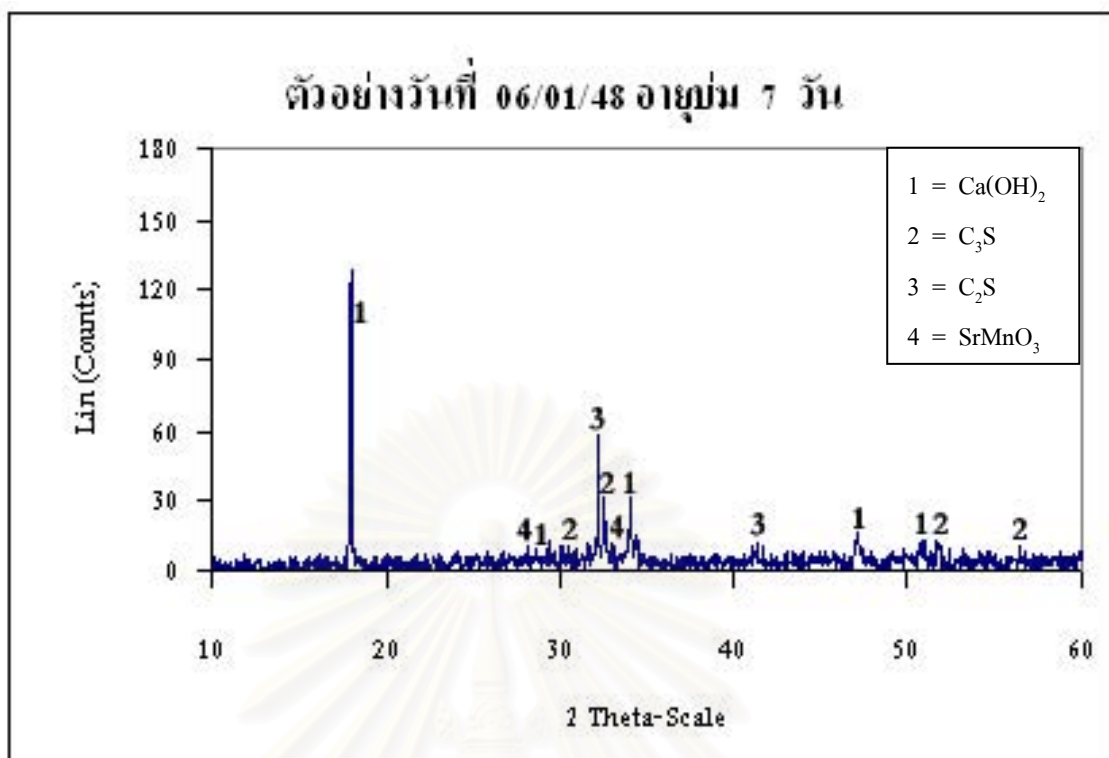


(จ) อายุบ่ม 60 วัน

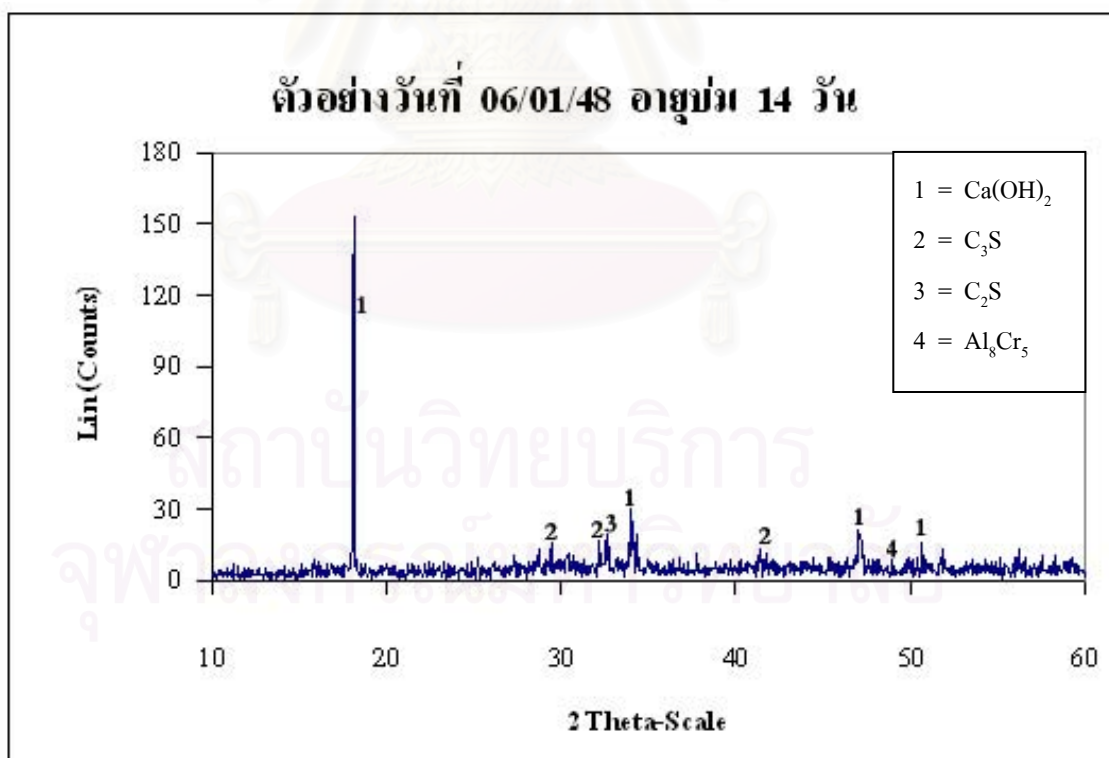
รูปที่ ง.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างซีเมนต์เพชรวันที่ 26/10/47



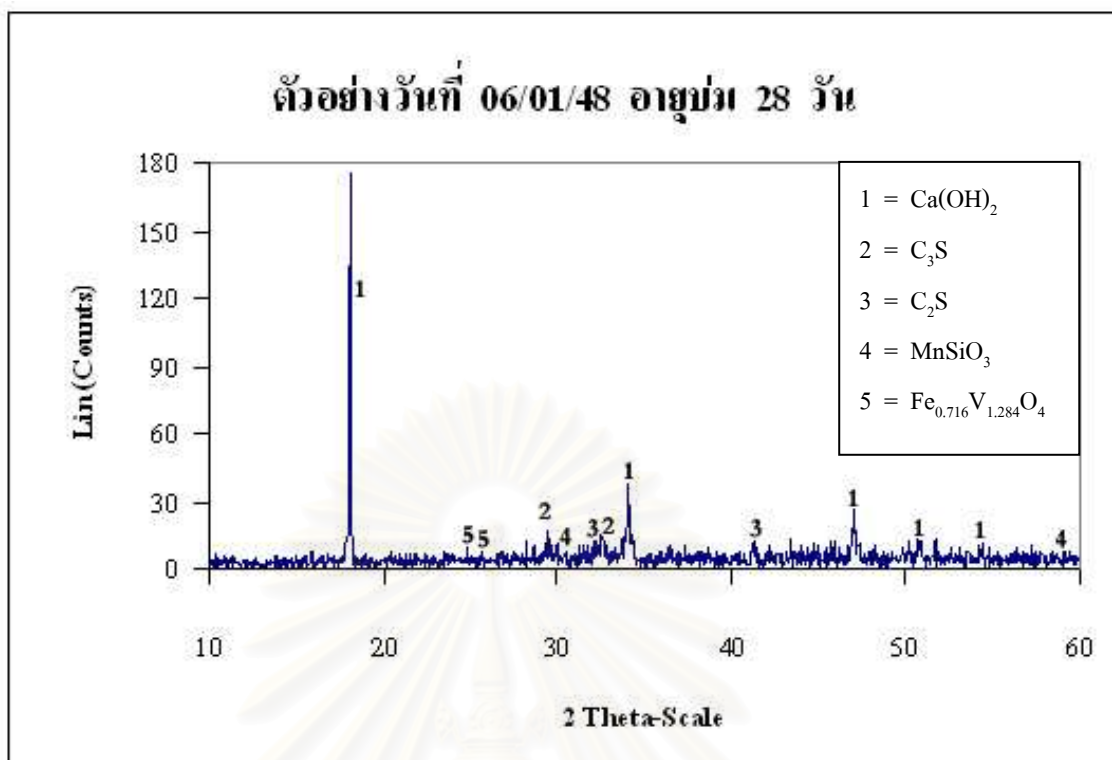
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



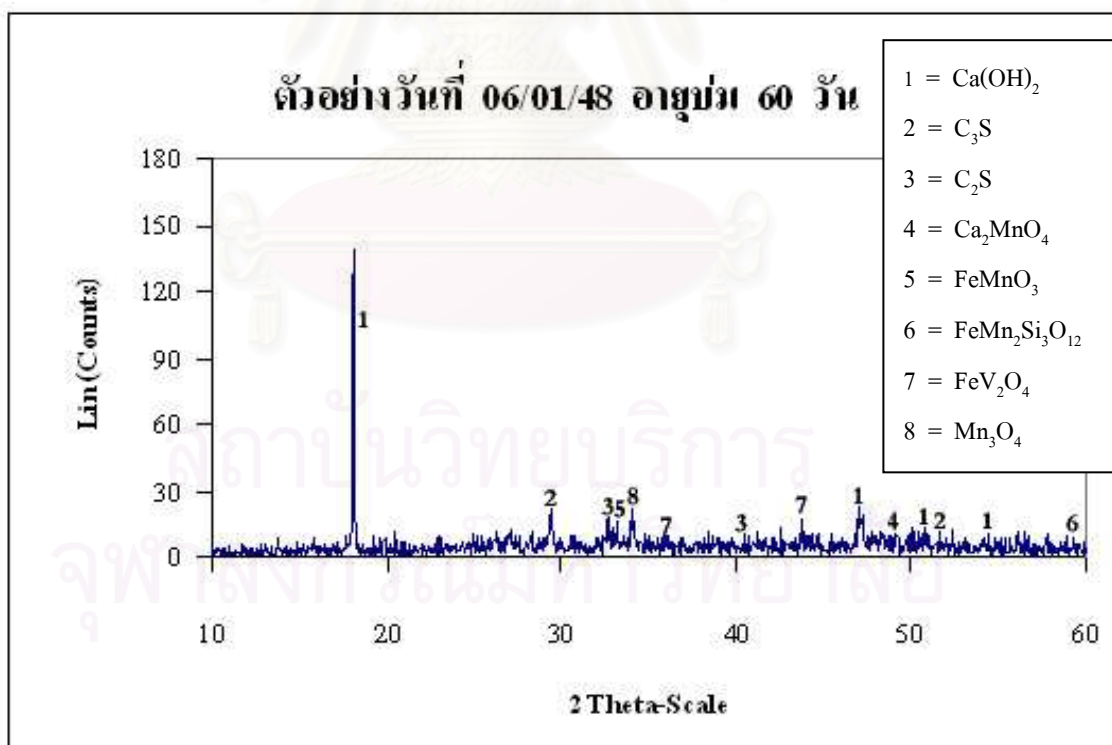
(ข) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน

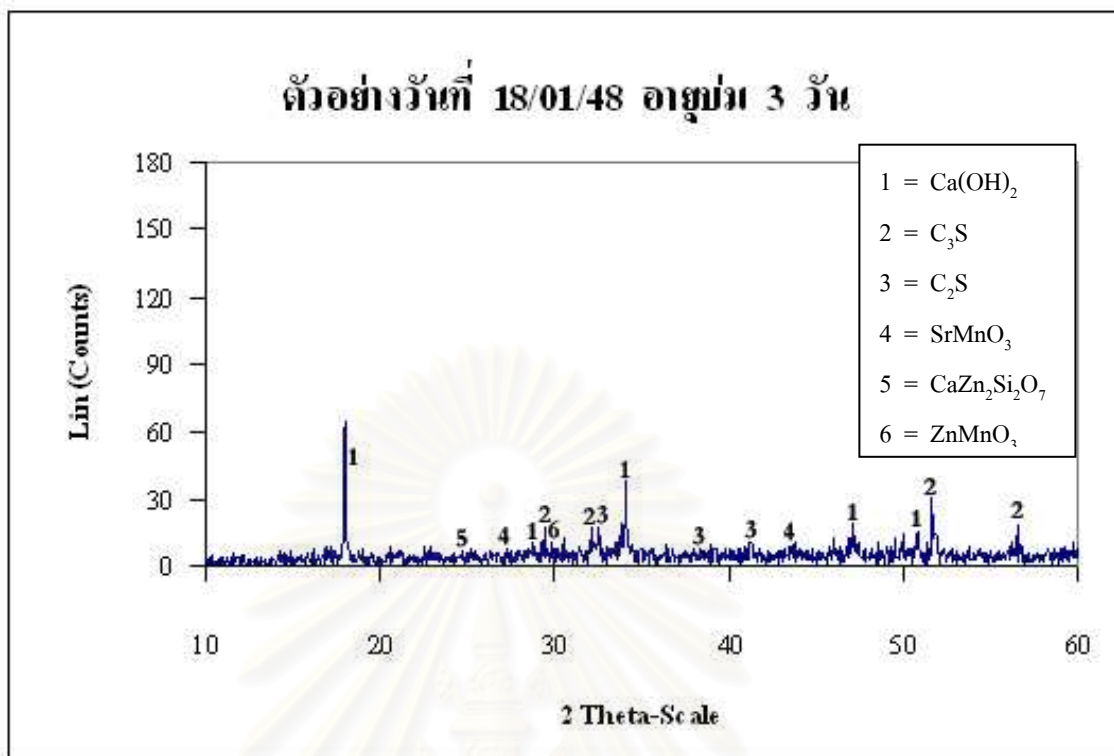


(ง.) อายุบ่ม 28 วัน

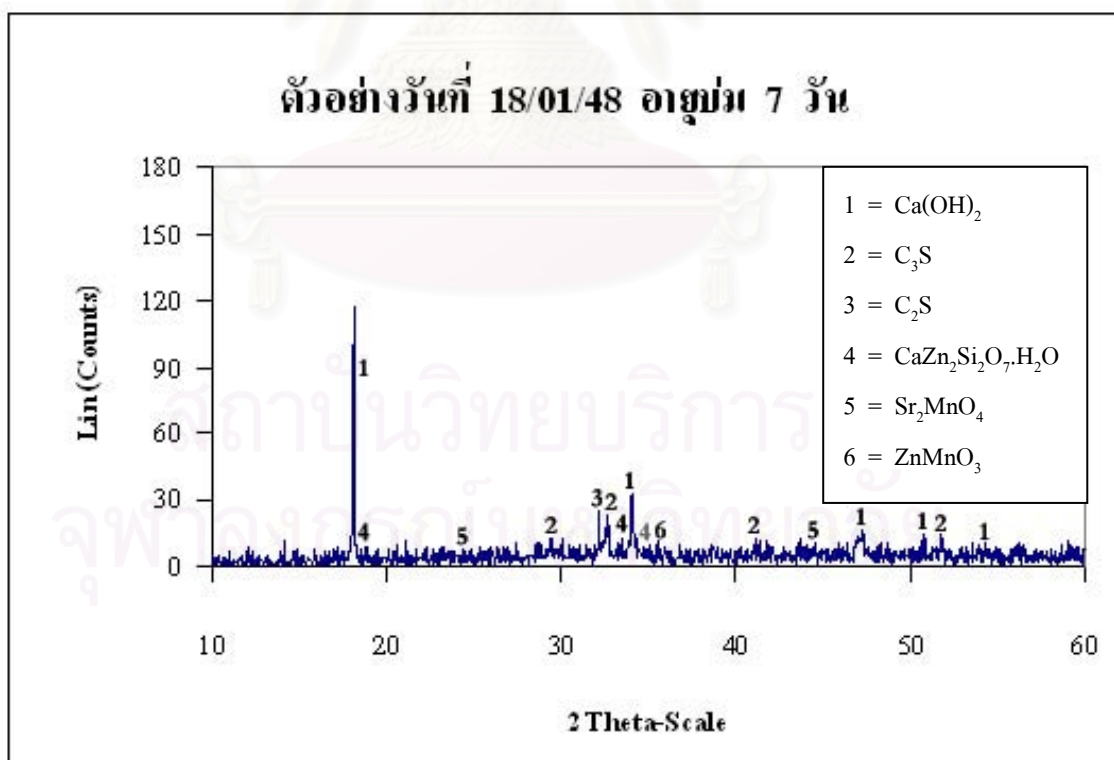


(จ.) อายุบ่ม 60 วัน

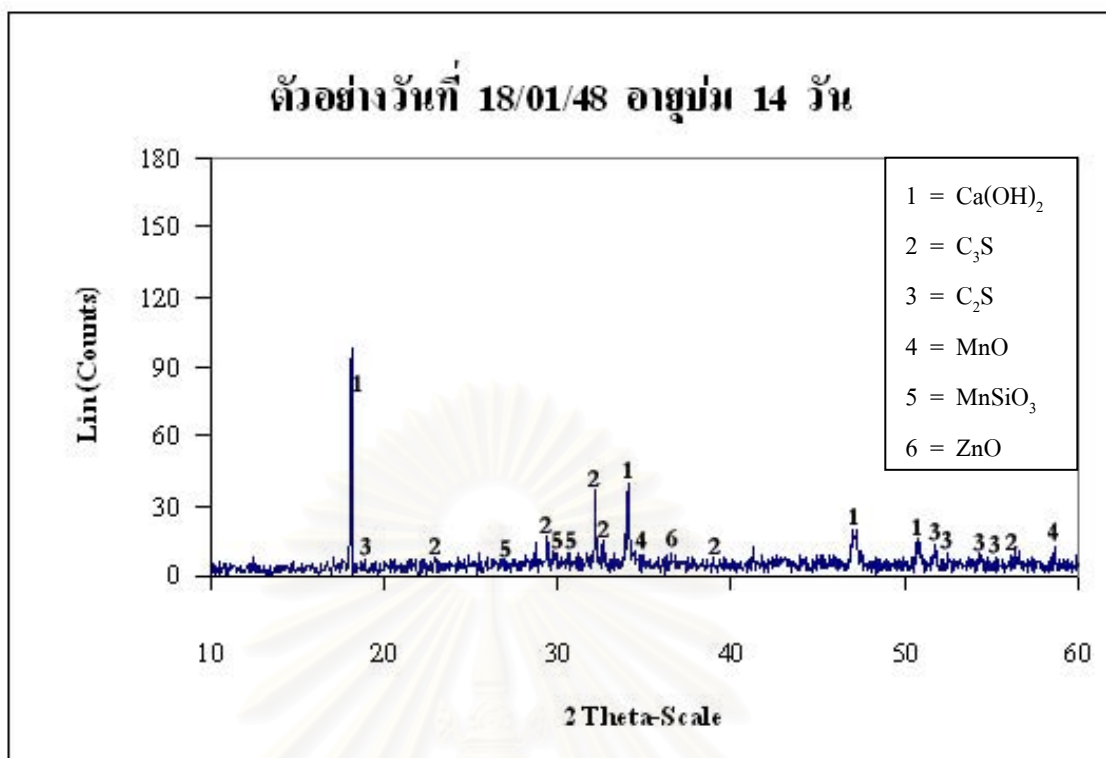
รูปที่ ๓.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่าง
ซีเมนต์เพสต์วันที่ 06/01/48



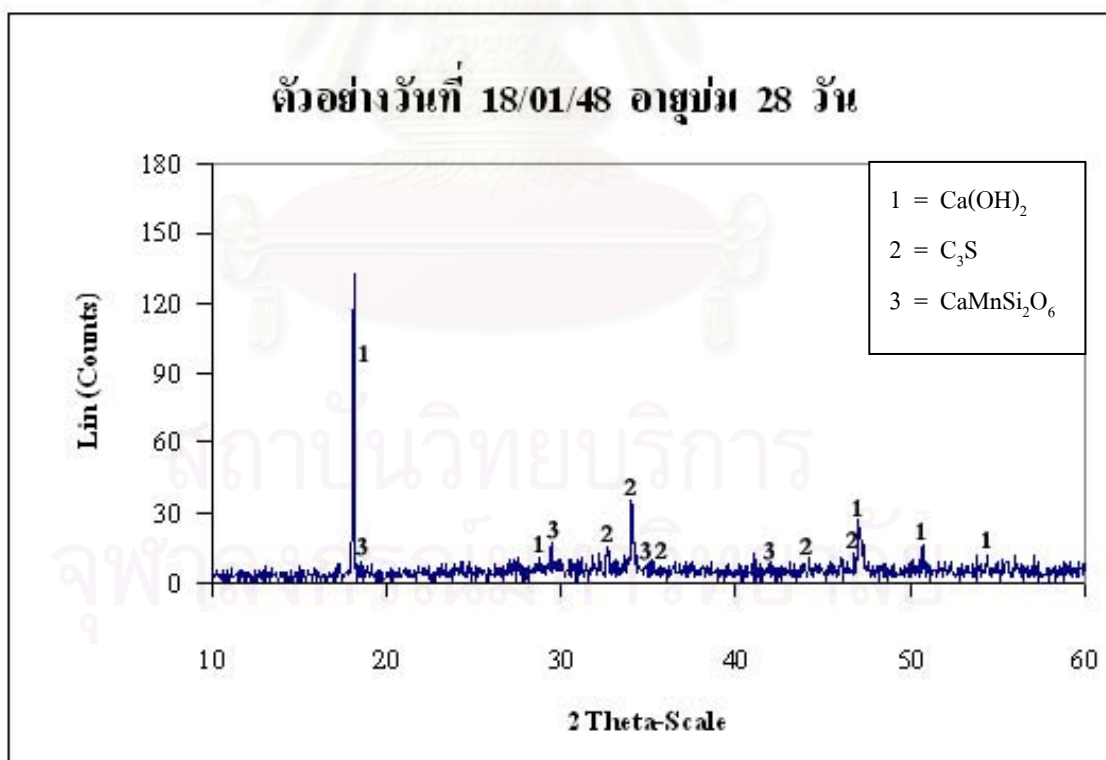
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



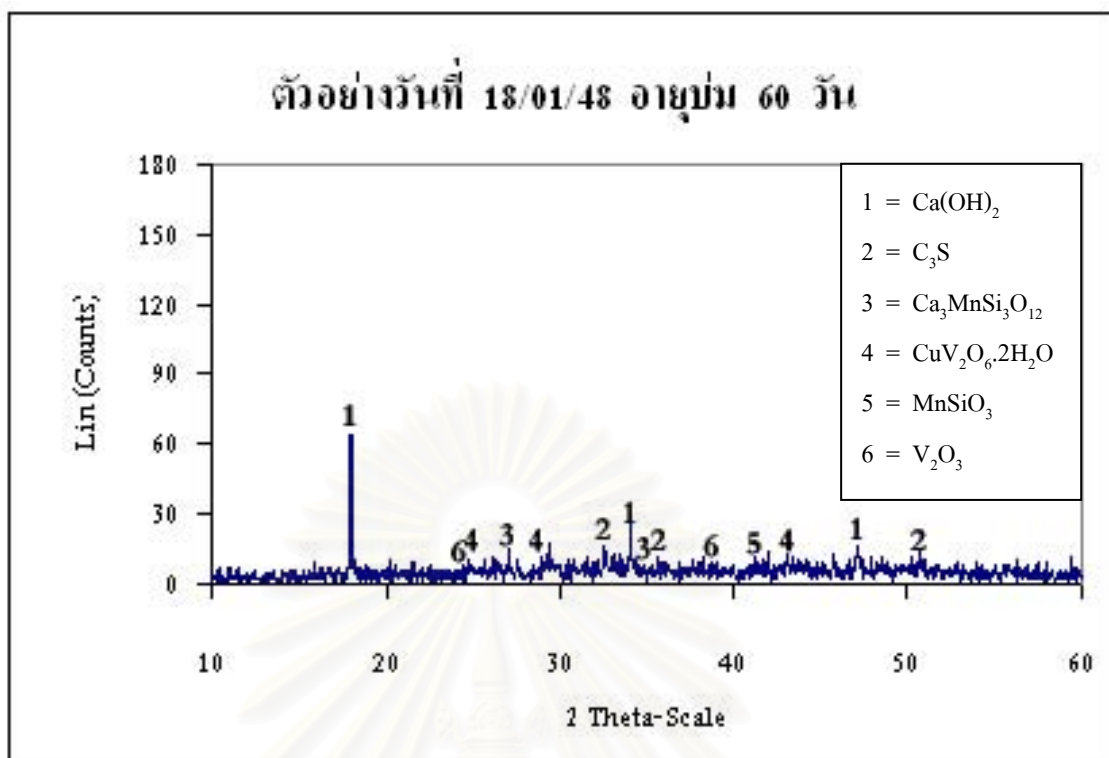
(ข) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน

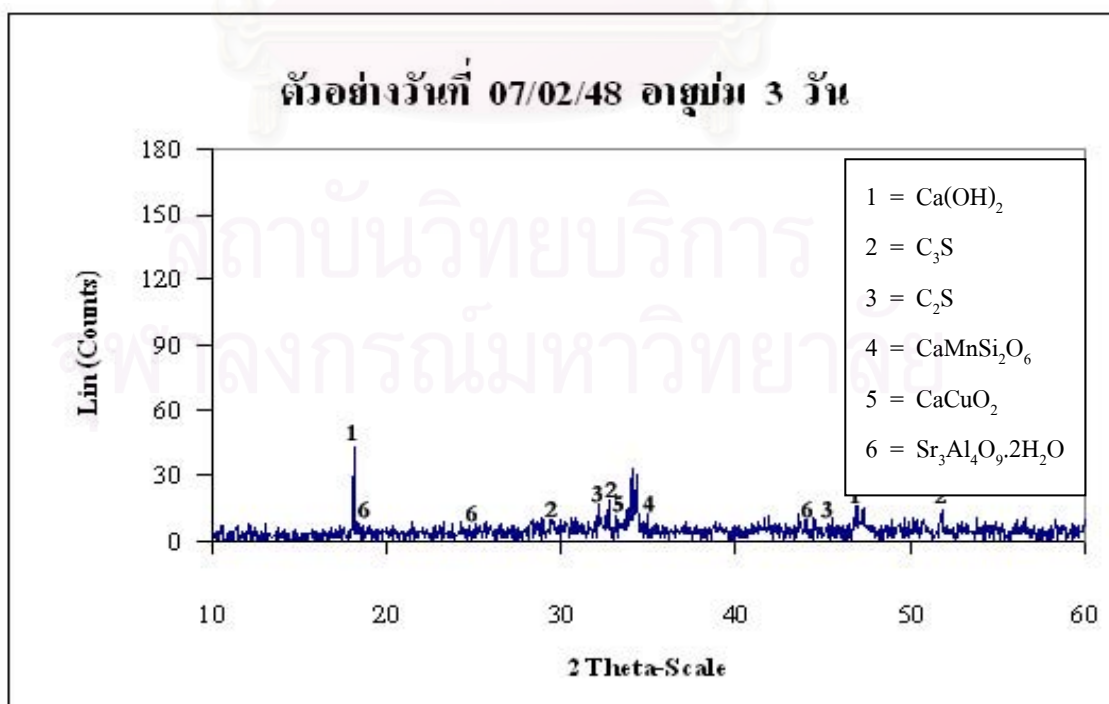


(ง) อายุบ่ม 28 วัน

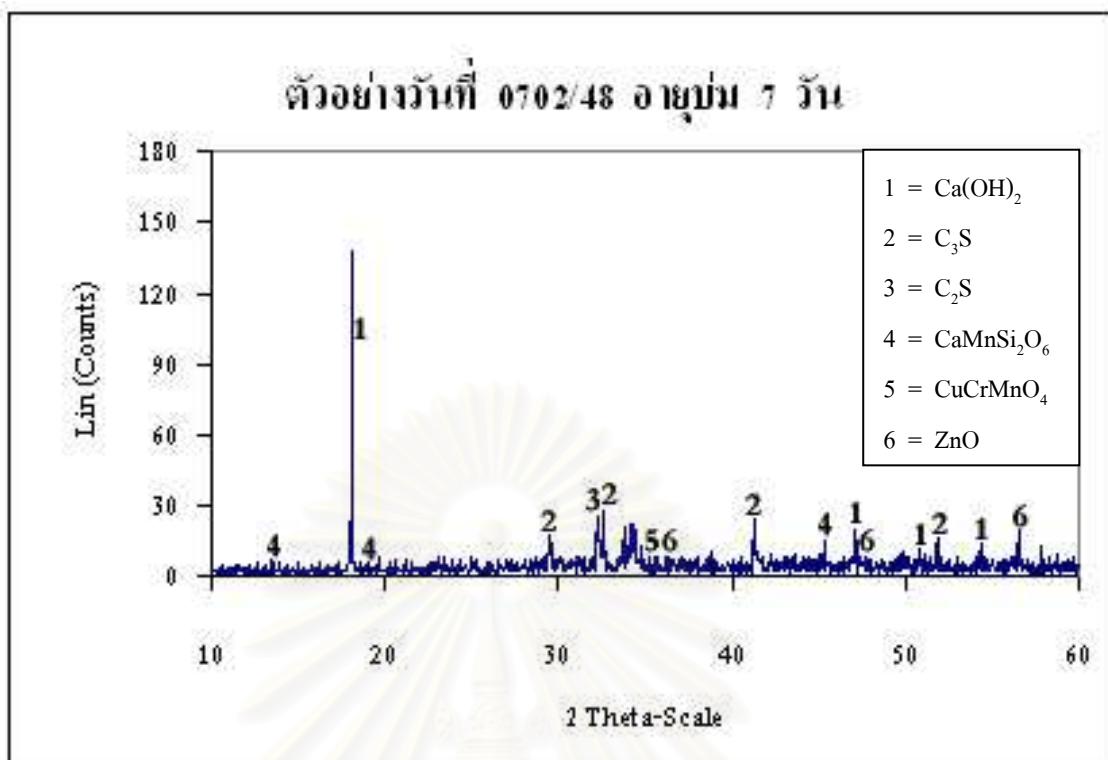


(จ) อายุบ่ม 60 วัน

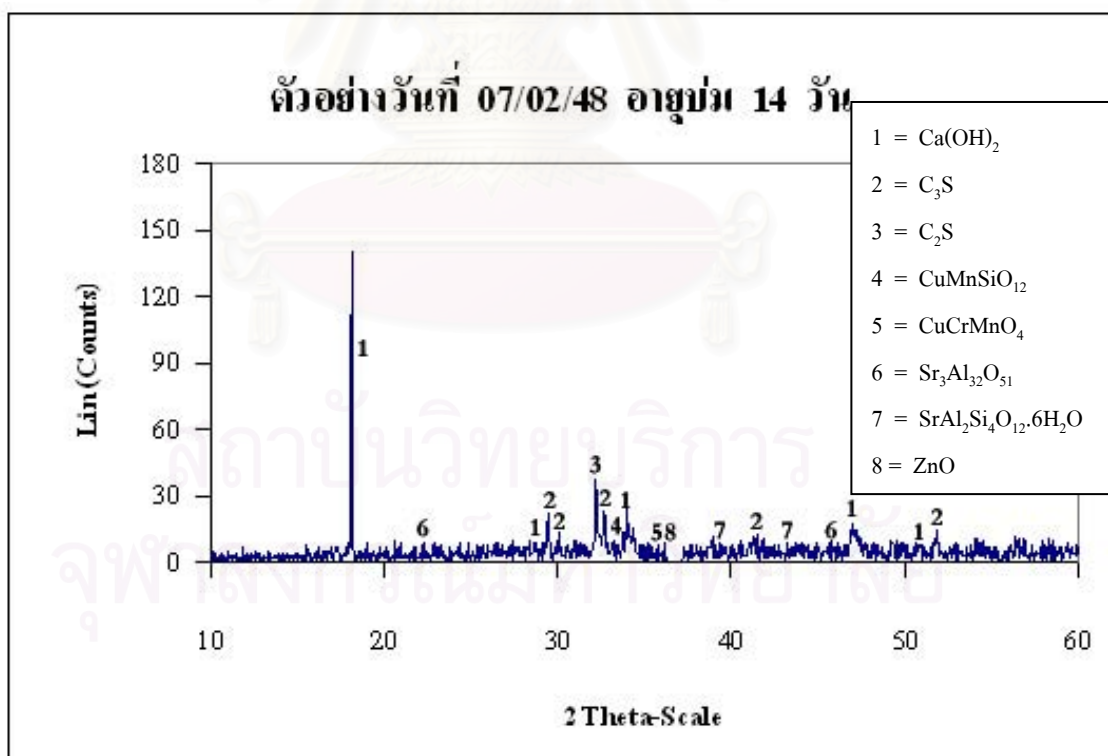
รูปที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างซีเมนต์เพชรวันที่ 18/01/48



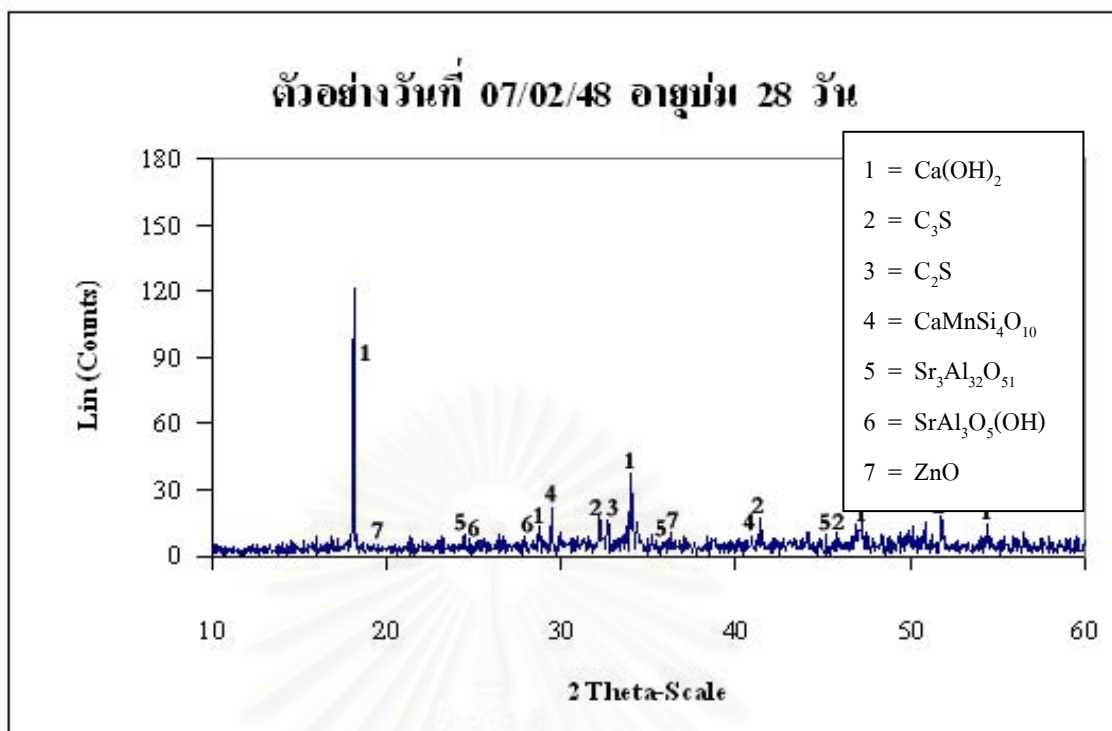
(ก) อายุบ่ม 3 วัน



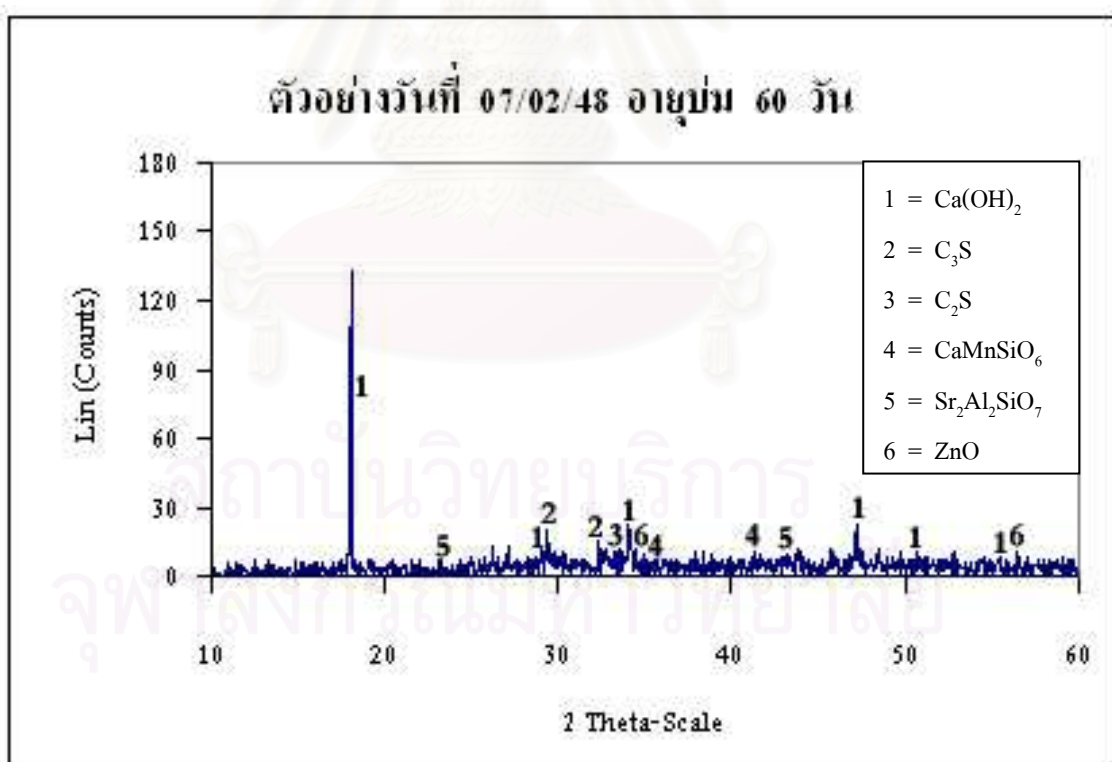
(จ) อายุบ่ม 7 วัน



(ค) อายุบ่ม 14 วัน

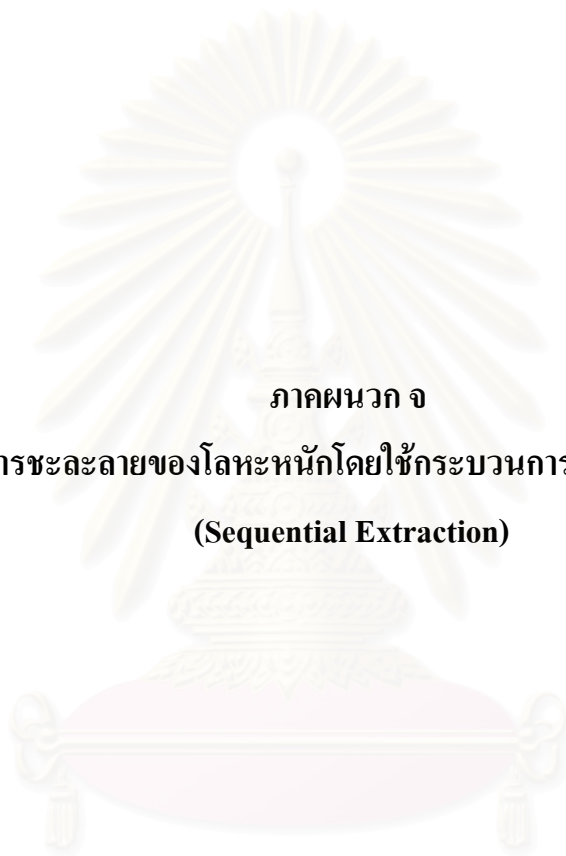


(ง) อายุบ่ม 28 วัน



(จ) อายุบ่ม 60 วัน

รูปที่ ๓.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) ของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์วันที่ 07/02/48



