



พฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

โดย

นางภัสดา ภู์พูล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

พฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

โดย

นางภัสดา ภู์พูล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา พ.ศ. 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



MECHANICAL BEHAVIOR OF CEMENT PASTE CONTAINING GLASS
DUST

BY

MRS PASSADA PHOOPHOOL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER PROGRAM IN CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2015
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

วิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นางภัสดา ภูพูล

เรื่อง

พฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

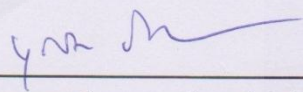
ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

เมื่อ วันที่ 4 สิงหาคม พ.ศ. 2559

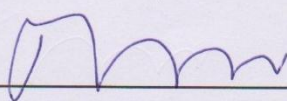
ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศักดิ์ พิสิษฐ์ไพบูลย์)

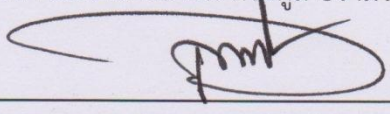
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร. บุรณัฏฐ์ นัฏธีระ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์


(รองศาสตราจารย์ ดร. ตระกูล อร่ามรักษ์)

คณบดี


(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสัสสร วังศกาญจน์)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
ชื่อผู้เขียน	ภัสดา ภู่วูล
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวิระ
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีเศษแก้วทิ้งเป็นขยะจำนวนมากซึ่งไม่ได้ถูกนำกลับไปใช้และนับวันจะมีปริมาณขยะจากเศษแก้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว โดยนำฝุ่นแก้วที่ได้จากการบดขวดแก้วสีชาจนเป็นผงละเอียดมาผสมกับซีเมนต์เพสต์ที่อัตราร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ต่อน้ำหนัก ตามลำดับ ทำการหล่อซีเมนต์เพสต์เป็นก้อนตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร โดยทำการบ่มที่ระยะเวลาและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ ทดสอบหาค่าความชันเหลวปกติ ระยะเวลาก่อตัวและทดสอบการรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ผลการศึกษาพบว่า ฝุ่นแก้วมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 71.36 และซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วมีความต้องการน้ำน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว โดยจะมีปริมาณความต้องการน้ำลดลงตามปริมาณการแทนที่ของฝุ่นแก้ว นอกจากนี้ยังพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะมีกำลังรับแรงอัดลดลงตามสัดส่วนของฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยตัวอย่างที่ทำการอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจะมีค่ากำลังรับแรงอัดมากที่สุด อย่างไรก็ตามค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้น

คำสำคัญ: ฝุ่นแก้ว, ซีเมนต์เพสต์, พฤติกรรมทางกล

Thesis Title	Mechanical Behavior of Cement Paste Containing Glass Dust
Author	Passada Phoophool
Degree	Master of Engineering
Department/Faculty/University	Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Burachat Chatveera
Academic Years	2015

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. 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%, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50% respectively. Cylinder specimens size 5 cm. diameters and 10 cm. high have been cast. Then cure the specimens at different curing time and temperature. 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 71.36% SiO_2 . 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. The specimen which was curing at 80°C has the highest compressive strength. However, compressive strength of cement paste containing glass dust is increased due to the longer curing time.

Keywords: Glass Dust, Cement Paste, Mechanical Behavior

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คุณวัฒน์ ทิพย์วีรนนท์ หัวหน้าส่วนจำกัดแก้วสิงห์ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุฝุ่นแก้วในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณ คุณณัฐวุฒิ กองม่วง ผู้จัดการส่วนควบคุมคุณภาพ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทดสอบคุณสมบัติของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 รวมทั้งห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้อนุเคราะห์เครื่องมือในการทดสอบและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุรฉัตร ฉัตรวีระ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ ช่วยแนะนำแนวทาง และให้คำปรึกษาจนการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัย ที่ให้ความสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่วงการวิศวกรรมและผู้ที่สนใจศึกษาค้นคว้าต่อไปในอนาคต

นางภัสดา ภู่อุปูล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
ABSTRACT	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(9)
สารบัญภาพ	(10)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและประเด็นปัญหาของการศึกษาวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย	5
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการจากการศึกษาวิจัย	5
1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	7
2.1.2 สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	8
2.1.3 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
2.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
2.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)	12
2.1.5.1 ปฏิกิริยาของสารประกอบ	12
2.1.5.2 โครงสร้างของซีเมนต์เพสต์	14

2.1.5.3 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน	15
2.1.6. ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)	17
2.2 การทดสอบซีเมนต์เพสต์	18
2.2.1 การทดสอบความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency)	18
2.2.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว	19
2.3 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์เพสต์	19
2.3.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน	20
2.3.2 อายุของคอนกรีต	20
2.3.3 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	20
2.3.4 ชนิดมวลรวม	20
2.3.5 วิธีการบ่มและระยะเวลาการบ่ม	21
2.3.6 การทำคอนกรีตให้แน่น	21
2.4 การกีดกร่อนโดยซัลเฟต	21
2.4.1 กลไกการกีดกร่อนด้วยโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)	22
2.4.2 กลไกการกีดกร่อนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)	22
2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกีดกร่อนโดยซัลเฟต	23
2.5 ข้อมูลเกี่ยวกับแก้วบรรจุภัณฑ์	24
2.5.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว	24
2.5.2 ชนิดของแก้ว	24
2.5.3 การใช้งานวัสดุแก้ว	26
2.5.4 องค์ประกอบทางเคมีและวัตถุประสงค์ในการหลอมแก้ว	27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
2.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	28
2.6.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการสูญเสียน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากการกีดกร่อนของซัลเฟต	30
2.7 การประเมินการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เบื้องต้น	34
บทที่ 3 วิธีศึกษาและวิจัย	36
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	36

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	37
3.3 สถานที่ใช้ในการทดสอบ	38
3.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ	38
3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี	38
3.4.2 การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ	39
3.4.2.1 วัตถุประสงค์	39
3.4.2.2 เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัว	39
3.4.2.3 การเตรียมตัวอย่าง	40
3.4.2.4 วิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม	40
3.4.2.5 การทดสอบหาระยะการก่อตัว (Setting Time, ASTM C 191)	42
3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	43
3.4.3.1 การหล่อก้อนซีเมนต์	43
3.4.3.2 การบ่มซีเมนต์เพสต์	44
3.4.3.3 การแช่ซีเมนต์เพสต์ลงในสารละลายซิลิเกต	44
3.4.3.4 การทดสอบกำลังอัดประลัย	45
3.4.3.5 การหาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์	45
3.5 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ	46
3.6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด	47
3.7 ทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว	49
3.8 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ	50
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	51
4.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ	51
4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี	51
4.1.2 สมบัติทางกายภาพ	52
4.1.3 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผง	52
4.1.4 ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว	53
4.1.5 หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	54
4.2 การหาความชื้นเหลวปกติ	55

4.3 ระยะเวลาการก่อตัว	55
4.4 กำลังอัด	56
4.4.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว	56
4.4.2 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	63
4.4.3 ผลของสารละลายซัลเฟตที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์	66
4.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก	68
4.5.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก	68
4.5.2 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก	75
4.5.3 ผลของสารละลายซัลเฟตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ ผสมฝุ่นแก้ว	77
4.6 การเปลี่ยนแปลงขนาด	79
4.6.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสภาวะต่างๆ	79
4.6.2 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสภาวะต่างๆ	82
4.6.3 ผลของการแช่สารละลายซัลเฟตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	84
4.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis	86
4.7.1 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	86
4.7.2 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	87
4.7.3 ผลของการแช่สารละลายซัลเฟตที่มีต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์	88
4.8 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เบื้องต้น	102
4.8.1 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตซีเมนต์เพสต์ ผสมฝุ่นแก้ว	102
4.9 การประเมินผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม	104
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ	107
5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย	107
5.2 ข้อเสนอแนะ	109

รายการอ้างอิง	110
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ	115
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว	117
ภาคผนวก ค ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด	120
ภาคผนวก ง ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก	156
ภาคผนวก จ ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด	192
ภาคผนวก ฉ ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้ว	195
ภาคผนวก ช รูปประกอบการทำวิจัย	208
ภาคผนวก ซ ตารางค่า Emission Factor ของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า	210
ภาคผนวก ฌ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่เกิดจากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	212
ภาคผนวก ฎ ผลกระทบทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	215
ประวัติผู้เขียน	218

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การจัดเรียงลำดับกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก ในปี 2554	2
1.2 ปริมาณซัลเฟตและแอมโมเนียจากโรงงานผลิตน้ำยาง	2
1.3 แสดงข้อมูลการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ ในปี พ.ศ. 2557	4
2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	9
2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	12
2.3 ออกไซด์ที่ผสมเพื่อให้สีในแก้ว	28
2.4 แหล่งวัตถุดิบซึ่งเป็นที่มาขององค์ประกอบทางเคมีต่างๆในแก้ว	28
3.1 อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว	40
3.2 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วสำหรับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว	43
3.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแพร่สารละลายซัลเฟต 7 วัน	46
3.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแพร่สารละลายซัลเฟต 14 วัน	46
3.5 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแพร่สารละลายซัลเฟต 28 วัน	47
3.6 จำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ	47
3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด	48
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	51
4.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	52
4.3 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วร้อยละ 0 แชน้ำ ที่ 28 วัน ที่บ่มด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน	87
4.4 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วร้อยละ 0 แชน้ำ ที่ 28 วัน ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C	88
4.5 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C และแพร่สารละลายแตกต่างกัน ที่ 28 วัน	89

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมการผลิต ในปี 2554	1
1.2 แผนภูมิวงกลมแสดงร้อยละปริมาณสารเคมีในฝนกรด	3
1.3 ขยะจากขวดแก้วสีชาที่เหลือใช้	4
2.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก (ค่าร้อยละ) กับเวลา (วัน)	9
2.2 สารประกอบหลักและสารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	11
2.3 ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกต	13
2.4 ลักษณะของเอทริงไกต์ (Ettringite)	14
2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับอายุของซีเมนต์เพสต์	17
2.6 รูปจำลองกระบวนการแตกตัวของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนด้วยซัลเฟต	23
3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	36
3.2 ฝุ่นแก้ว	36
3.3 โซเดียมซัลเฟต	37
3.4 แมกนีเซียมซัลเฟต	37
3.5 ลักษณะเครื่องมือไวแคต (ASTM C 187-98)	39
3.6 เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C 191	42
3.7 ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	44
3.8 การบ่มตัวอย่าง	44
3.9 เครื่องมือทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด	48
4.1 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า	53
4.2 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคฝุ่นแก้วที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า	53
4.3 กราฟแสดงค่าร้อยละที่ผ่านตะแกรงกับขนาดตะแกรงมาตรฐาน	54
4.4 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว	54
4.5 ปริมาณน้ำที่เติมจนซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวตามมาตรฐาน	55
4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม	56

- 4.21 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 14 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31°C), 70°C , 80°C และ 90°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 64
- 4.22 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31°C), 70°C , 80°C และ 90°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 65
- 4.23 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31°C), 70°C , 80°C และ 90°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง 65
- 4.24 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่ NaSO_4 , MgSO_4 , H_2O เป็นระยะเวลา 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 67
- 4.25 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่น้ำ (H_2O) เป็นระยะเวลา 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน 67
- 4.26 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C) 69
- 4.27 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C) 69
- 4.28 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 29 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C) 70
- 4.29 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 70°C 70
- 4.30 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 70°C 71
- 4.31 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 29 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 70°C 71
- 4.32 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80°C 72

- 4.33 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซิลิเฟต
เป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C 72
- 4.34 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซิลิเฟต
เป็นเวลา 29 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C 73
- 4.35 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซิลิเฟต
เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C 73
- 4.36 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซิลิเฟต
เป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C 74
- 4.37 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซิลิเฟต
เป็นเวลา 29 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C 74
- 4.38 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซิลิเฟต
เป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน 75
- 4.39 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสม
ฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม แห้สารละลายซิลิเฟตเป็นเวลา 7 วัน ที่ผ่านการบ่ม
ด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 75
- 4.40 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์
ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม แห้สารละลายซิลิเฟตเป็นเวลา 14 วัน
ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C
เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 76
- 4.41 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์
ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม แห้สารละลายซิลิเฟตเป็นเวลา 28 วัน
ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C
เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง 76
- 4.42 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
ของแต่ละสัดส่วนผสม แห้สารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 28 วัน
ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C
เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง 77
- 4.43 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซิลิเฟต
เป็นเวลา 2 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C 78

- 4.44 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลาย
แมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C
เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน 79
- 4.45 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) 80
- 4.46 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) 80
- 4.47 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้ น้ำ (H_2O) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) 81
- 4.48 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) เมื่อเทียบกับ
ซีเมนต์เพสต์ล้วน 81
- 4.49 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C
และ 90 °C 82
- 4.50 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C
และ 90 °C 83
- 4.51 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้ น้ำ (H_2O) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C 83
- 4.52 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C
และ 90 °C เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง 84
- 4.53 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลาย MgSO_4 , Na_2SO_4 และ H_2O บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) 85
- 4.54 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
แห้สารละลาย MgSO_4 , Na_2SO_4 และ H_2O บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C)
เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแห้ น้ำ (H_2O) 86
- 4.55 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0
บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแห้ น้ำ ที่ 28 วัน 90

4.56 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่น้ำ ที่ 28 วัน	91
4.57 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (80 °C) และแช่น้ำ ที่ 28 วัน	92
4.58 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (80 °C) และแช่น้ำ ที่ 28 วัน	93
4.59 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ Na ₂ SO ₄ ที่ 28 วัน	94
4.60 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ Na ₂ SO ₄ ที่ 28 วัน	95
4.61 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (80 °C) และแช่ Na ₂ SO ₄ ที่ 28 วัน	96
4.62 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (80 °C) และแช่ Na ₂ SO ₄ ที่ 28 วัน	97
4.63 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ MgSO ₄ ที่ 28 วัน	98
4.64 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ MgSO ₄ ที่ 28 วัน	99
4.65 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (80 °C) และแช่ MgSO ₄ ที่ 28 วัน	100
4.66 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (80 °C) และแช่ MgSO ₄ ที่ 28 วัน	101
4.67 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	102
4.68 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	103
4.69 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	103
4.70 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	104

4.71 กราฟแสดงราคาต้นทุนการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	105
4.72 กราฟแสดงราคาต้นทุนการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	105
4.73 กราฟแสดงราคาต้นทุนการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	106
4.74 กราฟแสดงราคาต้นทุนการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม	106

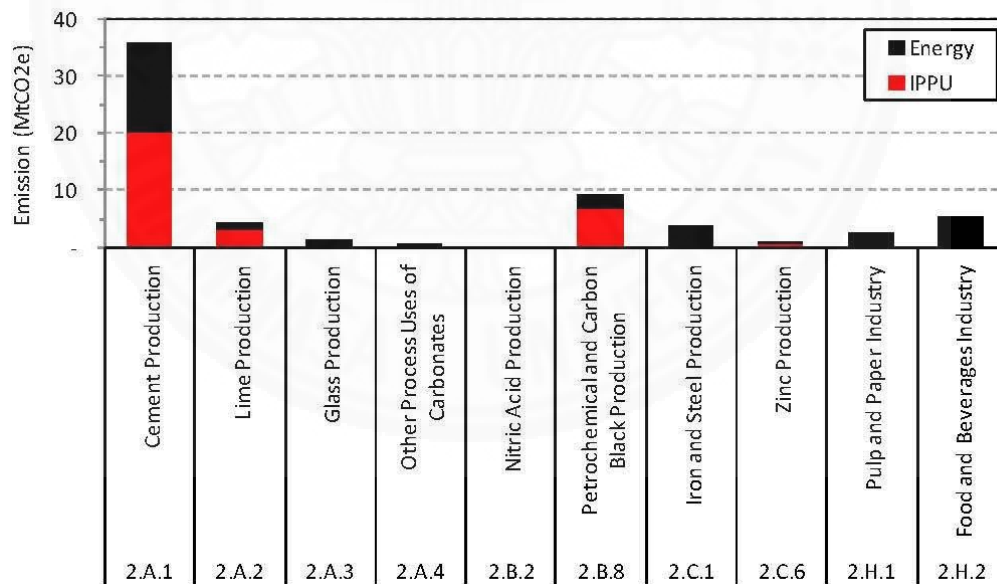


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและประเด็นปัญหาของการศึกษาวิจัย

ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งมาจากการเปลี่ยนรูปทางเคมีของวัตถุดิบและการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นก๊าซเรือนกระจกและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน โดยจากการคำนวณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคการเผาไหม้เชื้อเพลิงในกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตและก่อสร้าง และการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคกระบวนการอุตสาหกรรมและการใช้ผลิตภัณฑ์ของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2554 ดังภาพที่ 1.1 และตารางที่ 1.1 พบว่าอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุดเป็นปริมาณ 35.8 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (MtCO_2e) คิดเป็นร้อยละ 56.7 ของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด



ภาพที่ 1.1 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากอุตสาหกรรมการผลิต ในปี 2554

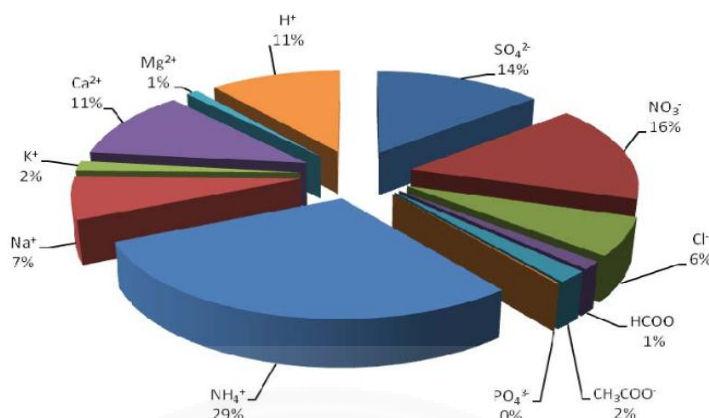
ตารางที่ 1.1 การจัดเรียงลำดับกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก ในปี 2554

ลำดับ ที่	ภาค IPPU กลุ่มอุตสาหกรรม	GHG (MtCO ₂ e)	ภาค Energy กลุ่มอุตสาหกรรม	GHG (MtCO ₂ e)	รวมทั้ง 2 ภาค กลุ่มอุตสาหกรรม	GHG (MtCO ₂ e)
1	การผลิตปูนซีเมนต์	19.9	การผลิตโลหะ	23.5	การผลิตปูนซีเมนต์	35.8
2	การผลิตปิโตรเคมีฯ	6.8	การแปรรูปอาหารฯ	5.1	การผลิตปิโตรเคมีฯ	9.1
3	การผลิตปูนขาว	3.2	การผลิตอื่นๆ	5.0	การแปรรูปอาหารฯ	5.1
4	การผลิตสังกะสี	0.5	การผลิตเหล็กฯ	3.4	การผลิตปูนขาว	4.4
5	การผลิตเหล็กฯ	0.3	การผลิตแร่โลหะ	3.1	การผลิตเหล็กฯ	3.7

นอกจากนี้ เนื่องจากสภาพแวดล้อมในปัจจุบัน ได้เกิดมลพิษทางด้านสารเคมีประเภทที่สามารถกัดกร่อนต่อคอนกรีตได้ จากสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นกรดและจากสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นซัลเฟต เช่น โซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ที่เป็นสารเคมีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำกร่อย น้ำทะเล และฝนกรด ดังแสดงในภาพที่ 1.2 ซึ่งปริมาณซัลเฟตจากโรงงานผลิตน้ำยางได้แสดงในตารางที่ 1.2 และปริมาณสารเคมีในฝนกรดได้แสดงในภาพที่ 1.2 ดังนั้นการออกแบบคอนกรีตในปัจจุบันจึงต้องออกแบบให้มีความทนทานของคอนกรีตในสภาพแวดล้อมที่ปนเปื้อนไปด้วยความเป็นกรดและความเป็นซัลเฟต โดยเฉพาะความเป็นซัลเฟต ที่ทำให้คอนกรีตเกิดความสูญเสียกำลังรับแรงอัด สูญเสียน้ำหนัก เกิดการขยายตัว และเกิดการร้าวร้าวในที่สุด

ตารางที่ 1.2 ปริมาณซัลเฟตและแอมโมเนียจากโรงงานผลิตน้ำยาง (วีระชาติ อินทร์ทอง, 2551)

จุดเก็บ ตัวอย่าง	pH	Temperature (°C)	ปริมาตรต่อ 1 วัน (m ³)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ Loading (kg/day)	NH ₃ (mg/l)
1	9.63	29.3	109.67	-	-	2143.75
2	9.13	29.5	320.93	-	-	108.50
3	4.39	32.1	612.13	6075.96	3719.73	-
4	4.36	29.6	499.19	3836.54	1915.16	-
5	4.46	28.9	51.30	3832.69	196.62	-
6	4.47	31.6	164.25	5747.12	943.96	-
7	4.53	29.9	485.18	4381.73	2125.93	-
8	4.75	29.7	494.78	4372.12	2163.24	-
9	-	-	3.27	-	-	-
10	12.2	30.7	9.60	-	-	-



ภาพที่ 1.2 แผนภูมิวงกลมแสดงร้อยละปริมาณสารเคมีในฝนกรด (สมพร จันทระและคณะ, 2555)

ปอซโซลาน (Pozzolan) คือ วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบไปด้วย ซิลิกาและอะลูมินา อยู่ในปริมาณสูง เมื่อบดเป็นผงละเอียด จะมีความสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิปกติและเมื่อมีความชื้นแล้วเกิดเป็นสารประกอบซึ่งมีสมบัติในการยึดประสาน ในปัจจุบันได้มีการศึกษาวิจัย การนำสารปอซโซลานมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้น ทั้งในด้านกำลังอัด ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ความสามารถทำงานได้ ลดการแตกร้าวและลดต้นทุนการผลิต เป็นต้น แต่การใช้ปอซโซลานในประเทศไทยค่อนข้างมีข้อจำกัด ทั้งนี้เพราะถ้าเลือกใช้ผสมในงานคอนกรีตนั้นแม้จะมีราคาถูก แต่จะมีการพัฒนากำลังอัดช้าและให้กำลังในระยะต้นต่ำ ส่วนการนำซิลิกาฟูมมาใช้ แม้จะมีการพัฒนากำลังอัดที่เร็วและให้กำลังระยะต้นที่สูงกว่าคอนกรีตปกติ แต่มีราคาที่สูงมากตามไปด้วย

แก้วเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูก จากข้อมูลการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ ในปี 2557 ดังตารางที่ 1.3 และภาพที่ 1.3 จะพบว่าประเทศไทยขยะมูลฝอยประเภทแก้ว 2,367,459 ตัน โดยมีการนำกลับไปใช้ใหม่เพียงร้อยละ 59 และเหลือทิ้งเป็นขยะมูลฝอยถึงร้อยละ 41 และนับวันจะมีปริมาณขยะจากเศษแก้วเพิ่มมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต ทำให้มีการรณรงค์การนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งหากสามารถนำเศษแก้วเหลือใช้ดังกล่าวมาใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตได้ จะเป็นประโยชน์ต่องานก่อสร้างในประเทศไทยอย่างมาก นอกจากนี้ยังจะช่วยลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ฝุ่นแก้ว (Glass Dust) ซึ่งได้มาจากการบดเศษแก้วจนละเอียดเป็นผง มีศักยภาพซึ่งสามารถเป็นปอซโซลานได้ คือมีปริมาณซิลิกาสูง โดยซิลิกาเป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้โครงสร้างของแก้วแข็งแรง นอกจากนี้ยังมีซิลิกาในรูปอสัณฐานในปริมาณที่สูง ซึ่งช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ง่าย



ภาพที่ 1.3 ขยะจากขวดแก้วสีชาที่เหลือใช้

ตารางที่ 1.3 แสดงข้อมูลการนำขยะมูลฝอยกลับมาใช้ประโยชน์ ในปี พ.ศ. 2557

ประเภท	ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น (ตัน)	ปริมาณการนำกลับมาใช้ประโยชน์		รวม		วิธีการ
		ซื้อขายในชุมชน (ตัน)	ซื้อขาย/แลกเปลี่ยนระหว่างอุตสาหกรรม (ตัน)	ตัน	ร้อยละ	
แก้ว	2,367,459	923,309	189,397	1,112,706	47	การแปรรูปใช้ใหม่
			295,000	295,000	12	การใช้ซ้ำ
กระดาษ	4,750,086	1,187,522	1,425,026	2,612,547	55	การแปรรูปใช้ใหม่
พลาสติก	1,310,400	655,200	196,560	851,760	65	การแปรรูปใช้ใหม่
เหล็ก/โลหะ	3,343,870	769,090	2,507,902	3,276,992	98	การแปรรูปใช้ใหม่
อะลูมิเนียม	882,925	88,292	309,024	397,316	45	การแปรรูปใช้ใหม่
ยาง	600,459	9,007	150,115	159,122	27	การแปรรูปใช้ใหม่
			93,900	93,900	16	การใช้ซ้ำ
			24,000	24,000	4	การใช้เป็นเชื้อเพลิง
รวม	13,255,199	3,639,780	5,198,328	8,823,343	67	

ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวคิดในการศึกษาวิจัยพฤติกรรมทางกลของซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้ว ตั้งแต่การศึกษา องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติกายภาพของฝุ่นแก้ว, ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยฝุ่นแก้ว รวมถึงศึกษาการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว นอกจากนี้ยังทำการศึกษาวิจัยด้านการสูญเสียกำลังอัดและการสูญเสียน้ำหนักของปูนซีเมนต์ผสมฝุ่นแก้ว จากการกักร่อนของซัลเฟต

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติกายภาพของฝุ่นแก้ว
- 2) เพื่อศึกษาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
- 3) เพื่อศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว
- 4) เพื่อศึกษาการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว จากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว
- 5) เพื่อศึกษาการสูญเสียน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว เนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการศึกษาวิจัย

- 1) ทราบถึงคุณสมบัติทางเคมีและสมบัติกายภาพของฝุ่นแก้ว
- 2) ทราบถึงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว
- 3) ทราบถึงสัดส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งาน
- 4) ทราบถึงการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว
- 5) ทราบถึงการสูญเสียน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว เนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต

1.4 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

- 1) ใช้ฝุ่นแก้วในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก และใช้อุณหภูมิในการบ่ม ดังนี้ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดที่สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนจากซัลเฟตได้
- 2) วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ
 - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 งานโครงสร้างตราสีพีไอ (แดง)

- ฝุ่นแก้ว
- น้ำประปา
- สารละลายโซเดียมซิลิเฟต, สารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟต

3) ศึกษาสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

4) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF)

5) ทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ของซีเมนต์เพสต์โดยใช้เทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

6) ทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

7) ทดสอบหาการเปลี่ยนแปลงขนาด

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ (Portland Cement) หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ได้จากการเผาวัตถุดิบที่ประกอบไปด้วยหินปูน (Calcareous) ดินเหนียวประเภท Argillaceous ออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และเหล็ก แล้วนำมาบดเป็นผงละเอียดเพื่อนำไปใช้งานต่อไป ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์นั้นมีสารประกอบที่สำคัญได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละประเภทจะมีอัตราส่วนสารประกอบที่ต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน

2.1.1 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่จะผลิตตามมาตรฐานของอเมริกา (ASTM C 150) และของประเทศอังกฤษ (British Standard:BS) ซึ่งมาตรฐานของปูนซีเมนต์ประเภทปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของไทย (มอก.15 เล่ม 1-2514) มาตรฐานของอเมริกา (ASTM C-150-63) มาตรฐานของอังกฤษ (BS.12-1958) มาตรฐานเยอรมัน (DIN) และมาตรฐานของญี่ปุ่น (JIS) ต่างแบ่งประเภทของปูนซีเมนต์ชนิดปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ออกเป็น 5 ประเภทดังนี้

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ที่ผลิตตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.15 เล่ม 1-2514 ประเภทที่ 1 เทียบได้กับมาตรฐาน ASTM C 150-63 Type I ของสหรัฐอเมริกา เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่นิยมใช้สำหรับงานคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมธรรมดาที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษ ใช้ได้ดีสำหรับโครงสร้างอาคารโดยทั่วไปที่ไม่อยู่ในสภาวะอากาศรุนแรง หรือที่มีซัลเฟตไม่รุนแรง ความร้อนจากปฏิกิริยารวมตัวกับน้ำอยู่ในระดับไม่เป็นอันตรายต่อคุณภาพใช้งานของคอนกรีต ไม่เหมาะกับการงานปูนก่อ หรือปูนฉาบ เพราะจะก่อตัวเร็วและแห้งตัวเร็ว ใช้ได้ดีกับงานเท เช่น เสาโครงสร้าง เสาเข็ม หรือคอนกรีตบล็อก

2) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 2

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทดัดแปลง (Modified Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปริมาณที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่

1 แต่ให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เหมาะกับคอนกรีตที่สัมผัสซัลเฟตปานกลาง

3) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทแข็งตัวและให้กำลังเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดในช่วงแรกสูงและให้ความร้อนสูง เนื่องจากมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) มาก และมีความละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใช้ในงานที่ต้องการถอดแบบเร็ว

4) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 4

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) ให้ความร้อนจากการปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำที่สุด เพราะมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) ต่ำ แต่จะมีปริมาณสารประกอบไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) มาก เหมาะกับการใช้งานคอนกรีตหนา หรืองานที่ใช้ปริมาณคอนกรีตมาก

5) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนทานต่อซัลเฟต (Sulfate Resistance Portland Cement) ที่สามารถทนทานต่อซัลเฟตที่มีความเข้มข้นสูง เพราะมีปริมาณสารประกอบไตรแคลเซียมอะลูมินา (C_3A) น้อยมาก เหมาะกับคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำทะเล ซัลเฟต และดินเค็ม

2.1.2. สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium Silicate or Alite)

สัญลักษณ์ทางเคมี ($3CaO.SiO_2$) หรือใช้ชื่อย่อว่า C_3S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเป็นผลึก 6 เหลี่ยม มีสีเทาเข้ม คุณสมบัติของ C_3S เหมือนกับคุณสมบัติของปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2 ถึง 3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงแรก ซึ่งการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium Silicate or Belite)

สัญลักษณ์ทางเคมี ($2CaO.SiO_2$) หรือใช้ชื่อย่อว่า C_2S เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างกลม เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม ให้ความแข็งแรงแก่ปูนซีเมนต์ในระยะแรกต่ำ และจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ ในภายหลัง จะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S

3) ไตรแคลเซียมอะลูมินา (Tricalcium Aluminate)

สัญลักษณ์ทางเคมี ($3CaO.Al_2O_3$) หรือใช้ชื่อย่อว่า C_3A เป็นสารประกอบที่มีรูปร่างเหลี่ยมมุม สีเทาอ่อน จะทำปฏิกิริยากับน้ำทันที ก่อให้เกิด Flash Set เกิดความร้อน 850 จูลต่อกรัม การ

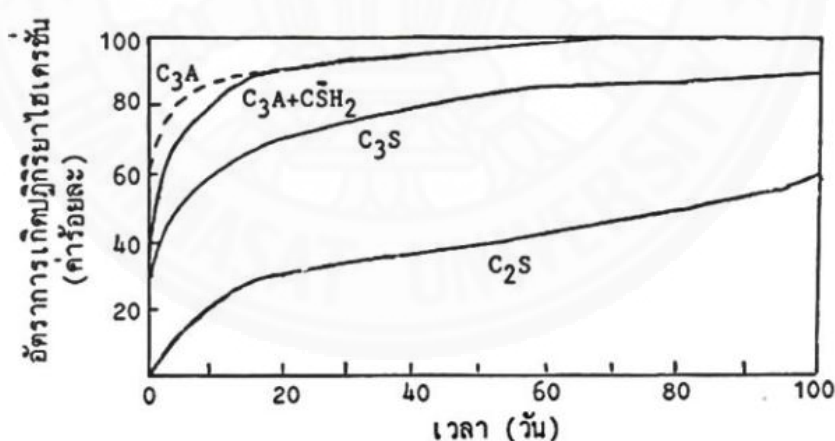
ป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิปซัมลงไประหว่างการบดซีเมนต์ กำลังของ C_3A จะพัฒนา กำลังอัดขึ้นภายใน 1 ถึง 2 วัน แต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ

4) เตตราแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium Aluminoferrite)

สัญลักษณ์ทางเคมี ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$) หรือชื่อย่อว่า C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่นาที ความร้อนเกิดขึ้น 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดา ประเสริฐ และชัย จตุรพิทักษ์กุล, 2553)

คุณสมบัติ	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันใด	เร็วมาก (นาทีก)
การพัฒนากำลังอัด	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1วัน)	เร็วมาก (1วัน)
กำลังอัดประลัย	สูง	ค่อนข้างสูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (จูล/กรัม)	ปานกลาง	น้อย	สูงมาก	ปานกลาง
ปริมาณโดยน้ำหนัก(ร้อยละ)	500	250	850	420
ปริมาณโดยน้ำหนัก(ร้อยละ)	35-55	15-35	15-35	15-10



ภาพที่ 2.1 อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารประกอบหลัก (ค่าร้อยละ) กับเวลา (วัน)
(บุรฉัตร และพิชัย, 2537)

2.1.3 สารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1) ยิปซัม (Gypsum) สัญลักษณ์ทางเคมี $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ หรือเขียนเป็น $CaO \cdot SO_3 \cdot 2H_2O$ หรือ CSH_2 ซึ่งในขั้นสุดท้ายของกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะบดปูนเม็ดร่วมกับยิปซัม

เพื่อป้องกันการก่อตัวเร็วเกินไปของซีเมนต์เพสต์ ในทางตรงกันข้าม ถ้ามีปริมาณยิปซัมมากเกินไปจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่แข็งตัวแล้วเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้ ปริมาณยิปซัมที่ใส่ควรที่จะเหมาะสมเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์เกิดกำลังอัดสูงที่สุดและเกิดการหดตัวน้อยที่สุด ปริมาณยิปซัมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับปริมาณอัลคาไลน์ออกไซด์ ได้แก่ Na_2O และ K_2O ปริมาณ C_3A และความละเอียดของปูนซีเมนต์

2) ปูนขาวอิสระ (Free Lime) CaO เกิดขึ้นได้ 2 กรณีคือ

กรณีที่ 1 วัตถุดิบมีปริมาณปูนขาวมากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ได้หมดในเตาเผา และกรณีที่ 2 ปริมาณปูนขาวไม่มากเกินไป แต่การทำปฏิกิริยาเป็นปูนเม็ดในระหว่างการเผาไม่สมบูรณ์ทำให้เหลือปูนขาวอิสระ

การเกิดขึ้นของกรณีที่ 1 และ 2 ทำให้เหลือ ปูนขาวอิสระในปูนซีเมนต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.2 อุณหภูมิของการสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) อยู่ที่ประมาณ 900 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิในการเผาปูนซีเมนต์สูง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส จะทำให้ปูนขาวถูกเผาจนเกรียม เป็นผลทำให้ปูนขาวอิสระรวมตัวกับน้ำได้ช้า ซึ่งการรวมตัวของปูนขาวอิสระกับน้ำจะเกิดขึ้นหลังจากที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวแล้ว ถ้าปูนขาวอิสระมีมากพออาจทำให้ซีเมนต์เพสต์ที่ก่อตัวแล้วขยายตัวและแตกร้าวได้ พฤติกรรมนี้เรียกว่า ความไม่คงตัว (Unsoundness)

3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)

วัตถุดิบสำหรับผลิตปูนซีเมนต์มีแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) ผสมอยู่เล็กน้อย เมื่อเผาวัตถุดิบ MgCO_3 จะสลายตัวได้เป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) บางส่วนจะหลอมเป็นปูนเม็ดที่เหลืออยู่ในรูปของแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เมื่อทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจะก่อให้เกิดความไม่อยู่ตัว การขยายตัวได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณ MgO ในปูนซีเมนต์ และขนาดของ MgO ถ้าขนาดเล็กมากๆจะเกิด ปฏิกิริยาไฮเดรชันได้เร็วโดยไม่เกิดการขยายตัวของซีเมนต์ที่แข็งตัว

4) ออกไซด์ของอัลคาไล (Alkali Oxides) (Na_2O , K_2O)

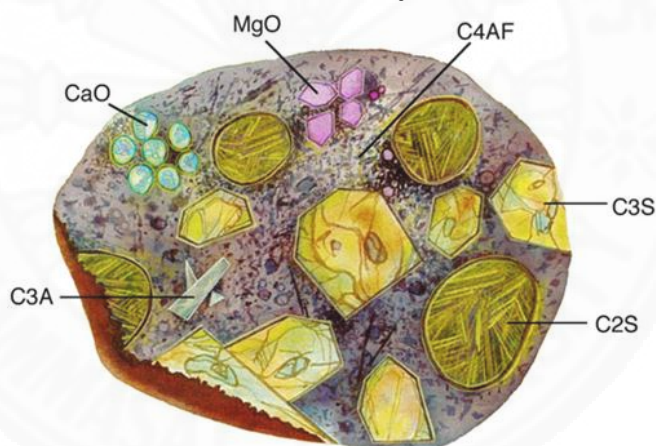
มีอยู่ประมาณร้อยละ 0.5 ถึง 1.3 ในปูนซีเมนต์แต่จะมีบทบาทสำคัญในกรณีที่มวลรวม (Aggregate) ซึ่งได้แก่ หินและทรายสามารถทำปฏิกิริยากับอัลคาไล มวลรวมจำพวกนี้เป็นซิลิกาที่ว่องไวและทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของอัลคาไลได้ จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่า อัลคาไลซิลิกา (Alkali Silica Reaction) ปฏิกิริยานี้ทำให้เกิดซิลิกาเจล ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและอาจทำให้คอนกรีตแตกร้าวได้ การแก้ไขปัญหามีการใช้ปูนซีเมนต์ที่มีอัลคาไลต่ำ (ต่ำกว่าร้อยละ 0.06) โดยคิดเป็นค่าเทียบเท่าปริมาณของ Na_2O หรือเลี่ยงการใช้มวลรวมที่มีซิลิกาที่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยา หรืออาจใช้สารปอซโซลานในส่วนผสมคอนกรีต

5) ฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (P_2O_5)

มีอยู่ในวัตถุดิบที่ใช้ทำปูนซีเมนต์บางแหล่ง ส่วนมากมาจากหินปูนและมีอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.1 ถึง 0.2 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ สารนี้ทำให้ปูนซีเมนต์แข็งตัวช้าเนื่องจาก P_2O_5 ทำให้ C_3S สลายตัวเป็น C_2S กับ CaO นอกจากนี้ถ้ามี P_2O_5 มากพออาจทำให้ความไม่คงตัวของปูนขาวอิสระ เกิดเพิ่มมากขึ้น

6) กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง

ปูนซีเมนต์ที่ใช้กันทั่วไปพบว่ามีสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการเผาปูนซีเมนต์ที่ไม่สมบูรณ์ และบางส่วนปนมากับยิปซัม มีความเป็นผลึกสูงจึงไม่สามารถทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้และไม่ มีผลที่จะเพิ่มกำลังให้แก่ปูนซีเมนต์ เรียกสิ่งเจือปนนี้ว่ากากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue) ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณกากที่ไม่ละลายในกรดและด่างสูงจะทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็น ผลมาจากการที่มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง มาตรฐานการทดสอบวัสดุตาม ASTM C 150 ได้กำหนด ปริมาณกากที่ไม่ละลายในกรดและด่างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไว้ ไม่เกินร้อยละ 0.75 สารประกอบหลักและสารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังแสดงในภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 สารประกอบหลักและสารประกอบรองในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Taylor, 1997)

2.1.4 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบไปด้วยออกไซด์ 2 กลุ่มใหญ่คือ ออกไซด์หลักและออกไซด์รอง มีรายละเอียดดังนี้

1) ออกไซด์หลัก ได้แก่ CaO , SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 ซึ่งรวมกันประมาณร้อยละ 90 ของน้ำหนักซีเมนต์

2) ออกไซด์รอง ได้แก่ MgO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 และยิปซัม ค่าออกไซด์ต่างๆ ที่เป็น องค์ประกอบของปูนซีเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าออกไซด์ต่างๆที่เป็นองค์ประกอบของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด, 2552)

กลุ่ม	ออกไซด์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ออกไซด์หลัก	CaO	60 – 67
	SiO ₂	17 – 25
	Al ₂ O ₃	3 – 8
	Fe ₂ O ₃	0.5 – 6
ออกไซด์รอง	MgO	0.1 – 5.5
	Na ₂ O + K ₂ O	0.5 – 1.3
	TiO ₂	0.1 – 0.4
	P ₂ O ₅	0.1 – 0.2
	SO ₃	1 – 3

2.1.5 ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction)

2.1.5.1 ปฏิกิริยาของสารประกอบ

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ จะก่อให้เกิดการแข็งตัว การก่อตัว และสามารถรับกำลังได้ โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาณสารประกอบแต่ละตัวในปูนซีเมนต์ ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำจะขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาของสารประกอบในปูนซีเมนต์

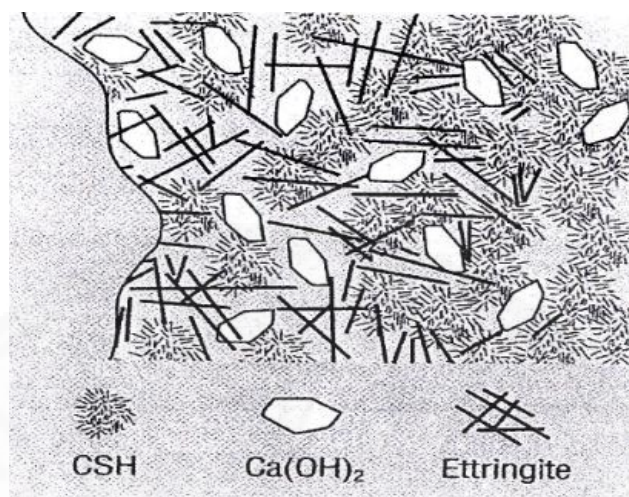
(1) ปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต (C₃S, C₂S)

แคลเซียมซิลิเกตจะทำปฏิกิริยากับน้ำ ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) ปริมาณ ร้อยละ 15 ถึง 25 และแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate, CSH) ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานและให้ความแข็งแรง ดังสมการที่ (2.1) และ (2.2)



ภาพที่ 2.3 แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ที่ได้นั้นจะเป็นลักษณะวุ้น (Gel) ที่ยังไม่แข็งตัว แต่จะแข็งตัวและจะพัฒนา

กำลังเชื่อมประสานมากขึ้นและได้ผลผลิตแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ซึ่งจะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความเป็นด่างอย่างมาก ซึ่งทำให้ซีเมนต์เพสต์มีค่า pH ประมาณ 12.5



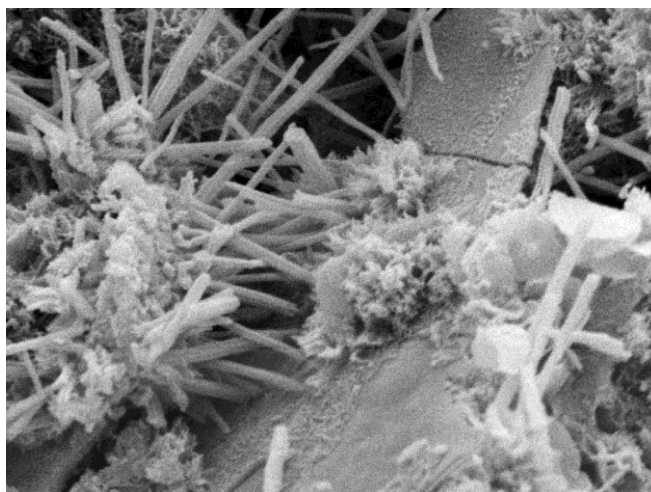
ภาพที่ 2.3 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลเฟต (ซัซวาล เศรษฐบุตร, 2551)

(2) ปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A)

แคลเซียมซัลเฟตไฮเดรต (C_3A) จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วและได้แคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต และก่อให้เกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์ ดังสมการที่ (2.3)



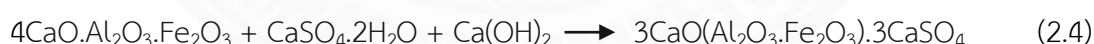
ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ มีการใส่ยิปซัม (Gypsum, CaSO_4) เข้าไปเพื่อหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เพราะเมื่อไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ทำปฏิกิริยากับอออนซัลเฟตในยิปซัม จะได้แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนตไฮเดรต (Calciumsulfoaluminate) หรือ เอทริงไกต์ (Ettringite) จะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เกิดได้ยากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ลักษณะของเอททริงไกต์ (Ettringite) มีรูปร่างอสัณฐาน (Amorphous) ลักษณะคล้ายเข็มผลึก (Nevile, A.M., 1995)

(3) ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF)

ปฏิกิริยาของเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) จะคล้ายปฏิกิริยาของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) แต่จะเกิดช้ากว่าและมีความร้อนจากปฏิกิริยาน้อยกว่าปฏิกิริยาระหว่างเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) กับยิปซัม ($CaSO_4$) จะทำให้เกิดแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calciumsulfoaluminate) และแคลเซียมซัลโฟเฟอไรต์ (Calciumsulfoferrite) ดังสมการที่ (2.4)



2.1.5.2 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 โดยปริมาตร เป็นผลึกรูปร่างหลายแบบ มีทั้งผลึกเล็กที่มีด้านเท่า ผลึกใหญ่ที่ลักษณะเป็นแผ่น และผลึกแบบยาว แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) เป็นสารประกอบที่ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความคงทนลดลง และการให้กำลังยังต่ำกว่าแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) อีกด้วย

(3) แคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calciumsulfoaluminate) มีอยู่ในซีเมนต์เพสต์ประมาณร้อยละ 10 ถึง 15 โดยปริมาตรแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (Calciumsulfoaluminate) หรือเอททริงไต์ (Ettringite) เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ มีลักษณะเป็นเข็มยาวเกิดขึ้นรอบเม็ดปูนและขยายตัวเข้าไปในช่องว่างเอททริงไต์ (Ettringite) จะพยายามดันส่วนที่ล้อมรอบอยู่ออก ถ้าเกิดเอททริงไต์ (Ettringite) ตอนที่ซีเมนต์เพสต์ยังไม่แข็งตัวก็จะเพิ่มคุณสมบัติด้านดีของซีเมนต์เพสต์ แต่ถ้าเกิดเอททริงไต์ (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)

2.1.5.3 กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration)

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ที่เกิดขึ้นในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาของสารประกอบและน้ำ โดยปฏิกิริยาประกอบที่เข้าทำปฏิกิริยา ได้แก่ เอไลต์ (ไตรแคลเซียมซิลิเกต) เบไลต์ (ไดแคลเซียมซิลิเกต) ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอไรต์ (C_4AF) แคลเซียมออกไซด์อิสระ (Free Calcium) ซัลเฟตของอัลคาไลน์ แคลเซียมซัลเฟต และน้ำ ภาพที่ 2.5 แสดงถึงปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิปกติประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ซึ่งแต่ละขั้นตอนจะมีการพัฒนาขององค์ประกอบทางเคมีและกายภาพที่ต่างกัน

(1) ระยะ Pre-induction, ในนาที่แรก

เมื่อปูนซีเมนต์สัมผัสกับน้ำจะมีการแตกตัวอย่างรวดเร็วของไอออนบางชนิดไปยังสถานะของเหลว และมีการฟอร์มตัวของไฮเดรตซัลเฟตของอัลคาไลน์จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ภายในไม่กี่วินาที ทำให้สารละลายนี้มีทั้งไอออนของโพแทสเซียม (K^+) โซเดียม (Na^+) และ ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตก็จะมีการแตกตัวจนกระทั่งอิ่มตัวด้วยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เช่นเดียวกัน ไตรแคลเซียมซิลิเกตจะมีการแตกตัวอย่างต่อเนื่องและจะมีชั้นของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดขึ้นบนผิวของอนุภาคปูนซีเมนต์ เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนไดออกไซด์ (CaO/SiO_2) ของผลิตภัณฑ์ไฮเดรตนี้จะมีค่าต่ำกว่า

ไตรแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สภาวะนี้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออน (Ca^+) และไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในขณะที่ไตรแคลเซียมอะลูมิเนตจะแตกตัวทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออน (Ca^{2+}) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนตที่ทำปฏิกิริยาที่ต่างกันตามชนิดปูนซีเมนต์

(2) ระยะ Induction หรือ ระยะดอร์แมนท์ (Dormant), ในช่วงแรก

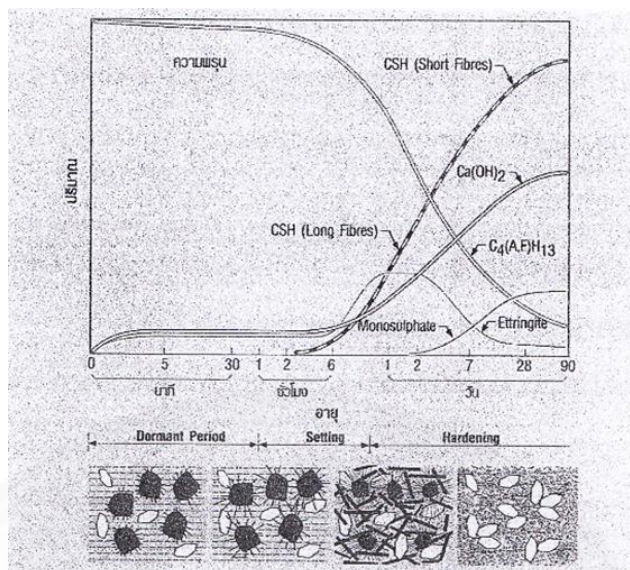
หลังจากช่วงสั้นๆของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ผ่านไปอย่างรวดเร็ว อัตราเร็วของปฏิกิริยาโดยรวมจะลดลงในช่วงแรก สาเหตุที่ปฏิกิริยาลดลงเป็นผลเนื่องมาจากความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในของเหลวที่เริ่มเข้าสู่จุดสูงสุดและกำลังจะลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) อยู่ในระดับคงที่ตามสัดส่วนในการเกิดของเอทริงไกต์ (Ettringite)

(3) ระยะเร่ง (Acceleration Stage), 3 ถึง 12 ชั่วโมงหลังการผสมเสร็จ

ในช่วงนี้จะมีการพัฒนาของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เพิ่มขึ้นอีกครั้ง และจะถูกควบคุมโดยการเกิดและพัฒนาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไฮเดรชัน ผลึกของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะเริ่มตกผลึกทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ไอออน (Ca^{2+}) ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซัลเฟตจะกลับมามีความเข้มข้นอย่างสมบูรณ์ แต่ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) จะลดลงเนื่องจากการฟอร์มตัวของเอทริงไกต์ (Ettringite)

(4) ระยะหลังการเร่ง (Post – Acceleration Period)

ในขณะนี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะลดลงตามปริมาณของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาที่ลดลง ในขณะที่แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) มีการฟอร์มตัวอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นผลมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่อเนื่องของไตรแคลเซียมซิลิเกตและเบต้าไดแคลเซียมซิลิเกต และเมื่อแคลเซียมซัลเฟตถูกใช้หมดไป มีผลทำให้ความเข้มข้นของซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) ลดลง ตามมาด้วยเอทริงไกต์ที่ฟอร์มตัวขึ้น จะเริ่มทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และได้แคลเซียมซึ่งมีโมเลกุลของอะลูมิเนียมและเฟอร์ไรต์ไดโมโนซัลเฟต ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ดังแสดงในภาพที่ 2.5

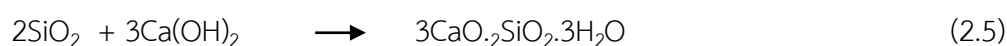


ภาพที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันกับอายุของซีเมนต์
เพสต์ (ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, 2551)

2.1.6. ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction)

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Material) เป็นวัสดุที่นิยมใช้เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดต้นทุนของคอนกรีตหรือเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น เพิ่มความทนทานของคอนกรีตต่อสภาพการกัดกร่อน ช่วยปรับคุณสมบัติของคอนกรีตสดเพื่อให้ทำงานได้ง่ายขึ้น วัสดุปอซโซลานมีส่วนประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิกาและอะลูมินา มีสมบัติในการยึดประสานเล็กน้อยหรือไม่เลย แต่เมื่อบดจนเป็นผงละเอียดจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุดมหมู่ปิกติและเมื่อมีความชื้น แล้วเกิดเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน (ความหมายตามมาตรฐาน มอก. 850-2532)

ปฏิกิริยาปอซโซลานิกคือ ปฏิกิริยาของซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิกอนไดออกไซด์จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ในขณะที่ปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic) ของอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮเดรต ($\text{C}_3\text{A}_2\text{H}_3$) ดังสมการที่ (2.5) และ (2.6)





กลไกของปฏิกิริยาไฮเดรชันในระบบซึ่งมีทั้งไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) และสารปอซโซลานเริ่มขึ้นจากไอออนของแคลเซียม (Ca^{2+}) จะละลายออกจากสารประกอบไตรแคลเซียมซิลิเกต (C_3S) อย่างอิสระลงไปในของเหลวแต่ไอออนดังกล่าวจะถูกดักจับด้วยอนุภาคที่มีประจุลบจากสารปอซโซลานโดยอาศัยการชนกันและถูกดูดซับไว้ที่ผิวของอนุภาคปอซโซลาน แคลเซียมซิลิเกต ไฮเดรตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตจะเกิดการตกตะกอนที่อัตราส่วนแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ (CaO/SiO_2) สูง ในขณะที่บนผิวของสารปอซโซลานจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน แต่จะได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่มีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมออกไซด์ต่อซิลิกอนออกไซด์ต่ำ และมีรูพรุนสูง โดยปกติเมื่ออนุภาคปอซโซลานสัมผัสกับน้ำ ผิวของสารปอซโซลานจะมีคุณสมบัติเป็นประจุลบอันเนื่องมาจากการดึงดูดไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่ได้จากการแตกตัวของน้ำไว้และจะทำให้มีการแตกตัวของโซเดียมไอออน (Na^+) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) และไอออนอื่นๆ เป็นผลให้เกิดชั้นที่ผิวของอนุภาคปอซโซลานซึ่งมีส่วนประกอบของซิลิกอนและอะลูมิเนียมเป็นส่วนใหญ่ การละลายของโซเดียมไอออนและโพแทสเซียมไอออนจะช่วยเร่งการแตกตัวของน้ำให้มีปริมาณของไฮโดรเนียมไอออนเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นการเร่งการแตกตัวของซิลิเกตไอออน (SiO_4^{4-}) และอะลูมิเนียมไอออน (AlO^{2-}) ด้วยและเมื่อรวมกับผลของแคลเซียมไอออนจึงทำให้ความหนาของชั้นอนุภาคปอซโซลานเพิ่มขึ้นและแตกออกในที่สุด

2.2 การทดสอบซีเมนต์เพสต์

ซีเมนต์เพสต์เป็นส่วนผสมที่ได้จากการผสมปูนซีเมนต์กับน้ำ คุณสมบัติหลายๆอย่างของปูนซีเมนต์จะสะท้อนถึงคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่นำไปใช้ทำมอร์ตาร์หรือคอนกรีต ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น

2.2.1 การทดสอบความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency)

ปริมาณน้ำที่ใช้ผสมกับปูนซีเมนต์มีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวของซีเมนต์ผสมเปียกจะก่อตัวช้ากว่าซีเมนต์ผสมแห้ง ดังนั้นในการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวจึงกำหนดให้ทำการทดสอบซีเมนต์เพสต์ที่มีสภาพความชื้นเหลว (Normal Consistency) เป็นมาตรฐานสากล ตามมาตรฐานของ ASTM C 187 โดยกำหนดว่าสภาพความชื้นเหลวปกติคือสถานะที่ซีเมนต์เพสต์ยอมให้เข็มไวน์แคตขนาดมาตรฐานจมลง 10 มิลลิเมตร ภายในเวลา 30 วินาที ปริมาณน้ำ

พอเหมาะที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์ให้ได้สภาวะความชื้นเหลวปกติ โดยปกติปริมาณน้ำจะมีค่าประมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์

2.2.2 การทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมรวมกันน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) ที่มีลักษณะนุ่มเหลว ปั่นง่าย ถ้าปล่อยให้แห้งโดยไม่รบกวนในไม่ช้าซีเมนต์เพสต์จะสูญเสียความไม่คืนตัวและถึงสถานะที่ไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้โดยปราศจากการแตกหัก การเปลี่ยนภูวณนี้เรียกว่า การก่อตัวและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่ง เพื่อที่จะให้ทราบระยะเวลาที่จะต้องทำงานให้แล้วเสร็จก่อนซีเมนต์หรือคอนกรีตจะเริ่มก่อตัวและแข็งตัว ซึ่งจะมีผลเกี่ยวข้องกับการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ คือระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัว หรือแข็งตัวไม่สามารถคืนสภาพเดิมได้ ปกติระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ จะแบ่งออกเป็น 2 ระยะคือ การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) และการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) ตามมาตรฐาน ASTM C 191

(1) การก่อตัวระยะต้น คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานไวแคตได้โดยเข็มไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์เลย 25 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที

(2) การก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มก่อตัวสามารถรับน้ำหนักได้บ้าง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ถึง 5 จะต้องใช้เวลาก่อตัวระยะต้นไม่น้อยกว่า 45 นาทีและไม่เกิน 8 ชั่วโมงสำหรับการก่อตัวระยะปลาย เมื่อวัดโดยใช้เครื่องมือไวแคต ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์จะผันแปรไปตามปัจจัยต่างๆ เช่น ส่วนผสมของเนื้อปูนซีเมนต์ ความละเอียด อุณหภูมิ และความชื้นขณะทดลองและปริมาณน้ำที่ใช้ผสม เป็นต้น

2.3 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์เพสต์

การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต เป็นคุณสมบัติหลักที่สำคัญของคอนกรีต เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพงาน เนื่องจากกำลังต้านทานแรงอื่นๆ เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังต้านทานแรงอัด การทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตทำได้โดยการกดหรืออัดแท่งทดสอบรูปลูกบาศก์ตามมาตรฐานอังกฤษ หรือรูปทรงกระบอกตามมาตรฐานอเมริกัน ซึ่งบ่มขึ้นตามระยะเวลาที่กำหนดจนกระทั่งวิบัติ แล้วทำการคำนวณหาค่าความต้านทานแรงอัดเฉลี่ย

มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร หรือปอนด์ต่อตารางนิ้ว ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการใช้งานซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อายุของซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต ชนิดของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ชนิดมวลรวม วิธีการบ่ม และการทำคอนกรีตให้แน่น

2.3.1 อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์หรืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการใช้งานซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีต เนื่องจากปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมจะทำให้ซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตมีความเหลวมากขึ้น ไหลเข้าแบบได้ง่าย แต่การใช้ปริมาณน้ำมากจะทำให้เกิดช่องว่างในซีเมนต์เพสต์เนื่องจากการระเหยของน้ำ ทำให้กำลังของซีเมนต์เพสต์หรือคอนกรีตลดลงได้

2.3.2 อายุของคอนกรีต

คอนกรีตพัฒนากำลังขึ้นตามอายุของคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้ค่าของกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อมีความชื้นเพียงพอ กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจะมีอัตราการพัฒนามากในช่วงแรกและจะลดลงหลังจากอายุ 28 วัน คอนกรีตที่ทำจากวัสดุปอซโซลานจะให้กำลังอัดในระยะต้นไม่มากนัก แต่ปฏิกิริยาปอซโซลานิกจะทำให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นในระยะยาว

2.3.3 ชนิดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แต่ละประเภทจะมีอัตราส่วนองค์ประกอบทางเคมีที่ไม่เท่ากัน ทำให้ปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะมีการใช้งาน และอัตราการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดที่ไม่เท่ากัน และขนาดของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีผลต่อกำลังรับแรงอัด ซึ่งปูนซีเมนต์ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันมาก ทำให้สามารถพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดได้อย่างรวดเร็ว

2.3.4 ชนิดมวลรวม

การเลือกมวลรวมที่ใช้ในการผสมคอนกรีต ควรที่จะเลือกมวลรวมที่มีลักษณะที่กลมมน กล่าวคือถ้ามวลรวมมีลักษณะกลมมนจะมีการขัดกันของวัสดุน้อยและมีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย ทำให้ความต้องการน้ำของมวลร่วนน้อยลงด้วยซึ่งส่งผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต การกระจายขนาด

คละที่ตึกก็เป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากการกระจายขนาดคละที่ดีจะทำให้ช่องว่างระหว่างมวลรวม น้อยลง ทำให้คอนกรีตมีกำลังต้านทานแรงอัดมากขึ้นด้วย

2.3.5 วิธีการบ่มและระยะเวลาการบ่ม

ความชื้นเป็นสิ่งสำคัญในการผสมคอนกรีต เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นปฏิกิริยาที่อาศัยระยะเวลา ซึ่งหากขาดความชื้นที่ใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันจะทำให้การเกิดปฏิกิริยา ไม่สมบูรณ์ และอุณหภูมิในการบ่มจะมีผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต หากอุณหภูมิในการบ่ม สูงขึ้นจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดได้เร็วขึ้น แต่อุณหภูมิที่มากเกินไปจนจุดเหมาะสมก็จะส่งผล เสียต่อซีเมนต์เพสต์ได้

ระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มเป็นปัจจัยที่ควบคุมความชื้นไม่ให้ระเหยเร็วกว่าที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ หากสามารถควบคุมการบ่มให้มีระยะเวลามากเท่าใดก็จะดีต่อกำลังรับ แรงอัดของคอนกรีต วิธีการบ่มคอนกรีตมีหลายวิธี ได้แก่ การชั่งหรือหล่อ น้ำ การฉีดหรือรดน้ำ การ คลุมด้วยวัสดุเปียกชื้น การบ่มในแบบหล่อ การใช้กระดาษกันน้ำซึม การใช้แผ่นผ้าพลาสติกคลุม การ ใช้สารเคมีเคลือบผิวคอนกรีต และการบ่มด้วยไอน้ำ

2.3.6 การทำคอนกรีตให้แน่น

ปริมาณช่องว่างในคอนกรีตทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตลดลง การแก้ไขทำ ได้โดยการทำให้คอนกรีตแน่นมีปริมาณช่องว่างน้อยที่สุด โดยใช้การจี้เขย่าคอนกรีตให้แน่น การจี้ เขย่าคอนกรีตทำได้หลายวิธี เช่น การจี้เขย่าในเนื้อคอนกรีต และการจี้เขย่าจากแบบหล่อ

2.4 การกัดกร่อนโดยซัลเฟต

เกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย สามารถทำอันตรายต่อซีเมนต์เพสต์ใน คอนกรีตได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.6 เกลือซัลเฟตจะมีอยู่มากในน้ำทะเล น้ำกร่อย ในดินบริเวณริมทะเล ดินทั่วไป หรือมักพบในน้ำเสียตามบ้านเรือน โรงงานอุตสาหกรรม เกลือซัลเฟตชนิดที่พบมากที่สุด คือ เกลือโซเดียมซัลเฟต รองลงมาคือแมกนีเซียมซัลเฟต โดยธรรมชาติซัลเฟตแต่ละชนิดมีความสามารถ ละลายน้ำได้ไม่เท่ากัน กล่าวคือ

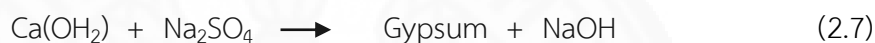
- | | |
|---|-----------------------------|
| 1. แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) | ละลายน้ำเพียง 1.2 กรัม/ลิตร |
| 2. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) | ละลายน้ำ 240 กรัม/ลิตร |
| 3. แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) | ละลายน้ำ 300 กรัม/ลิตร |

เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้น จึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต และแมกนีเซียมซัลเฟต ในการศึกษาความต้านทานต่อซัลเฟต (คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ, 2543)

2.4.1 กลไกการกัดกร่อนด้วยโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการกัดกร่อนโดยซัลเฟต คือ ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ในปูนซีเมนต์ และปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

กลไกการกัดกร่อนเริ่มจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยากับโซเดียมซัลเฟต ได้ยิปซัมและโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการ (2.7)



จากนั้น ยิปซัมที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรตโมโนซัลเฟต (CAH) หรือไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ทำให้ได้ Secondary Ettringite ดังสมการ (2.8) และ (2.9)



ซึ่งยิปซัม (Gypsum) และ Ettringite ที่เกิดขึ้น จะทำให้ปริมาตรเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ และเกิดการร้าวร้าวในที่สุด

2.4.2 กลไกการกัดกร่อนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4)

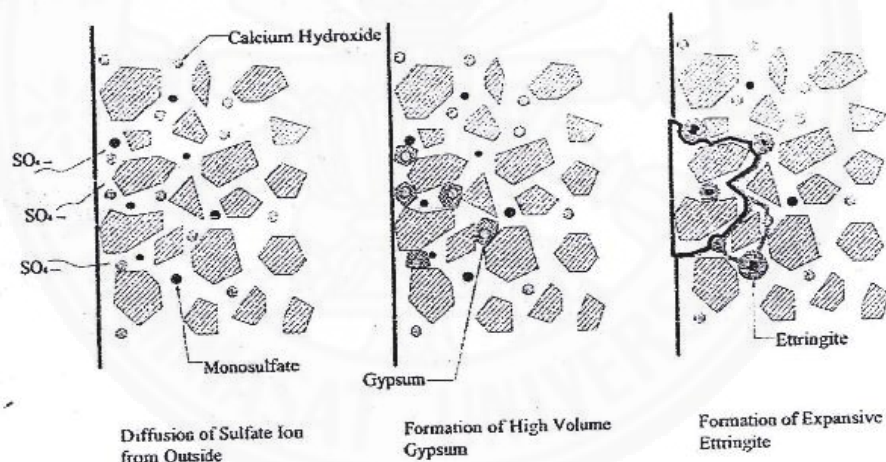
แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จะได้ยิปซัมและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ดังสมการ (2.10)



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ตามมาเนื่องจากปฏิกิริยาข้างต้นทำให้ความเป็นกรดต่าง และ pH ของสารละลายลดลง ซึ่งส่งผลให้เกิดความไม่อยู่ตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) จึงเกิดการแตกตัวเพื่อเพิ่มความเป็นกรดต่างของสารละลาย ดังสมการ (2.11)



เมื่อ Ca(OH)_2 ที่มาจากการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำให้เกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ในขณะเดียวกัน แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) จะทำปฏิกิริยากับสารละลาย SiO_2 จะได้ผลิตภัณฑ์คือ แมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ดังนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จะทำให้ซีเมนต์เพสต์ได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อนมากกว่าโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ดังแสดงในภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 รูปจำลองกระบวนการแตกร้าวของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนด้วยซัลเฟต (ปติ สุนทรสุขกุล, 2549)

2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกัดกร่อนโดยซัลเฟต

- (1) สภาพแวดล้อมที่มีซัลเฟต ตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต ถ้าสภาพแวดล้อมมีความเข้มข้นต่อซัลเฟตสูง ก็จะทำให้เกิดความเสียหายต่อซีเมนต์เพสต์ที่รุนแรงมากขึ้น
- (2) ความทึบน้ำของคอนกรีต แปรผกผันกับการซึมผ่านของซัลเฟต ถ้าความทึบน้ำมาก ซัลเฟตก็จะเข้าไปกัดกร่อนคอนกรีตได้ยาก

(3) ปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) เป็นสารประกอบที่มีผลต่อการกักกร่อนของซัลเฟต ถ้าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) น้อยและเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) มากก็จะเกิดความต้านทานต่อการกักกร่อนของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) มากและเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) น้อย

(4) ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในคอนกรีต ถ้าสามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ ก็จะช่วยลดความรุนแรงของการกักกร่อนโดยซัลเฟตได้ อาจจะทำให้โดยใช้สารปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

2.5 ข้อมูลเกี่ยวกับแก้วบรรจุภัณฑ์

2.5.1 ลักษณะทั่วไปของแก้ว

แก้ว (Glass) เป็นวัตถุโปร่งใส เนื้อใสสะอาด มีความเป็นมันแวววาวทุกใส แก้วเป็นสารประกอบของซิลิกากับสารโลหะออกไซด์มีลักษณะโปร่งตาและมีความเปราะในตัวเอง ตาม ASTM C162 กล่าวว่า แก้ว คือ วัสดุที่เป็นสารอนินทรีย์ต่างๆ มาเผาให้ถึงจุดละลายที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาเย็นตัวลงมาจะกลายเป็นของแข็งโดยไม่ตกผลึก จากคำว่าไม่ตกผลึกนี้ ทำให้เราโยงไปถึงวัสดุอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุอสัณฐาน (Amorphous Materials) ซึ่งหมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างไม่แน่นอนหรือมีโครงสร้างที่ไม่เป็นผลึก (Non-Crystalline Solid) ทั้งนี้เนื่องจากแก้วเป็นของแข็งที่ไม่มีผลึกอยู่ในตัวเอง เราจึงถือว่าแก้วเป็นวัสดุอสัณฐานประเภทหนึ่ง

2.5.2 ชนิดของแก้ว

การแบ่งประเภทของแก้ว สามารถแบ่งได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามกรรมวิธีการผลิต แบ่งองค์ประกอบทางเคมี หรือแบ่งตามการใช้งาน แต่โดยส่วนใหญ่เรามักจะบอกประเภทของแก้วตามองค์ประกอบ ดังนี้

(1) แก้วโซดาไลม์ (Soda-Lime Glass)

ผลิตจากวัตถุดิบหลัก คือ ทราย โซดาแอช หินปูน เป็นแก้วที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ แก้วที่เป็นขวด แก้วน้ำ 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 เนื่องจากสามารถหกลอม และขึ้นรูปได้ง่ายจึงมีต้นทุนการผลิตต่ำ และสามารถทำให้มีความแข็งแรงทนทานมากขึ้นเมื่อนำไปผ่าน ขบวนการอบ (Tempering) หรือการเคลือบ (Laminating)

(5) แก้วอลูมิโนซิลิเกต (Alumino Silicate Glass)

มีอะลูมินาและซิลิกาเป็นส่วนผสมหลัก มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำ และมีจุดอ่อนตัวของแก้ว (Softening Point) สูง พอที่จะป้องกันการเสียรูปทรงเมื่อทำการอบ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ผลิตภัณฑ์

(6) แก้วอัลคาไลน์-เอิร์ท อะลูมิโนซิลิเกต (Alkaline-Earth Alumino Silicate)

มีส่วนผสมของแอมเมียมออกไซด์ หรือแบเรียมออกไซด์ ทำให้มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับแก้วตะกั่ว แต่ผลิตง่ายกว่าและมีความทนทานต่อกรดและด่าง มากกว่าแก้วตะกั่วเล็กน้อย

(7) กลาส-เซรามิกส์ (Glass-Ceramics)

เป็นแก้วประเภทลิเทียมอะลูมิโนซิลิเกตที่มี TiO_2 หรือ ZrO_2 ผสมอยู่เล็กน้อย ซึ่งจะทำให้เกิดผลึกในเนื้อแก้ว ซึ่งอาจทำให้แก้วมีความทึบแสงหรือโปร่งใส ขึ้นกับชนิดของผลึก กลาส-เซรามิกส์จะทนทาน และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนต่ำมาก สามารถนำไปใช้เป็นภาชนะหุงต้ม หรือเป็นแผ่นบนเตาหุงต้มได้

โดยแก้วที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ แก้วโซดาไลม์

2.5.3 การใช้งานวัสดุแก้ว

วัสดุศาสตร์จะแบ่งชนิดของแก้วตามประเภทของการใช้งานดังต่อไปนี้

(1) แก้วในงานก่อสร้าง (Constructions) เช่น กระจกแผ่น กระจกลาย อิฐแก้ว (Glass Brock) เป็นต้น ต้องมีความแข็งแรง ความโปร่งใสสูง สามารถผลิตในปริมาณมากเพื่อให้คุ้มกับการลงทุน

(2) แก้วบรรจุภัณฑ์ (Containers) เช่น ขวด แก้วน้ำ และภาชนะต่างๆ ควรจะมีความทนทานทางกายภาพและทางเคมีระดับในระดับหนึ่ง และควรสามารถนำกลับมาล้างใช้ได้ใหม่อย่างน้อย 50 ครั้ง

(3) แก้วที่ผ่านการแปรรูป (Specialty Glass) เช่น กระจกนิรภัยชนิดต่างๆ กระจกฉนวน กระจกเสริมลวด เป็นการนำกระจกแผ่นแบบ Float มาอบ ดัด ตัดแต่ง ซึ่งจะทำให้ได้กระจกที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ มีความทนทานมากขึ้น กระจกนิรภัยจะช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากการแตกได้

(4) แก้วเครื่องประดับ ตกแต่ง (Ornaments & Figurines) เช่น แก้วคริสตัล ของชำร่วยต่างๆ แก้วสลัก เจียรไน มักเป็นแก้วพวก Borosilicate ซึ่งสามารถนำมาเป่าขึ้นรูปได้ง่าย หรือแก้วผสมตะกั่ว ซึ่งจะทำให้แกะสลักและเจียรไนได้ง่าย

(5) แก้วในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics & Electrical Glass) เช่น Cathode-Ray Tubes, Capacitors, Resistors, Computer Components และ Print Circuits เป็นต้น แก้วที่ใช้จะต้องมีค่า Dielectric ที่ดี มีการสูญเสียทางไฟฟ้าน้อยในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันสูง หน้าจอทีวี แก้วสำหรับการป้องกันการแผ่รังสี ก็ควรมีปริมาณตะกั่วที่สูง

(6) แก้วในงานทางแสง (Optical Glass) เช่น หลอดไฟ ต้องมีทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการใช้งานที่อุณหภูมิสูง ทนต่อสภาพดินฟ้าอากาศ ส่วนเลนส์ โยแก้วนำแสง ต้องใช้วัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูง

(7) แก้วในงานอื่นๆ (Other Glass) เช่น โยแก้ว โฟมแก้ว วัสดุคอมโพสิต ต้องสามารถใช้งานที่ต้องการความแข็งแรง ทนต่อการกัดกร่อน ทนความร้อน และมีความต้านทานไฟฟ้าที่ดี ขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่จะนำไปใช้

2.5.4 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) เร็วขึ้น เมื่อเย็นลง และเพิ่มความทนต่อสารเคมี แก้วที่มีปริมาณ MgO มากกว่า CaO จะทำให้การตกผลึกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้การเรียงตัวของผลึกออกมาสวยงาม

(5) Al_2O_3 แก้วที่มีปริมาณ Al_2O_3 สูง จะทำให้แก้วนั้นมีความทนทานต่อการสึกกร่อนและสารเคมีได้ดีขึ้น

(6) B_2O_3 แก้วที่มีสารประกอบพวก Boron เป็นองค์ประกอบ (Borosilicate) จะมีความคงทนต่อกรด-ด่าง และทนต่อความร้อน เนื่องจากจะทำให้สมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนลดลง แก้วประเภทนี้เป็นแก้วที่ใช้ในอุปกรณ์วิทยาศาสตร์และเป็นแก้วประเภทที่สามารถใช้ในเตาไมโครเวฟได้

(7) PbO แก้วที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ (Lead Glass) เนื้อแก้วใสวาว เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหสูงมีความอ่อน (soft) ไม่แข็งกระด้าง ง่ายต่อการเจียรไน เวลาเคาะมีเสียงกังวาน

(8) Fe_2O_3 ช่วยประหยัเชื้อเพลิงในขณะหลอม แต่จะทำให้เนื้อกระจกใส มีสีค่อนข้างเขียว

(9) ออกไซด์ อื่นๆ หากต้องการให้แก้ว หรือกระจกมีสีอื่นต่างๆ สามารถเติมสารนอกเหนือจากส่วนผสมข้างต้นที่กล่าวมาแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ออกไซด์ที่ใช้ผสมเพื่อให้สีในแก้ว

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

ตารางที่ 2.4 แหล่งวัตถุดิบซึ่งเป็นที่มาขององค์ประกอบทางเคมีต่างๆในแก้ว

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

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.6.1 งานวิจัยเกี่ยวกับซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

ศุภนันท์ บรรจงเกลี้ยง (2549) ได้ทำการศึกษาศักยภาพของผงแก้วในการเป็นปอซโซลาน โดยเน้นศึกษาปริมาณรีแอกทีฟซิลิกา จากนั้นศึกษาผลของผงแก้วต่อการพัฒนากำลังอัดและปริมาตรโพรงในมอร์ตาร์รวมทั้งความทนทานของคอนกรีต การวิจัยใช้ผงแก้วที่ได้จากการบดเศษขวดแก้วใสจนมีขนาดเล็กกว่า 38 ไมครอน ในปริมาณอย่างน้อยร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก ด้วยขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผงแก้วเพียง 0.12 ไมครอน มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะจากเทคนิค BET สูงกว่าปูนซีเมนต์เป็น 1.42 ตารางเมตรต่อกรัม ประกอบกับมีปริมาณรีแอกทีฟซิลิการ้อยละ 40 ของน้ำหนักทั้งหมด สูงกว่าเถ้าลอยแม่เมาะซึ่งมีร้อยละ 35 ของน้ำหนักทั้งหมด จึงมีแนวโน้มที่ผงแก้วจะให้ศักยภาพในการเป็นปอซโซลานที่ดีกว่าเถ้าลอยโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการพัฒนากำลังอัดในระยะหลัง ผงแก้วสามารถจัดเป็นปอซโซลานเทียบเท่ามาตรฐาน ASTM C618 ได้ และปฏิกิริยาปอซโซลานของผงแก้วซึ่งช่วยลดปริมาตรรวมทั้งความต่อเนื่องของโพรงในเพสต์ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดและช่วยเพิ่มความทนทาน พบว่าผงแก้วช่วยพัฒนากำลังอัดทั้งในระยะต้นและระยะหลังโดยอัตราการเกิดปฏิกิริยา

ขึ้นกับสัดส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ (w/b) ที่ w/b เป็น 0.5 ผงแก้วจะช่วยพัฒนากำลังอัดตั้งแต่ระยะแรกโดยให้กำลังอัดเทียบเท่ามอร์ตาร์ควบคุมที่ประมาณ 7 วัน และทำให้ดัชนีกำลังอัดสูงถึงประมาณร้อยละ 130 ที่ 91 วัน อีกทั้งผงแก้วช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคอนกรีตโดยลดประจุคลอไรด์ที่ผ่านจาก 5,165 คูลอมป์ที่ 7 วัน จนเหลือเพียง 750 คูลอมป์ที่ 91 วัน ในขณะที่คอนกรีตไม่ผสมผงแก้วมีค่าประจุผ่านลดลงเล็กน้อยจาก 4,960 คูลอมป์ที่ 7 วัน เหลือ 4,745 คูลอมป์ที่ 91 วัน

Shilpa Raju (2014) ได้ทำการวิจัยผลกระทบของการใช้ฝุ่นแก้วในคอนกรีต โดยทำการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วในช่วงปริมาณร้อยละ 5 ถึง 40 โดยเพิ่มปริมาณร้อยละ 5 ต่อครั้ง และทำการทดสอบกำลังอัดและกำลังรับแรงดัดของตัวอย่างที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน และทำการเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ โดยการทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 15 ซม. และการทดสอบแรงดัดใช้คานตัวอย่าง 15 x 15 x 70 ซม. ผลการทดสอบทั้งกำลังอัดและกำลังรับแรงดัดพบว่าคอนกรีตมีกำลังเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม และคอนกรีตที่แทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังสูงที่สุด

R.Vandhiyan, K.Ramkumar และ R.Ramya (2013) ได้ทำการวิจัยศึกษาผลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว โดยทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด, กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีก (Split Tensile Strength) ของตัวอย่างซีเมนต์ที่ถูกแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างซีเมนต์ปกติซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.45 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตพบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วในปริมาณร้อยละ 5 และ 10 มีค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตปกติ ส่วนตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วในปริมาณร้อยละ 15 มีค่ากำลังอัดลดลง สำหรับผลการทดสอบกำลังรับแรงดัดของคอนกรีตพบว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ถูกแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วในปริมาณร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงดัดเพิ่มขึ้นจากคอนกรีตปกติอย่างมาก ส่วนผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกแสดงว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วไม่ส่งผลต่อกำลังมากนัก ซึ่งจากผลการทดสอบโดยรวมสรุปได้ว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่ปริมาณร้อยละ 10 คือสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด

Hongjian Du, Hongchen Jacey Gao and Wei (2014) ได้ทำการวิจัยปฏิกิริยาปอซโซลานของฝุ่นแก้วและอิทธิพลที่มีต่อคอนกรีต โดยนำเศษแก้วเหลือใช้มาบดจนละเอียดและนำมาใช้แทนที่ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ และประเมินผลการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วต่าง ๆ กัน คือร้อยละ 0, 15, 30, 45 และ 60 โดยน้ำหนัก โดยทำการทดสอบกำลังอัดกับตัวอย่างทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. และได้ทำการตรวจสอบปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อายุการบ่มต่างกันสำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ถูกแทนที่ด้วยฝุ่นแก้ว

โดยผลการทดสอบพบว่าความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ลดลงมากเนื่องมาจากการเจือจางของพอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งส่งผลให้ได้กำลังที่ต่ำกว่าในระยะต้น อย่างไรก็ตาม การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของฝุ่นแก้วได้แสดงให้เห็นได้ชัดในช่วงการบ่มที่นานขึ้น เนื่องจากกำลังที่เพิ่มขึ้นมากสำหรับคอนกรีตที่ถูกแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วในปริมาณร้อยละ 15 และ 30 นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลงมากตามอายุการบ่ม เพราะถูกใช้ไปในปฏิกิริยาปอซโซลานของฝุ่นแก้ว ที่อายุ 91 วัน พบว่าแทบจะไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์เหลืออยู่เลยสำหรับการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 60 ซึ่งจากผลการทดสอบสรุปได้ว่าอัตราการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่เหมาะสมควรมีน้อยกว่าร้อยละ 60

Dr. G.Vijaryakumar, Ms H. Vishaliny, Dr. D.Govindarajulu (2013) ได้ทำการศึกษาฝุ่นแก้วในการแทนที่ซีเมนต์ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีต โดยทำการทดสอบ กำลังอัด, กำลังรับแรงดัด และกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของตัวอย่างคอนกรีต ที่อายุการบ่ม 28 และ 60 วัน โดยมีปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 จากผลการทดสอบพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตผสมฝุ่นแก้วในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 เพิ่มขึ้นร้อยละ 19.6, 25.3 และ 33.7 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ กำลังรับแรงดัดแบบผ่าซีก ของคอนกรีตผสมฝุ่นแก้วร้อยละ 40 เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.4 กำลังรับแรงดัดของคอนกรีตผสมฝุ่นแก้วร้อยละ 20, 30 และ 40 เพิ่มขึ้นร้อยละ 83.07, 99.07 และ 100 ตามลำดับ โดยจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าการแทนที่ซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วมีผลช่วยเพิ่มกำลังของคอนกรีตได้

2.6.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการสูญเสียน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เฟสท์ เนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต

สุวิมล สัจวานิชย์ (2546) ได้ศึกษาวิจัยเรื่องคุณสมบัติระยะยาวของคอนกรีตผสมเถ้าลอย เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับความทนทานของโครงสร้างคอนกรีต เกิดจากถูกกัดกร่อนด้วยซัลเฟต เป็นสาเหตุหลัก นอกจากนี้จากยังเกิดปัญหาการเสื่อมสภาพจากคาร์บอนेटชั่น เนื่องจากการซึมผ่านของคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อคอนกรีตเกิดจากไอเกลือหรือเกลือคลอไรด์ ทำให้เกิดสนิมในเหล็กเสริม ค่าความแข็งแรงของคอนกรีตก็เปลี่ยนไปตามเวลา จากผลการศึกษาโดยใช้วิธีเร่งความรุนแรงจากสภาวะต่างๆและเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยกับคอนกรีตปกติ พบว่า คอนกรีตที่ผสมเถ้าลอยช่วยเพิ่มความคงทนต่อการกัดกร่อนของเกลือซัลเฟต ช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์ และช่วยลดการเกิดสนิมเหล็กได้ หากผสมในสัดส่วนที่เหมาะสมจะมีผลดีคือสามารถลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตเพราะสามารถลดการใช้ปูนซีเมนต์ลงได้ประมาณร้อยละ 15 ถึง ร้อยละ 35

วรนาถ จิตริเที่ยง, วุฒิชัย หุ่นประเสริฐ และสมคิด หยีส้าลำ (2547) ได้ศึกษาวิจัยคอนกรีตกำลังสูงต้านทานซัลเฟต ผลการทดสอบพบว่า ในกรณีบ่มแช่แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความ

เข้มข้นร้อยละ 10 คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภททนน้ำเค็มและดินเค็ม มีค่าการถดถอยของกำลังรับแรงอัดเท่ากับร้อยละ 12.37 ซึ่งเป็นค่าดัชนีที่มีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์อีก 3 ประเภท และการบ่มแช่แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น ร้อยละ 20 คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภททนน้ำเค็มดินเค็ม ไม่มีค่าการถดถอยของกำลังรับแรงอัด แต่มีค่าเพิ่มของกำลังรับแรงอัดร้อยละ 0.15 จึงสรุปได้ว่า คอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภททนน้ำเค็มดินเค็ม มีความต้านทานการกัดกร่อนของแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1, 3 และ 5

ชาญชัย เจาะปก และคณะ (2548) ได้ศึกษาความทนทานของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบบดละเอียด โดยคุณสมบัติที่ทำการทดสอบได้แก่ กำลังรับแรงอัด และการต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ : เถ้าลอย : เถ้าแกลบ ที่ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด หลังจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 90 วัน คือ 60 : 20 : 20 โดยไม่มีการสูญเสียกำลังรับแรงอัดร้อยละ 9.5 การเพิ่มปริมาณน้ำยากันซึมโดยแทนที่สารละลายพิเศษทำให้กำลังรับแรงอัดและการต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้หินบะซอลต์เป็นมวลรวมหยาบทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดเมื่อเทียบกับการใช้หินปูนและกรวด กรวดจะให้คอนกรีตที่ต้านทานสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีกว่าหินบะซอลต์และหินปูน

โกเมนทร์ มูลโซคอนันต์, ชัชชัย หอมวิเชียร และนนท์ ปิณฑะดิษฐ์ (2549) ได้ศึกษาวิจัยความทนทานของคอนกรีตทนซัลเฟตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบบดละเอียด โดยการแช่ตัวอย่างคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่เร่งกำลังด้วยการบ่มไอน้ำ 12 ชั่วโมงและที่ไม่ได้เร่ง เปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมที่สามารถทนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตได้ดีที่สุดโดยไม่ต้องบ่มคือ 40 : 00 : 60 (OPC-FA-RHA) โดยมีกำลังรับแรงอัดต่างกันระหว่างแช่น้ำกับแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพียงร้อยละ 1.14 และอัตราส่วนผสมที่สามารถทนซัลเฟตได้ดีที่สุดโดยมีวิธีการบ่มมาเกี่ยวข้อง คือ 40 : 30 : 30 (OPC-FA-RHA) โดยมีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยระหว่างแช่น้ำกับแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ต่างกันร้อยละ 1.94

วินัย หอมศรีประเสริฐ และกั้วกาญจน์ บัวแก้ว (2551) ได้ศึกษาวิจัยอิทธิพลของเถ้าแกลบบดดำและซิลิกาฟูมในซีเมนต์เพสต์ภายใต้การกระทำของซัลเฟต โดยคุณสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนัก สารละลายที่ใช้คือสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยมวลต่อปริมาตร จากผลการศึกษาพบว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ยิ่งผสมเถ้าแกลบ

และซิลิกาฟุ่มในอัตราส่วนที่มากขึ้นจะทำให้การสูญเสียกำลังอัด การขยายตัว และการสูญเสียน้ำหนักลดลง แต่ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าอัตราส่วนซิลิกาฟุ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังอัดลดลง และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงมากขึ้นจะทำให้การขยายตัว การสูญเสียกำลังอัด การสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นด้วย

ปิติศานต์ กร้ามาตร และคณะ (2553) ศึกษาคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัวของเพสต์ การยุบตัว และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต) และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูนโดยพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ (ประเภทที่ 1 และ 5) ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยมีค่าต่ำกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่การก่อตัวของเพสต์ซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนมีค่าไม่แตกต่างกับกรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับค่าการยุบตัวของคอนกรีตมีแนวโน้มที่จะผกผันกับค่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์ และนอกจากนี้กำลังอัดประลัยของคอนกรีตซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจะมีค่าน้อยกว่ากรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน ส่วนกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยผงหินปูนจะให้ค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตไม่แตกต่างกับกรณีใช้ปูนซีเมนต์ล้วน สำหรับการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ล้วน มีแนวโน้มมากกว่าใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ล้วน สำหรับการใช้วัสดุประสานร่วม 3 ชนิด (ปูนซีเมนต์ เถ้าลอย และผงหินปูน) พบว่าการขยายตัว ของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่มีปริมาณ CaO สูงในปริมาณต่ำจะทำให้ค่าการขยายตัวของตัวอย่างคอนกรีตมากขึ้น แต่ถ้าแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณสูง จะให้ค่าการขยายตัวลดน้อยลง

สุวัฒน์ พาหุสุวัฒน์ (2553) ศึกษาผลของเถ้าลอยที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย กำหนดอัตราส่วนผสมน้ำต่อวัสดุประสานเป็น 3 ระดับ คือ 0.45, 0.55, 0.85 และผันแปรปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 3 ระดับ คือ ร้อยละ 15, 30 และ 45 ผลการวิจัยพบว่า เถ้าลอยมีผลต่อความสามารถในการเทหรือความยุบตัวของคอนกรีต โดยคอนกรีตผสมเถ้าลอยจะมีความยุบตัวมากกว่าคอนกรีตควบคุม สำหรับผลการทดสอบหน่วยน้ำหนักพบว่า ค่าหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุม และเมื่อปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยสูงขึ้น ค่าหน่วยน้ำหนักจะลดลงทุกช่วงการทดสอบในทุกเงื่อนไขอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน นอกจากนี้ จากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าลอย

ยงยุทธ วัฒนกุล (2553) ได้ศึกษาวิจัยคุณสมบัติทางด้านซีเมนต์ (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม การก่อตัวของเพสต์ การยุบตัว ความพรุน และกำลังอัดประลัยของคอนกรีต) และการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน การขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนัก จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณน้ำที่เหมาะสมของเพสต์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย และเถ้าลอยผสมผงหินปูน มีค่าน้อย

กว่าคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน สำหรับการก่อตัวของเพสต์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยและเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีระยะเวลาการก่อตัวที่มากขึ้น ความพรุนของคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอยและเถ้าลอยร่วมกับผงหินปูนมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในด้านกำลังอัดประลัยของคอนกรีตเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าลอย และเถ้าลอยผสมผงหินปูนจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อไม่แทนที่ สำหรับในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต พบว่าการขยายตัวและการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่ด้วยเถ้าลอยและผงหินปูน ให้ค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟต พบว่าการขยายตัวให้ค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ในขณะที่การสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน

นพคุณ ผลโพธิ์ (2554) ได้ศึกษาวิจัยผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซิลิเฟตของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูนเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้ชนิดวัสดุประสานและปริมาณที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตที่สัมผัสกับซิลิเฟต โดยใช้วิธีวัดค่าการขยายตัวของมอร์ตาร์และการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตและแมกนีเซียมซิลิเฟตและโซเดียมซิลิเฟตผสมแมกนีเซียมซิลิเฟต ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตให้ค่ามากที่สุด ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟตจะให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์มากกว่าในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต ส่วนการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายแมกนีเซียมซิลิเฟตของมอร์ตาร์เถ้าลอยไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่เถ้าลอยปริมาณสูงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะให้ค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ล้วน

ธวัชชัย คุณประคัลภ์ และอนันต์ นนทศิริ (2555) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบความสามารถในการต้านทานซิลิเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่ผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และ 30 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5 โดยทดสอบ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่แช่ในน้ำและกลุ่มที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟต ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วทำการทดสอบหาลำดับรับแรงอัดของคอนกรีตที่อายุต่างกัน จากผลการทดลองพบว่าคอนกรีตที่แช่ในสารละลายโซเดียมซิลิเฟตเข้มข้นร้อยละ 5, คอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 มีค่ากำลังสูงที่สุด

อัครพัชร กุลากุล และนายภาสิต ทรงประโคน (2556) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยระยะยาวมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกัดกร่อนของซิลิเฟต โดยใช้ซีเมนต์แทนที่ปูนด้วยเถ้าลอยด้วยอัตราส่วนต่างๆ ทำการบ่มที่อุณหภูมิต่างกัน และแช่สารละลายซิลิเฟตที่ระยะเวลาต่างกัน ผลการศึกษาพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยะยาวมีความต้องการน้ำมากกว่าซีเมนต์เพสต์ปกติ โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ตามสัดส่วนการแทนที่ที่มากขึ้น ทางด้านการทดสอบกำลังอัดพบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอยระยองในอัตราส่วนที่ร้อยละ 10 และบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ให้กำลังอัดสูงสุดในขณะที่บ่มด้วยอุณหภูมิห้องให้กำลังอัดต่ำที่สุดในทุกๆ สัดส่วน และการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยระยองจะเกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากขึ้น โดยที่ซีเมนต์เพสต์ที่สัมผัสกับสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากกว่าน้ำ

2.7 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เบื้องต้น

คาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) คือ ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปล่อยออกมาจากผลิตภัณฑ์แต่ละหน่วยตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การประกอบชิ้นส่วน การใช้งาน และการจัดการซากผลิตภัณฑ์หลังใช้งาน โดยคำนวณออกมาในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (CO_2e) สำหรับตัวเลขที่ประเมินได้จะนำไปแสดงบนฉลากคาร์บอน

ก๊าซเรือนกระจกที่ประเมินประกอบด้วยก๊าซ 6 ชนิดตามที่ควบคุมภายใต้พิธีสารเกียวโต ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) เพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFCs) และซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกหรือศักยภาพในการทำให้โลกร้อน ประเมินได้จากการวัดหรือคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นจริง และแปลงค่าให้อยู่ในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าโดยใช้ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนในรอบ 100 ปี ของ IPCC (GWP100) ที่เป็นค่าล่าสุดเป็นเกณฑ์ ตัวอย่างเช่น ก๊าซมีเทนมีค่า GWP100 เท่ากับ 25 หมายความว่า ก๊าซมีเทน 1 กิโลกรัมมีศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 25 กิโลกรัม ดังนั้นการปล่อยก๊าซมีเทน 1 กิโลกรัม คิดเป็นศักยภาพในการทำให้โลกร้อนเท่ากับ 25 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า เป็นต้น

การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ แสดงดังสมการที่ (2.12)

$$\text{ปริมาณก๊าซเรือนกระจก} = \text{ข้อมูลกิจกรรม} \times \text{ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจก} \quad (2.12)$$

องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (Thailand Greenhouse Gas Organization) เรียกโดยย่อว่า “TGO” เป็นหน่วยงานภายใต้กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มีวัตถุประสงค์หลักในการวิเคราะห์ กลั่นกรอง และทำความเข้าใจเกี่ยวกับการให้คำรับรองโครงการที่ลด

การปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกตามกลไกการพัฒนาที่สะอาด รวมทั้ง ติดตามประเมินผลโครงการที่ได้รับคำรับรอง ส่งเสริมการพัฒนาโครงการ และการตลาดซื้อขายปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ได้รับการรับรอง เป็นศูนย์กลางข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานด้านก๊าซเรือนกระจก จัดทำฐานข้อมูลเกี่ยวกับโครงการที่ได้รับคำรับรอง และการขายปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ได้รับการรับรอง ส่งเสริมและพัฒนาศักยภาพ ตลอดจนให้คำแนะนำแก่หน่วยงานภาครัฐและภาคเอกชนเกี่ยวกับการบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจกได้มีการจัดทำโครงการฉลากคาร์บอนขึ้นในเดือน สิงหาคม พ.ศ. 2551 โดยแบ่งฉลากคาร์บอนออกเป็น 2 ประเภท คือ

ฉลากแบบที่ 1 พิจารณาการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากทั้งวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ (Cradle to Grave) ตั้งแต่การได้มาซึ่งวัตถุดิบ การขนส่ง การผลิต การบรรจุหีบห่อ การใช้ งาน จนกระทั่งการกำจัดของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งการดำเนินงานจะใช้เวลาค่อนข้างมากเนื่องจากมีกระบวนการประเมินซับซ้อน

ฉลากแบบที่ 2 พิจารณาการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยพิจารณาเฉพาะก๊าซเรือนกระจกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต (Production stages) เท่านั้น (Gate to gate) ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลาในการดำเนินงานน้อยกว่าแบบแรก ฉลากคาร์บอนแสดงข้อมูลให้ผู้บริโภคทราบว่า สินค้าหรือบริการนี้มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในระดับสูง ค่อนข้างสูง ปานกลาง ค่อนข้างต่ำหรือต่ำ โดยแสดงผลเป็น 5 ระดับ ด้วยหมายเลข 1-5 สินค้าที่ได้ฉลากคาร์บอนเบอร์ 5 คือ สินค้าที่ปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่บรรยากาศน้อยที่สุดและเป็นมิตรต่อสภาพภูมิอากาศ หรือหมายความว่าสินค้าหรือบริการนั้นมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถช่วยบรรเทาปัญหาภาวะโลกร้อนได้ ซึ่งระบบฉลากคาร์บอนนี้มีความคล้ายคลึงกับฉลากประหยัดไฟเบอร์ 5 ของกระทรวงพลังงาน

บทที่ 3

วิธีศึกษาและวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาและวิจัย ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุที่ใช้ในการวิจัย เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ สถานที่ที่ใช้ในการทดสอบ รายละเอียดวิธีการทดสอบ การทดสอบ คุณสมบัติปูนซีเมนต์และฝุ่นแก้ว สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ และลำดับขั้นตอนในการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 งานโครงสร้างตราที่พีไอ ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

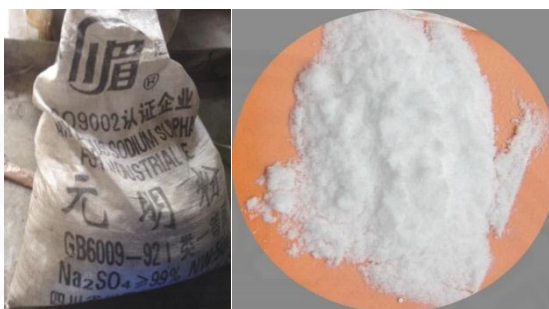
- 2) ฝุ่นแก้ว (Glass Dust) ดังแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ฝุ่นแก้ว

3) น้ำ : ใช้น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

4) สารละลายซัลเฟต : ใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ถึง 3.4



ภาพที่ 3.3 โซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 3.4 แมกนีเซียมซัลเฟต

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1) แบบหล่อก่อนทดสอบทรงกระบอก : ใช้แบบหล่อก่อนทดสอบทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และสูง 10 เซนติเมตร

2) เครื่องผสม (Mixer) : เครื่องผสมซีเมนต์เพสต์ตามมาตรฐาน ASTM C 305 ตามมาตรฐาน ASTM C 305 เครื่องผสมประกอบไปด้วย ตัวเครื่อง ใบกวน และอ่างผสม โดยใบกวนและตัวเครื่องสามารถปรับระดับการหมุนของใบพายได้อย่างน้อย 2 ระดับ คือ 140 ± 5 rpm และ 285 ± 10 rpm โดยอ่างผสมมีความจุประมาณ 4.37 ลิตร

3) เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (UTM : Universal Testing Machine)

4) เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Vicat Apparatus, ASTM C 191)

- 5) เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (Vernier Caliper)
- 6) เตอบไฟฟ้า
- 7) เครื่องชั่งน้ำหนัก : ที่มีความละเอียดในหน่วยกรัม (g)
- 8) ถังมือยาง
- 9) เกรียงใบโพธิ์
- 10) กระบอกตวงมาตรฐาน

3.3 สถานที่ใช้ในการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศูนย์รังสิต จังหวัดปทุมธานี

3.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

รายละเอียดการทดสอบได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ขั้นตอนที่ 2 การทดสอบหาค่าความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) และระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ (Setting Time) และขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ แบ่งออก เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ทดสอบการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต (Compressive Strength Loss due to Sulfate Attack) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine และส่วนที่ 2 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต (Weight Loss due to Sulfate Attack) ซึ่งรายละเอียดการทดสอบของแต่ละขั้นตอนได้แสดงในลำดับต่อไป

3.4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของซีเมนต์เพสต์และการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วจะทดสอบคุณสมบัติดังนี้ ความถ่วงจำเพาะ ปริมาณความชื้น และลักษณะพื้นผิวของอนุภาค ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM)

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของฝุ่นแก้วจะใช้เทคนิคที่เรียกว่า X-Ray Fluorescence (XRF)

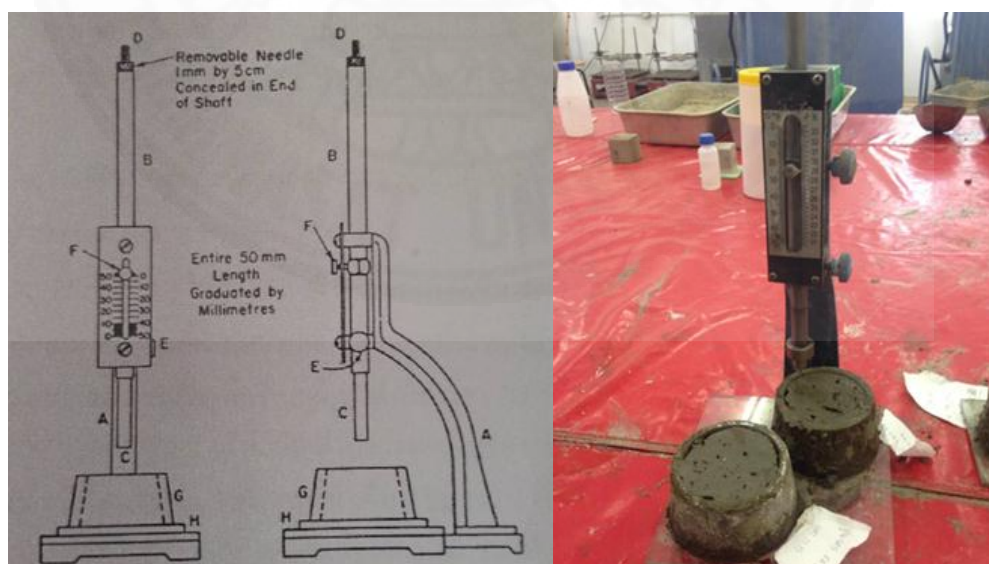
3.4.2 การทดสอบหาความชื้นเหลวปกติ

3.4.2.1 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาวิธีการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับการทำซีเมนต์เพสต์ที่มีความชื้นเหลวปกติ

3.4.2.2 เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (Vicat Apparatus, ASTM C 191) มีรูปทรงและขนาด ดังแสดงในภาพที่ 3.5

- (1) ขาตั้ง A
- (2) ก้านเข็ม B สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวดิ่งโดยมีน้ำหนักเท่ากับ 300 ± 0.5 กรัม
- (3) ที่ปลายก้านเข็ม B ตรงตำแหน่ง C มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10 ± 0.05 มิลลิเมตร มีความยาวไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตรและปลายอีกด้านเป็นเข็มที่สามารถหมุนออกมาได้ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง D โดยเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ± 0.05 มิลลิเมตรยาวไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร
- (4) ก้านเข็ม B สามารถถอดหมุนกลับด้านหรือปรับตำแหน่งโดยการหมุนสกรู E
- (5) ก้านเข็ม F คือ สเกลบอกระยะทางมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร
- (6) แบบหล่อ G เป็นรูปกรวยซึ่งมีความสูง 40 ± 1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านล่างเท่ากับ 70 ± 3 มิลลิเมตรและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในด้านบนเท่ากับ 60 ± 3 มิลลิเมตร
- (7) ฐาน H เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100×100 มิลลิเมตร ทำจากวัสดุที่ไม่ดูดซึมน้ำ



ภาพที่ 3.5 ลักษณะเครื่องมือไวแคต (ASTM C 187-98)

3.4.2.3 การเตรียมตัวอย่าง

เตรียมฝุ่นแก้วโดยทำการคัดเลือกขวดแก้วสีชาล้างด้วยน้ำสะอาดบดด้วยหม้อบดจากนั้นทำการเตรียมซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว โดยใช้อัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วผสมกับน้ำประปาด้วยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเริ่มต้นเท่ากับ 0.25 ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว

ลำดับ	สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสม	
		ปูนซีเมนต์	ฝุ่นแก้ว
1	C100GD0	100	0
2	C90GD10	90	10
3	C80GD20	80	20
4	C70GD30	70	30
5	C60GD40	60	40
6	C50GD50	50	50

สัญลักษณ์ที่ใช้ในการทดลอง

C หมายถึง ปริมาณร้อยละของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Cement)

GD หมายถึง ปริมาณร้อยละของฝุ่นแก้ว (Glass Dust)

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์ของตัวอย่างการทดสอบ เช่น ตัวอย่าง C90GD10 คือมีปริมาณอัตราส่วนของปูนซีเมนต์ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และมีปริมาณอัตราส่วนของฝุ่นแก้วร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก

3.4.2.4 วิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

(1) ผสมซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีความชื้นเหลวปกติ โดยใช้ปูนซีเมนต์หนัก 650 กรัม ตวงน้ำตามปริมาณที่กำหนด ปริมาณน้ำที่กำหนดอาจเริ่มต้นเพื่อให้เข็มไวกัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรตกลงอย่างอิสระและจมลงในซีเมนต์เพสต์น้อยกว่า 10 มิลลิเมตร จากนั้นเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเข็มไวกัดจมลงในซีเมนต์เพสต์มากกว่า 10 มิลลิเมตร

(2) นำซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสมจากนั้นปั่นให้เป็นก้อนลูกบอลกลมๆ อย่างรวดเร็วโดยมือซึ่งสวมถุงมืออย่างทั้ง 2 ข้างจากนั้นโยนสลักมือในแนวราบไปมา 6 ครั้งจาก

มือข้างหนึ่งไปมืออีกข้างหนึ่งโดยที่มือทั้งสองมีระยะห่างกันประมาณ 15 เซนติเมตรซึ่งจะได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีรูปทรงใกล้เคียงกับทรงกลมและเป็นเนื้อเดียวกันไว้บนมือข้างหนึ่ง

(3) นำก้อนซีเมนต์เพสต์ใส่ลงแบบรูปกรวย Conical Ring (G) โดยใส่จากด้านฐาน(ด้านที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า)ซึ่งวางอยู่บนมืออีกข้างหนึ่งเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ออกไปอีกด้านหนึ่ง

(4) ปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนที่เกินออกจากแบบโดยใช้เกรียงเหล็กเพียง 1 ครั้ง ภายหลังจากปาดซีเมนต์ส่วนเกินออกแล้วหากผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์ยังไม่เรียบให้ใช้เกรียงเหล็กปาดแต่งผิวหน้าเบาๆและระมัดระวังอย่าให้เกรียงเหล็กปาดกดบนผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์

(5) วาง Ring ด้านปลายข้างใหญ่ลงบน Base Plate (H) จากนั้นปาดซีเมนต์เพสต์ตามกำหนดในข้อ 4

(6) เลื่อน Base Plate จนกระทั่งจุดศูนย์กลางของซีเมนต์เพสต์ใน Ring ตรงกับตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของปลาย Plunger (C)

(7) เลื่อนปลาย Plunger (C) ให้สัมผัสกับซีเมนต์เพสต์ ชัน Ser-Screw (E) ให้แน่น

(8) เลื่อน Indicator (F) ไปที่ตำแหน่งศูนย์(หรือจุดตำแหน่งแรก) จากนั้นคลายสกรู E เพื่อให้ก้านเข็มตกลอยอิสระและจมเข้าไปในเนื้อซีเมนต์เพสต์เป็นเวลา 30 วินาทีให้หมุนสกรู E เพื่อหยุดการตกลอยอิสระของก้านเข็ม อ่านค่าระยะจมของเข็มไวดัด

(9) ปริมาณน้ำที่มีความชื้นเหลือปกติคือปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มไวดัดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จมลงในซีเมนต์เพสต์ 10 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที ดังนั้นหากผลการทดลองพบว่าเข็มไวดัดจมน้อยกว่า 10 มิลลิเมตรแสดงว่าปริมาณน้ำมากเกินไปให้เพิ่มปริมาณน้ำในการผสมซีเมนต์เพสต์ครั้งต่อไป แต่ถ้าเข็มไวดัดจมมากกว่า 10 มิลลิเมตรแสดงว่าปริมาณน้ำมากเกินไป

(10) บันทึกค่าความลึกของ Plunger ที่จมลงในซีเมนต์ ทั้งนี้สำหรับซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีความชื้นเหลือปกติ Plunger จะจมลงได้ 10 ± 1 มิลลิเมตร

(11) ให้ทำการทดลองจากข้อ 5 ถึงข้อ 10 ซ้ำหลายๆครั้งโดยใช้ซีเมนต์ใหม่ ทุกครั้งบันทึกค่าปริมาณน้ำที่ใช้และระยะการจมตัวของ Plunger ของการทดลองแต่ละครั้ง

(12) นำข้อมูลปริมาณน้ำและระยะที่เข็มจมลงไปวาดกราฟและหาปริมาณน้ำที่ระยะจมลง 10 มิลลิเมตร จะได้ปริมาณน้ำสำหรับการผสมซีเมนต์เพสต์ที่มีความชื้นเหลือปกติ

(13) คำนวณหาปริมาณน้ำในรูปร้อยละของซีเมนต์โดยให้มีความละเอียดถึงร้อยละ 0.10 ขณะที่เวลารายงานให้ใช้ละเอียดถึงร้อยละ 0.50

3.4.2.5 การทดสอบหาระยะการก่อตัว (Setting Time, ASTM C 191)

มีรูปทรงและขนาด ดังแสดงในภาพที่ 3.6

(1) เมื่อได้ค่าความชื้นเหลือปกติของแต่ละส่วนผสมแล้ว ให้ทำการทดสอบปล่อยเข็มไวกัดขนาด 1 มิลลิเมตร จมอย่างอิสระเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีหลังจากผสม

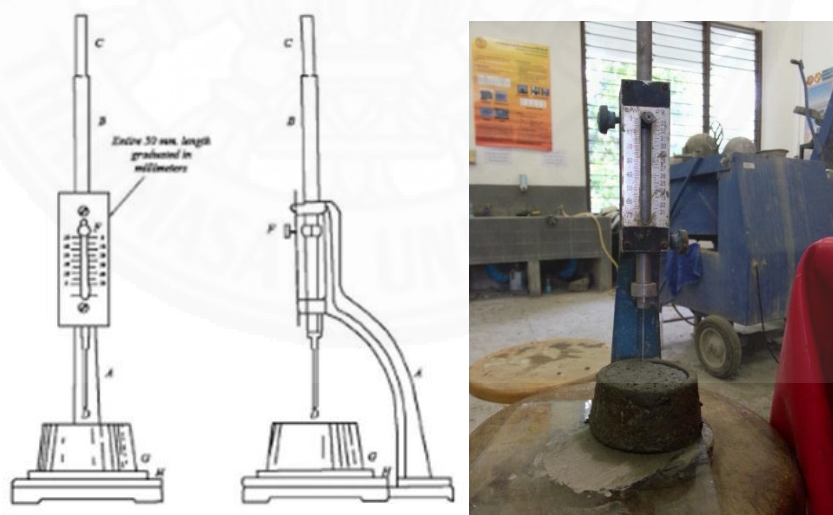
(2) ทำการทดสอบซ้ำทุก 15 นาที จนกระทั่งระยะเข็มจมน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร

(3) ในการทดสอบแต่ละครั้งให้เลื่อนปลายเข็มไวกัดให้แตะกับผิวของซีเมนต์เพสต์ จากนั้นให้ Indicator ไปที่ศูนย์ แล้วปล่อยเข็มไวกัดให้เลื่อนลงทันทีเป็นระยะเวลา 30 วินาที จากนั้นจึงอ่านระยะเข็มไวกัดที่จมลงไป

(4) ในการทดสอบแต่ละครั้งไม่ควรทดสอบใกล้กว่า 6.4 มิลลิเมตร จากจุดเดิม หรือ 9.5 มิลลิเมตร จากขอบด้านในของแบบรูปวงแหวน

(5) ให้เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับระยะเข็มจม หาเวลาที่ทำให้เข็มจมลง 25 มิลลิเมตรใน 30 วินาที นั่นคือระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

(6) ส่วนระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายคือระยะเวลาดังแต่เริ่มต้น จนเข็มไม่สามารถจมลงในซีเมนต์เพสต์ได้เลย



ภาพที่ 3.6 เครื่องมือทดสอบระยะเวลาการก่อตัวตามมาตรฐาน ASTM C 191

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วสำหรับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ลำดับ	สัญลักษณ์	อัตราส่วนผสม		
		ปูนซีเมนต์ (กรัม)	ฝุ่นแก้ว (กรัม)	น้ำ (กรัม)
1	C100GD0	1500	0	375
2	C90GD10	1350	150	365
3	C80GD20	1200	300	350
4	C70GD30	1050	450	335
5	C60GD40	900	600	315
6	C50GD50	750	750	270

3.4.3 การทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

การทดสอบการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต (Compressive Strength Loss due to Sulfate Attack) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine มีขั้นตอนดังนี้

3.4.3.1 การหล่อก้อนซีเมนต์

(1) นำส่วนผสมทั้งหมด คือ ปูนซีเมนต์ ฝุ่นแก้ว และน้ำ ตามอัตราส่วนที่ได้ ออกแบบไว้ จากนั้นเทน้ำลงไปในส่วนผสมแล้วทิ้งไว้ 30 วินาที แล้วจึงเปิดเครื่อง ผสมที่อัตราเร็วเบอร์ 1 เป็นเวลา 30 วินาที และอัตราเร็วเบอร์ 2 เป็นเวลา 60 วินาที

(2) จากนั้นนำซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเสร็จแล้วใส่ในแบบหล่อ 3 ชั้น ชั้นละ ประมาณ 1 ใน 3 ของแบบหล่อ จากนั้นกระทุ้ง 25 ครั้ง แล้วใส่ซีเมนต์เพสต์อีก 2 ชั้นที่เหลือให้ ซีเมนต์เพสต์เหลือพื้นที่ขอบบนของแบบหล่อมานิดหน่อย

(3) ใช้เกรียงปาดซีเมนต์เพสต์ที่เกินออกมาให้ผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์เรียบ โดยปาดครั้งเดียว จากนั้นแต่งหน้าซีเมนต์เพสต์ให้เรียบ โดยการใช้เกรียงปาดในแนวตั้งฉากกับหน้าตัด ทรงกระบอก ขยับเกรียงไปมาเช่นเดียวกับการเลื่อย จะทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความเรียบมากขึ้น

(4) รอการถอดแบบในอีก 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้ว

3.4.3.2 การบ่มซีเมนต์เพสต์

หลังจากได้ทำการเตรียมตัวอย่างในข้อที่ 1) เสร็จแล้ว ให้ทำการบ่มซีเมนต์เพสต์โดยการบ่มอากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสด้วยตู้อบไฟฟ้า หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักและบันทึกค่า ดังแสดงในภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 การบ่มตัวอย่าง

3.4.3.3 การแช่ซีเมนต์เพสต์ลงในสารละลายซัลเฟต

(1) เตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) โดยใช้ส่วนผสมน้ำประปา 1 ลิตร ต่อ Na_2SO_4 50 กรัม

(2) เตรียมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) โดยใช้ส่วนผสมน้ำประปา 1 ลิตร ต่อ MgSO_4 42.3 กรัม

(3) การแช่ก้อนซีเมนต์เพสต์ลงในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 7, 14, 28 วัน ตามลำดับ

(4) เมื่อครบกำหนดให้นำก้อนซีเมนต์เพสต์มาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักก่อนแช่สารละลายซัลเฟต ก็จะได้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต (Weight Loss due to Sulfate Attack)

3.4.3.4 การทดสอบกำลังอัดประลัย

(1) ทำความสะอาดผิวด้านที่ทดสอบกำลังอัดให้เรียบ

(2) วางก้อนทดสอบลงบนกึ่งกลางแป้นทดสอบ แล้วเพิ่มแรงอัดด้วยอัตราสม่ำเสมอ จนกระทั่งก้อนตัวอย่างแตกภายใน 20 ถึง 80 วินาที โดยห้ามปรับเปลี่ยนกลไกขณะทดสอบ

(3) บันทึกค่าของกำลังอัดสูงสุด

3.4.3.5 หาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์

นำตัวอย่างที่ถูกรับกำลังอัดจนถึงจะประลัยแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนโดยวิธี Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ใช้วัดการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่างๆ โดยทำการวัดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่คงเหลืออยู่ในซีเมนต์เพสต์ช่วงอุณหภูมิทดสอบประมาณอุณหภูมิห้อง (31°C) ถึง 600°C องศาเซลเซียส เครื่องที่ใช้ทดสอบมีแหล่งความร้อนเป็นระบบเตาเผาสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถึง 1100°C องศาเซลเซียส มีอัตราเพิ่มลดอุณหภูมิ 10°C องศาเซลเซียสต่อนาทีมีระบบทำให้เตาเผาเย็นอย่างรวดเร็วโดยใช้อากาศระบบการทำงานและประมวลผลจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของเทอร์โมแกรมระหว่างร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิหรือเวลาที่ในการวิเคราะห์

ลำดับ	สถานะ ส่วนผสม	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ											
		อุณหภูมิห้อง			70 °C			80 °C			90 °C		
		H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
1	C100GD0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	C90GD10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	C80GD20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	C70GD30	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	C60GD40	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	C50GD50	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
รวม		18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
		216											

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการแช่สารละลายซัลเฟต 28 วัน

ลำดับ	สถานะส่วนผสม	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ											
		อุณหภูมิห้อง			70 °C			80 °C			90 °C		
		H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
1	C100GD0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	C90GD10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	C80GD20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	C70GD30	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	C60GD40	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	C50GD50	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
รวม		18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
		216											

ตารางที่ 3.6 จำนวนตัวอย่างทั้งหมดที่ใช้ในการทดสอบ

ระยะเวลาในการบ่ม (วัน)	จำนวนตัวอย่าง
7	216
14	216
28	216
รวม	648

3.6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด

การเปลี่ยนแปลงขนาดอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C157/C157M-06 Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic Cement Mortar และ ASTM C490-97 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete. ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) ทำการผสมซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว ตามสัดส่วนผสมมาเทลงแบบหล่อขนาด 2.5x2.5x22 เซนติเมตร จำนวนตัวอย่างแสดงดังตารางที่ 3.7

2) หลังจากคอนกรีตมีอายุ $23 \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ วัน ทำการถอดแบบออกและวัดความยาวเริ่มต้น (L0) ด้วยเครื่อง Length Comparator ดังแสดงในภาพที่ 3.9

3) อบด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส 80 องศาเซลเซียสและ 90 องศาเซลเซียส

4) การบ่มแช่ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นลงในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และน้ำ

5) ทำการวัดต่อไปทุกๆ 3 วัน (Li) จนกระทั่งซีเมนต์เพสต์ มีอายุครบ 30 วัน

6) คำนวณหาความยาวที่เปลี่ยนไป ดังสมการที่ 3.1

$$\Delta L = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100 \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

โดยที่

ΔL คือ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาด

L_0 คือ ค่าความยาวเริ่มต้นของตัวอย่าง

L_1 คือ ค่าความยาวของตัวอย่างหลังจากแช่สารละลายในซัลเฟต

ตารางที่ 3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด

ลำดับ	สถานะ ส่วนผสม	จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ											
		อุณหภูมิห้อง			70 °C			80 °C			90 °C		
		H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	H ₂ O	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
1	C100GD0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	C90GD10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	C80GD20	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	C70GD30	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
5	C60GD40	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	C50GD50	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
รวม		18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
		216											



ภาพที่ 3.9 เครื่องมือทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด

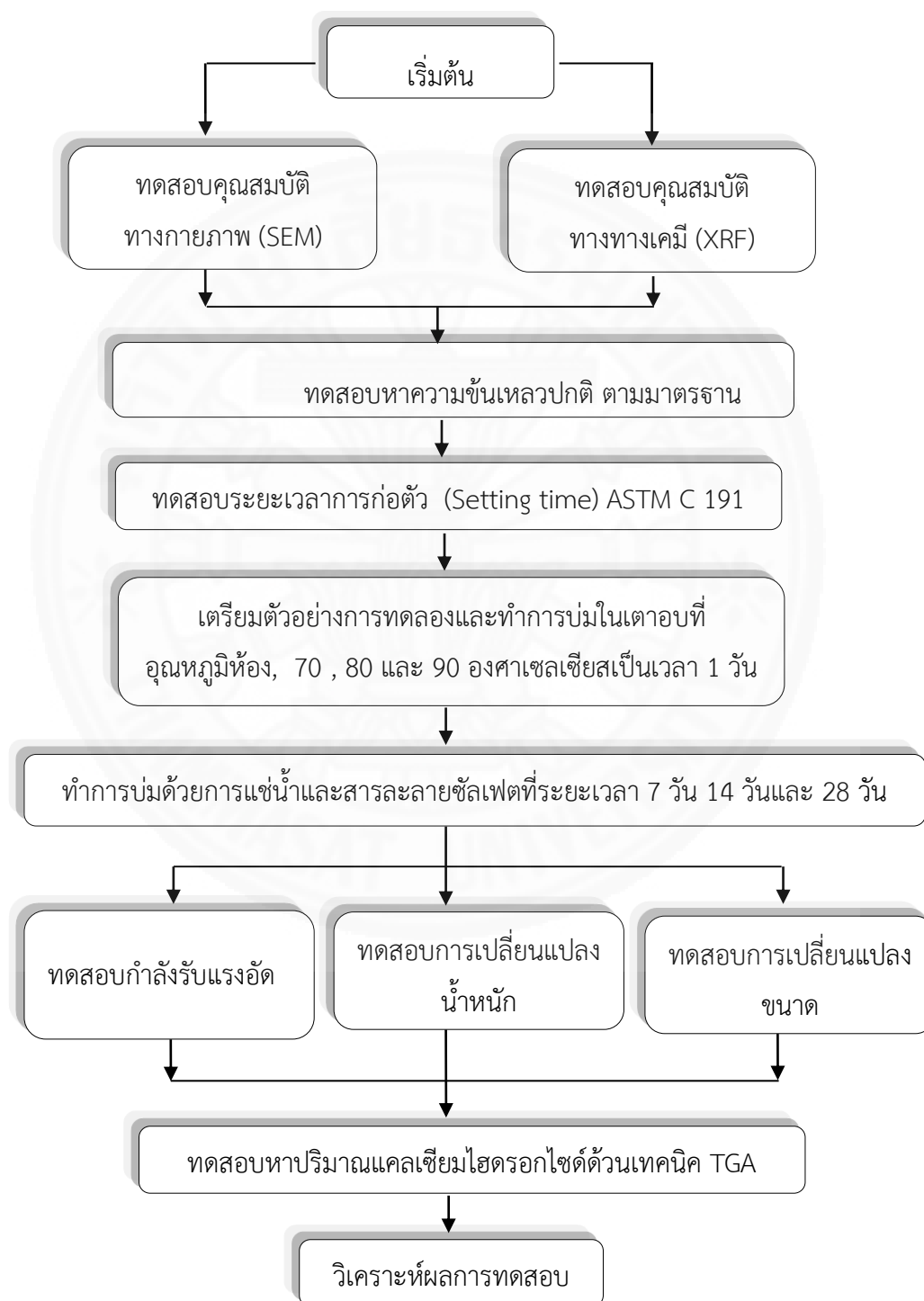
3.7 ทดสอบหาลักษณะการกระจายขนาดผลของอนุภาคฝุ่นแก้ว

การเตรียมตัวอย่างฝุ่นแก้วโดยทำการคัดเลือกเศษแก้วโดยเลือกใช้ขวดแก้วสีชาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า นำไปบดด้วยหม้อบดและทำการอบแห้งด้วยตู้อบ จากนั้นทำการหาขนาดผลของมวลละเอียดของฝุ่นแก้ว ขั้นตอนการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้

- 1) อบฝุ่นแก้วที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสจนตัวอย่างแห้ง
- 2) เลือกขนาดของตะแกรงและติดตั้งตะแกรงเรียงจากหยาบไปละเอียดตามลำดับจากบนลงล่าง
- 3) เทตัวอย่างอบแห้งซึ่งบันทึกน้ำหนักแล้วลงบนตะแกรงด้านบน
- 4) เดินเครื่องเขย่าเป็นเวลานานพอจนกระทั่งแน่ใจว่าถ้านำตะแกรงเบอร์ใดๆพร้อมมวลรวมซึ่งค้างบนตะแกรงนั้นออกมาเขย่าเป็นเวลา 1 นาทีแล้วมวลรวมจะรอดตะแกรงผ่านมาไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรง
- 5) ชั่งน้ำหนักของมวลรวมที่ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาด ตรวจสอบผลรวมของน้ำหนักทั้งหมดซึ่งถ้าแตกต่างไปจากน้ำหนักก่อนทดสอบแสดงว่าทดสอบนั้นผิดให้ทำการทดสอบใหม่
- 6) คำนวณหาค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ค้างบนตะแกรงแต่ละขนาดและปริมาณเปอร์เซ็นต์ผ่านตะแกรงแต่ละขนาดทั้งนี้ให้คำนวณจากน้ำหนักของตัวอย่างอบแห้งก่อนนำมาทดสอบเขย่า

3.8 ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบ

ขั้นตอนการดำเนินการทดสอบแสดงได้ดังต่อไปนี้



บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบในงานวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และองค์ประกอบทางกายภาพของฝุ่นแก้ว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมี

เมื่อพิจารณาคูณสมบัติทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเครื่องมือ X – Ray Fluorescence (XRF) พบว่าฝุ่นแก้วมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 71.36 และมีองค์ประกอบอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

องค์ประกอบทางเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ฝุ่นแก้ว	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
Silicon DioXide (SiO_2)	71.36	20.1
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	1.31	5.1
Iron Oxide (Fe_2O_3)	0.50	3.15
Calcium Oxide (CaO)	9.87	64.4
Magnesium Oxide (MgO)	1.75	1.7
Potassium Oxide (K_2O)	0.01	0.44
Sodium Oxide (Na_2O)	7.05	0.18
Sulfur Trioxide (SO_3)	0.02	2.32
Free CaO	-	1.2

4.1.2 สมบัติทางกายภาพ

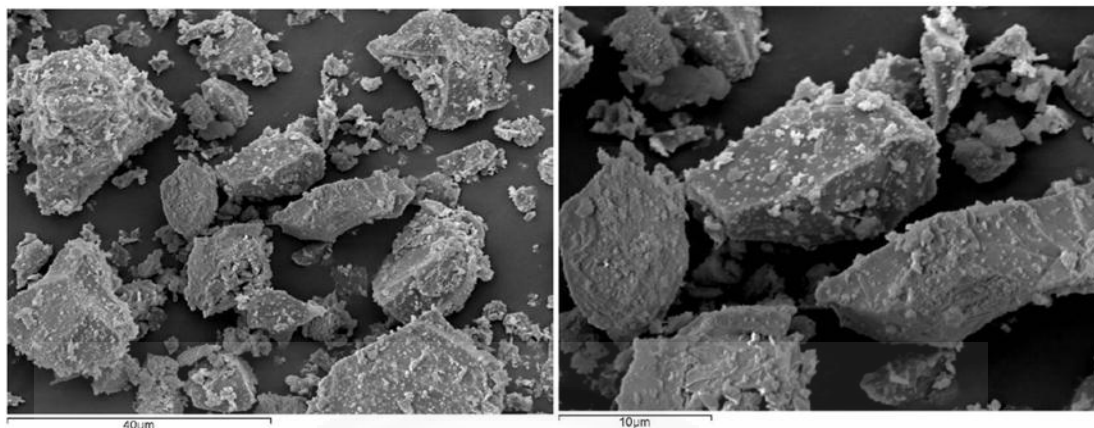
จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งจะศึกษาถึงปริมาณความชื้นสูงสุด พื้นที่ผิวจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ ปริมาณน้ำที่ต้องการ และความหนาแน่น ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

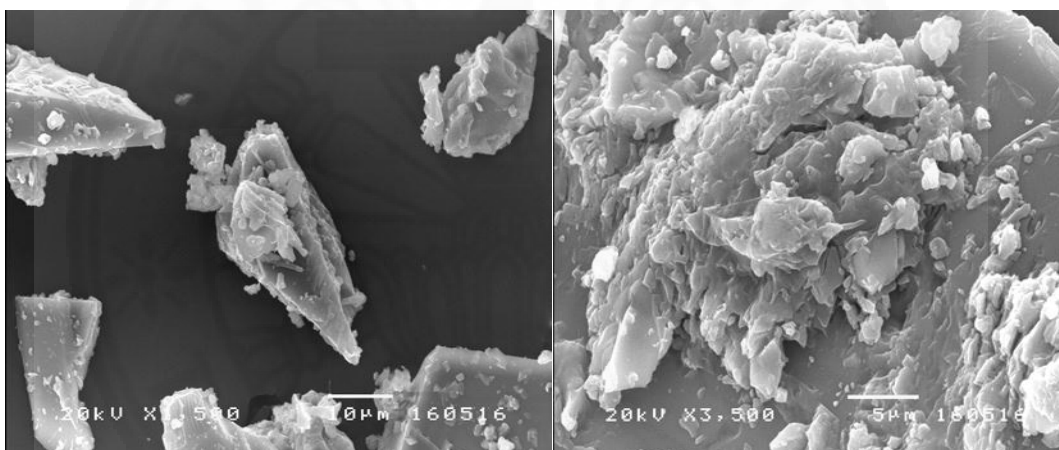
คุณสมบัติทางกายภาพ	ฝุ่นแก้ว	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ปริมาณความชื้นสูงสุด (Moisture Content, %)	-	0.19
พื้นที่ผิวจำเพาะ (Surface Area, cm^2/g)	773	3566
ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)	2.52	3.15
ปริมาณน้ำที่ต้องการ (Water Requirement, % of control)	98.9	100
ความหนาแน่น (Bulk Density, kg/L)	958.7	1000

4.1.3 โครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุผง

ลักษณะอนุภาคฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้เทคนิค (Scanning Electron Microscope : SEM) จากการศึกษาลักษณะอนุภาคของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ที่กำลังขยาย 1,500 และ 3,500 เท่า ตามลำดับพบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมส่วนฝุ่นแก้วมีลักษณะเป็นเกล็ดคมแหลมเป็นรูปทรงไม่แน่นอนมีพื้นผิวขรุขระและมีขนาดเล็กใหญ่คู่กัน ดังแสดงในภาพที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งลักษณะรูปร่างจะมีผลในด้านปริมาณความต้องการน้ำของซีเมนต์เฟส



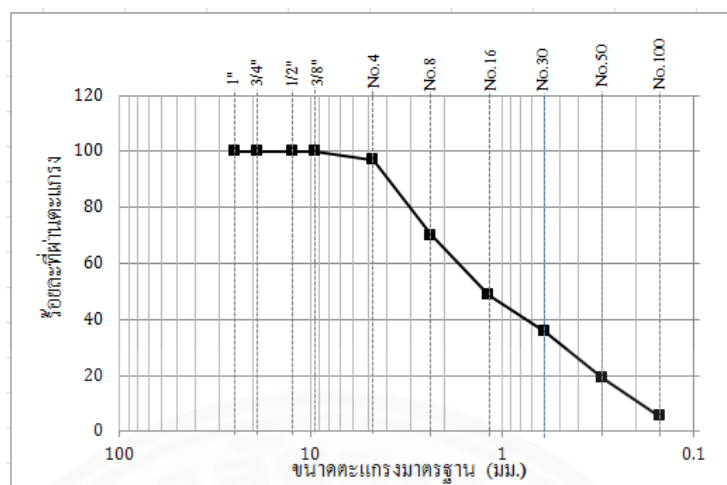
ภาพที่ 4.1 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคพูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า



ภาพที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะอนุภาคฝุ่นแก้วที่กำลังขยาย 1500 เท่า และ 3500 เท่า

4.1.4 ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคฝุ่นแก้ว

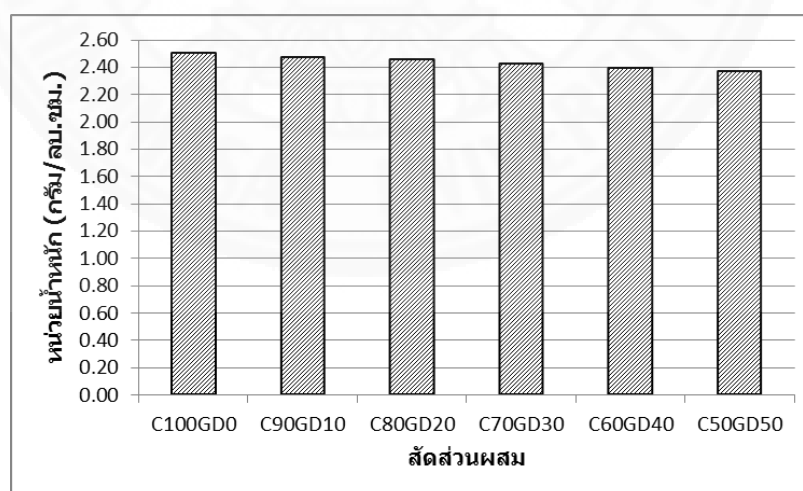
การเตรียมตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วโดยการคัดเลือกเศษแก้วโดยเลือกใช้ขวดแก้วสีชาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า นำไปบดด้วยหม้อบดและทำการอบแห้งด้วยตู้อบ จากนั้นทำการหาขนาดคละของมวลละเอียดของฝุ่นแก้ว ดังแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงค่าร้อยละที่ผ่านตะแกรงกับขนาดตะแกรงมาตรฐาน

4.1.5 หน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

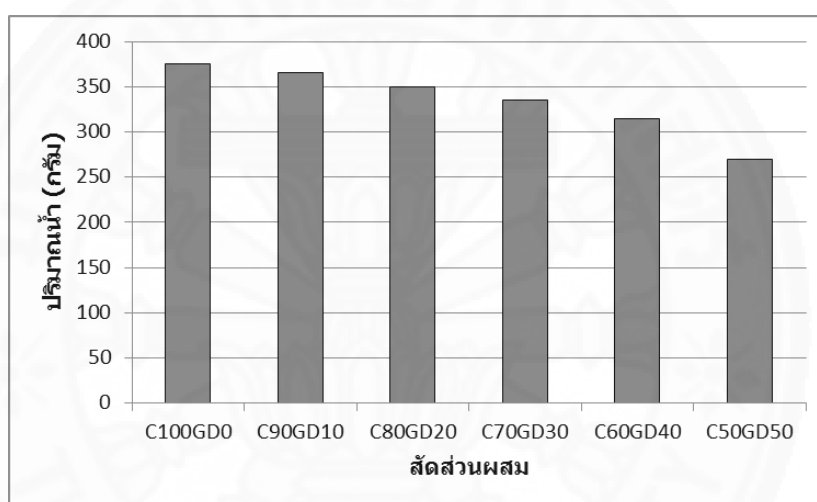
จากการทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ล้วนและซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว พบว่าหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ล้วนมีค่าหน่วยน้ำหนักมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว ดังแสดงในภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 กราฟแสดงหน่วยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

4.2 การหาความชื้นเหลวปกติ

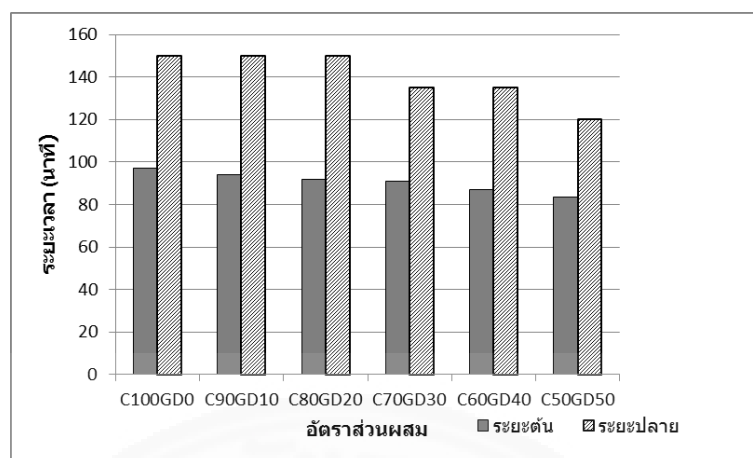
ผลการทดสอบหาปริมาณความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วกับซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วมีปริมาณความต้องการน้ำน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ ลดลง โดยมีปริมาณความต้องการน้ำลดลงตามปริมาณการแทนที่ของฝุ่นแก้ว ดังแสดงในภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ปริมาณน้ำที่เติมจนซีเมนต์เพสต์มีความชื้นเหลวตามมาตรฐาน

4.3 ระยะเวลาการก่อตัว

จากการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นการทดสอบด้วยเข็มไวแคต (Vicat Needle Modified Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C191-82 ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วจะมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายที่น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วดังแสดงในภาพที่ 4.6



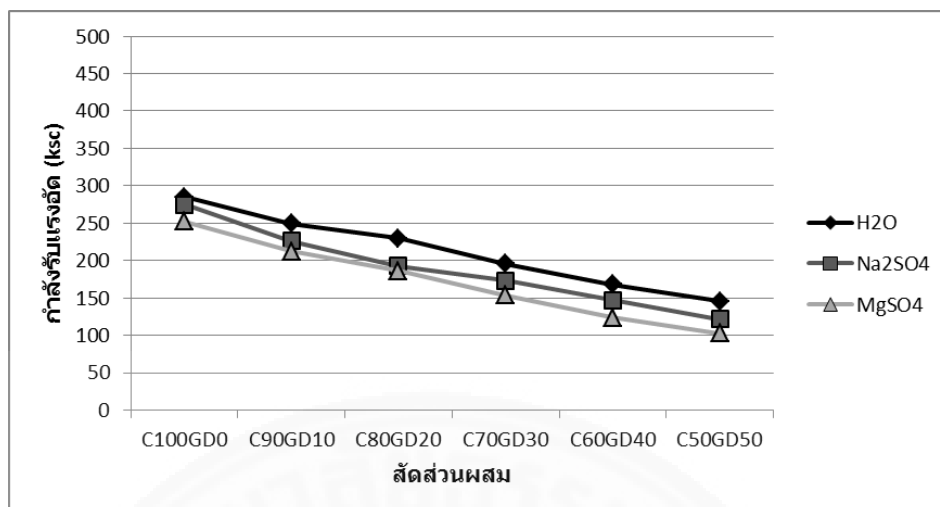
ภาพที่ 4.6 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม

4.4 กำลังอัด

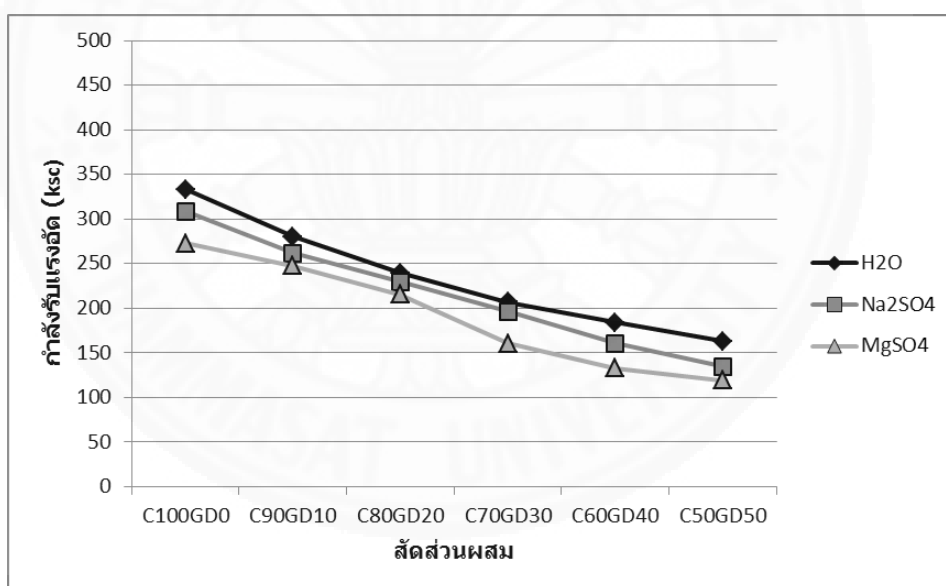
จากการศึกษากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่มีสัดส่วนผสมที่แตกต่างกัน คือแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส), 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยบ่มแช่น้ำสะอาดและสารละลายซิลเฟตที่ระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.4.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว

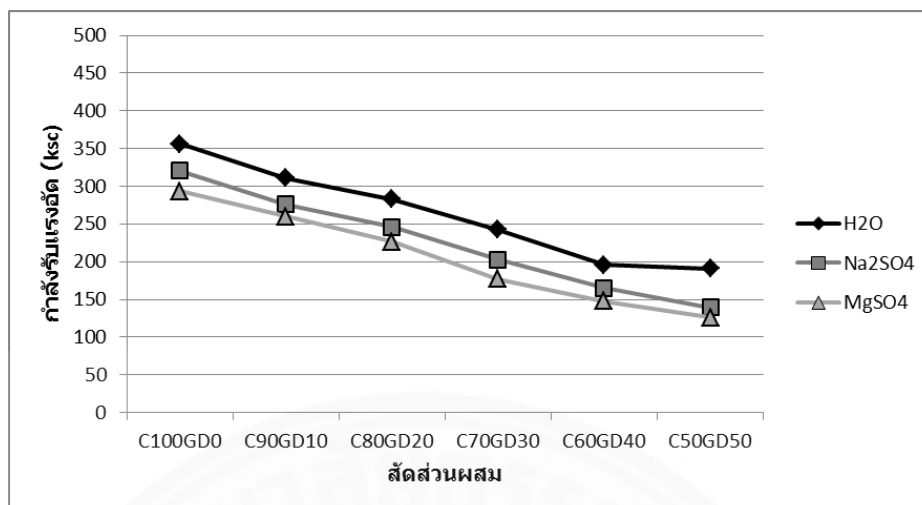
เมื่อพิจารณาถึงอายุต่างๆของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วพบว่าการบ่มทุกสภาวะส่งผลทำให้กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของตัวอย่างเพิ่มขึ้น หมายความว่าตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่อายุ 14 วันและ 7 วัน ซึ่งพบว่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกส่วนผสมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องประมาณ 31 องศาเซลเซียสและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าจะมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วง 7-14 วันและมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 14-28 วัน สำหรับตัวอย่างทุกส่วนผสมที่อบอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจะมีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่อบที่อุณหภูมิห้อง และ 70 องศาเซลเซียสและการบ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.7 ถึง ภาพที่ 4.19



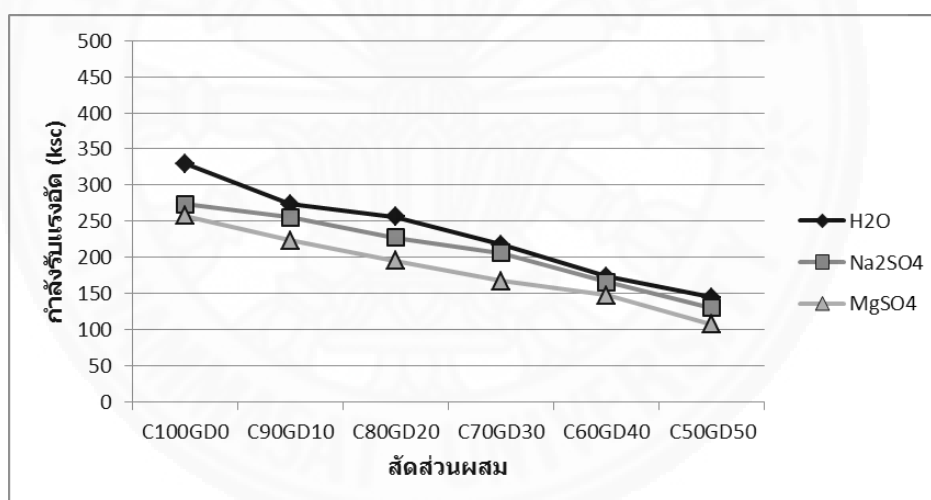
ภาพที่ 4.7 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 7 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C) เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



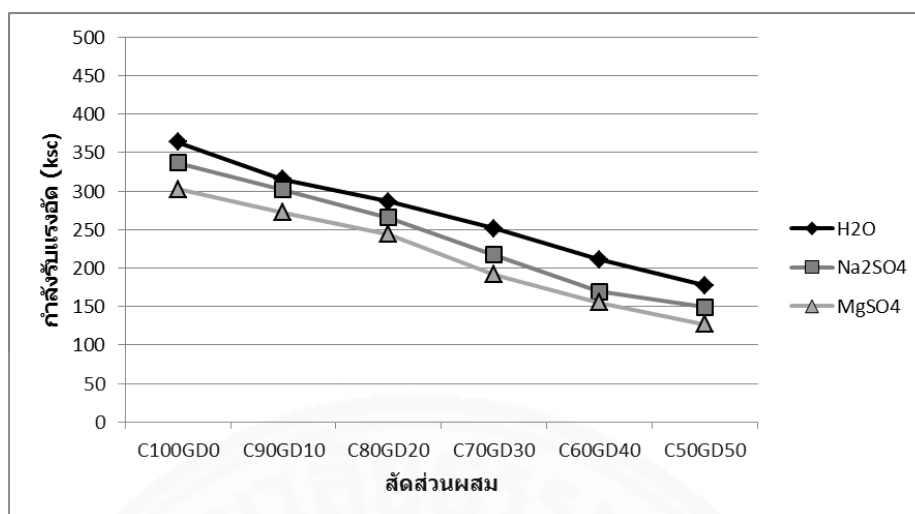
ภาพที่ 4.8 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 14 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C) เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



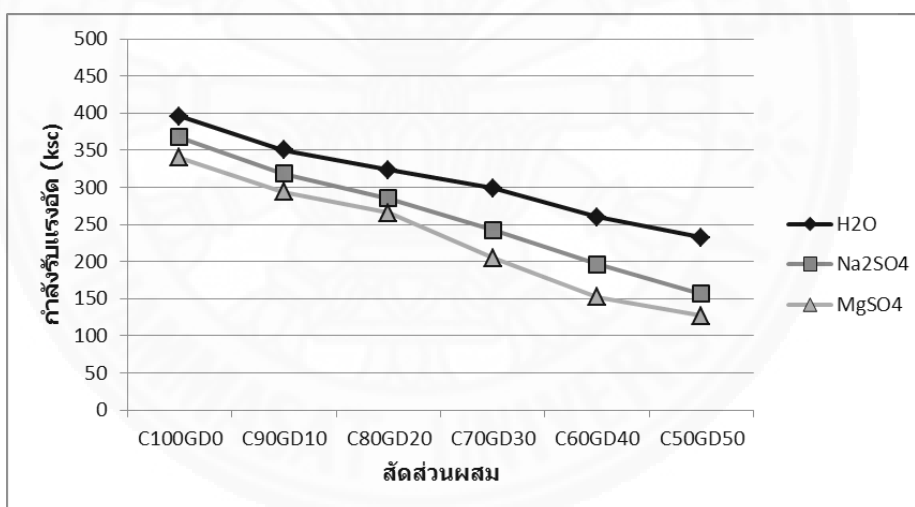
ภาพที่ 4.9 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C) เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



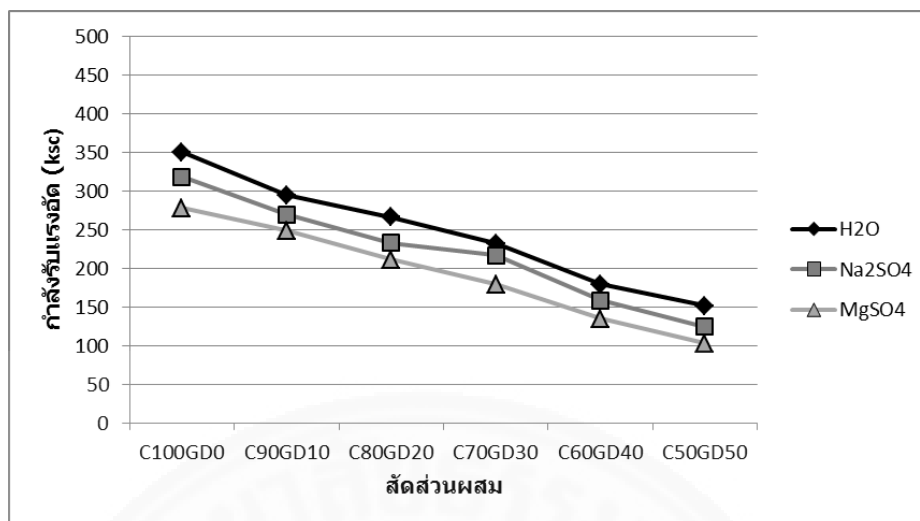
ภาพที่ 4.10 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 7 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



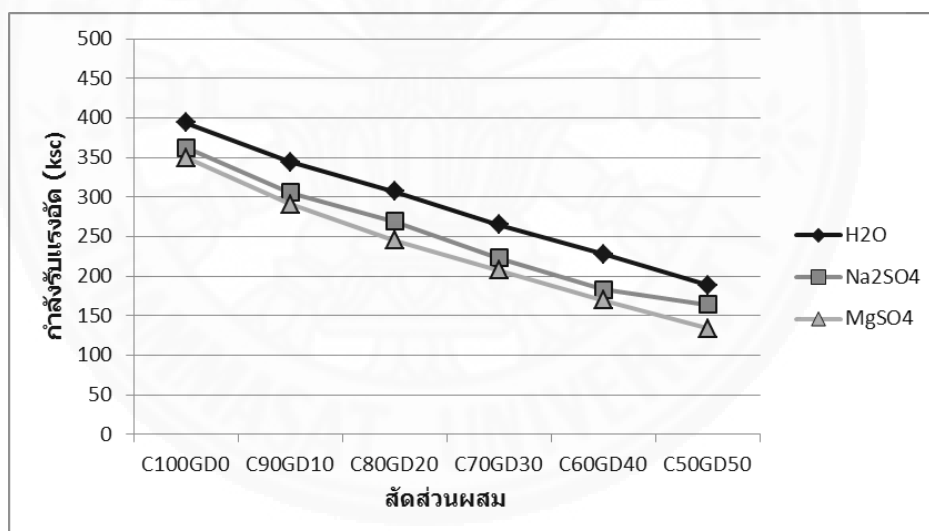
ภาพที่ 4.11 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 14 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



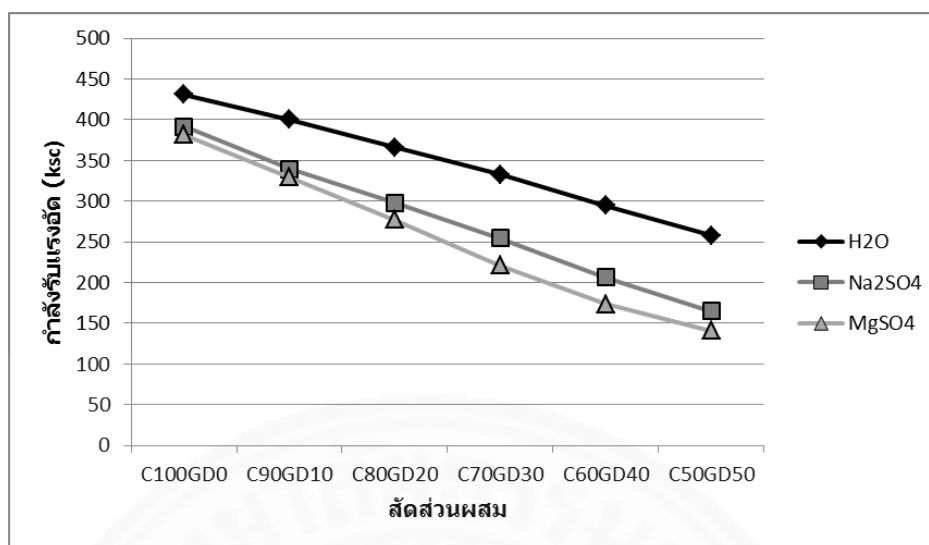
ภาพที่ 4.12 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 70 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



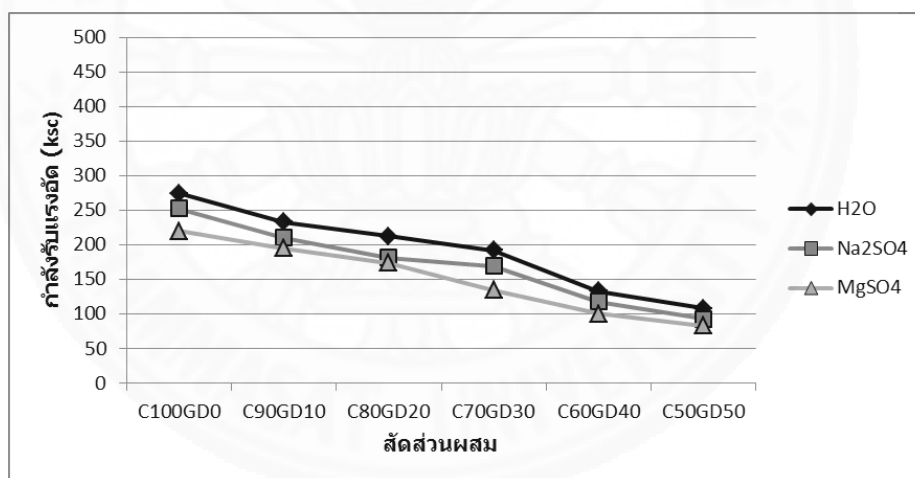
ภาพที่ 4.13 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 7 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



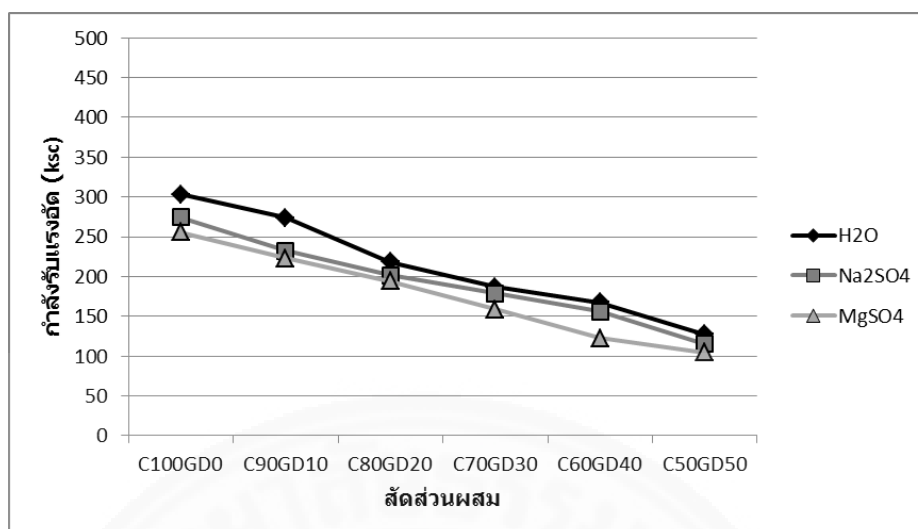
ภาพที่ 4.14 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 14 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



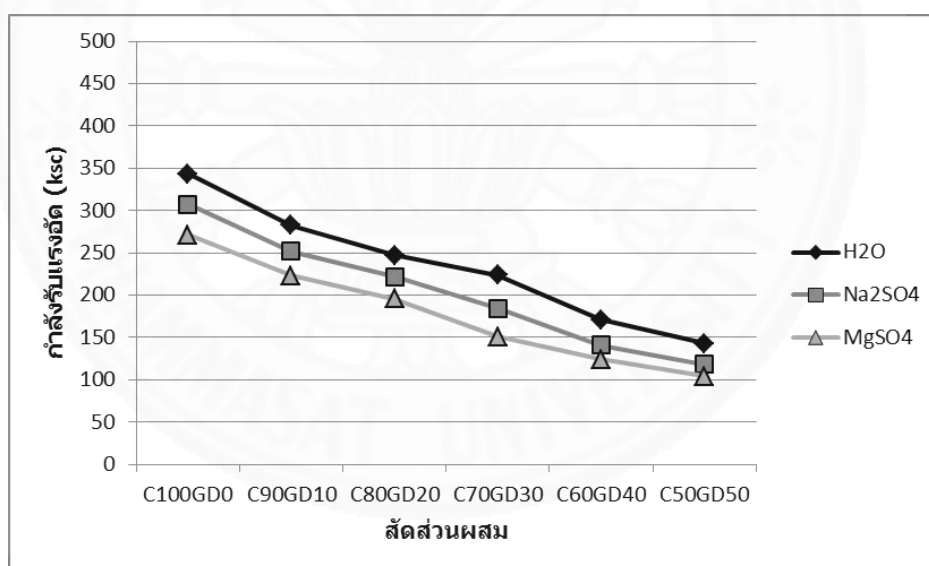
ภาพที่ 4.15 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



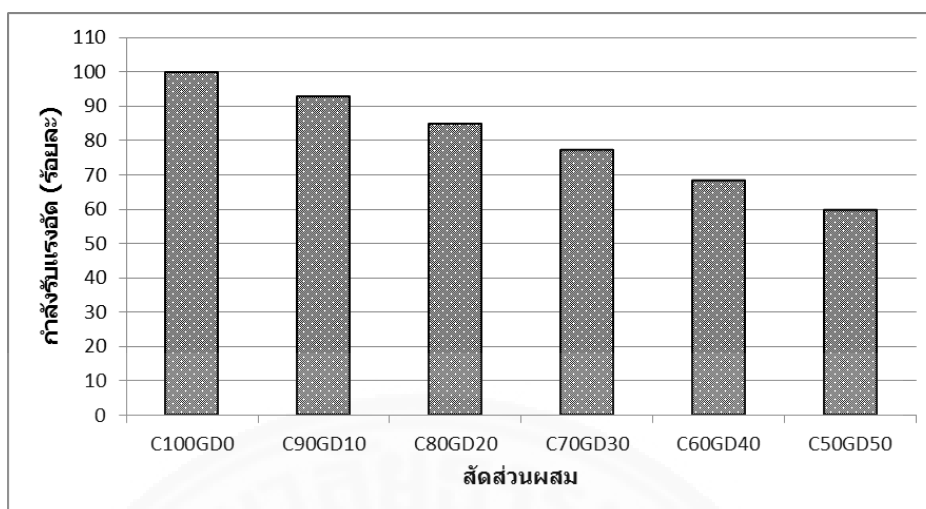
ภาพที่ 4.16 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 7 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.17 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 14 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.18 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



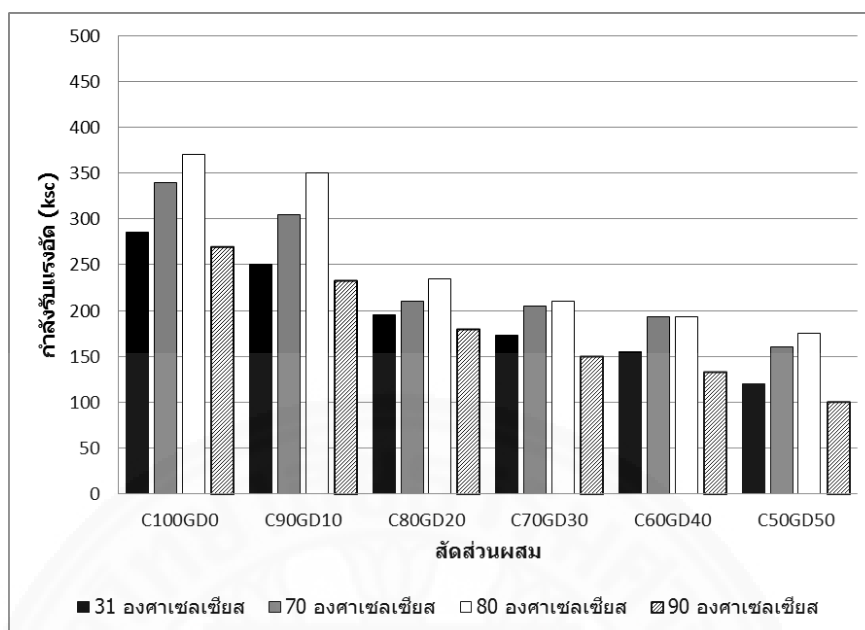
ภาพที่ 4.19 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกําลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ ระยะเวลาการแช่นํ้า 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน

4.4.2 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีผลต่อกําลังอัดของซีเมนต์เพสต์

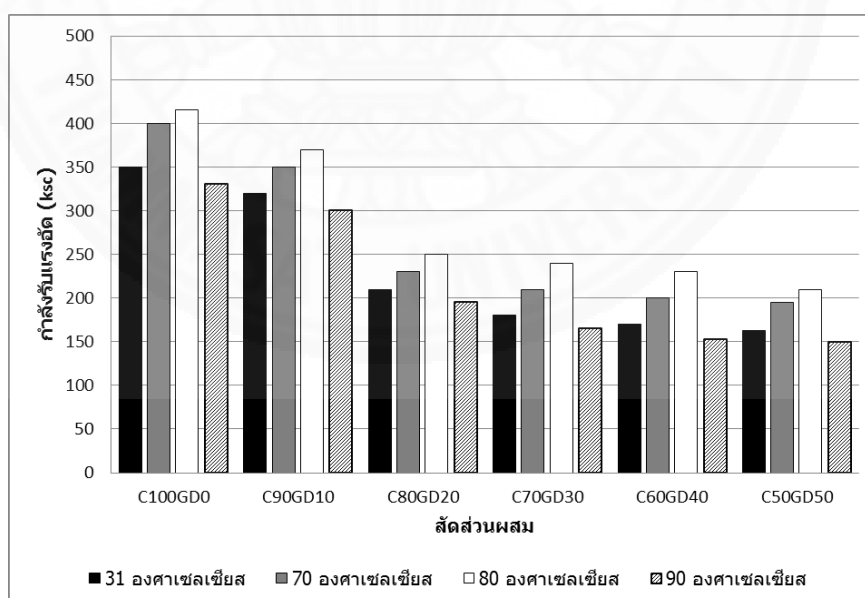
เมื่อเปรียบเทียบกําลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่บ่มด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส), 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าทุกระยะเวลาการแช่สารละลายซิลเฟต การบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสจะทำให้ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วมีกําลังอัดมากที่สุด รองลงมาเป็น 70 องศาเซลเซียส, อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส) และ 90 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งอุณหภูมิที่ได้ผลดีที่สุดในด้านกําลังอัดอยู่ในช่วง 65 ถึง 80 องศาเซลเซียส (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, 2548) ดังแสดงในภาพที่ 4.20 ถึง 4.23

การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อกําลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม มีรายละเอียด ขอบเขตของการทดสอบดังต่อไปนี้

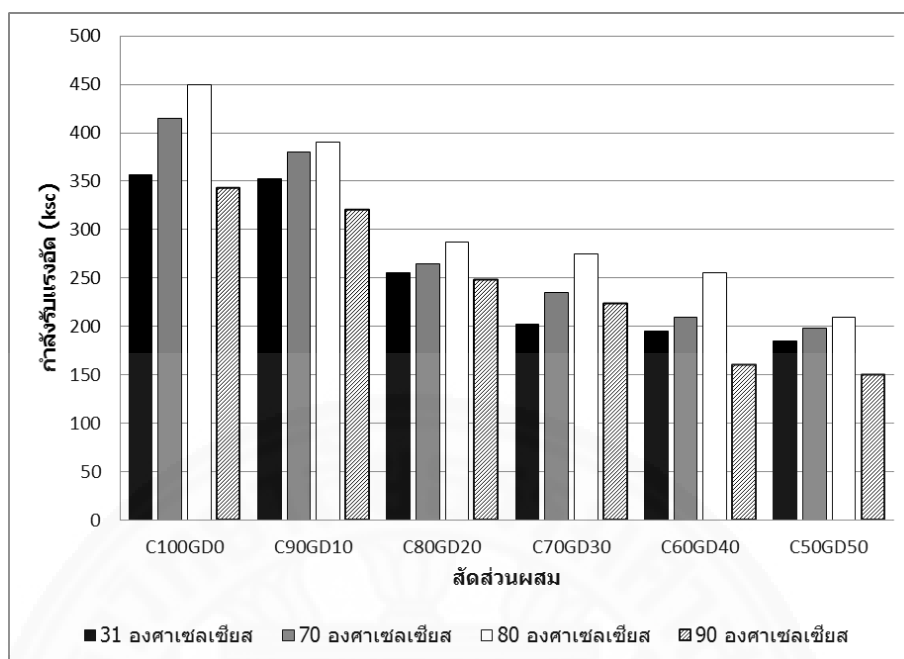
- (1) อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 6 สูตร คือ C100GD0, C90GD10, C80GD20, C70GD30, C60GD40 และ C50GD50
- (2) อุณหภูมิที่ใช้บ่มในเตาอบไฟฟ้าคือ การบ่มด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส, 80 องศาเซลเซียสและ 90 องศาเซลเซียส
- (3) ระยะเวลาการแช่นํ้าคือ 7, 14, 28 วัน



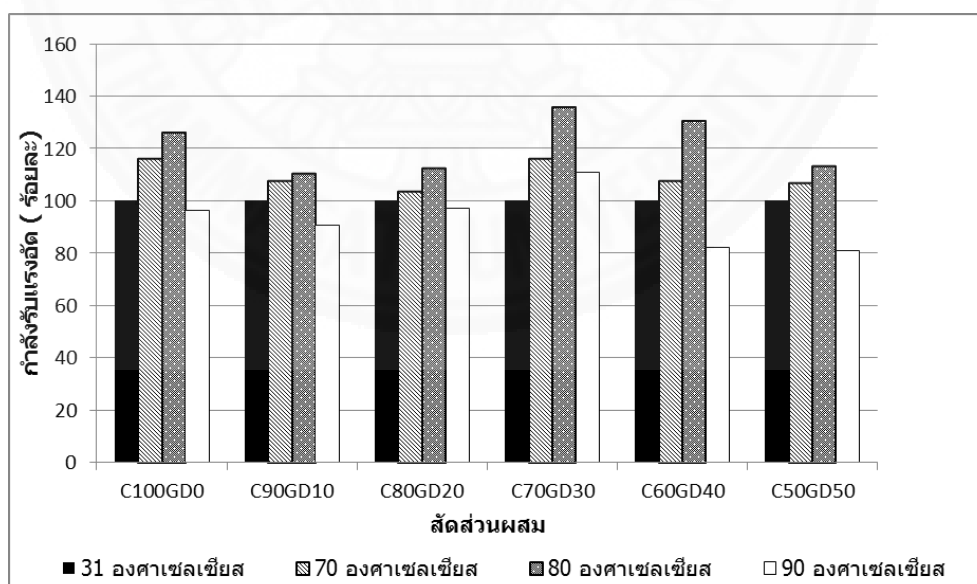
ภาพที่ 4.20 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 7 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.21 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 14 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



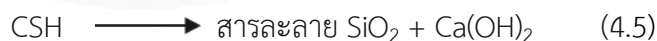
ภาพที่ 4.22 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์โพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

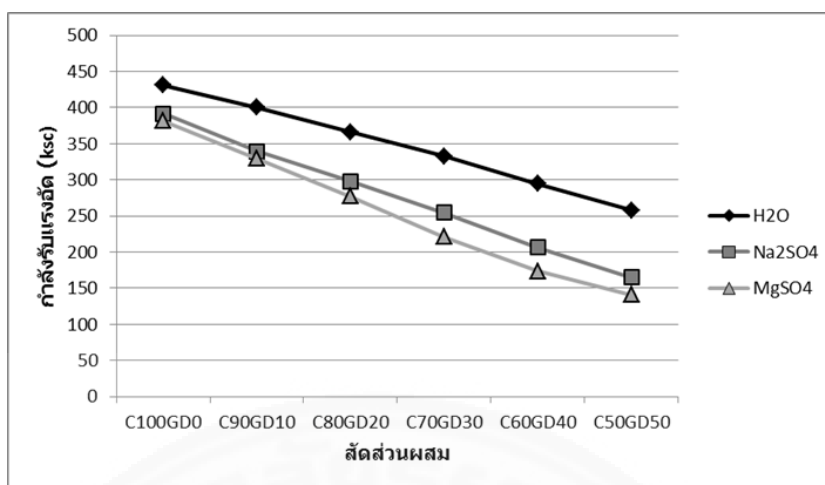


ภาพที่ 4.23 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์โพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม ที่ระยะเวลาการแช่น้ำ 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31 °C), 70 °C, 80 °C และ 90 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง

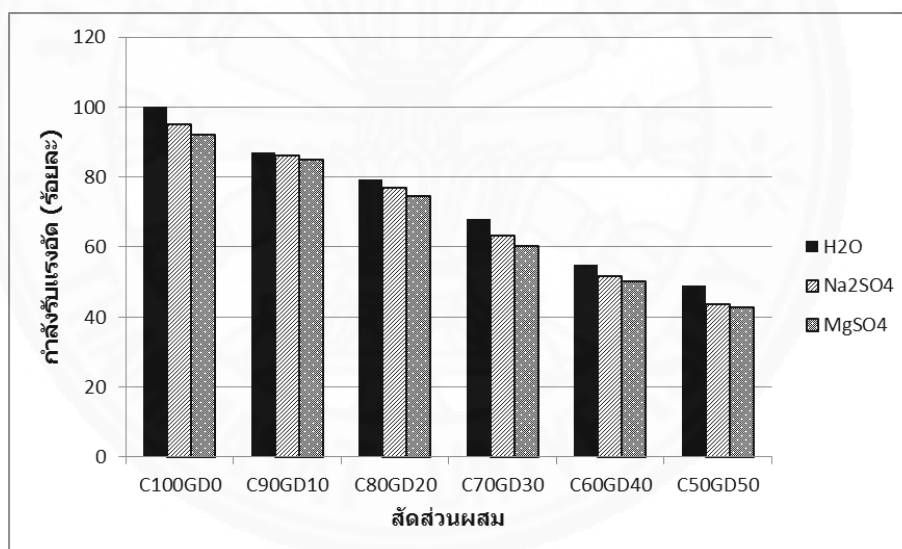
4.4.3 ผลของสารละลายซัลเฟตที่มีต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

จากผลการทดสอบนำซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมาแช่น้ำ แห่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแห่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) พบว่า ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่แช่แช่น้ำ (H_2O) มีค่ากำลังรับแรงอัดมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่แห่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และซีเมนต์เพสต์ที่แห่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.24 และ 4.25 เนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตมีผลโดยตรงกับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ซึ่งไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม (Gypsum) ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) ซึ่งเมื่อยิปซัม (Gypsum) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดเอทริงไต์ (Ettringite) ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการขยายตัวเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดความเสียหายได้ ในส่วนสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) จะทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) และเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ซึ่งเป็นตัวให้กำลัง จึงเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดความเสียหายได้ (นพคุณ ผลโพธิ์, 2554) ดังสมการที่ (4.1) ถึง (4.5)





ภาพที่ 4.24 กราฟกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่ NaSO₄ , MgSO₄, H₂O เป็นระยะเวลา 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.25 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสมที่ผ่านการแช่น้ำ (H₂O) เป็นระยะเวลา 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน

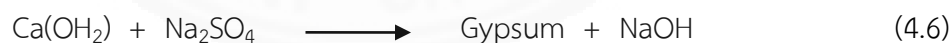
4.5 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

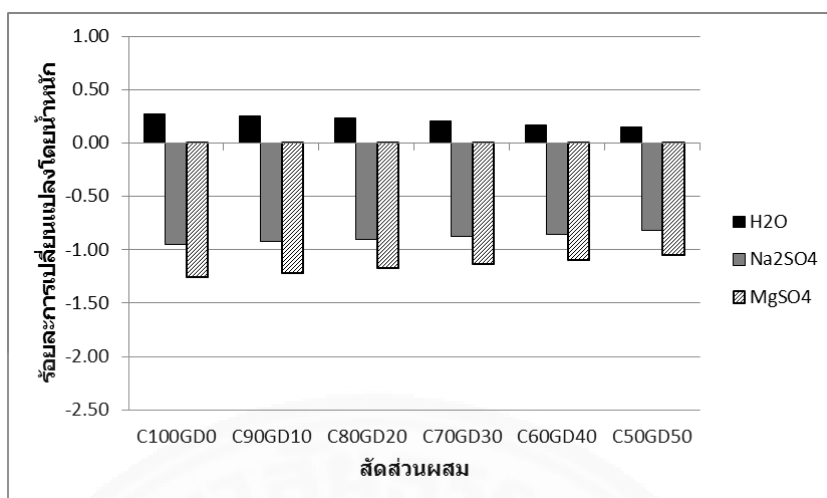
4.5.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาถึงอายุต่างๆของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วพบว่า การบ่มทุกสภาวะส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของตัวอย่างเพิ่มขึ้น หมายความว่าตัวอย่างที่อายุ 28 วัน มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่อายุ 14 วันและ 7 วัน ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างทุกส่วนผสมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องประมาณ 31 องศาเซลเซียสและบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลดลง สำหรับตัวอย่างทุกส่วนผสมที่อบอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่อบที่อุณหภูมิห้อง และ 70 องศาเซลเซียสและการบ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 4.26 ถึง ภาพที่ 4.38

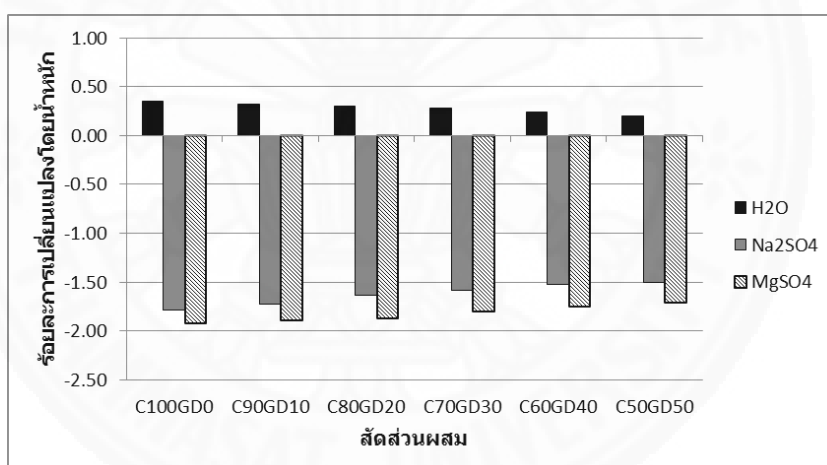
นอกจากนี้ยังพบว่าการบ่มด้วยน้ำ (H_2O) มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและลดลงตามสัดส่วนของปริมาณฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาถึงการกีดกร่อนของสารละลายซัลเฟตมีผลโดยตรงกับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ซึ่งไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม (Gypsum) ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักได้ เพราะฉะนั้นการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วจึงเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ดังสมการที่ (4.6) ถึง (4.9) (รัชชัย คุณประคัลภ์ และอนันต์ นนท์ศิริ, 2555)

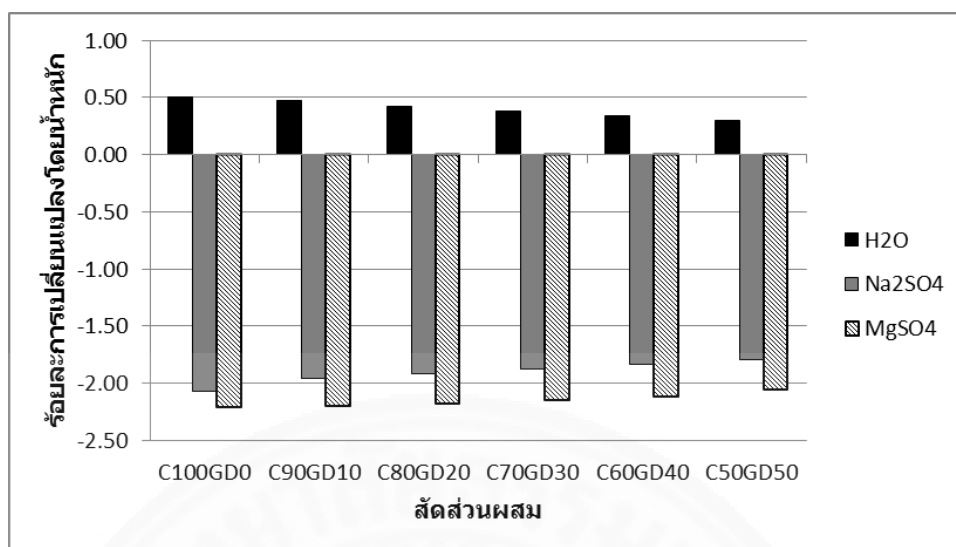




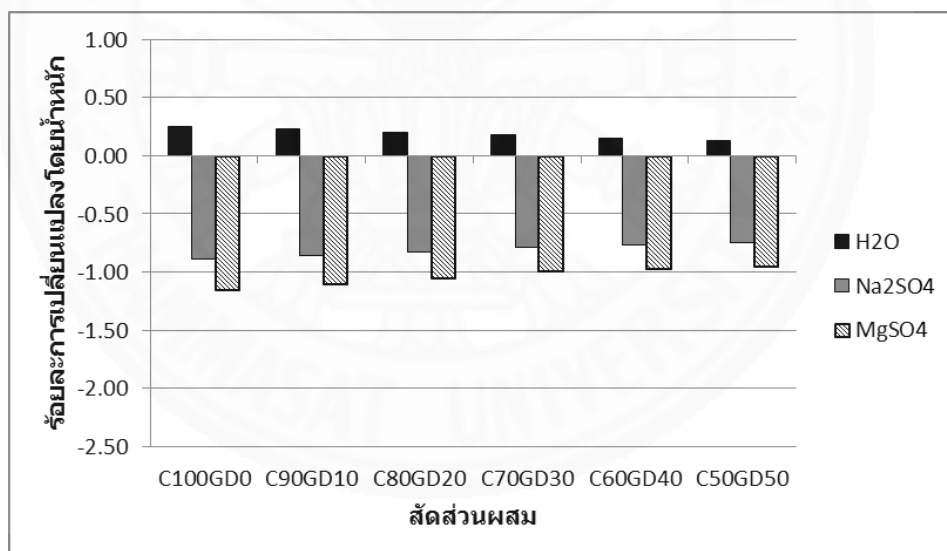
ภาพที่ 4.26 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แคลเซียมละลายซัลเฟต เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C)



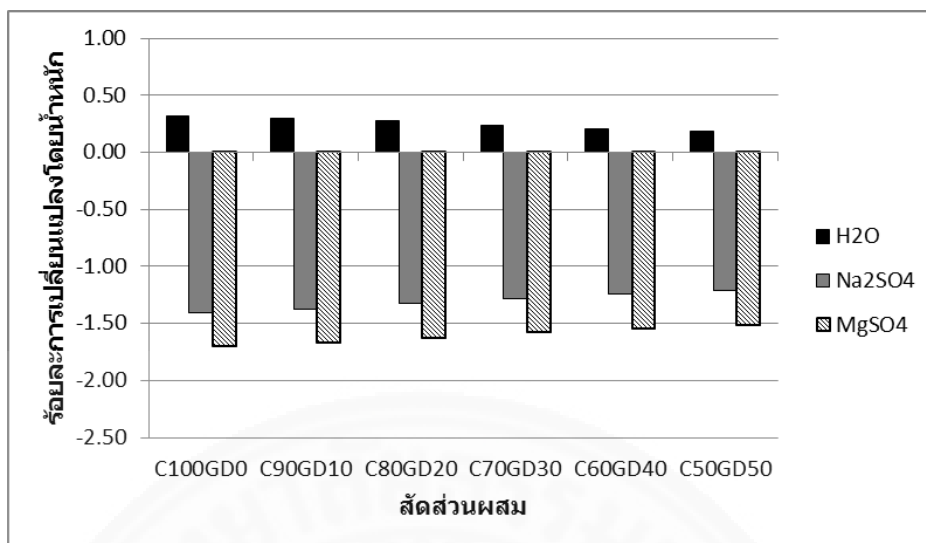
ภาพที่ 4.27 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แคลเซียมละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C)



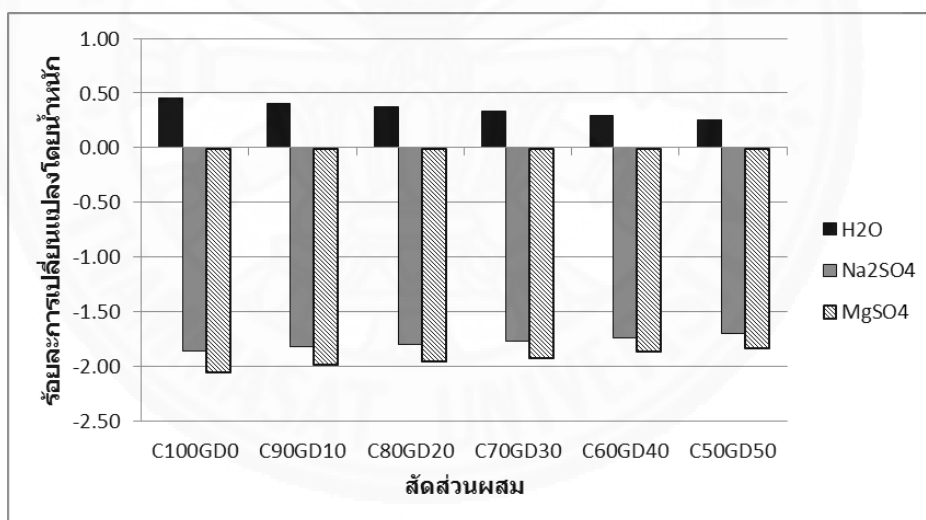
ภาพที่ 4.28 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C)



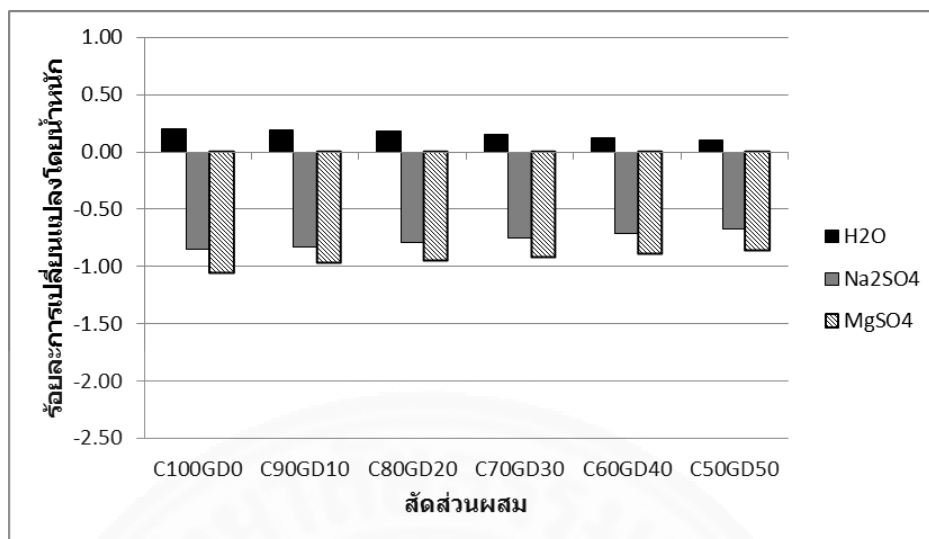
ภาพที่ 4.29 กราฟแท่งแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง (70 °C)



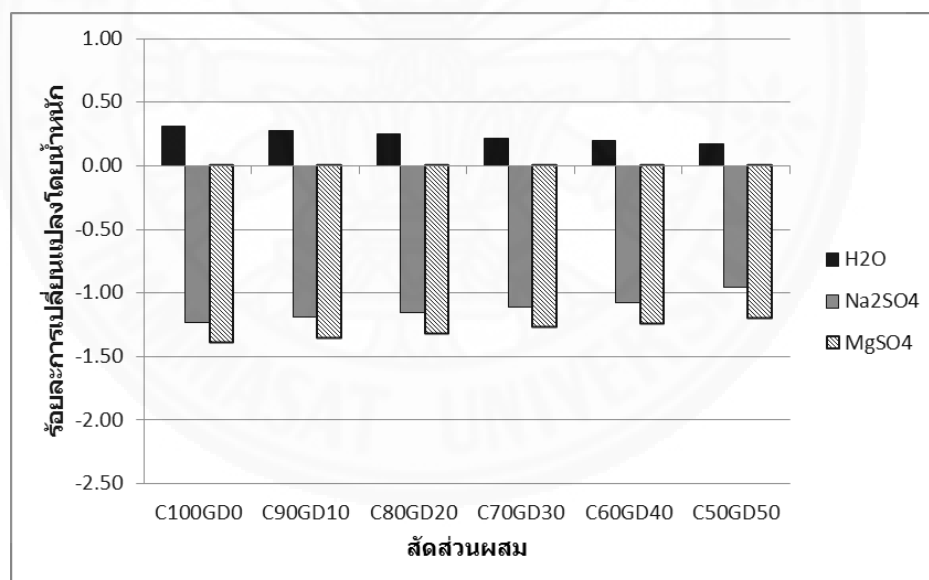
ภาพที่ 4.30 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 70 °C



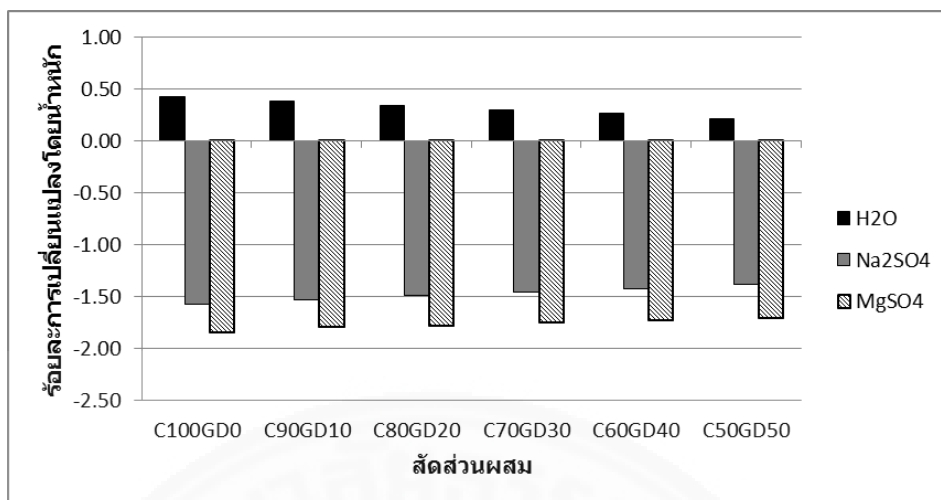
ภาพที่ 4.31 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 70 °C



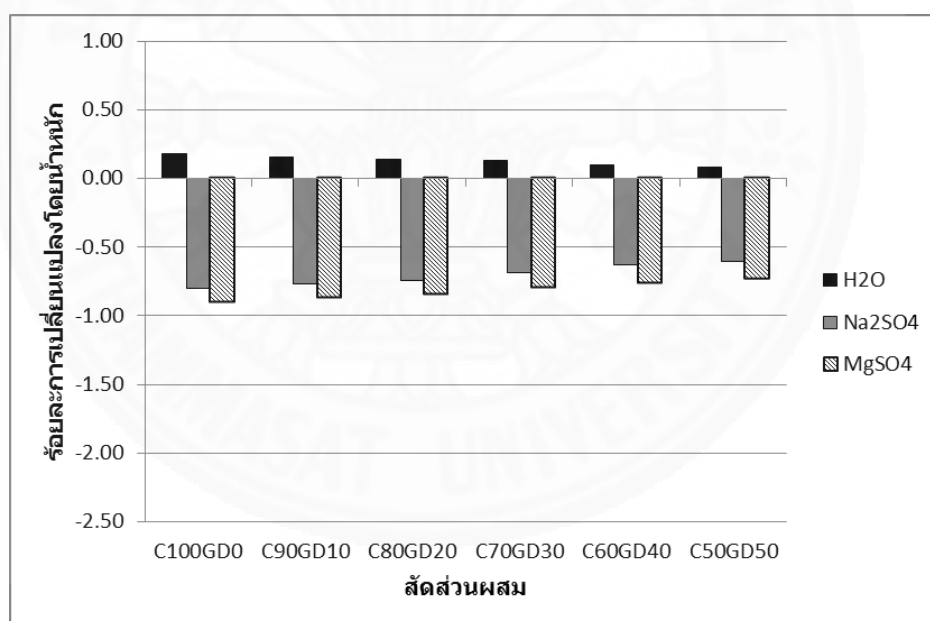
ภาพที่ 4.32 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C



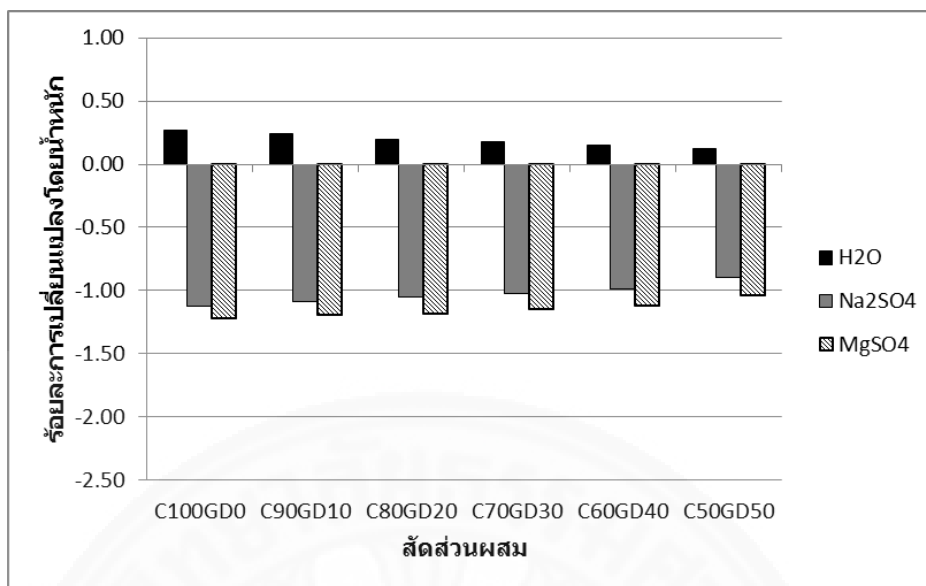
ภาพที่ 4.33 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C



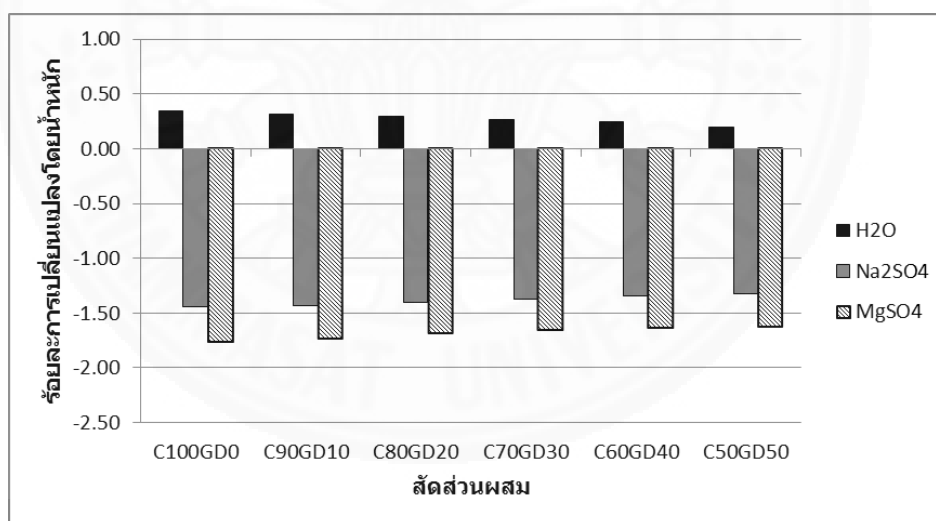
ภาพที่ 4.34 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C



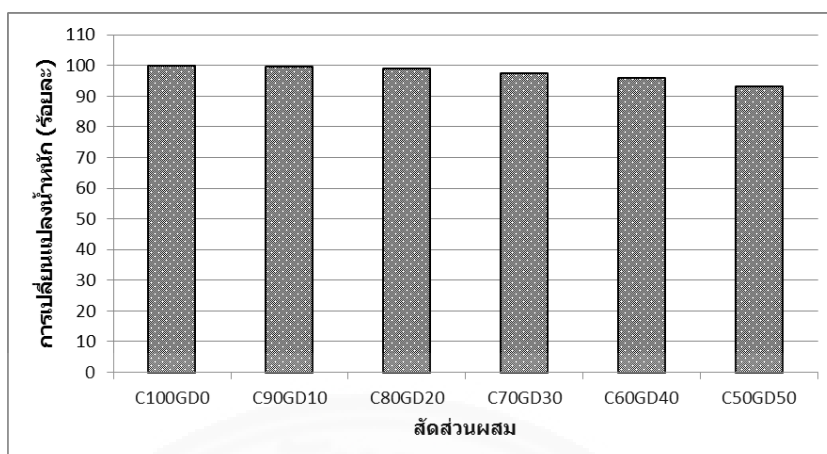
ภาพที่ 4.35 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟต เป็นเวลา 7 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C



ภาพที่ 4.36 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 14 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C



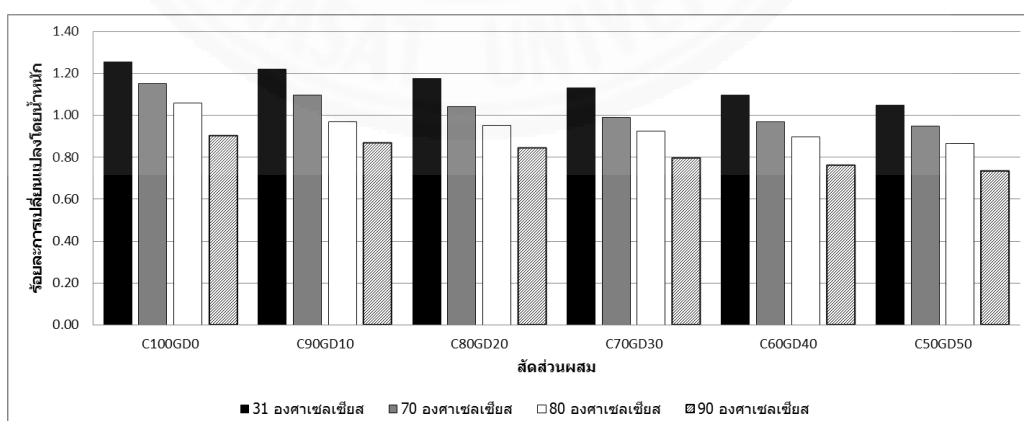
ภาพที่ 4.37 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 90 °C



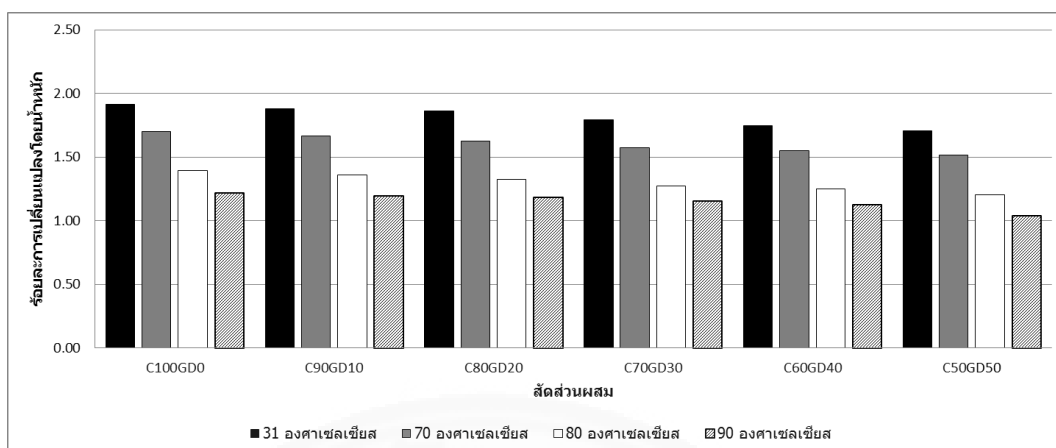
ภาพที่ 4.38 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน

4.5.2 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

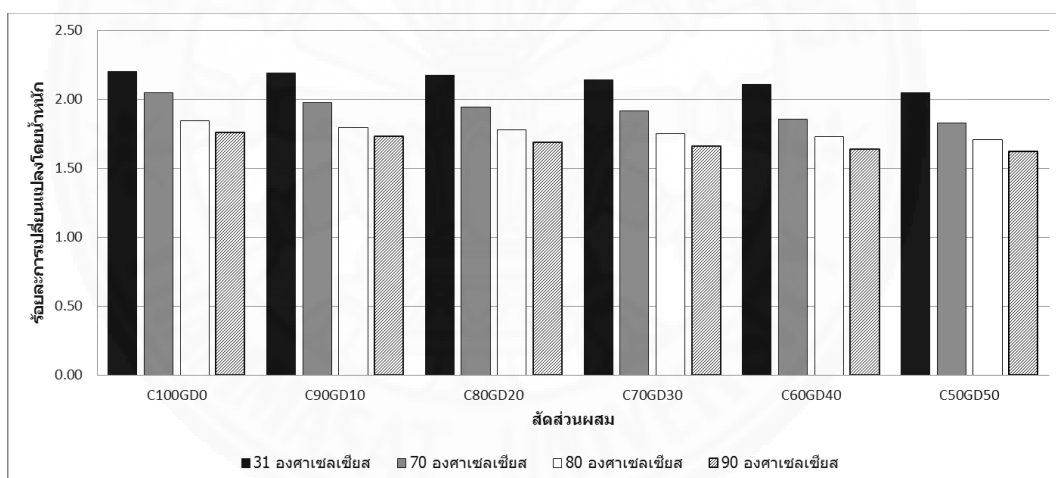
เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการแห้สารละลายซัลเฟตที่อุณหภูมิห้อง, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนผสม และทุกสารละลายในการแห้ มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ การบ่มอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยที่สุด รองลงมาเป็น 80, 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ ดังภาพที่ 4.39 ถึง 4.42 เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ทำให้ซีเมนต์เพสต์ทุกสัดส่วนผสมมีความแข็งแรงและความทึบน้ำมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิต่ำ จึงทำให้สารละลายซัลเฟตเข้าไปทำปฏิกิริยาได้น้อย (ธนวดี กิ่งรุ่งเพชร และคณะ, 2556)



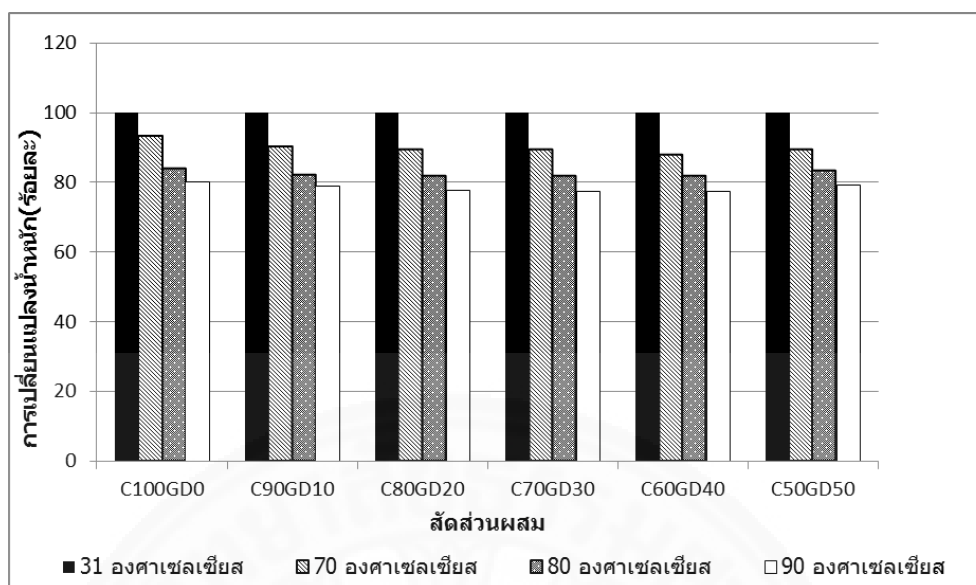
ภาพที่ 4.39 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว ของแต่ละสัดส่วนผสม แห้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 7 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วย อุณหภูมิห้อง (31°C), 70°C , 80°C และ 90°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพที่ 4.40 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม แห่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 14 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง ($31\text{ }^{\circ}\text{C}$), $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



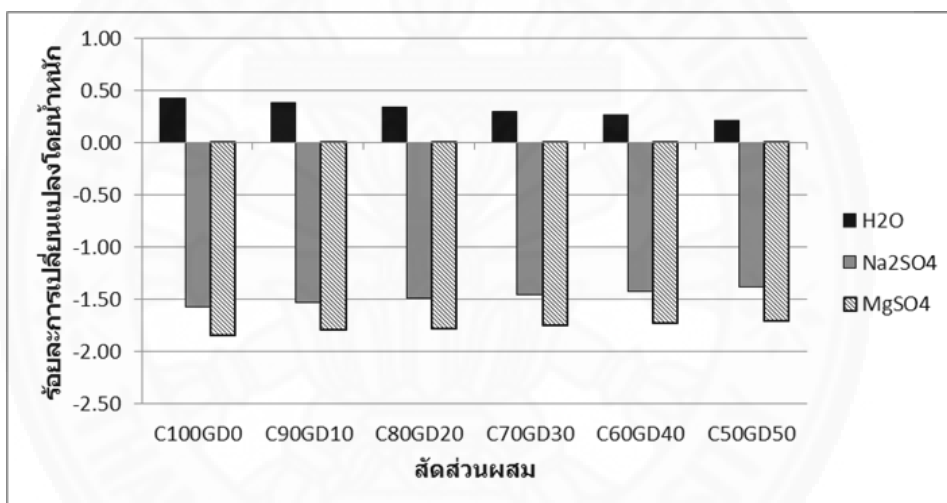
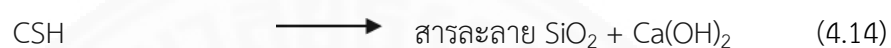
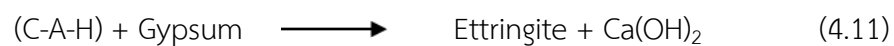
ภาพที่ 4.41 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม แห่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง ($31\text{ }^{\circ}\text{C}$), $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



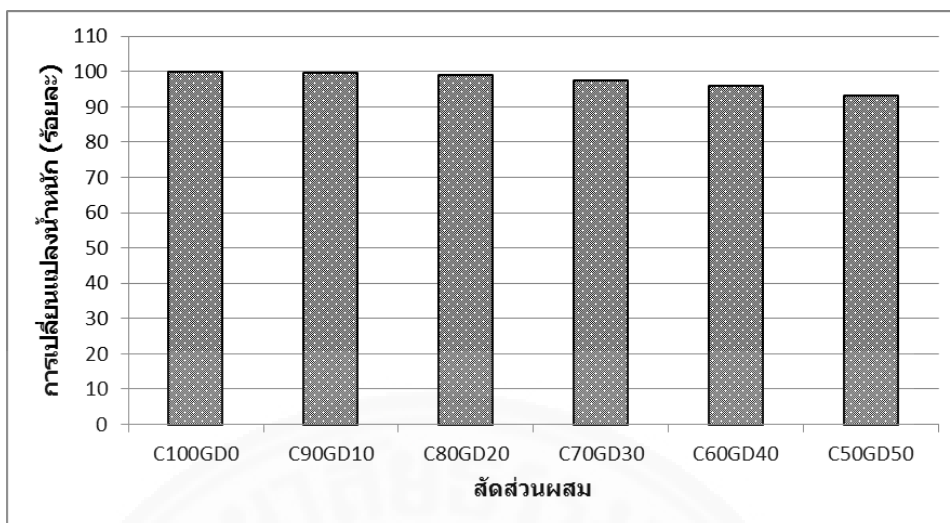
ภาพที่ 4.42 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม แห้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เป็นเวลา 28 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยอุณหภูมิห้อง (31°C), 70°C , 80°C และ 90°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง

4.5.3 ผลของสารละลายซัลเฟตที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

จากผลการทดสอบนำซีเมนต์เพสต์ทุกสัดส่วนผสมมาแช่น้ำ แห้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแห้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) พบว่า ซีเมนต์เพสต์ที่แห้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่แห้สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และซีเมนต์เพสต์ที่แช่น้ำ (H_2O) ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.43 และ 4.44 เนื่องจากการกีดร่อนของสารละลายซัลเฟตมีผลโดยตรงกับปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ซึ่งไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะทำปฏิกิริยากับยิปซัม (Gypsum) ที่เกิดจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ซึ่งทำให้เกิดการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักได้ เพราะฉะนั้นการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วจึงเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) ดังสมการที่ (4.10) ถึง (4.14) (รัชชัย คุณประคัลภ์ และอนันต์ นนท์ศิริ, 2555)



ภาพที่ 4.43 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห่สารละลายซัลเฟตเป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C



ภาพที่ 4.44 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แห้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 28 วัน บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน

4.6 การเปลี่ยนแปลงขนาด

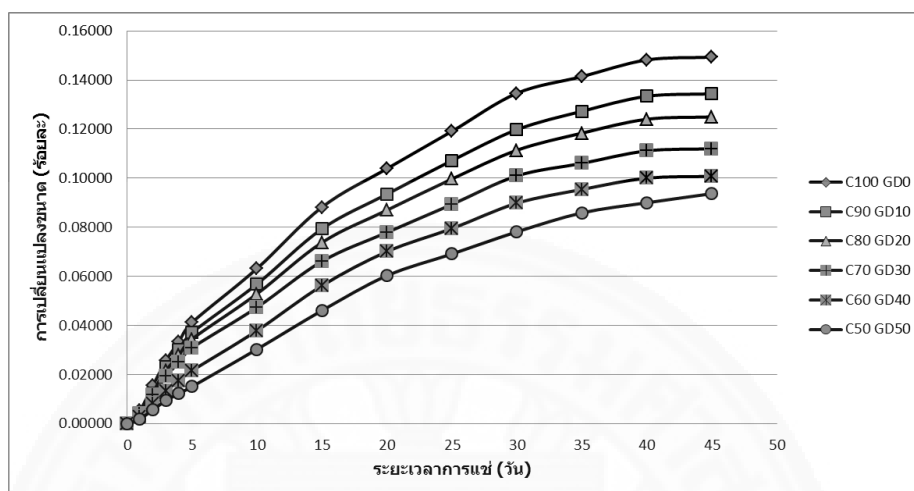
4.6.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสถานะต่างๆ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสถานะต่างๆแล้วแช่น้ำและสารละลายซัลเฟต โดยอิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของแต่ละสัดส่วนผสม มีรายละเอียด ขอบเขตของการทดสอบดังต่อไปนี้

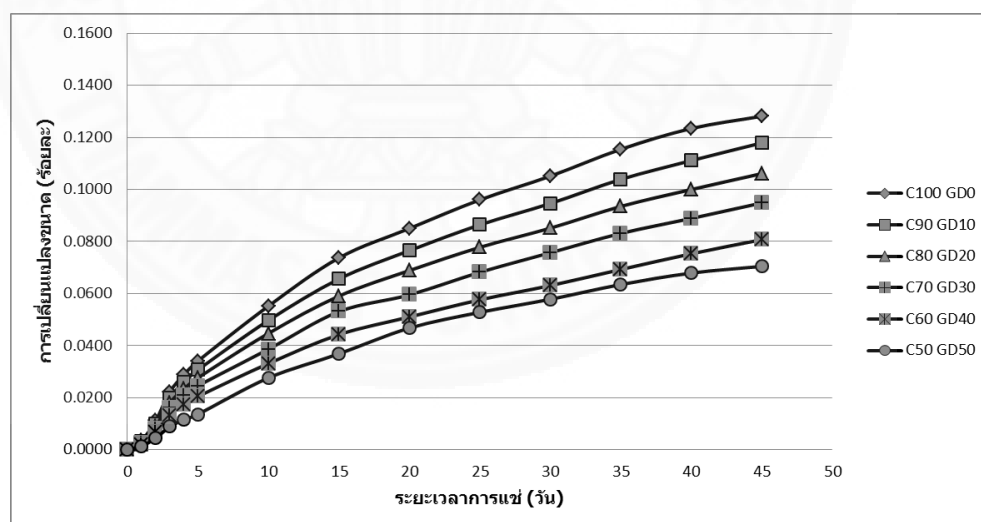
- (1) อัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 6 สูตร คือ C100GD0, C90GD10, C80GD20, C70GD30, C60GD40 และ C50GD50
- (2) อุณหภูมิที่ใช้บ่มในเตาอบไฟฟ้าคือ การบ่มด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส, 80 องศาเซลเซียสและ 90 องศาเซลเซียส

จากผลการทดสอบพบว่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกันโดยสัดส่วนผสมของ C100GD0 มีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดมากที่สุดทุกสถานะการบ่มทั้งในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตและน้ำ ร่องลงมาเป็น C90GD10, C80GD20, C70GD30, C60GD40 และ C50GD50 ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะ

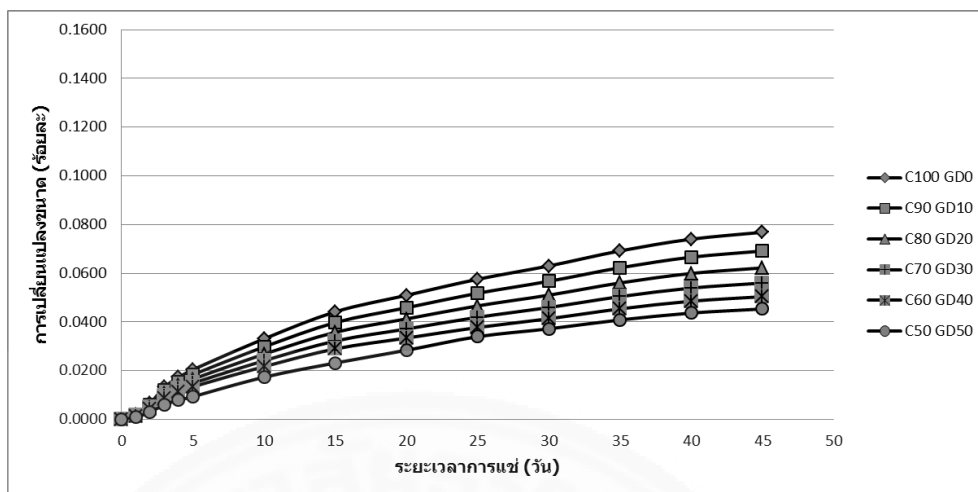
ปริมาณ C_3A ในซีเมนต์เฟสตัวอื่นที่ไม่ถูกแทนที่ปูนวิเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว มีค่ามากกว่าของสัดส่วนอื่นๆ ที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว จึงทำให้เกิดปริมาณ Ettingite มากกว่า ดังภาพที่ 4.45 ถึง 4.48



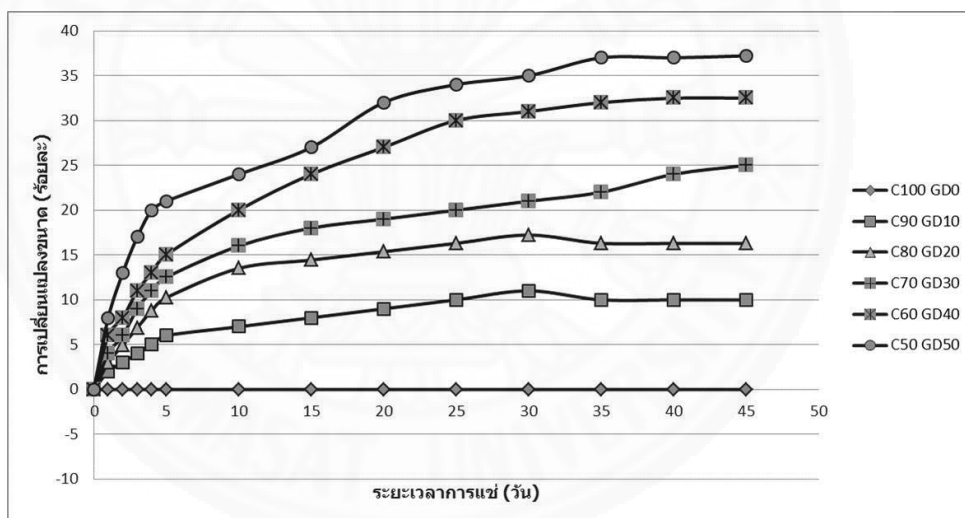
ภาพที่ 4.45 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เฟสตัวผสมฝุ่นแก้ว แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง ($31\text{ }^{\circ}C$)



ภาพที่ 4.46 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เฟสตัวผสมฝุ่นแก้ว แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) บ่มที่อุณหภูมิห้อง ($31\text{ }^{\circ}C$)



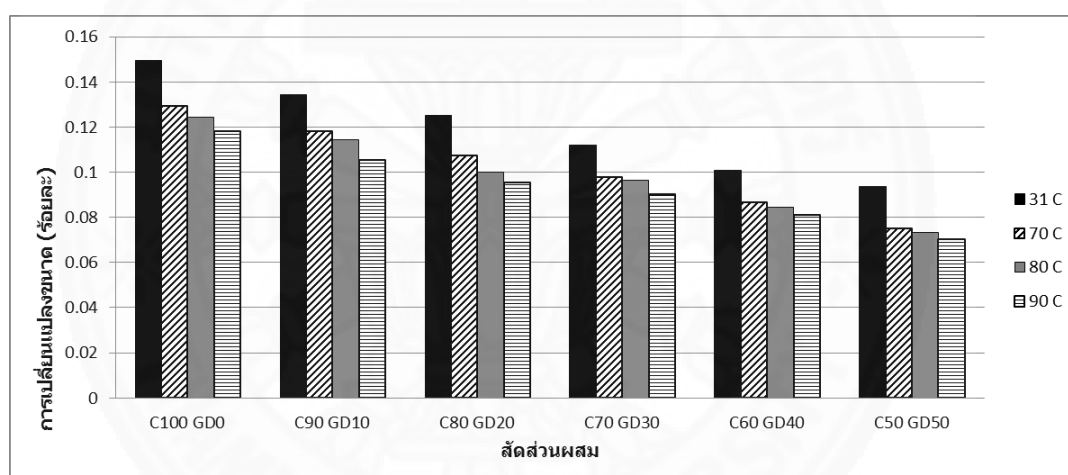
ภาพที่ 4.47 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแช่
น้ำ (H₂O) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C)



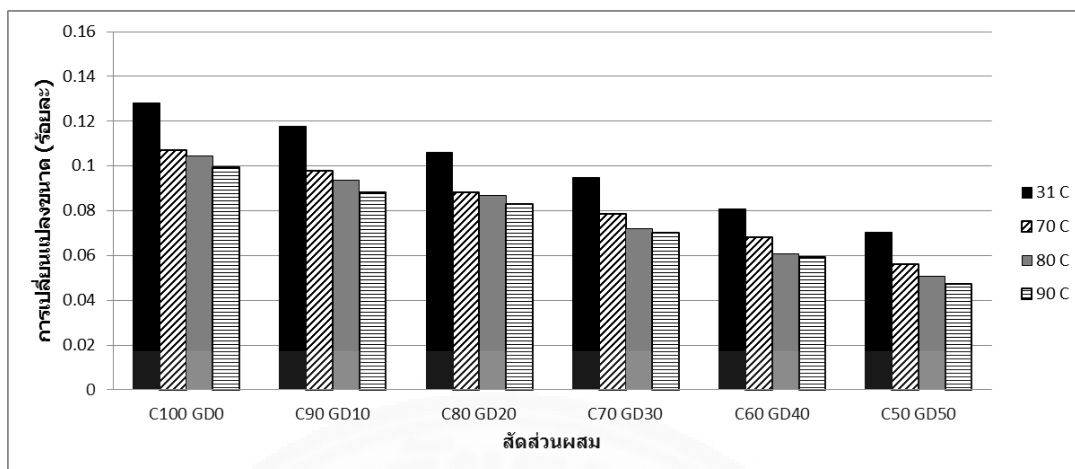
ภาพที่ 4.48 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแช่
สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ล้วน

4.6.2 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสถานะต่างๆ

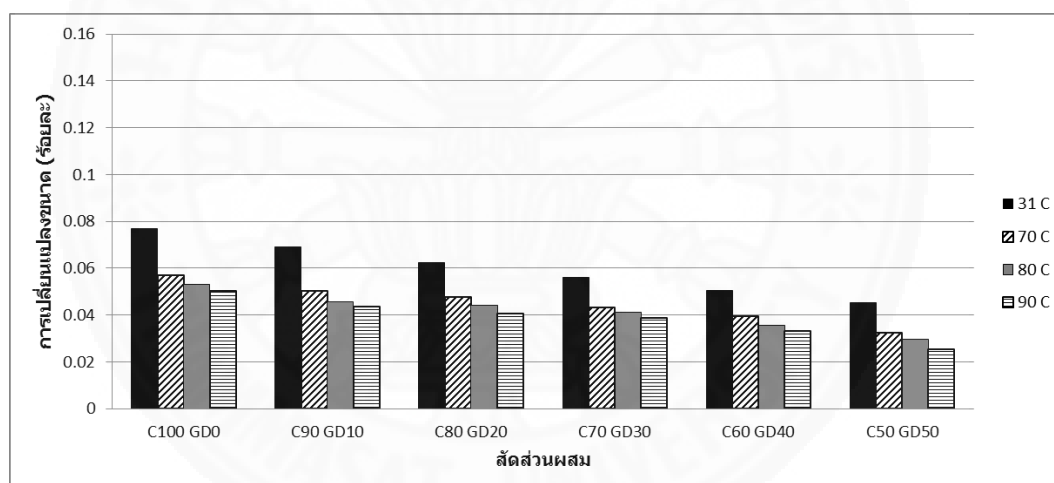
การศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่ผ่านการบ่มในสถานะต่างๆ แล้วแช่น้ำและสารละลายซัลเฟต โดยการบ่มที่อุณหภูมิต่างกัน คือบ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C) และบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C , 80°C และ 90°C ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.49 ถึง 4.52 พบว่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่บ่มอุณหภูมิห้อง (31°C) มีปริมาณร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดมากที่สุดตรงลงมาเป็นซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่บ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70°C , 80°C และ 90°C ตามลำดับ เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็นการเร่งปฏิกิริยา ไฮเดรชัน (Hydration) ทำให้ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมีความแข็งแรง และความทึบน้ำมากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิต่ำ



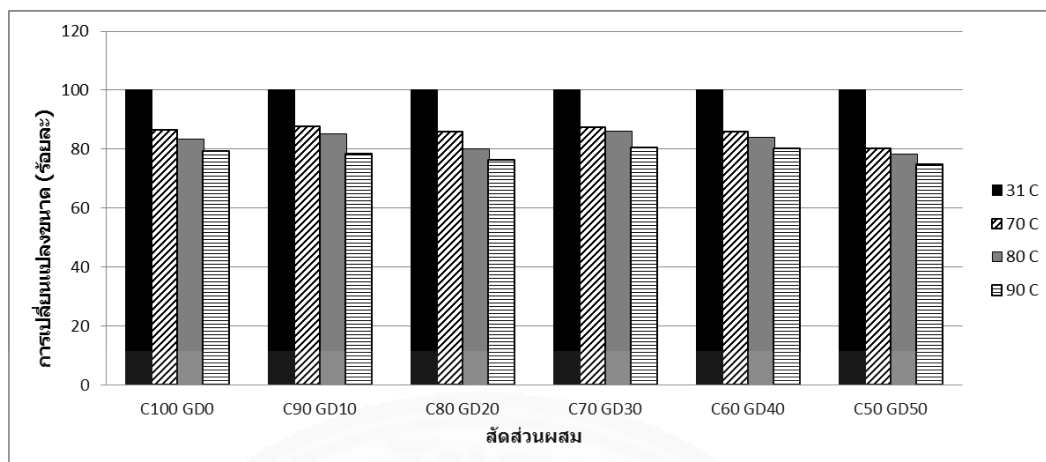
ภาพที่ 4.49 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C), 70°C , 80°C และ 90°C



ภาพที่ 4.50 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแฉะ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง ($31\text{ }^{\circ}\text{C}$), $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.51 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแฉะ น้ำ (H_2O) บ่มที่อุณหภูมิห้อง ($31\text{ }^{\circ}\text{C}$), $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 4.52 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วแชนสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) บ่มที่อุณหภูมิห้อง ($31\text{ }^{\circ}\text{C}$), $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิห้อง

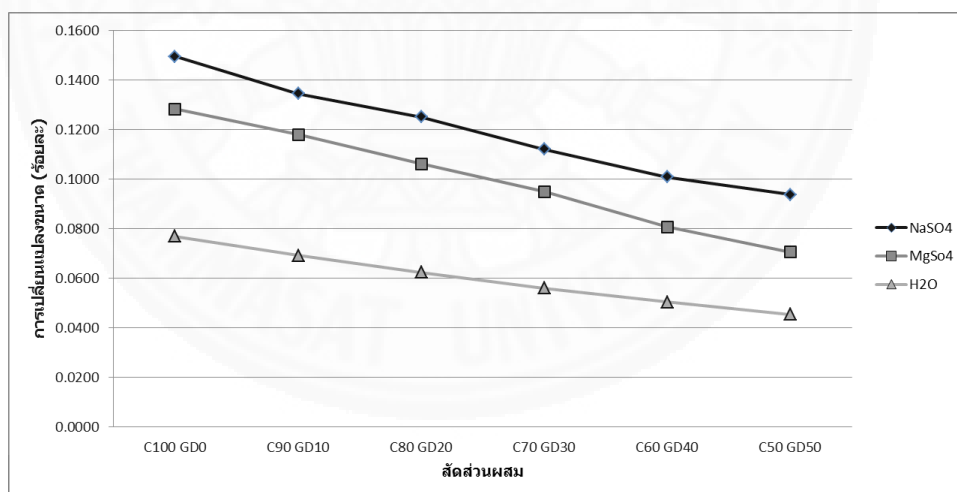
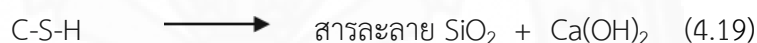
4.6.3 ผลของการแช่สารละลายซัลเฟตที่มีต่อปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้ว

จากการทดสอบหาปริมาณการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วระหว่างการแช่น้ำ สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) พบว่าตัวอย่างที่แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) มีร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดมากที่สุด รองลงมาเป็นแช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแช่น้ำ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.53 และ 4.54

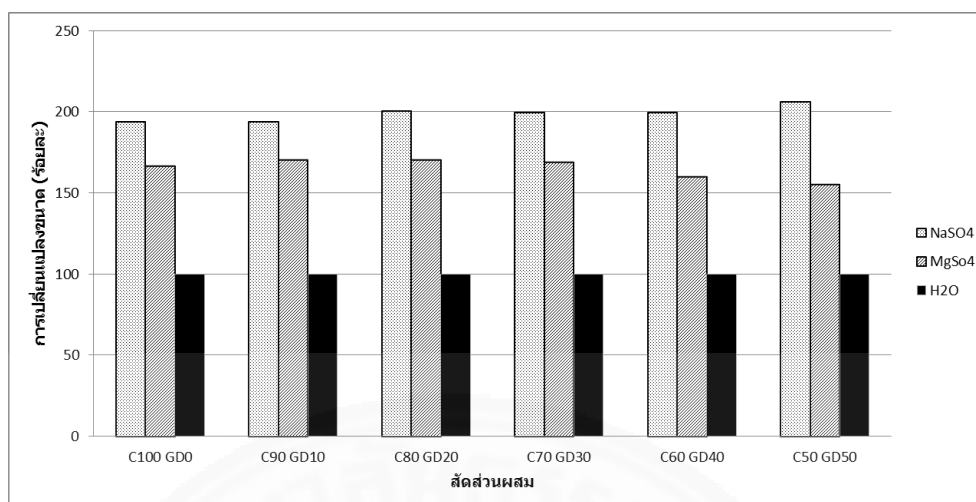
เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ก็จะทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) ซึ่งเมื่อยิปซัม (Gypsum) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการขยายตัวเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วเกิดความเสียหายได้

ในส่วนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จะทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) และเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) ในขณะเดียวกัน แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) จะทำปฏิกิริยากับสารละลาย SiO_2 จะได้ผลิตภัณฑ์คือแมกนีเซียมซิลิเกตไฮดรต (MSH) ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ดังนั้นแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จึงเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดความเสียหายได้ (นพคุณ ผลโพธิ์, 2554) ดังที่สมการ (4.15) ถึง (4.19)

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เฟสผสมฝุ่นแก้วที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) มีค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดมากกว่าเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เมื่อเปรียบเทียบที่อายุการแช่เดียวกันเนื่องจากการเกิดเอทริงไกต์ (Ettringite) และยับยั้งกลไกการทำละลายของสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีมากกว่า จึงเป็นผลให้เกิดการขยายตัวได้มากกว่า



ภาพที่ 4.53 กราฟแสดงแนวโน้มของร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เฟสผสมฝุ่นแก้วแช่สารละลาย MgSO_4 , Na_2SO_4 และ H_2O บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C)



ภาพที่ 4.54 กราฟร้อยละการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงขนาดของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแช่สารละลาย MgSO_4 , Na_2SO_4 และ H_2O บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C) เมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วแช่น้ำ (H_2O)

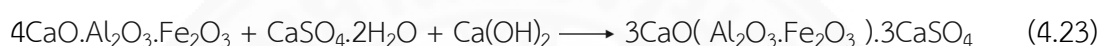
4.7 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA)

จากการนำตัวอย่างที่ผ่านการทดสอบกำลังอัดไปทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เหลืออยู่ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วด้วยเทคนิค Thermal Gravimetric Analysis (TGA) โดยทำการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 460 ถึง 550 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มลดอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีในอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 4.55 ถึง 4.66 ทำให้ได้ผลการทดสอบดังต่อไปนี้

4.7.1 ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

เมื่อนำผลการทดสอบมาเปรียบเทียบหาปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้ว โดยการบ่มที่อุณหภูมิต่างกัน คือ บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31°C) และบ่มด้วยเตาอบความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C (อุณหภูมิการบ่มที่ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดสูงสุด) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มอุณหภูมิห้อง (31°C) มีปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยเตาอบความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มเป็นการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ของซีเมนต์เพสต์ ทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยาไฮ

เดรชัน (Hydration) จึงทำให้ปริมาณดังกล่าวคงเหลือน้อยลง (วิศว จักรไพศาล, 2539) ดังสมการที่ (4.20) ถึง (4.23)



ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วร้อยละ 0 แชน้ำ ที่ 28 วันที่บ่มด้วยอุณหภูมิที่ต่างกัน

อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม	ปริมาณคงเหลือของ Ca(OH)_2 ร้อยละโดยน้ำหนัก
อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส)	0.607
80 องศาเซลเซียส	0.448

4.7.2 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วที่มีต่อปริมาณแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2)

จากการทดสอบปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยเปรียบเทียบระหว่างซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วและซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 ที่การบ่มน้ำ 28 วัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) คงเหลือน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) ทำให้ได้ (Ca(OH)_2) เป็นผลิตภัณฑ์ ดังสมการที่ (4.24) และ (4.25) ทำให้ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดที่สูงขึ้นในระยะเวลาการแช่ที่ 28 วัน หรือระยะยาว สอดคล้องกับปริมาณ (Ca(OH)_2) ที่น้อยลงจะทำให้กำลังอัดมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ส่วนฝุ่นแก้วยังคงเป็นวัสดุเฉื่อย



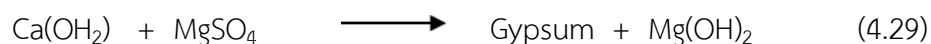


ตารางที่ 4.4 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้วร้อยละ 0 แชน้ำ ที่ 28 วัน ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 80 °C

สัดส่วนผสม	ปริมาณคงเหลือของ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ร้อยละโดยน้ำหนัก
C100GD0	0.448
C90GD10	0.535

4.7.3 ผลของการแช่สารละลายซัลเฟตที่มีต่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

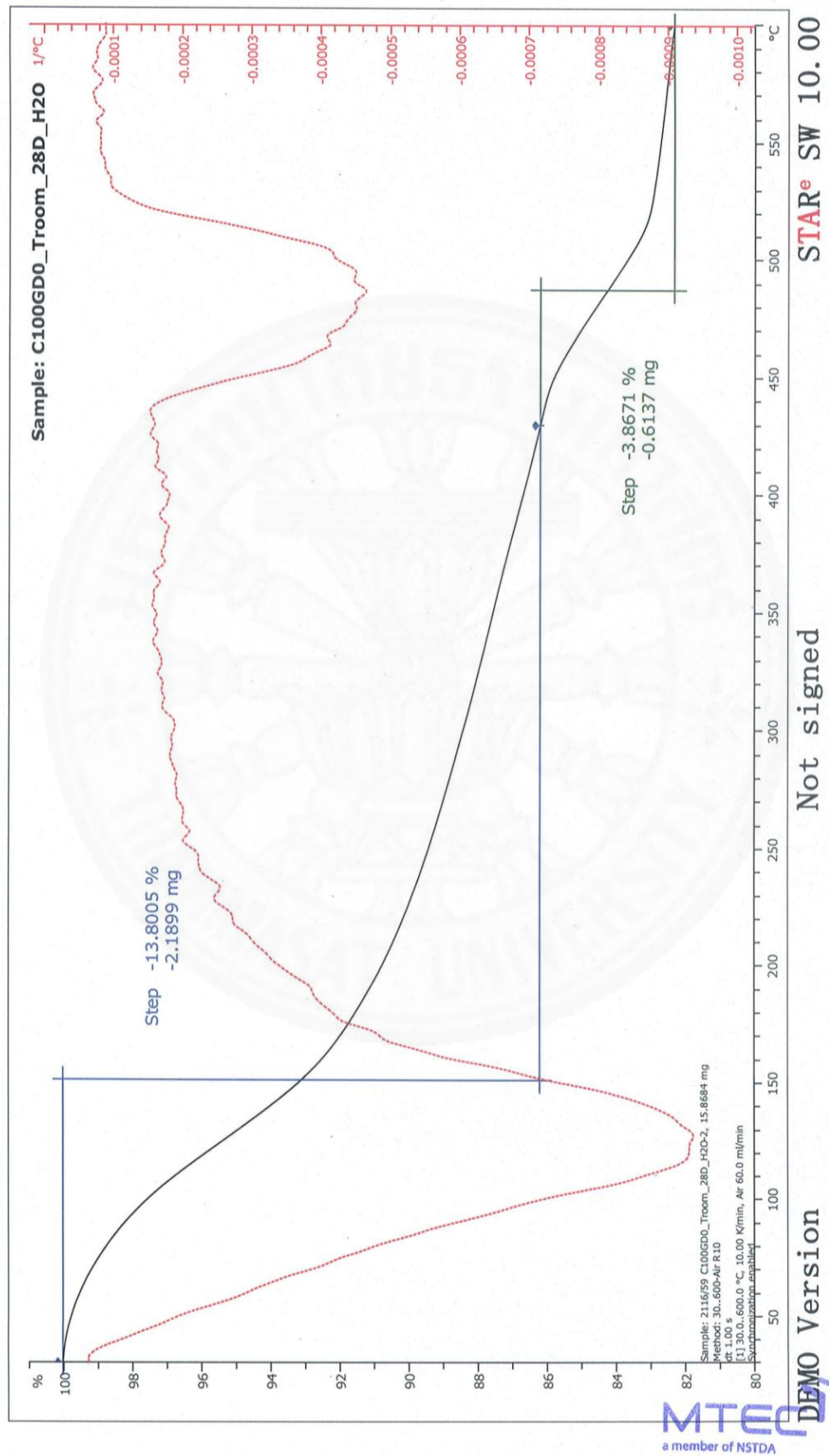
จากการทดสอบหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) คงเหลือระหว่างการแช่น้ำ สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) พบว่าตัวอย่างที่แช่น้ำมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เหลือร้อยละ 0.858 แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) เหลือร้อยละ 1.070 และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) เหลือร้อยละ 1.290 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่เหลือของการแช่สารละลายซัลเฟตจะมีค่าน้อยกว่าของการแช่น้ำ เป็นผลมาจากกระบวนการกัดกร่อนของสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ดังแสดงในตารางที่ (4.5)



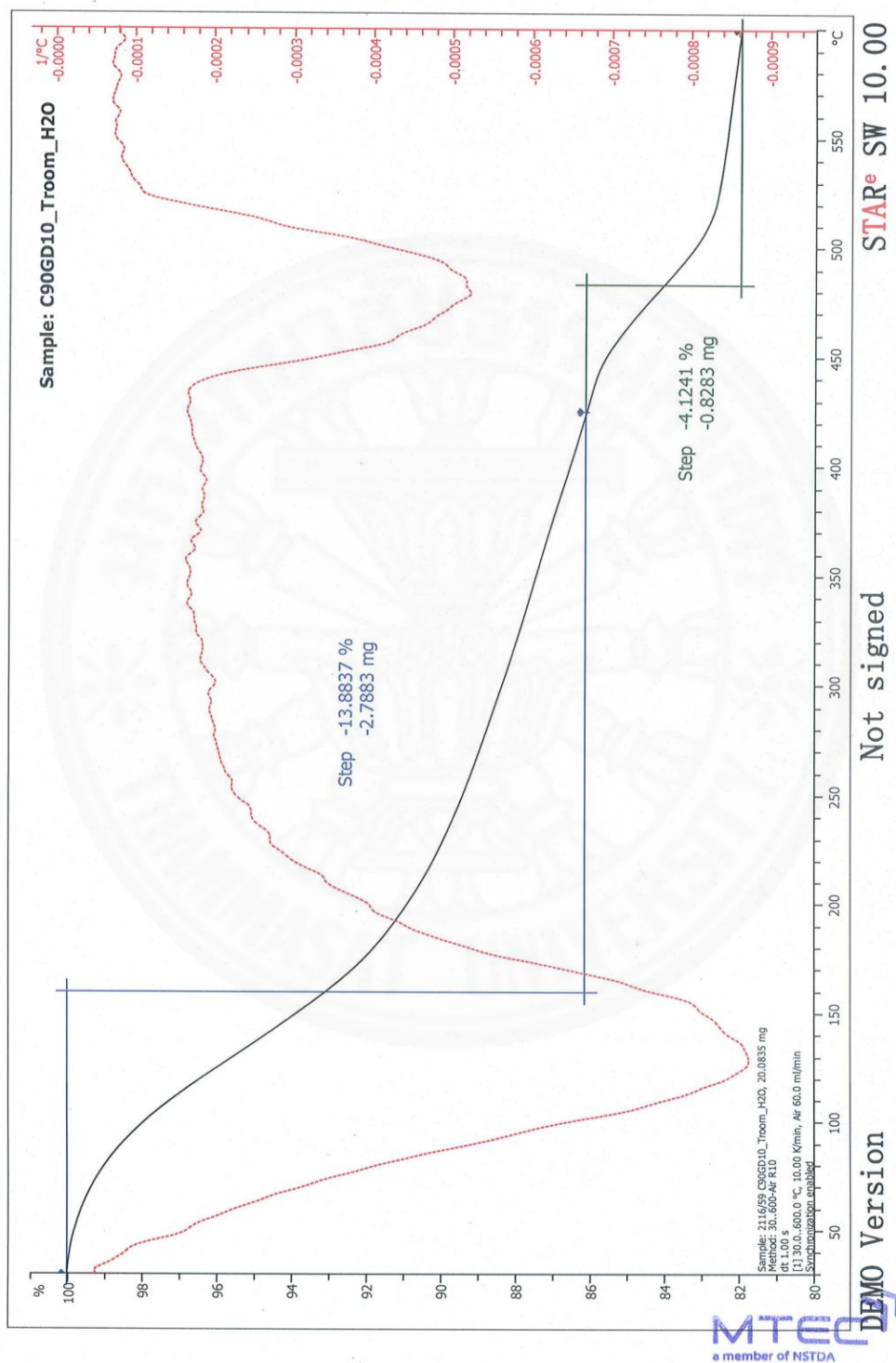
กล่าวคือเมื่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) มีอยู่มาก แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ก็จะทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) ซึ่งเมื่อยิปซัม (Gypsum) ทำปฏิกิริยากับไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) จะเกิดเอทริงไต์ (Ettringite) ทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการขยายตัวเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดความเสียหายได้และเมื่อแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จะทำให้เกิดยิปซัม (Gypsum) และเกิดการสลายตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) ซึ่งเป็นตัวให้กำลัง จึงเป็นสาเหตุทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดความเสียหายได้ (นพคุณ ผลโพธิ์, 2554) ดังที่สมการ (4.26) ถึง (4.30)

ตารางที่ 4.5 แสดงปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 80°C และแช่สารละลายแตกต่างกัน ที่ 28 วัน

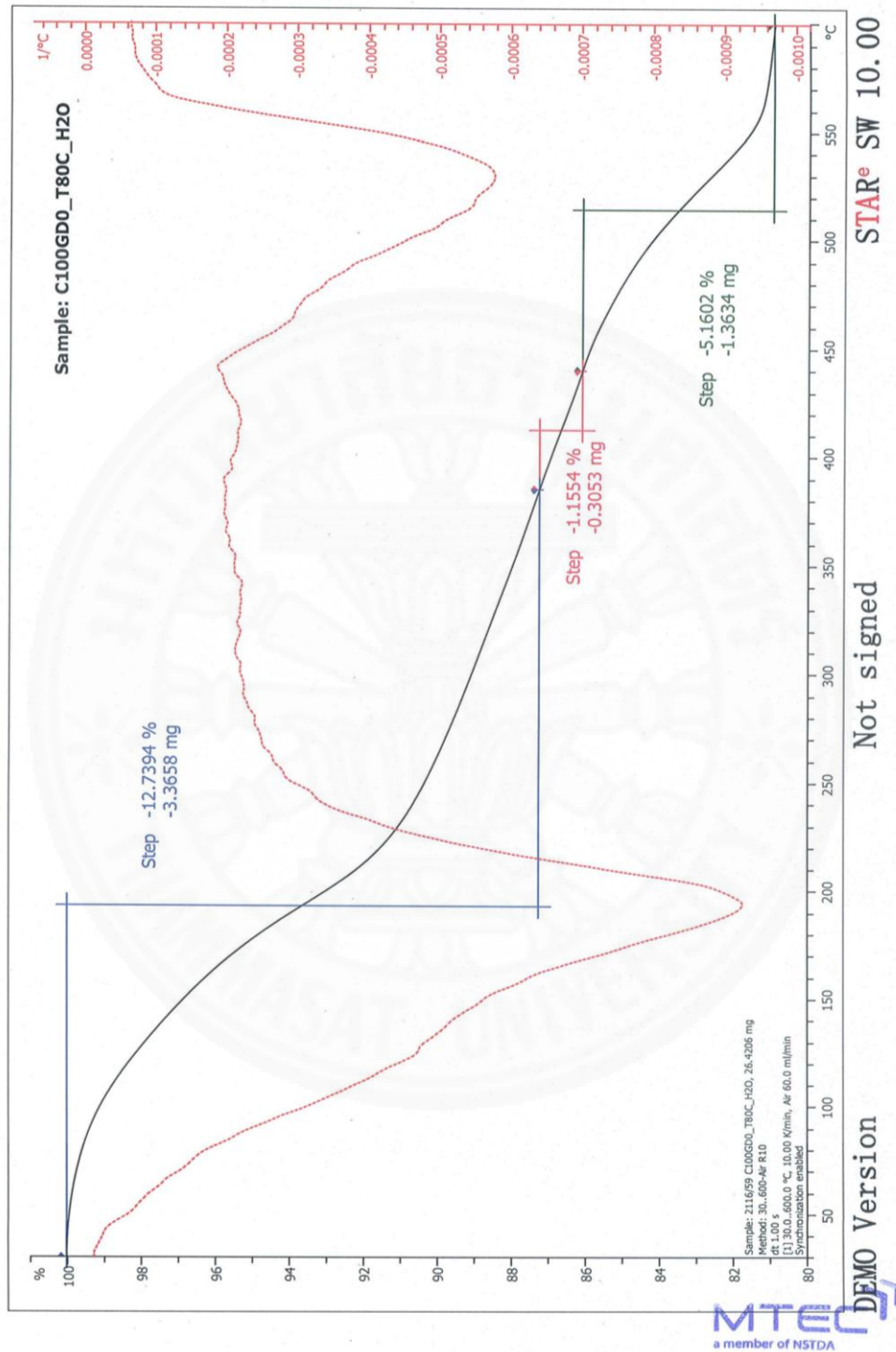
สารละลาย	ปริมาณคงเหลือของ Ca(OH)_2 ร้อยละโดยน้ำหนัก
H_2O	0.858
Na_2SO_4	1.070
MgSO_4	1.290



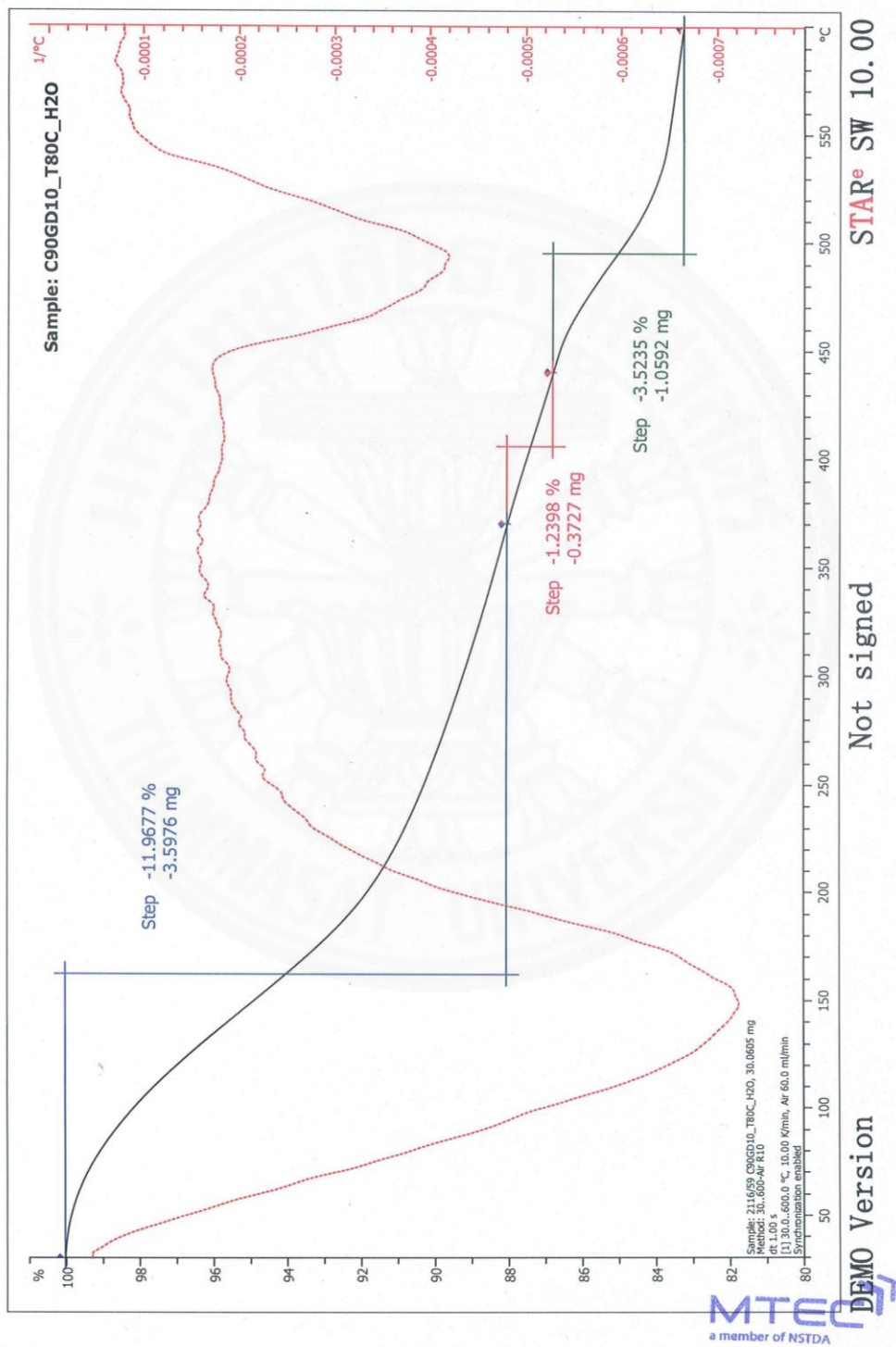
ภาพที่ 4.55 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 ปั่นที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ในน้ำ ที่ 28 วัน



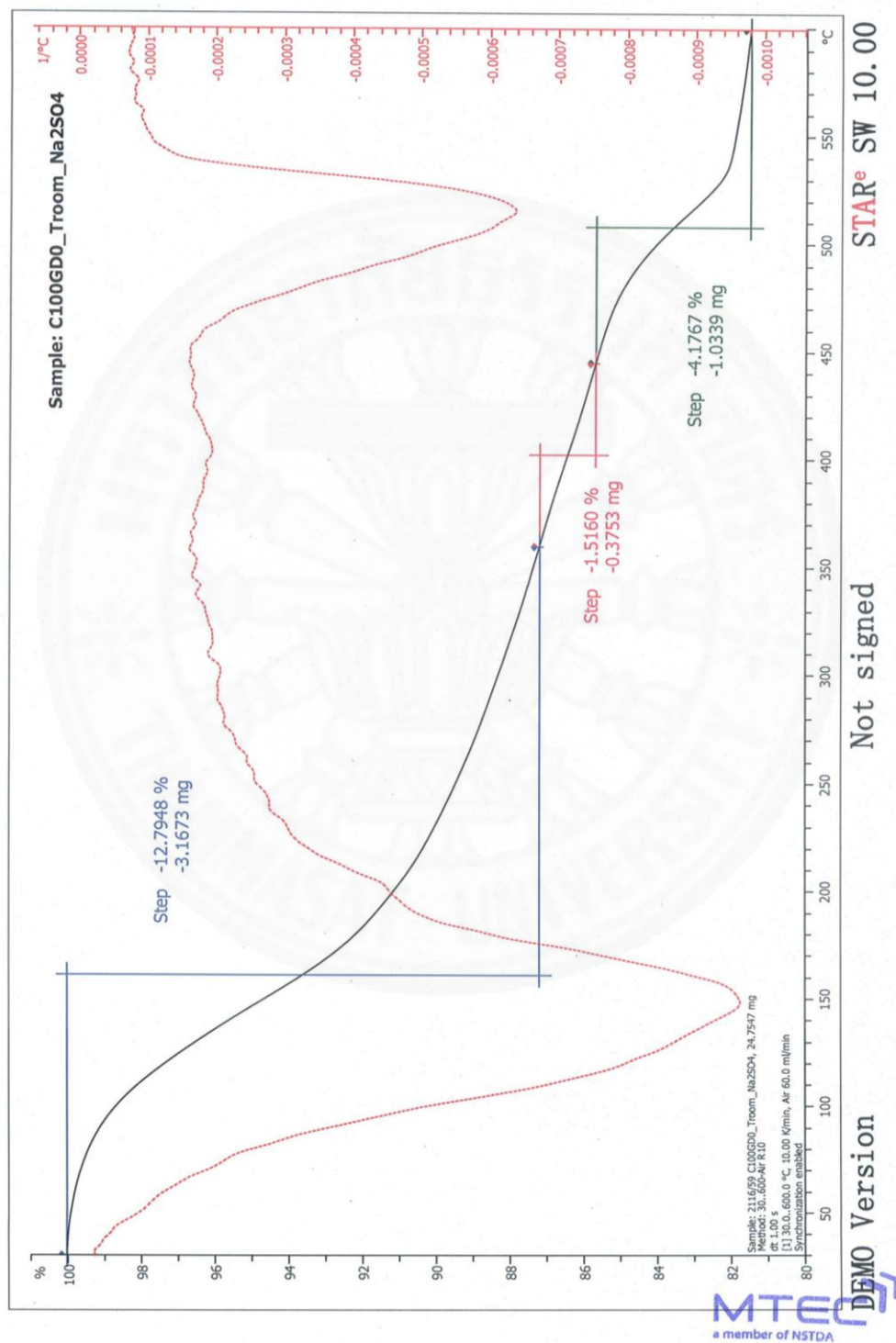
ภาพที่ 4.56 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 1 ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 ปมที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ในน้ำ ที่ 28 วัน



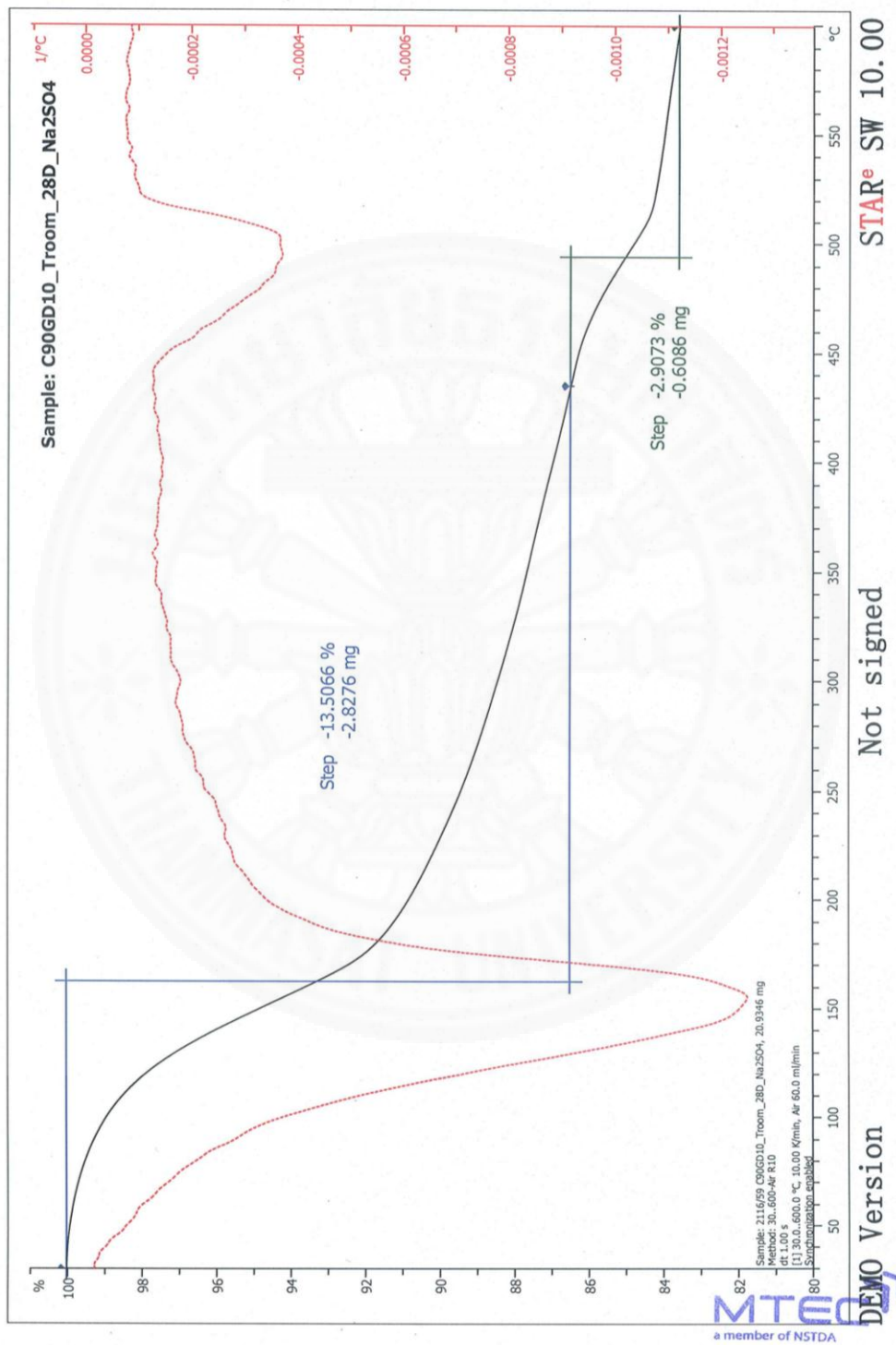
ภาพที่ 4.57 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 ปมที่อุณหภูมิ 80 °C และเส้นน้ำ ที่ 28



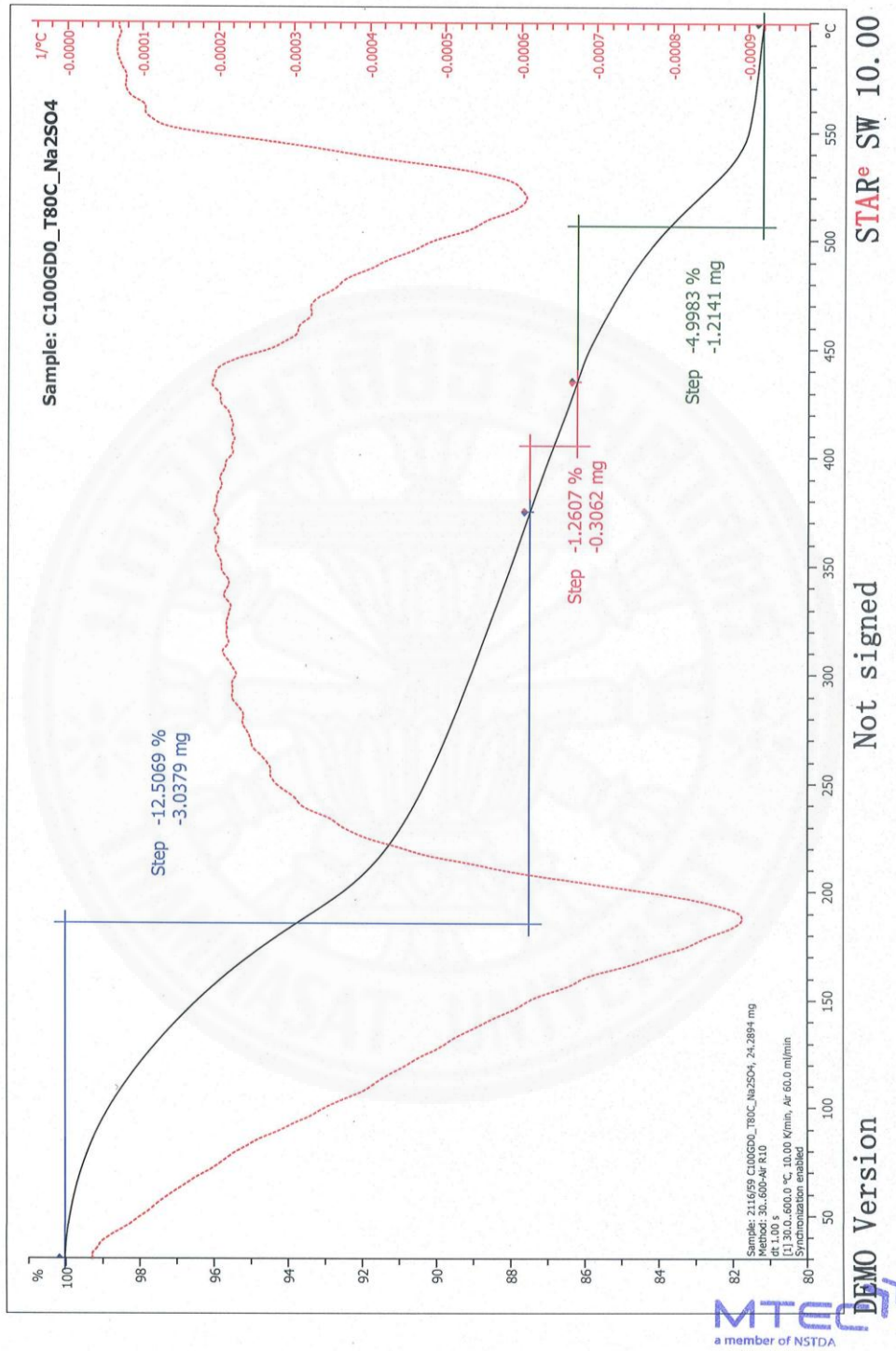
ภาพที่ 4.58 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 ปะการังที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่น้ำ ที่ 28 วัน



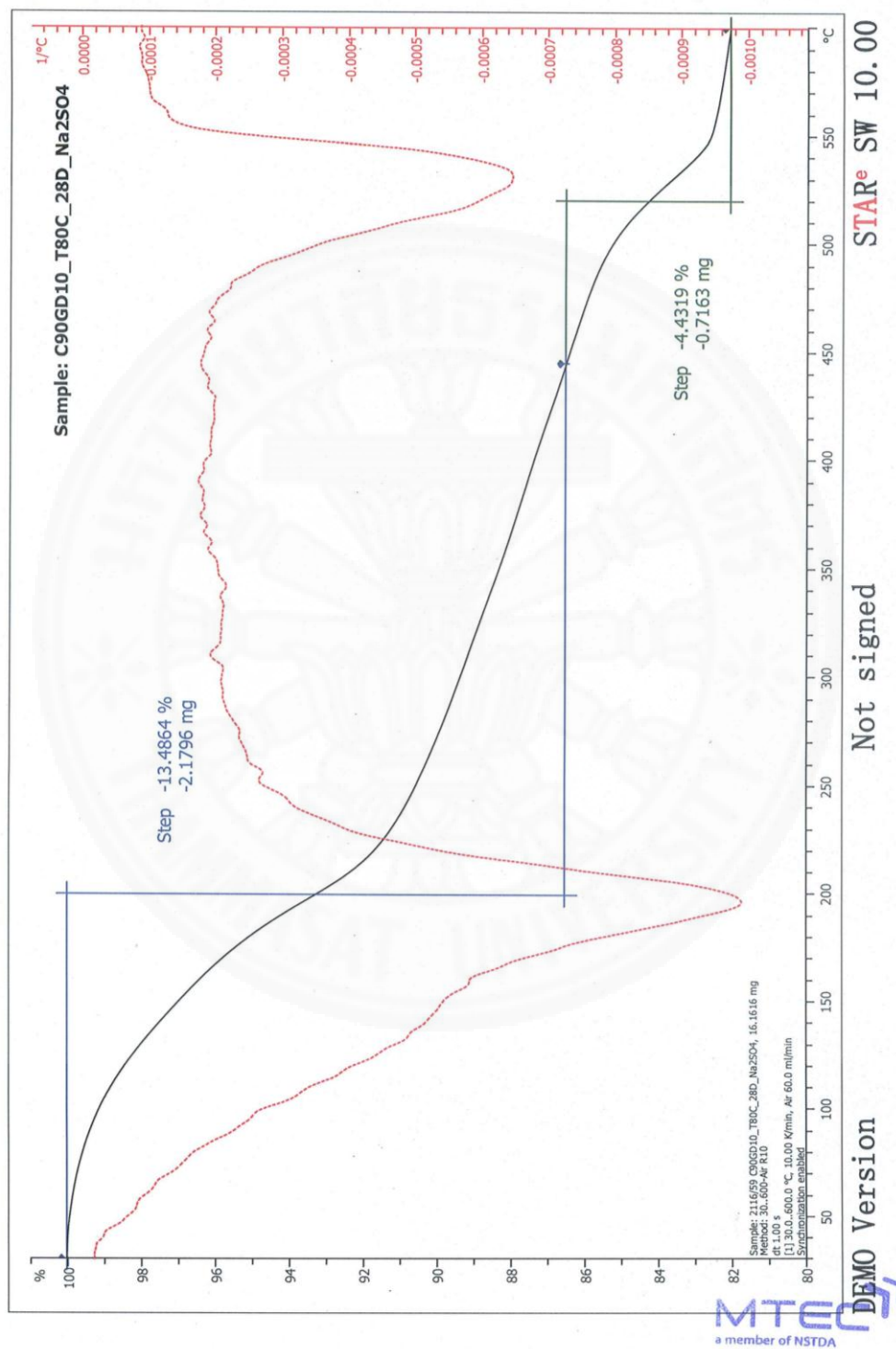
ภาพที่ 4.59 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์โพสที่ทำการแทนที่ด้วยปูนแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ Na₂SO₄ ที่ 28 วัน



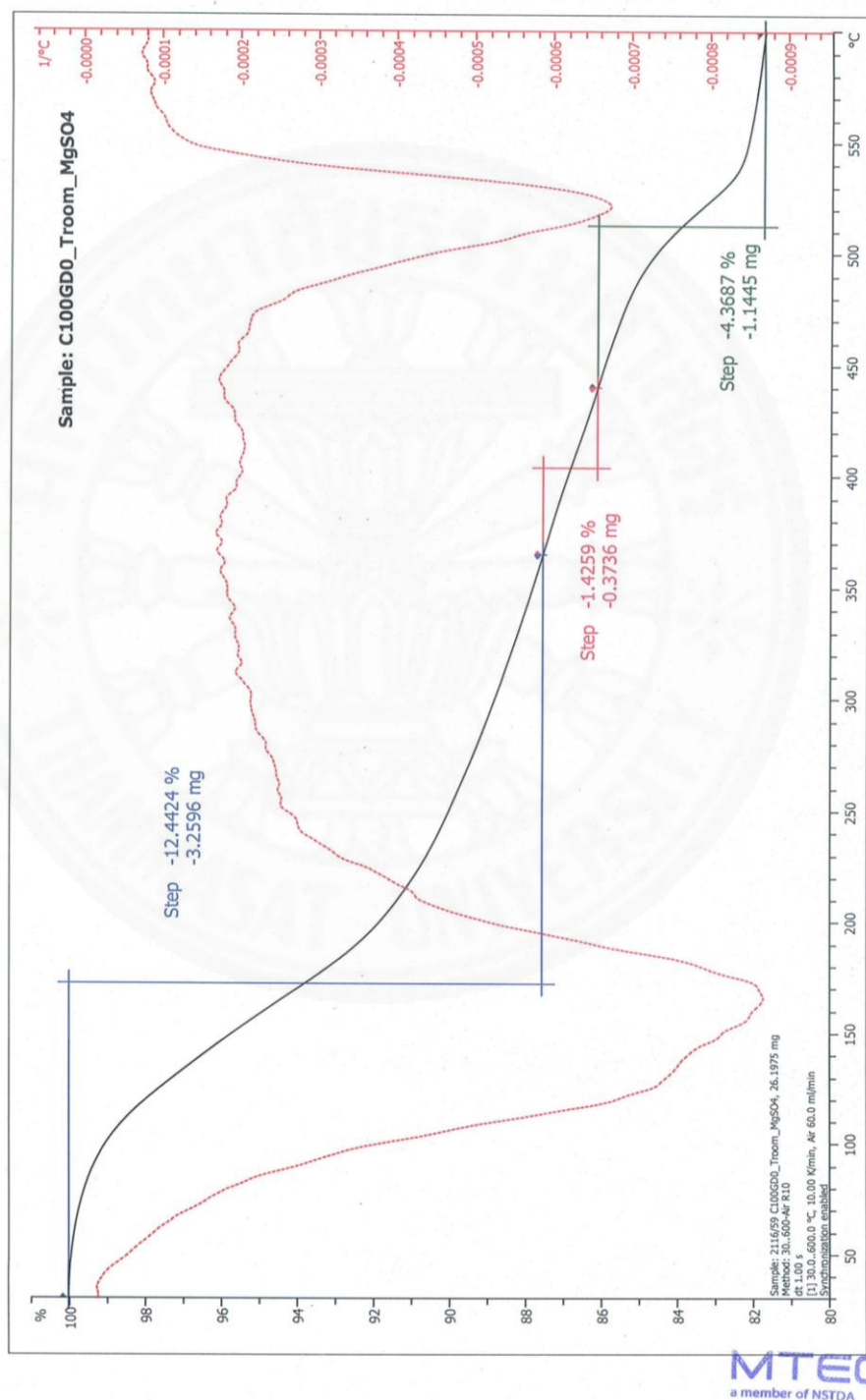
ภาพที่ 4.60 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ Na₂SO₄ ที่ 28 วัน



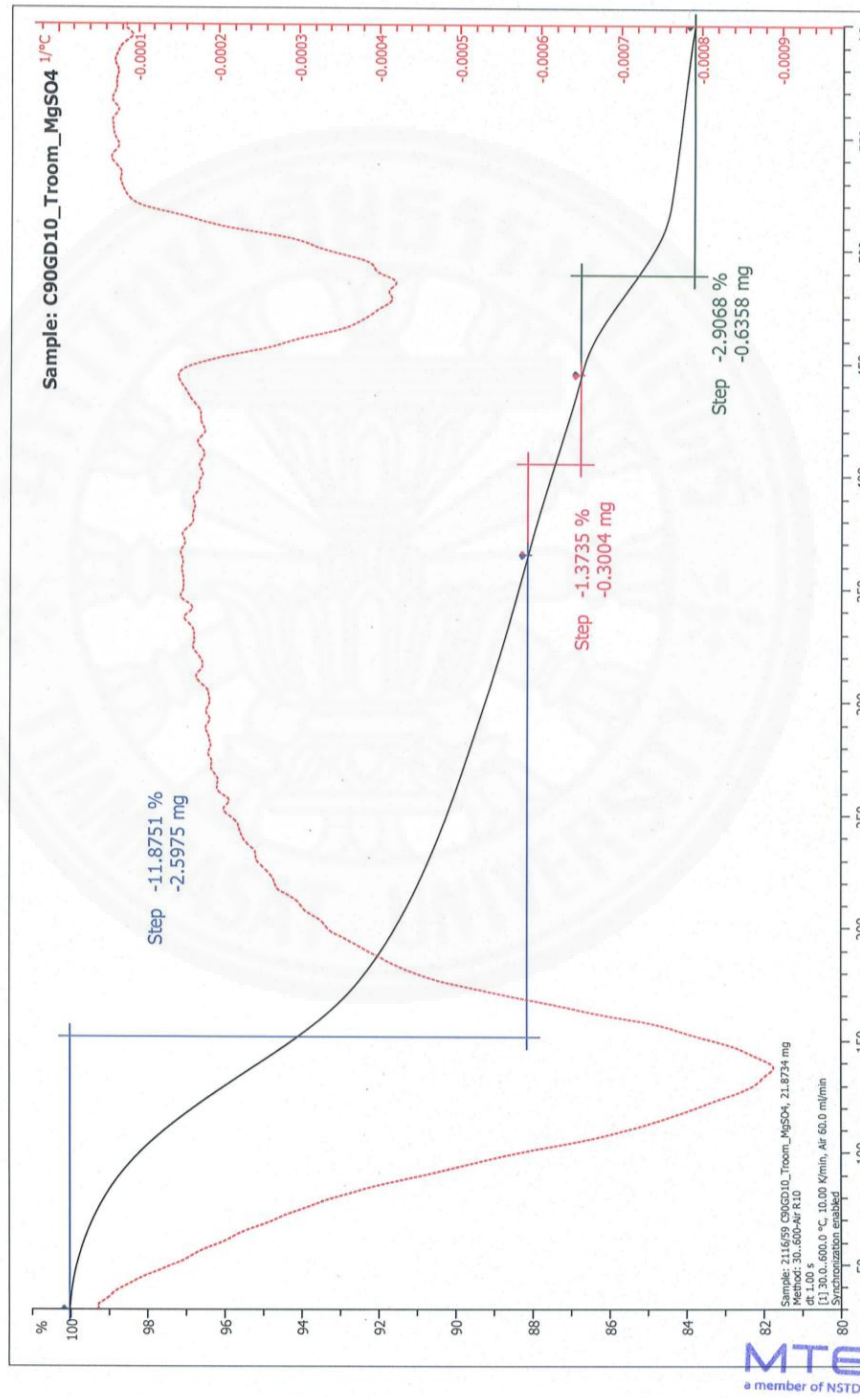
ภาพที่ 4.61 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 1 ที่มีการแทนที่ด้วยแผ่นแก้วร้อยละ 0 ปั่นที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ Na₂SO₄ ที่ 28 วัน



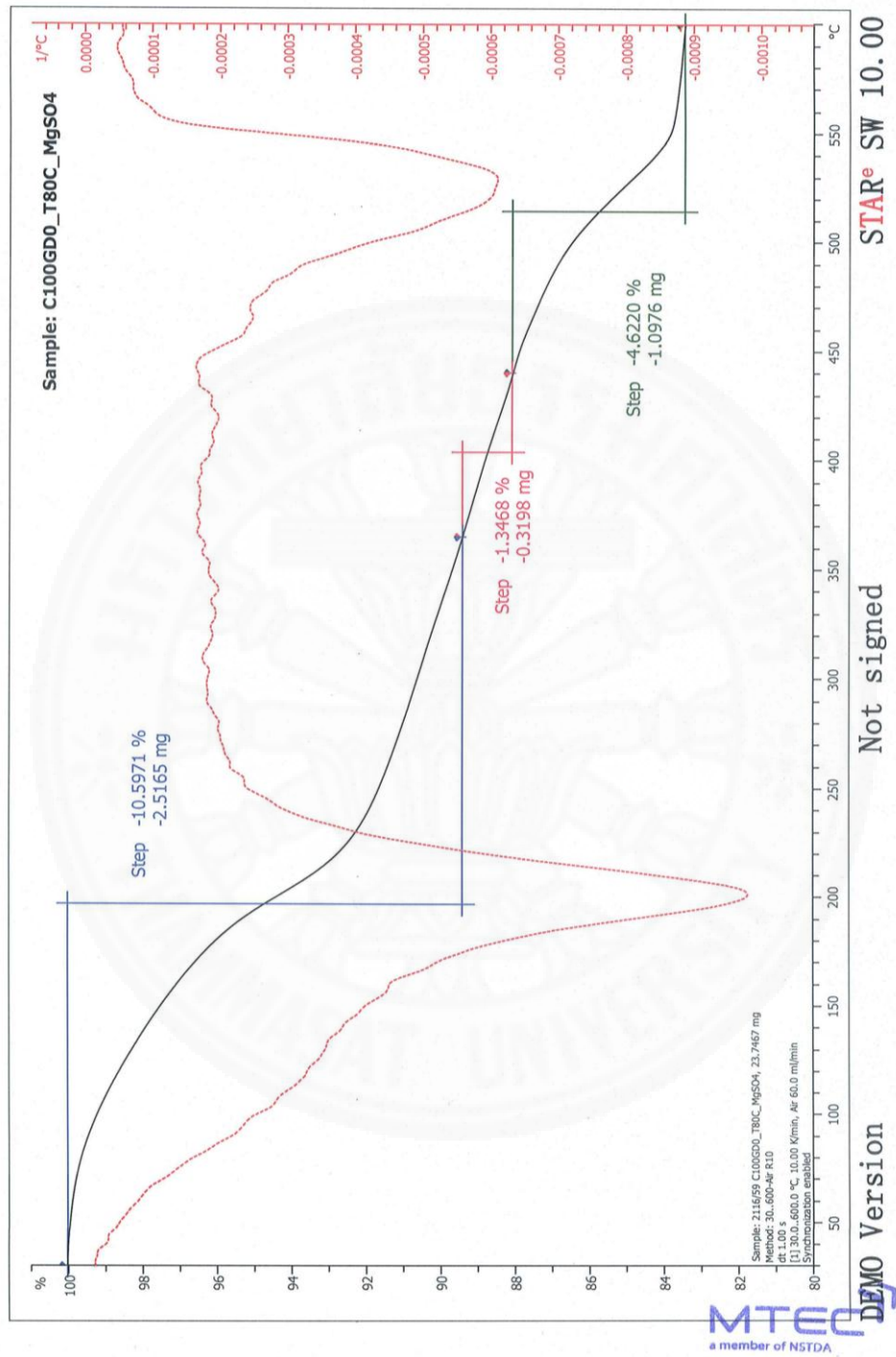
ภาพที่ 4.62 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์โพสตัดที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ Na₂SO₄ ที่ 28 วัน



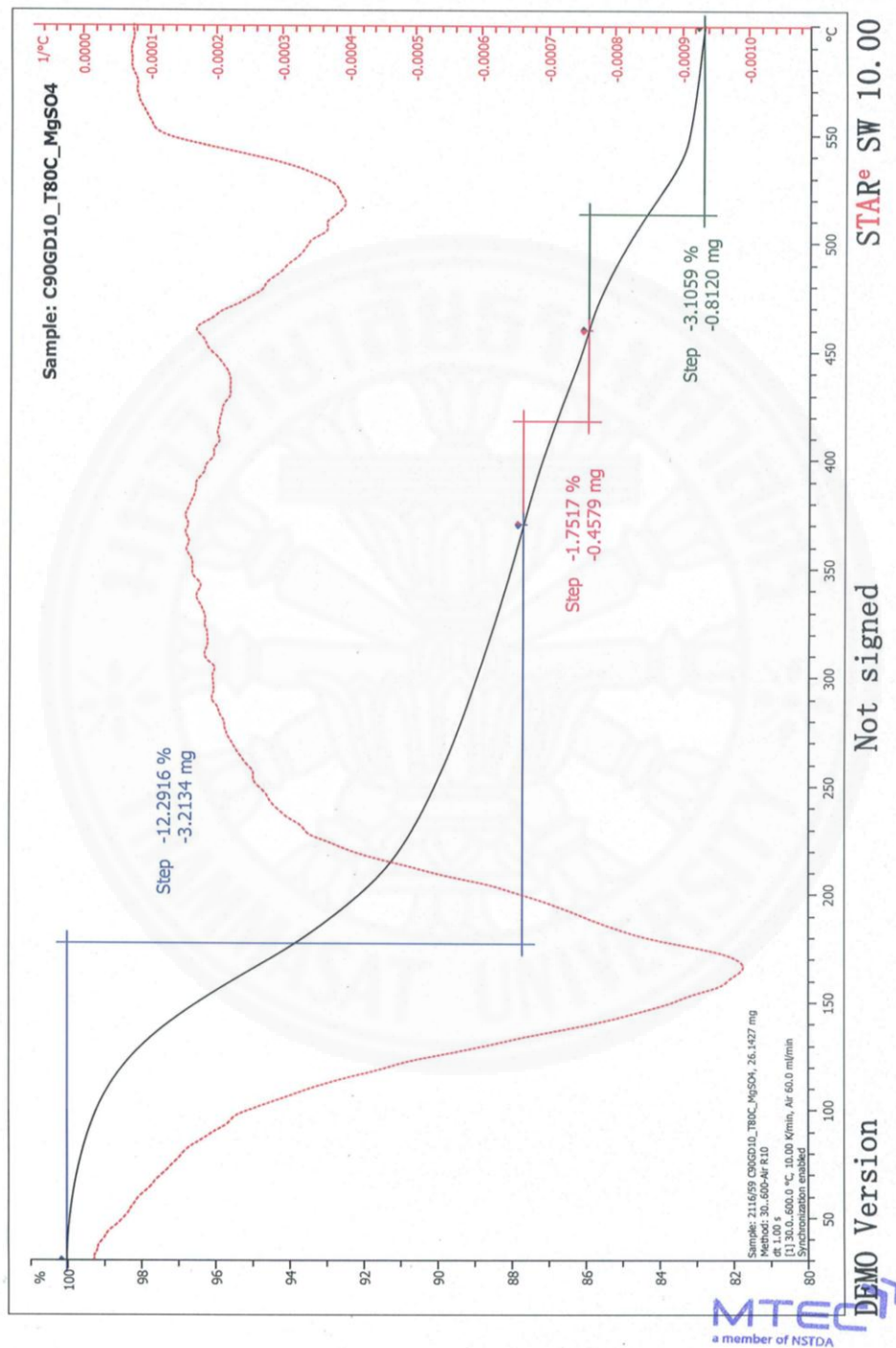
ภาพที่ 4.63 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 0 ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 ปั่นที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ MgSO_4 ที่ 28 วัน



ภาพที่ 4.64 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 10 ปั่นที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ MgSO_4 ที่ 28 วัน



ภาพที่ 4.65 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 1 มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ MgSO_4 ที่ 28 วัน

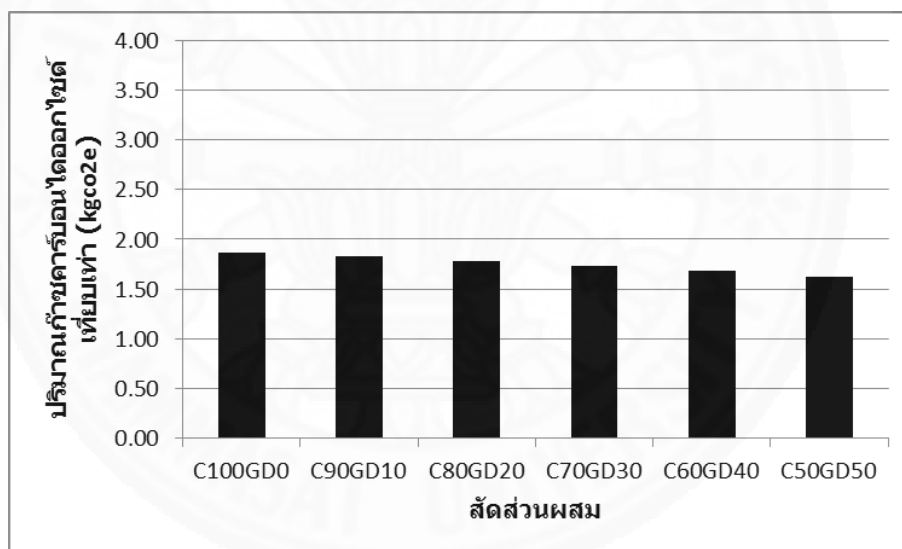


ภาพที่ 4.66 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 1 ที่มีการแทนที่ด้วยแกวร้อยละ 10 ปมที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ MgSO₄ ที่ 28 วัน

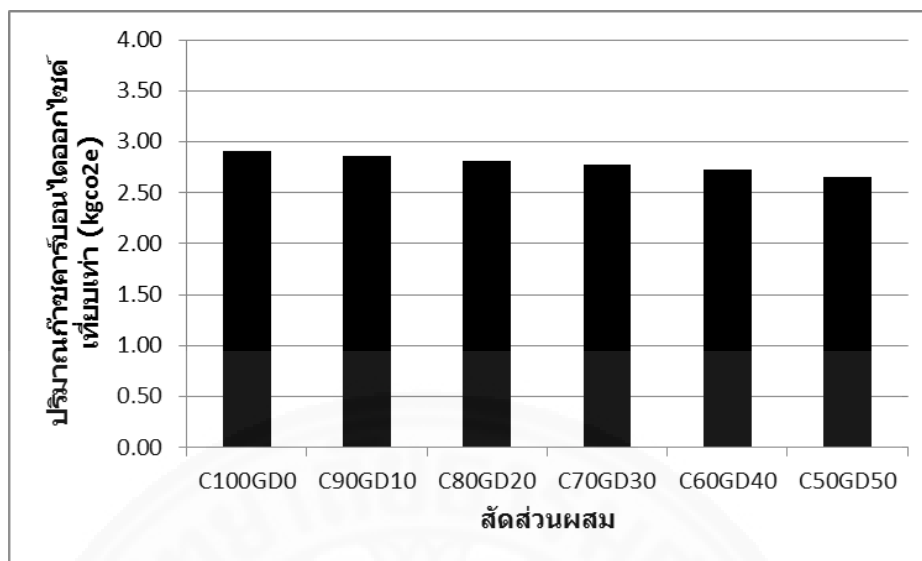
4.8 การประเมินปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เบื้องต้น

4.8.1 ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

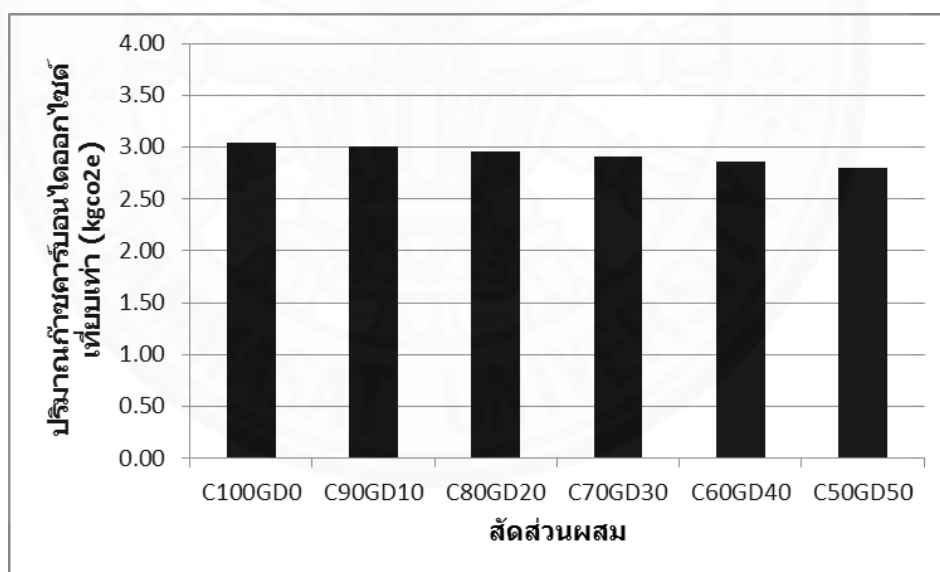
จากการทดสอบหาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วโดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 สูตร คือ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ พบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของซีเมนต์เพสต์ล้วนมีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนผสมในการบ่มมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ การบ่มอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดรองลงมาเป็น 80, 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.67 ถึง 4.70



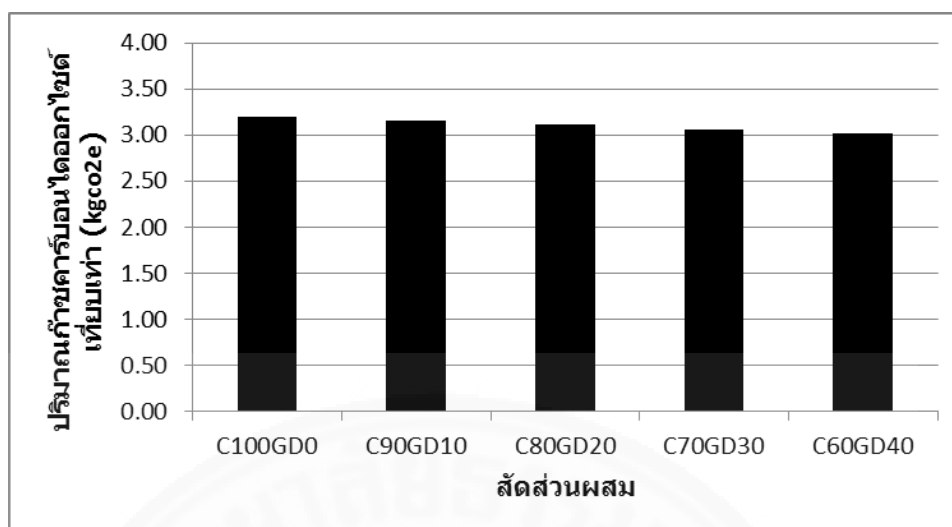
ภาพที่ 4.67 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม



ภาพที่ 4.68 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม



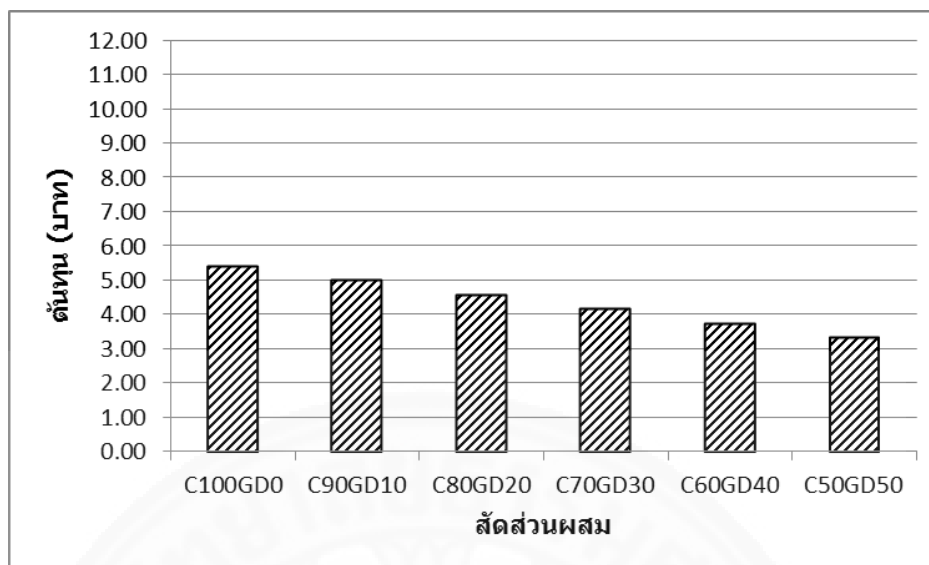
ภาพที่ 4.69 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม



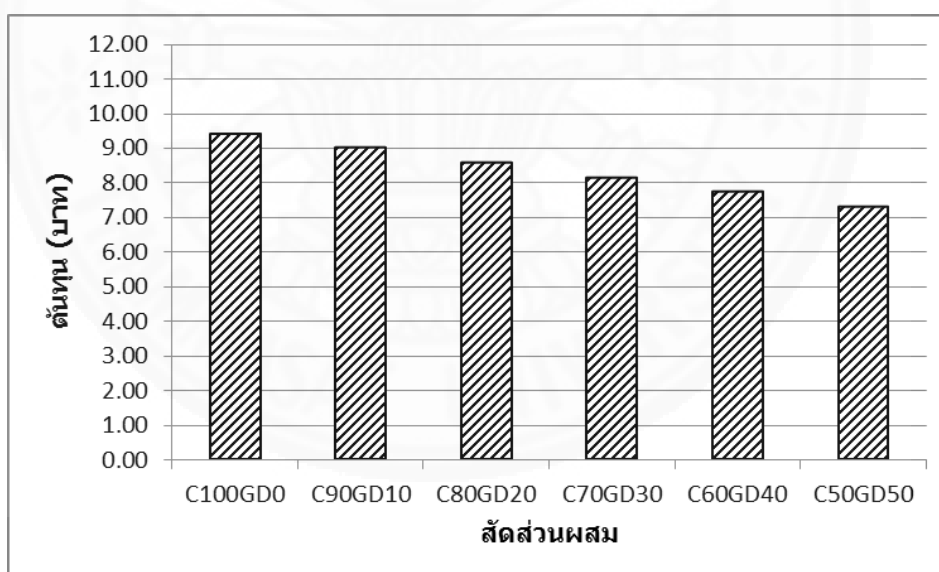
ภาพที่ 4.70 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าซีเมนต์เฟสผสมปูนแก้ว อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม

4.9 การประเมินผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

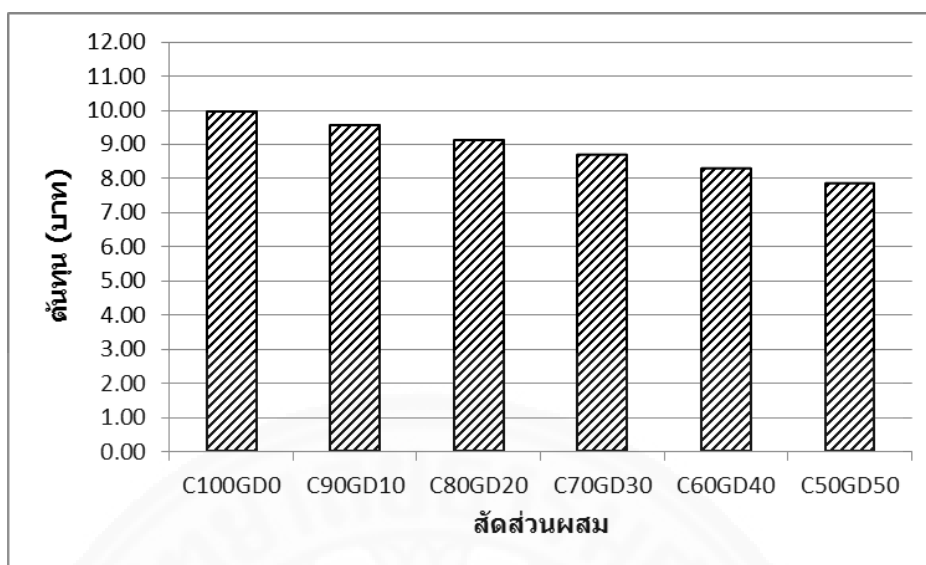
จากการทดสอบหาคูสมบัติทางกลของซีเมนต์เฟสผสมปูนแก้วโดยการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 สูตร คือ ซีเมนต์เฟสที่ผสมปูนแก้วอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ พบว่าผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมจากการผลิตซีเมนต์เฟสผสมปูนแก้วของซีเมนต์เฟสล้วนมีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นซีเมนต์เฟสที่ผสมปูนแก้วอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนผสมในการบ่มมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ การบ่มอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะมีผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมมากที่สุด รองลงมาเป็น 80, 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.71 ถึง 4.74



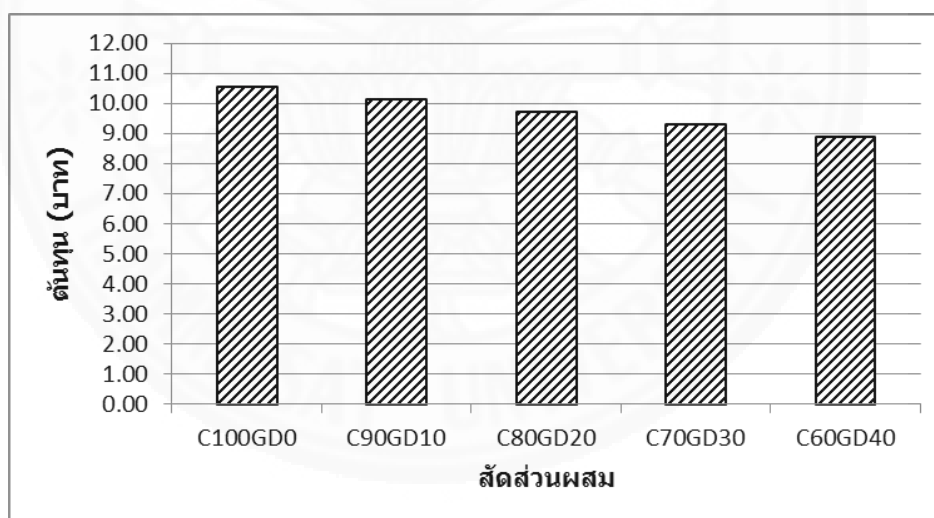
ภาพที่ 4.71 กราฟแสดงราคาต้นทุนทุกการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้ว อุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม



ภาพที่ 4.72 กราฟแสดงราคาต้นทุนทุกการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมปูนแก้ว อุณหภูมิห้อง 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม



ภาพที่ 4.73 กราฟแสดงราคาต้นทุนทุกการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิห้อง 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม



ภาพที่ 4.74 กราฟแสดงราคาต้นทุนทุกการผลิตของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว อุณหภูมิห้อง 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่น้ำหนัก 1.5 กิโลกรัม

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษาวิจัย

1. เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางเคมีของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเครื่องมือ X – Ray Fluorescence (XRF) พบว่าฝุ่นแก้วมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 71.36 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 64.4 ส่วนปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เพียงร้อยละ 20.1

2. เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นแก้วและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมส่วนฝุ่นแก้วมีลักษณะเป็นเกล็ดคมแหลมเป็นรูปทรงไม่แน่นอนมีพื้นผิวขรุขระและมีขนาดเล็กใหญ่คู่กัน ซึ่งลักษณะรูปร่างจะมีผลในด้านปริมาณความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์

3. ผลการทดสอบความปริมาณความต้องการน้ำของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วกับซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วมีความต้องการน้ำน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว เนื่องจากปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงโดยมีปริมาณความต้องการน้ำลดลงตามปริมาณการแทนที่ของฝุ่นแก้ว

4. จากการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้วจะมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายที่น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยฝุ่นแก้ว

5. ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะมีกำลังรับแรงอัดลดลงตามสัดส่วนของฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งไม่ผสมฝุ่นแก้ว ทั้งนี้เป็นเพราะสัดส่วนของปูนซีเมนต์ที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันมีน้อยลง ในขณะที่ฝุ่นแก้วยังมีลักษณะเป็นวัสดุเฉื่อยที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่ทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าค่ากำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะเพิ่มขึ้นต่อไปตามระยะเวลาการบ่มที่นานขึ้น

6. ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงและเหมาะสมที่จะทำให้กำลังรับแรงอัดสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้ซีเมนต์เพสต์มีการพัฒนากำลังรับ

แรงอัดที่เหมาะสมในช่วงระยะแรกของการแข็งตัวและมีกำลังรับแรงอัดมากที่สุด ส่วนการบ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสมีค่ากำลังรับแรงอัดต่ำที่สุด เนื่องจากเกิดการขยายตัวจากความร้อนที่มากเกินไปจึงเกิดการขยายตัวของช่องว่างอากาศมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดความพรุนในซีเมนต์เพสต์ จึงทำให้กำลังรับแรงอัดลดลง

7. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักลดลงตามสัดส่วนของฝุ่นแก้วที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ำกว่าของซีเมนต์เพสต์ซึ่งไม่ผสมฝุ่นแก้ว สำหรับซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วที่บ่มด้วยอุณหภูมิสูงมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่น้อยกว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากที่สุด รองลงมาคือที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและการแช่ในน้ำมีค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักน้อยที่สุด

8. ซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วทุกสัดส่วนผสมมีร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ใกล้เคียงกันโดยสัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ผสมฝุ่นแก้วมีค่าร้อยละการเปลี่ยนแปลงขนาดมากที่สุดในทุกสภาวะการบ่มทั้งในการแช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตและน้ำ ทั้งนี้เป็นเพราะปริมาณ C_3A ในซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วมีค่ามากกว่าของสัดส่วนอื่นๆที่ถูกแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วซึ่งทำให้มีปริมาณเอททริงไคต์มากกว่าทำให้เกิดการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์

9. การทดสอบ TGA ทางด้านอุณหภูมิในการบ่มพบว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มอุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส) มีปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) มากกว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยเตาอบความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในส่วนของการแทนที่พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยฝุ่นแก้วจะมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่น

10. จากการทดสอบหาปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วโดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 สูตร คือ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้ว 0%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% ตามลำดับ พบว่าปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของซีเมนต์เพสต์ล้วนมีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าการบ่มอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะมีปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุด รองลงมาเป็น 80, 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง (31 องศาเซลเซียส)

11. จากการทดสอบหาคุณสมบัติทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วโดยทำการเปรียบเทียบทั้งหมด 6 สูตร คือ ซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ พบว่าผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมจากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้วของซีเมนต์เพสต์ล้วนมีค่ามากที่สุดรองลงมาเป็นซีเมนต์เพสต์ที่ผสมฝุ่นแก้วอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิในการบ่มที่อุณหภูมิห้อง, 70, 80 และ 90 องศาเซลเซียส พบว่าทุกอัตราส่วนผสมในการบ่มมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ การบ่มอากาศที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสจะมีผลกระทบทางด้านเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อมมากที่สุด รองลงมาเป็น 80, 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง ถ้าฝุ่นแก้วถูกนำไปใช้อย่างจริงจังจะสามารถลดปริมาณขยะจากขวดแก้วได้เป็นอย่างมาก

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบจากการบดเพิ่มความละเอียดของฝุ่นแก้วต่อการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานของฝุ่นแก้ว
- 2) ควรศึกษาถึงการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายในการบดเศษแก้วเพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตต่อไปในอนาคต

รายการอ้างอิง

หนังสือ

- คณะกรรมการเทคนิคด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์. (2552). *แนวทางการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของผลิตภัณฑ์* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้ง แอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน),
- คณะกรรมการการคอนกรีตและวัสดุ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. (2543). *ความคงทนของคอนกรีต* (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์จุฑาทอง.
- บริษัทปูนซิเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด. (2548). *ปูนซีเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์บริษัทปูนซิเมนต์ไทยอุตสาหกรรม จำกัด.
- ปริญญา จินดาประเสริฐกุล และชัย จตุรพิทักษ์กุล. (2549). *ปูนซีเมนต์ ปอชโซลานและคอนกรีต* (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์บริษัทปูนซิเมนต์ไทยอุตสาหกรรม.

