

โครงสร้างและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียอันตรายผสมรวม
ในกระบวนการผลิตโดยใช้เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อยส่วน



ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

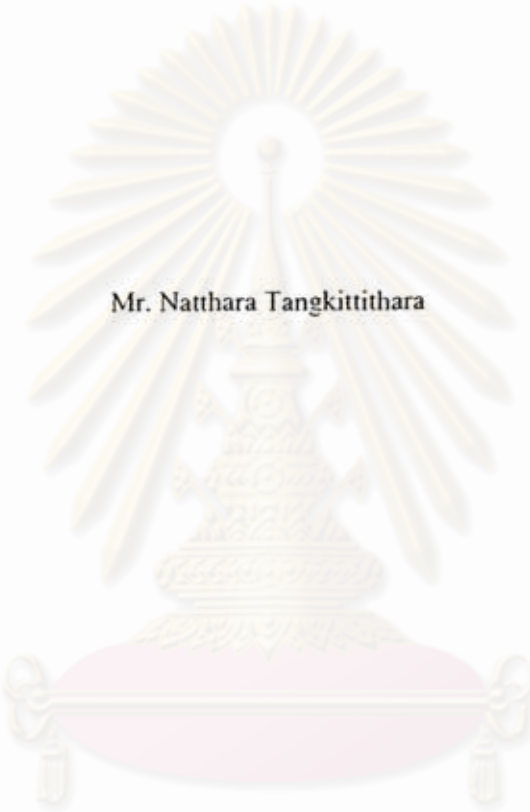
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STRUCTURE AND QUALITY OF CEMENT FROM CO-PROCESSING OF
HAZARDOUS WASTE IN A PILOT-SCALE
ROTARY CEMENT KILN



Mr. Natthara Tangkittithara

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

520669

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โครงสร้างและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสีย
อันตรายผสมรวมในกระบวนการผลิต โดยใช้ เตาเผา
ปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน

โดย

นายณัฐธรา ตั้งกิตติธรา

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

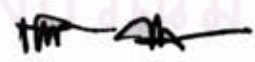

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

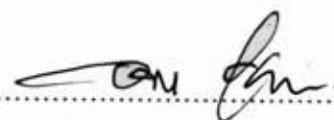
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชัยพร กุ่มประเสริฐ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(นายธนิต पुलิเวทินทร์)

ฉันทรา ตังกิตติธรา : โครงสร้างและคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่ใช้ของเสียอันตรายผสมรวมในกระบวนการผลิตโดยใช้เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน (Structure and Quality of Cement from Co-Processing of Hazardous Waste in a Pilot-Scale Rotary Cement Kiln) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศศ. คร. มนัสกร ราชกรกิจ , อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ศศ.คร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล 128 หน้า

ภาคตะกอนที่มีโลหะหนักผสมอยู่จัดว่าเป็นของเสียอันตรายที่สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ถ้าจากระบบกำจัดของเสียที่มีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้เล็งเห็นว่าการกำจัดภาคตะกอนโลหะหนักนั้นสามารถนำไปเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ จึงได้นำมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ ในการทดลองนี้ได้ใช้เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วนซึ่งเป็นแบบหมุนในการทดลอง และตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนั้นทำการเก็บจากวัตถุดิบจริงที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ และจะทำการผสมภาคตะกอนโลหะหนักในรูปของออกไซด์ที่เปรียบเทียบกับภาคตะกอนโลหะหนัก (Cr:Cu:Ni ในอัตราส่วน 1:1:1 และ Cr:Pb:Zn ในอัตราส่วน 1:4:13) และภาคตะกอนจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และ ภาคตะกอนจริงจากโรงงานหลอมเหล็กทำการทดลองที่ปริมาณโลหะหนักต่อปริมาณวัตถุดิบเท่ากับ 0.5 1.0 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ตัวอย่างละ 10 กิโลกรัม

จากการทดลองพบว่าการผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติของปูนซีเมนต์แต่อย่างใด และโลหะหนัก Cr:Pb:Zn Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ไม่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาในการผลิตปูนซีเมนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิติ.....^{นิติ}สาธิต ^{ตัวอักษร}.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970303121: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: CEMENT / CO-PROCESSING / HEAVY METAL

NATTHARA TANGKITTITHARA: STRUCTURE AND QUALITY OF CEMENT FROM CO-PROCESSING OF HAZARDOUS WASTE IN A PILOT-SCALE ROTARY CEMENT KILN. THESIS ADVISOR: ASST. PROF MANASKORN RACHARKORNIJ, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF VIBOON SRICHAROENCHAikul, Ph.D., 128 pp.

Sludge that contained many types of heavy metals from factories, which made the adverse affected to environmental and environment can indicate to hazardous waste. Bringing the sludge for using in the cement process is the one method to reduce concentration of sludge waste and consumed of raw material. However, the heavy metal in the sludge can make the effect to cement properties. This thesis study about the initial suitable concentration of sludge can use cement process without the affect to the cement properties. The heavy metal will ad 0.5, 1.0, 2.5 and 5.0 % by weight and combination of heavy metal include Cr: Cu: Ni (1:1:1), Cr: Pb: Zn (1:4:13) and use real sludge form steel industry and electronic industry was added into each 10 kg of the raw meal and burned in the pilot-scale rotary cement kiln.

The result showed combination ratio of Cr: Cu: Ni (1:1:1) not make the effect to cement properties if concentration of heavy metal lower than 0.5 % by weight and Cr: Pb: Zn (1:4:13) not make the effect to cement properties if concentration of heavy metal lower than 2.5 % by weight

Department :Environmental Engineering... Student's Signature *Natth*
Field of Study : ..Environmental Engineering... Advisor's Signature *[Signature]*
Academic Year :2009..... Co-Advisor's Signature *[Signature]*

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชกรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ .ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ชี้แนะให้ ความรู้ คำแนะนำ และคำปรึกษา ตลอดจนได้ให้ความช่วยเหลือในแต่ละขั้นตอนของการทำงาน วิจัย รวมทั้งตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการ และ อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ กรรมการ การสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้ชี้แนะ และตรวจทานในการ ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ คุณ ธนิต पुलิเวทินทร์ รองประธานฝ่ายเทคนิคและวิศวกรรม บริษัทปูนซีเมนต์ นครหลวง จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลและตัวอย่างของวัตถุคืบใน การวิจัย วิเคราะห์ตัวอย่าง และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นาย เจนวิทย์ กรอบทอง นิสิตปริญญาเอก หลักสูตรสาขาการจัดการ สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยคอยให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ในการทำ วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการของเสียนันตราย ศูนย์เครื่องข่ายคณะวิศวกรรมศาสตร์ โครงการ ศูนย์วิจัยแห่งชาติด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและของเสียนันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องวิจัย

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณครอบครัว ที่คอยสนับสนุน และ เพื่อนๆ ทุกๆ คนที่คอยให้ความ ช่วยเหลือในด้านต่างๆทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป.....	า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ปูนซีเมนต์.....	4
2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์.....	4
2.1.2 กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์.....	5
2.1.3 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
2.1.4 ปฏิกริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์.....	13
2.1.5 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	16
2.1.6 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว	17
2.1.7 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	18
2.2 กากของเสียอุตสาหกรรม	19
2.2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม	19
2.2.2 การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม	20
2.2.3 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมใช้เป็นวัสดุคิบและเชื้อเพลิงใน	21
กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์	
2.2.4 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแผลงวงจร.....	21
2.2.5 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบ โลหะ	23
2.3 โลหะหนัก	25
2.3.1 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์.....	25

2.3.2 พฤติกรรมของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	25
2.4 การชะละลาย.....	28
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
2.5.1 เตาเผาแบบหมุน	29
2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโลหะหนักในปูนซีเมนต์.....	30
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	34
3.1 แผนการทดลอง.....	34
3.2 วัตถุประสงค์	35
3.3. โลหะหนัก	35
3.4 เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน.....	36
3.5 การเตรียมวัตถุดิบ	37
3.6 วิธีการทดลอง	39
3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	40
3.7.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ	40
3.7.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี.....	40
3.7.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตาร์	43
3.8 อุปกรณ์และสารเคมี	44
3.8.1 เครื่องและอุปกรณ์.....	44
3.8.2 สารเคมี.....	45
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง	46
4.1 ผลวิเคราะห์ วัตถุดิบก่อนทำการทดลอง	46
4.1.1 ผลวิเคราะห์ XRF	46
4.1.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนัก (ICP).....	51
4.1.3 ผลวิเคราะห์ค่าความชื้น (%MC) และการสูญเสียน้ำหนัก (LOI).....	53
4.2 กระบวนการเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน.....	57
(Burning process in pilot-scale rotary cement kiln)	
4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมี (XRD และ XRF).....	59
4.3.1 วัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	59
4.3.2 วัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	61
4.3.3 วัตถุดิบที่ผสมกากตะกอนของ โรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	63
4.3.4 วัตถุดิบที่ผสมกากตะกอนจากอุตสาหกรรม โรงงานหลอมเหล็ก	65
4.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนัก.....	66

4.5 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ตา (Compressive Strength).....	68
4.5.1 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	69
4.5.2 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	70
4.5.3 วัสดุคืบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	71
4.5.4 วัสดุคืบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก.....	72
4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว (SEM)	73
4.6.1 เม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	73
4.6.2 เม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	76
4.6.3 เม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	80
4.6.4 เม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนโรงงานหลอมเหล็ก.....	83
4.7 ผลการทดสอบการชะละลาย (WET).....	85
4.7.1 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	86
4.7.2 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	87
4.7.3 ของวัสดุคืบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	88
4.7.4 วัสดุคืบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	90
รายการอ้างอิง	93
ภาคผนวก	96
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	128

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบที่สำคัญ	12
ตารางที่ 2.4 เวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จร้อยละ 80	15
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของน้ำเสียนอง โรงงานแฉวงจรมิตร	23
ตารางที่ 2.6 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ	24
ตารางที่ 2.7 ข้อมูลองค์ประกอบกากตะกอน โลหะหนักที่ใช้เป็นวัตถุดิบ	24
และเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากโรงงานชุบโลหะ	
ตารางที่ 2.8 ลักษณะผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์	25
ตารางที่ 2.9 ผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์	26
ตารางที่ 2.10 มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง	29
การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 ที่สกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) เทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) และมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311	
ตารางที่ 2.11 ค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ใช้ในต่างประเทศ	31
ตารางที่ 2.12 ปริมาณสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ของโลหะหนักที่อยู่ในวัตถุดิบ	32
แม่ปูนเม็ดปูนที่สุกแล้ว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	
ตารางที่ 2.13 ปริมาณของโลหะหนักของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด	33
ตารางที่ 2.14 ปริมาณของโลหะหนักของปูนยี่ห้อต่างๆ ตามท้องตลาด	33
ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง	35
ตารางที่ 3.2 ปริมาณ โลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง	36
ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์	40
ตารางที่ 3.4 ปริมาณซีเมนต์ ทราช และน้ำ สำหรับแบบหล่อก้อนมอร์ต้าจำนวน 6 ก้อน	43
ตารางที่ 3.5 กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ..	44
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบ	46
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบหลังจากแบ่งเป็นถุงละ 10 กิโลกรัม	48
ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ XRF ของหินเชล ดินเหนียว และผสมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน	49
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบที่ผสมหินเชลและดินเหนียว	50
ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักของวัตถุดิบ	51
ตารางที่ 4.6 ปริมาณ โลหะหนัก Cr:Cu:Ni ตามความเข้มข้นต่างๆในวัตถุดิบ	52

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะหนัก Cr:Pb:Zn ตามความเข้มข้นต่างๆในวัดดุจิบ	52
ตารางที่ 4.8 ปริมาณโลหะหนักจากกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม	52
อิเล็กทรอนิกส์ในวัดดุจิบ	
ตารางที่ 4.9 ปริมาณโลหะหนักกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็กในวัดดุจิบ	53
ตารางที่ 4.10 ปริมาณโลหะในกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	53
ตารางที่ 4.11 ปริมาณโลหะในกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก	53
ตารางที่ 4.12 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างควบคุม	54
ตารางที่ 4.13 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Cu:Ni.....	54
ตารางที่ 4.14 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Pb:Zn.....	55
ตารางที่ 4.15 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอน โรงงาน	55
อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	
ตารางที่ 4.16 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก	56
ตารางที่ 4.17 ผลวิเคราะห์การทดลองเผาแบบ Static	58
ตารางที่ 4.18 ผลวิเคราะห์มีเมตปูนของตัวอย่างควบคุม.....	59
ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบที่เป็นผลึกและ ปูนขาวอิสระของวัดดุจิบที่	60
ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)	
ตารางที่ 4.20 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัดดุจิบที่ผสม	61
Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้นต่างกัน	
ตารางที่ 4.21 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และปูนขาวอิสระของ	62
วัดดุจิบที่ผสม Cr:Pb:Zn (1:4:13)	
ตารางที่ 4.22 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัดดุจิบที่ผสม	63
Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้นต่างกัน	
ตารางที่ 4.23 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และปูนขาวอิสระของ	64
วัดดุจิบที่ผสมกากตะกอน โรงงานอิเล็กทรอนิกส์	
ตารางที่ 4.24 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัดดุจิบที่ผสมกากตะกอน	64
โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้นต่างกัน	
ตารางที่ 4.25 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปูนขาวอิสระของวัดดุจิบ	65
ที่ผสมกากตะกอน โรงงานเหล็ก	
ตารางที่ 4.26 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัดดุจิบที่ผสม กากตะกอน	66
โรงงานเหล็ก ที่ความเข้มข้นต่างกัน	
ตารางที่ 4.27 ปริมาณโลหะหนักในมีเมตปูนของตัวอย่างควบคุม.....	67
ตารางที่ 4.28 ปริมาณโลหะหนักในมีเมตปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	67

ตารางที่ 4.29 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	68
ตารางที่ 4.30 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์	68
ตารางที่ 4.31 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก.....	68
ตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก.....	69
Cr:Cu:Ni (1:1:1)	
ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก.....	70
Cr:Pb:Zn (1:4:13)	
ตารางที่ 4.34 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมกากตะกอน	71
จากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์	
ตารางที่ 4.35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมกากตะกอน	72
จากโรงงานหลอมเหล็ก	
ตารางที่ 4.36 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	74
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	
ตารางที่ 4.37 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	75
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	
ตารางที่ 4.38 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	76
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	
ตารางที่ 4.39 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	77
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	
ตารางที่ 4.40 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	78
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	
ตารางที่ 4.41 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	79
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	
ตารางที่ 4.42 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	80
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	
ตารางที่ 4.43 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	81
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	
ตารางที่ 4.44 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	82
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	
ตารางที่ 4.45 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานเหล็ก	83
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	

ตารางที่ 4.46 ร้อยละของธาตุในเม็ดยุบที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	84
ตารางที่ 4.47 ร้อยละของธาตุในเม็ดยุบที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	85
ตารางที่ 4.48 ผลทดสอบการชะละลายของตัวอย่างควบคุม	85
ตารางที่ 4.49 แสดงผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)	86
ตารางที่ 4.50 ผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)	87
ตารางที่ 4.51 ผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมกากตะกอน จากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์	88
ตารางที่ 4.52 ผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมกากตะกอน จากโรงงานหลอมเหล็ก	89

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปจำลองกระบวนการผลิตซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน).....	8
รูปที่ 2.2 รูปร่างลักษณะของ C_3S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม.....	10
รูปที่ 2.3 รูปร่างลักษณะของ C_2S ซึ่งมีเม็ดกลม.....	10
รูปที่ 2.4 รูปร่างลักษณะของ C_3A ซึ่งเป็นเหลี่ยมมุม.....	11
รูปที่ 2.5 รูปร่างลักษณะของ C_4AF	11
รูปที่ 2.6 ปฏิกริยาของแคลเซียมซิลิเกต.....	14
รูปที่ 3.1 เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน.....	37
รูปที่ 3.2 ท่อสแตนเลส.....	37
รูปที่ 3.3 เครื่องโม่ปูนซีเมนต์.....	38
รูปที่ 3.4 V-mix machine.....	38
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนผสม โลหะหนัก.....	38
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทดลอง.....	39
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ ตามมาตรฐาน US EPA SW-846 Method 3052.....	42
รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายยาตามมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม..... พ.ศ. 2548	43
รูปที่ 3.9 ลักษณะการกระทุ้งก้อนมอร์ต้า.....	44
รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ.....	47
รูปที่ 4.2 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Cu:Ni.....	54
รูปที่ 4.3 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Pb:Zn.....	55
รูปที่ 4.4 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอน โรงงาน..... อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	56
รูปที่ 4.5 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนจาก โรงงานหลอมเหล็ก.....	56
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการวางถ้วยและ thermocouple ในเตาเผา.....	57
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการวางถ้วยในเตาเผา.....	58
รูปที่ 4.8 Thermocouple บริเวณด้านข้างของช่องใส่วัตถุดิบ.....	58
รูปที่ 4.9 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Cu:Ni (1:1:1)..... ที่ความเข้มข้นต่างกัน	60
รูปที่ 4.10 กราฟปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)..... เทียบกับมาตรฐาน	61

รูปที่ 4.11 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัสดุคืบที่ผสม Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	62
ที่ความเข้มข้นต่างกัน	
รูปที่ 4.12 กราฟปูนขาวอิสระของวัสดุคืบที่ผสม โลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	62
เทียบกับมาตรฐาน	
รูปที่ 4.13 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัสดุคืบที่ผสมกากตะกอน.....	63
โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ความเข้มข้นต่างกัน	
รูปที่ 4.14 กราฟปูนขาวอิสระของวัสดุคืบที่ผสมกากตะกอนจาก โรงงาน	64
อิเล็กทรอนิกส์เทียบกับมาตรฐาน	
รูปที่ 4.15 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัสดุคืบที่ผสมกากตะกอน.....	68
โรงงานเหล็กที่ความเข้มข้นต่างกัน	
รูปที่ 4.16 กราฟปูนขาวอิสระของวัสดุคืบที่ผสมกากตะกอน โรงงานเหล็ก	66
เทียบกับมาตรฐาน	
รูปที่ 4.17 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ธาที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	69
รูปที่ 4.18 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ธาที่ผสม โลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	70
รูปที่ 4.19 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ธาที่ผสมกากตะกอนจาก โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ .	71
รูปที่ 4.20 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ธาที่ผสมกากตะกอนจาก โรงงานหลอมเหล็ก.....	72
รูปที่ 4.21 ลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)	73
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก	
รูปที่ 4.22 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)	74
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	
รูปที่ 4.23 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)	75
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	
รูปที่ 4.24 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	76
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	
รูปที่ 4.25 ลักษณะ โครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)	77
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก	
รูปที่ 4.26 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)	78
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	
รูปที่ 4.27 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)	78
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	
รูปที่ 4.28 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)	79
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	

รูปที่ 4.29 ลักษณะ โครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจาก โรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	80
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก	
รูปที่ 4.30 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจาก โรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	81
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	
รูปที่ 4.31 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจาก โรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	81
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	
รูปที่ 4.32 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจาก โรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	82
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	
รูปที่ 4.33 ลักษณะ โครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจาก โรงงานเหล็ก.....	83
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก	
รูปที่ 4.34 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจาก โรงงานเหล็ก.....	84
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1	
รูปที่ 4.35 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจาก โรงงานเหล็ก.....	84
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2	
รูปที่ 4.36 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจาก โรงงานเหล็ก.....	85
ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3	
รูปที่ 4.37 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1).....	86
รูปที่ 4.38 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสม โลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13).....	87
รูปที่ 4.39 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสมภาคตะกอนจาก โรงงานอิเล็กทรอนิกส์.....	88
รูปที่ 4.40 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสมภาคตะกอนจาก โรงงานหลอมเหล็ก.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

กากตะกอนที่มีโลหะหนักผสมอยู่จัดว่าเป็นของเสียอันตรายที่สามารถ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ถ้าจากระบบกำจัดของเสียที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากการกำจัดกากตะกอนของเสียที่มีโลหะหนักผสมอยู่นั้น จำเป็นต้องกำจัดให้ถูกต้องและเหมาะสมตามหลักสุขาภิบาล และด้วยเหตุผลนี้เอง ทำให้ผู้ประกอบการที่ก่อให้เกิดกากตะกอนเหล่านี้ ต้องเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมากในการกำจัดกากตะกอนโลหะหนัก

ในงานวิจัยนี้เล็งเห็นว่า การกำจัดกากตะกอน โลหะหนักนั้นสามารถนำไปเผาพร้อมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ จึงได้นำกระบวนการนี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ในการใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ วัตถุประสงค์หลักของการใช้ของเสียที่มีกากโลหะหนักเป็นวัตถุดิบในกระบวนการเผาร่วมกับปูนซีเมนต์เพื่อ เป็นการรักษาทรัพยากร เพิ่มคุณค่าทางเศรษฐศาสตร์ และการนำกลับมาใช้ใหม่ กล่าวคือ แทนที่โลหะหนักจะต้องถูกนำไปฝังกลบหรือนำไปบำบัดขั้นสุดท้าย ก็นำมาใช้เป็นวัตถุดิบร่วมกับกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ได้ ซึ่งเป็นการกำจัดกากตะกอนโลหะหนักพร้อมกับทำให้ลดการใช้วัตถุดิบไปด้วยในตัว ซึ่งโดยปกติในปูนซีเมนต์นั้นจะมีปริมาณของโลหะหนักอยู่แล้ว แต่มีในปริมาณที่น้อยมาก

การใช้กากตะกอน โลหะหนักนั้นจะต้องตรวจสอบสารประกอบของกากตะกอนนั้นก่อน เพราะกากตะกอน โลหะหนักนั้นมีสารประกอบมากมาย ซึ่งสารบางอย่างถ้ามีมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการเผาปูนซีเมนต์ได้ เช่นอาจต้องใช้เวลาในการเผามากขึ้น หรืออาจส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดหรือ โครงสร้างของคอนกรีตได้ เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาในเรื่องของปริมาณ โลหะหนักสูงสุดที่ปูนซีเมนต์สามารถรับได้ในการผสมกากตะกอนที่มีปริมาณ โลหะหนักผสมอยู่ แล้วไม่ส่งผลกระทบทั้งในเรื่อง โครงสร้างของปูนซีเมนต์ และเป็นอันตรายต่อมนุษย์เมื่อนำปูนซีเมนต์มาใช้ในงานต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาอัตราส่วนระหว่างปริมาณ โลหะหนักกับปูนซีเมนต์ และปริมาณสูงสุดของโลหะหนักที่สามารถเผาพร้อมได้ ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์โดยใช้เตาเผาแบบหมุนขนาดย่อย ส่วน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อด้านกายภาพ คุณสมบัติทางวิศวกรรมของผลิตภัณฑ์ และสิ่งแวดล้อม
- 1.2.2 ศึกษาผลของโลหะหนักที่มีต่อกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ได้จากการผสมอัตราส่วนของโลหะหนักต่างๆ ในกระบวนการเผาพร้อม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 งานวิจัยนี้จะใช้โลหะหนักที่จัดเตรียมตามอัตราส่วน เพื่อเปรียบเทียบกับการใช้กากตะกอนที่เป็นตัวอย่างจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม ในการเผาร่วมกับวัตถุดิบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อย ส่วน และจะทำการปรับอัตราส่วนของโลหะหนักตามลักษณะของกากตะกอน
- 1.3.2 ตัวอย่างทั้งหมดจะสังเคราะห์จากการใช้เตาเผาปูนซีเมนต์แบบหมุน (rotary kiln) ขนาดย่อย ส่วนขึ้นมาใช้ในการทดลอง
- 1.3.3 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้คือ X-ray diffraction spectrometer (XRD) X-ray fluorescence spectrometer (XRF) Scanning Electron Microscope (SEM) และ Inductively-coupled plasma spectrometer (ICP) ในการหาองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ทั้งก่อน และหลังการทดลอง การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าใช้วิธี ASTM C109/C 109M-05 และการทดสอบการชะละลายใช้วิธี WET ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบอัตราส่วน และปริมาณสูงสุดที่เหมาะสมของโลหะหนักที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อด้านกายภาพ คุณสมบัติทางวิศวกรรม ผลิตภัณฑ์ และสิ่งแวดล้อม ของปูนซีเมนต์
- 1.4.2 อาจนำไปสู่การจัดการกากของเสียอันตรายอย่างมีระบบ ด้วยการเผาพร้อมในการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเป็นการลดการกำจัดกากของเสียด้วยวิธีอื่นที่อาจไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการหรืออาจทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า

1.4.3 สามารถนำผลการทดลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการเผาากของเสี้ยนในเตาเผาปูนซีเมนต์
ขนาดจริง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

2.1.1 ความหมายของปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดเม็ดปูน ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่างๆ (หินปูน หรือ ดินปูนขาว กับ ดินเหนียว หรือ หินดาน) จนรวมตัวกันสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ แคลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงแต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ การทำปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกว่าไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิด ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะที่เริ่มแข็งตัว คำรับของชื่อปูนซีเมนต์ที่เรียกกันทางวิชาการว่า “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์” ได้มาจากการตั้งชื่อของนายโจเซฟ แอสปดิน โดยในปี ค.ศ. 1824 และได้ทำการจดทะเบียนลิขสิทธิ์ของวิธีการผลิตปูนซีเมนต์อย่างหนึ่ง ซึ่งได้จากการเผาส่วนผสมระหว่างหินปูนและดินเหนียว เมื่อนำมาบดจะได้ผงปูนซีเมนต์ หลังจากผสมรวมกับน้ำและแข็งตัวจะมีสีเหลืองเทา คล้ายกับหินในเมืองของเกาะปอร์ตแลนด์ ประเทศอังกฤษ จึงได้ตั้งชื่อว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปูนซีเมนต์ที่ผลิตในสมัยนั้นมีคุณภาพต่ำมาก ทั้งนี้เนื่องจากการเผาส่วนผสมดังกล่าวใช้ความร้อนต่ำ ซึ่งทำให้ปูนกับดินเหนียวยังรวมตัวกันไม่ดี

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เป็นวัสดุที่สำคัญที่สุดในการก่อสร้างทางวิศวกรรม เมื่อนำไปผสมรวมกับทรายและน้ำจะได้เป็นมอร์ตาร์ (Mortar) ซึ่งนำไปใช้เป็นปูนก่อสำหรับงานก่ออิฐหรือปูนฉาบสำหรับงานฉาบ เป็นต้น หากนำไปผสมรวมกับหิน กรวด ทราย และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้เป็นคอนกรีต ซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะมีความแข็งแรงและทนทานคล้ายหิน ตัวอย่างสิ่งก่อสร้างคอนกรีต ได้แก่ ฐานราก คอม่อ เขื่อน พื้น และถนน ซึ่งเมื่อเสริมด้วยเหล็กเส้นจะเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก สำหรับใช้ในงานพื้น หลังคา สะพาน อุโมงค์ และอื่นๆ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.2 กรรมวิธีในการผลิตปูนซีเมนต์

2.1.2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบที่สำคัญแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

(1) ประเภทที่ให้ธาตุแคลเซียมเป็นส่วนใหญ่ (Calcareous Materials) ซึ่งอยู่ในรูปของ CaCO_3 ได้แก่ หินปูน (Limestone) ดินสอพองหรือชอล์ก (Chalk) ดินปูนขาว (Marl)

(2) ประเภทที่ให้ออกไซด์ของธาตุซิลิกอน (SiO_2) และอลูมิเนียม (Al_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ (Argillaceous Materials) ได้แก่ หินดินดานหรือหินเชล (Shale) ดินค้ำหรือดินเหนียว (Clay) หินชนวน (Slate)

แต่ในบางครั้ง วัตถุดิบทั้งสองประเภทข้างต้นอาจมีปริมาณของธาตุที่ต้องการน้อยเกินไป หรือมีปริมาณธาตุอื่นเพิ่มเติมมากเกินไปที่จำเป็น เช่น เมื่อหินเชลหรือดินเหนียวที่ใช้มีปริมาณของเหล็กค้ำ จึงเพิ่มปริมาณแร่เหล็ก โดยการเติมสิลาแลง (Laterite) และเติมยิปซัม (Gypsum) เพื่อใช้เป็นสารหน่วงการก่อตัวโดยผสมกับเม็ดปูนจากเตาเผาในขั้นตอนผลิตปูนซีเมนต์ เป็นต้น (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

2.1.2.2 กรรมวิธีในการผลิต

กรรมวิธีในการผลิตมี 2 แบบ คือ แบบแห้ง (Dry Process) และ แบบเปียก (Wet Process) กล่าวคือ ในกระบวนการแบบแห้งนั้นจะทำวัตถุดิบทั้งหมดซึ่งได้แก่ หินปูน ดินดาน แร่เหล็ก ให้แห้งก่อนการบดและการผสม ส่วนในกระบวนการแบบเปียกนั้นวัตถุดิบซึ่งได้แก่ ดินสอพอง ดินเหนียว ได้รับการบดและการผสมเปียก

การเลือกกระบวนการผลิตจะต้องคำนึงถึงปริมาณที่มีอยู่ในวัตถุดิบ น้ำที่จะจ่ายให้โรงงาน ราคาของเชื้อเพลิง แหล่งกำลังไฟฟ้า วิธีเก็บฝุ่น ตลอดจนความสม่ำเสมอของวัตถุดิบก่อนที่จะป้อนเข้าสู่เตาเผา ถ้าวัตถุดิบที่มีเป็นหินซีเมนต์และหินปูนซึ่งแห้งตามธรรมชาติหรือมีความชื้นอยู่น้อยก็อาจทำให้แห้งก่อนโดยใช้ก๊าซร้อนที่ออกจากเตาเผา แล้วจึงนำไปบดและผสมกันในภาวะแห้งได้โดยมีราคาการผลิตต่ำซึ่งในลักษณะนี้กระบวนการผลิตแบบแห้งเสียค่าใช้จ่ายน้อย

อย่างไรก็ดีถ้าส่วนผสมหนึ่งของสารผสมอยู่ในภาวะเปียก ค่าใช้จ่ายอาจจะสูงขึ้นถ้าใช้กระบวนการแบบแห้งเพราะต้องทำวัตถุดิบให้แห้งก่อน กระบวนการแบบเปียกจึงเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่า ในกรณีนี้ กระบวนการแบบเปียกจะซับซ้อนน้อยกว่าและเหมาะสมกว่า แต่กระบวนการแบบแห้งสามารถควบคุมในเรื่องของการปรับปรุงคุณภาพและการเพิ่มชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากวัตถุดิบที่มีอยู่ได้ดีกว่ากระบวนการผลิตแบบเปียก เมื่อนำวัตถุดิบมาบดและผสมกันเรียบร้อยแล้ว ส่วนผสมนี้จะป้อนเข้าสู่ด้านบนของเตาเผา (Kiln) โดยส่วนใหญ่จะใช้เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ซึ่งเป็นเหล็กกล้าทรงกระบอกยาวประมาณ 70 ถึง 150 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 6 เมตร ด้านในบุด้วยอิฐทนไฟเพื่อฉนวนความร้อน หมุนรอบตัวในแนวเอียงอย่างช้าๆ ประมาณนาทีละ 3 รอบอุณหภูมิที่ใช้เผา

ประมาณ 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส เมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ผสมรวมกันและถูกเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ปฏิกิริยาทางเคมี เกิดการรวมตัวของออกไซด์ของธาตุต่างๆ และจับกันเป็นเม็ดเล็กๆ เรียกว่า ปูนเม็ด (Clinker) ถูกส่งออกมาข้างนอกทางด้านล่างของเตา ตารางที่ 2.1 แสดงถึงปริมาณของออกไซด์หลักและออกไซด์รองของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2543)

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
ปูนขาว (CaO)	60 – 67
ซิลิกา (SiO ₂)	17 – 25
อลูมินา (Al ₂ O ₃)	3 – 8
เหล็ก (Fe ₂ O ₃)	0.5 – 6
ออกไซด์รอง	
แมกนีเซียม (MgO)	0.1 – 5.5
โซเดียมและโพแทสเซียม (Na ₂ O + K ₂ O)	0.5 – 1.3
ไทเทเนียม (Ti ₂ O)	0.1 – 0.4
ฟอสฟอรัส (P ₂ O ₅)	0.1 – 0.2
ซัลเฟอร์ (SO ₃)	1 – 3

เมื่อเผาแล้วแล้วสีและรูปร่างจะบอกถึงความถูกต้องในการเผา ปูนที่เผาอย่างถูกต้องปูนเม็ดจะมีสีดำปนเขียวเหมือนแก้วใส เมื่อเย็นตัวแวววาวเป็นจุดๆ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มิลลิเมตร ส่วนปูนเม็ดที่ยังไม่ได้เผาจะมีสีดำเข้มหรือสีน้ำตาลเป็นหย่อมๆ ไม่เป็นมัน ปูนเม็ดที่เผาเกินพอดีจะมีสีน้ำตาลเข้มเป็นหย่อมๆ การเผาเกินพอดีไม่เสียหายแต่อย่างใด แต่ทำให้สิ้นเปลืองและเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบดเพราะปูนเม็ดที่เผาเกินพอดีจะมีความแข็งมาก

ปูนเม็ดที่ได้จากการเผาก็ร้อนมาก จะต้องได้รับการลดอุณหภูมิที่เหมาะสมก่อนนำไปบดปูนซีเมนต์ ทำได้โดยเป่าลมเข้าไปในถังลดความเย็น (Clinker Cooler) ซึ่งอาจจะเป็นแบบหมุน (Rotary Cooler) หรือแบบตะแกรง การลดอุณหภูมิมิมีผลต่อปูนเม็ด คือถ้าปูนเม็ดถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วจะบดง่าย และความแข็งแรงขึ้นภายใน 7 วันคิขึ้น แต่ถ้าถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ความแข็งแรงในระยะหลังจะสูงขึ้น แล้วจะถูกนำไปบดละเอียดในหม้อบดปูน (Grinding Mill) ในขั้นตอนนี้จะมีการใส่ชิปซัมเข้าไปด้วยหากมีปริมาณของชิปซัมอยู่น้อย โดยใส่ให้มีปริมาณชิปซัมผสมอยู่ประมาณ 5

เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ก่อตัวช้าลงเมื่อผสมกับน้ำ เพราะถ้าก่อตัวเร็วจะไม่สามารถนำไปเทในแบบได้ ปูนเม็ดที่บดละเอียดแล้วจะต้องผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้เกือบหมด ความละเอียดของปูนซีเมนต์มีผลต่อคุณภาพของปูนด้วยคือ ปูนซีเมนต์ที่ละเอียดจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ก่อตัวและแข็งตัวให้กำลังรับแรงได้เร็วกว่า ส่วนปูนซีเมนต์ที่หยาบอาจทำให้เกิดการซึมหรือคายน้ำได้มากกว่าปูนซีเมนต์ที่ละเอียด หลังจากบดแล้วปูนซีเมนต์จะถูกบีบไปเก็บไว้ในถังเก็บปูนซีเมนต์ (Bulk Storage) ซึ่งเป็นถังทรงกระบอกใหญ่ตั้ง มีผนังปกคลุมมิดชิดกันความชื้น เพื่อนำไปบรรจุใส่ถุงและจำหน่ายต่อไป นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ซีเมนต์อื่นๆที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ คือ ผุ่นปูน (Cement Kiln Dust หรือ CKD) ซึ่งเป็นอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาพร้อมกับก๊าซขณะเกิดการเผาไหม้ ซึ่งถูกดักจับโดยอุปกรณ์ดักฝุ่น

2.1.2.3 กรรมวิธีผลิตของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

โรงงานผลิตปูนซีเมนต์ของบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตั้งอยู่ที่อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี เตาเผามี 6 เตาในโรงงานมีกำลังการผลิตปูนเม็ดรวม 38500 ตันต่อวัน กระบวนการผลิตนั้นเริ่มต้นจากการระเบิดหินปูน (Limestone) และหินเชล (Shale) จากเหมืองหินในเขตพื้นที่สัมปทาน ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองชนิดนี้จะถูกนำมาเข้าเครื่องย่อยขนาดให้เป็นชิ้นเล็กๆขนาดต่ำกว่า 80 มิลลิเมตร ในการผลิตปูนเม็ด 1 ตัน ต้องใช้หินปูนประมาณ 1.6 ตัน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนประมาณร้อยละ 80 ของวัตถุดิบ หลังจากผ่านขั้นตอนของการย่อยขนาด หินที่ได้จะถูกนำมาผสมรวมกับวัตถุดิบพื้นฐานอื่นๆ เช่น แร่เหล็ก (Iron Ore) โดยจะถูกนำมาบดผสมรวมกันจนละเอียดเป็นผงฝุ่นในหม้อบดขนาดใหญ่ (Grinding Mill) จากนั้นทั้งหมดก็จะถูกผสมให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกันในไซโลผสมฝุ่นวัตถุดิบ (Homogenizing Silo) ก่อนส่งเข้าไปยังหอบอบความร้อน (Preheater Tower) และไหลเข้าสู่เตาเผา หลังจากผ่านขั้นตอนของเตาเผาแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าปูนเม็ด ซึ่งจะถูกส่งผ่านไปยังห้องลดความร้อนและลำเลียงไปเก็บไว้ในไซโล สำหรับในกระบวนการขั้นสุดท้ายนั้น ปูนเม็ดจะถูกนำไปบดรวมกับขี้ปซัมและหินปูนในหม้อบดปูนซีเมนต์เพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ผงตามที่ต้องการ จากนั้นจะถูกส่งไปเก็บยังไซโลเพื่อรอการบรรจุและส่งไปจำหน่ายต่อไป (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 สารประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.1.3.1 สารประกอบหลัก

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ ซึ่งได้แก่ สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในรูปผลึกละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 อย่างในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หลังจากการเผาแล้วได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) และ เทตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium aluminoferrite) ตารางที่ 2.2 ซึ่งได้ชื่อของสารประกอบเหล่านี้ตามอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ โดยใช้ชื่อของออกไซด์ของธาตุใดด้วยอักษรของธาตุนั้นเพียงตัวเดียวกล่าวคือ CaO ย่อเหลือ C SiO₂ ย่อเหลือ S Al₂O₃ ย่อเหลือ A และ Fe₂O₃ ย่อเหลือ F

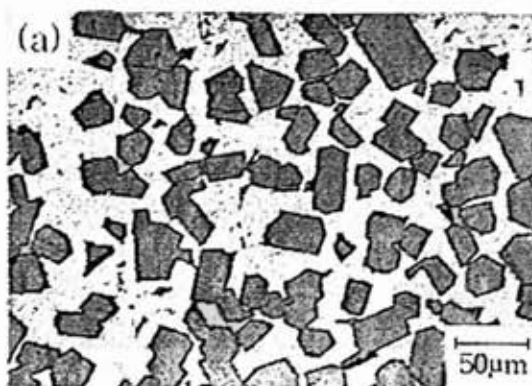
ตารางที่ 2.2 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (วินิต ช่อวิเชียร. 2544)

ชื่อของสารประกอบ	ตัวประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียมซิลิเกต	3 CaO.SiO ₂	C ₃ S
ไดแคลเซียมซิลิเกต	2 CaO.SiO ₂	C ₂ S
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	3 CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
เทตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์	4 CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