ภาคผนวก จ

ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 22/10/47

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Co	1	0.019	0.311	0.020	0.321	0.012	0.195	0.014	0.223	0.014	0.227
	2	0.016	0.249	0.013	0.205	0.016	0.252	0.007	0.119	0.007	0.109
	3	0.160	2.562	0.227	3.632	0.225	3.595	0.224	3.576	0.107	1.713
	4	nd	nd	0.022	0.357	0.035	0.558	0.035	0.558	0.019	0.303
	5	6.064	96.878	5.977	95.485	5.971	95.400	5.979	95.524	6.112	97.648
Cr	1	2.161	7.393	0.013	0.044	0.014	0.049	0.014	0.048	0.016	0.056
	2	0.022	0.077	0.020	0.067	0.023	0.080	0.097	0.330	0.117	0.401
	3	0.594	2.031	0.593	2.028	0.651	2.227	0.515	1.763	0.242	0.828
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	26.450	90.499	28.601	97.861	28.538	97.644	28.601	97.859	28.851	98.715
Cu	1	0.052	0.053	0.028	0.028	0.030	0.033	0.030	0.030	0.028	0.029
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	40.426	41.031	41.865	42.492	51.066	55.192	47.217	47.924	43.950	44.608
	4	5.711	5.797	6.836	6.939	6.644	7.181	5.852	5.940	4.304	4.368
	5	52.336	53.119	49.795	50.541	40.785	44.080	45.426	46.106	50.243	50.995
Fe	1	0.036	0.000	nd	nd	nd	nd	0.005	0.000	0.008	0.000
	2	0.007	0.000	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.006	0.000
	3	566.296	4.710	509.816	4.240	479.406	3.987	403.546	3.356	290.686	2.418
	4	nd	nd	7.159	0.060	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	11457.307	95.290	11506.664	95.700	11544.234	96.013	11620.091	96.644	11732.945	97.582
Mn	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	16.296	5.165	14.839	4.703	16.255	5.152	13.450	4.263	9.702	3.075
	4	1.719	0.545	3.060	0.970	5.561	1.763	5.298	1.679	3.686	1.168
	5	297.467	94.288	297.584	94.325	293.668	93.084	296.738	94.057	328.874	104.243

ตารางที่ จ.1 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 22/10/47

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ni	1	0.003	0.009	0.025	0.071	0.012	0.033	0.014	0.038	0.023	0.064
	2	0.017	0.049	0.018	0.049	0.017	0.047	0.003	0.009	0.012	0.032
	3	0.105	0.294	0.071	0.199	0.080	0.224	0.092	0.256	0.053	0.148
	4	0.012	0.034	0.008	0.021	0.034	0.095	0.027	0.075	0.015	0.042
	5	35.603	99.614	35.620	99.659	35.599	99.601	35.606	99.622	35.639	99.714
Pb	1	0.121	0.707	0.093	0.548	0.120	0.705	0.079	0.463	0.115	0.676
	2	0.012	0.069	nd	nd	0.044	0.258	nd	nd	0.009	0.052
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	16.915	99.223	16.954	99.452	16.883	99.037	16.969	99.537	16.923	99.271
Sr	1	20.360	9.926	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.701	1.805	4.238	2.066
	3	15.512	7.563	14.644	7.139	16.652	8.118	13.625	6.642	9.753	4.755
	4	2.558	1.247	3.814	1.859	5.537	2.699	5.222	2.546	3.580	1.745
	5	166.689	81.265	186.658	91.000	182.930	89.182	182.571	89.007	187.549	91.434
V	1	nd	nd	0.015	0.029	0.015	0.029	0.010	0.018	0.008	0.015
	2	0.006	0.012	0.012	0.023	0.008	0.016	nd	nd	nd	nd
	3	4.233	8.109	3.711	7.110	3.611	6.917	3.283	6.289	2.444	4.683
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	47.957	91.879	48.458	92.837	48.562	93.038	48.904	93.692	49.744	95.302
Zn	1	0.022	0.018	0.010	0.008	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	6.076	4.970	6.430	5.260	6.948	5.683	5.728	4.685	4.160	3.403
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	116.159	95.012	115.817	94.732	115.310	94.317	116.530	95.315	118.098	96.597

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ จ.2 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 26/10/47

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Co	1	0.034	0.651	0.032	0.603	0.013	0.245	0.012	0.223	0.010	0.183
	2	0.014	0.274	0.014	0.265	0.012	0.231	0.006	0.122	0.002	0.047
	3	0.335	6.326	0.201	3.790	0.292	5.519	0.261	4.930	0.150	2.836
	4	nd	nd	0.027	0.515	0.048	0.910	0.063	1.189	0.031	0.581
	5	4.908	92.749	5.018	94.827	4.926	93.095	4.949	93.535	5.098	96.354
Cr	1	0.369	1.145	0.013	0.041	0.018	0.057	0.018	0.057	0.013	0.041
	2	0.021	0.065	0.025	0.077	0.028	0.086	0.094	0.291	0.094	0.291
	3	0.966	2.996	0.592	1.836	0.711	2.206	0.614	1.905	0.305	0.944
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	30.894	95.794	31.620	98.046	31.492	97.651	31.523	97.747	31.838	98.724
Cu	1	0.043	0.065	0.029	0.044	0.025	0.038	0.022	0.033	0.031	0.047
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	34.550	52.204	33.060	49.953	40.047	60.510	39.766	60.085	35.528	53.682
	4	4.238	6.403	6.545	9.889	4.245	6.414	5.030	7.601	2.859	4.320
	5	27.352	41.328	26.549	40.114	21.865	33.038	21.365	32.281	27.764	41.951
Fe	1	0.019	0.000	0.008	0.000	0.003	0.000	0.004	0.000	0.012	0.000
	2	0.008	0.000	0.003	0.000	0.005	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000
	3	708.186	7.371	476.876	4.963	486.286	5.061	409.566	4.263	270.076	2.811
	4	nd	nd	43.617	0.454	nd	nd	4.477	0.047	0.000	0.000
	5	8899.763	92.629	9087.472	94.583	9121.682	94.939	9193.927	95.691	9337.885	97.189
Mn	1	0.004	0.001	0.004	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.003	0.001
	2	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.001	0.001	0.000	nd	nd
	3	26.943	6.550	26.943	6.550	21.635	5.259	18.045	4.387	12.501	3.039
	4	2.252	0.547	2.252	0.547	6.367	1.548	7.369	1.791	4.665	1.134
	5	382.154	92.901	382.154	92.901	383.348	93.192	385.938	93.821	394.185	95.826

ตารางที่ จ.2 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 26/10/47

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ni	1	0.021	0.063	0.035	0.104	0.019	0.058	0.008	0.023	0.024	0.073
	2	0.022	0.067	0.017	0.052	0.017	0.051	nd	nd	0.014	0.041
	3	0.122	0.365	0.079	0.237	0.087	0.262	0.076	0.229	0.059	0.179
	4	0.016	0.048	0.036	0.107	0.025	0.075	0.046	0.139	0.030	0.090
	5	33.092	99.457	33.106	99.499	33.124	99.554	33.142	99.609	33.145	99.618
Pb	1	0.248	4.023	0.182	2.952	0.142	2.307	0.115	1.875	0.104	1.696
	2	0.033	0.532	0.001	0.018	0.059	0.958	0.000	0.000	0.009	0.146
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	5.873	95.445	5.971	97.030	5.953	96.734	6.038	98.125	6.040	98.158
Sr	1	2.253	1.111	0.010	0.005	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.314	1.634	3.749	1.849
	3	18.061	8.906	15.518	7.652	18.569	9.156	14.597	7.198	10.668	5.261
	4	2.603	1.284	5.658	2.790	5.542	2.733	5.521	2.722	3.987	1.966
	5	179.884	88.700	181.615	89.553	178.691	88.111	179.370	88.446	184.397	90.925
V	1	0.016	0.035	0.018	0.040	0.012	0.027	0.014	0.030	0.005	0.012
	2	0.009	0.020	0.011	0.024	0.007	0.014	nd	nd	nd	nd
	3	4.995	11.000	3.613	7.957	3.554	7.827	3.290	7.245	2.359	5.194
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	40.387	88.945	41.765	91.979	41.834	92.132	42.104	92.725	43.043	94.794
Zn	1	0.018	0.017	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.006	0.005
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	7.239	6.746	5.123	4.774	6.156	5.738	5.475	5.102	3.793	3.535
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	100.043	93.237	102.177	95.226	101.144	94.262	101.825	94.898	103.502	96.460

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ จ.3 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 06/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ba	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.079	1.443	2.191	1.521
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	8.169	5.673	24.319	16.887	20.681	14.361	17.348	12.047	18.050	12.534
	5	135.835	94.327	119.686	83.113	123.324	85.639	124.578	86.510	123.764	85.944
Co	1	0.029	0.256	0.015	0.132	0.019	0.166	0.012	0.101	0.013	0.115
	2	0.022	0.196	0.015	0.131	0.011	0.097	0.004	0.033	0.008	0.066
	3	0.402	3.518	0.299	2.619	0.310	2.709	0.315	2.755	0.157	1.372
	4	nd	nd	0.106	0.924	0.092	0.804	0.019	0.162	0.002	0.016
	5	10.973	96.031	10.992	96.195	10.995	96.224	11.078	96.948	11.247	98.431
Cr	1	0.041	0.107	0.010	0.027	0.021	0.054	0.022	0.058	0.011	0.029
	2	0.026	0.068	0.019	0.050	0.021	0.056	0.104	0.272	0.112	0.293
	3	0.920	2.406	0.721	1.887	0.746	1.951	0.589	1.540	0.271	0.710
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	37.235	97.419	37.471	98.036	37.434	97.939	37.507	98.130	37.827	98.968
Cu	1	0.052	0.357	0.037	0.256	0.025	0.171	0.024	0.165	0.039	0.267
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	6.849	46.837	6.794	46.462	5.631	38.511	7.816	53.452	7.378	50.455
	4	0.942	6.439	3.145	21.508	2.208	15.097	1.479	10.113	0.921	6.298
	5	6.780	46.367	4.646	31.774	6.759	46.221	5.304	36.270	6.285	42.980
Fe	1	0.012	0.000	0.001	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000	0.037	0.000
	2	0.006	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000
	3	679.376	3.752	520.976	2.877	502.356	2.774	377.806	2.086	283.476	1.566
	4	13.434	0.074	46.301	0.256	7.385	0.041	16.096	0.089	17.492	0.097
	5	17414.536	96.174	17540.083	96.867	17597.617	97.185	17713.458	97.825	17806.358	98.338
Mn	1	0.005	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.005	0.001
	2	0.001	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	nd	nd	0.001	0.000
	3	29.755	6.434	24.207	5.234	24.462	5.289	18.877	4.082	13.452	2.909
	4	3.083	0.667	12.168	2.631	8.994	1.945	9.533	2.061	7.447	1.610
	5	429.635	92.898	426.100	92.134	429.020	92.765	434.066	93.856	441.574	95.480

ตารางที่ จ.3 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 06/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ni	1	0.473	1.549	0.023	0.077	0.015	0.049	0.012	0.041	0.021	0.068
	2	0.018	0.059	0.010	0.032	0.017	0.055	0.009	0.029	0.012	0.038
	3	0.120	0.394	0.112	0.367	0.115	0.377	0.095	0.311	0.053	0.173
	4	0.017	0.055	0.042	0.139	0.038	0.124	0.023	0.076	0.029	0.096
	5	29.906	97.943	30.347	99.385	30.350	99.395	30.395	99.543	30.420	99.625
Se	1	0.582	3.179	0.399	2.181	0.369	2.018	0.403	2.199	0.109	0.598
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.947	5.172	0.812	4.437
	3	3.576	19.530	7.847	42.855	4.156	22.697	7.517	41.055	4.034	22.031
	4	nd	nd	nd	nd	3.934	21.487	nd	nd	nd	nd
	5	14.150	77.281	10.062	54.954	9.848	53.788	9.441	51.564	13.352	72.924
Sr	1	0.055	0.021	0.002	0.001	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.422	1.314	3.727	1.431
	3	19.673	7.553	18.520	7.110	17.877	6.863	14.322	5.499	10.138	3.892
	4	3.395	1.303	8.902	3.418	6.412	2.462	6.715	2.578	4.524	1.737
	5	237.350	91.123	233.048	89.471	236.183	90.675	236.013	90.610	242.083	92.940
V	1	0.013	0.016	0.016	0.018	0.013	0.016	0.009	0.011	0.012	0.014
	2	0.008	0.009	0.005	0.006	0.009	0.010	nd	nd	nd	nd
	3	5.169	6.069	4.531	5.319	4.125	4.843	3.408	4.002	2.743	3.221
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	79.982	93.906	80.621	94.656	81.025	95.131	81.754	95.987	87.903	103.206
Zn	1	0.021	0.044	0.016	0.035	nd	nd	nd	nd	0.016	0.033
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	1.864	3.952	1.711	3.628	1.663	3.526	1.220	2.587	0.743	1.575
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	45.285	96.003	45.442	96.337	45.507	96.474	45.950	97.413	46.411	98.392