บทความวารสาร

- บรรณัตร ฉัตรวีระ, และวินัย หอมศรีประเสริฐ. (2554). พฤติกรรมของซีเมนต์เพสต์ผสมวัสดุปอชโซลานในการประยุกต์ใช้กับพลังงานไมโครเวฟ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร*, 34, 299-315.
- ยงยุทธ วัฒนกุล ปิตินันต์ กร้ามาตร อิทธิพร ศิริสวัสดิ์ และสมนึก ตั้งเต็มสิริกุล. (2553). คุณสมบัติด้านซีเมนต์และการขยายตัวในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชภัฏวชิรวิทยาดำรง*, 2, 51-59.
- วรรณดา ต.แสงจันทร์. “การพัฒนาอิฐมวลเบาจากเศษแก้ว.” *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ* ปีที่ 57, ฉบับที่ 179: หน้า 46-52.
- สมพร จันทระและคณะ. (2553). การเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างการตกสะสมของกรดในพื้นที่ภาคเหนือ. *วารสารวิทยาศาสตร์เคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2, 20.

วิทยานิพนธ์

- โกเมนทร์ มูลโชคอนันต์, ชัชชัย หอมวิเชียร และนนท์ ปิณฑะดิษฐ์. (2549). *การศึกษาและพัฒนาคอนกรีตทนซัลเฟต*. (วิทยานิพนธ์บัณฑิต). มหาวิทยาลัยขอนแก่น, คณะวิศวกรรมศาสตร์.

- ยงยุทธ วัฒนกุล. (2554). *คุณสมบัติด้านซีเมนต์และความต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยและผงหินปูน*. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- ชาญชัย เงามปก, ณัฐพงษ์ ทองทุม, พินิตพงศ์ คำปลิว และสุรเชษฐ์ เตชะกิจกุล. (2548). *คอนกรีตทนทานสูง*. (วิทยานิพนธ์บัณฑิต). มหาวิทยาลัยขอนแก่น, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- นพคุณ ผลโพธิ์. (2554). *ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ตาร์*. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- ธนวดี กิ่งรุ่งเพชร, ศิริลักษณ์ อินชู่ใจ และณัฐพงษ์ พิพัฒน์พงษ์. (2556). *ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังอัดและการหดตัวแบบแห้งของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะ*. (วิทยานิพนธ์บัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- วรนาถ จิตรีเที่ยง, วุฒิชัย หุ่นประเสริฐ และสมคิด หยีส้าล่า. (2547). *คอนกรีตกำลังสูงต้านทานซัลเฟต*. (วิทยานิพนธ์บัณฑิต). มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- วินัย หอมศรีประเสริฐ และก๊าวกาญจน์ บัวแก้ว. (2551). *การศึกษาการสูญเสียกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากลบและซิลิกาฟูมภายใต้การกระทำของสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต*. (วิทยานิพนธ์บัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- วิศว จักรไพศาล. (2539). *ผลกระทบของซีเมนต์เถ้าลอยในปฏิกิริยาปอซโซลานที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตสมรรถนะสูง*. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- วีระชาติ อินทร์ทอง. (2551). *การบำบัดน้ำซัลเฟตในน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลขุ่นโดยใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต*. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- ศุภณนธ์ บรรจงเกลี้ยง. (2549). *ศักยภาพของผงเถ้าในการเป็นปอซโซลาน*. (วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- วีระชาติ อินทร์ทอง. (2551). *การบำบัดน้ำซัลเฟตในน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลขุ่นโดยใช้เถ้าลอยจากเตาเผาขยะจังหวัดภูเก็ต*. (วิทยานิพนธ์บัณฑิต). มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- อัครพัทธ์ กุลากุล และภาสิต ทรงประโคน. (2555). *การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการสูญเสียกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยเนื่องจากการกัดกร่อนของซัลเฟต*. (วิทยานิพนธ์บัณฑิต). มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, คณะวิศวกรรมศาสตร์.

สื่ออิเล็กทรอนิกส์

- กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2557). *ร่างรายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี พ.ศ.2557*. สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มกราคม 2559, จาก <http://www.pcd.go.th/public/News/Files/Draft580318-1.pdf>
- ธวัชชัย คุณประคัลภ์. (2557). “ความต้านทานซัลเฟตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ผสมเถ้าลอยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 5.” สืบค้นเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม 2558, จาก <http://kmcenter.rid.go.th>
- บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้าง จำกัด. “คอนกรีตเทคโนโลยี.” สืบค้นเมื่อวันที่ 12 ธันวาคม 2558, จาก http://www.cpac.co.th/cpacnew/knowledge_cpac_book.php#cover

Books

- A.M. Neville. (1995). *Civil Engineering Consultant Properties of Concrete* (5th ed.). Dundee: University of Dundee.
- ASTM C187-11e1, Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011, www.astm.org
- ASTM C191-13, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, www.astm.org

Journals

- Dr. G. Vijaryakumar, Ms H. Vishaliny, Dr. D. Govindarajulu, “Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* ,ISSN 2250-2459,ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 3 Issue 2, February 2013

Hongjian Du, Hongchen Jacey Gao and Wei Li, "Pozzolanic reaction of glass powder and its influences on concrete", *Southern Cross University, 23rd Australasia Conference on the Mechanics of Structures and materials*, 2014.

R.Vandhiyan, K.Ramkumar and R.Ramya, "Experiment Study on Replacement of Cement", *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Volume 2 Issue 5, May 2012

Silpa Raju, Dr.P.R. Kumar, "Effect of Using Glass Powder in Concrete", *International Journal of Innovative Researc in Science, Engineering and Technology*, Volume 3 Special Issue 5, july 2014

Electronic Media

H.F.W. Taylor, Function of ingredient of Cement. Retrieved Nov 6, 2015, from <http://theconstructor.org/building/functions-of-ingredients-of-cement-opc/7561/>

ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบหาความชื้นเหลือปกติ

ตารางที่ ก-1 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C100GD0

ปริมาณน้ำ (กรัม)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
370	4
375	10
380	15

ตารางที่ ก-2 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C90GD10

ปริมาณน้ำ (กรัม)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
350	2
360	5
370	19

ตารางที่ ก-3 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C80GD20

ปริมาณน้ำ (กรัม)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
340	5
350	11
360	20

ตารางที่ ก-4 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C70GD30

ปริมาณน้ำ (กรัม)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
330	4
335	11
340	19

ตารางที่ ก-5 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C60GD40

ปริมาณน้ำ (กรัม)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
300	4
315	12
320	17

ตารางที่ ก-6 ปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปของอัตราส่วนผสม C50GD50

ปริมาณน้ำ (กรัม)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
265	5
270	9
285	16

ภาคผนวก ข
ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว

ตารางที่ ข-1 ระยะเวลาการก่อตัวของอัตราส่วนผสม C100GD

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
30	39
45	39
60	37
75	32
90	28
105	20
120	4
135	1
150	0

ตารางที่ ข-2 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มและก่อตัวสุดท้ายของ C90GD10

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
30	40
45	40
60	38
75	32
90	13
105	10
120	7
135	1
150	0

ตารางที่ ข-3 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C80GD20

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
30	38
45	38
60	38
75	32
90	13
105	7
120	3
135	1
150	0

ตารางที่ ข-4 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C70GD30

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มิลลิเมตร)
30	38
45	38
60	34
75	23
90	12
105	2.5
120	0.5
135	0

ตารางที่ ข-5 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C60GD40

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเพิ่มจม (มิลลิเมตร)
30	36
45	36
60	24
75	15
90	6.5
105	3
120	1
135	0

ตารางที่ ข-6 ระยะเวลาก่อตัวของอัตราส่วนผสม C50GD50

ระยะเวลา (นาที)	ระยะเพิ่มจม (มิลลิเมตร)
30	35
45	35
60	24
75	19
90	5.5
105	2
120	0

ภาคผนวก ค
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ ค-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิตั้งแต่ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	474	5.5	10	23.75	6820	287.20
	2	493	5.5	10	23.75	6530	274.99
	3	498	5.5	9.8	23.75	6950	292.68
C90GD10	1	511	5.5	10	23.75	5860	246.78
	2	501	5.5	10	23.75	5970	251.41
	3	505	5.5	9.9	23.75	5950	250.57
C80GD20	1	501	5.5	9.8	23.75	5420	228.25
	2	497	5.5	9.8	23.75	5410	227.83
	3	503	5.5	9.8	23.75	5530	232.88
C70GD30	1	486	5.5	9.7	23.75	4680	197.08
	2	502	5.5	9.9	23.75	4730	199.19
	3	497	5.5	10	23.75	4510	189.92
C60GD40	1	493	5.5	9.8	23.75	4120	173.50
	2	522	5.5	9.6	23.75	3850	162.13
	3	508	5.5	9.9	23.75	3975	167.39
C50GD50	1	513	5.5	10	23.75	3530	148.66
	2	484	5.5	9.7	23.75	3470	146.13
	3	493	5.5	9.7	23.75	3380	142.34

ตารางที่ ค-2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	495	5.5	10	23.75	6860	288.89
	2	494	5.5	9.5	23.75	6760	284.68
	3	490	5.5	10	23.75	5950	250.57
C90GD10	1	505	5.5	9.6	23.75	5040	212.24
	2	491	5.5	9.8	23.75	5950	250.57
	3	471	5.5	10	23.75	5130	216.03
C80GD20	1	489	5.5	9.9	23.75	4530	190.77
	2	516	5.5	10	23.75	4760	200.45
	3	495	5.5	9.95	23.75	4460	187.82
C70GD30	1	516	5.5	10	23.75	4330	182.34
	2	448	5.5	10	23.75	4160	175.19
	3	474	5.5	10	23.75	3860	162.55
C60GD40	1	523	5.5	10	23.75	3520	148.23
	2	504	5.5	10	23.75	3460	145.71
	3	494	5.5	10	23.75	3510	147.81
C50GD50	1	490	5.5	10	23.75	2850	120.02
	2	510	5.5	10	23.75	3050	128.44
	3	467	5.5	10	23.75	2760	116.23

ตารางที่ ค-3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	507	5.5	10	23.75	5460	229.93
	2	497	5.5	9.8	23.75	6290	264.88
	3	513	5.5	10	23.75	6215	261.73
C90GD10	1	507	5.5	9.7	23.75	5350	225.30
	2	497	5.5	10	23.75	5215	219.61
	3	513	5.5	10	23.75	4560	192.03
C80GD20	1	503	5.5	10	23.75	4180	176.03
	2	507	5.5	10	23.75	4460	187.82
	3	520	5.5	9.95	23.75	4620	194.56
C70GD30	1	513	5.5	10	23.75	3920	165.08
	2	515	5.5	9.9	23.75	3210	135.18
	3	520	5.5	10	23.75	3790	159.60
C60GD40	1	512	5.5	10	23.75	2980	125.49
	2	517	5.5	9.9	23.75	2850	120.02
	3	520	5.5	10	23.75	3010	126.76
C50GD50	1	519	5.5	9.9	23.75	2260	95.17
	2	527	5.5	10	23.75	2400	101.07
	3	526	5.5	10	23.75	2660	112.02

ตารางที่ ค-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	490	5.6	10	24.62	8840	359.09
	2	527	5.6	10	24.62	7600	308.72
	3	500	5.6	100	24.62	7910	321.31
C90GD10	1	498	5.7	9.8	25.50	7200	282.30
	2	501	5.7	10	25.50	6810	267.01
	3	505	5.7	9.1	25.50	6940	272.11
C80GD20	1	475	5.7	10	25.50	6880	269.75
	2	491	5.7	10	25.50	6660	261.13
	3	501	5.7	9.8	25.50	6060	237.60
C70GD30	1	474	5.7	10	25.50	5570	218.39
	2	500	5.7	9.8	25.50	5760	225.84
	3	504	5.7	9.4	25.50	5340	209.37
C60GD40	1	466	5.8	10	26.41	4320	163.59
	2	515	5.8	10	26.41	4590	173.81
	3	495	5.8	9.5	26.41	4850	183.66
C50GD50	1	488	5.8	9.8	26.41	3850	145.79
	2	512	5.8	9.8	26.41	3930	148.82
	3	502	5.8	10	26.41	3710	140.49

ตารางที่ ค-5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	482	5.6	9.9	24.62	6720	272.98
	2	501	5.6	9.8	24.62	6640	269.73
	3	506	5.6	10.0	24.62	6850	278.26
C90GD10	1	492	5.7	9.7	25.50	7490	293.67
	2	491	5.7	9.9	25.50	6600	258.78
	3	500	5.7	9.9	25.50	5460	214.08
C80GD20	1	493	5.7	10.0	25.50	6100	239.17
	2	489	5.7	9.8	25.50	5470	214.47
	3	469	5.7	9.7	25.50	5840	228.98
C70GD30	1	496	5.7	9.9	25.50	4900	192.12
	2	492	5.7	9.8	25.50	5580	218.78
	3	471	5.7	9.8	25.50	5290	207.41
C60GD40	1	486	5.8	9.8	26.41	4400	166.62
	2	495	5.8	9.9	26.41	4200	159.05
	3	506	5.8	10.0	26.41	4550	172.30
C50GD50	1	515	5.8	10.0	26.41	3190	120.80
	2	525	5.8	9.9	26.41	3830	145.04
	3	503	5.8	9.9	26.41	3290	124.59

ตารางที่ ค-6 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	495	5.6	9.9	24.62	6850	278.26
	2	488	5.6	9.75	24.62	6460	262.41
	3	506	5.6	9.8	24.62	5720	232.35
C90GD10	1	509	5.7	10	25.50	5650	221.53
	2	507	5.7	9.8	25.50	5540	217.22
	3	509	5.7	9.7	25.50	5910	231.72
C80GD20	1	493	5.7	9.8	25.50	4670	183.10
	2	497	5.7	10	25.50	4760	186.63
	3	504	5.7	9.9	25.50	5520	216.43
C70GD30	1	491	5.7	9.85	25.50	5650	221.53
	2	508	5.7	9.9	25.50	2700	105.86
	3	512	5.7	9.8	25.50	4450	174.48
C60GD40	1	500	5.8	10	26.41	4440	168.13
	2	498	5.8	9.9	26.41	3470	131.40
	3	510	5.8	9.9	26.41	3810	144.28
C50GD50	1	523	5.8	9.7	26.41	3190	120.80
	2	495	5.8	9.9	26.41	2600	98.46
	3	519	5.8	9.8	26.41	2730	103.38

ตารางที่ ค-7 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	497	5.6	9.9	24.62	8950	363.56
	2	480	5.6	9.75	24.62	8560	347.72
	3	471	5.6	10	24.62	8330	338.38
C90GD10	1	493	5.7	9.8	25.50	7840	307.39
	2	508	5.7	9.9	25.50	7250	284.26
	3	500	5.7	9.9	25.50	7440	291.71
C80GD20	1	511	5.7	9.75	25.50	6990	274.07
	2	503	5.7	9.8	25.50	6700	262.70
	3	505	5.7	9.7	25.50	6650	260.74
C70GD30	1	515	5.7	10	25.50	5940	232.90
	2	487	5.7	9.9	25.50	6240	244.66
	3	502	5.7	9.8	25.50	5570	218.39
C60GD40	1	512	5.8	9.6	26.41	4920	186.31
	2	495	5.8	9.7	26.41	4550	172.30
	3	501	5.8	9.9	26.41	4730	179.12
C50GD50	1	497	5.8	10	26.41	4320	163.59
	2	477	5.8	9.9	26.41	3740	141.63
	3	502	5.8	9.7	26.41	3910	148.06

ตารางที่ ค-8 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4
ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	485	5.6	9.9	24.62	7880	320.10
	2	500	5.6	9.7	24.62	7950	322.94
	3	505	5.6	9.8	24.62	7660	311.16
C90GD10	1	484	5.7	9.8	25.50	7390	289.75
	2	466	5.7	9.8	25.50	6530	256.03
	3	496	5.7	9.9	25.50	6670	261.52
C80GD20	1	504	5.7	9.8	25.50	5520	216.43
	2	500	5.7	9.7	25.50	6430	252.11
	3	510	5.7	10	25.50	5810	227.80
C70GD30	1	480	5.7	9.9	25.50	5280	207.02
	2	499	5.7	9.8	25.50	5740	225.06
	3	509	5.7	9.9	25.50	5520	216.43
C60GD40	1	508	5.8	10	26.41	3820	144.66
	2	501	5.8	10	26.41	4400	166.62
	3	512	5.8	9.9	26.41	4310	163.21
C50GD50	1	514	5.8	9.8	26.41	3300	124.96
	2	503	5.8	9.7	26.41	3040	115.12
	3	517	5.8	9.9	26.41	3480	131.78

ตารางที่ ค-9 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	490	5.6	9.9	24.62	6770	275.01
	2	488	5.6	9.9	24.62	6880	279.47
	3	494	5.6	10	24.62	6835	277.65
C90GD10	1	482	5.7	9.8	25.50	6910	270.93
	2	491	5.7	9.9	25.50	6370	249.76
	3	500	5.7	9.7	25.50	5740	225.06
C80GD20	1	486	5.7	9.75	25.50	5050	198.00
	2	490	5.7	9.8	25.50	5310	208.20
	3	500	5.7	9.9	25.50	5775	226.43
C70GD30	1	490	5.7	9.8	25.50	4230	165.85
	2	498	5.7	9.9	25.50	4850	190.16
	3	510	5.7	10	25.50	4615	180.95
C60GD40	1	512	5.8	10	26.41	3630	137.46
	2	512	5.8	10	26.41	3180	120.42
	3	515	5.8	9.9	26.41	3850	145.79
C50GD50	1	514	5.8	9.8	26.41	2880	109.06
	2	508	5.8	9.8	26.41	2350	88.99
	3	512	5.8	9.7	26.41	2905	110.01

ตารางที่ ค-10 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	515	5.6	9.9	24.62	6770	275.01
	2	520	5.6	9.7	24.62	6970	283.13
	3	512	5.6	9.7	24.62	6550	266.07
C90GD10	1	531	5.7	9.8	25.50	6310	247.41
	2	527	5.7	9.9	25.50	5500	215.65
	3	524	5.7	10	25.50	6000	235.25
C80GD20	1	505	5.7	10	25.50	4860	190.55
	2	506	5.7	9.9	25.50	5540	217.22
	3	510	5.7	9.8	25.50	5850	229.37
C70GD30	1	522	5.7	9.7	25.50	5010	196.43
	2	522	5.7	9.6	25.50	4370	171.34
	3	518	5.7	10	25.50	5350	209.77
C60GD40	1	527	5.8	9.9	26.41	3040	115.12
	2	525	5.8	9.8	26.41	4050	153.37
	3	519	5.8	9.9	26.41	3460	131.02
C50GD50	1	510	5.8	10	26.41	3280	124.21
	2	497	5.8	9.9	26.41	2540	96.19
	3	506	5.8	9.8	26.41	2750	104.14

ตารางที่ ค-11 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	507	5.6	10	24.62	6410	260.38
	2	508	5.6	9.9	24.62	6520	264.85
	3	510	5.6	10	24.62	5750	233.57
C90GD10	1	513	5.7	9.9	25.50	5020	196.83
	2	526	5.7	9.8	25.50	5780	226.63
	3	504	5.7	9.8	25.50	5315	208.39
C80GD20	1	513	5.7	9.7	25.50	4730	185.46
	2	526	5.7	10	25.50	4600	180.36
	3	504	5.7	9.9	25.50	4540	178.01
C70GD30	1	528	5.7	9.6	25.50	4110	161.15
	2	513	5.7	9.8	25.50	4560	178.79
	3	522	5.7	9.8	25.50	4320	169.38
C60GD40	1	521	5.8	10	26.41	3380	127.99
	2	495	5.8	9.9	26.41	3040	115.12
	3	501	5.8	9.8	26.41	2960	112.09
C50GD50	1	512	5.8	9.9	26.41	2500	94.67
	2	512	5.8	10	26.41	2370	89.75
	3	515	5.8	9.9	26.41	2490	94.29

ตารางที่ ค-12 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	512	5.6	10	24.62	5420	220.17
	2	492	5.6	9.9	24.62	5090	206.76
	3	506	5.6	9.9	24.62	5750	233.57
C90GD10	1	494	5.7	9.8	25.50	6660	261.13
	2	564	5.7	9.8	25.50	3500	137.23
	3	525	5.7	9.7	25.50	4750	186.24
C80GD20	1	524	5.7	10	25.50	4520	177.22
	2	511	5.7	10	25.50	4670	183.10
	3	507	5.7	9.9	25.50	4130	161.93
C70GD30	1	512	5.7	9.9	25.50	3950	154.87
	2	501	5.7	9.8	25.50	3370	132.13
	3	517	5.7	10	25.50	3010	118.02
C60GD40	1	507	5.8	10	26.41	2110	79.90
	2	499	5.8	9.9	26.41	2640	99.97
	3	512	5.8	9.7	26.41	3210	121.56
C50GD50	1	504	5.8	9.8	26.41	2330	88.23
	2	516	5.8	10	26.41	2210	83.69
	3	497	5.8	9.7	26.41	2050	77.63

ตารางที่ ค-13 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แฉ่น้ำไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	489	5.5	10	23.75	7560	318.37
	2	478	5.5	9.8	23.75	7950	334.79
	3	492	5.5	10	23.75	8225	346.37
C90GD10	1	502	5.5	9.85	23.75	6600	277.94
	2	492	5.5	9.9	23.75	6840	288.05
	3	509	5.5	10	23.75	6525	274.78
C80GD20	1	471	5.5	10	23.75	5710	240.46
	2	486	5.5	9.9	23.75	5860	246.78
	3	497	5.5	10	23.75	5515	232.25
C70GD30	1	489	5.5	9.8	23.75	5020	211.40
	2	479	5.5	10	23.75	5190	218.56
	3	481	5.5	9.8	23.75	4530	190.77
C60GD40	1	468	5.5	10	23.75	4210	177.29
	2	501	5.5	10	23.75	4450	187.40
	3	499	5.5	9.8	23.75	4450	187.40
C50GD50	1	514	5.5	9.7	23.75	4010	168.87
	2	500	5.5	10	23.75	3910	164.66
	3	518	5.5	9.9	23.75	3690	155.39

ตารางที่ ค-14 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	489	5.5	10	23.75	7540	317.52
	2	508	5.5	10	23.75	7380	310.79
	3	502	5.5	9.9	23.75	7050	296.89
C90GD10	1	481	5.5	10	23.75	6530	274.99
	2	490	5.5	10	23.75	5870	247.20
	3	501	5.5	9.8	23.75	6230	262.36
C80GD20	1	511	5.5	9.7	23.75	5750	242.14
	2	495	5.5	10	23.75	5170	217.72
	3	510	5.5	10	23.75	5430	228.67
C70GD30	1	516	5.5	10	23.75	4990	210.14
	2	495	5.5	9.8	23.75	4770	200.87
	3	512	5.5	9.9	23.75	4230	178.13
C60GD40	1	510	5.5	10	23.75	3860	162.55
	2	495	5.5	9.8	23.75	3710	156.24
	3	521	5.5	9.8	23.75	3870	162.97
C50GD50	1	516	5.5	10	23.75	3170	133.49
	2	518	5.5	10	23.75	3350	141.07
	3	522	5.5	9.9	23.75	3070	129.28

ตารางที่ ค-15 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	510	5.5	10	23.75	6360	267.83
	2	498	5.5	9.8	23.75	6320	266.15
	3	513	5.5	9.7	23.75	6750	284.26
C90GD10	1	501	5.5	9.7	23.75	6300	265.31
	2	506	5.5	10	23.75	5210	219.40
	3	515	5.5	9.9	23.75	6125	257.94
C80GD20	1	501	5.5	10	23.75	4670	196.66
	2	509	5.5	10	23.75	5660	238.35
	3	521	5.5	9.8	23.75	5010	210.98
C70GD30	1	512	5.5	10	23.75	4320	181.92
	2	511	5.5	9.9	23.75	3390	142.76
	3	515	5.5	10	23.75	3730	157.08
C60GD40	1	513	5.5	10	23.75	3570	150.34
	2	524	5.5	9.9	23.75	2760	116.23
	3	525	5.5	9.8	23.75	3120	131.39
C50GD50	1	526	5.5	9.9	23.75	2850	120.02
	2	532	5.5	10	23.75	2930	123.39
	3	523	5.5	9.7	23.75	2730	114.97

ตารางที่ ค-16 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	498	5.5	10	23.75	8890	374.37
	2	498	5.5	10	23.75	8780	369.74
	3	487	5.5	10	23.75	8210	345.74
C90GD10	1	484	5.7	9.8	25.50	8350	327.39
	2	452	5.7	10	25.50	7690	301.51
	3	488	5.7	9.7	25.50	8050	315.63
C80GD20	1	492	5.7	10	25.50	7670	300.73
	2	502	5.7	10	25.50	7000	274.46
	3	493	5.7	10	25.50	7250	284.26
C70GD30	1	495	5.7	10	25.50	6340	248.58
	2	502	5.7	9.8	25.50	6140	240.74
	3	496	5.7	10	25.50	6730	263.87
C60GD40	1	493	5.8	10	26.41	5950	225.32
	2	448	5.8	10	26.41	5120	193.89
	3	493	5.8	10	26.41	5670	214.71
C50GD50	1	506	5.8	9.8	26.41	5190	196.54
	2	501	5.8	9.8	26.41	4510	170.79
	3	493	5.8	9.9	26.41	4350	164.73

ตารางที่ ค-17 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	496	5.5	9.7	23.75	8240	347.00
	2	512	5.5	10	23.75	7210	303.63
	3	508	5.5	10	23.75	8530	359.21
C90GD10	1	500	5.7	9.7	25.50	9300	364.64
	2	504	5.7	9.8	25.50	6050	237.21
	3	510	5.7	10	25.50	7730	303.08
C80GD20	1	509	5.7	9.7	25.50	5460	214.08
	2	497	5.7	10	25.50	7540	295.63
	3	502	5.7	10	25.50	7320	287.01
C70GD30	1	502	5.7	9.9	25.50	5370	210.55
	2	501	5.7	9.8	25.50	5740	225.06
	3	505	5.7	10	25.50	5510	216.04
C60GD40	1	498	5.8	10	26.41	4890	185.18
	2	498	5.8	9.8	26.41	4340	164.35
	3	499	5.8	10	26.41	4200	159.05
C50GD50	1	508	5.8	9.9	26.41	4010	151.85
	2	500	5.8	10	26.41	4050	153.37
	3	518	5.8	9.9	26.41	3750	142.01

ตารางที่ ค-18 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	481	5.6	10	24.62	8090	328.63
	2	509	5.6	9.7	24.62	6700	272.16
	3	460	5.6	9.9	24.62	7530	305.88
C90GD10	1	511	5.7	9.8	25.50	7180	281.52
	2	503	5.7	9.9	25.50	6950	272.50
	3	478	5.7	10	25.50	6700	262.70
C80GD20	1	497	5.7	9.8	25.50	5640	221.14
	2	510	5.7	9.8	25.50	6840	268.19
	3	471	5.7	9.8	25.50	6200	243.09
C70GD30	1	503	5.7	10	25.50	5710	223.88
	2	494	5.7	9.7	25.50	4290	168.20
	3	469	5.7	9.8	25.50	4650	182.32
C60GD40	1	497	5.8	9.8	26.41	3700	140.11
	2	510	5.8	9.7	26.41	4480	169.65
	3	479	5.8	9.8	26.41	4120	156.02
C50GD50	1	530	5.8	10	26.41	3620	137.08
	2	503	5.8	10	26.41	3100	117.39
	3	527	5.8	10	26.41	3330	126.10

ตารางที่ ค-19 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่น้ำ
ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	477	5.5	9.8	23.75	9320	392.48
	2	487	5.5	10	23.75	9110	383.64
	3	497	5.5	9.9	23.75	9650	406.38
C90GD10	1	497	5.7	10	25.50	8630	338.37
	2	496	5.7	9.7	25.50	8770	343.86
	3	499	5.7	9.9	25.50	8910	349.35
C80GD20	1	498	5.7	9.8	25.50	7840	307.39
	2	498	5.7	9.9	25.50	7690	301.51
	3	463	5.7	10	25.50	7980	312.88
C70GD30	1	483	5.7	9.8	25.50	7210	282.69
	2	490	5.7	10	25.50	6550	256.82
	3	500	5.7	9.8	25.50	6500	254.86
C60GD40	1	483	5.8	9.8	26.41	6330	239.71
	2	495	5.8	9.7	26.41	5740	217.36
	3	500	5.8	10	26.41	6000	227.21
C50GD50	1	488	5.8	10	26.41	4990	188.96
	2	486	5.8	9.9	26.41	5120	193.89
	3	510	5.8	9.8	26.41	4850	183.66

ตารางที่ ค-20 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4
ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	496	5.5	10	23.75	8840	372.27
	2	508	5.5	10	23.75	8500	357.95
	3	512	5.5	10	23.75	8500	357.95
C90GD10	1	504	5.7	10	25.50	7780	305.04
	2	542	5.7	9.8	25.50	8130	318.77
	3	526	5.7	9.9	25.50	7500	294.06
C80GD20	1	503	5.7	10	25.50	6870	269.36
	2	506	5.7	9.8	25.50	6770	265.44
	3	502	5.7	10	25.50	6950	272.50
C70GD30	1	498	5.7	9.8	25.50	5580	218.78
	2	504	5.7	10	25.50	5680	222.70
	3	512	5.7	10	25.50	5820	228.19
C60GD40	1	495	5.8	10	26.41	5010	189.72
	2	472	5.8	9.7	26.41	4850	183.66
	3	500	5.8	10	26.41	4620	174.95
C50GD50	1	508	5.8	10	26.41	4400	166.62
	2	512	5.8	9.9	26.41	4490	170.03
	3	509	5.8	10	26.41	4120	156.02

ตารางที่ ค-21 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้น้ำมี
อายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	524	5.5	10	23.75	8250	347.42
	2	514	5.5	10	23.75	8170	344.05
	3	519	5.5	10	23.75	8510	358.37
C90GD10	1	514	5.7	10	25.50	7290	285.83
	2	514	5.7	9.8	25.50	7480	293.28
	3	514	5.7	10	25.50	7500	294.06
C80GD20	1	516	5.7	10	25.50	5930	232.51
	2	513	5.7	10	25.50	6480	254.07
	3	517	5.7	10	25.50	6350	248.97
C70GD30	1	522	5.7	10	25.50	5490	215.25
	2	506	5.7	10	25.50	5150	201.92
	3	515	5.7	10	25.50	5260	206.24
C60GD40	1	507	5.8	10	26.41	4850	183.66
	2	495	5.8	10	26.41	4870	184.42
	3	510	5.8	10	26.41	3700	140.11
C50GD50	1	514	5.8	10	26.41	3590	135.95
	2	516	5.8	10	26.41	3380	127.99
	3	513	5.8	10	26.41	3630	137.46

ตารางที่ ค-22 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 แชน้ำ ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	487	5.5	9.7	23.75	6200	261.09
	2	486	5.5	9.6	23.75	7100	298.99
	3	496	5.5	10	23.75	8300	349.53
C90GD10	1	500	5.6	10.2	24.62	6660	270.54
	2	515	5.6	9.9	24.62	6050	245.76
	3	497	5.6	10	24.62	7500	304.66
C80GD20	1	518	5.7	9.5	25.50	5850	229.37
	2	501	5.7	9.8	25.50	5350	209.77
	3	505	5.7	10	25.50	5500	215.65
C70GD30	1	487	5.7	9.8	25.50	4950	194.08
	2	486	5.7	10	25.50	4550	178.40
	3	496	5.7	10	25.50	4810	188.59
C60GD40	1	478	5.7	9.5	25.50	4280	167.81
	2	496	5.7	10.1	25.50	4440	174.09
	3	494	5.7	10	25.50	4100	160.75
C50GD50	1	425	5.8	10.2	26.41	3830	145.04
	2	504	5.8	10.2	26.41	3340	126.48
	3	495	5.8	9.9	26.41	2890	109.44

ตารางที่ ค-23 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไร่ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	513	5.5	10.1	23.75	6450	271.62
	2	516	5.5	9.9	23.75	6780	285.52
	3	510	5.5	9.7	23.75	6320	266.15
C90GD10	1	512	5.6	9.8	24.62	5550	225.45
	2	512	5.6	10.2	24.62	5960	242.10
	3	510	5.6	9.9	24.62	5650	229.51
C80GD20	1	517	5.7	9.8	25.50	5010	196.43
	2	534	5.7	9.7	25.50	5560	218.00
	3	520	5.7	9.7	25.50	4850	190.16
C70GD30	1	509	5.7	10	25.50	3860	151.34
	2	469	5.7	9.9	25.50	5050	198.00
	3	486	5.7	9.8	25.50	4760	186.63
C60GD40	1	519	5.7	9.6	25.50	4400	172.52
	2	498	5.7	10	25.50	3790	148.60
	3	500	5.7	9.9	25.50	3730	146.25
C50GD50	1	506	5.8	9.8	26.41	3330	126.10
	2	502	5.8	9.8	26.41	2950	111.71
	3	503	5.8	9.7	26.41	2850	107.92

ตารางที่ ค-24 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้นาน 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	516	5.6	9.8	24.62	3500	142.17
	2	519	5.6	10	24.62	7860	319.28
	3	512	5.6	10	24.62	7500	304.66
C90GD10	1	503	5.7	9.7	25.50	5720	224.27
	2	492	5.7	9.6	25.50	5830	228.59
	3	500	5.7	9.9	25.50	5530	216.82
C80GD20	1	512	5.7	9.7	25.50	5090	199.57
	2	506	5.7	9.3	25.50	5200	203.88
	3	502	5.7	9.8	25.50	4560	178.79
C70GD30	1	495	5.7	9.3	25.50	4110	161.15
	2	485	5.7	9.8	25.50	4260	167.03
	3	496	5.7	9.9	25.50	3760	147.42
C60GD40	1	489	5.8	9.9	26.41	2900	109.82
	2	492	5.8	10.1	26.41	3480	131.78
	3	494	5.8	9.8	26.41	3350	126.86
C50GD50	1	504	5.8	10.5	26.41	2800	106.03
	2	495	5.8	10.3	26.41	2560	96.94
	3	500	5.8	9.9	26.41	2915	110.39

ตารางที่ ค-25 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แฉ่น้ำไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	480	5.5	9.8	23.75	8925	375.85
	2	496	5.5	10	23.75	8340	351.21
	3	503	5.5	9.9	23.75	8125	342.16
C90GD10	1	516	5.5	9.8	23.75	7330	308.68
	2	504	5.5	9.8	23.75	7520	316.68
	3	510	5.5	10	23.75	7270	306.15
C80GD20	1	506	5.5	9.5	23.75	6310	265.73
	2	499	5.5	9.5	23.75	7020	295.63
	3	512	5.5	9.7	23.75	6800	286.36
C70GD30	1	497	5.5	9.8	23.75	5910	248.88
	2	503	5.5	10	23.75	5860	246.78
	3	508	5.5	9.7	23.75	5510	232.04
C60GD40	1	499	5.5	9.5	23.75	4530	190.77
	2	525	5.5	9.5	23.75	4460	187.82
	3	506	5.5	9.8	23.75	4950	208.45
C50GD50	1	534	5.5	9.8	23.75	3620	152.45
	2	504	5.5	9.9	23.75	5300	223.19
	3	504	5.5	10	23.75	4680	197.08

ตารางที่ ค-26 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	511	5.5	10	23.75	7770	327.21
	2	499	5.5	10	23.75	7450	313.73
	3	520	5.5	10	23.75	7600	320.05
C90GD10	1	514	5.5	10	23.75	6540	275.41
	2	500	5.5	10	23.75	6380	268.67
	3	520	5.5	10	23.75	6720	282.99
C80GD20	1	493	5.5	10	23.75	5730	241.30
	2	526	5.5	10	23.75	5860	246.78
	3	531	5.5	10	23.75	5930	249.72
C70GD30	1	526	5.5	10	23.75	4630	194.98
	2	455	5.5	10	23.75	4810	202.56
	3	523	5.5	10	23.75	4985	209.93
C60GD40	1	534	5.5	10	23.75	3750	157.92
	2	513	5.5	10	23.75	4060	170.97
	3	524	5.5	10	23.75	3950	166.34
C50GD50	1	497	5.5	10	23.75	2870	120.86
	2	520	5.5	10	23.75	3420	144.02
	3	529	5.5	10	23.75	3650	153.71

ตารางที่ ค-27 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	515	5.5	10	23.75	6870	289.31
	2	508	5.5	9.8	23.75	6920	291.41
	3	523	5.5	9.7	23.75	7130	300.26
C90GD10	1	513	5.5	9.7	23.75	6430	270.78
	2	525	5.5	10	23.75	6170	259.83
	3	521	5.5	9.9	23.75	5890	248.04
C80GD20	1	515	5.5	10	23.75	6180	260.25
	2	518	5.5	10	23.75	4960	208.88
	3	531	5.5	9.8	23.75	5010	210.98
C70GD30	1	523	5.5	10	23.75	3920	165.08
	2	525	5.5	9.9	23.75	4910	206.77
	3	538	5.5	10	23.75	3750	157.92
C60GD40	1	527	5.5	10	23.75	3680	154.97
	2	533	5.5	9.9	23.75	3450	145.29
	3	529	5.5	9.8	23.75	3360	141.50
C50GD50	1	539	5.5	9.9	23.75	3060	128.86
	2	547	5.5	10	23.75	2900	122.12
	3	531	5.5	9.7	23.75	3000	126.34

ตารางที่ ค-28 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	495	5.6	10	23.75	8890	374.37
	2	530	5.6	10	23.75	8780	369.74
	3	461	5.6	9.9	23.75	8210	345.74
C90GD10	1	503	5.7	9.8	25.50	8350	327.39
	2	504	5.7	10	25.50	7690	301.51
	3	502	5.7	9.8	25.50	8050	315.63
C80GD20	1	479	5.7	10	25.50	7670	300.73
	2	496	5.7	10	25.50	7000	274.46
	3	484	5.7	9.9	25.50	7250	284.26
C70GD30	1	478	5.7	10	25.50	6340	248.58
	2	503	5.7	9.8	25.50	6140	240.74
	3	500	5.7	10	25.50	6730	263.87
C60GD40	1	467	5.8	10	26.41	5950	225.32
	2	519	5.8	10	26.41	5120	193.89
	3	495	5.8	9.9	26.41	5670	214.71
C50GD50	1	498	5.8	9.8	26.41	5190	196.54
	2	513	5.8	9.8	26.41	4510	170.79
	3	504	5.8	10.5	26.41	4350	164.73

ตารางที่ ค-29 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	493	5.6	10	24.62	8950	363.56
	2	486	5.6	9.9	24.62	9070	368.44
	3	472	5.6	9.7	24.62	9120	370.47
C90GD10	1	470	5.7	9.8	25.50	8160	319.94
	2	488	5.7	10.1	25.50	7950	311.71
	3	469	5.7	9.7	25.50	8250	323.47
C80GD20	1	501	5.7	9.7	25.50	7240	283.87
	2	498	5.7	9.9	25.50	7530	295.24
	3	493	5.7	10	25.50	7050	276.42
C70GD30	1	504	5.7	10	25.50	5910	231.72
	2	501	5.7	9.8	25.50	6280	246.23
	3	494	5.7	9.7	25.50	6345	248.78
C60GD40	1	493	5.8	9.9	26.41	5000	189.34
	2	503	5.8	9.8	26.41	5200	196.91
	3	500	5.8	9.85	26.41	5330	201.84
C50GD50	1	517	5.8	9.9	26.41	4590	173.81
	2	526	5.8	10	26.41	4050	153.37
	3	476	5.8	10	26.41	3750	142.01

ตารางที่ ค-30 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้น้ำมี
อายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	505	5.6	9.9	24.62	8120	329.85
	2	498	5.6	9.8	24.62	8555	347.52
	3	483	5.6	9.7	24.62	8450	343.25
C90GD10	1	516	5.7	9.5	25.50	7270	285.05
	2	518	5.7	9.9	25.50	7540	295.63
	3	491	5.7	10.2	25.50	7650	299.95
C80GD20	1	507	5.7	10	25.50	6670	261.52
	2	505	5.7	10	25.50	6760	265.05
	3	489	5.7	9.8	25.50	6875	269.56
C70GD30	1	501	5.7	9.9	25.50	5650	221.53
	2	520	5.7	10.1	25.50	4700	184.28
	3	475	5.7	9.7	25.50	5325	208.79
C60GD40	1	512	5.8	10	26.41	4440	168.13
	2	510	5.8	9.9	26.41	3470	131.40
	3	484	5.8	10.1	26.41	4135	156.58
C50GD50	1	542	5.8	9.8	26.41	3190	120.80
	2	503	5.8	9.9	26.41	3600	136.33
	3	487	5.8	9.6	26.41	3280	124.21

ตารางที่ ค-31 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่น้ำ
ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	499	5.6	9.8	24.62	11500	467.15
	2	483	5.6	9.9	24.62	9850	400.12
	3	482	5.6	10.2	24.62	10500	426.52
C90GD10	1	497	5.7	10	25.50	9960	390.52
	2	512	5.7	9.9	25.50	9755	382.48
	3	503	5.7	9.8	25.50	10900	427.37
C80GD20	1	514	5.7	9.7	25.50	9350	366.60
	2	506	5.7	9.6	25.50	9215	361.31
	3	485	5.7	10.1	25.50	9455	370.72
C70GD30	1	515	5.7	10	25.50	8650	339.15
	2	495	5.7	9.9	25.50	8425	330.33
	3	447	5.7	9.8	25.50	8390	328.96
C60GD40	1	512	5.8	9.7	26.41	7850	297.27
	2	501	5.8	9.8	26.41	7560	286.28
	3	481	5.8	9.8	26.41	7930	300.29
C50GD50	1	501	5.8	10	26.41	6850	259.40
	2	482	5.8	10	26.41	7050	266.97
	3	491	5.8	9.9	26.41	6530	247.28

ตารางที่ ค-32 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4
ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	497	5.6	9.9	24.62	9940	403.78
	2	496	5.6	10	24.62	9530	387.12
	3	486	5.6	9.8	24.62	9450	383.87
C90GD10	1	516	5.7	9.7	25.50	8520	334.06
	2	518	5.7	9.8	25.50	8760	343.47
	3	463	5.7	10.2	25.50	8670	339.94
C80GD20	1	508	5.7	10.1	25.50	7500	294.06
	2	512	5.7	10	25.50	7460	292.50
	3	486	5.7	9.9	25.50	7860	308.18
C70GD30	1	515	5.7	9.8	25.50	6280	246.23
	2	498	5.7	9.8	25.50	6740	264.27
	3	499	5.7	9.7	25.50	6460	253.29
C60GD40	1	496	5.8	10	26.41	5820	220.39
	2	550	5.8	9.8	26.41	5400	204.49
	3	474	5.8	9.6	26.41	5110	193.51
C50GD50	1	512	5.8	10.1	26.41	4300	162.83
	2	521	5.8	10	26.41	4040	152.99
	3	490	5.8	9.8	26.41	4720	178.74

ตารางที่ ค-33 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	495	5.6	10	24.62	9270	376.56
	2	493.5	5.6	9.9	24.62	9280	376.97
	3	478	5.6	9.8	24.62	9610	390.37
C90GD10	1	487	5.7	9.7	25.50	8410	329.74
	2	499	5.7	10	25.50	8370	328.18
	3	467	5.7	9.8	25.50	8430	330.53
C80GD20	1	488	5.7	9.9	25.50	7570	296.81
	2	496	5.7	9.8	25.50	7310	286.61
	3	493	5.7	10.1	25.50	6350	248.97
C70GD30	1	495	5.7	10	25.50	5230	205.06
	2	503	5.7	9.8	25.50	5850	229.37
	3	491	5.7	9.6	25.50	5860	229.76
C60GD40	1	516	5.8	9.8	26.41	4630	175.33
	2	520	5.8	9.7	26.41	4180	158.29
	3	481	5.8	10	26.41	4940	187.07
C50GD50	1	521	5.8	10	26.41	3880	146.93
	2	517	5.8	9.9	26.41	3550	134.43
	3	463	5.8	9.8	26.41	3750	142.01

ตารางที่ ค-34 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 แชน้ำ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	510	5.6	9.8	24.62	6770	275.01
	2	515	5.6	9.9	24.62	8970	364.37
	3	496	5.6	10	24.62	9600	389.96
C90GD10	1	514	5.7	10	25.50	6950	272.50
	2	524	5.7	10	25.50	7510	294.46
	3	478	5.7	9.8	25.50	7140	279.95
C80GD20	1	495	5.7	9.6	25.50	6160	241.52
	2	501	5.7	10	25.50	6440	252.50
	3	483	5.7	10.2	25.50	6330	248.19
C70GD30	1	519	5.7	9.9	25.50	6010	235.64
	2	528	5.7	10.1	25.50	5370	210.55
	3	472	5.7	9.8	25.50	5730	224.66
C60GD40	1	495	5.8	9.7	26.41	4440	168.13
	2	495	5.8	9.75	26.41	4350	164.73
	3	479	5.8	9.9	26.41	4750	179.87
C50GD50	1	512	5.8	10	26.41	3780	143.14
	2	507	5.8	9.8	26.41	3940	149.20
	3	480	5.8	9.9	26.41	3590	135.95

ตารางที่ ค-35 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4
ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm^2)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	507	5.6	9.9	24.62	7410	301.00
	2	508	5.6	10	24.62	7520	305.47
	3	506	5.6	9.8	24.62	7750	314.82
C90GD10	1	536	5.7	9.6	25.50	6020	236.04
	2	529	5.7	9.8	25.50	6780	265.83
	3	520	5.7	9.7	25.50	6460	253.29
C80GD20	1	513	5.7	10	25.50	5530	216.82
	2	526	5.7	10.1	25.50	5600	219.57
	3	515	5.7	9.9	25.50	5850	229.37
C70GD30	1	528	5.7	9.8	25.50	4910	192.51
	2	513	5.7	9.6	25.50	4560	178.79
	3	517	5.7	9.8	25.50	4610	180.75
C60GD40	1	521	5.8	10.2	26.41	3780	143.14
	2	495	5.8	9.9	26.41	3940	149.20
	3	508	5.8	9.8	26.41	3450	130.65
C50GD50	1	512	5.8	9.7	26.41	3440	130.27
	2	512	5.8	9.8	26.41	2910	110.20
	3	503	5.8	9.9	26.41	3010	113.98

ตารางที่ ค-36 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (g)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	แรงอัด (kg)	กำลังอัด (ksc)
C100GD0	1	512	5.6	10	24.62	6420	260.79
	2	492	5.6	9.9	24.62	6890	279.88
	3	498	5.6	9.8	24.62	6730	273.38
C90GD10	1	494	5.7	10.1	25.50	5660	221.92
	2	564	5.7	9.8	25.50	5990	234.86
	3	523	5.7	9.7	25.50	5410	212.12
C80GD20	1	524	5.7	9.9	25.50	4720	185.06
	2	511	5.7	9.8	25.50	4670	183.10
	3	515	5.7	9.6	25.50	5570	218.39
C70GD30	1	512	5.7	10.2	25.50	3810	149.38
	2	501	5.7	9.9	25.50	3770	147.82
	3	504	5.7	9.8	25.50	3950	154.87
C60GD40	1	524	5.8	9.9	26.41	3270	123.83
	2	511	5.8	10	26.41	3140	118.91
	3	515	5.8	9.7	26.41	3450	130.65
C50GD50	1	504	5.8	10.2	26.41	2510	95.05
	2	516	5.8	9.9	26.41	2970	112.47
	3	510	5.8	9.8	26.41	2750	104.14

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

ตารางที่ ง-1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่น้ำไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	474	473	0.211	0.27
	2	5.5	10	493	492	0.203	
	3	5.5	9.8	498	496	0.402	
C90GD10	1	5.5	10	511	510.2	0.157	0.25
	2	5.5	10	501	499.5	0.299	
	3	5.5	9.9	505	503.5	0.297	
C80GD20	1	5.5	9.8	501	500	0.200	0.23
	2	5.5	9.8	497	496	0.201	
	3	5.5	9.8	503	501.5	0.298	
C70GD30	1	5.5	9.7	486	485	0.206	0.20
	2	5.5	9.9	502	501	0.199	
	3	5.5	10	497	496	0.201	
C60GD40	1	5.5	9.8	493	492	0.203	0.17
	2	5.5	9.6	522	521.3	0.134	
	3	5.5	9.9	508	507.1	0.177	
C50GD50	1	5.5	10	513	512.3	0.136	0.15
	2	5.5	9.7	484	483.5	0.103	
	3	5.5	9.7	493	492	0.203	