สารประกอบในปูนซีเมนต์มีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์เมื่อนำไปผสมกับน้ำเพื่อทำมอร์ต้าหรือคอนกรีต เช่น อัตราการทำปฏิกิริยากับน้ำ การให้ร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน กำลังรับแรงอัดในระยะแรก (Early Strength) และ ระยะหลัง (Ultimate Strength) ความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต เป็นต้น

(1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S)

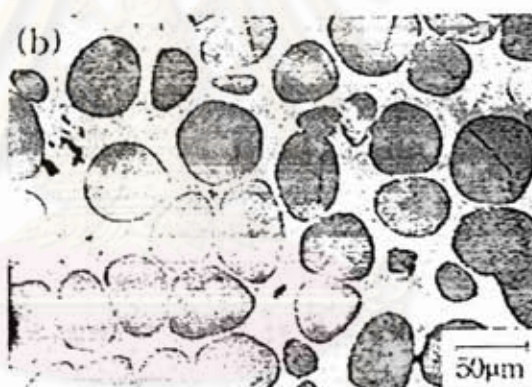
ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) เป็นสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดได้เร็ว (ประมาณ 14 วันหลังการผสม) มีการทำปฏิกิริยากับน้ำปานกลาง ก่อตัวภายในไม่กี่ชั่วโมง (2 ถึง 3 ชั่วโมง) คุณสมบัติของ C₃S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ในการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อนปานกลาง 120 แคลอรีต่อกรัม กำลังรับแรงอัดของ C₃S ถูกกระทบโดยปริมาณชิปซัม ปริมาณ C₃S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 35 ถึง 55



รูปที่ 2.2 รูปร่างลักษณะของ C_2S ซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยม

(2) ไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

ไคแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ทำให้เกิดกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในระยะหลัง (ตั้งแต่ 14 ถึง 28 วันและเรื่อยไปหลังเมื่อได้รับการบ่มชื้น) ทำปฏิกิริยากับน้ำก่อนข้างช้าให้ความร้อนน้อยโดยปล่อยความร้อน 60 แคลอรีต่อกรัม เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีความหนาแน่นสูงต่อการกักความร้อนของซัลเฟต โดยปริมาณของ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณร้อยละ 15 ถึง 35



รูปที่ 2.3 รูปร่างลักษณะของ C_2S ซึ่งเม็ดกลม

(3) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

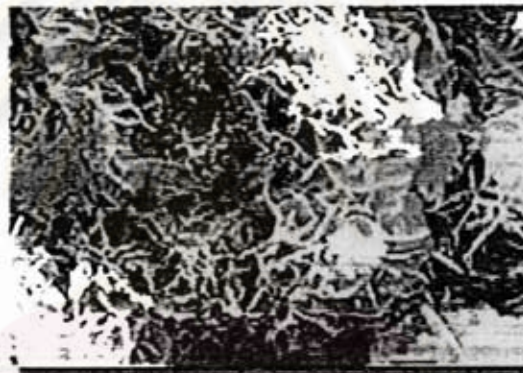
ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ทำให้เกิดกำลังรับแรงได้เร็วมากในระยะแรก (ประมาณ 1 วันหลังจากการผสม) เพราะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อตัวและแข็งตัวเร็ว ให้ความร้อนมากประมาณ 210 แคลอรีต่อกรัม เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน แต่ไม่ช่วยให้มีกำลังรับแรงอัดในระยะหลัง ทำให้เกิดความไม่คงตัว (Unsoundness) และไม่ทนต่อการกักความร้อนของซัลเฟต ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณร้อยละ 7 ถึง 15



รูปที่ 2.4 รูปร่างลักษณะของ C_3A ซึ่งเป็นแท่ง

(4) เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF)

เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) ไม่ค่อยมีส่วนในการพัฒนากำลังรับแรงอัดทั้งในระยะแรกและระยะหลัง เนื่องจากทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก ให้ความร้อนน้อย ประมาณ 100 แคลอรีต่อกรัม เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน สารประกอบนี้ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา - ดำ



รูปที่ 2.5 รูปร่างลักษณะของ C_4AF

จะเห็นได้ว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีสารประกอบหลักคือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) รวมกันประมาณร้อยละ 70 ถึงร้อยละ 80 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งสารประกอบทั้งสองชนิดนี้เป็นตัวควบคุมความแข็งแรงของมอร์ต้าหรือคอนกรีต สารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับน้ำคือ สารเชื่อมประสานแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ CSH) ซึ่งเป็น เป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะกับวัสดุผสม (กฤษณ์ จารุทะวาย, 2545) และคุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดตารางที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติด้านต่างๆของสารประกอบที่สำคัญ

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของสารประกอบที่สำคัญ (วินิต ช่อวิเชียร, 2544)

คุณสมบัติด้านต่างๆ	พฤติกรรมของสารประกอบแต่ละตัว			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
อัตราการทำปฏิกิริยา	ปานกลาง (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันที	รวดเร็ว(นาที)
ความร้อนของปฏิกิริยา (แคลอรีต่อกรัม)	120	60	210	100
การพัฒนากำลังรับแรงอัด				
- ระยะแรก (Early)	เร็ว	ช้า	เร็วมาก	เร็วมาก
- ระยะหลัง (Ultimate)	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความทนทานต่อการกัดกร่อน	ปานกลาง	สูง	น้อย	-

2.1.3.2 สารประกอบรอง

(1) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ส่วนใหญ่จะมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO₃) ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้แมกนีเซียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ แมกนีเซียมออกไซด์ บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันปริมาณจะเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดความไม่คงตัว เกิดการแตกร้าวเสียหาย หากมีอยู่ในปูนซีเมนต์มากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

(2) ปูนขาวอิสระหรือ Free Lime (CaO)

ปูนขาวอิสระเกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ

1. เมื่อวัตถุดิบมีปูนขาวมากเกินไปทำให้ทำปฏิกิริยากับ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ ได้ ไม่หมด

2. เมื่อปริมาณของปูนขาวมีไม่มากแต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆ ไม่สมบูรณ์

โดยปูนขาวอิสระนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจากปูนขาว หากมีอยู่เกินกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

(3) ยิปซัม (CaSO₄·2H₂O)

ทำให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติก่อตัวและแข็งตัวช้าลง หากมีอยู่จะทำให้เกิดความไม่คงตัว และทำให้รับกำลังแรงน้อยลง ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับอัลคาไลท์ออกไซด์ ได้แก่ Na₂O และ K₂O ปริมาณ C₃A และความละเอียดของปูน

(4) อัลคาไลออกไซด์ (Na_2O และ K_2O)

โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และ โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) มีคุณสมบัติเป็นด่าง (Alkalis) ทำให้เพิ่มกำลังอัดในระยะแรก แต่กำลังอัดในระยะหลังลดลง ถ้าผสมใช้กับวัสดุผสมที่ทำปฏิกิริยากับต่าง อาจทำให้เกิดการขยายตัวในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต เกิดการแตกร้าวเสียหายได้ นอกจากนี้ยังทำให้ปูนซีเมนต์ที่บรรจุอยู่ในถุง จับตัวกันเป็นก้อนเร็วขึ้น

จะเห็นได้ว่าสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นจะมี C_3S และ C_2S รวมกันมีปริมาณมากถึงประมาณ 70 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณของสารประกอบทั้งหมด สารประกอบทั้งสองเป็นตัวควบคุมให้มอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดทั้งในระยะแรก และระยะหลัง หากต้องการให้มีกำลังรับแรงอัดเร็วในระยะแรก จะต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3S ผสมอยู่มาก ซึ่งปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะมากด้วย ทำนองเดียวกันหากต้องการให้มีการพัฒนา กำลังรับแรงอัดในเวลาต่อมา ก็ต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_2S ผสมอยู่มากเช่นกัน ส่วนถ้าต้องการให้คอนกรีต มีความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตที่มีในดินหรือน้ำ ก็ต้องใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ผสมอยู่น้อย

2.1.4 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือ ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ เมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากน้ำไปทำปฏิกิริยากับ องค์ประกอบซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ

(1) อาศัยสารละลาย ซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออนต่างๆ ในสารละลายและ ไอออนนี้จะผสมกันทำให้เกิดสารประกอบใหม่

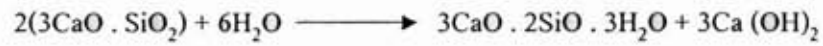
(2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง (Solid State Reaction) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของแข็งโดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลาย

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยช่วงแรกจะอาศัยสารละลาย และในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไปนี้ ทำให้แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้จะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

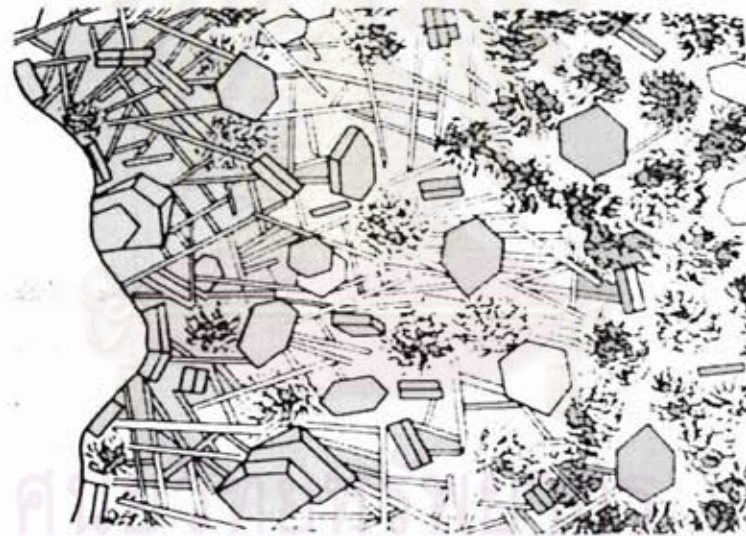
2.1.4.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 และสมการการเกิดปฏิกิริยาดังนี้



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

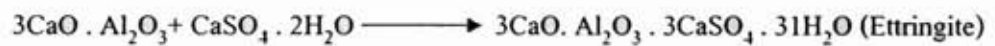
$Ca(OH)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ซีเมนต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมาก คือมีพีเอชประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (ชัชวาล เศรษฐบุตร์, 2543)

2.1.4.2 ปฏิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C₃A)

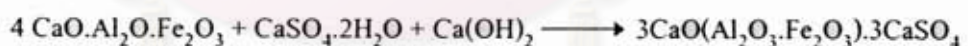
ปฏิริยาไฮเดรชันของ C₃A จะเกิดขึ้นทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม (CaSO₄·2H₂O) เข้าไปในกระบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิริยากับ C₃A เกิดชั้นของเอททริงไกต์ (Ettringite หรือ AFt) บนผิวของอนุภาค C₃A ดังสมการ



ชั้นของเอททริงไกต์ ก่อให้เกิดการหน่วงตัวของ C₃A และทำให้เกิดการก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิริยาไฮเดรชันของ C₃S แล C₂S เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของเอททริงไกต์ไม่ได้หยุดปฏิริยาไฮเดรชันของ C₃A กล่าวคือ เมื่อเกิดเอททริงไกต์จะเกิดแรงดันที่มาจาก การเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้เกิดชั้นของเอททริงไกต์แตกออกและเกิดปฏิริยาไฮเดรชันของ C₃A แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิดเอททริงไกต์ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ชั้นคอนจะเป็นอย่างนี้ไปจนกระทั่งไอออนของซัลเฟต (Sulphate Ions) มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิดเอททริงไกต์ จะเกิดปฏิริยาไฮเดรชันของ C₃A โดยเปลี่ยนเอททริงไกต์ไปเป็น โมโนซัลเฟต (Monosulphate หรือ AF_m)

2.1.4.3 ปฏิริยาไฮเดรชันของเตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C₄AF)

ปฏิริยาไฮเดรชันของ C₄AF นี้จะเกิดขึ้นในช่วงต้นโดย C₄AF จะทำปฏิริยากับยิปซัมและแคลเซียมไดออกไซด์ ซึ่งก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของซัลโฟลูมิเนต (Sulphoaluminate) และซัลโฟเฟอร์ไรท์ (Sulphoferrite) ดังสมการ



ตารางที่ 2.4 เวลาที่ทำให้ปฏิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก สำเร็จร้อยละ 80 (ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2543)

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C ₃ S	10
C ₂ S	100
C ₃ A	6
C ₄ AF	50

2.1.5 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

จากการศึกษาภาพถ่ายจาก SEM ที่อายุของซีเมนต์เพสต์ 7 28 90 วัน ที่อายุ 7 วัน พบว่า โครงสร้างระดับจุลภาคของซีเมนต์เพสต์มีช่องว่างหรือโพรงมาก พบเอททริงไคด์มีลักษณะเป็นเข็มยาว เกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายเข้าไปในช่องว่าง ที่อายุ 28 วัน ผลึกผลไฮดรอกซิลประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ซัลโฟเฟอร์ไรด์ และส่วนประกอบย่อยอื่นอีกไม่มาก จะขยายเข้าไปในโพรงหรือช่องว่างมากขึ้นทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความแน่นขึ้น โดยเฉพาะที่อายุ 90 วัน ซีเมนต์เพสต์จะมีโครงสร้างแน่นยิ่งขึ้น นอกจากนี้ในตัวซีเมนต์เพสต์ยังประกอบไปด้วยเม็ดปูนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาอีกด้วย

2.1.5.1 แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์

CSH มีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์มากที่สุด โดยจะเกิดขึ้นของ CSH ขยายออกจากเม็ดปูนเข้าสู่ช่องว่างและเกิดภายใต้ผิวเดิมของเม็ดปูนและขยายเข้าสู่ภายในเม็ดปูน เมื่อเกิดปริมาณมากและเชื่อมโยงถึงกันก็จะสามารถรับกำลังได้ CSH มีอยู่ถึงปริมาณร้อยละ 50 ถึง 70 โดยปริมาตร อยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆ มีขนาดประมาณเท่ากับสารแขวนลอย (เล็กกว่า 1 ไมโครเมตรทุกมิติ) จากการถ่ายภาพด้วย SEM พบว่า CSH เป็นผลึกที่หยาบมาก อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิเกตใน CSH ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และปริมาณน้ำที่ใช้ปฏิกิริยา สัญลักษณ์ทางเคมี $C_3S_2H_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยเท่านั้น

2.1.5.2 แคลเซียมไฮดรอกไซด์

ซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วย CH ปริมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตร เป็นผลึกที่มีรูปร่างหลายแบบ มีทั้งผลึกเล็กที่มีขนาดด้านเท่า ผลึกใหญ่ที่มีลักษณะเป็นแผ่น ผลึกบางยาว และผลึกที่มีรูปร่างระหว่งที่กล่าวมาทั้งหมด เมื่อสารละลายมีความเข้มข้นพอ CH จะตกผลึกซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซิลอย่างรวดเร็วยีกครั้งหนึ่ง และหลังจากนี้จะเพิ่มจำนวนและขยายตัวเข้าสู่โพรงอากาศ CH จะขยายตัวเข้าสู่ช่องว่างเท่านั้น และจะหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ CH เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลงเนื่องจากเป็นสารที่ละลายได้และถูกชะล้างออกมาได้ง่าย นอกจากนี้การให้กำลังของ CH ยังค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ CSH

2.1.5.3 แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต

แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตและแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตมีอยู่ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยที่แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือเอททริงไคด์เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายตัวเข้าไปในช่องว่าง เมื่อไม่มีช่องว่างแล้วเอททริงไคด์จะพยายามดันส่วนที่ล้อมรอบอยู่ออก ถ้าเกิดเอททริงไคด์คอนซีเมนต์เพสต์ยังเหลวอยู่จะไม่เป็นปัญหา แต่ถ้าเมื่อเกิดซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วจะทำให้เกิดแรงดันและทำให้ซีเมนต์เพสต์และแตกร้าวได้ เมื่ออายุนองของซัลเฟตหมดเอททริงไคด์จะทำปฏิกิริยาและเปลี่ยนเป็นแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตที่มีลักษณะเป็นแผ่น

2.1.6 คุณสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

คอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ต้องมีกำลังรับแรงตามต้องการ มีเนื้อแน่น สมำเสมอ ทึบน้ำ และทนทานต่อลมฟ้าอากาศ การกัดกร่อนและการทำลายอื่นๆ ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรหรือหดตัวมากเกินไปเมื่อถูกความร้อน-เย็นหรือความเปียก-แห้งสลับกัน ในบางครั้งอาจต้องการให้คอนกรีตทนทานต่อไฟและต่อสารเคมี หรือให้ต้องการให้มีน้ำหนักเบา มีผิวเรียบเป็นพิเศษ หรือให้มีผิวพรุน

2.1.6.1 กำลังต้านทานของคอนกรีต (Strength of Concrete)

คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดที่ต้องการของคอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว คือ กำลังต้านทานแรงอัด เนื่องจากพบว่า กำลังต้านทานหรือรับแรงแบบอื่นของคอนกรีต เช่น กำลังต้านทานแรงดึง กำลังต้านทานแรงดัด กำลังต้านทานแรงเฉือนและแรงยึดเหนี่ยว หรือแม้แต่ความทนทานและการเปลี่ยนแปลงปริมาตรล้วนเป็นสัดส่วนกับกำลังต้านทานแรงอัดขอ คอนกรีต นั่นคือถ้าคอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดสูง กำลังต้านทานแรงอย่างอื่นหรือความทนทานก็จะสูงตามไปด้วย

กำลังต้านทานของคอนกรีต จะได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตตัวอย่างตามมาตรฐานการทดสอบนั้นๆ กำลังต้านทานของคอนกรีตที่ได้จากการทดสอบอาจมีค่าแตกต่างกันมาก แม้ว่าแท่งคอนกรีตตัวอย่างจะได้นมาจากวิธีการและส่วนผสมเดียวกัน สาเหตุเกิดจากการเรียงตัวของวัสดุผสมในเนื้องานคอนกรีตไม่มีความสม่ำเสมอ ถ้าที่จะนำไปใช้จะเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบครั้งหนึ่ง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของก้อนมอร์ต้า ในการวัดกำลังต้านทานแรงอัด

2.1.6.2 ความแข็งแรง (Strength)

ความแข็งแรงเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของปูนซีเมนต์ ซึ่งบ่งชี้ว่าปูนซีเมนต์ที่จะนำไปใช้ มีคุณภาพดีหรือไม่ ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ไม่สามารถใช้คาดหมายถึงกำลังต้านทานของคอนกรีต ทั้งนี้เพราะกำลังต้านทานของคอนกรีต ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นอีกมากมาย ความแข็งแรงของปูนซีเมนต์เกิดจากการยึดเกาะกันของซีเมนต์เฟสส์ ซึ่งขึ้นกับปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์และความละเอียดของผงปูนซีเมนต์

การทดสอบความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ ใช้แท่งมอร์ต้าที่ทำขึ้นจากส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์กับทรายมาตรฐาน การทดสอบมีทั้งการทดสอบหาความต้านทานต่อแรงอัดและแรงดึง ในงานวิจัยนี้จะทดสอบเฉพาะกำลังต้านทานแรงอัด

ทรายมาตรฐาน เป็นทรายธรรมชาติที่ได้จากเมืองอ็อคตาว่า รัฐอิลลินอยส์ (Ottawa, Illinois) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นแร่ควอร์ตท์เกือบทั้งหมด มีสีชาวล้ำน้ำตาลทราย ขนาดของเม็ดทรายสม่ำเสมอประมาณ 1 มิลลิเมตร ที่สามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 20 และค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 30

การทดสอบความต้านทานต่อแรงอัด (Compressive Strength) ตามมาตรฐานอเมริกัน ได้จากการใช้แท่งลูกบาศก์ขนาด 2 นิ้วของมอร์ต้า ที่ประกอบด้วยซีเมนต์ 1 ส่วนกับ ทรายมาตรฐาน ดังกล่าวข้างต้น 2.75 ส่วน โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมได้จากการทดสอบหาการไหลตัวโดยใช้โต๊ะการไหล (Flow Table) มาตรฐาน และแบบหล่อตัวอย่างรูปกรวยมาตรฐาน สูง 2 นิ้ว ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางด้านล่าง 4 นิ้ว ด้านบน 2.75 นิ้ว ที่บรรจุอร์ตดา 2 ชั้น แต่ละชั้นกระทั่ง 20 ครั้ง เมื่อยกแท่นของโต๊ะการไหลขึ้นสูงครึ่งนิ้วและปล่อยให้ตกกระแทกลง 25 ครั้ง ภายใน 15 วินาที ถ้ามอร์ตดามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไหลแต่ออกไปจากเดิม 100 – 115 % แสดงว่าปริมาณน้ำที่ใช้อยู่ในช่วงที่ใช้ได้คือทำให้ส่วนผสมอยู่ ณ สภาวะเหลวปั้นได้ (plastic consistency) พบว่าปริมาณที่ใช้ทดลองนี้ ปกติเริ่มใช้ตั้งแต่ 47 – 49 % โดยน้ำหนักของซีเมนต์ เมื่อได้รับปริมาณน้ำที่เหมาะสม ก็ทำการผสมอร์ตดาแล้วหล่อแท่งลูกบาศก์ หลังจากบ่มตามมาตรฐานกำหนดก็นำมาทดสอบเมื่อลูกปูนมีอายุ 1 3 7 และ 28 วัน

2.1.6.3 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)

เป็นการตรวจสอบคุณภาพของปูนซีเมนต์ที่เก็บรักษาไว้ ว่ายังใช้ได้หรือไม่ ทำได้โดยเผาปูนซีเมนต์จำนวนหนึ่งที่ทราบน้ำหนักแน่นอนที่อุณหภูมิประมาณ 900 – 1000 องศาเซลเซียส จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ จากนั้นก็คำนวณหาน้ำหนักที่หายไป ตามปกติการสูญเสียน้ำหนักไม่ควรเกินกว่า 3 % ถ้ามีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่านี้แสดงว่า ปูนซีเมนต์บางส่วนได้ทำปฏิกิริยากับน้ำไปก่อนแล้ว ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเก็บรักษาปูนซีเมนต์ไม่ดีพอทำให้ปูนซีเมนต์เสื่อมคุณภาพ

2.1.7 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมาคมทดสอบวัสดุอเมริกัน (ASTM C 150) และสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (ม.อ.ก. 15) แบ่งปูนซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทคือ

ประเภทที่หนึ่ง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) สำหรับใช้ทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการความพิเศษกว่าธรรมดา และสำหรับใช้ในงานก่อสร้างตามปกติทั่วไป ที่ไม่อยู่ในภาวะอากาศรุนแรง หรือที่มีอันตรายจากซัลเฟตเป็นพิเศษ หรือความร้อนที่เกิดจากการรวมตัวกับน้ำจะไม่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงขั้นอันตรายที่คอนกรีตจะแตกร้าวเสียหายได้

ประเภทที่สอง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่เกิดความร้อนและทนซัลเฟตได้ปานกลาง เช่น งานสร้างเขื่อนคอนกรีต กำแพงกันดิน หล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ เป็นต้น ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง

ประเภทที่สาม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งแรงเร็ว (High-early Strength Portland Cement) หรือที่เรียกว่าซูเปอร์ซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ให้กำลังรับแรงอัดสูงในระยะแรก เร็วกว่าและมีเนื้อเป็นผงละเอียดปูนซีเมนต์ประเภทที่หนึ่ง ผลิตโดยเพิ่มลดสัดส่วนผสม (เพิ่ม C_3S และลด C_2S) หรือโดยการเติมสารอื่น บดให้ละเอียดมากขึ้น หรือโดยการเผาให้ดียิ่งขึ้น มีประโยชน์สำหรับทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือรีบอบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต ถนน พื้นและคาน เป็นต้น

และยังเหมาะกับการทำคอนกรีตในอากาศหนาว คอนกรีตที่หล่อด้วยปูนประเภทนี้เพียง 3 วัน จะมีกำลังเท่ากับคอนกรีตประเภทที่หนึ่งที่หล่อได้แล้ว 28 วัน

ประเภทที่สี่ ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low-Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนต่ำสุด อัตราการเกิดกำลังของคอนกรีตเป็นไปอย่างช้าๆ ใช้มากในการก่อสร้างคอนกรีตหนา เช่น เขื่อน เนื่องจากให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นขณะก่อตัวและแข็งตัว

ประเภทที่ห้า ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตสูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ชนิดต้านซัลเฟตได้สูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ (มี C_3A ต่ำสุด) ใช้สำหรับโครงสร้างที่อยู่ในที่ๆมีการกระทำของซัลเฟตรุนแรง เช่น น้ำที่มีดิน หรือด่าง (Alkaline) สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีระยะเวลาแข็งตัวช้ากว่าประเภทที่หนึ่ง

2.2 กากของเสียอุตสาหกรรม (Industrial waste)

2.2.1 ความหมายของกากของเสียอุตสาหกรรม

กากของเสียอุตสาหกรรม หมายถึง ของเหลือทิ้งจากการผลิตหรือสิ่งของที่เกี่ยวข้องสภาพจนใช้การไม่ได้แล้ว หรือในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมไม่ต้องการใช้อีกต่อไป ซึ่งกากของเสียดังกล่าวยังมีคุณสมบัติหรือความเข้มข้นในระดับที่สามารถก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม โดยทั่วไปกากของเสียอุตสาหกรรม แบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

(1) กากของเสียอันตราย (Hazardous Waste) คือ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบหรือปนเปื้อนสารอันตราย หรือมีคุณสมบัติที่เป็นอันตรายที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (พ.ศ.2548) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารไวไฟ สารกัดกร่อน สารที่เกิดปฏิกิริยาได้ง่าย สารพิษ สิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่มีองค์ประกอบของสิ่งเจือปน เมื่อนำมาหาค่าความเข้มข้นทั้งหมดของสิ่งเจือปน พบว่ามีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตราย ในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อหนึ่งกิโลกรัมของสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว (mg/kg; wet weight) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Total Threshold Limit Concentration (TTLIC) ที่กำหนดไว้ และสิ่งปฏิภูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้วที่เมื่อนำมาสกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์อันตรายและสารอินทรีย์อันตรายในหน่วยมิลลิกรัมของสารต่อลิตรของน้ำสกัด (mg/L) เท่ากับหรือมากกว่าค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

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

2.2.2 การจัดการกากของเสียอุตสาหกรรม

การเพิ่มขึ้นของกากของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณมากขึ้น จึงมีความจำเป็นในการจัดการกับของเสียเหล่านั้นอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ในการจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งการบำบัดของเสีย เช่น การทำเสถียร คงรูป การทำให้เป็นกลาง กระบวนการทำให้เป็นก้อนแข็งและการนำเอาของเสียมาใช้ประโยชน์ใหม่ (Reutilization) เป็นวิธีการหนึ่ง ซึ่งจะช่วยลดปริมาณของเสียที่จะต้องนำไปกำจัด (Treatment) ได้ นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีแหล่งจัดการกากของเสียอุตสาหกรรมหลายแห่งและสามารถส่งของเสียไปกำจัดได้ เช่น ศูนย์บริการกำจัดกาก แขวงแสมดำ เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร หลุมฝังกลบนิรภัยในจังหวัดราชบุรี ศูนย์บริการกำจัดกาก นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จ.ระยอง บริษัทบริหารและพัฒนาเพื่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม จำกัด (General Environmental Conversation Co., Ltd.) หรือ GENCO เต่าเผาเขตนิกมอุตสาหกรรมบางปู จังหวัดสมุทรปราการ นอกจากนี้ยังเกิดการพัฒนากากจัดการของเสียอันตรายในระดับสากล โดยที่ประเทศไทยให้สัตยาบัน (Ratification) เป็นภาคีสมาชิกอนุสัญญาบาเซล เมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ.2540 และอนุสัญญาฯ มีผลบังคับใช้กับประเทศไทยตั้งแต่วันที่ 22 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2541 มติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2540 อนุสัญญาบาเซล ว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายข้ามแดนของของเสียอันตรายและการกำจัด (Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal) เพื่อกำหนดข้อตกลงระหว่างประเทศในการควบคุมการนำเข้า การส่งออก การนำผ่าน พร้อมทั้งการจัดการของเสียอันตรายให้มีความปลอดภัย ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมอีกทั้งเป็นการป้องกันการขนส่งที่ผิดกฎหมาย ซึ่งสาระสำคัญของอนุสัญญาบาเซล ได้แบ่งบัญชีรายชื่อของเสียเป็น 2 กลุ่ม คือ

(1) List A เป็นของเสียที่ควบคุมมีประมาณ 59 ชนิด ได้แก่

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

(2) List B เป็นของเสียไม่อันตราย เช่น เศษแก้ว ทองแดง กระดาษ ชิ้นส่วน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น ซึ่งเป็นของเสียไม่อันตรายนั้นได้รับการยกเว้นให้มีการเคลื่อนย้ายเพื่อนำกลับไปใช้ประโยชน์หรือใช้ใหม่ได้

อนุสัญญาบาเซลไม่ได้เป็นเพียงมาตรการด้านกฎหมายเท่านั้น แต่ยังเป็นเครื่องมือและกลไกที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบการจัดการของเสียอันตรายของประเทศภาคสมาชิกให้อยู่ในระดับสากล และควบคุมการค้าขายกากของเสียอันตรายให้เป็นระบบมากขึ้น และช่วยลดความเสี่ยงต่อสุขภาพอนามัยและสิ่งแวดล้อมจากของเสียอันตรายอีกด้วย (สำนักสนธิสัญญาและยุทธศาสตร์, 2548)

2.2.3 การนำกากของเสียอุตสาหกรรมใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ในสภาวะปัจจุบัน กระแสการตื่นตัวทางด้านสิ่งแวดล้อมของโลก ได้ถูกนำมาพิจารณาเป็นประเด็นสำคัญในการกำหนดแนวทางในการพัฒนาประเทศกันอย่างกว้างขวาง ทำอย่างไรในการที่จะพัฒนาอุตสาหกรรม ให้ควบคู่กับการดูแลรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม ตามหลักการในการพัฒนาอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน โครงการในการรักษาสภาพแวดล้อมจึงถูกนำเข้ามาใช้ในวงการอุตสาหกรรมกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมผลิตปูนซีเมนต์การนำกากของเสียที่สามารถเป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนได้มาเผาไหม้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันมานานกว่า 20 ปีแล้ว (Achtembosch และคณะ, 2003) กากของเสียจากอุตสาหกรรมหลายชนิดที่มีความสามารถในการเผาไหม้ได้ดีและให้พลังงานสูง ทำให้มีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนได้ นอกจากเป็นการลดต้นทุนในด้านการผลิต อีกทั้งยังสามารถกำจัดของเสียได้จากการนำมาเผาไหม้ในเตาเผาปูนซีเมนต์

2.2.4 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตแผงวงจร

แผงวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Boards) คือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อองค์ประกอบต่างๆ บนแผ่น thin fiber epoxy แล้วจึงสร้างเส้นเชื่อมวงจรระหว่างองค์ประกอบต่างๆ แผงวงจรที่ได้จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ รวมทั้งเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เป็นต้น

ที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแผงวงจรพิมพ์โดยทั่วไป สามารถแบ่งออกได้เป็นสองชนิด คือ น้ำเสียที่มาจาก การล้างชิ้นงาน (Rinse Water) และน้ำเสียที่เกิดจากสารเคมีในกระบวนการผลิตที่หมดอายุ (Bath Dumped) โดยน้ำเสียทั้งสองมีปริมาณของโลหะหนักในน้ำแตกต่างกัน ซึ่งในแต่ละกระบวนการผลิตมีดังนี้

(1) กระบวนการเตรียมชิ้นงาน

- น้ำเสียจากการล้างชิ้นงาน ซึ่งจะได้น้ำเสียที่เจือจาง

(2) กระบวนการทำลวดลายทองแดง (Exposure + Developer Step)

- น้ำเสียจากการล้างชั้น Film ออกจากชิ้นงานซึ่งล้างด้วยตัวทำละลายอินทรีย์
- น้ำเสียจากการล้างชิ้นงานหลังจากล้างชั้น Film ออก

(3) กระบวนการกัดเนื้อทองแดงที่ไม่ต้องการ (Etching Step)

- น้ำเสียที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการกัดทองแดง ซึ่งมีคุณสมบัติตามสารเคมีที่ใช้กัดเนื้อทองแดง ซึ่งมีทั้งสารเคมีที่เป็นด่าง (Ammonia/Alkaline Solution) หรือมีคุณสมบัติเป็นกรด H_2SO_4/H_2O_2 หรือ $CuCl_2/HCl$ โดยน้ำเสียที่ได้มีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลัก

(4) กระบวนการชุบแบบใช้ไฟฟ้าและไม่ใช้ไฟฟ้า (Electro Plating และ Electroless Plating)

- ในกระบวนการชุบแบบไฟฟ้าอาศัยกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยสารละลาย $CuSO_4/H_2SO_4$ ซึ่งเมื่อหมดอายุการใช้งานน้ำเสียที่ได้จะมีคุณสมบัติเป็นกรด และมีทองแดงเป็นองค์ประกอบหลักในน้ำเสีย
- ในกระบวนการชุบโดยไม่ใช้ไฟฟ้า อาศัยกระบวนการทางเคมีซึ่งประกอบด้วย $CuSO_4/CH_2O/NaOH$ ซึ่งจะได้ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างและมีทองแดงที่อยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับ ฟอรัลดีไฮด์ (CH_2O)

ในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

(1) น้ำเสียจากการล้าง (Rinse) ชิ้นงานหลังจากกระบวนการต่างๆ เช่น กระบวนการชุบ กระบวนการกัด จะมีปริมาณโลหะหนักต่ำกว่า แต่จะมีปริมาณมากกว่า ก็จะใช้กระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นหลัก โดยอาศัยเทคนิคหลายๆเทคนิคประกอบกัน เพื่อรีไซเคิลน้ำล้างชิ้นงาน หรือใช้เทคนิคที่ซับซ้อนแล้วนำทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียมกลับมาใช้ใหม่ เช่น การใช้ ion - exchange resin เป็นต้น

(2) น้ำเสียอันเกิดจากสารเคมีในกระบวนการกัด (Etching) และการชุบ (Plating) ที่หมดอายุซึ่งมีปริมาณโลหะหนักมากกว่าแบบแรก และมีคุณสมบัติแตกต่างกันไปตามชนิดของสารเคมีที่ใช้ โดยน้ำเสียที่มีสารที่จำเป็นปะปนอยู่ก็จะแยกไปบำบัดก่อน ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ต่อไป

โดยตารางที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของน้ำเสียของโรงงานแหงวงจรมพิมพ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของน้ำเสียของโรงงานแปงวงจรมพิมพ์ (ทศพร ภูระหงษ์, 2545)

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้
พีเอช	7.1
ปริมาณโลหะหนักในรูปสารละลาย	
- ทองแดง (mg/l)	0.75
- นิกเกิล (mg/l)	0.17
- ตะกั่ว (mg/l)	0.61
- สังกะสี (mg/l)	0.15
- โครเมียม (mg/l)	N.D.
ของแข็งละลายทั้งหมด (mg/l)	4.17
ความขุ่น (NTU)	2.6

2.2.5 น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะ

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะนั้น มีสาเหตุต่างๆ ดังต่อไปนี้

- (1) น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดไขมัน และน้ำมัน
- (2) น้ำล้างจากขั้นตอนการจุ่มเงา และกำจัดสนิม
- (3) น้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา
- (4) น้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลออกมาโดยอุบัติเหตุ
- (5) น้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือ และบริเวณสถานที่

น้ำเสียที่ปล่อยออกมาจากโรงงานในปริมาณสูง ได้แก่ น้ำล้างจากขั้นตอนการกำจัดน้ำมัน ไขมัน น้ำเสียจากขั้นตอนการจุ่มเงา การกำจัดสนิม และน้ำล้างชิ้นงานภายหลังจากการชุบน้ำยา น้ำเสียทั้งสามส่วนนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องในการผลิต ส่วนน้ำเสียเนื่องจากน้ำยาที่เสื่อมคุณภาพหรือไหลมาเนื่องจากจากอุบัติเหตุจะมีมลพิษสูง แต่นานๆ จะเกิดขึ้นสักครั้งหนึ่ง สำหรับน้ำล้างทำความสะอาดเครื่องมือและบริเวณสถานที่ จะมีความเข้มข้นของสารมลพิษต่ำ และปริมาณไม่มาก โดยลักษณะน้ำเสียจะแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 ลักษณะน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ (ประยูร ฟองสติตกุล และคณะ, 2542)

พารามิเตอร์	ค่าที่ตรวจวัดได้
พีเอช	11.1 – 12.5
Total Solids (mg/l)	4,780 – 6,600
Suspended Solids (mg/l)	290 – 430
Dissolve Solids (mg/l)	4,490 – 6,170
Volatile Solids (mg/l)	1,010 – 1,810
Fixed Solids (mg/l)	3,777 – 4,967
COD (mg/l)	299 – 473
Zn (mg/l)	120 - 190

ตารางที่ 2.7 แสดงข้อมูลองค์ประกอบกากตะกอนโลหะหนักที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากโรงงานชุบโลหะ

ตารางที่ 2.7 ข้อมูลองค์ประกอบกากตะกอนโลหะหนักที่ใช้เป็นวัตถุดิบและเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากโรงงานชุบโลหะ (Stiegemann และ Buenfeld, 2003)

กากตะกอน	น้ำหนักของ ส่วนประกอบพื้นฐาน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	น้ำหนักของ ส่วนประกอบอื่นๆ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)
สลัดจ์จากโรงชุบโลหะ	CaO = 26.0 SiO ₂ = 6.3 Al ₂ O ₃ = 4.3 Fe ₂ O ₃ = 35.0	K ₂ O = 0.24 MnO = 0.41 Ba = 0.05 Cd = 0.10 Cr = 4.17 Cu = 9.63 Ni = 6.24 Pb = 0.05 Zn = 22.70

2.3 โลหะหนัก

2.3.1 ผลกระทบของโลหะหนักต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์

ผลกระทบของโลหะหนักนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของโลหะหนัก ส่วนใหญ่ก่อให้เกิดผลกระทบโดยตรงในกระบวนการผลิต เช่น เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนในปูนเม็ด และยังมีผลกระทบด้านอื่น เช่น การก่อตัวซัลฟ สีนปูน เป็นต้น

2.3.2 พฤติกรรมของโลหะหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

พฤติกรรมของโลหะหนักในระบบซีเมนต์ที่ได้จากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยมีการใช้วัตถุดิบและเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ในปัจจุบันยังไม่ได้มีการยืนยันที่แน่ชัด มีเพียงความเป็นไปได้ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างซีเมนต์และโลหะหนัก ซึ่งสามารถแยกออกเป็นได้ 4 กลุ่ม คือ การดูดติด (Sorption) การตกผลึก (Precipitation) การรวมตัวเข้ากับ โครงผลึกของสารประกอบซีเมนต์ (Lattice Inclusion) และการเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบในซีเมนต์แล้วเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ที่ละลายน้ำได้จำกัด (Li และคณะ, 2001 และ Achtembosch และคณะ, 2003)

ตารางที่ 2.8 ลักษณะผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ (Siam City Cement Public Company Limited, 2005)

ลักษณะผลกระทบต่อปูนซีเมนต์	ชนิดของโลหะหนัก
การก่อตัวซัลฟ	Pb, Zn, As, Cu, Cd, F
เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็ว	Cr, Ni, ฮาโลเจน
ลดความแข็งแรงในช่วงแรก	Zn, Pb, P, B, Mg
เพิ่มความแข็งแรงในระยะแรก	Cr, Ni, V, Ba, F
มีอิทธิพลต่อสีของปูน	Cr, Mg, Ti, Co, V

ตารางที่ 2.9 ผลกระทบของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ (Dalton และคณะ, 2004)

โลหะหนัก	สมบัติและผลกระทบต่อปูนซีเมนต์
สารหนู	โดยทั่วไปจะเข้าไปอยู่ในปูนเม็ด แต่ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตซีเมนต์
แคดเมียม	ปริมาณของแคดเมียมในปูนเม็ดจะลดลงเมื่อมีปริมาณคลอไรด์ในเตาเผาเพิ่มขึ้น
โครเมียม	สามารถลดคุณสมบัติของการก่อตัว C_3S ได้ถ้ามีปริมาณมากกว่าร้อยละ 3 มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่า ร้อยละ 2.5-5 โดยน้ำหนัก ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาทั่วไป
ทองแดง	ผลกระทบมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับรูปที่ก่อตัวขึ้น (ออกไซด์ เกลือ หรือ ซัลไฟด์)
ตะกั่ว	เป็นโลหะที่ระเหยได้ และสามารถสะสมในปูนเม็ด โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบหากมีปริมาณน้อยกว่า 70 ส่วนในล้านส่วน
ปรอท	เป็นโลหะที่ระเหยได้ง่ายมากและคาดว่ามีการหลุดออกไปกับก๊าซทางปล่องควัน
สังกะสี	ความแตกต่างของรูปที่ก่อตัวขึ้น สามารถก่อให้เกิดผลกระทบที่แตกต่างกัน เช่น เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้ มีผลกระทบต่อความสามารถในการเผาไหม้และการทำปฏิกิริยาของส่วนประกอบหลักในปูนเม็ด โดยจะเพิ่มขึ้นถ้ามีปริมาณของโลหะสูงกว่า (ร้อยละ 2.5-5 โดยน้ำหนัก) ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาทั่วไป
วานาเดียม	เพิ่มการหลอมละลายในเตาเผา ลดความพรุนของปูนเม็ด และลดความสามารถในการบดได้

พฤติกรรมของโลหะหนักที่กล่าวมาทั้งหมดซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ โดยจะกล่าวแต่เฉพาะโลหะหนักที่ทำการศึกษา

(1) โครเมียม (Cr)

โครเมียมเป็นโลหะหนักที่พบได้ตามหิน ทราช และพืชตามธรรมชาติทั่วไป โครเมียมไม่สามารถระเหยได้แต่จะปรากฏในรูปของอนุภาคที่อยู่ในอากาศ โดยปกติโครเมียมจะถูกพบด้วยกัน 3 รูปแบบคือ แร่เหล็ก โครเมียมไตรวาเลนต์ไอออน (Cr^{+3}) และ โครเมียมเฮกซะวาเลนต์ไอออน (Cr^{+6}) โครเมียมเป็นสารก่อมะเร็ง และเป็นอันตรายเมื่อได้รับการสัมผัสหรือเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าทางใดทางหนึ่ง ซึ่งโดยปกติ Cr^{+6} จะเป็นพิษมากกว่า Cr^{+3} โดยพฤติกรรมของโครเมียมที่สามารถเป็นไปได้ทั้งสภาวะกรดและด่าง ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง (พีเอชมากกว่า 11) โครเมียมจะอยู่ในรูป Cr^{+6} และมีการจัดรูปเป็นโครเมตไอออน CrO_4^{-2} ที่มีความสามารถในการละลายสูงกว่า แต่ความสามารถในการดูดซับ Cr^{+6} ของซีเมนต์

เพสค์น้อยมาก จึงต้องมีการเติมเกลือของ Fe^{+2} และเกิดตะกอนเป็น $Cr(OH)_3$ (Garavaglia และ Caramuscio, 1994) และภายใต้สภาวะที่เป็นกรด (พีเอชน้อยกว่า 3) โครเมียมจะอยู่ในรูปสารละลายในรูป $CrOH^{+2}$ โครเมียมจะมีบทบาทสำคัญใน CSH เอททริงไกด์และ โมโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก จากการรวมตัวของ Cr^{+3} ในโครงสร้างผลึกโดยการแทนที่ Al^{+3} (Polletini, Pomi และ Sinini, 2002) และในทางตรงกันข้าม Cr^{+6} จะรวมในแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (AF_1 และ AF_m)

(2) ทองแดง (Cu)

การละลายภายใต้สภาวะที่เป็นกรดของทองแดงเริ่มต้นที่ 7 และในกรณีที่ไม่มีการบอนด์ทองแดงจะอยู่ในรูป CuO_2^{-2} ที่พีเอชมากกว่า 11 และที่พีเอชช่วง 7 ถึง 11 ทองแดงจะอยู่ในรูป CuO หรือ $Cu(OH)_2$ ในกรณีที่การบอนด์ทองแดงจะตกตะกอนอยู่ในรูป Malachite ($Cu_2CO_3(OH)_2$) ที่มีพีเอชมากกว่า 7 โดยทองแดงมีบทบาทสำคัญ CSH เอททริงไกด์และ โมโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก สันนิษฐานว่าทองแดงรวมตัวกับ CSH เกิดเป็นผลึกขึ้น (Polletini, Pomi และ Sinini, 2002) ที่ความเข้มข้นสูงๆ ทองแดงอยู่ในรูป Brochantite ($Cu_4SO_4(OH)_6$) และเกิดการรวมตัวของ Cu^{+2} กับผลึกในโครงสร้างของ Faujasite ($C_{0.2}SH$) ยังไม่มีการพิสูจน์ที่แน่ชัดของรูปแบบปฏิกิริยาเอททริงไกด์และ โมโนซัลเฟตกับทองแดง ที่พีเอชน้อยกว่า 7 กล่าวคือทองแดงจะไม่เสถียร ปฏิกิริยาไฮเดรชันอาจถูกหน่วงจากการเคลือบเมล็ดซีเมนต์ของ $Cu(OH)_2$ เพิ่มขึ้น ทำให้ปฏิกิริยาของ C_3A และเกิดโครงสร้างผลึกของปอร์ตแลนด์ไอต์ถูกยับยั้ง

(3) นิกเกิล (Ni)

นิกเกิลเป็นโลหะหนักที่สามารถพบได้ในธรรมชาติ เช่น ในทราย หรือ หินภูเขาไฟ เป็นต้น นิกเกิลบริสุทธิ์จะแข็งและมีสีเงินขาว โดยปกติ นิกเกิลจะอยู่ร่วมกับโลหะอื่นๆ เช่น เหล็ก หรือ ทองแดง นิกเกิลเป็นสารก่อมะเร็ง และเป็นอันตรายเมื่อได้รับการสัมผัสหรือเข้าสู่ร่างกายไม่ว่าทางใดทางหนึ่ง และจะเป็นอันตรายมากเมื่ออยู่ในรูปของ $Ni(CO)_4$ ซึ่งอันตรายกว่า CO และในช่วงที่เป็นด่างสูง นิกเกิลจะอยู่ในรูป $HNiO_2$ ซึ่งอยู่ในรูปสารละลาย ในช่วงที่เป็นกลางและเป็นกรดจะอยู่ในรูป Ni^{+2} นิกเกิลมีบทบาทสำคัญใน โมโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก และนิกเกิลสามารถแทนที่แคลเซียมในเอททริงไกด์ (Scheidegger และคณะ, 2000) โดยปกติ $NiCO_3$ เป็นสารประกอบที่ไม่เสถียร และที่พีเอชน้อยกว่า 8 นิกเกิลจะชะละลายอยู่ในรูปของ Ni^{+2} ได้อย่างรวดเร็ว (Achtembosh และคณะ, 2003)

(4) ตะกั่ว (Pb)

ตะกั่วจะละลายอยู่ในรูป Pb^{+2} ในสภาวะที่มีซัลเฟตและคาร์บอเนตสูงเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถ้าความเข้มข้นของซัลเฟตลดลง Pb^{+2} จะละลายได้ที่พีเอชเท่ากับ 5 ในระบบพันธะซีเมนต์ (Cement Bond System) มีเพียงตะกั่วรูปแบบ Pb^{+2} เท่านั้นที่สามารถตรวจพบได้ ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดเกี่ยวกับพฤติกรรมของ Pb^{+3} และ Pb^{+4} ตะกั่วจะมีบทบาทสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรกกับ

พันธะไฮดรอกไซด์ สารประกอบตะกั่วจะเป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งคาดว่า เป็นผลมาจากการดูดซับของตะกั่วกับพันธะไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไปในระบบซีเมนต์ ความสามารถในการละลายของตะกั่วซัลเฟตมีค่าน้อยมาก คาดว่าจะเกิดการชะละลายของตะกั่วได้ที่พีเอชเท่ากับ 5

(5) สังกะสี (Zn)

สังกะสีจะพบในธรรมชาติตามหินทั่วไป สังกะสีมีลักษณะเป็นเหล็กสีขาวและถูกใช้ในอุตสาหกรรมเหล็ก ขุบโลหะ เคลือบโลหะ และเป็นส่วนประกอบของรถยนต์ และอื่นๆอีกมากมาย สังกะสีมีความเป็นพิษต่ำ แต่จะสามารถเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเกลือได้ ซึ่งจะเป็นอันตรายมาก ส่วนใหญ่ การได้รับอันตรายจากสังกะสีจะมาจากการสูดดมเข้าสู่ร่างกาย แต่สังกะสีมีความสามารถในการดูดซับน้ำในทางเดินอาหารจึงไม่ค่อยมีปัญหามากนัก แต่สังกะสีที่อยู่ในรูปสารละลายไอออนอิสระจะมีความเป็นพิษมากต่อพืช สัตว์ ในอุตสาหกรรมซีเมนต์สังกะสีที่ใช้ จะมาจากขางรถยนต์ (Andrade และคณะ, 2003) ในน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้แล้วมีความเข้มข้น 114,483 มิลลิกรัมต่อลิตร (Trezza and Scian, 2000) และในภาคตะกอนโรงงานขุบโลหะมีปริมาณ 227,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สังกะสีทำให้การก่อตัวซัลฟ ในปฏิกิริยาไฮเดรชันที่พีเอช 8 ถึง 12 สังกะสีจะอยู่ในรูปของ ZnO หรือ $Zn(OH)_2$ ที่มีความเสถียร ซึ่งความสามารถในการละลายได้ของ ZnO ที่มีปริมาณไม่เกิน 3 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามีปริมาณที่สูงกว่านี้จะตกตะกอนในรูป ZnO หรือ $\beta-Zn(OH)_2$ และ $ZnCO_3$ จะเกิดขึ้นในช่วงพีเอช 7 ถึง 8 ในช่วงที่เป็นค่าสูง สังกะสีจะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ หรือ ZnO_2^{-2} และถ้าพีเอชน้อยกว่า 7 จะอยู่ในรูป Zn^{+2} สังกะสีมีบทบาทที่สำคัญใน CSH เอททริงไกด์ และโบโนซัลเฟตของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ระยะแรกในเอททริงไกด์ สังกะสีสามารถรวมตัวกับแคลเซียม และใน CSH สังกะสีจะถูกดูดซับในรูปของไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต การชะละลายของสังกะสีเพิ่มขึ้นอย่างมากที่พีเอชประมาณ 7

2.4 การชะละลาย

ในการทดสอบการชะละลายสามารถแบ่งได้หลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์ ความสามารถในการชะละลายขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของโลหะหนักนั้นๆ ในการทดสอบการชะละลายของก้อนมอร์ตานี้จะใช้วิธีการตามกฎหมายของประเทศไทย

ปัจจุบันประเทศไทยใช้มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารอันตรายในน้ำสกัด (Leachant หรือ Extraction Fluid) ซึ่งเป็นการจำลองสถานการณ์หลุมฝังกลบ น้ำสกัดใช้สารละลายไฮเดียมซิงเครท 0.2 โมลาร์ ที่พีเอช 5.0 ± 0.1 เมื่อวิเคราะห์น้ำสกัดแล้ว ค่าที่วิเคราะห์ได้จะต้องไม่เกินตามเกณฑ์มาตรฐานที่ประกาศไว้

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช่แล้ว พ.ศ. 2548 ที่สกัดด้วยวิธี Waste Extraction Test (WET) เทียบกับค่า Soluble Threshold Limit Concentration (STLC) และมาตรฐานการชะละลายของ US EPA SW-846 Method 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure หรือ TCLP)

ชนิดโลหะหนัก	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มก. /ล.) (WET)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (มก. /ล.) (TCLP)
Antimony (Sb)	-	1
Arsenic (As)	5	5
Cadmium (Cd)	1	1
Chromium (Cr)	5	5
Copper (Cu)	25	-
Mercury (Hg)	0.2	0.2
Nickel (Ni)	20	70
Lead (Pb)	5	5
Thallium (Tl)	7	7
Vanadium (V)	24	-
Zinc (Zn)	250	-
Silver (Ag)	5	5
Barium (Ba)	100	100
Selenium (Se)	1	1

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 เตาเผาแบบหมุน

Lemieux และคณะ (2003) ได้ทดลองใช้ dibenzo-*p*-dioxin และ polychlorinated dibenzofurans จากของเสียอุตสาหกรรมพรม โดยนำไปเผาพร้อมกับวัสดุคืบในกระบวนการผลิตในเตาเผาแบบหมุนขนาดย่อย การทดลองได้ทำการหาค่าเริ่มต้นของการสร้าง PCDDs/Fs (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins และ polychlorinated dibenzofurans) จากการเผาพรม โดยเตาเผาจะประกอบด้วยสองส่วน ส่วนแรกจะเผาแบบหมุนที่ใช้แก๊สธรรมชาติที่มีกำลัง 73 กิโลวัตต์ และส่วนที่สองส่วนห้องเผาไหม้ที่มีกำลัง 73 กิโลวัตต์ และมีที่กรองฝุ่นทั้งแบบ baghouse และ wet-scrubber การวัดอุณหภูมิจะวัดโดย thermocouples จะศึกษา 3 สถานะ โดยสถานะละ 5 ตัวอย่าง ทั้ง 3 สถานะคือ ตัวอย่างเปรียบเทียบกับ พรมที่ชุ่มด้วยน้ำที่

ปราศจากไอออน และ พรหมที่ชุ่มด้วยสารฟอกขาว 10 % หรือโซเดียมไฮเปอร์คลอไรท์ พบว่าตัวอย่างเปรียบเทียบนั้นปล่อยปริมาณของ PCDDs/Fs และ สารจำพวกคลอรีนในปริมาณที่น้อย และพรหมที่ชุ่มด้วยน้ำปราศจากไอออนก็ปล่อยสารข้างต้นในปริมาณที่มากกว่าตัวอย่างเปรียบเทียบแต่ไม่มากพอ แต่แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มของไอโซเมอร์ 2, 3, 7, 8-TCDF และ 2, 3, 4, 7, 8-PeCDF ซึ่งสรุปได้ว่าพรหมที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารจำพวกคลอรีนเช่น สารฟอกขาว ต้องได้รับการจัดการที่ถูกต้องเพื่อป้องกันการเพิ่มของ PCDD/Fs

2.5.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโลหะหนักในปูนซีเมนต์

ของเสียอันตรายและไม่อันตรายจำนวนมากมีโลหะหนักรวมอยู่ ซึ่งโลหะหนักสามารถเพิ่มหรือลดคุณสมบัติของซีเมนต์ได้ ซึ่งเป็นหัวข้อหลักๆที่ทำการศึกษา

Andrade และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาศาสตร์ ผลกระทบของ วาเนเดียม (V) สังกะสี (Zn) และ ตะกั่ว (Pb) ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยวาเนเดียมสามารถพบได้ในเชื้อเพลิงทดแทนในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ตะกั่วสามารถพบได้ในของเสียอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น ในเชื้อเพลิง สังกะสีสามารถพบได้ในยางรถยนต์ที่ใช้แล้ว การทดลองใช้ตัวอย่างควบคุมและโลหะหนักทั้งสาม โดยใส่สารแอมโมเนียมเมตาแวนาเตท (NH_3VO_4), ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และเลดไนเตรท ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) จำนวน 1 % โดยน้ำหนัก ก่อนนำเข้าเตาเผาจะทำการอบไล่ไอน้ำด้วยอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าความสามารถในการเผาจะเพิ่มขึ้นถ้าปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้น (2.5 – 5.0 %)

Raet และคณะ (2003) ได้ศึกษาการนำกากตะกอนจากการชุบโลหะซึ่งมี Cu และ Ni อยู่ โดยเพิ่มตะกอนนี้เข้าไปในวัตถุดิบ 0.25-5 % โดยน้ำหนัก และทำการวิเคราะห์โดยวิธีการ Chemical Analysis, Thermogravimetric (TG), และ Different Thermal Analysis (DTA) ทั้งก่อนและหลังจากเข้าเตาเผา ผลจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มตะกอนจากการชุบโลหะที่ไม่เกิน 2 % โดยน้ำหนักซึ่งจะมี Cu อยู่ 2.4 % โดยน้ำหนัก และมี Ni อยู่ 1.2 % โดยน้ำหนัก จะไม่มีผลกระทบต่อปฏิกิริยาของการผลิตปูนซีเมนต์ และเป็นการลดอุณหภูมิของการเกิด C_2S ซึ่งจะมีผลให้กำลังแรงอัดเกิดช้าในปูนซีเมนต์ ปริมาณทั้งหมดของ Ni และมากกว่า 99 % ของ Cu ถูกเผาไหม้ออกไปหมดในกระบวนการ ซึ่งอาจจะไปรวมอยู่ในปูนซีเมนต์

Trezza และ Scian (2000) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้เชื้อเพลิงทดแทนในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และได้ใช้เชื้อเพลิงจากน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นส่วนผสมในวัตถุดิบ การวิเคราะห์การทดลองจะใช้ XRD ในวิเคราะห์ปูนเม็ด DTA จะวัดผลกระทบของอุณหภูมิต่อปูนเม็ด และการทดสอบกำลังต้านทานจะวัดที่ 1 ชั่วโมง 1, 7 และ 28 วัน โดยจะผสมเชื้อเพลิงรวมกับวัตถุดิบในปริมาณ 0, 0.005, 0.01, 0.02 และ 0.04 % โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ การวิเคราะห์อุณหภูมิจะเพิ่มอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส ต่อนาที และคงที่ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาทีจากนั้นการลดอุณหภูมิจะลดที่ 40 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลการทดลองสรุปได้ว่าการเพิ่มเชื้อเพลิงเป็นการลดพลังงานในขั้นตอนการเผาปูนเม็ด และผลการวัด

กำลังด้านทานของก้อนมอร์ต้าที่ 3 และ 28 วัน โดยอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.4 และปริมาณของซีเมนต์ที่ 0.04 % โดยน้ำหนัก ทำให้ได้กำลังด้านทานมากกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ใส่ซีเมนต์

Tenorio และคณะ (2000) ได้ศึกษาการนำภาคตะกอนจากการชุบโลหะซึ่งมี Cr เป็นส่วนผสมหลักว่ามีผลกระทบต่อกระบวนการเกิด clinker หรือไม่ โดยเพิ่มตะกอนที่มี Cr นี้เข้าไปในวัตถุดิบ 0.25-8 % โดยน้ำหนัก และทำการวิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง AAS XRD XRF ทั้งก่อนและหลังจากเข้าเตาเผา จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มตะกอนจากการชุบโลหะที่มี Cr อยู่ ไม่เกิน 2 % โดยน้ำหนักไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการเกิด C_2S และ C_3S ซึ่งชี้ให้เห็นว่าไม่มีผลกระทบต่อการผลิตซีเมนต์ โดยการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของประเทศบราซิลนั้น Cr ไม่มีการละลายออกมาโดยจะอยู่ในเม็ดปูนซีเมนต์ และการแพร่กระจายของ Cr ในกระบวนการผลิตมีน้อยกว่า 0.1 % โดยจะเหลืออยู่ในเม็ดปูนประมาณ 99.9 %

การกำจัดของเสียอันตรายโดยการนำไปใช้ในกระบวนการเผาไหม้ เป็นเทคโนโลยีใหม่ซึ่งถือว่าการใช้ของเสียให้เป็นประโยชน์และการใช้เชื้อเพลิงทดแทน Taweekitwanit (2004) ได้ทำการศึกษาการชะละลายของ โครเมียม นิกเกิล และ สังกะสี โดยใช้วิธีย่อยสลายด้วยเครื่องไมโครเวฟตามวิธี 3051A ของ US EPA ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โครเมียม และ สังกะสี มากกว่า 80 % ชะละลายจากซีเมนต์ ในขณะที่นิกเกิลชะละลายแค่ 3 % ซึ่งโครเมียมจะชะละลายที่ pH 4 – 10 ส่วนสังกะสีและนิกเกิลชะละลายที่ pH 4 แต่ความสามารถในการชะละลายของสังกะสีและนิกเกิลจะลดเมื่อ pH เพิ่มขึ้น โดยประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 พ.ศ.2540 ซึ่งกำหนดซีเมนต์ที่เป็นของเสียอันตรายและไม่อันตราย จากผลการทดลองโครเมียมที่มากกว่า 0.1 % โดยน้ำหนักของวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ จะถือว่าเป็นของเสียอันตราย และการผสมนิกเกิลและสังกะสีที่ 2 % โดยน้ำหนักของวัตถุดิบถือว่าเป็นของเสียอันตราย

โลหะหนักที่ปนเปื้อนสามารถทำอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ ในหลายๆประเทศจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานสำหรับการใช้โลหะหนักในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.10 ตารางที่ 2.11 ค่าสูงสุดของโลหะหนักที่ใช้ในต่างประเทศในอุตสาหกรรมซีเมนต์ (Holcim, 2006)

โลหะหนัก	หน่วย	สเปน	เบลเยียม	ฝรั่งเศส	สวีเดน
Cr	mg/kg	-	1000	-	100
Ni	mg/kg	-	1000	-	100
Zn	mg/kg	-	5000	-	400
Hg	mg/kg	10	5	10	0.8
Cd	mg/kg	100	70	-	0.5
Cu	mg/kg	-	-	-	100
Sb + As + Co + Ni + Pb + Sn + V +Cr	mg/kg	0.5	1000	2500	-

ในประเทศเยอรมนีได้กำหนดมาตรฐาน ปริมาณของโลหะหนักในวัสดุดิบ เม็ดปูน และ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเริ่มใช้ตั้งแต่ปี 2000 ดังตารางที่ 2.12 ตารางที่ 2.12 ปริมาณสูงสุด ต่ำสุด และค่าเฉลี่ย ของโลหะหนักที่อยู่ในวัสดุดิบ เม็ดปูน และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (VDZ, Germany 2000)

	โลหะหนัก	Cr (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Zn (mg/kg)
วัสดุดิบ	ต่ำสุด	23	5	12	10
	สูงสุด	59	19	38	108
	เฉลี่ย	30	14	20	34
เม็ดปูน	ต่ำสุด	10	5	10	29
	สูงสุด	422	136	397	600
	เฉลี่ย	66	38	38	113
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ต่ำสุด	25	14	14	21
	สูงสุด	712	98	97	679
	เฉลี่ย	68	33	45	164

ในประเทศไทย บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด ได้มีการตรวจสอบปริมาณของโลหะหนักในปูนซีเมนต์คอลลอตทุกเดือน ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 ปริมาณของโลหะหนักของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) 2007

เม็ดปูน	โลหะหนัก (mg/kg)			
	Cr	Cu	Ni	Zn
Holcim 2007	19-270	4-280	10-101	13-370
ค่ากลาง	53	113	27	61
โรงงาน 1	123	128	53	221
โรงงาน 2	115	113	68	212
โรงงาน 3	ปิด			
โรงงาน 4	105	132	51	174
โรงงาน 5	141	204	52	270
โรงงาน 6	124	208	52	271

ตารางที่ 2.14 แสดงปริมาณของโลหะหนักของปูนซีเมนต์ยี่ห้อต่างๆ ตามท้องตลาดในเดือนพฤษภาคม 2007 (บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด)

ตารางที่ 2.14 ปริมาณของโลหะหนักของปูนซีเมนต์ยี่ห้อต่างๆ ตามท้องตลาดในเดือนพฤษภาคม 2007 (บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด, 2007)

ยี่ห้อ	โลหะหนัก (mg/kg)			
	Cr	Cu	Ni	Zn
ช้าง	101	282	65	816
อินทรีเพชร	143	180	48	260
ราชสีห์แดง	165	280	65	362
TPI M299	199	224	68	715
ภูเขา	111	44	52	39

ในงานวิจัยนี้ได้ดูความสอดคล้องของผลการวิเคราะห์ต่างๆ เช่น กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก ค่าปริมาณของโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง ค่าปริมาณการชะละลาย การคูดินผิวของเม็ดปูน เพื่อเป็นแนวทางในการวิจารณ์ผลการทดลอง รวมทั้งออกแบบแผนการทดลองต่างๆ ทำให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาปริมาณสูงสุดของโลหะหนักที่สามารถผสมรวมกับปูนซีเมนต์ได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อในด้านต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จะทำการวิเคราะห์ทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และวิศวกรรม ซึ่งทางด้านกายภาพ ได้แก่ พื้นผิวของปูนซีเมนต์ ด้านเคมี ได้แก่ โครงสร้างของเม็ดปูนซีเมนต์ สารโลหะหนักที่อยู่ในเม็ดปูนซีเมนต์ และการทดสอบการชะละลาย ส่วนด้านวิศวกรรม ได้แก่ การหากล้างรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า ซึ่งในการทดลองจะผสมวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์กับโลหะหนักที่สังเคราะห์ขึ้นมาให้ได้ 10 กิโลกรัม จากนั้นนำไปทดลองแล้วทำการวิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ โดยการทดลองนี้จะแบ่งเป็นทั้งหมด 5 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ศึกษาจากตัวอย่างปูนซีเมนต์ที่เผาโดยไม่ผสมสารโลหะหนัก เพื่อใช้เป็นตัวอย่างควบคุมในการเปรียบเทียบกับเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนักที่ได้จากการสังเคราะห์

ชุดการทดลองที่ 2 ศึกษาเม็ดปูนซีเมนต์ที่ผสมโลหะหนัก โดยโลหะหนักที่ผสมจะให้เป็นตัวแทนของภาคตะกอนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คือ Cr:Cu:Ni ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นมาที่อัตราส่วน 1:1:1^a โดยจะทดลองที่ปริมาณโลหะหนัก 0.5 1.0 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ

ชุดการทดลองที่ 3 ศึกษาเม็ดปูนซีเมนต์ที่ผสมโลหะหนัก โดยโลหะหนักที่ผสมจะให้เป็นตัวแทนของภาคตะกอนโรงงานหลอมเหล็ก คือ Cr:Pb:Zn ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นมาที่อัตราส่วน 1:4:13^b โดยจะทดลองที่ปริมาณโลหะหนัก 0.5 1.0 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ

ชุดการทดลองที่ 4 ศึกษาเม็ดปูนซีเมนต์ที่ผสมโลหะหนัก โดยใช้ภาคตะกอนจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่ปริมาณโลหะหนัก 0.5 1.0 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ

ชุดการทดลองที่ 5 ศึกษาเม็ดปูนซีเมนต์ที่ผสมโลหะหนัก โดยใช้ภาคตะกอนจริงจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ปริมาณโลหะหนัก 0.5 1.0 2.5 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ

a เป็นอัตราส่วนที่ได้จากภาคตะกอนอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

b เป็นอัตราส่วนที่ได้จากภาคตะกอนโรงงานหลอมเหล็ก

ตารางที่ 3.1 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง

โลหะหนัก	อัตราส่วน	ปริมาณของโลหะหนักต่อปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนัก (%)			
		1	2	3	4
1) Cr:Cu:Ni	1:1:1	0.5	1.0	2.5	5.0
2) Cr:Pb:Zn	1:4:13	0.5	1.0	2.5	5.0
3) กากตะกอนจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์		0.5	1.0	2.5	5.0
4) กากตะกอนจริงจากโรงงานหลอมเหล็ก		0.5	1.0	2.5	5.0
5) ตัวอย่างควบคุม		-	-	-	-

3.2. วัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบ (Kiln Feed) จาก บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) จำนวน 118 ตัน ฤงฤงละประมาณ 10 – 20 kg โดยวัตถุดิบที่ที่เก็บมาได้นั้นจะต้องมีการนำมาปรับแก้ค่า LSF (Lime Saturation Factor) ก่อนที่จะนำไปใช้ในการทดลอง เนื่องจากค่า LSF ที่ใช้ในเตาเผาปูนซีเมนต์จริงนั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 104-110 ซึ่งสูง และใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงทำให้ค่า LSF ลดลงหลังจากกระบวนการ แต่ในงานวิจัยนี้ใช้แก๊ส LPG (Liquid Petroleum Gas) ทำให้ค่า LSF ไม่ลดลงกระบวนการเผาจึงไม่สมบูรณ์ การลดค่า LSF นั้นจะใช้การเติมหินเชล(Shale Core)และดินเหนียว(Clay) ที่ปริมาณ 2.5 % โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ โดยจะปรับค่า LSF ลงมาอยู่ที่ประมาณ 95-96 จากนั้นจะทำการผสมโลหะหนักและกากตะกอนที่เตรียมไว้ที่ความเข้มข้น 0.5 1.0 2.5 5.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก โดยจะทำการเตรียมตัวอย่างละ 10 kg จากนั้นนำไปทดลองแล้ววิเคราะห์ตัวอย่างละ 3 จ้า

3.3. โลหะหนัก

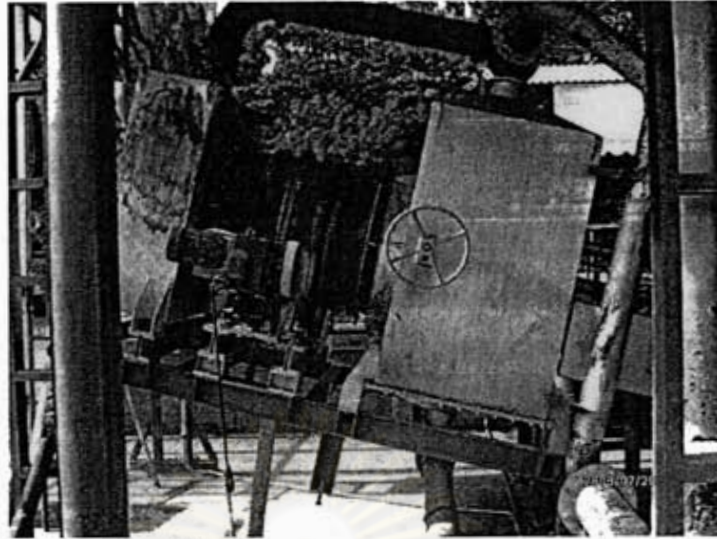
โลหะหนักที่ผสมกับวัตถุดิบนั้นจะอยู่ในรูปของออกไซด์ของเหล็ก ซึ่งจะต้องมีการคำนวณหาปริมาณที่แท้จริงในการผสม เนื่องจากโลหะหนักที่ใส่จะอยู่ในรูป Cr_2O_3 , CuO , NiO , PbO และ ZnO ส่วนกากตะกอนที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมจะทำการผสมลงไปเลยโดยไม่มีการคำนวณ โดยปริมาณโลหะหนักที่ผสมรวมกับวัตถุดิบที่ 10 กิโลกรัมในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง

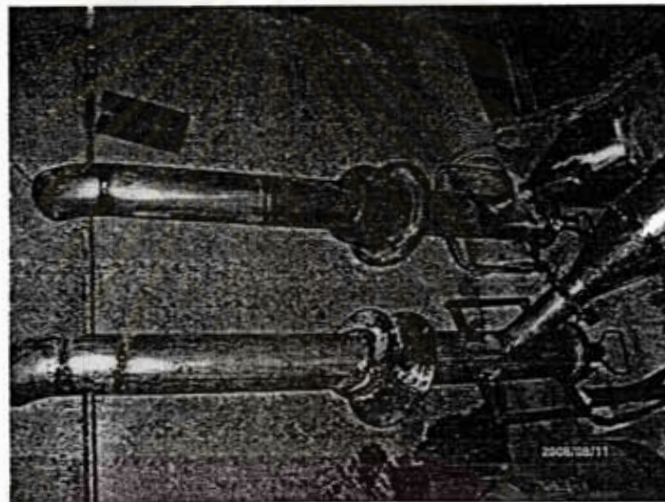
1) Cr ₂ O ₃ : CuO: NiO ₂ อัตราส่วน 1:1:1	ปริมาณของโลหะหนักที่ใช้ในการทดลอง (กรัม)				รวม (กรัม)
	0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	
1.1) Cr ₂ O ₃	48.7	97.4	243.5	480	876.6
1.2) CuO	20.8	41.6	104	208	374.4
1.3) NiO ₂	25.7	51.4	128.5	257	462.6
2) Cr ₂ O ₃ : PbO: ZnO อัตราส่วน 1:4:13	0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	รวม (กรัม)
2.1) Cr ₂ O ₃	7.9	15.8	39.5	79	142.2
2.2) PbO	12	24	60	120	216
2.3) ZnO	45	90	225	450	510
3) กากตะกอนจาก โรงงานอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์	50	100	250	500	900
4) กากตะกอนจาก โรงงานหลอมเหล็ก	50	100	250	500	900

3.4 เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน (Pilot-Scale Rotary Cement Kiln)

เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกสร้างขึ้นโดย บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) และออกแบบโดยนายเจนวิทย์ กรอบทอง นิสิตปริญญาเอก หลักสูตรสหสาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (นานาชาติ) สังกัด NCE-EHWM จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเตาเผา(Rotary Kiln) ประกอบไปด้วย ตัวเตาเผายาว 1 เมตร หนา 0.15 เมตร หอลดความชื้น (Cooling Chamber & Cooling Tower) เตาเผาจะหมุนที่ความเร็ว 0.5 รอบต่อนาทีโดยมีมอเตอร์กำลัง 2 แรงม้าในการขับเคลื่อน ภายในเตาก่อด้วยปูนทนไฟ C60 และใช้ท่อสแตนเลสในการป้อนวัตถุดิบ แสดงดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



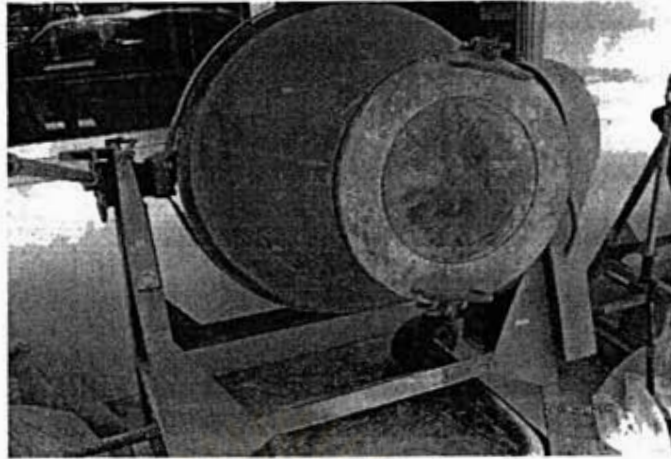
รูปที่ 3.1 เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดเล็กข้อ่วน



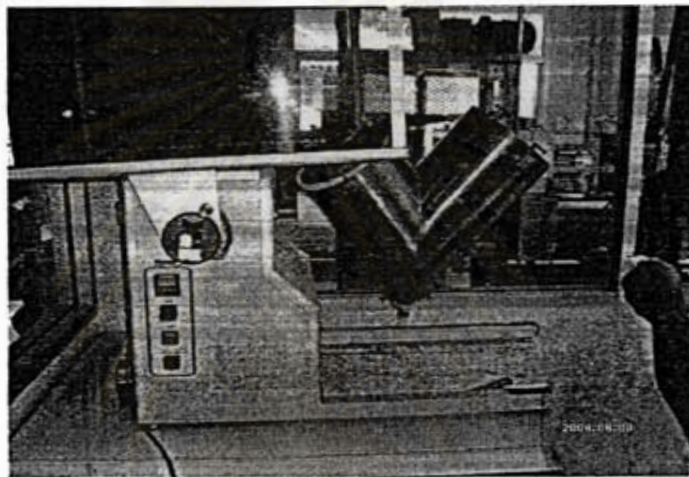
รูปที่ 3.2 ท่อสแตนเลส

3.5 การเตรียมวัตถุดิบ

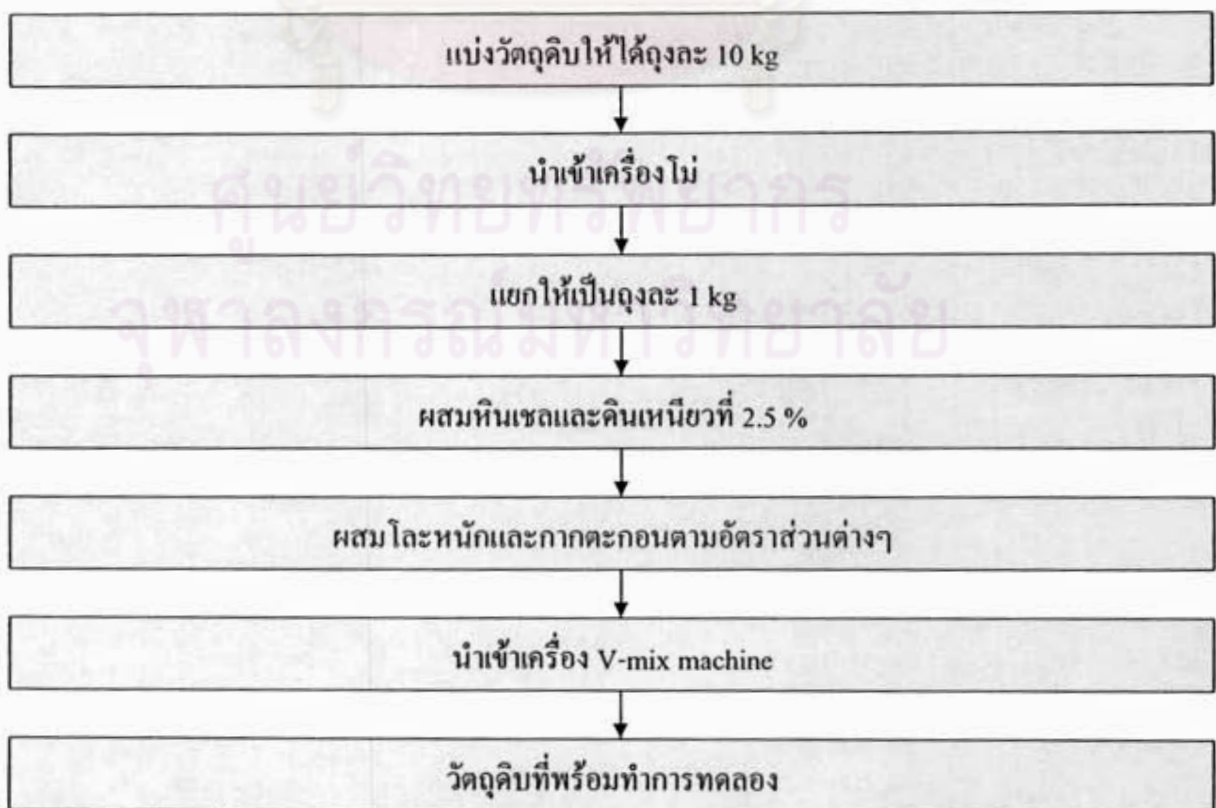
ในการเก็บวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองนั้น ต้องใช้เวลานานทำให้วัตถุดิบที่ได้นั้นมีค่า LSF (Lime Saturation Factor) ที่ต่างกัน LSF คือ ปริมาณ CaO ทั้งหมดต่อปริมาณ CaO ที่สามารถมีได้มากที่สุดในการป้อน จึงทำให้ต้องมีการปรับค่า LSF ให้มีค่าเหมาะสมพอที่จะใช้การทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ค่า LSF ที่เหมาะสมอยู่ 96 ± 1 การปรับแก้ค่า LSF นั้นจะทำโดยเริ่มจากการทำให้ได้ถุงละ 10 kg เพื่อใช้ในการทดลองแต่ละตัวอย่าง จากนั้นจะนำไปเข้าเครื่อง โม่ปูนซีเมนต์เพื่อให้ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และจะแยกแต่ละถุงให้เป็น 1 kg เพื่อผสมหินเซลและดินเหนียวที่ปริมาณ 2.5 % และในขั้นตอนนี้จะใส่โลหะหนักตามที่คำนวณไว้แล้วนำไปผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง V-mix machine ก็จะได้ตัวอย่างที่พร้อมสำหรับการทดลอง แสดงดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 เครื่องโม่ปูนซีเมนต์



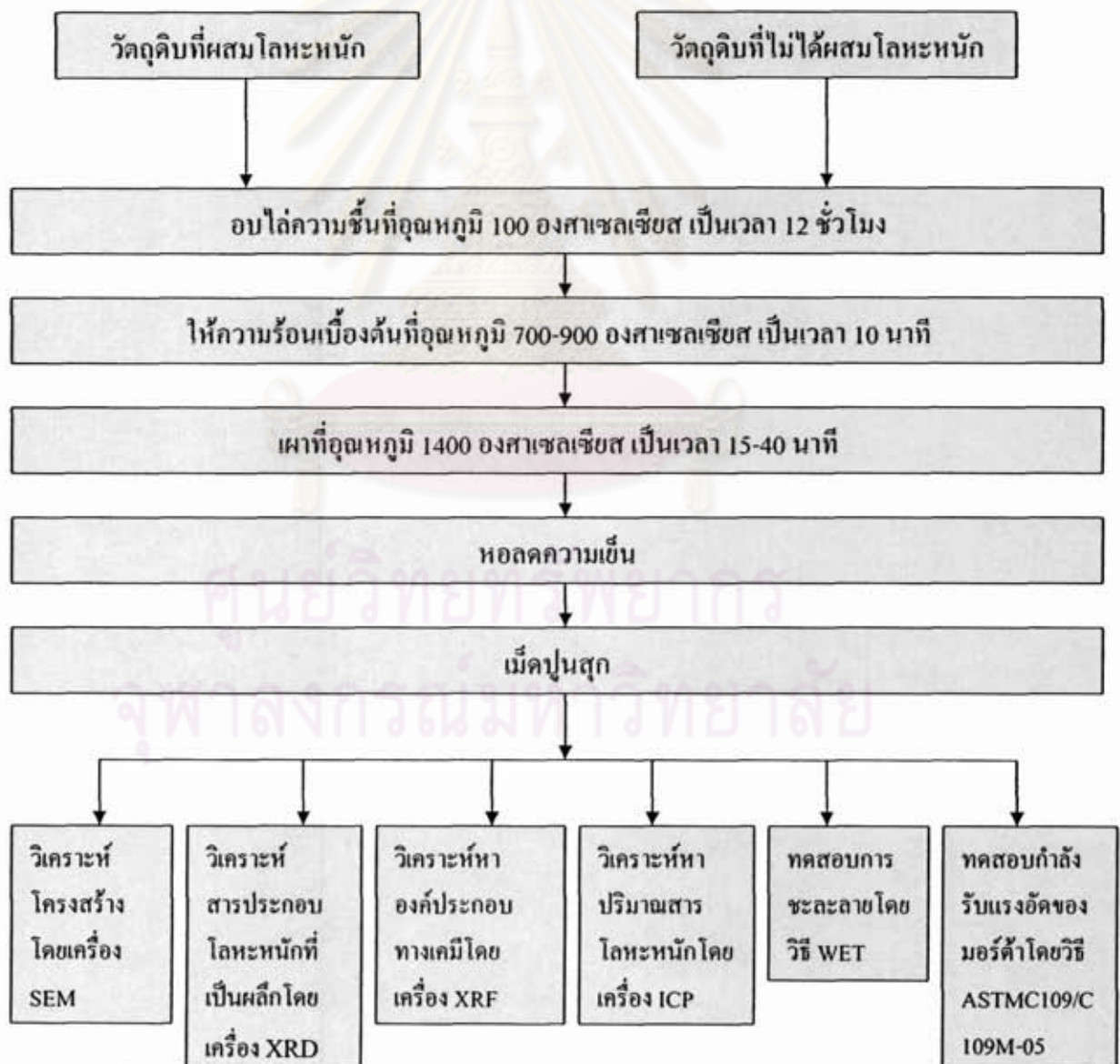
รูปที่ 3.4 V-mix machine



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบก่อนผสม โตะหนัก

3.6 วิธีการทดลอง

นำวัตถุดิบที่ได้เตรียมไว้จากขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ อบอุ่นความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปเข้าเตาเผาปูนซีเมนต์แบบหมุนที่ได้ทำการสร้างไว้ เป็นเวลาทั้งหมดประมาณ 25-40 นาที โดยจะแยกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการให้ความร้อนเบื้องต้นที่ 700–900 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 10 นาที และ ส่วนที่สองจะเป็นกระบวนการหลักของการผลิตปูนซีเมนต์คือการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1400-1450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-30 นาที หลังจากขั้นตอนนี้จะได้เม็ดปูนสุกที่มีสีดำปนเขียว และจะนำเข้าหอลดความชื้นก่อนนำไปทำการตรวจวิเคราะห์สมบัติต่างๆ และตัวอย่างที่จะใช้ในการเปรียบเทียบจะทำเหมือนกันทุกขั้นตอนแต่จะไม่ผสมสารโลหะหนัก ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดจะแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการทดลอง

3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

วิธีวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 วิธีการวิเคราะห์

วิธีวิเคราะห์	ตัวอย่าง ควบคุม	วัตถุดิบที่ผสมสารโลหะ หนักก่อนเข้าเตาเผา	เม็คปูนที่สูง หลังจากเผา
1) โครงสร้างพื้นผิว (SEM)	ทดลอง	-	ทดลอง
2) สารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก (XRD)	ทดลอง	-	ทดลอง
3) องค์ประกอบทางเคมี (XRF)	ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง
4) ปริมาณสาร โลหะหนัก(ICP)	ทดลอง	ทดลอง	ทดลอง
5) การชะละลาย (WET)	ทดลอง	-	ทดลอง
6) กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า (ASTMC109/C109M-05)	ทดลอง	-	ทดลอง
7) ความชื้น (%MC) การสูญเสียน้ำหนัก (LOI)	-	ทดลอง	-

3.7.1 วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

ศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) สำหรับตรวจสอบการจับตัวกันและการกระจายตัวของโลหะหนักของซีเมนต์พอสต์ในระดับจุลภาค (Microstructure) โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะถูกทำให้แตกให้มีผิวหน้าเรียบ และนำไปยึดติดกับแท่งอลูมิเนียมทรงกระบอกเล็กๆ และฉาบผิวด้วยโลหะหนักระหว่างทองกับแพลเลเดียม (Gold-Palladium Alloy) และนำไปตรวจวัด

3.7.2 วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

1) ศึกษาชนิดสารประกอบโลหะหนักที่เป็นผลึก (Mineralogical Composition)

ตรวจวัดด้วยเครื่อง XRD (X-ray Diffraction Spectrometer) โดยใช้ปริมาณตัวอย่าง 5 กรัม สิ่งที่ได้จากการตรวจวัด กราฟความถี่ของสารประกอบต่างๆ โดยเป็นความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และ Relative Intensity นำกราฟที่ได้ไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี ซึ่งทำให้สามารถระบุสารประกอบโลหะหนักแต่ละชนิดได้

2) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี (Chemical Composition)

การวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของเม็คปูนในรูปออกไซด์ ด้วยเครื่อง XRF (X-ray Fluorescence) นำตัวอย่างปริมาณ 5 กรัม ผสมกรดบอริกร้อยละ 5 ของน้ำหนักตัวอย่าง บดให้ละเอียดแล้วนำไปใส่แบบพิมพ์ กดให้แน่น จากนั้นนำตัวอย่างในแบบพิมพ์ไปวิเคราะห์

3) ความชื้น (Moisture Content) และค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Lost on Ignition)

ค่าความชื้นและค่าการสูญเสียน้ำหนักจะทำการทดลองทั้งตัวอย่างที่ผสม โลหะหนักและตัวอย่างควบคุม ค่าความชื้นจะทำโดยการนำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วหาอัตราส่วนของปริมาณน้ำที่หายของปริมาณน้ำทั้งหมดหลังจากการอบ ตามสมการ

$$\% \text{ ความชื้น} = (\text{น้ำหนักก่อนอบ} - \text{น้ำหนักหลังอบ}) \times 100 / \text{น้ำหนักก่อนอบ}$$

ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผา แสดงถึงปริมาณของคาร์บอนที่มีในตัวอย่าง จะทำโดยนำตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ 950±50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ค่าการสูญเสียจะมีค่าตามสมการ

$$\text{ค่าการสูญเสียน้ำหนัก} = (\text{น้ำหนักก่อนเผา} - \text{น้ำหนักหลังเผา}) / \text{น้ำหนักทั้งหมดก่อนหาค่าความชื้น}$$

4) ศึกษาปริมาณสารโลหะหนัก

ศึกษาปริมาณสารโลหะหนักในเม็ดปุ๋ย ทำการทดลองโดยใช้เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer) ทั้งนี้ต้องนำตัวอย่างไปย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตามมาตรฐาน US EPA SW-846 Method 3052 เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นของเหลวใส ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง ICP ซึ่งวิธีการย่อยสลายสารมีขั้นตอนดังนี้

- (1) นำตัวอย่างที่บดแล้ว 0.5 ± 0.0001 กรัม เติมกรด HNO₃ 9 ± 0.1 มิลลิลิตร
- (2) เติม HF 4 ± 0.1 มิลลิลิตร แล้วเติม HCL 2 ± 2 มิลลิลิตร
- (3) นำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟครั้งที่ 1 โดยตั้งอุณหภูมิเป็น 3 ช่วงดังนี้
 - ช่วงที่ 1 เพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึง 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5.5 นาที
 - ช่วงที่ 2 คงอุณหภูมิที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9.5 นาที
 - ช่วงที่ 3 ลดอุณหภูมิจาก 180 ถึง 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-15 นาที
- (4) นำตัวอย่างออกจากเครื่องย่อยสลาย แล้วทำให้เย็นทำอุณหภูมิห้อง (สามารถใช้น้ำแข็งหล่อเย็นได้)
- (5) เติมกรด H₃BO₃ 0.87 โมลาร์ 37 มิลลิลิตร
- (6) นำเข้าเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟครั้งที่ 2 โดยการตั้งอุณหภูมิเป็น 3 ช่วงดังนี้
 - ช่วงที่ 1 เพิ่มอุณหภูมิจาก 0 ถึง 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 13 นาที
 - ช่วงที่ 2 คงอุณหภูมิที่ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
 - ช่วงที่ 3 ลดอุณหภูมิจาก 160 ถึง 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-15 นาที
- (7) นำออกจากเครื่องย่อยสลาย รอให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำตัวอย่างมากรองด้วยกระดาษ 0.45 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง ICP

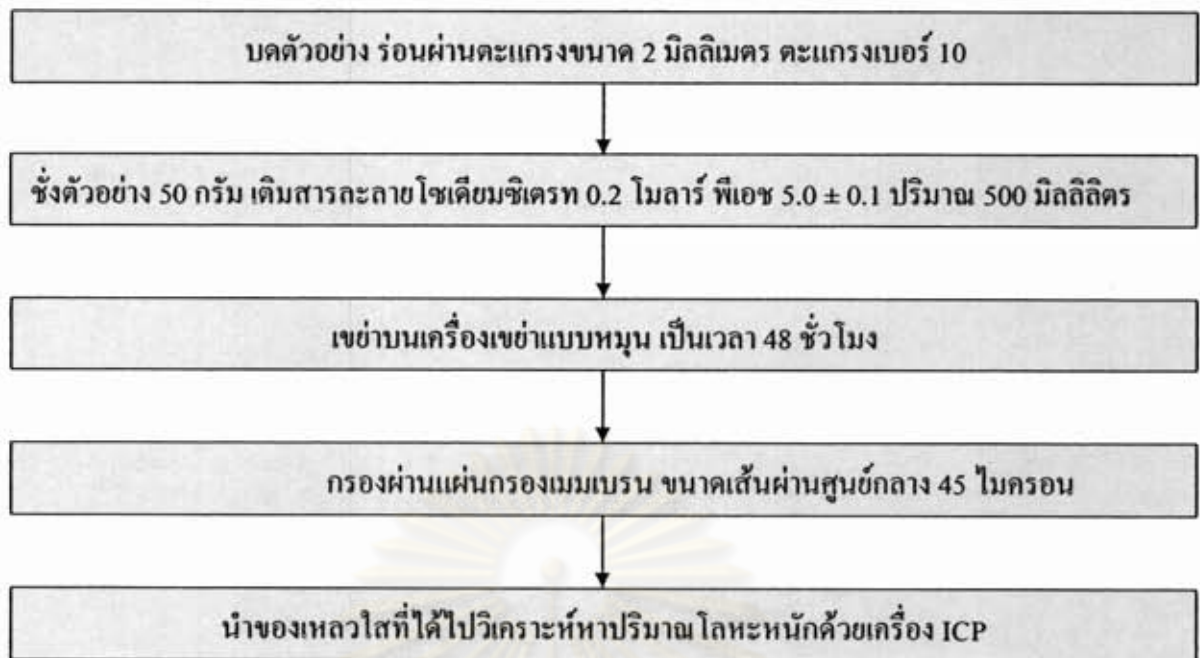


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายด้วยไมโครเวฟ ตามมาตรฐาน US EPA SW-846 Method 3052

5) การทดสอบการชะละลาย (Leaching Test)

มาตรฐานการชะละลายตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พ.ศ. 2548 ด้วยวิธี WET (Waste Extraction Test) จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

- (1) บดตัวอย่าง ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มิลลิเมตร ตะแกรงเบอร์ 10
- (2) ชั่งตัวอย่าง 50 กรัม เติมน้ำละลายโซเดียมซิเตรท 0.2 โมลาร์ พีเอช 5.0 ± 0.1 ปริมาณ 500 มิลลิลิตร
- (3) เขย่าบนเครื่องเขย่าแบบหมุน เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
- (4) กรองผ่านแผ่นกรองเมมเบรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 ไมครอน
- (5) นำของเหลวใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ โลหะหนักด้วยเครื่อง ICP



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการทดสอบการชะละลายมาตรฐานประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

3.7.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า

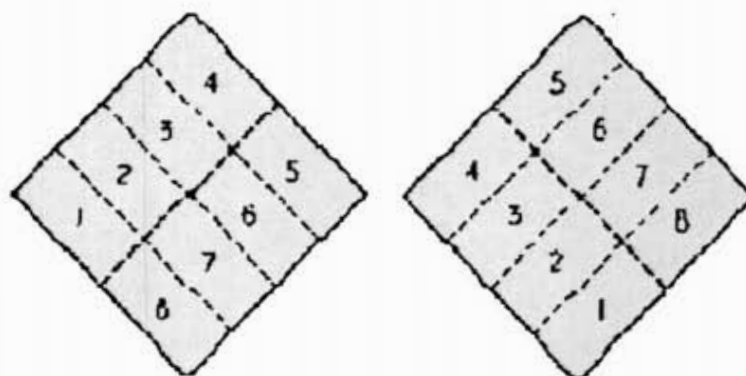
การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า ทำตามมาตรฐาน ASTM C 109/C109M-05 จะมีวิธีการดังนี้

- (1) นำเม็ดปูนที่ผ่านการบดแล้วผสมกับยิปซัม โดยอัตราส่วนผงปูนต่อยิปซัม เท่ากับ 96 ต่อ 4
- (2) นำเม็ดปูนที่ผสมยิปซัมแล้วผสมกับทรายที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2.75 และนำไปผสมน้ำที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.485 ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ปริมาณซีเมนต์ ทราย และน้ำ สำหรับแบบหล่อก้อนมอร์ต้าจำนวน 6 ก้อน

ซีเมนต์ (กรัม)	500
ทราย (กรัม)	1375
น้ำ (มิลลิลิตร)	242

- (3) ผสมให้เข้ากัน เทลงในแบบหล่อขนาด 5x5x5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยแบ่งการเท ออกเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกหนาประมาณ 25 มิลลิเมตร แล้วกระทุ้งด้วยแท่งกระทุ้ง 32 ครั้งใน 10 วินาที โดยการกระทุ้งแบ่งเป็น 4 รอบ จะกระทุ้งดังรูปที่ 3.9



รอบที่ 1 และ 3

รอบที่ 2 และ 4

รูปที่ 3.9 ลักษณะการกระทุ้งก้อนมอร์ต้า

- (4) เมื่อกระทุ้งครบทุกช่องแล้วให้เทซีเมนต์มอร์ต้าที่เหลือลงในแบบหล่อให้เต็ม แล้วทำการกระทุ้งเช่นเดียวกับชั้นแรก เมื่อกระทุ้งเสร็จแล้วให้ซีเมนต์มอร์ต้าสูงกว่า แบบหล่อเล็กน้อย
- (5) ใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบ
- (6) ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ก่อนและแบบออก จากนั้นนำไปบ่มชั้นที่ระยะเวลา 3 7 และ 28 วัน
- (7) นำไปทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด แล้วนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าตามมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548

อายุของก้อนมอร์ต้า (วัน)	ค่ามาตรฐานกำลังรับแรงอัด (kg/cm ²)	ความคลาดเคลื่อนของอายุที่ยอมให้ได้ (ชั่วโมง)
7	150	±3
28	245	±12

3.8 อุปกรณ์และสารเคมี

3.8.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

- (1) เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อยส่วน
- (2) ท่อสแตนเลส
- (3) เครื่อง โม่ปูนซีเมนต์
- (4) V-mix machine
- (5) เครื่องย่อยขนาดเม็ดปูนแบบเหวี่ยง
- (6) เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดก้อนมอร์ต้า
- (7) เครื่องย่อยขนาดเม็ดปูน
- (8) เครื่องตรวจวัด XRD และ XRF

3.8.2 สารเคมี

- (1) HNO_3
- (2) H_3BO_3
- (3) HCL
- (4) โซเดียมซัลเฟต
- (5) ไตรอีนทอนอลาไมน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลวิเคราะห์ วัตถุดิบก่อนทำการทดลอง

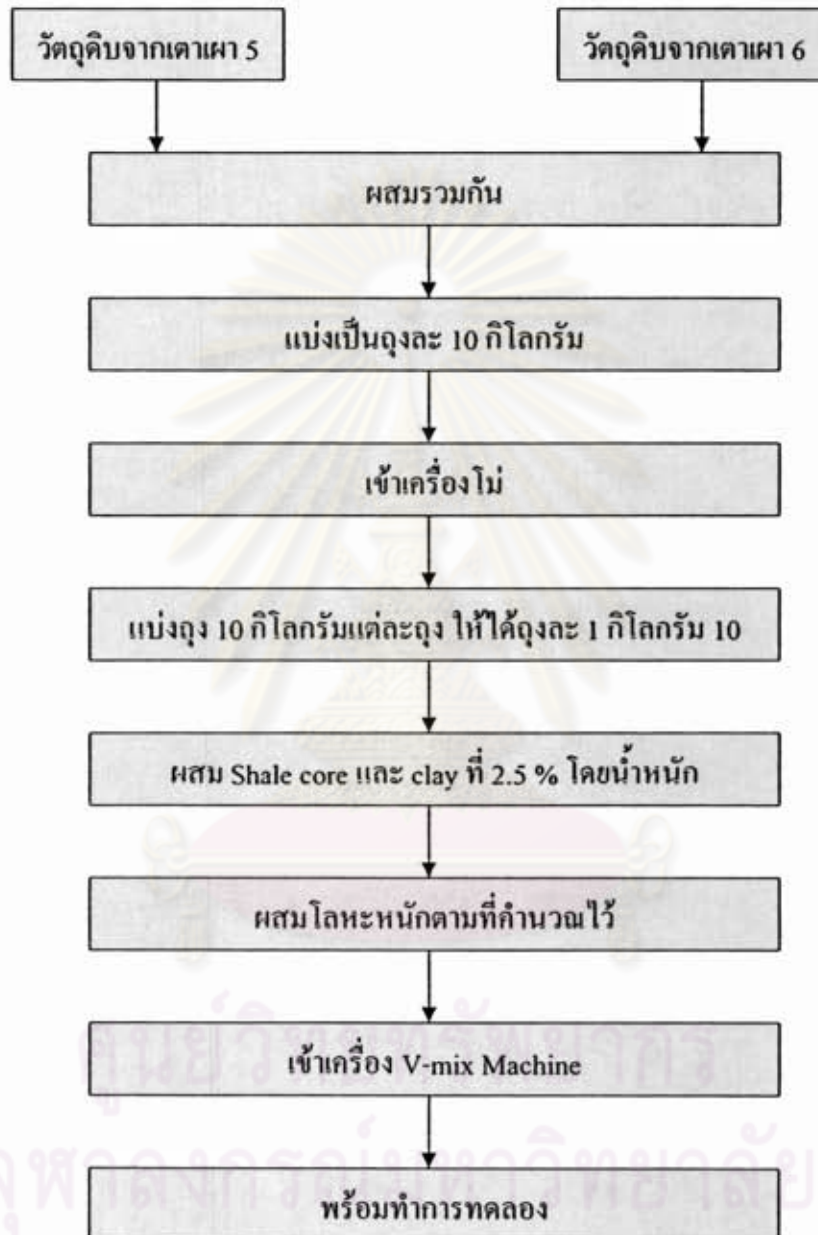
4.1.1 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF

จากการทดลองได้เตรียมวัตถุดิบ (Kiln feed) จากเตาเผา 5 (K5) และ 6 (K6) จากโรงงาน 3 จึงทำให้ได้วัตถุดิบที่มีองค์ประกอบแตกต่างกัน และผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ของวัตถุดิบทั้งสองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบ

สารประกอบ (ร้อยละ)	วัตถุดิบจากเตาเผา 5 โรงงาน 3	วัตถุดิบจากเตาเผา 6 โรงงาน 3
SiO ₂	13.33	12.64
Al ₂ O ₃	2.89	3.010
Fe ₂ O ₃	2.04	2.05
CaO	44.04	44.61
MgO	1.06	0.93
K ₂ O	0.31	0.34
Na ₂ O	0.07	0.03
SO ₃	0.18	0.20
P ₂ O ₅	0.06	0.06
Cl	0.01	0.01
TiO ₂	0.15	0.14
Mn ₂ O ₃	0.04	0.04
SUM	99.88	99.98
LSF	104.76	110.81
Silica Modulus (SM)	2.71	2.50
Alumina Modulus (AM)	1.40	1.47
Loss on Ignition	35.72	36.07

เนื่องจากการเก็บวัตถุดิบนั้นมีการเก็บกันที่ต่าง โรงงานและต่างช่วงเวลา กัน ทำให้ต้องการปรับให้ มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน โดยขั้นตอนการผสมให้เข้ากัน จากนั้นทำการแบ่งให้มีปริมาณที่ต้องใช้ในการ ผสมกับ โลหะหนัก ขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

โดยวัตถุดิบหลังจากการแบ่งเป็นถุง ถุงละ 10 กิโลกรัม แล้ว ยังต้องมีการปรับค่า LSF เนื่องจากวัตถุดิบที่ทำการเก็บมานั้น มีค่า LSF อยู่ที่ประมาณ 104 – 110 เพราะว่าเชื้อเพลิงของเตาเผาที่ใช้ในการทดลองนั้น ใช้แก๊ส LPG ทำให้ค่า LSF ไม่ลดลงกระบวนการเผาจึงไม่สมบูรณ์ ต่างจากเตาเผาจริงที่ใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงทำให้ค่า LSF ลดลง จึงต้องมีการลดค่า LSF ให้มีค่าอยู่ที่ประมาณ 95 – 96 โดยจะทำการนั้นจะใช้การเติมหินเชล (Shale Core) และดินเหนียว (Clay) ที่ปริมาณ 2.5% โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบที่แบ่งเป็นถุงละ 10 กิโลกรัม แล้วจะแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ของวัตถุดิบหลังจากแบ่งเป็นถุงละ 10 กิโลกรัม

สารประกอบ	วัตถุดิบ (ร้อยละ)
SiO ₂	13.23
Al ₂ O ₃	2.86
Fe ₂ O ₃	2.12
CaO	44.06
MgO	0.96
K ₂ O	0.33
Na ₂ O	0.05
SO ₃	0.22
P ₂ O ₅	0.06
Cl	0.01
TiO ₂	0.14
Mn ₂ O ₃	0.04
SUM	99.71
LSF	105.41
Silica Modulus (SM)	2.65
Alumina Modulus (AM)	1.35
Loss on Ignition	35.62

การผสมหินเชล (Shale core) และ ดินเหนียว (clay) ที่ 2.5% โดยน้ำหนักของวัตถุดิบ โดยจะผสมในขั้นตอนที่แบ่งวัตถุดิบเป็นถุงละ 1 กิโลกรัม นั่นก็คือที่ 25 กรัม ตารางที่ 4.3 แสดงผลวิเคราะห์ XRF ของหินเชล ดินเหนียว และผสมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน ที่อัตราส่วน 5:4 (Shale core: Clay) ก่อนที่จะนำไปผสมกับวัตถุดิบ ไปทำให้ได้วัตถุดิบที่เหมาะสมกับการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ของหินเชล ดินเหนียว และผสมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน

สารประกอบ (ร้อยละ)	หินเชล	ดินเหนียว	หินเชล:ดินเหนียว (5:4)
SiO ₂	76.17	35.21	57.86
Al ₂ O ₃	11.20	29.22	18.38
Fe ₂ O ₃	5.49	13.10	7.51
CaO	3.67	1.21	3.71
MgO	0.70	0.35	0.58
K ₂ O	1.78	0.001	1.11
Na ₂ O	0.09	0.001	0.01
SO ₃	0.16	0.03	0.12
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.09
Cl	0.001	0.001	0.001
TiO ₂	0.50	1.42	0.78
Mn ₂ O ₃	0.06	0.09	0.06
SUM	103.54	82.02	93.75
LSF	1.60	0.86	1.97
Silica Modulus (SM)	4.56	0.83	2.24
Alumina Modulus (AM)	2.04	2.23	2.45
Loss on Ignition	3.65	1.33	3.55

ตารางที่ 4.4 แสดงผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ของวัตถุดิบหลังจากผสมหินเซลและดินเหนียว 2.5% โดยน้ำหนัก ก่อนที่จะนำไปผสมกับโลหะหนัก จะเห็นได้ว่าค่า LSF ที่ได้คือ 94.57 ซึ่งเหมาะสมกับการทดลอง และจะทำให้กระบวนการเผาสมบูรณ์

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ด้วยเครื่อง XRF ของวัตถุดิบที่ผสมหินเซลและดินเหนียวแล้ว

สารประกอบ	วัตถุดิบ (ร้อยละ)
SiO ₂	14.35
Al ₂ O ₃	3.29
Fe ₂ O ₃	2.30
CaO	43.10
MgO	0.97
K ₂ O	0.34
Na ₂ O	0.05
SO ₃	0.23
P ₂ O ₅	0.06
Cl	0.01
TiO ₂	0.16
Mn ₂ O ₃	0.04
SUM	99.78
LSF	94.57
Silica Modulus (SM)	2.57
Alumina Modulus (AM)	1.43
Loss on Ignition	34.88

4.1.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง ICP

แต่อย่างไรก็ตาม โดยปกติวัตถุคิบนั้น จะมีโลหะหนักเป็นส่วนผสมอยู่แล้ว แต่มีในปริมาณที่น้อย จึงไม่แสดงผลอะไรในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณโลหะหนักที่อยู่ในวัตถุคิบบก่อนการผสมโลหะหนักซึ่งทำการตรวจวัดโดยใช้เครื่อง ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometer) ทั้งนี้ต้องนำตัวอย่างไปย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ (Microwave Digester) ตามมาตรฐาน US EPA SW-846 Method 3052 ดังที่แสดงไว้ในบทที่ 3

ตารางที่ 4.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณ โลหะหนักของวัตถุคิบบ

โลหะหนัก	ปริมาณ (ร้อยละ)
Cr	23.6
Cu	102
Zn	326
Ni	10.7
As	13
Se	N/D
Ba	62.6
Pb	14.1
V	16.9
Sb	N/D
Tl	1.18
Cd	0.1
Hg	N/D
Ca	33370
Al	4602
Fe	10170

โดยในขั้นตอนนี้ต่อไปจะเป็นการผสมโลหะหนักและกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่ได้กำหนดไว้ โดยทำการผสมหลังจากการผสมหินเชลและดินเหนียว จากนั้นทำการทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง V-mix machine เพื่อให้วัสดุดิบและโลหะหนักเป็นเนื้อเดียว ทำการผสมให้ได้ในปริมาณตุลละ 1 กิโลกรัม จำนวน 10 ตุล รวมเป็น 10 กิโลกรัม ในแต่ละค่าความเข้มข้นของโลหะหนักที่ตั้งไว้ และทำการตรวจวัดปริมาณของโลหะหนักในวัสดุดิบที่ผสมโลหะหนักแล้ว ตามมาตรฐาน US EPA SW-846 Method 3052 ตารางที่ 4.6 ถึง 4.9 แสดงปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้ในวัสดุดิบที่ผสมโลหะหนักแล้ว

ตารางที่ 4.6 ปริมาณโลหะหนัก Cr:Cu:Ni ในวัสดุดิบ

โลหะหนัก Cr:Cu:Ni	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	1439 : 1587 : 2497
1.0 %	3248 : 3416 : 5043
2.5 %	8467 : 7670 : 11410
5.0 %	17362 : 14810 : 25880

ตารางที่ 4.7 ปริมาณโลหะหนัก Cr:Pb:Zn ในวัสดุดิบ

โลหะหนัก Cr:Pb:Zn	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	253 : 737 : 2026
1.0 %	586 : 1685 : 12970
2.5 %	1547 : 5367 : 9513
5.0 %	2918 : 8078 : 18350

ตารางที่ 4.8 ปริมาณโลหะหนักจากกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ในวัสดุดิบ

ตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Cr:Cu:Ni)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	60.56 : 140.5 : 848
1.0 %	60.18 : 127.7 : 889
2.5 %	60.60 : 143.1 : 996
5.0 %	57.94 : 149.3 : 1219

ตารางที่ 4.9 ปริมาณ โลหะหนักจากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็กในวัตถุดิบ

ตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก (Cr:Pb:Zn)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	82.46 : 80.45 : 1002
1.0 %	117.7 : 153.96 : 2005
2.5 %	146.46 : 314.14 : 4514
5.0 %	243.56 : 638.79 : 9469

ตารางที่ 4.10 และ 4.11 แสดงปริมาณ โลหะหนักที่ตรวจวัดในกากตะกอนทั้งสองชนิดก่อนนำไปผสมกับวัตถุดิบ

ตารางที่ 4.10 ปริมาณ โลหะในกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

โลหะหนัก	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Ti	Tl	V	Zn
ปริมาณ (mg/kg)	<25	<25	<25	<25	4,928	1,406	<25	180	4,200	291	<25	194	<25	<25	<25	11,193

ตารางที่ 4.11 ปริมาณ โลหะในกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

โลหะหนัก	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Ti	Tl	V	Zn
ปริมาณ (mg/kg)	98	95	334	127	2,780	1,056	<25	5,985	289	6,471	<25	1,177	660	107	<25	>50,000

4.1.3 ผลวิเคราะห์ค่าความชื้น (MC) และการสูญเสียน้ำหนัก (LOI)

การวิเคราะห์ค่าความชื้น (Moisture Content) และการสูญเสียน้ำหนัก (Loss on Ignition) นั้นสามารถทำให้รู้คร่าวๆ ได้ว่า ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ที่ใช้ความร้อนสูงนั้น จะมีการสูญหายไปของมวลของวัตถุดิบหรือไม่ เนื่องจากในการทดลองอุณหภูมิที่ใช้สูง แต่การวิเคราะห์ค่าทั้งสองนี้ใช้อุณหภูมิที่น้อยกว่า โดยค่าความชื้นที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่หายไป และค่าการสูญเสียน้ำหนักซึ่งคือปริมาณมวลสารที่หายไป โดยค่าความชื้นของตัวอย่างควบคุมอยู่ 0.21% และการสูญเสียน้ำหนักอยู่ที่ 4.79% ค่าความชื้นของโลหะหนัก Cr:Cu:Ni อยู่ที่ 1.03% ค่าความชื้นของโลหะหนัก Cr:Pb:Zn อยู่ที่ 0.21% ค่าความชื้นของตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ที่ 0.18% และค่าความชื้นของตะกอนโรงงานหลอมเหล็ก อยู่ที่ 0.27 % ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Cu:Ni อยู่ที่ 5.09% ค่าการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Pb:Zn อยู่ที่ 6.10% ค่าการสูญเสียน้ำหนักที่มากขึ้นเนื่องมาจาก จุดหลอมเหลวของ Pb และ Zn อยู่ที่ 962 และ 907 ตามลำดับ ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อยู่

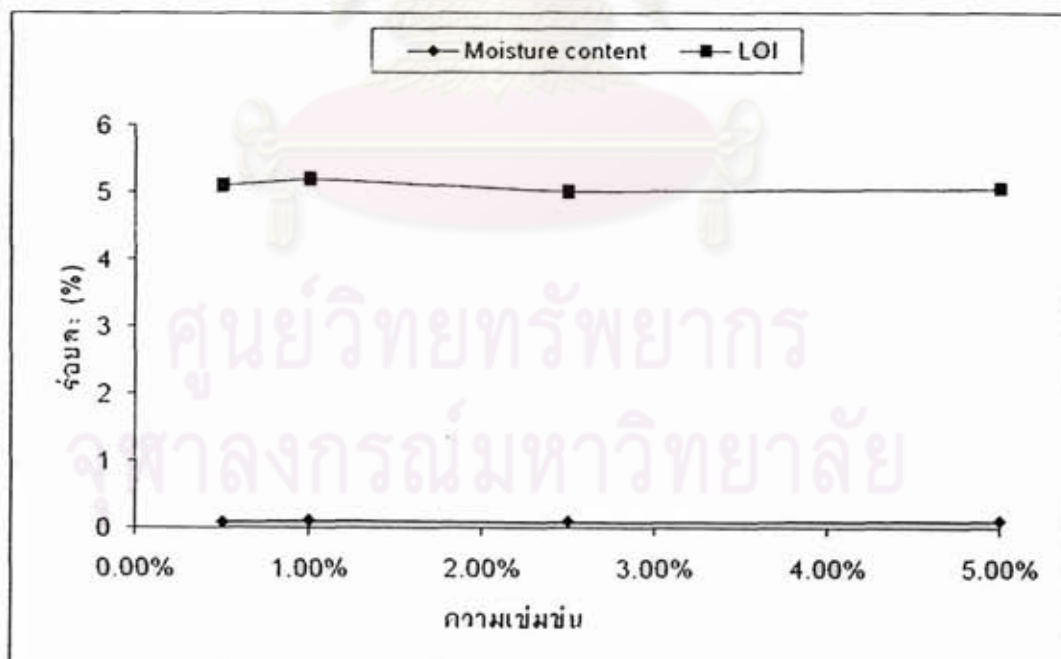
ที่ 6.8% และ ค่าการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก อยู่ที่ 7.8% ได้ค่าที่สูงเนื่องจากกากตะกอนมีส่วนผสมของ Pb และ Zn ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.12 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างควบคุม

วัตถุดิบ	ค่าความชื้น (%)	การสูญเสียน้ำหนัก (%)
ตัวอย่างควบคุม	0.21	4.79

ตารางที่ 4.13 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Cu:Ni

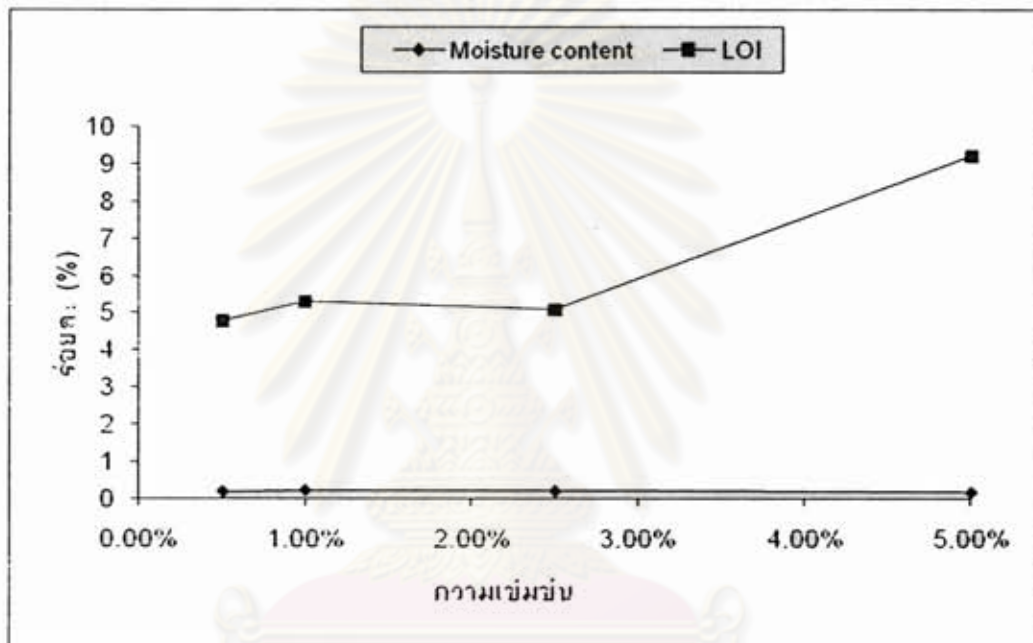
โลหะหนัก Cr:Cu:Ni	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.09	5.10
1.0 %	0.11	5.20
2.5 %	0.10	5.00
5.0 %	0.11	5.05
Average	0.10	5.09



รูปที่ 4.2 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Cu:Ni

ตารางที่ 4.14 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Pb:Zn

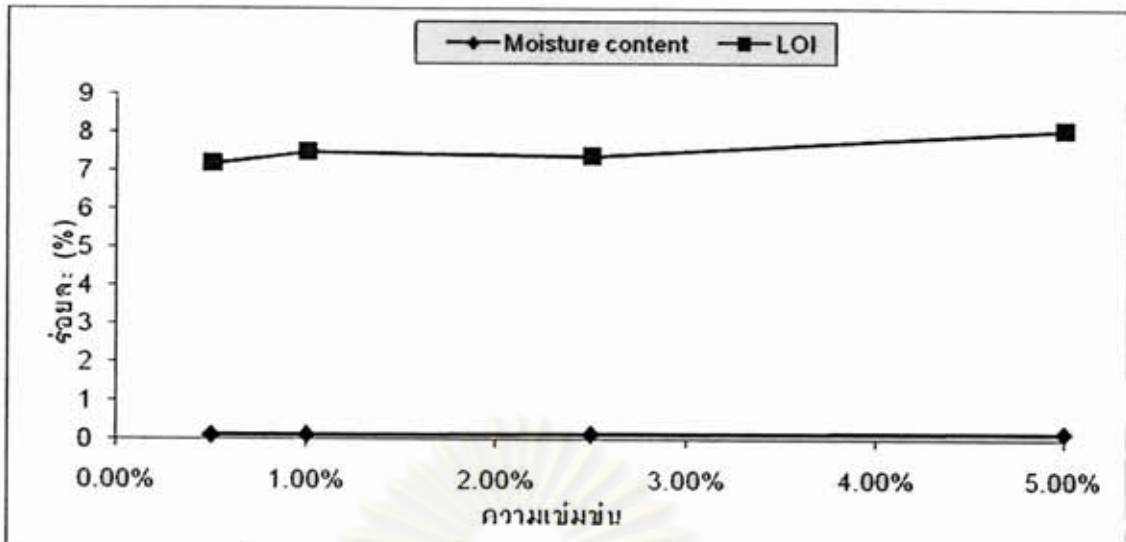
โลหะหนัก Cr:Pb:Zn	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.20	4.80
1.0 %	0.24	5.31
2.5 %	0.22	5.10
5.0 %	0.18	9.21
Average	0.21	6.10



รูปที่ 4.3 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Pb:Zn

ตารางที่ 4.15 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

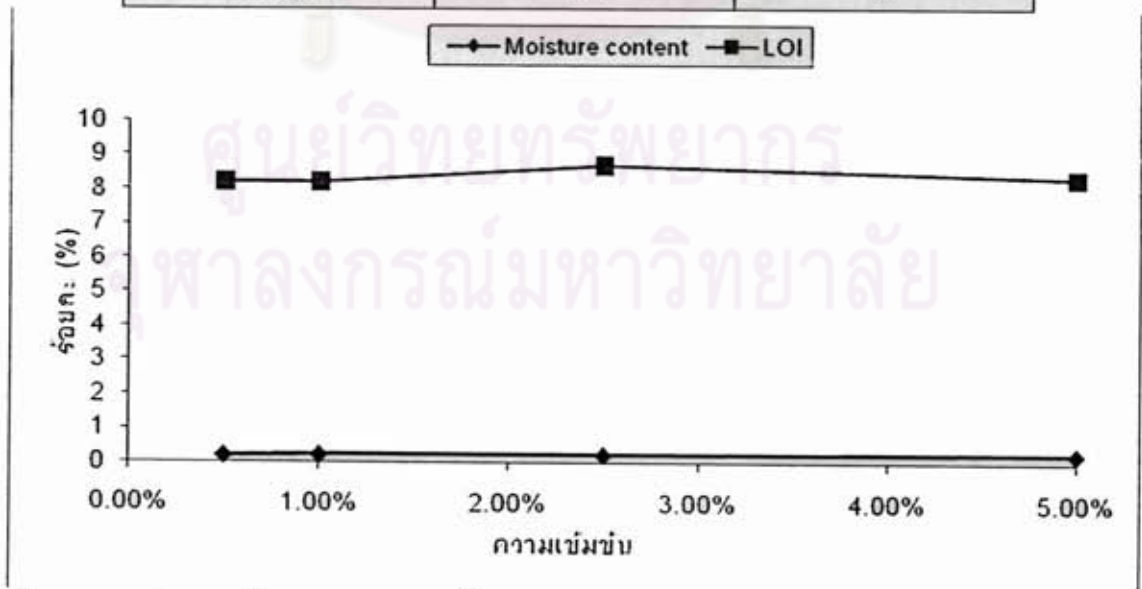
ตะกอนโรงงาน อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.15	6.5
1.0 %	0.19	6.7
2.5 %	0.18	6.8
5.0 %	0.2	7.2
Average	0.18	6.8



รูปที่ 4.4 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอน โรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 4.16 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนจาก โรงงานหลอมเหล็ก

ตะกอนจากโรงงาน หลอมเหล็ก	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.21	7.3
1.0 %	0.26	7.4
2.5 %	0.28	7.9
5.0 %	0.33	8.6
Average	0.27	7.8

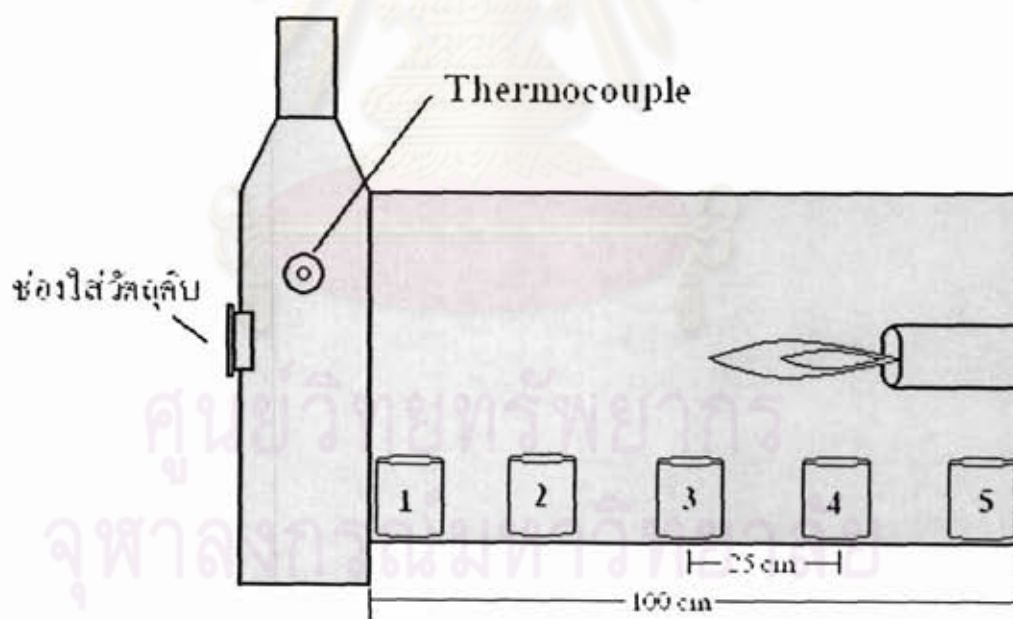


รูปที่ 4.5 กราฟค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนจาก โรงงานหลอมเหล็ก

จากผลการวิเคราะห์ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักแล้ว ทำให้เห็นว่าวัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมทั้งสองชนิดนั้นมีค่าที่สูงกว่า วัตถุดิบที่ผสมโลหะหนักออกไซด์ ซึ่งเป็นผลมาจากที่ภาคตะกอนโลหะหนักนั้นมีปริมาณของโลหะหนักชนิดอื่นที่เป็นตัวทำให้ค่าที่ได้สูงกว่าปกติ เช่น Zn ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ 907 องศาเซลเซียส จึงทำให้กระบวนการเผาในเตาเผา นั้นสูญเสียปริมาณของโลหะหนักไปจำนวนหนึ่ง เพราะในกระบวนการทดลองนั้น ใช้อุณหภูมิที่มากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส

4.2 กระบวนการเผาในเตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน (Burning process in pilot-scale rotary cement kiln)

ก่อนทำการทดลองเผาปูนซีเมนต์นั้น ได้มีการทดสอบ และวัดอุณหภูมิ ของเตาเผา นี้ โดยการทดสอบจะใช้ถ้วยบรรจุวัตถุดิบจำนวน 5 ถ้วย ด้วยละปริมาณ 1 กิโลกรัม จากนั้นนำไปวางไว้ในเตาเผาเรียงตามแนวยาวให้ได้ระยะห่างระหว่างถ้วยนั้นเท่ากับ 25 เซนติเมตร และจะดำเนินการทดลองแบบไม่หมุนเตา (Static Process) โดยจะทำการตรวจว่า ที่ตำแหน่งในเตาเผาให้ความร้อนที่สูงสุดและทำให้เม็ดปูนสุก ส่วนการวัดอุณหภูมิ นั้น จะมีเครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) อยู่บริเวณทางป้อนวัตถุดิบ อุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ 1150-1200 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิภายในเตา จากรูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งการวางถ้วยและ thermocouple



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการวางถ้วยและ thermocouple ในเตาเผา

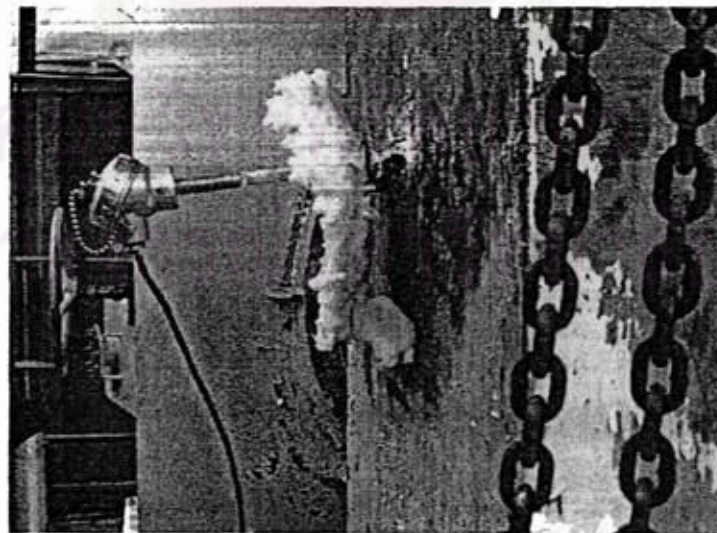
หลังจากทำการเผาแบบ Static แล้วทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณของ C_3S C_2S C_3A C_4AF และปูนขาวอิสระ เพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่ใช้กระบวนการเผาปูนซีเมนต์ จากการทดลองพบว่าจุดที่ 3-4 ได้ผลการทดลองที่เหมาะสมกว่าจุดอื่นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบริเวณจุดอื่นๆ อุณหภูมิอาจไม่สูงพอในการทำให้ปูนสุกได้ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.17 ผลวิเคราะห์การทดลองเผาแบบ Static

จุด	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	ปูนขาวอิสระ (%)
1	75.54	3.26	10.54	8.57	6.03
2	70.03	5.56	11.87	8.95	3.92
3	62.13	16.53	7.68	10.33	0.69
4	65.20	13.72	7.49	10.22	0.73
5	58.49	21.05	7.77	10.35	2.64
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งการวางถ้วยในเตาเผา



รูปที่ 4.8 Thermocouple บริเวณด้านข้างของช่องใส่วัสดุดิบ

เมื่อได้จุดที่เหมาะสมจึงทำการเริ่มทำการทดลองโดยเริ่มจาก การป้อนวัตถุดิบที่เป็นตัวอย่างควบคุมไปยังบริเวณที่ตั้งไว้ จากนั้นทำตามกระบวนการทดลอง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ ได้ผลดังตารางที่ 4.18 เห็นได้ว่าค่าทุกค่าอยู่ในค่ามาตรฐานของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ทำให้สรุปได้ว่าเตาเผาสามารถใช้งานได้จริง

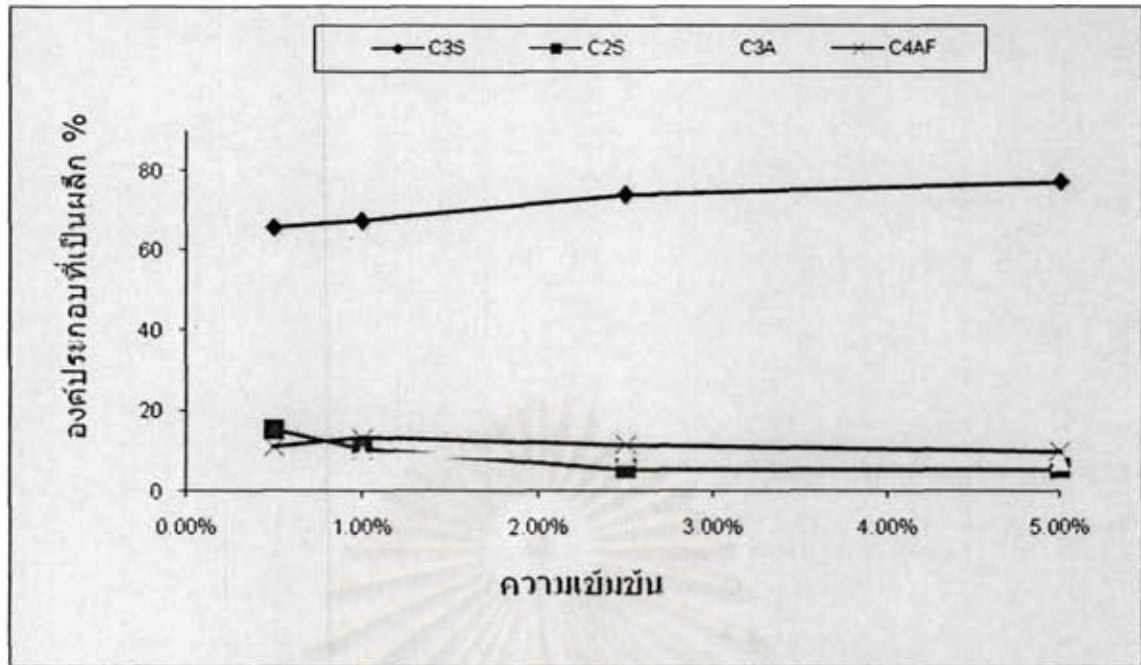
ตารางที่ 4.18 ผลวิเคราะห์เม็ดปูนของตัวอย่างควบคุม

เม็ดปูน (Clinker)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	ปูนขาวอิสระ (%)
ตัวอย่างควบคุม	64.41	10.45	7.62	10.25	1.46
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

4.3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมี (XRD และ XRF)

4.3.1 วัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

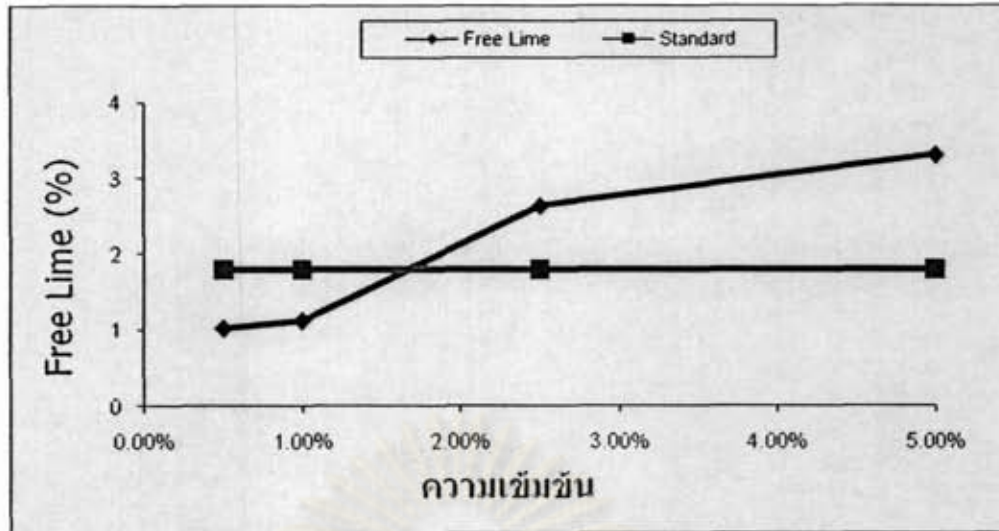
ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมี โดยจะตรวจทั้งวัตถุดิบที่ไม่ได้ผสมโลหะหนัก และวัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก ซึ่งตรวจพบว่าวัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) จะเห็นว่า C₃S นั้นเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าของ C₂S นั้นกลับลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยที่ผ่านมา Tenorio และคณะ (2000) ได้พบว่าการเพิ่ม Cr ที่ 2 % โดยน้ำหนักนั้นไม่มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และในการทดลองนี้ได้พบว่า การเพิ่มโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 % โดยน้ำหนัก นั้นไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ แต่ดูจากแนวโน้มของการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นแล้ว โดยถ้าเพิ่มความเข้มข้น จะทำให้ปริมาณของ C₃S นั้นเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ปริมาณของ C₂S นั้นลดลง ส่วน C₃A และ C₄AF นั้นมีปริมาณค่อนข้างคงที่ และที่ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก ปริมาณของปูนขาวอิสระนั้นอยู่ในค่ามาตรฐานของ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)



รูปที่ 4.9 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตารางที่ 4.19 องค์ประกอบที่เป็นผลึกและ ปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	65.92	15.26	7.78	11.04	1.03
1.0 %	67.54	10.40	8.83	13.23	1.13
2.5 %	74.04	5.45	8.98	11.53	2.64
5.0 %	77.11	5.50	7.44	9.95	3.31
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8



รูปที่ 4.10 กราฟปูนขาวอิสระของวัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) เทียบกับมาตรฐาน

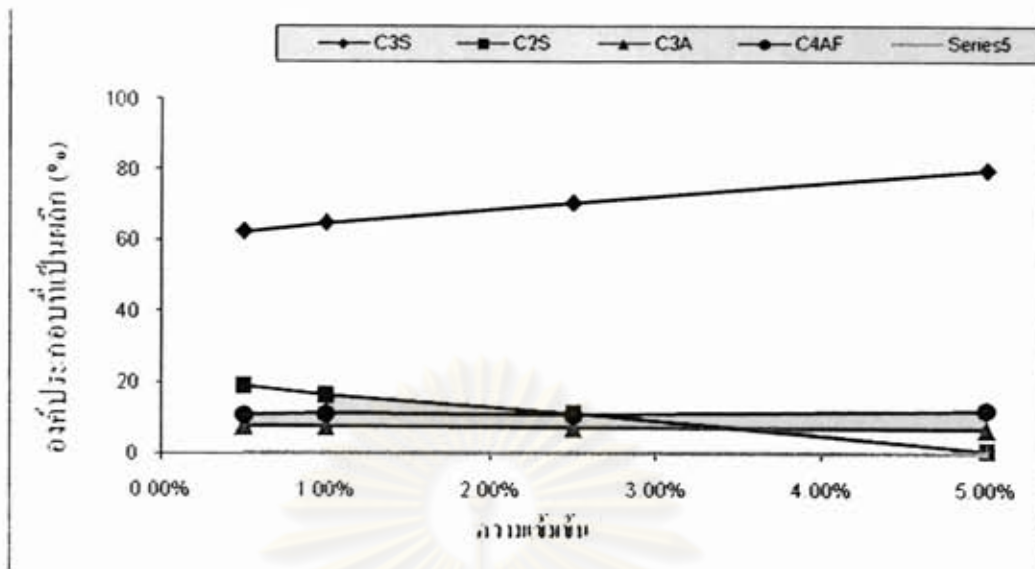
และตารางที่ 4.20 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของ Cr:Cu:Ni (1:1:1) แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นไม่เกิน 1.0 % โดยน้ำหนัก ค่าที่ได้นั้นไม่ต่างจากค่ามาตรฐานมากนัก

ตารางที่ 4.20 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุคืบที่ผสม Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	21.55	5.00	3.45	65.10	95.04	2.54	1.44
1.0 %	19.91	5.69	4.05	63.43	97.41	2.04	1.40
2.5 %	19.23	5.23	3.41	62.10	99.75	2.22	1.53
5.0 %	17.40	4.64	3.10	59.20	105.26	2.24	1.49
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

4.3.2 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

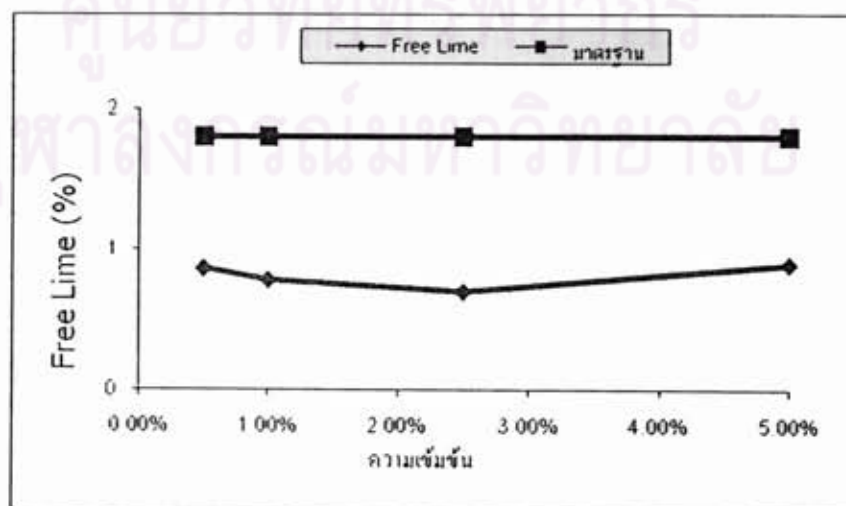
วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ได้ผลวิเคราะห์ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะหนัก จะทำให้ C₃S มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นไปถึง 5.0 % โดยน้ำหนักทำให้เกินมาตรฐาน ส่วน C₂S นั้นที่ความเข้มข้นไม่เกิน 1.0 % โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐาน แต่ที่ความเข้มข้น 2.5 % โดยน้ำหนัก อยู่ในค่ามาตรฐานและมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ส่วน C₃A และ C₄AF นั้นค่อนข้างคงที่ การลดลงของ C₃S มีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณ Cr และการลดลงของ C₂S เป็นผลมาจากการเพิ่มปริมาณของ Zn Andrade และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษา วานเดียม (V) สังกะสี (Zn) และ ตะกั่ว (Pb) ที่ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนักของวัสดุคืบ พบว่าความสามารถในการเผาเพิ่มขึ้นถ้าปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้น (2.5 – 5.0 %) ส่วนปริมาณปูนขาวอิสระไม่เกินค่ามาตรฐานทุกความเข้มข้น



รูปที่ 4.11 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตารางที่ 4.21 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Pb:Zn (1:4:13)

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	62.48	19.00	7.69	10.83	0.86
1.0 %	64.95	16.39	7.57	11.08	0.78
2.5 %	70.64	11.38	7.10	10.89	0.70
5.0 %	80.10	0.82	6.88	12.20	0.89
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8



รูปที่ 4.12 กราฟปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) เทียบกับมาตรฐาน

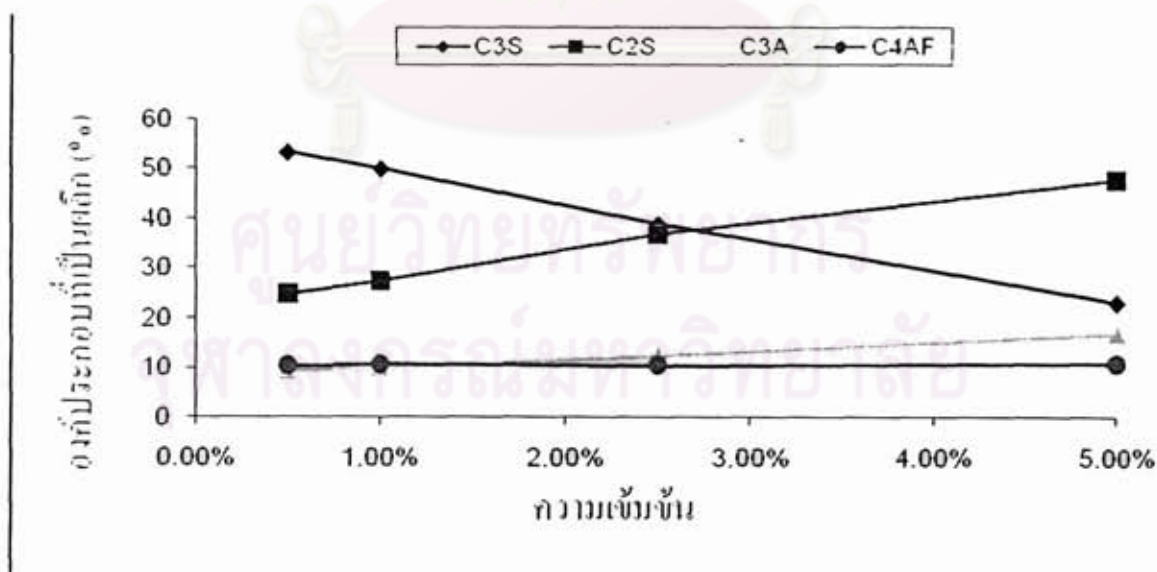
ตารางที่ 4.22 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของของ Cr:Pb:Zn (1:4:13) แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นไม่เกิน 2.5 % โดยน้ำหนัก ค่าที่ได้นั้นไม่ต่างจากค่ามาตรฐานมากนัก

ตารางที่ 4.22 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Pb:Zn(1:4:13 ที่ความเข้มข้นต่างกัน)

ความเข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	22.43	4.97	3.41	65.46	93.41	2.63	1.45
1.0 %	21.57	4.96	3.49	64.72	99.44	2.54	1.42
2.5 %	20.69	4.55	3.28	63.23	96.59	2.63	1.38
5.0 %	18.09	4.49	3.49	59.55	102.24	2.26	1.28
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

4.3.3 วัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอนของโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

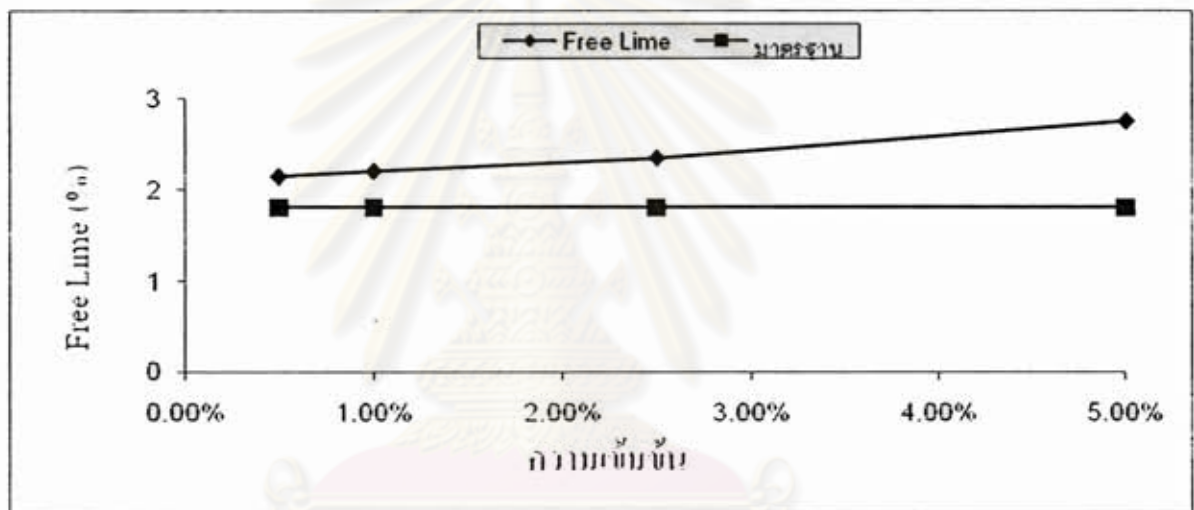
วัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอนของโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อดูจากผลวิเคราะห์แล้วเมื่อความเข้มข้นของภาคตะกอนเพิ่มมากขึ้น ค่า C₃S มีแนวโน้มที่น้อยลง C₂S เพิ่มขึ้น C₃A เพิ่มขึ้นและ C₄AF จะคงที่ แต่เมื่อดูจากค่าที่ได้ทั้งหมด การผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้กระบวนการเผาปูนซีเมนต์ไม่สมบูรณ์ทุกๆความเข้มข้น และค่าปูนขาวอิสระก็มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานด้วย



รูปที่ 4.13 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัตถุดิบที่ผสม ภาคตะกอน โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตารางที่ 4.23 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอน โรงงาน อิเล็กทรอนิกส์

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	53.18	24.80	9.29	10.33	2.14
1.0 %	49.91	27.37	10.02	10.62	2.20
2.5 %	38.60	36.66	12.51	10.36	2.34
5.0 %	22.88	47.57	16.82	10.66	2.75
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

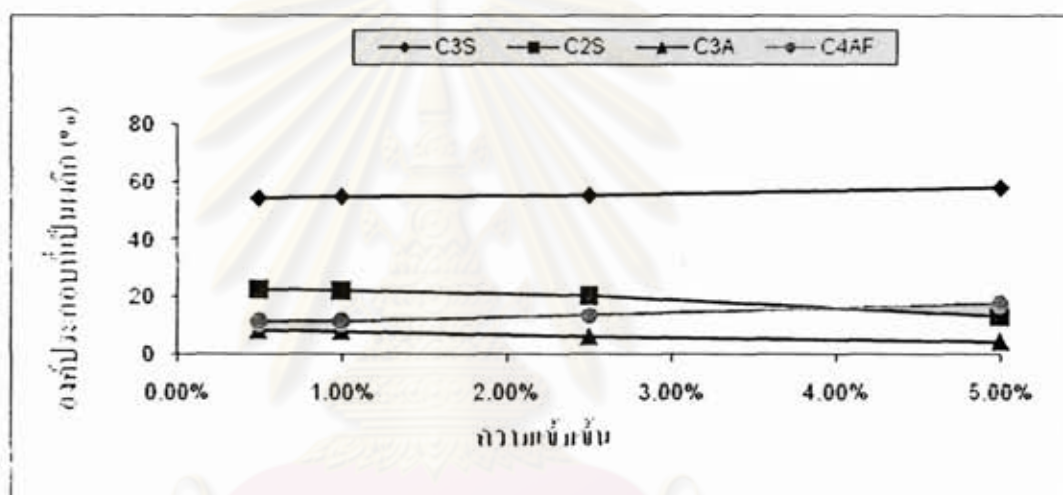


รูปที่ 4.14 กราฟปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์เทียบกับมาตรฐาน ตารางที่ 4.24 นั้นแสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอนจาก โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งที่ทุกความเข้มข้นค่าเกินมาตรฐาน ตารางที่ 4.24 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอน โรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ ความเข้มข้นต่างกัน

ความเข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	22.64	5.67	3.39	65.90	91.13	2.49	1.67
1.0 %	22.68	6.01	3.49	65.75	90.23	2.38	1.72
2.5 %	22.94	6.90	3.41	64.91	86.99	2.22	2.02
5.0 %	22.61	8.58	3.50	63.25	83.50	1.86	2.44
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

4.3.4 วัตถุประสงค์ที่ผสมภาคตะกอนจากอุตสาหกรรมโรงงานหลอมเหล็ก

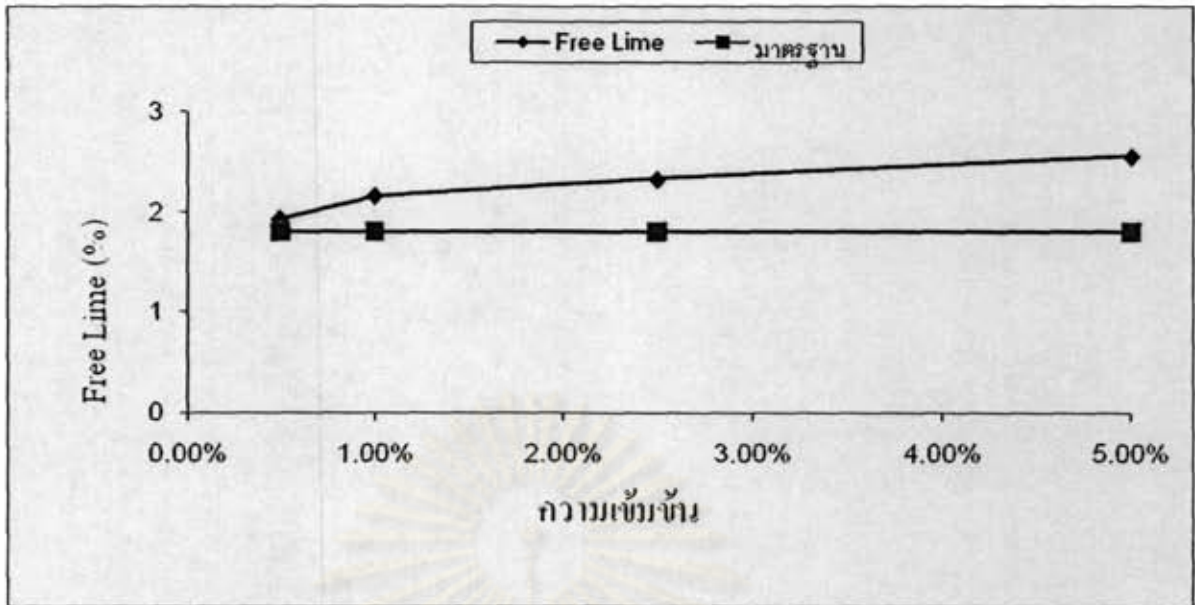
ส่วนวัตถุประสงค์ที่ผสมภาคตะกอนจากอุตสาหกรรมโรงงานหลอมเหล็กนั้น จากผลวิเคราะห์พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของภาคตะกอน C_3S มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และทุกความเข้มข้นไม่ผ่านมาตรฐาน ส่วน C_2S นั้นมีแนวโน้มที่ลดลงและผ่านมาตรฐานที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก และ C_3A มีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้น และ C_4AF มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากภาคตะกอนที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณของ Zn อยู่สูงเพราะ Zn ลดการเกิดของ C_3S และ C_2S Ract และคณะ (2003) มาพบว่าการผสมภาคตะกอนซุบโลหะที่ 2 % โดยน้ำหนัก ซึ่งมี Cu 2.4% และ Ni 1.4% โดยน้ำหนัก นั้นทำให้อุณหภูมิการเกิดของ C_3S นั้นลดลง และ Espinosa และคณะ (2000) พบว่าการเพิ่มภาคตะกอนซุบโลหะที่มี Cr 3.9 % และ Zn 0.03 % ที่ไม่เกิน 2 % โดยน้ำหนักไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ส่วนค่าปูนขาวอิสระมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานทุกๆความเข้มข้น



รูปที่ 4.15 กราฟองค์ประกอบที่เป็นผลึกของวัตถุประสงค์ที่ผสม ภาคตะกอน โรงงานเหล็ก ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตารางที่ 4.25 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปูนขาวอิสระของวัตถุประสงค์ที่ผสม ภาคตะกอน โรงงานเหล็ก

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	54.35	22.66	8.48	11.50	1.93
1.0 %	54.90	22.02	8.20	11.71	2.16
2.5 %	55.29	20.38	6.30	13.65	2.33
5.0 %	57.97	13.14	4.57	17.83	2.56
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8



รูปที่ 4.16 กราฟปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสมกากตะกอน โรงงานเหล็ก เทียบกับมาตรฐาน

ตารางที่ 4.26 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสมกากตะกอน โรงงานเหล็ก ซึ่งที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐาน

ตารางที่ 4.26 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสม กากตะกอน โรงงานเหล็ก ที่ความเข้มข้น ต่างกัน

ความเข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	22.20	5.61	3.78	65.41	91.77	2.36	1.48
1.0 %	22.12	5.55	3.85	65.32	91.97	2.35	1.44
2.5 %	21.65	5.24	4.49	64.25	92.11	2.22	1.16
5.0 %	19.84	5.47	5.86	62.37	64.75	1.74	0.93
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

4.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูน ทำการทดลองโดยใช้เครื่อง ICP ทั้งนี้ต้องนำตัวอย่างไปย่อยสลายด้วยเครื่องย่อยสลายสารด้วยคลื่นไมโครเวฟ ตามมาตรฐาน US EPA SW-846 Method 3052 ให้ได้ของเหลวใสก่อนนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก ได้ผลแสดงดังตาราง

ตารางที่ 4.27 ปริมาณโลหะหนักในเมล็ดปุ่นของตัวอย่างควบคุม

โลหะหนัก	ปริมาณ (mg/l)
Cr	65
Cu	157
Ni	21.2
Pb	N/D
Zn	297
Al	22900
As	37.8
Ba	120
Ca	44730
Cd	N/D
Fe	14830
Hg	N/D
Sb	N/D
Se	0.56
Tl	N/D
V	43

ตารางที่ 4.28 ปริมาณโลหะหนักในเมล็ดปุ่นที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Cu:Ni)	2773 : 2396 : 3426
1.0 % (Cr:Cu:Ni)	6416 : 4747 : 7337
2.5 % (Cr:Cu:Ni)	14880 : 10490 : 16100
5.0 % (Cr:Cu:Ni)	24620 : 21540 : 24650

ตารางที่ 4.29 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Pb:Zn)	594 : 210 : 11230
1.0 % (Cr:Pb:Zn)	1076 : 504 : 27960
2.5 % (Cr:Pb:Zn)	2566 : 2098 : 48950
5.0 % (Cr:Pb:Zn)	5002 : 4157 : 92310

ตารางที่ 4.30 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Cu:Ni)	130.6 : 211.3 : 4017
1.0 % (Cr:Cu:Ni)	122.4 : 242.5 : 4384
2.5 % (Cr:Cu:Ni)	170.02 : 355.13 : 5389
5.0 % (Cr:Cu:Ni)	97.94 : 385.27 : 6033

ตารางที่ 4.31 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Pb:Zn)	140.32 : 39.35 : 2390
1.0 % (Cr:Pb:Zn)	275.1 : 68.6 : 3561
2.5 % (Cr:Pb:Zn)	360.0 : 133.2 : 12840
5.0 % (Cr:Pb:Zn)	483.27 : 309.3 : 20169

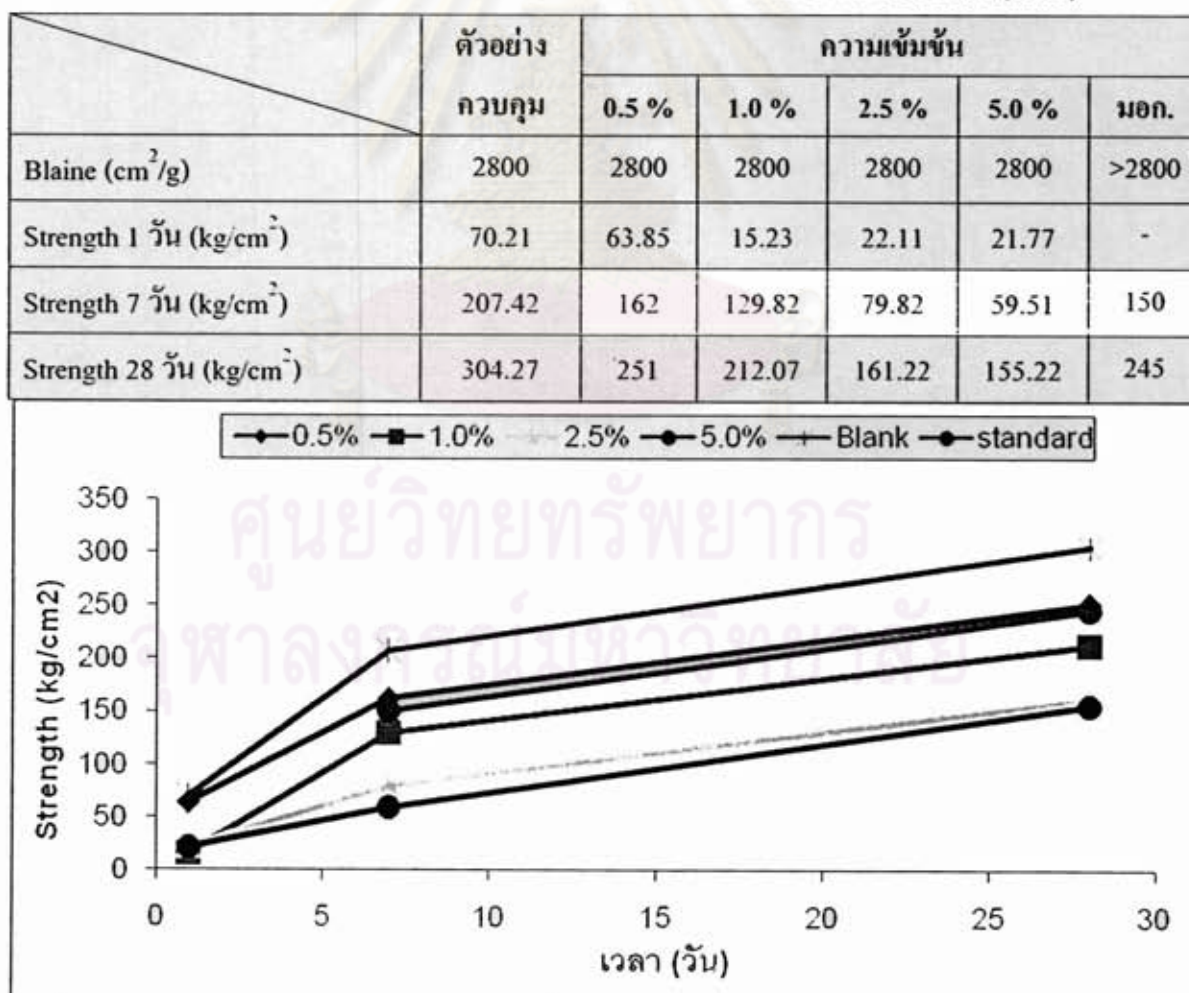
4.5 ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า (Compressive Strength)

การวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า ทำตามมาตรฐาน โดยวิธี ASTM C 109/C109M-05 โดยจะก่อนการทดลองจะทำการทดสอบ แอร์เพอร์มิเอบิลิตี (air permeability test) ซึ่งเป็นวิธีวัดพื้นที่ผิวอนุภาคของปูนซีเมนต์ โดยใช้วิธีของเบลน (Blaine Method) โดยวัดปริมาณอากาศที่แน่นอนจำนวนหนึ่งไหลผ่านชั้นอนุภาคของปูนซีเมนต์ที่ได้บรรจุให้มีความพรุน อากาศจะไหลผ่านปูนซีเมนต์ที่ละเอียดได้ยากกว่าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดน้อยกว่า มาตรฐานกำหนดค่าความละเอียดต่ำสุดของปูนซีเมนต์ไม่ต่ำกว่า $2,800 \text{ cm}^2/\text{g}$

4.5.1 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

ตารางที่ 4.32 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) โดยได้ผลที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 % โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผ่านมาตรฐานที่ 162 kg/cm^2 และ 251 kg/cm^2 ที่ 7 และ 28 วันตามลำดับ ส่วนที่ความเข้มข้นเกิน 2.5 % โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐานอยู่ที่ 79.82 kg/cm^2 และ 161.22 kg/cm^2 ที่ 7 และ 28 วันตามลำดับ กำลังรับแรงอัดลดลงเนื่องจากอิทธิพลของ Cr และ Cu ที่ทำให้ความแข็งแรงระยะแรกลดลงไปจากเดิม จากงานวิจัยที่ผ่านมา Murat และ Sorrentino (1996) พบว่าการผสมโลหะหนัก Cr ที่ความเข้มข้น 1.2 และ 3.25 % โดยน้ำหนัก ทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าลดลงที่ 28 วัน Stephan และคณะ (1999) พบว่าการผสมโลหะหนัก Cr ที่ 2.5 % โดยน้ำหนักส่งผลให้ลดกำลังรับแรงอัดในก้อนมอร์ต้า และการผสมโลหะหนัก Ni ที่ 2.5 % โดยน้ำหนักทำให้กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างควบคุมที่ 28 วัน และ Ni ยังทำปฏิกิริยาในกระบวนการเผาก่อให้เกิด MgNiO_2 เป็นตัวเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะหลัง

ตารางที่ 4.32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)



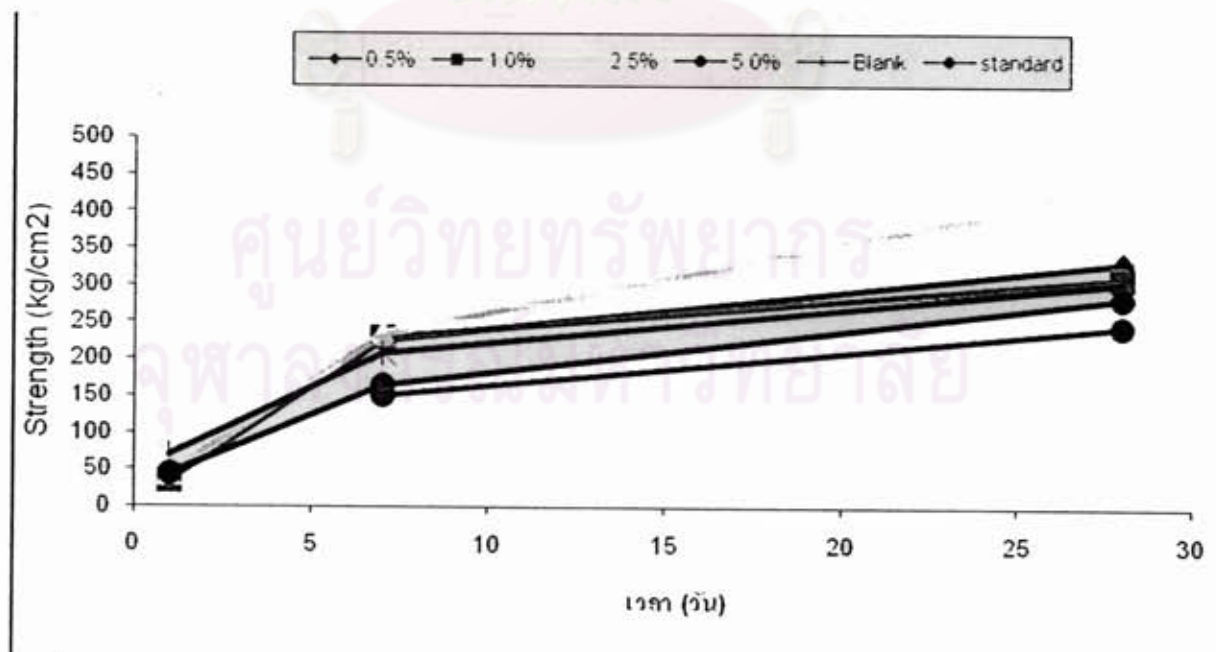
รูปที่ 4.17 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

4.5.2 วัสดุคิบัติผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

ตารางที่ 4.33 แสดงค่ากำลังรับแรงอัดก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ผลที่ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก ได้ค่า 37.28, 225.2 และ 331.83 kg/cm² ที่ 1, 7 และ 28 วันตามลำดับ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไปที่ 1.0 % โดยน้ำหนัก จะได้ผลไม่แตกต่างกับความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก มากนัก แต่ที่ความเข้มข้น 2.5 % โดยน้ำหนัก ผลที่ 1 และ 7 วัน อยู่ใกล้เคียงกับ 0.5 % โดยน้ำหนัก และ 1.0 % โดยน้ำหนัก แตกต่างกันที่อายุขั้ม 28 วัน ผลของกำลังรับแรงอัดเพิ่มไปมากกว่าความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก และ 1.0 % โดยน้ำหนัก โดยอยู่ที่ 430.93 kg/cm² เนื่องจาก Zn ที่มีปริมาณมากในวัสดุคิบัติจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดลดลงในระยะแรกแต่ช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะหลังที่ 28 วัน แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไปที่ 5.0 % โดยน้ำหนัก ผลที่ได้ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม แต่ยังผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.33 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

	ตัวอย่าง ควบคุม	ความเข้มข้น				
		0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	มอก.
Blaine (cm ² /g)	2800	2800	2800	2800	2800	>2800
Strength 1 วัน (kg/cm ²)	70.21	37.28	33.88	43.67	43.68	-
Strength 7 วัน (kg/cm ²)	207.42	225.2	229.48	234.2	164.47	150
Strength 28 วัน (kg/cm ²)	304.27	331.83	310.39	430.93	283.23	245



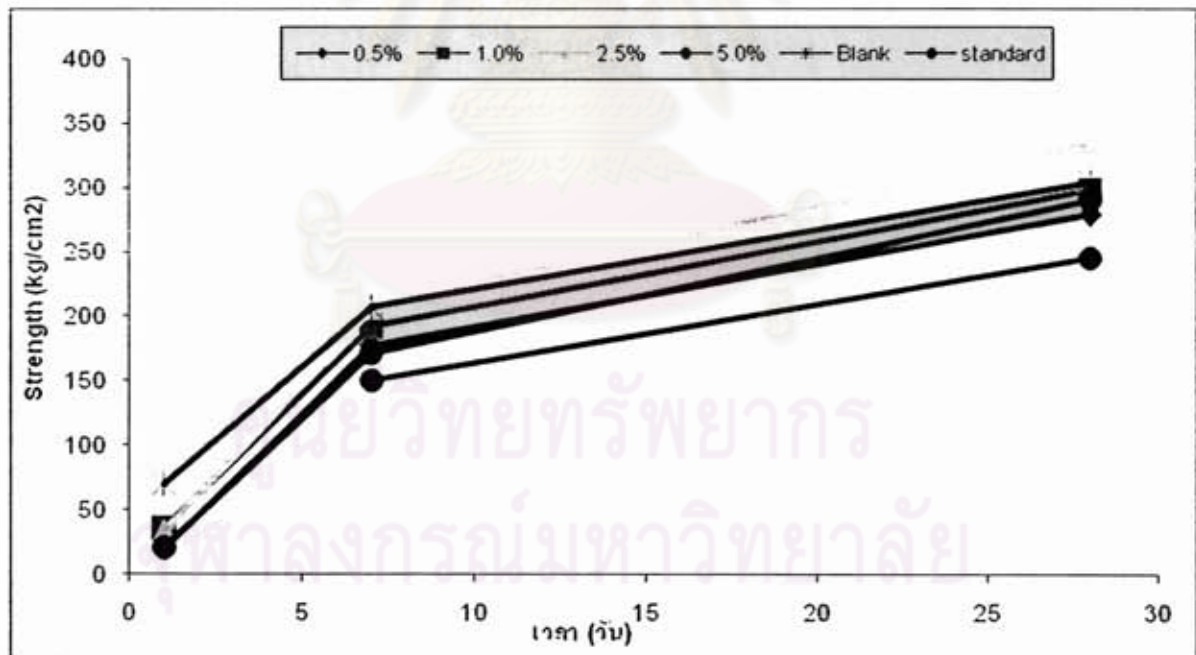
รูปที่ 4.18 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

4.5.3 วัสดุคิบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 4.34 แสดงผลทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 2.5 % โดยน้ำหนัก ได้ผลกำลังรับแรงอัดมากที่สุดทั้ง 3 วันคือ 33.18, 207.19 และ 333.8 kg/cm² และมากกว่าตัวอย่างควบคุมด้วย และที่ความเข้มข้น 0.5 % 1.0 % และ 5.0 % โดยน้ำหนัก ได้ผลกำลังรับแรงอัดที่ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม โดยผ่านมาตรฐานทั้งหมด สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา Tenorio และคณะ (2000) ได้ศึกษาการเพิ่มภาคตะกอนอิเล็กทรอนิกส์ไม่เกิน 2 % โดยน้ำหนักไม่ก่อให้เกิดผลกระทบในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.34 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

	ตัวอย่าง ควบคุม	ความเข้มข้น				
		0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	มอก.
Blaine (cm ² /g)	2800	2800	2800	2800	2800	>2800
Strength 1 วัน (kg/cm ²)	70.21	19.98	35.44	33.18	20.7	-
Strength 7 วัน (kg/cm ²)	207.42	177.18	191.83	207.19	170.98	150
Strength 28 วัน (kg/cm ²)	304.27	279.27	298.47	333.8	290.35	245



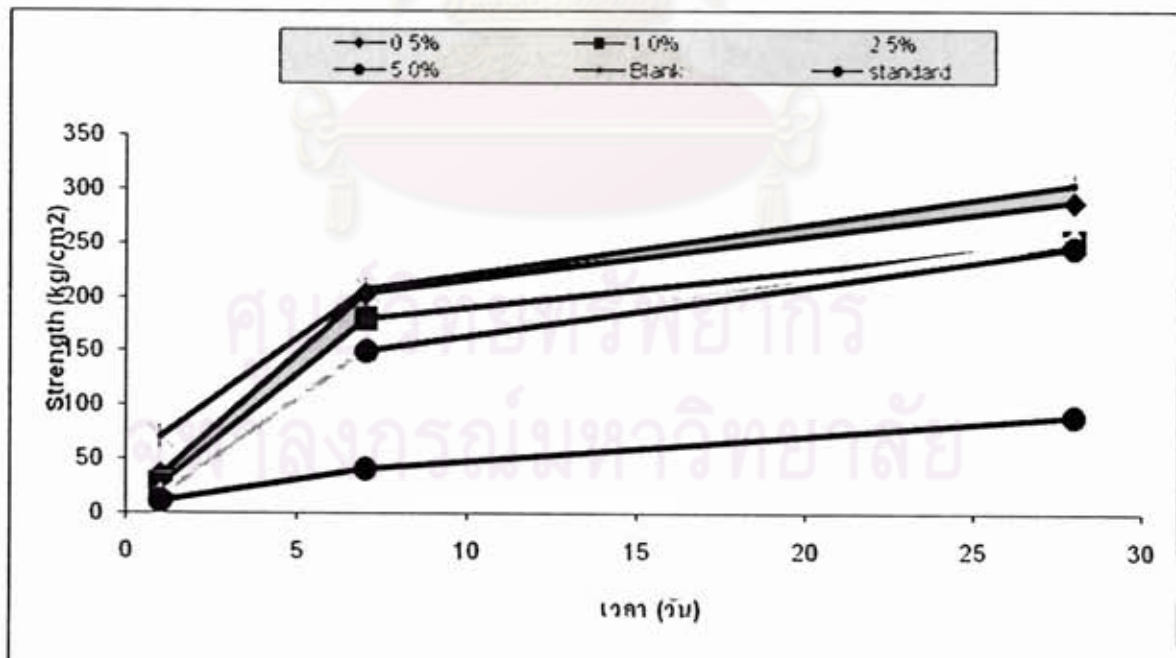
รูปที่ 4.19 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

4.5.4 วัสดุคิบที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

ตารางที่ 4.35 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ได้ผล 35.3, 202.66 และ 287.69 kg/cm² ที่ 1, 7 และ 28 วันตามลำดับ ซึ่งมากกว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผสมโลหะหนัก แต่ที่ความเข้มข้น 1.0 % และ 2.5 % โดยน้ำหนัก ได้ผลที่ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม และที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ได้ผลที่ต่ำกว่ามาตรฐานที่ 10.3, 40.32 และ 89.8 kg/cm² ที่ 1, 7 และ 28 วันตามลำดับ การผสมกากตะกอนโรงงานหลอมเหล็กทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่น้อยกว่าวัสดุคิบที่ไม่ได้ผสมโลหะหนัก

ตารางที่ 4.35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

	ตัวอย่าง ควบคุม	ความเข้มข้น				
		0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	มอก.
Blaine (cm ² /g)	2800	2800	2800	2800	2800	>2800
Strength 1 วัน (kg/cm ²)	70.21	35.3	25.87	15.6	10.3	-
Strength 7 วัน (kg/cm ²)	207.42	202.66	179.48	151.11	40.32	150
Strength 28 วัน (kg/cm ²)	304.27	287.69	251.68	254.44	89.8	245



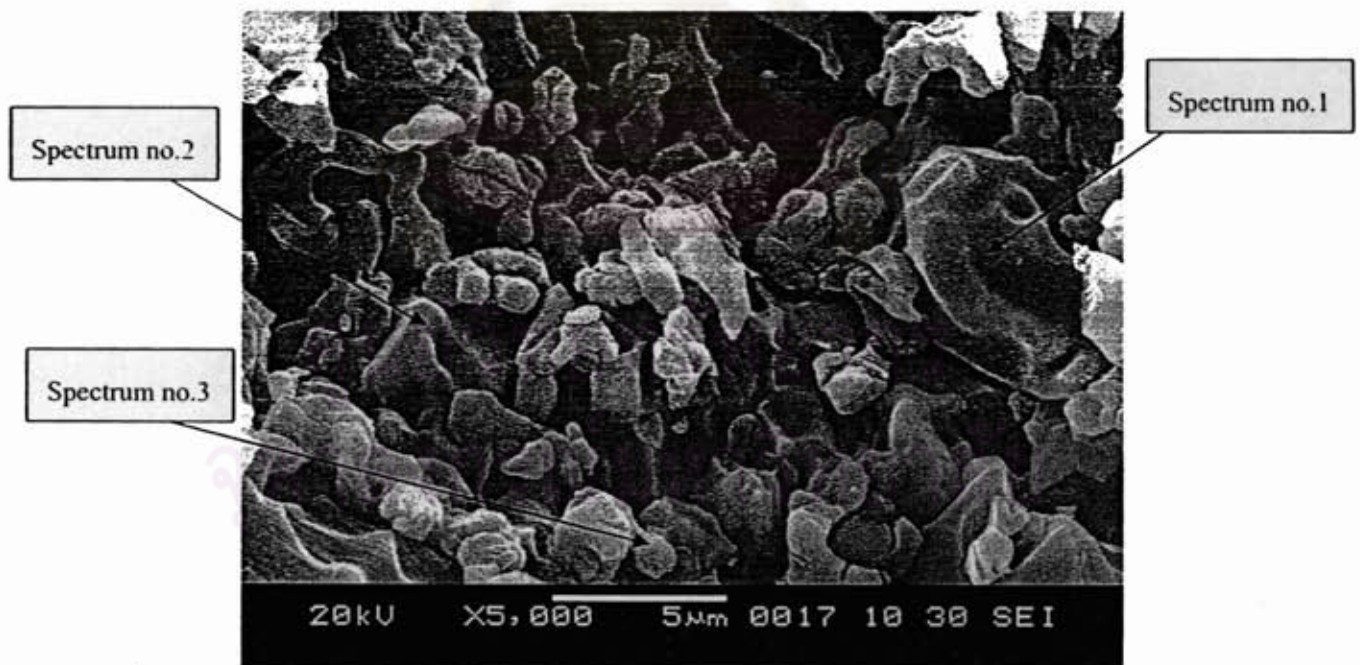
รูปที่ 4.20 กราฟกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

4.6 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว (SEM)

วิธีวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิว โดยวิธีส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) เป็นวิธีตรวจวัดองค์ประกอบธาตุของซีเมนต์ เพื่อทำการตรวจวัดว่าบริเวณ C_3S และ C_2S มีโลหะหนักที่ศึกษาจับเกาะอยู่หรือไม่ โดยตรวจวัดเฉพาะที่ตัวอย่างความสูงที่สุดเท่านั้น และสุ่มวัด 3 จุด

4.6.1 วัสดุคิบทที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

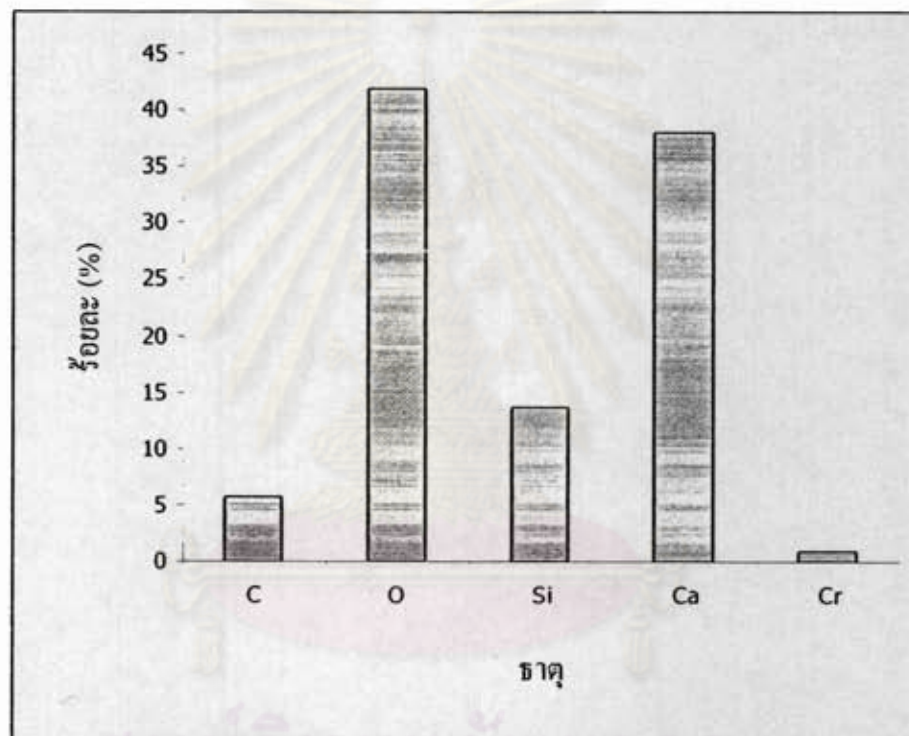
เม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก จากการตรวจวัดที่ Spectrum no.1 มีลักษณะเป็นหกเหลี่ยม ซึ่งเป็นลักษณะของ C_3S ซึ่งมี Cr อยู่ 0.88 % Spectrum no.2 ตรวจพบ C_3S มี Cr 0.79 % และ Ni 0.70 % ส่วน Spectrum no.3 ตรวจพบ C_3S มี Cr 1.13 % แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักที่ผสมลงไปในวัสดุคิบทนั้นทำปฏิกิริยาในกระบวนการเผาแล้วเกาะอยู่บริเวณพื้นผิวของปูนซีเมนต์ Polletini และคณะ (2002) ได้พบว่าโครเมียมจะมีบทบาทสำคัญใน CSH เอททริงไกด์และโมโนซัลเฟต ของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก จากการรวมตัวของ Cr^{3+} ในโครงสร้างผลึกโดยการแทนที่ Al^{3+} และสันนิษฐานว่า Cu รวมตัวกับ CSH เกิดเป็นผลึกชั้น Scheidegger และคณะ (2000) พบว่า Ni มีบทบาทสำคัญในโมโนซัลเฟต ของปฏิกิริยาไฮเดรชันระยะแรก และนิกเกิลสามารถแทนที่แคลเซียมในเอททริงไกด์



รูปที่ 4.21 ลักษณะ โครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.36 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	5.63
O	41.90
Si	13.59
Ca	38.00
Cr	0.88

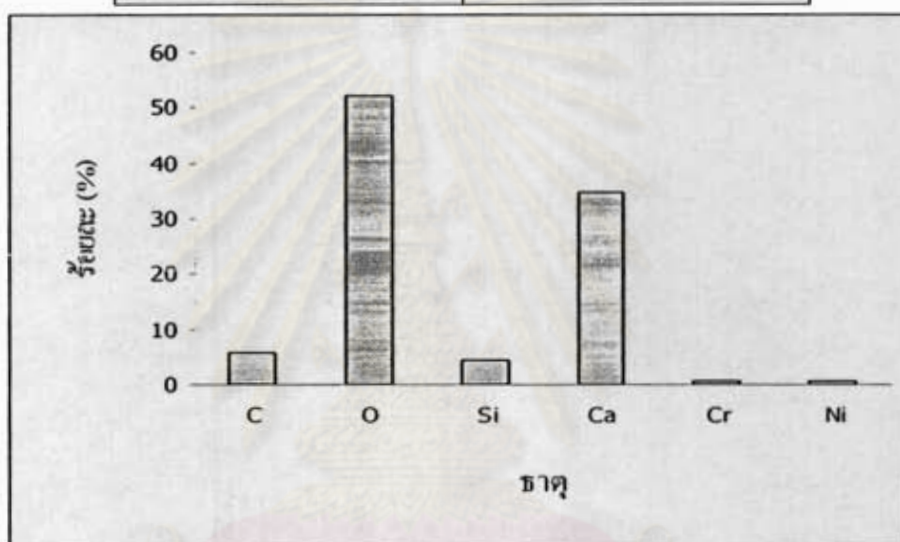


รูปที่ 4.22 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.37 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	5.67
O	52.32
Si	4.44
Ca	34.92
Cr	0.79
Ni	0.70

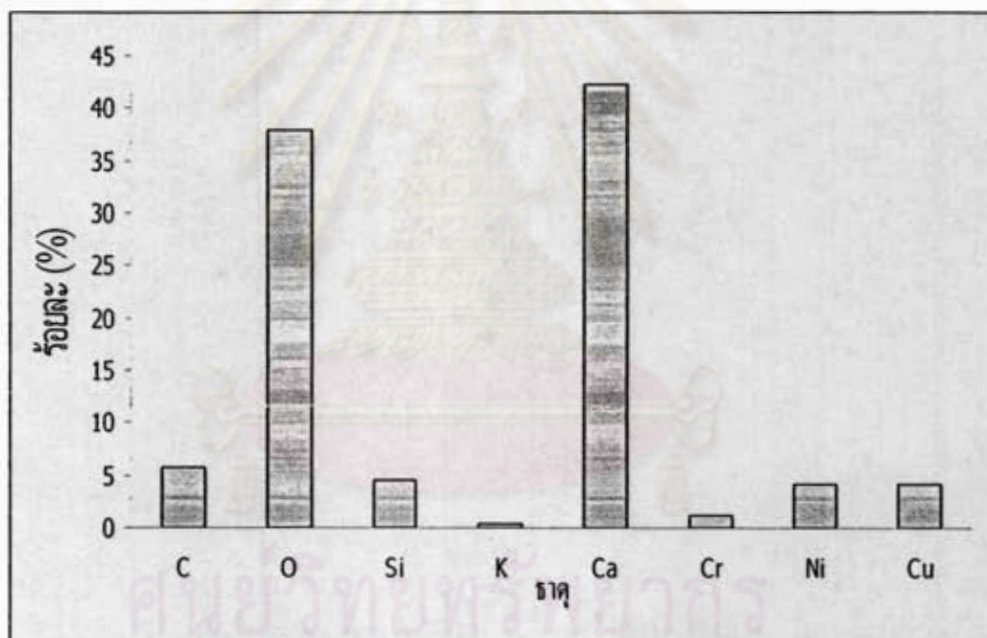


รูปที่ 4.23 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.38 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 %
โดยน้ำหนัก Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	5.68
O	37.81
Si	4.53
K	0.34
Ca	42.21
Cr	1.13
Ni	4.13
Cu	4.17

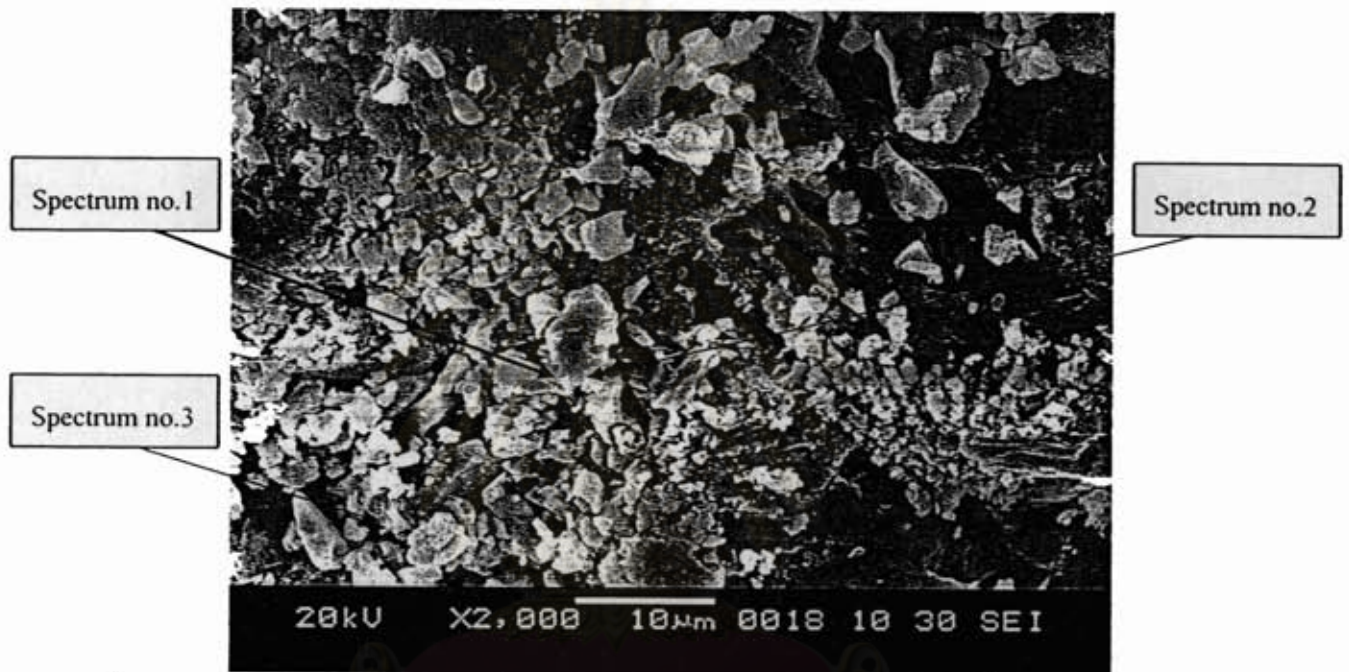


รูปที่ 4.24 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก
ที่ Spectrum no.3

4.6.2 เม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

เม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก บริเวณ Spectrum no.1, 2 และ 3 ตรวจพบ C_3S ซึ่งมี Cr อยู่ 1.46, 1.55 และ 2.40 % ตามลำดับ และมี Zn อยู่ 6.80, 5.27 และ 9.87 % ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมา Murat และ Sorrentino (1996) พบว่า Zn ทำปฏิกิริยากับ Fe ในเม็ดปูนแล้วก่อให้เกิด C_3S ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น และ Stephan และคณะ (1999) พบว่าการผสมโลหะ

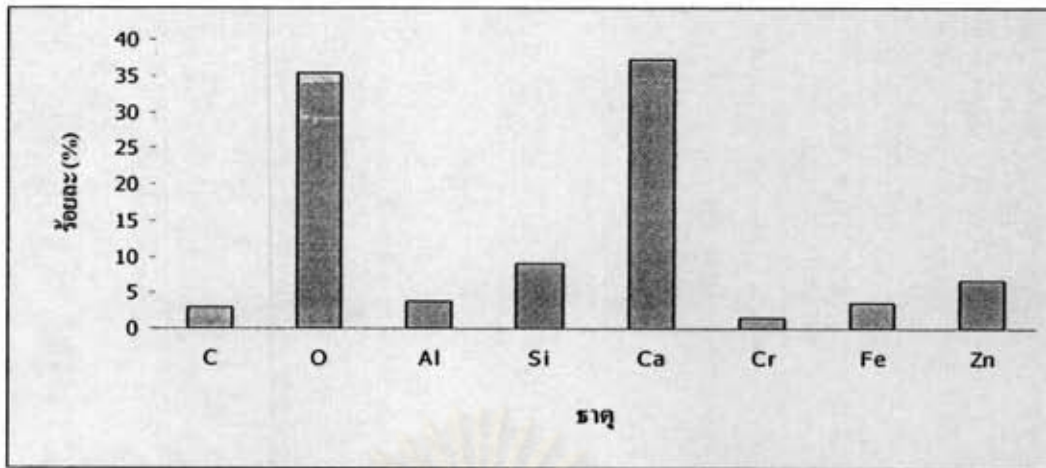
หนัก Zn ที่ 2.5 % ก่อให้เกิด C_3S ที่ปริมาณเล็กน้อยและลดปริมาณของ C_2S Older และคณะ (1980) ศึกษาได้ผลที่สอดคล้องกับ Stephan นั่นคือการเพิ่มขึ้นของ C_3S เป็นผลมาจากการแทนที่ของ Zn ใน Ca และจากการศึกษาของ Andrade และคณะ (2002) พบว่า Zn จะรวมตัวเข้าไปอยู่ใน C_3S ย่างขึ้นกว่าเดิม และยังพบว่าการผสม V Zn และ Pb ที่ปริมาณ 1 % โดยน้ำหนักของวัสดุคิบ ทำให้ความสามารถในการเผาเพิ่มขึ้นถ้าปริมาณโลหะหนักเพิ่มขึ้น (2.5 – 5.0 %) ตารางที่ 4.39 ถึง 4.41 แสดง Spectrum no.1 ถึง Spectrum no.3 ของเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.25 ลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.39 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

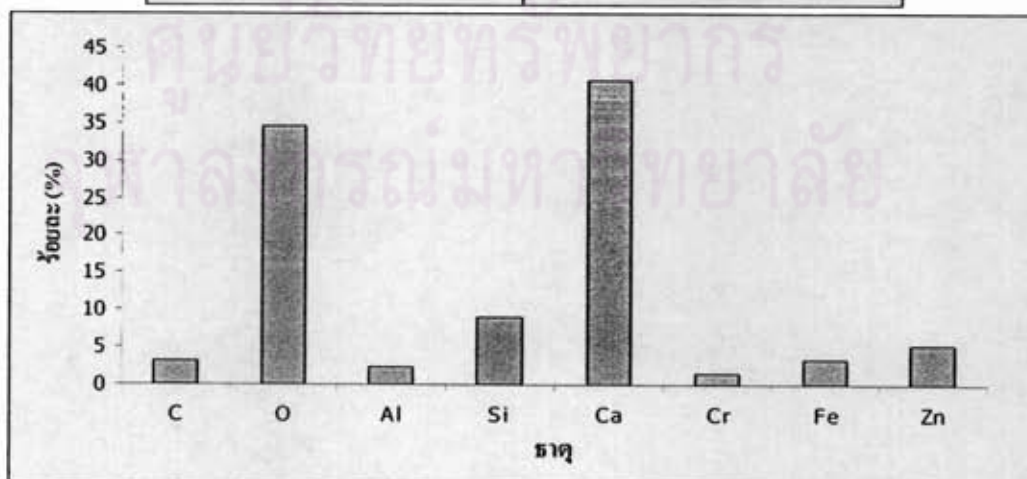
ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	3.00
O	35.29
Al	3.69
Si	8.97
Ca	37.22
Cr	1.46
Fe	3.56
Zn	6.80



รูปที่ 4.26 ร้อยละของธาตุในแม่คูปนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ตารางที่ 4.40 ร้อยละของธาตุในแม่คูปนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

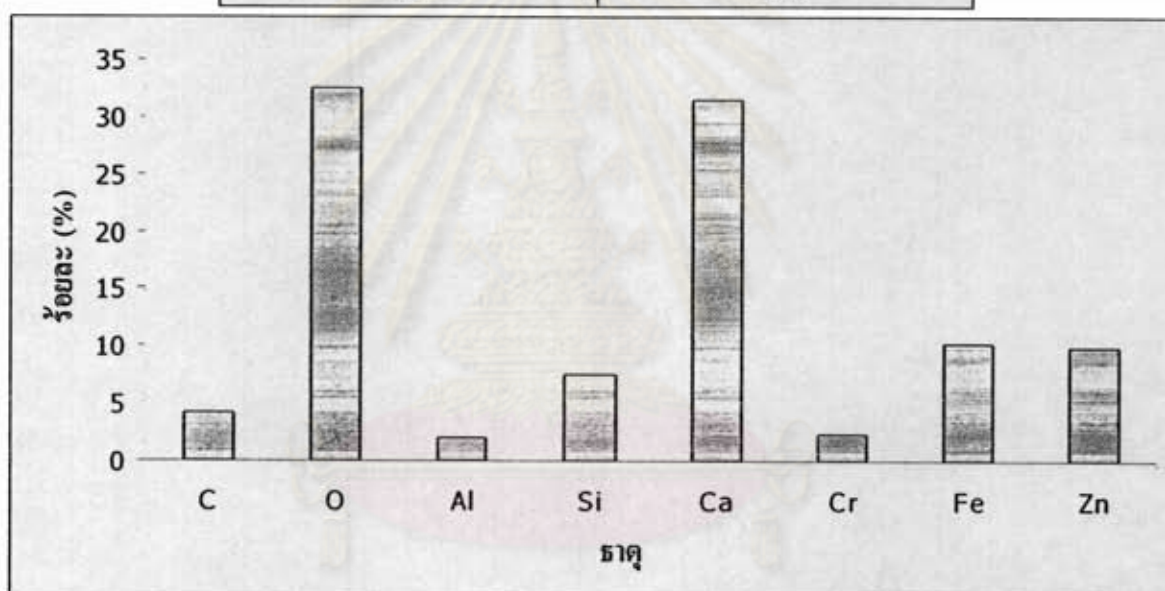
ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	3.21
O	34.61
Al	2.38
Si	8.91
Ca	40.68
Cr	1.55
Fe	3.40
Zn	5.27



รูปที่ 4.27 ร้อยละของธาตุในแม่คูปนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ตารางที่ 4.41 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 %
โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	4.15
O	32.44
Al	2.07
Si	7.49
Ca	31.40
Cr	2.40
Fe	10.19
Zn	9.87

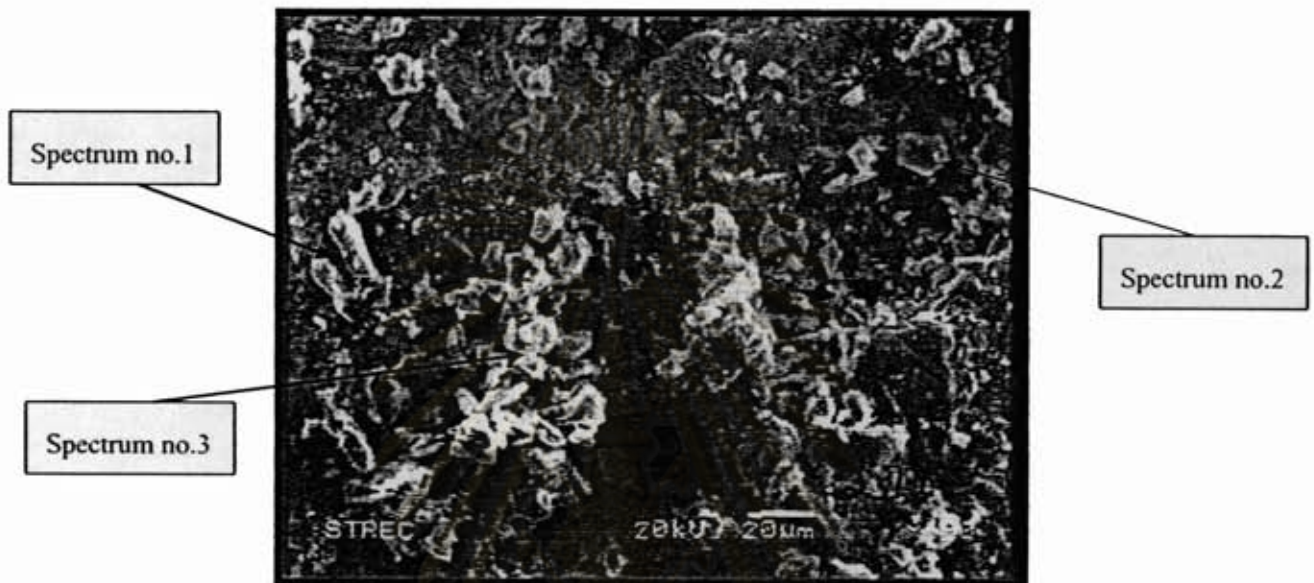


รูปที่ 4.28 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 %
โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.3 เม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

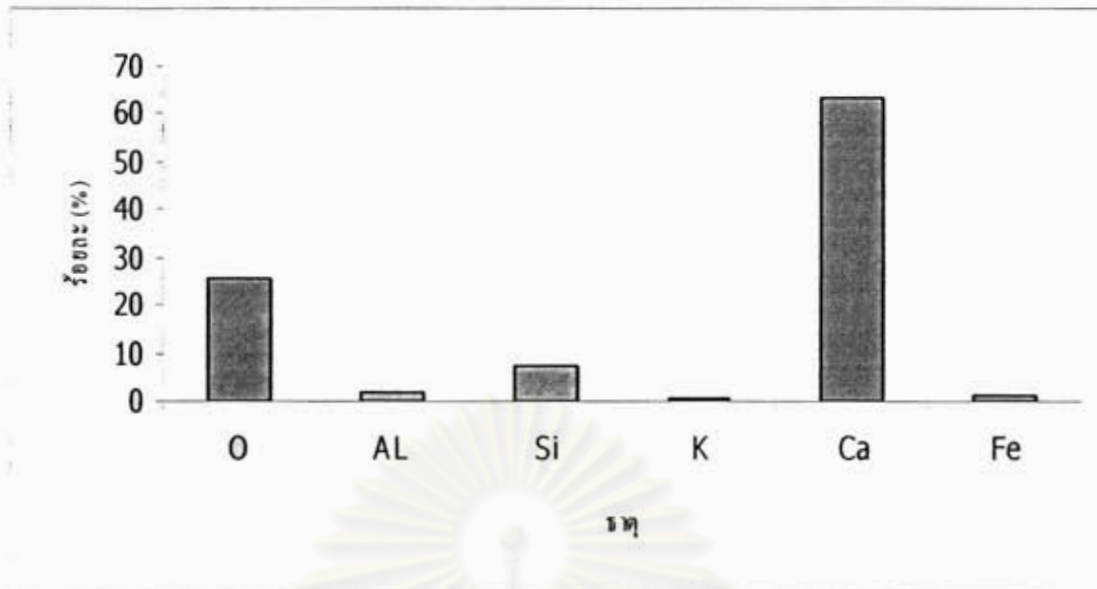
เม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ตารางที่ 4.42 ถึง 4.44 แสดง Spectrum no.1 ถึง Spectrum no.3 จากการตรวจไม่พบโลหะหนักที่สนใจ สันนิษฐานว่าโลหะหนักที่ผสมเข้าไปอาจไปเกาะอยู่ที่บริเวณอื่นที่ไม่ได้ทำการตรวจวัด



รูปที่ 4.29 ลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.42 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

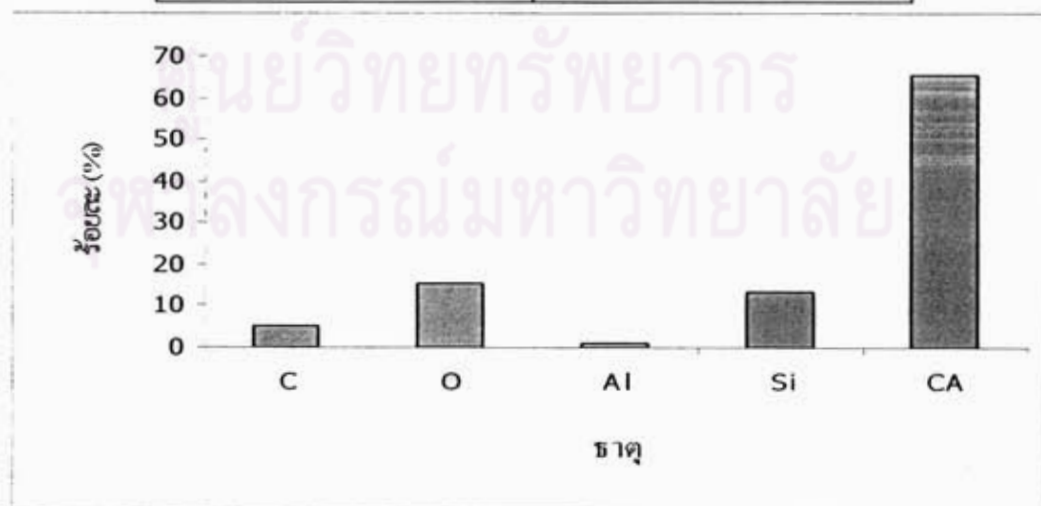
ธาตุ	ร้อยละ (%)
O	25.36
AL	1.79
Si	7.6
K	0.74
Ca	63.43
Fe	1.17



รูปที่ 4.30 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ตารางที่ 4.43 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

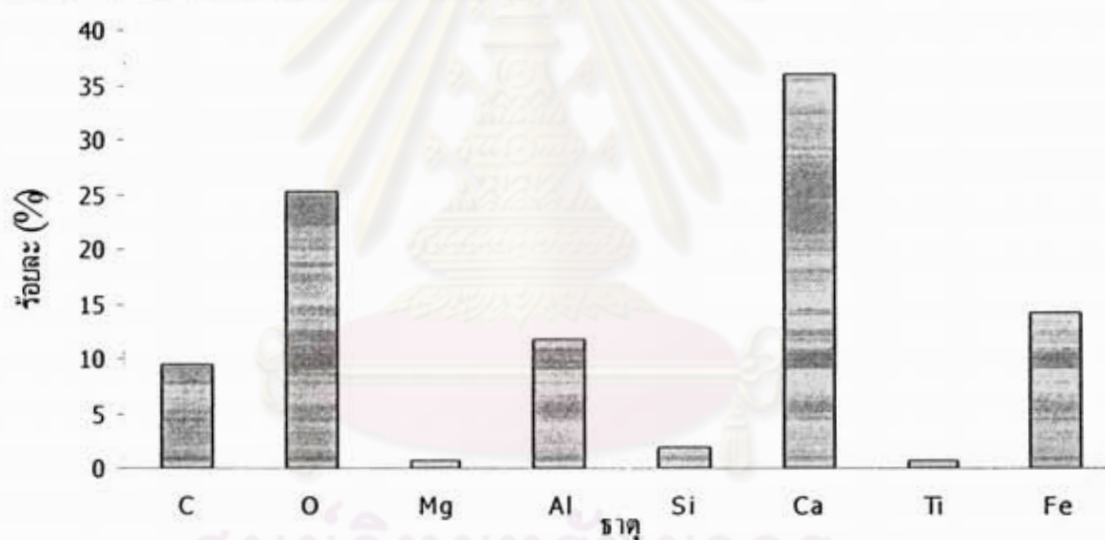
ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	4.93
O	15.51
Al	0.82
Si	13.15
Ca	65.58



รูปที่ 4.31 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ตารางที่ 4.44 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	9.4
O	25.27
Mg	0.73
Al	11.84
Si	1.86
Ca	36
Ti	0.62
Fe	14.27



รูปที่ 4.32 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

4.6.2 เม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนโรงงานหลอมเหล็ก

เม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนจากกากตะกอน โรงงานหลอมเหล็กที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก จากการตรวจวัดพบว่าที่บริเวณ Spectrum no.2 พบ C_3S ซึ่งมีปริมาณ 0.93 % ตารางที่ 4.45 ถึง 4.47 แสดง Spectrum no.1 ถึง Spectrum no.3

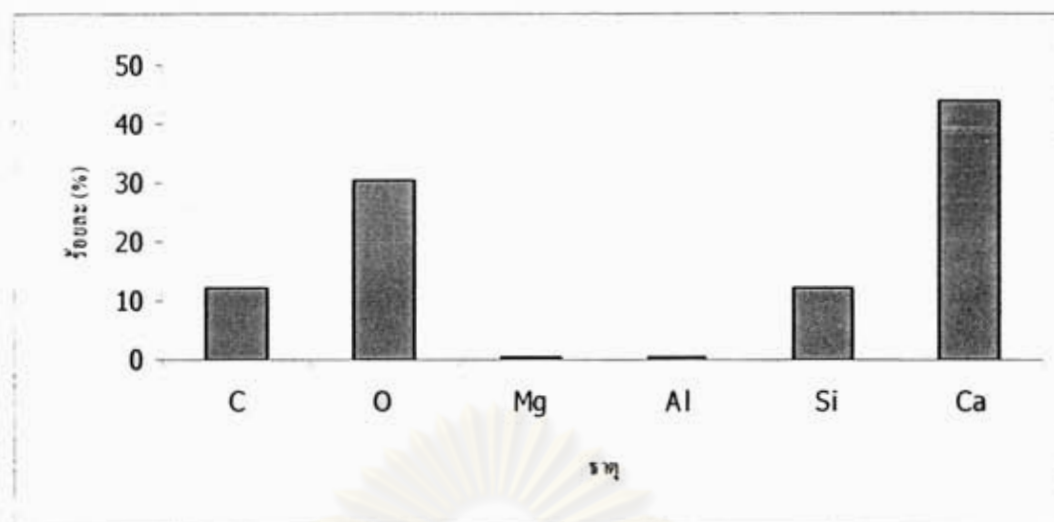
จากงานวิจัยที่ผ่านมา Ract และคณะ (2003) พบว่ากากตะกอนจากการชุบโลหะซึ่งมี Cu และ Ni อยู่ โดยเพิ่มตะกอนนี้เข้าไปในวัตถุดิบ 0.25-5 % โดยน้ำหนัก ผลจากการศึกษาพบว่า การเพิ่มตะกอนจากการชุบโลหะที่ไม่เกิน 2 % โดยน้ำหนักซึ่งจะมี Cu อยู่ 2.4 % โดยน้ำหนัก และมี Ni อยู่ 1.2 % โดยน้ำหนัก จะไม่มีผลกระทบต่อการใช้งานของผลิตภัณฑ์ปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.33 ลักษณะโครงสร้างภายในเม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.45 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

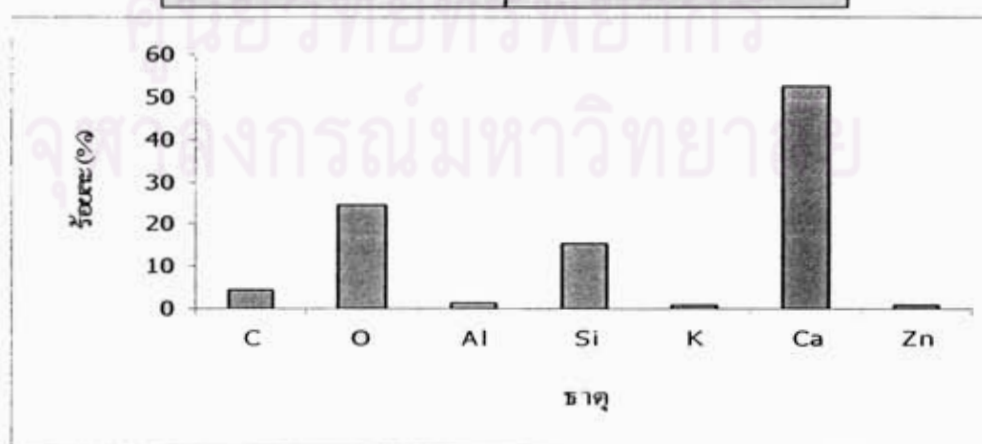
ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	12.32
O	30.54
Mg	0.65
Al	0.52
Si	11.98
Ca	44.0



รูปที่ 4.34 ร้อยละของธาตุในเมล็ดปุ่นที่ผสมผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ตารางที่ 4.46 ร้อยละของธาตุในเมล็ดปุ่นที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

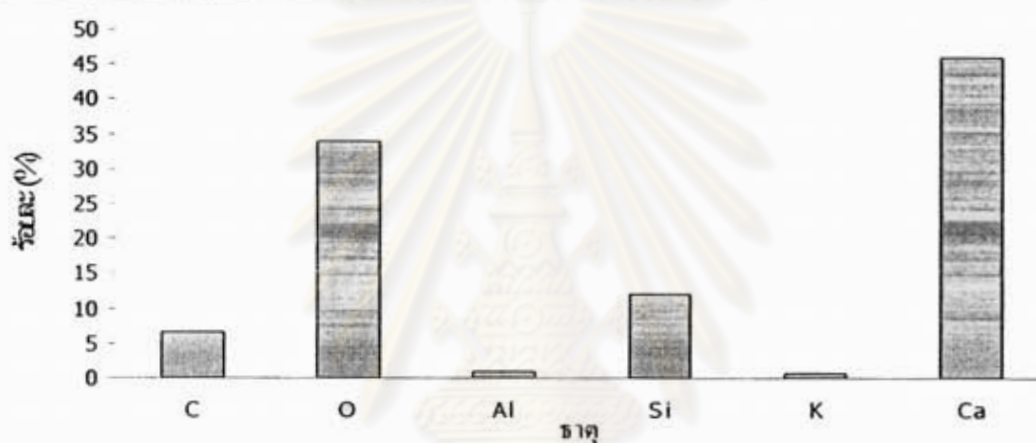
ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	4.31
O	24.32
Al	1.14
Si	15.51
K	1.06
Ca	52.72
Zn	0.93



รูปที่ 4.35 ร้อยละของธาตุในเมล็ดปุ่นที่ผสมผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ตารางที่ 4.47 ร้อยละของธาตุในเมล็ดปุ่นที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	6.64
O	33.98
Al	1.05
Si	12.01
K	0.59
Ca	45.91



รูปที่ 4.36 ร้อยละของธาตุในเมล็ดปุ่นที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

4.7 ผลการทดสอบการชะละลาย (WET)

การทดสอบการชะละลายทำตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่องการกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้ พ.ศ. 2548 ได้ผลดังตารางที่ 4.48 ถึง 4.52 ซึ่งตารางที่ 4.45 แสดงถึงการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างควบคุมพบว่าไม่สามารถตรวจวัดได้

ตารางที่ 4.48 ผลทดสอบการชะละลายของตัวอย่างควบคุม

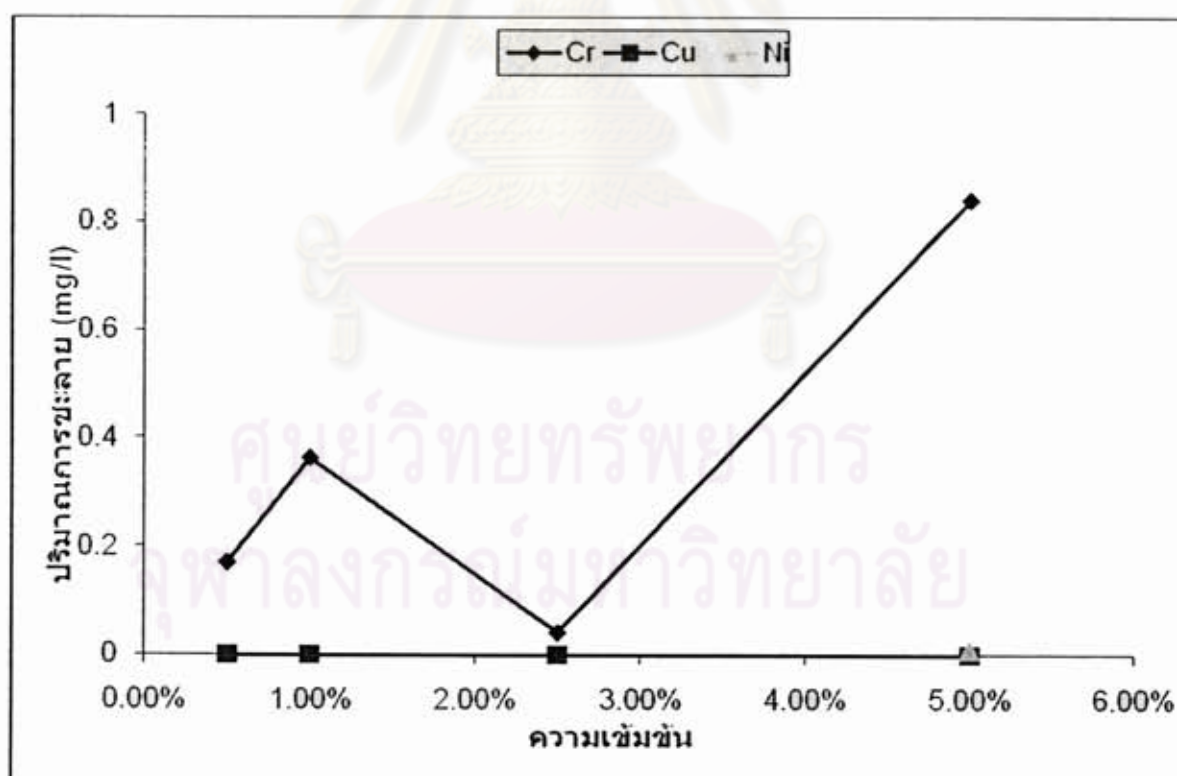
โลหะหนัก	ความเข้มข้นของโลหะหนักในตัวอย่างควบคุม (mg/l)
Cr	ND
Cu	ND
Ni	ND
Pb	ND
Zn	ND

4.7.1 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

ผลการทดสอบการชะละลายของวัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ได้ผลการทดลองที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน โดยที่ Cr ตรวจพบเจอทุกความเข้มข้นและอยู่ในค่ามาตรฐานทุกความเข้มข้น Cu ไม่สามารถตรวจพบได้ทุกความเข้มข้น และ Ni ตรวจพบที่ความเข้มข้นเดียวคือที่ เข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก อยู่ที่ 0.11 mg/l จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าโลหะหนักถูกตรึงอยู่ในปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 4.49 Taweekitwanit (2004) พบว่าการผสม Ni ที่ไม่เกิน 2% โดยน้ำหนัก ค่าการชะละลายจะไม่เกินค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 4.49 ผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

โลหะหนัก Cr:Cu:Ni	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l)
0.5 %	0.17 / ND / ND	5 / 25 / 20
1.0 %	0.362 / ND / ND	5 / 25 / 20
2.5 %	0.042 / ND / ND	5 / 25 / 20
5.0 %	0.839 / ND / 0.011	5 / 25 / 20



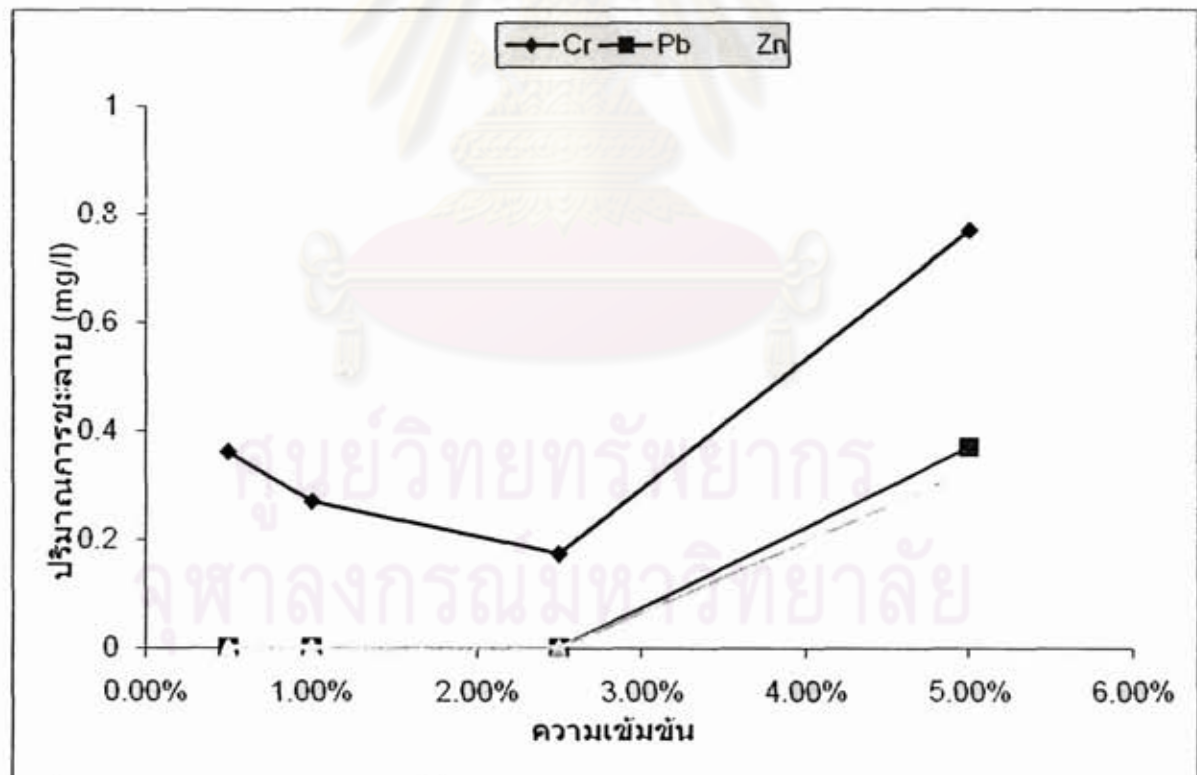
รูปที่ 4.37 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

4.7.2 วัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

ผลการทดสอบการชะละลายของวัสดุคืบที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ได้ผลการทดลองที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน โดยที่ Cr ตรวจพบเจอทุกความเข้มข้นและอยู่ในค่ามาตรฐานทุกความเข้มข้น Pb ตรวจพบที่ความเข้มข้นสูงสุดอยู่ที่ 0.370 mg/l และ Zn ตรวจพบที่ความเข้มข้นเดียวคือที่ 5.0 % โดยน้ำหนัก อยู่ที่ 0.328 mg/l แสดงดังตารางที่ 4.50 Taweekitwanit (2004) พบว่าการผสม Zn ที่ไม่เกิน 2% โดยน้ำหนัก ค่าการชะละลายจะไม่เกินค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 4.50 ผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

โลหะหนัก Cr:Pb:Zn	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l)
0.5 %	0.362 / ND / ND	5 / 5 / 250
1.0 %	0.271 / ND / ND	5 / 5 / 250
2.5 %	0.175 / ND / ND	5 / 5 / 250
5.0 %	0.771 / 0.370 / 0.328	5 / 5 / 250



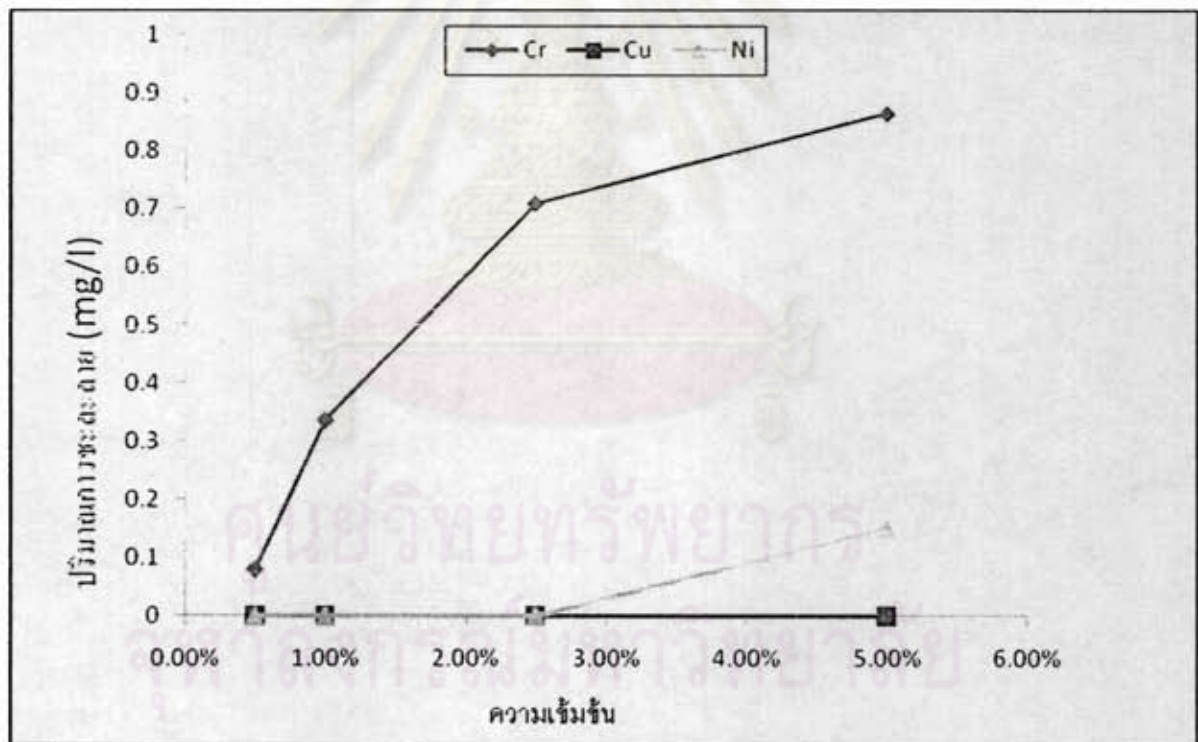
รูปที่ 4.38 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

4.7.3 ของวัสดุคืบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

ผลการทดสอบการชะละลายของวัสดุคืบที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ได้ผลการทดลองที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน โดยที่ Cr ตรวจพบเจอทุกความเข้มข้นและอยู่ในค่ามาตรฐานทุกความเข้มข้น Cu ไม่สามารถตรวจพบได้ทุกความเข้มข้น และ Ni ตรวจพบที่ความเข้มข้นเดียวคือที่ 5.0 % โดยน้ำหนัก อยู่ที่ 0.15 mg/l แสดงดังตารางที่ 4.51

ตารางที่ 4.51 ผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

ภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l) (Cr:Cu:Ni)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l) (Cr:Cu:Ni)
0.5 %	0.08 / ND / ND	5 / 25 / 20
1.0 %	0.336 / ND / ND	5 / 25 / 20
2.5 %	0.71 / ND / ND	5 / 25 / 20
5.0 %	0.864 / ND / 0.15	5 / 25 / 20



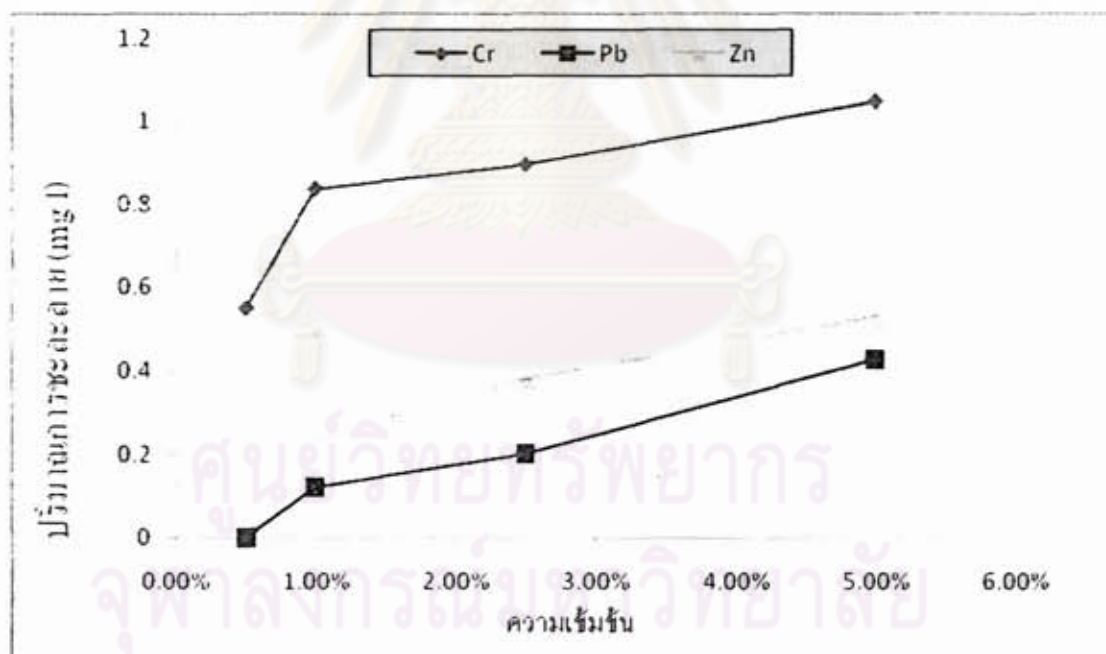
รูปที่ 4.39 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

4.7.4 วัสดุคืบที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

ผลการทดสอบการชะละลายของวัสดุคืบที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ได้ผลการทดลองที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 4.52 Tenorio และคณะ (2000) ได้ผสมกากตะกอนการจากซุบโลหะที่มี Cr ผสมอยู่ที่ไม่เกิน 2 % โดยน้ำหนัก จากการทดสอบการชะละลายตามมาตรฐานของประเทศบราซิลนั้น Cr ไม่มีการละลายออกมาโดยโลหะหนักจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำและคงอยู่ในเม็ดปูนซีเมนต์

ตารางที่ 4.52 ผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

กากตะกอนจากโรงงาน หลอมเหล็ก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l) (Cr:Pb:Zn)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l) (Cr:Pb:Zn)
0.5 %	0.55 / ND / 0.161	5 / 5 / 250
1.0 %	0.837 / 0.122 / 0.24	5 / 5 / 250
2.5 %	0.895 / 0.201 / 0.380	5 / 5 / 250
5.0 %	1.047 / 0.428 / 0.53	5 / 5 / 250



รูปที่ 4.40 การชะละลายของตัวอย่างที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 วัสดุคิบที่ผสมโลหะหนัก Cr : Cu : Ni

(1) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมี (XRD และ XRF)

จากผลการทดลองที่วัสดุคิบที่ผสมโลหะหนัก Cr : Cu : Ni ที่ความเข้มข้น 1.0 % โดยน้ำหนัก ให้ค่าที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน โดยมีแนวโน้มการเพิ่มของ C_3S และการลดลงของ C_2S เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น

(2) ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า (Compressive Strength)

จากผลการทดลองที่วัสดุคิบที่ผสมโลหะหนัก Cr : Cu : Ni ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 % โดยน้ำหนัก กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้านั้นผ่านมาตรฐาน แต่ที่ความเข้มข้นมากกว่า 2.5 % โดยน้ำหนัก นั้น กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ได้ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน

(3) ผลการทดสอบการชะละลาย (WET)

จากทดสอบการชะละลาย ได้ผลคือ ทุกค่าไม่เกินมาตรฐาน เนื่องจากในระบบซีเมนต์ซึ่งมีความเป็นด่างสูง จะสามารถตรึงโลหะหนักไว้ และลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักได้จึงมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

5.1.2 วัสดุคิบที่ผสมโลหะหนัก Cr : Pb : Zn

(1) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมี (XRD และ XRF)

จากผลการทดลองที่วัสดุคิบที่ผสมโลหะหนัก Cr: Pb:Zn ที่ความเข้มข้น 2.5% โดยน้ำหนัก ให้ค่าที่อยู่ในช่วงค่ามาตรฐาน และมีแนวโน้มการเพิ่มของ C_3S และการลดลงของ C_2S เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น

(2) ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า (Compressive Strength)

จากการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า ที่ความเข้มข้น 2.5 % โดยน้ำหนัก ได้ผลการทดสอบที่ได้ค่ามากที่สุดและผ่านมาตรฐาน แต่เมื่อที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ค่าที่ได้เริ่มลดลง

(3) ผลการทดสอบการชะละลาย (WET)

จากการทดสอบการชะละลายของวัสดุคิบ ค่าที่ได้ที่ทุกความเข้มข้นไม่เกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

5.1.3 วัสดุคิบที่ผสมกากตะกอนอิเล็กทรอนิกส์

(1) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมี (XRD และ XRF)

จากการทดลองพบว่า ไม่อยู่ในช่วงมาตรฐานทุกความเข้มข้น

(2) ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า (Compressive Strength)

จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้น 2.5 % โดยน้ำหนัก ได้ค่ากำลังรับแรงที่มากที่สุดและยังผ่านมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แต่เมื่อดูจากผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมีแล้ว ทำให้ได้ผลที่ว่าไม่สามารถก่อให้เกิดกระบวนการเผาที่สมบูรณ์ได้

(3) ผลการทดสอบการชะละลาย (WET)

จากการทดสอบการชะละลายของวัสดุคิบ ค่าที่ได้ที่ทุกความเข้มข้นไม่เกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

5.1.4 วัสดุคิบที่ผสมกากตะกอนโรงงานหลอมเหล็ก

(1) ผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมี (XRD และ XRF)

จากการทดลองพบว่า ไม่อยู่ในช่วงมาตรฐานทุกความเข้มข้น

(2) ผลวิเคราะห์กำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้า (Compressive Strength)

จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้น 0.5 % โดยน้ำหนัก ได้ค่ากำลังรับแรงที่มากที่สุดและยังผ่านมาตรฐานกระทรวงอุตสาหกรรม พ.ศ. 2548 แต่เมื่อดูจากผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นผลึก และองค์ประกอบทางเคมีแล้ว ทำให้ได้ผลที่ว่าไม่สามารถก่อให้เกิดกระบวนการเผาที่สมบูรณ์ได้

(3) ผลการทดสอบการชะละลาย (WET)

จากการทดสอบการชะละลายของวัสดุคิบ ค่าที่ได้ที่ทุกความเข้มข้นไม่เกินมาตรฐานของประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมเรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ. 2548

จากผลการวิจัยทั้งหมดสรุปได้ว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำวัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr : Cu : Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 % โดยน้ำหนัก ทำให้กระบวนการเผาที่สมบูรณ์ แต่ยังไม่ดีกว่าตัวอย่างควบคุม และ วัตถุดิบที่ผสมโลหะหนัก Cr : Pb : Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 2.5 % โดยน้ำหนัก ทำให้เกิดกระบวนการเผาที่สมบูรณ์ และผ่านมาตรฐานและดีกว่าตัวอย่างควบคุม ส่วนวัตถุดิบที่ผสมกากตะกอนทั้งสองชนิดนั้น เมื่อดูที่ผลกำลังรับแรงอัดนั้นผ่านมาตรฐาน แต่ค่าองค์ประกอบที่เป็นผลึกและองค์ประกอบทางเคมีนั้น ไม่อยู่ในค่ามาตรฐาน จึงไม่ก่อให้เกิดกระบวนการเผาที่สมบูรณ์

5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) การใช้เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดข้อนั้น ควรทำให้ผนังเตาเผามีความแข็งแรงทนทานมากกว่าปกติ เพราะเมื่อปูนที่ได้มีส่วนผสมของวัสดุที่ติดอยู่ที่ตามผนังเตาหลุดออกมาจำนวนหนึ่ง ต้องมีการแยกวัสดุเหล่านี้ก่อนนำไปวิเคราะห์ หรือมีการนำแม่เหล็กมาติดตั้งเพื่อแยกชิ้นส่วนเหล่านี้ออก
- (2) เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดข้อนั้น การสร้างให้มีระบบหมุนเวียนวัตถุดิบกลับมาใช้ใหม่ เนื่องจากการฟุ้งกระจายของวัตถุดิบในขณะที่ทำการทดลอง ทำให้มีการสูญเสียของวัตถุดิบในปริมาณหนึ่ง จึงทำให้ได้เม็ดปูนที่น้อยกว่าปกติ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฤษณ์ จารุทะวีย์. (2545). การใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยของขานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. (2543). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง (ซีแพค).

ทศพร ภูระหงษ์. (2545). ประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักบางชนิดในน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผงวงจรมพิมพ์ด้วยตัวกลางเศษคอนกรีต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สภาวาระแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประยูร ฟองสถิตย์กุล, ชลาชัย ห่วงประเสริฐ, พิทยา จารุพูนผล และ วิสิทธิ์ สุขป้อม.(2542). การนำเถ้าเถ้าใยปาล์มในน้ำทิ้งจากกระบวนการชุบโลหะด้วยสังกะสีโดยวิธีออกซิเดชันด้วยสารโปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต. วารสารสารานุกรมสุขศาสตร์ 29.2 : 38-46.

โรงงานอุตสาหกรรม, กรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง การกำจัดสิ่งปฏิกูลหรือวัสดุที่ไม่ใช้แล้ว พ.ศ.2548 (ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา http://www.diw.go.th/diw_web/htm (15 ตุลาคม 2550).

วินิต ช่อวิเชียร. (2544). คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สนธิสัญญาและยุทธศาสตร์. สำนัก. อนุสัญญาบาเซลว่าด้วยการควบคุมการเคลื่อนย้ายข้ามแดนของของเสียอันตรายและการกำจัด(ระบบออนไลน์). แหล่งที่มา: <http://www2.diw.go.th/treaty/basel.htm> [28 มิถุนายน 2548]

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. ITAS-Project

- American Society for Testing and Materials. (2005). (ASTM) C109/C109 M-05, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar (using 2 in or 50 mm cube specimens), ASTM international, 1-9.
- Andrade, F. R. D., Maringolo, V., and Kihara, Y. (2003). Incorporation of V, Zn and Pb into the Crystalline Phases of Portland Clinker. Cement and Concrete Research. 33: 63-71.
- 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.
- Garavaglia, R., and Caramuscio, P. (1994). Coal Fly-Ash Leaching Behavior and Solubility Controlling Solids. In: Goumans, J.J.J.M.; Van der Sloot, H. A., Aalbers, Th.G.: Environmental Aspects of Construction with Waste Materials. Studies in Environmental Science, Bd. 60, Utrecht, Elsevier Science BV.
- Lemieux, P., Stewart, E., Realf, M., and Mulholland, J.M. (2003). Emissions study of co-firing waste carpet in a rotary kiln. Journal of environmental management. 27-33.
- Li, X.D., Poon, C.S., Sun, H., Lo, I.M.C., Krik, D.W. (2001). Heavy metal speciation and leaching behaviors in cement based solidified/stabilized waste materials, Journal of Hazardous Materials A82: 215-230.
- Murat, M., and Sorrentino, F. (1996). Effect of large addition of Cd, Pb, Cr, and Zn to cement raw meal on the composition and the properties of the clinker and the cement. Cement and concrete research 26: 377-385
- Odler, I., and Schmidt, O. (1980). Structure and properties of Portland cement clinker doped with zinc oxide, J Am Ceram Soc 63: 13-16.
- Polletini, A., Pomi, R., and Sirini, P. (2002). Fractional factorial design to investigate the influence of heavy metals and anions on acid neutralization behavior of cement-based products. Environmental Science and Technology. 36(7):1584-91.
- Ract, P. G., Espinosa, D. C. R., and Tenorio, J. A. S. (2003). Determination of Cu and Ni Incorporation Ratios in Portland cement Clinker. Waste Management. 23: 281-285.
- Rehmet, A.; Lee, A.; Goyal, A.; and Mensinger, M.C. Construction-grade cement production from contaminated sediment using cement-lock technology, The Institute of Gas Technology (IGT), (1999) 1-11.
- Siam City Cement Public Company Limited. (2005). Environmental Care. Environmental Initiatives [Online]. Available from: <http://www.siamcitycement.com> [2005, June 12]

- Scheidegger, A. M., Wieland, E., Scheinort, A. C., Dahn, R., and Spieler, P. (2000). Spectroscopic evidence for the formation of layered Ni-Al double hydroxide in cement. Environmental Science and Technology. 34:4545-4548.
- Stegemann, J. A., and Buenfeld, N. R. (2003). Prediction of Unconfined Compressive Strength of Cement Paste Containing Industrial Wastes. Waste Management 23: 321-332.
- Taweekitwanit, E. (2004). Leaching behavior of heavy metals from cement derived from the co-burning of hazardous waste. Master's Thesis. International Postgraduate Programs in Environmental Management (Hazardous Waste Management). Chulalongkorn University.
- Tenorio, J.A.S and. Espinosa, D.C.R. (2000). Laboratory study of galvanic sludge's influence on the clinkerization process. Resources. Conservation and Recycling 31: 71-82.
- The GTZ-Holcim Public Private Partnership. Guidelines on Co-processing Waste Materials in Cement Production. 2006
- Trezza, M. A., and Scian, A. N. (2000). Burning Wastes as an Industrial Resource: Their Effect on Portland cement clinker. Cement and Concrete Research. 30: 137-144.
- Verband Deutscher Zeitchriftenvenleger. Germany. 2000 [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา:
<http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zementmerkblaetter/T1> [15 สิงหาคม 2550]



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

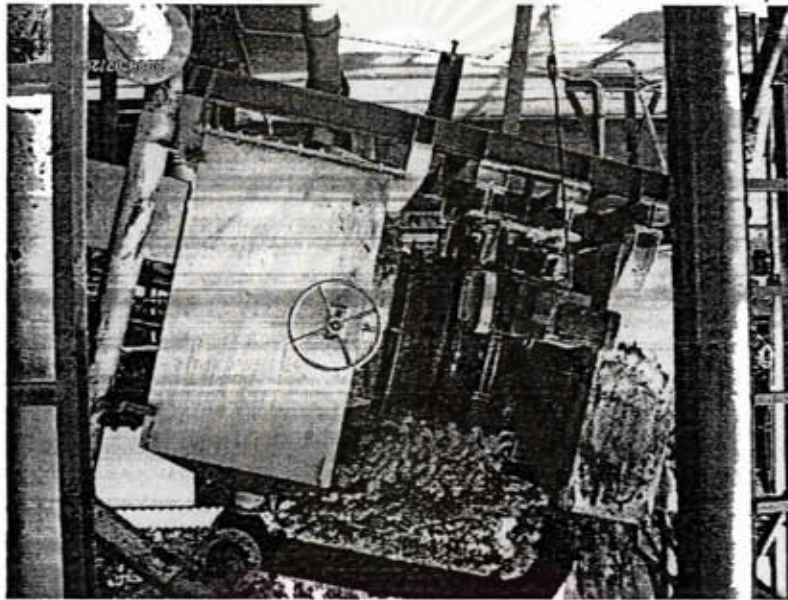


ภาคผนวก ก.