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ จ.4 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 16/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ba	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.636	2.001	2.195	1.667
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	5.907	4.484	15.046	11.422	21.043	15.975	15.120	11.479	17.700	13.437
	5	125.814	95.516	116.675	88.578	110.678	84.025	113.965	86.520	111.826	84.896
Co	1	0.019	0.179	0.015	0.136	0.011	0.105	0.020	0.183	0.013	0.123
	2	0.024	0.224	0.012	0.112	0.015	0.136	0.003	0.029	0.006	0.057
	3	0.339	3.171	0.266	2.487	0.217	2.030	0.222	2.071	0.168	1.573
	4	nd	nd	0.051	0.480	0.063	0.585	0.055	0.513	0.017	0.160
	5	10.313	96.426	10.352	96.784	10.390	97.144	10.396	97.204	10.491	98.087
Cr	1	0.021	0.052	0.020	0.049	0.022	0.053	0.015	0.037	0.014	0.033
	2	0.022	0.053	0.008	0.020	0.027	0.067	0.144	0.353	0.110	0.268
	3	1.006	2.458	0.611	1.493	0.852	2.082	0.634	1.548	0.385	0.941
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	39.888	97.438	40.297	98.437	40.036	97.799	40.144	98.062	40.429	98.758
Cu	1	0.058	0.375	0.039	0.255	0.033	0.214	0.019	0.125	0.030	0.195
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	4.748	30.829	4.758	30.894	5.904	38.337	7.520	48.828	7.087	46.015
	4	1.076	6.989	1.843	11.967	1.369	8.890	1.079	7.006	0.359	2.332
	5	9.519	61.808	8.761	56.884	8.094	52.559	6.783	44.041	7.925	51.459
Fe	1	0.013	0.000	0.007	0.000	0.006	0.000	0.003	0.000	0.031	0.000
	2	0.008	0.000	0.005	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.000
	3	647.626	3.730	418.616	2.411	433.606	2.498	313.266	1.804	225.636	1.300
	4	12.897	0.074	82.433	0.475	5.722	0.033	27.669	0.159	nd	nd
	5	16701.052	96.195	16860.536	97.114	16922.261	97.469	17020.657	98.036	17135.927	98.700
Mn	1	0.004	0.001	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.003	0.001
	2	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	nd	nd	nd	nd
	3	33.065	6.587	21.876	4.358	25.396	5.060	19.921	3.969	15.583	3.105
	4	2.739	0.546	8.410	1.675	8.956	1.784	10.020	1.996	6.737	1.342
	5	466.132	92.866	471.652	93.966	467.587	93.156	471.998	94.035	479.617	95.552

ตารางที่ จ.4 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 16/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ni	1	0.044	0.164	0.024	0.091	0.011	0.041	0.011	0.041	0.018	0.068
	2	0.017	0.064	0.014	0.053	0.011	0.040	0.011	0.040	0.004	0.014
	3	0.214	0.801	0.141	0.526	0.163	0.611	0.163	0.611	0.125	0.467
	4	0.038	0.143	0.050	0.186	0.067	0.250	0.067	0.250	0.027	0.100
	5	26.415	98.828	26.499	99.143	26.476	99.057	26.476	99.057	26.555	99.351
Se	1	0.826	3.698	0.506	2.266	0.237	1.060	0.480	2.148	0.144	0.644
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.821	3.677	1.067	4.778
	3	6.663	29.829	3.998	17.898	7.214	32.297	8.105	36.285	5.512	24.676
	4	nd	nd	1.781	7.973	nd	nd	3.406	15.246	1.934	8.657
	5	14.849	66.473	16.053	71.863	14.887	66.643	9.526	42.645	13.681	61.246
Sr	1	0.015	0.005	0.001	0.000	0.002	0.001	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	4.979	1.782	3.644	1.305
	3	18.882	6.759	16.460	5.892	18.583	6.652	17.318	6.200	12.608	4.514
	4	2.593	0.928	5.972	2.138	6.462	2.313	7.495	2.683	5.177	1.853
	5	258.198	92.432	257.254	92.094	254.641	91.159	249.895	89.460	258.258	92.454
V	1	0.020	0.024	0.016	0.020	0.018	0.023	0.016	0.020	0.011	0.014
	2	0.012	0.015	0.011	0.013	0.010	0.012	nd	nd	nd	nd
	3	5.082	6.267	3.569	4.402	3.751	4.626	3.092	3.813	2.225	2.744
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	75.975	93.694	77.492	95.566	77.309	95.339	77.980	96.168	78.852	97.242
Zn	1	0.065	0.127	0.009	0.017	0.000	0.001	nd	nd	0.004	0.008
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	2.076	4.014	1.328	2.568	1.737	3.359	1.403	2.713	0.963	1.862
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	49.572	95.859	50.288	97.244	49.976	96.640	50.310	97.287	50.746	98.130

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ จ.5 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 18/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ba	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.120	1.659	2.220	1.737
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	8.211	6.427	16.508	12.921	17.099	13.383	16.277	12.740	14.903	11.664
	5	119.555	93.573	111.258	87.079	110.668	86.617	109.370	85.601	110.644	86.599
Co	1	0.042	0.405	0.014	0.137	0.014	0.138	0.016	0.157	0.018	0.175
	2	0.023	0.222	0.012	0.118	0.007	0.072	0.004	0.041	0.007	0.069
	3	0.370	3.572	0.260	2.516	0.308	2.972	0.225	2.177	0.081	0.780
	4	nd	nd	nd	nd	0.015	0.147	0.017	0.164	nd	nd
	5	9.918	95.802	10.066	97.229	10.008	96.671	10.090	97.462	10.246	98.977
Cr	1	0.021	0.054	0.014	0.037	0.019	0.051	0.015	0.038	0.009	0.024
	2	0.020	0.051	0.017	0.044	0.016	0.043	0.122	0.316	0.091	0.236
	3	0.957	2.492	0.577	1.503	0.735	1.914	0.430	1.121	0.224	0.583
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	37.417	97.402	37.806	98.416	37.643	97.992	37.848	98.525	38.091	99.157
Cu	1	0.039	0.329	0.047	0.396	0.033	0.282	0.028	0.233	0.026	0.219
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	4.304	36.413	6.128	51.843	7.090	59.976	6.666	56.395	6.018	50.915
	4	0.638	5.398	0.476	4.027	0.713	6.028	0.537	4.544	0.223	1.887
	5	6.839	57.859	5.170	43.734	3.985	33.714	4.590	38.829	5.553	46.979
Fe	1	0.010	0.000	0.003	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
	2	0.017	0.000	0.005	0.000	0.008	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
	3	659.076	3.853	403.496	2.359	420.056	2.456	322.386	1.885	322.386	1.885
	4	nd	nd	17.115	0.100	15.335	0.090	10.977	0.064	10.977	0.064
	5	16444.883	96.146	16683.367	97.541	16668.583	97.454	16770.621	98.051	16770.621	98.051
Mn	1	0.003	0.001	0.002	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.004	0.001
	2	0.002	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	nd	nd
	3	29.834	6.639	19.769	4.399	22.210	4.942	17.194	3.826	11.921	2.653
	4	1.846	0.411	5.417	1.205	8.060	1.794	7.043	1.567	5.059	1.126
	5	417.700	92.949	424.195	94.395	419.111	93.263	425.145	94.606	432.400	96.220

ตารางที่ จ.5 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 18/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ni	1	0.023	0.083	0.013	0.048	0.015	0.053	0.004	0.015	0.007	0.025
	2	0.011	0.040	0.015	0.054	0.030	0.112	0.006	0.021	0.006	0.021
	3	0.100	0.369	0.076	0.281	0.098	0.362	0.070	0.259	0.048	0.178
	4	0.004	0.015	0.007	0.025	0.019	0.071	0.026	0.097	0.012	0.044
	5	27.014	99.492	27.041	99.592	26.989	99.402	27.045	99.609	27.079	99.731
Se	1	0.524	2.262	0.372	1.607	0.436	1.880	0.455	1.965	0.399	1.720
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.072	4.627	0.604	2.606
	3	7.800	33.674	4.507	19.456	5.681	24.527	4.563	19.697	nd	nd
	4	nd	nd	2.299	9.926	nd	nd	1.615	6.971	nd	nd
	5	14.840	64.064	15.986	69.011	17.047	73.593	15.460	66.739	22.162	95.674
Sr	1	0.012	0.004	nd	nd	0.003	0.001	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.487	1.294	3.888	1.443
	3	17.902	6.642	14.787	5.486	15.618	5.794	11.745	4.357	8.827	3.275
	4	1.916	0.711	4.210	1.562	5.554	2.060	4.368	1.621	3.506	1.301
	5	249.718	92.643	250.551	92.952	248.374	92.145	249.948	92.729	253.327	93.982
V	1	0.024	0.030	0.006	0.008	0.014	0.018	0.018	0.023	0.012	0.015
	2	0.005	0.007	0.007	0.008	0.011	0.013	nd	nd	nd	nd
	3	4.568	5.679	3.251	4.042	3.640	4.525	2.817	3.502	1.939	2.411
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	75.831	94.285	77.164	95.942	76.763	95.444	77.593	96.475	78.476	97.573
Zn	1	0.013	0.025	0.056	0.108	nd	nd	nd	nd	0.013	0.024
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	1.869	3.625	1.215	2.356	1.552	3.011	1.153	2.236	0.548	1.062
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	49.671	96.349	50.283	97.536	50.001	96.989	50.401	97.764	50.993	98.913

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ จ.6 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 22/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ba	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	2.250	1.494	2.229	1.480
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	7.456	4.953	18.849	12.521	16.252	10.796	18.417	12.234	17.236	11.449
	5	143.085	95.047	131.692	87.479	134.289	89.204	129.874	86.272	131.076	87.070
Co	1	0.033	0.317	0.011	0.105	0.016	0.150	0.012	0.109	0.017	0.162
	2	0.012	0.113	0.008	0.072	0.013	0.125	0.009	0.085	0.002	0.020
	3	0.298	2.826	0.193	1.827	0.216	2.044	0.242	2.292	0.056	0.527
	4	nd	nd	nd	nd	0.073	0.689	nd	nd	nd	nd
	5	10.199	96.743	10.331	97.995	10.225	96.991	10.280	97.513	10.468	99.291
Cr	1	0.027	0.031	0.006	0.006	0.019	0.022	0.019	0.021	0.011	0.013
	2	0.022	0.025	0.022	0.024	0.024	0.027	0.216	0.244	0.231	0.261
	3	2.025	2.289	1.251	1.414	1.473	1.665	0.904	1.022	0.548	0.619
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	86.396	97.655	87.193	98.555	86.954	98.286	87.332	98.713	87.681	99.107
Cu	1	0.033	0.288	0.053	0.469	0.023	0.203	0.032	0.280	0.027	0.234
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	6.827	60.044	6.604	58.082	5.729	50.384	6.709	59.004	5.914	52.018
	4	1.438	12.647	1.077	9.476	2.082	18.309	1.472	12.947	0.380	3.341
	5	3.072	25.992	3.635	31.973	3.537	31.104	3.157	27.769	5.049	44.406
Fe	1	0.010	0.000	0.005	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000	0.037	0.000
	2	0.008	0.000	0.004	0.000	0.004	0.000	nd	nd	nd	nd
	3	644.966	3.692	411.376	2.355	414.006	2.370	296.226	1.696	218.186	1.249
	4	nd	nd	22.057	0.126	6.709	0.038	nd	nd	nd	nd
	5	16824.110	96.308	17035.652	97.519	17048.371	97.592	17172.864	98.304	17250.872	98.751
Mn	1	0.004	0.001	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.004	0.001
	2	0.002	0.000	0.001	0.000	0.003	0.001	nd	nd	nd	nd
	3	28.120	6.200	18.500	4.079	19.643	4.331	14.809	3.265	10.564	2.329
	4	2.241	0.494	7.676	1.693	7.690	1.696	7.380	1.627	4.956	1.093
	5	423.154	93.304	427.342	94.228	426.183	93.972	431.330	95.107	437.997	96.577

ตารางที่ จ.6 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 22/01/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ni	1	0.037	0.125	0.010	0.035	0.018	0.062	0.008	0.028	0.008	0.028
	2	0.011	0.037	0.014	0.047	0.018	0.060	0.008	0.027	0.009	0.031
	3	0.118	0.397	0.077	0.260	0.101	0.340	0.066	0.222	0.066	0.221
	4	0.008	0.028	0.024	0.080	0.028	0.093	0.030	0.100	0.019	0.064
	5	29.543	99.412	29.592	99.578	29.552	99.445	29.605	99.623	29.615	99.657
Se	1	0.797	4.320	0.437	2.370	0.430	2.330	0.457	2.477	0.196	1.065
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.910	4.934	0.782	4.244
	3	5.324	28.877	4.174	22.640	1.301	7.058	4.641	25.175	nd	nd
	4	nd	nd	2.864	15.536	nd	nd	2.630	14.268	nd	nd
	5	12.315	66.803	10.961	59.453	16.705	90.612	9.798	53.146	17.457	75.361
Sr	1	0.066	0.024	nd	nd	0.001	0.001	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.506	1.277	3.526	1.284
	3	15.948	5.808	14.562	5.304	14.546	5.298	11.059	4.028	7.222	2.630
	4	2.122	0.773	5.594	2.038	5.688	2.072	4.890	1.781	2.906	1.058
	5	256.433	93.395	254.413	92.659	254.334	92.630	255.114	92.914	260.915	95.027
V	1	0.019	0.023	0.014	0.017	0.012	0.015	0.011	0.013	0.012	0.015
	2	0.013	0.015	0.006	0.008	0.013	0.017	nd	nd	nd	nd
	3	5.150	6.340	3.745	4.611	3.712	4.571	2.876	3.541	2.105	2.591
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	76.044	93.622	77.459	95.364	77.486	95.398	78.338	96.446	79.108	97.394
Zn	1	0.012	0.027	0.057	0.135	nd	nd	nd	nd	0.003	0.007
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	1.638	3.877	0.860	2.036	1.079	2.553	0.670	1.586	0.263	0.624
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	40.604	96.095	41.337	97.829	41.176	97.447	41.584	98.414	41.988	99.370

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ จ.7 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 03/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ba	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.963	1.668	1.872	1.591
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	7.976	6.779	18.853	16.024	19.437	16.520	19.462	16.542	22.355	19.001
	5	109.677	93.221	98.800	83.976	98.216	83.480	96.228	81.790	93.426	79.408
Co	1	0.034	0.247	0.012	0.089	0.013	0.096	0.017	0.122	0.021	0.154
	2	0.011	0.081	0.013	0.092	0.021	0.154	0.006	0.044	0.006	0.041
	3	0.452	3.275	0.377	2.732	0.331	2.399	0.214	1.548	0.132	0.952
	4	nd	nd	0.125	0.903	0.053	0.387	0.046	0.333	0.001	0.004
	5	13.312	96.397	13.283	96.183	13.391	96.963	13.527	97.954	13.651	98.849
Cr	1	0.015	0.033	0.013	0.029	0.018	0.040	0.015	0.034	0.010	0.022
	2	0.012	0.027	0.022	0.049	0.027	0.059	0.161	0.361	0.086	0.192
	3	0.821	1.838	0.532	1.191	0.599	1.340	0.210	0.469	0.193	0.433
	4	nd	nn	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	43.828	98.102	44.110	98.731	44.033	98.560	44.290	99.135	44.387	99.352
Cu	1	0.046	0.022	0.033	0.016	0.033	0.016	0.029	0.014	0.025	0.012
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	97.264	48.071	118.661	58.646	110.456	54.591	91.440	45.193	93.286	46.105
	4	17.329	8.564	24.814	12.264	15.214	7.519	8.672	4.286	7.720	3.816
	5	87.696	43.342	58.826	29.074	76.631	37.874	102.193	50.507	101.303	50.067
Fe	1	0.007	0.000	0.004	0.000	0.008	0.000	0.011	0.000	0.031	0.000
	2	0.013	0.000	0.004	0.000	0.005	0.000	0.005	0.000	0.003	0.000
	3	882.566	3.669	533.136	2.216	580.426	2.413	350.616	1.458	300.536	1.249
	4	62.161	0.258	129.982	0.540	20.765	0.086	nd	nd	3.347	0.014
	5	23110.205	96.073	23391.825	97.243	23453.747	97.501	23704.319	98.542	23751.035	98.737

ตารางที่ จ.7 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 03/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Mn	1	0.004	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.004	0.001
	2	0.002	0.000	0.002	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	nd	nd
	3	25.431	5.288	16.485	3.428	18.092	3.762	11.250	2.339	9.755	2.028
	4	2.690	0.559	9.139	1.900	6.441	1.339	4.512	0.938	4.168	0.867
	5	452.787	94.152	455.285	94.671	456.377	94.898	465.149	96.722	466.986	97.104
Ni	1	0.048	0.210	0.011	0.047	0.005	0.024	0.006	0.025	0.025	0.109
	2	0.016	0.069	0.014	0.060	0.017	0.074	0.004	0.016	0.005	0.023
	3	0.105	0.460	0.075	0.327	0.074	0.322	0.047	0.204	0.040	0.176
	4	0.009	0.041	0.017	0.072	0.022	0.098	0.025	0.111	0.019	0.082
	5	22.681	99.221	22.743	99.493	22.741	99.483	22.778	99.644	22.770	99.610
Pb	1	0.194	0.607	0.131	0.411	0.056	0.174	0.120	0.376	0.092	0.288
	2	0.044	0.136	0.022	0.069	nd	nd	0.018	0.058	nd	nd
	3	0.493	1.543	nd	nd	0.458	1.431	nd	nd	nd	nd
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	31.244	97.714	31.822	99.520	31.462	98.395	31.836	99.567	31.883	99.712
Se	1	0.853	7.404	0.329	2.854	0.265	2.298	0.502	4.363	0.346	3.008
	2	nd	nd	nd	nd	0.023	0.199	1.123	9.751	1.111	9.646
	3	7.476	64.916	8.253	71.661	3.694	32.077	2.150	18.673	1.382	11.997
	4	nd	nd	2.536	22.023	1.425	12.374	nd	nd	nd	nd
	5	3.188	27.681	0.399	3.462	6.110	53.052	7.740	67.213	8.677	75.349
Sr	1	0.013	0.007	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.424	1.884	3.094	1.703
	3	19.570	10.771	19.001	10.458	16.366	9.008	9.910	5.455	8.396	4.621
	4	3.214	1.769	8.150	4.486	5.842	3.216	3.636	2.001	3.238	1.782
	5	158.886	87.452	154.533	85.056	159.476	87.776	164.714	90.659	166.956	91.894

ตารางที่ จ.7 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 03/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
V	1	0.016	0.026	0.010	0.016	0.014	0.022	0.008	0.013	0.009	0.015
	2	0.008	0.013	0.013	0.021	0.012	0.019	nd	nd	nd	nd
	3	3.716	6.031	2.864	4.648	2.910	4.723	1.621	2.631	1.461	2.371
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	57.870	93.930	58.723	95.315	58.675	95.236	59.981	97.356	60.140	97.614
Zn	1	0.025	0.008	0.014	0.005	nd	nd	0.010	0.003	0.004	0.001
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	19.689	6.619	15.585	5.239	17.258	5.802	11.880	3.994	11.267	3.788
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	277.746	93.373	281.861	94.756	280.201	94.198	285.570	96.003	286.188	96.211

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.8 ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 05/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ba	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	1.893	1.860	1.770	1.739	1.526	1.500
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	7.004	6.885	17.743	17.440	16.647	16.363	14.650	14.400	16.632	16.348
	5	94.733	93.115	83.995	82.560	83.197	81.777	85.318	83.861	83.579	82.151
Co	1	0.020	0.156	0.009	0.069	0.015	0.112	0.010	0.078	0.026	0.199
	2	0.015	0.118	0.012	0.096	0.007	0.053	0.001	0.006	0.006	0.043
	3	0.286	2.203	0.239	1.839	0.276	2.128	0.078	0.598	0.113	0.873
	4	nd	nd	0.048	0.366	nd	nd	0.005	0.038	nd	nd
	5	12.667	97.523	12.681	97.631	12.691	97.706	12.895	99.280	12.844	98.885
Cr	1	0.016	0.039	0.006	0.015	0.016	0.038	0.012	0.030	0.018	0.045
	2	0.022	0.053	0.015	0.036	0.111	0.271	0.101	0.246	0.067	0.163
	3	0.452	1.099	0.345	0.839	0.349	0.849	0.131	0.318	0.130	0.316
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	40.598	98.808	40.723	99.111	40.612	98.841	40.844	99.405	40.873	99.476
Cu	1	0.060	0.023	0.028	0.011	0.024	0.009	0.031	0.011	0.037	0.014
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	79.624	29.864	108.209	40.585	102.831	38.567	87.223	32.714	91.347	34.260
	4	11.975	4.491	19.419	7.283	12.845	4.817	10.001	3.751	5.384	2.019
	5	174.967	65.623	138.970	52.122	150.927	56.606	169.372	83.709	169.859	63.707
Fe	1	0.007	0.000	0.005	0.000	0.007	0.000	0.009	0.000	0.038	0.000
	2	0.008	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	nd	nd
	3	645.066	2.720	420.286	1.772	425.406	1.793	284.916	1.201	227.096	0.957
	4	25.953	0.109	111.370	0.470	15.730	0.066	1.879	0.008	nd	nd
	5	23048.470	97.171	23187.841	97.759	23278.361	98.140	23432.698	98.791	23492.369	99.042

ตารางที่ จ.8 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 05/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Mn	1	0.003	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.001	0.005	0.001
	2	0.002	0.000	0.002	0.000	nd	nd	nd	nd	0.001	0.000
	3	16.558	4.304	11.778	3.062	12.062	3.136	8.463	2.200	7.106	1.847
	4	1.698	0.441	5.937	1.543	4.106	1.067	4.108	1.068	2.769	0.720
	5	366.434	95.253	366.977	95.394	368.525	95.797	372.121	96.732	374.814	97.432
Pb	1	0.071	0.152	0.084	0.180	0.115	0.245	0.106	0.226	0.073	0.156
	2	nd	nd	0.010	0.021	nd	nd	0.014	0.030	0.034	0.072
	3	0.622	1.328	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	46.185	98.520	46.785	99.799	46.764	99.755	46.759	99.744	46.772	99.772
Se	1	0.572	5.804	0.237	2.401	0.260	2.643	0.359	3.639	0.256	2.602
	2	nd	nd	nd	nd	0.677	6.870	0.720	7.305	0.897	9.104
	3	4.071	41.317	8.209	83.319	8.160	82.822	1.562	15.849	3.557	36.098
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	1.738	17.643	nd	nd
	5	5.210	52.879	1.407	14.281	0.755	7.665	5.475	55.564	5.143	52.196
Sr	1	0.006	0.004	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	4.178	2.825	3.501	2.367	3.352	2.267
	3	18.145	12.270	19.958	13.496	16.954	11.465	10.756	7.274	9.533	6.447
	4	2.727	1.844	7.391	4.998	5.139	3.475	4.532	3.065	3.575	2.417
	5	129.725	87.726	120.527	81.505	121.606	82.235	129.088	87.294	131.417	88.869
V	1	0.019	0.036	0.006	0.011	0.010	0.019	0.009	0.017	0.006	0.011
	2	0.008	0.015	0.007	0.013	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	2.436	4.483	2.027	3.730	2.112	3.886	1.223	2.250	0.971	1.786
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	51.894	95.482	52.310	96.246	52.227	96.095	53.118	97.733	53.373	98.203

ตารางที่ จ.8 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 05/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Zn	1	0.066	0.020	0.013	0.004	nd	nd	0.010	0.003	0.006	0.002
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	15.389	4.760	12.701	3.929	12.308	3.807	11.331	3.505	10.904	3.373
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	307.849	95.220	310.590	96.067	310.996	96.193	311.963	96.492	312.394	96.626

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.๑ ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง (Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 07/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Ba	1	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	1.751	1.497	1.682	1.438	1.514	1.295
	3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	4	7.399	6.327	21.900	18.727	19.871	16.992	20.324	17.380	24.394	20.860
	5	109.541	93.673	95.041	81.273	95.319	81.511	94.935	81.182	91.033	77.845
Co	1	0.027	0.201	0.014	0.109	0.020	0.153	0.012	0.092	0.031	0.232
	2	0.014	0.103	0.008	0.062	0.002	0.018	0.007	0.051	0.006	0.046
	3	0.412	3.124	0.263	1.995	0.317	2.400	0.260	1.972	0.123	0.935
	4	nd	nd	0.131	0.991	0.146	1.108	0.110	0.836	nd	nd
	5	12.743	96.572	12.779	96.843	12.710	96.321	12.806	97.048	13.036	98.787
Cr	1	0.005	0.015	0.005	0.015	0.012	0.035	0.013	0.038	0.013	0.039
	2	0.020	0.059	0.023	0.067	0.130	0.373	0.135	0.385	0.084	0.239
	3	0.510	1.461	0.484	1.386	0.497	1.423	0.214	0.614	0.104	0.297
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	34.401	98.465	34.425	98.532	34.298	98.169	34.575	98.963	34.737	99.425
Cu	1	0.048	0.017	0.040	0.015	0.027	0.010	0.025	0.009	0.026	0.009
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	100.959	36.830	127.036	46.343	140.696	51.326	116.100	42.354	85.394	31.152
	4	12.147	4.431	28.236	10.301	25.509	9.306	21.003	7.662	7.688	2.805
	5	160.966	60.371	118.807	43.341	107.887	39.358	136.992	49.975	181.012	66.034
Fe	1	0.001	0.000	0.006	0.000	0.006	0.000	0.005	0.000	0.040	0.000
	2	0.006	0.000	0.006	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	nd	nd
	3	704.226	2.954	565.796	2.373	558.586	2.343	367.766	1.543	247.736	1.039
	4	nd	nd	110.481	0.463	38.137	0.160	16.956	0.071	nd	nd
	5	23137.040	97.046	23164.984	97.163	23244.543	97.497	23456.545	98.386	23593.497	98.961

ตารางที่ จ.9 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 07/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Mn	1	0.003	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.004	0.001
	2	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000
	3	20.196	5.190	17.574	4.516	17.750	4.561	11.497	2.954	7.798	2.004
	4	1.893	0.486	9.181	2.359	8.296	2.132	7.030	1.806	3.707	0.952
	5	367.072	94.323	362.407	93.124	363.117	93.307	370.636	95.239	377.656	97.043
Ni	1	0.028	0.128	0.004	0.018	0.015	0.068	0.014	0.065	0.026	0.120
	2	0.021	0.095	0.008	0.038	0.014	0.063	0.001	0.006	0.005	0.021
	3	0.083	0.378	0.087	0.394	0.073	0.332	0.054	0.245	0.041	0.187
	4	0.010	0.045	0.020	0.091	0.033	0.150	0.026	0.118	0.009	0.043
	5	21.811	99.355	21.834	99.459	21.818	99.387	21.858	99.566	21.871	99.629
Pb	1	0.148	0.333	0.067	0.150	0.081	0.182	0.102	0.230	0.103	0.232
	2	0.033	0.074	0.070	0.158	nd	nd	0.001	0.002	nd	nd
	3	0.663	1.492	0.315	0.708	0.280	0.630	nd	nd	nd	nd
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	43.577	98.101	44.035	99.134	44.060	99.188	44.317	99.768	44.317	99.768
Se	1	0.547	4.411	0.102	0.820	0.443	3.576	0.208	1.676	0.268	2.158
	2	nd	nd	nd	nd	0.962	7.761	1.060	8.550	0.598	4.823
	3	5.436	43.838	5.100	41.134	5.547	44.738	7.992	64.458	2.005	16.171
	4	nd	nd	2.405	19.399	1.536	12.388	0.352	2.835	nd	nd
	5	6.417	51.751	4.792	38.647	3.910	31.537	2.788	22.482	9.529	76.849
Sr	1	0.008	0.003	0.001	0.000	0.001	0.000	nd	nd	nd	nd
	2	nd	nd	nd	nd	4.274	1.523	3.631	1.294	3.342	1.191
	3	16.865	6.011	22.276	7.940	22.007	7.844	13.666	4.871	8.198	2.922
	4	2.327	0.829	9.518	3.392	9.010	3.211	6.736	2.401	3.431	1.223
	5	261.356	93.157	248.761	88.667	245.264	87.421	256.521	91.433	265.585	94.664

ตารางที่ จ.9 (ต่อ) ข้อมูลการชะละลายของโลหะหนักโดยใช้กระบวนการสกัดแบบต่อเนื่อง
(Sequential Extraction) ตัวอย่างวันที่ 07/02/48

ธาตุ	ขั้นตอน ที่	อายุบ่ม (วัน)									
		3		7		14		28		60	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
V	1	0.017	0.041	0.011	0.027	0.012	0.030	0.011	0.027	0.006	0.015
	2	0.013	0.031	0.010	0.026	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	2.786	6.835	2.647	6.494	2.774	6.805	1.852	4.544	0.952	2.335
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	37.948	93.093	38.095	93.454	37.977	93.165	38.900	95.429	39.806	97.651
Zn	1	0.013	0.004	0.021	0.006	nd	nd	0.007	0.002	0.002	0.001
	2	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	3	18.156	5.302	16.327	4.768	17.753	5.184	11.293	3.298	10.037	2.931
	4	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	5	324.273	94.694	326.093	95.226	324.689	94.816	331.141	96.700	332.314	97.043

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้



ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.1 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 20/10/47

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.05	14.38	12.56	51.12	50.97
	2	25.30	14.30	12.48	50.28	
	3	25.20	14.55	12.73	51.51	
7	1	25.20	28.10	26.46	107.02	107.09
	2	25.20	30.00	28.38	114.80	
	3	25.35	26.40	24.73	99.46	
14	1	24.95	36.00	34.46	140.78	138.39
	2	25.10	35.50	33.95	137.88	
	3	25.05	35.10	33.54	136.51	
28	1	25.25	53.40	52.08	210.24	209.57
	2	25.10	53.10	51.77	210.26	
	3	25.00	52.40	51.06	208.21	
60	1	25.15	67.70	66.56	269.77	265.31
	2	25.15	65.30	64.13	259.92	
	3	25.25	67.10	65.95	266.25	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

ตารางที่ ๓.2 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 21/10/47

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.10	12.89	11.05	44.89	43.28
	2	25.15	12.56	10.72	43.44	
	3	25.15	12.09	10.24	41.51	
7	1	25.10	24.64	22.95	93.22	93.18
	2	25.15	24.11	22.42	90.85	
	3	25.10	25.19	23.51	95.47	
14	1	25.20	29.40	27.77	112.34	110.24
	2	25.15	27.50	25.85	104.77	
	3	25.10	29.60	27.97	113.61	
28	1	25.30	55.80	54.51	219.61	220.45
	2	25.20	55.90	54.61	220.90	
	3	25.30	56.10	54.81	220.83	
60	1	24.95	64.20	63.01	257.45	252.66
	2	25.00	64.00	62.81	256.11	
	3	25.10	61.40	60.18	244.40	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.3 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 22/10/47

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.20	16.49	14.70	59.46	61.76
	2	25.00	17.78	16.00	65.26	
	3	25.15	16.73	14.94	60.56	
7	1	26.05	38.20	36.68	143.54	150.56
	2	25.05	41.10	39.62	161.23	
	3	25.10	37.70	36.18	146.93	
14	1	25.40	37.00	35.47	142.34	152.43
	2	24.95	40.60	39.11	159.81	
	3	25.10	39.70	38.20	155.15	
28	1	25.15	63.70	62.51	253.35	256.86
	2	25.15	62.70	61.50	249.25	
	3	25.05	67.00	65.85	267.96	
60	1	25.10	71.50	70.41	285.94	283.59
	2	25.10	66.40	65.24	264.96	
	3	25.00	74.60	73.55	299.88	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

ตารางที่ ๓.4 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 26/10/47

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.45	16.44	14.65	58.67	58.36
	2	25.40	16.43	14.64	58.74	
	3	25.30	16.11	14.31	57.67	
7	1	25.20	34.70	33.14	134.05	126.95
	2	25.20	32.70	31.11	125.86	
	3	25.20	31.50	29.90	120.94	
14	1	25.10	40.70	39.22	159.26	151.18
	2	25.30	37.90	36.38	146.58	
	3	25.25	38.10	36.58	147.69	
28	1	25.20	50.00	48.63	196.73	195.05
	2	25.15	50.30	48.94	198.35	
	3	25.05	48.10	46.71	190.08	
60	1	25.00	60.10	58.86	240.01	237.78
	2	25.35	60.80	59.57	239.54	
	3	25.40	59.50	58.25	233.78	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.5 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 06/01/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.10	10.57	8.70	35.35	36.68
	2	25.05	11.00	9.14	37.19	
	3	25.25	11.15	9.29	37.51	
7	1	25.50	19.98	18.23	72.88	70.64
	2	25.25	18.64	16.88	68.13	
	3	25.20	19.29	17.53	70.93	
14	1	25.45	35.80	34.25	137.19	143.16
	2	25.10	38.10	36.58	148.58	
	3	25.30	37.20	35.67	143.72	
28	1	25.10	47.20	45.80	186.00	191.21
	2	25.05	49.80	48.43	197.08	
	3	25.15	48.40	47.01	190.55	
60	1	25.25	59.40	58.15	234.77	231.92
	2	25.15	57.70	56.43	228.72	
	3	25.30	58.90	57.65	232.26	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.6 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 16/01/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.05	11.66	9.81	39.91	38.75
	2	25.15	11.02	9.16	37.12	
	3	25.20	11.55	9.70	39.22	
7	1	25.00	23.21	21.50	87.68	87.13
	2	25.05	23.62	21.92	89.20	
	3	25.20	22.61	20.90	84.53	
14	1	25.55	38.10	36.58	145.94	144.86
	2	25.15	36.00	34.46	139.66	
	3	25.10	38.20	36.68	148.99	
28	1	25.25	50.00	48.63	196.34	199.06
	2	25.35	53.30	51.98	208.99	
	3	25.25	48.90	47.52	191.84	
60	1	25.10	66.90	65.75	267.02	260.23
	2	25.30	65.10	63.93	257.56	
	3	25.20	64.50	63.32	256.12	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๓.7 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 18/01/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.10	25.15	23.47	95.31	93.99
	2	25.15	24.88	23.19	94.01	
	3	25.20	24.59	22.90	92.64	
7	1	25.05	46.00	44.58	181.42	181.10
	2	25.15	46.30	44.89	181.93	
	3	25.20	45.90	44.48	179.93	
14	1	25.05	63.40	62.20	253.14	242.43
	2	25.00	61.10	59.87	244.15	
	3	25.10	57.90	56.63	230.02	
28	1	25.25	75.50	74.46	300.59	293.50
	2	25.20	72.10	71.01	287.26	
	3	25.30	73.70	72.63	292.64	
60	1	25.25	83.40	82.46	332.88	331.96
	2	25.20	79.00	78.00	315.52	
	3	25.20	86.80	85.90	347.47	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๘.8 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 20/01/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.00	12.79	10.95	44.65	44.10
	2	25.25	12.68	10.84	43.76	
	3	25.25	12.71	10.87	43.88	
7	1	25.15	24.20	22.51	91.22	92.09
	2	25.25	23.89	22.19	89.59	
	3	25.05	25.14	23.46	95.46	
14	1	25.40	36.40	34.86	139.90	132.70
	2	25.55	33.10	31.52	125.74	
	3	25.35	34.50	32.94	132.45	
28	1	25.25	52.50	51.17	206.56	203.42
	2	25.15	51.50	50.15	203.28	
	3	25.20	50.90	49.55	200.41	
60	1	25.15	55.20	53.90	218.46	217.22
	2	25.05	55.50	54.20	220.57	
	3	25.45	54.40	53.09	212.63	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.๑ ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 22/01/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.35	17.16	15.38	61.83	59.85
	2	25.30	17.11	15.33	61.75	
	3	25.20	15.64	13.84	55.97	
7	1	25.10	35.80	34.25	139.11	140.76
	2	25.05	37.30	35.77	145.57	
	3	25.15	35.50	33.95	137.60	
14	1	25.15	45.80	44.38	179.88	183.39
	2	25.25	48.00	46.61	188.16	
	3	25.35	46.70	45.29	182.12	
28	1	25.45	64.70	63.52	254.41	258.29
	2	25.20	64.70	63.52	256.95	
	3	25.20	66.30	65.14	263.50	
60	1	25.10	64.50	63.32	257.15	263.98
	2	25.20	70.00	68.89	278.66	
	3	25.20	64.50	63.32	256.13	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.10 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 30/01/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.10	9.90	8.02	32.59	32.59
	2	25.15	10.23	8.36	33.88	
	3	25.25	9.63	7.75	31.29	
7	1	25.30	18.97	17.21	69.34	71.30
	2	25.20	19.54	17.79	71.95	
	3	25.10	19.63	17.88	72.61	
14	1	25.05	29.30	27.67	112.60	123.26
	2	25.05	34.60	33.04	134.44	
	3	25.00	31.70	30.10	122.74	
28	1	25.25	47.60	46.20	186.52	180.54
	2	25.30	43.40	41.95	169.02	
	3	25.20	47.40	46.00	186.08	
60	1	25.30	60.40	59.17	238.38	237.86
	2	25.20	60.70	59.47	240.56	
	3	25.00	58.80	57.55	234.64	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.11 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 01/02/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.15	16.22	14.42	58.47	58.27
	2	25.25	16.77	14.98	60.48	
	3	25.25	15.64	13.84	55.86	
7	1	24.95	28.30	26.66	108.92	106.02
	2	24.90	27.30	25.65	104.99	
	3	25.20	27.40	25.75	104.15	
14	1	25.10	48.40	47.01	190.93	184.05
	2	25.00	44.80	43.37	176.83	
	3	25.15	46.90	45.49	184.39	
28	1	25.20	61.10	59.87	242.20	252.60
	2	24.95	63.30	62.10	253.74	
	3	25.20	65.90	64.74	261.86	
60	1	25.10	86.10	85.19	345.99	340.39
	2	24.95	84.20	83.27	340.20	
	3	25.00	83.10	82.15	334.98	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.12 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 03/02/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.30	13.98	12.16	48.98	47.26
	2	25.05	13.05	11.21	45.64	
	3	25.15	13.47	11.64	47.18	
7	1	25.50	26.90	25.24	100.89	101.11
	2	25.10	25.32	23.64	96.01	
	3	25.05	27.80	26.15	106.42	
14	1	25.40	41.30	39.82	159.81	157.76
	2	25.40	39.40	37.90	152.09	
	3	25.86	42.40	40.94	161.39	
28	1	25.50	50.50	49.14	196.42	208.47
	2	25.30	55.10	53.80	216.76	
	3	25.40	54.20	52.89	212.24	
60	1	25.15	72.30	71.22	288.65	296.46
	2	25.25	76.40	75.37	304.27	
	3	25.30	63.80	62.61	252.25**	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

**ค่าที่ได้ของก้อนตัวอย่างมีค่าเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.13 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 05/02/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.05	8.81	6.92	28.16	28.19
	2	25.00	8.96	7.07	28.84	
	3	25.15	8.69	6.80	27.56	
7	1	25.05	15.79	13.99	56.93	58.65
	2	25.10	16.42	14.63	59.41	
	3	25.10	16.47	14.68	59.61	
14	1	25.50	26.70	25.04	100.08	103.72
	2	25.40	23.08	21.37	85.77**	
	3	25.50	28.50	26.86	107.37	
28	1	25.25	40.70	39.22	158.32	160.04
	2	25.35	39.20	37.70	151.58	
	3	25.00	43.20	41.75	170.22	
60	1	25.20	66.90	65.75	265.96	257.20
	2	25.15	65.30	64.13	259.92	
	3	25.05	61.60	60.38	245.71	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

**ค่าที่ได้ของก้อนตัวอย่างมีค่าเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑.14 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์ ตัวอย่างวันที่ 07/02/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.25	7.48	5.57	22.50	22.87
	2	25.05	7.63	5.73	23.30	
	3	24.90	7.48	5.57	22.82	
7	1	25.05	12.79	10.95	44.56	43.33
	2	25.35	12.35	10.51	42.24	
	3	25.25	12.54	10.70	43.19	
14	1	25.40	20.26	18.52	74.31	79.21
	2	25.40	23.13	21.42	85.97	
	3	25.86	21.35	19.62	77.35	
28	1	25.25	29.70	28.08	113.34	117.85
	2	25.00	31.40	29.80	121.50	
	3	25.15	30.90	29.29	118.72	
60	1	25.15	46.90	45.49	184.39	188.38
	2	25.05	48.60	47.22	192.14	
	3	25.30	48.20	46.81	188.60	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

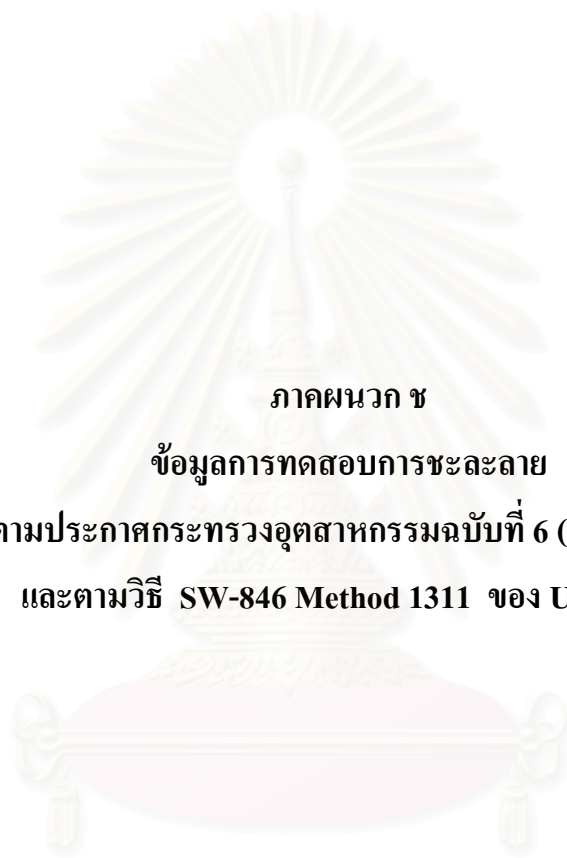
ตารางที่ ๑.15 ข้อมูลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า ตัวอย่างวันที่ 09/02/48

อายุบ่ม (วัน)	จำนวน ชิ้น	พื้นที่หน้าตัด (ตร.ซม.)	ค่าที่อ่านได้ (กิโลนิวตัน)	ค่าที่ใช้จริง* (กิโลนิวตัน)	กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	กำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)
3	1	25.20	8.19	6.29	25.46	23.86
	2	25.05	7.69	5.79	23.55	
	3	24.90	7.42	5.51	22.57	
7	1	25.20	14.65	12.83	51.92	51.14
	2	25.35	14.81	13.00	52.26	
	3	25.25	14.02	12.20	49.24	
14	1	25.40	31.60	30.00	120.39	115.12
	2	25.30	28.90	27.27	109.85	
	3	25.45	26.30	24.63	98.66**	
28	1	25.45	44.30	42.86	171.66	169.29
	2	25.30	42.90	41.44	166.98	
	3	25.45	43.70	42.25	169.23	
60	1	25.35	61.50	60.28	242.39	248.51
	2	25.05	61.30	60.08	244.48	
	3	25.55	66.00	64.84	258.66	

* ค่าที่ใช้จริง = ค่าปรับแก้ของเครื่องทดสอบกำลังอัด = $1.0127 \times \text{ค่าที่อ่านได้} - 2.0011$

**ค่าที่ได้ของก้อนตัวอย่างมีค่าเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช

ข้อมูลการทดสอบการชะละลาย

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

และตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลการทดสอบการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6

วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)											
	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Se	Sr	V	Zn
20/10/47	nd	0.007	3.153	0.030	nd	nd	0.019	nd	nd	13.316	nd	0.227
21/10/47	nd	0.018	2.866	0.052	nd	nd	0.031	nd	nd	11.879	nd	0.294
22/10/47	nd	0.004	2.996	0.058	nd	nd	0.031	nd	nd	11.566	nd	0.317
26/10/47	nd	0.028	2.948	0.063	nd	nd	0.081	nd	nd	10.510	nd	0.108
6/1/48	1.833	0.028	2.804	0.041	nd	nd	0.000	nd	nd	10.159	nd	0.092
16/1/48	0.682	0.047	1.545	0.083	nd	nd	0.103	nd	0.247	4.200	nd	nd
18/1/48	0.757	0.067	2.618	0.057	nd	nd	0.096	nd	nd	5.033	0.005	nd
20/1/48	0.950	0.025	1.746	0.059	nd	nd	0.075	nd	nd	5.762	nd	nd
22/1/48	1.863	0.015	4.584	0.032	nd	nd	0.055	nd	0.538	8.624	nd	nd
30/1/48	nd	0.067	0.478	0.088	nd	nd	0.125	nd	nd	2.008	0.018	nd
1/2/48	nd	0.046	0.225	0.090	0.975	0.017	0.147	nd	nd	0.886	0.040	nd
3/2/48	nd	0.088	0.261	0.088	1.372	0.013	0.066	0.272	nd	1.090	0.044	nd
5/2/48	1.272	0.023	1.605	0.021	nd	nd	0.000	nd	nd	6.994	nd	0.060
7/2/48	nd	0.089	0.231	0.067	nd	nd	0.085	0.269	nd	0.772	0.062	nd
9/2/48	nd	0.091	0.190	0.061	0.008	nd	0.070	nd	nd	0.413	0.020	nd
ค่ามาตรฐาน	100.000		5.000					5.000	1.000			

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 การทดสอบการชะละลายตามวิธี SW-486 Method 1311 ของ U.S EPA

วันที่เก็บ ตัวอย่าง	ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)											
	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Se	Sr	V	Zn
20/10/47	nd	0.045	1.586	0.046	0.001	nd	0.033	nd	nd	15.153	0.096	nd
21/10/47	nd	0.008	1.555	0.048	nd	nd	0.024	nd	nd	15.235	nd	nd
22/10/47	nd	0.025	1.797	0.071	nd	nd	0.017	nd	nd	15.630	nd	nd
26/10/47	nd	0.024	2.051	0.076	nd	nd	0.057	nd	nd	16.198	nd	nd
6/1/48	4.088	0.009	2.362	0.093	10.304	0.282	0.059	nd	3.584	16.612	0.605	nd
16/1/48	3.338	0.008	2.481	0.075	nd	nd	0.000	nd	1.939	15.796	0.108	nd
18/1/48	3.649	0.002	4.584	0.043	0.066	nd	0.023	nd	2.945	15.982	0.161	nd
20/1/48	3.743	0.022	2.115	0.075	nd	nd	0.049	nd	3.872	17.314	nd	nd
22/1/48	4.080	0.034	4.293	0.074	nd	0.000	0.018	nd	3.572	16.715	0.091	nd
30/1/48	6.469	0.109	3.686	0.095	0.030	nd	1.024	nd	3.321	19.953	0.226	1.201
1/2/48	6.069	0.020	3.908	0.073	1.330	0.022	0.589	nd	2.796	20.348	0.604	0.205
3/2/48	5.549	0.034	3.203	0.087	nd	nd	0.060	nd	3.110	20.058	0.528	nd
5/2/48	5.618	0.095	2.351	0.086	nd	nd	0.000	0.077	3.727	18.806	0.132	0.687
7/2/48	5.378	0.033	2.766	0.076	nd	nd	0.223	0.069	4.027	18.890	0.779	nd
9/2/48	4.091	0.026	3.702	0.059	nd	nd	0.034	nd	1.486	17.715	0.175	nd
ค่ามาตรฐาน	100.000		5.000					5.000	1.000			

nd (not detectable) = ไม่สามารถตรวจวัดได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

วิธีการชะละลาย

ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

และตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบชะละลาย ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

1. การสกัดสาร (Leachate extraction procedure) และการวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของสารอันตรายในน้ำสกัด ให้ใช้วิธีดังต่อไปนี้

1.1 การสกัดสารเพื่อทดสอบหาปริมาณสารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable) และเพื่อทดสอบว่าสิ่งปฏิภูลและวัสดุที่ไม่ใช่แล้วได้ผ่านการทำลายฤทธิ์หรือปรับเสถียรอย่างสมบูรณ์นั้น มีวิธีดังต่อไปนี้

1.1.1.1 หากตัวอย่างเป็นของเหลวหรือมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนในปริมาณที่น้อยกว่าร้อยละ 0.5 ให้กรองตัวอย่างนั้นด้วยแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน แล้วนำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 1.2

1.1.1.2 หากตัวอย่างมีของแข็ง (Dry solids) ปะปนอยู่ในปริมาณมากกว่าร้อยละ 0.5 ให้ดำเนินการดังต่อไปนี้

(1) บดตัวอย่างให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร

(2) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ (1)หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด (Leachant) หรือน้ำฝนกรดสังเคราะห์ (Synthetic Acid Rain Extraction Fluid) ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) จนค่าความเป็นกรดต่างของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง

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

(4) กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน

(5) นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วไปทำการวิเคราะห์ตามข้อ 1.2

1.2 การวิเคราะห์หาค่าสารอันตรายต่าง ๆ ในของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วจากข้อ 1.1.1 หรือข้อ 1.1.2 ให้ใช้วิธีมาตรฐาน US EPA SW 846 หรือวิธีมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์น้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 2 (พ.ศ. 2539) ลงวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2539

2. สารที่ถูกชะล้างได้ (Leachable Substances) เป็นสารซึ่งเมื่อนำมาสกัดด้วยวิธีสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) และวิธีวิเคราะห์น้ำสกัดตามหลักเกณฑ์ที่ประกาศนี้แล้ว มีปริมาณโลหะหรือวัตถุพิษในน้ำสกัดเท่ากับหรือมากกว่าค่าใดค่าหนึ่งดังต่อไปนี้

อาร์ซีนิก (ทั้งหมด) (Arsenic (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แบเรียม (Barium)	100.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
แคดเมียม (ทั้งหมด) (Cadmium (total))	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
โครเมียม (ทั้งหมด) (Chromium (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ตะกั่ว (ทั้งหมด) (Lead (total))	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
ปรอท (ทั้งหมด) (Mercury (total))	0.2	มิลลิกรัมต่อลิตร
ซีลีเนียม (Selenium)	1.0	มิลลิกรัมต่อลิตร
เงิน (Silver)	5.0	มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดสอบการชะละลาย ตามวิธี SW-846 Method 1311 ของ U.S. EPA

เป็นวิธีที่ออกแบบมาเพื่อหาการชะละลายของทั้งสารอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในสถานะของแข็ง และของเหลว ซึ่งน้ำสกัดนั้นจะเป็นการจำลองการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Landfill) ซึ่งมีวิธีทดสอบดังต่อไปนี้

การเตรียมน้ำสกัด

น้ำสกัดชนิดที่ 1 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 N จำนวน 64.3 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้อง pH จะมีค่าประมาณ 4.93 ± 0.05

น้ำสกัดชนิดที่ 2 เติมกรดอะซิติกเข้มข้น 5.7 มิลลิลิตร ลงในขวดที่มีน้ำกลั่นอยู่ 500 มิลลิลิตร ทำการปรับปริมาตรให้ได้ 1000 มิลลิลิตร ถ้าเตรียมถูกต้อง pH จะมีค่าประมาณ 2.88 ± 0.05

การเลือกน้ำสกัดที่เหมาะสม ในกรณีปริมาณของแข็งในตัวอย่างมากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 %

- แบ่งตัวอย่างที่เป็นของแข็งขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 มิลลิเมตร จำนวน 500 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ เติมน้ำกลั่น 96.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watchglass) นำไปกวนด้วยแมกเนติกสเตอร์เลอร์เป็นเวลา 5 นาที วัดและจดค่า pH ถ้า pH น้อยกว่า 5.0 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1

- ถ้า pH มากกว่าหรือเท่ากับ 5.0 เติมกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1 N จำนวน 3.5 มิลลิลิตร ปิดปากบีกเกอร์ด้วยกระจกนาฬิกา (Watchglass) นำไปให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และตรวจวัดค่า pH ถ้า pH น้อยกว่า 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 1 แต่ถ้า pH มากกว่า 5 เลือกใช้น้ำสกัดชนิดที่ 2

วิธีการทดลอง

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 นำของเหลวที่ผ่านการกรองแล้วมาทำการปรับค่า pH ให้น้อยกว่า 2 ด้วยกรดไนตริกจากนั้นนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฤทัยรัตน์ แพรอด เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย