

การศึกษาพฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF
CEMENT PASTE CONTAINING GLASS DUST



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENT PASTE CONTAINING GLASS DUST



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ

การศึกษาพฤติกรรมทางกลของซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้ว
STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENT PASTE
CONTAINING GLASS DUST

นักศึกษา

นายพนธกร นิลภูมิ รหัสนักศึกษา 62010586
นายรัชต อุทร์ธรรม รหัสนักศึกษา 62010753
นายสิริวิชญ์ จินคำปา รหัสนักศึกษา 62010946

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.แหลมทอง

เหล่าคงถาวร

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชลิตา อู่ตะเภา	
ผศ.สมเกียรติ ขวัญพฤกษ์	
รศ.ดร.แหลมทอง เหล่าคงถาวร	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.ชลิตา อู่ตะเภา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 6 มิถุนายน ๒๕๖๖

การศึกษาพฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

นายพนธกร	นิลภูมิ	รหัสนักศึกษา	62010586
นายรชต	อุ๋ทรงธรรม	รหัสนักศึกษา	62010753
นายสิริวิชัย	จินคำปา	รหัสนักศึกษา	62010946

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. แหลมทอง เหล่าคงถาวร

ปีการศึกษา 2565

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีเศษแก้วทิ้งเป็นขยะจำนวนมากซึ่งไม่ได้ถูกนำกลับไปใช้และนับวันจะมีปริมาณขยะจากเศษแก้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว โดยนำฝุ่นแก้วที่ได้จากการบดขวดแก้วสีชาจนเป็นผงละเอียดมาผสมกับซีเมนต์เพสต์ที่อัตราร้อยละ 0, 20 และ 40 ต่อน้ำหนัก ตามลำดับ ทำการหล่อซีเมนต์เพสต์เป็นก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาดความกว้าง 5 เซนติเมตร ความยาว 5 เซนติเมตร และความสูง 5 เซนติเมตร โดยทำการบ่มที่ระยะเวลา 7 วัน 14 วัน และ 28 วัน ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ ทดสอบหาค่าความชื้นเหลือปกติ ระยะเวลาก่อตัวและทดสอบการรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ จากผลการศึกษาพบว่า ฝุ่นแก้วมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 73.4 และซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วมีปริมาณความต้องการน้ำน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว โดยจะมีปริมาณความต้องการน้ำลดลงตามปริมาณการแทนที่ของฝุ่นแก้วนอกจากนี้ยังพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะมีกำลังรับแรงอัดลดลงตามสัดส่วนของฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น

STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENT PASTE CONTAINING GLASS DUST

Mr. Polthakorn Nilphum Student ID. 62010586

Mr. Rachata Ausongtham Student ID. 62010753

Mr. Sirawich Jeenkhampa Student ID. 62010946

Advisor: Assoc.Prof.Dr.Laemthong Laokhongthavorn

Academic Year 2022

ABSTRACT

Currently Thailand has a lot of waste glass that is not yet brought to recycle process and increased every day. The situation like this can lead to environmental problems in the near future. So This research aims to study mechanical behavior of cement paste containing glass dust. The recycled glass has been used in form of glass dust replacing cement in various portions by weight; 0%, 20%, and 40% respectively. Cube specimens is 5 cm wide, 5 cm long, and 5 cm high. Then cure the specimens at 7 days, 14 days and 28 days. Having studied the physical and chemical properties of glass dust and cement and found normal consistency and setting time and compressive strength of cement paste. The result showed that glass dust consists of 73.40% SiO₂. And, cement paste containing more glass dust needs less water than cement paste containing less glass dust. In addition, it showed that compressive strength of cement paste is decreased if glass dust portion is increased. However, compressive strength of cement paste containing glass dust is increased due to the longer curing time.

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำโครงการเรื่อง ศึกษาพฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว สามารถดำเนินการจนสำเร็จลุล่วงได้เนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. แหลมทอง เหล่าคงถาวร ที่ได้ช่วยเหลือให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาการแก้ไขปัญหาต่างๆทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณบริษัท แก้วกรุงไทย จำกัด ที่มอบเศษแก้วบดแก่เรา เพื่อมาทำการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้ปกครองของคณะผู้จัดทำที่ได้ให้กำลังใจและช่วยสนับสนุนค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมต่างๆ ในการทำโครงการ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ชั้นปีที่ 4 ที่ได้ช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหา และช่วยตรวจสอบข้อผิดพลาดในการทำโครงการ

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณแหล่งข้อมูลต่างๆ ที่คณะผู้จัดทำได้ศึกษาข้อมูลและนำมาอ้างอิง ในการทำโครงการ ครั้งนี้จนโครงการประสบความสำเร็จลุล่วงมาได้ โดยคณะผู้จัดทำหวังว่ารายงานเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่ต้องการศึกษาเกี่ยวกับโครงการนี้ต่อ หากมีข้อผิดพลาดประการใดคณะผู้จัดทำขอน้อมรับไว้และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

นายพนธกร	นิลภูมิ
นายรชต	อุทรวงธรรม
นายสิริวิษณุ	จินคำปา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและประเด็นปัญหาของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	6
1.5 วิธีการศึกษา	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 ปูนซีเมนต์	8
2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
2.1.2 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
2.1.3 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	12
2.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13
2.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)	14
2.1.6 ปอซโซลาน (Pozzolan)	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทดสอบซีเมนต์เพสต์	21
2.2.1 การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency)	21
2.2.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว	22
2.3 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์เพสต์	22
2.3.1 คุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีต	22
2.3.2 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	23
2.3.3 การทำคอนกรีต	23
2.3.4 การบ่ม	24
2.3.5 การทดสอบกำลังอัด	24
2.4 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	25
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน	26
2.5 ข้อมูลเกี่ยวกับแก้วบรรจุภัณฑ์	27
2.5.1 ชนิดของแก้ว	27
2.5.2 ประเภทของบรรจุภัณฑ์แก้ว	28
2.5.3 องค์ประกอบทางเคมีและวัตถุดิบในการหลอมแก้ว	29
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีการศึกษาและวิจัย	32
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	32
3.2 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 รายละเอียดวิธีการทดสอบ	33
3.4 การทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว (ASTM C 136)	34
3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	34
3.6 การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ (ASTM C 187)	34
3.7 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (ASTM C 191)	37
3.8 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	39
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	42
4.1 ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว	42
4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี	42
4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ	42
4.2.2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผง	43
4.2.3 องค์ประกอบทางเคมี	44
4.3 การหาความชื้นเหลวปกติ	45
4.4 การหาระยะเวลาการก่อตัว	45
4.5 หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	46
4.6 การสูญเสียน้ำหนัก	46
4.6.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนัก	46
4.6.2 ผลของสารละลายซัลเฟตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	47
4.7 การเปลี่ยนแปลงขนาด	49
4.7.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ ...	49
ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสถานะต่างๆ	

4.7.2 ผลของการแช่สารละลายซิลิเกตที่มีต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ ..	50
ผสมฝุ่นแก้ว	
4.8 กำลังอัด	52
4.8.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว	52
4.8.2 ผลของสารละลายซิลิเกตที่มีต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	53
4.9 การประเมินด้านราคาต่อกำลังรับแรงอัด	54
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก ก	60
ภาคผนวก ข	61
ภาคผนวก ค	62
ภาคผนวก ง	64
ภาคผนวก จ	67
ภาคผนวก ฉ	70
ภาคผนวก ช	73
ภาคผนวก ซ	76
ภาคผนวก ฌ	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงบัญชีก๊าซเรือนกระจกภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ ปี พ.ศ. 2543-2560 จากระบบ TGEIS	2
1.2 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกลุ่มกระบวนการอุตสาหกรรมโลหะ ปี พ.ศ. 2560	3
1.3 ปริมาณการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ใน ปี พ.ศ. 2559 (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)	5
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	7
2.1 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	10
2.2 สรุปลักษณะสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา, 2555)	11
2.3 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 (ปริญญา, 2547)	12
2.4 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (นิตยา, 2559)	13
2.5 ออกไซด์ที่ใช้ผสมเพื่อให้แก้วมีสีอื่นต่างๆ	30
2.6 แหล่งวัตถุดิบซึ่งเป็นที่มาขององค์ประกอบทางเคมีต่างๆในแก้ว	30
3.1 อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว	35
3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความชื้นเหลือปกติ	37
3.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว	38
3.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบตามระยะเวลาในการบ่ม	41
4.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	44
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	45
ก-1 ขนาดคละของฝุ่นแก้ว	60
ข-1 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C100GD0	61
ข-2 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C80GD20	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่	หน้า
ข-3 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C60GD40	61
ค-1 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C100GD0	62
ค-2 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C80GD20	62
ค-3 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C60GD40	63
ค-4 ระยะเวลาก่อตัวต้นและปลายของแต่ละอัตราส่วนผสม	63
ง-1 หน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C100GD0	64
ง-2 หน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C80GD20	65
ง-3 หน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C60GD40	66
จ-1 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C100GD0	67
จ-2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C80GD20	68
จ-3 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C60GD40	69
ฉ-1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของอัตราส่วนผสม C100GD0	70
ฉ-2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของอัตราส่วนผสม C80GD20	71
ฉ-3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของอัตราส่วนผสม C60GD40	72
ช-1 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสม C100GD0	73
ช-2 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสม C80GD20	74
ช-3 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสม C60GD40	75
ซ-1 ราคาของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ	76
ซ-2 ตารางการประเมินราคาต่อค่ากำลังอัด	77

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนภูมิวงกลมแสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคกระบวนการอุตสาหกรรมกรรมฯ ... แยกตามกลุ่มอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2560	1
1.2 แสดงแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ ของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2543-2560	2
1.3 ขยะจากขวดแก้วสีขาที่เหลือใช้	4
2.1 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของสารประกอบหลัก.....	11
2.2 กราฟแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก.....	11
2.3 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	14
2.4 กราฟความสัมพันธ์ของเวลาและความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน	17
2.5 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของอนุภาค C_3S	17
2.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก	20
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ C_3A กับอัตราการเสียหายที่ปริมาณซีเมนต์ในช่วงผสมต่างๆ	27
3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	32
3.2 ฝุ่นแก้ว	32
3.3 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)	33
3.4 อุปกรณ์ไวแคท	35
4.1 กราฟแสดงค่าร้อยละที่ผ่านตะแกรงกับขนาดตะแกรงมาตรฐาน	42
4.2 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า	43
4.3 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคฝุ่นแก้วที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า	44
4.4 ปริมาณน้ำที่เติมจนซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวตามมาตรฐาน	45
4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วน	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	46
4.7 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แชน้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 7 วัน.	46
4.8 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แชน้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน	47
4.9 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แชน้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน	47
4.10 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แซ่ (MgSO ₄) เป็นเวลา 7 วัน	48
4.11 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แซ่ (MgSO ₄) เป็นเวลา 14 วัน	48
4.12 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แซ่ (MgSO ₄) เป็นเวลา 28 วัน	49
4.13 กราฟแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ล้วน (C100GD0)	49
แชน้ำและสารละลายซัลเฟต	
4.14 กราฟแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ล้วน (C80GD20)	50
แชน้ำและสารละลายซัลเฟต	
4.15 กราฟแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ล้วน (C60GD40)	50
แชน้ำและสารละลายซัลเฟต	
4.16 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาด แชน้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 7 วัน	51
4.17 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาด แชน้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน	51
4.18 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาด แชน้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน	51
4.19 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่	52
H ₂ O , MgSO ₄ เป็นระยะเวลา 7 วัน	
4.20 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่	52
H ₂ O , MgSO ₄ เป็นระยะเวลา 14 วัน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
4.21 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่ H_2O , $MgSO_4$ เป็นระยะเวลา 28 วัน	53
4.22 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ผ่านการแช่น้ำ และผ่านการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นระยะเวลา 7 วัน	53
4.23 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ผ่านการแช่น้ำ และผ่านการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นระยะเวลา 14 วัน	54
4.24 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ผ่านการแช่น้ำ และผ่านการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นระยะเวลา 28 วัน	54
4.25 กราฟประเมินราคาต่อกำลังอัด	54
ฌ-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	77
ฌ-2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	77
ฌ-3 เศษแก้วที่รับมาจากบริษัท	77
ฌ-4 คัดเศษแก้วโดยการร่อนตะแกรง	77
ฌ-5 เครื่องเขย่าตะแกรง	77
ฌ-6 ฝุ่นแก้วที่ใช้ในการทดสอบ	77
ฌ-7 เต้าอบไฟฟ้า	78
ฌ-8 การผสมด้วยมือ	78
ฌ-9 ไวแคท	78
ฌ-10 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์	78
ฌ-11 เตรียมแบบ	78
ฌ-12 เข้าแบบ	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่	หน้า
ฅ-13 ปมน้ำ	79
ฅ-14 เตรีมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	79
ฅ-15 ปมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต	79
ฅ-16 วัดขนาด โดยเวอร์เนียร์คาลิปเปอร์	79
ฅ-17 ชั่งน้ำหนัก	79
ฅ-18 เครื่องทดสอบกำลังอัด UTM	79

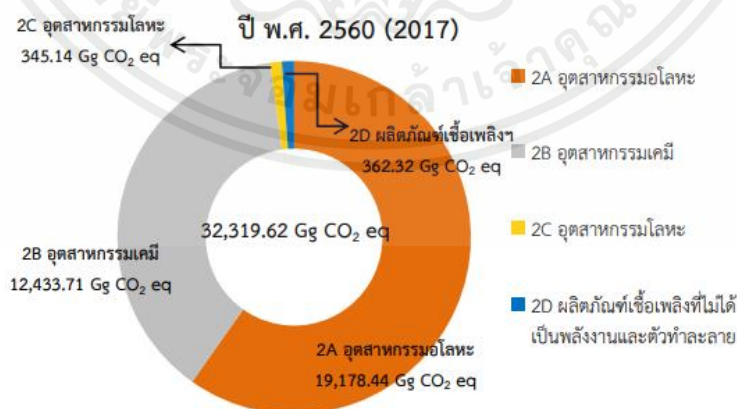


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและประเด็นปัญหาของการศึกษา

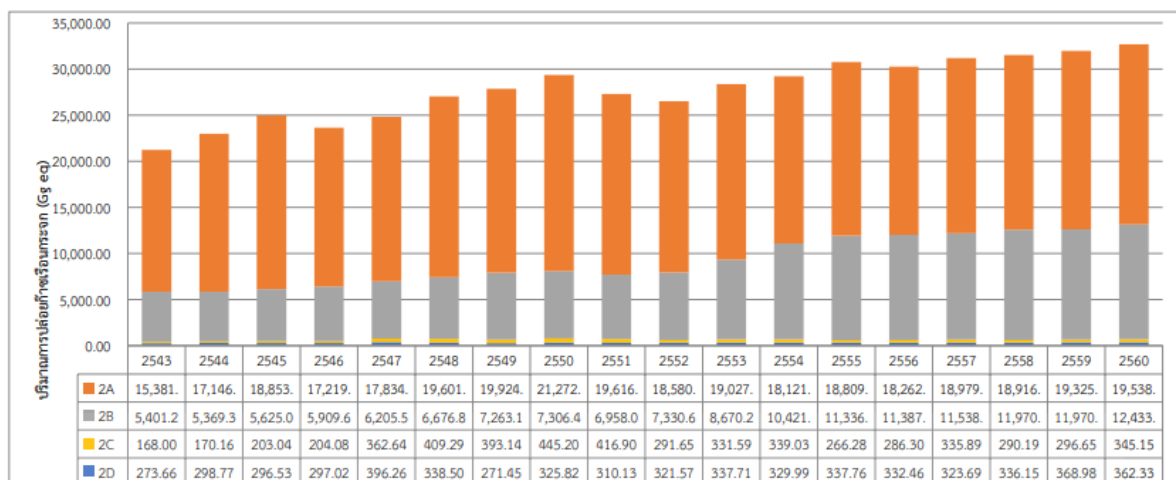
ในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ เป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีการใช้งานพลังงานและก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ออกสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก จากผลการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2543-2560 รายงานทั้งหมด 4 กลุ่ม ได้แก่ อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมโลหะ และกลุ่มผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงที่ไม่ได้เป็นพลังงานและตัวทำละลาย พบว่า การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยในภาคกระบวนการอุตสาหกรรมฯ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 1.2 และตารางที่ 1.1 สำหรับในปี พ.ศ. 2560 มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด เท่ากับ 32,679.51 จิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (GgCO₂eq) โดยกลุ่มอุตสาหกรรมโลหะ เป็นกิจกรรมที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เท่ากับ 19,178.44 จิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (GgCO₂eq) รองลงมาเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตสารเคมี มีปริมาณการปล่อยเท่ากับ 12,433.71 จิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (GgCO₂eq) ส่วนกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตโลหะ และกลุ่มการใช้ผลิตภัณฑ์จากเชื้อเพลิงในรูปแบบที่ไม่เป็นพลังงานและการใช้ตัวทำละลายเป็นส่วนที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยมีปริมาณการปล่อยเท่ากับ 345.14 และ 362.32 จิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (GgCO₂eq) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1.1(กรมโรงงานอุตสาหกรรม)



รูปที่ 1.1 แผนภูมิวงกลมแสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคกระบวนการอุตสาหกรรมกรรมฯ

แยกตามกลุ่มอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2560 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 แสดงแนวโน้มการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2543-2560 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

ตารางที่ 1.1 แสดงบัญชีก๊าซเรือนกระจกภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ปี พ.ศ. 2543-2560 จากระบบ TGEIS (กรมโรงงานอุตสาหกรรม)

ปี พ.ศ.	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (Gg eq)	ปริมาณก๊าซเรือนกระจก (MT eq)
2543	21,224.22	21.22
2544	22,665.00	22.66
2545	24,624.85	24.62
2546	23,310.24	23.31
2547	24,469.80	24.47
2548	26,662.02	26.66
2549	27,480.97	27.48
2550	28,953.01	28.95
2551	26,938.61	26.94
2552	26,179.91	26.18
2553	28,014.90	28.01
2554	28,882.87	28.88
2555	30,406.87	30.41
2556	29,934.50	29.93
2557	30,829.40	30.83
2558	31,164.50	31.16
2559	31,605.20	31.61
2560	32,319.62	32.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณารายสาขาย่อยในกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตแร่ ดังตารางที่ 1.2 พบว่า การผลิตปูนซีเมนต์ปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด เท่ากับ 17,994.60 จิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($GgCO_2eq$) ในกลุ่มอุตสาหกรรมโลหะ ส่วนอันดับที่สอง คือ ผลิตภัณฑ์อื่นที่มีการใช้โซดาแอช มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 299.01 จิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($GgCO_2eq$) รองลงมาคือ การผลิตแก้ว และอันดับสุดท้าย คือ การผลิตปูนขาว ที่มีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 231.97 และ 128.37 จิกะกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ($GgCO_2eq$) ในกลุ่มอุตสาหกรรมโลหะตามลำดับ

ตารางที่ 1.2 ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกกลุ่มกระบวนการอุตสาหกรรมโลหะ ปี พ.ศ. 2560

แหล่งกำเนิดก๊าซ	CO ₂
	GgCO ₂ eq
2A1 การผลิตปูนซีเมนต์	17,994.60
2A2 การผลิตปูนขาว	128.37
2A3 การผลิตแก้ว	231.97
2A4b ผลิตภัณฑ์อื่นที่มีการใช้โซดาแอช	299.01

นอกจากนี้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมในปัจจุบัน ได้เกิดมลพิษทางด้านสารเคมีประเภทที่สามารถกัดกร่อนต่อคอนกรีตได้ จากสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นกรดและจากสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นซัลเฟต เช่น โซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ที่เป็นสารเคมีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำกร่อย น้ำทะเล และฝนกรด ดังนั้นการออกแบบคอนกรีตในปัจจุบันจึงต้องออกแบบให้มีความทนทานของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นกรดและความเป็นซัลเฟต โดยเฉพาะความเป็นซัลเฟต ที่ทำให้คอนกรีตเกิดความสูญเสียกำลังรับแรงอัด สูญเสียน้ำหนัก เกิดการขยายตัว และเกิดการวิบัติในที่สุด

ปอซโซลาน (Pozzolan) เป็นวัสดุที่มีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็น ซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่เลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วเกิดเป็นสารประกอบ ซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัย การนำสารปอซโซลานมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งการนำวัสดุปอซโซลานมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตบางอย่าง

เช่น เพิ่มความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีต ลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ช่วยเพิ่มความต้านทานของคอนกรีตต่อการกัดกร่อนของสารเคมีต่าง ๆ ได้ เป็นต้น อีกทั้งในงานก่อสร้างการแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยวัสดุปอซโซลานจะเป็นการช่วยประหยัดต้นทุนการก่อสร้างได้มาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้วเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก จากข้อมูลการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ในปี 2559 ดังตารางที่ 1.3 และภาพที่ 1.3 จะพบว่าประเทศไทยขยะมูลฝอยประเภทแก้ว 2,415,842 ตัน โดยมีการนำกลับไปใช้ใหม่เพียงร้อยละ 68 และเหลือทิ้งเป็นขยะมูลฝอยถึงร้อยละ 32 และนับวันจะมีปริมาณขยะจากเศษแก้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต ทำให้มีการรณรงค์การนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งหากสามารถนำเศษแก้วเหลือใช้ดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตได้ จะเป็นประโยชน์ต่องานก่อสร้างในประเทศไทยอย่างมาก นอกจากนี้ยังจะช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ฝุ่นแก้ว (Glass Dust) ซึ่งได้มาจากการบดเศษแก้วจนละเอียดเป็นผง มีศักยภาพซึ่งสามารถเป็นปอซโซลานได้ คือมีปริมาณซิลิกาสูง โดยซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้โครงสร้างของแก้วแข็งแรง นอกจากนี้ยังมีซิลิกาในรูปอสัณฐานในปริมาณที่สูง ซึ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ง่าย



รูปที่ 1.3 ขยะจากขวดแก้วสีชาที่เหลือใช้

ตารางที่ 1.3 ปริมาณการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ใน ปี พ.ศ. 2559 (กรมควบคุมมลพิษ, 2559)

ประเภท	ปริมาณที่เกิดขึ้น (ตัน)	ปริมาณการนำกลับมาใช้ประโยชน์		รวม		วิธีการ
		ซื้อขาย ใบชุมชน (ตัน)	ซื้อขาย/แลกเปลี่ยน ระหว่างอุตสาหกรรม (ตัน)	ตัน	ร้อยละ	
แก้ว	2,415,842	640,000	767,000	1,407,000	58	การแปรรูปใช้ใหม่
	-	-	250,000	250,000	10	การใช้ซ้ำ
กระดาษ	4,079,363	1,440,000	1,720,000	3,160,000	77	การแปรรูปใช้ใหม่
พลาสติก	3,072,000	2,240,000	430,000	2,670,000	87	การแปรรูปใช้ใหม่
เหล็ก/โลหะ	3,025,563	480,000	1,175,000	1,655,000	55	การแปรรูปใช้ใหม่
อะลูมิเนียม	780,000	288,000	202,000	490,000	63	การแปรรูปใช้ใหม่
ยาง	505,063	112,000	109,000	221,000	44	การแปรรูปใช้ใหม่
	-	-	80,000	80,000	16	การใช้ซ้ำ
รวม	13,877,831	5,200,000	4,733,000	9,933,000		

1.3 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

วัตถุประสงค์การศึกษามีรายละเอียดดังนี้

- 1) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติกายภาพของฝุ่นแก้ว โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว
- 3) เพื่อศึกษาการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว จากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว
- 4) เพื่อศึกษาการสูญเสียน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วเนื่องจากการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซิลิเกต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาวิจัย

มีรายละเอียดดังนี้

- 1) ทราบถึงคุณสมบัติทางเคมีและสมบัติกายภาพของฝุ่นแก้ว โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 2) ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ทราบถึงการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว
- 4) ทราบถึงการสูญเสียน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วเนื่องจากการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟต

1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

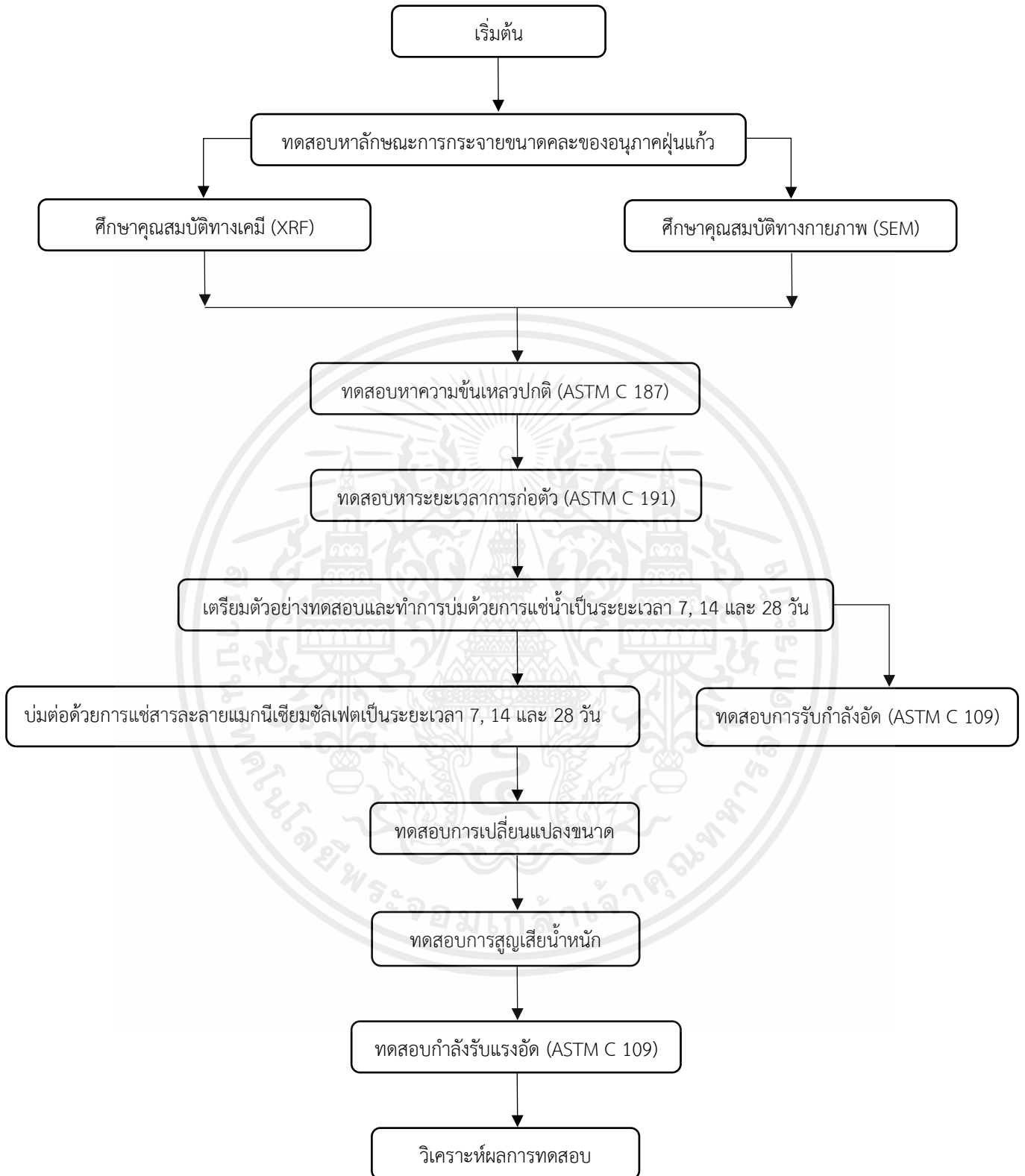
ขอบเขตการศึกษามีรายละเอียดดังนี้

- 1) ใช้ฝุ่นแก้วในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก และใช้อุณหภูมิในการบ่ม ดังนี้ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง, 40 และ 60 องศาเซลเซียส โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนจากแมกนีเซียมซัลเฟตได้
- 2) วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ
 - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 งานโครงสร้างตราที่พีไอ (แดง)
 - ฝุ่นแก้วประเภทโซดาไลม์ (สีขาว)
 - น้ำประปา
 - สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1.5 วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษามีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 1.4 และมีรายละเอียดดังนี้ ขั้นตอนหนึ่งเริ่มทำการทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคฝุ่นแก้ว แล้วมาศึกษาคุณสมบัติทั้งทางเคมี และทางกายภาพของทั้งฝุ่นแก้วและซีเมนต์ เพื่อนำมาทดสอบหาความชื้นเหลือปกติ และระยะเวลาก่อตัวเมื่อได้ค่าที่เหมาะสมแล้วจึงเริ่มเตรียมตัวอย่างเพื่อนำมาบ่มน้ำ และแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 7,14 และ 28 วัน เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบโดยตัวอย่างที่บ่มน้ำเมื่อบ่มเสร็จนำมาทดสอบหาการรับกำลังอัด ส่วนตัวอย่างที่ได้หลังการบ่มแมกนีเซียมซัลเฟตให้ทำการทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงขนาดและการสูญเสียน้ำหนักก่อน จึงนำทดสอบกำลังรับแรงอัด เมื่อได้ค่าครบแล้วจึงมาทำการสรุปวิเคราะห์ผลการทดสอบทั้งหมด

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีตที่นิยมใช้กันแพร่หลาย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งมีส่วนผสมหลัก คือ หินปูน หินดินดาน ดินลูกรัง และทราย รวมถึงการเพิ่มสารอื่นๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณภาพของปูนซีเมนต์ เช่น ยิปซัม สารบอซโซลาน สารลดน้ำ เป็นต้น ทำให้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถแบ่งออกได้หลายประเภทตามความเหมาะสมกับงาน และคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบของวัตถุดิบจะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาการปรับส่วนประกอบทางเคมีจะให้ปูนซีเมนต์มีคุณสมบัติต่างกัน เมื่อผสมกับน้ำปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว (A.M. Kaja, 2021)

2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

มาตรฐานปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ของไทย คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ หรือ มอก. 15 เล่ม 1 ข้อกำหนดเกณฑ์คุณภาพ ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทด้วยกัน (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2555) ได้แก่

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่นิยมใช้มากที่สุดในประเทศไทย เหมาะสำหรับงานคอนกรีตโดยทั่วไป เช่น อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก, พื้นอาคาร, ถนน, สะพาน, ถังกักเก็บน้ำ, อ่างเก็บน้ำ, ท่อน้ำ, และผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป เป็นต้น นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องการความแข็งแรงสูง เช่น สะพานขนาดใหญ่, สนามกีฬา และอาคารสูง เป็นต้น

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ดัดแปลง (Modified Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เกิดความร้อนน้อยกว่าประเภท 1 และทนซัลเฟตได้ปานกลาง เพราะมีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ ไม่เกิน 8% เหมาะสำหรับงานโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องสัมผัสกับดินหรือน้ำที่มีความเข้มข้นของซัลเฟตสูงกว่าปกติแต่ไม่ถึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับรุนแรง นอกจากนี้ ยังใช้ในงานโครงสร้างที่มีความหนาแน่นมาก เช่น ตอม่อขนาดใหญ่, ฐานรากขนาดใหญ่ และ กำแพงกันดินที่หนาแน่นๆ เป็นต้น

3) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ให้กำลังอัดสูงเร็ว (High early strength Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดสูงในระยะแรก เพราะปูนซีเมนต์มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่ต้องการใช้งานเร็ว หรือ ถอดแบบในเวลาอันสั้น มักใช้ในงานหล่อผลิตภัณฑ์คอนกรีตอัดแรงสำเร็จรูปชนิดต่างๆ เช่น แผ่นพื้นอัดแรง, เสาเข็มอัดแรง, เสาไฟฟ้า, เสาและคานสำเร็จรูปสำหรับงานอาคาร, คานสะพานสำเร็จรูป และหมอนรางรถไฟ ไม่ควรใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ ในงานโครงสร้างคอนกรีตขนาดใหญ่ เพราะความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดสูงมากในช่วงต้น อาจทำให้โครงสร้างนั้นเกิดการแตกร้าวได้

4) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ปริมาณและอัตราความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ โดยเกิดความร้อนน้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 2 และมีการพัฒนากำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่นๆ เหมาะสำหรับงานคอนกรีตมวล (Mass Concrete) เช่น เขื่อน เนื่องจากทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตขณะก่อตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งเป็นการลดปัญหาความเสี่ยงจากการแตกร้าว เนื่องจากความร้อน (Thermal Cracking)

5) ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภททนทานต่อซัลเฟต (Sulfate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่มีค่า (C_3A) ไม่เกิน 5% เพื่อป้องกันไม่ให้ซัลเฟตจากภายนอกเข้ามาทำลายเนื้อคอนกรีต และให้กำลังต่ำกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 เหมาะสำหรับงานโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับเกลือซัลเฟตอย่างรุนแรงจากดินหรือน้ำที่มีปริมาณซัลเฟตสูง เช่น งานก่อสร้างบ่อบำบัดน้ำเสีย, โครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำเสียโดยตรง และโครงสร้างใต้ดิน เป็นต้น

2.1.2 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

เมื่อเผาวัตถุดิบของปูนซีเมนต์ซึ่งได้แก่สารออกไซด์ของธาตุแคลเซียมซิลิกอน อะลูมิเนียมและเหล็ก สารเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันทางเคมีและรวมตัวกันเป็นสารประกอบอยู่ในปูนเม็ด ในรูปของผลึกที่ละเอียดมาก โดยมีส่วนประกอบทางเคมีและชื่อย่อ ดังตารางที่ 1 (วิเชียร ชาลี, 2559) และคุณสมบัติที่ทำปฏิกิริยากับน้ำทั้ง 4 ชนิด ในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (พงษ์ธร จุลพันธ์ทอง, 2559)

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อของสารประกอบหลัก	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
4. เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S)

C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกของการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม และกำลังอัดของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซั่ม ปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55%

2. ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S)

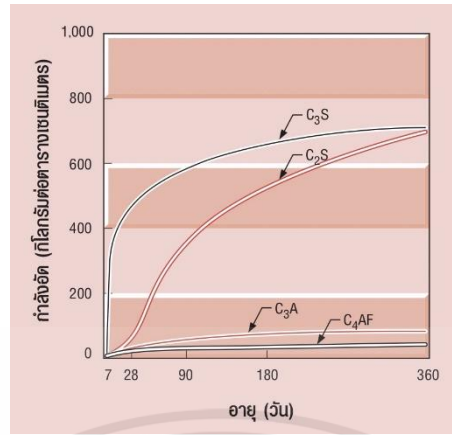
C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้า ๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S ปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35 %

3. ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

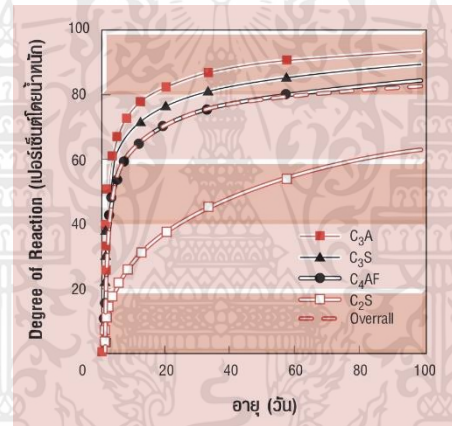
C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน C_3A จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซั่มลงระหว่างการบดซีเมนต์กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15%

4. เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรท์ (C_4AF)

C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนที่เกิดประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10%



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของสารประกอบหลัก (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2555)



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2555)

ตารางที่ 2.2 สรุปคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2555)

คุณสมบัติ	C ₃ S (Alite)	C ₂ S (Belite)	C ₃ A	C ₄ AF (Celite)
1. อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Rate of Hydration)	เร็ว (ชั่วโมง)	ช้า (วัน)	กันที่กันใด	เร็วมาก (นาที)
2. การพัฒนากำลังอัด (Strength Development)	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (วันเดียว)	เร็วมาก (วันเดียว)
3. กำลังอัดประลัย (Ultimate Strength)	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
4. ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of Hydration)	ปานกลาง (500 จูลต่อกรัม)	น้อย (250 จูลต่อกรัม)	สูงมาก (850 จูลต่อกรัม)	ปานกลาง (420 จูลต่อกรัม)
5. คุณสมบัติอื่นๆ	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	คุณสมบัติเหมือนปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์	ไม่เสถียรในน้ำ และถูกซัลเฟตทำลายได้ง่าย	ทำให้ปูนซีเมนต์มีสีเทา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้ จากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ เป็นต้น (พงษ์ธร จุลพันธ์ทอง, 2559)

ตารางที่ 2.3 สารประกอบและคุณสมบัติของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 (ปริญญา, 2547)

สารประกอบและคุณสมบัติ	ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C ₃ S	49	46	56	25	30
C ₂ S	25	29	15	50	46
C ₃ A	12	6	12	5	5
C ₄ AF	8	12	8	12	13
ความละเอียด (เบลน, ซม. ² /กรัม)	3,000	3,000	4,500	3,000	3,000
กำลังอัด (3 วัน, กก./ซม. ²)	180	150	310	80	120
ความร้อนปฏิกิริยา (28 วัน, จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

2.1.3 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

สารประกอบรองที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ถึงแม้จะมีปริมาณน้อย แต่สารประกอบบางตัวมีผลกระทบต่อซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต (พิศาล ลากตระกูล, 2558)

1. **ยิปซัม (Gypsum : CaSO₄.2H₂O)** การผลิตปูนซีเมนต์ในขั้นตอนสุดท้ายจะบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซัมเพื่อป้องกันการก่อตัวเร็วเกินไปของซีเมนต์เพสต์ซึ่ง เมื่อมีอยู่มากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ ทั้งนี้เนื่องจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง C₃A กับยิปซัมทำให้เกิดเอตริงไทด์ (Ettringite) ซึ่งปริมาณเพิ่มมากขึ้นจากเดิม เมื่อยิปซัมผสมอยู่น้อยปฏิกิริยาระหว่าง C₃A กับยิปซัมจะเกิดขึ้นเมื่อซีเมนต์เพสต์ยังอยู่ในสภาพพลาสติก ทำให้การขยายตัวของปริมาตรเกิดขึ้นก่อนการแข็งตัวของซีเมนต์เพสต์จึงไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่เมื่อยิปซัมผสมอยู่มากปฏิกิริยาจะยังคงขึ้นแม้หลังจากซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้ว

2. **ปูนขาวอิสระ (Free Lime)** ปูนขาวอิสระสามารถเกิดขึ้นได้จากวัตถุดิบ มีปริมาณของ CaO มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO₂ , Al₂O₃ , Fe₂O₃ ได้หมด หรืออาจเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของ CaO ไม่มากแต่ทำปฏิกิริยากับออกไซด์ต่างๆไม่สมบูรณ์ในระหว่างการเผา การรวมตัวของ Free Lime กับน้ำทำให้เกิดสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ที่ปริมาณมากขึ้น ถ้า Free Lime มีปริมาณที่มากเกินไป อาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้พฤติกรรมนี้เรียกว่าความไม่อยู่ตัว เนื่องจาก Lime (Unsoundness Due to Lime)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium Oxide, MgO) วัตถุประสงค์ในการผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) ผสมอยู่เล็กน้อยเมื่อเผาวัตถุดิบ $MgCO_3$ จะสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยแมกนีเซียมออกไซด์บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลือจะอยู่ในรูปผลึกอิสระและรวมตัวกับน้ำ การรวมตัวกับน้ำจะเกิดได้ช้ามากกินเวลานานปี ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเหมือนกับ CaO คือทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว (Unsoundness) และอาจส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ การขยายตัวด้วยวิธีของ Autoclave ตามมาตรฐาน ASTM C 151(R.M.K.College of Engineering and Techology, 2012)

4. อลคาไลออกไซด์ (Alkali Oxides หรือ Na_2O , K_2O) อลคาไลออกไซด์ในปูนซีเมนต์จะทำปฏิกิริยากับมวลรวมบางประเภทที่มีซิลิกา ปฏิกิริยานี้เรียกว่า ปฏิกิริยาอัลคาไลซิลิกา (Alkali-Silica Reaction) ได้อัลคาไลซิลิกาเจล (Alkali Silica Gel) ผลจากปฏิกิริยาจะก่อให้เกิดการขยายตัวดันให้คอนกรีตแตกร้าวเสียหายในกรณีที่จำเป็นต้องใช้มวลรวมที่ทำปฏิกิริยากับอัลคาไลได้ ควรเลือกปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ

5. ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P_2O_5) ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าเนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO นอกจากนี้ถ้ามี P_2O_5 มากพออาจทำให้เกิดความไม่คงตัว เพราะปูนขาวอิสระเพิ่มมากขึ้น

2.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ได้จะประกอบด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่ คือ

1. ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณ 90% ของน้ำหนักซีเมนต์
2. ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิปซั่ม ปริมาณออกไซด์ต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ (นิตยา ไจทอง, 2559)

ออกไซด์	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	
CaO	60-70
SiO_2	17-25
Al_2O_3	3-8
Fe_2O_3	0.5-0.6
ออกไซด์รอง	
MgO	0.1-5.5
$Na_2O + K_2O$	0.5-1.3
TiO_2	0.1-0.4
P_2O_5	0.1-0.2

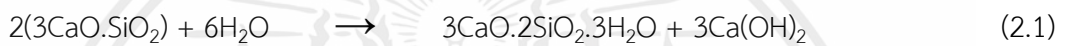
2.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

2.1.5.1 ปฏิกิริยาของสารประกอบ

ปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชันก่อให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัว โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารประกอบในปูนซีเมนต์ สารประกอบนี้จะทำปฏิกิริยาและมีอิทธิพลซึ่งกันและกัน ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำสามารถเริ่มต้น ด้วยปฏิกิริยาของแต่ละสารประกอบในซีเมนต์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบที่สำคัญมี 4 ชนิด (ธีรภาพ ศรีบุญเรือง, 2558) คือ

(1) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต (C_3S และ C_2S)

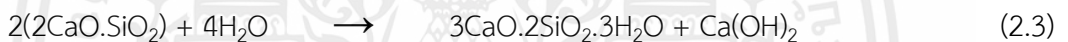
สมการของ C_3S



หรือ



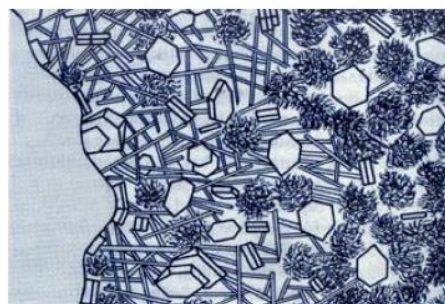
สมการของ C_2S



หรือ



จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) แสดงสมการทางเคมีของแคลเซียมซิลิเกต C_3S และ C_2S ตามลำดับ เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) โดยอัตราส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ประมาณร้อยละ 15-25 ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติเป็นต่างอย่างมากคือมีความเป็นกรดเป็นด่าง (PH) ประมาณ 12.5 ช่วยป้องกันการกัดกร่อนของเหล็กได้เป็นอย่างดี ส่วนแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) จะทำหน้าที่ตัวประสาน



CSH



Ca(OH)₂

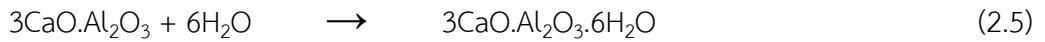


Ettringite

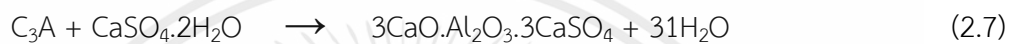
รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (นิตยา ใจทง, 2559)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(2) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)



สมการทางเคมี (2.3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดขึ้นกับน้ำได้ในทันที และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของซีเมนต์เพสต์ เพื่อหน่วงไม่ให้เกิดปฏิกิริยานี้อย่างรวดเร็วจึงใส่ยิปซัม ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เข้าไปในระหว่างขบวนการบดซีเมนต์ ยิปซัมจะทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ก่อให้เกิดชั้นของ Ettringite บนผิวของอนุภาคไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ดังสมการที่ (2.4)



ชั้นของ Ettringite ก่อให้เกิดการหน่วงการก่อตัวของ C_3A และทำให้การก่อตัวในช่วงแรกนี้ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลไฟด์ (C_3S , C_2S) เป็นส่วนใหญ่แต่ชั้นของ Ettringite ไม่ได้หยุดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกล่าวคือ เมื่อเกิด Ettringite จะเกิดแรงดันที่มาจากกาการเพิ่มปริมาตรของของแข็ง แรงดันนี้จะทำให้ชั้นของ Ettringite แตกออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A แต่เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิด Etringite ใหม่เข้าไปแทนที่เป็นการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันอีกครั้งหนึ่ง ชั้นตอนจะเป็นอย่างนี้จนกระทั่ง Sulphate Lons มีปริมาณไม่เพียงพอที่จะก่อให้เกิด Ettringite จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3A โดยเปลี่ยน Ettringite ไปเป็น Monosulphate (พิศาล ลากตระกูล, 2558)

(3) ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF)



สมการที่ (2.5) แสดงปฏิกิริยาระหว่าง C_4AF และยิปซัมก่อให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตและแคลเซียมซัลโฟเฟอร์ไรต์ ซึ่งปฏิกิริยาของ C_4AF มีลักษณะคล้ายกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน C_3A แต่ปฏิกิริยาจะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนจากการทำปฏิกิริยาน้อยกว่ายิปซัมจะหน่วงการทำปฏิกิริยาของ C_4AF มากกว่าที่หน่วงใน C_3A

2.1.5.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ในปัจจุบันนิยามศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปูนซีเมนต์จากการวัดอัตราการเกิดพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งทำได้ง่ายกว่าการศึกษาจากปฏิกิริยาเคมีโดยตรง แบ่งพฤติกรรมการเกิดปฏิกิริยาออกเป็น 5 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นที่ 1 (Period of rapid evolution of heat) ขั้นที่ 2 (Dormant period) ขั้นที่ 3 (Acceleration period) ขั้นที่ 4 และ ขั้นที่ 5 ดังแสดงรูปที่ 2.4 เนื่องจากในอนุภาคปูนซีเมนต์ ประกอบด้วย C_3S มากถึงร้อยละ 50 ของสารประกอบทั้งหมด ซึ่งมีสัดส่วนมากที่สุดในปูนซีเมนต์ ทั้งยังเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว ทำให้การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

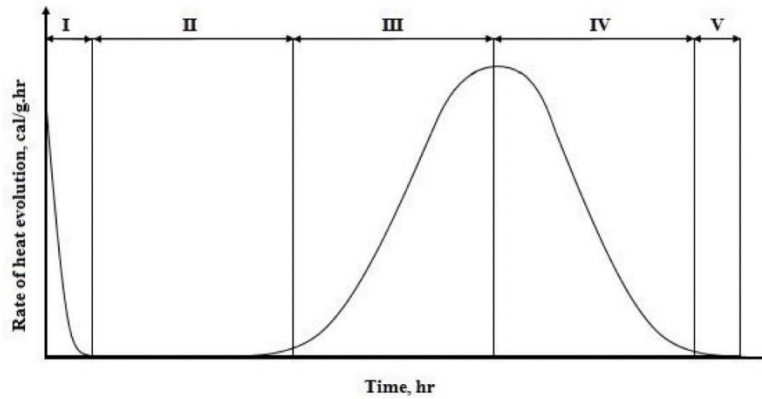
คายความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นผลจากอิทธิพลของ C_3S เป็นหลัก ดังนั้นจึงใช้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ C_3S อธิบายพฤติกรรมในช่วงต่างๆ ดังต่อไปนี้ (พีรพัฒน์ พาหุสุวัฒน์, 2562)

ช่วงการวิวัฒนาการความร้อนอย่างรวดเร็ว (ขั้นที่ 1, Period of rapid evolution of heat) เมื่ออุณหภูมิของปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำ สารประกอบแคลเซียมซิลิเกต C_3S และ C_2S ปลดปล่อยไอออน Ca^{+} และ OH^{-} ออกมาอย่างรวดเร็ว จากกระบวนการละลาย (Dissolution) หรือไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ในช่วงนี้ซีเมนต์เพสต์จะมีสภาพความเป็นด่างสูง ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดขึ้นในช่วงดังกล่าว จะให้อัตราความร้อนสูงและลดลงเร็วในช่วงเวลาสั้น ๆ ประมาณ 10 ถึง 20 นาทีแรก

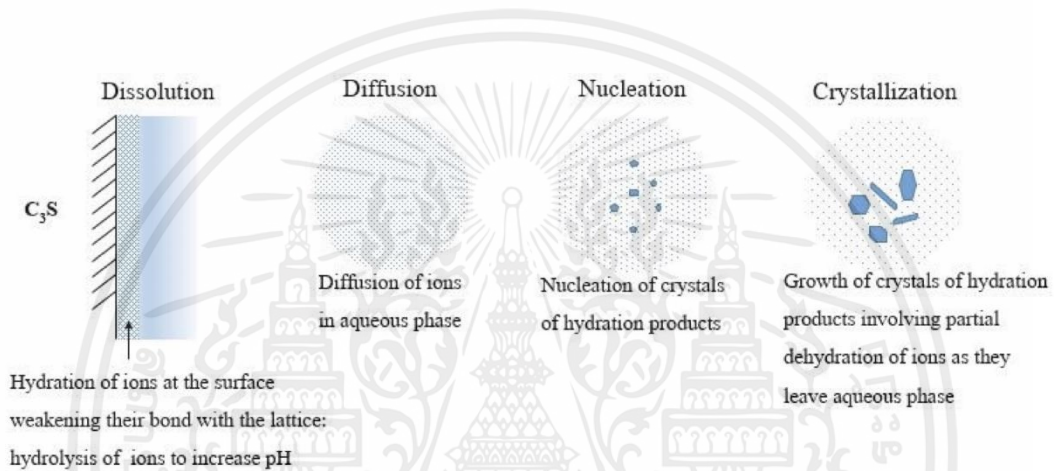
ในขั้นถัดมาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นนี้มีอัตราที่ช้ามากเนื่องจากผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ก่อตัวและคลุมผิวหน้าของอนุภาคปูนซีเมนต์ ชัดขวางไม่ให้น้ำเข้าทำปฏิกิริยาต่อ ทำให้ปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้าๆ ผ่านกระบวนการแพร่ (Diffusion) โดยซีเมนต์เพสต์ยังคงสภาพพลาสติกอยู่ เป็นเวลานานก่อนเกิดการก่อตัวช่วงต้น หรือ Initial Set ซึ่งเป็นกระบวนการก่อตัวของนิวเคลียส (Nucleation) เรียกช่วงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอย่างช้าๆ นี้ว่า ช่วงสงบนิ่ง (ขั้นที่ 2, Dormant period) อยู่ในช่วง 2 ถึง 4 ชั่วโมงหลังจากผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ

ต่อมาอุณหภูมิของปูนซีเมนต์เริ่มทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งมาจากน้ำที่ซึมผ่านชั้นฟิล์ม C-S-H เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบที่อยู่ภายใน ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นเรียกว่า ช่วงเร่งเกิด (ขั้นที่ 3, Acceleration Period) อยู่ในช่วง 4 ถึง 8 ชั่วโมงหลังจากผสม ในช่วงนี้ผลิตภัณฑ์ไฮเดรชันจะมีขนาดใหญ่เนื่องจากการขยายตัวของนิวเคลียสที่อยู่บนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เกิดการก่อตัวของผลึกอย่างต่อเนื่องมากขึ้น จนขยายตัวเข้าสู่ภายในอนุภาคซีเมนต์ และขยายออกตัวสู่บริเวณที่เคยเป็นสารละลายจนเกิดการเชื่อมประสานกันเป็น โครงข่าย ทำให้คอนกรีตเกิดการก่อตัวที่ระยะปลาย (Final set) เริ่มการแข็งตัวที่ระยะแรก (Early hardening)

ขณะเดียวกันชั้นฟิล์มของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเจล (C-S-H) ก่อตัวเป็นชั้นเลเยอร์หนามากขึ้นจากกระบวนการก่อตัวของผลึกอย่างต่อเนื่อง (Crystallization) กลายเป็นผนังป้องกันการซึมผ่าน (Diffusion barrier) ทำให้น้ำและไอออนแพร่ผ่านผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเข้าไปทำปฏิกิริยากับอนุภาค C_3S หรือ C_2S ได้ยาก ทำให้เกิดปฏิกิริยาช้าลงอีกครั้ง เป็นผลให้อัตราการคายความร้อนเริ่มลดลง เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงชะลอช้า (ขั้นที่ 4) เกิดขึ้นภายใน 18-36 ชั่วโมง และช้าลงมากขึ้นเมื่อชั้นเลเยอร์ของผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความหนาเพิ่มขึ้น การแพร่ผ่านชั้นเลเยอร์จึงเกิดขึ้นได้ยาก จนกระทั่งปฏิกิริยาเริ่มคงที่ (Steady State) ซึ่งเป็นช่วงที่การแพร่ผ่านอย่างช้าๆ เกิดขึ้นต่อเนื่อง เรียกว่า ช่วงคงที่ (ขั้นที่ 5)



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ของเวลาและความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (พีรพัฒน์ พาหุสุวัฒน์,2562)



รูปที่ 2.5 กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของอนุภาค C_3S (พีรพัฒน์ พาหุสุวัฒน์,2562)

2.1.5.3 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์

(1) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) มีปริมาณมากที่สุดในส่วนประกอบของซีเมนต์เพสต์ถึงร้อยละ 50 ถึง 70 โดยปริมาตรและอยู่ในรูปอนุภาคเล็กๆ มีขนาดประมาณเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ทุกมิติ และมีลักษณะเป็นผลึกที่หยาบมาก อัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลิเกตใน CSH ไม่คงที่ขึ้นอยู่กับอายุ อุณหภูมิ และปริมาณน้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยา

(2) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ ปริมาตรร้อยละ 20 ถึง 25 โดยปริมาตรเป็นผลึกรูปร่างหลายแบบ มีทั้งผลึกเล็กที่มีด้านเท่า ผลึกใหญ่ที่ลักษณะเป็นแผ่น และผลึกแบบยาว แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลง และการให้กำลังยังต่ำกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calciumsulfoaluminate) มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยปริมาตรแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calciumsulfoaluminate) หรือเอททริงไกต์ (Ettringite) เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายตัวเข้าไปในช่องว่างเอททริงไกต์ (Ettringite) จะพยายามดันส่วนที่ล้อมรอบอยู่ ออก ถ้าเกิดเอททริงไกต์ (Ettringite) ตอนที่ซีเมนต์เพสต์ยังไม่แข็งตัวก็จะเพิ่มคุณสมบัติด้านดีของซีเมนต์เพสต์ แต่ถ้าเกิดเอททริงไกต์ (Ettringite) หลังจากซีเมนต์เพสต์แข็งตัวแล้วก็จะเกิดรอยร้าวได้

(4) เม็ดปูนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปแล้วเม็ดปูนจะมีขนาดตั้งแต่ 1 ถึง 50 ไมโครเมตร และเป็นส่วนน้อยที่มีขนาดใหญ่กว่า 50 ไมโครเมตรขึ้นไป เม็ดปูนซีเมนต์ขนาดเล็กสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีและทำปฏิกิริยาได้หมด ขณะที่เม็ดปูนขนาดใหญ่ต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาถึงแม้ว่าปฏิกิริยาจะยังคงมีต่อไปและผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่เกิดขึ้นจะขยายเข้าสู่ช่องว่างที่เหลืออยู่ แต่เนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคมีจำกัด ดังนั้นเม็ดปูนที่ทำปฏิกิริยาไม่หมดก็ยังคงมีอยู่ในซีเมนต์เพสต์

(5) ช่องว่างในซีเมนต์เพสต์ ประกอบไปด้วยโพรงเล็กๆ ตั้งแต่ 0.0005 - 10 ไมโครเมตร โดยทั่วไปจะแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ โพรงของเจล (Gel Pore) และโพรงคาพิลลารี (Capillary Pore)

(ภัสดา ภู่วูล, 2558)

2.1.5.4 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ที่ได้ จะมีคุณสมบัติดีหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นหากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างเป็นระเบียบและเหมาะสม ก็จะทำให้คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ดีไปด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันมีดังนี้ (วิพล ไชยชนะ, 2562)

1. อายุของเพสต์ : ในช่วงแรกๆนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงสิ้นสุดของปฏิกิริยาไฮเดรชัน

2. องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ : สารประกอบหลักที่เป็นองค์ประกอบในปูนซีเมนต์ จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันแตกต่างกัน

3. ความละเอียดของปูนซีเมนต์ : ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดของเม็ดปูนซีเมนต์สูง(เม็ดเล็ก) จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นไปอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเม็ดปูนซีเมนต์ที่มีขนาดเล็กจะเพิ่มผิวสัมผัสให้กับน้ำมากขึ้น ดังนั้นจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้อย่างรวดเร็ว

4. อัตราส่วนน้ำกับปูนซีเมนต์ : ซึ่งมีผลในช่วงหลังของการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ถ้าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงหลังมีค่าลดลง จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นช้า

5. อุณหภูมิ : อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ถ้าอุณหภูมิสูงปฏิกิริยาไฮเดรชันก็เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่อุณหภูมิก็ไม่ควรสูงเกินไปเพราะจะทำให้ซีเมนต์เฟสแตก

6. สารหน่วงหรือสารเร่ง : จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นช้าหรือเร็วตามต้องการ

2.1.6 ปอซโซลาน (Pozzolan)

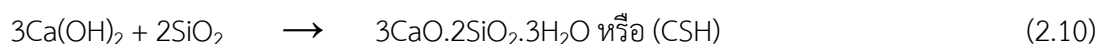
2.1.6.1 วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Materials)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan Material) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่มีเลย แต่เมื่ออบจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้น แล้วเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน

2.1.6.2 ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolan Reaction)

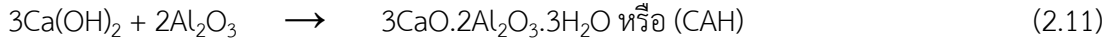
วัสดุปอซโซลานอาจมีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานหรือไม่ก็ได้ แต่ต้องทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) แล้วเกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) หรือ แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) กล่าวคือ เมื่อปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์นี้เองที่ทำปฏิกิริยากับซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่า แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามลำดับ ซึ่งสารประกอบที่ได้ทั้งสองนี้มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (pozzolanic reaction) สรุปเป็นสมการทางเคมีได้ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 (พรสุดา โภภูค่างพลู, 2563)

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นซิลิกา (SiO_2) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



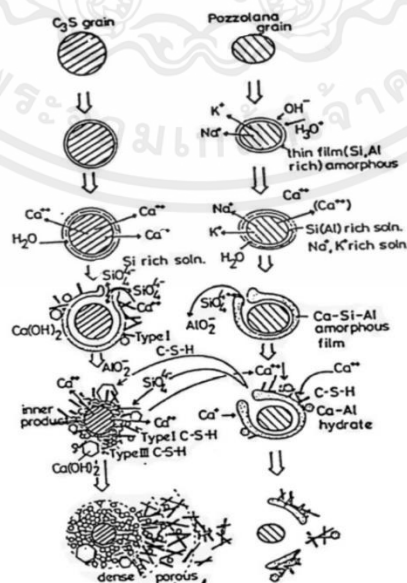
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบหลักทางเคมีเป็นอะลูมินา (Al_2O_3) ปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



2.1.6.3 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีวัสดุปอซโซลาน

จากรูปที่ 2.6 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และวัสดุปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปของเหลว แต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากวัสดุปอซโซลานโดยอาศัยการชนกัน และถูกดูดซับที่ไว้ที่ผิวของอนุภาคปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกา (CaO/SiO_2) สูง ในขณะที่บนผิวของวัสดุปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันแต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกาค่าต่ำ และมีความพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำ ผิวของสารปอซโซลานจะมีคุณสมบัติเป็นประจุบวก อันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ ที่ละลายตามมา เป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอนหรืออะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำ ให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO_2^-) ด้วย และเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นบนอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด (พรสุดา โภภูค่างพลู, 2563)



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกิดร่วมกับปฏิกิริยาปอซโซลานิก (พรสุดา โภภูค่างพลู, 2563)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทดสอบซีเมนต์เพสต์

2.2.1 การทดสอบหาความข้นเหลวปกติ (Normal Consistency)

เมื่อผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ จะเกิดปฏิกิริยาเคมี มีความร้อนเกิดขึ้น และได้วัสดุผสมที่มีสภาพข้นเหนียว ซึ่งเรียกว่าซีเมนต์เพสต์ หลังจากนั้นช่วงระยะเวลาหนึ่งซีเมนต์จะเริ่มก่อตัว และแข็งตัวในที่สุด ระยะเวลาในการก่อตัวของปูนซีเมนต์นี้เป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่ง ที่กำหนดขึ้นไว้เพื่อที่จะให้ทราบระยะเวลาที่จะต้องทำงานให้แล้วเสร็จ ก่อนซีเมนต์หรือคอนกรีตจะเริ่มก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งจะมีผลเกี่ยวข้องกับการเพิ่มกำลังของคอนกรีต

ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์มีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ผสมเปียกจะก่อตัวช้ากว่าซีเมนต์ผสมแห้ง ดังนั้นในการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวจึงกำหนดให้ทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่มีสภาพความข้นเหลว (Normal Consistency) เป็นมาตรฐานสากล โดยกำหนดว่าสภาพความข้นเหลวปกติคือสถานะที่ซีเมนต์เพสต์ยอมให้เข็มไวนแคต ขนาดมาตรฐานจมลง 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที

ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ ให้ได้สถานะความข้นเหลวปกติ โดยปกติ ปริมาณน้ำจะมีค่าประมาณ 25% ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

2.2.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมรวมกันน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีลักษณะนุ่มเหลวปั้นง่าย ถ้าปล่อยให้แห้งโดยไม่รบกวนในไม่ช้าซีเมนต์เพสต์จะสูญเสียความไม่คืนตัวและถึงสถานะที่ไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ โดยปราศจากการแตกหัก การเปลี่ยนสถานะนี้เรียกว่าการก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์

ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เริ่มก่อตัว หรือแข็งตัวไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ ปกติระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ จะแบ่งออกเป็น 2 ระยะเวลาคือ การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time)

การก่อตัวระยะต้น คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานไวนแคตได้ โดยเข็มไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์เลย 25 ม.ม. ในเวลา 30 วินาที

การก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักได้บ้าง

ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภท 1 – 5 จะต้องมีเวลาการก่อตัวระยะต้นไม่น้อยกว่า 45 นาที และไม่เกิน 8 ชั่วโมงสำหรับการก่อตัวระยะปลาย เมื่อวัดโดยใช้เครื่องมือไวนแคต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์จะผันแปรไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น ส่วนผสมของเนื้อปูนซีเมนต์ ความละเอียดของอนุภาค และความชื้นขณะทดสอบและปริมาณน้ำที่ใช้ผสม เป็นต้น

โดยทั่วไปการก่อตัวจะเร็วขึ้นเมื่ออนุภาคมีสูงชัน เพราะอนุภาคเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผสมมีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัว ด้วยเหตุนี้ในการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวจึงได้กำหนดให้ใช้ปริมาณน้ำเพื่อผสมปูนซีเมนต์ ให้ได้ซีเมนต์เพสต์ที่ภาวะมาตรฐานคงที่เสมอ เรียกภาวะนี้ว่า ความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำที่ต้องการที่จะทำให้เข็มโวลแคนดาขนาดมาตรฐานจมลง 10 มม.ภายในเวลา 30 วินาที ของการทดสอบตามมาตรฐานอเมริกัน

นอกจากนี้ ส่วนผสมและขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ยังมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวอีกด้วย ถ้าลดปริมาณของยิปซั่มลง ระยะเวลาการก่อตัวจะน้อยลง นั่นคือซีเมนต์เพสต์จะแข็งตัวเร็วขึ้น ปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดกว่าจะทำปฏิกิริยาทางเคมีเร็วขึ้นทำให้ก่อตัวเร็วขึ้นด้วย

2.3 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต เป็นคุณสมบัติหลักที่สำคัญของคอนกรีต เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพงาน เนื่องจากกำลังต้านทานแรงอื่นๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังต้านทานแรงอัด การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทำได้โดยการกดหรืออัดแท่งทดสอบรูปลูกบาศก์ ตามมาตรฐานอังกฤษ หรือรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานอเมริกัน ซึ่งบ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนดจนกระทั่งวิบัติ แล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ยมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการใช้งานซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต ได้แก่ คุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีต, อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน, การทำคอนกรีต, การบ่ม, การทดสอบกำลังอัด

2.3.1 คุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีต

(1) **ปูนซีเมนต์** เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะว่าปูนซีเมนต์แต่ละประเภท จะก่อให้เกิดกำลังของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ แม้ว่าจะเป็นปูนซีเมนต์ประเภทเดียวกัน แต่มีความละเอียดแตกต่างกันแล้ว อัตราการเพิ่มกำลังของคอนกรีตก็จะแตกต่างกันไปด้วย กล่าวคือ ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีความละเอียดมากก็จะให้กำลังสูง โดยเฉพาะหลังจากที่แข็งตัวไปแล้วไม่นาน

(2) **มวลรวม** มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเพียงเล็กน้อย เพราะมวลรวมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป มักมีความแข็งแรงมากกว่าซีเมนต์เพสต์ ยกเว้นกรณีคอนกรีตกำลังสูงซึ่งมีกำลังของซีเมนต์เพสต์สูงมากกว่าคอนกรีตทั่วไปมวลรวม

จึงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีต โดยมวลรวมหยาบที่เป็นหินย่อยซึ่งมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมหรือผิวหยาบ จะทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่ากรวดซึ่งมีผิวเรียบ ขนาดใหญ่สุดของมวลรวมก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน เพราะคอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่มีขนาดใหญ่จะต้องการปริมาณน้ำน้อยกว่ามวลรวมขนาดเล็ก เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากันดังนั้นคอนกรีตโดยทั่วไปที่ใช้มวลรวมขนาดใหญ่จึงมักให้กำลังดีกว่า ส่วนขนาดคละของมวลรวมจะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตในแง่ที่ว่า คอนกรีตที่ใช้มวลรวมที่ขนาดคละไม่เหมาะสม กล่าวคือ มีส่วนละเอียดมากเกินไปนั้น จะต้องการปริมาณน้ำมากกว่ามวลรวมที่มีส่วนคละที่ดี เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถเทได้เท่ากัน อีกทั้งยังก่อให้เกิดฟองอากาศแทรกตัวอยู่ในเนื้อคอนกรีตเป็นจำนวนมากกว่า ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงได้ นอกจากนี้ ความสะอาดของมวลรวมก็จะมีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน

(3) **น้ำ** มีผลต่อกำลังของคอนกรีตตามความใสและปริมาณของสารเคมีหรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ น้ำอุ่นหรือน้ำที่มีสารแขวนลอยปนอยู่จะทำให้กำลังของคอนกรีตต่ำลงซึ่งอาจจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและชนิดของสารแขวนลอยนั้น

(4) **สารผสมเพิ่ม** เช่น สารผสมเพิ่มประเภทสารลดน้ำและสารลดน้ำพิเศษ ชนิดและปริมาณมีผลต่อการลดน้ำในส่วนผสมคอนกรีตเมื่อควบคุมให้มีค่ายุบตัวเท่ากัน สารผสมเพิ่มประเภทนี้จะช่วยลดปริมาณน้ำในส่วนผสม ทำให้คอนกรีตมีกำลังสูงกว่าคอนกรีตโดยทั่วไปที่ไม่ใส่น้ำยา นอกจากนี้การใช้แร่ผสมเพิ่มและสารผสมเพิ่มชนิดอื่นๆ ก็มีผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีตแตกต่างกันตามชนิดและปริมาณของสารผสมเพิ่มชนิดนั้น ๆ เช่น ซิลิกาฟูม จะช่วยให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังในระยะต้นสูงขึ้น จึงนิยมใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง เป็นต้น

2.3.2 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตโดยตรง โดยเฉพาะอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังของคอนกรีตอย่างมาก ถ้าใช้ส่วนผสมคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า จะทำให้ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า

2.3.3 การทำคอนกรีต

(1) **การชั่งตวงวัสดุผสมคอนกรีต** หากใช้การตวงโดยปริมาตรจะมีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งส่วนผสมโดยน้ำหนัก ซึ่งหากชั่งตวงวัสดุผสมคอนกรีตผิดไปจะทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงได้

(2) **การผสมคอนกรีต** จะต้องผสมวัสดุทำคอนกรีตให้รวมเป็นเนื้อเดียวกันให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำมีโอกาสทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ได้อย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์กระจายแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างมวลรวมได้เต็มที่ ดังนั้นการผสมหากกระทำอย่างไม่ทั่วถึงจะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่คงที่ได้

(3) การลำเลียง, การเท, และการอัดแน่นคอนกรีต จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะหากคอนกรีตเกิดการแยกตัวในขณะที่ลำเลียง หรือเท จะมีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าไม่สม่ำเสมอ นอกจากนี้การทำให้คอนกรีตแน่นตัว หากทำได้ไม่เต็มที่ก็จะทำให้เกิดรูพรองขึ้นในเนื้อคอนกรีต มีผลทำให้กำลังของคอนกรีตมีค่าลดลงได้

2.3.4 การบ่ม

(1) **ความชื้น** จะมีอิทธิพลต่อกำลังของคอนกรีต เพราะเมื่อปูนซีเมนต์เริ่มผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างค่อยเป็นค่อยไป และซีเมนต์เพสต์จะมีกำลังเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ トラบใดที่ยังคงมีความชื้นอยู่ ถ้าซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตไม่มีความชื้นอยู่ คอนกรีตก็จะไม่มีการเพิ่มกำลังอีกต่อไป ดังนั้นเมื่อคอนกรีตเริ่มแข็งตัวจึงควรทำการบ่มด้วยความชื้นทันที ในทางปฏิบัติเราควรจะบ่มคอนกรีตให้นานที่สุด ส่วนการบ่มในห้องปฏิบัติการมักจะบ่มจนถึงอายุ 28 วัน

(2) **อุณหภูมิ** ถ้าหากอุณหภูมิสูงในขณะที่บ่ม จะทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังเร็วกว่าคอนกรีตที่ได้รับการบ่มในอุณหภูมิต่ำกว่า

(3) **เวลาที่ใช้ในการบ่ม** ถ้าหากสามารถบ่มคอนกรีตให้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาได้ยาวนานเท่าใด ก็จะได้กำลังของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

2.3.5 การทดสอบกำลังอัด

การควบคุมคุณภาพคอนกรีตสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะทำในรูปของการชักตัวอย่างคอนกรีตสดมาทำก้อนตัวอย่าง โดยถือว่ากำลังของก้อนตัวอย่างเป็นตัวแทนของคอนกรีตที่หล่อเป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตดังต่อไปนี้

(1) **รูปร่างและขนาดของตัวอย่างคอนกรีต** การใช้แท่งคอนกรีตที่ต่างรูปร่างหรือต่างขนาดกัน จะมีผลทำให้ค่ากำลังของคอนกรีตเกิดความแตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ อัตราส่วนความสูงต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างทดสอบคอนกรีต ก็มีผลต่อกำลังของคอนกรีตเช่นกัน

(2) **วิธีการทำตัวอย่างคอนกรีต** ตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับการอัดแน่นด้วยวิธีการกระทุ้งด้วยเหล็ก จะมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าวิธีการใช้เครื่องจี้เขย่า

(3) **ความชื้นในตัวอย่างคอนกรีต** ในขณะที่ทำการทดสอบ ถ้าหากแท่งทดสอบมีความชื้นก็จะให้ค่ากำลังที่ต่ำกว่าแท่งทดสอบที่แห้งกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4) **อัตราการกด** ในการทดสอบกำลังอัด ถ้าใช้อัตราการกดสูงจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงตามไปด้วย จึงควรใช้อัตราการกดตามมาตรฐานที่กำหนดไว้

(5) **เครื่องทดสอบ** น้ำหนักที่กดอย่างสม่ำเสมอตลอดพื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง จึงจะให้กำลังอัดที่ถูกต้อง ซึ่งจะเกิดได้ดังนี้

- ก้อนตัวอย่างต้องอยู่ตรงจุดกึ่งกลาง และแกนของก้อนตัวอย่างต้องอยู่ในแนวตั้ง
- แผ่นรองกดต้องอยู่ในแนวตั้งฉากกับแกนของก้อนตัวอย่าง
- แผ่นรองกดต้องเคลื่อนตัวได้เล็กน้อย
- แผ่นรองกดจะต้องเรียบเป็นระนาบ
- ถ้าต้องใช้วัสดุ Cap ตัวอย่าง ควรจะเลือกวัสดุที่มีกำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นใกล้เคียงกับของคอนกรีต

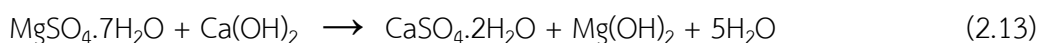
2.4 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

เกลือซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในน้ำใต้ดิน เช่น โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) อัจฉริยะทำลายของซัลเฟต ต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟต และความชื้น การทำลายของซัลเฟตจะไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้น และรุนแรงมากในกรณีที่อยู่ในสภาพเปียกสลับแห้ง โดยสารละลายจะค่อย ๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้ สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ซึ่งมีความเข้มข้นสูง และมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดีกว่าเกลือซัลเฟตอื่น ๆ เมื่อแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จากน้ำทะเลแพร่กระจายเข้ามาในโพรงหรือช่องว่างระหว่างคอนกรีตจะทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังต่อไปนี้ (จิเชียร ชาติ, 2560)

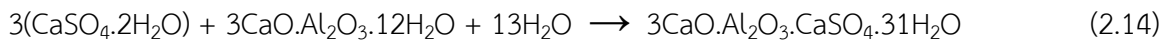
(1) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ได้สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ดังสมการที่ (2.12)



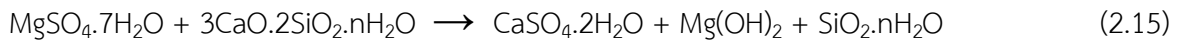
แมกนีเซียมซัลเฟตจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัม ดังสมการที่ (2.13)



แคลเซียมซัลเฟตหรือยิปซัมที่ได้ สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตได้เป็นแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต ดังสมการที่ (2.14)



นอกจากนี้ แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ปฏิกิริยานี้เป็นการดึงแคลเซียม (Decalcification) จาก C-S-H ได้สารประกอบใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟตแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ และซิลิกาเจล ดังสมการที่ (2.11)



แคลเซียมซัลเฟตที่เกิดขึ้นในสมการที่ 2.14 สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ดังสมการที่ 2.13 ได้อีก ในที่สุดแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ดังสมการที่ (2.16)

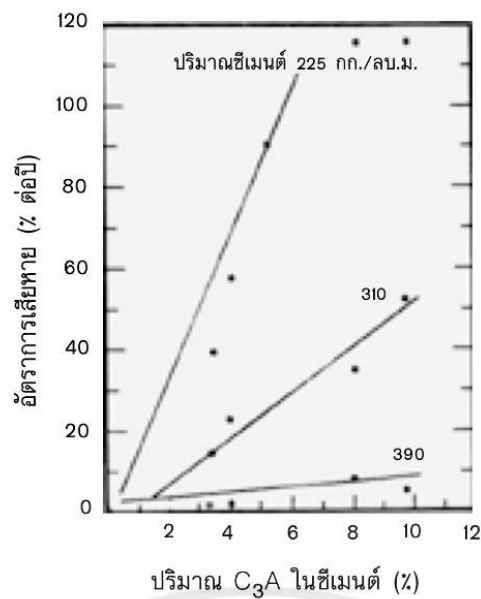


ยิปซัมที่เกิดตามสมการที่ (2.9) และ (2.11) และแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตที่เกิดตามสมการที่(2.8)และ (2.10) มีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าสารประกอบเดิม มีการขยายตัวทำให้มีปริมาตรมากขึ้น และเกิดแรงดันภายในคอนกรีตเป็นผลให้คอนกรีตแตกร้าวในที่สุด ส่วนซิลิกาเจลและแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเกิดตามสมการที่ (2.11) และ (2.12) เป็นสารที่ไม่แข็งแรงเท่ากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่สูญเสียไป ตามสมการที่ (2.11) ทำให้กำลังของคอนกรีตลดลง การลดปริมาณของ C_3A ให้น้อยลง จะทำให้ปริมาณของแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตลดลง ส่งผลให้ปริมาณการเกิดยิปซัม แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต และแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตลดลงตามไปด้วย จึงทำให้การกัดกร่อนของซัลเฟตลดลง ดังนั้น การใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A ต่ำ จึงสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตได้

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อน

การกัดกร่อนของซัลเฟตจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ 1.ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในซีเมนต์ 2. ปริมาณปูนซีเมนต์ ทั้ง 2 ปัจจัยนี้แสดงได้ดังกราฟรูปที่ 2.7 (นิตยา ใจทอง, 2559)

จากกราฟสามารถสรุปได้ว่า อัตราการเสียหายจะผันแปรโดยตรงกับปริมาณ C_3A ในซีเมนต์ยังมี C_3A มากเท่าใดอัตราการเสียหายจะมากขึ้นเท่านั้น และถึงแม้ว่าจะมีปริมาณ C_3A ต่ำเท่าใดก็จะมีผลต่อการป้องกันความเสียหายในกรณีที่ใช้ปริมาณซีเมนต์ในส่วนผสมต่ำ



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ C_3A กับอัตราการเสียหายที่ปริมาณซีเมนต์ในช่วงผสมต่างๆ (นิตยา ใจทอง, 2559)

2.5 ข้อมูลเกี่ยวกับแก้วบรรจุภัณฑ์

แก้ว เป็นวัสดุที่เกิดจากการหลอมส่วนผสมของสารอนินทรีย์ที่อุณหภูมิสูงเข้าด้วยกัน เมื่อส่วนประกอบต่างๆเกิดการหลอมจนเป็นน้ำแก้วที่อยู่ในสถานะของเหลวจะถูกนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปและทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้อะตอมหรือโมเลกุลของแก้วไม่มีเวลาในการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก (Non-crystalline solid) หรือเรียกว่า วัสดุอสัณฐาน (Amorphous materials) ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของแก้วตามการนำไปใช้ประโยชน์ (ในประเทศไทย) ออกเป็น 3 ชนิดหลัก คือ แก้วบรรจุภัณฑ์, กระจก และผลิตภัณฑ์อื่นๆของแก้ว

2.5.1 ชนิดของแก้ว (ฉันทพล เล่าห์รอดพันธุ์ , 2558)

การแบ่งประเภทของแก้ว สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่เรามักจะบอกประเภทของแก้วตามองค์ประกอบของมัน ดังนี้

(1) แก้วโซดาไลม์ (Soda-Lime Glass)

ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ ททราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ แก้วที่เป็นขวดแก้วน้ำ กระจก เป็นต้น สามารถทำให้เกิดสีต่างๆ ได้โดยการเติมออกไซด์ที่มีสีลงไป

(2) แก้วที่บอโรซิลิเกต (Borosilicate Glass) หรือ Pyrex

เป็นแก้วที่มีการเติมบอริก-ออกไซด์ ลงไป ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อน แก้วที่ได้สามารถนำไปใช้ทำเครื่องแก้ววิทยาศาสตร์ ทำภาชนะแก้วสำหรับใช้ในเตาไมโครเวฟ เป็นต้น

(3) แก้วตะกั่ว (Lead Glass) หรือแก้วคริสตัล เป็นแก้วที่มีสารผสมของตะกั่วออกไซด์ อยู่มากกว่า 24% โดยน้ำหนัก จะเป็นแก้วที่มีดัชนีหักเหสูงมากกว่าแก้วชนิดอื่น ทำให้มีประกายแวววาวสวยงาม และแกะสลักเป็นลวดลายต่างๆ ได้ ใช้ทำเครื่องแก้วที่มีราคาแพง

(4) แก้วโอ-ปอล (Opal Glass) เป็นแก้วที่มีการเติมสารบางตัว เช่น โซเดียมฟลูออไรด์ หรือแคลเซียมฟลูออไรด์ ทำให้มีการตกผลึก หรือการแยกเฟสขึ้นในเนื้อแก้ว ทำให้แก้วชนิดนี้มีความขุ่นหรือโปร่งแสง เนื่องจากสามารถหลอม และขึ้นรูปได้ง่ายจึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถทำให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้นเมื่อนำไปผ่าน ขบวนการอบ (Tempering) หรือการเคลือบ (Laminating)

(5) แก้วอะลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate Glass) มีอะลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากความร้อนต่ำ และมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (Softening Point) สูง พอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์

(6) แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-earth Alumino Silicate) มีส่วนผสมของแอมโมเนียมออกไซด์ หรือแบเรียมออกไซด์ ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่าและมีความทนทานต่อกรดและด่าง มากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

(7) กลาส-เซรามิกส์ (Glass-Ceramics) เป็นแก้วประเภทลิเทียมอะลูมิโนซิลิเกตที่มี TiO_2 หรือ ZrO_2 ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้ว ซึ่งอาจทำให้แก้วมีความทึบแสงหรือโปร่งใส ขึ้นกับชนิดของผลึก กลาส-เซรามิกส์จะทนทาน และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก สามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้ม หรือเป็นแผ่นบนเตาหุงต้มได้

2.5.2 ประเภทของบรรจุภัณฑ์แก้ว

บรรจุภัณฑ์ที่ทำจากแก้วเป็นบรรจุภัณฑ์ที่มีลักษณะใส สะอาด มองเห็นรูปลักษณ์และสีสันทนของผลิตภัณฑ์ภายใน และมีความปลอดภัยเพราะไม่ทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์ที่บรรจุ โดยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.501-2527 จะแบ่งประเภทของบรรจุภัณฑ์แก้วออกเป็น 4 ประเภทตามสภาพความเป็นต่างของแก้ว ดังนี้

(1) บรรจุภัณฑ์แก้วประเภท I หมายถึง แก้วบอโรซิลิเกต (แก้วที่มีโบรอนไตรออกไซด์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก) แก้วบอโรซิลิเกต (borosilicate glass) หรือ แก้วแข็ง (hard glass) เป็นแก้วอีกชนิดหนึ่งที่พบได้ทั่วไปในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากความแข็งแรงทนต่อการกระแทกได้ดี การทนความร้อนและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกะทันหัน (thermal shock) ได้ดี และความทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี รวมทั้งสารละลายเบส ในทางการค้าจะพบแก้วบอโรซิลิเกตที่ถูกนำมาใช้ในงานหลากหลาย เช่น กระจกของเตาอบ ฝามือสุกี้ กระจกครอบไฟรถยนต์ และกระจกครอบไฟส่องสว่างที่ใช้ภายในและภายนอกอาคาร สำหรับภายในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ ปีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่ บิวเรตต์ และขวดก้นกลม

แม้ว่าแก้วบอโรซิลิเกตจะทนทานต่อการกัดกร่อนของสารเคมีหลายชนิด แต่สารเคมีบางชนิดสามารถละลายแก้วบอโรซิลิเกตได้ เช่น กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กรดฟอสฟอริกร้อน ($\text{hot H}_3\text{PO}_4$) สารละลายเบสแก่ ดังนั้นไม่ควรเก็บสารเคมีเหล่านี้ในบรรจุภัณฑ์แก้วนานจนเกินไป

(2) บรรจุภัณฑ์แก้วประเภท II หมายถึง แก้วโซดาไลม์ (แก้วที่ทำจากโลมโซดา และทรายเป็นส่วนผสมหลัก) ที่ผ่านการปรับสภาพความเป็นต่างของผิวแก้วด้วยวิธีพิเศษ (special treatment) ทำให้ผิวแก้วหนาประมาณ 0.1-0.2 ไมครอนและมีสภาพใกล้เคียงเป็นกลาง เหมาะสำหรับบรรจุยาชนิดที่มีสภาพเป็นกรด (acid) และเป็นกลาง (neutral) โดยทั่วไปใช้ทำภาชนะบรรจุยาสำหรับฉีดที่มีความเป็นต่างได้ ถ้าผ่านการทดสอบแล้วว่ามี ความคงตัวเหมาะสม

(3) บรรจุภัณฑ์แก้วประเภท III หมายถึง แก้วโซดาไลม์ที่ผลิตจากวัตถุดิบพื้นฐานคือ ทรายแก้ว หินปูน และโซดาแอช โดยทั่วไปไม่ใช้ทำภาชนะบรรจุยาสำหรับฉีด ยกเว้นยาฉีดที่ทดสอบความคงตัวไว้แล้วว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อบรรจุยาชนิดที่ทำจากแก้วประเภทนี้ โดยแก้วประเภทนี้ได้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเบียร์ น้ำอัดลม สุรา ยา อาหาร เครื่องดื่มบำรุงกำลัง และเครื่องแก้ว (จาน ชาม แก้วต่างๆ) เป็นต้น

(4) บรรจุภัณฑ์แก้วประเภท NP หมายถึง แก้วโซดาไลม์ที่ใช้ทำภาชนะบรรจุยาที่ได้รับประทาน หรือยาที่ใช้ภายนอกเฉพาะที่ แต่ไม่ใช้ทำภาชนะบรรจุยาสำหรับยาฉีด

2.5.3 องค์ประกอบทางเคมีและวัตถุดิบในการหลอมแก้ว

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วจะมีผลต่อคุณสมบัติของแก้ว ดังต่อไปนี้

(1) SiO_2 แก้วที่มีปริมาณของ SiO_2 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนต่อความร้อนและสารเคมี แต่ทำการผลิตได้ยากเนื่องจากต้องใช้การหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้น และขึ้นรูปได้ยากเนื่องจากมีความหนืดสูง

(2) Na_2O แก้วที่มีปริมาณ Na_2O สูงจะหลอมเหลวที่อุณหภูมิต่ำ เปราะแตกง่าย และไม่ทนต่อสารเคมี ถ้ามีปริมาณ Na_2O สูงมากๆ จะสามารถละลายน้ำได้

(3) K_2O ช่วยให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

(4) CaO , MgO หรือ BaO จะช่วยในการขึ้นรูป ทำให้แก้วคงตัว (set) เร็วขึ้นเมื่อเย็นลง และเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ MgO มากกว่า CaO จะทำให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

(5) Al_2O_3 แก้วที่มีปริมาณ Al_2O_3 สูง จะทำให้มีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6) B_2O_3 แก้วที่มีสารประกอบพวก Boron เป็นองค์ประกอบ (Borosilicate) จะมีความคงทนต่อกรดต่าง และทนต่อความร้อน เนื่องจากจะทำให้สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้

(7) PbO แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead Glass) เนื้อแก้วใสวาวเนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูงมีความอ่อน (Soft) ไม่แข็งกระด้าง ง่ายต่อการเจียรระไน เวลาเคาะมีเสียงกังวาน

(8) Fe_2O_3 ช่วยประหยัดเชื้อเพลิงในขณะหลอม แต่จะทำให้เนื้อกระจกใส มีสีค่อนข้างเทาเขียว

(9) ออกไซด์อื่นๆ หากต้องการให้แก้ว หรือกระจกมีสีอื่นต่างๆ สามารถเติมสารนอกเหนือจากส่วนผสมข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ออกไซด์ที่ผสมเพื่อให้แก้วมีสีอื่นต่างๆ (ณัฐพล เล่าห์รอดพันธุ์ , 2558)

SiO_2	Silica sand
Na_2O	Soda ash (Na_2CO_3), Salt cake (Na_2SO_4)
K_2O	Feldspar (เป็นแร่พวก Alumino silicate ที่มี Na, K เจือปน)
CaO	Dolomite (เป็นแร่พวก carbonate ของ Mg, Ca) , Lime stone
MgO	Dolomite
Al_2O_3	Feldspar
Fe_2O_3	Impurities

ตารางที่ 2.6 แหล่งวัตถุดิบซึ่งเป็นที่มาขององค์ประกอบทางเคมีต่างๆในแก้ว

(ณัฐพล เล่าห์รอดพันธุ์ , 2558)

Chromium oxide (Cr_2O_3)	สีเขียว
Cobalt oxide (CoO)	สีน้ำเงิน
Urenium (U)	สีเหลือง
Nickle (Ni)	สีน้ำตาล
Carbon-Sulfur-Iron (C-S-Fe)	สีอำพัน
Manganese (Mn)	สีชมพู

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. รายงานผลการวิจัยการพัฒนาสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ปอซโซลานโดยมีน้ำยาลดน้ำยาเป็นสารผสมเพิ่ม
2. รายงานวิจัยการศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟูมที่อยู่ใต้อุณหภูมิสูง
3. รายงานวิจัยการต้านซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูน
4. โครงการวิจัยเรื่องความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี
5. โครงการวิจัยเรื่องผลของต่างเร่งปฏิกิริยาต่อสมบัติของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน
6. รายงานวิจัยเรื่องการนำเศษวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์กลับมาใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์สมรรถนะสูง
7. รายงานวิจัยเรื่องการผลิตอิฐมอญซีเมนต์ผสมซีเถ้าแกลบ โดยใช้น้ำยาลดน้ำยาเป็นตัวประสาน
8. รายงานวิจัยเรื่องผลกระทบของยูเรียต่อสมบัติคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบ
9. รายงานวิจัยเรื่องผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบ
10. รายงานวิจัยเรื่องการศึกษาแนวทางการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาโดยใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรม

บทที่ 3

วิธีศึกษาและวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาและวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุที่ใช้ในการวิจัย สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ รายละเอียดวิธีการทดสอบ วัตถุประสงค์ในการทดสอบ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ และลำดับขั้นตอนในการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 งานโครงสร้างตราทีพีโอ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

- 2) ฝุ่นแก้ว : นำขยะขวดเปียร์มาใช้ในการทำเป็นฝุ่นแก้ว โดยการใช้แปรงเหล็กขัดตราสินค้าที่ติดอยู่ตรงขวดเปียร์ออก ตามด้วยทำความสะอาดขวดเปียร์ด้วยน้ำแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาทีเสร็จแล้วจึงใช้ค้อนทุบขวดเปียร์ให้เป็นเศษแก้ว จากนั้นใช้โรงสีลูกกลิ้งบดเศษแก้ว ให้เป็นฝุ่นแก้ว (ขนาดอนุภาค $< 0.2\text{ mm}$) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ฝุ่นแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) น้ำ : ใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

4) สารละลายซัลเฟต : สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

3.2 สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.3 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

รายละเอียดการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบหาค่าความชันเหลวกปกติ และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว และขั้นตอนที่ 4 การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว ได้แก่ การทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกักร้อนของซัลเฟต การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกักร้อนของซัลเฟต ซึ่งรายละเอียดการทดสอบของแต่ละขั้นตอนได้แสดงในลำดับต่อไป

3.4 การทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว (ASTM C 136)

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาขนาดคละของฝุ่นแก้ว โดยใช้ตะแกรงมาตรฐานสำหรับหาค่าพิกัดความละเอียด

(Fineness Modulus)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 4, 8, 16, 30, 50, 100 นิ้ว และถาดรอง
- 2) เครื่องเขย่าชนิดมอเตอร์มือหมุน
- 3) ตาชั่งใหญ่ ที่มีความละเอียดถึง 0.1 % ของน้ำหนักที่ชั่งทั้งหมด
- 4) เตาอบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

ทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดคละ

ขั้นตอนที่ 1 : เตรียมฝุ่นแก้วสำหรับทดสอบตรวจสอบก่อนว่าชื้นหรือไม่ ปกติควรเป็นฝุ่นแก้วที่แห้งหากชื้นเกินไปควรอบเสียก่อน

ขั้นตอนที่ 2 : เตรียมชุดของตะแกรงด้วยการทำความสะอาด ไม่ให้มีเศษฝุ่นผงค้างอยู่ในช่อง แล้วชั่งน้ำหนักตะแกรงทุกขนาดและบันทึกไว้ พร้อมกับจัดเรียงซ้อนตามลำดับโดยถาดรองอยู่ล่างสุด

ขั้นตอนที่ 3 : ค่อยๆ เทฝุ่นแก้วที่เตรียมพร้อมไว้แล้วลงในชุดตะแกรง ปิดฝาให้สนิทแล้วนำไปเข้าเครื่องเขย่า จั๋วเวลาประมาณ 10 นาที

ขั้นตอนที่ 4 : ถึงขั้นตอนนี้ฝุ่นแก้วที่มีขนาดเม็ดต่างๆ ก็จะถูกแยกไปอยู่ในตะแกรงขนาดต่างๆ ดังนั้นให้นำตะแกรงที่มีฝุ่นแก้วค้างอยู่ในแต่ละตะแกรงไปชั่งและจดบันทึกไว้ แล้วคำนวณหาค่าพิสัยความละเอียด

3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี จะเป็นการทดสอบแยกระหว่างฝุ่นแก้วกับปูนซีเมนต์ โดยที่มีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพดังนี้ ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความหนาแน่น ปริมาณน้ำที่ดูดซับ ปริมาณความชื้นสูงสุด ลักษณะพื้นผิวของอนุภาค ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) และการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีคือ ออกไซด์หลักและออกไซด์รอง ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF)

3.6 การทดสอบหาความชื้นเหลือปกติ (ASTM C 187)

วัตถุประสงค์

เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์เพสต์เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นในการนำไปใช้ในงานประเภทต่างๆ ได้ต่อไป

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) อุปกรณ์ไวแคท (Vicat Apparatus) : ประกอบด้วยโครงโลหะโค้ง มีแกนสามารถเลื่อนขึ้นลงได้ในแนวตั้ง โดยแกนหนักประมาณ 300 กรัม ปลายทั้งสองของแกนมีเข็มที่ขนาดต่างกันสามารถถอดเปลี่ยนได้ ปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Plunger มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร และปลาย Needle มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และยาว 50 มิลลิเมตรเช่นเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีกรวยกลมสำหรับใส่ปูนซีเมนต์ทำด้วยวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ ขอบบนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6 เซนติเมตร และขยายโตขึ้นที่ขอบล่าง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 7 เซนติเมตร ความสูงของกรวย 4 เซนติเมตร เวลาใช้งานกรวยวางบนแผ่นกระจกใสขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัสอีกทีหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ไวแคท

- 2) ตาชั่ง ที่มีความละเอียดถึง 0.1 กรัม
- 3) กระบอกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
- 4) นาฬิกาจับเวลา
- 5) เกรียงเหล็ก
- 6) ถาด
- 7) ถุงมือยาง
- 8) แผ่นกระจก ขนาดประมาณ 100 x 100 มิลลิเมตร

การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์ผสมปูนแก้ว

ทำการเตรียมซีเมนต์ผสมปูนแก้ว โดยใช้อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ด้วยปูนแก้ว ตามตารางที่ 3.1 และอัตราส่วนน้ำเริ่มต้นเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยปูนแก้ว

ลำดับ	สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสม (%)	
		ปูนซีเมนต์	ปูนแก้ว
1	C100GD0	100	0
2	C80GD20	80	20
3	C60GD40	60	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ที่ในการทดลอง

C หมายถึง ปริมาณร้อยละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Cement)

GD หมายถึง ปริมาณร้อยละของฝุ่นแก้ว (Glass Dust)

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ของตัวอย่างการทดสอบ เช่น ตัวอย่าง C60GD40 คือมีปริมาณอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ร้อยละ 60 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณอัตราส่วนของฝุ่นแก้วร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 1 : เนื่องจากการทดสอบหาความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์นั้น จุดสำคัญคือผู้ทดสอบต้องการทราบว่า จะต้องใช้ปริมาณน้ำในสัดส่วนเท่าไรจึงจะพอดี ซึ่งซีเมนต์แต่ละชนิดจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปปริมาณน้ำที่เหมาะสมจะอยู่ราว 25 - 35 เปอร์เซ็นต์ เทียบกับน้ำหนักซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้ว ดังนั้นการเริ่มต้นใส่น้ำควรเริ่มที่ปริมาณน้ำน้อยๆ ก่อน แล้วจึงจะเพิ่มหรือลดครั้งละประมาณ 1 - 5 เปอร์เซ็นต์ จนกว่าจะได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนที่ 2 : การผสมซีเมนต์กับน้ำเพื่อให้เป็นเพสต์สำหรับทดสอบนั้น ขึ้นอยู่กับเวลาในการผสมซึ่งสำคัญมาก เริ่มด้วยการนำซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้วตามอัตราส่วนผสมที่แสดงในตารางที่ 3.2 ใส่ลงในภาชนะที่ไม่วัดซีเมนต์ และเกลี่ยเป็นกองให้เข้ากัน แล้วทำเป็นแอ่งตรงกลาง หลังจากนั้นเทน้ำที่เตรียมไว้ลงในแอ่ง และเกลี่ยซีเมนต์รอบๆ เข้ามารวมในแอ่ง โดยพยายามรักษาเวลาภายใน 30 วินาที และปล่อยซีเมนต์ให้ดูตัวจนทั่วอีกประมาณ 30 วินาที

ขั้นตอนที่ 3 : จากนั้นจึงเริ่มขั้นตอนของการคลุกเคล้าซีเมนต์ซึ่งควรสวมถุงมือยาง ด้วยการขย่ำส่วนผสมแรง ๆ ประมาณ 1 นาที 30 วินาที และปั่นให้เป็นลูกกลมๆ โยนลูกปูนไปมาระหว่างมือทั้งสองข้าง ประมาณ 5 - 6 ครั้ง โดยพยายามรักษาระยะห่างของมือทั้งสองข้างไว้ประมาณ 15 เซนติเมตร

ขั้นตอนที่ 4 : อัดลูกปูนในแบบกรวยของอุปกรณ์ไวแคทให้แน่น อาจเขย่าแบบเล็กน้อยเพื่อไล่ฟองอากาศออก แล้วจึงปาดผิวหน้าปูนให้เรียบและนำมาวางบนแท่น

หมายเหตุ : ข้อควรระวังเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มแรก หลังจากเทน้ำใส่ลงในแอ่ง จนกระทั่งนำซีเมนต์ที่คลุกเคล้าเป็นเพสต์มาวางบนแท่น ควรใช้เวลาระหว่าง 3 ถึง 5 นาทีเท่านั้น

การทดสอบหาค่าความชื้นเหลว

ขั้นตอนที่ 1 : จากขั้นตอนการเตรียมซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว ให้เลื่อนแบบกรวยที่อัดลูกปูนเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ไปบนแท่นรองของอุปกรณ์ไวแคท และเลื่อนกึ่งกลางของกรวยให้ตรงกับแนวของแท่งเหล็ก

ขั้นตอนที่ 2 : ปรับแท่งเหล็กโดยให้ด้าน plunger ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร เลื่อนลงมาแตะผิวหน้าของปูนในแบบกรวย แล้วลือด้วยสกรู จากนั้นปรับเข็มบนหน้าปัดให้อยู่ที่ตำแหน่ง 0

ขั้นตอนที่ 3 : คลายสกรูเพื่อให้ปลาย plunger จมลงในปูนด้วยน้ำหนักตัวมันเอง แล้วอ่านค่าบนหน้าปัดหลังจากปล่อยให้เข็มจมลงโดยอิสระเป็นเวลา 30 วินาที

ขั้นตอนที่ 4 : ความชื้นเหลือของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว ที่เหมาะสมจะอยู่ที่ระยะจมของปลาย plunger ในปูนเท่ากับ 10 ± 1 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 5 : ในการทดสอบหากระยะจมไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบซ้ำหลายๆ ครั้งด้วยการเพิ่มอัตราส่วนของน้ำทุกครั้ง โดยแต่ละครั้งให้เตรียมตัวอย่างใหม่เสมอ พร้อมกับทำความสะอาดปลาย plunger ให้เรียบร้อยก่อนปล่อยจมลงในปูน จนกระทั่งได้ค่าที่สามารถจะนำมาวาดกราฟระหว่างระยะจมเทียบกับอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้ว หลังจากนั้นทำการอ่านค่าอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้ว ที่ระยะจมเท่ากับ 10 ± 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความชื้นเหลือปกติ

ลำดับ	สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสม						จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
		ปูนซีเมนต์		ฝุ่นแก้ว		น้ำ		
		%	กรัม	%	กรัม	%	กรัม	
1	C100GD0	100	800	0	0	23	184	1
						24	192	1
						25	200	1
2	C80GD20	80	640	20	160	23	184	1
						22	176	1
						21	168	1
3	C60GD40	60	480	40	320	21.5	172	1
						21	168	1
						20	160	1
รวม								9

3.7 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว (ASTM C 191)

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวหลังจากที่เป็นซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) อุปกรณ์ไวแคท (Vicat Apparatus)
- 2) ตาชั่ง ที่มีความละเอียดถึง 0.1 กรัม
- 3) กระจกตวงขนาด 100 มิลลิลิตร
- 4) นาฬิกาจับเวลา
- 5) เกรียงเหล็ก
- 6) ถาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7) ถูงมีอย่าง

8) แผ่นกระจก ขนาดประมาณ 100 x 100 มิลลิเมตร

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อได้ค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแล้ว ให้ทำการทดสอบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. ทำการเตรียมซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วตามที่ออกแบบ และให้นำไปใส่ในแบบกรวย จากนั้นให้เลื่อนกึ่งกลางของแบบกรวยไปตรงกับแนวของแท่งเหล็ก

ขั้นตอนที่ 2. ปรับแท่ง B โดยให้ก้าน Needle ซึ่งมีขนาดพื้นที่หน้าตัดประมาณ 1 ตารางมิลลิเมตร เลื่อนลงมาสัมผัสที่ผิวหน้าของปูนที่บรรจุในแบบกรวย แล้วล๊อคไว้ด้วยสกรู จากนั้นจึงปรับเข็มบนหน้าปัดให้อยู่ในตำแหน่ง 0 แล้วทิ้งตัวอย่างไว้เฉยๆ โดยไม่รบกวน 30 นาที

ขั้นตอนที่ 3 : เมื่อครบเวลาดังกล่าวแล้ว จึงคลายสกรู เพื่อปล่อยให้ปลายเข็มจมลงในซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว และอ่านระยะการจมของเข็มเมื่อเวลาผ่านไป 30 วินาที

ขั้นตอนที่ 4. ระยะเวลาของการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วนั้น จะนับตั้งแต่เวลาเริ่มผสมจนกระทั่งถึงเวลาที่เข็มจมลงในซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วเป็นระยะ 25 ± 2 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 5 : เนื่องจากการทดสอบจำเป็นต้องทำซ้ำเรื่อยๆ เพราะไม่สามารถที่จะทราบเวลาที่แน่นอนในการทำให้เข็มจมได้ระยะตามต้องการ จึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ผ่านไป (Elapsed) กับระยะจม (Penetration) เพื่อนำไปวาดกราฟหาค่าที่แน่นอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 6 : ในการทดสอบซ้ำให้ย้อนกลับไปขั้นตอนที่ 2 และ 3 โดยทำการทดสอบทุกๆ 15 นาที โดยแต่ละครั้งค่อยๆ หมุนกรวยให้เปลี่ยนไปจากตำแหน่งเดิมที่เข็มจมไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร และเข็มควรอยู่ห่างจากขอบกรวยไม่น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร

ขั้นตอนที่ 7 : สำหรับระยะเวลาของการก่อตัวขั้นปลายคือ เวลารวมทั้งหมดจนกระทั่งปลายเข็มไม่สามารถจมลงไปในซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วได้

หมายเหตุ : มาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 1 หรือ ASTM C150 กำหนดไว้ว่าสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต้องมีการก่อตัวระยะต้นไม่น้อยกว่า 45 นาทีและการก่อตัวระยะปลายไม่มากกว่า 375 นาที

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

ลำดับ	สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสม			จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
		ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ฝุ่นแก้ว (กรัม)	น้ำ (กรัม)	
1	C100GD0	800	0	192	1
2	C80GD20	640	160	176	1
3	C60GD40	480	320	172	1
รวม					3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

วัตถุประสงค์

เพื่อทดสอบหากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้ว โดยการหล่อก้อนทดสอบรูปลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เพื่อเปรียบเทียบความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นหรือที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากปริมาณน้ำที่ผสมและระยะเวลาของการบ่มด้วยน้ำกับการบ่มด้วยสารละลายซิลิเกต

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) เครื่องผสมมอร์ต้าตามมาตรฐาน ASTM C 305
- 2) แบบหล่อลูกบาศก์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร ทำด้วยวัสดุที่ซีเมนต์ไม่ยึดเกาะ
- 3) เกรียงเหล็ก
- 4) ผ้า
- 5) กระดาษทราย
- 6) หลอดแก้วกระทุ้ง หรือวัสดุอื่นที่ไม่ดูดซึมน้ำ ไม่สึกหรือเมื่อเสียดสีและไม่เปราะหักง่าย อาทิ แท่งยางแข็ง ไม้ที่มีขนาดหน้าตัดประมาณ 13×25 เซนติเมตร และมีความยาวประมาณ 120 ถึง 150 มิลลิเมตร หน้าตัดปลายที่ใช้กระทุ้งต้องตั้งฉากกับแกนยาวของแท่ง
- 7) เครื่องทดสอบกำลังอัด อาจเป็นแบบไฮดรอลิกหรือแบบเกลียวหมุนโยกด้วยมือที่สามารถอ่านค่าความละเอียดได้ถึง ± 0.01 หรือเครื่อง Universal Testing Machine ก็ได้

การทดสอบหากำลังรับแรงอัด

ขั้นตอนที่ 1 : เมื่อได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมแล้ว ให้เตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วใหม่ ตามอัตราส่วนที่ได้ออกแบบไว้ โดยที่การเตรียมตัวอย่างด้วยเครื่องผสมมอร์ต้า มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เทน้ำลงไปในห้องผสมทั้งหมด จากนั้นให้เทซีเมนต์ตามลงไปแล้วเปิดสวิชต์เดินเครื่องด้วยความเร็วต่ำ 140 ± 5 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- เดินด้วยความเร็วเท่าเดิมต่ออีก 30 วินาที พร้อมเทฝุ่นแก้วลงไปในห้องผสมอย่างช้าๆให้หมด
- จากนั้นให้หยุดเครื่อง และเปลี่ยนเป็นความเร็วปานกลาง 285 ± 10 rpm แล้วเดินเครื่องทิ้งไว้ 1 นาที
- หยุดเครื่องอีกครั้ง เพื่อพักซีเมนต์มอร์ต้าไว้ 90 วินาที โดยที่ภายใน 15 วินาทีแรกให้รีบปาดส่วนที่เลอะข้างๆห้องผสมลงไปให้หมด พร้อมทั้งเกลี่ยส่วนผสมกันหม้อ แล้วปิดฝา
- เมื่อครบเวลาพัก จึงเดินเครื่องต่อด้วยความเร็วปานกลางเท่าเดิมต่อไปอีก 30 วินาที

ขั้นตอนที่ 2 : บรรจุในแบบหล่อ หลังจากชโลมน้ำมันในช่องแบบจนทั่วแล้ว จึงใส่ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของความสูงแบบหล่อ ระยะเวลาเสร็จสิ้นถึงจุดนี้ ควรใช้เวลาไม่เกิน 2 นาที 30 วินาที จากนั้นให้ใช้แท่งกระทุ้งมาตรฐาน โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบๆ ละ 8 ครั้ง รวมได้ 32 ครั้งภายในเวลา 10 วินาที

ขั้นตอนที่ 3 : จากนั้นใส่ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วลงในแบบที่เหลือจนเต็ม และกระทุ้งอีก 32 ครั้ง ภายในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งเป็น 4 รอบเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนที่ 4 : ต่อมาใช้เกรียงปาดผิวหน้าให้เรียบ โดยปาดครั้งเดียว จากนั้นแต่งหน้าซีเมนต์เพสต์ให้เรียบ โดยการใช้เกรียงปาดในแนวตั้งฉากกับหน้าตัดแบบ ตามด้วยขยับเกรียงไปมาเช่นเดียวกับการเลื่อย จะทำให้ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วมีความเรียบมากขึ้น จากนั้นให้ใช้ผ้าชุบน้ำพอหมาดและตั้งทิ้งไว้เฉยๆ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงค่อยถอดแบบ แล้วนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

ขั้นตอนที่ 5 : ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 – 4 จำนวน 18 ครั้งต่อหนึ่งอัตราส่วนผสม จำนวนตัวอย่างที่บ่มจะมีระยะเวลาที่กำหนด ดังนี้ 7, 14, 28 วัน วันละ 6 ตัวอย่าง ตามตารางที่ 3.4

ขั้นตอนที่ 6 : นำตัวอย่างของขั้นตอนที่ 5 มาอย่างละ 6 ตัวอย่าง มาบ่มน้ำตามระยะเวลาที่กำหนด

เมื่อครบกำหนดการบ่มน้ำแล้ว ให้นำตัวอย่างมาทำความสะอาดเช็ดผิวหน้าให้แห้งและเรียบก่อน จึงค่อยนำไปทดสอบการรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 จำนวนละ 3 ตัวอย่างของแต่ละระยะเวลาในการบ่ม พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงอัดสูงสุด

ขั้นตอนที่ 7 : นำตัวอย่างของขั้นตอนที่ 6 ที่ผ่านการบ่มน้ำครบตามระยะเวลาที่กำหนดมาอย่างละ 3 ตัวอย่าง มาทำความสะอาดเช็ดผิวให้แห้ง แล้ววัดขนาดและน้ำหนักก่อน จึงค่อยนำไปบ่มต่อด้วยสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตในระยะเวลาที่กำหนด โดยที่สัดส่วนผสมน้ำประปา 1 ลิตรต่อ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) 42.36 กรัม

ขั้นตอนที่ 8 : เมื่อขั้นตอนที่ 7 ครบกำหนดการบ่มแล้ว ให้ทำความสะอาดเช็ดผิวให้แห้งและเรียบ แล้ววัดขนาดและน้ำหนักหลังบ่ม ก็จะได้การเปลี่ยนแปลงขนาดและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกักตัวของซัลเฟต หลังจากนั้นให้นำตัวอย่างไปทดสอบการรับแรงอัด ตามมาตรฐาน ASTM C 109 พร้อมทั้งบันทึกค่าแรงอัดสูงสุด

หมายเหตุ : การทดสอบรับแรงอัดของก้อนตัวอย่าง ตัวอย่างจะต้องมีผิวหน้าที่เรียบ และให้วางตัวอย่างลงบนกึ่งกลางแป้นทดสอบ แล้วเดินเครื่องทดสอบเพิ่มแรงอัดอย่างสม่ำเสมอกระทั่งตัวอย่างแตก เวลาที่นับจากการเริ่มให้แรงอัดในก้อนตัวอย่างจนกระทั่งแตกจะต้องอยู่ภายในช่วงเวลา 20 - 80 วินาที

ขั้นตอนที่ 9 : การคำนวณหาค่ากำลังรับแรงอัด (Compression Strength) ของซีเมนต์เพสต์ สามารถหาได้จากสมการ

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย f_c = กำลังรับแรงอัดประลัย มีหน่วยเป็น ปอนด์/ตารางนิ้ว หรือ กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร

P = แรงอัด มีหน่วยเป็น ปอนด์ หรือ กิโลกรัม

A = พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่าง มีหน่วยเป็น ตารางนิ้ว หรือ ตารางเซนติเมตร

โดยให้คิดจากขนาดเดิมคือ 5×5 เซนติเมตร แต่หากหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบจริงคลาดเคลื่อนเกินกว่า 1.5% ให้ใช้พื้นที่หน้าตัดของแท่งตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบตามระยะเวลาในการบ่ม

ลำดับ	สัญลักษณ์	ระยะเวลาบ่ม (วัน)	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ (ก้อน)	
			บ่ม H ₂ O	บ่ม MgSO ₄ ต่อจากบ่ม H ₂ O
1	C100GD0	7	3*	3***
		14	3*	3***
		28	3*	3***
2	C80GD20	7	3*	3***
		14	3*	3***
		28	3*	3***
3	C60GD40	7	3*	3***
		14	3*	3***
		28	3*	3***
รวม			27	27
			54	

หมายเหตุ : * = ทดสอบการรับกำลังอัด

** = ทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกักร้อนของซัลเฟต

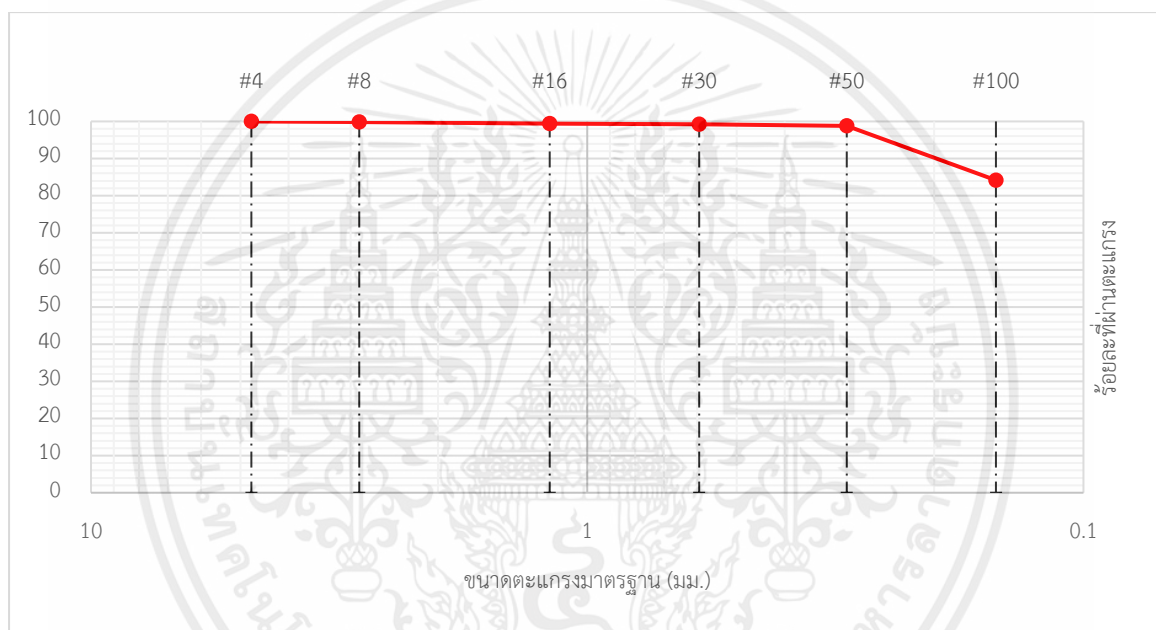
*** = ทดสอบ * และ **

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว

คัดเลือกเศษแก้วโดยเลือกใช้ขวดแก้วสีชาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า แล้วนำไปบดด้วยหม้อบดและทำการอบแห้งด้วยตู้อบ จากนั้นทำการหาขนาดคละของมวลละเอียดของฝุ่นแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่าร้อยละที่ผ่านตะแกรงกับขนาดตะแกรงมาตรฐาน

4.2 คุณสมบัติทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมี

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแก้ว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

จากการศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะศึกษาถึงความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความหนาแน่น ปริมาณน้ำที่ต้องการ และปริมาณความชื้นสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

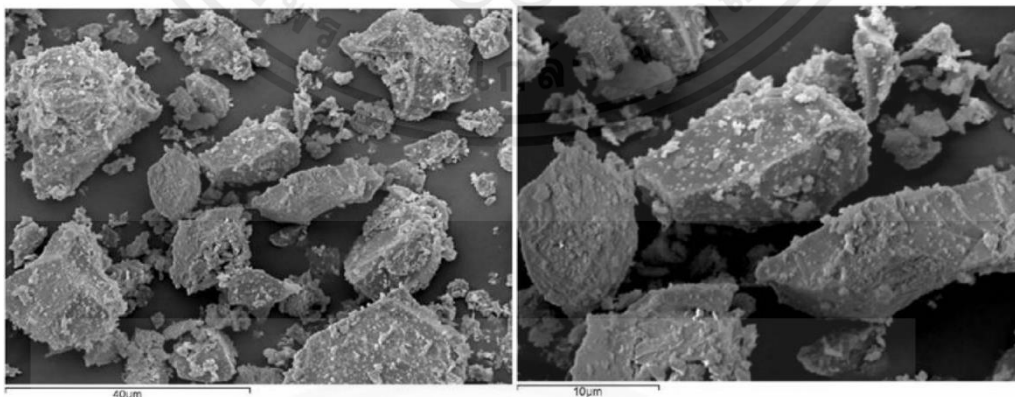
คุณสมบัติทางกายภาพ	ฝุ่นแก้ว	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ความถ่วงจำเพาะ	2.52	3.15
พื้นที่ผิวจำเพาะ (cm ² /g)	773	3566
ความหนาแน่น (kg/L)	958.7	1000
ปริมาณน้ำที่ต้องการ (%)	98.9	100
ปริมาณความชื้นสูงสุด (%)	-	0.19

(ภัสดา พาหุล, 2558)

4.2.2 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผง

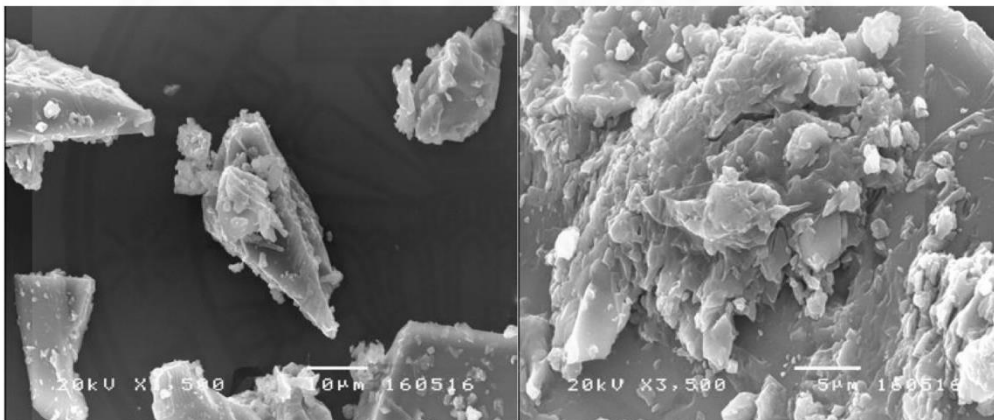
ลักษณะอนุภาคฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้เทคนิค

(Scanning Electron Microscope : SEM) จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า ตามลำดับพบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมส่วนฝุ่นแก้วมีลักษณะเป็นเกล็ดคมแหลมเป็นรูปทรงไม่แน่นอนมีพื้นผิวขรุขระและมีขนาดเล็กใหญ่คละกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งลักษณะรูปร่างจะมีผลในด้านปริมาณความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์ (ภัสดา พาหุล, 2558)



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคฝุ่นแก้วที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า

4.2.3 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเครื่องมือ X - Ray Fluorescence (XRF) พบว่าฝุ่นแก้วมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 73.4 และมีองค์ประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

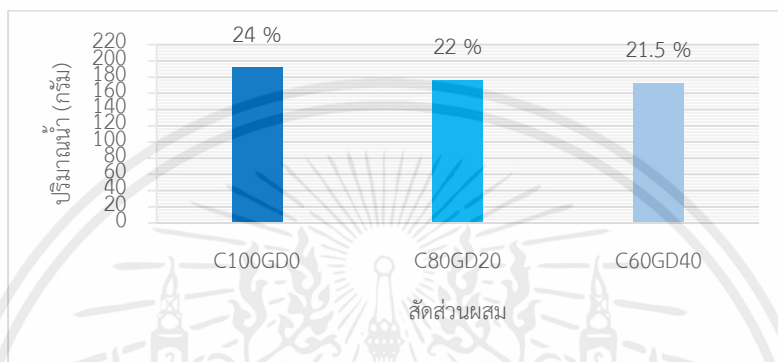
องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ฝุ่นแก้ว	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
Silicon DioXide (SiO_2)	73.4	21.20
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	2.0	5.22
Iron Oxide (Fe_2O_3)	0.22	3.08
Calcium Oxide (CaO)	8.0	64.73
Magnesium Oxide (MgO)	3.0	1.04
Potassium Oxide (K_2O)	0.4	0.42
Sodium Oxide (Na_2O)	13.0	0.19
Sulfur Trioxide (SO_3)	-	2.01
Free Lime	-	1.60

(ณัฐพล เลขาธิการพันธุ์, 2558 : ซีซีวาลย์ เศรษฐบุตตร, 2539)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การหาความชื้นเหลือปกติ

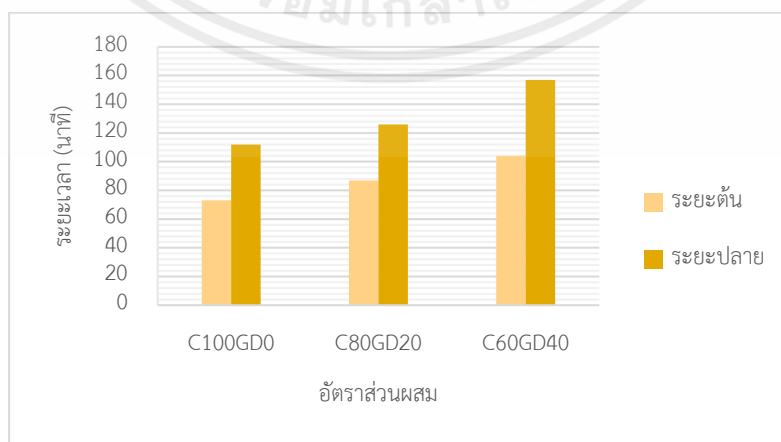
ผลการทดสอบหาความต้องการปริมาณน้ำ พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วมีปริมาณความต้องการน้ำน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง โดยมีปริมาณความต้องการน้ำลดลงตามปริมาณการแทนที่ของฝุ่นแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ปริมาณน้ำที่เติมจนซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลือตามมาตรฐาน

4.4 การหาระยะเวลาการก่อตัว

จากการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยเข็มไวแคต (Vicat Needle Modified Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C191 ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วจะมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวปลายที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วดังแสดงในรูปที่ 4.5

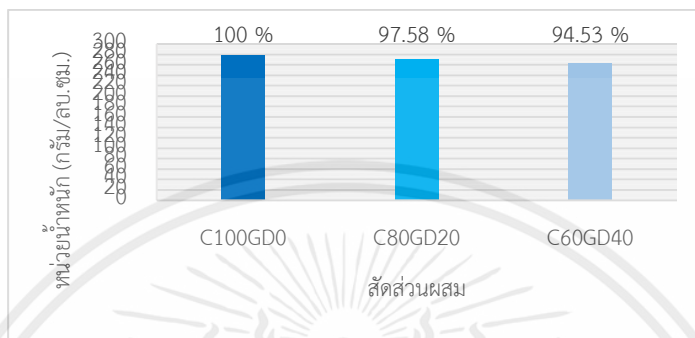


รูปที่ 4.5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

จากการทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก พบว่าหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วมีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 4.6



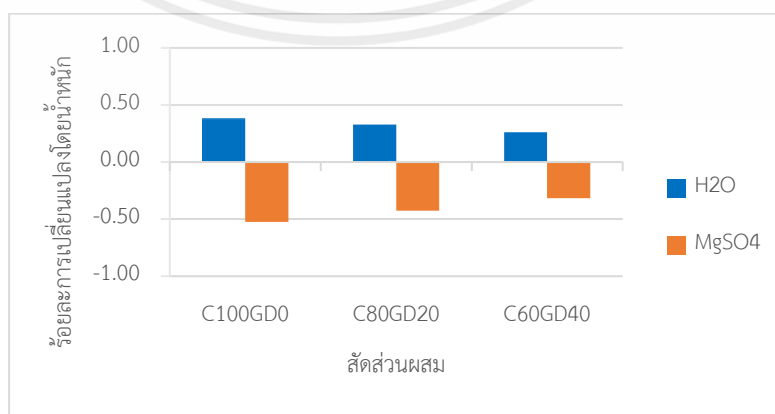
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

4.6 การสูญเสียน้ำหนัก

4.6.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อการสูญเสียน้ำหนัก

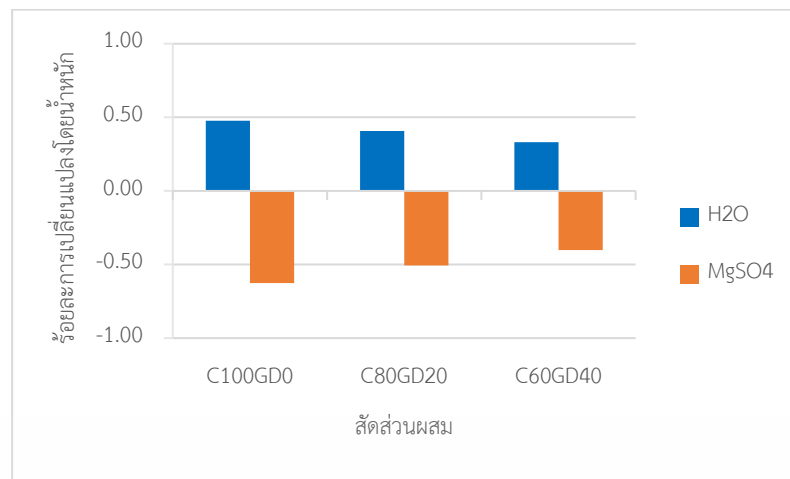
เมื่อพิจารณาถึงอายุต่างๆของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วพบว่า การบ่มทุกสภาวะส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของตัวอย่างเพิ่มขึ้น หมายความว่าตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่อายุ 14 วันและ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9

นอกจากนี้ยังพบว่า การบ่มด้วยน้ำ (H_2O) มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่ลดลง ตามสัดส่วนของปริมาณฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น

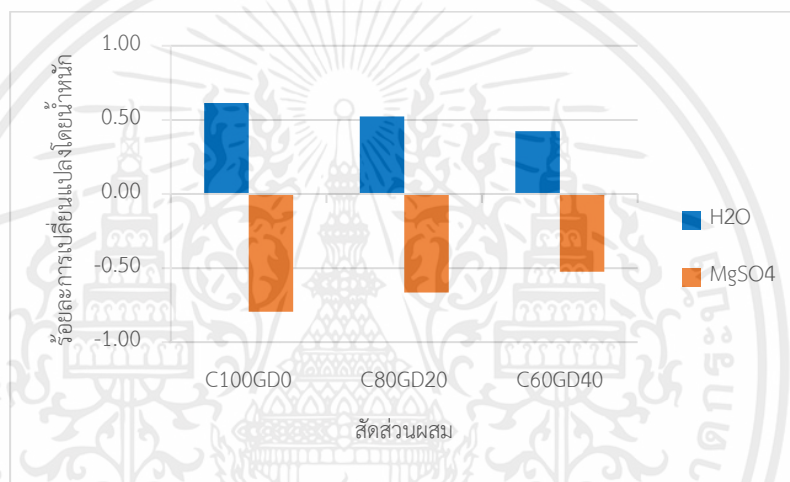


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แข็งน้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแช่น้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักแช่น้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน

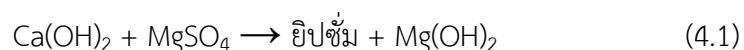
4.6.2 ผลของสารละลายซัลเฟตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

จากผลการทดสอบนำซีเมนต์เพสต์ทุกสัดส่วนผสมมาแช่น้ำ และแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

(MgSO₄) พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

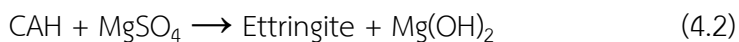
มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่แช่น้ำ (H₂O) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ถึง 4.12 เนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลาย

แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) เป็นไปตามสมการที่ (4.6.1) ถึง (4.6.5)

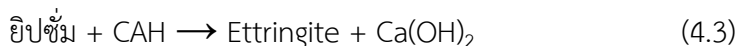


Ca(OH)₂ จากการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตก่อให้เกิดยิปซั่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

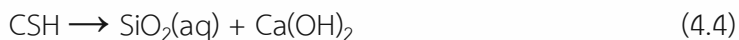


CAH จากปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟตก่อให้เกิด Ettringite



ปฏิกิริยาที่ 1) และ 2) ก่อให้ PH ของสารละลายลดลง

ซึ่งส่งผลให้เกิดการไม่อยู่ตัวของ Calcium Silicate Hydrate (CSH) โดยจะเกิดการสลายตัว

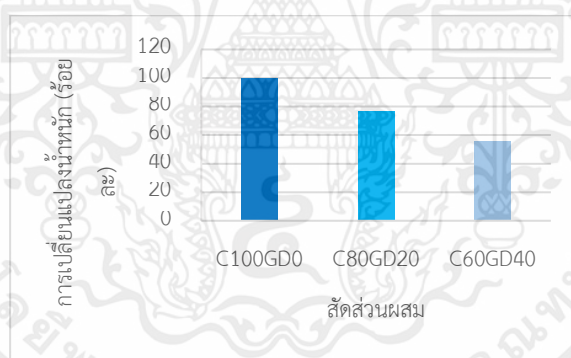


จากสมการที่ 4 จะพบว่า Ca(OH)_2 นี้จะทำปฏิกิริยากับ MgSO_4 ก่อให้เกิดการสลายตัวของ CSH มากขึ้น

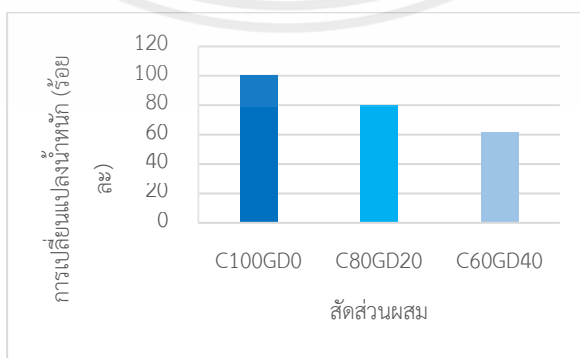


MSH นี้ไม่ใช่ตัวที่จะก่อให้เกิดการประสาน ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักได้

เพราะฉะนั้นการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วจึงเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) (นพคุณ ผลโพธิ์, 2554)

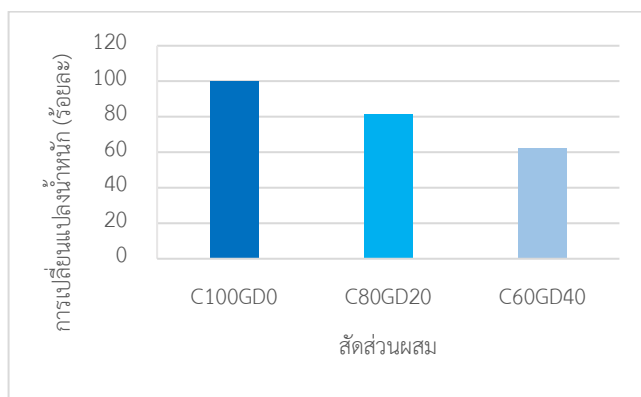


รูปที่ 4.10 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แร่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.11 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แร่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 14 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

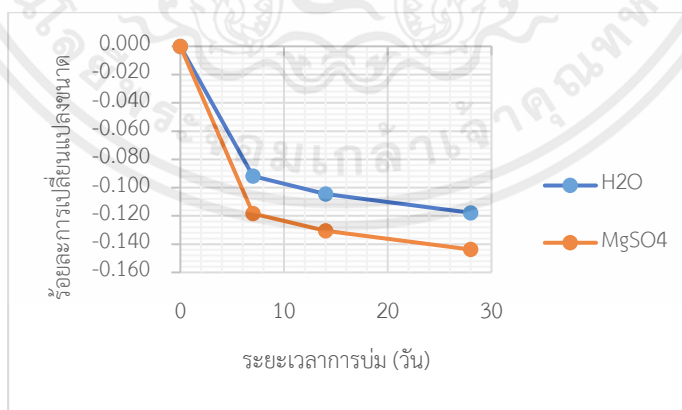


รูปที่ 4.12 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) เป็นเวลา 28 วัน

4.7 การเปลี่ยนแปลงขนาด

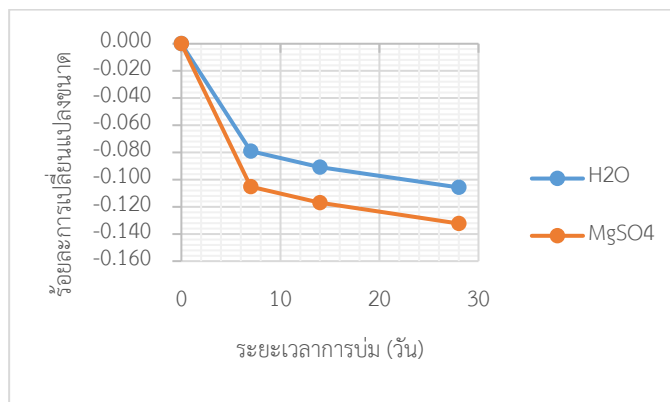
4.7.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสถานะต่างๆ

จากผลการทดสอบพบว่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันโดยสัดส่วนผสมของ C100GD0 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดมากที่สุดทุกสถานะการบ่มทั้งในการแ่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและน้ำ รองลงมาเป็น C80GD20 และ C60GD40 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณ C_3A ในซีเมนต์เพสต์ล้วนที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว มีค่ามากกว่าของสัดส่วนอื่นๆที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว จึงทำให้เกิดปริมาณ Ettingite มากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง 4.15

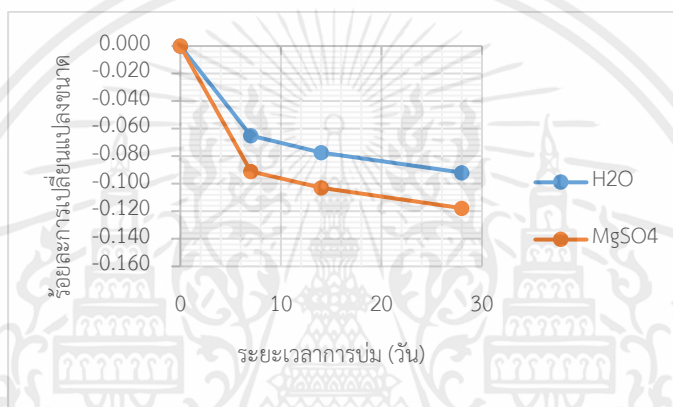


รูปที่ 4.13 กราฟแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ล้วน (C100GD0) แห่น้ำและสารละลายซัลเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว (C80GD20) แช่น้ำและสารละลายซัลเฟต



รูปที่ 4.15 กราฟแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว (C60GD40) แช่น้ำและสารละลายซัลเฟต

4.7.2 ผลของการแช่สารละลายซัลเฟตที่มีต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

จากการทดสอบหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วระหว่าง

การแช่น้ำ และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) พบว่าตัวอย่างที่แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดมากกว่าแช่น้ำ (H_2O) ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ถึง 4.18

เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) จะทำให้เกิด

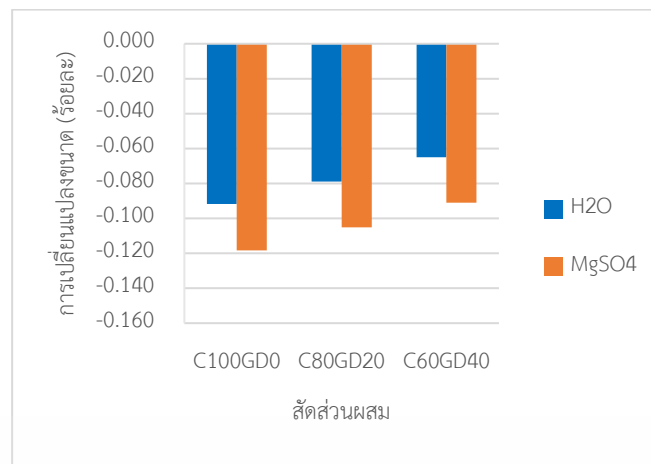
ยิปซัม (Gypsum) และเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ในขณะเดียวกัน แมกนีเซียม

ไฮดรอกไซด์ ($Mg(OH)_2$) จะทำปฏิกิริยากับสารละลาย SiO_2 จะได้ผลิตภัณฑ์คือแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต

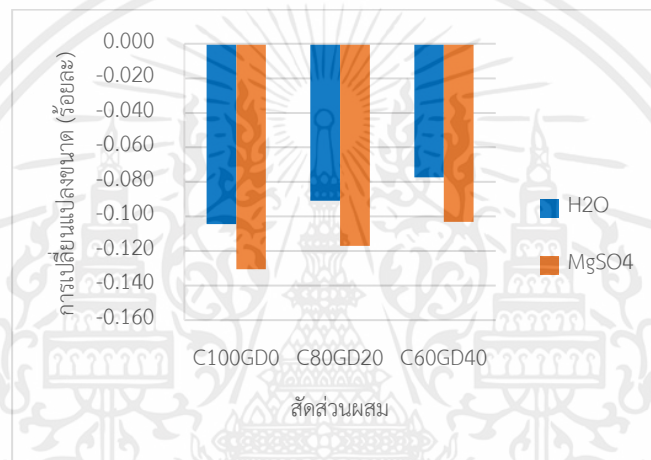
(MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ดังนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) จึงเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์

เพสต์เกิดความเสียหายได้ (นพคุณ ผลโพธิ์, 2554)

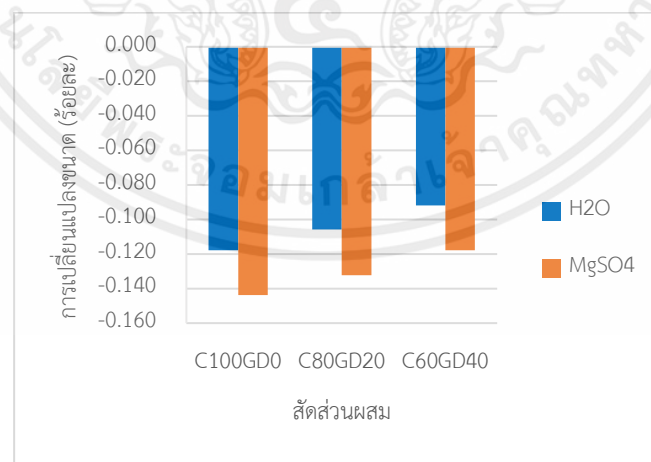
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาด แช่น้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาด แช่น้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาด แช่น้ำและสารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน

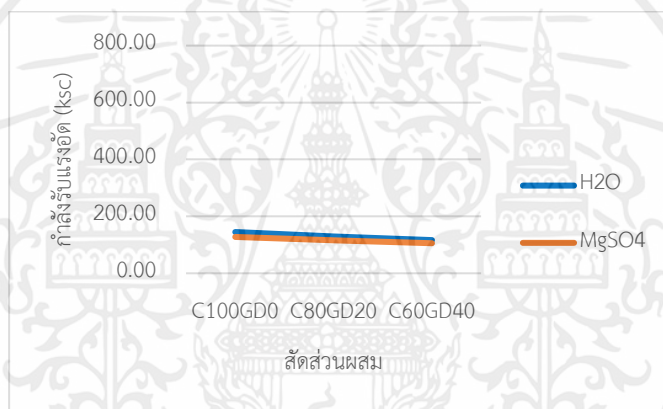
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 กำลังอัด

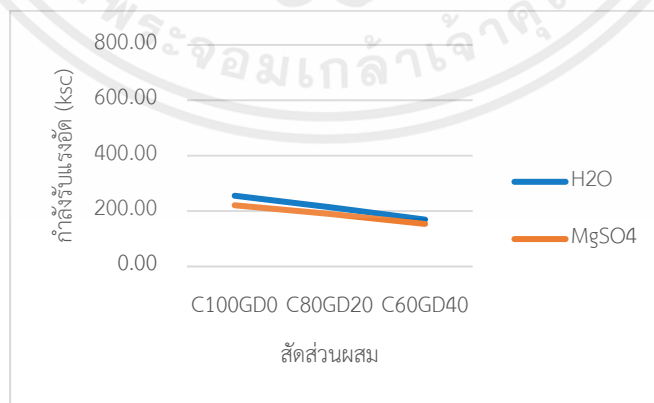
จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่มีสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน คือ แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยทำการบ่มน้ำสะอาดและสารละลายซัลเฟตที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.8.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว

เมื่อพิจารณาถึงอายุต่างๆของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วพบว่า การบ่มทุกสภาวะส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของตัวอย่างเพิ่มขึ้น หมายความว่าตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับที่อายุ 14 วันและ 7 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ถึง 4.21

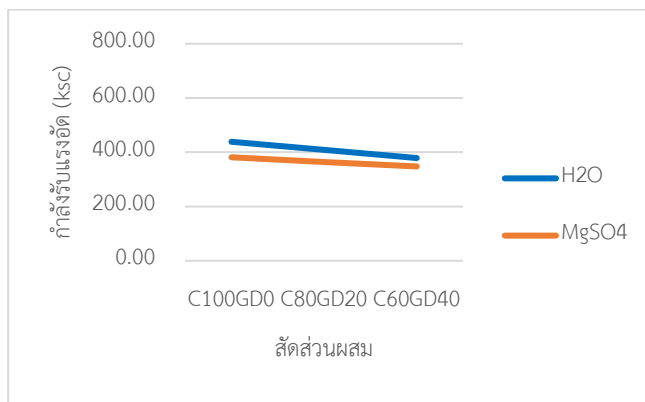


รูปที่ 4.19 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่ H₂O , MgSO₄ เป็นระยะเวลา 7 วัน



รูปที่ 4.20 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่ H₂O , MgSO₄ เป็นระยะเวลา 14 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

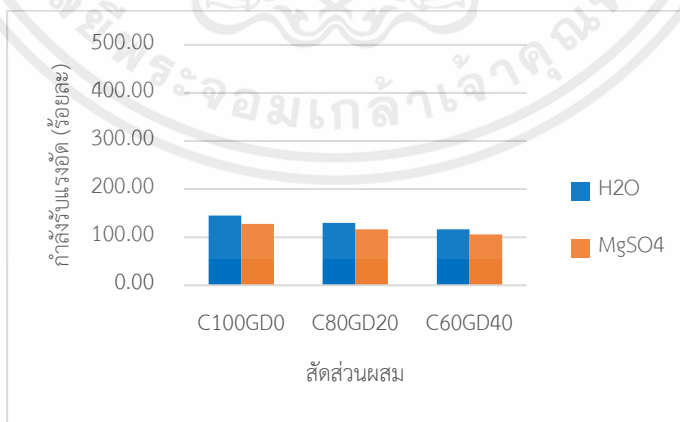


รูปที่ 4.21 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่ H₂O , MgSO₄ เป็นระยะเวลา 28 วัน

4.8.2 ผลของสารละลายซัลเฟตที่มีต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

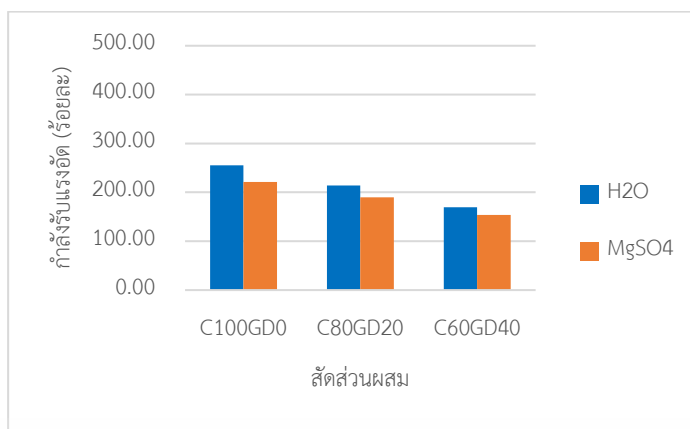
จากผลการทดสอบน้ำซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วทุกสัดส่วนผสมมาแช่น้ำ และแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) พบว่าซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วที่แช่น้ำ(H₂O) มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต(MgSO₄) ดังแสดงในรูปที่4.22 ถึง 4.24

เนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) จะทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) และเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นตัวให้กำลัง จึงเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดความเสียหายได้ (นพคุณ ผลโพธิ์, 2554)

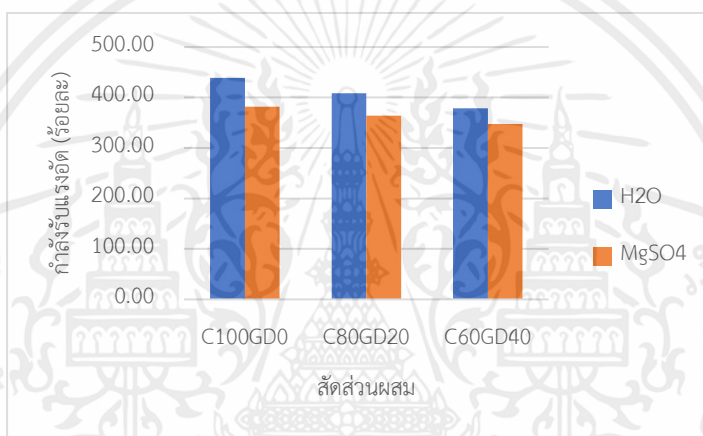


รูปที่ 4.22 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่น้ำ (H₂O) และผ่านการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) เป็นระยะเวลา 7 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

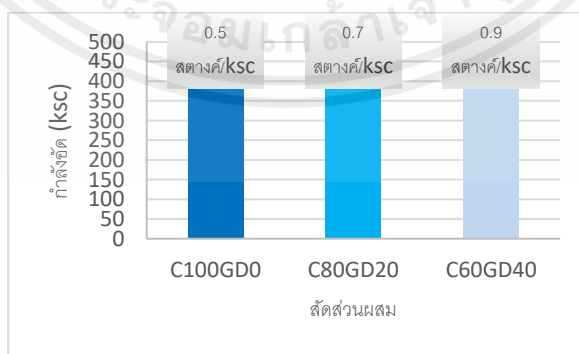


รูปที่ 4.23 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฟ่อนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่น้ำ (H₂O) และผ่านการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) เป็นระยะเวลา 14 วัน



รูปที่ 4.24 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฟ่อนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่น้ำ (H₂O) และผ่านการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) เป็นระยะเวลา 28 วัน

4.9 การประเมินด้านราคาต่อกำลังรับแรงอัด



รูปที่ 4.25 กราฟประเมินราคาต่อกำลังอัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

สามารถสรุปการศึกษาได้ดังนี้

1. ผลการทดสอบหาขนาดคละของฝุ่นแก้ว พบว่าฝุ่นแก้วมีค่าพิกัดความละเอียดน้อยกว่า 0.2 หมายความว่าฝุ่นแก้วมีความละเอียดมาก ซึ่งเหมาะที่จะนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์

2. เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความหนาแน่น ปริมาณน้ำที่ต้องการ และปริมาณความชื้นสูงสุด ของฝุ่นแก้วมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทั้งหมด

3. เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม ส่วนฝุ่นแก้วมีลักษณะเป็นเกล็ดคมแหลมเป็นรูปทรงไม่แน่นอนมีพื้นผิวขรุขระและมีขนาดเล็กใหญ่คละกัน ซึ่งลักษณะรูปร่างจะมีผลในด้านปริมาณความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์

4. เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเครื่องมือ X-Ray Fluorescence (XRF) พบว่าฝุ่นแก้วมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 73.4 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 64.73 ส่วนปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพียงร้อยละ 21.20

5. ผลการทดสอบหาปริมาณความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์ พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วมีปริมาณความต้องการน้ำน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงโดยมีปริมาณความต้องการน้ำลดลงตามปริมาณการแทนที่ของฝุ่นแก้ว

6. จากการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วจะมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายที่มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. จากการทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก พบว่าหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วมีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว

8. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลดลงตามสัดส่วนของฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ำกว่าของซีเมนต์เพสต์ซึ่งไม่ผสมฝุ่นแก้ว นอกจากนี้ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากกว่าการแช่ในน้ำ

9. ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ใกล้เคียงกันโดยสัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมฝุ่นแก้วมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดมากที่สุดในทุกสภาวะการบ่มทั้งในการแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและน้ำ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณ C_3A ในซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วมีค่ามากกว่าของสัดส่วนอื่นๆที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วซึ่งทำให้มีปริมาณเอทริงไคต์มากกว่าทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์

10. ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะมีกำลังรับแรงอัดลดลงตามสัดส่วนของฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งไม่ผสมฝุ่นแก้ว ทั้งนี้เป็นเพราะสัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีน้อยลง ในขณะที่ฝุ่นแก้วยังมีลักษณะเป็นวัสดุเฉื่อยที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นต่อไปตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น

11. ผลการประเมินราคาต่อกำลังจะแสดงให้เห็นในทุกอัตราส่วนว่าหากยิ่งเพิ่มปริมาณฝุ่นแก้วเข้าไปแทนที่ซีเมนต์เพสต์ก็จะยิ่งทำให้มีราคาต้นทุนการผลิตที่สูงขึ้นตามปริมาณของฝุ่นแก้วที่เข้าไปแทนที่

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบจากการบดเพิ่มความละเอียดของฝุ่นแก้วต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของฝุ่นแก้ว

2. ควรศึกษาถึงการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการบดเศษแก้วเพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตต่อไปในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- คมสัน มาลีสี , “ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี(ปรับปรุงใหม่)” , พิมพ์ครั้งที่ 6 , จำนวน 140 เล่ม , โรงพิมพ์ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย 88/8 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 , ปีที่พิมพ์ 2563
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร , “คอนกรีตเทคโนโลยี (Concrete Technology)” , คอนกรีตผสมเสร็จจีซีแพค , บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด , ปีที่พิมพ์ 2537
- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม , “รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2559 รายงานสถานการณ์มลพิษ ของประเทศไทย ปี 2559” , จำนวนที่พิมพ์ 1,800 เล่ม , จัดพิมพ์โดย บริษัทหัวใหญ่ จำกัด 22/17 ซอยลาดพร้าว 23 จันทเกษม จตุจักร กรุงเทพฯ 10900 , ปีที่พิมพ์ 2560 , หน้า 75
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม , “เอกสารรายงานผลการจัดทำบัญชีก๊าซเรือนกระจก ภาคกระบวนการอุตสาหกรรม และการใช้ผลิตภัณฑ์ปี พ.ศ. 2543-2560”
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม , “เอกสารวิชาการของ บริษัทปูนซีเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด” , 2547
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม , “เอกสารวิชาการของคอนกรีตผสมเสร็จจีซีแพค” , บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด , 2545
- ญัฐพล เล่าห์รอดพันธุ์ , “เอกสารประกอบการสอน วิชา คอ 351 อุตสาหกรรมการผลิตแก้ว (Glass Production Industry)” , 2558
- ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร , “คอนกรีตเทคโนโลยี” , โรงพิมพ์เลขที่ 1 ถนนปูนซีเมนต์ไทย บางซื่อ ดุสิต กรุงเทพฯ 10800
- นิตยา ไจทง , “การพัฒนาสมบัติเชิงกลของปูนซีเมนต์ปอซโซลานโดยมีน้ำยางธรรมชาติเป็นสารผสมเพิ่ม” , 2559
- ชาตรี อยู่ร่วมพฤษ์ , “การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตผสมตะกรันเตาถลุงเหล็กบดละเอียดและซิลิกาฟุ่มที่อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรดสูง” , 2560
- สุขชัย สุขยานุติษฐ์ , “การต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมฝุ่นหินปูน” , 2554
- สันติ ประมูลมาก , สราวุธ แก้วล้อมทรัพย์ และ รำไพพรรณ ปันศิลป์ , “การศึกษาผลของอุณหภูมิ และเวลาการบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโพลิเมอร์มอร์ตาร์แก้าลอย” , 2561
- วิเชียร ชาลี , “ความคงทนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมจากเศษคอนกรีตผสมแก้่า่านหินภายใต้สิ่งแวดล้อมทะเลเป็นเวลา 5 ปี” , 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิเชียร ชาลี , “ผลของต่างแรงปฏิกิริยาต่อสมบัติของมอร์ตาร์จากเถ้าถ่านหิน” , 2559
- กระทรวงอุตสาหกรรม , “ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน” , 2556
- พรสุดา โกฎค่างพูล , “การสังเคราะห์วัสดุที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจากดินเกาลินเพื่อใช้เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่ยั่งยืน” , 2563
- พีรพัฒน์ พาหุสุวัฒน์ , “การนำเศษวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์กลับมาใช้เป็นสารตัวเติมในวัสดุประกอบไฟเบอร์ซีเมนต์สมรรถนะสูง” , 2562
- วิพล ไชยชนะ , “การผลิตอิฐมอญซีเมนต์ผสมซีเมนต์เถ้าแกลบโดยใช้น้ำยารักษาเป็นตัวยึดประสาน” , 2562
- พิศาล ลาภตระกูล , “ผลกระทบของยูเรียต่อสมบัติคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบ” , 2558
- ชีรภาพ ศรีบุญเรือง , “ผลกระทบของความละเอียดของผงหินปูนต่อสมบัติของคอนกรีตชนิดอัดแน่นได้ด้วยตัวเองผสมเถ้าแกลบ” , 2558
- พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง , “การศึกษาแนวทางการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาโดยใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรม” , พิมพ์ครั้งที่ 5 , 2559
- ปริญญา จินดาประเสริฐ , “ปูนซีเมนต์ ปอซโซลานและคอนกรีต” , พิมพ์ครั้งที่ 3 , 2555
- ภัสดาภูพูล , “พฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว” , 2558
- คมสัน มาลีสี , “ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ASTM C 136 , พิมพ์ครั้งที่ 6 , จำนวน 140 เล่ม , โรงพิมพ์ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย 88/8 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 , ปีที่พิมพ์ 2563 , หน้าที่ 55
- คมสัน มาลีสี , “ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ASTM C 187 , พิมพ์ครั้งที่ 6 , จำนวน 140 เล่ม , โรงพิมพ์ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย 88/8 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 , ปีที่พิมพ์ 2563 , หน้าที่ 9
- คมสัน มาลีสี , “ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ASTM C 191 , พิมพ์ครั้งที่ 6 , จำนวน 140 เล่ม , โรงพิมพ์ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย 88/8 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 , ปีที่พิมพ์ 2563 , หน้าที่ 17
- คมสัน มาลีสี , “ปฏิบัติการคอนกรีตเทคโนโลยี ASTM C 109 , พิมพ์ครั้งที่ 6 , จำนวน 140 เล่ม , โรงพิมพ์ : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย 88/8 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 , ปีที่พิมพ์ 2563

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Q.Yu , “Cement and Concrete Research” , 2020
- A.M. Kaja , “Properties of Concrete” , Fourth Edition , 2021
- F.L.Smidth , “Quality of Cement” , 2000
- I.Soroka , “Porland Cement Paste and Concrete” , 1979
- Peter C. Hewlett , “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete” , Fourth Edition , 1998
- Portland Cement Association , “Design and Control of Concrete Mixtures : Portland,Blended and Other Hydraulic Cement” , Concrete Information , 2002



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบหาขนาดคละของฝุ่นแก้ว

ตารางที่ ก-1 ขนาดคละของฝุ่นแก้ว

เบอร์ตะแกรง	ขนาดช่องเปิด (mm)	น้ำหนักตะแกรง (g)	น้ำหนักตะแกรง รวมฝุ่นแก้ว (g)	น้ำหนักค้าง (g)	เปอร์เซ็นต์ค้าง	เปอร์เซ็นต์ค้างสะสม	เปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรง	F.M.	
4	4.75	485	485	0.0	0.0	0.0	100.0	0.19	OK
8	2.88	544	545	1.0	0.2	0.2	99.8		
16	1.19	639	641	2.0	0.4	0.6	99.4		
30	0.595	458	459	1.0	0.2	0.8	99.2		
50	0.3	563	565	2.0	0.4	1.2	98.8		
100	0.15	525	597	72.0	14.6	15.9	84.1		
PAN	-	478	892	414.0	84.1	-	-		
รวม		-	-	492.0	100.0	18.70	-		

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ

ตารางที่ ข-1 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C100GD0

ครั้งที่	อัตราส่วนผสม							ระยะจม (mm)
	ปูนซีเมนต์		ฝุ่นแก้ว		น้ำ			
	%	กรัม	%	กรัม	%	กรัม	CC	
1	100	800	0	0	23	184	184	2.0
2					24	192	192	9.5
3					25	200	200	16.5

ตารางที่ ข-2 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C80GD20

ครั้งที่	อัตราส่วนผสม							ระยะจม (mm)
	ปูนซีเมนต์		ฝุ่นแก้ว		น้ำ			
	%	กรัม	%	กรัม	%	กรัม	CC	
1	80	640	20	160	23	184	184	14.0
2					22	176	176	9.2
3					21	168	168	5.0

ตารางที่ ข-3 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C60GD40

ครั้งที่	อัตราส่วนผสม							ระยะจม (mm)
	ปูนซีเมนต์		ฝุ่นแก้ว		น้ำ			
	%	กรัม	%	กรัม	%	กรัม	CC	
1	60	480	40	320	21.5	172	172	10.5
2					21	168	168	7.0
3					20	160	160	3.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว

ตารางที่ ค-1 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C100GD0

เวลาที่เริ่มผสม (นาฬิกา)	เวลาที่พักแบบ (นาฬิกา)	เวลาที่เริ่มปล่อยเข็ม (นาฬิกา)	เวลาหลังจากผสม (นาที)	ระยะเข็มจม (mm)	หมายเหตุ
15:21:00	15:28:00	15:58:00	30	-	อ่านไม่ได้
		16:13:00	45	-	อ่านไม่ได้
		16:28:00	60	40.00	
		16:43:00	75	3.50	
		16:58:00	90	1.00	
		17:13:00	105	0.00	

ตารางที่ ค-2 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C80GD20

เวลาที่เริ่มผสม (นาฬิกา)	เวลาที่พักแบบ (นาฬิกา)	เวลาที่เริ่มปล่อยเข็ม (นาฬิกา)	เวลาหลังจากผสม (นาที)	ระยะเข็มจม (mm)	หมายเหตุ
14:07:00	14:13:00	14:43:00	30	-	อ่านไม่ได้
		14:58:00	45	-	อ่านไม่ได้
		15:13:00	60	-	อ่านไม่ได้
		15:28:00	75	40.00	
		15:43:00	90	4.50	
		15:58:00	105	2.00	
		16:13:00	120	0.00	

ตารางที่ ค-3 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C60GD40

เวลาที่เริ่มผสม (นาฬิกา)	เวลาที่พักแบบ (นาฬิกา)	เวลาที่เริ่มปล่อยเข็ม (นาฬิกา)	เวลาหลังจากผสม (นาที)	ระยะเข็มจม (mm)	หมายเหตุ
15:08:00	15:15:00	15:45:00	30	-	อ่านไม่ได้
		16:00:00	45	-	อ่านไม่ได้
		16:15:00	60	-	อ่านไม่ได้
		16:30:00	75	-	อ่านไม่ได้
		16:45:00	90	41.50	
		17:00:00	105	5.00	
		17:15:00	120	1.50	
		17:30:00	135	1.00	
		17:45:00	150	0.00	

ตารางที่ ค-4 ระยะเวลาก่อตัวต้นและปลายของแต่ละอัตราส่วนผสม

สัญลักษณ์	T _{ต้น} (นาที)	T _{ปลาย} (นาที)
C100GD0	73	112
C80GD20	87	126
C60GD40	104	157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบหาหน่วยน้ำหนัก

ตารางที่ ง-1 หน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C100GD0

ตัวอย่างที่ (ก้อน)	น้ำหนักก่อนปม (กรัม)	เฉลี่ย
1	287	278.33
2	285	
3	284	
4	276	
5	276	
6	277	
7	278	
8	276	
9	278	
10	272	
11	274	
12	277	
13	283	
14	278	
15	282	
16	277	
17	274	
18	276	
รวม	5010	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 หน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C80GD20

ตัวอย่างที่ (ก้อน)	น้ำหนักก่อนปม (กรัม)	เฉลี่ย
1	266	271.61
2	271	
3	270	
4	271	
5	274	
6	267	
7	274	
8	274	
9	272	
10	273	
11	278	
12	281	
13	270	
14	272	
15	277	
16	268	
17	264	
18	267	
รวม	4889	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-3 หน่วยน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C60GD40

ตัวอย่างที่ (ก้อน)	น้ำหนักก่อนปม (กรัม)	เฉลี่ย
1	264	263.11
2	264	
3	264	
4	262	
5	262	
6	262	
7	266	
8	264	
9	266	
10	260	
11	260	
12	261	
13	264	
14	266	
15	268	
16	262	
17	261	
18	260	
รวม	4736	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

ผลการทดสอบหาการสูญเสียน้ำหนัก

ตารางที่ จ-1 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C100GD0

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก่อน)	น้ำหนักก่อนบ่ม (กรัม)	น้ำหนักหลังบ่มน้ำ หรือน้ำหนัก ก่อนบ่ม MgSO ₄ (กรัม)	น้ำหนักหลังบ่ม MgSO ₄ (กรัม)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังบ่มน้ำ		น้ำหนักที่สูญเสียหลังบ่ม MgSO ₄	
					กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ
7	1	287.00	288.47	286.59	1.47	0.51	-1.88	-0.65
	2	285.00	285.23	283.46	0.23	0.08	-1.77	-0.62
	3	284.00	285.60	284.74	1.60	0.56	-0.86	-0.30
รวม		856.00	859.30	854.79	3.30	1.16	-4.51	-1.57
เฉลี่ย		285.33	286.43	284.93	1.10	0.39	-1.50	-0.52
14	1	278.00	278.95	277.21	0.95	0.34	-1.74	-0.62
	2	276.00	276.83	274.84	0.83	0.30	-1.99	-0.72
	3	278.00	280.19	278.70	2.19	0.79	-1.49	-0.53
รวม		832.00	835.97	830.75	3.97	1.43	-5.22	-1.87
เฉลี่ย		277.33	278.66	276.92	1.32	0.48	-1.74	-0.62
28	1	283.00	284.12	281.26	1.12	0.40	-2.86	-1.01
	2	278.00	279.82	278.04	1.82	0.65	-1.78	-0.64
	3	282.00	284.23	282.12	2.23	0.79	-2.11	-0.74
รวม		843.00	848.17	841.42	5.17	1.84	-6.75	-2.39
เฉลี่ย		281.00	282.72	280.47	1.72	0.61	-2.25	-0.80

ตารางที่ จ-2 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C80GD20

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก่อน)	น้ำหนักก่อนบ่ม (กรัม)	น้ำหนักหลังบ่มน้ำ หรือน้ำหนัก ก่อนบ่ม MgSO ₄ (กรัม)	น้ำหนักหลังบ่ม MgSO ₄ (กรัม)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังบ่มน้ำ		น้ำหนักที่สูญเสียหลังบ่ม MgSO ₄	
					กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ
7	1	266	266.56	265.88	0.56	0.21	-0.68	-0.26
	2	271	271.26	270.15	0.26	0.10	-1.11	-0.41
	3	270	271.84	270.18	1.84	0.68	-1.66	-0.61
รวม		807.00	809.66	806.21	2.66	0.99	-3.45	-1.27
เฉลี่ย		269.00	269.89	268.74	0.89	0.33	-1.15	-0.42
14	1	274	274.83	273.08	0.83	0.30	-1.75	-0.64
	2	274	274.57	273.29	0.57	0.21	-1.28	-0.47
	3	272	273.93	272.79	1.93	0.71	-1.14	-0.42
รวม		820.00	823.33	819.16	3.33	1.22	-4.17	-1.52
เฉลี่ย		273.33	274.44	273.05	1.11	0.41	-1.39	-0.51
28	1	270	272.03	270.18	2.03	0.75	-1.85	-0.68
	2	272	272.83	271.32	0.83	0.31	-1.51	-0.55
	3	277	278.42	276.30	1.42	0.51	-2.12	-0.76
รวม		819.00	823.28	277.00	4.28	1.57	-5.48	-1.99
เฉลี่ย		273.00	274.43	92.33	1.43	0.52	-1.83	-0.66

ตารางที่ จ-3 ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของอัตราส่วนผสม C60GD40

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก่อน)	น้ำหนักก่อนบ่ม (กรัม)	น้ำหนักหลังบ่มน้ำ หรือน้ำหนัก ก่อนบ่ม MgSO ₄ (กรัม)	น้ำหนักหลังบ่ม MgSO ₄ (กรัม)	น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นหลังบ่มน้ำ		น้ำหนักที่สูญเสียหลังบ่ม MgSO ₄	
					กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ
7	1	264	264.56	263.84	0.56	0.21	-0.72	-0.27
	2	264	264.66	263.33	0.66	0.25	-1.33	-0.50
	3	262	262.84	262.38	0.84	0.32	-0.46	-0.18
รวม		790.00	792.06	789.55	2.06	0.78	-2.51	-0.95
เฉลี่ย		263.33	264.02	263.18	0.69	0.26	-0.84	-0.32
14	1	266	266.84	265.80	0.84	0.32	-1.04	-0.39
	2	264	264.92	264.26	0.92	0.35	-0.66	-0.25
	3	266	266.88	265.36	0.88	0.33	-1.52	-0.57
รวม		796.00	798.64	795.42	2.64	1.00	-3.22	-1.21
เฉลี่ย		265.33	266.21	265.14	0.88	0.33	-1.07	-0.40
28	1	264	266.67	265.12	2.67	1.01	-1.55	-0.58
	2	266	266.23	264.24	0.23	0.09	-1.99	-0.75
	3	268	268.47	267.81	0.47	0.18	-0.66	-0.25
รวม		798.00	801.37	797.17	3.37	1.27	-4.20	-1.57
เฉลี่ย		266.00	267.12	265.72	1.12	0.42	-1.40	-0.52

ภาคผนวก ฉ

ผลการทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงขนาด

ตารางที่ ฉ-1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของอัตราส่วนผสม C100GD0

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก้อน)	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	หลังบ่ม	ขนาดที่เปลี่ยนแปลง		ขนาดที่เปลี่ยนแปลง	
		H ₂ O	H ₂ O	MgSO ₄	หลังบ่ม H ₂ O		หลังบ่ม MgSO ₄	
		ความสูง (cm)			cm	%	cm	%
7	1	5.096	5.090	5.088	-0.006	-0.118	-0.002	-0.04
	2	5.072	5.070	5.062	-0.002	-0.039	-0.008	-0.16
	3	5.076	5.070	5.062	-0.006	-0.118	-0.008	-0.16
รวม		15.244	15.230	15.212	-0.014	-0.275	-0.018	-0.35
เฉลี่ย		5.081	5.077	5.071	-0.005	-0.092	-0.006	-0.12
14	1	5.104	5.102	5.098	-0.002	-0.039	-0.004	-0.08
	2	5.118	5.114	5.104	-0.004	-0.078	-0.010	-0.20
	3	5.106	5.096	5.090	-0.010	-0.196	-0.006	-0.12
รวม		15.328	15.312	15.292	-0.016	-0.313	-0.020	-0.39
เฉลี่ย		5.109	5.104	5.097	-0.005	-0.104	-0.007	-0.13
28	1	5.094	5.088	5.086	-0.006	-0.118	-0.002	-0.04
	2	5.092	5.082	5.080	-0.010	-0.196	-0.002	-0.04
	3	5.106	5.104	5.086	-0.002	-0.039	-0.018	-0.35
รวม		15.292	15.274	15.252	-0.018	-0.353	-0.022	-0.43
เฉลี่ย		5.097	5.091	5.084	-0.006	-0.118	-0.007	-0.14

ตารางที่ ฉ-2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของอัตราส่วนผสม C80GD20

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก้อน)	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	หลังบ่ม	ขนาดที่เปลี่ยนแปลง		ขนาดที่เปลี่ยนแปลง	
		H ₂ O	H ₂ O	MgSO ₄	หลังบ่ม H ₂ O		หลังบ่ม MgSO ₄	
		ความสูง (cm)			cm	%	cm	%
7	1	5.044	5.040	5.040	-0.004	-0.079	0.000	0.00
	2	5.076	5.070	5.058	-0.006	-0.118	-0.012	-0.24
	3	5.082	5.080	5.076	-0.002	-0.039	-0.004	-0.08
รวม		15.202	15.190	15.174	-0.012	-0.237	-0.016	-0.32
เฉลี่ย		5.067	5.063	5.058	-0.004	-0.079	-0.005	-0.11
14	1	5.132	5.128	5.112	-0.004	-0.078	-0.016	-0.31
	2	5.154	5.148	5.146	-0.006	-0.116	-0.002	-0.04
	3	5.126	5.122	5.122	-0.004	-0.078	0.000	0.00
รวม		15.412	15.398	15.380	-0.014	-0.272	-0.018	-0.35
เฉลี่ย		5.137	5.133	5.127	-0.005	-0.091	-0.006	-0.12
28	1	5.050	5.046	5.030	-0.004	-0.079	-0.016	-0.32
	2	5.056	5.048	5.048	-0.008	-0.158	0.000	0.00
	3	5.012	5.008	5.004	-0.004	-0.080	-0.004	-0.08
รวม		15.118	15.102	15.082	-0.016	-0.317	-0.020	-0.40
เฉลี่ย		5.039	5.034	5.027	-0.005	-0.106	-0.007	-0.13

ตารางที่ ฉ-3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาดของอัตราส่วนผสม C60GD40

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก้อน)	ก่อนบ่ม	หลังบ่ม	หลังบ่ม	ขนาดที่เปลี่ยนแปลง		ขนาดที่เปลี่ยนแปลง	
		H ₂ O	H ₂ O	MgSO ₄	หลังบ่ม H ₂ O		หลังบ่ม MgSO ₄	
		ความสูง (cm)			cm	%	cm	%
7	1	5.146	5.140	5.130	-0.006	-0.117	-0.010	-0.19
	2	5.112	5.110	5.110	-0.002	-0.039	0.000	0.00
	3	5.082	5.080	5.076	-0.002	-0.039	-0.004	-0.08
รวม		15.340	15.330	15.316	-0.010	-0.195	-0.014	-0.27
เฉลี่ย		5.113	5.110	5.105	-0.003	-0.065	-0.005	-0.09
14	1	5.154	5.148	5.146	-0.006	-0.116	-0.002	-0.04
	2	5.198	5.194	5.184	-0.004	-0.077	-0.010	-0.19
	3	5.146	5.144	5.140	-0.002	-0.039	-0.004	-0.08
รวม		15.498	15.486	15.470	-0.012	-0.232	-0.016	-0.31
เฉลี่ย		5.166	5.162	5.157	-0.004	-0.077	-0.005	-0.10
28	1	5.102	5.096	5.078	-0.006	-0.118	-0.018	-0.35
	2	5.046	5.042	5.042	-0.004	-0.079	0.000	0.00
	3	5.076	5.072	5.072	-0.004	-0.079	0.000	0.00
รวม		15.224	15.210	15.192	-0.014	-0.276	-0.018	-0.35
เฉลี่ย		5.075	5.070	5.064	-0.005	-0.092	-0.006	-0.12

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบหากล้างรับแรงอัด

ตารางที่ ข-1 ผลการทดสอบหากล้างรับแรงอัดของอัตราส่วนผสม C100GD0

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก้อน)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัดหลังบ่ม H ₂ O หรือ แรงอัดก่อนบ่ม MgSO ₄		กำลังอัดหลังบ่ม MgSO ₄		กำลังอัดหลังบ่ม H ₂ O (ksc)	กำลังอัดหลังบ่ม MgSO ₄ (ksc)	กำลังอัดที่สูญเสีย (ksc)
			(kN)	(kg)	(kN)	(kg)			
7	1	25	33.00	3365.01	28.43	2899.01	134.60	115.96	-18.64
	2	25	37.46	3819.80	32.33	3296.69	152.79	131.87	-20.92
	3	25	36.23	3694.37	33.26	3391.52	147.77	135.66	-12.11
รวม			106.69	10879.18	94.02	9587.22	435.17	383.49	-51.68
เฉลี่ย			35.56	3626.39	31.34	3195.74	145.06	127.83	-17.23
14	1	25	58.87	6002.97	56.77	5788.84	240.12	231.55	-8.57
	2	25	76.22	7772.15	62.35	6357.83	310.89	254.31	-56.57
	3	25	52.77	5380.96	43.41	4426.52	215.24	177.06	-38.18
รวม			187.86	19156.08	162.53	16573.18	766.24	662.93	-103.32
เฉลี่ย			62.62	6385.36	54.18	5524.39	255.41	220.98	-34.44
28	1	25	139.38	14212.58	127.32	12982.82	568.50	519.31	-49.19
	2	25	97.69	9961.45	79.22	8078.06	398.46	323.12	-75.34
	3	25	85.56	8724.55	74.09	7554.96	348.98	302.20	-46.78
รวม			322.63	32898.58	280.63	28615.84	1315.94	1144.63	-171.31
เฉลี่ย			107.54	10966.19	93.54	9538.61	438.65	381.54	-57.10

ตารางที่ ข-2 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสม C80GD20

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก้อน)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัดหลังบ่ม H ₂ O หรือ แรงอัดก่อนบ่ม MgSO ₄		กำลังอัดหลังบ่ม MgSO ₄		กำลังอัดหลังบ่ม H ₂ O (ksc)	กำลังอัดหลังบ่ม MgSO ₄ (ksc)	กำลังอัดที่สูญเสีย (ksc)
			(kN)	(kg)	(kN)	(kg)			
7	1	25	25.61	2611.45	21.70	2212.75	104.46	88.51	-15.95
	2	25	32.43	3306.89	30.40	3099.89	132.28	124.00	-8.28
	3	25	37.40	3813.68	33.61	3427.21	152.55	137.09	-15.46
รวม			95.44	9732.02	85.71	8739.85	389.28	349.59	-39.69
เฉลี่ย			31.81	3244.01	28.57	2913.28	129.76	116.53	-13.23
14	1	25	67.58	6891.13	65.34	6662.72	275.65	266.51	-9.14
	2	25	48.53	4948.60	41.14	4195.05	197.94	167.80	-30.14
	3	25	41.38	4219.52	32.97	3361.95	168.78	134.48	-34.30
รวม			157.49	16059.26	139.45	14219.72	642.37	568.79	-73.58
เฉลี่ย			52.50	5353.09	46.48	4739.91	214.12	189.60	-24.53
28	1	25	95.92	9780.96	86.00	8769.42	391.24	350.78	-40.46
	2	25	110.41	11258.51	97.41	9932.90	450.34	397.32	-53.02
	3	25	94.17	9602.51	84.18	8583.83	384.10	343.35	-40.75
รวม			300.50	30641.99	267.59	27286.15	1225.68	1091.45	-134.23
เฉลี่ย			100.17	10214.00	89.20	9095.38	408.56	363.82	-44.74

ตารางที่ ข-3 ผลการทดสอบหากำลังรับแรงอัดของอัตราส่วนผสม C60GD40

ระยะเวลาบ่ม (วัน)	ตัวอย่างที่ (ก้อน)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัดหลังบ่ม H ₂ O หรือ แรงอัดก่อนบ่ม MgSO ₄		กำลังอัดหลังบ่ม MgSO ₄		กำลังอัดหลังบ่ม H ₂ O (ksc)	กำลังอัดหลังบ่ม MgSO ₄ (ksc)	กำลังอัดที่สูญเสีย (ksc)
			(kN)	(kg)	(kN)	(kg)			
7	1	25	25.53	2603.29	23.49	3225.31	104.13	129.01	24.88
	2	25	35.49	3618.92	31.63	2395.28	144.76	95.81	-48.95
	3	25	24.80	2528.86	22.63	2307.58	101.15	92.30	-8.85
รวม			85.82	8751.07	77.75	7928.17	350.04	317.13	-32.92
เฉลี่ย			28.61	2917.02	25.92	2642.72	116.68	105.71	-10.97
14	1	25	32.33	3296.69	30.87	3147.81	131.87	125.91	-5.96
	2	25	23.21	2366.72	16.20	1651.91	94.67	66.08	-28.59
	3	25	68.91	7026.75	66.02	6732.06	281.07	269.28	-11.79
รวม			124.45	12690.17	113.09	11531.79	507.61	461.27	-46.34
เฉลี่ย			41.48	4230.06	37.70	3843.93	169.20	153.76	-15.45
28	1	25	59.92	6110.04	51.36	5237.18	244.40	209.49	-34.91
	2	25	120.22	12258.83	112.22	11443.07	490.35	457.72	-32.63
	3	25	98.38	10031.81	92.08	9389.40	401.27	375.58	-25.70
รวม			278.52	28400.68	255.66	26069.65	1136.03	1042.79	-93.24
เฉลี่ย			92.84	9466.89	85.22	8689.88	378.68	347.60	-31.08

ภาคผนวก ซ

ผลการประเมินราคาต่อค่ากำลังอัด

ตารางที่ ซ-1 ราคาของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ส่วนผสม	ราคา (บาท)	น้ำหนัก (กิโลกรัม)
ปูนซีเมนต์	140	50
ฝุ่นแก้ว	1.2	0.174

ตารางที่ ซ-2 ตารางการประเมินราคาต่อค่ากำลังอัด

สัญลักษณ์	ปูนซีเมนต์			ฝุ่นแก้ว			ค่ากำลังอัด (ksc)	รวมราคา (บาท/ก้อน)	ราคา (บาท/ksc)
	%	กรัม	ราคา (บาท)	%	กรัม	ราคา (บาท)			
C100GD0	100	800	2.240	0	0	0	438.65	2.240	0.0051
C80GD20	80	640	1.792	20	160	1.103	408.56	2.895	0.0071
C60GD40	60	480	1.344	40	320	2.207	378.68	3.551	0.0094

ภาคผนวก ฅ

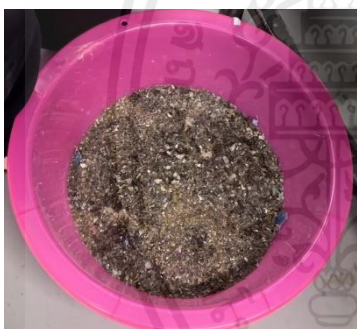
รูปประกอบการทำวิจัย



รูปที่ ฅ-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ ฅ-2 สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ ฅ-3 เศษแก้วที่รับมาจากบริษัท



รูปที่ ฅ-4 คัดเศษแก้วโดยการร่อนตะแกรง



รูปที่ ฅ-5 เครื่องเขย่าตะแกรง



รูปที่ ฅ-6 ฝุ่นแก้วที่ใช้ในการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฌ-7 เตาอบไฟฟ้า



รูปที่ ฌ-8 การผสมด้วยมือ



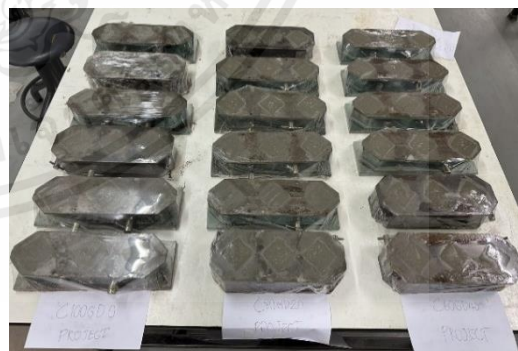
รูปที่ ฌ-9 ไวแคท



รูปที่ ฌ-10 เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์

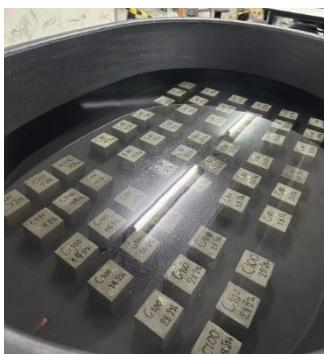


รูปที่ ฌ-11 เตรียมแบบ



รูปที่ ฌ-12 เข้าแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ฅ-13 บ่มน้ำ



รูปที่ ฅ-14 เตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ ฅ-15 บ่มสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



รูปที่ ฅ-16 วัดขนาด โดยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์



รูปที่ ฅ-17 ชั่งน้ำหนัก



รูปที่ ฅ-18 เครื่องทดสอบกำลังอัด UTM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้