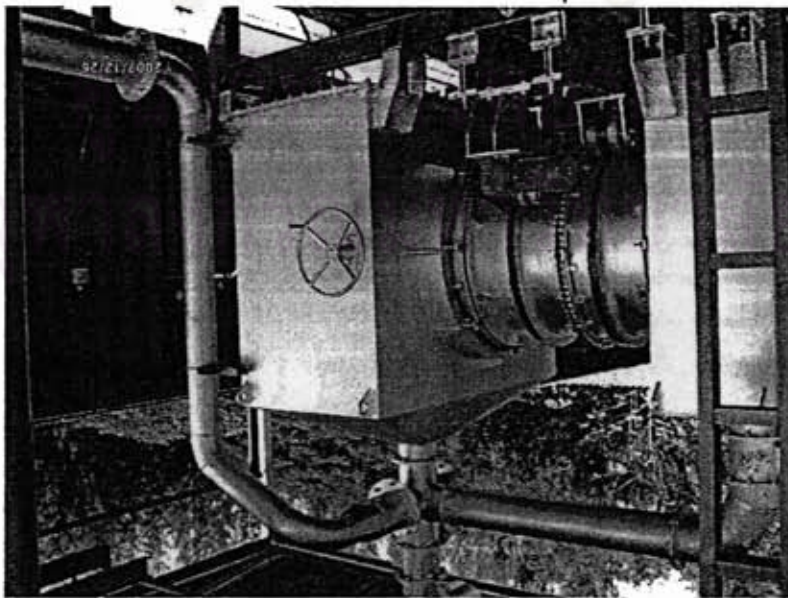
เตาเผาปูนซีเมนต์ขนาดย่อส่วน

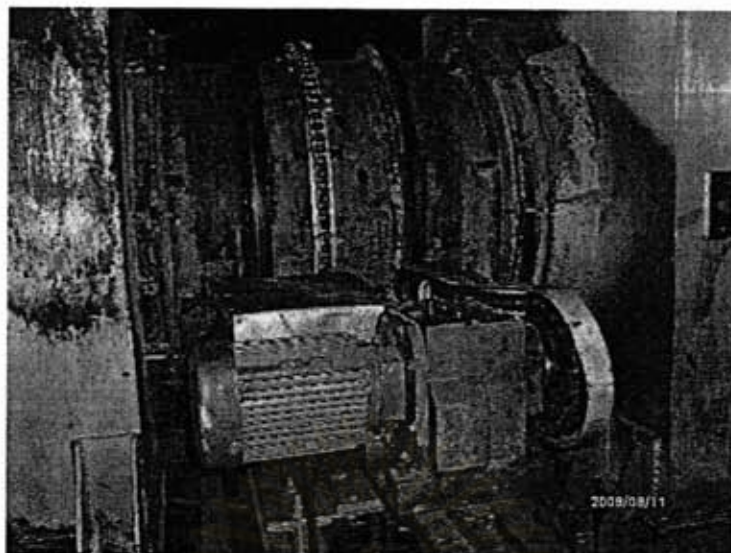
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

បទដ្ឋស្រូបស្រាវជ្រាវដោយប្រើប្រាស់កម្រិតស្រូបស្រាវជ្រាវកម្រិតស្រូបស្រាវជ្រាវ ៧០ ម៉ែត្រ

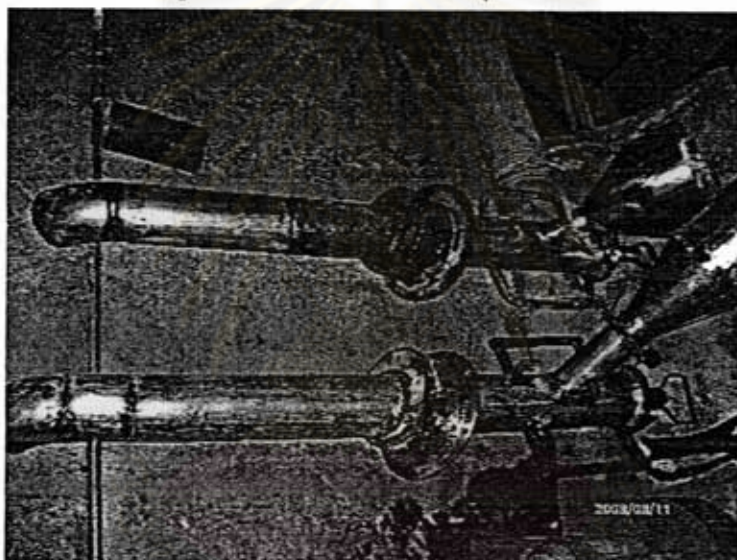


កម្រិតស្រូបស្រាវជ្រាវកម្រិតស្រូបស្រាវជ្រាវ ៧០ ម៉ែត្រ

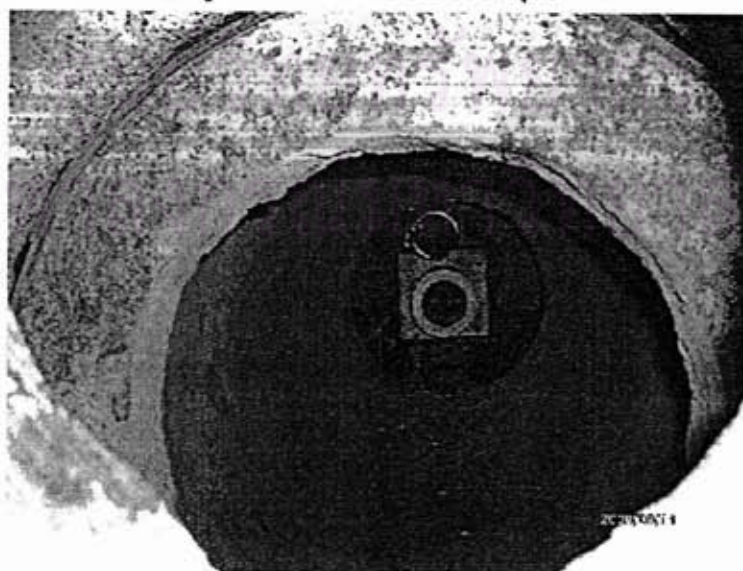




รูปที่ ก.3 มอเตอร์สำหรับหมุนเดาเผา



รูปที่ ก.4 ท่อสำหรับป้อนวัตถุดิบ



รูปที่ ก.5 หัวเบิร์นเนอร์ทั้ง 2 หัว



รูปที่ ก.6 ทดลมเป่าอากาศทั้ง 2



รูปที่ ก.7 ถังเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก.8 หอดคความเข็น



รูปที่ ก.9 ป้มลมสำหรับหอดคความเข็น



รูปที่ ก.10 กล่องควบคุมเตาเผา

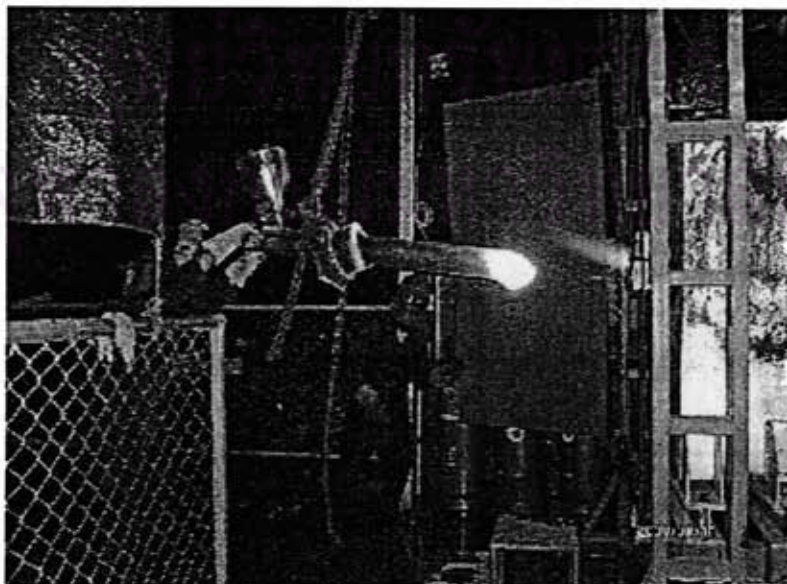
ศูนย์
จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.11 ชั้นตอนขณะป้อนวัตถุดิบ



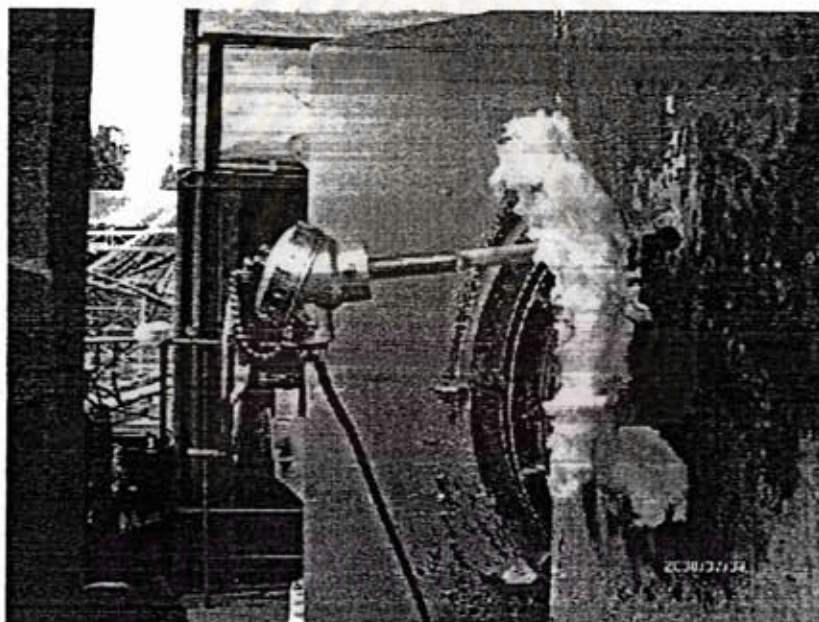
รูปที่ ก.12 ชั้นตอนขณะป้อนวัตถุดิบ



รูปที่ ก.13 ชั้นตอนขณะป้อนวัตถุดิบ




รูปที่ ก.14 ภายในเตาเผาขณะทำการทดลอง



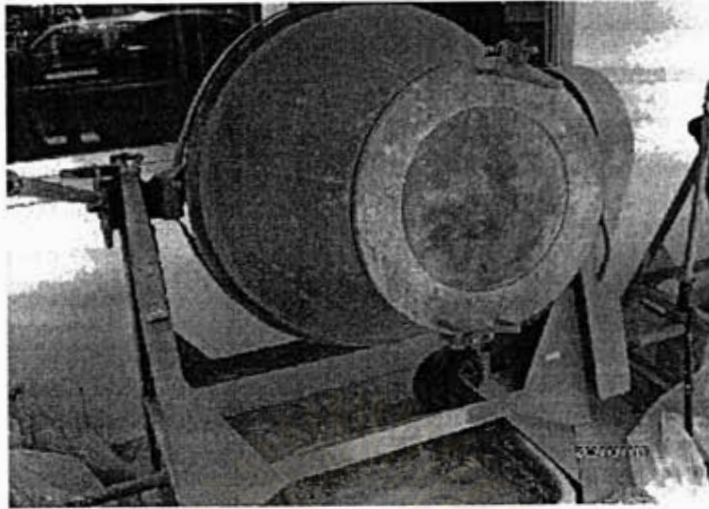
รูปที่ ก.15 ตัววัดอุณหภูมิภายในเตา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

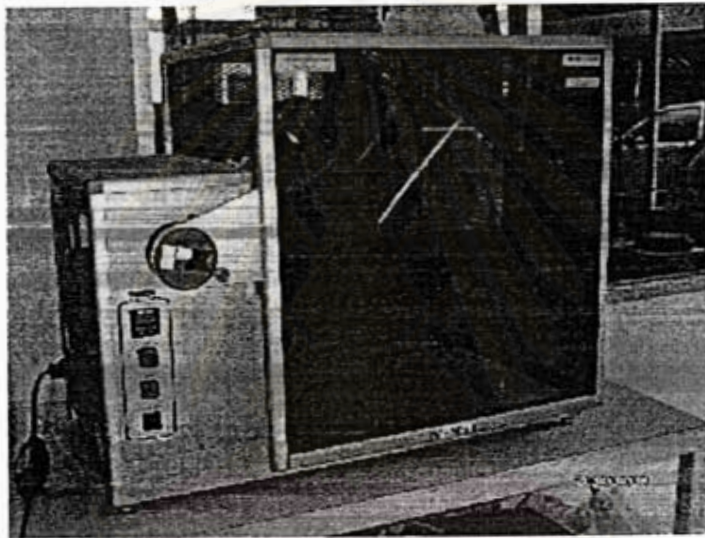


ภาคผนวก ข.
เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.1 เครื่องโม่ปูนซีเมนต์



รูปที่ ข.2 V-mix machine



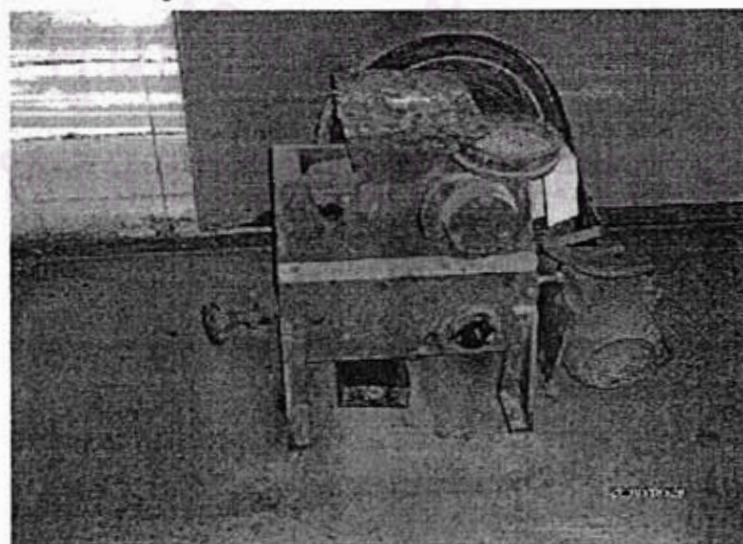
รูปที่ ข.3 เครื่องย่อยขนาดเม็ดปูนแบบเหยียง



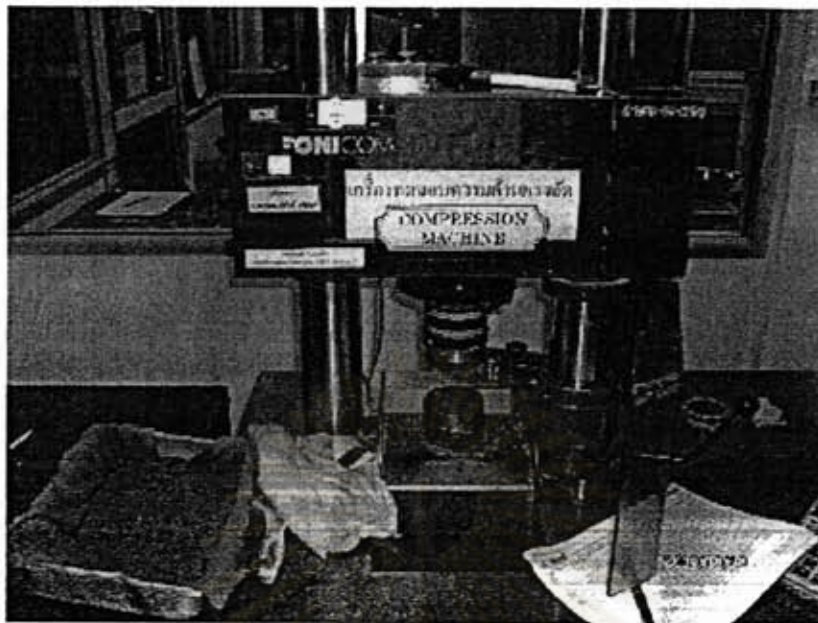
รูปที่ ข.4 เครื่องอัดตัวอย่างก่อนนำไปเข้าเครื่อง XRD และ XRF



รูปที่ ข.5 เครื่องตรวจวัด XRD และ XRF



รูปที่ ข.6 เครื่องย่อยขนาดเม็ดปูน



รูปที่ ข.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดก้อนมอร์ต้า



รูปที่ ข.8 แท่นอัดก้อนมอร์ต้า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก.
ข้อมูลดิบผลการทดลอง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบ

สารประกอบ (ร้อยละ)	วัตถุดิบจากเตาเผา 5 โรงงาน 3	วัตถุดิบจากเตาเผา 6 โรงงาน 3
SiO ₂	13.33	12.64
Al ₂ O ₃	2.89	3.010
Fe ₂ O ₃	2.04	2.05
CaO	44.04	44.61
MgO	1.06	0.93
K ₂ O	0.31	0.34
Na ₂ O	0.07	0.03
SO ₃	0.18	0.20
P ₂ O ₅	0.06	0.06
Cl	0.01	0.01
TiO ₂	0.15	0.14
Mn ₂ O ₃	0.04	0.04
SUM	99.88	99.98
LSF	104.76	110.81
Silica Modulus (SM)	2.71	2.50
Alumina Modulus (AM)	1.40	1.47
Loss on Ignition	35.72	36.07

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.2 ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบหลังจากแบ่งเป็นถุงละ 10 kg

สารประกอบ (ร้อยละ)	วัตถุดิบจากเตาเผา 5 โรงงาน 3	วัตถุดิบจากเตาเผา 6 โรงงาน 3
SiO ₂	13.33	12.64
Al ₂ O ₃	2.89	3.010
Fe ₂ O ₃	2.04	2.05
CaO	44.04	44.61
MgO	1.06	0.93
K ₂ O	0.31	0.34
Na ₂ O	0.07	0.03
SO ₃	0.18	0.20
P ₂ O ₅	0.06	0.06
Cl	0.01	0.01
TiO ₂	0.15	0.14
Mn ₂ O ₃	0.04	0.04
SUM	99.88	99.98
LSF	104.76	110.81
Silica Modulus (SM)	2.71	2.50
Alumina Modulus (AM)	1.40	1.47
Loss on Ignition	35.72	36.07

ตารางที่ ค.3 ผลวิเคราะห์ XRF ของหินเชล ดินเหนียว และผสมทั้งสองอย่างเข้าด้วยกัน

สารประกอบ (ร้อยละ)	หินเชล	ดินเหนียว	หินเชล:ดินเหนียว (5:4)
SiO ₂	76.17	35.21	57.86
Al ₂ O ₃	11.20	29.22	18.38
Fe ₂ O ₃	5.49	13.10	7.51
CaO	3.67	1.21	3.71
MgO	0.70	0.35	0.58
K ₂ O	1.78	0.001	1.11

Na ₂ O	0.09	0.001	0.01
SO ₃	0.16	0.03	0.12
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.09
Cl	0.001	0.001	0.001
TiO ₂	0.50	1.42	0.78
Mn ₂ O ₃	0.06	0.09	0.06
SUM	103.54	82.02	93.75
LSF	1.60	0.86	1.97
Silica Modulus (SM)	4.56	0.83	2.24
Alumina Modulus (AM)	2.04	2.23	2.45
Loss on Ignition	3.65	1.33	3.55

ตารางที่ ๓.4 ผลวิเคราะห์ XRF ของวัตถุดิบที่ผสมหินเชลและดินเหนียว

สารประกอบ	วัตถุดิบ (ร้อยละ)
SiO ₂	14.35
Al ₂ O ₃	3.29
Fe ₂ O ₃	2.30
CaO	43.10
MgO	0.97
K ₂ O	0.34
Na ₂ O	0.05
SO ₃	0.23
P ₂ O ₅	0.06
Cl	0.01
TiO ₂	0.16
Mn ₂ O ₃	0.04
SUM	99.78
LSF	94.57
Silica Modulus (SM)	2.57
Alumina Modulus (AM)	1.43
Loss on Ignition	34.88

ตารางที่ ค.5 ผลวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของวัตถุคืบ

โลหะหนัก	ปริมาณ (ร้อยละ)
Cr	23.6
Cu	102
Zn	326
Ni	10.7
As	13
Se	N/D
Ba	62.6
Pb	14.1
V	16.9
Sb	N/D
Tl	1.18
Cd	0.1
Hg	N/D
Ca	33370
Al	4602
Fe	10170

ตารางที่ ค.6 ปริมาณโลหะหนัก Cr:Cu:Ni ตามความเข้มข้นต่างๆในวัตถุคืบ

โลหะหนัก Cr:Cu:Ni	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	1439 : 1587 : 2497
1.0 %	3248 : 3416 : 5043
2.5 %	8467 : 7670 : 11410
5.0 %	17362 : 14810 : 25880

ตารางที่ ค.7 ปริมาณโลหะหนัก Cr:Pb:Zn ตามความเข้มข้นต่างๆในวัตถุคืบ

โลหะหนัก Cr:Pb:Zn	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	253 : 737 : 2026
1.0 %	586 : 1685 : 12970
2.5 %	1547 : 5367 : 9513
5.0 %	2918 : 8078 : 18350

ตารางที่ ค.8 ปริมาณโลหะหนักจากกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ใน
วัดคูขี้

ตะกอนโรงงานอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ (Cr:Cu:Ni)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	60.56 : 140.5 : 848
1.0 %	60.18 : 127.7 : 889
2.5 %	60.60 : 143.1 : 996
5.0 %	57.94 : 149.3 : 1219

ตารางที่ ค.9 ปริมาณโลหะหนักจากกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็กในวัดคูขี้

ตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก (Cr:Pb:Zn)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 %	82.46 : 80.45 : 1002
1.0 %	117.7 : 153.96 : 2005
2.5 %	146.46 : 314.14 : 4514
5.0 %	243.56 : 638.79 : 9469

ตารางที่ ค.10 ปริมาณโลหะในกากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

โลหะ หนัก	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Ti	Tl	V	Zn
ปริมาณ (mg/kg)	<25	<25	<25	<25	4,928	1,406	<25	180	4,200	291	<25	194	<25	<25	<25	11,193

ตารางที่ ค.11 ปริมาณโลหะในกากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

โลหะ หนัก	Ag	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Sb	Sn	Ti	Tl	V	Zn
ปริมาณ (mg/kg)	98	95	334	127	2,780	1,056	<25	5,985	289	6,471	<25	1,177	660	107	<25	>50,000

ตารางที่ ค.12 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างควบคุม

วัตถุดิบ	ค่าความชื้น (%)	การสูญเสียน้ำหนัก (%)
ตัวอย่างควบคุม	0.206	4.790

ตารางที่ ค.13 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Cu:Ni

โลหะหนัก Cr:Cu:Ni	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.09	5.10
1.0 %	0.11	5.20
2.5 %	0.10	5.00
5.0 %	0.11	5.05
Average	0.1025	5.09

ตารางที่ ค.14 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของโลหะหนัก Cr:Pb:Zn

โลหะหนัก Cr:Pb:Zn	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.20	4.80
1.0 %	0.24	5.31
2.5 %	0.22	5.10
5.0 %	0.18	9.21
Average	0.21	6.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.15 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนโรงงานอุตสาหกรรม
อิเล็กทรอนิกส์

ตะกอนโรงงาน อุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.15	6.5
1.0 %	0.19	6.7
2.5 %	0.18	6.8
5.0 %	0.2	7.2
Average	0.18	6.8

ตารางที่ ค.16 ค่าความชื้นและการสูญเสียน้ำหนักของตะกอนจาก โรงงานหลอมเหล็ก

ตะกอนจากโรงงาน หลอมเหล็ก (mg/kg)	Moisture content (%)	Loss on ignition (%)
0.5 %	0.21	7.3
1.0 %	0.26	7.4
2.5 %	0.28	7.9
5.0 %	0.33	8.6
Average	0.27	7.8

ตารางที่ ค.17 ผลวิเคราะห์การทดลองเผาแบบ Static

จุด	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	ปูนขาวอิสระ (%)
1	75.54	3.26	10.54	8.57	6.03
2	70.03	5.56	11.87	8.95	3.92
3	62.13	16.53	7.68	10.33	0.69
4	65.20	13.72	7.49	10.22	0.73
5	58.49	21.05	7.77	10.35	2.64
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

ตารางที่ ค.18 ผลวิเคราะห์เม็ดปูนของตัวอย่างควบคุม

เม็ดปูน (Clinker)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	ปูนขาวอิสระ (%)
ตัวอย่างควบคุม	64.41	10.45	7.62	10.25	1.46
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

ตารางที่ ค.19 องค์ประกอบที่เป็นผลึกและ ปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni

(1:1:1)

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	65.92	15.26	7.78	11.04	1.027
1.0 %	67.54	10.40	8.83	13.23	1.13
2.5 %	74.04	5.45	8.98	11.53	2.641
5.0 %	77.11	5.50	7.44	9.95	3.311
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

ตารางที่ ค.20 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความ

เข้มข้นต่างกัน

ความ เข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	21.55	5.00	3.45	65.10	95.04	2.54	1.44
1.0 %	19.91	5.69	4.05	63.43	97.41	2.04	1.40
2.5 %	19.23	5.23	3.41	62.10	99.75	2.22	1.53
5.0 %	17.40	4.64	3.10	59.20	105.26	2.24	1.49
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

ตารางที่ ค.21 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Pb:Zn (1:4:13)

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	62.48	19.00	7.69	10.83	0.86
1.0 %	64.95	16.39	7.57	11.08	0.78
2.5 %	70.64	11.38	7.10	10.89	0.70
5.0 %	80.10	0.82	6.88	12.20	0.89
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

ตารางที่ ค.22 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสม Cr:Pb:Zn(1:4:13 ที่ความเข้มข้นต่างกัน)

ความเข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	22.43	4.97	3.41	65.46	93.41	2.63	1.45
1.0 %	21.57	4.96	3.49	64.72	99.44	2.54	1.42
2.5 %	20.69	4.55	3.28	63.23	96.59	2.63	1.38
5.0 %	18.09	4.49	3.49	59.55	102.24	2.26	1.28
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

ตารางที่ ค.23 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี และปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสมกากตะกอนโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	53.18	24.80	9.29	10.33	2.14
1.0 %	49.91	27.37	10.02	10.62	2.20
2.5 %	38.60	36.66	12.51	10.36	2.34
5.0 %	22.88	47.57	16.82	10.66	2.75
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

ตารางที่ ค.24 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสมภาคตะกอน โรงงาน
อิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้นต่างกัน

ความ เข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	22.64	5.67	3.39	65.90	91.13	2.49	1.67
1.0 %	22.68	6.01	3.49	65.75	90.23	2.38	1.72
2.5 %	22.94	6.90	3.41	64.91	86.99	2.22	2.02
5.0 %	22.61	8.58	3.50	63.25	83.50	1.86	2.44
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

ตารางที่ ค.25 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและปูนขาวอิสระของวัตถุดิบที่ผสม ภาคตะกอน
โรงงานเหล็ก

ความเข้มข้น	องค์ประกอบที่เป็นผลึก (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	Free Lime
0.5 %	54.35	22.66	8.48	11.50	1.93
1.0 %	54.90	22.02	8.20	11.71	2.16
2.5 %	55.29	20.38	6.30	13.65	2.33
5.0 %	57.97	13.14	4.57	17.83	2.56
มาตรฐาน	63-70	7-14	6.5-8.5	9-11	<1.8

ตารางที่ ค.26 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบที่ผสม ภาคตะกอน โรงงานเหล็ก ที่
ความเข้มข้นต่างกัน

ความ เข้มข้น	องค์ประกอบทางเคมี (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	LSF	SM	AM
0.5 %	22.20	5.61	3.78	65.41	91.77	2.36	1.48
1.0 %	22.12	5.55	3.85	65.32	91.97	2.35	1.44
2.5 %	21.65	5.24	4.49	64.25	92.11	2.22	1.16
5.0 %	19.84	5.47	5.86	62.37	64.75	1.74	0.93
มาตรฐาน	20-22	4-6	3-4	64-67	94-96	≥2.2	≥1.4

ตารางที่ ก.27 ปริมาณโลหะหนักในเมล็ดปุ่นของตัวอย่างควบคุม

โลหะหนัก	ปริมาณ (mg/l)
Cr	65
Cu	157
Ni	21.2
Pb	N/D
Zn	297
Al	22900
As	37.8
Ba	120
Ca	44730
Cd	N/D
Fe	14830
Hg	N/D
Sb	N/D
Se	0.56
Tl	N/D
V	43

ตารางที่ ก.28 ปริมาณโลหะหนักในเมล็ดปุ่นที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Cu:Ni)	2773 : 2396 : 3426
1.0 % (Cr:Cu:Ni)	6416 : 4747 : 7337
2.5 % (Cr:Cu:Ni)	14880 : 10490 : 16100
5.0 % (Cr:Cu:Ni)	24620 : 21540 : 24650

ตารางที่ ค.29 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Pb:Zn)	594 : 210 : 11230
1.0 % (Cr:Pb:Zn)	1076 : 504 : 27960
2.5 % (Cr:Pb:Zn)	2566 : 2098 : 48950
5.0 % (Cr:Pb:Zn)	5002 : 4157 : 92310

ตารางที่ ค.30 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Cu:Ni)	130.6 : 211.3 : 4017
1.0 % (Cr:Cu:Ni)	122.4 : 242.5 : 4384
2.5 % (Cr:Cu:Ni)	170.02 : 355.13 : 5389
5.0 % (Cr:Cu:Ni)	97.94 : 385.27 : 6033

ตารางที่ ค.31 ปริมาณโลหะหนักในเม็ดปูนที่ผสมจากตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก

โลหะหนัก (mg/kg)	ปริมาณ (mg/kg)
0.5 % (Cr:Pb:Zn)	140.32 : 39.35 : 2390
1.0 % (Cr:Pb:Zn)	275.1 : 68.6 : 3561
2.5 % (Cr:Pb:Zn)	360.0 : 133.2 : 12840
5.0 % (Cr:Pb:Zn)	483.27 : 309.3 : 20169

ตารางที่ ค.32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

	ตัวอย่าง ควบคุม	ความเข้มข้น				
		0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	มอก.
Blaine (cm ² /g)	2800	2800	2800	2800	2800	>2800
Strength 1 วัน (kg/cm ²)	70.21	63.85	15.23	22.11	21.77	-
Strength 7 วัน (kg/cm ²)	207.42	162	129.82	79.82	59.51	150
Strength 28 วัน (kg/cm ²)	304.27	251	212.07	161.22	155.22	245

ตารางที่ ค.33 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn
(1:4:13)

	ตัวอย่าง ควบคุม	ความเข้มข้น				
		0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	มอก.
Blaine (cm^2/g)	2800	2800	2800	2800	2800	>2800
Strength 1 วัน (kg/cm^2)	70.21	63.85	15.23	22.11	21.77	-
Strength 7 วัน (kg/cm^2)	207.42	162	129.82	79.82	59.51	150
Strength 28 วัน (kg/cm^2)	304.27	251	212.07	161.22	155.22	245

ตารางที่ ค.34 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมกากตะกอนจากโรงงาน
อิเล็กทรอนิกส์

	ตัวอย่าง ควบคุม	ความเข้มข้น				
		0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	มอก.
Blaine (cm^2/g)	2800	2800	2800	2800	2800	>2800
Strength 1 วัน (kg/cm^2)	70.21	19.98	35.44	33.18	20.7	-
Strength 7 วัน (kg/cm^2)	207.42	177.18	191.83	207.19	170.98	150
Strength 28 วัน (kg/cm^2)	304.27	279.27	298.47	333.8	290.35	245

ตารางที่ ค.35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนมอร์ต้าที่ผสมกากตะกอนจากโรงงาน
หลอมเหล็ก

	ตัวอย่าง ควบคุม	ความเข้มข้น				
		0.5 %	1.0 %	2.5 %	5.0 %	มอก.
Blaine (cm^2/g)	2800	2800	2800	2800	2800	>2800
Strength 1 วัน (kg/cm^2)	70.21	19.98	35.44	33.18	20.7	-
Strength 7 วัน (kg/cm^2)	207.42	177.18	191.83	207.19	170.98	150
Strength 28 วัน (kg/cm^2)	304.27	279.27	298.47	333.8	290.35	245

ตารางที่ ก.36 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 %
โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	5.63
O	41.90
Si	13.59
Ca	38.00
Cr	0.88

ตารางที่ ก.37 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 %
โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	5.67
O	52.32
Si	4.44
Ca	34.92
Cr	0.79
Ni	0.70

ตารางที่ ก.38 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสม โลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1) ที่ความเข้มข้น 5.0 %
โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	5.68
O	37.81
Si	4.53
K	0.34
Ca	42.21
Cr	1.13
Ni	4.13
Cu	4.17

ตารางที่ ก.39 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	3.00
O	35.29
Al	3.69
Si	8.97
Ca	37.22
Cr	1.46
Fe	3.56
Zn	6.80

ตารางที่ ก.40 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	3.21
O	34.61
Al	2.38
Si	8.91
Ca	40.68
Cr	1.55
Fe	3.40
Zn	5.27

ตารางที่ ก.41 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13) ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	4.15
O	32.44
Al	2.07
Si	7.49
Ca	31.40
Cr	2.40
Fe	10.19
Zn	9.87

ตารางที่ ก.42 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ธาตุ	ร้อยละ (%)
O	25.36
AL	1.79
Si	7.6
K	0.74
Ca	63.43
Fe	1.17

ตารางที่ ก.43 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมกากตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	4.93
O	15.51
Al	0.82
Si	13.15
Ca	65.58

ตารางที่ ก.44 ร้อยละของธาตุไนเบ้คปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ที่ความเข้มข้น 50.000 mg/kg ที่ Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	9.4
O	25.27
Mg	0.73
Al	11.84
Si	1.86
Ca	36
Ti	0.62
Fe	14.27

ตารางที่ ก.45 ร้อยละของธาตุไนเบ้คปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.1

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	12.32
O	30.54
Mg	0.65
Al	0.52
Si	11.98
Ca	44.0

ตารางที่ ก.46 ร้อยละของธาตุไนเบ้คปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.2

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	4.31
O	24.32
Al	1.14
Si	15.51
K	1.06
Ca	52.72
Zn	0.93

ตารางที่ ค.47 ร้อยละของธาตุในเม็ดปูนที่ผสมภาคตะกอนจากโรงงานหลอมเหล็ก ที่ความเข้มข้น 5.0 % โดยน้ำหนัก ที่ Spectrum no.3

ธาตุ	ร้อยละ (%)
C	6.64
O	33.98
Al	1.05
Si	12.01
K	0.59
Ca	45.91

ตารางที่ ค.49 แสดงผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมโลหะหนัก Cr:Cu:Ni (1:1:1)

โลหะหนัก Cr:Cu:Ni	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l)
0.5 %	0.17 / ND / ND	5 / 25 / 20
1.0 %	0.362 / ND / ND	5 / 25 / 20
2.5 %	0.042 / ND / ND	5 / 25 / 20
5.0 %	0.839 / ND / 0.011	5 / 25 / 20

ตารางที่ ค.50 แสดงผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมโลหะหนัก Cr:Pb:Zn (1:4:13)

โลหะหนัก Cr:Pb:Zn	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l)
0.5 %	0.362 / ND / ND	5 / 5 / 250
1.0 %	0.271 / ND / ND	5 / 5 / 250
2.5 %	0.175 / ND / ND	5 / 5 / 250
5.0 %	0.771 / 0.370 / 0.328	5 / 5 / 250

ตารางที่ ค.51 แสดงผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมกากตะกอนจากโรงงาน
อิเล็กทรอนิกส์

กากตะกอนจากโรงงาน อิเล็กทรอนิกส์	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l) (Cr:Cu:Ni)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l) (Cr:Cu:Ni)
0.5 %	0.08 / ND / ND	5 / 25 / 20
1.0 %	0.336 / ND / ND	5 / 25 / 20
2.5 %	0.71 / ND / ND	5 / 25 / 20
5.0 %	0.864 / ND / 0.15	5 / 25 / 20

ตารางที่ ค.52 แสดงผลการทดสอบการชะละลายของตัวอย่างที่ผสมกากตะกอนจากโรงงาน
หลอมเหล็ก

กากตะกอนจากโรงงาน หลอมเหล็ก	ความเข้มข้นของโลหะหนัก (mg/l) (Cr:Pb:Zn)	ค่ามาตรฐานที่ยอมรับได้ (mg/l) (Cr:Pb:Zn)
0.5 %	0.55 / ND / 0.161	5 / 5 / 250
1.0 %	0.837 / 0.122 / 0.24	5 / 5 / 250
2.5 %	0.895 / 0.201 / 0.380	5 / 5 / 250
5.0 %	1.047 / 0.428 / 0.53	5 / 5 / 250

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐธรา ตั้งกิตติธรา เกิดเมื่อวันที่ 1 เดือนเมษายน พ.ศ. 2527 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตภาคพายัพ ในปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย