การใช้ตะกรันดีบุกเป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วน

นางสาว วิริยา เทวนุกูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4913-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

UTILIZATION OF TIN SLAG AS A PARTIAL CEMENT REPLACEMENT

Miss Wiriya Tevanukul

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4913-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ตะกรันดีบุกเป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วน
โดย	นางสาว วิริยา เทวนุกูล
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บุญยง โลห์วงศ์วัฒน)

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

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิริยา เทวนุกูล : การใช้ตะกรันดีบุกเป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วน. (UTILIZATION OF TIN SLAG AS A PARTIAL CEMENT REPLACEMENT) อ. ที่ปรึกษา : อ. ดร. มนัสกร ราชากรกิจ, 114 หน้า. ISBN 974-17-4913-9.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันดีบุกจากกระบวนการถลุงแร่ดีบุกมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานของตะกรันดีบุก การชะละลายโลหะหนักโดยวิธีการสกัดสารตามข้อกำหนดในประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) ดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลาน สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแทนที่ตะกรันดีบุกในการผสมมอร์ตาร์ การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก และการศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffraction Spectrometry) รวมทั้งการนำตะกรันดีบุกมาผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ตะกรันดีบุกจัดเป็นวัสดุปอซโซลานคุณภาพตามมาตรฐาน ASTM C618 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายมีค่าไม่เกินมาตรฐานที่กำหนด จากการศึกษาผลของขนาดตะกรันพบว่าเมื่อนำตะกรันดีบุกขนาดเล็กกว่า 75 ไมครอนมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักในการผสมมอร์ตาร์ โดยใช้สัดส่วนวัสดุประสานต่อน้ำ เท่ากับ 1:0.5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 245 กก./ตร.ซม.ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.15 สำหรับมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนขาวมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามาตรฐานมาก ในการศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัด พบว่าซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และ50 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่มหลัง 28 วัน ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาปอซโซลาน สำหรับการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อทรายต่อหินเกล็ดต่อน้ำ เท่ากับ 1:1.2:1.8:0.5 ปริมาณตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ เท่ากับ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดมากกว่ามาตรฐาน มอก.827 ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน และมีต้นทุนการผลิต เท่ากับ 2.88 บาทต่อก้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต .....
สาขาวิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2546.....

##4370497121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORD : TIN SLAG / CEMENT REPLACEMENT / COMPRESSIVE STRENGTH
WIRIYA TEVANUKUL : UTILIZATION OF TIN SLAG AS A PARTIAL CEMENT REPLACEMENT
THESIS ADVISOR : MANASKORN RACHAKORNKIJ, Ph.D., 114 pp. ISBN 974-17-4913-9.

This research was to investigate experimentally the possibility of tin slag utilization from tin smelter in producing pure tin ingot as a partial cement replacement material. By studying both physical and chemical characteristics of slag, leachate according to the extraction procedure described in the Notification of Ministry of Industry No.6 (1997), the pozzolanic index and properties of slag-cement mortar and slag-lime mortar. Development of hydration reaction in cement paste using X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) was also investigated. Additionally, use of slag-cement concrete for making interlocking concrete paving blocks was evaluated.

The results of the experiments indicated that tin slag could be classified as a pozzolanic material according to ASTM C618 requirements and the amount of all regulated heavy metals in the leachate met the regulatory limits. The slag was classified into four sizes according to its particles namely; slag, slag #50, slag #100 and slag #200. It was found that the slag having particle sizes of smaller than 75 micron could effectively replace cement by 30% by weight. The 28-day compressive strength was over 245 kg/cm^2 which satisfied the TIS-15. However, the compressive strength of the slag-lime mortars did not satisfy the standard at any mixing proportions. The development of the reaction shown in the results of XRD indicated that cement paste with 30% and 50 % replacement by slag after 28 days of curing showed a decrease in amount of calcium hydroxide due to pozzolanic reaction. A binder-to-sand-to-gravel-to-water ratio of 1:1.2:1.8:0.5 was used to produce concrete paving blocks. The blocks with appropriate cement replacement of 30% produced, provided 14-day compressive strength that exceeded the TIS-827 and cost about 2.88 baht per piece.

Department .....Environmental Engineering..... Student's signature .....
Field of study .....Environmental Engineering..... Advisor's signature .....
Academic year .....2003.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ อาจารย์ ดร. มนัสกร ราชากรกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัย จนสำเร็จลุล่วง

ขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ สำหรับข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะในงานวิจัยนี้

ขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการคอนกรีต และห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับอุปกรณ์บางส่วนและสถานที่ในการทำงานวิจัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบคุณบริษัทไทยแลนด์สเมลติ้งแอนด์รีไฟนิ่ง จำกัด ที่อนุเคราะห์ตะกรันดีบุก และเอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำงานวิจัย

ขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้บางส่วน

ขอบคุณบิดา มารดา และน้อง ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือ ทั้งในขณะศึกษาและทำงานวิจัยเป็นอย่างดี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ
กิตติกรรมประกาศ..... ฉ
สารบัญ..... ช
สารบัญตาราง..... ฌ
สารบัญรูป..... ฐ
สัญลักษณ์และคำย่อ..... ฒ

บทที่ 1 บทนำ..... 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย..... 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
2.1 ศัพท์และความหมาย..... 4
2.2 ดีบุก..... 4
2.3 การถลุงแร่ดีบุก..... 6
2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 9
2.5 ปูนขาว..... 15
2.6 วัสดุใหม่ในงานคอนกรีต..... 16
2.7 คอนกรีตบล็อก..... 21
2.8 การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 22

บทที่ 3 แผนการดำเนินการวิจัย..... 28
3.1 วัสดุ สารเคมี เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยที่ใช้ในการวิจัย..... 28
3.2 การดำเนินการวิจัย..... 32
การทดลองที่ 1 การศึกษาลักษณะกายภาพ องค์ประกอบเคมี และการชะละลาย
ของตะกรันดีบุก..... 32
การทดลองที่ 2 การศึกษาดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก..... 34

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของขนาดตะกรันดีบุก สัดส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลของระยะเวลาบ่ม และกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก..... 34
การทดลองที่ 4 การศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดย X-Ray Diffraction Spectrometry..... 36
การทดลองที่ 5 การศึกษาการนำตะกรันดีบุกไปใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นและการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น..... 36
3.3 การวิเคราะห์ผลการวิจัย..... 37

บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล..... 38
4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ..... 38
4.2 ดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก..... 52
4.3 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแทนที่ด้วยตะกรันดีบุกบางส่วน..... 70
4.4 การศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัด โดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD)..... 63
4.5 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น..... 69

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 73
5.1 สรุปผลการวิจัย..... 73
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต..... 74

รายการอ้างอิง..... 75
บรรณานุกรม..... 78
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก ข้อมูลค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น..... 80
ภาคผนวก ข ข้อมูลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry..... 90
ภาคผนวก ค วิธีการทดลอง 107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 114

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบโดยประมาณของแร่ดีบุกที่ใช้ในการถลุง..... 6
ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบเคมีของตะกรันแรก และตะกรันสุดท้าย..... 7
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 10
ตารางที่ 2.4 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 10
ตารางที่ 2.5 สมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 11
ตารางที่ 2.6 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C618..... 14
ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ PFA GGBS และMS 18
ตารางที่ 2.8 ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของปูนซีเมนต์ PFA GGBS และ MS 18
ตารางที่ 3.1 ขนาดของตะแกรง (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM 33
ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว 39
ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว..... 41
ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก และตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 44
ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก และตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200..... 47
ตารางที่ 4.5 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายของตะกรันดีบุก..... 51
ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน..... 52
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าต่างๆของตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่วกับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพวัสดุผสมในซีเมนต์ ASTM C618-95..... 52
ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน..... 54
ตารางที่ 4.9 กำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน..... 55
ตารางที่ 4.10 กำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน..... 56

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.11 กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ..... 60
ตารางที่ 4.12 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก 62
ตารางที่ 4.13 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช..... 70
ตารางที่ 4.14 รายละเอียดค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น..... 71
ตารางที่ ผ-1 ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของการทดลองหาค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน 81
ตารางที่ ผ-2 ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของการทดลองหาผลของขนาดตะกรันดีบุกต่อกำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน..... 81
ตารางที่ ผ-3 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 81
ตารางที่ ผ-4 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 82
ตารางที่ ผ-5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 82
ตารางที่ ผ-6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 82
ตารางที่ ผ-7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 83
ตารางที่ ผ-8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน..... 83
ตารางที่ ผ-9 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} : น้ำ เท่ากับ {0:1} : 0.5 83
ตารางที่ ผ-10 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} : น้ำ เท่ากับ {0.1:0.9} : 0.5 84
ตารางที่ ผ-11 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} : น้ำ เท่ากับ {0.2:0.8} : 0.5 84
ตารางที่ ผ-12 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} : น้ำ เท่ากับ {0.3:0.7} : 0.5 85

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ผ-13 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} : น้ำ เท่ากับ {0.4:0.6} : 0.6 85
ตารางที่ ผ-14 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} : น้ำ เท่ากับ {0.5:0.5} : 0.6 86
ตารางที่ ผ-15 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} : น้ำ เท่ากับ {0:1} : 0.5 86
ตารางที่ ผ-16 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} : น้ำ เท่ากับ {0.1:0.9} : 0.5 87
ตารางที่ ผ-17 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} : น้ำ เท่ากับ {0.3:0.7} : 0.5 87
ตารางที่ ผ-18 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} : น้ำ เท่ากับ {0.5:0.5} : 0.5 88
ตารางที่ ผ-19 ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช ขนาด 11.25 X 22 X 6 ซม. ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน..... 88
ตารางที่ ผ-20 ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช ขนาด 11.25 X 22 X 6 ซม. ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน..... 88
ตารางที่ ผ-21 ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช ขนาด 11.25 X 22 X 6 ซม. ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน..... 89
ตารางที่ ผ-22 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วนที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน..... 91
ตารางที่ ผ-23 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วนที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน..... 92
ตารางที่ ผ-24 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วนที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน..... 93
ตารางที่ ผ-25 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วนที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน..... 94
ตารางที่ ผ-26 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 3 วัน..... 95

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ผ-27 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 7 วัน..... 96
ตารางที่ ผ-28 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 28 วัน..... 97
ตารางที่ ผ-29 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 90 วัน..... 98
ตารางที่ ผ-30 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 3 วัน..... 99
ตารางที่ ผ-31 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 7 วัน..... 100
ตารางที่ ผ-32 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 28 วัน..... 101
ตารางที่ ผ-33 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 90 วัน..... 102
ตารางที่ ผ-34 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 3 วัน..... 103
ตารางที่ ผ-35 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 7 วัน..... 104
ตารางที่ ผ-36 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 28 วัน..... 105
ตารางที่ ผ-37 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักระยะเวลาการบ่ม 90 วัน..... 106

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการถลุงแบบสองขั้น..... 8
รูปที่ 2.2 ลักษณะและขนาดของบล็อกประสานปูพื้น..... 22
รูปที่ 2.3 ผลกระทบเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานต่อกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่ผสมด้วยอัตราส่วน 1:2:4:0.6..... 23
รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก และตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200..... 29
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือการในการดำเนินการวิจัย..... 31
รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของตะกรันดีบุก..... 42
รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 42
รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200..... 43
รูปที่4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แลนด์..... 44
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน ของตะกรันดีบุก..... 45
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน ของตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200..... 45
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอน ของเถ้าลอยลิกไนต์..... 46
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของวัสดุที่มีรูปสารประกอบแบบอสัณฐาน..... 48
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของวัสดุที่มีรูปสารประกอบแบบควอทซ์..... 48
รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 49
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของตะกรันดีบุก..... 49
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของเถ้าลอยลิกไนต์.... 50
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของอนุภาคต่อกำลังรับแรงอัด..... 54
รูปที่ 4.14 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 56

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 57
รูปที่ 4.16 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 57
รูปที่ 4.17 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 58
รูปที่ 4.18 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 58
รูปที่ 4.19 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ..... 59
รูปที่ 4.20 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ..... 60
รูปที่ 4.21 มอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 61
รูปที่ 4.22 มอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนขาว..... 62
รูปที่ 4.23 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดา ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 64
รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 65
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 66
รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 67
รูปที่ 4.27 ความเข้มของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ของซีเมนต์เพสท์ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 68
รูปที่ 4.28 ความเข้มของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ของซีเมนต์เพสท์ที่ส่วนผสมต่างๆ ที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ..... 68

สัญลักษณ์และคำย่อ

ASTM	=	American Society for Testing and Materials
C_2S	=	$2CaO.SiO_2$, ไดแคลเซียมซิลิเกต
C_3A	=	$3CaO.Al_2O_3$, ไตรแคลเซียมอลูมิเนต
C_3S	=	$3CaO.SiO_2$, ไตรแคลเซียมซิลิเกต
C_4AF	=	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$, เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์
$Ca(OH)_2$	=	แคลเซียมไฮดรอกไซด์
CAH	=	แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต
CSH	=	แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต
$d_{50\%}$	=	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย
LOI	=	Loss On Ignition
SEM	=	Scanning Electron Microscope
XRD	=	X-Ray Diffraction Spectrometry
XRF	=	X-Ray Fluorescence Spectroscopy

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมในประเทศเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ผลผลิตที่ได้จากภาคอุตสาหกรรมนอกจากจะมีประโยชน์จากผลิตผลที่ได้แล้ว ในขณะเดียวกันก็มีของเสียและวัสดุเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตโดยควรได้รับการจัดการอย่างถูกวิธีหรือนำกลับไปใช้ใหม่ในรูปวัตถุดิบแทนที่ในกระบวนการอื่นซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการนำตะกรันดีบุกที่เป็นของเสียอันเกิดจากอุตสาหกรรมการถลุงแร่ดีบุกมาใช้ให้เกิดประโยชน์แทนที่การนำไปถมที่ดินว่างเปล่า คิดเป็นปริมาณ 12,000 ตันต่อปี

จากการวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีของตะกรันดีบุกเบื้องต้น พบว่าส่วนใหญ่ประกอบด้วย แคลเซียม (CaO) ประมาณร้อยละ 18–21 โดยน้ำหนัก ซิลิกา (SiO_2) ประมาณร้อยละ 30-39 โดยน้ำหนัก อลูมินา (Al_2O_3) ประมาณร้อยละ 8-10 โดยน้ำหนัก และเหล็ก (Fe_2O_3) ประมาณ ร้อยละ 10-19 โดยน้ำหนัก เป็นสารประกอบหลักซึ่งสารประกอบเหล่านี้เป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์เช่นกัน และเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะผลึกของสารประกอบพบว่าผลึกของสารประกอบอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous Phase) ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตพบว่าสารประกอบซิลิกาและอลูมินาที่อยู่ในรูปอสัณฐานสามารถใช้เป็นวัสดุผสมซีเมนต์ได้ ดังนั้นการนำตะกรันดีบุกมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วนอาจทำปฏิกิริยากับสารประกอบในปูนซีเมนต์ได้เช่นเดียวกับเถ้าลอยลิกไนต์ที่ปัจจุบันนิยมนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนเพื่อลดปริมาณวัตถุดิบที่ต้องนำมาใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเป็นการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต รวมทั้งเป็นการลดภาระในการกำจัดและได้ประโยชน์เพิ่มขึ้นในขอบข่ายการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันดีบุกจากโรงงานถลุงแร่ดีบุกมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วน

2. ศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุก เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน และปูนขาวผสมตะกรันดีบุก รวมทั้งสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก

3. ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุก โดย X-ray Diffraction Spectrometry (XRD) ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารประกอบเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และปฏิกิริยาปอซโซลาน

4. ศึกษาการใช้ประโยชน์จากการนำตะกรันดีบุกไปใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการนำตะกรันดีบุกซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการถลุงแร่ดีบุกมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วน โดยมีขอบเขตการวิจัย ดังนี้

1. ศึกษาส่วนประกอบทางกายภาพ สมบัติทางเคมี รวมถึงการชะละลายโลหะหนักของตะกรันดีบุกโดยศึกษาความเป็นพิษตามประกาศกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 6 พ.ศ.2540

2. ศึกษาสัดส่วนตะกรันดีบุกผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณน้ำที่ใช้ และผลของความละเอียดของขนาดตะกรัน โดยมอร์ตาร์ที่ได้จะทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

3. ศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัด โดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) วิเคราะห์ซีเมนต์เพสท์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุก เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

4. พารามิเตอร์ที่เกียวข้องกับการทำมอร์ตาร์และซีเมนต์เพสท์ ได้แก่ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อตะกรันดีบุก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระยะเวลาการบ่ม และขนาดอนุภาคตะกรันดีบุก

5. ทดสอบกำลังรับแรงอัดและประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น เมื่อนำตะกรันดีบุกไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตบล็อกปูพื้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ทำให้ทราบถึงความเป็นไปได้ในการนำตะกรันดีบุกมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนโดยวิเคราะห์จากสมบัติที่เปลี่ยนไปเมื่อนำตะกรันดีบุกผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สาเหตุการพัฒนากำลังรับแรงอัด จากผลวิเคราะห์ของ X-Ray Diffraction Spectrometry รวมทั้งสัดส่วนที่เหมาะสมของปริมาณตะกรันดีบุกที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุและงานคอนกรีตทั่วไป อีกทั้งเป็น

การช่วยลดการทำลายภูเขาหินปูนเพื่อนำหินปูนมาผลิตเป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยในการวิจัยนี้ได้นำตะกรันดีบุกไปใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ศัพท์และความหมาย

มอร์ตาร์ (Mortar) หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมทรายและน้ำ

ซีเมนต์เพสท์ (Cement Paste) หมายถึง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมน้ำ

กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) หมายถึง อัตราส่วนค่ารับแรงอัดของวัสดุต่อพื้นที่หน้าตัดที่แรงกระทำต่อวัสดุ

ดัชนีปอซโซลาน (Pozzolanic Index) หมายถึง ค่าความเป็นปอซโซลานของวัสดุ

2.2 ดีบุก (Tin)

นักวิทยาศาสตร์และนักโบราณคดีเชื่อว่าโลหะผสมชนิดแรกของโลกที่มนุษย์ทำขึ้น คือ สำริด หรือ บรอนซ์ (Bronze) ซึ่งเป็นโลหะผสมของทองแดงกับดีบุก ในสมัยโบราณมนุษย์รู้จักนำสำริดมาใช้ในการหล่อทำอาวุธ เครื่องใช้ และตกแต่งรูปหล่อโลหะต่างๆ สำหรับในประเทศไทยมีการพบเครื่องใช้และเครื่องประดับบ้านเชียงมีดีบุกผสมอยู่ด้วยซึ่งมีอายุเก่าแก่กว่า 4,300-5,000 ปีมาแล้ว (สุมิตร ปิติพัฒน์, 2515) เช่นเดียวกับอียิปต์และเมโสโปเตเมียที่รู้จักใช้สำริดทำเครื่องใช้และ อาวุธมาแล้ว เมื่อ 3,000 ปีก่อนคริสตกาล และในสมัยที่อาณาจักรโรมันรุ่งโรจน์ (30 B.C – 750 A.D)ได้ครอบครองดินแดนในฝรั่งเศสและอังกฤษ

การค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์เพื่อนำดีบุกมาใช้ด้านอุตสาหกรรมยุคใหม่เริ่มเมื่อ พ.ศ.2353 (ค.ศ. 1810) ปีเตอร์ ดูรองต์ ชาวอังกฤษ ได้ค้นพบวิธีการถนอมอาหารไว้ให้คงทนโดยบรรจุในกระป๋องป้องกันอากาศเข้าซึ่งทำด้วยเหล็กภายในชุบดีบุกบางๆ โดยการนำเหล็กมาชุบหรือเคลือบดีบุก เรียกว่า เหล็กวิลาศ (Tin Plate) จากการค้นพบนี้ทำให้อุตสาหกรรมผลิตเหล็กวิลาศขยายตัวขึ้นอย่างรวดเร็ว ในปลายคริสตวรรษที่ 19 นอกจากการนำดีบุกมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารยังมีการนำดีบุกไปใช้ในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับประเทศไทยมีความต้องการใช้ดีบุกในกิจกรรมต่างๆประมาณ 8,000 ตันต่อปี (วิจารณ์ อุปัติศฤงค์, 2538)

2.2.1 <u>คุณสมบัติของดีบุก</u>

ดีบุกมีสัญลักษณ์ธาตุคือ Sn มีเลขอะตอมเท่ากับ 50 มวลอะตอมเท่ากับ 118.69 อยู่ในเลขหมู่ IVA ของตารางธาตุ จัดเป็นโลหะนอกจำพวกเหล็ก (Nonferrous Metals) ชนิดโลหะหนัก (Heavy Metals) เช่นเดียวกับทองแดง เงิน ตะกั่ว และสังกะสี ฯลฯ ซึ่งเป็นโลหะที่มีความหนาแน่นสูงกว่า 4 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เดซิเมตร จุดหลอมเหลว 231.89 องศาเซลเซียส จุดเดือด 2,270 องศาเซลเซียส โดยโลหะหนักมีความสำคัญในงานอุตสาหกรรมอย่างมากและเป็นต้นกำเนิดโลหะผสมหลายชนิด ดีบุกเป็นโลหะที่มีสีขาวคล้ายเงิน เนื้อโลหะอ่อน รีดเป็นแผ่นได้ง่าย และยังทนต่อการกัดกร่อนในบรรยากาศปกติได้ดี ไม่เป็นพิษจึงสามารถใช้ในการเคลือบแผ่นเหล็กทำกระป๋องบรรจุอาหาร

2.2.2 <u>การใช้ประโยชน์</u>

การใช้ประโยชน์ของดีบุก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเคลือบผิวแผ่นเหล็กด้วยดีบุก (Tin Plating)

เนื่องจากดีบุกมีคุณสมบัติพิเศษ คือ ไม่เป็นสนิม ไม่เป็นพิษต่อร่างกาย มีจุดหลอมเหลวต่ำและเกาะจับผิวโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก ทองแดง และทองเหลืองได้เป็นอย่างดี จึงถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมทำแผ่นเหล็กชุบดีบุก สำหรับทำภาชนะบรรจุอาหารซึ่งสามารถต้านทานการกัดกร่อนของกรด หรือสารละลายอื่นๆได้โดยไม่เป็นสนิม

2. โลหะบัดกรี (Solders)

ดีบุกที่นำไปทำโลหะบัดกรี บางครั้งเรียกตะกั่วบัดกรี ซึ่งมีส่วนผสมของตะกั่วและดีบุกในโลหะบัดกรี นำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมและกิจการต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมบรรจุอาหารกระป๋อง อุตสาหกรรมไฟฟ้าอิเลคทรอนิคส์ และงานเชื่อมโลหะอื่นๆที่ไม่ต้องการทำลายรูปของโลหะเดิมหรือทำให้รูปร่างเสียไป

3. โลหะผสม (Tin Alloys)

โลหะผสมที่มีส่วนผสมของดีบุก ได้แก่ ทองสัมฤทธิ์เประกอบด้วยดีบุกและทองแดง โลหะตัวพิมพ์ประกอบด้วยดีบุก ตะกั่ว และพลวง โลหะพิวเตอร์ (Pewter) ประกอบด้วยดีบุก ตะกั่ว และทองแดง โลหะรองรับเพลา (Bearing Metal) ประกอบด้วยดีบุก ทองแดง และพลวง โลหะผสมหลอมละลาย (Fusible Alloys) ที่เกิดจากการนำดีบุกซึ่งมีคุณสมบัติจุดหลอมเหลวต่ำมาผสมกับตะกั่ว บิสมัท แคดเมียม และอินเดียม จะได้โลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าจุดเดือดของน้ำ ใช้ทำเป็นวัสดุเพื่อความปลอดภัยสำหรับควบคุมอุณหภูมิในวงจรไฟฟ้า ดีบุกเปลว (Tin Foil) นิยมใช้ทำที่ห่อบุหรี่และภาชนะห่ออาหาร เนื่องจากมีคุณสมบัติในการกันความชื้นและไม่เป็นพิษต่อร่างกาย

4. สารเคมี (Chemical Compounds)

สารประกอบเคมีที่มีดีบุกเป็นส่วนประกอบเดิมนิยมใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอและเครื่องเคลือบ แต่ปัจจุบันความต้องการใช้ลดน้อยลงเนื่องจากมีสารเคมีชนิดอื่นที่มีคุณสมบัติดีกว่าและราคาถูกกว่ามาใช้แทน มีการนำสารประกอบเคมีที่มีดีบุกผสม (Sn organocompound) ไปใช้ในอุตสาหกรรมทำพลาสติกและสีทาบ้าน

2.3 การถลุงแร่ดีบุก (Tin Smelting)

สินแร่ดีบุกส่วนใหญ่ที่นำมาถลุงให้เป็นโลหะคือ แคสซิเทอไรต์ (SnO_2) ส่วนสินแร่ดีบุกชนิดอื่น ได้แก่ สแตนไนต์ (Cu_2FeSnS_4) และมาเลย์ไอต์ ($CaSnSiO_5$) เป็นแร่หายากและไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นจะกล่าวเฉพาะแคสซิเทอไรต์

แร่ดีบุกหรือแคสซิเทอไรต์ (SnO_2) มักพบว่าเกิดร่วมกับหินแกรนิตและหินอัคนีสีจางอื่นๆ (Acid Igneus Rocks) อาจเกิดร่วมกับหินภูเขาไฟไรโอไลต์ (Rhyolite)ในสายแร่เปกมาไทต์หรือสายแร่ควอตซ์ ที่ตัดผ่านหินแกรนิต ส่วนบริเวณที่เป็นต้นกำเนิดให้แร่ดีบุกจริงๆนั้นยังไม่สามารถสรุปได้ว่ามาจากชั้นเปลือกโลก (Crust) หรือเปลือกโลกชั้นใน (Mantle) แต่ส่วนใหญ่เชื่อว่ามาจากหินเปลือกโลกตอนล่าง (Lower Crust) คุณลักษณะของแร่ดีบุกที่นำมาถลุงมีองค์ประกอบ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบโดยประมาณของแร่ดีบุกที่ใช้ในการถลุง

ส่วนประกอบ	ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนัก
ดีบุก (Sn) ต่ำสุด	65
เหล็ก (Fe) สูงสุด	2.5
ทังสติกออกไซด์ (WO_3) สูงสุด	5.0
กำมะถัน (S) สูงสุด	0.5
สารหนู (As) สูงสุด	0.1
ทองแดง+ตะกั่ว+บิสมัท+พลวง (Cu+Pb+Bi+Sb) สูงสุด	0.1
อื่นๆ	26.8

ที่มา : ชาคร จารุพิสิฐธร, 2528.

2.3.1 <u>การถลุง (Smelting)</u>

การถลุงแร่ดีบุกเริ่มทำกันมาไม่น้อยกว่า 5,000 ปี แล้วซึ่งปัจจุบันการถลุงแร่ดีบุกยังคงใช้กรรมวิธีทางความร้อน โดยโรงถลุงส่วนใหญ่ใช้กรรมวิธีถลุงแบบสองขั้นคือประกอบด้วยขั้นถลุงหัวแร่ และขั้นถลุงตะกรันแรก (Primary Slag)

ในการถลุงขั้นแรกหรือขั้นถลุงหัวแร่ จะทำการผสมหัวแร่ให้เข้ากับตัวลดออกซิเจน ใช้ประมาณ ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนักของหัวแร่ สารเชื้อ ประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักของหัวแร่ กากโลหะหมุนเวียน ฝุ่นดีบุกซึ่งได้จากอุปกรณ์เก็บฝุ่น และโลหะเจือเหล็ก-ดีบุก หรือเรียกว่า Hard Head ซึ่งได้จากการถลุงขั้นที่สองหรือขั้นถลุงตะกรันแรก จากนั้นนำวัตถุดิบทั้งหมดเข้าเตาถลุง ขณะที่ปฏิกิริยาดำเนินอยู่นั้นจะทำการเจาะเตาถลุงให้น้ำโลหะดีบุกที่เกิดขึ้นไหลออกจากเตาลงสู่เบ้า เมื่อวัตถุดิบภายในเตาเริ่มจะหลอมละลายรวมกันจึงอุดรูเจาะของเตาไว้ รอกระทั่งทุกอย่างภายในเตาละลายจนหมดแล้ว จึงเจาะเตาอีกครั้งหนึ่ง ปล่อยให้น้ำโลหะดีบุกและตะกรันไหลออกมาลงสู่เบ้าซึ่งโลหะจะแยกตัวจากตะกรัน ตะกรันนี้เรียกว่าตะกรันแรก จะถูกทำให้มีขนาดเล็กพอเหมาะสำหรับการถลุงในขั้นที่สองต่อไป เนื่องจากในตะกรันแรกยังมีดีบุกเหลืออยู่มากคือประมาณร้อยละ 15-20 ส่วนโลหะดีบุกที่ได้จะนำไปทำให้บริสุทธิ์ (ถ้ายังไม่บริสุทธิ์พอ) ก่อนที่จะหล่อเป็นแท่งเพื่อส่งจำหน่ายต่อไป

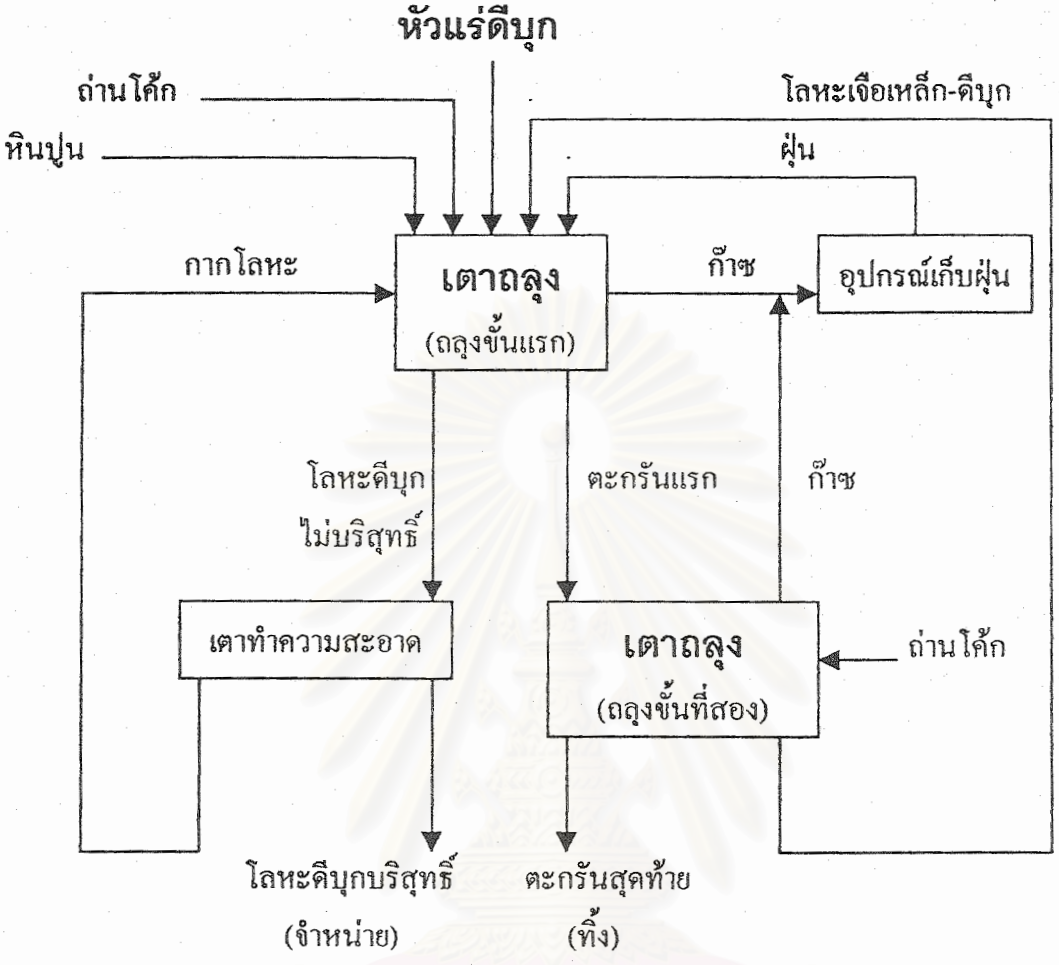
ในการถลุงขั้นที่สองหรือขั้นถลุงตะกรันแรก จะทำการผสมตะกรันแรกให้เข้ากับตัวลดออกซิเจนและสารเชื้อแล้วนำเข้าเตา ซึ่งจะถลุงให้ได้ตะกรันสุดท้ายที่มีดีบุกต่ำสามารถทิ้งไปได้ และได้โลหะเจือเหล็ก-ดีบุก ซึ่งจะหมุนเวียนกลับไปสู่การถลุงขั้นแรก โดยปกติตะกรันสุดท้ายจะมีดีบุกประมาณร้อยละ 1 แต่อาจจะสูงหรือต่ำกว่านี้ก็ได้ทั้งนี้แล้วแต่ปริมาณของเหล็กที่มีอยู่ในตะกรันดังกล่าว ตารางที่ 2.2 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของตะกรันแรก ตะกรันสุดท้ายและโลหะเจือเหล็ก-ดีบุกที่ถลุงได้

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบเคมีของตะกรันแรกและตะกรันสุดท้าย

สารประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ตะกรันแรก	ตะกรันสุดท้าย
Sn	15-23	0.8-1.2
CaO	20-40	18-21
SiO_2	8-20	18-24
Fe_2O_3	20-26	14-21
MgO	2-4	1-2

ที่มา : ชาคร จารุพิสิฐธร, 2528.

สำหรับกรรมวิธีถลุงแบบสองขั้นแสดงเป็นแผนผัง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กรรมวิธีการถลุงแบบสองขั้น

2.3.2 การทำให้บริสุทธิ์ (Refining)

โลหะดีบุกที่ถลุงได้จากการถลุงขั้นแรก มีความบริสุทธิ์ไม่ได้ตามความต้องการของตลาด หรือไม่ได้มาตรฐาน เนื่องจากมีมลทินอื่นๆปนอยู่ด้วย มลทินเหล่านี้ได้แก่ เหล็ก ทองแดง พลวง สารหนู นิกเกิล ตะกั่ว และบิสมัท ซึ่งพบในโลหะดีบุกเสมอไม่มากก็น้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของแร่ที่นำมาถลุง กล่าวคือ ถ้าถลุงจากแร่ดีบุกเกรดสูงก็จะได้ดีบุกที่มีมลทินต่ำ แต่ถ้าถลุงจากแร่ดีบุกเกรดปานกลางหรือเกรดต่ำก็จะได้ดีบุกที่มีมลทินสูง ซึ่งเพิ่มความยุ่งยากในการขจัดมลทินมากขึ้น การขจัดมลทินออกจากดีบุกหรือการทำดีบุกให้บริสุทธิ์นั้นมีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีคือ การทำดีบุกให้บริสุทธิ์ด้วยความร้อน (Fire Refining) การทำดีบุกให้บริสุทธิ์ด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Refining) และการทำดีบุกให้บริสุทธิ์ด้วยสุญญากาศ (Vacuum Refining)

2.3.3 ตะกรัน (slag)

ในกระบวนการถลุงแร่ นอกจากจะได้โลหะออกมาแล้ว ยังมีส่วนประกอบอื่นที่ไม่ถูกลดออกซิเจนให้เป็นโลหะ ส่วนประกอบดังกล่าวจะรวมตัวกันเป็นตะกรัน เพราะฉะนั้นตะกรันจึงเป็นส่วนผสมของพวกโลหะออกไซด์ ซิลิเกต และอาจมีพวกซัลไฟด์ คาร์ไบด์หรือเฮไลด์ เป็นส่วนประกอบด้วย ตะกรันควรมีจุดหลอมตัว ความถ่วงจำเพาะ และความหนืดต่ำๆเพื่อให้เม็ดโลหะแยกตัวออกได้เร็ว โดยไม่ติดค้างในตะกรัน และเพื่อให้ตะกรันเหลวพอที่จะไหลออกจากเตาถลุงได้สะดวก ส่วนประกอบของตะกรันมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการเก็บโลหะด้วย ในการถลุงแร่จึงต้องผสมสารเชื้อในวัตถุประจุเพื่อจัดส่วนผสมของตะกรันให้มีคุณสมบัติตามต้องการ

ตะกรันที่เกิดจากการถลุงแร่ดีบุกมีองค์ประกอบเหมือนกับการถลุงแร่โลหะชนิดอื่นทั่วไป กล่าวคือ มีแคลเซียมออกไซด์-เฟอร์ริกออกไซด์-ซิลิกา ($CaO-Fe_2O_3-SiO_2$) เป็นหลัก และมีสแตนนัสออกไซด์ (SnO) อยู่ด้วย ปกติแคลเซียมออกไซด์มาจากสารเชื้อที่ผสมเข้าไปส่วนประกอบอื่นๆมาจากแร่ที่นำไปถลุง แคลเซียมออกไซด์ตัวเดียว มีจุดหลอมตัวสูงถึง 2,570 องศาเซลเซียส ซิลิกาหลอมตัวที่1,728 องศาเซลเซียส และเฟอร์ริกออกไซด์ละลายที่ 1,371 องศาเซลเซียส ในขณะที่ส่วนประกอบอื่นๆที่มักมีในวัตถุประจุ เช่น อลูมินา แมกนีเซียมออกไซด์ ไททาเนียมออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์ จะทำให้จุดหลอมตัวของตะกรันลดลงถ้ามันมีอยู่ในตะกรันในปริมาณต่ำ แต่จะกลับเพิ่มจุดหลอมตัวของตะกรันให้สูงขึ้นถ้ามีในปริมาณที่สูง อุณหภูมิที่ใช้ถลุงแร่ดีบุกอยู่ในช่วง 1,200 ถึง 1,350 องศาเซลเซียส

ตะกรันที่ออกมาจากเตาหลอมจะอยู่ในลักษณะของเหลวก่อนและต่อมาถ้าถูกทำให้เย็นลงอย่างช้าๆในอากาศ ตะกรันที่ได้จะมีลักษณะเป็นผลึกที่แน่นเรียกว่า Air-cooled Slag แต่ถ้าตะกรันเหลวถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วโดยการฉีดน้ำ ตะกรันที่ได้จะมีผลึกที่เบากว่าเรียกว่า Granulated Slag ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ Granulated Slag ซึ่งเป็นตะกรันสุดท้ายจากนั้นนำไปบดละเอียดก่อนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุก่อสร้างที่สำคัญในงานวิศวกรรม โดยเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับทราย หิน และน้ำด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะได้คอนกรีตซึ่งเมื่อแข็งตัวแล้วจะทำให้ได้คอนกรีตที่แข็งแรงทนทาน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผสมกันของสารจำพวกแคลเซียมหรือวัสดุจำพวกหินปูนกับดินเหนียว ซิลิกา อลูมินา และสารจำพวกออกไซด์ของเหล็กตามอัตราส่วนที่ต้องการแล้วนำส่วนผสมต่างๆไปเผาที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส จนทำปฏิกิริยาเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นจึงนำไปบดให้ละเอียด ส่วนประกอบของ

สารประกอบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ) โดยน้ำหนัก
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-6
SO_3	1-3
MgO	0.1-5.5
$K_2O + Na_2O$	0.5-1.3

ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539.

เมื่อเผาส่วนประกอบข้างต้นนี้ของปูนซีเมนต์แล้ว ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียม ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเคมีรวมตัวกันได้สารประกอบอยู่ในรูปของผลึกละเอียดมาก สารประกอบที่สำคัญ 4 ชนิด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต ไดแคลเซียมซิลิเกต ไตรแคลเซียมอลูมิเนต และเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

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

ที่มา : วินิต ช่อวิเชียร, 2539.

โดยสารประกอบทั้ง 4 ชนิดมีผลต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดังนี้

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, C_3S) เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และทำให้มีกำลังอัดเพิ่มอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, C_2S) เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นโดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆและจะเพิ่มขึ้นจนใกล้เคียงกับกำลังอัดในไตรแคลเซียมซิลิเกต

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, C_3A) จะทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก ก่อให้เกิดการก่อตัวทันที (flash set) และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม โดยกำลังอัดของไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน ให้กำลังอัดต่ำ และจะไม่เพิ่มขึ้นอีกตามเวลา แต่จะมีประโยชน์ในการช่วยเร่งปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกตให้เร็วขึ้น

4. เตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite, C_4AF) ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์จะค่อนข้างต่ำ

อิทธิพลของสารประกอบที่สำคัญเหล่านี้ต่อคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 สมบัติของสารประกอบที่สำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น	ปานกลาง (500 จูล/กรัม)	น้อย (250 จูล/กรัม)	สูงมาก (850 จูล/กรัม)	ปานกลาง (420 จูล/กรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	-	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539.

จากตารางที่ 2.4 และ2.5 จะเห็นได้ว่าสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มีผลต่อการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นอย่างมากและเป็นสารประกอบหลักที่มีปริมาณร้อยละ 70 ถึง 80 ของปริมาณทั้งหมด ดังนั้นในการศึกษาโดย X-Ray Diffraction Spectrometer (XRD) จะทำการศึกษาสารประกอบดังกล่าว รวมทั้งสารเชื่อมประสาน

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; CSH) ซึ่งเป็นสารที่เกิดหลังจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทำปฏิกิริยากับน้ำกลายเป็นสารที่ก่อให้เกิดการเชื่อมประสานและทำให้ปูนซีเมนต์เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะวัสดุผสม (กฤษณ์ จารุทะวัย, 2545)

2.4.1 <u>ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง</u>

1. ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่น คือ ปฏิกิริยาระหว่างน้ำและปูนซีเมนต์ เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ น้ำจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต ให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และความร้อน ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$2(3CaO.SiO_2) + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.2\,SiO_2.3\,H_2O + 3Ca(OH)_2 \quad .....(2.1)$$

$$2(2CaO.SiO_2) + 4H_2O \longrightarrow 3CaO.2\,SiO_2.3\,H_2O + Ca(OH)_2 \quad .....(2.2)$$

สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาดังกล่าวเรียกรวมๆว่า ซีเมนต์เจล (Cement Gel) ซึ่งประกอบด้วย แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate; CSH) มีปริมาณมากที่สุดคือร้อยละ 60 โดยปริมาตร และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide; $Ca(OH)_2$) อีกประมาณร้อยละ 20 ถึง 25 โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) นี้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุประสานที่มีลักษณะเหนียวคล้ายกาว เกิดการก่อตัว แข็งตัวและยึดเกาะแน่นกับวัสดุผสม ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นนี้ยังสามารถทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกถ้ามีสารที่มีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) สำหรับสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดการก่อตัวผิดปกติ (False Setting) จึงต้องมีการผสมยิปซั่มลงไปเพื่อหน่วงปฏิกิริยา ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์จะทำปฏิกิริยากับยิปซั่มในน้ำ โดยยิปซั่มจะหน่วงให้ปฏิกิริยาช้าลงมากและจะให้ของแข็งแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ ดังสมการที่ 2.5 โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากสมการที่ 2.3 2.4 และ2.5 รวมเรียกว่าแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (Calciumaluminatehydrate; CAH) ซึ่งจะมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับ CSH

$$3CaO.Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO.Al_2O_3.6H_2O \quad .....(2.3)$$

$$3CaO.Al_2O_3 + CaSO_4.2H_2O \longrightarrow 3CaO.\,Al_2O_3.3CaSO_4.3H_2O \quad .....(2.4)$$

$$4CaO.\,Al_2O_3.Fe_2O_3 + CaSO_4.2H_2O + Ca(OH)_2 \longrightarrow 3CaO.(Al_2O_3.Fe_2O_3).3CaSO_4 \quad ...(2.5)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อน้ำที่เติมลงไป ลดลงประมาณครึ่งหนึ่งของน้ำที่มีอยู่ ซึ่งมีความหมายว่าปฏิกิริยานี้จะเกิดได้เมื่อน้ำที่ผสมอย่างน้อยเป็นสองเท่าของน้ำที่ต้องการสำหรับปฏิกิริยาเคมี

2. ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction)

ปฏิกิริยาที่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารตั้งต้นซึ่งได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจากสมการที่ 2.1 และ2.2 เข้าทำปฏิกิริยากับ ปฏิกิริยาปอซโซลาน คือปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ตามสมการที่ 2.6 และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามสมการที่ 2.7

$$3Ca(OH)_2 + 2\,SiO_2 \longrightarrow 3CaO.2\,SiO_2.3\,H_2O \quad .....(2.6)$$

$$3Ca(OH)_2 + 2Al_2O_3 \longrightarrow 3CaO.2Al_2O_3.3H_2O \quad .....(2.7)$$

2.4.2 <u>วัสดุปอซโซลาน</u> (Pozzolanic Material)

วัสดุปอซโซลาน คือ วัสดุที่มีซิลิกา และ/หรืออลูมินาเป็นสารประกอบหลักซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานตัววัสดุเอง (Cementitious) แต่สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเกิดเป็นสารเชื่อมประสานได้ โดยสารปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติเกิดเป็นสารประกอบที่มีสมบัติเชื่อมประสานซึ่งก็คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามสมการที่ 2.6 และ2.7

ในอดีตได้มีการค้นพบวัสดุที่เกิดจากการตกตะกอนทับถมของดินในเมืองปอซซูโอลี (Pozzuloi) ซึ่งเมื่อนำตะกอนดังกล่าวมาใช้ผสมในปูนซีเมนต์ พบว่ามอร์ตาร์มีคุณภาพที่ดีขึ้น จึงเรียกวัสดุนี้ว่า ปอซโซลาน (Pozzolan) จากนั้นได้มีการนำมาใช้เพื่อปรับปรุงการทนทานต่อสารเคมี การลดอุณหภูมิ และการเพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะปลาย ในซีเมนต์เพสท์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตให้ดีขึ้น

การจำแนกสารประกอบปอซโซลานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามมาตรฐาน ASTM C618-96 แสดงดังตารางที่ 2.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 การแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C618 – 96

คุณสมบัติ		ประเภทของวัสดุผสม		
		N	F	C
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	% ต่ำสุด	70	70	50
SO_3	% สูงสุด	4	5	5
ปริมาณความชื้น	% สูงสุด	3	3	3
การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้	% สูงสุด	10	6	6
ดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลาน	% ต่ำสุด	75	75	75

1. Class N คือ สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolans) เช่น วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) และหินพรุน (Pumicite)

2. Class F คือ สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งเป็นวัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน ได้แก่ การเผาวัตถุดิบพวกดินเหนียว หินเชล (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินหรือแกลบ และกากตะกอนที่เหลือจากการหลอมโลหะ (Slag) เป็นต้น

3. Class C คือ สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งผ่านกระบวนการทางความร้อนเช่นเดียวกับ Class F แต่มีสมบัติบางประการที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณรวมของซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์ มากกว่า ร้อยละ 50 แต่ไม่ถึงร้อยละ 70 ของสารประกอบออกไซด์ทั้งหมดของวัสดุ

2.4.3 <u>ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์</u>

ตามมาตรฐานทั่วไป สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

1.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (Ordinary Portland Cement; OPC) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีการผลิตใช้มากที่สุด เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา นิยมนำปูนซีเมนต์ชนิดนี้มาใช้เป็นมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ชนิดต่างๆที่ผลิตขึ้นมาภายหลัง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาค เศียรเดียวสีเขียว และตราดอกจิก เป็นต้น

2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีความต้านทานพวกเกลือซัลเฟตมากกว่าประเภทที่ 1 เหมาะสำหรับใช้งานคอนกรีตที่เกิดความร้อน

และทนซัลเฟตปานกลาง เช่น คลองส่งน้ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราพญานาค 7 เศียร

3. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 3 (High Early Strength Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดเร็ว โดยปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะให้กำลังอัดสูงในเวลาอันสั้น คอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ชนิดนี้ที่เวลา 24 ชั่วโมง จะมีความแข็งแรงเท่ากับคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 อายุการบ่ม 3 วัน และเท่ากับงานคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 2 อายุการบ่ม 28 วัน ดังนั้นจึงเหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือถอดไม้แบบในเวลาอันสั้น และไม่เหมาะกับงานคอนกรีตขนาดใหญ่เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ชนิดนี้มีค่าสูงมากอาจทำให้โครงสร้างเกิดการแตกร้าวได้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราเอราวัณ ตราสามเพชร และตราพญานาคเศียรเดียวสีแดง เป็นต้น

4. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 4 (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เกิดความร้อนต่ำ โดยปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้เหมาะกับงานคอนกรีตหลา (Mass Concrete) เช่น งานเขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นซึ่งเป็นการลดความเสี่ยงจากการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking)

ในประเทศไทยยังไม่มีการผลิตปูนซีเมนต์ประเภทนี้ โดยจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมกับ Pulverlized Fuel Ash (PFA) หรือ Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) แทน

5. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (Sulphate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีไตรแคลเซียมอลูมิเนตต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกมาทำลายเนื้อคอนกรีต ให้กำลังรับแรงอัดช้าและความร้อนต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะกับงานโครงสร้างที่ต้องแช่ในน้ำหรืออยู่ใกล้ทะเล ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราฉลามและตราช้างฟ้า

2.5 ปูนขาว

ปูนขาว (Lime) จัดเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปกับงานก่ออิฐ ฉาบปูนที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมาก นอกจากนั้นยังสามารถใช้ปูนขาวผสมทำสีน้ำปูน (White Wash) สำหรับใช้ทากำแพงหรือทาอาคาร ซึ่งปูนขาวโดยทั่วไปได้มาจากการเผาหินปูน (Limestone) โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 1,400 ถึง 2,000 องศาฟาเรนต์ไฮต์ (760 ถึง 1,093 องศาเซลเซียส) ในการเผาจะใช้วิธีค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิ และเมื่อเผาสุกดีแล้วจึงนำไปบดให้เป็นผง ปูนขาวที่ดีจะต้องเผาสุก เมื่อแห้งสนิท มีสีขาว และละลายน้ำได้ดี

ปูนขาวทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. High calcium quick lime มีสารประกอบแคลเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

2. Dolomitic quick lime มีสารประกอบแคลเซียมออกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

3. Hydrated high calcium lime มีสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

4. Normal hydrated dolomitic lime มีสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมออกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

5. Pressure hydrated dolometic lime มีสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์เป็นส่วนประกอบหลัก

โดยประเภทของปูนขาวต่างๆขึ้นกับส่วนประกอบของหินปูนและขั้นตอนการเผา กล่าวคือ หินปูนที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ภายหลังเผาก็จะได้เป็น ปูนขาวแคลเซียมสูง (High Calcium Lime) แต่ถ้าหินปูนบางแหล่งมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ผสมอยู่ด้วย ปูนขาวที่ได้จะเป็นพวก Dolomitic Lime ถ้าหินปูนถูกเผาอย่างสมบูรณ์ปูนขาวที่ได้จะเป็นพวกปูนดิบ (Quick Lime) แต่ถ้าได้รับความชื้นเรียกว่า ปูนขาวสุก (Hydrated Lime) ซึ่งปูนขาวดิบตามท้องตลาดมีส่วนประกอบแคลเซียมออกไซด์ ประมาณร้อยละ 61 และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ประมาณร้อยละ 24 โดยน้ำหนัก ส่วนปูนขาวสุกตามท้องตลาดมีส่วนประกอบของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 81 โดยน้ำหนัก

2.6 วัสดุใหม่สำหรับงานคอนกรีต

การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับงานคอนกรีต (Concrete Technology) ได้เจริญก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วมาก โดยมีการวิจัยและพัฒนาวัสดุผสมคอนกรีตประเภทอื่นๆ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญคือ ต้องการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้น ทั้งคอนกรีตที่อยู่สภาพเหลว เช่น ความสามารถเทได้ และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว เช่น กำลังรับแรงอัด และที่สำคัญยิ่งคือ ต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีความทนทาน รวมทั้งต้องการให้ได้คอนกรีตที่มีราคาเหมาะสมด้วย โดยได้มีการนำวัสดุอื่นๆมาผสม วัสดุที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ Pulverized Fuel Ash (PFA), Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) และ Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้นอกจากจะได้ประโยชน์โดยตรง คือ การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตให้ดีขึ้นแล้ว ยังได้ประโยชน์ทางอ้อม คือ เป็นการนำของเสีย (Waste) มาใช้ ซึ่งช่วยขจัดปัญหาเรื่องมลภาวะด้วย

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)

PFA เป็นของแข็งเม็ดกลมมีความละเอียด ซึ่งลอยขึ้นมาพร้อมกับอากาศร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินที่บดละเอียด (Pulverized Coal) ในโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และจะถูกจับด้วยเครื่องดักจับ (Precipitator) ถ่านหินเมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิสูงในเตาเผาคุณสมบัติของสารประกอบต่างๆในถ่านหินจะเปลี่ยนแปลงไป ทั้งด้านกายภาพ และเคมี ทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิในเตาเผา รวมทั้งวิธีการทำให้เย็น PFA ที่ได้จากการเผานี้ ส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของซิลิกา และอลูมินา

2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

GGBS เป็นของเสียของกระบวนการผลิตเหล็กโดยใช้เตาหลอม ตะกรันที่เกิดขึ้นเป็นผลจากการหลอมตัวของแคลเซียมออกไซด์จากหินปูนกับซิลิกาและอลูมินาจากแท่งเหล็กและถ่าน Coke ซึ่งคุณภาพของเหล็กที่ได้จะสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำเหล็ก และองค์ประกอบทางเคมีของตะกรัน ดังนั้นในการควบคุมคุณภาพของเหล็กที่หลอม ผู้ผลิตจะทำการตรวจสอบคุณภาพทางเคมีของตะกรันอยู่ตลอดเวลา เพื่อทำการปรับปรุงดัดแปลงสัดส่วนของวัตถุดิบและสภาพการทำงานของเตาเผา ตะกรันที่หลอมละลายอยู่ด้านบนของเบ้าหลอมจะถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการเทลงในน้ำหรือใช้น้ำฉีดทันที ผลก็คือ ตะกรันส่วนใหญ่จะกลายเป็นเม็ดแก้วกลมที่มีองค์ประกอบทางเคมีที่ค่อนข้างแน่นอน หลังจากนั้นจะผ่านกระบวนการระเหยน้ำออก และทำการบดเช่นเดียวกับการบดปูนซีเมนต์ โดยไม่มีการเติมวัสดุอื่นเข้าไป

3. Microsilica (MS) หรือ Silica Fume

MS หรือ Silica Fume เป็นของเหลือ (By-product) จากกระบวนการผลิต Silicon Metal หรือ Ferrosilicon Alloy โดยการนำเอาวัตถุดิบอันได้แก่ หินควอร์ต ถ่าน และ เหล็ก หลอมรวมกัน เมื่อวัตถุดิบนี้ได้รับความร้อน เกิดการหลอมตัวจะเกิดไอของซิลิกอนโมโนออกไซด์ลอยตัวขึ้น ไอเหล่านี้จะถูกดักจับไว้และทำให้เย็นตัว ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กมากของ Amorphous Silica โดยมีขนาดเล็กกว่าเม็ดซีเมนต์ประมาณ 100 เท่า

2.6.1 <u>องค์ประกอบทางเคมี</u>

องค์ประกอบทางเคมีของ Pulverized Fuel Ash (PFA), Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS) และ Microsilica (MS) เหมือนกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่สัดส่วนจะแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 องค์ประกอบเคมีของปูนซีเมนต์ PFA GGBS และMS

ออกไซด์	ปริมาณ (ร้อยละ) โดยน้ำหนัก			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	PFA	GGBS	MS
CaO	65	3	40	0.2
SiO_2	20	48	37	92
Al_2O_3	5	26	11	0.7
Fe_2O_3	3	10	0.3	1.2
SO_3	2.4	0.7	0.3	-
MgO	1.1	2	7	0.2
K_2O	0.9	3	0.7	1.9
Na_2O	0.2	1	0.4	1.2
ออกไซด์อื่นๆ	1.4	1.3	2.3	2.6

ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539.

2.6.2 ลักษณะทางกายภาพ

ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของปูนซีเมนต์ Pulverized Fuel Ash (PFA) Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)และMicrosilica (MS)แสดงเปรียบเทียบไว้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ลักษณะทางกายภาพทั่วไปของปูนซีเมนต์ PFA GGBS และ MS

สมบัติ	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	PFA	GGBS	MS
ความละเอียด (ตร.ซม./กรัม)	3400	3800	3500	150,000
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	1400	900	1200	240
ความถ่วงจำเพาะ (กรัม/ลบ.ซม.)	3.15	2.3	2.9	2.2
สี	เทา	เทาอ่อน	ขาว	เทาดำ

ที่มา : ชัชวาล เศรษฐบุตร, 2539.

จากตารางที่ 2.8 พบว่า

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ PFA และ GGBS ที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตจะมีความละเอียดใกล้เคียงกัน แต่ MS จะมีความละเอียดสูงมาก

2. จากค่าความถ่วงจำเพาะ ถ้านำ PFA GGBS หรือ MS มาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยน้ำหนักจะเป็นการเพิ่มปริมาตรของส่วนละเอียดเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่น้ำหนักเท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อความสามารถเทได้ของคอนกรีต

3. MS ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ประมาณ 100 เท่า ซึ่งทำให้การจัดเก็บและการลำเลียงทำได้ลำบาก การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยการผสมน้ำกับ MS ในอัตราส่วนเท่ากัน เพื่อให้ได้ของเหลว (Slurry) สะดวกต่อการจัดเก็บและการลำเลียง

2.6.3 ลักษณะการทำปฏิกิริยา

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)

ปูนซีเมนต์เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้สารประกอบ 2 ชนิด คือ Calcium Silicate Hydrate (CSH) และ Free Lime หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.8

$$\text{ปูนซีเมนต์} + \text{น้ำ} \longrightarrow \text{CSH} + Ca(OH)_2 \qquad \text{.....(2.8)}$$

CSH ทำหน้าที่เป็นตัวประสานให้ส่วนผสมของคอนกรีตจับตัวกัน ส่วน $Ca(OH)_2$ ที่เกิดขึ้นนี้ประมาณร้อยละ 25 โดยปริมาตร ซึ่งไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ใดๆ ในบางครั้งยังก่อให้เกิดผลเสียกับคอนกรีตด้วย เช่น ก่อให้เกิดฝ้าขาวบนผิวหน้าคอนกรีต (Efflorescence) หรือเกิดเป็นฟิล์มบนผิวมวลรวม ทำให้การจับยึดระหว่างมวลรวม และมอร์ตาร์ไม่ดีนัก แต่เมื่อใส่ PFA เป็นส่วนผสมแล้ว SiO_2 ที่มีอยู่จำนวนมากใน PFA นี้ จะทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ และก่อให้เกิด CSH เพิ่มขึ้น ดังสมการที่ 2.9

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 \text{ จาก PFA} + \text{น้ำ} \longrightarrow \text{CSH} \qquad \text{.....(2.9)}$$

CSH ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานส่วนผสมต่างๆจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตให้ดีขึ้นไม่ว่าจะเป็นคุณสมบัติด้านกำลังอัด ความทนทาน การต้านการซึมผ่านของน้ำ เป็นต้น

2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

เนื่องจาก GGBS มีองค์ประกอบทางเคมีของ CaO อยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ GGBS จะใกล้เคียงกับปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ทั่วไป แต่เกิดช้ากว่า หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นแล้ว ก็จะเกิดปฏิกิริยาระหว่าง SiO_2 ใน GGBS กับ $Ca(OH)_2$ จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์อีกครั้งหนึ่ง ดังสมการที่ 2.10 2.11 และ 2.12

ปูนซีเมนต์ + น้ำ $\longrightarrow$ CSH + $Ca(OH)_2$ .....(2.10)

GGBS + น้ำ $\longrightarrow$ CSH + $Ca(OH)_2$ .....(2.11)

$Ca(OH)_2$ + SiO_2 จาก GGBS + น้ำ $\longrightarrow$ CSH .....(2.12)

ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ GGBS อาจเร่งให้เกิดเร็วขึ้นได้โดยการบด GGBS ให้มีความละเอียดมากขึ้น

3. Microsilica (MS)

เนื่องจาก MS มีปริมาณ SiO_2 อยู่สูงถึงร้อยละ 90 ปฏิกิริยาของ MS ในส่วนผสมคอนกรีตจะเหมือนกับของ PFA แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วมาก เนื่องจาก MS มีความละเอียดสูงมาก ส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดทั้งช่วงต้นและช่วงปลายเป็นไปได้เร็วกว่าคอนกรีตทั่วๆไป

นอกจากนี้ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นแล้ว MS ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีต กล่าวคือ MS เป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้นจะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ (Microfiller Effect) ทำให้คอนกรีตมีความหนาแน่นสูงมาก เป็นผลดีทั้งด้านกำลังอัดและความทนทาน

2.6.4 <u>คุณประโยชน์และการใช้งาน</u>

1. Pulverized Fuel Ash (PFA)

- ปรับปรุงความสามารถเทได้ของคอนกรีต ทำให้คอนกรีตลื่นไหลเข้าแบบได้ดี เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของ PFA ซึ่งมีรูปร่างกลม

- ลดการเยิ้ม (Bleeding)

- อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นช้า ดังนั้นความร้อนจากปฏิกิริยาจะลดลงซึ่งลดโอกาสการแตกร้าวของคอนกรีต โดยเฉพาะโครงสร้างขนาดใหญ่

- เพิ่มกำลังอัดคอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

- เพิ่มความทนทานของคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง PFA กับ $Ca(OH)_2$ ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลง

2. Ground Granular Blast Furnace Slag (GGBS)

- ปฏิกิริยาของคอนกรีตที่ผสมด้วยตะกรันจะช้ากว่า คอนกรีตทั่วๆไป ส่งผลให้ความร้อนจากปฏิกิริยาต่ำ ทำให้เหมาะที่จะใช้ในงานโครงสร้างที่มีปัญหาการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน เช่น ฐานรากแผ่ขนาดใหญ่ และเขื่อน เป็นต้น

- คอนกรีตมีความทนทานต่อซัลเฟต น้ำทะเล และสารเคมีได้ดี

- ลดปฏิกิริยา Alkali-Aggregate Reaction ในคอนกรีตที่ใช้หินที่ทำปฏิกิริยากับ Alkali ในปูนซีเมนต์

- เพิ่มกำลังอัดและกำลังดัด (Flexural Strength) คอนกรีตที่มีอายุมากกว่า 28 วัน

3. Microsilica (MS)

- ลดการเยิ้ม (Bleeding) และการแยกตัวของคอนกรีตสด

- เพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตทั้งระยะสั้นและระยะยาว

- เพิ่มความหนาแน่น ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นมากส่งผลให้มีความทนทานสูง การซึมผ่านของน้ำและอากาศเป็นไปได้ยาก

2.7 **คอนกรีตบล็อก**

คอนกรีตบล็อก คือ แท่งคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ น้ำ วัสดุผสมพวกทราย กรวด หรือหินย่อย ผสมเข้าด้วยกันแล้วนำไปอัดขึ้นรูปตามแบบหล่อของบล็อก โดยคอนกรีตบล็อกที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ได้แก่ คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง และ คอนกรีตบล็อกสำหรับปูพื้น

2.7.1 <u>คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง</u>

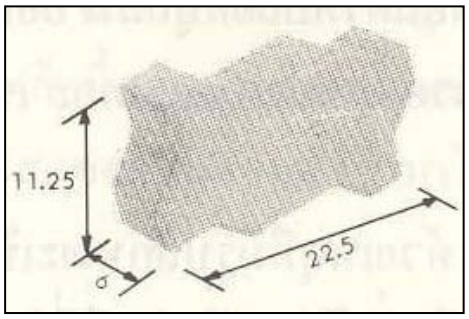
คอนกรีตบล็อกสำหรับก่อผนัง แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบกลวง (Hollow Concrete Block) มี 2 ชนิดคือ ชนิดที่ไม่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้นอกจากน้ำหนักของคอนกรีตบล็อกเอง (Non-load Bearing Block) และชนิดที่สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ (Load Bearing Block)

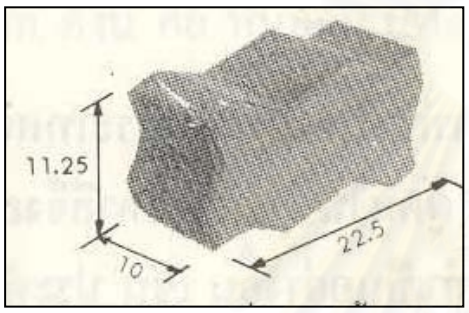
2. คอนกรีตบล็อกก่อผนังแบบตัน (Solid Concrete Block) เป็นคอนกรีตบล็อกทึบตันไม่มีรูกลวงตรงกลาง สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้นอกจากจะรับน้ำหนักคอนกรีตบล็อกเอง

2.7.2 <u>คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น</u> (Interlocking Concrete Paving Block)

คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นเป็นคอนกรีตบล็อกที่สามารถนำมาวางเรียงประสานกันได้อย่างต่อเนื่อง ใช้สำหรับปูพื้นถนน ทางเท้า และลานต่างๆ ซึ่งชนิดและขนาดของคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นขึ้นอยู่กับผู้ผลิต เช่น คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น หนา 6 เซนติเมตรสำหรับทางเท้า หนา 10 เซนติเมตรสำหรับถนนสาธารณะเป็นต้น ดังรูปที่ 2.2



บล็อกปูถนนซีแพค 6 ซม.
สำหรับงานปูทางเท้า จอดรถถนนภายในบ้าน
1 ตร.ม. ใช้ 40 ก้อน
ความยาว 22.5 ซม.
ความกว้าง 11.25 ซม.
หนา 6.0 ซม.



บล็อกปูถนนซีแพค 10 ซม.
สำหรับงานที่ต้องรับน้ำหนักสูง เช่น ลานจอด
รถในโรงงาน โกดังสินค้า ถนนสาธารณะ
1 ตร.ม. ใช้ 40 ก้อน
ความยาว 22.5 ซม.
ความกว้าง 11.25 ซม.
หนา 10.0 ซม

รูปที่ 2.2 ลักษณะและขนาดของบล็อกประสานปูพื้น (พิภพ สุนทรสมัย, 2530)

2.8 การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lea (1980) ได้ทำการศึกษาการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย Burnt Shale พบว่าวัสดุดังกล่าว มีความเป็นปอซโซลาน โดยค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกของคอนกรีตที่ผสมด้วยวัสดุดังกล่าวมีค่าน้อยลงเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุปอซโซลานมากขึ้น แต่ค่ากำลังรับแรงอัดช่วงปลายมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นจนใกล้เคียงคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของตัวอย่างในสัดส่วนและระยะเวลาการบ่มต่างๆกัน ดังนั้นการพิจารณาลักษณะสมบัติของวัสดุปอซโซลานนั้นควรพิจารณาที่ระยะยาว เนื่องจากค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของสารประกอบในปูนซีเมนต์ไม่ใช่วัสดุปอซโซลาน คอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลานต้องการระยะเวลาบ่มที่ยาวนานกว่าคอนกรีตธรรมดาทั่วไป เพื่อให้ได้ค่ากำลังรับแรงอัดที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการบ่มในน้ำ หรือสภาพชื้น จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าการบ่มในอากาศธรรมดา

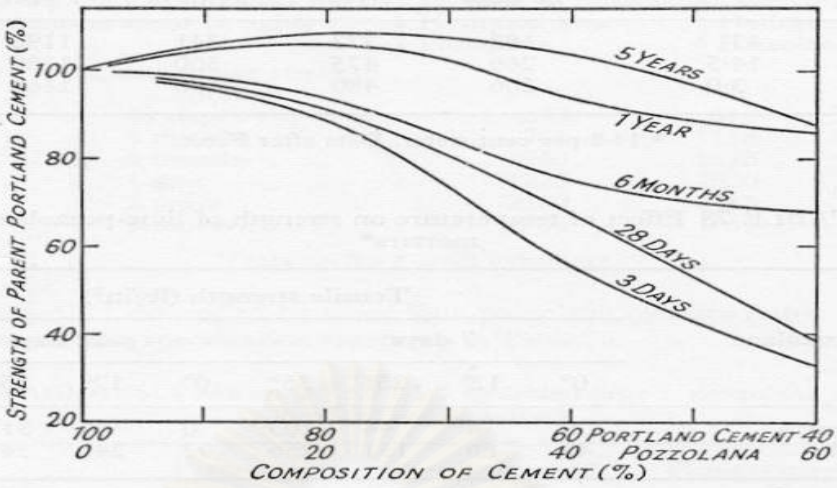


FIG. 126 Effect of substituting pozzolana for Portland cement on the strength of 1 : 2 : 4 : 0·6 concrete stored in water at 18°.

รูปที่ 2.3 ผลกระทบเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานต่อค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ผสมด้วยอัตราส่วน 1:2:4:0.6 (Lea, 1980)

อุดม (2532) ทำการศึกษาการพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ผสมขี้เถ้าลอยลิกไนต์จากโรงไฟฟ้า อำเภอแม่เมาะ จ.ลำปาง พบว่าคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ผสมขี้เถ้าลอยเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 15 20 30 และ40 โดยน้ำหนัก มีการพัฒนากำลังรับแรงเพิ่งขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม โดยอัตราส่วนการแทนที่ของขี้เถ้าลอยที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้การพัฒนากำลังในช่วงระยะการบ่มเริ่มต้นต่ำกว่า แต่ในช่วงระยะการบ่มหลัง 28 วันจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าปูนซีเมนต์ล้วน เมื่อทดสอบค่าความเป็นวัสดุปอซโซลานโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร มีค่าร้อยละ 89.2 ซึ่งจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชั้น F เนื่องจากผลรวมซิลิกา อลูมินาและเหล็กมีมากกว่า ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักตามข้อกำหนด ASTM C618 และจากการวิเคราะห์หาสารเชื่อมประสานโดย X-Ray Diffraction Spectrometry ให้ผลสอดคล้องกับการพัฒนากำลังรับแรงอัด

Douglas และคณะ (1991) ได้ศึกษาคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Slags) ได้แก่ ตะกรันทองแดงและตะกรันตะกั่ว แปรค่าความละเอียด 3,000 ตร.ซม./กรัม และ 4,000 ตร.ซม./กรัม เพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยทำการทดสอบหาค่าดัชนีความเป็นปอซโซลานในมอร์ต้า ซึ่งการทดลองทำโดยการนำตะกรันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 35 โดยปริมาตร

ผลการศึกษาพบว่า

1. ตะกรันตะกั่วมีค่าดัชนีความเป็นปอซโซลานมากกว่าร้อยละ 75 ซึ่งสามารถใช้เป็นวัสดุแทนที่ซีเมนต์บางส่วนได้ ในขณะที่ตะกรันทองแดงมีค่าต่ำกว่าร้อยละ 75 ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานความเป็นวัสดุปอซโซลาน

2. ขนาดอนุภาคตะกรันที่มีค่าความละเอียด 3,000 ตร.ซม./กรัม ให้ค่ากำลังรับแรงอัดน้อยกว่าตะกรันที่มีค่าความละเอียด 4,000 ตร.ซม./กรัม

Nakamura และคณะ (1992) ได้ทำการศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง และคุณสมบัติของคอนกรีตที่เกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งผสมกับตะกรันจากเตาถลุงเหล็กในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของคอนกรีต ในการทดลองมีการแปรค่าความละเอียดของอนุภาคตะกรัน 3 ค่า คือ 453 786 และ 1160 ตร.ม/กก. อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าเท่ากับ 0.3 และ 0.4 และมีการผสมสารเติมแต่งคอนกรีต ประเภทสารลดปริมาณน้ำ (High Range Water-reducing Admixture) เพื่อควบคุมให้คอนกรีตมีค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 160 – 200 มม.

จากการทดลองพบว่า คอนกรีตที่ประกอบด้วยตะกรันที่มีขนาดอนุภาคละเอียดที่สุดจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกสูง โดยที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงจนเกือบเท่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงอย่างเดียว และที่ระยะเวลาบ่มที่ 91 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในบรรดาคอนกรีตทั้งหมด โดยอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3 และ 0.4 จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนคอนกรีตที่ประกอบด้วยตะกรันที่มีความละเอียดของอนุภาคประมาณ 786 ตร.ม/กก. เมื่อใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.3 ก็จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงกว่าที่ 0.4 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 และ 7 วัน คอนกรีตนี้จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเพียงอย่างเดียว แต่ที่ระยะเวลา 28 และ 91 วัน จะให้ค่ากำลังรับแรงอัดเกือบเท่ากัน

จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างของโพรงคอนกรีตพบว่า คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาเพียงอย่างเดียว จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำสูงสุด ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้อนุภาคตะกรันที่มีขนาดละเอียดที่สุดให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมน้ำต่ำที่สุด และความพรุนน้อยที่สุด

จากการทดลองของ Nakamura สามารถสรุปได้ว่าเมื่อนำตะกรันจากเตาหลอมเหล็กมาผสมปูนซีเมนต์แล้วสามารถทำให้คอนกรีตที่ได้มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สามารถเทียบได้กับคอนกรีตที่เกิดจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง โดยคุณสมบัติของคอนกรีตที่ได้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของอนุภาคตะกรันที่ใช้

Sakai และคณะ (1992) ทำการศึกษาในลักษณะที่คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Nakamura แต่ในการทดลองนี้จะใช้ปูนซีเมนต์ประเภทให้ความร้อนปานกลางและมีการแปรปริมาณตะกรันที่ใช้ในงานคอนกรีต โดยการทดลองได้มีการแปรค่าความละเอียดของอนุภาคตะกรัน 4 ค่า คือ 300 400 500 และ600 ตร.ม/กก. และใช้ตะกรันเตาถลุงเหล็กในปริมาณร้อยละ 50 60 70 และ80 ของน้ำหนักคอนกรีต ปริมาณซีเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรของคอนกรีตที่ใช้มี 2 ค่าคือ 210 และ300 กก./ลบ.ม

จากการทดลองสรุปได้ว่าเมื่อใช้ตะกรันในปริมาณต่างๆกันในคอนกรีตพบว่าระยะเวลาก่อตัวเริ่มแรกของคอนกรีตทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ระยะเวลาก่อตัวสุดท้ายของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณตะกรันเพิ่มขึ้น

ปริมาณตะกรันที่ใช้ในการผสมคอนกรีตจะมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อใช้ระยะเวลาบ่ม 3และ7วัน แต่เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มเพิ่มเป็น 28 และ91วันกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณตะกรันที่ใช้เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ปริมาณตะกรันร้อยละ 80คอนกรีตจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำมาก

เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มสั้น ความละเอียดของอนุภาคตะกรันมีผลไม่มากนักต่อค่ากำลังรับแรงอัดแต่เมื่อใช้ระยะเวลาบ่มนาน ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคตะกรันที่ใช้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น

Shannag และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของวัสดุปอซโซลานต่อผลกระทบเบื้องต้นของซีเมนต์เพสท์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต โดยวัสดุปอซโซลานที่ทำการทดลองได้แก่ เถ้าภูเขาไฟในพื้นที่ต่างกันจำนวน 2 ชนิดโดยชนิดที่ 1 มีสัดส่วนของ ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3)เท่ากับ 40.1 13.4 และ12.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ชนิดที่ 2 มีสัดส่วนเท่ากับ 38.5 12.8 และ11.6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักตามลำดับ ดัชนีความเป็นปอซโซลาน (Pozzolanic Index) ของวัสดุทั้งสองมีค่าเท่ากับร้อยละ 60 และ83 ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าขนาดที่เล็กลงของวัสดุจะทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น โดยวัสดุชนิดที่ 2 มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าชนิดที่ 1 และเมื่อผสมวัสดุชนิดที่ 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ลงในคอนกรีตร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 28 และ90 วัน จะให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ล้วน

Zhang และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่เรียกว่า Thermally Activated Alumina-silicate ที่มีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต โดยวัสดุดังกล่าวมีลักษณะเป็นผงสีขาวมีส่วนประกอบ ซิลิกา (SiO_2) เท่ากับ ร้อยละ 51.34 และอลูมินา (Al_2O_3)

เท่ากับร้อยละ 41.95 โดยน้ำหนัก ขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 1.3 ไมครอน และมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) โดยมีส่วนที่เป็นผลึก (Crystallized Phases) เพียงเล็กน้อย พบว่าวัสดุดังกล่าวมีความเป็นปอซโซลานสูง และสามารถใช้เป็นวัสดุประสานในการผลิตคอนกรีตกำลังสูงได้ โดยการแทนที่ในสัดส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมด้วยปูนซีเมนต์ล้วนในทุกระยะเวลาการบ่ม

วาสนา (2538) พบว่าปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าลอยต่างๆสามารถสังเกตได้จากการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) โดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจาก ($Ca(OH)_2$) ทำปฏิกิริยากับวัสดุปอซโซลานทำให้เกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมอลูมิเนต (CAH) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) และเอททรินไกต์ (ettringite; $3CaO.\ Al_2O_3\ .3CaSO_4\ .31H_2O$) ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้มีผลต่อการพัฒนากำลังในคอนกรีต

Maltais และคณะ (1997) ศึกษาอุณหภูมิของการบ่มต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย Class F ที่มีขนาดเล็กกว่าและใหญ่กว่า 45 μm ใช้ปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 20°ซ และ 40°ซ ผลการศึกษาพบว่า ขนาดเถ้าลอยจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่อายุช่วงแรกเพิ่มขึ้น สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิการบ่มมีผลต่อการลดกำลังอัดในระยะยาวของมอร์ตาควบคุม แต่ไม่มีผลเชิงลบต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยในระยะยาว ในช่วงต้นโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ของทั้งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าลอยและมอร์ตาร์ธรรมดาไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งตัวอย่างที่อายุน้อยกว่า 28 วัน อิทธิพลของเถ้าลอยต่อปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ไม่ปรากฏชัดทุกอุณหภูมิการบ่มของเถ้าลอยทั้งสองชนิด แต่จะปรากฏชัดเจนขึ้นหลังจากอายุ 28 วันไปแล้ว นอกจากนั้นแล้วเถ้าลอยที่ขนาดละเอียดกว่ามีผลต่อการเพิ่มความแน่นของโครงสร้างภายใน เนื่องจากว่าปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ เอททรินไกต์ (Ettringite; $3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.31H_2O$) ที่เพิ่มขึ้น

ศราวุฒิ และคณะ (2543) ศึกษาพฤติกรรมคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กที่ไม่ผ่านการบดเนื่องจากการบดต้องใช้ต้นทุนในการผลิตสูงเพื่อศึกษาการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านคอนกรีตเทคโนโลยี โดยทำการทดสอบพฤติกรรมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุง ได้แก่ ค่าความข้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัว ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ความสามารถในการดูดซับคลอไรด์ และกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลา 3 7 28 และ91 วัน พบว่าเมื่อใช้ปริมาณตะกรันเตาถลุงแทนที่

ปูนซีเมนต์มากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ความสามารถในการดูดซับคลอไรด์ของซีเมนต์เพสท์ลดลง การพัฒนากำลังจะต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากตะกรันเตาถลุงที่ไม่ผ่านการบดทำให้วัสดุไม่ความไวในการทำปฏิกิริยาเคมี

Isaia และคณะ (2003) อธิบายว่าวัสดุปอซโซลานที่เติมแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปนั้นส่วนใหญ่เพื่อเพิ่มสมบัติรับน้ำหนักเชิงกล (Mechanical Strength) และความคงทน (Durability) ของโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดขึ้น และโครงสร้างรูพรุน (Pore Structure) ในเนื้อคอนกรีตที่ลดลง ซึ่งคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองจะถูกแทนที่ด้วยวัสดุประสานต่างๆ ได้แก่ เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า และเถ้าแกลบจากโรงสี ในสัดส่วนที่ต่างๆ กัน คือ 12.5 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับสัดส่วนควบคุมที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.35 0.5 และ 0.65 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Effect) จะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการเพิ่มของวัสดุปอซโซลานในส่วนผสม โดยอัตราการเพิ่มขึ้นที่ระยะเวลา 91 วันจะมีค่าสูงกว่าที่ 28 วัน

กฤษณ์ (2545) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเถ้าลอยเส้นใยปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยจากโรงงานน้ำตาล มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการผสมมอร์ตาร์ พบว่า เถ้าลอยทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลานตามข้อกำหนดใน ASTM C618 และเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่า กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ซึ่งในงานวิจัยนี้ เถ้าลอยเส้นใยปาล์มสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผสมมอร์ตาร์ได้ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 ซึ่งให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 85 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยชานอ้อยให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่อายุการบ่ม 28 วัน ประมาณร้อยละ 50 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ธรรมดา

หฤษฎ์ (2546) ได้ทำการศึกษาการนำซิลิกาขอลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เป็นวัสดุแทนที่ในซีเมนต์บางส่วนเพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อก โดยทำการทดลองศึกษาลักษณะทางกายภาพ สมบัติทางเคมี ดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลาน และกำลังรับแรงอัด โดยทำการแปรค่าสัดส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด เท่ากับ 1:1:1 1:0.8:1.2 1:1.2:1.8 1:2:3 1:3:5 1:4:6 และ1:4:7 เพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน พบว่าที่อัตราส่วนผสม 1:1.2:1.8 ให้ค่ากำลังรับแรงอัด เท่ากับ 378 และ 536 กก./ซม.^{2} ที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ 28 วัน ตามลำดับ

บทที่ 3

แผนการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันดีบุกซึ่งเป็นของเสียทางอุตสาหกรรมมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยงานวิจัยแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 5 การทดลองคือ 1. การศึกษาลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และการชะละลายของตะกรันดีบุก 2. การศึกษาหาค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุกเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น 3. การศึกษาการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของการนำตะกรันดีบุกมาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดต่อระยะเวลาบ่ม ผลของค่าความละเอียดของตะกรันที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ และการเปรียบเทียบกำลังอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันดีบุกและมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก 4. การศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตเมื่อผสมตะกรันดีบุก เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ โดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) 5. การนำตะกรันดีบุกไปใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นและการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้น โดยทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตรายของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและทดสอบวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมโยธา ห้องปฏิบัตการทดสอบวัสดุของภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และการปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 วัสดุ สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 <u>วัสดุที่ใช้ในการวิจัย</u>

3.1.1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ตราช้าง ของบริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด (มหาชน) ซึ่งผลิตขึ้นโดยมีคุณสมบัติตามมาตรฐานอุตสาหกรรม 15 (มอก.15)

3.1.1.2 ตะกรันดีบุก

ได้จากกระบวนการถลุงแร่ดีบุกเพื่อผลิตแท่งดีบุกบริสุทธิ์ ซึ่งนำมาจากโรงงานถลุงแร่ดีบุกจังหวัดภูเก็ต โดยเป็นตะกรันดีบุกที่เกิดจากการถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching)

3.1.1.3 ทราย

ทรายที่ใช้ในการทำมอร์ตาร์เป็นทรายแม่น้ำ มีลักษณะเป็นทรายหยาบ มีเหลี่ยมมุม

3.1.1.4 หินเกล็ด

ใช้หินเกล็ดในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4

3.1.1.5 น้ำ

น้ำที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำประปา

3.1.1.6 ปูนขาว เกรดเชิงพาณิชย์

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

3.1.2.1 กรดซัลฟูริก

3.1.2.2 กรดไนตริก

รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก และตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

3.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.3.1 การเตรียมวัสดุ ทดสอบลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุ

- ตะแกรงเบอร์ 3/8 4 8 16 30 50 100 และ200
- เครื่องร่อนหาขนาดอนุภาค (Sieve Shaker)
- ชุดทดสอบหาความถ่วงจำเพาะ
- เครื่องบดวัสดุ (Roll Crusher)
- เตาอบ (Oven)
- กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

- เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Laser Diffraction Particle Size Analyzer)

- เครื่องวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของวัสดุ (X-Ray Fluorescence Spectrometry)

3.1.3.2 การทดสอบหาปริมาณโลหะหนักโดยการสกัดสาร

- ตะแกรง ขนาด 9.5 มิลลิเมตร

- เครื่องชั่งสารเคมี 200 กรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม

- ขวดพลาสติกขนาด 2 ลิตร

- กระบอกตวงขนาด 2,000 มิลลิลิตร อ่านค่าได้ละเอียด 10 มิลลิลิตร

- เครื่องวัดพีเอช

- เครื่องเขย่าแบบหมุน (Rotary Agitator) มีอัตราการหมุน 30 รอบ/นาที

- กระดาษกรองใยแก้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6-0.8 ไมครอน

- ชุดกรองและปั๊มสุญญากาศ (Vacuum Pump)

- เครื่องย่อยสลายและสกัดสาร (Microwave Digesters)

- เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Inductively Coupled Plasma Spectrometer)

3.1.3.3 การทดสอบหาค่าดัชนีความเป็นปอซโซลาน การหล่อก้อนมอร์ตาร์และคอนกรีตบล็อก และการทดสอบกำลังรับแรงอัด

- เครื่องชั่งน้ำหนัก 15,000 กรัม อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 กรัม

- แบบหล่อมอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร

- แบบหล่อคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ขนาด 11.25x22.5x6 เซนติเมตร

- โต๊ะการไหล (Flow Table)

- ไม้กระทุ้ง (Tamper) ขนาดหน้าตัด 0.5x1 นิ้ว มีความยาวประมาณ 5-6 นิ้ว หน้าตัดเรียบและตั้งฉากกับแกนจับ ทำด้วยวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ

- เกรียงฉาบซีเมนต์

- เครื่องผสมซีเมนต์

- เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด (Compressive Strength Testing Machine)

3.1.3.4 การวิเคราะห์หาสารประกอบแคลเซียมซิลิเกต

- เครื่องวิเคราะห์สารประกอบที่อยู่ในรูปCrystalline Phase (X-Ray Diffraction Spectrometry)

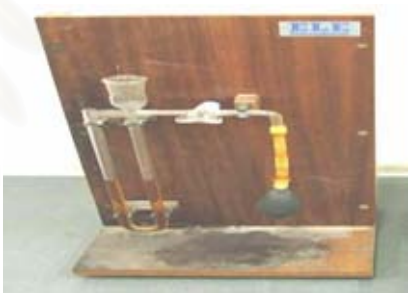
(ก)

(ข)

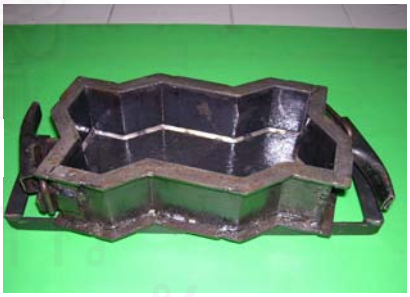
(ค)

(ง)

(จ)

(ฉ) 

(ช)

(ซ) 

รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การทำวิจัย : (ก) เครื่องผสมมอร์ตาร์ (ข) เครื่องบด (Roll Crusher)
(ค) เครื่องเขย่า (Rotary Shaker) (ง) เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer)
(จ) โต๊ะการไหล (Flow Table) (ฉ) เครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability)
(ช) แบบหล่อมอร์ตาร์ ขนาด 5x5x5 ซม. (ซ) แบบหล่อคอนกรีตบล็อกปูพื้นแบบคดกริช
ขนาด 11.25x22x6 ซม.

3.1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการวิจัย

3.1.4.1 อัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

3.1.4.2 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

3.1.4.3 ระยะเวลาการบ่มก้อนตัวอย่าง

3.1.4.4 ขนาดตะกรันดีบุก

3.2 การดำเนินการวิจัย

การวิจัยแบ่งการทดลองเป็น 5 การทดลอง ดังนี้

การทดลองที่1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพ ทางเคมี และการชะละลายของวัสดุ

1. ลักษณะทางกายภาพ

1.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และตะกรันดีบุกหาโดยการแทนที่ในน้ำมันก๊าดตามมาตรฐาน ASTM C188-95

1.2 การกระจายขนาดของอนุภาค วิเคราะห์โดยใช้ตะแกรงร่อนเบอร์ 3/8 4 8 16 30 50 100 200 โดยขนาดตะแกรง (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM แสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับตะกรันดีบุกที่ไม่ได้ผ่านการบด และวิเคราะห์โดยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Malvern Particle Size Analyzer Model Mastersizer 2000) ซึ่งสามารถวัดอนุภาคขนาดตั้งแต่ 0.02 ถึง 2,000 ไมโครเมตร สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกรันดีบุกที่ผ่านการบดด้วยเครื่องRoll Crusher แล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200เพื่อให้มีขนาดใกล้เคียงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตาม มอก.15

1.3 ลักษณะอนุภาค วิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM-6400 Scanning Electron Microscope) เพื่อดูรูปร่างและลักษณะผิวของวัสดุ ซึ่งตัวอย่างที่นำมาทดสอบจะต้องฉาบผิวด้วยโลหะผสมระหว่างทองกับแพลเลเดียม (Gold-palladium Alloy)

1.4 ความสามารถในการดูดซึมน้ำของวัสดุ (Water Absorption Capacity) ตาม ASTM C 128-93

1.5 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ทดสอบโดยเครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C204-95 ซึ่งค่าพื้นที่ผิวจำเพาะมีหน่วยเป็น พื้นที่ผิวต่อน้ำหนัก

1.6 รูปแบบของสารประกอบในวัสดุ ทำการทดสอบสารประกอบในปูนซีเมนต์และตะกรันดีบุกอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous Phase) หรือรูปผลึกควอทซ์ (Crystalline Phase) โดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD)

2. <u>ส่วนประกอบทางเคมี</u> โดยทำการทดสอบส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกรันดีบุกด้วยเครื่องวิเคราะห์สารประกอบออกไซด์ของวัสดุ (Phillips X-Ray Fluorescence Spectrometer Model 2400)

3. <u>การทดสอบการชะละลาย</u> ทำการทดสอบการชะละลายโลหะหนักในตะกรันดีบุก โดยวิธีสกัดสาร (Extraction Procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540) และวิเคราะห์โลหะหนักด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma Spectroscope (ICP)

ตารางที่ 3.1 ขนาดของตะแกรง (Sieve) ตามมาตรฐาน ASTM

ขนาดตะแกรง (Sieve No.)	ขนาดช่องตะแกรง		ขนาดลวดที่ใช้ทำตะแกรง	
	ม.ม.	นิ้ว	ม.ม.	นิ้ว
3 ”	76.10	3.00	5.80	0.2283
2 ”	50.80	2.00	5.05	0.1988
1 ½ ”	38.10	1.50	4.59	0.1807
1 ”	25.40	1.00	3.80	0.1496
¾ ”	19.00	0.75	3.30	0.1299
½ ”	12.70	0.50	2.67	0.1051
3/8 ”	9.51	0.375	2.27	0.0894
No. 4	4.76	0.187	1.54	0.0606
No. 8	2.38	0.0937	1.00	0.0394
No. 16	1.19	0.0469	0.650	0.0256
No. 30	0.595	0.0234	0.390	0.0154
No. 50	0.297	0.0117	0.215	0.0085
No. 100	0.149	0.0059	0.110	0.0043
No. 200	0.074	0.0029	0.053	0.0021

การทดลองที่ 2 การศึกษาหาค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก

ทดสอบหาค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Index) ของตะกรันดีบุก ตามมาตรฐาน ASTM C311-85 ซึ่งหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนของค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุกร้อยละ 35 โดยปริมาตร ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน โดยปริมาณน้ำที่ต้องการในส่วนผสมมอร์ตาร์เป็นตามมาตรฐาน ASTM C230-83 ซึ่งมีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 110 $\pm$ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยจำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 6 ก้อนตัวอย่าง

$$\text{ดัชนีความเป็นปอซโซลาน} = \frac{\text{กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมวัสดุ 35 \%โดยปริมาตร}}{\text{กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน}} \times 100$$

การทดลองที่ 3 การศึกษาผลของขนาดตะกรันดีบุก สัดส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลของระยะเวลาบ่ม และเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดกับมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก

การทดลองนี้แบ่งเป็น 4 การทดลองย่อย คือ 1. การศึกษาถึงผลของขนาดตะกรันดีบุกต่อค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ 2. การศึกษาอัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์ และอัตราส่วนน้ำต่อตะกรันดีบุกที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3. การนำอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในแต่ละส่วนผสมมาศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ 4.การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุกและมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก โดยการทดลองทั้งหมดนี้ใช้อัตราส่วนทรายต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 2.75 การหล่อมอร์ตาร์เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C109-95

การทดลองที่ 3.1 <u>การศึกษาขนาดตะกรันดีบุกที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัด</u>

- ขนาดตะกรันดีบุกที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ 1.อนุภาคตะกรันที่ไม่ผ่านการบด (Slag) 2. อนุภาคตะกรันที่บดแล้วผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างเบอร์ 100 (Slag #50) 3. อนุภาคตะกรันที่บดแล้วผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ค้างเบอร์ 200 (Slag #100) 4.อนุภาคตะกรันที่บดแล้วผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (Slag #200)
- กำหนดตะกรันดีบุกที่ใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 30โดยน้ำหนัก
- กำหนดค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water-to-Binder Ratio) เท่ากับ 0.5

- ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

- จำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 12 ก้อนตัวอย่าง

การทดลองที่ 3.2 <u>การศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยตะกรันดีบุก และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ผสมตะกรันดีบุก</u>

- ขนาดตะกรันดีบุกที่ใช้ทำการศึกษา คือ ตะกรันดีบุกที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อให้มีขนาดใกล้เคียง มอก.15 ว่าด้วยมาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ต้องมีขนาดอนุภาคละเอียดไม่น้อยกว่า 2,800 ตร.ซม./กรัม

- ทำการแปรค่าตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ที่ร้อยละ 0 10 20 30 40 และ50 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.4 0.5 0.6 และ0.7

- ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 และ28 วัน

- จำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 144 ก้อนตัวอย่าง

การทดลองที่ 3.3 <u>การศึกษาผลของระยะเวลาบ่มต่อกำลังรับแรงอัด</u>

- นำอัตราส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในแต่ละสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์จากผลการทดลองที่ 3.2 มาทำการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดในแต่ละระยะเวลาการบ่มเพื่อดูพัฒนาการของค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์

- ทำการแปรค่าระยะเวลาการบ่มที่ 1 3 7 14 28 และ90 วัน

- จำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 108 ก้อนตัวอย่าง

การทดลองที่ 3.4 <u>การเปรียบเทียบมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์และมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนขาว</u>

- ขนาดตะกรันดีบุกที่ใช้ทำการศึกษา คือ ตะกรันดีบุกที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อให้มีขนาดใกล้เคียงตามมอก.15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2517) ว่าด้วยมาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

- ทำการแปรค่าตะกรันดีบุกแทนที่ปูนขาว ที่ร้อยละ 0 10 30 และ50 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 1 3 7 14 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์จากการทดลองที่ 3.3

- กำหนดให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5

- จำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 72 ก้อนตัวอย่าง

การทดลองที่ 4 การศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อผสมตะกรันดีบุก

- เป็นการทดสอบเพื่อศึกษากระบวนการเกิดและผลของปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานที่เกิดจากการนำตะกรันดีบุกมาเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยใช้ X-ray Diffraction Spectrometry (XRD)

- การวิเคราะห์ด้วย XRDนี้ ใช้ซีเมนต์เพสท์ผสมตะกรันดีบุก โดยไม่มีการผสมทราย เนื่องจากทรายมีซิลิกาที่อยู่ในรูป Crystalline Phase ซึ่งจะทำให้เกิดการแทรกแซงของ Diffraction Peak จากทราย

- การทดลองจะทำการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันดีบุกที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ในปริมาณร้อยละ 0 10 30 และ50 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W/(C+SLAG)] ตามการทดลองที่ 3.3 ระยะเวลาบ่ม 3 7 28 และ90 วัน โดยจะสนใจสารประกอบที่มีความสำคัญต่อการพัฒนากำลังอัด คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

- จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ เท่ากับ 16 ตัวอย่าง

การทดลองที่ 5 การศึกษาการใช้ประโยชน์และค่าใช้จ่ายในการใช้ตะกรันดีบุกเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

- ทำการทดสอบคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นซึ่งมีตะกรันดีบุกเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยใช้ตะกรันดีบุกที่ผ่านการบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

- กำหนดสัดส่วน วัสดุประสาน : ทราย : หินเกล็ด : น้ำ เท่ากับ 1:1.2:1.8:0.5 โดยน้ำหนัก ใช้ระยะเวลาบ่มที่ 7 14 และ28 วัน (อัตราส่วน ปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเกล็ด : น้ำ ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกสูงสุด เท่ากับ 1:1.2:1.8:0.5 ศึกษาโดย หฤษฎ์ ธิตินันท์, 2546)

- อัตราส่วนการแทนที่ตะกรันดีบุกในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการทดลองที่ 3.3 ที่ให้ปริมาณในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มากที่สุดและมีค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ไม่น้อยกว่า 245 กก/ซม^2 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน มอก.15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2517) ซึ่งกล่าวถึงมาตรฐานคุณภาพปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆที่นำไปใช้งาน โดยค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ต้องไม่น้อยกว่า 245 กก/ซม^2 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

- คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ใช้ในการทดลอง คือ ขนาด 11.25x22x6 เซนติเมตร (คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช)

- ระยะเวลาบ่มคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ที่ 7 14 และ28 วัน
- จำนวนก้อนตัวอย่างเท่ากับ 9 ก้อนตัวอย่าง

3.3 การวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในการวิเคราะห์ผลการวิจัยจะเปรียบเทียบสมบัติต่างๆของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุกกับผลการวิจัยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันตะกั่ว และตะกรันทองแดง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 สมบัติพื้นฐานของวัสดุ

การวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานของตะกรันดีบุกซึ่งเป็นของเสียที่เกิดจากกระบวนการถลุงแร่ดีบุก เพื่อผลิตแท่งดีบุกบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ลักษณะ คือ องค์ประกอบทางเคมี ลักษณะสมบัติทางกายภาพ และการชะละลายโลหะหนักโดยวิธีการสกัดสารตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ผลการศึกษาลักษณะสมบัติของตะกรันเป็นดังนี้

4.1.1 <u>ส่วนประกอบทางเคมี</u>

ส่วนประกอบทางเคมีสามารถหาได้โดยการใช้ X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) ซึ่งเป็นการหาส่วนประกอบทางเคมีของวัสดุในรูปของออกไซด์ โดยทำการทดสอบหาส่วนประกอบทางเคมีของตะกรันดีบุก เปรียบเทียบกับ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าลอยที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ โรงไฟฟ้าอำเภอแม่เมาะ ซึ่งเป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532) ตะกรันจากโรงถลุงแร่ทองแดงที่เมือง New Brunswick และตะกรันจากโรงถลุงแร่ตะกั่วที่เมือง Quebec ประเทศแคนาดา ซึ่งเป็นการศึกษาของ Douglas และคณะ (1991) ดังแสดงใน ตารางที่ 4.1

จากตารางที่ 4.1 เมื่อเปรียบเทียบส่วนประกอบทางเคมีของตะกรันดีบุกเถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว พบว่าสารประกอบหลักที่มีในวัสดุ ได้แก่ อลูมินา (Al_2O_3) แคลเซียม (CaO) เหล็ก (Fe_2O_3) และซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์เช่นกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบแคลเซียม (CaO) ของตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว มีเพียงร้อยละ 21.10 11.92 1.93 และ16.60 โดยน้ำหนักตามลำดับซึ่งน้อยกว่าที่พบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีถึงร้อยละ 63.82 โดยน้ำหนัก ซึ่งสารประกอบแคลเซียมนี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำ (H_2O) เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ได้สารประกอบใหม่คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) จะเป็นสารเชื่อมประสานทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ดังนั้น ตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว จึงมีการเชื่อมประสานภายในตัวเองน้อย โอกาสการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้แคลเซียม ซิลิกา และเหล็กที่พบในตะกรันดีบุกมาจากสารเชื้อ (Flux) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการถลุง

ตารางที่ 4.1 ส่วนประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว

สารประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ตะกรันดีบุก	เถ้าลอยลิกไนต์	ตะกรันทองแดง	ตะกรันตะกั่ว
Al_2O_3	5.42	9.69	28.27	7.16	1.66
CaO	63.82	21.10	11.92	1.93	16.60
Cr_2O_3	-	0.28	-	-	-
Fe_2O_3	2.92	17.43	14.57	50.00	45.35
K_2O	0.46	0.66	2.48	0.96	0.25
La_2O_3	-	0.34	-	-	-
MgO	1.50	3.39	2.13	1.49	0.68
MnO	-	1.24	0.11	0.09	0.09
Na_2O	0.26	0.47	-	1.06	0.26
P_2O_5	-	0.93	-	-	-
SiO_2	20.2	34.91	35.43	36.78	19.1
SnO_2	-	1.72	-	-	-
SO_3	2.55	0.15	2.35	-	1.30
Ta_2O_5	-	0.45	-	-	-
TiO_2	-	5.75	0.38	0.39	0.14
ZrO_2	-	1.49	-	-	-
LOI	-	0.00	-	-	-
Total	97.13	100.00	97.79	99.86	85.43

หมายเหตุ 1.ผลการวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

2.ผลการวิเคราะห์ตะกรันทองแดงและตะกรันตะกั่วเป็นการศึกษาของ Douglas และคณะ (1991)

3.” – “ คือ ไม่มีข้อมูลในงานวิจัย

สำหรับซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็ก (Fe_2O_3) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) ในข้างต้นเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดหลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ดังนั้นเมื่อรวมปริมาณซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ($SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว มีค่าเท่ากับร้อยละ 28.54 62.30 78.27 93.94 และ 66.11 โดยน้ำหนักตามลำดับ จะเห็นได้ว่าโอกาสที่จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว มีมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นตะกรันดีบุกอาจสามารถใช้เป็นวัสดุผสมในปูนซีเมนต์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96) โดยผลรวมของซิลิกา อลูมินา และเหล็กต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลรวมของตะกรันดีบุกมีค่าเท่ากับร้อยละ 62.30 โดยน้ำหนัก ปริมาณซัลเฟตมีค่าไม่เกินร้อยละ 4-5 โดยน้ำหนักซึ่งปริมาณซัลเฟตของตะกรันดีบุกมีค่าร้อยละ 0.15 โดยน้ำหนัก ปริมาณความชื้นมีค่าไม่เกินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก พบว่าตะกรันดีบุกมีความชื้นร้อยละ 1.8 โดยน้ำหนัก สำหรับค่า LOI (Loss On Ignition) เป็นค่าการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเนื่องจากการเผาหรือแสดงถึงปริมาณคาร์บอนที่มีในวัสดุ โดยตะกรันดีบุกมีค่า LOI เท่ากับ ร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก ซึ่งมาตรฐานกำหนดให้ต้องมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก เพื่อไม่ให้คาร์บอนซึ่งจะเป็นตัวดูดน้ำเมื่อทำการผสมวัสดุกับซีเมนต์ทำให้น้ำที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำลง ทั้งนี้ปริมาณ LOI ที่มีค่าเท่ากับ 0 เนื่องจากตะกรันดีบุกได้ผ่านกระบวนการถลุงแร่ดีบุกซึ่งกระทำในอุณหภูมิที่สูงมากคือมากกว่า 1,200 องศาเซลเซียส ในขณะที่ LOI เป็นการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิ 500 - 700 องศาเซลเซียส โดยจากข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าตะกรันดีบุกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของการเป็นวัสดุผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

4.1.2 <u>สมบัติทางกายภาพ</u>

เมื่อสังเกตตะกรันที่เกิดจากกระบวนการถลุงแร่ดีบุกด้วยตาเปล่า พบว่าตะกรันที่ได้จากการถลุงมีลักษณะเป็นก้อนแข็งมีเหลี่ยมมุม (Irregular) สีดำมันวาวและเปราะ ทั้งนี้ลักษณะที่เปราะเนื่องจากตะกรันดีบุกถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วหลังออกจากเตาหลอมด้วยการฉีดพ่นน้ำแรงดันสูงหลังออกจากเตาหลอมทำให้โครงสร้างผลึกของอนุภาคไม่สามารถผนึกตัวได้อย่างแข็งแรง ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า Quenching โดยตะกรันดีบุกที่ได้จะมีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ เนื่องจากแรงดันน้ำที่ฉีดพ่น เรียกลักษณะตะกรันดีบุกที่ได้ว่า Granulated Slag ส่วนลักษณะสมบัติทางกายภาพอื่นๆมีดังนี้

4.1.2.1 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

เมื่อนำตะกรันดีบุกมาทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยการแทนที่ในน้ำมันก๊าด ตามมาตรฐาน ASTM C188-95 เช่นเดียวกับการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.25 ในขณะที่ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.14 ซึ่งต่ำกว่าตะกรันดีบุก โดยวิเคราะห์ได้ว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันดีบุกจากตารางที่ 4.1 มีธาตุที่มีมวลโมเลกุล (Molecular Weight) สูงรวมตัวกันมากกว่าเช่น ซิลิกา เหล็ก ไททาเนียม ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว ที่ใช้ในการเปรียบเทียบ แสดงผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว

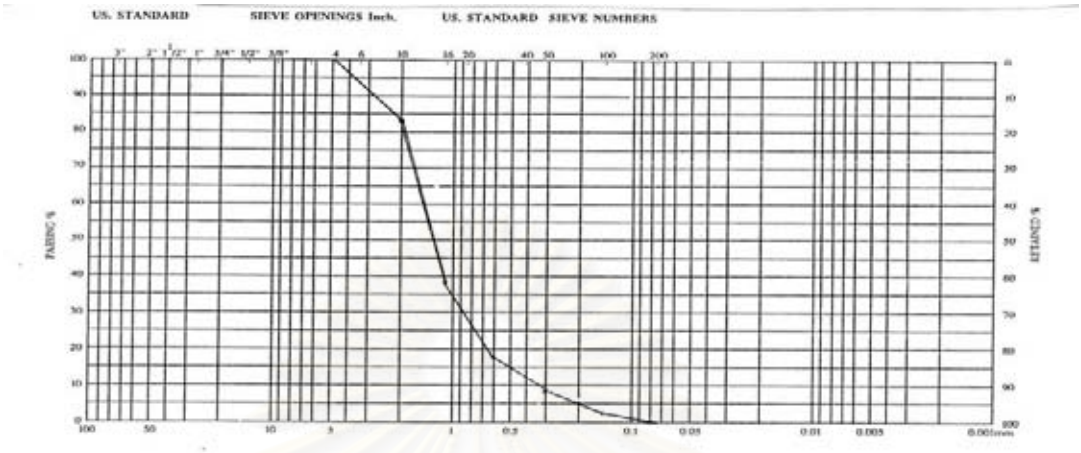
ชนิดตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	3.13
ตะกรันดีบุก	3.25
เถ้าลอยลิกไนต์	2.56
ตะกรันทองแดง	3.39
ตะกรันตะกั่ว	3.40

หมายเหตุ 1.ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของอุดม หงษ์ประธานพร (2532)
2.ผลการวิเคราะห์ตะกรันทองแดงและตะกรันตะกั่วเป็นการศึกษาของ Douglas และคณะ (1991)

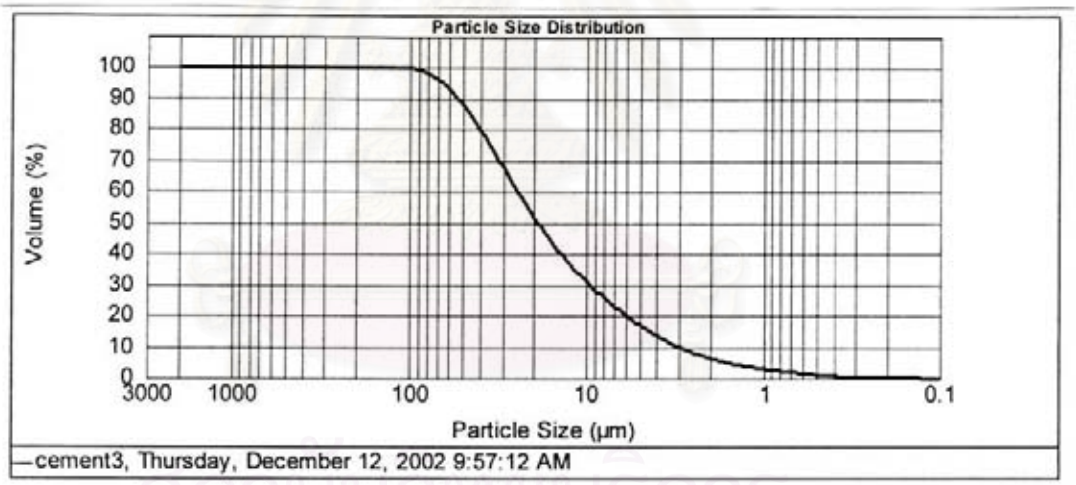
4.1.2.2 การกระจายขนาดอนุภาค (Size Distribution)

การวัดการกระจายขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุกและตะกรันดีบุกที่ผ่านการบดแล้วร่อนด้วยตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 (200 mesh) เพื่อให้มีขนาดตามมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 ที่ต้องมีขนาดอนุภาคสามารถร่อนผ่านตะแกรงมาเบอร์ 200 ได้โดยสะดวก คือมีขนาดอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร ความละเอียดมากกว่า 2,800 ตร.ซม./กรัม โดยการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของตะกรันดีบุก ใช้ชุดตะแกรงร่อนตามวิธีมาตรฐาน ASTM C136-93 แสดงดังรูปที่ 4.1 สำหรับปูนซีเมนต์และตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer) ซึ่งสามารถวิเคราะห์

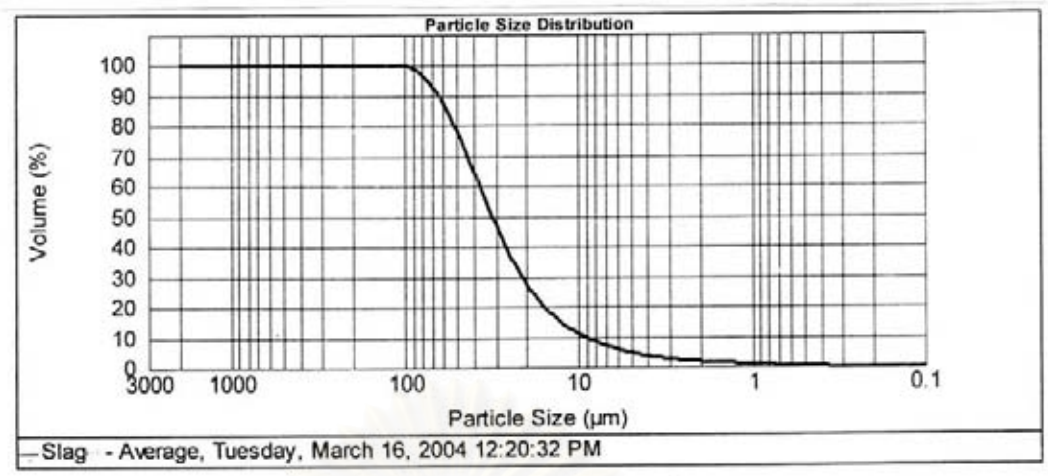
ขนาดอนุภาคได้ละเอียดถึง 0.02 ไมโครเมตร โดยผลการวิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคแสดงดังรูปที่ 4.2 และ4.3



รูปที่ 4.1 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของตะกรันดีบุก



รูปที่ 4.2 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.3 การกระจายขนาดอนุภาคสะสมของตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

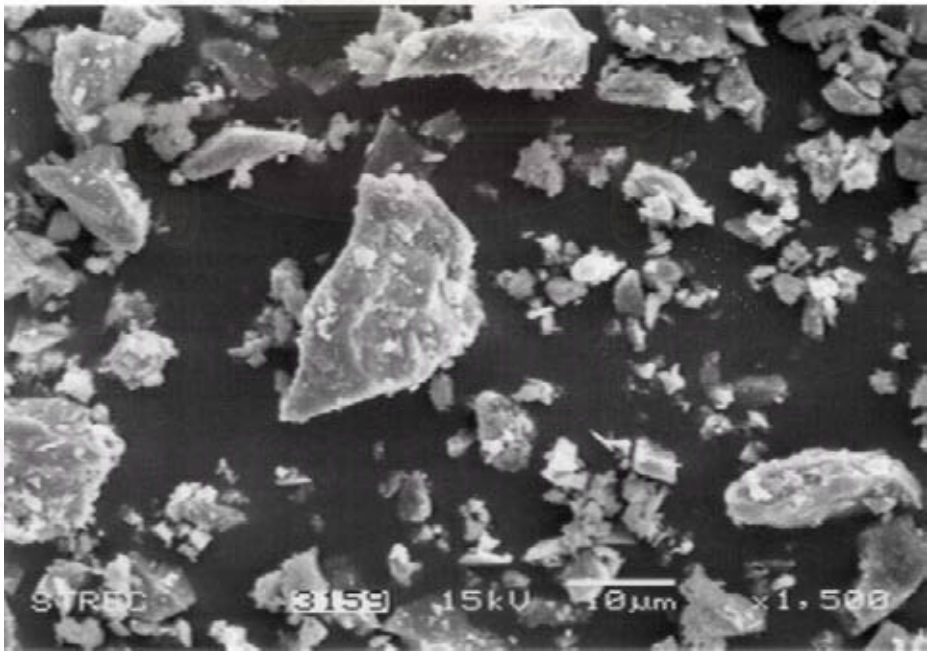
จากรูปที่ 4.1 พบว่าตะกรันดีบุกมีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1 – 5 มิลลิเมตร สัมประสิทธ์ความโค้ง (C_c) เท่ากับ 1.4 โดยค่าสัมประสิทธ์ความโค้ง (Coefficient of Curve) แสดงถึงรูปร่างของเส้นแสดงการกระจายขนาดคละของวัสดุ ถ้าสัมประสิทธิ์ความโค้งมีค่าน้อยกว่า 1 หรือมากกว่า 6 แสดงว่าวัสดุมีขนาดแตกต่างกันน้อยหรือมากเกินไปถือว่าวัสดุมีการกระจายขนาดที่ไม่ดี (Poorly Graded) รูปที่ 4.2 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดอนุภาคประมาณ 3 – 54 ไมโครเมตร สัมประสิทธ์ความโค้ง (C_c) เท่ากับ 1.2 และในรูปที่ 4.3 ขนาดอนุภาคตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มีขนาดประมาณ 9 – 64 ไมโครเมตร สัมประสิทธ์ความโค้ง (C_c) เท่ากับ 1.3 จะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มีขนาดอนุภาคมากกว่า 74 ไมโครเมตรซึ่งเป็นขนาดช่องว่างของตะแกรงเบอร์ 200 ทั้งนี้อาจเนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer ใช้กรรมวิธีแบบแห้ง ทำให้อนุภาคมีโอกาสจับตัวกัน (Agglomeration) ขนาดของอนุภาคที่วัดได้จึงมีขนาดใหญ่กว่าที่ควรจะเป็น สำหรับขนาดอนุภาคสะสมเปอร์เซนต์ไทล์ที่ 10 50 และ90 แสดงดังตารางที่ 4.3 โดยจะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีขนาดเล็กกว่าตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ทุกเปอร์เซนต์ไทล์ โดยในการวิจัยนี้เพื่อให้ได้อนุภาคตะกรันดีบุกที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้ต้องบดด้วยเครื่อง Roll Crusher 2 รอบ ใช้เวลา 10 นาที ต่อตะกรันดีบุก 15 กก. คิดเป็นอัตราการผลิต 90 กก./ชม. เมื่อทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้ว มีปริมาณตะกรันดีบุกที่ค้างอยู่บนตะแกรงเบอร์ 200 คิดเป็นร้อยละ 6 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก และตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200

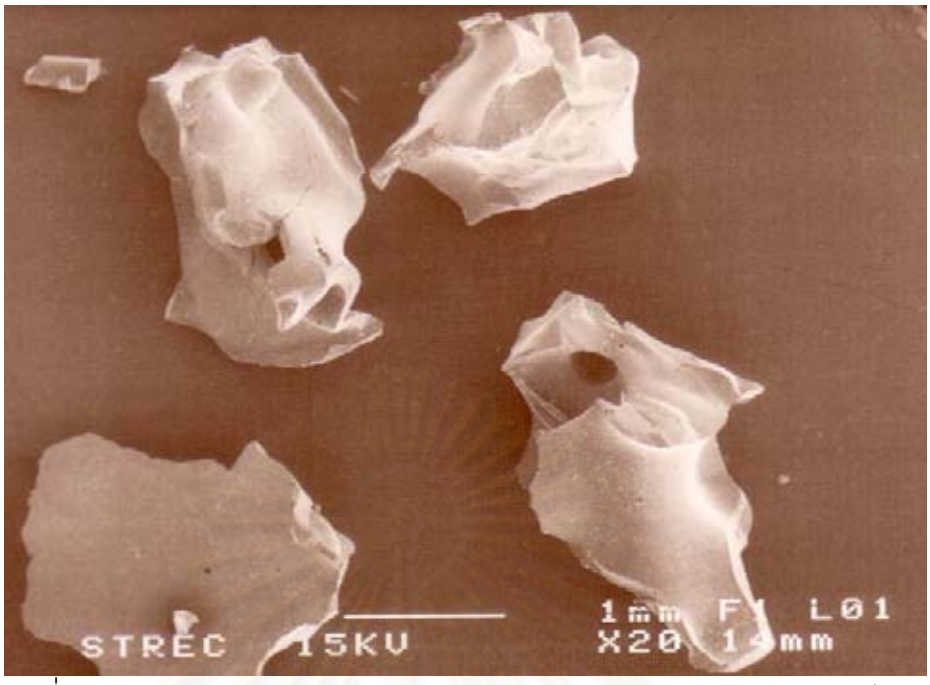
ชนิดตัวอย่าง	d_{10} % (ไมโครเมตร)	d_{50} % (ไมโครเมตร)	d_{90} % (ไมโครเมตร)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2.992	18.987	53.534
ตะกรันดีบุก	0.35×10^3	1.5×10^3	1.9×10^3
ตะกรันดีบุกที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200	9.238	31.341	63.906

4.1.2.3 ลักษณะอนุภาค

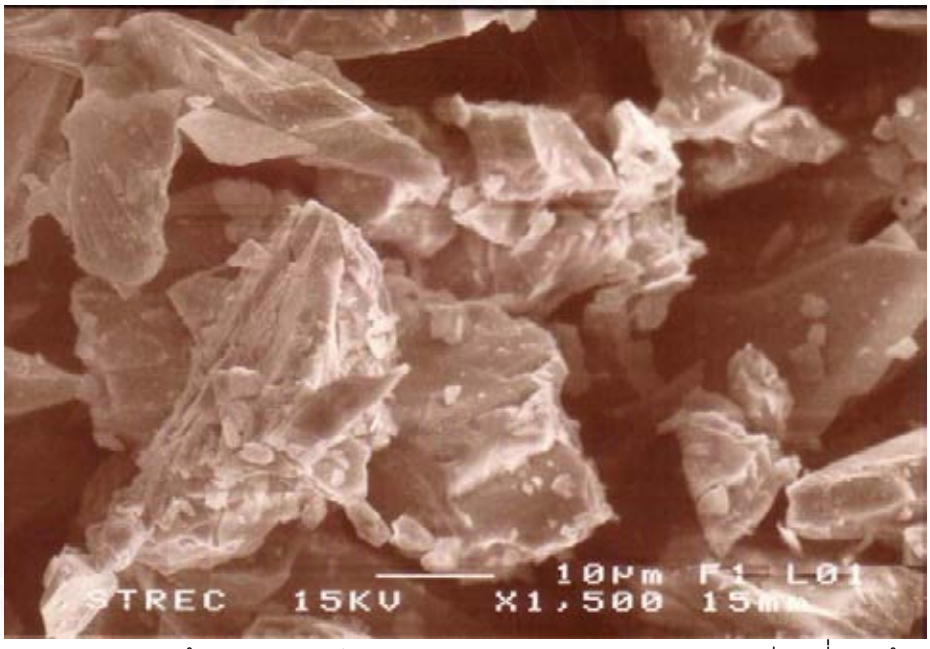
การหาลักษณะอนุภาคสามารถหาได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) เพื่อสังเกตลักษณะอนุภาคของวัสดุโดยรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า รูปที่ 4.5 แสดงลักษณะอนุภาคของตะกรันดีบุกที่ไม่ผ่านการบดที่กำลังขยาย 20 เท่า รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะอนุภาคตะกรันดีบุกที่ผ่านการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์ที่กำลังขยาย 2,500 เท่า



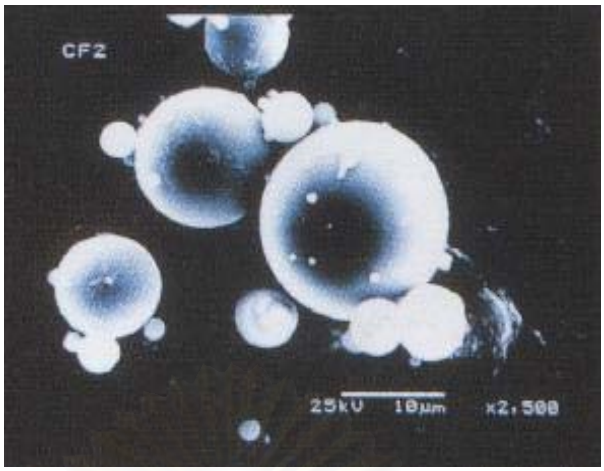
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดของตะกรันดีบุก กำลังขยาย 20 เท่า



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดของตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดของเถ้าลอยลิกไนต์
กำลังขยาย 2,500 เท่า
ที่มา : ทิพยรัตน์ หาญสืบสาย (2544)

จากรูปที่ 4.4 พบว่าลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีลักษณะเป็นก้อนเหลี่ยม ผิวค่อนข้างเรียบ และมีละอองเล็กๆเกาะอยู่โดยรอบ รูปที่ 4.5 อนุภาคของตะกรันดีบุกมีรูปทรงเป็นเหลี่ยมปรากฏโพรงให้เห็นในบางอนุภาค ทั้งนี้ลักษณะอนุภาคตะกรันดีบุกที่เห็นเป็นอนุภาคที่เกิดจากการฉีดน้ำแรงดันสูงเข้าใส่ขณะอุณหภูมิสูง รูปที่ 4.6 อนุภาคของตะกรันดีบุกหลังจากผ่านการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 แล้ว พบว่าอนุภาคมีลักษณะรูปทรงเหลี่ยมมีขนาดทั้งเล็กและใหญ่ปะปนกัน บางอนุภาคมีผิวค่อนข้างเรียบ รูปที่ 4.7 พบว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบซึ่งลักษณะที่เป็นทรงกลมผิวเรียบนี้จะทำให้ความสามารถในการทำงานได้ดี (Workability) เมื่อผสมกับคอนกรีตเนื่องจากอนุภาคจะทำตัวเสมือนตัวหล่อลื่นระหว่างปูนซีเมนต์และวัสดุผสม

4.1.2.4 ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Capacity)

การวิเคราะห์ความสามารถการดูดซึมน้ำ ใช้วิธีการตามมาตรฐาน ASTM C128-93 โดยผลการทดสอบความสามารถการดูดซึมน้ำของตะกรันดีบุกมีค่าประมาณ ร้อยละ 8.8 โดยน้ำหนัก

4.1.2.5 พื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area)

จากการทดสอบพื้นที่ผิวจำเพาะโดยเครื่องหาความซึมอากาศเบลน (Blaine Air Permeability Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C204-96 ของปูนซีเมนต์ ตะกรันดีบุกก่อนทำ

การบด และตะกรันดีบุกที่ทำการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เปรียบเทียบกับเถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 พื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตะกรันดีบุก ตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่ว

ชนิดของตัวอย่าง	พื้นที่ผิวจำเพาะ ($ซม^2$/กรัม)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	3,380
ตะกรันดีบุก	630
ตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200	3,200
เถ้าลอยลิกไนต์	2,370
ตะกรันทองแดง	≈ 3,000
ตะกรันตะกั่ว	≈ 3,000

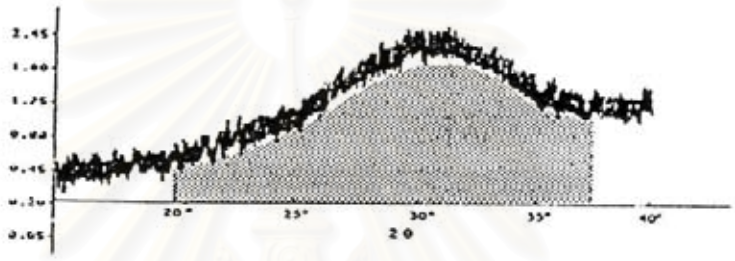
หมายเหตุ 1.ผลการวิเคราะห์เถ้าลอยลิกไนต์เป็นการศึกษาของอุดม หงษ์ประธานพร (2532)
2.ผลการวิเคราะห์ตะกรันทองแดงและตะกรันตะกั่วเป็นการศึกษาของ Douglas และคณะ (1991)

จากตารางที่ 4.4 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการทดสอบมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงที่สุด ซึ่งแสดงว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าพื้นที่ผิวมากกว่าวัสดุทดสอบอื่นเมื่อเทียบกับน้ำหนักวัสดุที่เท่ากัน เมื่อเทียบกับตะกรันดีบุกที่ผ่านการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานความละเอียดของการผลิตปูนซีเมนต์ที่สามารถลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้โดยสะดวก จะเห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าความละเอียดสูงกว่า โดยในปัจจุบันขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีขายตามท้องตลาดจะถูกบดให้มีขนาดเล็กกว่าขนาดของช่องเปิดตะแกรงเบอร์ 200 มาก ทั้งนี้ขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก โดยขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ดี แต่ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กมากจนเกินไปก็จะทำปฏิกิริยากับความชื้นที่มีอยู่ในอากาศทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดการเสื่อมสภาพได้ง่ายก่อนการนำไปใช้งานได้

4.1.2.6 รูปแบบของสารประกอบในวัสดุ

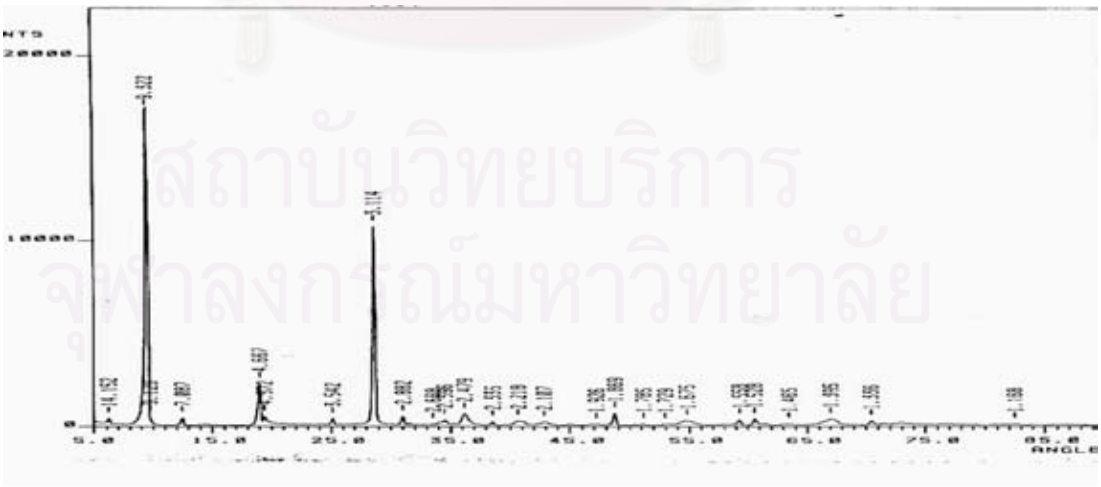
การทดสอบรูปแบบของสารประกอบในวัสดุโดยใช้เครื่อง X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) เพื่อทำการทดสอบว่าวัสดุมีรูปแบบของสารประกอบเป็นแบบอสัณฐาน

(Amorphous Phase) หรือเป็นแบบควอทซ์ (Crystalline Phase) ถ้าวัสดุมีสารประกอบแบบ อสัณฐานผลการวิเคราะห์โดย XRD จะมีลักษณะเป็นเนินไม่มีจุดสูงสุด (Peak) ปริมาณของสารประกอบ อสัณฐานในวัสดุทราบได้จากปริมาณพื้นที่ใต้กราฟ แสดงดังรูปที่ 4.8 ส่วนควอทซ์ผลการวิเคราะห์โดย XRD จะมีลักษณะแหลมสูงมีจุดสูงสุดให้เห็นอย่างชัดเจน แสดงดังรูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบปริมาณของสารประกอบในรูปควอทซ์เทียบได้จากความสูงของกราฟ โดยได้ทำการทดสอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และ ตะกรันดีบุก เปรียบเทียบกับเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งเป็นการศึกษาของ Inthasaro (2002) แสดงดังรูปที่ 4.10 4.11 และ4.12

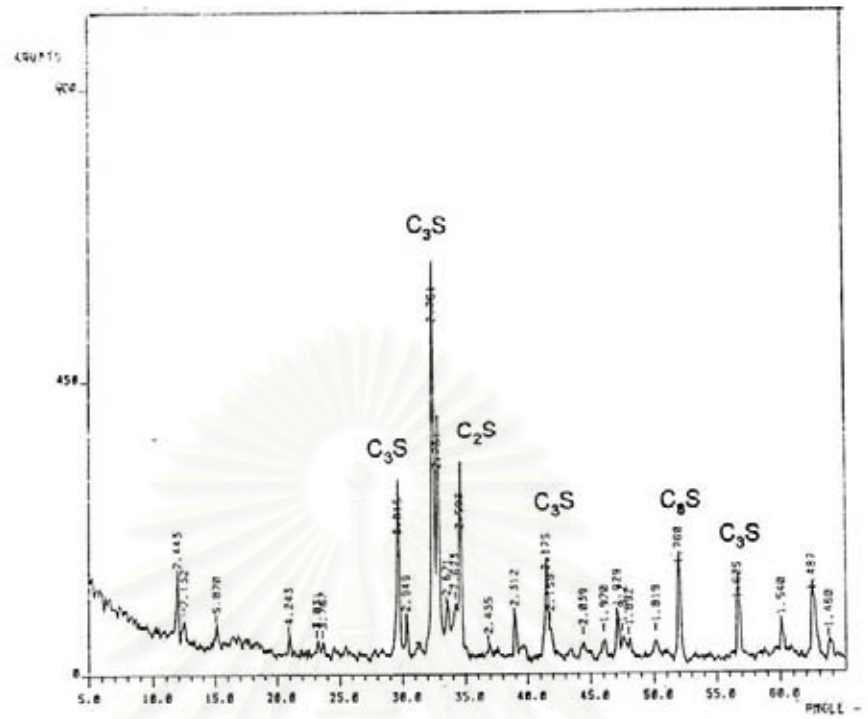


รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของวัสดุที่มีรูปแบบสารประกอบแบบอสัณฐาน

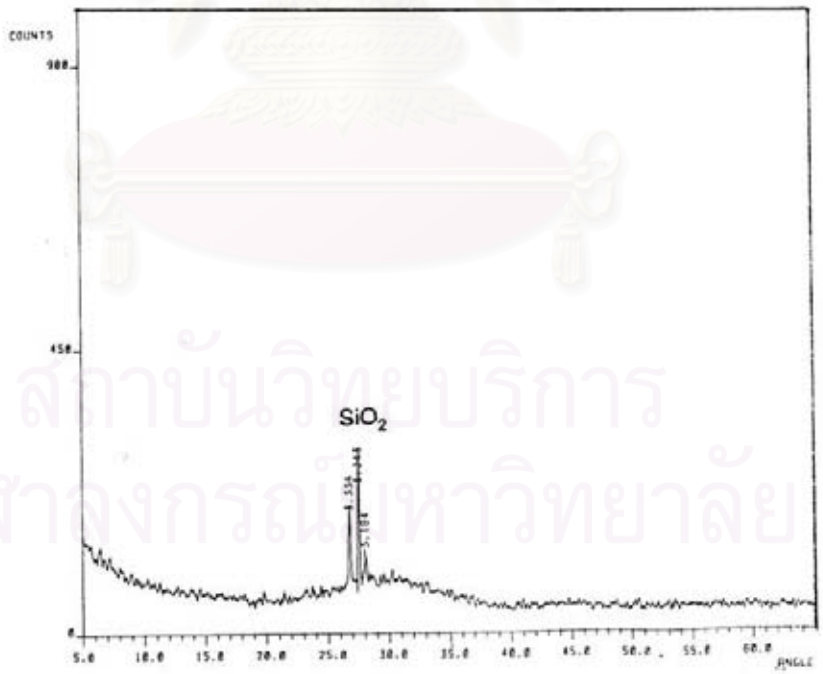
ที่มา : Douglas และคณะ (1991)



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของวัสดุที่มีรูปแบบสารประกอบแบบควอทซ์

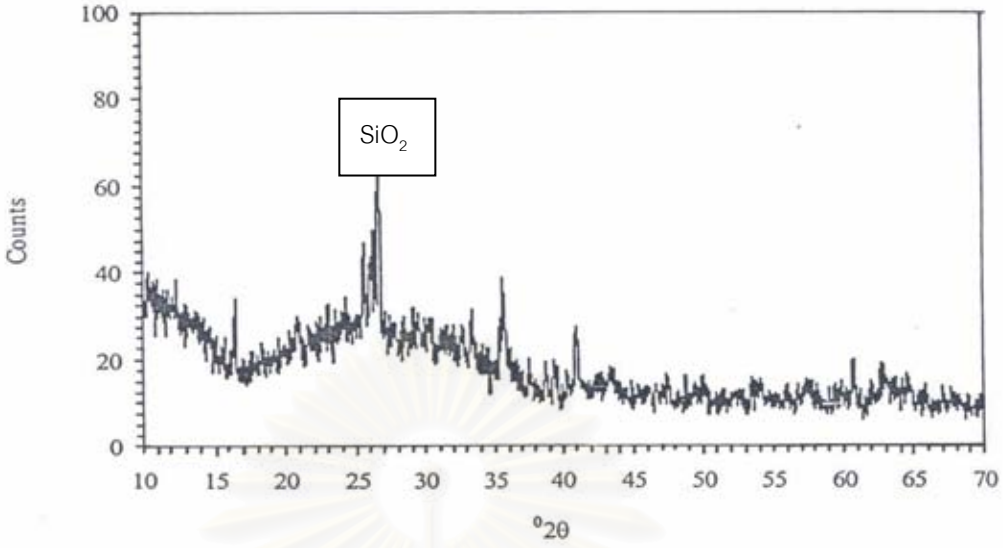


รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของตะกรันดีบุก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของเถ้าลอยลิกไนต์
ที่มา : Inthasaro (2002)

จากการวิเคราะห์โดย XRD ในรูปที่ 4.10 พบว่าสารประกอบที่อยู่ในรูปควอทซ์ (Crystalline Phase) ได้แก่ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) และไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแสดงได้จากกราฟที่มี Peak สูงเด่นชัดขึ้นมาส่วนสารประกอบในรูปของอสัณฐาน (Amorphous Phase) มีปริมาณน้อยสังเกตได้จากขนาดพื้นที่ใต้กราฟ รูปที่ 4.11 พบว่า สารประกอบในตะกรันดีบุกส่วนใหญ่อยู่ในรูปอสัณฐาน และปรากฏ Peak ที่ตำแหน่ง 27° 2θ ซึ่งแสดงว่าเป็นสารประกอบซิลิก้าที่อยู่ในรูปควอทซ์แต่มีปริมาณน้อยมาก เนื่องจาก Peak ที่ปรากฏมีลักษณะไม่สูงและมีปริมาณน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟซึ่งแสดงถึงปริมาณความเป็นอสัณฐานของสารประกอบในตะกรันดีบุกที่มีอยู่มากกว่า สำหรับรูปที่ 4.12 พบว่าการวิเคราะห์โดย XRD ของเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะเช่นเดียวกับตะกรันดีบุกคือมีสารประกอบซิลิกาที่อยู่ในรูปควอทซ์จำนวนไม่มากสามารถตรวจพบได้ในปริมาณน้อย ซึ่งจากการศึกษาในอดีตพบว่าวัสดุที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อแทนที่หรือผสมเพิ่มในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ควรมีสารประกอบหลักจำพวกซิลิกาและอลูมินาอยู่ในรูปผลึกแบบอสัณฐานซึ่งจะทำปฏิกิริยาเคมีได้ดีกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในช่วงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน (Zhang และคณะ,1995) ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้มีการทดลองนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้เป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในอดีตและได้มีการพัฒนาจนสามารถนำมาใช้ในงานก่อสร้างจริงในปัจจุบันได้

4.1.3 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลาย

การทดสอบปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายของตะกรันดีบุกได้จากวิธีสกัดสาร (Leachate Extraction Procedure) ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ.2540) ผลการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำชะละลายของตะกรันดีบุกมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้

ตารางที่ 4.5 ปริมาณโลหะหนักในน้ำชะละลายของตะกรันดีบุก

ชนิดโลหะหนัก	เกณฑ์กำหนด (มก./ล.)	ปริมาณโลหะหนักที่ถูกชะละลายออกมา (มก./ล.)
Ag	< 5.0	< 0.07
As	< 5.0	< 0.07
Ba	< 100.0	0.03
Cd	< 1.0	< 0.04
Cr	< 5.0	0.069
Hg	< 0.2	< 0.005
Pb	< 5.0	< 0.05
Se	< 1.0	< 0.08

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.5 แสดงว่าน้ำชะละลายของตะกรันดีบุกมีปริมาณโลหะหนักไม่เกินค่ามาตรฐานที่กระทรวงอุตสาหกรรมกำหนดไว้

4.2 ดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก

ค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานตาม ASTM C311-85 วัดได้จากการนำวัสดุที่ต้องการทดสอบคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เพื่อให้มีอนุภาคน้อยกว่า 75 ไมโครเมตร เทียบเท่ากับขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อใช้เป็นวัสดุผสมในซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยทำการแทนที่ ร้อยละ 35 โดยปริมาตรเพื่อทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน โดยสัดส่วนน้ำที่ใช้ในการผสมหาได้จาก ASTM C230-83 ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

อัตราส่วนตะกรันดีบุก : ปูนซีเมนต์ โดยปริมาตร	ค่ากำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (กก./ซม.^{2})
0 : 100	312
35 : 65	243

จากผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมตะกรันดีบุกต่อมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าร้อยละ 78.2 ซึ่งมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่จะต้องมีค่ามากกว่าร้อยละ 75 ดังนั้นตะกรันดีบุกจึงจัดอยู่ในวัสดุผสมซีเมนต์ชั้นคุณภาพ C ตามมาตรฐาน ASTM C618-96 โดยได้แสดงค่าเปรียบเทียบตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่วกับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพวัสดุผสมในซีเมนต์ ASTM C618-96 ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าต่างๆของตะกรันดีบุก เถ้าลอยลิกไนต์ ตะกรันทองแดง และตะกรันตะกั่วกับมาตรฐานการแบ่งชั้นคุณภาพของวัสดุผสมในซีเมนต์ (ASTM C618-96)

คุณสมบัติ		ชั้นคุณภาพ			ตะกรันดีบุก	เถ้าลอยลิกไนต์	ตะกรันทองแดง	ตะกรันตะกั่ว
		N	F	C				
$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	%ต่ำสุด	70	70	50	62.03	78.27	93.94	66.11
SO_3	%สูงสุด	4	5	5	0.15	2.35	-	1.30
ปริมาณความชื้น	%สูงสุด	3	3	3	1.8	-	-	-
LOI	%สูงสุด	10	6	6	0.0	-	-	-
Pozzolanic Index	%ต่ำสุด	75	75	75	77.9	89.2	71.3	78.2

หมายเหตุ 1.ผลการวิเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นการศึกษาของ อุดม หงษ์ประธานพร (2532)

2.ผลการวิเคราะห์ตะกรันทองแดงและตะกรันตะกั่วเป็นการศึกษาของ E. Douglas และคณะ (1991)

3.” – “ คือ ไม่มีข้อมูลในงานวิจัย

จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าตะกรันดีบุกจัดอยู่ในวัสดุผสมซีเมนต์ชั้นคุณภาพ C ซึ่งวัสดุผสมซีเมนต์ชั้นคุณภาพดังกล่าวมักเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) ซึ่งเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการทางความร้อน เช่น เถ้าที่เกิดจากการเผาไหม้ถ่านหิน การเผาวัตถุดิบพวกดินเหนียวหรือหินเชล (Shale) และกากตะกอนที่เหลือจากการหลอมโลหะ (Slag) ส่วนชั้นคุณภาพ F มักเป็นวัสดุปอซโซลานสังเคราะห์เช่นกัน แต่มีคุณภาพที่ดีกว่าเนื่องจากมีปริมาณ ซิลิกา อลูมินา และเหล็กที่มากกว่าซึ่งมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่า สำหรับชั้นคุณภาพ N มักพบในวัสดุปอซโซลานที่เกิดจากธรรมชาติ (Natural Pozzolans) เช่นเถ้าที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟและหินพรุน (Pumicite) เป็นต้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตัวอย่างต่างๆพบว่าเกือบทุกตัวอย่างมีค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานมากกว่า ร้อยละ 75 ยกเว้น ตะกรันทองแดง แม้ว่าปริมาณรวมของซิลิกา อลูมินา และเหล็กจะมีค่าสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะค่าออกไซด์เหล็กที่มีปริมาณมากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักทำให้ปริมาณรวมมีค่าสูงแต่เนื่องจากออกไซด์เหล็กที่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เกิดเป็นสารประกอบเตตราแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดต่ำ

4.3 สมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแทนที่ด้วยตะกรันดีบุกบางส่วน

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแทนที่ด้วยตะกรันดีบุกบางส่วน โดยทำการศึกษาผลของขนาดตะกรันดีบุกที่มีต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ การศึกษาอัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ อัตราส่วนน้ำต่อตะกรันดีบุกที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ การศึกษาผลของระยะเวลาบ่มที่มีต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน และการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันดีบุก และมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก

4.3.1 <u>ผลของขนาดตะกรันดีบุกที่มีต่อกำลังรับแรงอัด</u>

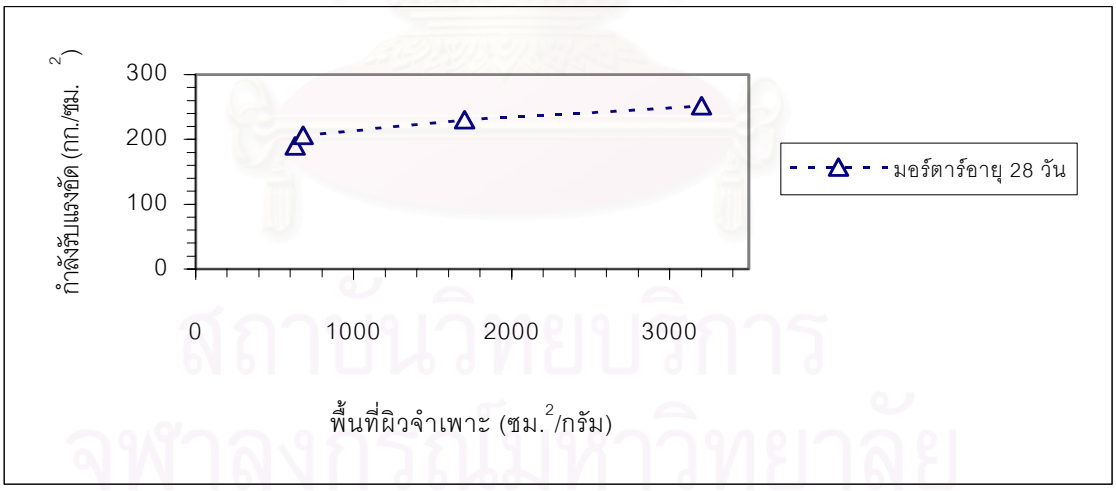
ขนาดตะกรันดีบุกที่นำมาใช้ในการวิจัยมีด้วยกัน 4 ขนาด คือ ตะกรันดีบุกที่ไม่ผ่านการบดซึ่งเป็นตะกรันดีบุกที่ไหลออกมาจากรูเจาะของเตาถลุงแล้วทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็วด้วยการฉีดน้ำแรงดันสูงทำให้มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ (Granular) ตะกรันดีบุกที่บดแล้วผ่านตะแกรงเบอร์ 50 ค้างเบอร์ 100 (Slag #50) ตะกรันดีบุกที่บดแล้วผ่านตะแกรงเบอร์ 100 ค้างเบอร์ 200 (Slag #100) และตะกรันดีบุกที่บดแล้วผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (Slag #200) โดยเลือกอัตราส่วนตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.5 เป็นตัวแทน

ในการศึกษาผลของขนาดตะกรันดีบุกต่อกำลังรับแรงอัดในมอร์ตาร์ ผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (ซม.^{2}/กรัม)	ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (กก./ซม.^{2})
Slag	630	190
Slag #50	680	206
Slag #100	1,500	230
Slag #200	3,200	252

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความละเอียดของตะกรันดีบุกมีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ โดยอนุภาคของตะกรันดีบุกที่ละเอียดมากจะมีผลทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยผ่านมาในอดีตที่อนุภาคขนาดเล็กให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ดีกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า (Sakai และคณะ, 1992) ดังนั้นขนาดตะกรันดีบุกที่จะใช้ในการทดลองต่อไปจะเป็นขนาดตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าความละเอียดของอนุภาคต่อค่ากำลังรับแรงอัดแสดงดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความละเอียดของอนุภาคต่อกำลังรับแรงอัด

เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จากตารางที่ 4.5 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,380 ตร.ซม. จะเห็นได้ว่ามีขนาดเล็กกว่าตะกรันที่ผ่านการบดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้มีการพัฒนาคุณสมบัติมาเป็นระยะเวลานาน ซึ่งขนาดอนุภาคก็เป็นส่วนหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับน้ำและวัสดุผสมเพิ่ม (Additive)

นอกจากองค์ประกอบสารเคมีในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนั้นแม้ว่าตามมาตรฐาน มอก.15 ซึ่งว่าด้วยมาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะกำหนดให้อนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องมีขนาดละเอียดมากกว่า 2,800 ตร.ซม./กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคตะกรันดีบุกที่บดแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 มีค่าความละเอียดของอนุภาคที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งนี้ถ้าต้องการให้อนุภาคตะกรันดีบุกมีขนาดเล็กเท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อาจต้องใช้เวลาและรอบในการบดมากกว่าเดิม โดยในการวิจัยนี้เพื่อให้ได้อนุภาคตะกรันดีบุกที่สามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 ได้จะต้องบดด้วยเครื่อง Roll Crusher 2 รอบ ใช้เวลา 10 นาที ต่อตะกรันดีบุก 15 กก. คิดเป็นอัตราการผลิต 90 กก./ชม.

4.3.2 <u>อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันดีบุกและอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุก</u>

การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาผลของการนำตะกรันดีบุกเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานซึ่งหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมตะกรันดีบุกที่เหมาะสม โดยในการศึกษานี้ใช้ขนาดตะกรันดีบุกที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เนื่องจากหัวข้อ 4.3.1 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงเบอร์ 200 เมื่อผสมในมอร์ตาร์ให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าขนาดอื่น ผลการศึกษาดังตารางที่ 4.10 และ 4.11 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันดีบุก ที่ร้อยละ 0 10 20 30 40 และ50 โดยน้ำหนักโดยมีระยะเวลาบ่ม 7และ28 วัน

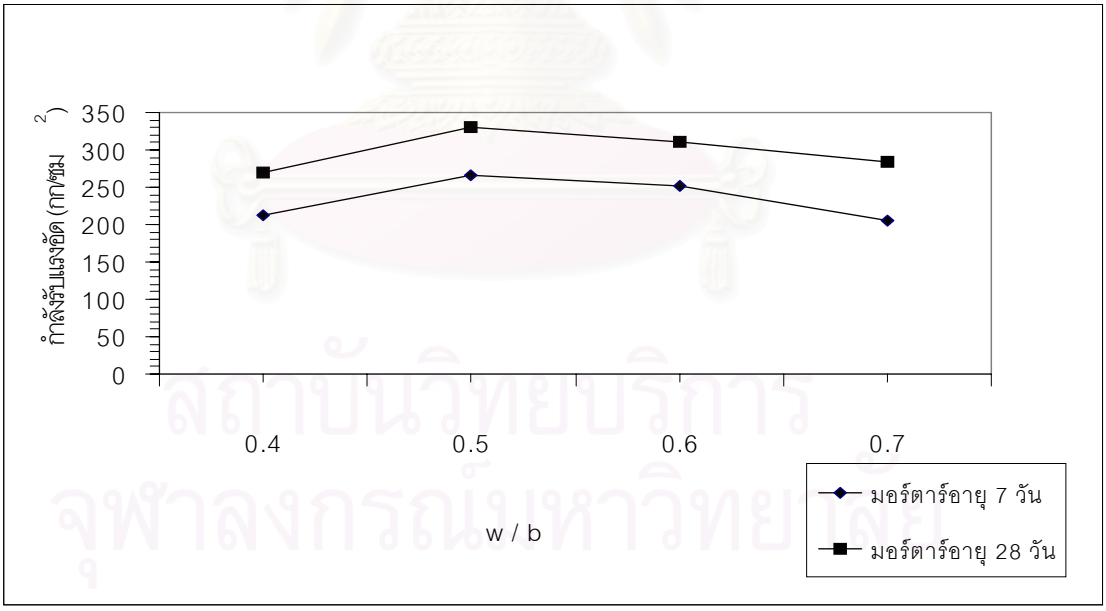
ตารางที่ 4.9 กำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W / (C+Slag)]	กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (กก./ซม.^{2})					
	อัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก [Slag:C]					
	0:100	10:90	20:80	30:70	40:60	50:50
0.4	212	178	151	131	90	75
0.5	266	254	228	180	122	97
0.6	251	218	204	164	135	109
0.7	230	201	161	130	107	83

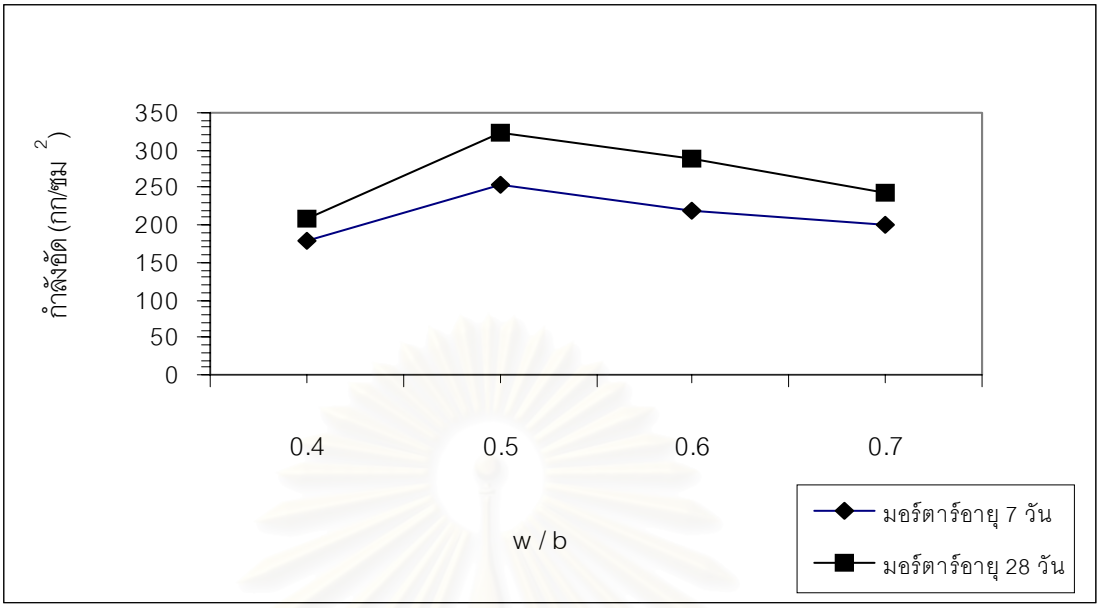
ตารางที่ 4.10 กำลังรับแรงอัดที่อัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน [W / (C+Slag)]	ค่ากำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (กก./ซม.^{2})					
	อัตราส่วนตะกรันดีบุกต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก					
	0:100	10:90	20:80	30:70	40:60	50:50
0.4	270	209	173	147	111	97
0.5	331	324	295	251	152	121
0.6	311	288	271	211	159	129
0.7	284	243	205	150	133	101

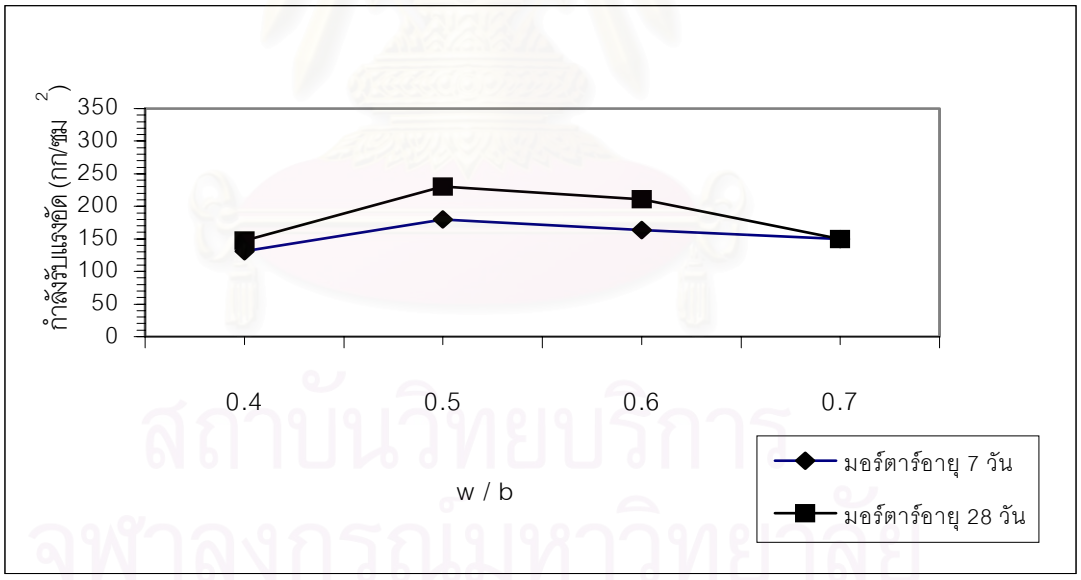
จากตารางที่ 4.9และ4.10 สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันดีบุก ที่ร้อยละ 0 10 20 30 40 และ50 โดยน้ำหนักโดยมีระยะเวลาการบ่ม 7และ28 วัน ดังรูปที่ 4.14 4.15 4.16 4.17 4.18 และ 4.19



รูปที่ 4.14 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

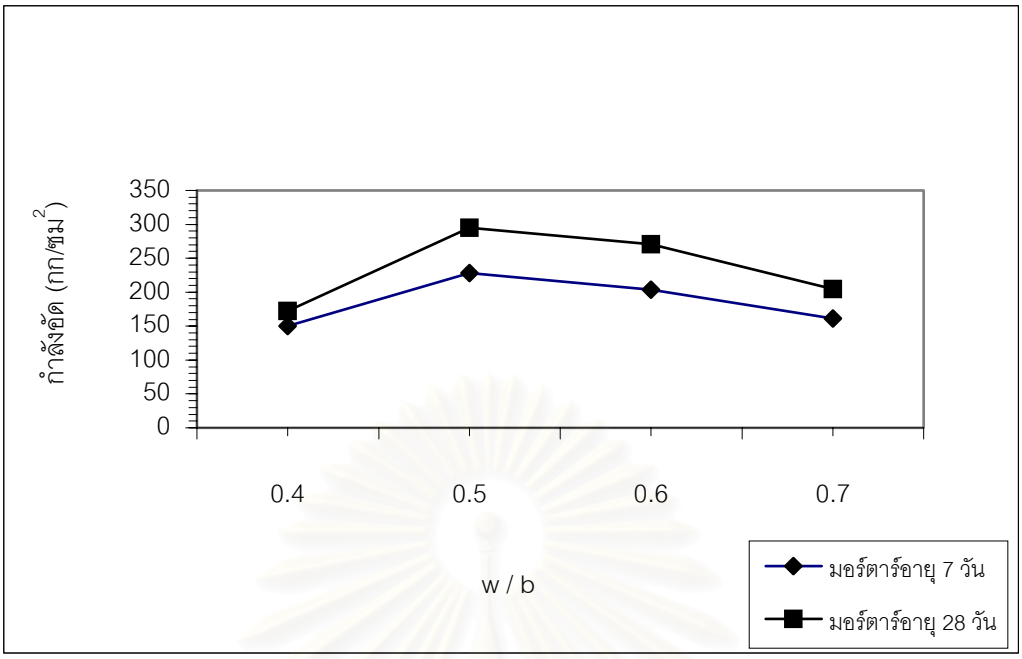


รูปที่ 4.15 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ10 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

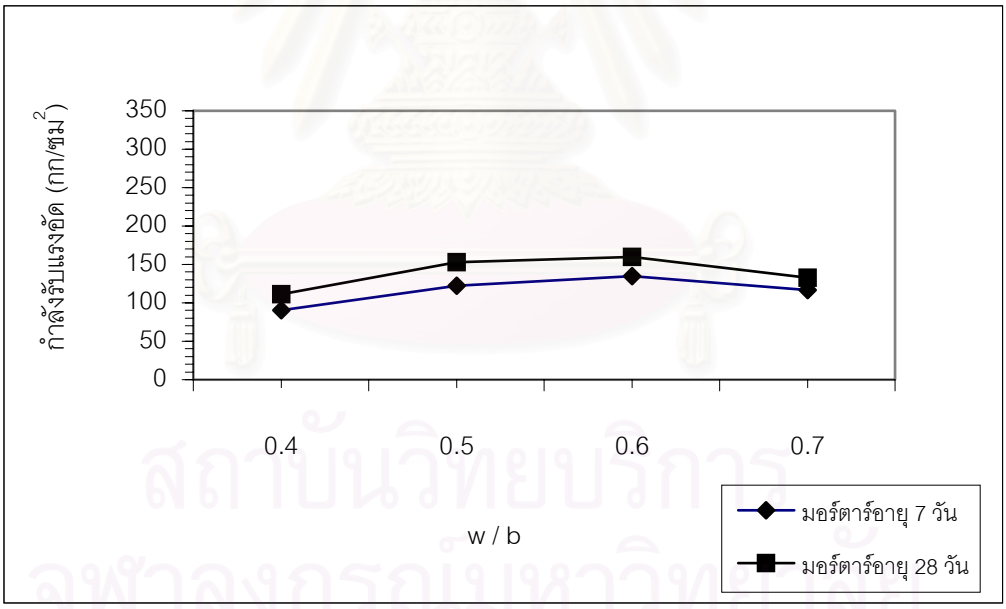


รูปที่ 4.16 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ20 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

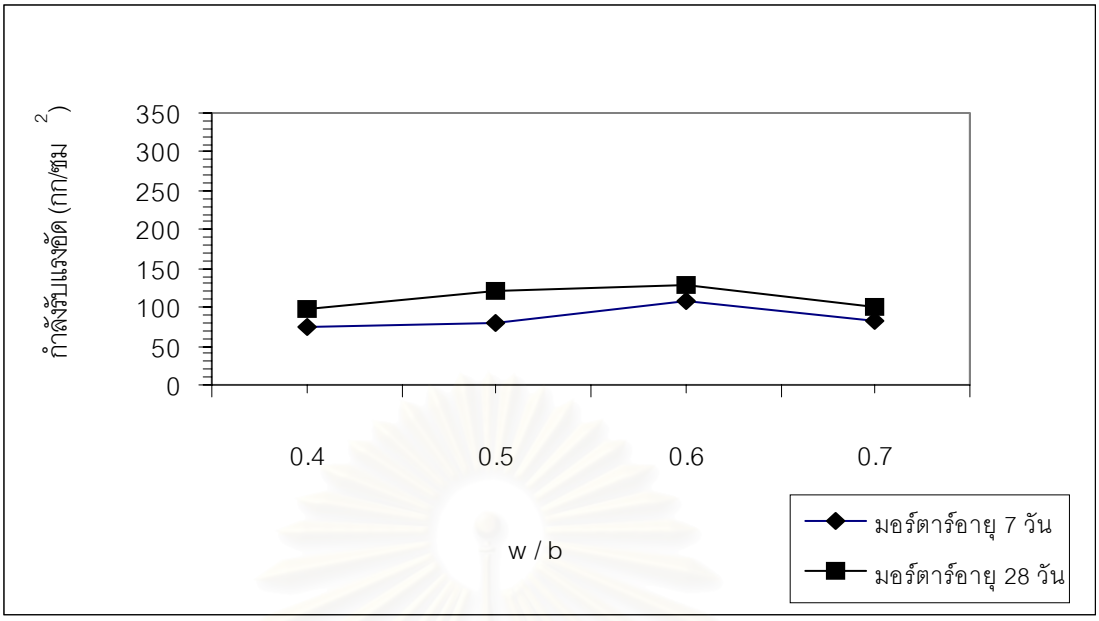
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ



รูปที่ 4.18 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ



รูปที่ 4.19 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่างๆ

จากรูปที่ 4.14 4.15 4.16 และ4.17 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน มอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ10 20 และ30 โดยน้ำหนัก ส่วนรูปที่ 4.18 และ 4.19 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.6 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดสำหรับมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ตะกรันดีบุกในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาเพื่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์จะมีเพิ่มขึ้นทั้งนี้อาจเนื่องจากตะกรันดีบุกมีรูปร่างเป็นเหลี่ยม (Irregular) ซึ่งเป็นรูปร่างที่ทำให้มีความต้องการน้ำมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์หรือเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีลักษณะกลม และความสามารถในการดูดซึมน้ำของตะกรันดีบุก (Water Absorption Capacity) ที่มีประมาณร้อยละ 8.8 โดยน้ำหนัก จากหัวข้อ 4.1.2.4 ความสามารถการดูดซึมน้ำ

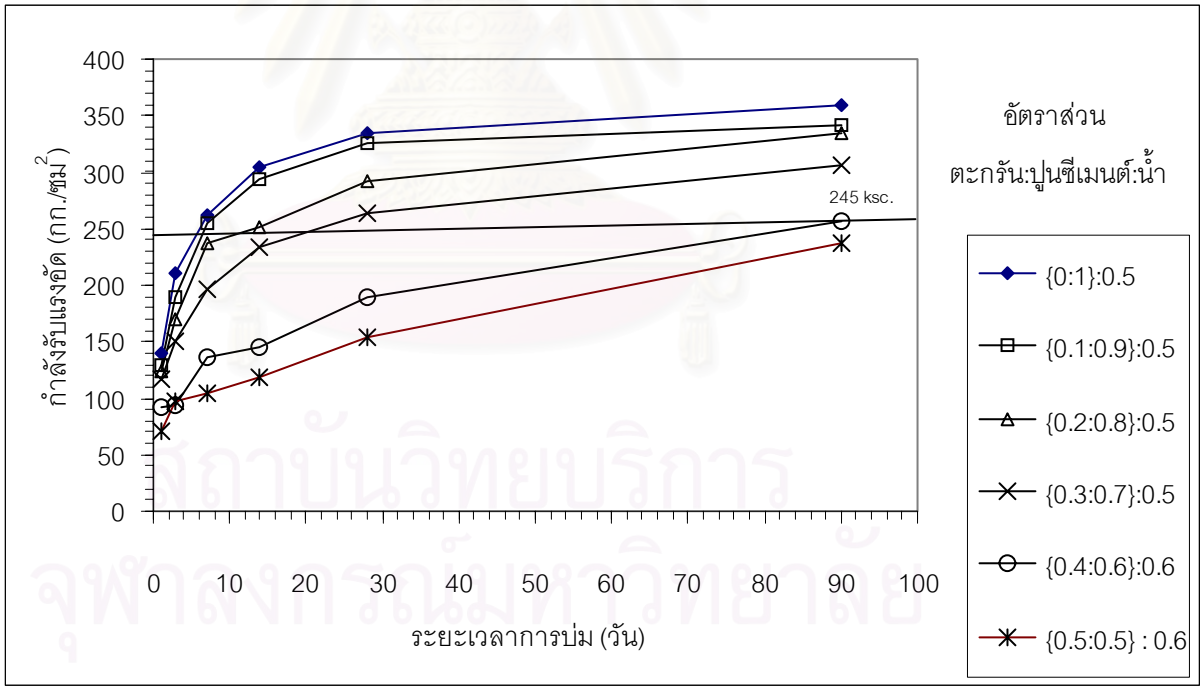
4.3.4 <u>ผลของระยะเวลาการบ่มต่อค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์</u>

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันดีบุก โดยอัตราส่วนที่ใช้ในการศึกษาได้จากการทดลองที่ผ่านมาที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในแต่ละร้อยละการแทนที่ตะกรันดีบุกในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.11 และ รูปที่ 4.21 แสดงมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 0 ถึง 50 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 4.11 กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาการบ่มต่างๆ

อัตราส่วนผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} : น้ำ	กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม (กก./ซม.^{2})					
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	90 วัน
{0:1} : 0.5	140	211	262	305	334	359
{0.1:0.9} : 0.5	130	189	254	294	326	346
{0.2:0.8} : 0.5	125	170	237	252	292	335
{0.3:0.7} : 0.5	118	150	186	203	265	306
{0.4:0.6} : 0.6	92	108	137	150	198	246
{0.5:0.5} : 0.6	71	87	110	118	148	238

จากตารางที่ 4.11 สามารแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์กับระยะเวลาบ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สัดส่วนตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0 10 20 30 40 และ50 โดยน้ำหนักดังรูปที่ 4.20

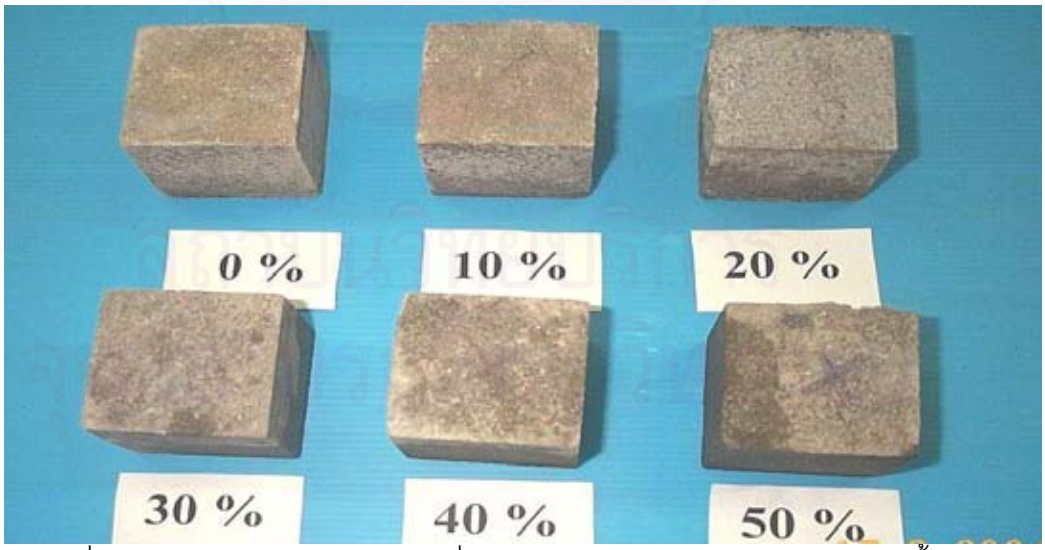


รูปที่ 4.20 กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากตารางที่ 4.11และรูปที่ 4.20 พบว่าค่ากำลังรับแรงอัดจะลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันดีบุกเมื่อนำไปเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ใน มอก.15 ซึ่งกำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ต้องมีค่ามากกว่า 245 กก./ซม.^{2} ที่

ระยะเวลาบ่ม 28 วัน จะเห็นได้ว่าที่อัตราส่วนตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 0 10 20 และ30 โดยน้ำหนักมีค่ามากกว่าเกณฑ์มาตรฐาน ทั้งนี้จุดประสงค์การทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์เป็นการทดสอบเพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ว่ามีคุณภาพสามารถใช้ในงานคอนกรีตได้หรือไม่ ดังนั้นในการนำตะกรันดีบุกไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนสามารถแทนที่ได้ถึงร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

จากผลการศึกษาความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุกในหัวข้อ 4.2 แสดงให้เห็นว่าตะกรันดีบุกจัดอยู่ในมาตรฐานวัสดุผสมซีเมนต์คุณภาพชั้น C ผลรวมปริมาณซิลิกา อลูมินา และเหล็กมีค่า ร้อยละ 62.03 โดยน้ำหนัก โดยมีซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ร้อยละ 35.43 9.69 และ 17.43 โดยน้ำหนักตามลำดับ ถ้าซิลิกา อลูมินา และเหล็กทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรท (CAH) ปฏิกิริยาดังกล่าวคือ ปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งโดยทั่วไปปฏิกิริยาปอซโซลานมักเกิดที่ระยะเวลาบ่มหลัง 28 วัน เมื่อสังเกตลักษณะความชันของกราฟในรูปที่ 4.20 พบว่าการเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงอัดในช่วงระยะเวลาบ่ม 28 ถึง 90 วัน ที่ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 40 และ50 โดยน้ำหนัก มากกว่า ร้อยละ 0 10 20 และ30 โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอาจเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำปฏิกิริยากับซิลิกาในตะกรันดีบุก ซึ่งเราสามารถตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานดังกล่าวได้จากการพัฒนากำลังรับแรงอัดโดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ควรมีค่าลดลงเนื่องจากมีการนำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไปใช้



รูปที่ 4.21 มอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละต่างๆโดยน้ำหนัก

4.3.5 <u>การเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันดีบุกกับมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก</u>

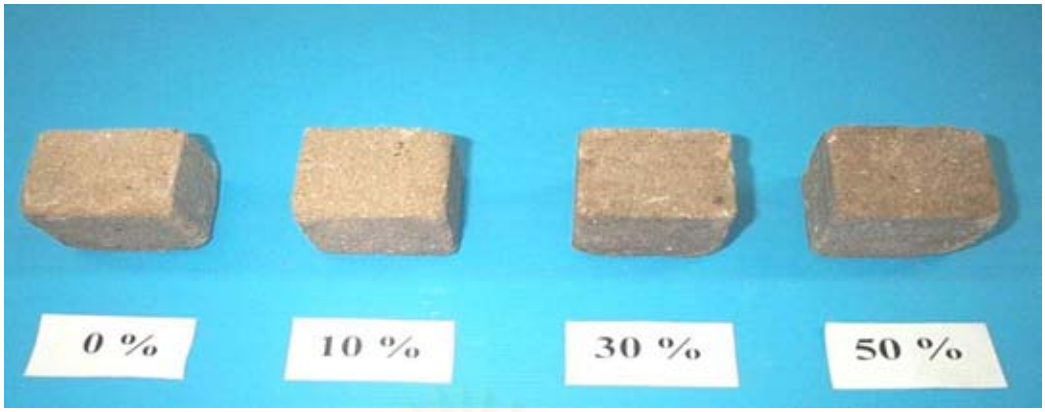
เป็นการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ผสมตะกรันดีบุกซึ่งคาดว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและปฏิกิริยาปอซโซลานกับมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุกซึ่งคาดว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาวทำปฏิกิริยากับซิลิกาของตะกรันดีบุกโดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุกแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนขาวผสมตะกรันดีบุก

อัตราส่วนผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} : น้ำ	กำลังรับแรงอัดที่ระยะเวลาบ่ม (กก./ซม.^{2})					
	1 วัน	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	90 วัน
{0:1} : 0.5	- -	- -	- -	57	65	98
{0.1:0.9} : 0.5	- -	- -	- -	45	49	73
{0.3:0.7} : 0.5	- -	- -	- -	- -	38	61
{0.5:0.5} : 0.5	- -	- -	- -	- -	32	49

หมายเหตุ 1. “ - - “ คือ ไม่สามารถอ่านค่ากำลังรับแรงอัดได้เนื่องจากมอร์ตาร์ก่อตัวไม่แข็งพอที่จะอ่านค่ากำลังรับแรงอัดได้

จากตารางที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนขาวเป็นไปอย่างช้ามากและมีค่ากำลังรับแรงอัดน้อยมากเนื่องจากปริมาณซิลิกาในตะกรันดีบุกจากตารางที่ 4.1 มีร้อยละ 34.91 โดยน้ำหนัก ดังนั้นโอกาสที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปูนขาวทำปฏิกิริยากับซิลิกาจึงมีโอกาสน้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนักของปูนขาว อีกทั้งปริมาณปูนขาวที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับซิลิกาทำให้เกิดปรากฏการณ์ Free Lime ซึ่งจะเกิดขึ้นใน 2 กรณี คือ เมื่อมีปูนขาวมากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ ซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ได้หมด และเมื่อปริมาณปูนขาวมีไม่มากแต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆไม่สมบูรณ์ส่งผลให้การก่อตัวไม่แข็งแรง (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2539)

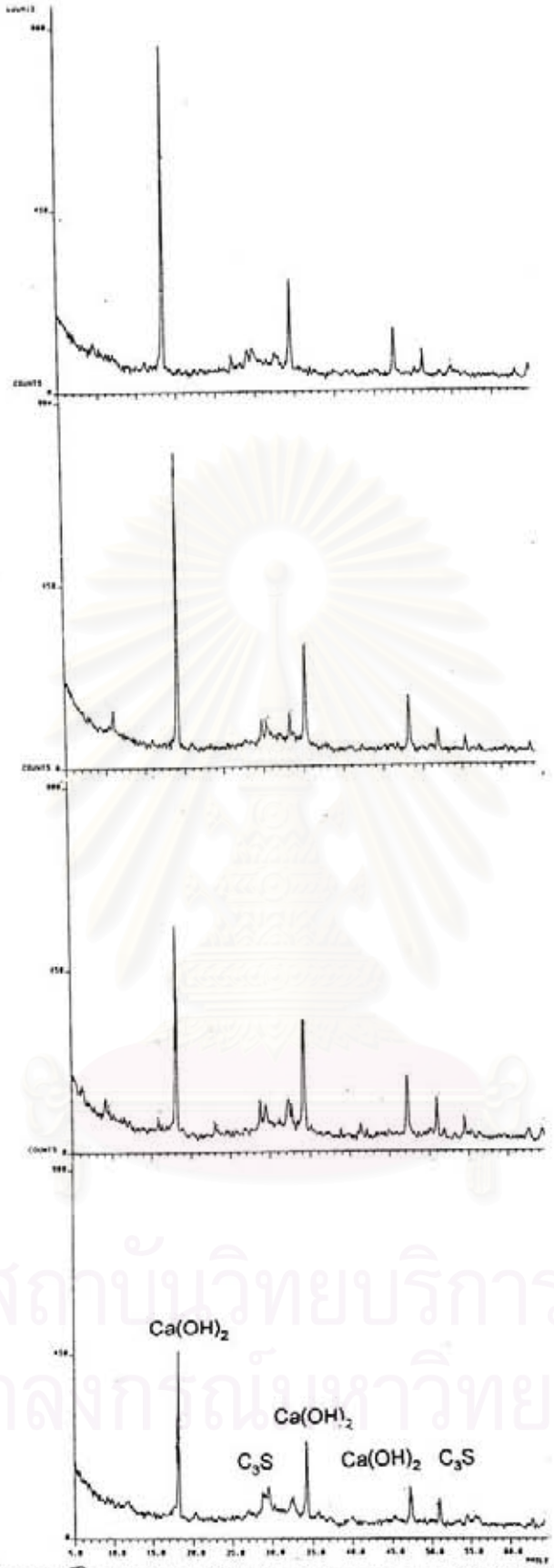


รูปที่ 4.22 มอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนขาว

4.4 การศึกษาการพัฒนากำลังรับแรงอัดโดยใช้ X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD)

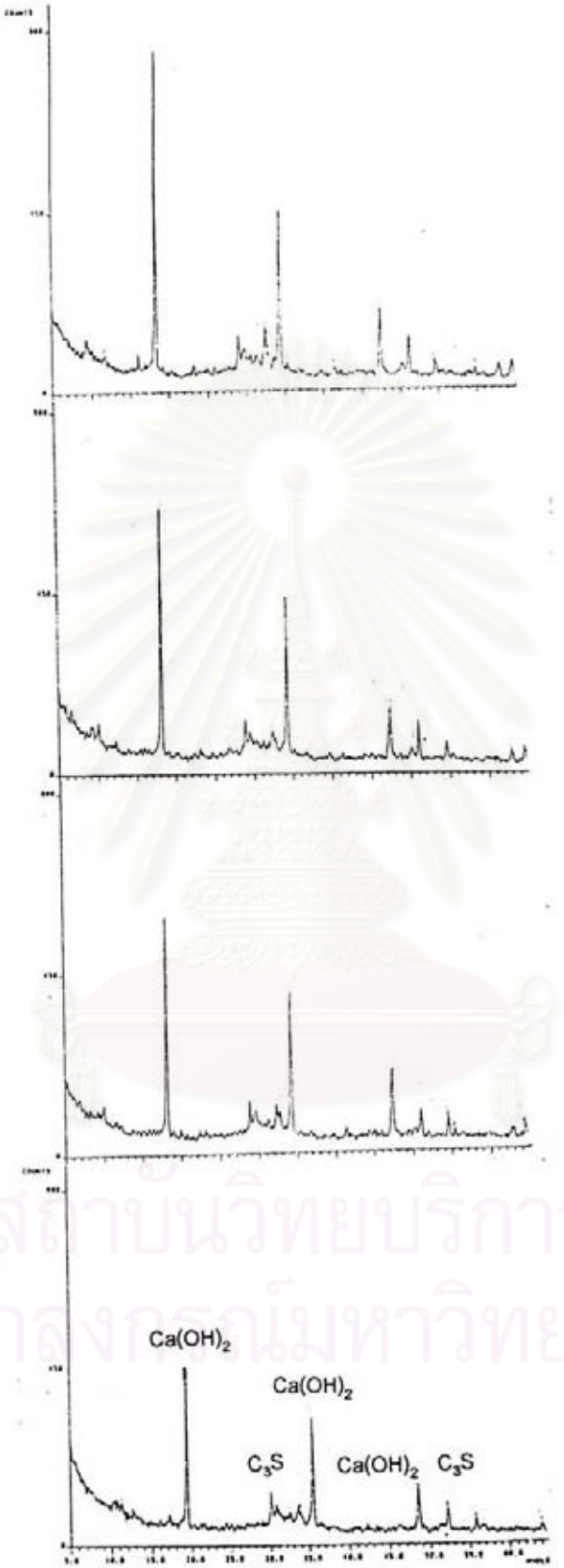
ในการทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และวัสดุปอซโซลานสามารถทำการศึกษาโดยใช้ XRD เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่น (Hydration Reaction) และปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) โดยปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดสารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และสารประกอบแคลเซียมอลูมิเนทไฮเดรต (CAH) ซึ่งปฏิกิริยาทั้งสองมักไม่เกิดขึ้นโดยแยกอิสระดังนั้นสารประกอบต่างๆที่อยู่ในตะกรันดีบุกอาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการสร้างผลึกในปฏิกิริยาไฮเดรชั่น นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานยังขึ้นอยู่กับไอออนของแคลเซียม ความเป็นด่าง ซิลิเกต และอลูมิเนต เนื่องจากเรื่องเหล่านี้เป็นเรื่องที่ซับซ้อน การศึกษาการเกิดปฏิกิริยาของตะกรันดีบุกกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดย XRD จึงถูกนำมาใช้เพื่อให้เข้าใจถึงปรากฏการที่เกิดขึ้น

รูปที่ 4.20 ถึง 4.24 แสดงผล XRD ของสารประกอบซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 0 10 30 และ50 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 3 7 28 และ90 วัน โดยใช้สัดส่วนผสมจากตารางที่ 4.11 คืออัตราส่วนผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์} : น้ำ เท่ากับ 1:0.5 {0.1:0.9} : 0.5 {0.3:0.7} : 0.5 และ{0.5:0.5} : 0.6 จากรูปที่แสดงจะเห็นได้ว่าสารประกอบหลักที่พบ ได้แก่ สารประกอบไตรแคลเซียมซิลเกต (C_3S) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) สำหรับไตรแคลเซียมซิลิเกต มีค่า Diffraction Peak ที่สังเกตได้ชัดเจนที่ 29.48° และ 50.84° ส่วนแคลเซียมไฮดรอกไซด์ มีค่า Diffraction Peak ที่สังเกตได้ชัดเจนที่ 18.12° และ 34.16° สำหรับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรท (CSH) และแคลเซียมอลูมิเนต (CAH) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นไม่พบ Diffraction Peak เนื่องจาก อยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งจะไม่แสดง Diffraction Peak



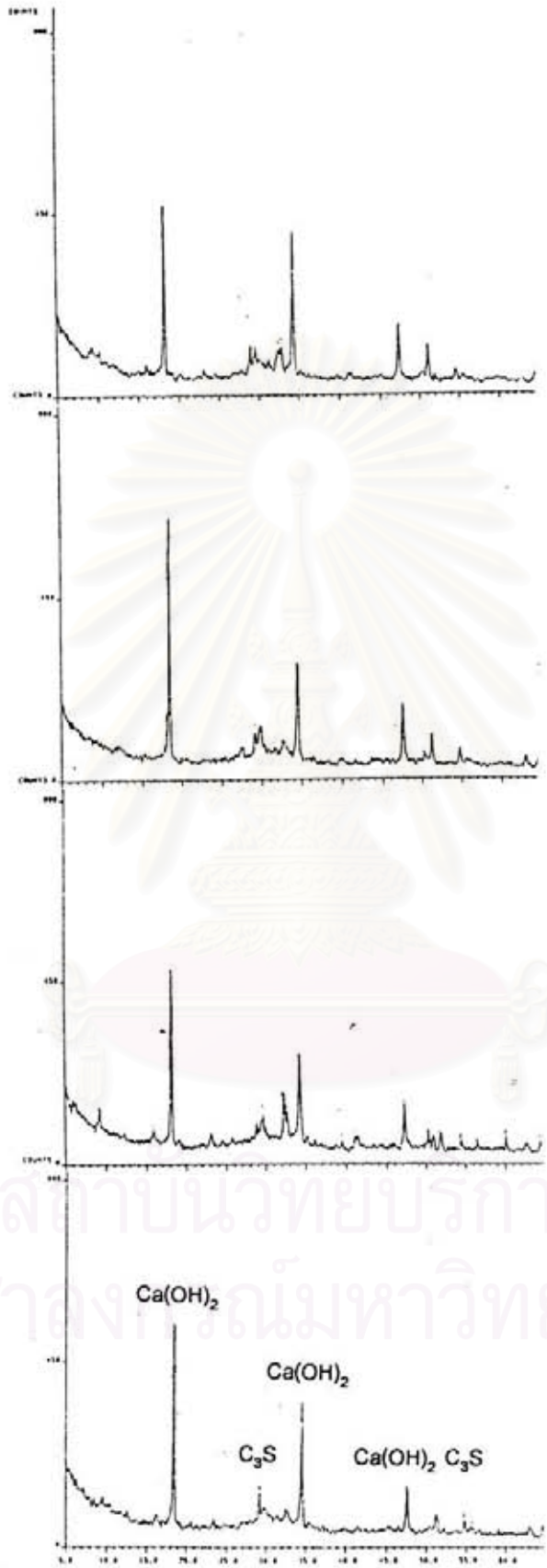
รูปที่ 4.23 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ธรรมดาที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



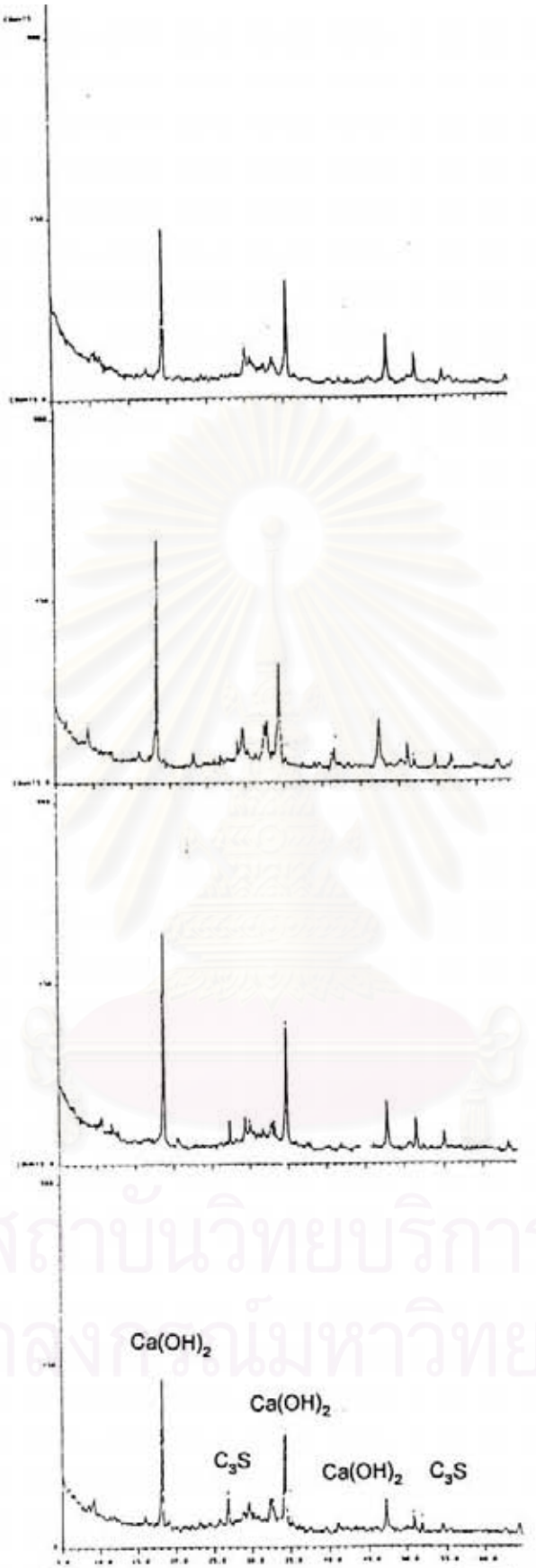
รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



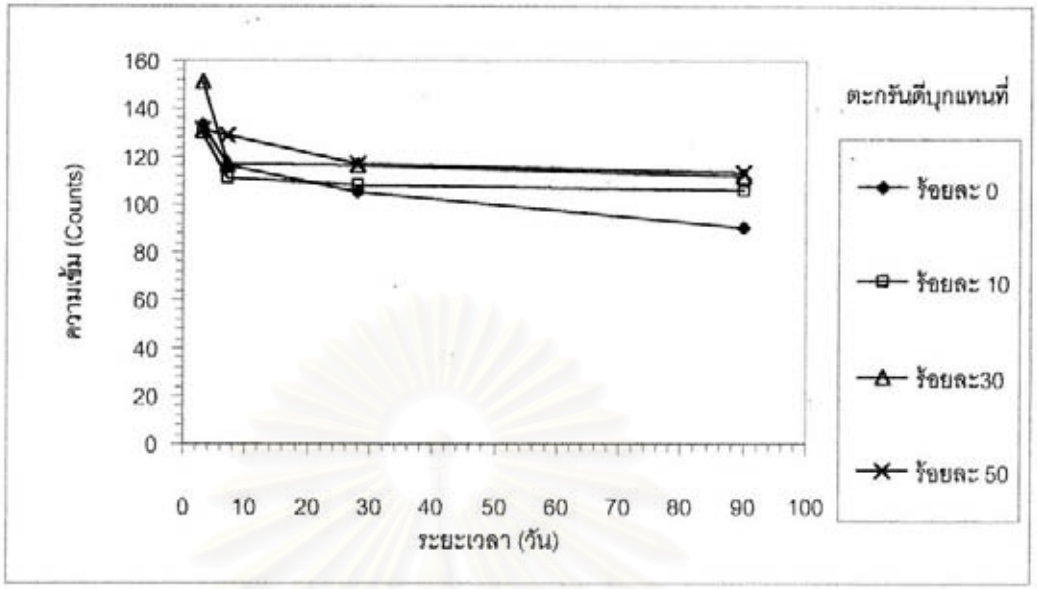
รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

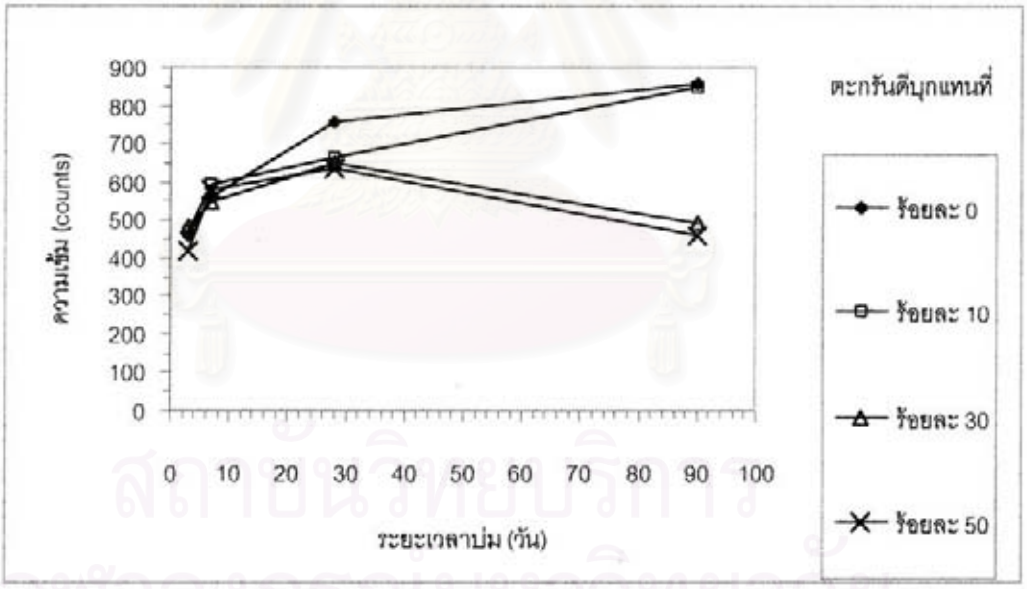


รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพลท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักที่ระยะเวลาบ่มต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 ความเข้มของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ของซีเมนต์เพสท์ที่ส่วนผสมต่างๆตามระยะเวลาบ่ม



รูปที่ 4.28 ความเข้มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ของซีเมนต์เพสท์ที่ส่วนผสมต่างๆตามระยะเวลาบ่ม

จากรูปที่ 4.27 พบว่าปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น นั่นแสดงว่ามีการนำไตรแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ไปใช้ โดยซีเมนต์เพสท์ธรรมดามีการใช้ปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตมากกว่าซีเมนต์เพสท์ผสมตะกรันดีบุกทุกร้อยละการแทนที่เมื่อระยะเวลาผ่านบ่มเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.28 พบว่าซีเมนต์เพสท์ธรรมดาและซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ส่วนซีเมนต์เพสท์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 และ50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งระยะเวลาบ่มหลัง 28 วันที่ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยซิลิกาในตะกรันดีบุกทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งสนับสนุนการศึกษาผลของดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลาน ในหัวข้อ 4.2 และผลของระยะเวลาต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดในหัวข้อ 4.3.4 ที่ค่าความชันของกราฟในช่วงระยะเวลาบ่ม 28 ถึง 90 วัน มอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ถึง 50 โดยน้ำหนัก มีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0 ถึง 20 โดยน้ำหนัก

4.5 การนำไปใช้ประโยชน์และการประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

4.5.1 <u>การนำไปใช้ประโยชน์ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น</u>

จากการทดสอบคุณสมบัติกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในหัวข้อ 4.3.4 พบว่าร้อยละการแทนที่ของตะกรันดีบุก 10 ถึง 30 โดยน้ำหนักให้ค่ากำลังรับแรงอัด มากกว่า 245 กก/ซม^2 ตามมาตรฐาน มอก.15 ซึ่งเป็นการทดสอบกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ว่ามีคุณสมบัติในการรับน้ำหนักได้หรือไม่ ดังนั้นการนำตะกรันดีบุกไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริชขนาด 11.25X22X6 เซนติเมตร จึงเลือกปริมาณการแทนที่ของตะกรันดีบุกร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และใช้อัตราส่วน วัสดุประสาน : ทราย : หินเกล็ด : น้ำ เท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 : 0.5 ศึกษาโดย หฤษฎ์ ธิตินันท์, 2546 โดยสัดส่วนดังกล่าวจะให้ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วน 1:1:1:0.5 1:0.8:1.2:0.5 1:2:3:0.5 1:3:5:0.5 1:4:6:0.5 และ 1:4:7:0.5

ตารางที่ 4.13 กำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช

อัตราส่วน ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ค่ากำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2}) ที่ระยะเวลาบ่ม		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
30 : 70	384	416	472

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ระยะเวลาบ่ม 7 วันมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรม คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น (มอก.827) ที่กำหนดให้ค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่า 40 เมกะปาสคาล หรือ 407 กก./ซม.^{2} ที่ระยะเวลาบ่มไม่น้อยกว่า 7 วัน แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่ม 14 วัน สามารถผ่านมาตรฐานได้โดยมีค่ากำลังรับแรงอัดที่ 416 กก./ซม.^{2} โดย รูปที่ 2.9 แสดงคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช ซึ่งตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 2.9 คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช ซึ่งตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.2 <u>การประมาณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น</u>

ปัจจุบันการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นมีการผลิตกันทั่วๆไปตามบริษัทต่างๆ ซึ่งมีลักษณะหลากหลายรูปแบบ และสีของผิวหน้าต่างๆหลายสีซึ่งราคาก็แตกต่างกันออกไป โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริชสีเทาซึ่งมีราคาในตามตลาดอุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผลิตก้อนละ 4.10 บาท (ไม่รวมภาษีมูลค่าเพิ่มและการขนส่ง โดยเป็นราคา ณ.วันที่ 9 เมษายน 2546) ซึ่งคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริชนำไปใช้ประโยชน์สำหรับปูทางเท้า ลานจอดรถ ลานอเนกประสงค์ พื้นที่ลานภายนอกอาคาร หรือพื้นที่บ้านพักอาศัย เป็นต้น

วัสดุที่มีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริช ได้แก่

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตราช้าง ทราย หินเกล็ด ใช้ผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น ซึ่งราคานี้รวมค่าขนส่งแล้ว
- น้ำจะใช้น้ำประปาซึ่งราคาคิดตามการประปาภูมิภาคโดยประมาณ
- ตะกรันดีบุกเป็นวัสดุที่ไม่มีประโยชน์ถูกนำไปทิ้งจึงไม่มีค่าใช้จ่ายของวัสดุและไม่มีค่าใช่จ่ายในการขนส่ง ตะกรันดีบุกใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
- เครื่องผสมคอนกรีต เครื่องคัดขนาดใช้คัดขนาดตะกรันดีบุกให้ได้ขนาดตามต้องการ และเครื่องบดตะกรันดีบุกให้ได้ขนาดตามต้องการ คิดค่าใช้จ่ายตามกำลังวัตต์ของเครื่อง โดยคิดค่าไฟฟ้าจากการไฟฟ้าภูมิภาคโดยประมาณ

ตารางที่ 4.14 ค่าใช้จ่ายของวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช 1 ก้อน

วัสดุที่ใช้				คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช	
ส่วนประกอบ	ราคา (บาท/หน่วย)	น้ำหนัก/หน่วย (กก.)	ราคา (บาท/กก.)	ปริมาณที่ใช้ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	2,320 บาท/ตัน	1,000 กก.	2.32	0.65	1.51
ทราย	275 บาท/ลบ.ม.	2,650 กก.	0.104	0.93	0.93
หินเกล็ด	250 บาท/ลบ.ม.	2,700 กก.	0.093	1.52	0.16
น้ำ	15 บาท/หน่วย	1,000 กก.	0.015	0.42	0.01
ตะกรันดีบุก	-	-	-	0.25	-
รวมค่าใช้จ่าย	-	-	-	-	1.8

หมายเหตุ : ข้อมูลจากกรมการค้าภายในราคาวัสดุเป็นราคา ณ เดือนธันวาคม พ.ศ.2546

การคิดค่าใช้จ่ายของเครื่องมือในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริช

ข้อมูลพื้นฐาน

- กำหนดให้ค่าไฟฟ้าราคาเฉลี่ย 3 บาทต่อหน่วย โดยประมาณ

ตารางที่ 4.15 ค่าใช้จ่ายของวัสดุในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช 1 ก้อน

อุปกรณ์	กำลังไฟฟ้า (กิโลวัตต์)	ราคาไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	เวลา (ชั่วโมง)	จำนวน (ครั้ง/กก.)	ปริมาณ (กก.)	ค่าใช้จ่าย (บาท)
เครื่องผสม	0.75	3	5/60	1/3.8	3.8	0.19
เครื่องบด	44.8	3	2/15	2/15	0.28	0.84
เครื่องคัดขนาด	0.3	3	1/5	1/5	0.28	0.06
รวมค่าใช้จ่าย	-	-	-	-	-	1.08

รวมค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นรูปแบบคดกริช 1 ก้อน

= ค่าใช้จ่ายของวัสดุ + ค่าไฟฟ้า

= 1.8 + 1.08

= 2.88 บาท

จะเห็นได้ว่าค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริชมีราคาที่ถูกกว่าราคาท้องตลาดที่ขายประมาณ 4.10 บาท/ก้อน เนื่องจากไม่ได้รวมถึงค่าขนส่งวัสดุ ค่าแรง ค่าเครื่องจักร และค่าเสื่อมราคาของเครื่องจักร ดังนั้นควรเปรียบเทียบกับราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นจากโรงงานมากกว่าราคาขายตามท้องตลาด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันดีบุกซึ่งเป็นของเสียจากกระบวนการถลุงแร่ดีบุกมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยนำมาเป็นวัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน โดยผลสรุปที่ได้จากการศึกษามีดังนี้

5.1สรุปผลการวิจัย

1. ตะกรันดีบุกที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ จะต้องเป็นตะกรันที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quenching) เพื่อให้รูปแบบผลึกเป็นแบบอสัณฐาน (Amorphous) จึงจะสามารถทำปฏิกิริยากับสารประกอบในปูนซีเมนต์ได้ แต่ถ้าตะกรันถูกปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ (Air-Cooled) ผลึกจะอยู่ในรูปควอทซ์ (Crystalline) ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบในปูนซีเมนต์

2. ตะกรันดีบุกจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน ชั้นคุณภาพ C โดยมีค่าผลรวมซิลิกา อลูมินา และเหล็ก ปริมาณซัลเฟต ปริมาณความชื้น ค่าสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ และค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลาน จัดอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตาม ASTM C618-96

3. ขนาดอนุภาคตะกรันดีบุกมีผลต่อกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ โดยขนาดอนุภาคที่เล็กเมื่อผสมกับปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูง โดยขนาดตะกรันดีบุกที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในงานวิจัยนี้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 75 ไมครอน

4. การแทนที่ตะกรันดีบุกในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ต่ำลง โดยปริมาณตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 0 ถึง 30 โดยน้ำหนัก สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐาน มอก.15 ว่าด้วยค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ที่ต้องมีค่ามากกว่า 245 กก/ตร.ซม. ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

5. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.5 ปริมาณตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 0 ถึง 30 โดยน้ำหนัก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เท่ากับ 0.6 ปริมาณตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก เป็นสัดส่วนที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดในแต่ละสัดส่วนการแทนที่

6. เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วนกับมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 10 20 30 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน คิดเป็นร้อยละของกำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน เท่ากับ 97.6 87.4 79.3 59.3 และ44.3

7. มอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนขาวให้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าและก่อตัวช้าเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์มาก

8. จากผลวิเคราะห์โดย XRD พบว่าปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นสารประกอบเริ่มต้นในปูนซีเมนต์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาบ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ยกเว้นหลังระยะเวลาบ่มที่ 28 วันปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของสัดส่วนตะกรันดีบุกแทนที่ ร้อยละ 30 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าลดลง เนื่องจากถูกนำไปใช้ทำปฏิกิริยากับซิลิกาในตะกรันดีบุก โดยเรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งสอดคล้องกับความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก

9. ในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นแบบคดกริช สามารถนำตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก ขนาดอนุภาคตะกรันดีบุกเล็กกว่า 75 ไมครอน อัตราส่วนวัสดุประสาน:ทราย:หินเกล็ด:น้ำ เท่ากับ 1:1.2:1.8:0.5 โดยสามารถผ่านมาตรฐาน มอก.827 เมื่อระยะเวลาบ่ม 14 วัน ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัด 416 กก./ตร.ซม. โดยมาตรฐาน มอก.827 กำหนดให้กำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นต้องมีค่ามากกว่า 407 กก./ตร.ซม. ในระยะเวลาบ่มไม่น้อยกว่า 7 วัน

5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

1. ควรศึกษาคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตเมื่อผสมตะกรันดีบุก เช่น ระยะเวลาการก่อตัว (Setting Time) ความทนทาน ความสามารถในการซึมน้ำได้ ปริมาณความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ความต้านทานซัลเฟต ซึ่งวัสดุผสมเพิ่มในซีเมนต์จำพวกตะกรัน เช่น ตะกรันเตาถลุงเหล็กมีคุณสมบัติที่ดีในแง่ ให้ความร้อนต่ำซึ่งเหมาะกับงานที่ใช้เทคอนกรีตคราวละมากๆ จำพวกงานเขื่อนเพื่อลดการแตกร้าว (Cracking) ทนซัลเฟต (Sulphate Resistance) ซึ่งเหมาะกับงานคอนกรีตที่สัมผัสน้ำทะเล

2. ควรศึกษาการแปรอัตราส่วนระหว่าง วัสดุประสาน:ทราย:หินเกล็ด:น้ำ เมื่อใช้ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้อัตราส่วนซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยอื่น ความต้องการน้ำเนื่องจากการผสมตะกรันดีบุกหรือหินเกล็ดอาจเปลี่ยนไป

3. คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่ผลิตจากตะกรันดีบุกในการวิจัยนี้มีข้อแตกต่างจากภาคอุตสาหกรรมการทำคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นที่มีเครื่องจักรสำหรับขึ้นรูปด้วยแรงอัด ดังนั้นกำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นผสมตะกรันดีบุกจากงานวิจัยนี้อาจมีค่ากำลังรับแรงอัดมากขึ้นหากได้รับการขึ้นรูปด้วยเครื่องจักรซึ่งทำให้ความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมีมากขึ้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กฤษณ์ จารุทะวัย. 2545. การใช้เถ้าลอยเส้นใยปาล์มและเถ้าลอยชานอ้อยแทนที่ซีเมนต์บางส่วน. วิทยานิพนธ์ปริญญาหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิงแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชาคร จารุพิสิฐธร. 2528. ถลุงแร่ดีบุก. กรุงเทพมหานคร : กรมทรัพยากรธรณี.

ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด (ซีแพค).

ทิพยรัตน์ หาญสืบสาย. 2544. เถ้าลอยลิกไนต์ในงานคอนกรีตกับการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

หฤษฎ์ ธิตินันท์. 2546. การนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วไปใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตคอนกรีตบล็อก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วาสนา สามห้วย. 2538 การศึกษาสัดส่วนผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยแม่เมาะ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิจารณ์ อุปัติศฤงค์. 2534. รายงานสถานการณ์แร่ของประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร : กรมทรัพยากรธรณี.

วินิต ช่อวิเชียร. 2539. คอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 8. ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุมิตร ปิติพัฒน์. 2515. บ้านเชียง กุญแจสู่ยุคก่อนประวัติศาสตร์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ศราวุฒิ บุษบงค์ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ. 2543. พฤติกรรมของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงที่ไม่ผ่านการบด. วารสารสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีที่ 32 เล่มที่ 1 : 53-70.

อุดม หงษ์ประธานพร. 2532. การพัฒนากำลังของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมขี้เถ้าลอยและขี้เถ้าแกลบ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2530. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตามมาตรฐาน มอก.15-2514 (แก้ไขเพิ่มเติม พ.ศ.2517). กระทรวงอุตสาหกรรม.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2531. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่องมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น มอก.827-2531. กระทรวงอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 in. or 50 mm cube specimens). C109-95, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Section 4 : 74-79.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. C 128-93, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Section 4 :70-73.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. C136-93, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Section 4 : 79-82.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Specific Gravity of Portland Cement. C188-95. Annual book of ASTM Standard vol. 04.05 section 4 : 596-597.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus. C204-95, Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.01 section 4 : 163-169.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. C230-83, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Section 4 : 151-154.

American Society for Testing and Materials. 1985. Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. C 311-85, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Section 4 : 184-190.

American Society for Testing and Materials. 1996. Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. C 618-96, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Section 4 : 310-312.

Douglas, E., Mainwaring, P.R., and Hemmings, R.T. 1991. Pozzolanic Properties of Canadian Non-Ferrous Slags. In V.M. Molhotra (ed.), Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete: Proceeding Third International Conference : 1525-1549.

Inthasaro, P. 2002. Utilization of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash as a Partial Cement Replacement. Master's Thesis, Inter-Departmental Program in Environmental Management, Graduate School, Chulalongkorn University.

Isaia, G. C., Gastaldini, A. L. G., and Moraes, R. 2003. Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High-performance Concrete. Cement and Concrete Composites Vol. 25 No.1 : 69-76.

Lea, F. M. 1980. The Chemistry of Cement and Concrete.3rd ed. New York: Chemical Publishing.

Maltais, Y. and Marchard, J. 1997. Influence of Curing Temperature o Cement Hydration and Mechanical Strength Development of Fly Ash Mortars. Cement and Concrete Research. Vol. 27 : 1009-1020.

Nakamura, N., Sakai, M., and Swamy, R.N. 1992. Effect of Slag Fineness on the Development of Concrete Strength and Microstructure. In V.M. Molhotra (ed.), Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete: Proceeding Fourth International Conference : 1343-1366.

Sakai, M., and Swamy, R.N. 1992. Effect of Slag Fineness on the Development of Sulphate Resistance Concrete. In V.M. Molhotra (ed.), Fly ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete: Proceeding Fourth International Conference : 1447-1456.

Shannag, M. J., and Yeginobali, A. 1995. Properties of Pastes, Mortars and Concretes Containing Natural Pozzolan. Cement and Concrete Research Vol. 25 No. 3 : 647-657.

Zhang, M. H., and Malhotra, V. M. 1995. Characteristics of Thermally Activated Alumino-silicate Pozzolanic Material and Its Use in Concrete. Cement and Concrete Research Vol. 25 No. 8 : 1713-1725.

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

มั่นเกียรติ โกศลนิรัตน์วงศ์, ยิ่งศักดิ์ วัตสุรนิตย์ฤกษ์ และ วิริยะ สิริสิงห. 2520. 110 ธาตุ คุณสมบัติและการค้นพบ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์อักษรวัฒนา.

ประพิศลา เทพสิทธา. 2542. การทำเสถียรและการทำให้เป็นก้อนของตะกรันจากการถลุงแร่เซรัสไซต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประเสริฐ งามเลิศประเสริฐ. 2541. การนำของเสียซิลิกา-อลูมินาและปรอทซัลไฟด์มาทำให้เป็นก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

รักษพล ชูชาติ. 2538. การทำเสถียรกากตะกอนจาโรไซต์โดยการทำให้เป็นก้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไลทิพย์ อภิธรรมวิริยะ. 2542. การนำซิลิกา-อลูมินาที่ใช้แล้วมาใช้ประโยชน์ในการทำวัสดุปูพื้น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุดมวิทย์ กาญจนวรงค์. 2543. ปฏิบัติงานทดสอบคอนกรีตเทคโนโลยี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์สกายบุ๊กส์.

ภาษาอังกฤษ

Albino, V., Cioffi, R., De Vita, B., and Samtoro, L.1996. Evaluation of Solid Waste Stabilization Procurer by Means of Leaching Tests. Environmental Technology 17 : 309-315.

Hussin, M.W., and Abdul Awal, A.S.M. 1999. Influence of Fuel Ash on Sulfate Resistance of Mortar and Concrete. In V.M. Malhotra (ed.), Fly Ash, Silica Fume, Slag & Natural Pozzolan in Concrete, Proceeding Sixth CANMET/ACI International Conference, Bangkok : 417-429.

Lane, R.O., and Best, J.F. 1982. Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete. Concrete International 4 : 81-92.

Rijal, S.P. 1990. Solidification of Laboratory Wasres Using Cementitious Binders. Thesis No. EV-90-20, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

Sollars, C.J, and Perry, R. 1989. Cement-based stabilization of wastes: Practical and theoretical considerations. Journal of the Institution of Water and Environmental Management : 123-131.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลองหล่อก้อนมอร์ตาร์ และคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-1 ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของการทดลองหาค่าดัชนีความเป็นวัสดุปอซโซลานของตะกรันดีบุก ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

อัตราส่วนตะกรันดีบุก : ปูนซีเมนต์โดยปริมาตร	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0 : 100	311.6	305.7	317.5	311.6
35 : 65	242.9	237.1	252.8	244.3

ตารางที่ ผ-2 ค่ากำลังรับแรงอัดมอร์ตาร์ของการทดลองหาผลของขนาดตะกรันดีบุกต่อกำลังรับแรงอัด ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

ตัวอย่าง	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
ตะกรันดีบุก	191.6	186.5	193.7	190.6
ตะกรันดีบุกผ่านตะแกรง #50 ค้าง #100	209.5	209.3	199.8	206.2
ตะกรันดีบุกผ่านตะแกรง #100 ค้าง #200	225.4	201.8*	239.2	230.4
ตะกรันดีบุกผ่านตะแกรง #200	223.4	268.5	266.5	252.8

หมายเหตุ * คือ กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

ตารางที่ ผ-3 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ปูนซีเมนต์ล้วน เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (กก./ซม.^{2})				กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน(กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.4	199.9	215.9	219.9	211.9	254.7	272.4	283.3	270.3
0.5	258.7	266.5	271.8	265.6	331.8	325.3	335.1	330.7
0.6	243.8	251.8	255.8	250.5	307.8	309.8	315.8	311.1
0.7	211.6	235.8	243.8	230.4	282.2	280.2	290.0	284.1

ตารางที่ ผ-4 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ10 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (กก./ซม.^{2})				กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน(กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.4	167.9	181.8	183.8	177.9	203.8	211.8	211.6	209.1
0.5	247.8	251.8	262.6	254.1	321.8	327.8	321.4	323.7
0.6	211.8	215.5	225.9	217.8	282.2	291.8	290.0	288.0
0.7	191.8	199.8	211.8	201.2	235.2	242.9	251.8	243.3

ตารางที่ ผ-5 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ20 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (กก./ซม.^{2})				กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน(กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.4	143.9	151.9	155.9	150.6	167.9	169.9	179.9	172.5
0.5	217.5	231.8	235.2	228.2	282.2	297.8	303.7	294.5
0.6	199.8	203.8	207.8	203.8	263.8	271.8	275.8	270.5
0.7	155.9	159.9	167.9	161.2	199.9	205.8	207.8	204.5

ตารางที่ ผ-6 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ30 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (กก./ซม.^{2})				กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน(กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.4	119.9	133.9	137.9	130.6	143.9	145.9	151.9	147.2
0.5	171.9	175.9	191.9	179.9	249.9	245.9	259.9	251.2
0.6	155.9	163.9	171.9	163.9	203.9	211.9	215.9	210.5
0.7	123.9	129.9	135.9	129.9	143.9	151.9	153.9	149.9

ตารางที่ ผ-7 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ40 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (กก./ซม.^{2})				กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน(กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.4	91.9	87.9	79.9*	89.9	101.9	111.9	119.9	111.3
0.5	119.9	123.9	121.5	121.9	148.9	145.8	162.6	152.5
0.6	127.9	137.2	141.1	135.4	156.7	156.7	164.6	159.4
0.7	97.9	105.8	117.6	107.1	125.4	135.9	137.2	132.8

หมายเหตุ * คือ กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ผ-8 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ตะกรันดีบุกแทนที่ปูนซีเมนต์ ร้อยละ50 โดยน้ำหนัก เมื่อแปรผันอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	กำลังรับแรงอัดที่ 7 วัน (กก./ซม.^{2})				กำลังรับแรงอัดที่ 28 วัน (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.4	67.9	73.9	83.9	75.3	87.9	92.1	109.7	96.6
0.5	91.9	96.0	103.9	97.3	113.9	117.9	131.9	121.3
0.6	103.9	107.9	115.9	109.3	123.9	127.9	135.9	129.3
0.7	82.7	83.9	93.9*	83.3	95.9	99.9	105.9	100.6

หมายเหตุ * คือ กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย

ตารางที่ ผ-9 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} :น้ำ เท่ากับ {0:1} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	135.9	127.9	155.9	139.9
3	199.9	209.9	223.8	211.2
7	257.8	259.8	267.8	261.8
14	297.8	305.7	311.8	305.1
28	327.8	339.8	335.8	334.5
90	355.8	357.8	363.8	359.1

ตารางที่ ผ-10 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์}:น้ำ เท่ากับ {0.1:0.9} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	119.9	129.9	139.9	129.9
3	183.8	189.9	191.9	188.5
7	247.8	253.8	259.8	253.8
14	287.8	291.8	301.7	293.8
28	321.8	325.8	329.8	325.8
90	331.8	334.9	355.7	340.8

ตารางที่ ผ-11 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์}:น้ำ เท่ากับ {0.2:0.8} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	115.6	125.4	133.3	127.7
3	164.6	170.5	176.4	170.5
7	227.8	239.8	243.8	237.2
14	241.0	255.8	258.6	251.8
28	279.8	299.8	295.8	291.8
90	327.8	329.8	347.8	335.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-12 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} :น้ำเท่ากับ {0.3:0.7} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	107.9	121.9	123.9	117.9
3	137.2	152.8	160.6	150.2
7	181.8	191.8	183.8	185.8
14	207.8	197.8	201.8	202.5
28	252.8	274.3	266.5	264.5
90	329.2	289.8	297.8	305.6

ตารางที่ ผ-13 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} :น้ำเท่ากับ {0.4:0.6} : 0.6

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	86.2	94.1	96.0	92.1
3	105.8	103.8	113.6	107.7
7	121.5	143.1	145.1	136.5
14	146.9	150.9	152.8	150.2
28	209.3	205.7	178.6	197.9
90	256.5	246.9	254.7	246.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-14 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนซีเมนต์} :น้ำ เท่ากับ {0.5:0.5} : 0.6

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	66.6	72.5	73.8	70.9
3	86.2	82.3	92.1	86.8
7	97.9	103.8	109.7	103.9
14	115.6	121.5	117.6	118.2
28	170.9	187.8	193.9	184.2
90	233.8	249.5	243.6	238.4

ตารางที่ ผ-15 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} :น้ำ เท่ากับ {0:1} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	-	-	-	-
3	-	-	-	-
7	-	-	-	-
14	54.4	58.8	-	57.1
28	65.3	61.2	67.9	64.8
90	101.6	93.8	77.5*	97.7

หมายเหตุ * คือ กำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างมีค่าเกินช่วงเบี่ยงเบน 10 เปอร์เซนต์ของค่าเฉลี่ย (3 ตัวอย่าง) จึงไม่นำมาคิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-16 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} :น้ำ เท่ากับ {0.1:0.9} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	-	-	-	-
3	-	-	-	-
7	-	-	-	-
14	46.9	40.8	47.1	44.9
28	47.1	53.1	46.5	48.9
90	75.3	75.5	69.4	73.4

ตารางที่ ผ-17 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} :น้ำ เท่ากับ {0.3:0.7} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	-	-	-	-
3	-	-	-	-
7	-	-	-	-
14	-	-	34.7	-
28	36.7	37.7	40.8	38.4
90	65.3	60.2	55.1	61.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-18 ค่ากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์อัตราผสม {ตะกรันดีบุก:ปูนขาว} :น้ำ เท่ากับ {0.5:0.5} : 0.5

ระยะเวลาการบ่ม (วัน)	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	-	-	-	-
3	-	-	-	-
7	-	-	-	-
14	-	-	-	-
28	30.5	-	34.7	32.6
90	48.9	51.0	46.9	48.9

ตารางที่ ผ-19 ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอนขนาด 11.25 X 22 X 6 ซม. อัตราส่วนวัสดุประสาน:ทราย:หินเกล็ด:น้ำ เท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 : 0.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน

อัตราส่วน ตะกรันดีบุก : ปูนซีเมนต์	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
30 : 70	378.6	382.6	389.4	384.2

ตารางที่ ผ-20 ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอนขนาด 11.25 X 22 X 6 ซม. อัตราส่วนวัสดุประสาน:ทราย:หินเกล็ด:น้ำ เท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 : 0.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 14 วัน

อัตราส่วน ตะกรันดีบุก : ปูนซีเมนต์	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
30 : 70	410.4	419.6	425.1	416.4

ตารางที่ ผ-21 ค่ากำลังรับแรงอัดคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นตัวหนอนขนาด 11.25 X 22 X 6 ซม. อัตราส่วนวัสดุประสาน:ทราย:หินเกล็ด:น้ำ เท่ากับ 1 : 1.2 : 1.8 : 0.5 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน

อัตราส่วน ตะกรันดีบุก : ปูนซีเมนต์	กำลังรับแรงอัด (กก./ซม.^{2})			
	ก้อนที่ 1	ก้อนที่ 2	ก้อนที่ 3	ค่าเฉลี่ย
30: 70	458.2	484.3	489.2	472.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-22 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วน ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
11.60	7.494	97	21
18.12	4.692	460	100
20.24	4.384	68	15
28.72	3.106	108	23
29.48	3.027	133	29
32.44	2.758	105	23
34.16	2.623	250	54
35.68	2.514	68	15
36.92	2.433	54	12
39.48	2.281	57	12
47.16	1.926	146	32
50.64	1.794	99	22
54.44	1.684	59	13
55.28	1.660	52	11
55.88	1.644	51	11
62.72	1.480	49	11
64.32	1.447	48	10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-19 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วน ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.12	9.689	137	24
9.60	9.205	109	19
15.84	5.590	82	15
18.12	4.892	561	100
22.96	3.870	68	12
23.36	3.805	59	11
28.76	3.102	124	24
29.44	3.031	116	21
32.24	2.774	127	23
32.68	2.738	114	20
34.16	2.623	435	78
38.80	2.319	57	10
41.28	2.185	71	13
42.04	2.147	54	10
47.20	1.924	195	35
50.88	1.793	132	24
51.80	1.763	57	10
54.40	1.685	78	14
55.20	1.663	49	9
56.24	1.634	48	9
62.60	1.483	55	10
64.24	1.449	51	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-20 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วน ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
10.96	8.066	142	19
15.84	5.590	73	10
19.08	4.648	754	100
20.80	4.267	66	9
29.56	3.000	105	15
30.28	2.949	108	14
33.20	2.969	130	17
35.12	2.553	352	47
48.12	1.689	174	23
51.80	1.763	95	13
54.04	1.696	45	6
57.16	1.610	48	6
63.60	1.462	53	7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-21 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์แบบปูนซีเมนต์ล้วน ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
18.32	4.839	859	100
26.96	3.304	83	10
28.96	3.081	102	14
29.72	3.004	90	13
32.44	2.758	97	11
34.40	2.605	290	34
47.40	1.916	165	19
51.08	1.787	98	11
54.80	1.674	61	7
62.64	1.478	51	6
64.56	1.442	63	7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-22 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
10.40	8.499	120	26
10.72	8.246	114	24
11.20	7.894	115	24
12.64	6.997	93	20
17.12	5.175	83	18
18.36	4.581	470	100
29.76	2.976	130	28
30.68	2.912	107	23
32.40	2.761	88	19
33.48	2.674	105	22
33.76	2.653	89	19
35.40	2.534	344	73
48.40	1.679	158	34
52.08	1.755	98	21
55.68	1.649	67	14
56.64	1.624	48	10
63.92	1.455	46	10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-23 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.92	8.909	129	22
18.08	4.902	595	100
28.72	3.106	135	23
29.48	3.027	111	19
31.16	2.868	87	15
32.20	2.778	131	22
32.64	2.741	109	18
34.12	2.626	400	67
41.32	2.183	53	9
47.16	1.926	207	35
50.68	1.793	103	17
54.40	1.685	80	13
55.24	1.661	53	9
62.56	1.484	53	9
62.84	1.478	51	9
63.72	1.459	41	7
64.20	1.450	62	10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-24 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.20	9.605	124	19
9.96	8.873	130	20
12.16	7.272	87	13
18.12	4.892	664	100
26.68	3.338	170	26
28.80	3.097	118	21
29.56	3.019	108	20
32.32	2.768	106	16
34.16	2.623	442	67
47.16	1.926	176	27
49.96	1.624	65	10
50.88	1.793	132	20
54.44	1.684	79	12
62.64	1.482	56	8
64.24	1.449	61	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-25 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.28	9.522	147	17
11.64	7.596	96	11
15.96	5.548	92	11
18.24	4.860	850	100
19.12	4.638	67	8
23.16	3.837	70	8
28.88	3.089	104	18
29.56	3.019	106	14
30.48	2.930	94	11
31.24	2.861	96	11
32.40	2.761	148	17
32.80	2.728	97	11
33.48	2.674	86	10
34.28	2.614	455	54
35.28	2.542	72	8
41.32	2.183	56	7
47.32	1.919	205	24
50.12	1.819	67	8
50.96	1.791	127	15
54.48	1.683	69	8
59.72	1.547	52	6
62.76	1.479	63	7
64.52	1.443	68	8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-26 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
5.92	14.917	163	34
6.28	14.062	156	32
9.16	9.646	143	30
12.20	7.249	83	17
15.64	5.590	88	18
16.12	4.892	484	100
19.08	4.648	65	13
23.04	3.857	79	16
24.56	3.622	59	12
25.68	3.466	69	14
28.76	3.102	102	21
29.48	3.027	151	31
32.24	2.774	231	48
32.64	2.741	134	28
34.16	2.623	318	66
35.12	2.553	72	15
36.08	2.487	64	13
39.44	2.283	58	12
41.00	2.199	72	15
41.40	2.179	69	14
47.20	1.924	151	31
50.24	1.814	76	16
50.88	1.793	73	15
51.80	1.763	78	16
54.36	1.686	60	12
56.48	1.628	52	11
60.00	1.541	70	14

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-27 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.44	9.361	129	24
16.24	5.453	80	15
18.40	4.616	548	100
23.36	3.605	67	12
29.12	3.064	117	21
29.60	3.015	97	18
32.44	2.758	97	18
34.44	2.602	356	65
46.48	1.952	52	10
47.52	1.912	140	26
51.16	1.784	96	18
54.72	1.676	66	12
55.56	1.653	51	9
55.84	1.645	47	9
62.96	1.475	50	9
64.64	1.441	55	10

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-28 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
11.68	7.443	91	14
17.78	4.990	88	14
18.36	4.828	650	100
27.52	3.238	84	13
29.00	3.076	102	21
29.76	3.000	116	24
32.56	2.748	104	16
34.40	2.605	412	63
47.44	1.915	186	29
50.16	1.617	61	9
51.08	1.787	107	16
54.68	1.677	78	12
62.96	1.475	53	8
64.60	1.442	61	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-33 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.24	9.563	126	26
10.12	8.733	114	23
15.92	5.562	81	16
18.20	4.870	493	100
23.04	3.857	66	13
28.84	3.093	136	28
29.48	3.027	112	23
31.16	2.868	90	18
32.36	2.764	114	23
32.76	2.731	120	24
34.24	2.617	407	83
39.68	2.270	52	11
41.12	2.193	55	11
41.40	2.179	55	11
47.24	1.922	161	37
50.24	1.614	62	13
50.96	1.791	122	25
54.48	1.683	73	15
55.36	1.658	52	11
59.60	1.550	43	9
62.60	1.478	50	10
64.32	1.447	52	11

ตารางที่ ผ-34 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 3 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
8.44	10.468	114	27
9.12	9.689	129	31
15.84	5.590	86	21
18.12	4.892	418	100
18.92	4.687	70	17
23.04	3.857	76	18
25.64	3.471	72	17
26.76	3.329	124	30
28.84	3.093	89	21
29.48	3.027	131	31
32.32	2.768	134	32
32.68	2.738	104	25
34.16	2.623	256	61
35.04	2.559	66	16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-35 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
10.52	8.402	128	22
11.68	7.443	98	17
18.64	4.756	580	100
20.48	4.333	69	12
27.28	3.266	116	20
29.28	3.048	129	22
29.92	2.984	100	17
32.60	2.728	101	17
33.16	2.699	97	17
34.72	2.582	390	67
47.72	1.904	149	26
50.52	1.605	56	10
51.40	1.776	109	19
54.92	1.670	76	13
63.20	1.470	52	9
64.84	1.437	54	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-36 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 28 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.24	9.563	144	23
12.32	7.178	84	13
16.00	5.535	82	13
18.20	4.870	636	100
23.12	3.844	76	12
26.64	3.319	511	80
28.88	3.089	100	16
29.60	3.015	117	33
32.36	2.764	147	23
32.72	2.735	166	26
34.28	2.614	338	53
35.24	2.545	67	11
41.80	2.195	56	9
41.44	2.177	86	14
47.24	1.922	156	25
50.96	1.791	92	14
51.64	1.762	57	9
54.52	1.682	66	10
56.60	1.625	71	11
62.76	1.479	54	8
64.36	1.446	55	9

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ผ-37 ผลการวิเคราะห์โดย X-Ray Diffraction Spectrometry (XRD) ของซีเมนต์เพสท์ที่มีตะกรันดีบุกแทนที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาการบ่ม 90 วัน

2θ ($^\circ$)	D ($^\circ$A)	I (counts)	I / I_0
9.20	9.605	156	34
11.64	7.596	97	21
12.28	7.202	83	18
15.92	5.562	94	21
18.12	4.892	458	100
19.04	4.657	69	15
20.36	4.358	52	11
23.04	3.857	90	20
25.72	3.461	63	14
28.76	3.102	122	27
29.44	3.031	113	25
32.32	2.768	165	36
32.68	2.738	161	35
34.16	2.623	380	83
35.12	2.553	69	15
41.24	2.187	76	17
47.16	1.926	185	40
50.84	1.794	130	28
51.84	1.762	48	10
54.40	1.685	72	16
55.20	1.663	45	10
59.56	1.551	46	10
62.68	1.481	60	13
64.36	1.446	59	13

ภาคผนวก ค.
วิธีการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค-1 การหาค่าการดูดซึมน้ำของตะกรันดีบุก

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C128-93

ขั้นตอนการทดลอง

1. ใส่วัสดุน้ำหนักประมาณ 1 กก. ในถาดขนาดพอเหมาะ เทน้ำให้ท่วมวัสดุเล็กน้อย ทิ้งไว้ให้วัสดุดูดซึมน้ำเป็นเวลา 24 $\pm$ 4 ชม.
2. เกลี่ยตัวอย่างวัสดุให้ทั่วถาด ทิ้งไว้กลางแจ้งที่มีลมพัดและกวนตัวอย่างเป็นระยะๆ เพื่อให้แห้งทั่วกันจนกระทั่งตัวอย่างวัสดุเริ่มไหลได้อย่างอิสระ (Free flow)
3. เทตัวอย่างใส่แบบหล่อกรวยมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางบน 40 $\pm$ 3 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางล่าง 90 $\pm$ 3 มม. และสูง 75 $\pm$ 3 มม. แล้วกระทุ้งเบาๆ ที่ผิวหน้า
4. ดึงแบบหล่อออกในแนวดิ่ง ถ้าวัสดุยังคงรูปกรวยอยู่แสดงว่ายังมีความชื้นอยู่ที่ผิว นำไปไว้ในที่กลางแจ้งอีกครั้งและกวนเป็นระยะๆ
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 จนกว่าเมื่อยกแบบหล่อกรวยออกตัวอย่างวัสดุยุบตัวหรือล้ม (ถือว่าวัสดุในขณะนี้อยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง)
6. ชั่งน้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้งและอบแห้ง
7. คำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของวัสดุ

การคำนวณ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ (\% Absorption)} = [(S-A) / A] \times 100$$

โดยที่ A = น้ำหนักของวัสดุอบแห้ง (Oven dry weight)

S = น้ำหนักของวัสดุที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry weight)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ภาคผนวก ค-2</u> การทดสอบค่ากำลังรับแรงอัด

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C109-95

ขั้นตอนการทดลอง

การเตรียมแบบหล่อตัวอย่าง

1. ทาน้ำมันบางๆ ที่ผิวด้านในของแบบหล่อกับฐาน
2. ทาน้ำมันชนิดข้นหรือจารบีระหว่างตัวแบบหล่อกับฐาน
3. เช็ดน้ำมันส่วนเกินออกจากแบบหล่อ
4. ใช้จารบีทารอยต่อระหว่างแบบหล่อกับฐานที่ด้านนอก

การหล่อก้อนตัวอย่าง

1. หล่อก้อนตัวอย่างโดยใช้ขนาดโมลด์ 5 x 5 x 5 ซม.^{3} โดยชั่งวัสดุที่ใช้ตามอัตราส่วนที่ต้องการทดสอบโดยให้ได้ปริมาณ 3 ตัวอย่างในแต่ละการผสม
2. การผสมใช้วิธีการผสมด้วยเครื่องผสม โดยผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน เมื่อเข้ากันดีแล้ว เติมน้ำลงผสมและทิ้งให้ซึมตัวด้วยน้ำ 30 วินาที เริ่มผสมให้เข้ากันในเวลา 1 นาที 30 วินาที
3. เอาส่วนผสมลงในแบบหล่อ ภายในเวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที หลังการผสมเสร็จ การหล่อจะแบ่งออกเป็น 2 ชั้นโดยชั้นแรกหนาประมาณ 1 นิ้ว แล้วใช้ Tamper กระทุ้งชั้นละ 16 ครั้งโดย 8 ครั้งแรกจะมีทิศทางตั้งฉากกับ 8 ครั้งหลังให้แรงกระทุ้งพอประมาณ และเท่ากันตลอด ใช้เวลาประมาณ 5 วินาที เติมส่วนผสมชั้นที่ 2 ให้เลยขอบแบบหล่อเล็กน้อย และใช้มือป้องขณะกระทุ้ง ใช้ Tamper กระทุ้ง 16 ครั้งเช่นเดียวกับครั้งแรก เมื่อเสร็จแล้วให้ใช้เกรียงปาดส่วนเกินออกในลักษณะคล้ายเลื่อย
4. หลังจากหล่อเสร็จให้นำตัวอย่างพร้อมแบบหล่อเก็บไว้ในที่ชื้นทันที และถอดแบบในเวลา 24 ชั่วโมง บ่มตัวอย่างต่อจนครบระยะเวลาที่กำหนด นำตัวอย่างไปทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยใช้เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การหาค่ากำลังรับแรงอัด

ให้กระทำในช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

เวลาที่ทดสอบ	ช่วงเวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้
1 วัน	$\pm$ ½ ชม.
3 วัน	$\pm$ 1 ชม.
7 วัน	$\pm$ 3 ชม.
28 วัน	$\pm$ 12 ชม.

นำก้อนตัวอย่างที่จะทดสอบ วัดพื้นที่หน้าตัดที่จะให้แรงกด โดยใช้ด้านที่สัมผัสกับแบบหล่อ เช็ดผิวหน้าทั้ง 2 ด้าน ให้สะอาดปราศจากเม็ดทราย ผิวหน้าของเครื่องมือทั้ง 2 ด้านที่สัมผัสกับก้อนตัวอย่างจะต้องเรียบ ในการให้แรงกดกับแท่งตัวอย่าง จะต้องอยู่ในแนวศูนย์กลางของเครื่อง โดยเวลาที่ใช้ในการทดสอบควรอยู่ที่ 20-80 วินาที

การคำนวณ

บันทึกค่าแรงกดสูงสุดจากเครื่องกดและคำนวณในค่าของ กก./ตร.ซม. โดยให้คำนวณความละเอียดถึง 0.1 กก./ตร.ซม.

ก้อนตัวอย่างที่ไม่สมบูรณ์ในการทดสอบแต่ละครั้ง หากมีผลการทดสอบของก้อนตัวอย่างใดที่มีค่าเบี่ยงเบนเกินกว่า 10% ของค่าเฉลี่ย ควรตัดผลการทดสอบนั้นออกและนำก้อนใหม่มาวัดแทน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ภาคผนวก ค-3</u> การหาค่าการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss On Ignition) **และความชื้น** (Moisture Content)

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C114-94

ขั้นตอนการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักวัสดุประมาณ 1 กรัมใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ชั่งน้ำหนักแล้ว (A) จดค่าน้ำหนักของวัสดุและถ้วยกระเบื้อง (B)
2. อบวัสดุที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนกระทั้งน้ำหนักคงที่ ถือว่าเป็นน้ำหนักของวัสดุแห้งที่ไม่มีความชื้น จดค่าน้ำหนักของวัสดุและถ้วยกระเบื้องที่สภาวะไม่มีความชื้น (C)
3. เผาวัสดุที่อุณหภูมิ 750 $\pm$ 50 องศาเซลเซียส จนกระทั้งน้ำหนักคงที่ จดค่าน้ำหนักของวัสดุและถ้วยกระเบื้อง (D)

การคำนวณ

เปอร์เซ็นต์ความชื้น (Percent Moisture Content) = (B-C) / (B-A) x 100

การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (Loss On Ignition) = (C-D) / (C-A) x 100

โดยที่ A = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องอบแห้ง

B = น้ำหนักวัสดุและถ้วยกระเบื้อง

C = น้ำหนักวัสดุและถ้วยกระเบื้องอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่

D = น้ำหนักของวัสดุและถ้วยกระเบื้องเผาที่อุณหภูมิ 750 $\pm$ 50 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>ภาคผนวค-4</u> การหาค่าดัชนีกำลังรับแรงอัดของวัสดุปอซโซลานเทียบกับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ประเภทที่ 1

อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C311-85

ขั้นตอนการทดลอง

1. หล่อก้อนตัวอย่างขนาด 5 x 5 x 5 ซม.^{3} ของสัดส่วนควบคุม (Control mixture) และสัดส่วนทดสอบ (Test mixture) ตามมาตรฐาน ASTM 109-86 โดยที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้จะต้องตรงตามมาตรฐาน ASTM C150 สัดส่วนทดสอบคือ สัดส่วนที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลาน 35 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
2. ปริมาณน้ำที่ใช้สำหรับสัดส่วนทดสอบ จะเท่ากับปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อให้ได้ค่าการไหลของมอร์ตา 110$\pm$ 5 ของค่าการไหลของสัดส่วนควบคุม
3. บ่มก้อนตัวอย่างทั้งหมดเก็บไว้ในที่ควบคุมความชื้น เป็นเวลา 20 – 24 ชั่วโมง
4. ถอดแบบหล่อ บ่มเป็นระยะเวลา 28 แล้วทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างสัดส่วนควบคุมและสัดส่วนทดสอบ

การคำนวณ

ดัชนีกำลังรับแรงอัดของวัสดุปอซโซลาน

$$= (A / B) \times 100$$

โดยที่ A = ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วนทดสอบ

B = ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของตัวอย่างสัดส่วนควบคุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.5 การทดสอบการชะละลายของสาร

อ้างอิงตามมาตรฐาน ประกาศกระทวงอุตสาหกรรมฉบับที่ 6 (พ.ศ. 2540)

ขั้นตอนการทดลอง

1. บดตัวอย่างให้เป็นผงแล้วร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 9.5 มิลลิเมตร
2. นำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 1 หนัก 100 กรัม เติมด้วยน้ำสกัด ซึ่งประกอบด้วยน้ำกลั่นผสมสารละลายของกรดกำมะถันและกรดไนตริก (ในสัดส่วน 80 ต่อ 20 โดยน้ำหนัก) หาค่าความเป็นกรดด่าง พีเอชของส่วนผสมมีค่าคงที่เท่ากับ 5 แล้วจึงปรับปริมาตรของของผสมให้อัตราส่วนปริมาตรของน้ำสกัดเป็น 20 เท่า (มิลลิลิตร) ของน้ำหนัก (กรัม) ของตัวอย่าง
3. เขย่าบนเครื่องกวนเขย่าแบบหมุน(Rotary agitator) ที่มีอัตราหมุน 30 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง
4. กรองสารละลายจากการสกัดด้วยแผ่นกรองใยแก้วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูกรอง 0.6 ถึง 0.8 ไมครอน
5. นำของเหลวที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักโดยใช้เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว วิริยา เทวนุกูล เกิดวันที่ 8 พฤศจิกายน 2520 ที่จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปี พ.ศ. 2542 เข้าศึกษาในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2543

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย