

การใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ทรายและซีเมนต์ในมอร์ตาร์

นายฉัตรชัย อารมย์ดี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

UTILIZATION OF STEEL SLAG AS SAND AND CEMENT REPLACEMENT IN MORTAR

Mr. Chatchai Aromdee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ทรายและซีเมนต์ในมอร์ตาร์
โดย	นายฉัตรชัย อารมย์ดี
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเซรามิก
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี เวียมศิริเลิศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ นารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพัตรา จินาวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริฉวี เวียมศิริเลิศ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันทนี พุกกะคุปต์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ปาจารย์ ถาวรนิติ)

ฉัตรชัย อารมย์ดี : การใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ทรายและซีเมนต์ในมอร์ตาร์.
(UTILIZATION OF STEEL SLAG AS SAND AND CEMENT REPLACEMENT IN
MORTAR) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ศิริพันธ์ เจียมศิริเลิศ, อ. ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล, 76 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบจากการนำตะกรันเหล็กในอุตสาหกรรมโลหะ มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทรายในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยมีการทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิกและสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่อัตราส่วนการแทนที่ต่างๆกัน การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะมีการนำตะกรันเหล็กมาผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในรูปแบบชิ้นงานเพสต์ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก และทำการบ่มเพื่อรอการวิเคราะห์ทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ 3 7 และ 28 วัน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส หลังจากนั้น ทำการเตรียมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และแทนที่ทรายด้วยตะกรันเหล็กที่อัตราส่วนร้อยละ 10 20 40 60 80 และ 100 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และทำการวิเคราะห์อัตราการใช้และค่าการแช่ตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ต่างๆเหล่านั้นเพื่อปรับปริมาณการใช้น้ำที่เหมาะสมต่อการหล่อแบบ โดยทำการเตรียมตัวอย่างด้วยการหล่อลงแบบทองเหลืองขนาด 5 x 5 x 5 เซนติเมตร³ ปล่อยให้ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนถอดออกจากแบบ และทำการบ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน ก่อนทำการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเฟสของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ ตามลำดับจากการศึกษาพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทรายด้วยตะกรันเหล็กในส่วนผสมของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ จะทำให้เกิดโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงอัดของชิ้นงาน โดยมีค่าความต้านทานแรงอัดสูงสุดคือ 41.17 และ 44.66 เมกะปาสคาล ด้วยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทรายด้วยตะกรันเหล็กที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ตามลำดับ

ภาควิชา...วัสดุศาสตร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา...เทคโนโลยีเซรามิก.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา...2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5272265423 : MAJOR CERAMIC TECHNOLOGY

KEYWORDS : Steel Slag / Pozzolanic reaction / Cement mortar / Paste

CHATCHAI AROMDEE: UTILIZATION OF STEEL SLAG AS SAND AND CEMENT REPLACEMENT IN MORTAR. ADVISOR: ASST. PROF. SIRITHAN JIEMSIRIERS, Ph.D., CO-ADVISOR: PITAK LAORATANAKUL, Ph.D, 76 pp.

In this research, steel slag as a by-product from metallurgical processes was used as a pozzolan material in cement mortar. Pozzolanic reaction and cement mortar properties were investigated. The pozzolanic reaction was studied by varying the ratio of hydrated lime $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to steel slag at 1:1 1:2 and 1:3. Phase microstructure and thermal properties of the pozzolan products were analyzed by X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscope (SEM) and Differential Thermal Analysis (DTA) techniques, respectively. Cement mortar properties were investigated. Mixtures of steel slag, sand and Portland cement were prepared by replacing the cement with the amount of steel slag at 10, 20, 30 and 40 wt%, and replacing the amount of sand by steel slag as 10, 20, 40, 60, 80 and 100 wt%. Setting time and flow ability of the mixture were measured by Vicat apparatus and slump test, respectively. The mixture was cast in a steel mold of $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ and demolded at 24 h, then kept in water for 3, 7 and 28 days. Microstructure and mineral phase of the hardened mortar products were analyzed by Scanning Electron Microscope (SEM) and X-ray diffractometer (XRD), respectively. It was found that partly replacing of Portland cement and sand by steel slag in the mix of Portland cement mortar would enhance calcium silicate hydrate phase and strength of the specimens. The highest compressive strength of the cement mortar with 20 wt% and 40 wt% steel slag substituted by Portland cement and sand at 28 days was 41.17 and 44.66 MPa, respectively.

Department : Materials Science..... Student's Signature

Field of Study : Ceramic Technology..... Advisor's Signature

Academic Year : 2012..... Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่สามารถประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ถ้าไม่ได้รับความกรุณาจาก ผศ. ดร.ศิริธันว์ เจียมศิริเลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งกรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ส่งเสริม สั่งสอน ตักเตือน กระตุ้น และให้ความอิสระในการดำเนินงานอย่างดียิ่งตลอดระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร.สุพัตรา จินาวัดน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ผศ.ดร.วันतीय์ พุกกะคุปต์ และคณาจารย์ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ทุกท่าน ที่อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัยและอำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ เครื่องมือในการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ดร.ปาจริย์ ถาวรนิติ นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่เป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine – Amsler)

ขอขอบพระคุณ คุณศุภิรพันธ์ พันธุ์เลิศ ผู้ช่วยนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยอย่างเสมอมา

ขอขอบคุณ คุณวิระพงษ์ ครอบนม และ นายธนากร เทพามาตย์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ

ขอขอบคุณ บริษัท เกษมศักดิ์เทรตติ้ง จำกัด ที่ให้การสนับสนุน ตะแกรงเหล็กที่ใช้เป็นวัสดุดิบในงานวิจัย

ขอขอบคุณ หน่วยปฏิบัติการวิจัยเซรามิกขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่สนับสนุนเครื่องมือวิเคราะห์ตลอดการวิจัย

ขอขอบคุณ ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนการศึกษาและทุนวิจัยตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และ น้อง ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในทุกๆเรื่องอย่างดีและจริงใจ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นแบบอย่างที่ดี ให้ความหวังใจช่วยเหลือเป็นแรงบันดาลใจในการใช้ชีวิตและการศึกษาในครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 วัสดุปอชโซลาน	3
2.2 ความเป็นมาของการใช้วัสดุปอชโซลาน	4
2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	4
2.3.1 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	5
2.3.2 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	6
2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น	7
2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอชโซลาน	7
2.4.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกั่วเหล็ก	7
2.4.3 ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง	8
2.4.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วพิเศษ	8
2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	8
2.5.1 ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)	8
2.5.2 ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A).....	10
2.5.3 ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF).....	11
2.6 ปฏิกิริยาปอชโซลานิก.....	11
2.7 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	13
2.8 ตะกั่วเหล็ก	13

2.8.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตะกรันเหล็ก.....	15
2.8.2	องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติโดยทั่วไปของตะกรันเหล็ก	15
2.8.3	การใช้ประโยชน์ของตะกรันเหล็ก.....	17
2.9	เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย	20
3.1	การวิเคราะห์วัสดุดิบ	20
3.2	การออกแบบการทดลอง	20
3.2.1	การทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิก	20
3.2.2	การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทรายด้วยตะกรันเหล็ก	22
3.2.3	แผนผังการทดลอง	24
3.3	การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	25
3.3.1	การทดสอบเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ (Setting time).....	25
3.3.2	การทดสอบการไหลตัวของปูนซีเมนต์ผสมเสร็จใหม่ (Slump test)	25
3.3.3	การหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์ (Drying shrinkage)	26
3.3.4	การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ (Rate of water absorption) ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	26
3.3.5	การทดสอบความต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์	27
3.3.6	การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	28
3.3.7	การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	29
บทที่ 4	30
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล		30
4.1	ผลการวิเคราะห์วัสดุดิบและสารเคมี.....	30
4.1.1	ผลการวิเคราะห์เฟสของตะกรันเหล็ก.....	31
4.1.2	การศึกษาพื้นที่ผิวและการกระจายตัวของอนุภาค ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และกากตะกรันเหล็ก.....	32
4.2	ผลการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิก	33
4.2.1	การวิเคราะห์เฟสของปฏิกิริยาปอซโซลานิก.....	33
4.2.2	ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน	37
4.2.3	ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM และ EDS	39

4.3 ผลการทดสอบสมบัติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสริมใยใหม่	42
4.3.1 ค่าการไหลตัวของวิธี Slump test.....	43
4.3.2 ผลการทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์.....	43
4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด.....	44
4.5 ผลการทดสอบการหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	48
4.6 ผลการทดสอบการอัตราดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	51
4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์	52
4.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	56
บทที่ 5.....	59
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	59
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	59
5.1.1 การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิก.....	59
5.1.2 การศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์.....	59
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
รายการอ้างอิง	61
ภาคผนวก	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	76

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ปริมาณของตะกอนเหล็กในประเทศไทยต่างๆ	15
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกอนเหล็ก	15
ตารางที่ 2.3 สมบัติด้านอื่นๆของตะกอนเหล็ก	16
ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของตะกอนเหล็กในประเทศไทยญี่ปุ่น	17
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ ตะกอนเหล็ก	21
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์สูตรแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย	23
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์สูตรแทนที่ทรายด้วยตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก... ..	23
ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	31
ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	33
ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบค่าการไหลตัว Slump test	43
ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์	44
ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 3 วัน	45
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความทนต่อแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 7 วัน	45
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 28 วัน	46
ตารางที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์บ่มที่ 3 วัน	49
ตารางที่ 4.9 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์บ่มที่ 7 วัน	50
ตารางที่ 4.10 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์บ่มที่ 28 วัน	50

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 ปฏิกริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เพสต์	13
ภาพที่ 2.2 ตะกรันเหล็กจากเตา EAF	14
ภาพที่ 2.3 การใช้ประโยชน์ของตะกรันเหล็ก	17
ภาพที่ 3.1 โมลด์ทองเหลืองหล่อซีเมนต์เพสต์	22
ภาพที่ 3.2 แผนผังการทดลอง	24
ภาพที่ 3.3 เครื่อง Vicat apparatus	25
ภาพที่ 3.4 ลักษณะการวางตัวอย่างในการทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำ	27
ภาพที่ 3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine – Amsler)	28
ภาพที่ 4.1 เฟสของตะกรันเหล็ก	32
ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของอนุภาคตะกรันเหล็ก	33
ภาพที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของเพสต์ผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 3 วัน	34
ภาพที่ 4.4 องค์ประกอบทางเฟสของเพสต์ผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 7 วัน	35
ภาพที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของเพสต์ผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 28 วัน	36
ภาพที่ 4.6 กราฟ DTA ของเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 3 วัน	38
ภาพที่ 4.7 กราฟ DTA ของเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 28 วัน	38
ภาพที่ 4.8 กราฟ DTA ของเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:2 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่เปรียบเทียบระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 3 และ 28 วัน	39
ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเพสต์สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ. 40	

ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของเพสต์สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ.....	41
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของเพสต์สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ.....	42
ภาพที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงอัดใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก บ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน	47
ภาพที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงอัดการใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ทราย 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก บ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน.....	48
ภาพที่ 4.14 อัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption)	51
ภาพที่ 4.15 อัตราการดูดซึมน้ำช่วง 2 (Secondary Rate of Water Absorption)	52
ภาพที่ 4.16 เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สูตร C	53
ภาพที่ 4.17 เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สูตร SS3.....	55
ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบเฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สูตร C และ สูตร SS3 (b) เปรียบเทียบองค์ประกอบเฟสแบบ Quantitative (%) สูตร SS3 บ่มที่ 28 วัน	56
ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ.....	57
ภาพที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร SS3 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานวิจัยในปัจจุบันนี้มีการหันมาเอาใจจริงเอาใจกับการลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่ดีและมีประโยชน์ที่จะสามารถช่วยลดขยะและของเสียได้มาจากแหล่งต่างๆมากมาย เช่น ของเสียที่มากจากชุมชน ของเสียที่มากจากสถานที่ท่องเที่ยว และของเสียที่มากจากแหล่งของโรงงานอุตสาหกรรมด้านต่างๆ เป็นต้น และของเสียที่มาจากอุตสาหกรรมจึงมีนักวิจัยมากมายที่ได้ใช้ความรู้ความสามารถใช้เครื่องมือต่างๆมากมายวิเคราะห์หาประโยชน์ที่ยังหลงเหลือของของเสียเหล่านั้นๆทั้งที่ยังมีความเป็นพิษหรือหมดไปแล้ว โดยงานวิจัยอันดับต้นๆที่มีการนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่คือการนำไปเป็นส่วนผสมของคอนกรีต และของเสียส่วนใหญ่ๆนั้นก็เช่น fly ash ที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหิน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ดี ซิลิกาฟุ้ง (silica fume) ที่ได้จากกระบวนการรีดักชันจากควอร์ต เป็นตัวที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีและเร็วมาก และตะกรันเหล็ก ที่ได้มาจากโรงงานถลุงเหล็กที่มีมากมายตามประเทศต่างๆซึ่งสร้างปริมาณของเสียในแต่ละปีนั้นมากมายแต่ตะกรันเหล็กนั้นก็ยังมีประโยชน์ในงานด้านคอนกรีตมากมายและเป็นอีกตัวที่มีสมบัติในการทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับ ซิลิกาฟุ้ง คือเป็นตัวที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดีแต่ต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของสารปอซโซลาน (Pozzolan) ก่อนนำไปใช้งาน โดยปฏิกิริยาของปอซโซลานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีสถานะความชื้นและอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เหมาะสม จึงจะทำให้ได้สารประกอบที่แสดงสมบัติเชื่อมประสานที่ดี

ตะกรันเหล็กส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากแหล่งผลิตจากเตาหลอมเหล็ก 2 ชนิดในกระบวนการหลอมเหล็ก คือ เตา Basic Oxygen Furnace (BOF) และ เตา Electric Arc Furnace (EAF) ซึ่งพบว่าจะได้ปริมาณตะกรันเหล็กร้อยละ 10-15 ของปริมาณเหล็กที่ใช้ผลิตในแต่ละปี ปริมาณของตะกรันเหล็ก จะแตกต่างกันในแต่ละประเทศ องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก จากแหล่งต่างๆประกอบด้วย CaO , Fe , SiO_2 , MgO และ MnO สำหรับธาตุ Fe ในตะกรันเหล็ก จะอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น iron oxide แต่องค์ประกอบของขนาดเกรน และ องค์ประกอบทางเคมีของเฟส ล้วนขึ้นอยู่กับกระบวนการเย็นตัว เช่น ถ้าปล่อยให้เย็นตัวช้าๆสำหรับตะกรันเหล็กที่มาจากเตา Basic Oxygen Furnace จะเกิดขนาดของเกรนที่ใหญ่กว่าการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นความเป็นไปได้ในการนำตะกรันเหล็กมาใช้เป็นสารปอซโซลานทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์และทราย เพื่อเป็นการรักษาสภาพแวดล้อมโดยการลดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์และช่วยลดค่าใช้จ่ายในงานคอนกรีตรวมทั้งลดค่าใช้จ่ายในการ

กำจัดของเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆสามารถทำได้โดยการนำกลับมาใช้ใหม่ โดยวิธีที่ใช้กันแพร่หลายคือการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในงานคอนกรีต ซึ่งการนำมาใช้งานให้มีประสิทธิภาพจะต้องเตรียมให้อยู่ในรูปของวัสดุปอซโซลาน สำหรับของเสียจากอุตสาหกรรมโลหะที่ใช้ในงานวิจัยคือ ตะกรันจากอุตสาหกรรมหลอมเศษเหล็กจากเตา Electric Arc Furnace (EAF steel slag) โดยที่วัสดุปอซโซลานที่เตรียมได้ต้องมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ดีและจะต้องส่งผลให้ค่าความสามารถในการต้านทานแรงอัดของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นเมื่อนำมาใช้ในส่วนผสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์และแทนที่ทรายตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) โดยการนำตะกรันเหล็กมาผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์
2. ศึกษาการใช้ตะกรันเหล็กเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์และแทนที่ทรายในซีเมนต์มอร์ตาร์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกโดยนำตะกรันเหล็กผสมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์
2. ใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ต่อตะกรันเหล็กที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 สำหรับศึกษาปฏิกิริยาของเพสต์ที่เกิดขึ้น
3. ศึกษาปฏิกิริยาของชิ้นงานเพสต์ ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน
4. ใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 แทนที่ทรายร้อยละ 0, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 สำหรับทดสอบสมบัติต่างๆของมอร์ตาร์รวมทั้งความต้านทานแรงอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตาม ASTM C 109/C 109M-95⁽¹⁾

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถใช้ประโยชน์ตะกรันเหล็กมาเป็นวัสดุปอซโซลาน
2. ใช้ประโยชน์จากตะกรันเหล็กเพื่อทดแทนปูนซีเมนต์และทรายในซีเมนต์มอร์ตาร์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ตะกรันเหล็กถูกนำมาทดสอบการใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย ทั้งตะกรันจากอุตสาหกรรมหลอมเศษเหล็กที่ได้มาจากเตา Electric Arc Furnace (EAF) ที่นำมาใช้เป็นวัสดุเติมในการทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์และแทนที่ทราย จากการศึกษาสมบัติในเบื้องต้นพบว่า ตะกรันเหล็กและมีออกไซด์ของธาตุหลักต่างๆเช่นเดียวกับที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์คือ SiO_2 , Al_2O_3 และ CaO รวมกันมีมากกว่าร้อยละ 70 ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ จึงศึกษาความเป็นไปได้ในการนำตะกรันเหล็กมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานเพื่อทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์และทราย

2.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan)

วัสดุปอซโซลาน เป็นที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานเมื่อนำมาใช้ประโยชน์จะเป็นผลดีต่ออุตสาหกรรมปูนซีเมนต์มาก เพราะวัสดุปอซโซลานมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่าปูนซีเมนต์ จึงส่งผลให้ราคาของต้นทุนการผลิตนั้นลดลงและส่งผลกระทบต่อค่าแรงค่าวัสดุที่ลดลงตามไปด้วย แต่ก็ยังมีวัสดุปอซโซลานบางชนิดที่ยังมีการนำเข้าจากต่างประเทศและราคายังสูงอยู่คือ ซิลิกาฟูม ขณะเดียวกันภายในประเทศเองยังมีวัสดุปอซโซลานอีกหลายชนิดที่มีคุณประโยชน์มากพอที่นำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ เช่น ถ้ำถ่านหิน ถ้ำแกลบ และ ตะกรันเหล็ก เป็นต้น

วัสดุปอซโซลานนอกจากใช้ปรับสมบัติของคอนกรีตเช่นเดียวกับการใช้วัสดุเฉื่อยแล้วยังทำให้คอนกรีตมีความต้านทานแรงอัดเพิ่มขึ้น⁽³⁾ และความทนทานที่ดีขึ้นด้วย เนื่องจากวัสดุเหล่านี้มีความเป็นปูนซีเมนต์ในตัวเอง ดังนั้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีจะให้สารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เหมือนกับปฏิกิริยาของ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate; C_3S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate; C_2S) แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะช้ากว่าและความต้านทานแรงอัดในช่วงแรกจะต่ำกว่าการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อย่างเดียว

มาตรฐาน ASTM C618⁽²⁾ ให้ความหมายของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือ อลูมินา เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานจะไม่มีสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จึงสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติยึดประสาน”

วัสดุปอซโซลานเมื่อใช้ผสมคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่จะช้ากว่า ดังนั้นจึงสามารถใช้วัสดุปอซโซลานเพื่อลดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉพาะในงานคอนกรีตขนาดใหญ่ได้ด้วย

2.2 ความเป็นมาของการใช้วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลานเป็นสิ่งที่ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่สมัยโบราณ โดยชาวอียิปต์โบราณใช้มอร์ตาร์ (mortar) ทำจากยิปซัมที่ผ่านการเผาเพื่อใช้ก่อสร้างในหลายๆประเภท รวมทั้งใช้เป็นวัสดุประสานระหว่างหินของปิรามิดแห่งเคออปส์ (Pyramid of Cheops) ในราวๆ 3,000 ปีก่อนคริสตกาล ยิปซัมที่ใช้จะผ่านการเผาเพื่อนำมารวมกับน้ำและจะก่อตัว แต่ไม่สามารถแข็งตัวในน้ำได้ ต่อมาชาวโรมันเรียนรู้จากชาวกรีกในการใช้ปูนขาว และในขณะเดียวกันชาวอียิปต์เริ่มมีการใช้ปูนขาวในยุคสมัยเดียวกับชาวโรมัน การแข็งตัวของปูนขาวนั้นเกิดมาจากการรวมตัวกับน้ำและทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ ดังนั้นการแข็งตัวของมอร์ตาร์ที่ทำขึ้นจากปูนขาวจึงมีการแข็งตัวจากภายนอกสู่ภายในและด้วยการที่ปูนขาวต้องการคาร์บอนไดออกไซด์ดังนั้นปูนขาวจึงไม่สามารถที่จะแข็งตัวในน้ำได้ ชาวโรมันจึงแก้ปัญหาด้วยการผสมปูนขาวให้เข้ากันได้ดีและอัดลงแบบให้แน่นเพื่อให้สิ่งที่จะก่อสร้างเกิดความแข็งแรงและคงทนถาวร ด้วยเหตุนี้สิ่งก่อสร้างในยุคสมัยนั้นจึงสามารถอยู่ทนสภาวะอากาศของการเปลี่ยนแปลงโลกได้มาจนถึงปัจจุบันให้เราได้พบเห็นกัน อย่างเช่น โคลีเซียม (Coliseum) ในกรุงโรม ประเทศอิตาลี⁽³⁾

2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement)

เป็นตัวช่วยยึดประสานโครงสร้างของคอนกรีตทำให้คอนกรีตแข็งแรงขึ้น โดยปูนซีเมนต์จะมีอยู่หลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันแบ่งได้ 5 ชนิดหลักๆ คือ⁽³⁾

ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เหมาะสำหรับงานคอนกรีตทั่วไปที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา เช่น สะพาน ถนน สนามบิน และใช้งานในสภาวะอากาศที่ไม่รุนแรง เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland Cement) เหมาะสำหรับใช้กับงานคอนกรีตที่เกิดความร้อนสูงหรือทนต่อเกลือของซัลเฟตได้บ้างพอสมควร เช่น งานก่อสร้างเขื่อน

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดแข็งตัวเร็วหรือให้กำลังอัดเร็ว (High Early Strength Portland Cement) โดยสามารถให้กำลังที่สูงในช่วงระยะ 7 วันแรกของการบ่ม เพราะมีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ธรรมดาและมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันคือ มีปริมาณสารประกอบของ C_3A มากกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งช่วยให้ปฏิกิริยาในซีเมนต์เกิดขึ้นได้รวดเร็วใน

ช่วงแรก เหมาะสำหรับการทำคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็วหรืองานที่ต้องการใช้เร่งด่วน เช่น ถนนที่มีการจราจรคับคั่ง แต่มีข้อควรระวังคือ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ในงานที่มีโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เช่น สร้างเขื่อน เพราะความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เกิดขึ้นสูงมาก ซึ่งอาจทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวได้

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่มีอัตราการคายความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์ที่ต่ำ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างขนาดใหญ่ เช่น การสร้างเขื่อน เนื่องจากคุณสมบัติของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงจากการแตกร้าวของคอนกรีตเนื่องจากการคายความร้อน

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดต้านทานซัลเฟตได้สูง (Sulphate Resistant Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้จะทนต่อซัลเฟตได้สูง เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate; C_3S) ที่ต่ำเหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟตมาก เช่น งานที่มีการก่อสร้างบริเวณทะเลหรือใกล้ทะเล แต่ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ให้กำลังรับกำลังอัดที่ค่อนข้างช้า

2.3.1 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีดังนี้คือ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ซึ่งสมบัติต่างๆของสารประกอบหลักมีดังนี้⁽³⁾

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate, $3CaO \cdot SiO_2$) หรือ C_3S จะมียุ่่มากที่สุดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 45 – 55 สมบัติของสารประกอบ C_3S จะเหมือนกันกับสมบัติของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายในเวลา 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกของการบ่ม การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อนประมาณ 500 จูลต่อกรัม ปริมาณของสารประกอบ C_3S ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 35-55

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate, $2CaO \cdot SiO_2$) หรือ C_2S มีปริมาณร้อยละ 15 – 35 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สมบัติของสารประกอบ C_2S จะเหมือนกันกับสมบัติของสารประกอบ C_3S เมื่อผสมน้ำจะเกิดการแข็งตัว มีการพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกันกับสารประกอบ C_3S ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบ C_2S จะก่อให้เกิดความร้อนประมาณ 250 จูลต่อกรัม และปริมาณของสารประกอบ C_2S ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 15-35

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium Aluminate, $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) หรือ C_3A สารประกอบ C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำในทันที ก่อให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วและเกิดความร้อนขึ้นอย่างมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม กำลังอัดของสารประกอบ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายในระยะเวลาบ่ม 1-2 วัน แต่พบว่าค่ากำลังอัดที่ได้ค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับ C_3S ส่วนปริมาณของสารประกอบ C_3A ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 7-15

4. เทตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite, $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$) หรือ C_4AF จะทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาทีที่เหมือนกับปฏิกิริยาของสารประกอบ C_3A แต่เกิดความร้อนขึ้นน้อยกว่า ประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดที่ได้ค่อนข้างต่ำ ปริมาณของสารประกอบ C_4AF ในปูนซีเมนต์จะมีประมาณร้อยละ 5-10

สรุปสมบัติที่สำคัญของสารประกอบหลักทั้ง 4 ชนิดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ ดังตารางที่ 2.1⁽³⁾

ตารางที่ 2.1 สมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สมบัติ	สารประกอบ			
	C3S	C2S	C3A	C4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว(ชั่วโมง)	ช้า(วัน)	ทันที	เร็วกว่า(นาที)
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว(วัน)	ช้า(สัปดาห์)	เร็วมาก(1วัน)	เร็วมาก(1วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

2.3.2 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

สารประกอบแต่ละชนิดจะส่งผลต่อสมบัติของปูนซีเมนต์อย่างน้อยแตกต่างกันดังนี้⁽³⁾

1. ยิปซัม ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดเม็ดปูนซีเมนต์ เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการก่อตัวเร็วเกินไปของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เฟสต์เมื่อเกิดการแข็งตัวแล้วไม่ขยายตัวและแตกร้าวได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่าง C_3A กับ ยิปซัม ทำให้เกิด เอททริงไกต์ (ettringite) เพิ่มขึ้นจากเดิมถ้าหาปริมาณยิปซัมที่ไม่เหมาะสมซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยานั้นเกิดขึ้นต่อเนื่องแม้ว่าซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเป็นเหตุให้มีการแตกร้าวของซีเมนต์ได้

2. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) การผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) เป็นวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์ เมื่อผ่านการเผาจะสลายตัวเป็นตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นเม็ดปูนซีเมนต์ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO โดยจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆหลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ทำให้เกิดสารประกอบที่ไม่อยู่ตัว

3. อัลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O และ K_2O) ที่อยู่ในปูนซีเมนต์จะส่งผลเสียต่อคอนกรีตกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ได้มาผสมเป็นคอนกรีต โดยผลจากปฏิกิริยาก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวได้

2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทอื่น

นอกจากจะมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้ง 5 ประเภท ที่องค์ประกอบหลักๆส่วนใหญ่เป็น C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ในสัดส่วนปริมาณที่ต่างกัน แต่ยังมีปูนซีเมนต์ประเภทอื่นที่มาจากการเพิ่มสารประกอบอื่นระหว่างการเผา หรือนำมาบดกับปูนเม็ด⁽³⁾ ได้แก่

2.4.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน (Portland pozzolana cement) ได้จากการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับวัสดุปอซโซลาน สวมมากแล้วการที่ผสมวัสดุปอซโซลานกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์จะทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง กำลังในระยะแรกลดลงเพิ่มความสามารถในการต้านทานสารละลายซัลเฟต ลดปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา ปริมาณของการผสมวัสดุปอซโซลานจะอยู่ที่ระหว่าง 15 – 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

2.4.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเหล็ก

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเหล็ก (Portland blast furnace slag cement) เป็นซีเมนต์ที่ได้มาจากการบดตะกรันเหล็กกับปูนเม็ด ส่วนมากจะใช้ตะกรันเหล็กในช่วงร้อยละ 25 – 70 ของวัสดุซีเมนต์ เมื่อตะกรันเหล็กทำปฏิกิริยาจะให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเหมือนกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S แต่ปฏิกิริยาที่เกิดจากตะกรันเหล็กจะช้ากว่า เช่นนี้การรับกำลังในระยะแรกจะต่ำกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันก็จะต่ำกว่า แต่การต้านทานต่อสารละลายซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ตะกรันเหล็กจะดีขึ้น เพราะปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง แต่ในประเทศไทยยังไม่มีการผลิต

2.4.3 ปูนซีเมนต์ซัลเฟตสูง

ทำจากการบดตะกั่วเหล็กประมาณร้อยละ 80 – 85 กับแคลเซียมซัลเฟต (ยิปซั่มที่ผ่านการเผาจัดน้ำ) ประมาณร้อยละ 10 – 15 และมีปูนเม็ดร้อยละ 5 ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำกว่าและทนต่อซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ตะกั่วเหล็ก และสามารถทนต่อการกัดกร่อนของกรดเหมาะสำหรับทำท่อน้ำทิ้ง

2.4.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็วพิเศษ

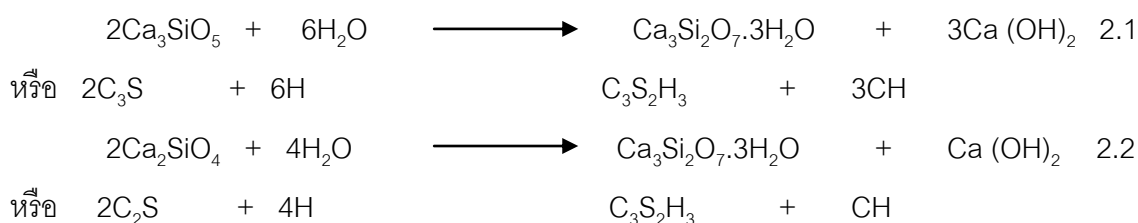
ทำมาจากการที่บดสารแคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride) ประมาณร้อยละ 1 – 2 กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 โดยที่แคลเซียมคลอไรด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ให้แข็งตัวเร็วขึ้นและเนื่องจากปูนประเภทนี้แข็งตัวเร็วมากจึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องการกำลังระยะแรกสูงเป็นพิเศษ

2.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะเกิดแบบอาศัยสารละลาย และเมื่อเพสต์เกิดการแข็งตัวแล้วจะเกิดปฏิกิริยาขึ้นระหว่างของแข็ง สำหรับปูนซีเมนต์จะประกอบไปด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องได้สารประกอบอีกหลายรูปแบบ โดยแยกเป็นส่วนๆดังต่อไปนี้

2.5.1 ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C₃S) และ ไดแคลเซียมซิลิเกต (C₂S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไดแคลเซียมซิลิเกต อยู่ในกลุ่มสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะทำปฏิกิริยาได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO .2SiO₂ .3H₂O, CSH) และ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂, CH) ดังสมการที่ 2.1 – 2.2⁽³⁾



ขั้นตอนในการทำปฏิกิริยาแบ่งออกได้เป็นสามช่วงคือ ช่วงที่ 1 เมื่อผสม C₃S กับน้ำจะเกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วและจะลดลงจนหยุดในเวลา 15 นาทีแรก ช่วงที่ 2 ปฏิกิริยาจะแทบไม่

เกิดขึ้นเลยเรียกว่าระยะดอร์แมนต์ (dormant period) หรือเรียกว่าระยะสงบในระยะนี้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะอยู่ในสภาพพลาสติกเป็นเวลาหลายชั่วโมงซึ่งช่วงนี้ทำให้สามารถเทหรือหล่อคอนกรีตเข้าแบบได้ และหลังจากนี้ C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอีกครั้งก็จะเข้าสู่ช่วงที่ 3 ช่วงระยะนี้มีการคายความร้อนออกมาอย่างต่อเนื่องและความร้อนจะเกิดขึ้นสูงสุดเมื่ออายุได้ 4 – 8 ชั่วโมงและที่เวลานี้ก็จะเกิดการก่อตัวสุดท้ายขึ้น หลังจากนั้นปฏิกิริยาจะค่อยๆลดลงและเมื่อเวลานานขึ้นปฏิกิริยามีการเกิดขึ้นน้อยมากและยังมีต่อไป ส่วน C_2S จะเกิดปฏิกิริยาเช่นเดียวกับ C_3S กับน้ำ แต่ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นช้ากว่าเพราะ C_2S ไม่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยามากกับ C_3S ดังนั้นความร้อนที่ได้จากการเกิดก็จะน้อยตามไปด้วย

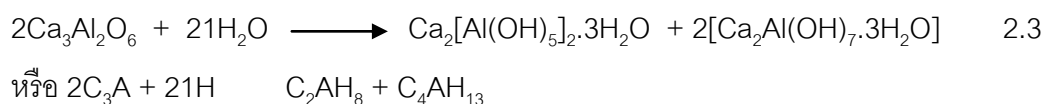
สิ่งที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาของ C_3S และ C_2S มีดังต่อไปนี้⁽³⁾

1. แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นจึงมีความสำคัญต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์มากที่สุด แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเริ่มเกิดขึ้นมาก เมื่อพ้นระยะดอร์แมนต์ โดยจะเกิดขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ขยายออกจากเม็ดปูนซีเมนต์เข้าสู่ช่องว่างและเกิดภายใต้ผิวเดิมของเม็ดปูนซีเมนต์ ขยายเข้าสู่ภายในเม็ดปูนซีเมนต์ เมื่อเกิดปริมาณมากและเชื่อมโยงถึงกันก็จะสามารถต้านทานแรงอัดได้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีอยู่ประมาณร้อยละ 50-70 โดยปริมาตร และอยู่ในรูปของอนุภาคเล็กๆมีขนาดประมาณสารแขวนลอย (เล็กกว่า 1 ไมโครเมตรทุกมิติ) และมีความเป็นผลึกน้อยมาก อัตราส่วนของสารประกอบแคลเซียมต่อซิลิเกตในแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณน้ำที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา สัญลักษณ์ทางเคมี $C_3S_2H_3$ เป็นเพียงค่าเฉลี่ยโดยประมาณของสารประกอบที่เกิดขึ้น⁽³⁾

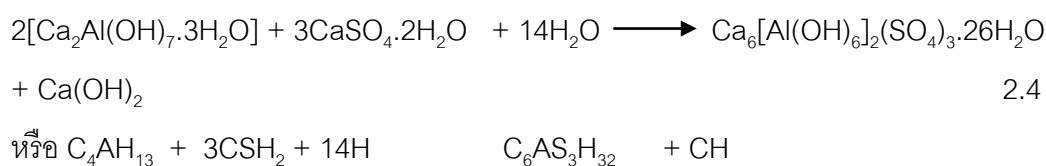
2. แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ซีเมนต์เพสต์ประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ปริมาณร้อยละ 20-25⁽³⁾ โดยปริมาตร เป็นผลึกที่มีรูปร่างหลายแบบ เมื่อสารละลายในซีเมนต์เพสต์มีความเข้มข้นมากพอจะทำให้ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ตกผลึก ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง หลังจากนั้นจะเพิ่มจำนวนและขยายตัวเข้าสู่โพรงคาปิลารี โดยแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะขยายเข้าสู่ที่ว่างในโครงสร้างเท่านั้นและหยุดเมื่อไม่มีช่องว่างเหลืออยู่ แคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารประกอบที่ทำให้ ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลง เนื่องจากเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้และถูกชะล้างออกมาได้ง่าย นอกจากนี้กำลังอัดของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังค่อนข้างต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดที่ได้จากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

2.5.2 ปฏิกริยาของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C₃A)⁽³⁾

ปฏิกริยาของสารประกอบ C₃A จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างฉับพลันของซีเมนต์เพสต์ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.3



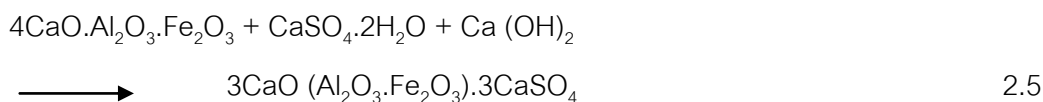
ปฏิกริยาดังกล่าวทำให้เกิดการก่อตัวอย่างรวดเร็วมากจนเกินไป จำเป็นต้องผสมยิปซัม เพื่อหน่วงปฏิกริยาดังกล่าว เพราะอนุภาคของ C₃A จะทำปฏิกริยากับไอออนของซัลเฟต (SO₄²⁻) ได้ สารประกอบแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตไฮเดรต (Ca₆[Al(OH)₆]₂(SO₄)₃·26H₂O) หรือเรียกว่า เอททริงไกต์ โดยยิปซัมจะเข้าทำปฏิกริยากับอนุภาคของ C₃A ก่อให้เกิดชั้นของเอททริงไกต์ บนผิวของอนุภาคของ C₃A แสดงดังสมการที่ 2.4⁽⁴⁾



ปฏิกริยาของการเกิด เอททริงไกต์ แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงเช่นกัน ช่วงที่ 1 ปฏิกริยาจะเกิดอย่างรวดเร็วและทำให้เกิดเอททริงไกต์ ที่มีลักษณะยาวคล้ายเข็มจะเกิดขึ้นเมื่อมีไอออนของ SO₄²⁻ ที่เพียงพอ การเกิดเอททริงไกต์เพิ่มมากขึ้นรอบอนุภาค C₃A ทำให้ปฏิกริยาเกิดได้ยากขึ้นและปฏิกริยาดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ช่วงที่ 2 ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นค่อนข้างน้อยและใช้เวลานานหลายชั่วโมง เมื่อไอออนของ SO₄²⁻ ทำปฏิกริยาหมดแล้วอนุภาค C₃A จะทำปฏิกริยากับเอททริงไกต์ และเปลี่ยนไปเป็นเอททริงไกต์ที่มี SO₄²⁻ น้อยลง เรียกว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนต (3(Ca₄[Al₂(OH)₁₄](SO₄)·5H₂O)) และช่วงที่ 3 ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นเมื่อระยะเวลาประมาณ 12-36 ชั่วโมง แคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตจะสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นเอททริงไกต์เมื่อได้ไอออนของ SO₄²⁻ ซึ่งเป็นเหตุผลหลักของการเกิดการกัดกร่อนของซัลเฟต เพราะ เอททริงไกต์มีปริมาณมากกว่าแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตมาก จึงทำให้คอนกรีตขยายตัวและแตกร้าวได้⁽⁴⁾

2.5.3 ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C₄AF)

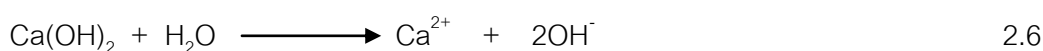
ปฏิกิริยาของ C₄AF จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม และ Ca(OH)₂ แสดงดังสมการที่ 2.5⁽⁴⁾



ปฏิกิริยาของ C₄AF คล้ายกับปฏิกิริยาของ C₃A แต่เกิดขึ้นช้ากว่าและมีความร้อนของปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อยกว่า โดยสารประกอบเหล็กออกไซด์จะทำปฏิกิริยาคลายกับอลูมิเนียมออกไซด์ และสามารถแทนที่กันได้ ยิปซัมจะเข้าห่วงปฏิกิริยาของ C₄AF มากกว่าการห่วงปฏิกิริยาของ C₃A ปฏิกิริยาระหว่าง C₄AF และยิปซัมทำให้เกิดแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตและซัลโฟเฟอร์ไรต์ ผลผลิตนี้มีลักษณะเหมือนเข็มคล้ายกับเอททริงไกต์และสามารถเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของ แคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ที่มีซัลเฟตต่ำลงได้ ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C₄AF มาก และ C₃A ต่ำสามารถทนทานต่อการทำลายของซัลเฟตได้ดี ซึ่งแสดงว่าการเปลี่ยนกลับเป็นเอททริงไกต์ จากแคลเซียมโมโนซัลโฟลูมิเนตที่เกิดจาก C₄AF ไม่เกิดขึ้น

2.6 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก⁽⁵⁾

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกเกิดขึ้นเมื่อมีส่วนผสมระหว่าง แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ สารปอซโซลานผสมกับน้ำทำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ในของผสมเกิดปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิสขึ้นในขั้นแรก เนื่องจาก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายในน้ำได้ดี ซึ่งจะทำให้สารละลายมีค่า pH สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (pH 12.5 ที่ 20°C) เนื่องจาก OH⁻ ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ 2.6

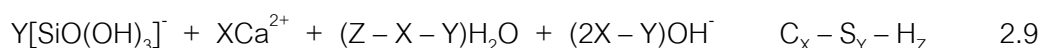


เมื่อสารละลายมีค่า pH อยู่ที่ประมาณ 12.5 จะส่งผลให้สารปอซโซลานละลายมากขึ้นและจะทำให้ความเข้มข้นในโครงร่างของ Ca²⁺, OH⁻, Na⁺, SO₄²⁻ ที่อยู่ในสารปอซโซลาน จะละลายในสารละลายอย่างรวดเร็วเพิ่มมากขึ้น ส่วน ซิลิเกต หรือ อลูมิโนซิลิเกต จะเกิดการแตกออกของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อ pH มีค่าสูงขึ้นที่เล็กลงและละลายในสารละลาย ซึ่งในสารละลายจะมีอัตราส่วนของ

สาร Ca^{2+} , OH^- , Na^+ , SO_4^{2-} ละลายอยู่ในปริมาณที่มากกว่า ซิลิเกต หรือ อลูมิโนซิลิเกต เนื่องจากค่าพลังงานพันธะของ Ca^{2+} , OH^- , Na^+ , SO_4^{2-} ต่ำกว่า ซึ่งปฏิกิริยาที่ได้ดังสมการที่ 2.7 – 2.8



และเมื่อ Ca^{2+} เข้าทำปฏิกิริยากับสารละลาย โมโนซิลิเกต และ อลูมิเนต จะทำให้ได้สารประกอบของสารเชื่อมประสานทั้ง แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) ดังสมการที่ 2.9 – 2.10



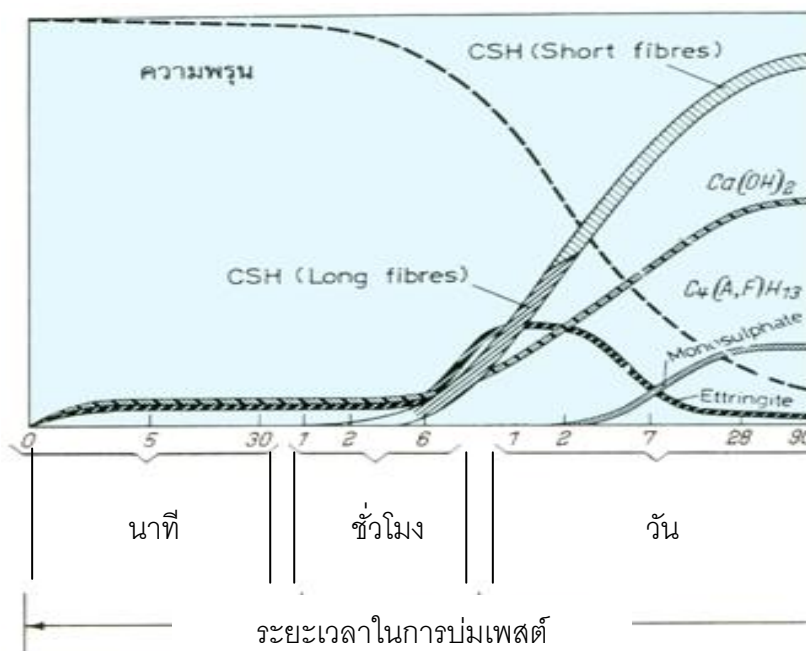
ซีเมนต์เพสต์ของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ สารปอซโซลาน ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน ที่ 23°C ยังมีค่าความต้านทานแรงอัดที่ไม่สูงพอ ซึ่งจากการศึกษาด้วย SEM อนุภาคของสารปอซโซลานถูกเคลือบด้วยชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล เนื่องจาก การละลายของ โมโนซิลิเกต จะกระจายได้มากและเร็วกว่าการละลายของ อลูมิเนต และผลของความเข้มข้นที่สูงกว่าของ Ca^{2+} จะจำเป็นสำหรับโครงสร้างของ แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต มากกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จึงทำให้ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เกิดได้เร็วกว่า และการตกผลึกของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จึงเกิดขึ้นที่รอบๆผิวของอนุภาคสารปอซโซลาน ส่วนโครงสร้างของ Hexagonal plate (C_4AH_{13}) จะตกผลึกภายนอกผิวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

โดยตามมาตรฐาน ASTM C 618-91⁽⁶⁾ จำแนกสารปอซโซลานออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

1. ประเภท N สารปอซโซลานที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Pozzolans) ได้แก่ วัสดุที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟ (Volcanic Tuff) และหินพูน (Pumicite)
2. ประเภท F สารปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolans) คือ วัสดุที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อนโดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ ได้แก่ ดินเหนียว หินเชล (Shale) หินที่มีซิลิกาเป็นองค์ประกอบ ซี้ไถ้แอลบ และซี้ไถ้ลอย เป็นต้น
3. ประเภท C เป็นสารปอซโซลานที่ได้จากการผ่านกระบวนการทางความร้อน โดยการเผาวัตถุดิบที่ได้จากธรรมชาติ เช่นเดียวกับข้อ 2 แต่มีปริมาณผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ที่แตกต่างกัน

2.7 โครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์

ผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์แสดงดังภาพที่ 2.1 แผนภาพแสดงกระบวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและโครงสร้างของซีเมนต์เฟสท์ โดยอนุภาคของปูนซีเมนต์จะแสดงด้วยอนุภาคสีดำ ในขณะที่ Ca(OH)_2 จะแสดงด้วยรูป 6 เหลี่ยม ผลึกของ เอททริงไทต์แสดงโดยเส้นบางๆ สั้นๆ และ CSH แสดงโดยเส้นเข็มมีความยาวพอสมควร จากภาพที่ 2.1 จะพบว่าระหว่างระยะคอรีเมนต์ อนุภาคปูนซีเมนต์จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ก่อให้เกิด Ca(OH)_2 และ เอททริงไทต์เป็นส่วนใหญ่หลังจาก 1 ชั่วโมงผ่านไป CSH Gel เริ่มเกิดขึ้นโดยมีรูปร่างเป็นเส้นใยยาว การเกิดและการขยายตัวของ CSH Gel นี้ก่อให้เกิดการก่อดัวในขณะที่ปริมาณเพิ่มขึ้น ความพรุนของซีเมนต์เฟสท์จะลดลงและกำลังอัดจะเริ่มพัฒนาขึ้น หลังจาก 24 ชั่วโมงไปแล้ว SO_4^{2-} ถูกใช้หมดไป C_3A และ C_4AF เริ่มก่อดัวและ เอททริงไทต์ถูกเปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมโมโนซัลไฟฟลูออรีนส่วน C_3S และ C_2S จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไปได้ CSH ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยโดยผลิตภัณฑ์ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทั้งหมดนี้จะไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ ทำให้ความพรุนของซีเมนต์เฟสท์ลดลงในระยะยาว⁽⁴⁾



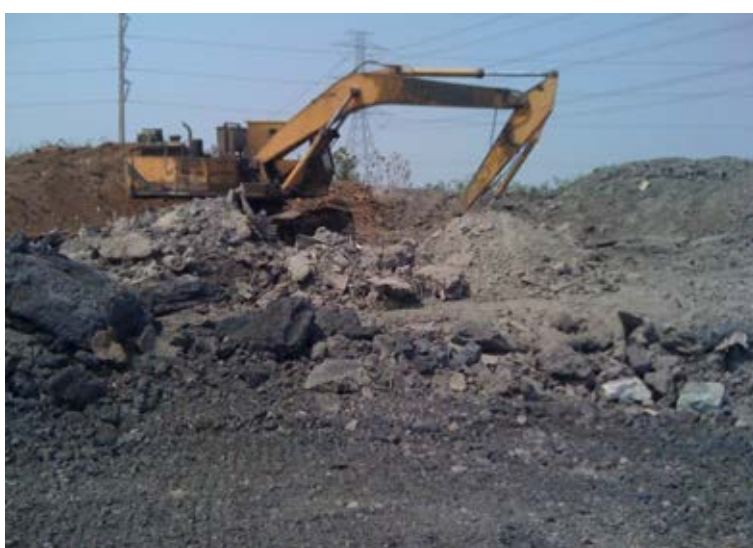
ภาพที่ 2.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เฟสท์⁽⁴⁾

2.8 ตะกรันเหล็ก (Steel Slag)

ตะกรันเหล็กเกิดจากกระบวนการปรับปรุงสมบัติของน้ำเหล็ก ในการหลอมเศษเหล็กเศษเหล็กส่วนใหญ่แล้วจะมีปริมาณองค์ประกอบที่เกินกว่ามาตรฐานที่ต้องการเสมอ เช่น คาร์บอน ซิลิคอน แมงกานีส ไททาเนียม ฟอสฟอรัส และซัลเฟอร์ จึงมีการทำให้น้ำเหล็กมีองค์ประกอบตาม

ต้องการ ต้องมีการกำจัดหรือลดปริมาณสารประกอบเหล่านี้ผ่านทางปฏิกิริยาเคมีด้วยการใส่สารสร้างตะกั่ว เช่น หินปูนขาวหรือปูนขาว ลงไป ตะกั่วจึงเป็นสารประกอบไอโอดีนที่ประกอบด้วยซิลิกา อะลูมินา หินปูน แมกนีเซียม เหล็กออกไซด์และแมงกานีสออกไซด์ องค์ประกอบทางเคมีของตะกั่วเหล่านี้ค่อนข้างไม่คงที่เท่าใดนักโดยมีตะกั่วเกิดขึ้นหลักๆ คือ

1. ตะกั่วที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF slag) มีปริมาณเหล็กออกไซด์เจือปนค่อนข้างสูงประมาณร้อยละ 25-40 โดยน้ำหนัก มีแคลเซียมออกไซด์ และซิลิกอนออกไซด์ที่ประมาณร้อยละ 30 และ 15 มีสีดำค่อนข้างเข้ม จัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษ ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 ตะกั่วเหล็กจากเตา EAF

2. ตะกั่วที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็ก (Ladle furnace) มีฤทธิ์เป็นด่างกว่ามาก เนื่องจากมีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ (มาจากปูนขาว) ต่อซิลิกาค่อนข้างสูง มีแคลเซียมออกไซด์อยู่ประมาณร้อยละ 35-60 โดยน้ำหนัก มีสีเทาเข้ม แข็ง และมักมีเหล็กเจือปนมาด้วย ตะกั่วที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็กจัดเป็นวัสดุไม่ใช้แล้วที่ไม่มีพิษเช่นเดียวกับตะกั่วที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้า

ตะกั่วที่เกิดขึ้นในเตาอาร์คไฟฟ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ นิยมใช้เป็นมวลรวมผสมในยางมะตอยสำหรับงานก่อสร้างถนน และวัสดุกรูพื้นถนนมากกว่าตะกั่วที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็ก เพราะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำกว่า จากการศึกษาวิจัยตะกั่วที่เกิดขึ้นในเตาถลุงน้ำเหล็กสามารถนำกลับมาใช้ในรูปของวัสดุอุดซบเท้าคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นโครงสร้างสำหรับชายฝั่งทะเลและยังสามารถใช้เป็นฟลักซ์แทนปูนขาวในกระบวนการหลอมเศษเหล็กกล้าได้บางส่วน⁽³⁾

2.8.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับตะกรันเหล็ก⁽⁷⁾

พบปริมาณตะกรันเหล็กที่เกิดจากอุตสาหกรรมโลหะจากทั้งทวีปเอเชียและยุโรปที่มีมากถึง 10–15 ล้านตัน นับว่าเป็นปริมาณที่ไม่น้อยเลยเมื่อดูจากโดยรวม จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการใช้ประโยชน์จากของเสียที่เกิดขึ้น ดังตารางที่ 2.1

ตาราง 2.1 ปริมาณของตะกรันเหล็กในประเทศต่างๆ⁽⁷⁾

Country	Steel slag(BOF+EAF) (Million ton)	Reference
Europe	12	Motz and Geiseler (2001)
USA	8	Proctor et al.(2000)
China	14.07	Huang and Wang (2001)
Japan	12.6	Okumura (1993)

2.8.2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติโดยทั่วไปของตะกรันเหล็ก

องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก จากแหล่งต่างๆ โดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของตะกรันเหล็กประกอบด้วย CaO, Fe, SiO₂, MgO และ MnO สำหรับธาตุ Fe ใน ตะกรันเหล็กจะอยู่ในหลายรูปแบบ เช่น iron oxide ถ้าพิจารณาค่าองค์ประกอบทางเคมีในแต่ละโรงงานนั้นพบว่ามีความไม่แตกต่างกันมากนัก การที่ตะกรันเหล็กมีออกไซด์ของแคลเซียมค่อนข้างสูงจึงทำให้ตะกรันเหล็กเหมาะสำหรับเป็นวัสดุประสานที่ดีเมื่อมีการนำไปทำปฏิกิริยากับน้ำโดยวิธีที่ถูกต้องและเหมาะสม ดังตารางที่ 2.2

ตาราง 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก⁽⁷⁾

Country	Slag	Fe	CaO	MnO	MgO	SiO ₂	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	S
Europe	BOF slag low MgO content	14-20	45-55	<5	<3	12-18	<2	<3	NR
	BOF slag high MgO content	15-20	42-50	<5	5-8	12-15	<2	<3	NR
	EAF slag low MgO content	18-28	30-40	<6	4-8	12-17	<1.5	4-7	NR
	EAF slag high MgO	20-29	25-35	<6	8-15	10-15	<1.5	4-7	NR

	content								
Japan	BOF slag(converter)	17.5	44.3	5.3	6.4	13.8	NR	1.5	0.07
China	BOF slag	17-27	34-48	1.5-6	2.5-10	9-15	0.9	0.9-2.8	0.2
USA	BOF slag	15-30	40-50	5-10	5-10	10-15	1-3	2	NR

*NR = no report

นอกจากองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กที่ส่งผลต่อสมบัติที่แตกต่างกันโดยทำปฏิกิริยากับน้ำแล้วก็ยังมีสมบัติอื่นที่น่าสนใจของตะกรันเหล็กอีกหลายประเภท คือ การทดสอบความทนทานต่อวัฏจักรการแข็งตัว-ละลาย (Freeze/thaw resistance) ซึ่งตะกรันส่วนใหญ่ให้ผล การทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ดีคือ มีการผุกร่อนน้อยกว่า 1.0 มิลลิเมตร การทดสอบการขีดสีของมวลรวม (Los Angeles test) ผลที่ได้ออกมาคือจะอยู่ในช่วงร้อยละ 8 – 20 ซึ่งมีมาตรฐานที่กำหนดไว้ไม่ควรเกินร้อยละ 40 และคุณสมบัติด้านความปลอดภัยจากการลื่นไถลของวัสดุ (Polished stone value) จะอยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 45 – 63 ดังตารางที่ 2.3

ตาราง 2.3 สมบัติด้านอื่นๆของตะกรันเหล็ก⁽⁷⁾

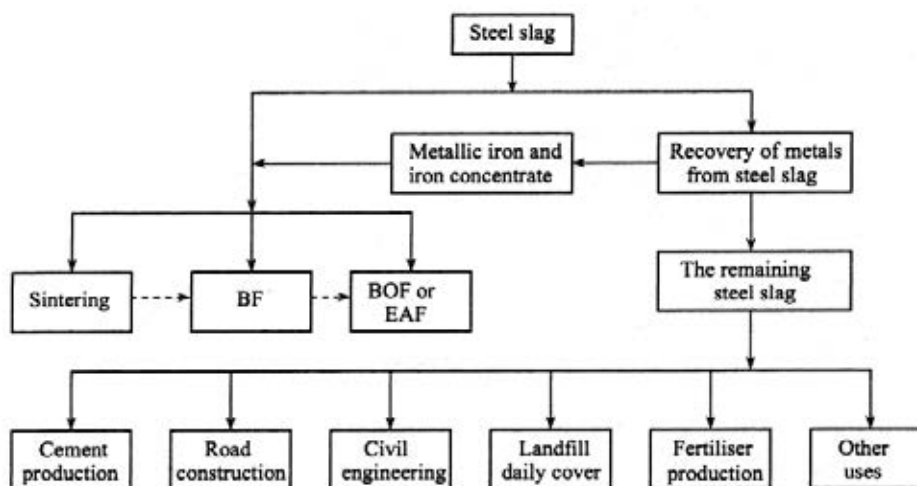
Property	Unit	BOF slag	EAF slag	Basalt	Granite
Bulk density	g/cm ³	3.1-3.7	3.2-3.8	2.8-3.1	2.6-2.8
Resistance to impact determined On crushed aggregate (8-12mm)	Wt%	10-26	10-26	9-20	12-27
Absorption of water	Wt%	0.2-1.0	0.2-1.0	<0.5	0.3-1.2
Freeze/thaw resistance (particle size <5 mm)	Wt%	<1.0	<1.0	<1.0	0.8-2.0
Los Angeles test (test aggregate 8-12 mm)	Wt%	9-18	8-15	-	15-20
Polished stone value (PSV)		54-57	58-63	45-55	45-55
Compressive strength	N/mm ²	>100	>100	>250	>120

2.8.3 การใช้ประโยชน์ของตะกรันเหล็ก

การนำตะกรันเหล็กมาใช้ประโยชน์มีการนำไปใช้ในงานหลายด้าน เช่น นำกลับไปรีไซเคิล ในอุตสาหกรรมโลหะ ก่อสร้างถนน งานด้านซีเมนต์ ทำปุ๋ย และอื่น ๆ ที่น่าสนใจอีกมากมาย เป็นต้น และจากผลตัวอย่างในการนำตะกรันเหล็กมาใช้ประโยชน์ของญี่ปุ่นจะเห็นได้ว่าโดยรวมต่อปีนั้นมา การนำมาใช้ประโยชน์ได้ถึง $10,181 \times 10^3$ ตันต่อปีดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ตะกรันเหล็ก มีคุณประโยชน์ มากมายกว่าการที่จะทำแค่เป็นของเสียชนิดหนึ่งดังแสดงใน ภาพที่ 2.2 และตารางที่ 2.4

ตาราง 2.4 ตัวอย่างการใช้ประโยชน์ของตะกรันเหล็กในประเทศญี่ปุ่น⁽⁷⁾

Utilization	Using in							Production ($\times 10^3$ t/year)	Ratio (%)
	Metal recovery	Road	Cement	Earth works	Fertilizer	Other	own works		
Unit								9965	102.2
$\times 10^3$ t/year	195	814	692	3316	124	1080	3960	10,181	
%	1.92	7.99	6.80	32.57	1.22	10.61	38.89	100	



ภาพที่ 2.3 การใช้ประโยชน์ของตะกรันเหล็ก⁽⁷⁾

2.9 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Khalifa S. Al-Jabri และคณะ⁽⁸⁾ ศึกษาประสิทธิภาพของ high strength concrete (HSC) โดยการแทนที่ทรายด้วย copper slag ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 6 สูตร ในอัตราส่วน

ร้อยละ 0, 30, 50, 70, 80 และ 100 โดยนำหน้าวัสดุเชื่อมประสาน โดยผลจากการที่แทนที่ทรายด้วย copper slag ที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ได้ลดการแตกร้าวลงไปในส่วนผสมได้ถึง 22% เมื่อเทียบกับสูตรที่ไม่ได้แทนที่ด้วย slag และเมื่อดูในด้านการรับแรงการใช้ copper slag แทนที่ทรายสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของ high strength concrete (HSC) ได้ดีเมื่อมีอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม

Khalifa S. Al-Jabri และคณะ⁽⁹⁾ ศึกษาการเติมตะกรันทองแดง แทนที่ทรายใน high performance concrete (HPC) โดยมีการเติม copper slag ในอัตราส่วนร้อยละ 0 – 100 โดยนำหน้าวัสดุประสานโดยส่วนผสมที่น้ำหนักอยู่ที่การเติม copper slag แทนที่ทรายร้อยละ 40 เพราะว่า ในด้านความต้านทานแรงอัดอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่มีการเติม copper slag และอัตราการดูดซึมน้ำมีน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับส่วนผสมทั้งหมดจากร้อยละ 0 – 100

Caijun S. และ Jueshi Q.⁽¹⁰⁾ ศึกษาการนำตะกรันประเภทต่างๆมาแทนที่ในปูนซีเมนต์เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น ตะกรันเหล็ก ตะกรันทองแดง ตะกรันฟอสฟอรัส เพื่อคุณสมบัติด้านต่างๆของปูนซีเมนต์หลังจากการแทนที่ คือ สมบัติความทนต่อการกัดกร่อน ความต้านทานแรงอัด พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดที่ได้ยังต่ำกว่ามาตรฐานของมอร์ตาร์ที่ใช้แต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียวแต่ที่มีผลการทดลองที่ดีกว่าคือความทนต่อการกัดกร่อน

ไชยยันต์ ชัยจักร และคณะ⁽¹¹⁾ ศึกษาการใช้ตะกรันเหล็กเป็นมวลรวมโดยมีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสาน ในอัตราส่วน 60:40 และ 40:60 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 โดยมีมาตรฐานของ มอก. 58-2530 กำกับการทดลองจากผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วน 40:60 ของวัสดุประสาน โดยการแทนที่ด้วย ตะกรันเหล็กร้อยละ 70 ให้ค่าความต้านทานแรงอัดที่ 44.80 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากอายุการบ่ม 3 วัน และ ค่าความต้านทานแรงอัดที่ 68.73 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จากอายุการบ่มที่ 28 วัน วัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนอยู่ที่ 0.089 วัตต์ต่อเมตรต่อองศาเซลเซียส และ ความหนาแน่นเท่ากับ 1380 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

Satish V. และคณะ⁽¹²⁾ ศึกษาความต้านทานแรงอัดจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยใช้ตะกรันจากเตา EAF สองชนิดคือ ตะกรันที่ผ่านการหลอมและเย็นตัวในน้ำอีกครั้ง และตะกรันที่ไม่มีการนำกลับไปหลอมและปล่อยให้เย็นตัวโดยอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในร้อยละ 20 และ 30 โดยนำหน้าของวัสดุประสาน จากผลการทดลองพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันเหล็กที่ไม่ผ่านการหลอมใหม่ร้อยละ 20 ได้ค่าความต้านทานแรงอัดอยู่ที่ 58.6 MPa และเมื่อเปรียบเทียบกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันเหล็กที่ผ่านการหลอมใหม่ร้อยละ 20 ค่าความต้านทานแรงอัดอยู่ที่ 61 MPa จากอายุการบ่มที่ 28 วัน ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ด้วยตะกรันเหล็กที่ไม่ผ่านการหลอมใหม่ร้อยละ 30 นั้นได้ค่าความต้านทานแรงอัดอยู่ที่ 53.4 MPa

Yong Xin Li และคณะ⁽¹³⁾ ศึกษาวัสดุเหลือทิ้ง คือ steel-making slag, blast furnace slag และ fly ash โดยวิเคราะห์ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง รูปพรุน กับ ผลจากธาตุต่างๆของซีเมนต์มอร์ตาร์ และค่าความต้านทานต่อแรงอัด พบว่าค่า รูปพรุนลดลงต่ำสุดเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย blast furnace slag ที่ร้อยละ 20 โดยนำหน้าวัสดุประสาน ที่อายุในการบ่ม 28 วัน และค่าที่ได้ต่ำกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์มาตรฐานอาจเป็นเพราะว่าสัดส่วนที่เหมาะสมของ blast furnace slag การกระจายตัวและขนาดที่เหมาะสมทำให้ซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นตัวค่อนข้างสูง จึงมีค่า porosity ที่ดีแต่ในทางกลับกันค่าความต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ด้วย steel-making slag และ fly ash จะไม่ช่วยเพิ่มความหนาแน่นของซีเมนต์มอร์ตาร์แต่จะช่วยให้ในเรื่องของค่าความต้านทานแรงอัดที่มีมากกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ด้วย blast furnace slag ซึ่งให้ค่าความต้านทานแรงอัดที่ต่ำที่สุด

Wang Q. และ Yan P.⁽¹⁴⁾ ศึกษาการใช้ประโยชน์จากตะกรันเหล็ก ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการหลอมเหล็กกล้า ศึกษาปฏิกิริยา ไฮเดรชันจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และค่า pH value ซึ่งผลที่ได้พบว่าการเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยาไฮเดรชันของ steel slag จะคล้ายกันกับซีเมนต์ แต่พบว่า hydration rate ต่ำกว่าซีเมนต์ซึ่ง hydration rate ของ steel slag ที่ระยะเริ่มต้นจะถูกเร่งได้ด้วยการใช้ขนาดอนุภาคที่เล็กละเอียดและการบ่มในสารละลายที่เป็นด่าง อย่างไรก็ตามค่า pH ที่สภาวะปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถเพิ่ม hydration rate ของ steel slag ได้ในช่วง 28 วัน ส่วนผลของ curing temperature จะช่วยเร่งการเกิด hydration rate ของ steel slag ช่วงระยะเริ่มต้น แต่จะไม่ส่งผลต่อ hydration rate ที่ระยะหลัง 28 วัน และสารประกอบ C_3S และ C_2S ของ steel slag จะเข้าทำปฏิกิริยาและให้ hydration products เป็น CSH gel และ $Ca(OH)_2$ ซึ่ง C_3S and C_2S จะเกิดปฏิกิริยาได้น้อยและหลงเหลืออยู่ในโครงสร้าง เมื่อระยะเวลามากกว่า 90 วัน

ศราวุฒิ บุชบงศ์ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ⁽¹⁵⁾ ศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตผสมตะกรันเหล็กที่ไม่ผ่านการบดเพื่อศึกษาสมบัติของคอนกรีตสดและคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว คือ ค่าความชื้นเหลวปกติ ระยะเวลาการก่อตัว ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และความต้านทานแรงอัด ที่อายุการบ่ม 3, 7, 28 และ 91 วัน รวมทั้งศึกษาความทนทานของคอนกรีต ได้แก่ การหดตัว วัดค่าความคงตัวด้วยออโตแคลฟ โดยมีอัตราส่วนผสมในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 30 และ 60 และจากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการใช้ตะกรันเหล็กเพิ่มมากขึ้นระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์จะเพิ่มมากขึ้น ค่าความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลง ค่าความต้านทานแรงอัดที่ได้ต่ำกว่าคอนกรีตมาตรฐาน และค่าความคงตัวนั้นมีการขยายของขึ้นงานมากจนไม่สามารถทดสอบได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic reaction) ของตะกรันเหล็ก และ ศึกษาสมบัติของซีเมนต์มอร์ตาร์โดยการนำตะกรันเหล็กมาแทนที่ซีเมนต์และแทนที่ทราย วิเคราะห์หาสมบัติต่างๆแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

3.1 การวิเคราะห์วัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ได้นำตะกรันเหล็กซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก ที่ได้รับการสนับสนุนมาจาก บริษัทเกษมศักดิ์ เทรดิง จำกัด มาวิเคราะห์หาสมบัติที่เบื้องต้นที่เหมาะสมในการเป็นวัสดุปอซโซลานมีขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ องค์ประกอบ X-ray fluorescence spectrometry บริษัท Philips รุ่นPW2404 เพื่อเปรียบเทียบกับ องค์ประกอบทางเคมีของ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1⁽¹⁷⁾

2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของตะกรันเหล็ก ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker โดยใช้ Cu-K α radiation ที่ scanning speed 1.5 องศาต่อนาที ในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 5 ถึง 70 องศา

3. การศึกษาพื้นที่ผิวของตะกรันเหล็กและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยเครื่อง ทดสอบหาพื้นที่ผิว (บริษัท Quantachrome รุ่น Autosorb-1)

4. การศึกษาค่าความละเอียดและการกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และตะกรันเหล็ก ด้วยเครื่องวิเคราะห์หาขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคบริษัท Malvern รุ่น Mastersizers

5. ตรวจสอบขนาดเม็ดทรายโดยวิธี sieve analysis ในช่วงขนาด 35 – 100 mesh ตาม มาตรฐาน ASTM C 33-97⁽¹⁸⁾

3.2 การออกแบบการทดลอง

3.2.1 การทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิก

- 3.2.1.1 การเตรียมวัสดุปอซโซลาน ขนาดของวัสดุปอซโซลาน จะใช้ขนาดอนุภาคที่ ผ่าน Sieve มาตรฐาน 325 mesh เพื่อให้ได้ขนาดที่เล็กกว่า 45 ไมครอน ซึ่งจากการศึกษาขนาดของ

วัสดุปอชโซลานที่เล็กละเอียดมากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาในซีเมนต์เพสต์เกิดได้ดีกว่าการใช้วัสดุปอชโซลานที่มีขนาดใหญ่^(18, 19, 20)

3.2.1.2 ศึกษาปฏิกิริยาปอชโซลานิกของตะกรันเหล็ก โดยใช้แบบหล่อตัวอย่างเพสต์ทองเหลือง รูปทรงกระบอกขนาดสูง 4 เซนติเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ดังภาพที่ 3.1 โดยในชั้นแรกนำแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 95% ของ บริษัท Megroup จำกัดผสมกับตะกรันเหล็กในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก และใช้ปริมาณน้ำ ต่อ ปูนขาวผสมวัสดุปอชโซลาน (Water/Solid) ในอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา หลังจากหล่อตัวอย่างครบ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออกแล้วนำชิ้นตัวอย่างเพสต์ไปบ่มเพื่อนำไปศึกษาปฏิกิริยาปอชโซลานิกที่ระยะเวลาในการบ่ม 3 7 และ 28 วัน อัตราส่วนผสมดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 อัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ต่อ ตะกรันเหล็ก

Mix Proportion of Paste (by Weight)			
Mix	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Steel Slag	Water/Solid
1:1	20	20	0.35
1:2	15	30	0.35
1:3	10	30	0.35



ภาพที่ 3.1 โมลด์ทองเหลืองหล่อซีเมนต์เพสต์

หลังจากบ่มครบ 3, 7 และ 28 วัน ทำการหยุดปฏิกิริยาปอซโซลานิกด้วยสารละลายอะซิโตน พร้อมอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง^(21, 22, 23) จึงนำไปวิเคราะห์ปฏิกิริยาปอซโซลานิกตามขั้นตอนดังนี้

1. วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์เชิงความร้อน Simultaneous Thermal Analyser บริษัท NETZSCH รุ่น STA449C Jupiter
2. วิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM 5410 บริษัท JEOL โดยเตรียมแบ่งก้อนตัวอย่างเพสต์ให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 0.1-1.0 เซนติเมตร
3. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟส เพื่อศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิกโดยบดเพสต์ให้ละเอียดก่อนนำไปวิเคราะห์

3.2.2 การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และทรายด้วยตะกรันเหล็ก

ในการทดลองส่วนนี้จะนำวัสดุปอซโซลาน(ตะกรันเหล็ก) มาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ผสมวัสดุเชื่อมประสาน ในอัตราส่วนที่ให้ค่าการไหลตัว และเวลาการเซ็ตตัว ที่เหมาะสมต่อการหล่อมอร์ตาร์ และอัตราส่วนผสมของทรายที่ใส่ในส่วนผสมคือ 1:2.75 ตาม ASTM C 109/C⁽²⁴⁾ ดังตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3

ตาราง 3.2 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์สูตรแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วย
ตะกั่วจากเตาหลอมเหล็ก

Mix Proportion of Mortar (by Weight)				
Mix	Steel slag	Cement	Sand	W/(Cement+Pozzolan)
M Control	-	100	275	0.69
SC1	10	90	275	0.68
SC2	20	80	275	0.67
SC3	30	70	275	0.65
SC4	40	60	275	0.63

*SC = Steel slag + Cement

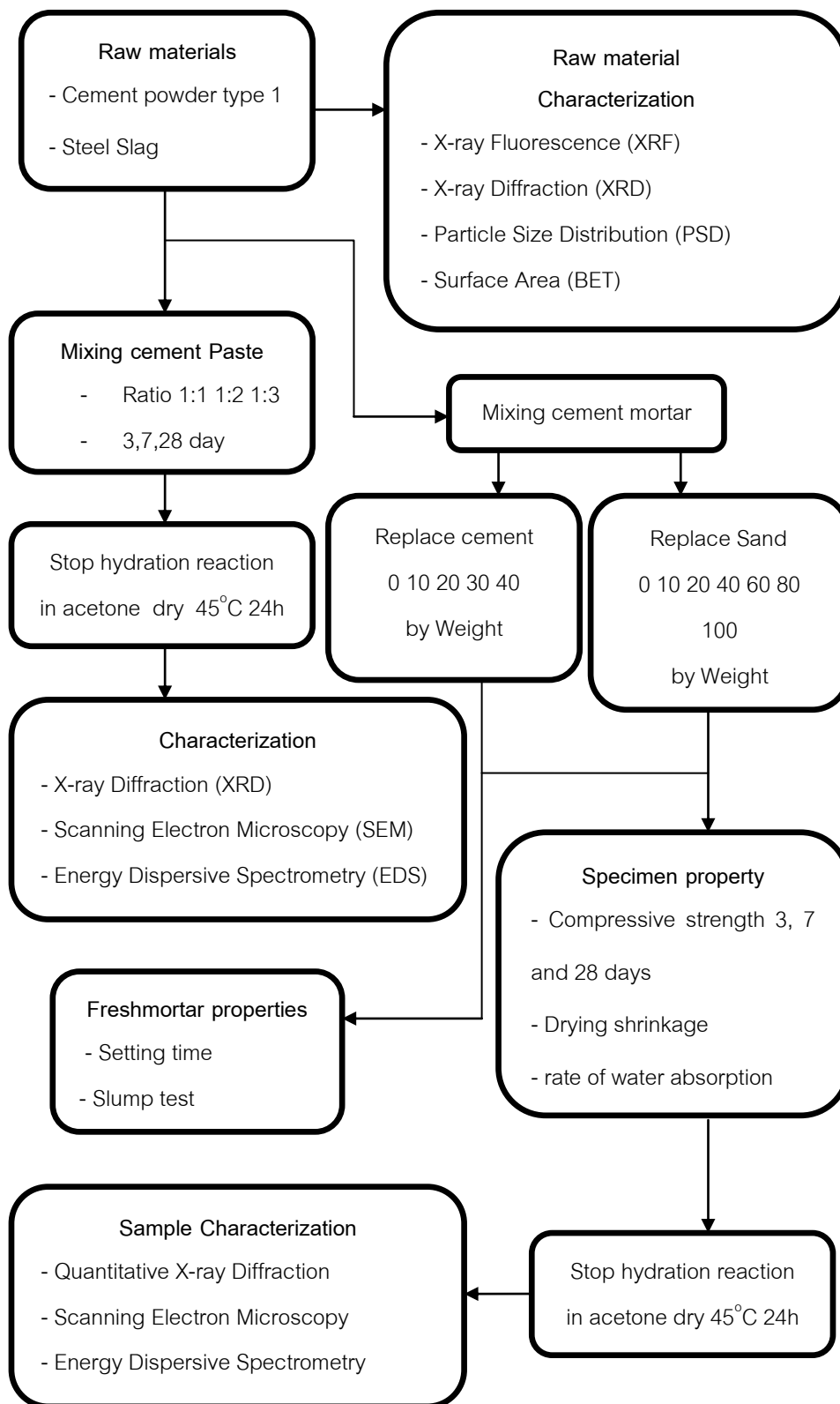
ตาราง 3.3 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์มอร์ตาร์สูตรแทนที่ทรายด้วยตะกั่วจากเตาหลอมเหล็ก

Mix Proportion of Mortar (by Weight)				
Mix	Steel slag	Cement	Sand	W/(Cement+Pozzolan)
M Control	-	100	275	0.69
SS1	10	100	100	0.35
SS2	20	100	80	0.35
SS3	40	100	60	0.35
SS4	60	100	40	0.35
SS5	80	100	20	0.35
SS6	100	100	0	0.35

*SS = Steel slag + Sand

หลังจากหล่อตัวอย่างตามสูตรที่ได้กำหนดไว้ครบ 24 ชั่วโมง ในแบบหล่อของเหล็กมอร์ตาร์มาตรฐาน ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร จึงถอดแบบออกแล้วนำก้อนตัวอย่างไปบ่มแช่น้ำ ที่ระยะเวลา 3, 7, 14 และ 28 วัน เพื่อนำไปทดสอบ การหดตัว/ขยายตัว การดูดซึมน้ำ และการทดสอบความทนต่อแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ต่อไป

3.2.3 แผนผังการทดลอง



ภาพที่ 3.2 แผนผังการทดลอง

3.3 การทดสอบและวิเคราะห์สมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

3.3.1 การทดสอบเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ (Setting time)

ทำการหาเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์ด้วยเครื่อง Vicat apparatus ภาพที่ 3.3 ตามมาตรฐาน ASTM C191-04b⁽²⁵⁾ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. นำปูนผสมเสร็จใหม่เทลงโมลด์ยางจนเต็ม โดยจับเวลาตั้งแต่เริ่มทำการผสมปูนเข้ากับน้ำ
2. ตั้งค่าเครื่อง Vicat apparatus โดยปล่อยปลายเข็มมาแตะที่ผิวด้านบนของปูนที่อยู่ในโมลด์ยาง แล้วทำการล๊อคเข็มไว้ไม่ให้ขยับ ต่อจากนั้นปรับแถบอ่านค่าของเครื่อง Vicat apparatus ให้ชี้คอยู่ที่เลขศูนย์ แล้วทำการปล่อยเข็ม Vicat needle ลงสู่ผิวของปูนซีเมนต์
3. ทำการปล่อยเข็ม Vicat needle ทุกๆ 10 นาทีพร้อมอ่านค่าจนเข็มหยุดที่ 25 มิลลิเมตร จึงบันทึกช่วงระยยะเวลานั้นเป็นเวลาเริ่มในการก่อตัวของปูนซีเมนต์สูตรนั้นๆ (initial setting time) ปล่อยเข็ม Vicat needle ไปจนกว่าไม่สามารถจะทิ่มทะลุเนื้อปูนซีเมนต์ได้คือเวลาสุดท้ายของการก่อตัว (final setting time) แล้วจดบันทึกเวลา



ภาพที่ 3.3 เครื่อง Vicat apparatus

3.3.2 การทดสอบการไหลตัวของปูนซีเมนต์ผสมเสร็จใหม่ (Slump test)

โดยทำการหาค่าการไหลตัวด้วยวิธี slump test ตามมาตรฐาน ASTM C1437⁽²⁶⁾ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำปูนผสมเสร็จใหม่ที่ได้ เทลงในอุปกรณ์ทดสอบรูปกรวยให้เต็ม จากนั้นยกกรวยขึ้น ปล่อยให้ปูนไหลออกไปทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที จนปูนหยุดไหลตัว

2. วัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของปูน ทั้งสองด้านกำหนดให้เป็น L1 และ L2
3. บันทึกค่าที่วัดได้โดยควบคุมให้แต่ละสูตรมีการแผ่ขยายตัวไม่เกิน 115 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน

3.3.3 การหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์ (Drying shrinkage)

ทำการหาค่าการหดตัว/ขยายตัวตาม ASTM C596-09⁽²⁷⁾ ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มในน้ำดังนี้

1. ผสมปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ตามสูตรแล้วหล่อปูนลงในโมลด์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร³ ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วถอดโมลด์ออกบ่มในน้ำ 3, 7 และ 28 วัน
2. วัดขนาดของมอร์ตาร์ด้วย Vernier Caliper ทั้ง 4 ด้าน
3. ค่าที่วัดได้นำมาคำนวณเปอร์เซ็นต์การหดตัวตามสูตรต่อไปนี้

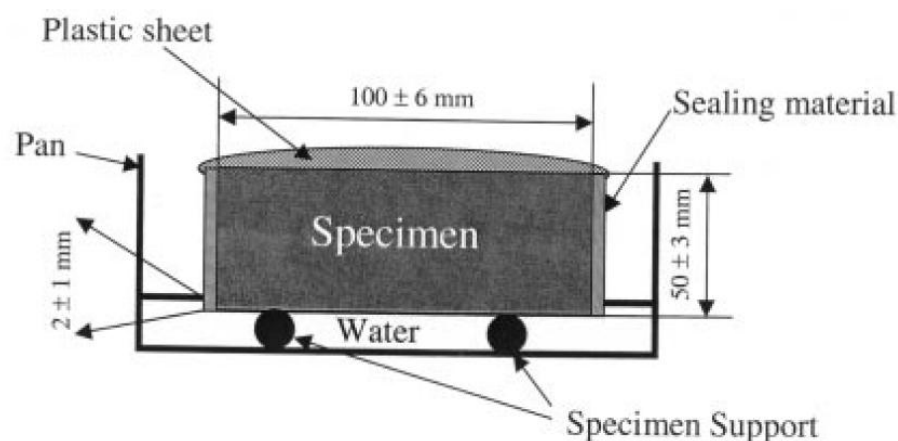
$$\% = \frac{L1 - L2}{L1} \times 100$$

L1 = ความยาวเริ่มต้น

L2 = ความยาวหลังบ่ม

3.3.4 การทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำ (Rate of water absorption) ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ASTM C1585-04⁽²⁸⁾

1. นำมอร์ตาร์ที่ผ่านการบ่มมาแล้ว 3 และ 28 วันมาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส 3 วัน
2. เมื่อครบกำหนดนำมาเก็บไว้ใน Desiccators 15 วัน หลังจากนั้นนำชิ้นงานมาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่าเป็น M1
3. นำชิ้นงานมาตากด้วยกาวทาที่หน้าโพลีเอทิลีน บริเวณด้านข้างของมอร์ตาร์ทั้งสองด้าน แล้วนำชิ้นงานมาแช่ไว้ใน ภาชนะที่มีน้ำโดยให้น้ำในภาชนะสูงขึ้นมาในระดับประมาณ 3 มิลลิเมตร จากขอบล่างของมอร์ตาร์ ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 ลักษณะการวางตัวอย่างในการทดสอบหาอัตราการดูดซึมน้ำ⁽²⁸⁾

4. จับเวลาที่ 1, 5, 10, 20, 30, 60 นาที; 2, 3, 4, 5, 6 ชั่วโมง; 1, 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 วัน โดยทุกๆครั้งที่ครบเวลาให้นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกค่าไว้เพื่อหา Water absorption ตามสูตรของ Darcy's Law

$$\text{Water absorption } (I) = \left[\frac{M2 - M1}{a * b} \right]$$

$M1$ = น้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่น้ำ, g

$M2$ = น้ำหนักตัวอย่างหลังแช่น้ำ, g

a = พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง, cm^2

b = ความหนาแน่นของน้ำ, 1 g/cm^3

5. จากนั้นนำค่าการดูดซึมน้ำที่ได้ (Water absorption, (I)) ที่ได้มาวาดกราฟหาความสัมพันธ์กับรากที่สองของเวลาเพื่อหาอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption) และอัตราการดูดซึมน้ำช่วงที่ 2 (Secondary Rate of Water Absorption)

3.3.5 การทดสอบความต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ASTM C 109/C⁽²⁴⁾

เมื่อทำการทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่เรียบร้อยแล้วจึงนำปูนซีเมนต์ที่ได้มาหล่อชิ้นงานสำหรับทดสอบความทนต่อแรงอัดของปูนซีเมนต์ตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดโมลด์ที่ใช้หล่อชิ้นงานให้สะอาดแล้วเคลือบด้วยน้ำมันหล่อลื่นบางๆ เพื่อให้สะดวกในการถอดชิ้นงาน (โมลด์ทองเหลือง $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร³)

2. เทปูนซีเมนต์ผสมเสร็จตามสูตรที่กำหนดลงในโม่ลดจนเต็ม ปาดผิวหน้าส่วนที่เกินให้เรียบ
3. ทิ้งไว้ให้เซตตัวในโม่ 24 ชั่วโมงแล้วถอดออกจากโม่ลดนำไปบ่มในน้ำเป็นเวลา 3, 7 และ 28 วัน
4. เมื่อครบกำหนดวันนำชิ้นงานไปทดสอบความทนต่อแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงอัด Universal Testing Machine – Amsler ภาพที่ 3.5 พร้อมบันทึกค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการ

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ = ความทนต่อแรงอัด (compressive strength, MPa)

F = แรงแกด (N)

A = พื้นที่ผิวสัมผัส (mm^2)



ภาพที่ 3.5 เครื่องทดสอบกำลังอัด (Universal Testing Machine – Amsler)

3.3.6 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

นำวัตถุดิบและชิ้นงานที่ได้มาศึกษาองค์ประกอบทางเฟสด้วยเครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8-Advance ผลิตโดยบริษัท Bruker โดยใช้ $\text{Cu-K}\alpha$ radiation ที่ scanning speed 1.5 องศา ต่อนาทีในช่วงมุม 2θ ตั้งแต่ 5 ถึง 70 องศา โดยมีการวิเคราะห์ทั้งหมด 7 ตัวอย่างคือสูตรการแทนที่

ทราयर้อยละ 0, 10, 20, 40, 60, 80, 100 เมื่อวิเคราะห์เฟสในเชิงคุณภาพเสร็จแล้วนำผลข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐานจาก JCPDS และจึงเลือกเฟสที่ต้องการวิเคราะห์ต่อเพื่อแปลงผลให้เป็นเชิงปริมาณด้วยโปรแกรม Topas โดยอาศัยหลักการ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะเป็นค่าที่แปรผันตาม ปริมาณของที่เป็นผลึกภายในสารตัวอย่าง ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความเข้มของ intensity คำนวณหาปริมาณของเฟสองค์ประกอบต่างๆใน สารตัวอย่างออกมาเป็นค่าของการวิเคราะห์เฟสในเชิงปริมาณได้ และค่าที่ได้มีการอ้างอิงมาจากมาตรฐานของข้อมูลที่มีอยู่ในเครื่อง โดยดูที่ค่าความเข้ากันได้ของกราฟว่าเฟสของสารประกอบที่วิเคราะห์นั้นมีเกิดขึ้นจริง

3.3.7 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

ศึกษาโครงสร้างจุลภาคของชิ้นตัวอย่างเพื่อดูการกระจายตัวของขนาดอนุภาคและรูปร่างผลึกของปูนซีเมนต์ ด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคแบบส่องกราด Scanning electron microscope รุ่น JSM-6480LV ผลิตโดยบริษัท JEOL โดยจะทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 7 ตัวอย่างเช่นกันคือสูตรการแทนที่ทราयर้อยละ 0, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 ก่อนที่จะนำชิ้นงานวิเคราะห์จะต้องเคลือบตัวอย่างชิ้นงานด้วยทองคำก่อนทั้งหมด

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการนำเอาตะกรันเหล็ก (Steel slag) มาทดสอบในด้านความเป็นวัสดุปอซโซลาน และนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ และนำมาแทนที่ทรายเพื่อคุณสมบัติในการรับแรงโดยทั้งสองสูตรนำมาขึ้นรูปเป็นซีเมนต์มอร์ตาร์ เพื่อนำมาทดสอบสมบัติในด้านต่างๆ ได้แก่ ระยะเวลาในการก่อตัว (Setting time) อัตราการไหลตัว (Slump test) อัตราการดูดซึมน้ำ (Rate of water absorption) และความต้านทานแรงอัด (Compressive strength) รวมถึงองค์ประกอบทางเฟสและโครงสร้างจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ โดยผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลแสดงในหัวข้อต่อไป

4.1 ผลการวิเคราะห์หัตถุคิบัติและสารเคมี

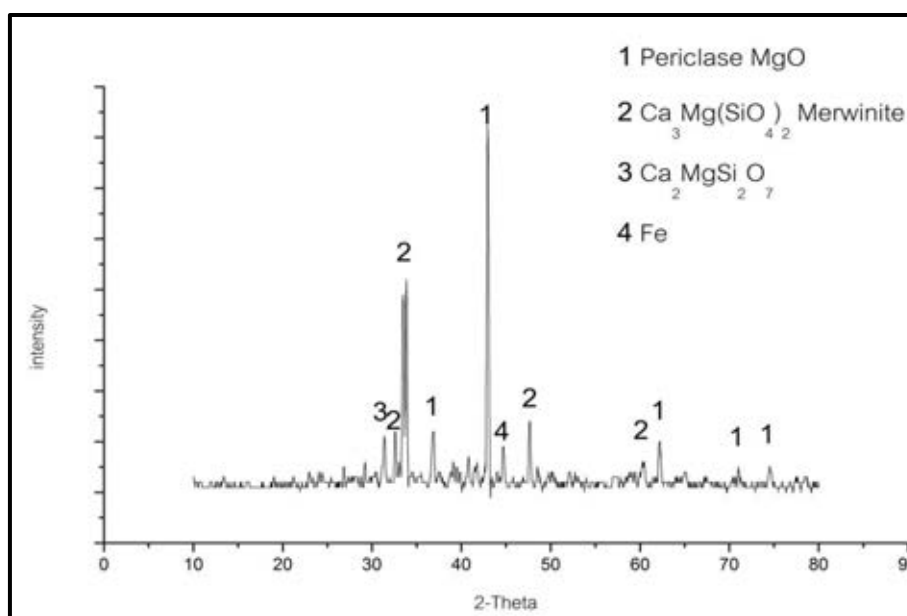
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เปรียบเทียบกับ ตะกรันเหล็ก ซึ่งพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็กนั้นใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีออกไซด์หลักดังนี้ Al_2O_3 , CaO , SiO_2 และ Fe_2O_3 โดยนอกเหนือจากนี้ก็เป็นออกไซด์รอง เช่น K_2O , Na_2O ซึ่งออกไซด์สองตัวนี้มีค่าเป็นต่าง ทำให้เพิ่มกำลังรับแรงอัดในระยะแรก แต่กำลังรับแรงอัดในระยะหลังลดลงถ้าผสมใช้กับวัสดุผสมที่ทำปฏิกิริยากับต่างอาจทำให้เกิดการขยายตัวในมอร์ตาร์หรือคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหาย และออกไซด์อีกตัวคือปริมาณของ MgO ซึ่งเป็นออกไซด์รองของปูนซีเมนต์ที่ควรจะมีไม่เกินร้อยละ 0.1 – 5.5 โดยน้ำหนัก แต่ที่วิเคราะห์พบในตะกรันเหล็กมีปริมาณ MgO อยู่มากถึงร้อยละ 18.86 ซึ่งอาจส่งผลเสียต่อชิ้นงานคอนกรีตได้ โดยพบว่าปริมาณ MgO ส่งผลให้เมื่อใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีส่วนผสมของตะกรันเหล็กหรือวัสดุปอซโซลานอื่นๆที่มีปริมาณของ MgO ที่มากเกินไปตัว MgO จะทำปฏิกิริยาช้ามากและจะทำให้ขยายตัวหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวไปแล้วส่งผลให้แตกร้าวภายหลังได้⁽²⁹⁾ และเมื่อมีการนำไปใช้จริง โดยที่ไม่ได้ทดสอบก่อนในงานด้านโครงสร้างของอาคารอาจจะส่งผลให้เกิดอันตรายได้ สาเหตุที่มีปริมาณของ MgO ที่มากนั้นอาจจะเป็นเพราะมาจากกระบวนการของการป้อนน้ำเหล็กให้มีคุณสมบัติตามต้องการและลอยขึ้นมาเกิดเป็นตะกรันเหล็กที่มีการกำจัดออกและนำมาพักไว้ด้านนอกของสายการผลิต ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้
ของปูนปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และตะกรันเหล็ก

Chemical compound (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	ตะกรันเหล็ก
Al ₂ O ₃	4.96	11.09
CaO	66.61	31.47
SiO ₂	21.30	26.69
SO ₃	2.72	0.42
Fe ₂ O ₃	3.10	4.05
MgO	1.81	18.86
Na ₂ O	0.21	0.59
K ₂ O	0.50	0.31
MnO	-	4.63
LOI	0.74	2.31

4.1.1 ผลการวิเคราะห์เฟสของตะกรันเหล็ก

จากผลจากการวิเคราะห์เฟสด้วย XRD ของตะกรันเหล็กพบว่าสารประกอบ MgO, CaO และ SiO₂ ในตะกรันเหล็ก ซึ่งสอดคล้องกับผลศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของตะกรันเหล็ก โดยจะอยู่รวมกันในรูปของสารประกอบ Ca₃Mg (SiO₄)₂ ซึ่งการอยู่รวมกันของ Ca₃Mg (SiO₄)₂ ไม่ส่งผลดีต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้ความสามารถของ C₂S เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันช้าลงและอาจจะส่งผลให้ด้านความต้านทานแรงอัดนั้นช้าขึ้นด้วยเมื่อเทียบกับการใช้แต่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเดียวในส่วนผสม



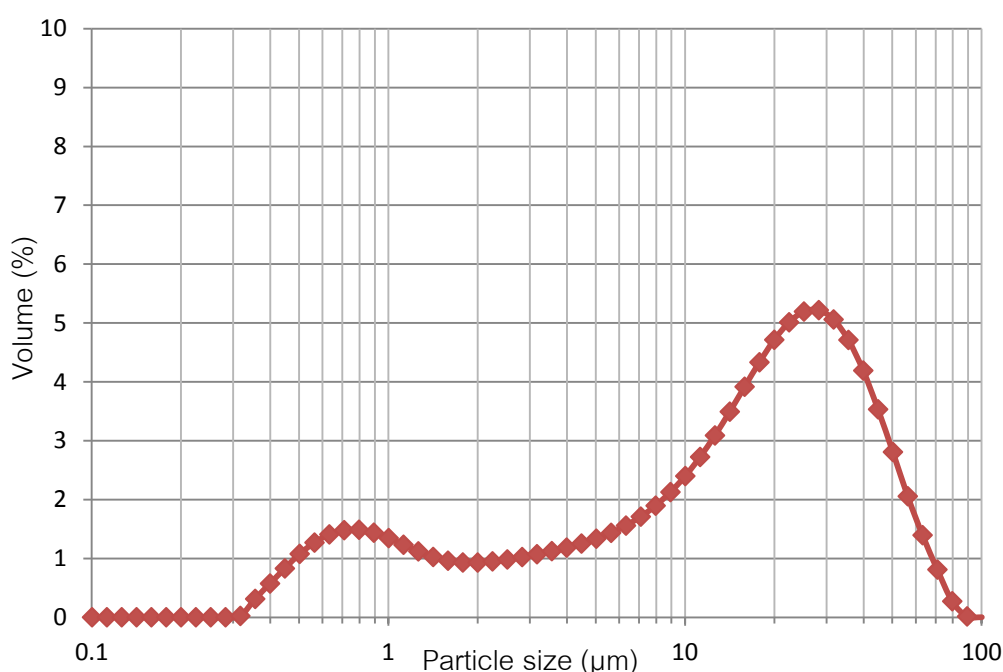
ภาพที่ 4.1 เฟสของตะกรันเหล็ก

4.1.2 การศึกษาพื้นที่ผิวและการกระจายตัวของอนุภาค ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และกากตะกรันเหล็ก

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของตะกรันเหล็กเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์พบว่าตะกรันเหล็กมีพื้นที่ผิวเท่ากับ $3.84 \text{ m}^2/\text{g}$. และขนาดอนุภาคเท่ากับ $15.72 \text{ }\mu\text{m}$ ส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 มีพื้นที่ผิว $30.28 \text{ m}^2/\text{g}$. และขนาดอนุภาคเท่ากับ $19.69 \text{ }\mu\text{m}$ การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจากกราฟจะมีอยู่สองช่วงด้วยกันคือช่วงแรกจะเป็นการกระจายตัวที่ขนาดอนุภาค $0.3 - 0.9 \text{ }\mu\text{m}$ และช่วงที่สองคือจาก $0.9 - \sim 90 \text{ }\mu\text{m}$ ซึ่งการกระจายตัวของขนาดอนุภาคส่วนใหญ่จะอยู่ที่ $25 \text{ }\mu\text{m}$ และจากค่าพื้นที่ผิวของตะกรันเหล็กซึ่งน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อยู่มากทำให้ตะกรันเหล็กมีโอกาสที่จะดูดซับน้ำได้น้อยกว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ในองค์ประกอบของตะกรันนั้นมีอนุภาคของเหล็กที่ยังแทรกอยู่ในโครงสร้างจึงทำให้ตะกรันเหล็กนั้นหนักกว่าแต่ค่าที่วิเคราะห์ได้นั้นไม่ต่างกันมากซึ่งแสดงได้ว่าขนาดอนุภาคของตะกรันใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ต้องบดตะกรันให้มีขนาดที่เหมาะสม)และการที่ขนาดของตะกรันเหล็กใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นจะส่งผลดีต่อการนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในส่วนผสมของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ต่อไป เพราะจะทำให้การซึมผ่านของน้ำจะลดลงอย่างมากตามอายุการปมที่เพิ่มขึ้น⁽³¹⁾ ดังตารางที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 และกากตะกั่วเหล็ก

ชนิดของวัสดุที่ใช้ศึกษา	Surface Area (m ² /g)	Mean Particle Size (Micron)
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภท 1	30.28	19.69
ตะกั่วเหล็ก	3.84	15.72



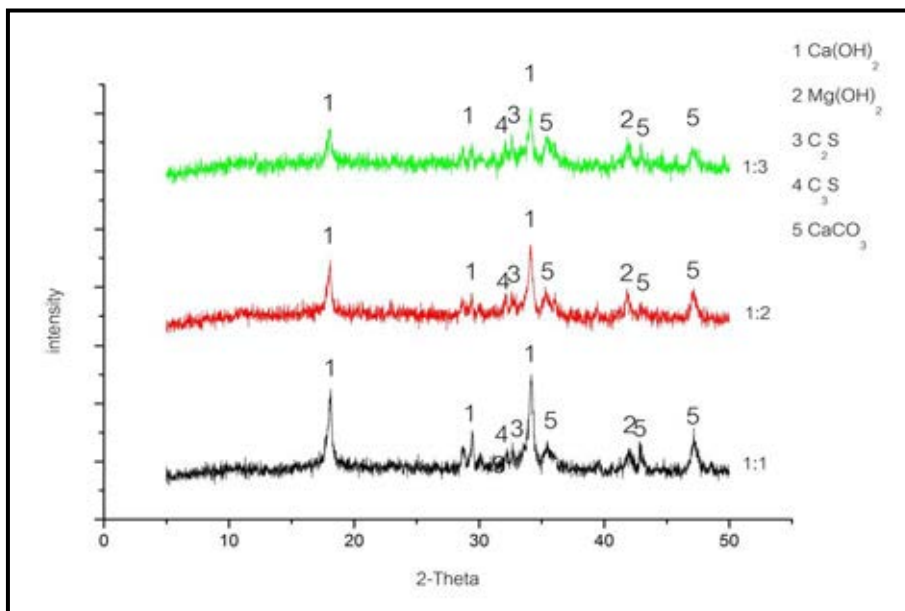
ภาพที่ 4.2 การกระจายตัวของอนุภาคตะกั่วเหล็ก

4.2 ผลการศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิก

4.2.1 การวิเคราะห์เฟสของปฏิกิริยาปอซโซลานิก

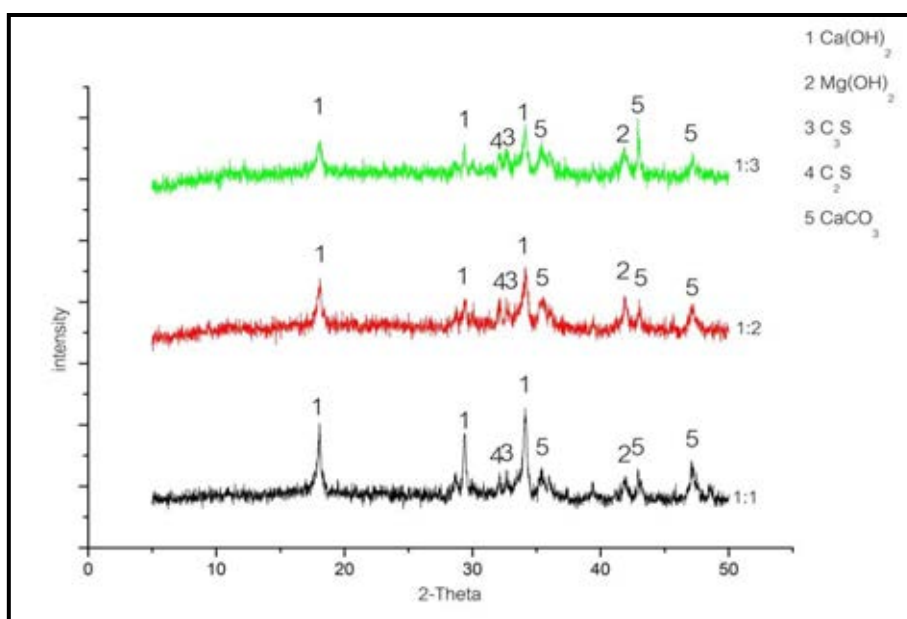
ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค X-ray diffractometer ของชิ้นงานเฟสที่มีส่วนผสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่อยู่ในรูปของ Portlandite (Ca(OH)₂, JCPDS 01-072-0156) ในเฟสหลักและสารปอซโซลานที่ได้จากกากตะกั่วจากอุตสาหกรรม ตะกั่วเหล็ก ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน ส่วนใหญ่แล้วเฟสหลักที่เกิดขึ้นยังเป็น Ca(OH)₂ ที่มีการเริ่มทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อเข้าสู่ปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างช้าๆ และมีเฟสของ Brucite (Mg(OH)₂,

JCPDS 00-044-1482) ซึ่งมาจาก MgO ที่อยู่ในตะกอนเหล็กทำปฏิกิริยากับน้ำจนเกิดเป็น $Mg(OH)_2$ ดังภาพที่ 4.4



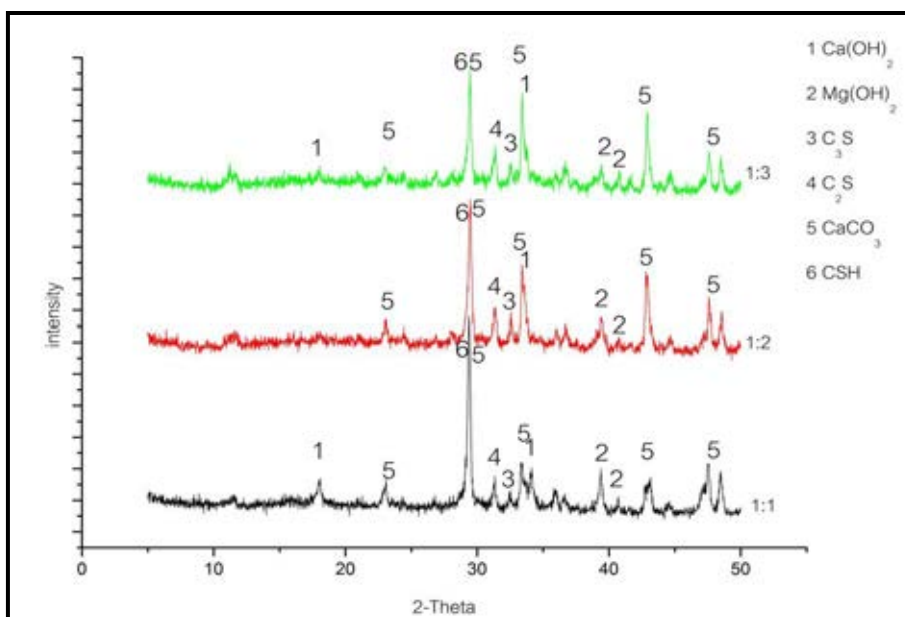
ภาพที่ 4.3 องค์ประกอบทางเฟสของเพสต์ผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และตะกอนเหล็ก ในสัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 3 วัน

ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค X-ray diffractometer ของชิ้นงานเพสต์ที่มีส่วนผสมของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และ ตะกอนเหล็ก ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันนั้นมีมากขึ้นไม่มากและไม่ต่างจากการบ่มที่ 3 วัน มากนักโดยผลส่วนหนึ่งที่ทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้าคือเฟสของ MgO ที่อยู่ในรูปของ $Mg(OH)_2$ เริ่มมีผลในการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงของเฟสนั้นน้อยตามไปด้วยและอีกประการหนึ่งน่าจะเป็นผลที่มาจาก C_2S อยู่ในโครงสร้างด้วยการที่ปฏิกิริยาของ C_2S นั้นค่อนข้างที่จะช้าในการเกิดปฏิกิริยาในช่วงต้นแต่จากการคาดการณ์ปฏิกิริยาน่าจะเกิดได้ดีเมื่อหลังจาก 7 วันไปแล้ว ดังภาพที่ 4.4



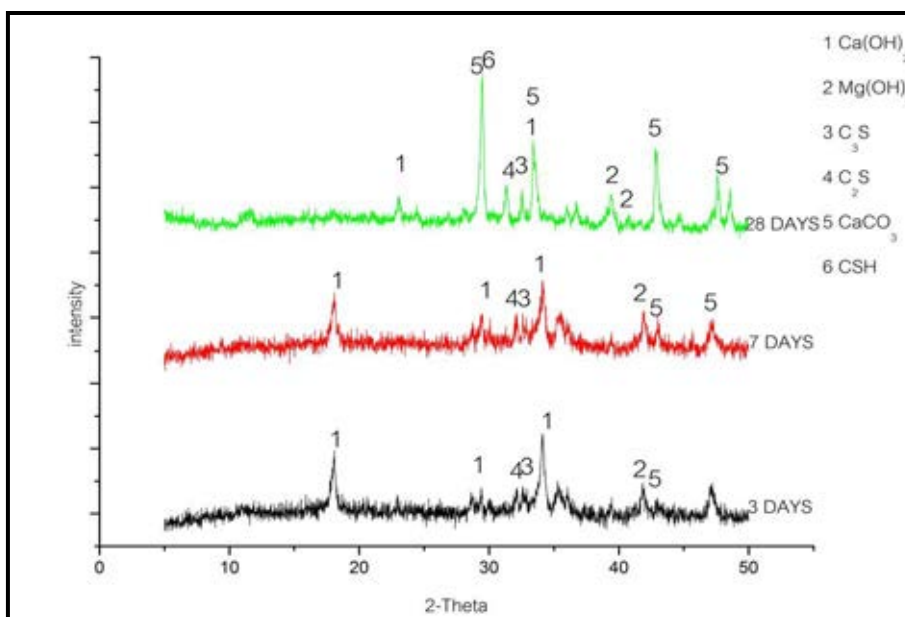
ภาพที่ 4.4 องค์ประกอบทางเฟสของเพสต์ผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และตะกั่วเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 7 วัน

ผลการวิเคราะห์เฟสด้วยเทคนิค X-ray diffractometer ของชิ้นงานเพสต์ที่มีส่วนผสมของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และตะกั่วเหล็ก ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน แสดงให้เห็นว่าผลของการที่เติมตะกั่วเหล็กมากขึ้นเพื่อให้ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์นั้นเป็นผลทำให้หน่วงความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งดูได้จากพีคของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ยังคงหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างของเฟส แสดงว่าปฏิกิริยาไฮเดรชันของอัตราส่วนผสมที่ 1:3 ยังเกิดไม่สมบูรณ์เพราะว่าถ้าปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดได้น้อยจะส่งผลให้โครงสร้างหลักของการนำไปใช้ในซีเมนต์อร์ตาร์นั้นล่าช้าและมีค่าความต้านทานแรงอัดน้อยลงตามไปด้วย ต่างจากอัตราส่วนผสมที่ 1:2 เฟสของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่น้อยลงจนแทบหมดไปและเกิดเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมากขึ้นและมากกว่าในทุกส่วนผสมแสดงให้เห็นว่าการเติมตะกั่วเหล็กในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยเสริมให้ตะกั่วเหล็กเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีต่อการนำไปใช้เป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์อร์ตาร์หรือคอนกรีตเพื่อนำไปใช้งานด้านต่างๆต่อไปได้ ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 องค์ประกอบทางเฟสของเพสต์ผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และตะกั่วเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 28 วัน

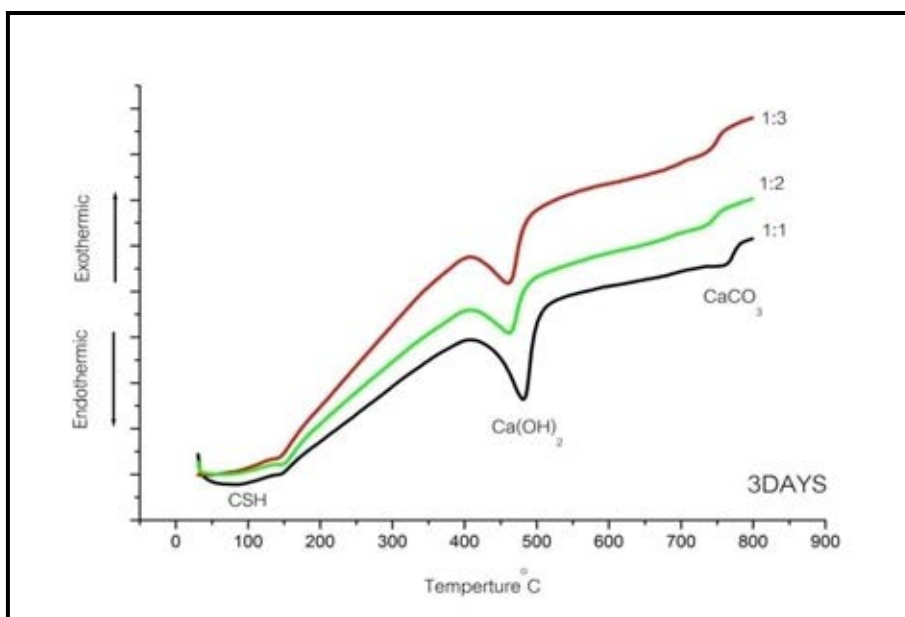
จากผลการทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิกทั้ง 3 อัตราส่วนคือ 1:1, 1:2 และ 1:3 ปฏิบัติใน โครงสร้างที่ต้องการคือการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ให้ เปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นในโครงสร้าง จากทั้งหมดที่ อัตราส่วน 1:2 จากการบ่มที่ 28 วัน แสดงการเปรียบเทียบการพัฒนากการของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจาก 3, 7 และ 28 วัน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมาจากการเปลี่ยนแปลงของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์โดยมี C_2S เป็นตัวช่วยในการทำปฏิกิริยามากกว่า C_3S ในโครงสร้างเฟส ดัง ภาพที่ 4.7



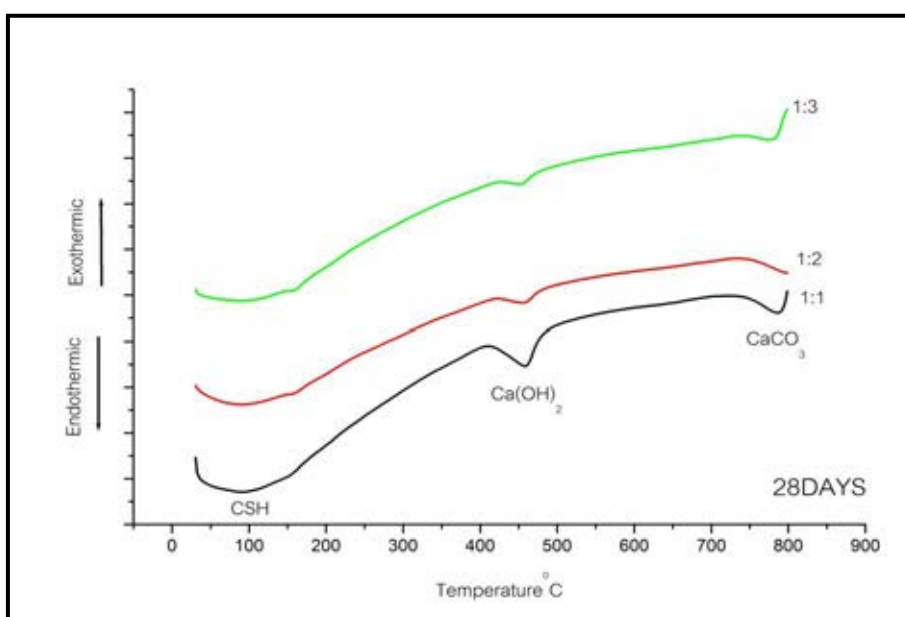
ภาพที่ 4.8 องค์ประกอบทางเฟสของเพสต์ผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และตะกั่วเหล็ก ใน สัดส่วน 1:2 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์เปรียบเทียบระหว่าง 3, 7 และ 28 วัน

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน

ผลการวิเคราะห์ค่าการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของชิ้นงานเพสต์ที่มีอัตราส่วนผสมของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และตะกั่วเหล็ก ในอัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยเปรียบเทียบ ที่ระยะเวลาบ่ม 3 และ 28 วัน พบว่าเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และตะกั่ว เหล็กในสัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 3 และ 28 วัน พบว่าพีคในช่วง $80 - 120^\circ\text{C}$ มีการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต และช่วงพีค $180 - 220^\circ\text{C}$ ต่อมาจะเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ตำแหน่งพีคในช่วงอุณหภูมิ $415 - 500^\circ\text{C}$ มีลักษณะ การสลายตัวไป ส่วนปริมาณของ MgO ที่อยู่ในรูปของ Mg(OH)_2 ที่ยังไม่มีการสลายตัวจากการ เปลี่ยนแปลงความร้อนเพราะว่าอุณหภูมิในการเริ่มสลายตัวของ Mg(OH)_2 นั้นเกินกว่าช่วงอุณหภูมิ ที่ใช้วิเคราะห์ซึ่งน่าจะมากกว่า 900°C สุดท้ายพีคในช่วงอุณหภูมิ $740 - 800^\circ\text{C}$ แสดงการสลายตัว ของสารประกอบกลุ่ม CaCO_3 ซึ่งเกิดจากการที่ตะกั่วเหล็กผสมสารประกอบ CaO อยู่มากทำให้มี โอกาสเกิดปฏิกิริยาและได้ CaCO_3 ⁽³⁵⁾ ดังภาพที่ 4.6 – 4.7

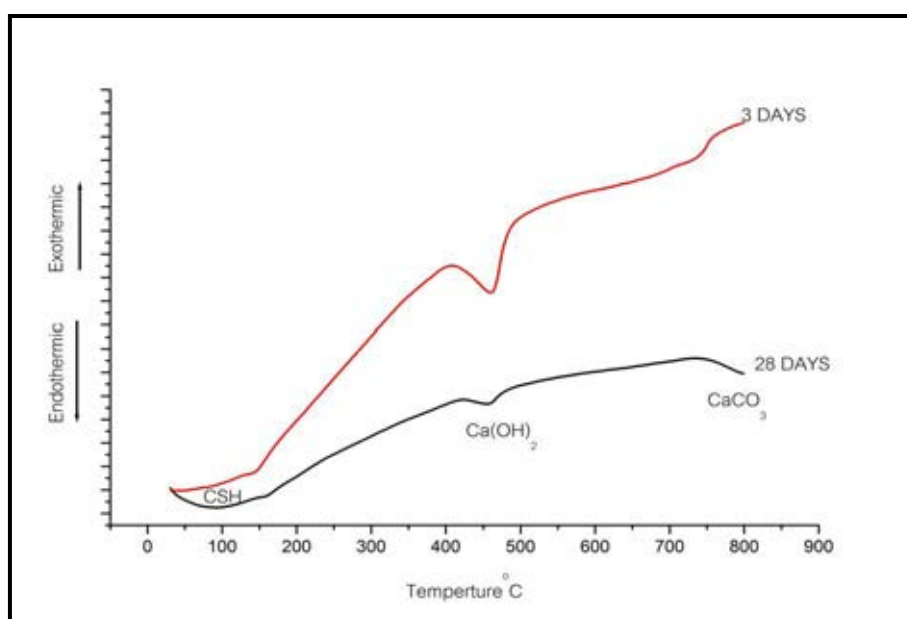


ภาพที่ 4.6 กราฟ DTA ของเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 3 วัน



ภาพที่ 4.7 กราฟ DTA ของเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ตะกรันเหล็ก ใน สัดส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 28 วัน

ผลของการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนขึ้นงานเพสต์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันที่อัตราส่วน 1:2 ที่ 3 และ 28 วัน พบว่าการสลายตัวของ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่อยู่ในช่วงพีค ประมาณ 80 – 120 °C อายุการบ่มที่ 28 วัน มีลักษณะของการสลายตัวไปที่มากขึ้นกว่า 3 วัน รวมทั้งปริมาณของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ที่มีการสลายตัวที่เป็นผลมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเปลี่ยนไปเป็น CaO ส่วนของ CaCO_3 ซึ่งมีการสลายตัวที่มากขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 750 – 800°C ดังภาพที่ 4.8

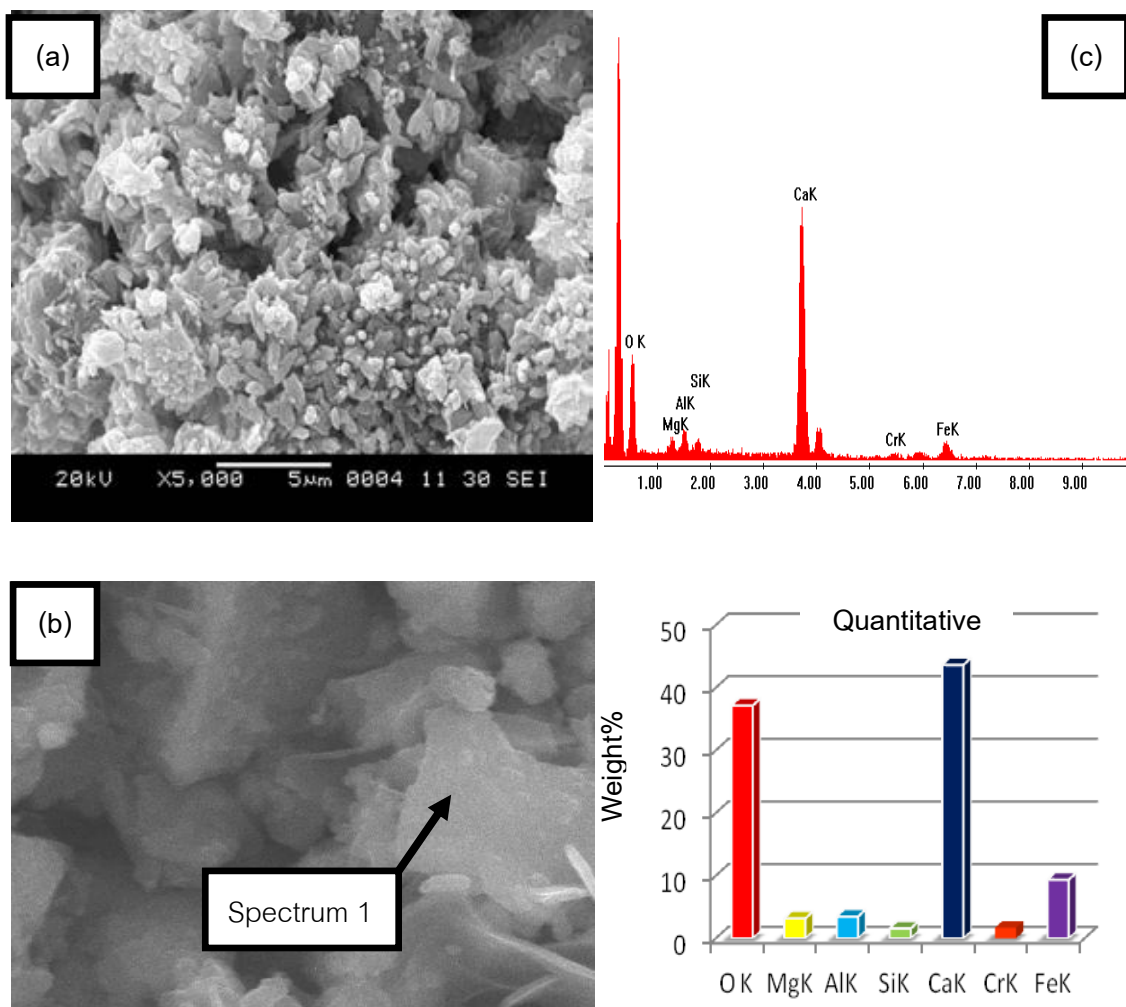


ภาพที่ 4.8 กราฟ DTA ของเพสต์ที่มีส่วนผสมระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ตะกรันเหล็กใน สัดส่วน 1:2 โดยนำหน้าวัสดุประสาน ที่เปรียบเทียบระยะเวลาในการบ่มเพสต์ 3 และ 28 วัน

4.2.3 ผลวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค SEM และ EDS

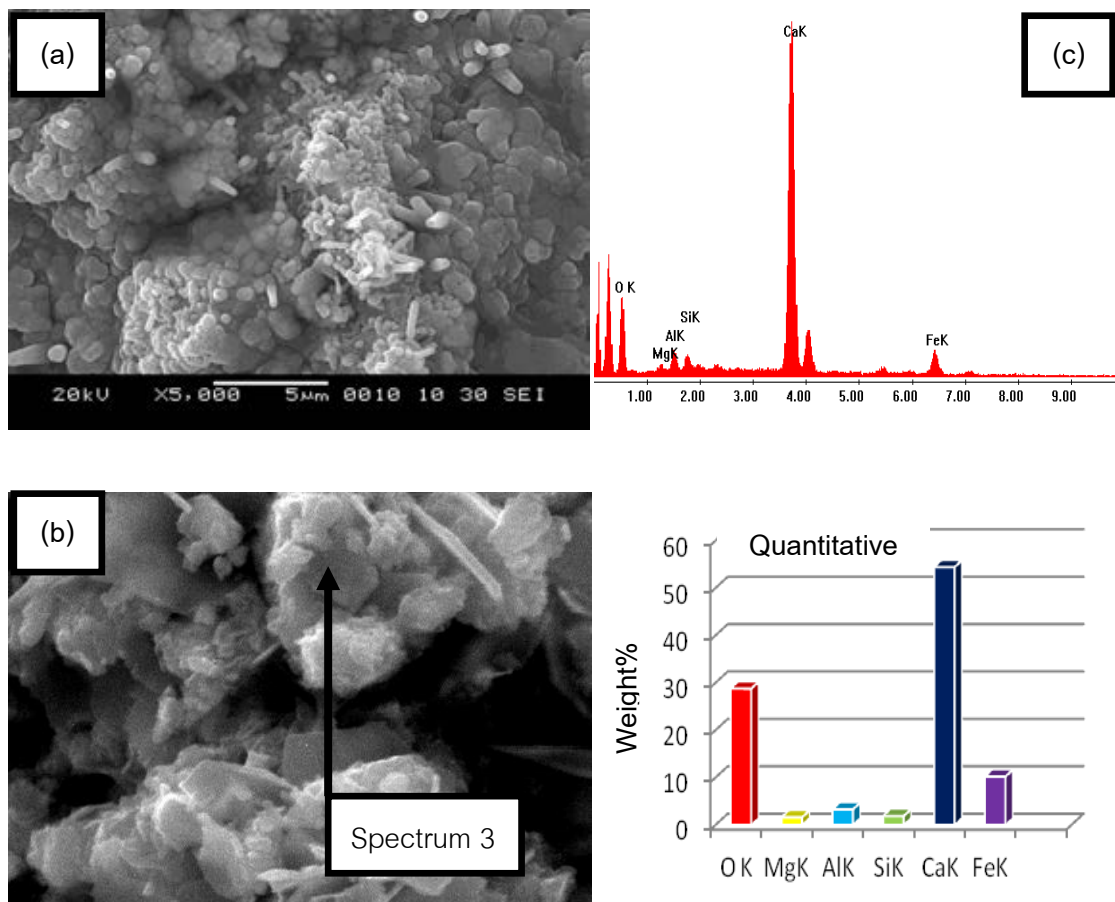
ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ EDS ของชิ้นงานเพสต์ที่มีส่วนผสมของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารปอซโซลานที่ได้จากกากตะกอนจากอุตสาหกรรม คือ ตะกรันเหล็ก ในสัดส่วน 1:2 โดยเปรียบเทียบที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเพสต์ที่สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วันพบว่า มีปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เกิดขึ้นน้อยมากสังเกตได้จากการที่ยังไม่มีการรวมตัวของผลึกยังมีความพรุนตัวอยู่มากและเมื่อยืนยันด้วยองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค EDS ตรวจพบธาตุ O, Al, Si และ Ca ซึ่งยังมีอยู่ไม่มาก คาดว่าประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ดูได้จากกราฟในภาพ (c) ดังภาพที่ 4.11



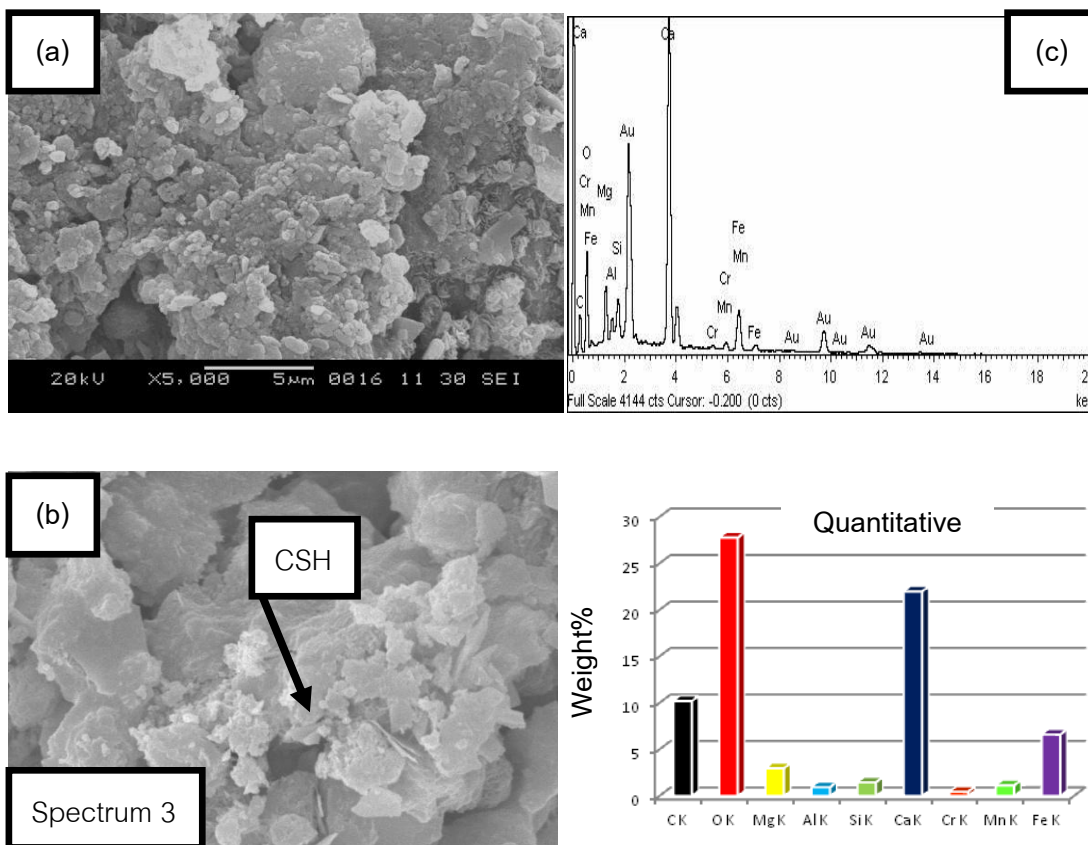
ภาพที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคของเพสต์สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 3 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเพสต์ที่สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน พบว่าเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างผลึกมีความหนาแน่นมากขึ้นซึ่งเมื่อยืนยันการวิเคราะห์องค์ประกอบทางธาตุด้วยเทคนิค EDS แล้วจะเห็นได้ว่า จุดที่ได้มีการวิเคราะห์นั้นปริมาณของธาตุ Ca เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคของเพสต์สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 7 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเพสต์ที่สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน พบว่ามีความหนาแน่นของสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต เกิดขึ้นอย่างชัดเจนและกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ และยืนยันด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค EDS เห็นได้ชัดเจนว่ามีปริมาณของธาตุ O, Si และ Ca ซึ่งเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) มีปริมาณเพิ่มขึ้นดูได้จากภาพ (c) ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคของเพสต์สัดส่วน 1:2 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ EDS ของชิ้นงานเพสต์ที่มีส่วนผสมของ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และ ตะกั่วเหล็ก ในสัดส่วน 1:2 โดยเปรียบเทียบที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน พบว่าตะกั่วเหล็กมีผลในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ดีอาจเป็นผลมาจาก C_2S สามารถสร้างโครงสร้างของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอและเพสต์มีลักษณะของความหนาแน่นของผลึกมากขึ้นดูได้จาก ภาพที่ 4.11 (a)

4.3 ผลการทดสอบสมบัติปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ผสมเสร็จใหม่

นำวัสดุปอซโซลานมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้ปริมาณน้ำต่อซีเมนต์ผสมวัสดุเชื่อมประสาน ในอัตราส่วนที่ให้ค่าการไหลตัว และเวลาการเซ็ตตัว ที่เหมาะสมต่อการหลอมมอร์ตาร์ตลอดจนนำไปทดสอบสมบัติการหดตัว ความสามารถการดูดซึมน้ำ นำไปทดสอบความต้านทานแรงอัด วิเคราะห์เฟสของมอร์ตาร์ด้วย

เทคนิค XRD และสุดท้ายโครงสร้างจุลภาคของมอร์ตาร์ด้วยเทคนิค SEM/EDS มีผลและการวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.3.1 ค่าการไหลตัวของวิธี Slump test

ผลของค่าการไหลตัวของงานวิจัยนี้จะได้มาจากการคำนวณสัดส่วนระหว่าง น้ำ ต่อ ซีเมนต์ รวมกับสารปอซโซลานซึ่งในที่นี้จะใช้เป็นกากตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก จะได้สูตรเป็น $W/(C+P)$ ตามมาตรฐาน ASTM C-109 พบว่าเมื่อมีการแทนที่ของสารปอซโซลานคือ ตะกอนเหล็กมากขึ้น ซึ่งสูตรที่มีการเพิ่มตะกอนจากเตาหลอมเหล็กมากที่สุดคือสูตรที่ SS6 (ใช้ตะกอนแทนที่ทราย 100%) แสดงให้เห็นว่าตะกอนจากเตาหลอมเหล็กมีผลต่อค่าการไหลตัวเมื่อมีปริมาณเพิ่มขึ้นและอาจจะส่งผลเสียต่อการเซ็ตตัวของปูนต่อไปแนวทางแก้ไขคือลดปริมาณของน้ำตามจำนวนที่เพิ่มขึ้นของตะกอนจากเตาหลอมเหล็ก ดังตารางที่ 4.3

ตาราง 4.3 ผลการทดสอบค่าการไหลตัว Slump test

Mix.	C	SC1	SC2	SC3	SC4	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	
Slump test (mm.)	L1	105	107	105	105	115	110	115	115	125	140	180
	L2	108	110	115	115	120	110	110	110	120	135	175

4.3.2 ผลการทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์

การทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์ตามมาตรฐาน ASTM C191-04b ด้วยเครื่อง Vicat apparatus โดยจะได้ผลของเวลาเริ่มต้นการเซ็ตตัว initial setting time จนถึงเวลาสุดท้ายของการเซ็ตตัว final setting time

จากตารางผลการทดสอบเวลาในการเซ็ตตัวของปูนซีเมนต์มีข้อกำหนดคุณลักษณะของการเซ็ตตัวตามมาตรฐาน ASTM C150 ได้กำหนดไว้ดังนี้ เวลาเริ่มต้นการเซ็ตตัว initial setting time อยู่ที่ 45 นาที และเวลาสุดท้ายของการเซ็ตตัว final setting time อยู่ที่ 375 นาที ซึ่งจากตารางที่ 4.3

พบว่าเมื่อมีการแทนที่ของตะกรันเหล็กมากขึ้น ทำให้ช่วงของการบังคับเวลาเริ่มต้นของการเซตตัว Initial setting time และเวลาสุดท้ายของการเซตตัว final setting time นานขึ้นแล้วกว้างขึ้นมาก อาจส่งผลให้การทำงานเสียเวลามากขึ้น แต่ข้อดีของการที่มีการยืดเวลาของการก่อตัวของซีเมนต์ มอร์ตาร์ออกไปนั้นก็ก็คือจะสามารถทำให้เทและเขย่าได้ฟองอากาศเพื่อให้แน่นได้ง่ายกว่าสูตรที่ไม่มี การแทนที่ตะกรันเหล็ก ดังตารางที่ 4.4

ตาราง 4.4 ผลการทดสอบเวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์

Mix.		C	SC1	SC2	SC3	SC4	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6
Setting time (min.)	initial	90	90	100	110	150	80	87	135	150	165	>210
	final	120	135	150	148	180	100	120	170	240	290	-

4.4 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด (Compressive strength)

จากการนำปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ไปหล่อขึ้นรูปเป็นชิ้นงานขนาด 5x5x5 เซนติเมตร³ แล้วนำไปทดสอบความต้านทานแรงอัด ด้วยเครื่องทดสอบกำลังอัด Universal Testing Machine – Amsler ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัด ของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน มีผลการทดสอบดังตารางที่ 4.5 - 4.6

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 3 วัน

Mix.	Compressive strength 3 days (MPa)						AV	STDV.
	1	2	3	4	5	6		
C	21.95	18.82	17.25	21.56	18.42	18.42	19.40	1.90
SC1	24.18	24.78	25.86	-	-	-	24.93	0.85
SC2	22.48	21.92	22.90	-	-	-	22.43	0.49
SC3	18.21	19.04	19.37	-	-	-	18.87	0.60
SC4	13.16	14.39	14.17	-	-	-	13.09	0.66
SS1	26.26	25.09	18.03	26.66	24.30	23.91	24.04	3.13
SS2	26.66	28.62	28.62	31.16	29.01	25.09	28.19	2.09
SS3	32.93	28.22	38.81	29.99	34.69	29.05	32.28	4.03
SS4	23.72	23.13	26.66	25.87	22.74	24.30	24.40	1.56
SS5	23.52	23.91	23.13	23.52	23.13	27.05	24.04	1.50
SS6	27.83	27.05	23.52	27.24	25.48	25.09	26.03	1.63

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบความทนต่อแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 7 วัน

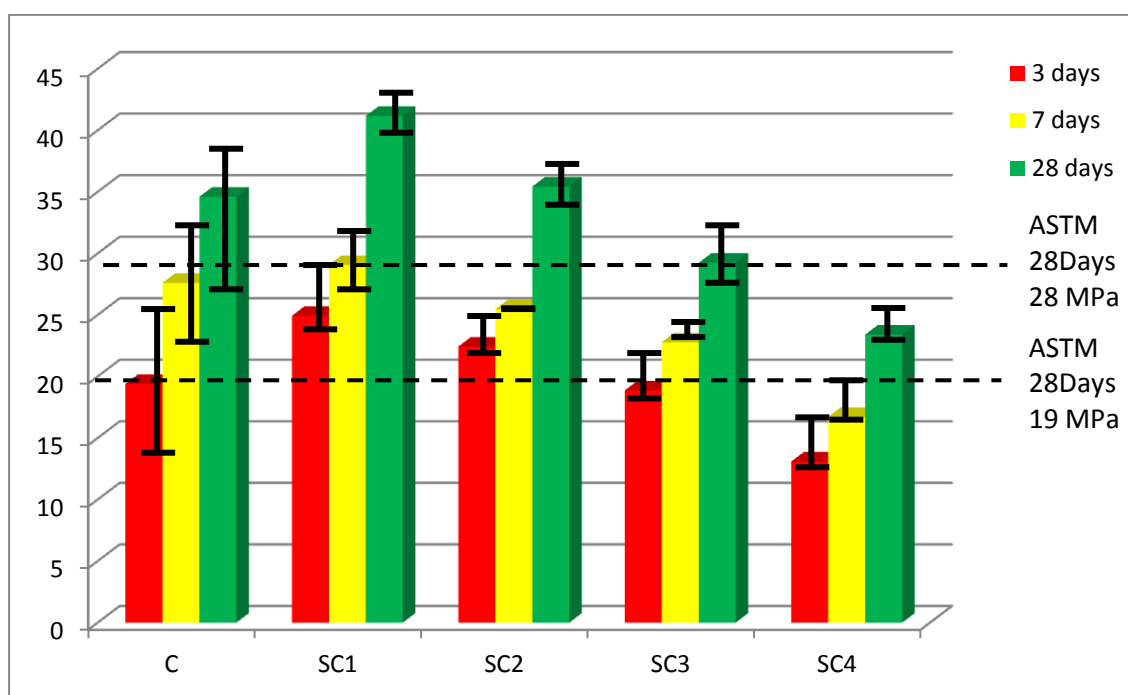
Mix.	Compressive strength 7 days (MPa)						AV	STDV.
	1	2	3	4	5	6		
C	25.09	27.44	28.22	27.05	27.83	29.79	27.60	1.54
SC1	28.27	29.00	29.92	-	-	-	29.06	0.77
SC2	25.45	25.46	25.46	-	-	-	25.46	0.01
SC3	23.00	22.75	22.61	-	-	-	22.78	0.20
SC4	17.31	16.32	16.53	-	-	-	16.72	0.52
SS1	29.99	30.97	28.81	24.50	28.22	27.64	28.35	2.24
SS2	34.89	34.69	35.08	30.97	31.36	34.50	33.58	1.89
SS3	43.51	47.43	30.58	32.14	44.30	40.38	39.72	6.87
SS4	26.66	27.05	26.66	27.05	28.22	23.72	26.56	1.50
SS5	27.05	27.83	29.79	30.97	30.58	27.05	28.88	1.78

SS6	29.40	28.22	27.64	31.16	30.97	31.75	29.86	1.69
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบความต้านทานแรงอัดของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์หลังการบ่มที่ 28 วัน								
Compressive strength 28 days (MPa)								
Mix.	1	2	3	4	5	6	AV	STDV
C	31.75	32.93	33.12	32.93	33.71	28.62	32.18	1.86
SC1	41.47	40.56	41.49	-	-	-	41.17	0.53
SC2	35.66	35.82	34.82	-	-	-	35.43	0.54
SC3	28.38	29.54	29.80	-	-	-	29.24	0.76
SC4	22.94	23.50	23.77	-	-	-	23.40	0.42
SS1	34.10	34.89	40.38	33.91	33.52	32.34	34.85	2.83
SS2	36.46	38.81	38.02	37.24	38.42	38.22	37.86	0.86
SS3	46.80	43.16	43.51	44.10	45.08	45.32	44.66	1.35
SS4	30.18	30.97	31.36	31.75	32.14	31.16	31.26	0.68
SS5	33.32	33.12	32.54	34.50	31.36	35.67	33.42	1.51
SS6	32.14	34.69	35.67	36.46	38.81	36.46	35.70	2.21

จากการทดลอง ASTM C150-05⁽³⁰⁾ ได้กำหนดค่าความต้านทานแรงอัด (Compressive strength) ของปูนที่อายุการบ่ม 7 วันและ 28 วัน จะมีค่าความต้านทานแรงอัดอยู่ที่ 19 MPa และ 28 MPa ตามลำดับ

จากการทดสอบสูตรของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนด้วยตะกั่วเหล็ก พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกั่วเหล็ก ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7 แรกของอายุการบ่มผลของค่าความต้านทานแรงอัดที่ได้มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นทุกสูตรนั้นน่าจะเป็นผลของปฏิกิริยาในการพัฒนากำลังอัดของ C_3S ซึ่ง C_3S ทำปฏิกิริยากับน้ำในปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดการก่อตัวและแข็งตัวพร้อมทั้งให้ค่าความต้านทานแรงอัดที่ดีในช่วง 7 วันแรก และที่ 28 วัน จะมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของตะกั่วเหล็กมากกว่าร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ค่าความต้านทานแรงอัดที่ลดลงน่าจะมาจากปฏิกิริยาของสารประกอบ MgO ในตะกั่วเหล็กซึ่งมีปริมาณมาก ทำให้ปฏิกิริยาการระหว่งปูนซีเมนต์กับน้ำเพื่อให้เกิดสารประกอบ CSH ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ให้ความแข็งแรงนั้นน้อยลงตามไปด้วย สารประกอบ MgO ยังอาจเกิดปฏิกิริยากับน้ำเกิดเป็น $Mg(OH)_2$ ซึ่งทำให้ชิ้นงานแตกร้าววม

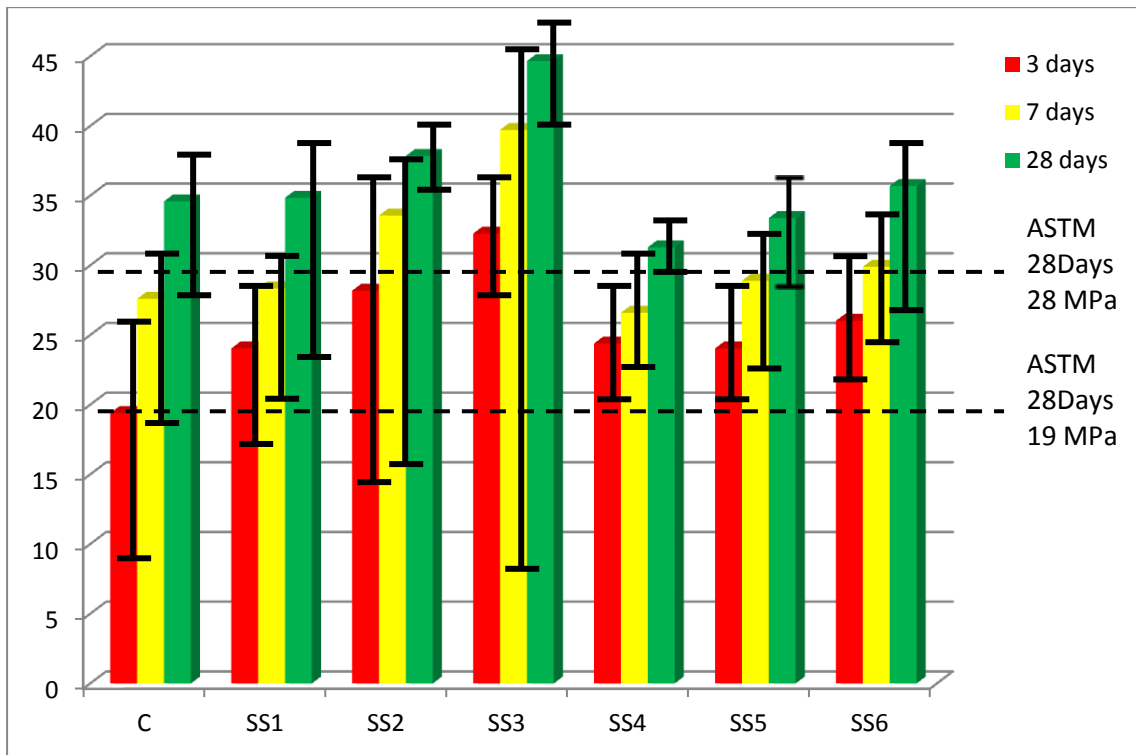
ภายใน ความต้านทานแรงอัดที่ได้จึงลดลง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการที่ใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์สามารถที่จะมีการแทนที่ได้ในอัตราส่วนที่ไม่น่าจะเกิน ร้อยละ 20 และเมื่อมีการแทนที่ตะกรันเหล็กมากขึ้นกว่าร้อยละ 20 ทำให้แนวโน้มของค่าความต้านทานแรงอัดนั้นลดลงตามไปด้วย ดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงอัดใช้ตะกรันเหล็กแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก บ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน

จากการทดสอบสูตรของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ทรายด้วยตะกรันเหล็ก พบว่าค่าความต้านทานแรงอัดของงานมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยตะกรันเหล็ก ร้อยละ 10, 20, 40, 60, 80, และ 100 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่ระยะเวลาบ่ม 3, 7 และ 28 วัน มีค่าความต้านทานแรงอัดที่เพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานตาม ASTM C150-05 โดยสูตร SS3 ซึ่งมีค่ามากที่สุดคือ 44.66 MPa แต่จะมีค่าความต้านทานต่อแรงอัดที่ลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการแทนที่ทรายที่มากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน เพราะว่าการที่มีกรนำตะกรันเหล็กแทนที่ทรายแต่คงไว้ซึ่งปริมาณของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแทนที่ทรายด้วยตะกรันเหล็กเพื่อทำปฏิกิริยากับน้ำนั้น ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดมากขึ้นกว่าการที่นำตะกรันเหล็กไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กล่าวคือโอกาสของการที่ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะสร้างโครงสร้างของ CSH ให้เกิดขึ้นมานั้นได้ดีกว่าและส่งผลให้การพัฒนา

ค่าความต้านทานแรงอัดดีขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อมีปริมาณของตะกอนเหล็กเพิ่มขึ้นมากกว่าร้อยละ 40 และมีค่าความต้านทานแรงอัดที่ลดลงนั้นเป็นสาเหตุมาจากการที่เมื่อมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่าเดิมแต่ปริมาณของตะกอนเหล็กเพิ่มขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของน้ำที่พอเหมาะต่อการทำปฏิกิริยานั้นไม่พอดีหรือมีน้ำส่วนเกินในโครงสร้างเกิดขึ้นเมื่อมีการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างจึงเกิดช่องว่างขึ้นจึงเกิดความไม่แข็งแรงขึ้นในโครงสร้างจนส่งผลให้น้ำขึ้นตัวอย่างไปทดสอบความต้านทานแรงอัดค่าที่ได้จึงต่ำลงตามปริมาณตะกอนเหล็กที่เพิ่มขึ้น⁽³³⁾ ดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงอัดการใช้ตะกอนเหล็กแทนที่ทราย 10, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก บ่มที่ 3, 7 และ 28 วัน

4.5 ผลการทดสอบการหดตัว/ขยายตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

ได้ทำการหล่อปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ในแบบหล่อมาตรฐานขนาด 5x5x5 เซนติเมตร³ การหดตัวหาได้โดยคำนวณค่า % การหดตัวหลังจากเวลาผ่านไป 3, 7 และ 28 วัน จากเปอร์เซ็นต์การหด/การขยายตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตรที่ทำการทดลองทั้งหมด 11 สูตร ส่วนใหญ่จะเกิดการขยายตัวแต่ไม่มีความรุนแรงมากของการขยาย การที่มีการขยายตัวเกิดขึ้นเพราะว่ามีจำนวนของปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพิ่มขึ้น (แคลเซียมอะลูมิเนตซีเมนต์ลดลง) โดยรวมเปอร์เซ็นต์ของการขยายตัวจะมีไม่เกิน 1% สำหรับการทดสอบในงานวิจัยนี้ เหตุที่ซีเมนต์มอร์ตาร์มีการขยายตัวนั้นส่วน

ใหญ่เกิดมาจาก เอพทริงไคต์ ($6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{SO}_3\cdot32\text{H}_2\text{O}$) ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่มีระบบซีเมนต์เป็นแบบ Aluminous cement, Portland cement, Anhydrite System จะทำให้เกิดการหดตัว ขยายตัว การขยายตัวจะเกิดหลังจาก Final setting แล้ว โดยทั่วไป Ettingite (เกิดจากการทำปฏิกิริยาจาก C_3A กับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และน้ำ) จะทำให้เกิดการขยายตัวและถ้ามี Portlandite (เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , C_2S) กับน้ำ) อยู่ร่วมด้วยในปฏิกิริยา จะทำให้เกิดการขยายตัวมากขึ้น อาจเป็นเพราะว่าการที่ 2OH^- ที่ได้จาก Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ปริมาณมากไปแทนที่ซัลเฟต (SO_4^{2-}) ซึ่งมีผลทำให้ขยายตัวมากขึ้น ดังตารางที่ 4.8 - 4.10

ตาราง 4.8 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์บ่มที่ 3 วัน

Mix.	Drying shrinkage 3 day (%)						AV	S.D.
	1	2	3	4	5	6		
C	+0.10	+0.30	+0.10	+0.20	+0.00	+0.10	0.13	0.10
SC1	+0.10	+0.30	+0.20	+0.10	+0.10	+0.30	0.18	0.10
SC2	+0.20	+0.20	+0.30	+0.20	+0.10	+0.00	0.16	0.10
SC3	+0.20	+0.10	+0.10	+0.30	+0.20	+0.10	0.16	0.08
SC4	+0.10	+0.00	+0.20	+0.30	+0.30	+0.00	0.15	0.14
SS1	+0.30	+0.00	+0.00	+0.10	+0.10	+0.20	0.11	0.12
SS2	+0.00	+0.10	+0.20	+0.10	+0.10	+0.20	0.11	0.08
SS3	+0.10	+0.10	+0.10	+0.10	+0.20	+0.20	0.13	0.05
SS4	+0.00	+0.10	+0.00	+0.00	+0.10	+0.30	0.08	0.12
SS5	+0.10	+0.20	+0.10	+0.00	+0.10	+0.10	0.10	0.06
SS6	+0.20	+0.20	+0.30	+0.10	+0.10	+0.30	0.20	0.09

ตาราง 4.9 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์บ่มที่ 7 วัน

Mix.	Drying shrinkage 7 day (%)						AV	S.D.
	1	2	3	4	5	6		
C	+0.40	+0.40	+0.20	+0.40	+0.50	+0.20	0.35	0.12
SC1	+0.30	+0.50	+0.30	+0.20	+0.30	+0.30	0.31	0.10
SC2	+0.30	+0.30	+0.40	+0.50	+0.40	+0.20	0.35	0.10
SC3	+0.30	+0.30	+0.30	+0.30	+0.50	+0.10	0.30	0.13
SC4	+0.30	+0.50	+0.20	+0.10	+0.40	+0.20	0.28	0.15
SS1	+0.50	+0.30	+0.20	+0.40	+0.30	+0.30	0.33	0.10
SS2	+0.30	+0.30	+0.30	+0.30	+0.40	+0.20	0.30	0.06
SS3	+0.30	+0.20	+0.30	+0.30	+0.20	+0.40	0.28	0.08
SS4	+0.50	+0.30	+0.50	+0.30	+0.30	+0.30	0.36	0.10
SS5	+0.30	+0.40	+0.40	+0.40	+0.20	+0.30	0.33	0.08
SS6	+0.40	+0.40	+0.40	+0.30	+0.10	+0.20	0.30	0.13

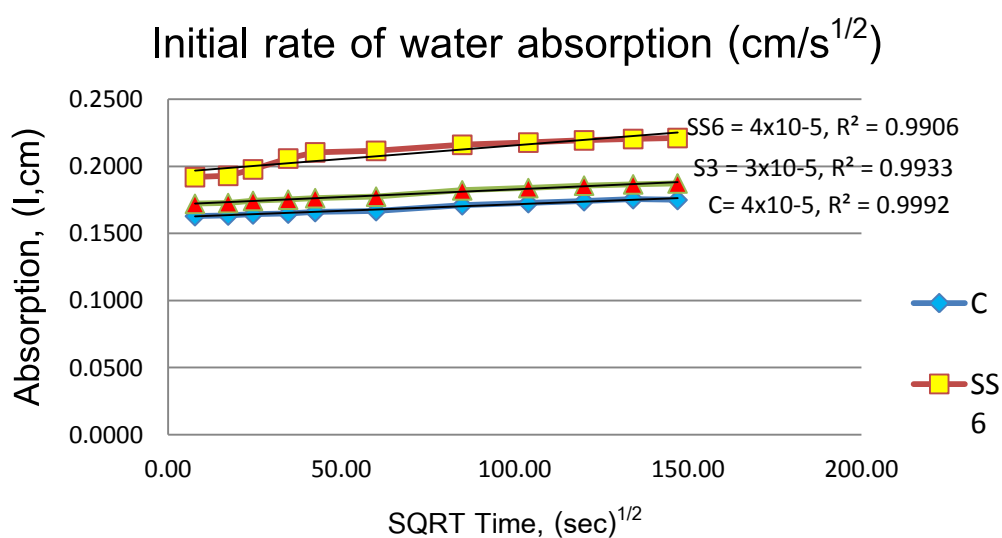
ตาราง 4.10 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์บ่มที่ 28 วัน

Mix.	Drying shrinkage 28 day (%)						AV	S.D.
	1	2	3	4	5	6		
C	+0.50	+0.50	+0.60	+0.50	+0.60	+0.60	0.55	0.05
SC1	+0.60	+0.40	+0.60	+0.60	+0.60	+0.50	0.55	0.08
SC2	+0.50	+0.50	+0.50	+0.60	+0.70	+0.30	0.51	0.13
SC3	+0.40	+0.50	+0.60	+0.50	+0.40	+0.60	0.50	0.09
SC4	+0.40	+0.40	+0.40	+0.50	+0.60	+0.50	0.46	0.08
SS1	+0.30	+0.30	+0.50	+0.70	+0.60	+0.60	0.50	0.17
SS2	+0.50	+0.50	+0.60	+0.60	+0.60	+0.30	0.51	0.12
SS3	+0.50	+0.50	+0.60	+0.60	+0.50	+0.30	0.50	0.11
SS4	+0.50	+0.60	+0.50	+0.70	+0.30	+0.40	0.50	0.14
SS5	+0.50	+0.40	+0.60	+0.40	+0.70	+0.50	0.51	0.12
SS6	+0.40	+0.50	+0.60	+0.60	+0.50	+0.60	0.53	0.08

4.6 ผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

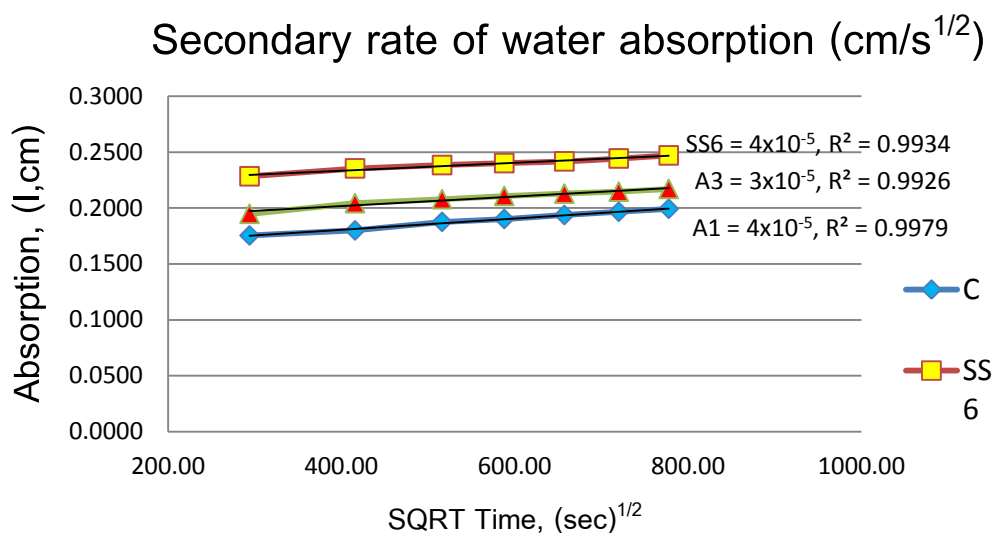
การทดสอบนี้จะแบ่งผลการทดสอบเป็นสองช่วงคือ อัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption) สมารถหาได้จากความชัน (Slope) ของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดซึมน้ำ (Water Absorption, I) กับค่ารากที่สองของเวลาโดยใช้ช่วงเวลา 1 นาที จนถึง 6 ชั่วโมง และอัตราการดูดซึมน้ำช่วงที่ 2 (Secondary Rate of Water Absorption) ใช้วิธีคำนวณเช่นเดียวกับอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption) แต่ใช้เวลาของ 1 วัน จนถึง 7 วัน

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการดูดซึมน้ำของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ทั้งหมด 7 สูตร มีผลการทดสอบที่น่าสนใจอยู่ 3 สูตร คือ C, SS3 และ SS6 นำมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในภาพที่ 4.14 และภาพที่ 4.15 พบว่าทั้งสามสูตรมีอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption) ที่สูงในระยะ 6 ชั่วโมงแรกเนื่องจากปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ยังมีความแห้งอยู่ในโครงสร้างมากโดยดูได้จากกราฟในภาพที่ 4.14 และพอเข้าสู่ช่วงที่ 2 (Secondary Rate of Water Absorption) ความเร็วของอัตราการดูดซึมน้ำเริ่มช้าและต่ำลง เนื่องจากเข้าสู่ช่วงของการอิ่มตัวดูได้จากกราฟในภาพที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้เวลานานการบ่มมากขึ้น น้ำจะเข้าไปแทนที่รูพรุนที่อยู่ในโครงสร้างของซีเมนต์มอร์ตาร์ทำให้อัตราการดูดซึมน้ำลดลงและจากการทดสอบได้พบว่า ซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร SS6 มีอัตราการดูดซึมน้ำที่สูงที่สุดนั้นแสดงให้เห็นได้ว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นมีผลต่อการรับแรง และเป็นผลสืบเนื่องมาจากกาที่ใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาที่สูงของสูตร SS6 จึงทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 4.14 อัตราการดูดซึมน้ำเริ่มต้น (Initial Rate of Water Absorption)

สูตร C, SS6 และ SS3

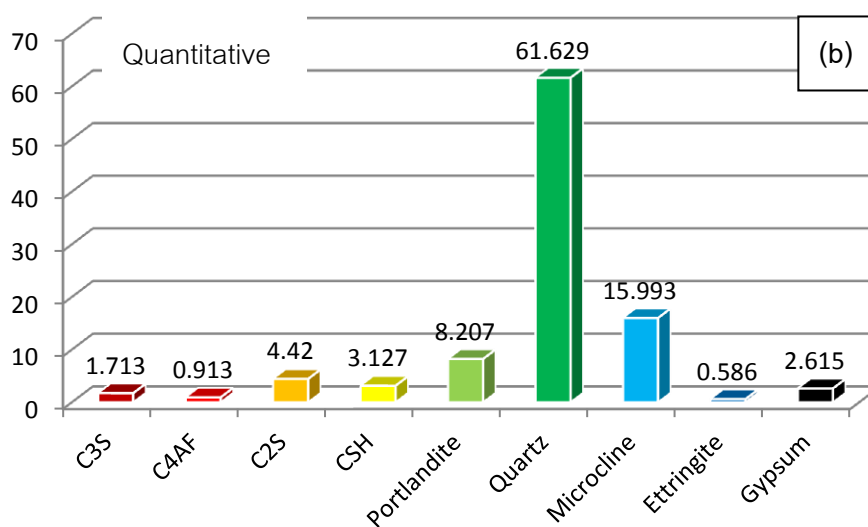
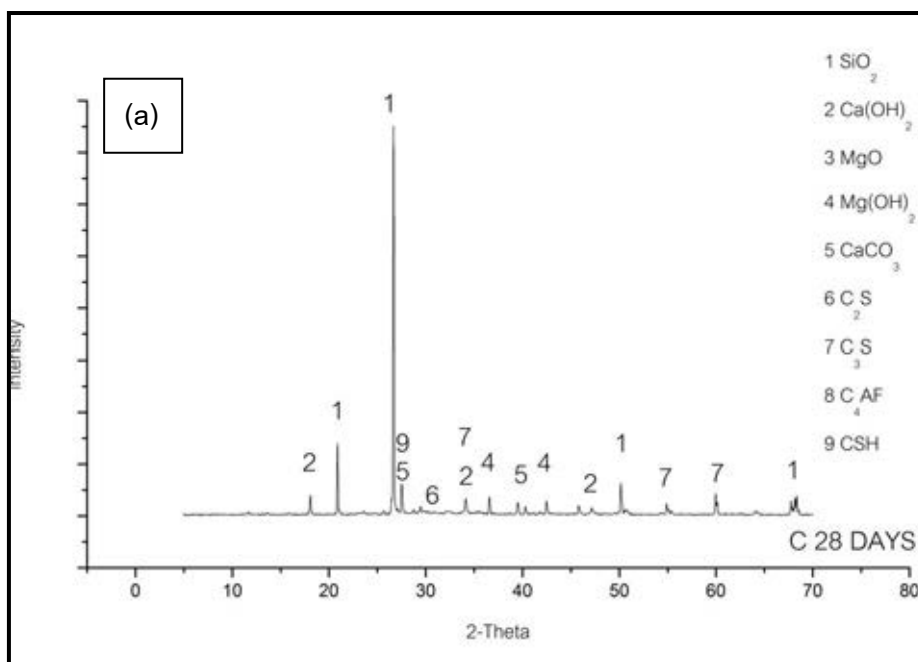


ภาพที่ 4.15 อัตราการดูดซึมน้ำช่วง 2 (Secondary Rate of Water Absorption)

สูตร C, SS6 และ SS3

4.7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

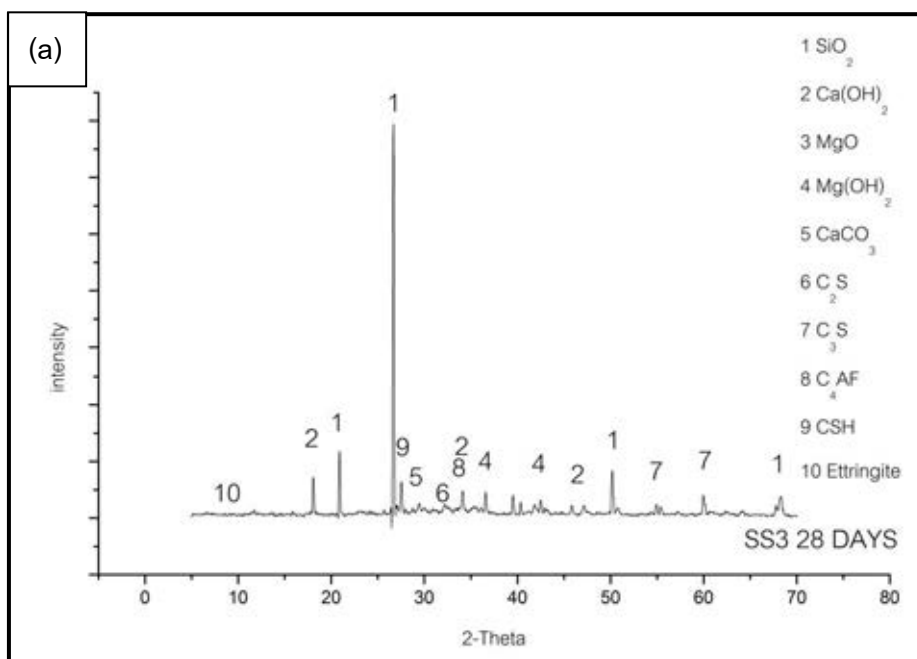
องค์ประกอบทางเฟสของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C ป่มที่ 28 วัน พบว่าเฟสหลักคือซิลิกา (SiO_2 , JCPDS 01-086-1629) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2 , JCPDS 01-072-0156) ที่ยังคงหลงเหลืออยู่เป็นเพราะว่าอาจจะทำปฏิกิริยาไม่หมด ส่วน MgO ที่อยู่ในองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะอยู่ในรูปของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2 , JCPDS 00-044-1482) และเฟสของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3 , JCPDS 01-086-0174) ที่แทรกอยู่ตามโครงสร้างของมอร์ตาร์ สุดท้ายจะเป็นเฟสของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , JCPDS 01-073-0599) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S , JCPDS 00-049-1673) ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำจนเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH, JCPDS 00-029-0373) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสแบบเชิงปริมาณ (Quantitative) จากกราฟแสดงถึงปริมาณของธาตุองค์ประกอบเฟสของสูตร C จากการตรวจสอบยืนยันได้ว่าพบธาตุองค์ประกอบหลักและธาตุองค์ประกอบรองในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์แต่ปริมาณของเอททริงไกต์ที่วิเคราะห์พบนั้นน้อยมากจนไม่สามารถที่จะยืนยันในองค์ประกอบเฟสได้เลย ดังภาพที่ 4.16

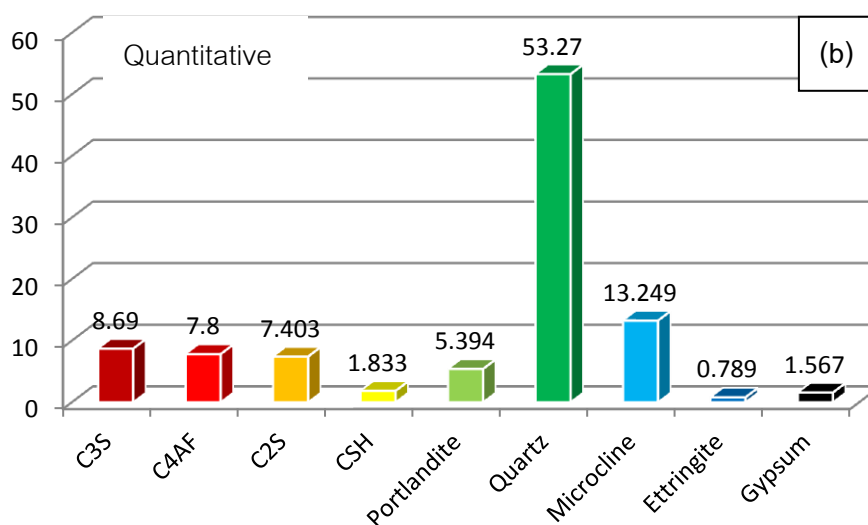


ภาพที่ 4.16 (a) เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สูตร C, (b) ปริมาณองค์ประกอบเฟสแบบ Quantitative (%) สูตร C บ่มที่ 28 วัน

องค์ประกอบทางเฟสของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร SS3 สังเกตได้ว่าเฟสหลักคือซิลิกา (SiO_2 , JCPDS 01-086-1629) มีปริมาณลดลงเป็นเพราะว่าสูตร SS3 นี้มีการลดปริมาณทรายน้อยลงและมีการแทนที่ด้วยตะกั่วเหล็ก ในปริมาณร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และมีการใส่ปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เท่ากับสูตร C ซึ่งเป็นสูตรมาตรฐาน พบว่า ปริมาณของ MgO ที่อยู่ในองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะอยู่ในรูปของ

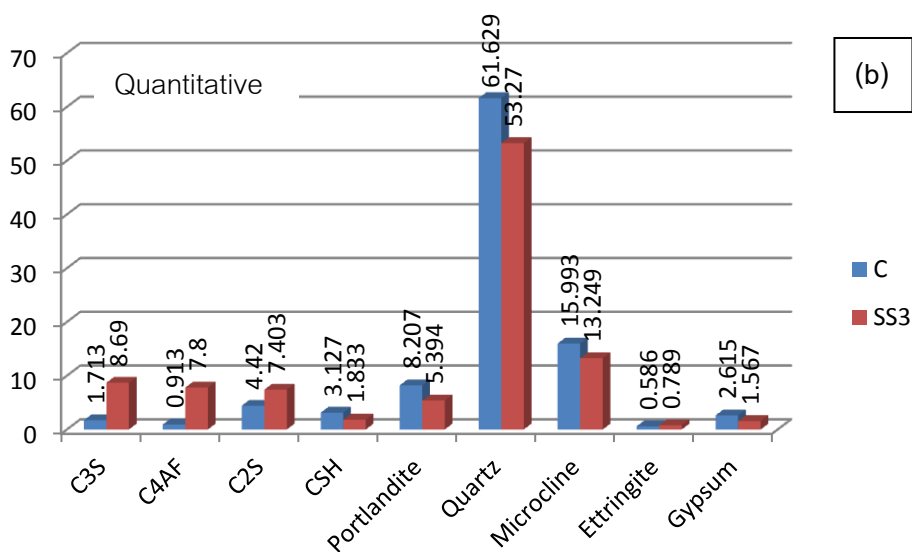
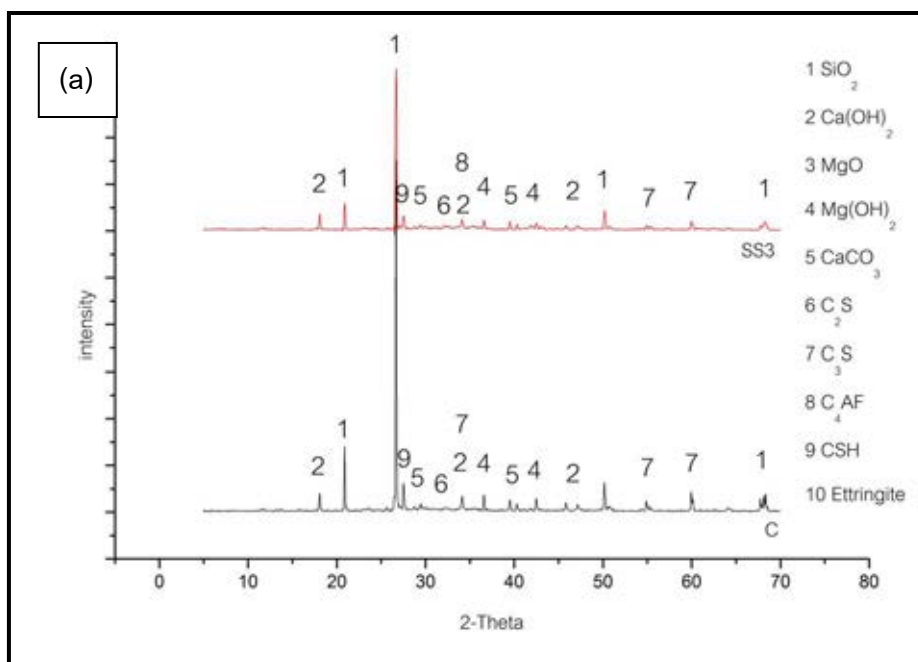
แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$, JCPDS 00-044-1482) เป็นออกไซด์ที่มาจากตะกอนหลักส่วนใหญ่ แต่ดูจากปริมาณของเฟสที่เกิดขึ้นของแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อการขยายตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นมีไม่มากจึงไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงอัดที่มีการทดสอบไปก่อนหน้านี้แต่อย่างใด ประกอบกับการที่มีเฟสของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH, JCPDS 00-029-0373) ที่มาจากปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S , JCPDS 01-073-0599) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S , JCPDS 00-049-1673) ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำ ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างและยึดประสานโครงสร้างให้แน่นหนาเหมาะแก่การรับแรงได้ สุดท้ายเมื่อตรวจสอบวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบหลักจากการวิเคราะห์องค์ประกอบเฟสแบบเชิงปริมาณ (Quantitative) พบปริมาณของ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF , JCPDS 00-011-0124) ที่มีมากกว่าปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C น่าจะเป็นผลมาจากการที่มีการแทนที่ตะกอนหลักเข้าไปจึงเพิ่มปริมาณของ เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอไรต์ ส่งผลให้สมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ได้มาจากสูตร SS3 อาจจะเกิดสมบัติของการทนต่อซัลเฟตได้ดี ดังภาพที่ 4.17





ภาพที่ 4.17 (a) เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สูตร SS3, (b) องค์ประกอบเฟสแบบ Quantitative (%) สูตร SS3 บ่มที่ 28 วัน

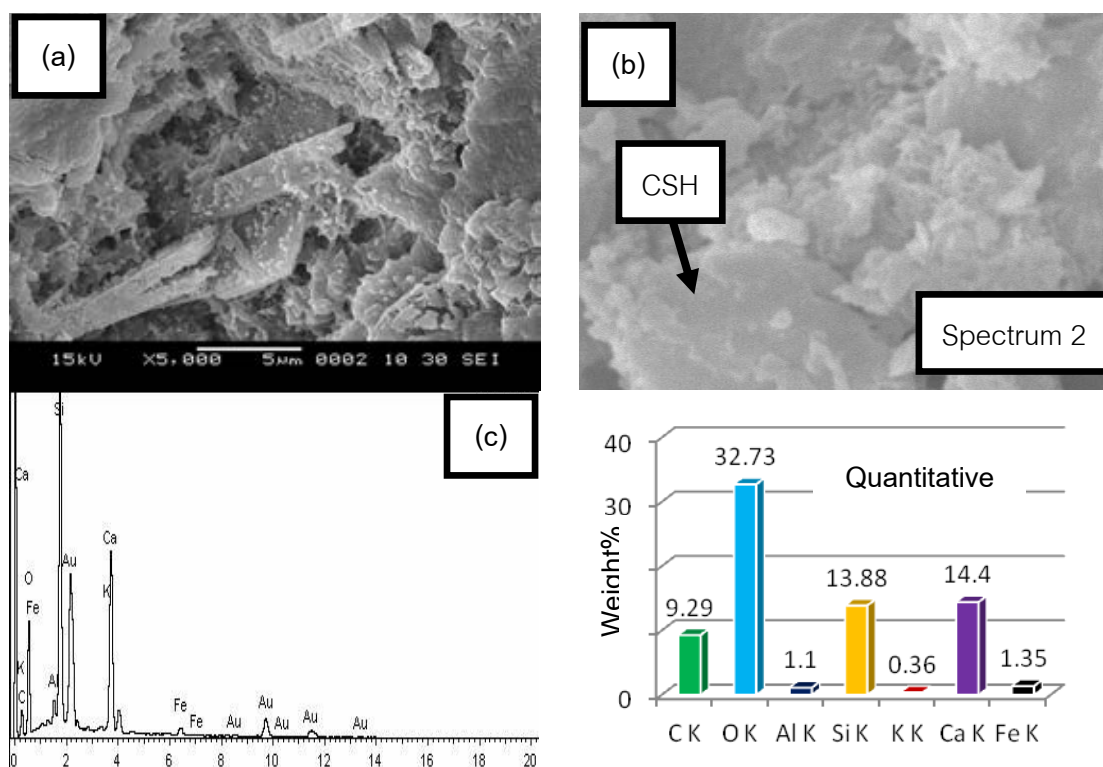
จากผลการวิเคราะห์เฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์รวมทั้งองค์ประกอบเฟสแบบเชิงปริมาณ สูตร C และ SS3 ที่อายุการบ่ม 28 วัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกันพบว่า ลักษณะของการเกิดเฟสของ สูตร SS3 นั้น ผลที่ได้ออกมานั้น ปฏิบัติการในการเกิดเฟสใกล้เคียงกับเฟสของมอร์ตาร์สูตร C ซึ่งเป็นสูตรมาตรฐานมีแค่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับทรายทำปฏิกิริยากับน้ำเท่านั้นเพียงแต่ว่าปริมาณของซิลิกา ในสูตร SS3 นั้นต่ำกว่าเป็นเพราะว่าได้มีการลดปริมาณอัตราส่วนของทรายและแทนที่ด้วยตะกรัน ต่อมาจะเป็นการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเมื่อมีการแทนที่ทรายด้วยตะกรันหลักสิ่งที่ทำให้เกิดโครงสร้างของ CSH นั้นส่วนใหญ่จะมาจาก C_2S เป็นหลักโดยขึ้นอยู่กับการแตกตัวและการสลายของตะกรันหลักเมื่อสัมผัสกับไอออนของ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ตะกรันหลักซึ่งมีคุณสมบัติความเป็นสารปอซโซลานอยู่บ้างแล้วจึงทำให้เกิด CSH และเพิ่มความแข็งแรงให้กับมอร์ตาร์⁽³⁴⁾ แต่ในกรณีของสูตร C นั้น CSH ส่วนใหญ่จะได้มาจาก C_3S ซึ่งโครงสร้างของ CSH จะสามารถพบได้ในส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคของซีเมนต์มอร์ตาร์ต่อไป ดังภาพที่ 4.18



ภาพที่ 4.18 (a) เปรียบเทียบเฟสองค์ประกอบของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ สูตร C และ สูตร SS3 (b) เปรียบเทียบองค์ประกอบเฟสแบบ Quantitative (%) สูตร SS3 บมที่ 28 วัน

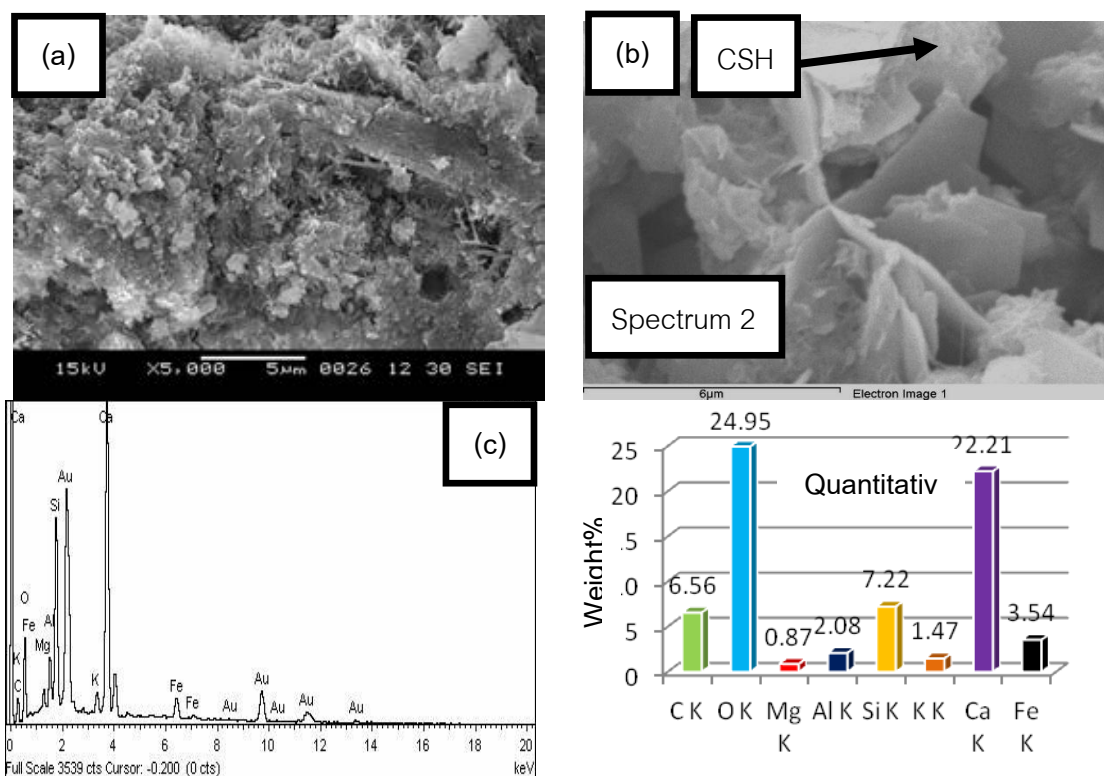
4.8 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน พบว่าพบการก่อตัวของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งประกอบด้วยธาตุ O, Al, Si และ Ca อยู่ปริมาณที่มาก โครงสร้างของ CSH มีการก่อตัวเพิ่มขึ้นสูงและส่งผลให้ความหนาแน่นของผลึกมีมากขึ้น ดังภาพ 4.19 (b)



ภาพที่ 4.19 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร C ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร SS3 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วันจากภาพ (b) จะเห็นได้ชัดว่ามีผลึกของสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เกิดขึ้นเช่นเดียวกับสูตร C ปริมาณความหนาแน่นของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีการสร้างโครงสร้างขึ้นมาหนาแน่นกว่าโครงสร้างในสูตร C ส่วนการเกิดโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตของในสูตร SS3 นั้นมาจากปริมาณของธาตุองค์ประกอบที่วิเคราะห์คือ O, Al, Si และ Ca ทำปฏิกิริยากันจนเกิด แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต และ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นโครงสร้างหลักของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ ซึ่งยืนยันได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย EDS ทำให้เกิดโครงสร้างของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่แข็งแรงตามมาด้วย ดังภาพที่ 4.20



ภาพที่ 4.20 โครงสร้างจุลภาคของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์สูตร SS3 ที่ระยะเวลาบ่ม 28 วัน (a) โครงสร้างจุลภาค, (b) บริเวณที่ทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS, (c) สเปกตรัมแสดงองค์ประกอบของธาตุ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาปฏิกิริยาปอซโซลานิก

จากปฏิกิริยาในสารปอซโซลานิกที่เกิดจากตะกั่วหนักบดผสมทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ พบว่ามีการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ดี เมื่อมีระยะเวลาในการบ่มเพสต์เพิ่มมากขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่เกิดขึ้นทำให้เกิดสารเชื่อมประสานหลักอย่างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีผลต่อโครงสร้างในปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ต่อไป จึงสรุปได้ว่าการทดสอบปฏิกิริยาปอซโซลานิก ตะกั่วหนักสามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุเชื่อมประสานได้ดีแต่ต้องมีการเตรียมตะกั่วหนักให้เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยา คือ ต้องบดให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงจะส่งผลให้ปฏิกิริยานั้นเกิดได้สมบูรณ์

5.1.2 การศึกษาสมบัติของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์

1. ค่าของอัตราการไหลตัวเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกก่อนที่จะมีการออกแบบส่วนผสมของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์เพราะว่าถ้ามีการปรับอัตราการไหลตัวไม่เหมาะสมจะส่งผลให้เวลาในการเซตตัวของปูนซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นขยายออกไปใช้เวลานานขึ้นอาจจะทำให้เสียเวลาในการทำงานและส่งผลต่อโครงสร้างได้ ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้สรุปได้ว่า ถ้ามีการนำตะกั่วหนักมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อหล่อซีเมนต์มอร์ตาร์ควรจะมีอัตราส่วนของน้ำไม่เกิน 0.69 wt% และในส่วนของสูตรที่มีการนำตะกั่วหนักมาใช้แทนที่ทรายเพื่อหล่อซีเมนต์มอร์ตาร์ควรจะมีอัตราส่วนของน้ำไม่เกิน 0.35 wt% เพราะว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณของตะกั่วหนักจากเตาหลอมเหล็กกล้ามากขึ้นในส่วนผสมจะทำให้ค่าการไหลตัวมีมากขึ้นและค่าการเซตตัวก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

2. ความต้านทานแรงอัด (Compressive strength) สูตรที่มีการนำตะกั่วหนักมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อหล่อซีเมนต์มอร์ตาร์นั้นจากผลการทดลองค่าความต้านทานแรงอัดจะมีมากที่สุดเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 10 และ 20 wt% เท่านั้นและเมื่อมีการเพิ่มไปมากกว่านี้ค่าความแข็งแรงก็จะลดน้อยลงจะได้ค่าความทนต่อแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 41.17 MPa และส่วนของสูตรที่มีการนำตะกั่วหนักมาใช้แทนที่ทรายเพื่อหล่อซีเมนต์มอร์ตาร์ทำการแทนที่ได้สูงสุดที่ 40 wt% และได้ค่าความทนต่อแรงอัดสูงสุดอยู่ที่ 44.66 MPa

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาด้านการนำตะกรันจากเตาหลอมเหล็กมาใช้ให้ได้ประโยชน์มากที่สุดเพราะว่าของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเหล็กนี้ยังมีปริมาณที่มากอยู่ในปัจจุบันและถ้าเป็นไปได้ว่าสามารถนำมาใช้งานได้มากขึ้นก็จะเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้นด้วย

2. จากการที่ได้นำตะกรันจากเตาหลอมเหล็กมาใช้ประโยชน์ครั้งนี้สังเกตได้ว่าถ้าสามารถเพิ่มปริมาณของการแทนที่ในส่วนผสมได้มากขึ้นก็อาจจะทำให้มอร์ตาร์ที่ได้ออกมานำไปทำเป็นวัสดุรับแรงได้อย่างดีอีกประเภทหนึ่ง

3. ก่อนนำตะกรันเหล็กมาใช้วิเคราะห์ทดสอบควรจะเตรียมให้พร้อมในการใช้งาน เช่น มีการนำมาทำความสะอาดคัดสิ่งสกปรกที่เจือปนอยู่ออก และนำไปอบก่อนนำมาใช้ เพื่อให้สมบัติของตะกรันเหล็กคงตัวที่สุดต่อการที่จะนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อที่จะทำให้ผลของการทดสอบวิเคราะห์นั้นไม่คลาดเคลื่อน

4. เมื่อมีการนำสารปอซโซลานที่มาจากของเสียในแหล่งต่างๆมาใช้ในการงานคอนกรีต ควรมีการทดสอบปฏิกิริยาเบื้องต้นของสารปอซโซลานนั้นๆก่อนโดยวิธีเร่งปฏิกิริยาของสารปอซโซลานคือการนำมาทดสอบในออตเคฟล์เพื่อดูผลที่มาจากการเติมสารปอซโซลานกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นไปในทางที่ดีหรือส่งผลเสียหายต่อคอนกรีต

รายการอ้างอิง

- (1) ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortar (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens, C109/C 109M-05, 2009
- (2) ASTM, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, C 618, 2001.
- (3) ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และปริญญา จินดาประเสริฐ, ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต, พิมพ์ครั้งที่ 7, ศูนย์วิจัย และพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2555.
- (4) ชัชวาล เศรษฐบุตร, ช.คอนกรีต เทคโนโลยี (CONCRETE TECHNOLOGY), พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: ผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง, 2536.
- (5) C. Shi and Robert L. Day. Pozzolan reaction in the presence of chemical activators Part II. Reaction products and mechanism. Cement and Concrete Research.30(2000): 607 – 613.
- (6) ASTM, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete, C 618-94a.
- (7) Shen H. and Forssberg E. An overview of recovery of metals from slags. Waste Management. 23(2003): 933-949.
- (8) Khalifa S. Al-Jabri., Makoto, H., Abdullah H. Al-Saidy., S.K. Al-Oraimi. Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate. Construction and Building Materials. 23 (2009): 2132–2140.
- (9) Khalifa S. Al-Jabri., Makoto, H., Salem K. Al-Oraimi., Abdullah H. Al-Saidy. Copper slag as sand replacement for high performance concrete. Cement & Concrete Composites. 31 (2009): 483–488.
- (10) Caijun S., Jueshi Q. High performance cementing materials from industrial slags. Resources, Conservation and Recycling. 29 (2000): 195–207.
- (11) ไชยยันต์ ชัยจักร, สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และ กุลพัฒน์ วัฒนกุล, การผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบา จากกากอุตสาหกรรมรีไซเคิลเหล็ก, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- (12) Satish, V., Luckman, M., Venkateswaran, D., Cementitious and pozzolanic behavior of electric arc furnace steel slags. Cement and Concrete Research. 39 (2009): 102-109.
- (13) Yong Xin, L., Yi Min, C., Jiang Xiong, W., Xing Yang, H., Hong Tao, Z., Wen Sheng, Z. A study on the relationship between porosity of the cement paste with mineral additives and compressive strength of mortar based on this paste. Cement and Concrete Research. 36 (2006): 1740-1743.
- (14) Wang, Qiang., Yan, P. Hydration properties of basic oxygen furnace steel slag, Construction and Building Materials. (2010): 1-7.
- (15) ศราวุฒิ บุษบงศ์, บุรฉัตร ฉัตรวีระ, พฤติกรรมของคอนกรีตผสมตะกั่วเหล็กที่ไม่ผ่านการบด, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- (16) ASTM, Standard specification for portland cement, Annual book of ASTM standards, C 150-95, 1998.
- (17) ASTM, Standard specification for concrete aggregates, Annual book of ASTM standards, C 33-97, 1999.
- (18) เอกภพ อังศ์วัฒนา, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรนิสรากุล, พยุง เกตุกราย, พิชัย นิमितยงสกุล, ปริญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุล ชัย และทิน เกตุรัตน์บวร, 2540, การใช้เถ้าถ่านหินแยกขนาดจากแม่เมาะในงานคอนกรีตกำลังสูง, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ, ครั้งที่ 4, 12-14 พฤศจิกายน, ภูเก็ต, หน้า 206-215.
- (19) สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ, 2538, ผลกระทบของความละเอียดจากการบดและการแยกเถ้าถ่านหินแม่เมาะต่อสมบัติของมอร์ตาร์, วิทยานิพนธ์"ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- (20) Luxan M.P., Sanchez de Rojas M.I. and Frias M. Investigation on the fly ash-calcium hydroxide reactions. Cement and concrete research.19 (1989): 69-80.
- (21) Kitamura M., Sahara T. and Senna M. Effects of milling Al(OH)₃ prior to mix with Ca(OH)₂ for a rapid cement hardener. Powder technology. 118 (2001): 203-208.
- (22) Lee C. Y., Lee H. K. and Lee K. M. Strength and microstructural characteristics of chemically activated fly ash-cement systems. Cement and concrete research. 33 (2003): 425-431.

- (23) Sakai E., Nikaido Y., Itoh T. and Daimon M. Ettringite formation and microstructure of rapid hardening cement. Cement and concrete research. 34 (2004): 1669-1673.
- (24) ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortar (Using 2-in. or [50mm] Cube Specimens, C109/C 109M-05, 2009.
- (25) ASTM, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, C 191-04b, 2008.
- (26) ASTM, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, C 1437-01, 2008.
- (27) ASTM, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, C596-09, 2008.
- (28) ASTM, Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, C1585-04, 2009.
- (29) A. Bakolas, E. Aggelakopoulou, A. Moropoulou., Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in ceramic powder-lime pastes, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry - J THERM ANAL CALORIM 92 (2008): 345-351.
- (30) El Elaoui B. and Benkaddour M. Hydration of C_3A in the presence of $CaCO_3$. Journal of Thermal analysis and calorimetry. 48(1997): 893-901.
- (31) ASTM, Standard Specification for Portland Cement, C150-05, 2009
- (32) Hooton R.D. and Emery J.J. Sulfate Resistance of a Canadian Slag. ACI Materials Journal. 87(1990): 547-555.
- (33) Hogan F.L. and Meusel J.W. Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast-Furnace Slag. Cement Concrete and Aggregate. 3(1981): 40-52.
- (34) ASTM, Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars, C989-99: 2001.
- (35) K. Long Lin. and C.Yi Lin. Hydration characteristics of waste sludge ash utilized as raw cement material. Cement and Concrete Research.35(2005): 2000-2007.

- (35) C. Shi and Robert L. Day. Pozzolan reaction in the presence of chemical activators
Part II. Reaction products and mechanism. Cement and Concrete
Research.30(2000): 607 – 613.

ภาคผนวก

ตารางที่ 1 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2+3\text{O}_{10}$ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-011-0124

Pattern : 00-011-0124		Radiation = 1.540598		Quality : Deleted		
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2+3\text{O}_{10}$ Calcium Aluminum Iron Oxide Brownmillite, syn		2th	i	h	k	l
		12.215	50	0	2	0
		24.503	30	0	4	0
		26.268	10	1	2	1
		32.292	80	2	0	0
		33.537	70	0	0	2
		34.062	100	0	1	2
		34.882	20	1	5	0
		36.963	10	2	1	1
		40.991	30	2	3	1
		41.989	30	0	4	2
		44.370	80	2	4	1
		47.306	80	2	1	2
		48.930	20	2	2	2
		50.375	40	0	8	0
		52.880	20	2	6	1
		58.765	40	1	7	2
		60.459	40	3	0	2
		61.345	10	2	6	2
		61.799	20	0	8	2
		64.179	10	0	10	0
		65.703	10	3	6	1
		67.307	20	1	6	3
		70.785	10	0	1	4
		71.403	20	2	8	2
Lattice : Orthorhombic S.G. : Pcmn (62)		Mol. weight = 485.97 Volume [CD] = 432.06 Dx = 3.735				
a = 5.58000 b = 14.50000 c = 5.34000 a/b = 0.38483 c/b = 0.36828	Z = 2					
Deleted and rejected by: Deleted by 30-226. Additional pattern: To replace 10-32. Data collection flag: Ambient.						
Midgley, H., Mag. Concrete Res., volume Mar (1957)						
Radiation : SS/FOM : F24= 3(0.0720,103)		Filter : Not specified d-sp : Not given				

ตารางที่ 2 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 25\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-009-0414

Pattern : 00-009-0414		Radiation = 1.540596		Quality : Deleted		
$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 25\text{H}_2\text{O}$		2θ	i	h	k	l
Calcium Aluminum Sulfate Hydroxide Hydrate Ettringite, syn		9.081	100	1	0	0
		9.975	14	1	0	1
		15.784	80	1	1	0
		17.796	25	1	1	2
		18.239	8	2	0	0
		18.907	35	1	0	4
		20.119	4	2	0	2
		22.094	2	2	0	3
		22.902	50	1	1	4
		24.232	8	2	1	0
		24.710	16	2	0	4
		25.577	30	2	1	2
		27.250	6	2	1	3
		27.507	20	3	0	0
		29.595	8	1	1	6
		31.867	8	2	2	0
		32.256	40	3	0	4
		32.977	8	2	2	2
		33.191	14	3	1	0
		33.408	8	0	0	8
		34.250	20	3	1	2
		34.967	45	2	1	6
		35.539	6	3	1	3
		36.086	4	2	2	4
		36.900	4	4	0	0
		37.089	4	1	1	8
		37.426	12	3	0	6
		38.320	6	2	0	8
		40.416	20	3	2	0
		40.817	45	2	2	6
		41.285	10	3	2	2
		41.907	25	3	1	6
		42.402	4	3	2	3
		42.528	6	4	1	0
		43.451	6	4	1	2
		43.872	6	3	2	4
		44.531	2	4	1	3
		44.670	2	3	1	7
		45.814	4	3	2	5
		45.912	3	4	1	4
		46.636	30	5	0	0
		47.702	30	4	0	7
		48.513	30	5	0	3
		49.127	40	2	1	10
		49.354	40	3	3	2
		50.315	10	4	2	2
		50.404	10	2	0	11
		51.658	40	3	3	4
Lattice : Hexagonal S.G. : P63/mmc (194) a = 11.23000 c = 21.44000 Z = 2		Mol. weight = 1237.08 Volume [CDJ] = 2341.61 Dx = 1.755 Dm = 1.770				
Optical data: A=1.470(1), B=1.491, Sign=- Color: Colorless, white General comments: Sample prepared by the National Bureau of Standards. Analysis: Spectrographic analysis showed 0.1-1.0% Si, Sr, 0.01-0.1% Ag, Cr, Cu, Mg, Na, Pb; 0.001%-0.01% B, Ba, Cs, Fe, Mn, Ni, Sn, Zn, Zr. Temperature of data collection: Pattern made at 25 C. Sample source or locality: Optical data specimen from Franklin, New Jersey, USA. Deleted and rejected by: Deleted by 37-1476, 41-1451. Data collection flag: Ambient.						
Hurlbut, Baum, Am. Mineral., volume 45, page 1137 (1960) Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume 8, page 3 (1959)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54056 SS/FOM : F30= 28(0.0174,61)		Filter : Beta d-sp : Not given				

ตารางที่ 3 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ MgO ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-045-0946

Pattern : 00-045-0946		Radiation = 1.540598		Quality : High		
MgO		2 θ	i	h	k	l
Magnesium Oxide Periclase, syn		36.937	4	1	1	1
		42.917	100	2	0	0
		62.304	39	2	2	0
		74.891	5	3	1	1
		78.630	10	2	2	2
		94.051	8	4	0	0
		105.734	2	3	3	1
		109.765	19	4	2	0
		127.285	14	4	2	2
		143.754	4	5	1	1
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 40.30				
S.G. : Fm-3m (225)		Volume [CDJ] = 74.68				
a = 4.21120		Dx = 3.585				
		Dm = 3.560				
	Z = 4	I/cor = 1.00				
<p>Sample preparation: MgO (Heraeus, 99.99 %) annealed in open Au crucible at 800 C for 1 week. Color: Colorless Additional pattern: To replace 4-829. General comments: Validated by calculated pattern 43-1022. Data collection flag: Ambient.</p>						
Kern, A., Doetzer, R., Eysel, W., Mineralogisch-Petrographisches Inst., Univ. Heidelberg, Germany., ICDD Grant-in-Aid (1993)						
Radiation : CuK α 1		Filter : Monochromator crystal				
Lambda : 1.54060		d-sp : Diffractometer				
SS/FOM : F10=101(0.0099,10)		Internal standard : Si				

ตารางที่ 4 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ β -Ca₂SiO₄ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-049-1673

Pattern : 00-049-1673		Radiation = 1.540598		Quality : Not indexed		
β -Ca ₂ SiO ₄		2 θ	i	h	k	l
Calcium Silicate		18.074	4	1	0	-1
		18.894	10	0	0	2
		23.224	8	0	1	2
		23.472	6	1	1	1
		26.355	10	0	2	0
		27.490	11	1	1	-2
		28.082	8	0	2	1
		29.277	13	1	1	2
		31.049	32	1	2	0
		31.774	16	0	1	3
		32.007	100	1	0	-3
		32.149	89	1	2	-1
		32.570	98	2	0	0
		32.754	32	0	2	2
		32.940	36	1	2	1
		34.345	61	1	0	3
		35.236	16	2	1	0
		36.619	18	2	0	-2
		36.900	8	1	1	3
		37.281	16	2	1	1
		37.409	18	1	2	2
		38.766	3	0	0	4
		39.046	4	2	1	-2
		39.456	32	0	2	3
		41.030	64	0	3	1
		41.089	19	0	1	4
		41.685	19	2	1	2
		41.928	3	1	2	-3
		42.361	11	2	2	0
		42.909	2	2	2	-1
		43.167	9	-1	1	4
		43.385	7	1	3	0
		44.142	20	2	2	1
		44.347	12	2	1	-3
		44.670	14	0	3	2
		44.810	19	1	3	1
		45.595	2	1	1	4
		45.692	2	2	2	-2
		47.490	10	0	2	4
		47.889	8	2	1	3
		48.023	16	2	2	2
		48.376	1	1	3	2
		49.297	7	2	0	-4
		50.049	5	0	3	3
		50.404	14	2	2	-3
		50.554	10	1	0	-5
		50.947	13	0	1	5
		51.658	5	3	1	0
		51.847	2	3	1	-1
		52.455	2	1	1	-5
		52.946	9	2	3	-1
		53.278	4	1	0	5
		53.649	17	2	2	3
		53.991	7	2	3	1
		54.267	8	0	4	0
		55.223	3	0	4	1
		56.215	24	3	0	-3
		56.517	11	0	2	5
		56.745	5	2	2	-4
		56.975	9	1	4	0
		57.188	15	3	2	0
		57.324	17	3	2	-1
		57.677	3	1	4	-1
		58.035	10	0	4	2
		58.155	6	1	4	1
		58.580	17	1	3	-4
Lattice : Monoclinic S.G. : P21/n (14) a = 5.51210 b = 6.75750 c = 9.31380 a/b = 0.81570 c/b = 1.37829 beta = 94.58 Z = 4 Mol. weight = 172.24 Volume [CD] = 345.81 Dx = 3.308		Sample preparation: Calcium silicate was mixed with 0.5% by weight of Cr2 O3 to stabilize it. The mixture was heated to 1400 C, then cooled. General comments: Rietveld method. General comments: Structure is heavily twinned. General comments: Material is stabilized with 0.5 wt.% Cr2 O3. Additional pattern: See ICSD 81096 (PDF 86-398). Data collection flag: Ambient.				
Mumme, W., Hill, R., Bushnell-Wye, G., Segnit, E., Neues Jahrb. Mineral., Abh., volume 169, page 35 (1995) CAS Number: 10034-77-2						
Radiation : Sync Lambda : 0.85040 SS/FOM : F30= 90(0.0088,38)		Filter : Monochromator crystal d-sp : Calculated spacings External standard : Si				

ตารางที่ 5 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Ca(OH)_2 ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-072-0156

Pattern : 01-072-0156		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Ca(OH) ₂ Calcium Hydroxide Portlandite, syn		2θ 18.108 28.729 34.170 36.689 47.250 50.897 54.466 56.340 59.494 62.735 64.458 71.970 78.020 79.340 82.048 84.905 85.155 86.452	I 766 185 999 7 401 253 137 12 19 93 96 69 12 19 12 54 41 29	h 0 1 0 0 0 1 1 0 2 2 1 2 0 1 2 1 1 1 0 1 1 0 2	k 0 0 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 2 0 1 2 1 0 2 0 0 0 1 1 1 1 0 2	l 1 0 1 2 2 0 1 3 0 1 3 4 3 0 1 1 3 4 3
Lattice : Hexagonal S.G. : P-3m1 (164) a = 3.58530 c = 4.89500 Z = 1		Mol. weight = 74.09 Volume [CD] = 54.49 Dx = 2.258 I/cor = 3.45				
ICSD collection code: 015471 Remarks from ICSD/CSD: REM B Temperature factors anormal defined. Test from ICSD: At least one TF missing. Data collection flag: Ambient.						
Petch, H.E., Acta Crystallogr., volume 14, page 950 (1961) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F18=1000(0.0002,19)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ตารางที่ 6 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ $\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-073-0599

Pattern : 01-073-0599		Radiation = 1.540598					Quality : Calculated				
$\text{Ca}_3(\text{SiO}_4)\text{O}$		2th	i	h	k	l	2th	i	h	k	l
Calcium Silicate Oxide		10.619	12	0	0	3	79.279	19	0	2	
		14.912	58	1	0	1	79.711	13	1	4	9
		16.134	19	0	1	2	79.910	16	0	5	4
		20.318	4	1	0	4	80.209	68	4	0	13
		21.330	39	0	0	6	80.442	35	2	3	11
		22.978	50	0	1	5	80.740	3	0	0	0
		25.220	63	1	1	0	80.905	3	5	0	5
		27.433	49	1	1	3	81.832	8	3	3	0
		29.425	849	0	2	1	82.822	2	3	3	3
		30.084	131	2	0	2	83.185	56	0	4	14
		32.234	647	0	0	9	83.777	31	2	4	1
		32.600	820	0	2	4	84.105	19	4	2	2
		33.261	64	1	1	6	84.402	8	3	0	0
		34.378	999	2	0	5	84.796	14	2	1	1
		38.770	264	0	2	7	85.419	92	2	4	4
		38.926	161	1	0	10	85.715	49	3	2	13
		39.134	29	2	1	1	86.404	91	4	2	5
		39.649	13	1	2	2	86.633	53	4	1	12
		41.312	450	2	0	8	87.298	5	1	0	0
		*41.312	450	1	1	9	87.877	12	3	1	1
		41.657	170	2	1	4	88.662	3	2	3	14
		42.439	7	0	1	11	89.021	12	2	4	7
		43.113	16	1	2	5	*89.021	12	1	2	1
		43.447	11	0	0	12	89.251	7	5	1	1
		44.437	5	3	0	0	89.873	108	2	2	
		45.821	160	0	3	3					
		46.951	130	0	2	10					
		49.020	6	1	2	8					
		49.795	48	0	3	6					
		50.009	24	2	0	11					
		50.899	10	1	1	12					
		51.779	664	2	2	0					
		53.017	1	2	2	3					
		53.466	2	0	1	14					
		54.034	15	2	1	10					
		54.195	9	1	3	1					
		54.598	6	3	1	2					
		55.118	9	0	0	15					
		55.951	56	3	0	9					
		56.187	28	1	3	4					
		56.541	298	0	2	13					
		57.360	3	3	1	5					
		60.002	178	2	0	14					
		60.417	13	1	3	7					
		60.679	42	4	0	1					
		61.054	12	0	4	2					
		61.241	9	1	0	0					
		61.539	5	1	1	15					
		62.317	327	3	1	8					
		*62.317	327	2	2	9					
		62.538	225	4	0	4					
		62.869	17	2	1	13					
		63.638	126	0	4	5					
		65.270	14	0	1	1					
		66.131	5	1	2	14					
		66.524	10	4	0	7					
		66.773	13	3	2	1					
		67.306	14	0	2	0					
		67.448	48	0	0	0					
		68.295	35	0	4	8					
		68.541	20	3	2	4					
		69.102	3	3	1	11					
		69.592	7	2	3	5					
		69.836	5	2	2	12					
		70.566	4	4	1	0					
		71.155	17	2	0	0					
		71.603	17	4	1	3					
		72.463	24	4	0	10					
		73.113	1	2	1	1					
		73.386	9	0	3	15					
		73.660	5	1	0	0					
		74.068	6	2	3	8					
		74.679	10	4	1	6					
		74.848	11	0	4	11					
		76.839	5	1	2	0					
		77.644	3	3	1	14					
		78.111	14	0	1	1					
		*78.111	14	3	2	10					
		78.579	1	5	0	2					
		79.013	2	2	2	15					
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									
SS/FOM : F30=531(0.0016,35)											

ตารางที่ 7 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Ca (CO₃) ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-086-0174

Pattern : 01-086-0174		Radiation = 1.540598		Quality : Alternate		
Ca(CO ₃)		2th	i	h	k	l
		23.058	99	0	1	2
		29.399	999	1	0	4
		31.422	19	0	0	6
Calcium Carbonate		35.981	139	1	1	0
Calcite, syn		39.417	176	1	1	3
		43.171	149	2	0	2
		47.122	65	0	2	4
		47.492	187	0	1	8
		48.505	193	1	1	6
		56.581	31	2	1	1
		57.417	87	1	2	2
		58.060	11	1	0	10
		60.683	51	2	1	4
		60.994	23	2	0	8
		61.364	24	1	1	9
		63.065	19	1	2	5
		64.683	58	3	0	0
		65.582	32	0	0	12
		69.193	10	2	1	7
		70.230	19	0	2	10
		72.896	27	1	2	8
		73.682	6	3	0	6
		76.300	11	2	2	0
		77.138	19	1	1	12
		78.453	1	2	2	3
		80.260	1	1	3	1
		80.971	5	3	1	2
		81.521	22	2	1	10
		82.070	3	0	1	14
		83.797	40	1	3	4
		84.825	18	2	2	6
		85.906	1	3	1	5
		86.451	4	1	2	11
Lattice : Rhombohedral S.G. : R-3c (167) a = 4.98800 c = 17.06800 Z = 6		Mol. weight = 100.09 Volume [CD] = 367.76 Dx = 2.712 Dm = 2.710 Mcor = 3.22				
ICSD collection code: 080869 Temperature factor: ATF Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 295. Remarks from ICSD/CSD: REM DEN Additional pattern: See PDF 85-1108 and PDF 5-586. Data collection flag: Ambient						
Maslen, E.N., Streltsov, V.A., Streltsova, N.R., Ishizawa, N., Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 51, page 929 (1995) Calculated from ICSD using POWD-12++						
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30=1000(0.0002,30)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ตารางที่ 8 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ α -SiO₂ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 01-086-1629

Pattern : 01-086-1629		Radiation = 1.540598		Quality : Alternate		
α -SiO ₂		2θ	I	h	k	l
Silicon Oxide Quartz low		20.904	212	1	0	0
		26.686	999	1	0	1
		36.627	73	1	1	0
		39.522	74	0	1	2
		40.373	34	1	1	-1
		42.548	52	2	0	0
		45.892	28	0	2	1
		50.227	110	1	1	-2
		50.675	5	0	0	3
		54.976	37	2	0	2
		55.396	16	1	0	3
		57.367	2	1	2	0
		60.095	84	1	2	-1
		64.135	16	1	1	-3
		65.945	3	3	0	0
		67.885	52	2	1	2
		68.258	62	0	2	3
		68.475	67	3	0	1
		73.560	22	0	1	4
		75.829	25	0	3	2
		77.869	12	2	2	0
		80.040	26	2	1	-3
		80.244	19	2	2	-1
		81.294	21	1	1	-4
		81.702	26	1	3	0
		84.051	13	1	3	-1
		85.093	2	0	2	4
		87.285	1	2	2	-2
		87.631	2	0	3	3
Lattice : Hexagonal S.G. : P3121 (152) a = 4.90300 c = 5.39990 Z = 3		Mol. weight = 60.08 Volume [CD] = 112.42 Dx = 2.662 I/cor = 3.10				
ICSD collection code: 201353 ICSD space group comment: ICSD SG: P3121S IT is: 152 SG short form: P3121 Temperature factor: ATF Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 78 Data collection flag: Non ambient temperature.						
Lager, G.A., Jorgensen, J.D., Rotella, F.J., J. Appl. Phys., volume 53, page 6751 (1982) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F29=1000(0.0001,29)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

ตารางที่ 9 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Calcium Silicate Hydrate ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-029-0373

Ca ₂ SiO ₄ ·H ₂ O /2CaO·SiO ₂ ·H ₂ O		2 θ	I	h	k	l
Calcium Silicate Hydrate		16.651	13	0	0	2
		19.112	4	1	0	2
		19.280	3	0	2	0
		21.035	50	0	2	1
		21.462	6	1	2	0
		22.718	30	2	1	1
		23.047	7	1	2	1
		25.143	35	2	0	2
		25.562	4	0	2	2
		26.981	45	2	1	2
		27.233	100	1	2	2
		28.522	4	1	1	3
		31.027	50	3	1	1
		31.750	45	1	3	1
		32.977	30	2	1	3
		33.229	25	1	2	3
		33.627	30	0	0	4
		34.385	45	3	1	2
		34.840	35	2	3	0
		35.467	40	3	2	1
		35.877	9	2	3	1
		36.389	8	1	1	4
		37.153	60	2	2	3
		38.490	11	3	2	2
		38.836	17	2	3	2
		39.081	16	0	2	4
		39.402	7	3	1	3
		40.190	20	4	1	1
		41.207	11	1	4	1
		41.705	16	4	0	2
		42.931	18	4	2	0
		43.385	19	2	3	3
		43.872	30	1	4	2
		44.554	12	2	4	1
		45.643	9	3	1	4
		46.184	6	1	3	4
		46.334	18	4	2	2
		47.124	20	4	1	3
		47.675	4	2	1	5
		48.023	8	1	2	5
		48.541	4	4	3	0
		48.902	2	3	2	4
		49.354	14	4	3	1
		49.816	2	5	1	1
		50.434	3	1	5	0
		51.008	35	2	2	5
		51.223	5	1	5	1
		51.627	3	4	0	4
		52.101	4	3	4	2
		52.683	14	4	1	4
		53.211	10	1	3	5
		53.480	15	1	4	4
		54.060	5	3	3	4
		55.151	19	5	2	2
		55.623	30	4	2	4
		56.328	14	2	5	2
		57.207	9	1	5	3
		57.835	9	5	3	1
		58.683	22	3	5	1
		59.897	17	5	3	2
		60.328	7	0	6	0
		60.987	9	0	6	1
		61.936	4	4	2	5
		62.540	9	2	4	5
		62.822	7	6	2	1
		63.060	6	0	6	2
		64.129	8	3	5	3
		65.599	2	4	0	6
		66.602	4	4	4	4
		68.029	4	6	2	3
		68.653	2	3	5	4
		69.115	8	6	0	4
Lattice : Orthorhombic		Mol. weight = 190.26				
S.G. : P212121 (19)		Volume [CD] = 928.08				
a = 9.47600		Dx = 2.723				
b = 9.19800		Z = 8				
c = 10.64800						
a/b = 1.03022						
c/b = 1.15764						
Color: Colorless						
Additional pattern: To replace 3-247, 3-248, 9-325 and 26-323.						
Sample preparation: Prepared hydrothermally, from β -Ca ₂ SiO ₄ treated for 40 days at 150 C.						
Data collection flag: Ambient.						
Igram, L., Taylor, University of Aberdeen, Old Aberdeen, Scotland., ICDD Grant-in-Aid						
Radiation : CuK α 1		Filter : Monochromator crystal				
Lambda : 1.54056		d-sp : Guinier				
SS/FOM : F30= 29(0.0151,69)						

ตารางที่ 10 แสดงค่า 2θ , intensity และ hkl ของ Mg (OH)₂ ซึ่งเป็นข้อมูลมาตรฐานจาก 2003 JCPDS – International Centre for Diffraction Data หมายเลข JCPDS 00-044-1482

Mg(OH) ₂		2 θ	I	h	k	l
Magnesium Hydroxide Brucite, syn		18.528	53	0	0	1
		32.877	6	1	0	0
		37.984	100	1	0	1
		50.786	29	1	0	2
		58.670	33	1	1	0
		62.116	13	1	1	1
		68.215	7	1	0	3
		68.889	3	2	0	0
		72.071	7	2	0	1
		81.272	4	2	0	2
		87.024	1	1	1	3
		89.557	1	1	0	4
		96.202	1	2	0	3
		99.926	3	2	1	1
		107.464	1	0	0	5
		108.200	1	1	1	4
		109.150	3	2	1	2
		116.125	2	3	0	0
		119.482	1	3	0	1
Lattice : Hexagonal S.G. : P-3m1 (164) a = 3.14420 c = 4.77700 Z = 1		Mol. weight = 58.32 Volume [CD] = 40.90 Dx = 2.368 Icor = 2.80				
Color: White Sample source or locality: Sample was obtained from Johnson Matthey Company General comments: Average relative standard deviation in intensity for the ten strongest reflections for three specimen mounts = 3.9%. General comments: A few minor reflections of MgO (4-829) were observed. Deleted and rejected by: Deleted by 7-239 which is satisfactory. Optical data: B=11.561, Q=1.581, Sign=+ Data collection flag: Ambient.						
Sailer, R., McCarthy, G., North Dakota State University, Fargo, North Dakota, USA., ICDD Grant-in-Aid (1992)						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54056 SS/FOM : F19= 51(0.0143,26)		Filter : Monochromator crystal d-sp : Diffractometer Internal standard : Si				

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ฉัตรชัย อามรย์ดี เกิดเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดสมุทรสงคราม สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก คณะเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร ในปีการศึกษา 2550 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเซรามิก ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาในปี 2555

การนำเสนอผลงานระดับนานาชาติ

C. Aromdee, S. Jiemsirilers and P.Laoratanakul, "The pozzolanic properties of steel slag in mortar" The 9th International Meeting of Pacific Rim Ceramic Societies (PACRIM9), Cairns, North Queensland, Australia, July 10 – 14, 2011. (Oral)

C. Aromdee, S. Jiemsirilers and P.Laoratanakul, "Effect of steel slag on compressive strength in cement mortar" Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON2011), Miracle grand hotel, Bangkok, Thailand, January 5 – 7, 2011. (Oral)