สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา

T055563

นายพิศุทธิ์ พิชัยสวัสดิ์

นายสิทธิชัย กิมกิติกุลวิไล

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 55563
วัน,เดือน,ปี 19 พ.ค. 2548

b.....
i.....

Fundamental Study on Preparation of Light Weight Concrete

Mr. Pisut Pichaisawad

Mr. Sittichai Kimkitikulvilai

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

of the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fundamental Study on Preparation of Light Weight Concrete

Mr. Pisut Pichaisawad

Mr. Sittichai Kimkitikulvilai

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement

of the Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง	การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา
นักศึกษา	นาย พิศุทธิ์ พิชัยสวัสดิ์
	นาย สิทธิชัย กิมกิติกุลวิไล
ภาควิชา	เคมี
สาขาวิชา	เคมีอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน
	ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย	----------
กรรมการ ผศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด	----------
กรรมการ ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์	----------

.....

(ผศ.ดร. ประยงค์ ดวงดี)

หัวหน้าภาควิชา

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา
นักศึกษา นาย พิศุทธิ์ พิชัยสวัสดิ์ รหัส 43050091
นาย สิทธิชัย กิมกิติกุลวิไล รหัส 43050124
ภาควิชา เคมี คณะ วิทยาศาสตร์
สาขาวิชา เคมีอุตสาหกรรม
ปีการศึกษา 2546
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน
ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเบื้องต้นในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย โดยในขั้นตอนแรกศึกษาผลของปริมาณเถ้าลอยและทรายที่มีต่อค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีต พบว่าก้อนคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยทดแทนปูนซีเมนต์ขาวในบางส่วนมีค่าความหนาแน่นลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อเพิ่มปริมาณทรายเป็นผลให้ก้อนคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นมากขึ้น ขั้นตอนที่สองทำการปรับปรุงค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตด้วยการเติมผงอลูมิเนียม พบว่าผงอลูมิเนียมสามารถทำให้ปริมาตรของก้อนคอนกรีตเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มปริมาณของผงอลูมิเนียมมากขึ้นปริมาตรของก้อนคอนกรีตมากขึ้นเป็นผลให้ก้อนคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นลดลง ขั้นตอนที่สามเป็นการศึกษาผลของพลังงานความร้อนจากการอบไอน้ำที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาของผงอลูมิเนียม พบว่าการให้พลังงานความร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับปูนซีเมนต์ขาว เป็นผลให้ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลดลง ขั้นตอนสุดท้ายศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อการกระจายตัวของรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตก่อนทำการอบด้วยไอน้ำ พบว่าการบ่มก้อนคอนกรีตสดที่อุณหภูมิห้องประมาณ 3 – 4 ชั่วโมงก่อนทำการอบด้วยไอน้ำ เป็นผลให้รูพรุนที่เกิดขึ้นภายในก้อนคอนกรีตมีการกระจายตัวของรูพรุนที่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามเมื่อก้อนคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นลดลงส่งผลให้ค่าความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีตลดลงด้วย ดังนั้นสูตรที่นำมาปรับปรุงค่าความหนาแน่นแล้วและมีค่าความแข็งแรงกดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คือ สูตรที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์ขาว 300 กรัม ทรายละเอียด 100 กรัม เถ้าลอย 600 กรัม ผงอลูมิเนียม 4.5 กรัม จากนั้นนำก้อนคอนกรีตสดที่ได้ไปตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วทำการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 90 นาที พบว่าได้ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.99 กรัม / ลบ.ซม. และค่าความแข็งแรงกดเท่ากับ 70 กก. / ตร.ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special project title Fundamental study on the preparation of light weight concrete

Student Mr. Pisut Pichaisawad code 43050091

Mr. Sittichai Kimkitikulvilai code 43050124

Special project advisor Dr. Punnama Siriphannon

Dr. Pathavuth Monvisade

Department Chemistry

Acadamic Year 2003

Abstract

This research studied on preparation of lightweight concrete blocks from white cement, sand and fly ash. It was divided into 4 steps. The first step was coped with the effects on quantities of fly ash and sand on the density of the block. It was found that when the white cement was partially replaced by fly ash, the density of the block was decreased. On the other hand, the increase of sand brought about the increase of the density. The second step, the density of the block was modified by adding aluminium powder as a blowing agent. It was found that the aluminium powder can magnify the volume of the block. In addition, the more the aluminium powder, the higher the volume of the block, have decreasing in the density. The third step was studied on the heat energy effect on reaction rate by streaming. It was shown that the heat energy accelerated the reaction between aluminium powder and white cement resulting in decrease of the density. The final step was studied on the effect of curing time on pore distribution in concrete block. It was seen that using curing time of 3 to 4 hours before streaming gave a reasonable pore distribution in the block and also reducing in the density. However, the decreasing of density brought about the decreasing in compressive strength. To optimize these values, it should be compromised the reasonable values of both density and compressive strength, i.e. the block with formula of 300 g of white cement , 100 g of sand, 600 g of fly ash and 4.5 g of aluminium powder with curing time of 4 hours and streaming at 100°C for 90 minutes. This formula gave the results of 0.99 g / cm^3 in density and 70 kg / cm^2 in compressive strength.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ดร. ภัทธาวุธ มนต์วิเศษ และ ดร. ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาโครงงานพิเศษ คอยให้คำปรึกษา แนะนำตลอดการทำโครงงาน

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. ตะวัน สุขน้อย ผศ.ดร. อิทธิพล แจ้งชัด และ ดร. ชลลดา ฤตวิรุฬห์ ที่กรุณาเป็นกรรมการโครงงานพิเศษและคอยให้คำปรึกษา แนะนำตลอดการทำโครงงาน

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ช่วยประสิทธิประสาทวิชาความรู้ และให้คำปรึกษา คอยช่วยเหลือจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. เมตตา เจริญพาณิชย์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์เถ้าลอยที่ใช้ในโครงงานวัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี และ เจ้าหน้าที่ประจำอาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์เทคโนโลยี ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการทำโครงงาน

ขอขอบพระคุณ พี่ๆ และ เพื่อนๆ ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำต่างๆ

นอกจากนี้ยังมีบุคคลที่มิได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ซึ่งมีความช่วยเหลืออย่างมาก ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

นายพิศุทธิ์ พิชัยสวัสดิ์
นายสิทธิชัย กิมกิติกุลวิไล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	รูปร่างลักษณะของไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยมและไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นเม็ดกลมดำ	7
รูปที่ 2.2	การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก	9
รูปที่ 2.3	ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต	11
รูปที่ 2.4	แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	12
รูปที่ 2.5	กระบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต	14
รูปที่ 2.6	อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	15
รูปที่ 2.7	ลักษณะภายใน Pumice	18
รูปที่ 2.8	ลักษณะผิวภายนอกและภายในของ Expanded Clay	19
รูปที่ 2.9	มวลรวมเบาประเภท Expanded Shale	20
รูปที่ 2.10	Sintered Fly Ash	20
รูปที่ 2.11	ลักษณะของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ผลิตจากเถ้าลอย	21
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	27
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าลอย	29
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียม	30
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียมและการอบไอน้ำ	32
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตโดยควบคุมเวลาการเซตตัว	35
รูปที่ 3.6	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียมและควบคุมเวลาในการเซตตัว	38
รูปที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์ชนิดของผลึกโดยเทคนิค XRD	40
รูปที่ 4.2	ลักษณะของรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อผ่านการอบไอน้ำ	46
รูปที่ 4.3	ลักษณะรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อทำการทิ้งเวลาการเซตตัว 4 ชั่วโมง	48
รูปที่ 4.4	ลักษณะรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมที่เวลาเซตตัว 4 ชั่วโมง	50
รูปที่ 4.5	กราฟการวิเคราะห์ชนิดของผลึกของก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเครื่องมือวิเคราะห์ XRD	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติของคอนกรีต	3
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
ตารางที่ 2.3	สารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
ตารางที่ 2.4	สมบัติต่างๆขององค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
ตารางที่ 2.5	เวลาที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ 80 %	14
ตารางที่ 2.6	เวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต	17
ตารางที่ 3.1	ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบที่เลือกใช้	26
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	27
ตารางที่ 3.3	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมจากเถ้าลอย	28
ตารางที่ 3.4	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมจากผงอลูมิเนียม	30
ตารางที่ 3.5	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมผ่านการอบไอน้ำ	32
ตารางที่ 3.6	ปริมาณของผงอลูมิเนียมและเวลาที่ใช้ในการตั้งคอนกรีตสดทิ้งไว้	37
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRF	40
ตารางที่ 4.2	ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	41
ตารางที่ 4.3	ผลของเถ้าลอยที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	42
ตารางที่ 4.4	ผลของทรายที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	43
ตารางที่ 4.5	ผลของผงอลูมิเนียมที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	44
ตารางที่ 4.6	ผลของการอบไอน้ำที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	45
ตารางที่ 4.7	ผลของระยะเวลาการเซตตัวของก้อนคอนกรีตมวลเบาสูตร C3S1F6Al0.05(S) ก่อนการอบไอน้ำ	47
ตารางที่ 4.8	ผลของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมวลเบาสูตร C3S1F6(S)3h และ C3S1F6(S)4h	49
ตาราง ก-1	PDF Data Base ของแคลเซียมซิลิเกต	58
ตาราง ก-2	PDF Data Base ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	59
ตาราง ก-3	PDF Data Base ของควอทซ์	60
ตาราง ก-4	PDF Data Base ของ Mullite	61
ตาราง ก-5	PDF Data Base ของแคลเซียมคาร์บอเนต	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 คอนกรีตคืออะไร	3
2.2 องค์ประกอบของคอนกรีต	4
2.3 หน้าที่และสมบัติของส่วนผสม	4
2.4 ปูนซีเมนต์	5
2.5 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	7
2.6 สารประกอบรอง	9
2.7 การก่อตัวและการแข็งตัว	10
2.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	11
2.9 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	15
2.10 การบ่มคอนกรีต	16
2.11 คอนกรีตมวลเบา	17
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	24
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	24
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	24
3.3 แผนการดำเนินงานวิจัย	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ขั้นตอนการวิจัย	25
3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบและการวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี	25
3.4.2 การเตรียมก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	26
3.4.3 การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าลอย	28
3.4.4 การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยผสมผงอลูมิเนียม	29
3.4.5 การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยผสมผงอลูมิเนียมและการอบไอน้ำ	31
3.4.6 ผลของสภาวะการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาต่อการกระจายตัวของรูพรุนและความหนาแน่น	33
3.4.7 การหาค่าความหนาแน่นแบบบัลค์ (Bulk Density)	39
3.4.8 การหาค่าความแข็งแรงกด (Compressive Strength)	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	40
4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัตถุดิบที่ใช้	40
4.2 การศึกษาค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตตัวอย่างก่อนการปรับปรุง	41
4.3 การศึกษาค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตตัวอย่างหลังการปรับปรุง	42
4.4 ผลของสภาวะการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาต่อการกระจายตัวของรูพรุนและความหนาแน่น	47
4.5 การเพิ่มปริมาณของผงอลูมิเนียมที่มีต่อสมบัติของก้อนคอนกรีตมวลเบา	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	53
5.1 อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบา	53
5.2 ผลของผงอลูมิเนียมที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบา	53
5.3 ผลของพลังงานความร้อนจากการอบไอน้ำที่มีต่อความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมวลเบา	54
5.4 ผลของสภาวะที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาต่อการกระจายตัวของรูพรุนและความหนาแน่น	54
5.5 ข้อเสนอแนะ	55
เอกสารอ้างอิง	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
ภาคผนวก ก	รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอกซ์ของสารต่าง ๆ จากฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standard	57
ภาคผนวก ข	รูปแบบการคายรังสีเอ็กซ์ของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง (X-ray Fluorescence Spectrophotometer)	63
ภาคผนวก ค	ผลของน้ำหนักและปริมาตรของก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง	65
ภาคผนวก ง	ค่ามาตรฐานของก้อนคอนกรีตมวลเบาเกรดการค้า	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	รูปร่างลักษณะของไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยมและไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นเม็ดกลมดำ	7
รูปที่ 2.2	การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก	9
รูปที่ 2.3	ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต	11
รูปที่ 2.4	แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	12
รูปที่ 2.5	กระบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต	14
รูปที่ 2.6	อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	15
รูปที่ 2.7	ลักษณะภายใน Pumice	18
รูปที่ 2.8	ลักษณะผิวภายนอกและภายในของ Expanded Clay	19
รูปที่ 2.9	มวลรวมเบาประเภท Expanded Shale	20
รูปที่ 2.10	Sintered Fly Ash	20
รูปที่ 2.11	ลักษณะของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ผลิตจากเถ้าลอย	21
รูปที่ 3.1	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	27
รูปที่ 3.2	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าลอย	29
รูปที่ 3.3	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียม	30
รูปที่ 3.4	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียมและการอบไอน้ำ	32
รูปที่ 3.5	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตโดยควบคุมเวลาการเซตตัว	35
รูปที่ 3.6	ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียมและควบคุมเวลาในการเซตตัว	38
รูปที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์ชนิดของผลึกโดยเทคนิค XRD	40
รูปที่ 4.2	ลักษณะของรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อผ่านการอบไอน้ำ	46
รูปที่ 4.3	ลักษณะรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อทำการทิ้งเวลาการเซตตัว 4 ชั่วโมง	48
รูปที่ 4.4	ลักษณะรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมที่เวลาเซตตัว 4 ชั่วโมง	50
รูปที่ 4.5	กราฟการวิเคราะห์ชนิดของผลึกของก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเครื่องมือวิเคราะห์ XRD	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติของคอนกรีต	3
ตารางที่ 2.2	องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
ตารางที่ 2.3	สารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	6
ตารางที่ 2.4	สมบัติต่างๆขององค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
ตารางที่ 2.5	เวลาที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ 80 %	14
ตารางที่ 2.6	เวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต	17
ตารางที่ 3.1	ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบที่เลือกใช้	26
ตารางที่ 3.2	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	27
ตารางที่ 3.3	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมจากเถ้าลอย	28
ตารางที่ 3.4	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมจากผงอลูมิเนียม	30
ตารางที่ 3.5	อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมผ่านการอบไอน้ำ	32
ตารางที่ 3.6	ปริมาณของผงอลูมิเนียมและเวลาที่ใช้ในการตั้งคอนกรีตสดทิ้งไว้	37
ตารางที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRF	40
ตารางที่ 4.2	ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	41
ตารางที่ 4.3	ผลของเถ้าลอยที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	42
ตารางที่ 4.4	ผลของทรายที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	43
ตารางที่ 4.5	ผลของผงอลูมิเนียมที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	44
ตารางที่ 4.6	ผลของการอบไอน้ำที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา	45
ตารางที่ 4.7	ผลของระยะเวลาการเซตตัวของก้อนคอนกรีตมวลเบาสูตร C3S1F6Al0.05(S) ก่อนการอบไอน้ำ	47
ตารางที่ 4.8	ผลของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมวลเบาสูตร C3S1F6(S)3h และ C3S1F6(S)4h	49
ตาราง ก-1	PDF Data Base ของแคลเซียมซิลิเกต	58
ตาราง ก-2	PDF Data Base ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต	59
ตาราง ก-3	PDF Data Base ของควอทซ์	60
ตาราง ก-4	PDF Data Base ของ Mullite	61
ตาราง ก-5	PDF Data Base ของแคลเซียมคาร์บอเนต	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตาราง ข-1	ผลการทดลองที่ได้จากการทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ XRF	64
ตาราง ค-1	น้ำหนักและปริมาตรของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง	66
ตาราง ง-1	สมบัติของก้อนคอนกรีตมวลเบาเกรดการค้า	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

คอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันมาเป็นเวลานานและถูกนำไปใช้ประโยชน์ในงานทางด้านก่อสร้างต่างๆ เช่น ที่พักอาศัย อุโมงค์ ถนน และเขื่อน เป็นต้น ซึ่งคอนกรีตเป็นวัสดุพื้นฐานที่จะขาดไม่ได้เลยในงานก่อสร้าง คอนกรีตทำหน้าที่เสมือนเป็นโครงร่างของสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งมีความแข็งแรงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของตัวคอนกรีต อย่างไรก็ตามคอนกรีตก็ยังมีข้อบกพร่องบางประการ ทำให้เกิดผลเสียที่ตามมา เช่น มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง ซึ่งมีผลทำให้ความแข็งแรงของตัวคอนกรีตลดลง และข้อเสียที่เป็นปัญหามากที่สุดที่ทำให้เป็นข้อจำกัดของการใช้ คือคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมาก มีผลทำให้เมื่อนำไปปลูกสร้างสิ่งก่อสร้างที่มีความสูงมาก ๆ จำเป็นที่ต้องมีเสาและคานที่สามารถรับน้ำหนักมาก ๆได้ ถ้าเสาและคานไม่สามารถรับน้ำหนักได้ดีอาจก่อให้เกิดการทรุดตัวจนถล่มได้ และสมบัติที่ดีของก้อนคอนกรีตมวลเบาอีกประการคือ ความเป็นฉนวนความร้อนที่ดี เนื่องจากมีรูพรุนเป็นจำนวนมากในก้อนคอนกรีตจึงช่วยในการระบายความร้อนภายในอาคาร ทำให้ผู้อยู่อาศัยนิยมนำเอาคอนกรีตมวลเบามาสร้างที่อยู่อาศัยเพื่อทำให้ภายในบ้านมีความเย็นสบายไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องปรับอากาศซึ่งสามารถช่วยลดพลังงานของชาติได้ในอีกทางหนึ่ง

ในปัจจุบันจึงได้มีการปรับปรุงสมบัติที่เป็นข้อด้อยของคอนกรีตข้างต้น โดยการผลิตคอนกรีตเป็นบล๊อกที่มีรูพรุนสูง น้ำหนักเบา เพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อเป็นกำแพงซึ่งไม่ใช่ส่วนของอาคารที่ต้องการสมบัติการรับแรงที่สูงมากนัก สำหรับการปรับปรุงคอนกรีตเพื่อลดน้ำหนักที่มากของตัวคอนกรีตนั้นเป็นผลให้น้ำหนักที่ตกลงบนคานน้อยลง ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสร้างเสาและคานได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและปรับปรุงอัตราส่วนผสมในการผลิตคอนกรีตที่เหมาะสมเพื่อให้คอนกรีตมีรูพรุนมาก การกระจายตัวของรูพรุนที่ดีและความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจาก ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย
2. ศึกษาผลของสภาวะในการเตรียมต่อความหนาแน่นและความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัตถุดิบ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย เพื่อเตรียมก้อนคอนกรีตให้มีรูพรุนสูง และความหนาแน่นต่ำ ศึกษาถึงผลของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อการเกิดรูพรุนในคอนกรีต ศึกษาผลของความร้อนต่อการเกิดปฏิกิริยาของผงอลูมิเนียมในก้อนคอนกรีต ศึกษาหาระยะเวลาในการเซตตัวให้เหมาะสมสัมพันธ์กับการเกิดปฏิกิริยาของผงอลูมิเนียม จากนั้นนำก้อนคอนกรีตที่เตรียมได้ไปทดสอบหาความหนาแน่น และความแข็งแรงกด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงอัตราส่วนของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบา
2. ทราบถึงสภาวะในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบา
3. ทราบถึงเทคนิคในการเตรียมคอนกรีตมวลเบา
4. เป็นแนวทางในการพัฒนาคอนกรีตยุคใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 คอนกรีตคืออะไร [1]

คอนกรีตคือวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพราะมีความเหมาะสมทั้งทางด้านราคาและสมบัติต่างๆ คอนกรีตประกอบด้วยส่วนผสม 2 ส่วนคือ วัสดุประสาน อันได้แก่ ปูนซีเมนต์กับน้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต และวัสดุผสมอันได้แก่ ทราย หินหรือกรวด เมื่อนำวัสดุ 2 ส่วนนี้มาผสมกันสามารถคงสภาพเหลวอยู่ช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งนานพอที่สามารถนำไปเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างต่างๆตามต้องการ หลังจากนั้นจะแปรสภาพเป็นของแข็ง มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2.1 สมบัติของคอนกรีต [1]

สมบัติของคอนกรีต	
ความหนาแน่น (กก./ลบ.ม.)	2,300-2,400
ความแข็งแรงดึง (กก./ตร.ซม.)	30
มอดุลัสยืดหยุ่น(E) (กก./ตร.ซม.)	2.5×10^5
การนำความร้อน(W/m.k)	3
สัมประสิทธิ์การขยายตัว ($10^{-6}/^{\circ}C$)	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 องค์ประกอบของคอนกรีต

คอนกรีตประกอบด้วยปูนซีเมนต์ หิน ทราย น้ำ และน้ำยาผสมคอนกรีต โดยเมื่อนำส่วนผสมต่างๆเหล่านี้มาผสมกันจะมีชื่อเรียกเฉพาะดังนี้

- ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำและน้ำยาผสมคอนกรีต เรียกว่า ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste)
- ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย เรียกว่า มอร์ต้า (Mortar)
- มอร์ต้าผสมกับทราย เรียกว่า คอนกรีต (Concrete)

2.3 หน้าที่และสมบัติของส่วนผสม

1. **ซีเมนต์เพสต์** หน้าที่ของซีเมนต์เพสต์มีดังนี้
   - เสริมช่องว่างระหว่างมวลรวม
   - หล่อลื่นคอนกรีตสดขณะเทหล่อ
   - ให้กำลังแก่คอนกรีตเมื่อคอนกรีตแข็งตัว รวมทั้งป้องกันการซึมผ่านของน้ำ

   สมบัติของซีเมนต์เพสต์ขึ้นอยู่กับ
   - คุณภาพของซีเมนต์
   - อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
   - ความสมบูรณ์ของปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์หรือปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2. **มวลรวม** หน้าที่ของมวลรวมมีดังนี้
   - เป็นตัวแทรกประสานราคาถูกที่กระจายอยู่ทั่วซีเมนต์เพสต์
   - ช่วยให้คอนกรีตมีความคงทน ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงมาก

   สมบัติของมวลรวมที่สำคัญ
   - มีความแข็งแรง
   - การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่ำ
   - คงทนต่อปฏิกิริยาเคมี
   - ต้านทานต่อแรงกระแทก และการเสียดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. **น้ำ** หน้าที่หลักของน้ำสำหรับงานคอนกรีตมี 3 ประการ คือ

- ใช้ล้างวัสดุมวลรวมต่างๆ
- ใช้ผสมทำคอนกรีต
- ใช้บ่มคอนกรีต
- ก่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์
- ทำหน้าที่หล่อลื่นเพื่อให้คอนกรีตอยู่ในสภาพเหลวสามารถเทได้
- เคลือบ หิน ทราย ให้เปียกเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์จะเข้าเกาะได้โดยรอบ

4. **น้ำยาผสมคอนกรีต** หน้าที่สำคัญของน้ำยาผสมคอนกรีต คือ

ช่วยปรับปรุงสมบัติทั้งคอนกรีตที่เหลว และคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วในด้านต่างๆ เช่น เวลา การก่อตัว ความสามารถในการเท การพัฒนากำลังอัดและความทนทานเป็นต้น

2.4 ปูนซีเมนต์

เมื่อนำวัตถุดิบในการผลิตปูนซีเมนต์มาเผาในหม้อปฏิกิริยาจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีขึ้นเป็นขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1) น้ำระเหยออกจากส่วนผสมทั้งหมด

ขั้นตอนที่ 2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกขับออกจากหินปูนและดินสอพอง เหลือไว้เพียง แคลเซียมออกไซด์

ขั้นตอนที่ 3) เกิดการหลอมตัวของออกไซด์ระหว่างแคลเซียมออกไซด์ จากหินปูนและดินสอพอง ซิลิกา อลูมินา และเหล็กออกไซด์จากดินดำหรือดินเหนียวและดินดาน

ขั้นตอนที่ 4) เกิดการรวมตัวทางเคมีของออกไซด์ต่างๆ และตามด้วยขบวนการตกผลึกเมื่อทำให้เย็นตัว

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งเป็นปูนที่นิยมใช้กันมากในเชิงพาณิชย์จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ

- **ออกไซด์หลัก** ได้แก่ CaO SiO_2 Al_2O_3 Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์
- **ออกไซด์รอง** ได้แก่ MgO Na_2O TiO_2 P_2O_5 และยิปซัม ปริมาณออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [1]

ชื่อสารเคมี	% โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-67
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-0.6
ออกไซด์รอง	
MgO	0.5-6.0
Na_2O+K_2O	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
P_2O_5	0.1-0.2
SO_3	1-3

ออกไซด์หลักในปูนซีเมนต์จะรวมตัวในระหว่างการเกิดปูนเม็ด (Clinker) เกิดเป็นสารประกอบที่สำคัญ 4 อย่าง ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สารประกอบสำคัญในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [1]

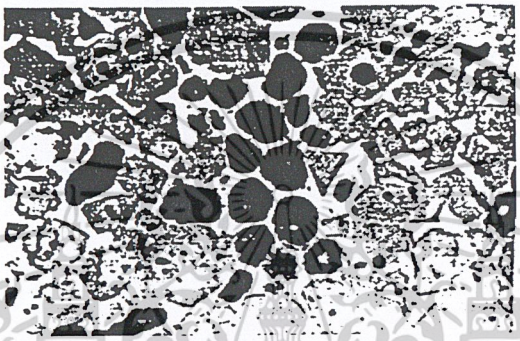
ชื่อสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต (Tricalcium Silicate)	$3CaO.SiO_2$	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต (Dicalcium Silicate)	$2CaO.SiO_2$	C_2S
ไตรแคลเซียม อลูมิเนต (Tricalcim Aluminate)	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
เตตระแคลเซียม อลูมิโนเฟอร์ไรท์ (Tetracalcium Aluminoferrite)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

ไตรแคลเซียมซิลิเกต เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 1 สมบัติของ ไตรแคลเซียมซิลิเกต เหมือนกับสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในสัปดาห์แรก การเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูล/กรัมค่ากำลังอัดของไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีผลโดยตรงจากปริมาณยิปซัม ปริมาณไตรแคลเซียมซิลิเกต ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีปริมาณ 35-55%โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2.1 รูปร่างลักษณะของไตรแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเป็นผลึกรูป 6 เหลี่ยมและไตรแคลเซียมซิลิเกตเป็นเม็ดกลมดำ [1]

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

ไดแคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม โดยไดแคลเซียมซิลิเกตมีอยู่หลายรูปแบบ มีเพียง β-C_2S เท่านั้นที่คงตัวที่อุณหภูมิทั่วไป β-C_2S มีสมบัติยึดเกาะ เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูล/กรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับไตรแคลเซียมซิลิเกต ปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกตในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35% โดยน้ำหนัก

3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A)

ไตรแคลเซียมอลูมิเนตเป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมสีเทาอ่อนไตรแคลเซียม-อลูมิเนตจะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมากประมาณ 850จูล/กรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของไตร-แคลเซียมอลูมิเนต จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีไตรแคลเซียมอลูมิเนตอยู่ในปริมาณ 7-15 %โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

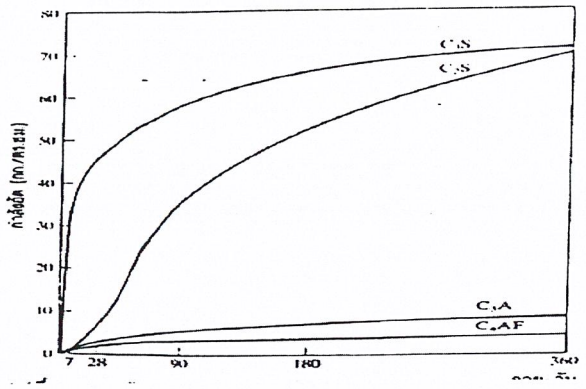
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)

เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูล/กรัม กำลังอัดของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ อยู่ในปริมาณ 5-10% สมบัติที่สำคัญของสารประกอบทั้ง 4 ชนิด สรุปได้ดังตารางที่ 2.4 และกราฟรูปที่ 2.2

ตารางที่ 2.4 สมบัติต่างๆขององค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [1]

สมบัติ	ไตรแคลเซียมซิลิเกต	ไดแคลเซียมซิลิเกต	ไตรแคลเซียมอลูมิเนต	เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์
1) อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาที)
2) การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (อาทิตย์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3) กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4) ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง (500J/g)	น้อย (250J/g)	สูงมาก (850J/g)	ปานกลาง (420J/g)
5) สมบัติอื่นๆ	สมบัติเหมือนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์	-	ไม่คงตัวในน้ำและถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การพัฒนากำลังของสารประกอบหลัก [1]

2.6 สารประกอบรอง

1. ยิปซัม ($CaSO_4.2H_2O$)

ยิปซัมถูกใส่เข้าไปในระหว่างบดปูนเม็ด เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ต้องเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับ

1) อัลคาไลน์ออกไซด์ อันได้แก่ Na_2O K_2O
2) ปริมาณไตรแคลเซียมอลูมิเนต
3) ความละเอียดของปูนซีเมนต์

2. Free Lime (CaO)

Free Lime เกิดขึ้นได้ 2 กรณี คือ

1) เมื่อวัตถุดิบมี Lime มากเกินไปทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยา SiO_2 Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมด
2) ปริมาณ Lime มีไม่มาก แต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆไม่สมบูรณ์

Free Lime นี้จะทำปฏิกิริยากับน้ำอย่างช้าๆ หลังจากที่ซีเมนต์แข็งตัวแล้ว ซึ่งอาจก่อให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวเสียหายได้ หรือที่เรียกว่า ซีเมนต์ไม่อยู่ตัวเนื่องจาก Lime

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบในการผลิตปูนส่วนใหญ่จะมี $MgCO_3$ ซึ่งเมื่อเผาแล้วจะเกิดการแยกตัวให้ MgO และ CO_2 แมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ด ที่เหลือจะอยู่ในรูปของ MgO และเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเหมือนกับ CaO ปริมาตรจะเพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดการไม่อยู่ตัว

การขยายตัวจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

1) ปริมาณของ MgO ในปูนซีเมนต์
2) ขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กๆ จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็ว โดยจะไม่ก่อให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

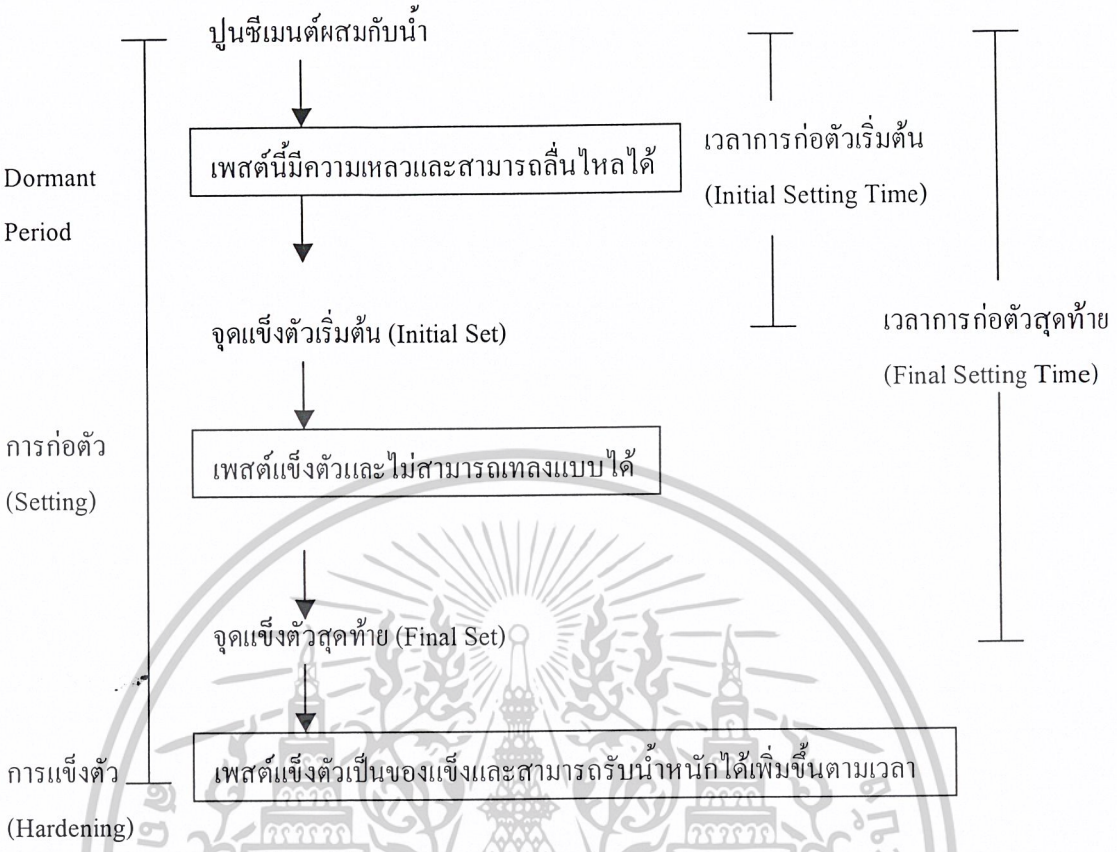
4. อัลคาไลน์ออกไซด์ (Na_2O K_2O)

อัลคาไลน์ออกไซด์ ที่อยู่ในปูนซีเมนต์นี้จะส่งผลเสีย ในกรณีที่ใช้มวลรวมบางประเภทที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์มาผสมเป็นคอนกรีต ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายยากต่อการแก้ไข ในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลน์ ควรเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลน์ต่ำ

2.7 การก่อตัวและการแข็งตัว

ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ก่อให้เกิดซีเมนต์เพสต์ที่อยู่ในสภาพเหลวช่วงเวลาหนึ่ง โดยสมบัติของเพสต์ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเราเรียกช่วงนี้ว่า "Dormant Period" หลังจากนั้น เพสต์จะเริ่มแข็งตัว ถึงแม้ว่าจะยังนิ่มอยู่ แต่ไม่สามารถลื่นไหลเข้าแบบได้แล้ว จุดนี้เราเรียกว่า "จุดแข็งตัวเริ่มต้น" (Initial Set) เวลาตั้งแต่ซีเมนต์ผสมกับน้ำจนถึงจุดแข็งตัวเริ่มต้น เรียกว่า "เวลาการก่อตัวเริ่มต้น" (Initial Setting Time) การก่อตัวของเพสต์จะยังคงดำเนินต่อไปจนถึงสภาพที่เป็นของแข็ง หรือ "จุดแข็งตัวสุดท้าย" (Final Set) และเวลาที่ทำให้เพสต์ถึงช่วงนี้เรียกว่า "เวลาการก่อตัวสุดท้าย" (Final Setting Time) เพสต์ยังคงแข็งตัวต่อไป และสามารถรับน้ำหนักได้ ขบวนการทั้งหมดนี้เราเรียกว่า "การแข็งตัว" (Hardening) ขั้นตอนต่างๆของการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีตแสดงไว้ในรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการก่อตัวและแข็งตัวของคอนกรีต [1]

2.8 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน

การก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบของซีเมนต์ โดยปฏิกิริยานี้เกิดเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) อาศัยสารละลายซีเมนต์จะละลายในน้ำ ก่อให้เกิดไอออน ในสารละลายและไอออนนี้จะผสมทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น
2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยตรงที่ผิวของของแข็ง โดยไม่จำเป็นต้องใช้สารละลายปฏิกิริยาประเภทนี้เรียกว่า "Solid State Reaction"

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์จะเกิดขึ้นทั้ง 2 ลักษณะ โดยในช่วงแรกจะอาศัยสารละลายและในช่วงต่อไปจะเกิดปฏิกิริยาระหว่างของแข็ง

ซีเมนต์ประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจเกิดปฏิกิริยาต่อไป ทำให้มันแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ที่ได้ครั้งแรก ดังนั้นในที่นี้เราจะแยกพิจารณาปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักของซีเมนต์แต่ละประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต** (C_3S , C_2S)

แคลเซียมซิลิเกต จะทำปฏิกิริยากับน้ำก่อให้เกิด $Ca(OH)_2$ และ Calcium Silicate Hydrate (CSH) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวประสาน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และเป็นไปตามสมการการเกิดปฏิกิริยามีดังนี้

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

หรือ $$2C_3S + 6H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2 \quad (1)$$

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

หรือ $$2C_2S + 4H_2O \longrightarrow C_3S_2H_3 + Ca(OH)_2 \quad (2)$$

รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต [1]

จากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเกิดเจล ซึ่งเมื่อแข็งตัวจะมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการคือ โครงสร้างไม่สม่ำเสมอและมีรูพรุน องค์ประกอบทางเคมีของ CSH นี้ ขึ้นอยู่กับ อายุ อุณหภูมิ และอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ในที่นี้จะใช้ตัวย่อ 'CSH' แทน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างเป็นอย่างไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีสมบัติเป็นด่างอย่างมาก คือมี pH ประมาณ 12.5 ซึ่งช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กเสริมแรงได้อย่างดี

- **ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต** (C_3A)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต จะเกิดทันทีทันใด และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ ดังสมการ

$$3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$$

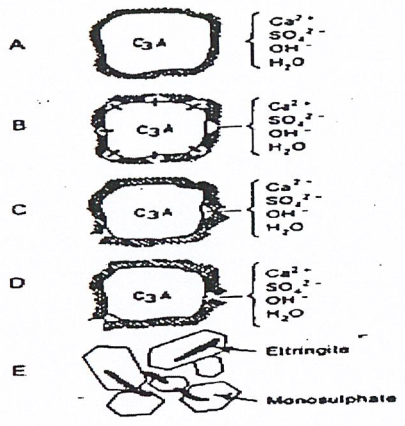
หรือ $$C_3A + 6H_2O \longrightarrow C_3AH_6$$

เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็ว จึงใส่ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอลูมิเนตก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอลูมิเนต ดังสมการ

$$C_3A + CaSO_4 \cdot 2H_2O \longrightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O \quad \text{(Ettringite)}$$

ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ไตรแคลเซียมซิลิเกต และ ไดแคลเซียมซิลิเกต เป็นส่วนใหญ่ แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต กล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออก และเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต แต่เมื่อเกิดการแตกตัว จะเกิด Ettringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชัน อีกครั้งหนึ่ง ขั้นตอนจะเป็นอย่างนี้ ไปจนกระทั่งซัลเฟตไอออนมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็นโมโนซัลเฟตดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กระบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอลูมิเนต [1]

- **ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์** (C_4AF)

ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ นี้จะเกิดในช่วงต้นโดยเตตระ-แคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรท์ จะทำปฏิกิริยากับยิปซัมและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ก่อให้เกิดอนุภาคที่มีรูปร่างเหมือนเข็มของ ซัลโฟอลูมิเนต และ ซัลโฟเฟอร์ไรต์ ดังสมการ

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

เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขององค์ประกอบหลักในปูนซีเมนต์จนเสร็จสิ้นประมาณ 80% จะมีค่าดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เวลาที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักสำเร็จ 80% [1]

สารประกอบหลัก	เวลา (วัน)
C_3S	10
C_2S	100
C_3A	3
C_4AF	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ และสมบัติของซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะมีผลต่อสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้ว

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้แก่

1) **อายุของเพสต์** ยกเว้น Dormant Period อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมากที่สุดในช่วงแรก และอัตราการลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6

รูปที่ 2.6 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน [1]

2) **องค์ประกอบของซีเมนต์** จากตารางที่ 2.3 พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลักแต่ละตัวในซีเมนต์จะแตกต่างกัน

3) **ความละเอียดของซีเมนต์** ซีเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะมีพื้นที่ผิวที่จะสัมผัสกับน้ำได้มาก ผลก็คือปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดในอัตราที่เร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของปฏิกิริยา

4) **อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์** ในช่วงต้นอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ในช่วงหลังอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง ผลก็คือทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยเฉลี่ยและดีกรีการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลง

5) **อุณหภูมิ** อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยมีข้อแม้ว่าการเพิ่มอุณหภูมินี้ต้องไม่ก่อให้เกิดการแห้งตัวของเพสต์

6) **น้ำยาผสมคอนกรีต** น้ำยาหน่วงหรือน้ำยาเร่งการก่อตัวจะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยจะลดและเพิ่มอัตราตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การบ่มคอนกรีต

การบ่ม (Curing) คือ ชื่อเฉพาะของวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่องวิธีการคือให้น้ำแก่คอนกรีตหลังจากที่คอนกรีตแข็งตัวแล้ว

หน้าที่สำคัญของการบ่มคอนกรีตมีด้วยกัน 2 ประการคือ

1). ป้องกันการสูญเสียความชื้นของเนื้อคอนกรีต

2). รักษาระดับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาพที่เหมาะสม

สำหรับวัตถุประสงค์ที่สำคัญของการบ่มคอนกรีต คือ

1). เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังและความทนทาน

2). เพื่อป้องกันการแตกร้าวของคอนกรีต โดยรักษาระดับอุณหภูมิให้เหมาะสม และลดการระเหยของน้ำให้น้ำระเหยน้อยที่สุด

การบ่ม อาจหมายถึงการควบคุมอุณภูมิของคอนกรีตด้วยทั้งนี้เพราะอุณหภูมิที่สูงจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว อันทำให้คุณภาพของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะแรก อย่างไรก็ตามการเร่งนี้อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อสมบัติของคอนกรีตในระยะยาว

2.10.1 กรรมวิธีการบ่ม

แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามสภาพอุณหภูมิที่ใช้บ่มคือ

1). การบ่มที่อุณหภูมิปกติ

2). การบ่มที่อุณหภูมิ และความกดดันสูง

2.10.2 ระยะเวลาการบ่ม

โดยทั่วไประยะเวลาของการบ่มคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่สำคัญหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ อัตราส่วนผสมของคอนกรีต กำลังของคอนกรีตที่ต้องการ ขนาดและรูปร่าง อุณหภูมิที่ใช้ เป็นต้น สำหรับงานโครงสร้างทั่วๆ ไป ส่วนใหญ่จะกำหนดระยะเวลาในการบ่มไว้ตั้งแต่ 3 วัน จนถึง 2 สัปดาห์ ซึ่งกำหนดเวลาดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นแต่โดยปกตินิยมกำหนดระยะเวลาการบ่มไว้ประมาณ 1 สัปดาห์สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาระยะเวลาของการบ่มคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ตารางที่ 2.6 เวลาขั้นต่ำในการบ่มคอนกรีต [1]

ประเภทของงาน	คอนกรีตที่ใช้		
	ปูนซีเมนต์ผสม	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3
งานธรรมดา			
- เสา คาน และกำแพง	7 วัน	7 วัน	4 วัน
- พื้นบ้าน พื้นถนนในบ้าน	8 วัน	14 วัน	4 วัน
- ถนนชั้น 1 ลานจอดหรือทางวิ่งของเครื่องบิน	-	-	7 วัน
- เสาเข็มสำหรับจะนำไปตอกเป็นฐานราก	21 วัน	14วัน	7 วัน
งานพิเศษ			
- แผ่นพื้นบาง ๆ	14 วัน	14 วัน	7 วัน
- รูปหล่อที่เล็กบางซึ่งใช้ปูนซีเมนต์ผสมมาก	-	21 วัน	7 วัน

2.11 คอนกรีตมวลเบา

คอนกรีตมวลเบา คือ คอนกรีตที่มีความหนาแน่นหรือหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าคอนกรีตทั่วไป โดยสามารถเตรียมได้จาก

1) คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา (Light-Weight Aggregate Concrete)
2) โฟมคอนกรีต (Aerated or Foam Concrete)
3) คอนกรีตที่ไม่มีส่วนละเอียด (No-Fines Concrete)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

55563

2.11.1 คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบา

มวลรวมเบามีหน่วยน้ำหนักระหว่าง 60 – 1,000 กก./ลบ.ม. เทียบกับ 1,100 – 1,750 กก./ลบ.ม. ของมวลรวมปกติ หน่วยน้ำหนักของมวลรวมเบาแต่ละชนิด สามารถจำแนกออกได้เป็น 4 ชนิดคือ

1) มวลรวมเบาที่ได้จากธรรมชาติ

ได้แก่ หิน Vermiculite Perlite Pumice และ Scoria ซึ่งเป็นลาวาที่พองตัวโดยธรรมชาติ เกิดขึ้นเวลาภูเขาไฟระเบิดมวลรวมชนิดนี้ใช้ผสมทำคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังอัดที่สูงมากนัก และมวลรวมชนิดนี้จะดูดซึมน้ำมาก

รูปที่ 2.7 ลักษณะภายใน Pumice [1]

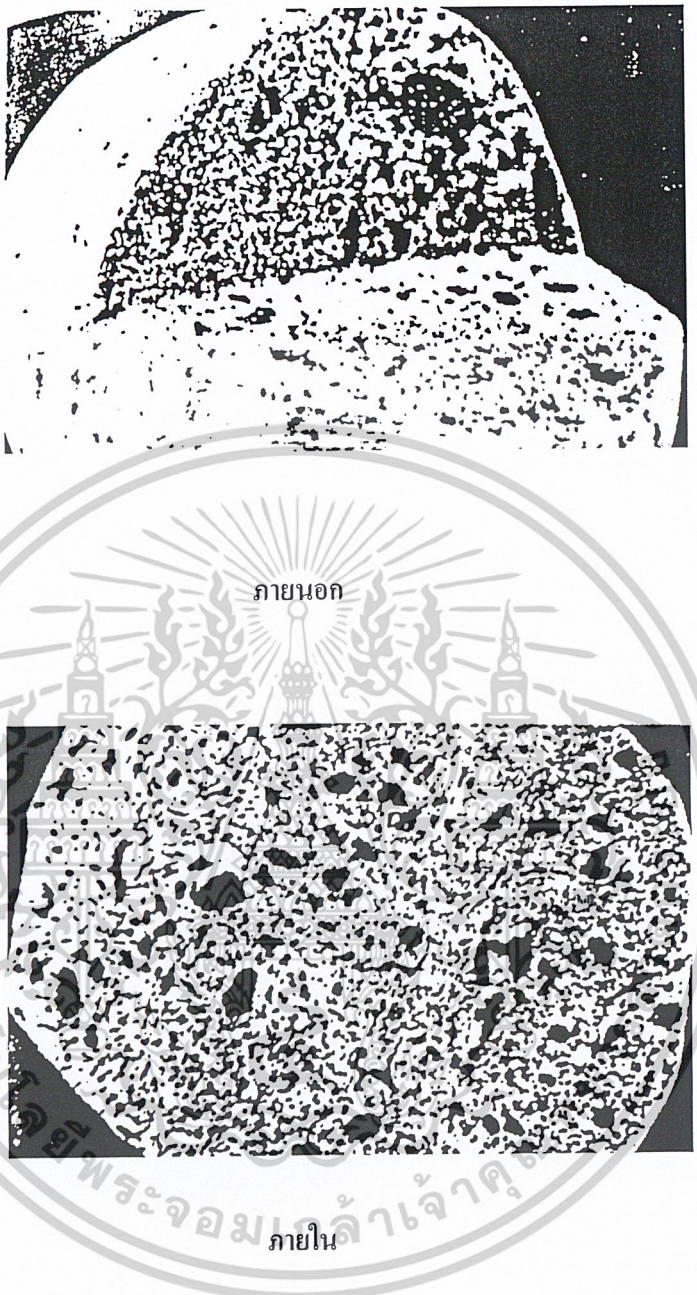
2) มวลรวมเบาที่ได้จากกระบวนการผลิต

เป็นมวลรวมเบาที่ใช้ผลิตคอนกรีตมากที่สุด สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทคือ

- **Expanded Clay Aggregate**

ได้จากการนำดินเหนียวมาผสมกับสารที่ก่อให้เกิดฟองอากาศแล้วนำไปเผาในหม้อเผา ที่ 1,200 °C ณ อุณหภูมินี้จะมีการขยายตัว เนื่องมาจากการเผาไหม้ของสารอินทรีย์เกิดเป็นฟองอากาศอยู่ในเนื้อหิน ลักษณะของหินพวกนี้จะมีรูปร่างกลม แข็ง ผิวเรียบแน่น แต่เนื้อภายในเป็นโพรงอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



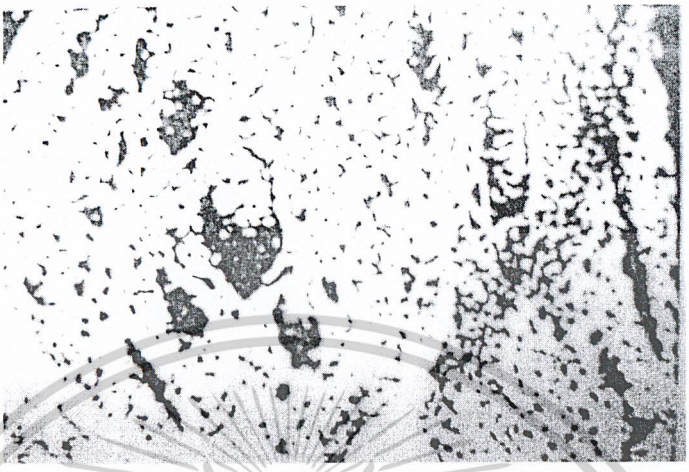
รูปที่ 2.8 ลักษณะผิวภายนอกและภายในของ Expanded Clay [1]

- **Expanded Shale Aggregate**

ได้จากการนำดินดาน มาผสมกับถ่านที่บดละเอียดแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1,200 °C วัตถุดิบจะถูกหลอมรวมกันและจะมีฟองอากาศถูกกักไว้ภายในเนื้อหิน ลักษณะจะเป็นหินที่มีความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

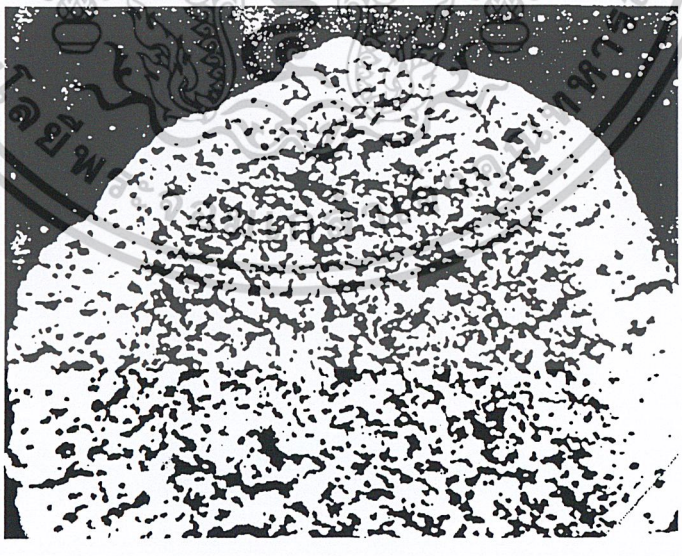
มาก หลังจากที่เผามวลรวมทั้งสองนี้ได้ที่แล้ว จะนำมวลรวมเบาที่ได้ไปย่อยให้ได้ขนาดที่ต้องการ เนื่องจากมวลรวมเบาชนิดนี้มีความแข็งแรงจึงเป็นที่นิยมใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลรวมเบา



รูปที่ 2.9 มวลรวมเบาประเภท Expanded Shale [1]

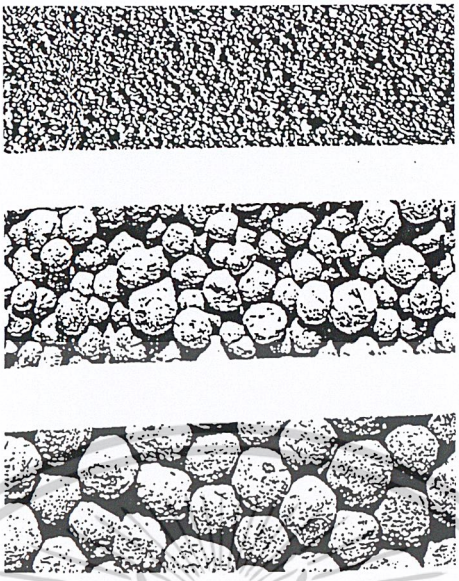
- **Sintered Fly Ash**

ได้จากการนำเอาเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินไปทำเป็นเม็ดก่อน แล้วจึงนำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1,400 °C ณ อุณหภูมินี้เถ้าลอยจะเกาะกัน และผิวของมวลรวมเบาชนิดนี้จะค่อนข้างเรียบ



รูปที่ 2.10 Sintered Fly Ash [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลักษณะของมวลรวมละเอียดและมวลรวมหยาบที่ผลิตจากเถ้าลอย [1]

สมบัติของคอนกรีตที่ผลิตจากมวลรวมเบา

1) หน่วยน้ำหนัก หรือ ความหนาแน่น 300 1,800 กก. / ลบ.ม.
2) กำลังอัดรูปทรงลูกบาศก์ 4 - 480 กก. / ตร.ซม.
3) ปริมาณซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับคอนกรีตปกติจนถึงสูงกว่าปกติ 70%
4) ในปริมาณความสามารถในการเทได้เท่ากัน คอนกรีตที่ใช้มวลรวมเบาจะมีค่ายุบตัวน้อยกว่าคอนกรีตทั่ว ๆ ไป
5) การนำความร้อนต่ำ เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อน รวมทั้งมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำอีกด้วย
6) การดูดซึมน้ำที่สูง
7) ค่า Modulus of Elasticity ต่ำ
8) ความสามารถในการทนไฟได้ดี
9) กำลังและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กต่ำ
10) Tensile Strain มากกว่าคอนกรีตปกติ
11) Creep จะเหมือนกับคอนกรีตทั่ว ๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ Joao A. Rossignolo และ Marcos V.C. Agnesini [5] ได้ทำการเตรียมคอนกรีตผสมพอลิเมอร์โดยใช้พอลิเมอร์ที่ผสมเป็นสไตรีนบิวทาไดอีนมอนอเมอร์แล้วได้นำไปทำการทดสอบความทนทานต่อสารเคมีโดยใช้กรดซัลฟูลิก กรดครอริดิก และกรดอะซิติก เป็นตัวทดสอบและทำการทดสอบการต้านทานการซึมน้ำโดยผลการทดสอบปรากฏว่าคอนกรีตที่มีการผสมสไตรีนบิวทาไดอีนมอนอเมอร์ จะมีการต้านทานต่อสารเคมีและการซึมของน้ำได้ดีกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติโดยการเติมสไตรีนบิวทาไดอีนมอนอเมอร์ลงไป

Neopor System [3] ได้มีการผลิตคอนกรีตมวลเบาโดยได้นำเม็ดโฟมและสารให้ฟองเข้ามาผสมเข้ากับส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อให้คอนกรีตมีน้ำหนักที่เบาขึ้นและประหยัดวัตถุดิบมากขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของคอนกรีตที่มีการผสมเม็ดโฟมยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สามารถนำไปใช้ได้และเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย

J.A. Rossignolo,M.V.C. Agesini and J.A. Morais [7]ได้ทำการปรับปรุงคอนกรีตผสม โดยใช้น้ำยางสไตรีนบิวตะไดอีน (Styrene-Butadiene Rubber Latex , SBR) แล้วนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพบางประการในขณะที่ยังเป็นคอนกรีตสดโดยได้เปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ SBR ค่าความแข็งแรงกดของคอนกรีตที่ได้รับการปรับปรุงแล้วจะมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพซึ่งอาจเกิดจากรูพรุนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ SBR สามารถแทรกตัวอยู่ในคอนกรีตได้มากขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่มีการปรับปรุงคุณภาพจะมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความแข็งแรงโค้งงอดีขึ้นและค่าการดูดซึมน้ำจะลดลงเมื่อมีการผสม SBR เพิ่มมากขึ้น

Deborah D.L. Chung [8] ได้ศึกษาวัสดุประกอบที่มีโครงสร้างที่ดีทำให้สมบัติทางการควบคุมความร้อน ทางอุณหภูมิ ความทนทานต่อกระแสไฟฟ้าและการสั่นสะเทือนดีขึ้น ในการศึกษาที่ใช้ซีเมนต์เป็นวัฏภาคหลัก (Matrix Phase) จะใส่เส้นใยคาร์บอนที่มีขนาดเล็กเป็นตัวเสริมแรง (Reinforced Phase) ในขณะที่วัสดุที่ใช้พอลิเมอร์เป็นวัฏภาคหลักจะใส่เส้นใยคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่องเป็นวัฏภาคเสริมแรง ดังนั้นจากการทดลองทราบว่าค่าการนำไฟฟ้าของเส้นใยเป็นผลทำให้ค่าความต้านทานของวัสดุผสมเปลี่ยนไปขึ้นกับ ค่าความร้อน อุณหภูมิ ค่าการทำลายของสิ่งแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

J.A. Rossignolo M.V.C. Agnesini และ J.A. Morais [9] ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลเบาเทียบกับคอนกรีตปกติ พบว่าค่าความแข็งแรงกดของคอนกรีตมวลเบามีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติ และค่าสมบัติความแข็งแรง ค่าความยืดหยุ่นของคอนกรีตมวลเบาก็มีค่าต่ำกว่าคอนกรีตปกติเช่นกัน ถึงแม้ว่าคอนกรีตมวลเบาจะมีสมบัติเชิงกลลดต่ำลงจากคอนกรีตปกติอย่างไรก็ตามจากการทดลอง พบว่าคอนกรีตมวลเบาสามารถนำมาใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อวลาผ่านไป 2 ชั่วโมงหลังจากผสมเสร็จแล้วเนื่องมาจากว่าคอนกรีตมวลเบาจะมีการเซตตัวและการกระจายตัวของรูพรุนที่สม่ำเสมอทำให้สมบัติเชิงกลนั้นลดต่ำลงไม่มากนัก

B. Gerharz [10] ได้ทำการปรับปรุงคอนกรีตโดยการผสมพอลิเมอร์ชนิดต่างๆลงไปได้แก่ สไตรีนอะซิติกอิมัลชัน อะซิติกอิมัลชัน สไตรรีนบิวตะไดอีน และอิมัลชันอิพอกซีเรซินแล้วนำมาทดสอบโดยการให้รถวิ่งทับด้วยความเร็ว 120 km/hr โดยเปรียบเทียบระหว่างคอนกรีตซึมน้ำ(Drainage Concrete) กับคอนกรีตที่ทำการปรับปรุงโดยผสมพอลิเมอร์ ซึ่งคอนกรีตปรับปรุงโดยผสมพอลิเมอร์จะมีความแข็งแรงกว่าเนื่องจากมีการเติมวัสดุผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ผงอลูมิเนียม (Aluminium Powder , Al)
2. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เกรดการค้า ตราเสือ บริษัทปูนซีเมนต์ไทย จำกัด
3. ปูนซีเมนต์ขาว เกรดการค้า ตราช้างเผือก บริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด
4. ทรายละเอียด (ทรายแม่น้ำ)
5. เถ้าลอย (Fly Ash) จากโรงงานผลิตไฟฟ้า อำเภอ แม่เมาะ
6. น้ำประปา (Water H_2O)
7. แป้งฝุ่น (ทัลคัม)

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ตะแกรงมาตรฐานขนาด 12 35 100 200 230 เมช บริษัท RETSCH รุ่น 5657 HAAN W. GERMANY สำหรับปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ขาว ทรายละเอียด เถ้าลอย
2. เครื่องร่อนตะแกรง บริษัท RETSCH รุ่น VIBRO
3. เครื่องชั่งอย่างละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument Company รุ่น TC 254
4. ตู้อบ บริษัท WBT Binder รุ่น 7200 Tuttlingen / GERMANY
5. ยูนิเวอร์แซล อินดิเคเตอร์ วัดความเป็นกรด-เบส บริษัท Whatman ชนิด Narrow Range pH 12-14 Colour Developes in 30 second
6. โถดูดความชื้น
7. แบบพิมพ์โลหะ ขนาด 512 ลูกบาศก์เซนติเมตร
8. เกรียงเหล็ก ถังดำผสมปูน
9. เครื่องมือทดสอบค่าความแข็งแรงกด ขนาด 800 kN บริษัท Control รุ่น C46L2
10. หม้ออบไอน้ำ
11. ฟิล์มยืด
12. เครื่องมือทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด
13. เครื่องมือทดสอบค่าความหนืดของคอนกรีตสด บริษัท Brookfield Engineering Laboratories, INC รุ่น RV Spindleset

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แผนการดำเนินการวิจัย

ได้ทำการทดลองเป็น 8 ขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบและการวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี
2. การเตรียมก้อนคอนกรีตตัวอย่าง
3. การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าลอย
4. การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียม
5. การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียมและการอบไอน้ำ
6. ผลของสภาวะการเตรียมก้อนคอนกรีตต่อการกระจายตัวของรูพรุนและความหนาแน่น
   ก.) ผลของระยะเวลาการเซตตัวของก้อนคอนกรีตก่อนอบไอน้ำ
   ข.) ผลของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่น
7. การทดสอบหาความหนาแน่นแบบบัลค์ (Bulk Density)
8. การทดสอบค่าความแข็งแรงกด (Compressive Strength)

3.4 ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1 การเตรียมวัตถุดิบและการวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี

นำวัตถุดิบต่าง ๆ มาทำการร่อนโดยใช้ตะแกรงมาตรฐานขนาด 12 35 100 200 230 เมช เพื่อคัดแยกขนาดที่มีปริมาณมากที่สุดแล้วนำมาใช้ในการทดลอง โดยนำวัตถุดิบที่ได้ไปอบในตู้อบก่อนการใช้งานที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ปราศจากความชื้น แล้วจึงนำวัตถุดิบที่ได้มาเก็บไว้ในโถดูดความชื้น จากนั้นนำวัตถุดิบทุกชนิดยกเว้นทรายละเอียด ไปทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRF เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี และทำการวิเคราะห์ชนิดของผลึกโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบที่เลือกใช้

วัตถุดิบ	ขนาดของอนุภาคที่ใช้ (เมช)
ปูนซีเมนต์	100
ปูนซีเมนต์ขาว	200
ทรายละเอียด	35
เถ้าลอย	230

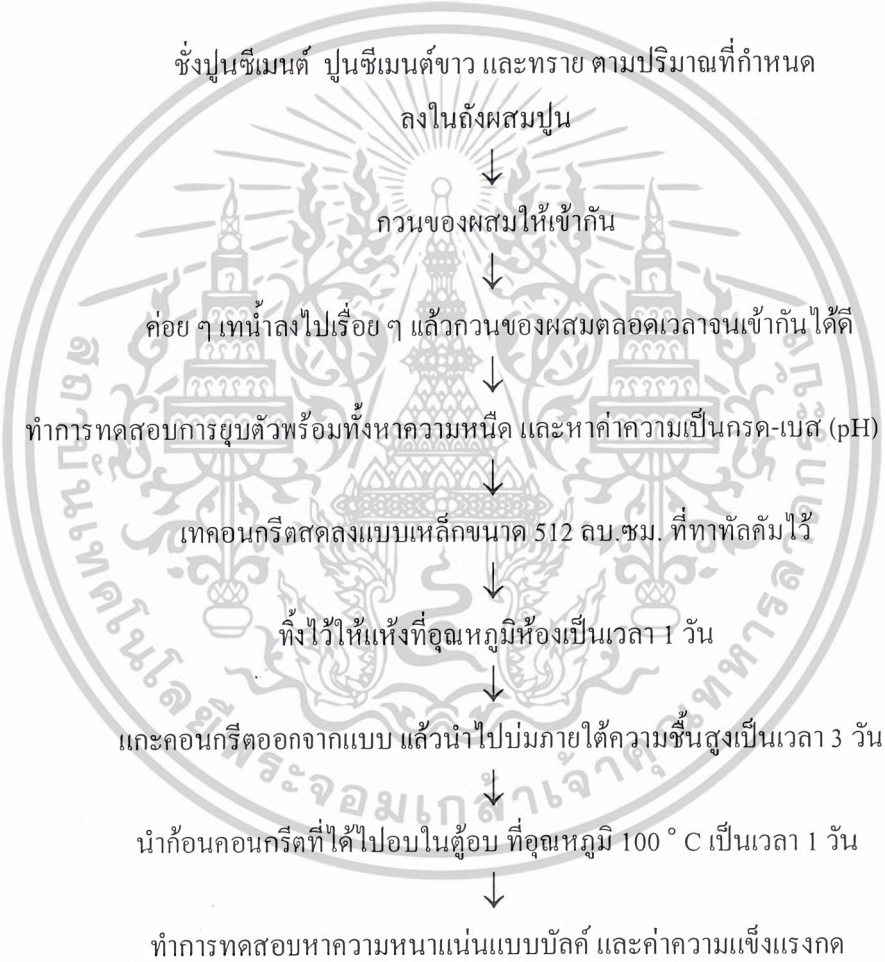
3.4.2 การเตรียมก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

ชั่งปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ขาว ทราย และน้ำ ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.2 จากนั้นทำการผสมวัตถุดิบที่เป็นของแข็งให้เข้ากัน แล้วจึงค่อยเติมน้ำลงไปอย่างช้า ๆ พร้อมกวนให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีจนเป็นคอนกรีตสดที่มีลักษณะเหลวข้น จากนั้นนำคอนกรีตสดที่ได้ไปทดสอบหาค่าการยุบตัวโดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดควรมีค่าต่ำประมาณ 5-10 % ของการยุบตัวของคอนกรีตสด จากนั้นนำคอนกรีตสดไปทำการทดสอบหาความหนืดที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตและผลของค่าความหนืดที่วัดได้จะนำไปใช้ในการควบคุมความหนืดของคอนกรีตสด ให้มีความหนืดเท่ากันทุกสูตรตลอดการทดลองคือเท่ากับ 5300 เซนติพอยท์ จากนั้นทำการหาค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และค่าความเป็นกรด-เบสโดยต้องควบคุมให้เท่ากันทุกสูตรตลอดการทดลองคือเท่ากับ 12-14 แล้วจึงค่อยเทคอนกรีตสดลงแบบขนาด 512 ลบ.ซม. ที่ทาทัลคัมไว้เพื่อให้แกะออกจากแบบได้ง่าย จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศในคอนกรีตสดออกให้หมดโดยการนำแท่งเหล็กมากระทุ้ง แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้คอนกรีตสดเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและระเหยน้ำออกไป อย่างช้า ๆ ซึ่งจะทำให้ได้ก้อนคอนกรีตที่สมบูรณ์ คือไม่มีรอยแตกร้าวที่ก้อนคอนกรีต นำคอนกรีตที่ได้มาแกะออกจากแบบแล้วไปทำการบ่มภายใต้ความชื้นสูง (ทำโดยนำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปไว้ในกระสอบที่ชุบน้ำไว้) เป็นเวลา 3 วัน เพื่อพัฒนากำลังอัดของก้อนคอนกรีตให้สูงขึ้น จากนั้นนำก้อนคอนกรีตภายหลังจากทำการบ่มแล้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

สูตรที่	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	ทรายละเอียด (กรัม)
1	300	-	600
2	-	300	600



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าลอย

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ทราย เถ้าลอย และน้ำ ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นทำการเตรียมก้อนคอนกรีตเช่นเดียวกันกับในการทดลองที่ 3.4.2 แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงกด ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นและความแข็งแรงกดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการเตรียมก้อนคอนกรีตโดยเติมเถ้าลอย

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมจากเถ้าลอย

สูตรที่	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	ทรายละเอียด (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)
C1S2	300	600	-
C1S4F1	150	600	150
C1F2	300	-	600
C2S3F4	300	450	600
C3S1F6	300	100	600

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย ตามปริมาณที่กำหนด

ลงในถังผสมปูน

↓

กวนของผสมให้เข้ากัน

↓

ค่อย ๆ เทน้ำลงไปเรื่อย ๆ แล้วกวนของผสมตลอดเวลาจนเข้ากันได้ดี

↓

ทำการทดสอบการยุบตัวพร้อมทั้งหาความหนืด และหาค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

↓

เทคอนกรีตสดลงแบบเหล็กขนาด 512 ลบ.ซม. ที่ทาทัลคัมไว้

↓

ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน

↓

แกะคอนกรีตออกจากแบบ แล้วนำไปบ่มภายใต้ความชื้นสูงเป็นเวลา 3 วัน

↓

นำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 $^{\circ}$ C เป็นเวลา 1 วัน

↓

ทำการทดสอบหาความหนาแน่นแบบบัลค์ และค่าความแข็งแรงกด

รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาจากเถ้าลอย

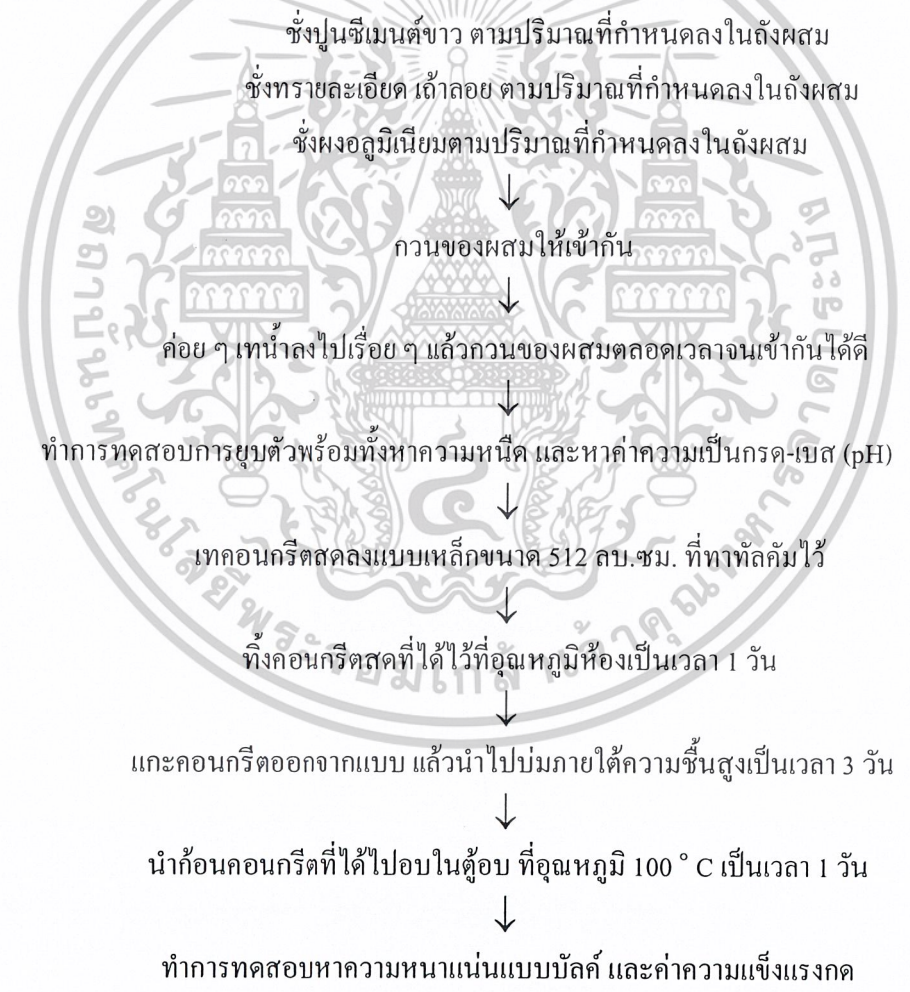
3.4.4 การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยผสมผงอลูมิเนียม

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.4 จากนั้นเติมผงอลูมิเนียมลงไป แล้วจึงทำการเตรียมก้อนคอนกรีตเช่นเดียวกันกับในการทดลองที่ 3.4.2 แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงกด ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นและความแข็งแรงกดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการเตรียมก้อนคอนกรีตโดยเติมเถ้าลอยและผงอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมจากผงอลูมิเนียม

สูตรที่	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	ทรายละเอียด (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงอลูมิเนียม (กรัม)
C1S2	300	600	-	-
C1S4F1	150	600	150	-
C1F2Al 0.05	300	-	600	0.45
C2S3F6Al 0.05	300	450	600	0.45
C3S1F6Al 0.05	300	100	600	0.45



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

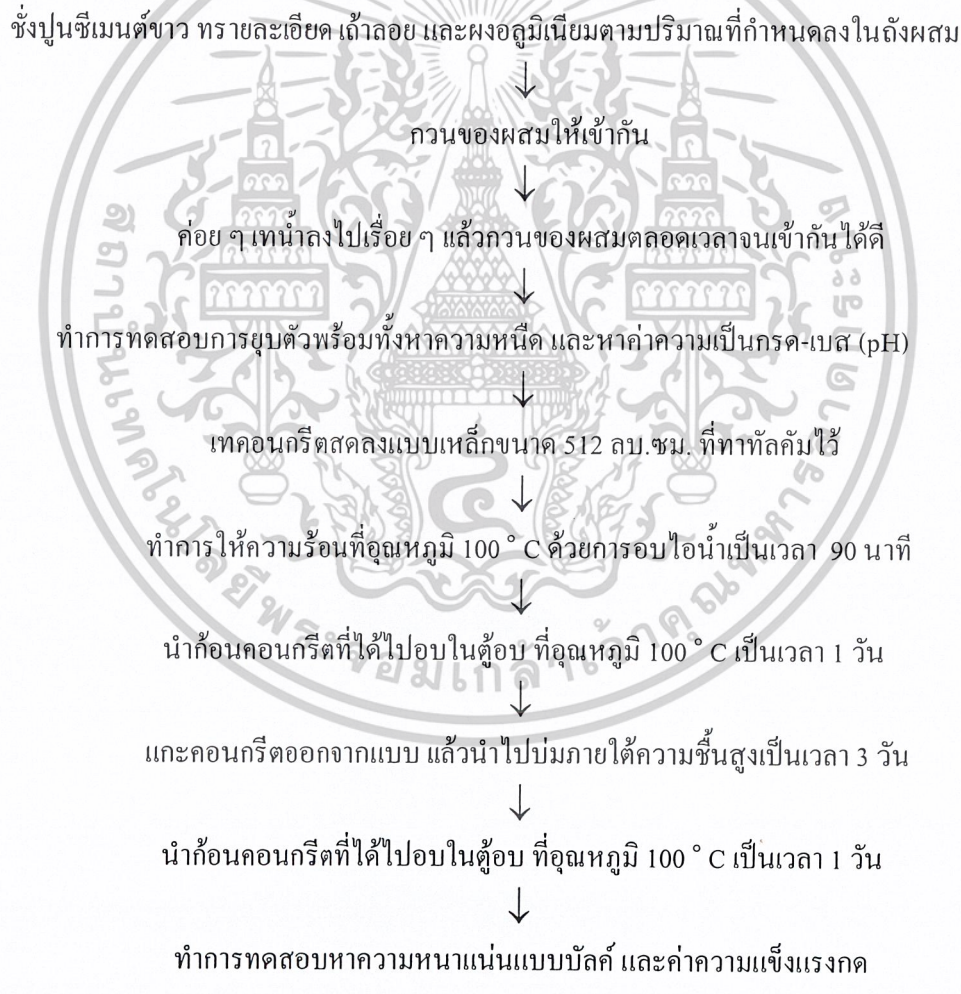
3.4.5 การเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยผสมผงอลูมิเนียมและการอบไอน้ำ

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.5 จากนั้นจึงทำการเติมผงอลูมิเนียมลงไปแล้วจึงทำการผสมวัตถุดิบที่เป็นของแข็งให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำลงไปอย่างช้า ๆ พร้อมกวนให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีจนเป็นคอนกรีตสดที่มีลักษณะเหลวข้น จากนั้นนำคอนกรีตสดที่ได้ไปทดสอบหาค่าการยุบตัวโดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดควรมีค่าต่ำประมาณ 5-10 % ของการยุบตัวของคอนกรีตสด จากนั้นนำคอนกรีตสดไปทำการทดสอบหาความหนืดที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตและผลของค่าความหนืดที่วัดได้จะนำไปใช้ในการควบคุมความหนืดของคอนกรีตสด ให้มีความหนืดเท่ากันทุกสูตรตลอดการทดลองคือเท่ากับ 5300 เซนติพอยท์ จากนั้นทำการหาค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และค่าความเป็นกรด-เบสจะต้องควบคุมให้เท่ากันทุกสูตรตลอดการทดลอง คือเท่ากับ 12-14 แล้วจึงค่อยเทคอนกรีตสดลงแบบขนาด 512 ลบ.ซม. ที่ทาทัลคัมไว้เพื่อให้แกะออกจากแบบได้ง่าย จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศในคอนกรีตสดออกให้หมดโดยการนำแท่งเหล็กมากระทุ้ง แล้วจึงนำแบบที่เทคอนกรีตสดลงไปแล้วไปทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ด้วยการอบไอน้ำเป็นเวลา 90 นาที เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในคอนกรีตสดจะมีสารประกอบจำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดมากขึ้นกว่าการไม่ให้ความร้อน ซึ่งสารประกอบนี้จะสามารถทำปฏิกิริยากับผงอลูมิเนียมภายใต้สภาวะที่มีความเป็นกรด-เบสประมาณ 12-14 ให้ก๊าซไฮโดรเจนออกมา ซึ่งก๊าซนี้สามารถทำให้ก้อนคอนกรีตเกิดรูพรุนมากขึ้นได้ จากนั้นนำก้อนคอนกรีตมาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำคอนกรีตที่ได้มาแกะออกจากแบบแล้วไปทำการบ่มภายใต้ความชื้นสูง (ทำโดยนำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปไว้ในกระสอบที่ชุบน้ำไว้) เป็นเวลา 3 วัน เพื่อพัฒนากำลังอัดของก้อนคอนกรีตให้สูงขึ้น จากนั้นนำก้อนคอนกรีตภายหลังจากทำการบ่มแล้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงกด ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของความหนาแน่นและความแข็งแรงกดที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อทำการเตรียมก้อนคอนกรีตโดยเติมเถ้าลอย ผงอลูมิเนียม และการอบไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรผสมผ่านการอบไอน้ำ

สูตรที่	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	ทรายละเอียด (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ผงอลูมิเนียม (กรัม)
C1S2 (S)	300	600	-	-
C1S4F1 (S)	150	600	150	-
C1F2Al 0.05 (S)	300	-	600	0.45
C2S3F6Al 0.05 (S)	300	450	600	0.45
C3S1F6Al 0.05 (S)	300	100	600	0.45



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียมและการอบไอน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.6 ผลของสภาวะการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาต่อการกระจายตัวของรูพรุนและความหนาแน่น

ในการทดลองขั้นนี้จะทำการคัดเลือกคอนกรีตมวลเบาสูตรที่มีความหนาแน่นต่ำที่สุดจากการทดลองข้างต้นมาทำการปรับปรุงเพื่อให้มีการกระจายตัวของรูพรุนดีขึ้นและความหนาแน่นต่ำลง

ก.) ผลของระยะเวลาการเซตตัวของก้อนคอนกรีตก่อนอบไอน้ำ

ในการทดลองนี้จะทำการควบคุมปริมาณของผงอลูมิเนียมให้คงที่และเวลาของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยให้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิห้องก่อนทำการให้ความร้อนด้วยการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 90 นาที ที่เวลาต่าง ๆ กันคือ ที่ 2 3 4 6 และ 8 ชั่วโมง ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันจะขึ้นตั้งแต่ตอนที่เป็นคอนกรีตสด แต่ปฏิกิริยาจะดำเนินไปอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อมีการให้ความร้อนด้วยการอบไอน้ำแก่คอนกรีตสดเข้าไป จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้เร็วขึ้น จนทำให้คอนกรีตสดแข็งตัวได้เร็ว

ทั้งนี้จากการควบคุมเวลาการตั้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันไปอย่างช้า ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อหาเวลาที่คอนกรีตสดแข็งตัวพอดีกับความสามารถในการกักฟองก๊าซที่มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับผงอลูมิเนียมให้มากที่สุด

- ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตโดยควบคุมเวลาในการตั้งทิ้งไว้

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย ตามสูตร C3S1F6A1 0.05 (S) ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.5 จากนั้นจึงทำการเติมผงอลูมิเนียมลงไปแล้วจึงทำการผสมวัตถุดิบที่เป็นของแข็งให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำลงไปอย่างช้า ๆ พร้อมกวนให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีจนเป็นคอนกรีตสดที่มีลักษณะเหลวข้น จากนั้นนำคอนกรีตสดที่ได้ไปทดสอบหาค่าการยุบตัวโดยค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดควรมีค่าต่ำประมาณ 5-10 % ของการยุบตัวของคอนกรีตสด จากนั้นนำคอนกรีตสดไปทำการทดสอบหาความหนืดที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตและผลของค่าความหนืดที่วัดได้จะนำไปใช้ในการควบคุมความหนืดของคอนกรีตสด ให้มีความหนืดเท่ากันทุกสูตรตลอดการทดลองคือเท่ากับ 5300 เซนติพอยท์ จากนั้นทำการหาค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และค่าความเป็นกรด-เบสจะต้องควบคุมให้เท่ากันทุกสูตรตลอดการทดลอง คือเท่ากับ 12-14 แล้วจึงค่อยเทคอนกรีตสดลงแบบขนาด 512 ลบ.ซม. ที่ทาทัลคัมไว้เพื่อให้แกะออกจากแบบได้ง่าย จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศในคอนกรีตสดออกให้หมดโดยการนำแท่งเหล็กมากระทุ้ง จากนั้นตั้งคอนกรีตสดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำแบบที่เทคอนกรีตสดลงไปแล้วไปทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ด้วยการอบไอน้ำเป็นเวลา 90 นาที เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชันภายในคอนกรีตสดจะมีสารประกอบ จำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดมากขึ้นกว่าการไม่ให้ความร้อน ซึ่งสารประกอบนี้จะสามารถทำปฏิกิริยากับผงอลูมิเนียมภายใต้สภาวะที่มีความเป็นกรด-เบสประมาณ 12-14 ให้ก๊าซไฮโดรเจนออกมา ซึ่งก๊าซนี้สามารถทำให้ก้อนคอนกรีตเกิดรูพรุนมากขึ้นได้ จากนั้นนำก้อนคอนกรีตมาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำคอนกรีตที่ได้มาแกะออกจากแบบแล้วไปทำการบ่มภายใต้ความชื้นสูง (ทำโดยนำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปไว้ในกระสอบที่ชุบน้ำไว้) เป็นเวลา 3 วัน เพื่อพัฒนากำลังอัดของก้อนคอนกรีตให้สูงขึ้น จากนั้นนำก้อนคอนกรีตภายหลังจากทำการบ่มแล้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวการการทดลองข้างต้นแต่เปลี่ยนเวลาของการตั้งคอนกรีตสดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 4 6 และ 8 ชั่วโมงตามลำดับ จากนั้นนำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้นเพื่อรอทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงกด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ตามปริมาณที่กำหนดลงในถังผสม
ชั่งทรายละเอียด เถ้าลอย ตามปริมาณที่กำหนดลงในถังผสม
ชั่งผงอลูมิเนียมตามปริมาณที่กำหนดลงในถังผสม

↓

กวนของผสมให้เข้ากัน

↓

ค่อย ๆ เทน้ำลงไปเรื่อย ๆ แล้วกวนของผสมตลอดเวลาจนเข้ากันได้ดี

↓

ทำการทดสอบการยุบตัวพร้อมทั้งหาความหนืด และหาค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

↓

เทคอนกรีตสดลงแบบเหล็กขนาด 512 ลบ.ซม. ที่ทาทัลคัมไว้

↓

ตั้งคอนกรีตสดที่ได้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 3 4 6 และ 8 ชั่วโมง

↓

ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ° C ด้วยการอบไอน้ำเป็นเวลา 90 นาที

↓

นำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 ° C เป็นเวลา 1 วัน

↓

แกะคอนกรีตออกจากแบบ แล้วนำไปบ่มภายใต้ความชื้นสูงเป็นเวลา 3 วัน

↓

นำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 ° C เป็นเวลา 1 วัน

↓

ทำการทดสอบหาความหนาแน่นแบบบัลค์ และค่าความแข็งแรงกด

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตโดยควบคุมเวลาในการเซตตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.) ผลของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่น

ในการทดลองนี้จะทำการคัดเลือกคอนกรีตสูตรที่มีความหนาแน่นต่ำ และเวลาที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ก้อนคอนกรีตเกิดการกระจายตัวของรูพรุนที่ดี ซึ่งการกระจายตัวของรูพรุนที่ดีสังเกตได้จากความหนาแน่นที่ลดลงในแต่ละสูตรและลักษณะทางกายภาพของก้อนคอนกรีตบางประการ เช่น มีรูพรุนที่สม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน ซึ่งในแต่ละสูตรมีการให้เวลาคอนกรีตสดเซตตัวที่อุณหภูมิห้องก่อนการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C ที่เวลาต่าง ๆ กัน และมีการควบคุมปริมาณของผงอลูมิเนียมให้เท่ากัน ดังนั้นความหนาแน่นที่ลดลงก็จะหมายถึง คอนกรีตมีการกระจายตัวของรูพรุนที่ดีนั่นเอง

เมื่อทำการเลือกสูตรคอนกรีตแล้ว ก็จะนำสูตรนี้มาทำการปรับปรุงทางด้านความหนาแน่นให้มีค่าลดลง โดยการเติมผงอลูมิเนียมลงไปที่ปริมาณต่าง ๆ กัน เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซ ที่ได้จาการเกิดปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์กับผงอลูมิเนียมซึ่งปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจะมากขึ้นเป็นไปตามสัดส่วนโมลของผงอลูมิเนียมที่เข้าทำปฏิกิริยาพอดีกันกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในคอนกรีตสด และเมื่อเกิดก๊าซได้มากขึ้น คอนกรีตก็สามารถเก็บก๊าซที่เกิดขึ้นได้ก็จะมีผลทำให้ความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลดต่ำลงได้

- ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียม

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ทราย และเถ้าลอย ตามสูตร C3S1F6A1 0.05 (S) ในอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.5 แต่เปลี่ยนแปลงของผงอลูมิเนียมลงไปตามอัตราส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.6 แล้วจึงทำการผสมวัตถุดิบที่เป็นของแข็งให้เข้ากัน จากนั้นเติมน้ำลงไปอย่างช้า ๆ พร้อมกวนให้ส่วนผสมเข้ากันได้ดีจนเป็นคอนกรีตสดที่มีลักษณะเหลวข้น จากนั้นนำคอนกรีตสดไปทำการทดสอบหาความหนืดที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตคือเท่ากับ 5300 เซนติพอยท์ จากนั้นทำการหาค่าความเป็นกรด-เบส (pH) และค่าความเป็นกรด-เบสจะต้องควบคุมให้เท่ากันทุกสูตรตลอดการทดลอง คือเท่ากับ 12-14 แล้วจึงค่อยเทคอนกรีตสดลงแบบขนาด 512 ลบ.ซม. ที่ทาทัลคัมไว้เพื่อให้แกะออกจากแบบได้ง่าย จากนั้นทำการไล่ฟองอากาศในคอนกรีตสดออกให้หมดโดยการนำแท่งเหล็กมากระทุ้ง จากนั้นตั้งคอนกรีตสดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่เวลาต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.8 แล้วจึงนำแบบที่เทคอนกรีตสดลงไปแล้วไปทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ด้วยการอบไอน้ำเป็นเวลา 90 นาที เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันภายในคอนกรีตสดจะมีสารประกอบจำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดมากขึ้นกว่าการไม่ให้ความร้อน ซึ่งสารประกอบนี้จะสามารถทำปฏิกิริยากับผงอลูมิเนียมภายใต้สภาวะที่มีความเป็นกรด-เบสประมาณ 12-14 ให้ก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรเจนออกมา ซึ่งก๊าซนี้สามารถทำให้ก้อนคอนกรีตเกิดรูพรุนมากขึ้นได้ จากนั้นนำก้อนคอนกรีตมาอบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำคอนกรีตที่ได้มาแกะออกจากแบบแล้วไปทำการบ่มภายใต้ความชื้นสูง (ทำโดยนำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปไว้ในกระสอบที่ชุบน้ำไว้) เป็นเวลา 3 วัน เพื่อพัฒนากำลังอัดของก้อนคอนกรีตให้สูงขึ้น จากนั้นนำก้อนคอนกรีตภายหลังจากทำการบ่มแล้วไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปเก็บไว้ในโถดูดความชื้น เพื่อรอทำการทดสอบสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนาแน่น ความแข็งแรงกด

ตารางที่ 3.6 ปริมาณของผงอลูมิเนียมและเวลาที่ใช้ในการตั้งคอนกรีตสดทิ้งไว้

ครั้งที่	สูตรที่	ปริมาณผงอลูมิเนียม (กรัม)	เวลาในการตั้งคอนกรีตสดทิ้งไว้ (ชั่วโมง)
1	C3S1F6A10.1(S)	0.9	3
2	C3S1F6A10.2(S)	1.8	3
3	C3S1F6A10.1(S)	0.9	4
4	C3S1F6A10.2(S)	1.8	4
5	C3S1F6A10.5(S)	4.5	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั่งปูนซีเมนต์ขาว ตามปริมาณที่กำหนดลงในถังผสม
ชั่งทรายละเอียด เถ้าลอย ตามปริมาณที่กำหนดลงในถังผสม
ชั่งผงอลูมิเนียมตามปริมาณที่กำหนดลงในถังผสม
↓
กวนของผสมให้เข้ากัน
↓
ค่อย ๆ เทน้ำลงไปเรื่อย ๆ แล้วกวนของผสมตลอดเวลาจนเข้ากันได้ดี
↓
ทำการทดสอบการยุบตัวพร้อมทั้งหาความหนืด และหาค่าความเป็นกรด-เบส (pH)
↓
เทคอนกรีตสดลงแบบเหล็กขนาด 512 ลบ.ซม. ที่ทาทัลคัมไว้
↓
ตั้งคอนกรีตสดที่ได้ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาดังแสดงในตารางที่ 3.6
↓
ทำการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 ° C ด้วยการอบไอน้ำเป็นเวลา 90 นาที
↓
นำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 ° C เป็นเวลา 1 วัน
↓
แกะคอนกรีตออกจากแบบ แล้วนำไปบ่มภายใต้ความชื้นสูงเป็นเวลา 3 วัน
↓
นำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 100 ° C เป็นเวลา 1 วัน
↓
ทำการทดสอบหาความหนาแน่นแบบบัลค์ และค่าความแข็งแรงกด

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเติมผงอลูมิเนียมและควบคุมเวลาในการเซตตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7. การหาความหนาแน่นแบบบัลค์ (Bulk Density)

นำก้อนคอนกรีตที่ได้หลังจากผ่านการบ่มแล้วมาอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 วัน จากนั้นนำมาชั่งหาน้ำหนักที่แน่นอนด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง แล้วนำก้อนคอนกรีตที่อบแล้วมาหุ้มด้วยฟิล์มยืดให้สนิทจากนั้นจึงนำก้อนคอนกรีตที่ได้ไปแทนที่น้ำ ผลการทดลองที่ได้นำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$D_{(Bulk)} = M / V$$

เมื่อ $D_{(Bulk)}$ = ความหนาแน่นแบบบัลค์

M = มวลรวมของแท่งคอนกรีต

V = ปริมาตรของก้อนคอนกรีตมวลรวม รวมรูพรุนที่ได้จากการแทนที่น้ำ

3.4.8. การหาค่าความแข็งแรงกด (Compressive Strength)

นำก้อนคอนกรีตที่ผ่านการบ่มแล้วเข้าไปอบที่ตู้อบอุณหภูมิ 100 °C นาน 1 วัน แล้วนำก้อนคอนกรีตที่ได้จากการอบ แล้วมาทดสอบค่าความแข็งแรงกดโดยใช้เครื่องกดอัด ขนาด 1000 kN ที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ แล้วทำการบันทึกแรงที่เครื่องกระทำต่อก้อนคอนกรีตเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความแข็งแรงกด

เมื่อ

แรงที่ใช้กดก้อนคอนกรีต (kN) × 101.94 = น้ำหนักที่กระทำต่อก้อนคอนกรีต (กิโลกรัม)

และ

$$\frac{\text{น้ำหนักที่กระทำต่อก้อนคอนกรีต (กก.)}}{\text{พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงมากระทำ (ตร.ซม)}} = \text{ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม.)}$$

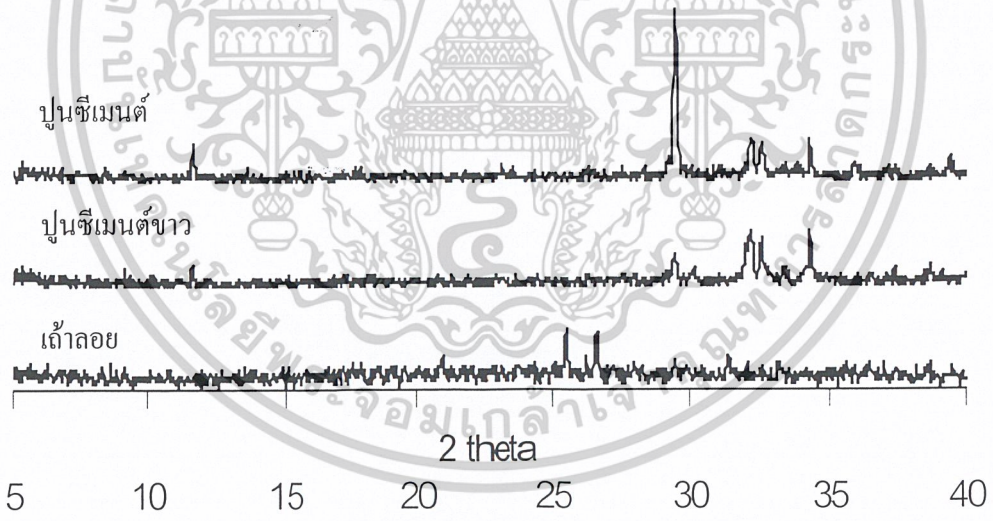
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของวัตถุดิบที่ใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ XRF

วัตถุดิบ	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	P_2O_5	BaO
ปูนซีเมนต์ขาว	-	0.59	3.35	17.04	6.36	-	72.40	-	0.21	-	-
ปูนซีเมนต์	-	0.61	2.69	11.05	4.27	0.53	78.07	0.20	2.33	0.22	-
เถ้าลอย	1.14	1.95	24.89	43.15	4.77	3.14	11.84	0.50	8.27	0.20	0.11



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ชนิดของผลึกโดยเทคนิค XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิก XRF พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ขาวได้แก่ CaO และ SiO_2 ตามลำดับซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของปูนซีเมนต์โดยทั่วไป หากพิจารณาแพทเทริน์ XRD ของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด พบว่าปูนซีเมนต์และปูนซีเมนต์ขาวมีลักษณะแพทเทริน์คล้ายคลึงกัน คือมีพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.3 32.173 33.929 และ 34.125 องศา ซึ่งพีกดังกล่าวเป็นพีกของไตรแคลเซียมซิลิเกต ที่เป็นวัฏภาคองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปของปูนซีเมนต์ซึ่ง ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี อย่างไรก็ตามพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.3 องศาของปูนซีเมนต์มีค่าความเข้มสูงกว่าพีกที่ตำแหน่งเดียวกันของปูนซีเมนต์ขาว ผลดังกล่าวน่าจะเนื่องมาจากมีวัฏภาคที่เป็นผลึกของสารประกอบแคลเซียมประเภทอื่น เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (พีกหลักปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 29.4 องศา) ซ้อนทับกับพีกของไตรแคลเซียมซิลิเกต ทั้งนี้ผลดังกล่าวไม่พบในปูนซีเมนต์ขาวเนื่องมาจากปริมาณแคลเซียมในปูนซีเมนต์ขาวมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ นอกจากนี้สีของปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกัน คือ ปูนซีเมนต์จะมีสีเทาคล้ำกว่าปูนซีเมนต์ขาว ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปริมาณของ Fe_2O_3 ในปูนซีเมนต์มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ขาว ซึ่ง Fe_2O_3 มีอนุภาคสีน้ำตาลดำจึงเป็นส่วนที่ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเข้มขึ้น

ส่วนในเถ้าลอยซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างจากปูนซีเมนต์ทั้งสองชนิด คือ มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ SiO_2 Al_2O_3 และ CaO ตามลำดับ แพทเทริน์ XRD ของเถ้าลอย แสดงพีกที่ตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 25.4 องศา ซึ่งเป็นพีกของ SiO_2 ประเภทควอทซ์ และที่ 26.65 องศา เป็นพีกของ $Al_2Si_2O_{10}$(Mullite)

4.2 การศึกษาค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตตัวอย่างก่อนการปรับปรุง

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

สูตร	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ทราย (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม.)
C1	-	300	600	2.04	190
C2	300	-	600	1.94	190

<u>หมายเหตุ</u>

ในการเติมน้ำจะนำไปวัดความหนืดได้ 5300 เซนติพอยท์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 12-14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่เตรียมจากปูนซีเมนต์ขาวและปูนซีเมนต์มีความหนาแน่นที่ใกล้เคียงกัน มีผลทำให้มีค่าความแข็งแรงกดที่เท่ากัน

แต่ก้อนคอนกรีตที่ได้มีสีต่างกันโดยก้อนคอนกรีตจากปูนซีเมนต์มีสีคล้ำกว่าปูนซีเมนต์ขาว ดังนั้นจึงเลือกใช้ปูนซีเมนต์ขาวมาเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาในตอนต่อไป

4.3 การศึกษาค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตตัวอย่างหลังการปรับปรุง

ตารางที่ 4.3 ผลของเถ้าลอยที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา

สูตร	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ทราย (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม.)
C1S2	300	-	600	1.96	200
C1S4F1	150	150	600	1.70	170

หมายเหตุ

C = ปูนซีเมนต์ขาว S = ทราย F = เถ้าลอย ตัวเลข = อัตราส่วนโดยน้ำหนัก

ในการเติมน้ำจะนำไปวัดความหนืดได้ 5300 เซนติพอยท์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 12-14

จากผลการทดลอง เมื่อพิจารณาการใช้เถ้าลอยแทนที่การใช้ปูนซีเมนต์ขาวในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบา โดยเทียบจากสูตร C1S2 กับ C1S4F1 พบว่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ขาวในบางส่วน ทำให้ก้อนคอนกรีตที่ได้มีน้ำหนักลดลง เนื่องจากเถ้าลอยเป็นวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ขาว ส่งผลให้มีค่าความหนาแน่นลดลง และค่าความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นองค์ประกอบก็มีค่าลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลของทรายที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา

สูตร	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ทราย (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม.)
C1F2	300	600	-	1.20	130
C3S1F6	300	600	100	1.25	120
C2S3F4	300	600	450	1.34	110

หมายเหตุ

C = ปูนซีเมนต์ขาว S = ทราย F = เถ้าลอย ตัวเลข = อัตราส่วนโดยน้ำหนัก

ในการเติมน้ำจะนำไปวัดความหนืดได้ 5300 เซนติพอยท์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 12-14

เนื่องจากทรายถือเป็นวัตถุดิบที่มีน้ำหนักที่มากกว่าของวัตถุดิบชนิดอื่นทั้งหมดที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีต เมื่อมีปริมาณของทรายในก้อนคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ก้อนคอนกรีตที่ได้มีน้ำหนักและความหนาแน่นมาก ดังตัวอย่าง เช่น สูตร C1F2 ซึ่งไม่มีทรายผสมอยู่เลย และสูตร C2S3F4 มีปริมาณทรายที่ผสมอยู่ถึง 450 กรัม พบว่าสูตรที่มีทรายผสมอยู่มากกว่ามีค่าความหนาแน่นที่มากกว่า

ส่วนค่าความแข็งแรงกดพบว่าสูตร C1F2 มีค่ามากที่สุดอันเนื่องมาจากเถ้าลอยมีอนุภาคขนาดที่เล็ก มีส่วนทำให้การอัดตัวของส่วนผสมในก้อนคอนกรีตค่อนข้างแน่น ก้อนคอนกรีตจึงมีช่องว่างน้อยส่งผลทำให้ก้อนคอนกรีตที่ได้มีค่าความแข็งแรงกดมาก นอกจากนี้ทรายซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีส่วนทำให้คอนกรีตสดมีความหนืดสูงขึ้น จึงต้องใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเพื่อปรับความหนืดของคอนกรีตสดทุกสูตรให้มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้น้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ขาวเพิ่มขึ้น เมื่อคอนกรีตเซตตัวแข็งน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาระเหยออกไปจากก้อนคอนกรีตทิ้งให้เกิดเป็นรูพรุนขึ้นภายในก้อนคอนกรีตเป็นเหตุให้มีค่าความแข็งแรงกดลดลง ดังนั้นเมื่อมีปริมาณทรายมากขึ้นจึงต้องใช้น้ำมากขึ้นทำให้เหลือปริมาณรูพรุนภายหลังการเซตตัวมากขึ้น จึงทำให้ค่าความแข็งแรงกดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลของผงอลูมิเนียมที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา

สูตร	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ทราย (กรัม)	ผงอลูมิเนียม (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มล.)	ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม.)
C1F2Al 0.05	300	600	-	0.45	1.17	120
C3S1F6Al 0.05	300	600	100	0.45	1.20	110
C2S3F6Al 0.05	300	600	450	0.45	1.30	100

หมายเหตุ

C = ปูนซีเมนต์ขาว S = ทราย F = เถ้าลอย Al = ผงอลูมิเนียม ตัวเลข = อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เลขทศนิยม = ร้อยละโดยน้ำหนักของผลรวมของปูนซีเมนต์ขาวและเถ้าลอย

ในการเติมน้ำจะนำไปวัดความหนืดได้ 5300 เซนติพอยท์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 12-14

จากผลการทดลองเมื่อทำการเติมผงอลูมิเนียมลงไปค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตที่ได้มีค่าลดลง อันเนื่องมาจากผงอลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียม-ไฮดรอกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับน้ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเมื่อเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นภายในก้อนคอนกรีต มีผลทำให้ก้อนคอนกรีตมีการขยายตัว และมีปริมาตรเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลดต่ำลง ส่วนค่าความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีตที่เติมผงอลูมิเนียมมีค่าต่ำกว่าก้อนคอนกรีตที่ไม่เติมผงอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลของการอบไอน้ำที่มีต่อก้อนคอนกรีตมวลเบา

สูตร	ปูนซีเมนต์ขาว (กรัม)	เถ้าลอย (กรัม)	ทราย (กรัม)	ผงอลูมิเนียม (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มล.)	ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม.)
C1F2Al 0.05 (S)	300	600	-	0.45	1.02	80
C3S1F6Al 0.05 (S)	300	600	100	0.45	1.13	90
C2S3F6Al 0.05 (S)	300	600	450	0.45	1.20	100

หมายเหตุ

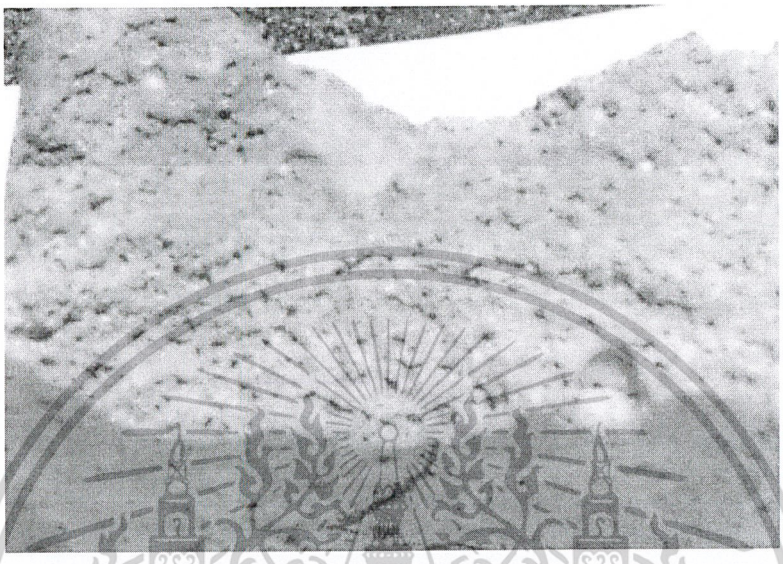
C = ปูนซีเมนต์ขาว S = ทราย F = เถ้าลอย Al = ผงอลูมิเนียม ตัวเลข = อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เลขทศนิยม = ร้อยละโดยน้ำหนักของผลรวมของปูนซีเมนต์ขาวและเถ้าลอย (S) = ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 °C

ในการเติมน้ำจะนำไปวัดความหนืดได้ 5300 เซนติพอยท์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 12-14

จากผลการทดลอง พบว่าพลังงานความร้อนจากการอบไอน้ำทำให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้น มีผลทำให้ก้อนคอนกรีตมวลเบาที่ได้เกิดการขยายตัวและมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นลดต่ำลงและทำให้ค่าความแข็งแรงกดลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้หากพิจารณาถึงเวลาในการเซตตัวของก้อนคอนกรีตมวลเบา ซึ่งจะมีผลต่อการกระจายตัวของก๊าซไฮโดรเจนในก้อนคอนกรีต พบว่าเวลาในการเซตตัวของก้อนคอนกรีตไม่สัมพันธ์กับอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ส่งผลทำให้ก๊าซไฮโดรเจนเกิดการระเหยหลุดออกจากก้อนคอนกรีตได้ง่ายก่อนที่ก้อนคอนกรีตจะเซตตัวแข็ง มีผลทำให้การกระจายตัวของรูพรุนในก้อนคอนกรีตที่ได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะทางกายภาพภายนอกของก้อนคอนกรีต สูตรที่ไม่มีทรายมีปริมาตรเพิ่มขึ้นได้ง่ายกว่าเพราะทรายมีน้ำหนักมากเมื่อก้อนคอนกรีตเกิดการขยายตัว ทรายตกลงสู่ด้านล่างของแม่แบบ เป็นผลให้ด้านล่างของก้อนคอนกรีตมีเนื้อแน่นมากกว่าด้านบน ดังนั้นความหนาแน่นของสูตรที่มีทรายน้อยและสูตรที่ไม่มีทรายตามลำดับ จากการสังเกตดังกล่าวจึงทำการคัดเลือกสูตรที่นำมาศึกษาผลของเวลาในการเซตตัวต่อค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดโดยเลือกสูตร C3S1F6Al0.05(S) มาทำการศึกษาและปรับปรุงเนื่องจากสูตร C1F2Al0.05(S) ไม่มีส่วนของทรายเป็นส่วนประกอบเมื่อขึ้นรูปแล้วผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีลักษณะที่ร่วนหลุดร่อนง่าย และสูตร C2S3F6A1 0.05 (S) มีปริมาณทรายมากจึงทำให้มีค่าความหนาแน่นที่สูงเกินไปจึงไม่นำทั้งสูตรนี้มาปรับปรุง



รูปที่ 4.2 ลักษณะของรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อผ่านการอบไอน้ำ

จากรูปจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตมีลักษณะเป็นเซลล์เปิดกระจายกันอยู่ทั่วภายในก้อนคอนกรีต ซึ่งรูพรุนมีลักษณะที่เป็นท่อต่อกันความยาวไม่สม่ำเสมอ และยังมีรูพรุนที่เป็นเซลล์ปิดอยู่บ้างอาจมีรูพรุนที่ไม่ได้เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนโดยเกิดจากการไหลตัวได้ไม่เต็มแม่แบบของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นมาเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลของสภาวะการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาต่อการกระจายตัวของรูพรุนและความหนาแน่น

ตารางที่ 4.7 ผลของระยะเวลาการเซตตัวของก้อนคอนกรีตมวลเบาสูตร C3S1F6Al0.05(S) ก่อนการอบไอน้ำ

สูตร	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม.)
C3S1F6Al0.05 (S) 2h	2	1.14	90
C3S1F6Al0.05 (S) 3h	3	1.10	80
C3S1F6Al0.05 (S) 4h	4	1.11	80
C3S1F6Al0.05 (S) 6h	6	1.20	100
C3S1F6Al0.05 (S) 8h	8	1.27	110

หมายเหตุ

C = ปูนซีเมนต์ขาว S = ทราย F = เถ้าลอย Al = ผงอลูมิเนียม ตัวเลข = อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เลขทศนิยม = ร้อยละโดยน้ำหนักของผลรวมของปูนซีเมนต์ขาวและเถ้าลอย (S) = ผ่านการอบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100°C 2h 3h 4h 6h 8h = เวลาที่ทิ้งไว้ก่อนการอบไอน้ำเป็นชั่วโมงตามตัวเลขข้างหน้า

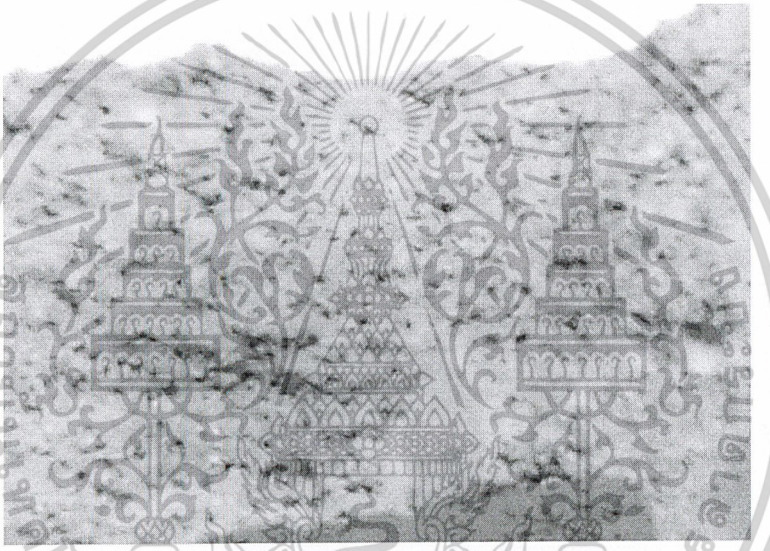
ปูนซีเมนต์ขาว = 300 กรัม ทราย = 100 กรัม เถ้าลอย = 600 กรัม ผงอลูมิเนียม = 0.45 กรัม

ในการเติมน้ำจะนำไปวัดความหนืดได้ 5300 เซนติพอยท์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 12-14

จากผลการทดลอง เมื่อตั้งก้อนคอนกรีตทิ้งไว้ให้เกิดการเซตตัวก่อนทำการอบไอน้ำประมาณ 2 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาในการเซตตัวของก้อนคอนกรีตยังน้อยเกินไป เนื้อปูนซีเมนต์ขาวและทรายยังเกิดการเคลื่อนตัวลงมาแทนที่ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในส่วนด้านล่างของแม่แบบ และก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดการระเหยออกจากก้อนคอนกรีตไปได้มาก จึงทำให้ได้รูพรุนภายในก้อนคอนกรีตไม่มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการตั้งทิ้งไว้ให้ก้อนคอนกรีตเซตตัวที่ 6 และ 8 ชั่วโมง ก่อนการอบไอน้ำพบว่า ทำให้ก้อนคอนกรีตที่ได้เกิดการเซตตัวแข็งมากเกินไป มีผลทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นภายในก้อนคอนกรีตไม่สามารถดันให้ปริมาตรของก้อนคอนกรีตขยายตัวได้ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมวลเบาเพิ่มสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นจากสูตร C3S1F6Al 0.05 (S) ในตารางที่ 4.6 (ไม่มีเวลาการตั้งทิ้งไว้ให้เซตตัวของก้อนคอนกรีต) ดังนั้นจากผลการทดลองจึงทำการเลือกสูตรที่มีการตั้งก้อนคอนกรีตทิ้งไว้ให้เซตตัว ที่ 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องมาจากก้อนคอนกรีตทั้งสองมีค่าความหนาแน่นที่ลดลงเมื่อเทียบกับสูตร C3S1F6Al 0.05 (S) ในตารางที่ 4.6 (ไม่มีเวลาการตั้งทิ้งไว้ให้เซตตัวของก้อนคอนกรีต) และยังมีค่าความแข็งแรงกดที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ภาคผนวก ตารางที่ ง-1)



รูปที่ 4.3 ลักษณะรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อทำการทิ้งเวลาการเซตตัว 4 ชั่วโมง

จากรูปรูพรุนมีลักษณะที่ต่อเนื่อง และมีการกระจายตัวทั่วทั้งก้อนคอนกรีตและอาจมีรูพรุนที่ไม่ได้เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนโดยเกิดจากการไหลตัวได้ไม่เต็มแม่แบบของปูนซีเมนต์เกิดขึ้นเล็กน้อย แต่ไม่ค่อยเห็นความแตกต่างมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนคอนกรีตที่ไม่ผ่านการบ่มให้เซตตัวก่อนการอบไอน้ำ (รูปที่ 4.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การเพิ่มปริมาณของผงอลูมิเนียมที่มีต่อสมบัติของก้อนคอนกรีตมวลเบา

ตารางที่ 4.8 ผลของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมวลเบาสูตร C3S1F6(S)3h และ C3S1F6(S)4h

สูตร	ระยะเวลา (ชม.)	ผงอลูมิเนียม (กรัม)	ความหนาแน่น (กรัม / มิลลิลิตร)	ค่าความแข็งแรงกด (กก. / ตร.ซม)
C3S1F6Al 0.1 (S) 3h	3	0.9	1.16	80
C3S1F6Al 0.2 (S) 3h	3	1.8	1.13	80
C3S1F6Al 0.1 (S) 4h	4	0.9	1.08	80
C3S1F6Al 0.2 (S) 4h	4	1.8	1.04	80
C3S1F6Al 0.5 (S) 4h	4	4.5	0.99	70

หมายเหตุ

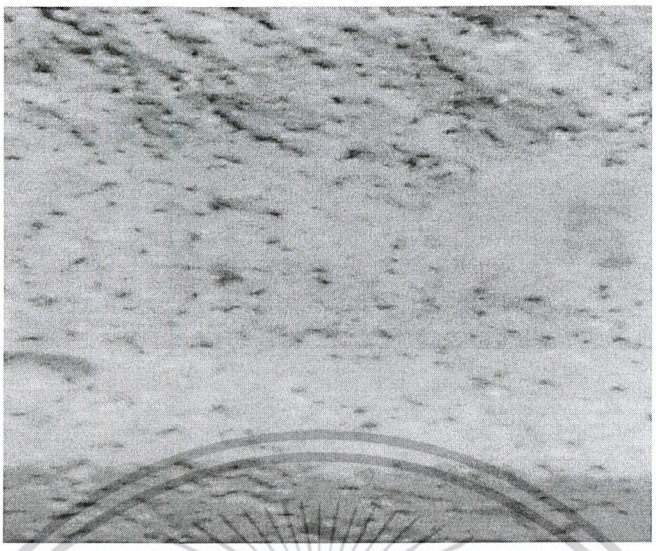
C = ปูนซีเมนต์ขาว S = ทราย F = เถ้าลอย Al = ผงอลูมิเนียม ตัวเลข = อัตราส่วนโดยน้ำหนัก เลขทศนิยม = ร้อยละโดยน้ำหนักของผลรวมของปูนซีเมนต์ขาวและเถ้าลอย (S) = ผ่านการอบไอน้ำ 2h 3h 4h 6h 8h = เวลาที่ทิ้งไว้ก่อนการอบไอน้ำเป็นชั่วโมงตามตัวเลขข้างหน้า

ปูนซีเมนต์ขาว = 300 กรัม ทราย = 100 กรัม เถ้าลอย = 600 กรัม ผงอลูมิเนียม = 0.45 กรัม

ในการเติมน้ำจะนำไปวัดความหนืดได้ 5300 เซนติพอยท์ ที่ค่าความเป็นกรด-เบส ประมาณ 12-14

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อมีการเพิ่มผงอลูมิเนียมลงไปในก้อนคอนกรีตทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากขึ้น มีผลทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้ก้อนคอนกรีตที่ได้เกิดการขยายตัวจนมีปริมาตรเพิ่มขึ้นและทำให้ได้ก้อนคอนกรีตที่มีค่าความหนาแน่นที่ต่ำลงได้ จากสูตร C3S1F6Al0.1(S) และ C3S1F6Al0.2(S) ที่ 3และ 4 ชั่วโมงเป็นการเพิ่มผงอลูมิเนียมในปริมาณเพียงเล็กน้อย จึงทำให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดของก้อนคอนกรีตไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมที่มากขึ้นตามสูตร C3S1F6Al0.5(S)4h เห็นได้ว่าผงอลูมิเนียมเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้นจนเป็นผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดลดลง

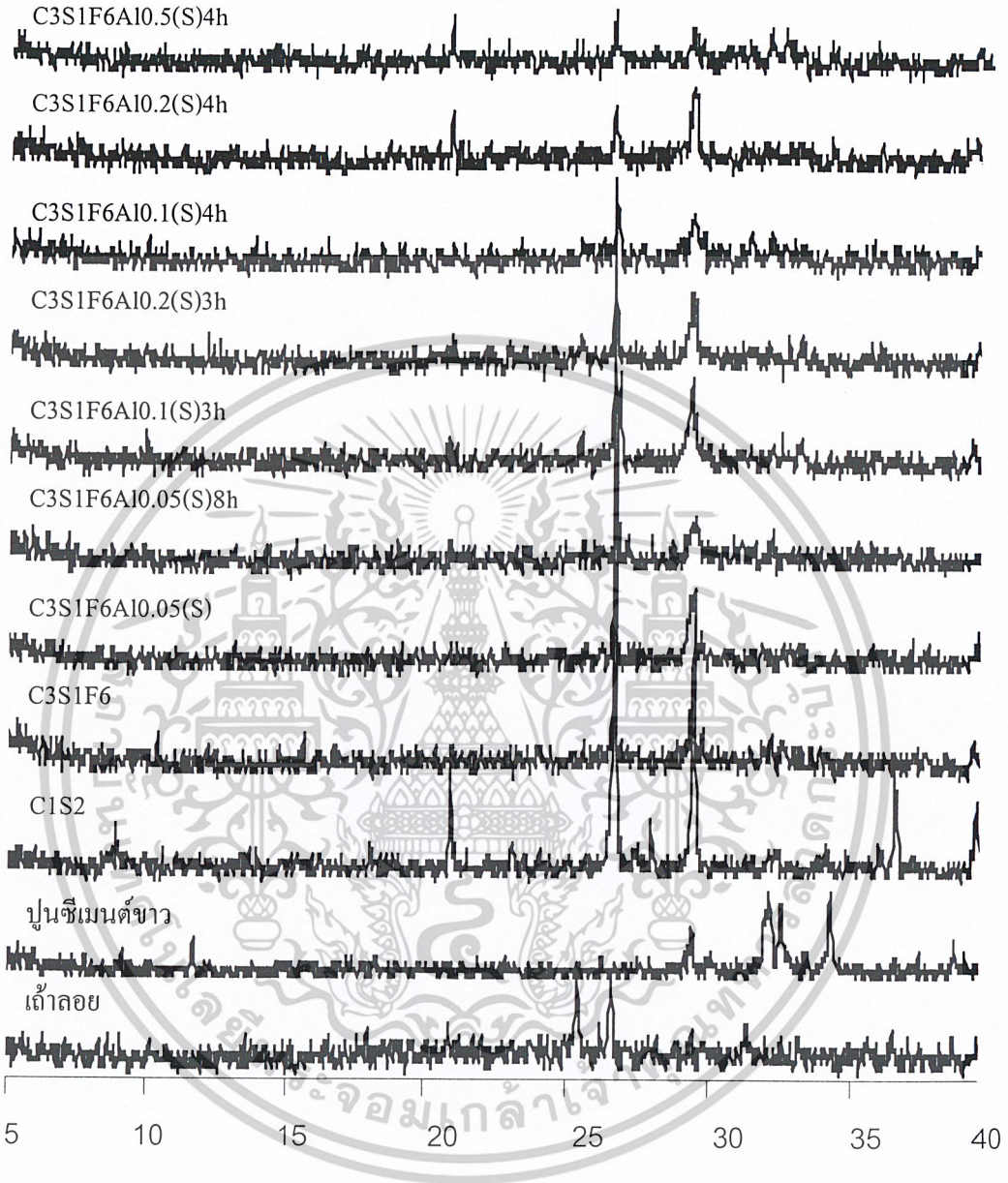
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ลักษณะรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเมื่อเพิ่มปริมาณผงอลูมิเนียมที่เวลาเซตตัวที่ 4 ชั่วโมง จากรูปลักษณะของรูพรุน

จากรูปรูพรุนมีลักษณะต่อเนื่องกระจายอยู่ทั่วก้อนคอนกรีตมีทั้งแบบที่เป็นเซลล์เปิดและเซลล์ปิดซึ่งแบบที่เป็นเซลล์ปิดอาจจะมีอยู่เล็กน้อยและอาจมีรูพรุนที่ไม่ได้เกิดจากก๊าซไฮโดรเจนโดยเกิดจากการไหลตัวได้ไม่เต็มแม่แบบของปูนซีเมนต์เกิดขึ้น ไม่ค่อยเห็นความแตกต่างมากนักเมื่อเปรียบเทียบกับก้อนคอนกรีตที่ไม่ผ่านการบ่มให้เซตตัวก่อนการอบไอน้ำ (รูปที่ 4.2) และก้อนคอนกรีตเมื่อทำการทิ้งเวลาการเซตตัว 4 ชั่วโมง (รูปที่ 4.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟการวิเคราะห์ชนิดของผลึกของก้อนคอนกรีตมวลเบาโดยเครื่องมือวิเคราะห์ XRD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าก้อนคอนกรีตตัวอย่าง มีพีกที่ตำแหน่ง 2θ คือ 21.035 27.233 29.063 32.173 และ 33.929 องศา ซึ่งเป็นพีกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่ง เห็นพีกของก้อนคอนกรีตสูตรที่ไม่มีเถ้าลอย สูงและเด่นชัดกว่าก้อนคอนกรีตที่มีเถ้าลอยผสมอยู่เนื่องมาจาก ความเป็นผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตในกรณีที่มีเถ้าลอย ต่ำกว่าในกรณีที่ไม่มีเถ้าลอยเนื่องจากปริมาณเถ้าลอย ไปบดบังการเกิดปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับน้ำจึงทำให้เกิดผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงพีกที่วิเคราะห์ได้จึงมีฐานที่กว้างขึ้นและต่ำลงเห็นพีกได้ยากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบา

ความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสมจะมีค่าความหนาแน่นที่ลดต่ำลง เพราะอนุภาคของเถ้าลอยมีความหนาแน่นที่น้อยกว่าอนุภาคของวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ที่ผสมอยู่ในก้อนคอนกรีต ดั้งนั้นหากใช้ปริมาณของเถ้าลอยเป็นส่วนผสมในปริมาณมาก ก็จะสามารถลดค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลงได้ จากสูตร C1S2 และ C1S4F1 เห็นแนวโน้มได้ว่าสูตร C1S2 ที่ไม่มีปริมาณของเถ้าลอยผสมอยู่เลย เมื่อทำการเติมเถ้าลอยแทนที่ในส่วนของปูนซีเมนต์คือสูตร C1S4F1 ผลของเถ้าลอยทำให้ความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดลดลง

ความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณทรายเป็นส่วนผสม เพราะอนุภาคของทรายมีค่าความหนาแน่นที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่น ๆ จากสูตร C1F2 C3S1F6 และ C2S3F4 พบว่ามีปริมาณทรายผสมอยู่เป็น 0 100 450 กรัม ตามลำดับ พบว่าในสูตรที่ไม่มีทราย (C1F2) มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่ดีเกิดการหลุดร่อนของผิวภายนอกได้ง่ายจึงทำการเลือกสูตร C3S1F6 ที่มีทรายผสมอยู่ 100 กรัม ซึ่งมีลักษณะทางกายภาพที่ดีไม่หลุดร่อนและมีค่าความหนาแน่นที่ต่ำกว่าสูตร C2S3F4 มาทำการศึกษาและปรับปรุงต่อไป

5.2 ผลของผงอลูมิเนียมที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบา

ผงอลูมิเนียมจะเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับน้ำทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นภายในก้อนคอนกรีต ซึ่งส่งผลให้ก้อนคอนกรีตเกิดการขยายตัวและมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้น มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลดลง จากสูตร C3S1F6 และ C3S1F6Al0.05 พบว่า สูตร C3S1F6 ไม่มีผงอลูมิเนียมเป็นส่วนผสมอยู่เลยจึงทำให้มีการขยายตัวของก้อนคอนกรีตที่ต่ำกว่า สูตร C3S1F6Al0.05 ที่มีการเติมผงอลูมิเนียมซึ่งเป็นสารให้ฟองที่ดีจึงทำให้ก้อนคอนกรีตเกิดการขยายตัวมากขึ้นมีผลทำให้ค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลของพลังงานความร้อนจากการอบไอน้ำที่มีต่อความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตมวลเบา

พลังงานความร้อนจากการอบไอน้ำจะไปทำการเร่งอัตราการเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์ขาวกับน้ำ ทำให้เกิดสารประกอบจำพวกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปริมาณมาก มีผลทำให้ผงอลูมิเนียมเข้าทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเกิดก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้น ส่งผลให้ก้อนคอนกรีตเกิดการขยายตัว และมีปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตจึงลดต่ำลง จากสูตร C3S1F6Al0.05 และ C3S1F6Al0.05(S) จะเห็นได้ว่าสูตรที่ไม่มีการอบไอน้ำ (C3S1F6Al0.05) พบว่าการขยายตัวของก้อนคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าสูตรที่มีการอบไอน้ำ (C3S1F6Al0.05(S)) จากผลการทดลองค่าความหนาแน่นและค่าความแข็งแรงกดลดลงของสูตร C3S1F6Al0.05(S) จึงมีค่าต่ำกว่าสูตร C3S1F6Al0.05 ดังนั้นจึงเลือกสูตร C3S1F6Al0.05(S) มาทำการศึกษาและปรับปรุงต่อไป

5.4 ผลของสภาวะที่ใช้ในการเตรียมก้อนคอนกรีตมวลเบาต่อการกระจายตัวของรูพรุนและความหนาแน่น

5.4.1 ผลของระยะเวลาการเซตตัวของก้อนคอนกรีต

ก้อนคอนกรีตจะมีการกระจายตัวของรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากก้อนคอนกรีตไม่สามารถกักเก็บก๊าซไฮโดรเจน ที่มาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ภายในก้อนคอนกรีตได้

ดังนั้นจากการศึกษาและปรับปรุงพบว่าก้อนคอนกรีตจะใช้เวลาประมาณ 3 – 4 ชั่วโมง ในการเซตตัวแข็งเพื่อการกักเก็บฟองก๊าซที่ได้จากปฏิกิริยาข้างต้นไว้ภายในได้มากที่สุด และจะทำให้การกระจายตัวของรูพรุนภายในก้อนคอนกรีตเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

5.4.2 ผลของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่น

ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตที่ได้จะมีค่าลดต่ำลง เมื่อมีปริมาณของผงอลูมิเนียมที่เติมลงไปในก้อนคอนกรีตมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีการเติมผงอลูมิเนียมลงไปในก้อนคอนกรีต ผงอลูมิเนียมจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วให้ก๊าซไฮโดรเจนออกมามากขึ้น ส่งผลให้ก้อนคอนกรีตที่ได้เกิดการขยายตัวและมีปริมาตรเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความหนาแน่นของก้อนคอนกรีตลดต่ำลงจากากรทดลองเป็นการเติมผงอลูมิเนียมที่มากเกินพอแล้ว ซึ่งปัจจัยนี้ไม่ส่งผลให้เห็นถึงความแตกต่างของค่าความหนาแน่นมากนักแต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความหนาแน่นที่ลดลงนั้นเนื่องมาจาก ในสูตร C3S1F6Al0.05(S) เมื่อเติมผงอลูมิเนียมลงไปผงอลูมิเนียมอาจเกิดปฏิกิริยาได้ไม่ทั้งหมด และเมื่อเติมผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น คือสูตร C3S1F6Al0.5(S)4h จึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้เพิ่มขึ้นแต่เป็นการเติมผงอลูมิเนียมที่มากเกินพอแล้วซึ่งถ้าเติมผงอลูมิเนียมลงไปอีกไม่น่าจะส่งผลที่แตกต่างจากผลการทดลองของเดิมมากนัก

5.5 ข้อเสนอแนะ

5.5.1 ก้อนคอนกรีตมวลเบาที่มีเถ้าลอยเป็นวัตถุดิบผสมอยู่ จะมีการดูดซึมน้ำมาก ดังนั้นจึงควรแก้ไขการดูดซึมน้ำที่มากของก้อนคอนกรีตมวลเบา โดยการเคลือบพอลิ-เมอร์ไว้ที่ผิวของก้อนคอนกรีตมวลเบา

5.5.2 ก้อนคอนกรีตมวลเบาจะมีค่าความแข็งแรงกดที่ลดลง เมื่อมีค่าความหนาแน่นน้อย ๆ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงสมบัติของก้อนคอนกรีตให้มีค่าความแข็งแรงกดให้สูงขึ้นโดยการใช้วัตถุดิบที่ให้ความแข็งแรงกับก้อนคอนกรีตได้ดี แต่ยังทำให้ก้อนคอนกรีตมีค่าความหนาแน่นที่ไม่เปลี่ยนแปลง

5.5.3 ทำการปรับปรุงสมบัติของก้อนคอนกรีตทางด้านการเป็นฉนวนความร้อน โดยทำการเพิ่มขนาดของรูพรุนในก้อนคอนกรีตให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร. **Concrete Technology,** หน้า 1-257, **2536**

[2] Blaga A., and Beaudoin J.J. 2003. **CBD-241. Polymer Modifield Concrete.**

[3] Neopor System. **Lightweight Concrete Utilizing in excess of 25% of fly ash.**

[4] Fowler D.W. 1999. Polymer in concrete: a vision for the 21st century. **journal of the cement and concrete composite:**449-452

[5] Rossignolo J.A. and Agnesini M.V.C. 2002. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete. **Journal of the cement and concrete composite.**

[6] Yoshihiko O. 1997. Recent progress in concrete-polymer composite. **Journal of the review article:** 31-40

[7] Rossignolo J.A., Agnesini M.V.C. and Morais J.A. 2003. Properties of high – performance lwac for precast structures with brazilian aggregates. Cement and concrete composites. 25 1: 77-82

[8] Deborah D.L.chung. 2002. Composite get smart. Cement and concrete composites.24 1 : 923-932

[9] Gerharz B. 1999. Pavements on the base of polymer – modified drainage concrete . Physicochemical and engineering aspects. 152 1-2 : 205-209

[10] Miguel A.P. , Antomio A. and Alejanandrojosa . 1999. Fatigue behavior of polymer modified porous concretes, cement and concrete research. 29 7 : 1077 - 1083

[11] ชัยรัตน์ เสริมศรีสุวรรณ. โครงงานพิเศษ "การใช้พอลิเมอร์ในคอนกรีต" , หน้า 1-29 , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , 2537

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

รูปแบบการกระเจิงของรังสีเอกซ์ของสารต่าง ๆ จากฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee of Powder Diffraction Standard)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-1 PDF Data Base ของแคลเซียมซิลิเกต

Pattern : 16-407 ***Radiation*** = 1.540598 ***Quality*** : Indexed

$Ca_3 Si O_5$

Calcium Silicate

Lattice : Orthorhombic ***Mol. weight*** = 228.32

S.G. : C (9) ***Volume [CD]*** = 2242.23

a = 12.34200 ***Dx*** = 3.044

b = 7.14300

c = 25.43400

a/b = 1.72785 ***Z*** = 18

c/b = 3.56069

TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 950 C.
GENERAL COMMENTS : Stable form at 990 < T < 1050 C.
GENERAL COMMENTS : Pure synthetic material

CAS : 38882-71-2

*Bull. Soc. Fr. Mineral. Cristallogr., volume 87, page 241, (1964) primary reference
Regcurd

Radiation : CuKa1 ***Filter*** : Not specified

Lambda : 1.54050 ***d-sp*** : Guinier

SS/FOM : F30= 19(0.0087,178)

2th	I	h	k	l
14.752	12	2	0	1
15.927	6	1	1	2
22.607	12	1	1	5
24.921	8	0	2	0
27.081	4	0	2	3
29.063	95	2	2	1
29.160	60	4	0	1
29.757	35	4	0	2
31.635	95	0	0	9
32.173	100	2	2	4
32.220	55	4	0	4
32.803	6	3	1	6
33.929	100	2	2	5
38.185	25	2	2	7
38.235	16	4	0	7
38.714	6	5	1	1
39.205	6	4	2	2
40.701	70	3	1	9
41.167	20	5	1	4
42.612	2	0	0	12
45.258	12	3	3	3
45.330	6	6	0	3
46.184	18	2	2	10
46.209	12	5	1	7
49.127	6	3	3	6
49.184	10	6	0	6
51.100	35	0	4	0
51.192	60	6	2	0
55.187	2	5	0	9
55.441	25	2	4	4
55.477	4	5	3	4
55.550	16	7	1	4
55.918	2	4	2	11
60.265	12	4	4	2
60.415	10	3	1	13
61.435	25	6	2	9
61.481	25	7	1	8
61.753	6	1	3	13
62.728	12	4	4	5
62.917	6	6	0	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-2 PDF Data Base ของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

Pattern : 29-373 ***Radiation =*** 1.540598 ***Quality :*** Indi

$Ca_2 SiO_4 \cdot H_2O$

$1/_2 CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$

Calcium Silicate Hydrate

Lattice : Orthorhombic ***Mol. weight =*** 190.26

S.G. : P212121 (19) ***Volume [CD] =*** 928.08

a = 9.47600 ***Dx =*** 2.723

b = 9.19800

c = 10.64800

a/b = 1.03022 ***Z =*** 8

c/b = 1.15764

COLOR : Colorless
ADDITIONAL PATTERN : To replace 3-247, 3-248, 9-325 and 26-323.
SAMPLE PREPARATION : Prepared hydrothermally, from beta- Ca2 SiO4 treated for 40 days at 150 C.

*ICDD Grant-in-Aid, primary reference
Igram, L., Taylor, University of Aberdeen, Old Aberdeen, Scotland
*Acta Crystallogr., volume 5, page 724, (1952), unit cell data
Heller, L.

Radiation : CuKa1 ***Filter :*** Monochromator crystal

Lambda : 1.54056 ***d-sp :*** Guinier

SS/FOM : F30= 29(0.0151,59)

2th	I	h	k	l
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
34.640	35	2	3	0
35.487	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
39.061	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	0	2
47.124	20	4	1	3
47.575	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
49.516	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	5
66.602	4	4	4	4
68.029	4	6	2	3
68.653	2	3	5	4
69.115	8	6	0	4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 PDF Data Base ของควอทซ์

Pattern : 46-1045 *Radiation* = 1.540598 *Quality* : High

SiO_2

Quartz, syn / Silicon Oxide

Lattice : Hexagonal *Mol. weight* = 60.08

S.G. : P3221 (154) *Volume [CD]* = 113.01

a = 4.91344 *Dx* = 2.649

Dm = 2.660

c = 5.40524

Z = 3 *I/Icor* = 3.41

COLOR : White
TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 23(1) C
GENERAL COMMENTS : Low temperature quartz
GENERAL COMMENTS : 2theta determination based on profile fit method
OPTICAL DATA : B=1.544 G=1.553 Sign=+
ADDITIONAL PATTERN : To replace 33-1161

*ICDD Grant-in-Aid (1993) primary reference :
Kern, A., Eysel, W., Mineralogisch-Petrograph. Inst., Univ. Heidelberg, Germany
*Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume 3, page 24, (1954) optical data : Swanson, Fuyat
*Z. Kristallogr., volume 198, page 177, (1992)

2th	I	h	k	l
20.860	16	1	0	0
26.640	100	1	0	1
36.544	9	1	1	0
39.465	8	1	0	2
40.300	4	1	1	1
42.450	6	2	0	0
45.793	4	2	0	1
50.139	13	1	1	2
50.622	1	0	0	3
54.875	4	2	0	2
55.325	2	1	0	3
57.235	1	2	1	0
59.950	9	2	1	1
64.036	2	1	1	3
65.786	1	3	0	0
67.744	6	2	1	2
68.144	7	2	0	3
68.318	5	3	0	1
73.468	2	1	0	4
75.660	3	3	0	2
77.575	1	2	2	0
79.884	2	2	1	3
80.047	1	2	2	1
81.173	2	1	1	4
81.491	2	3	1	0
83.840	1	3	1	1
84.957	1	2	0	4
87.439	1	3	2	0
90.831	2	3	1	2
92.788	1	4	0	1
94.651	1	1	2	3
95.119	1	4	0	2
96.238	1	2	1	4
98.750	1	2	2	3
102.231	1	1	1	5
102.567	1	3	1	3
103.877	1	3	2	1
104.203	1	3	2	2
105.593	1	3	2	3
112.014	1	4	1	0
114.061	1	3	2	4
114.467	2	4	0	3
114.639	2	4	1	1
115.885	1	2	2	4
117.537	1	0	0	6
118.313	1	2	1	5
120.124	1	3	1	4
121.853	1	1	0	6
122.605	1	4	1	2
127.251	1	3	0	5
131.203	1	1	1	6
132.756	1	5	0	1
134.293	1	4	0	4
136.424	1	2	0	6
137.895	2	4	1	3
140.318	1	3	3	0
143.251	3	5	0	2
144.119	1	3	3	1

Radiation : CuKa1 *Filter* : Monochromator crystal

Lambda : 1.54060 *d-sp* : Diffractometer

SS/FOM : F30=539(0.0018,31) *Internal standard* : Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-4 PDF Data Base ของ Mullite

Pattern : 79-1275 ***Radiation*** = 1.540598 ***Quality*** Calculated

$Al_2(Al_{2.2}Si_{1.2})O_{9.6}$

Mullite / Aluminum Silicon Oxide

Lattice : Orthorhombic ***Mol. weight*** = 316.81

S.G. : Pbam (55) ***Volume [CD]*** = 166.56

a = 7.58800 ***Dx*** = 3.121

b = 7.68800

c = 2.88950

a/b = 0.98699 ***Z*** = 1 ***Vicor*** = 0.75

c/b = 0.37585

ICSD COLLECTION CODE: 066263
TEMPERATURE FACTOR: ATF

*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference

*Am. Mineral., volume 76, page 332 (1991)
Angel, R.J., McMullan, R.K., Prewitt, C.T.

Radiation : CuKa1 ***Filter*** : Not specified

Lambda : 1.54060 ***d-sp*** : Calculated spacings

2th	I	h	k	l
16.401	80	1	1	0
23.120	<1	0	2	0
23.429	1	2	0	0
25.963	57	1	2	0
26.171	100	2	1	0
30.922	20	0	0	1
33.150	45	2	2	0
35.197	49	1	1	1
36.995	15	1	3	0
37.399	2	3	1	0
39.157	23	2	0	1
40.805	57	1	2	1
40.945	34	2	1	1
42.536	22	2	3	0
42.761	5	3	2	0
45.964	1	2	2	1
47.254	1	0	4	0
47.915	6	4	0	0
48.842	1	1	4	0
48.963	1	1	3	1
49.286	10	3	1	1
49.447	5	4	1	0
50.669	1	3	3	0
53.394	6	2	4	0
53.507	4	2	3	1
53.697	9	3	2	1
53.849	15	4	2	0
57.548	16	0	4	1
58.123	6	4	0	1
58.935	1	1	4	1
59.469	1	4	1	1
60.550	43	3	3	1
60.691	23	4	3	0
61.402	1	1	5	0
62.312	1	5	1	0
62.988	2	2	4	1
63.399	11	4	2	1
64.440	21	0	0	2
65.443	4	2	5	0
66.146	7	5	2	0
66.998	2	1	1	2
69.444	3	0	2	2
*69.444	3	3	4	1
69.575	5	2	0	2
*69.575	5	4	4	0
70.409	13	1	5	2
70.699	6	1	2	2
70.798	7	2	1	2
71.185	4	5	1	1
71.787	2	3	5	0
72.300	2	5	3	0
73.903	2	0	6	0
74.123	13	2	5	1
74.413	8	2	3	2
74.795	13	5	2	1
75.048	2	6	0	0
76.235	7	6	1	0
76.695	4	1	3	2
76.945	3	3	1	2
78.063	2	4	4	1
78.770	<1	2	6	0
79.764	1	6	2	0
80.310	3	2	3	2
*80.310	3	4	5	0
80.591	2	5	4	0
80.683	3	5	3	1
82.238	<1	0	6	1
83.346	<1	6	0	1
83.673	<1	0	4	2
84.164	1	4	0	2
84.739	<1	3	6	0
84.860	<1	1	4	2
85.319	1	4	1	2
85.566	1	6	3	0
86.259	<1	3	3	2
86.984	2	2	6	1
87.962	1	6	2	1
88.409	2	2	4	2
88.775	5	4	2	2
*88.775	5	5	4	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-5 PDF Data Base ของแคลเซียมคาร์บอเนต

Pattern : 5-586 **Radiation =** 1.540598 **Quality :** High

$Ca C O_3$

Calcite, syn / Calcium Carbonate

Lattice : Rhombohedral *Mol. weight =* 100.09

S.G. : R-3c (167) *Volume [CD] =* 367.78

a = 4.98900 *Dx =* 2.711

Dm = 2.710

c = 17.06200

Z = 6 *I/Icor =* 2.00

OPTICAL DATA : A=1.487, B=1.659, Sign=-
COLOR : Colorless
SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample from Mallinckrodt Chemical Works
ANALYSIS : Spectroscopic analysis: <0.1% Sr, <0.01% Ba, <0.001% Al, B, Cs, Cu, K, Mg, Na, Si, Sn; <0.0001% Ag, Cr, Fe, Li, Mn
TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 26 C
GENERAL COMMENTS : Other form: aragonite
GENERAL COMMENTS : Pattern reviewed by Parks, J., McCarthy, G., North Dakota State Univ, Fargo, ND, USA. ICDD Grant-in-Aid (1992)
GENERAL COMMENTS : Agrees well with experimental and calculated patterns
GENERAL COMMENTS : Additional weak reflections [indicated by brackets] were observed.
ADDITIONAL PATTERN : See ICSD 16710, 20179, 28827, 18164, 18165 and 18166 (PDF 72-1214 and 72-1937)

*Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, volume 0, page 51, (1953) primary reference :
Swanson, Fuyat
*Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., volume 0, page 142, optical data :

Radiation : CuKa1 ***Filter :*** Beta

Lambda : 1.54050 ***d-sp :*** Not given

SS/FOM : F30= 57(0.0159, 33)

2th	I	h	k	l
23.022	12	0	1	2
29.406	100	1	0	4
31.418	3	0	0	6
35.966	14	1	1	0
39.402	18	1	1	3
43.146	18	2	0	2
47.124	5	0	2	4
47.490	17	0	1	8
48.513	17	1	1	6
56.555	4	2	1	1
57.402	8	1	2	2
58.075	2	1	0	10
60.678	5	2	1	4
60.987	4	2	0	8
61.345	3	1	1	9
63.060	2	1	2	5
64.578	5	3	0	0
65.599	3	0	0	12
69.231	1	2	1	7
70.238	2	0	2	10
72.870	2	1	3	8
73.729	1	3	0	6
76.300	1	2	2	0
77.177	2	1	1	12
80.933	1	3	1	2
81.547	3	2	1	10
82.113	1	0	1	14
83.767	3	1	3	4
84.788	1	2	2	6
86.483	1	1	2	11
93.072	1	2	0	14
94.701	3	4	0	4
95.011	4	3	1	8
96.165	2	1	0	16
97.647	1	2	1	13
99.161	2	3	0	12
102.242	1	0	2	16
102.952	1	2	3	2
103.899	1	1	3	10
104.124	3	4	2	14
105.846	2	3	2	4
106.145	4	0	4	8
107.330	1	0	2	16
109.561	2	4	1	0
110.483	2	3	2	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

รูปแบบการคายรังสีเอ็กซ์ของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

(X-ray Fluorescence Spectrophotometer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ข-1 ผลการทดลองที่ได้จากการทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ XRF (X-ray fluoressent)

สารตัวอย่าง	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	TiO_2	Fe_2O_3	P_2O_5
C1S1	0.538	0.477	4.57	57.5	1.52	2.860	30.8	0.197	1.43	-
C3F6S1	0.505	0.890	15.7	31.1	9.84	0.778	36.1	1.31	3.43	0.234
C3S1F6(S)	0.563	0.900	15.5	30.7	9.83	0.744	36.5	1.35	3.53	0.231
C3S1F6Al0.05(S)8h	1.590	0.907	15.3	31.6	9.44	0.751	35.3	1.27	3.28	0.233
C3S1F6Al0.1(S)3h	0.410	0.888	15.9	31.8	9.35	0.699	35.9	1.31	3.41	0.230
C3S1F6Al0.2(S)3h	0.432	0.886	16.0	32.4	9.35	0.710	35.2	1.28	3.40	0.257
C3S1F6Al0.1(S)4h	0.432	0.913	15.9	31.6	9.66	0.737	35.6	1.34	3.52	0.225
C3S1F6Al0.2(S)4	0.467	0.930	15.8	32.2	9.62	0.734	35.1	1.29	3.34	0.255
C3S1F6Al0.5S)4	0.612	0.847	16.6	32.6	9.84	0.733	34.0	1.31	3.31	0.249

ภาคผนวก ค

ผลของน้ำหนักและปริมาตรของก้อนคอนกรีตตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-1 น้ำหนักและปริมาตรของก้อนคอนกรีตตัวอย่าง

สูตร	น้ำหนัก	ปริมาตร
C1	1177.08	577
C2	1196.98	617
C1S2	1009.13	514
C1S4F1	883.77	518
C1F2	769.85	520
C3S1F6	632.78	530
C2S3F6	684.52	509
C1F2Al0.05	620.10	530
C3S1F6Al0.05	616.89	510
C2S3F6Al0.05	750.02	570
C1F2Al0.05(S)	558.31	546
C3S1F6Al0.05(S)	575.63	507
C2S3F6Al0.05(S)	626.90	520
C3S1F6Al0.05(S)2h	626.73	548
C3S1F6Al0.05(S)3h	568.25	514
C3S1F6Al0.05(S)4h	583.60	522
C3S1F6Al0.05(S)6h	620.40	517
C3S1F6Al0.05(S)8h	654.20	514
C3S1F6Al0.1(S)3h	593.00	511
C3S1F6Al0.2(S)3h	586.30	514
C3S1F6Al0.1(S)4h	548.70	509
C3S1F6Al0.2(S)4h	556.40	535
C3S1F6Al0.5(S)4h	542.51	545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
ค่ามาตรฐานของก้อนคอนกรีตมวลเบาเกรดการค้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ง-1 สมบัติของก้อนคอนกรีตมวลเบาเกรดการค้า

คุณสมบัติวัสดุ	อิฐมอญ	คอนกรีตมวลเบาเกรดการค้า
ค่ากำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	15-40	35-80
ค่าการนำความร้อน (W / mk)	1.15	0.098
ค่าการถ่ายเทความร้อนรวม OTTV (W / mk)	58-70	32-42
ค่าการกันเสียง (SCT Rating) (db)	38	43
อัตราการทนไฟ (Fire Rating) (ชั่วโมง)	1-2	4
ความเร็วในการก่อ (ตร.ม. / วัน)	8-12	15-25
ร้อยละการเสียหาย/แตกร้าว	10-30	0-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้