ตารางที่ ง-2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ Na_2SO_4
ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	495	490	1.010	0.95
	2	5.5	9.5	494	489	1.012	
	3	5.5	10	490	486	0.816	
C90GD10	1	5.5	9.6	505	500	0.990	0.92
	2	5.5	9.8	491	486.5	0.916	
	3	5.5	10	471	467	0.849	
C80GD20	1	5.5	9.9	489	484	1.022	0.90
	2	5.5	10	516	511.5	0.872	
	3	5.5	9.95	495	491	0.808	
C70GD30	1	5.5	10	516	512	0.775	0.87
	2	5.5	10	448	444	0.893	
	3	5.5	10	474	469.5	0.949	
C60GD40	1	5.5	10	523	518	0.956	0.85
	2	5.5	10	504	500	0.794	
	3	5.5	10	494	490	0.810	
C50GD50	1	5.5	10	490	486	0.816	0.82
	2	5.5	10	510	506	0.784	
	3	5.5	10	467	463	0.857	

ตารางที่ ง-3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ MgSO_4 ไว้นาน 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	507	501	1.183	1.25
	2	5.5	9.8	497	490.5	1.308	
	3	5.5	10	513	506.5	1.267	
C90GD10	1	5.5	9.7	507	501	1.183	1.22
	2	5.5	10	497	491	1.207	
	3	5.5	10	513	506.5	1.267	
C80GD20	1	5.5	10	503	498	0.994	1.18
	2	5.5	10	507	500	1.381	
	3	5.5	10	520	514	1.154	
C70GD30	1	5.5	10	513	507	1.170	1.13
	2	5.5	9.9	515	508.5	1.262	
	3	5.5	10	520	515	0.962	
C60GD40	1	5.5	10	512	508	0.781	1.10
	2	5.5	9.9	517	510	1.354	
	3	5.5	10	520	514	1.154	
C50GD50	1	5.5	9.9	519	514	0.963	1.05
	2	5.5	10	527	521.5	1.044	
	3	5.5	10	526	520	1.141	

ตารางที่ ง-4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	490	489	0.204	0.25
	2	5.6	10	527	525.5	0.285	
	3	5.6	10	500	498.7	0.260	
C90GD10	1	5.7	9.8	498	497	0.201	0.23
	2	5.7	10	501	499.5	0.299	
	3	5.7	9.1	505	504	0.198	
C80GD20	1	5.7	10	475	474	0.211	0.20
	2	5.7	10	491	490	0.204	
	3	5.7	9.8	501	500	0.200	
C70GD30	1	5.7	10	474	473.3	0.148	0.18
	2	5.7	9.8	500	499	0.200	
	3	5.7	9.4	504	503	0.198	
C60GD40	1	5.8	10	466	465.3	0.150	0.15
	2	5.8	10	515	514	0.194	
	3	5.8	9.5	495	494.5	0.101	
C50GD50	1	5.8	9.8	488	487.5	0.102	0.13
	2	5.8	9.8	512	511	0.195	
	3	5.8	10	502	501.5	0.100	

ตารางที่ ง-5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนักหลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	482	478	0.830	0.89
	2	5.6	9.8	501	495.8	1.038	
	3	5.6	10.0	506	502	0.791	
C90GD10	1	5.7	9.7	492	487.8	0.854	0.86
	2	5.7	9.9	491	487	0.815	
	3	5.7	9.9	500	495.5	0.900	
C80GD20	1	5.7	10.0	493	489	0.811	0.83
	2	5.7	9.8	489	485	0.818	
	3	5.7	9.7	469	465	0.853	
C70GD30	1	5.7	9.9	496	492	0.806	0.79
	2	5.7	9.8	492	487.5	0.915	
	3	5.7	9.8	471	468	0.637	
C60GD40	1	5.8	9.8	486	482.5	0.720	0.77
	2	5.8	9.9	495	491	0.808	
	3	5.8	10.0	506	502	0.791	
C50GD50	1	5.8	10.0	515	511	0.777	0.75
	2	5.8	9.9	525	521.5	0.667	
	3	5.8	9.9	503	499	0.795	

ตารางที่ ง-6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนักหลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	495	489	-1.150	1.15
	2	5.6	9.75	488	483	-1.100	
	3	5.6	9.8	506	500	-1.200	
C90GD10	1	5.7	10	509	503	-1.125	1.10
	2	5.7	9.8	507	502	-1.050	
	3	5.7	9.7	509	503	-1.115	
C80GD20	1	5.7	9.8	493	488	-1.000	1.04
	2	5.7	10	497	492	-0.975	
	3	5.7	9.9	504	498	-1.150	
C70GD30	1	5.7	9.85	491	486	-1.045	0.99
	2	5.7	9.9	508	503	-0.965	
	3	5.7	9.8	512	507	-0.957	
C60GD40	1	5.8	10	500	495	-0.975	0.97
	2	5.8	9.9	498	493	-0.950	
	3	5.8	9.9	510	505	-0.980	
C50GD50	1	5.8	9.7	523	518	-0.950	0.95
	2	5.8	9.9	495	490	-0.945	
	3	5.8	9.8	519	514	-0.950	

ตารางที่ ง-7 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่น้ำ ไว้ให้มี อายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	497	496	-0.215	0.20
	2	5.6	9.75	480	479	-0.198	
	3	5.6	10	471	470	-0.200	
C90GD10	1	5.7	9.8	493	492	-0.195	0.19
	2	5.7	9.9	508	507	-0.185	
	3	5.7	9.9	500	499	-0.200	
C80GD20	1	5.7	9.75	511	510	-0.185	0.18
	2	5.7	9.8	503	502	-0.176	
	3	5.7	9.7	505	504	-0.180	
C70GD30	1	5.7	10	515	514	-0.165	0.16
	2	5.7	9.9	487	486	-0.145	
	3	5.7	9.8	502	501	-0.155	
C60GD40	1	5.8	9.6	512	511	-0.125	0.12
	2	5.8	9.7	495	494	-0.115	
	3	5.8	9.9	501	500	-0.130	
C50GD50	1	5.8	10	497	497	-0.100	0.10
	2	5.8	9.9	477	476	-0.109	
	3	5.8	9.7	502	502	-0.099	

ตารางที่ ง-8 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไร่ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	485	481	-0.885	0.85
	2	5.6	9.7	500	496	-0.795	
	3	5.6	9.8	505	501	-0.865	
C90GD10	1	5.7	9.8	484	480	-0.825	0.83
	2	5.7	9.8	466	462	-0.845	
	3	5.7	9.9	496	492	-0.815	
C80GD20	1	5.7	9.8	504	500	-0.765	0.79
	2	5.7	9.7	500	496	-0.800	
	3	5.7	10	510	506	-0.795	
C70GD30	1	5.7	9.9	480	476	-0.765	0.76
	2	5.7	9.8	499	495	-0.715	
	3	5.7	9.9	509	505	-0.785	
C60GD40	1	5.8	10	508	504	-0.745	0.72
	2	5.8	10	501	497	-0.735	
	3	5.8	9.9	512	509	-0.665	
C50GD50	1	5.8	9.8	514	511	-0.630	0.68
	2	5.8	9.7	503	500	-0.655	
	3	5.8	9.9	517	513	-0.745	

ตารางที่ ง-9 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	490	484	-1.125	1.06
	2	5.6	9.9	488	484	-0.900	
	3	5.6	10	494	488	-1.150	
C90GD10	1	5.7	9.8	482	477	-0.955	0.97
	2	5.7	9.9	491	486	-0.985	
	3	5.7	9.7	500	495	-0.965	
C80GD20	1	5.7	9.75	486	481	-0.950	0.95
	2	5.7	9.8	490	485	-0.945	
	3	5.7	9.9	500	495	-0.965	
C70GD30	1	5.7	9.8	490	485	-0.937	0.93
	2	5.7	9.9	498	493	-0.915	
	3	5.7	10	510	505	-0.925	
C60GD40	1	5.8	10	512	507	-0.910	0.90
	2	5.8	10	512	507	-0.895	
	3	5.8	9.9	515	510	-0.885	
C50GD50	1	5.8	9.8	514	510	-0.857	0.87
	2	5.8	9.8	508	504	-0.885	
	3	5.8	9.7	512	508	-0.855	

ตารางที่ ง-10 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่น้ำ ไว้ให้มี อายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	515	514	-0.180	0.18
	2	5.6	9.7	520	519	-0.190	
	3	5.6	9.7	512	511	-0.170	
C90GD10	1	5.7	9.8	531	530	-0.165	0.16
	2	5.7	9.9	527	526	-0.150	
	3	5.7	10	524	523	-0.155	
C80GD20	1	5.7	10	505	504	-0.140	0.14
	2	5.7	9.9	506	505	-0.150	
	3	5.7	9.8	510	509	-0.125	
C70GD30	1	5.7	9.7	522	521	-0.135	0.13
	2	5.7	9.6	522	521	-0.129	
	3	5.7	10	518	517	-0.140	
C60GD40	1	5.8	9.9	527	526	-0.100	0.10
	2	5.8	9.8	525	525	-0.095	
	3	5.8	9.9	519	518	-0.110	
C50GD50	1	5.8	10	510	510	-0.080	0.08
	2	5.8	9.9	497	497	-0.075	
	3	5.8	9.8	506	506	-0.090	

ตารางที่ ง-11 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไร่ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	507	503	-0.800	0.80
	2	5.6	9.9	508	504	-0.800	
	3	5.6	10	510	506	-0.800	
C90GD10	1	5.7	9.9	513	509	-0.770	0.77
	2	5.7	9.8	526	522	-0.780	
	3	5.7	9.8	504	500	-0.760	
C80GD20	1	5.7	9.7	513	509	-0.740	0.74
	2	5.7	10	526	522	-0.755	
	3	5.7	9.9	504	500	-0.735	
C70GD30	1	5.7	9.6	528	524	-0.700	0.69
	2	5.7	9.8	513	509	-0.705	
	3	5.7	9.8	522	519	-0.655	
C60GD40	1	5.8	10	521	518	-0.630	0.63
	2	5.8	9.9	495	492	-0.622	
	3	5.8	9.8	501	498	-0.625	
C50GD50	1	5.8	9.9	512	509	-0.610	0.60
	2	5.8	10	512	509	-0.605	
	3	5.8	9.9	515	512	-0.590	

ตารางที่ ง-12 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 7 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	512	507	-0.907	0.90
	2	5.6	9.9	492	488	-0.905	
	3	5.6	9.9	506	501	-0.895	
C90GD10	1	5.7	9.8	494	490	-0.875	0.87
	2	5.7	9.8	564	559	-0.880	
	3	5.7	9.7	525	521	-0.845	
C80GD20	1	5.7	10	524	520	-0.850	0.84
	2	5.7	10	511	507	-0.830	
	3	5.7	9.9	507	503	-0.850	
C70GD30	1	5.7	9.9	512	508	-0.810	0.80
	2	5.7	9.8	501	497	-0.800	
	3	5.7	10	517	513	-0.780	
C60GD40	1	5.8	10	507	503	-0.765	0.76
	2	5.8	9.9	499	495	-0.755	
	3	5.8	9.7	512	508	-0.766	
C50GD50	1	5.8	9.8	504	500	-0.735	0.73
	2	5.8	10	516	512	-0.720	
	3	5.8	9.7	497	493	-0.745	

ตารางที่ ง-13 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่น้ำไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	489	487	-0.350	0.35
	2	5.5	9.8	478	476	-0.350	
	3	5.5	10	492	490	-0.350	
C90GD10	1	5.5	9.85	502	500	-0.330	0.32
	2	5.5	9.9	492	490	-0.350	
	3	5.5	10	509	508	-0.285	
C80GD20	1	5.5	10	471	470	-0.295	0.30
	2	5.5	9.9	486	485	-0.305	
	3	5.5	10	497	496	-0.295	
C70GD30	1	5.5	9.8	489	488	-0.275	0.28
	2	5.5	10	479	478	-0.280	
	3	5.5	9.8	481	480	-0.285	
C60GD40	1	5.5	10	468	467	-0.235	0.24
	2	5.5	10	501	500	-0.245	
	3	5.5	9.8	499	498	-0.250	
C50GD50	1	5.5	9.7	514	513	-0.200	0.20
	2	5.5	10	500	499	-0.200	
	3	5.5	9.9	518	517	-0.200	

ตารางที่ ง-14 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	489	480	-1.810	1.79
	2	5.5	10	508	499	-1.800	
	3	5.5	9.9	502	493	-1.750	
C90GD10	1	5.5	10	481	473	-1.705	1.72
	2	5.5	10	490	481	-1.745	
	3	5.5	9.8	501	492	-1.715	
C80GD20	1	5.5	9.7	511	503	-1.621	1.64
	2	5.5	10	495	487	-1.675	
	3	5.5	10	510	502	-1.610	
C70GD30	1	5.5	10	516	508	-1.550	1.58
	2	5.5	9.8	495	487	-1.600	
	3	5.5	9.9	512	504	-1.595	
C60GD40	1	5.5	10	510	503	-1.435	1.53
	2	5.5	9.8	495	487	-1.600	
	3	5.5	9.8	521	513	-1.550	
C50GD50	1	5.5	10	516	508	-1.500	1.51
	2	5.5	10	518	510	-1.495	
	3	5.5	9.9	522	514	-1.524	

ตารางที่ ง-15 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	510	500	-1.950	1.92
	2	5.5	9.8	498	489	-1.900	
	3	5.5	9.7	513	503	-1.900	
C90GD10	1	5.5	9.7	501	492	-1.890	1.88
	2	5.5	10	506	497	-1.850	
	3	5.5	9.9	515	505	-1.895	
C80GD20	1	5.5	10	501	492	-1.860	1.86
	2	5.5	10	509	500	-1.856	
	3	5.5	9.8	521	511	-1.865	
C70GD30	1	5.5	10	512	503	-1.800	1.79
	2	5.5	9.9	511	502	-1.795	
	3	5.5	10	515	506	-1.775	
C60GD40	1	5.5	10	513	504	-1.750	1.75
	2	5.5	9.9	524	516	-1.600	
	3	5.5	9.8	525	515	-1.885	
C50GD50	1	5.5	9.9	526	517	-1.700	1.71
	2	5.5	10	532	523	-1.695	
	3	5.5	9.7	523	514	-1.725	

ตารางที่ ง-16 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การเปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การเปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	498	496	-0.33	0.32
	2	5.5	10	498	497	-0.295	
	3	5.5	10	487	485	-0.325	
C90GD10	1	5.7	9.8	484	483	-0.293	0.30
	2	5.7	10	452	451	-0.298	
	3	5.7	9.7	488	487	-0.300	
C80GD20	1	5.7	10	492	491	-0.285	0.27
	2	5.7	10	502	501	-0.278	
	3	5.7	10	493	492	-0.260	
C70GD30	1	5.7	10	495	494	-0.230	0.24
	2	5.7	9.8	502	501	-0.245	
	3	5.7	10	496	495	-0.240	
C60GD40	1	5.8	10	493	492	-0.199	0.21
	2	5.8	10	448	447	-0.225	
	3	5.8	10	493	492	-0.205	
C50GD50	1	5.8	9.8	506	505	-0.175	0.18
	2	5.8	9.8	501	500	-0.180	
	3	5.8	9.9	493	492	-0.195	

ตารางที่ ง-17 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแก่ Na_2SO_4 ไวให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	9.7	496	490	-1.300	1.40
	2	5.5	10	512	505	-1.350	
	3	5.5	10	508	500	-1.555	
C90GD10	1	5.7	9.7	500	493	-1.395	1.37
	2	5.7	9.8	504	497	-1.325	
	3	5.7	10	510	503	-1.400	
C80GD20	1	5.7	9.7	509	502	-1.315	1.32
	2	5.7	10	497	490	-1.345	
	3	5.7	10	502	495	-1.305	
C70GD30	1	5.7	9.9	502	496	-1.275	1.28
	2	5.7	9.8	501	495	-1.265	
	3	5.7	10	505	498	-1.295	
C60GD40	1	5.8	10	498	492	-1.245	1.25
	2	5.8	9.8	498	492	-1.240	
	3	5.8	10	499	493	-1.255	
C50GD50	1	5.8	9.9	508	502	-1.215	1.22
	2	5.8	10	500	494	-1.205	
	3	5.8	9.9	518	512	-1.225	

ตารางที่ ง-18 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	481	473	-1.715	1.70
	2	5.6	9.7	509	500	-1.685	
	3	5.6	9.9	460	452	-1.695	
C90GD10	1	5.7	9.8	511	502	-1.675	1.67
	2	5.7	9.9	503	495	-1.658	
	3	5.7	10	478	470	-1.665	
C80GD20	1	5.7	9.8	497	489	-1.625	1.62
	2	5.7	9.8	510	502	-1.645	
	3	5.7	9.8	471	463	-1.600	
C70GD30	1	5.7	10	503	495	-1.570	1.57
	2	5.7	9.7	494	486	-1.550	
	3	5.7	9.8	469	462	-1.595	
C60GD40	1	5.8	9.8	497	489	-1.630	1.55
	2	5.8	9.7	510	502	-1.515	
	3	5.8	9.8	479	472	-1.500	
C50GD50	1	5.8	10	530	522	-1.522	1.52
	2	5.8	10	503	495	-1.495	
	3	5.8	10	527	519	-1.530	

ตารางที่ ง-19 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่น้ำ
ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	9.8	477	475	-0.315	0.31
	2	5.5	10	487	486	-0.300	
	3	5.5	9.9	497	495	-0.310	
C90GD10	1	5.7	10	497	496	-0.275	0.27
	2	5.7	9.7	496	495	-0.280	
	3	5.7	9.9	499	498	-0.265	
C80GD20	1	5.7	9.8	498	497	-0.300	0.25
	2	5.7	9.9	498	497	-0.215	
	3	5.7	10	463	462	-0.245	
C70GD30	1	5.7	9.8	483	482	-0.235	0.22
	2	5.7	10	490	489	-0.225	
	3	5.7	9.8	500	499	-0.195	
C60GD40	1	5.8	9.8	483	482	-0.195	0.20
	2	5.8	9.7	495	494	-0.189	
	3	5.8	10	500	499	-0.225	
C50GD50	1	5.8	10	488	487	-0.160	0.17
	2	5.8	9.9	486	485	-0.175	
	3	5.8	9.8	510	509	-0.183	

ตารางที่ ง-20 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	496	490	-1.215	1.23
	2	5.5	10	508	502	-1.145	
	3	5.5	10	512	505	-1.335	
C90GD10	1	5.7	10	504	498	-1.200	1.19
	2	5.7	9.8	542	536	-1.180	
	3	5.7	9.9	526	520	-1.200	
C80GD20	1	5.7	10	503	497	-1.160	1.16
	2	5.7	9.8	506	500	-1.175	
	3	5.7	10	502	496	-1.142	
C70GD30	1	5.7	9.8	498	492	-1.155	1.11
	2	5.7	10	504	499	-1.050	
	3	5.7	10	512	506	-1.128	
C60GD40	1	5.8	10	495	490	-1.050	1.08
	2	5.8	9.7	472	467	-1.085	
	3	5.8	10	500	495	-1.100	
C50GD50	1	5.8	10	508	503	-0.995	0.96
	2	5.8	9.9	512	508	-0.875	
	3	5.8	10	509	504	-1.000	

ตารางที่ ง-21 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	524	517	-1.390	1.39
	2	5.5	10	514	507	-1.405	
	3	5.5	10	519	512	-1.385	
C90GD10	1	5.7	10	514	507	-1.375	1.36
	2	5.7	9.8	514	507	-1.355	
	3	5.7	10	514	507	-1.350	
C80GD20	1	5.7	10	516	509	-1.333	1.32
	2	5.7	10	513	506	-1.325	
	3	5.7	10	517	510	-1.315	
C70GD30	1	5.7	10	522	515	-1.285	1.27
	2	5.7	10	506	499	-1.295	
	3	5.7	10	515	509	-1.230	
C60GD40	1	5.8	10	507	501	-1.235	1.25
	2	5.8	10	495	489	-1.265	
	3	5.8	10	510	504	-1.250	
C50GD50	1	5.8	10	514	508	-1.195	1.21
	2	5.8	10	516	510	-1.200	
	3	5.8	10	513	507	-1.220	

ตารางที่ ง-22 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 แชน้ำ ไว้ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	9.7	487	486	-0.270	0.27
	2	5.5	9.6	486	485	-0.250	
	3	5.5	10	496	495	-0.284	
C90GD10	1	5.6	10.2	500	499	-0.250	0.24
	2	5.6	9.9	515	514	-0.260	
	3	5.6	10	497	496	-0.220	
C80GD20	1	5.7	9.5	518	517	-0.210	0.20
	2	5.7	9.8	501	500	-0.200	
	3	5.7	10	505	504	-0.190	
C70GD30	1	5.7	9.8	487	486	-0.185	0.17
	2	5.7	10	486	485	-0.170	
	3	5.7	10	496	495	-0.165	
C60GD40	1	5.7	9.5	478	477	-0.140	0.15
	2	5.7	10.1	496	495	-0.160	
	3	5.7	10	494	493	-0.150	
C50GD50	1	5.8	10.2	425	424	-0.130	0.12
	2	5.8	10.2	504	503	-0.125	
	3	5.8	9.9	495	494	-0.110	

ตารางที่ ง-23 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไร่ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10.1	513	507	-1.110	1.12
	2	5.5	9.9	516	511	-1.050	
	3	5.5	9.7	510	504	-1.198	
C90GD10	1	5.6	9.8	512	506	-1.100	1.08
	2	5.6	10.2	512	506	-1.150	
	3	5.6	9.9	510	505	-1.000	
C80GD20	1	5.7	9.8	517	512	-1.050	1.05
	2	5.7	9.7	534	528	-1.064	
	3	5.7	9.7	520	515	-1.043	
C70GD30	1	5.7	10	509	504	-1.022	1.03
	2	5.7	9.9	469	464	-1.030	
	3	5.7	9.8	486	481	-1.030	
C60GD40	1	5.7	9.6	519	514	-1.000	0.98
	2	5.7	10	498	493	-0.970	
	3	5.7	9.9	500	495	-0.980	
C50GD50	1	5.8	9.8	506	501	-0.900	0.90
	2	5.8	9.8	502	497	-0.905	
	3	5.8	9.7	503	499	-0.880	

ตารางที่ ง-24 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไร่ให้มีอายุ 14 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.8	516	510	-1.220	1.22
	2	5.6	10	519	513	-1.198	
	3	5.6	10	512	506	-1.240	
C90GD10	1	5.7	9.7	503	497	-1.200	1.20
	2	5.7	9.6	492	486	-1.196	
	3	5.7	9.9	500	494	-1.190	
C80GD20	1	5.7	9.7	512	506	-1.190	1.18
	2	5.7	9.3	506	500	-1.185	
	3	5.7	9.8	502	496	-1.175	
C70GD30	1	5.7	9.3	495	489	-1.155	1.15
	2	5.7	9.8	485	479	-1.170	
	3	5.7	9.9	496	490	-1.130	
C60GD40	1	5.8	9.9	489	483	-1.125	1.12
	2	5.8	10.1	492	486	-1.130	
	3	5.8	9.8	494	489	-1.110	
C50GD50	1	5.8	10.5	504	499	-1.050	1.04
	2	5.8	10.3	495	490	-1.067	
	3	5.8	9.9	500	495	-1.000	

ตารางที่ ง-25 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่น้ำไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	9.8	480	478	-0.500	0.50
	2	5.5	10	496	494	-0.500	
	3	5.5	9.9	503	500	-0.500	
C90GD10	1	5.5	9.8	516	514	-0.470	0.47
	2	5.5	9.8	504	502	-0.470	
	3	5.5	10	510	508	-0.470	
C80GD20	1	5.5	9.5	506	504	-0.430	0.43
	2	5.5	9.5	499	497	-0.410	
	3	5.5	9.7	512	510	-0.440	
C70GD30	1	5.5	9.8	497	495	-0.370	0.38
	2	5.5	10	503	501	-0.385	
	3	5.5	9.7	508	506	-0.395	
C60GD40	1	5.5	9.5	499	497	-0.319	0.34
	2	5.5	9.5	525	523	-0.345	
	3	5.5	9.8	506	504	-0.368	
C50GD50	1	5.5	9.8	534	532	-0.300	0.30
	2	5.5	9.9	504	502	-0.300	
	3	5.5	10	504	502	-0.300	

ตารางที่ ง-26 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ Na_2SO_4 ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	511	500	-2.150	2.07
	2	5.5	10	499	489	-2.000	
	3	5.5	10	520	509	-2.050	
C90GD10	1	5.5	10	514	504	-1.975	1.96
	2	5.5	10	500	490	-1.950	
	3	5.5	10	520	510	-1.955	
C80GD20	1	5.5	10	493	484	-1.920	1.92
	2	5.5	10	526	516	-1.915	
	3	5.5	10	531	521	-1.914	
C70GD30	1	5.5	10	526	516	-1.885	1.87
	2	5.5	10	455	447	-1.835	
	3	5.5	10	523	513	-1.900	
C60GD40	1	5.5	10	534	524	-1.835	1.84
	2	5.5	10	513	504	-1.850	
	3	5.5	10	524	514	-1.825	
C50GD50	1	5.5	10	497	488	-1.790	1.80
	2	5.5	10	520	511	-1.800	
	3	5.5	10	529	519	-1.805	

ตารางที่ ง-27 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.5	10	515	503	-2.250	2.20
	2	5.5	9.8	508	497	-2.150	
	3	5.5		523	512	-2.198	
C90GD10	1	5.5	9.7	513	502	-2.200	2.19
	2	5.5	10	525	514	-2.180	
	3	5.5		521	510	-2.190	
C80GD20	1	5.5	10	515	504	-2.155	2.17
	2	5.5	10	518	507	-2.170	
	3	5.5		531	519	-2.195	
C70GD30	1	5.5	10	523	512	-2.160	2.14
	2	5.5	9.9	525	514	-2.150	
	3	5.5		538	527	-2.110	
C60GD40	1	5.5	10	527	516	-2.115	2.11
	2	5.5	9.9	533	522	-2.100	
	3	5.5		529	518	-2.115	
C50GD50	1	5.5	9.9	539	527	-2.150	2.05
	2	5.5	10	547	536	-1.995	
	3	5.5		531	520	-2.000	

ตารางที่ ง-28 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแช่น้ำ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การเปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การเปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	495	493	-0.450	0.45
	2	5.6	10	530	528	-0.435	
	3	5.6	9.9	461	459	-0.465	
C90GD10	1	5.7	9.8	503	501	-0.410	0.40
	2	5.7	10	504	502	-0.400	
	3	5.7	9.8	502	500	-0.395	
C80GD20	1	5.7	10	479	477	-0.395	0.38
	2	5.7	10	496	494	-0.375	
	3	5.7	9.9	484	482	-0.355	
C70GD30	1	5.7	10	478	476	-0.335	0.33
	2	5.7	9.8	503	501	-0.355	
	3	5.7	10	500	499	-0.300	
C60GD40	1	5.8	10	467	466	-0.295	0.29
	2	5.8	10	519	517	-0.300	
	3	5.8	9.9	495	494	-0.285	
C50GD50	1	5.8	9.8	498	497	-0.255	0.26
	2	5.8	9.8	513	512	-0.245	
	3	5.8	10.5	504	503	-0.265	

ตารางที่ ง-29 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสแก่ Na_2SO_4 ไวให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	493	483	-1.955	1.86
	2	5.6	9.9	486	477	-1.845	
	3	5.6	9.7	472	464	-1.785	
C90GD10	1	5.7	9.8	470	461	-1.820	1.82
	2	5.7	10.1	488	479	-1.815	
	3	5.7	9.7	469	460	-1.835	
C80GD20	1	5.7	9.7	501	492	-1.800	1.80
	2	5.7	9.9	498	489	-1.810	
	3	5.7	10	493	484	-1.795	
C70GD30	1	5.7	10	504	495	-1.790	1.77
	2	5.7	9.8	501	492	-1.765	
	3	5.7	9.7	494	485	-1.750	
C60GD40	1	5.8	9.9	493	484	-1.745	1.74
	2	5.8	9.8	503	494	-1.735	
	3	5.8	9.85	500	491	-1.750	
C50GD50	1	5.8	9.9	517	508	-1.695	1.70
	2	5.8	10	526	517	-1.700	
	3	5.8	10	476	468	-1.715	

ตารางที่ ง-30 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไร่ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	505	495	-2.050	2.05
	2	5.6	9.8	498	487	-2.150	
	3	5.6	9.7	483	474	-1.950	
C90GD10	1	5.7	9.5	516	506	-1.950	1.98
	2	5.7	9.9	518	508	-1.975	
	3	5.7	10.2	491	481	-2.000	
C80GD20	1	5.7	10	507	497	-1.950	1.94
	2	5.7	10	505	495	-1.945	
	3	5.7	9.8	489	480	-1.935	
C70GD30	1	5.7	9.9	501	491	-1.915	1.91
	2	5.7	10.1	520	510	-1.900	
	3	5.7	9.7	475	466	-1.925	
C60GD40	1	5.8	10	512	502	-1.865	1.86
	2	5.8	9.9	510	500	-1.875	
	3	5.8	10.1	484	475	-1.825	
C50GD50	1	5.8	9.8	542	532	-1.850	1.83
	2	5.8	9.9	503	494	-1.800	
	3	5.8	9.6	487	478	-1.835	

ตารางที่ ง-31 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่น้ำ
ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.8	499	497	-0.430	0.42
	2	5.6	9.9	483	481	-0.425	
	3	5.6	10.2	482	480	-0.400	
C90GD10	1	5.7	10	497	495	-0.355	0.38
	2	5.7	9.9	512	510	-0.395	
	3	5.7	9.8	503	501	-0.400	
C80GD20	1	5.7	9.7	514	512	-0.300	0.34
	2	5.7	9.6	506	504	-0.340	
	3	5.7	10.1	485	483	-0.370	
C70GD30	1	5.7	10	515	513	-0.300	0.30
	2	5.7	9.9	495	494	-0.300	
	3	5.7	9.8	447	446	-0.300	
C60GD40	1	5.8	9.7	512	511	-0.255	0.26
	2	5.8	9.8	501	500	-0.270	
	3	5.8	9.8	481	480	-0.250	
C50GD50	1	5.8	10	501	500	-0.220	0.21
	2	5.8	10	482	481	-0.195	
	3	5.8	9.9	491	490	-0.215	

ตารางที่ ง-32 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไร่ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	497	489	-1.600	1.58
	2	5.6	10	496	488	-1.585	
	3	5.6	9.8	486	478	-1.545	
C90GD10	1	5.7	9.7	516	508	-1.515	1.53
	2	5.7	9.8	518	510	-1.550	
	3	5.7	10.2	463	456	-1.535	
C80GD20	1	5.7	10.1	508	500	-1.500	1.49
	2	5.7	10	512	504	-1.494	
	3	5.7	9.9	486	479	-1.490	
C70GD30	1	5.7	9.8	515	507	-1.485	1.46
	2	5.7	9.8	498	491	-1.450	
	3	5.7	9.7	499	492	-1.430	
C60GD40	1	5.8	10	496	489	-1.415	1.42
	2	5.8	9.8	550	542	-1.430	
	3	5.8	9.6	474	467	-1.425	
C50GD50	1	5.8	10.1	512	505	-1.400	1.39
	2	5.8	10	521	514	-1.375	
	3	5.8	9.8	490	483	-1.380	

ตารางที่ ง-33 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แช่ MgSO_4 ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	495	486	-1.800	1.84
	2	5.6	9.9	493.5	484	-1.950	
	3	5.6	9.8	478	469	-1.780	
C90GD10	1	5.7	9.7	487	478	-1.800	1.80
	2	5.7	10	499	490	-1.780	
	3	5.7	9.8	467	459	-1.805	
C80GD20	1	5.7	9.9	488	479	-1.790	1.78
	2	5.7	9.8	496	487	-1.770	
	3	5.7	10.1	493	484	-1.780	
C70GD30	1	5.7	10	495	486	-1.750	1.75
	2	5.7	9.8	503	494	-1.735	
	3	5.7	9.6	491	482	-1.760	
C60GD40	1	5.8	9.8	516	507	-1.720	1.73
	2	5.8	9.7	520	511	-1.750	
	3	5.8	10	481	473	-1.710	
C50GD50	1	5.8	10	521	512	-1.700	1.71
	2	5.8	9.9	517	508	-1.740	
	3	5.8	9.8	463	455	-1.680	

ตารางที่ ง-34 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส
 แชน้ำ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.8	510	508	-0.350	0.34
	2	5.6	9.9	515	513	-0.330	
	3	5.6	10	496	494	-0.345	
C90GD10	1	5.7	10	514	512	-0.311	0.32
	2	5.7	10	524	522	-0.325	
	3	5.7	9.8	478	477	-0.310	
C80GD20	1	5.7	9.6	495	493	-0.310	0.29
	2	5.7	10	501	500	-0.290	
	3	5.7	10.2	483	482	-0.282	
C70GD30	1	5.7	9.9	519	518	-0.240	0.27
	2	5.7	10.1	528	527	-0.275	
	3	5.7	9.8	472	471	-0.280	
C60GD40	1	5.8	9.7	495	494	-0.250	0.24
	2	5.8	9.75	495	494	-0.240	
	3	5.8	9.9	479	478	-0.235	
C50GD50	1	5.8	10	512	511	-0.197	0.19
	2	5.8	9.8	507	506	-0.190	
	3	5.8	9.9	480	479	-0.195	

ตารางที่ ง-35 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ Na_2SO_4 ไร่ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	9.9	507	500	-1.400	1.45
	2	5.6	10	508	501	-1.390	
	3	5.6	9.8	506	498	-1.550	
C90GD10	1	5.7	9.6	536	528	-1.410	1.43
	2	5.7	9.8	529	521	-1.460	
	3	5.7	9.7	520	513	-1.430	
C80GD20	1	5.7	10	513	506	-1.400	1.40
	2	5.7	10.1	526	519	-1.390	
	3	5.7	9.9	515	508	-1.410	
C70GD30	1	5.7	9.8	528	521	-1.370	1.37
	2	5.7	9.6	513	506	-1.360	
	3	5.7	9.8	517	510	-1.390	
C60GD40	1	5.8	10.2	521	514	-1.350	1.35
	2	5.8	9.9	495	488	-1.330	
	3	5.8	9.8	508	501	-1.364	
C50GD50	1	5.8	9.7	512	505	-1.310	1.32
	2	5.8	9.8	512	505	-1.300	
	3	5.8	9.9	503	496	-1.350	

ตารางที่ ง-36 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก บ่มที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส แช่ $MgSO_4$ ไว้ให้มีอายุ 28 วัน

ชุดตัวอย่าง	ตัวอย่าง ที่	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (cm)	สูง (cm)	น้ำหนัก ก่อน (g)	น้ำหนัก หลัง (g)	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนัก	%การ เปลี่ยนแปลง น้ำหนักเฉลี่ย
C100GD0	1	5.6	10	512	503	-1.750	1.76
	2	5.6	9.9	492	483	-1.800	
	3	5.6	9.8	498	489	-1.730	
C90GD10	1	5.7	10.1	494	485	-1.730	1.73
	2	5.7	9.8	564	554	-1.750	
	3	5.7	9.7	523	514	-1.710	
C80GD20	1	5.7	9.9	524	515	-1.700	1.69
	2	5.7	9.8	511	502	-1.680	
	3	5.7	9.6	515	506	-1.677	
C70GD30	1	5.7	10.2	512	504	-1.660	1.66
	2	5.7	9.9	501	493	-1.675	
	3	5.7	9.8	504	496	-1.640	
C60GD40	1	5.8	9.9	524	515	-1.650	1.64
	2	5.8	10	511	503	-1.630	
	3	5.8	9.7	515	507	-1.625	
C50GD50	1	5.8	10.2	504	496	-1.620	1.62
	2	5.8	9.9	516	508	-1.640	
	3	5.8	9.8	510	502	-1.610	

ภาคผนวก จ
ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด

ตารางที่ จ-1 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แซ่สารละลายโซเดียมซัลเฟต
ไว้ให้มีอายุ 45 วัน

วันที่	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1	0.00550	0.00440	0.00409	0.00413	0.00289	0.00202
2	0.01560	0.01248	0.01161	0.01170	0.00819	0.00573
3	0.02570	0.02313	0.02151	0.01928	0.01349	0.00944
4	0.03350	0.03015	0.02804	0.02513	0.01759	0.01231
5	0.04120	0.03708	0.03448	0.03090	0.02163	0.01514
10	0.06320	0.05688	0.05290	0.04740	0.03792	0.03034
15	0.08820	0.07938	0.07382	0.06615	0.05623	0.04611
20	0.10390	0.09351	0.08696	0.07793	0.07013	0.06031
25	0.11910	0.10719	0.09969	0.08933	0.07950	0.06916
30	0.13460	0.11979	0.11141	0.10095	0.08985	0.07817
35	0.14140	0.12726	0.11835	0.10605	0.09545	0.08590
40	0.14820	0.13338	0.12404	0.11115	0.10004	0.09003
45	0.14930	0.13437	0.12496	0.11198	0.10078	0.09372

ตารางที่ จ-2 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แซ่สารละลายแมกนีเซียม
ซัลเฟตไว้ให้มีอายุ 45 วัน

วันที่	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0035	0.00315	0.00284	0.00252	0.00210	0.00140
2	0.0112	0.01008	0.00907	0.00806	0.00672	0.00448
3	0.0222	0.01998	0.01798	0.01598	0.01332	0.00888
4	0.0288	0.02592	0.02333	0.02074	0.01728	0.01152
5	0.0341	0.03069	0.02762	0.02455	0.02046	0.01364
10	0.0552	0.04968	0.04471	0.03864	0.03312	0.02760
15	0.0737	0.06559	0.05903	0.05306	0.04422	0.03685

20	0.0850	0.07650	0.06885	0.05950	0.05100	0.04675
25	0.0960	0.08640	0.07776	0.06816	0.05760	0.05280
30	0.1051	0.09459	0.08513	0.07567	0.06306	0.05781
35	0.1154	0.10386	0.09347	0.08309	0.06924	0.06347
40	0.1234	0.11106	0.09995	0.08885	0.07527	0.06787
45	0.1281	0.11785	0.10607	0.09479	0.08070	0.07046

ตารางที่ จ-3 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่น้ำไว้ให้มีอายุ 45 วัน

วันที่	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1	0.0021	0.00189	0.00170	0.00153	0.00138	0.00096
2	0.0067	0.00605	0.00544	0.00490	0.00441	0.00309
3	0.0133	0.01199	0.01079	0.00971	0.00874	0.00612
4	0.0173	0.01555	0.01400	0.01260	0.01134	0.00794
5	0.0205	0.01841	0.01657	0.01492	0.01342	0.00940
10	0.0331	0.02981	0.02683	0.02414	0.02173	0.01738
15	0.0442	0.03980	0.03582	0.03224	0.02901	0.02321
20	0.0510	0.04590	0.04131	0.03718	0.03346	0.02844
25	0.0576	0.05184	0.04666	0.04199	0.03779	0.03401
30	0.0631	0.05675	0.05108	0.04597	0.04137	0.03724
35	0.0692	0.06232	0.05608	0.05048	0.04543	0.04089
40	0.0740	0.06664	0.05997	0.05398	0.04858	0.04372
45	0.0769	0.06917	0.06226	0.05603	0.05043	0.04539

ตารางที่ จ-4 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด บ่มที่อุณหภูมิห้อง แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟตและน้ำไว้ให้มีอายุ 45 วัน

สูตร	Na ₂ SO ₄ %เปลี่ยนแปลง	MgSO ₄ %เปลี่ยนแปลง	H ₂ O %เปลี่ยนแปลง
C100GD0	0.1493	0.1281	0.0769
C90GD10	0.1344	0.1179	0.0692
C80GD20	0.1250	0.1061	0.0623
C70GD30	0.1120	0.0948	0.0560
C60GD40	0.1008	0.0807	0.0504
C50GD50	0.0937	0.0705	0.0454

ตารางที่ จ-5 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด บ่มที่อุณหภูมิห้อง 31 °C, 70 °C, 80 °C และ 90 °C แซ่สารละลายโซเดียมซัลเฟตไว้ให้มีอายุ 45 วัน

อุณหภูมิ	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
31 °C	0.1493	0.1344	0.1250	0.1120	0.1008	0.0937
70 °C	0.1291	0.1180	0.1075	0.0977	0.0865	0.0752
80 °C	0.1245	0.1145	0.1000	0.0964	0.0846	0.0734
90 °C	0.1183	0.1054	0.0955	0.0902	0.0809	0.0702

ตารางที่ จ-6 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด บ่มที่อุณหภูมิห้อง 31 °C, 70 °C, 80 °C และ 90 °C แซ่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตไว้ให้มีอายุ 45 วัน

อุณหภูมิ	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
31 °C	0.1281	0.1179	0.1061	0.0948	0.0807	0.0705
70 °C	0.1070	0.0980	0.0884	0.0785	0.0680	0.0560
80 °C	0.1045	0.0938	0.0867	0.0720	0.0608	0.0506
90 °C	0.0993	0.0881	0.0831	0.0702	0.0593	0.0470

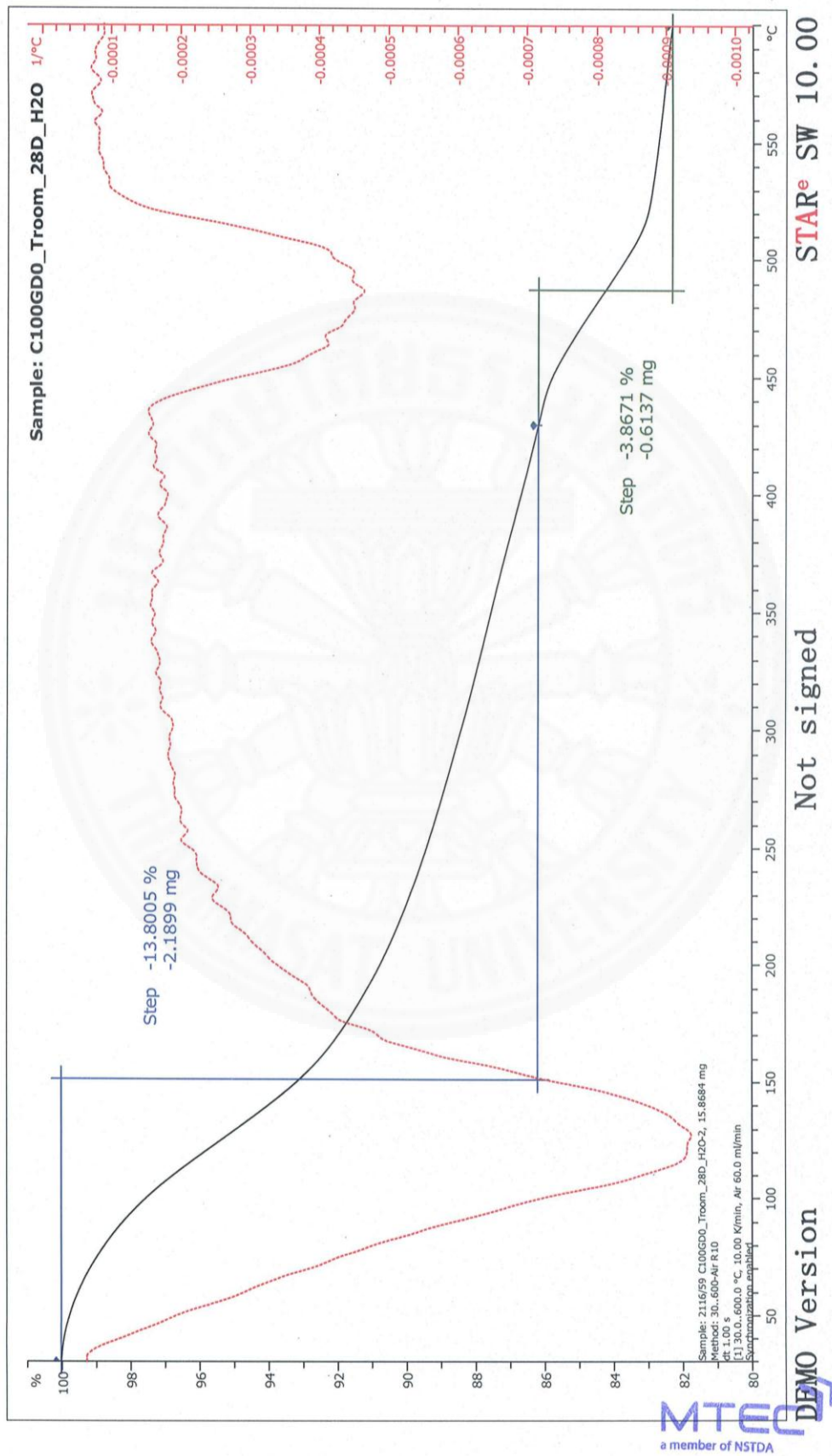
ตารางที่ จ-7 ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงขนาด บ่มที่อุณหภูมิห้อง 31 °C, 70 °C, 80 °C และ 90 °C แซ่น้ำไว้ให้มีอายุ 45 วัน

อุณหภูมิ	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
31 °C	0.0769	0.0692	0.0623	0.0560	0.0504	0.0454
70 °C	0.0570	0.0501	0.0475	0.0433	0.0395	0.0325
80 °C	0.0530	0.0456	0.0443	0.0413	0.0355	0.0295
90 °C	0.0501	0.0437	0.0405	0.0388	0.0330	0.0254

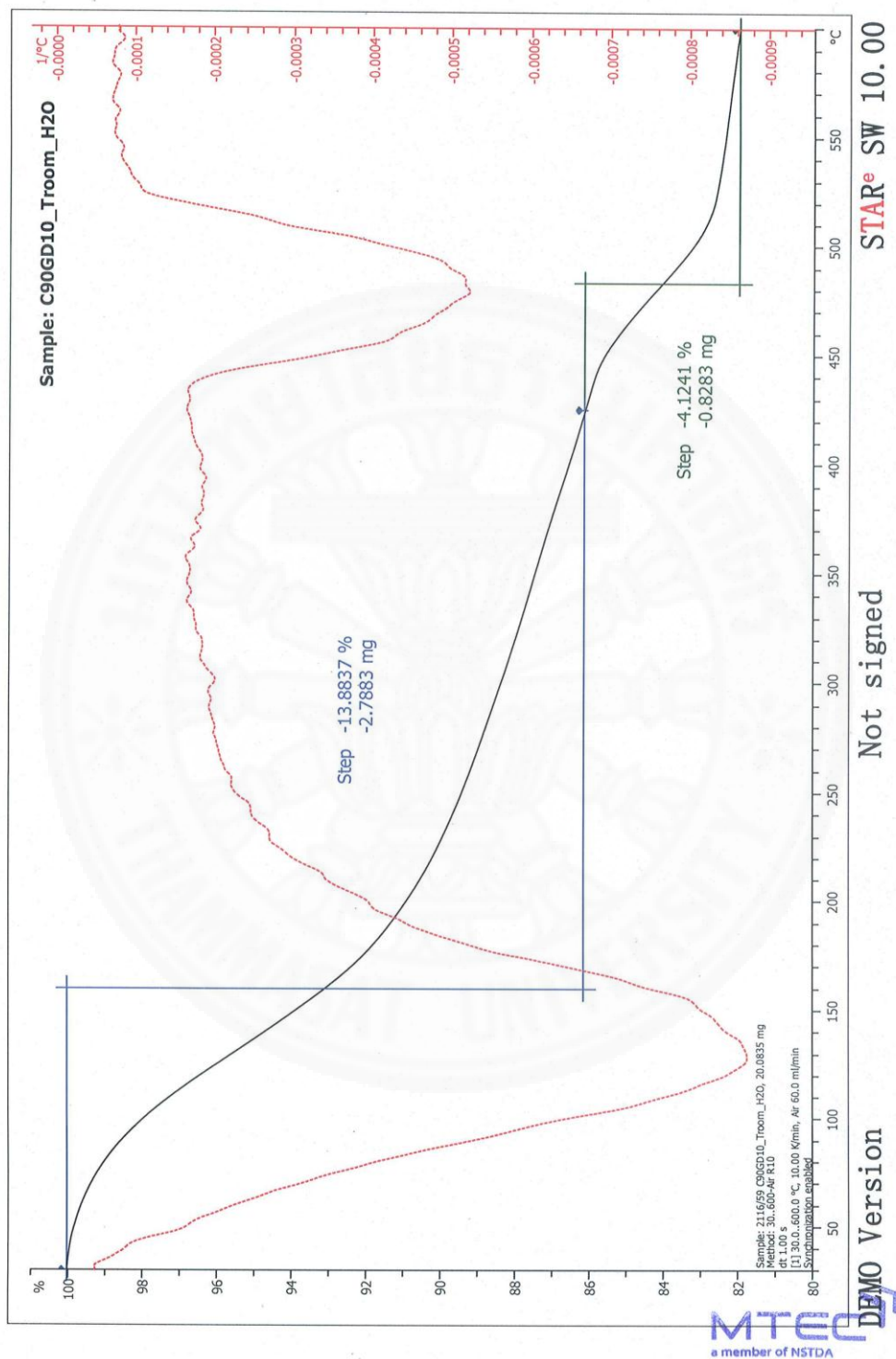
The background of the page features a large, faint, circular seal of Thammasat University. The seal contains the university's name in Thai and English, along with a central emblem.

ภาคผนวก ฉ

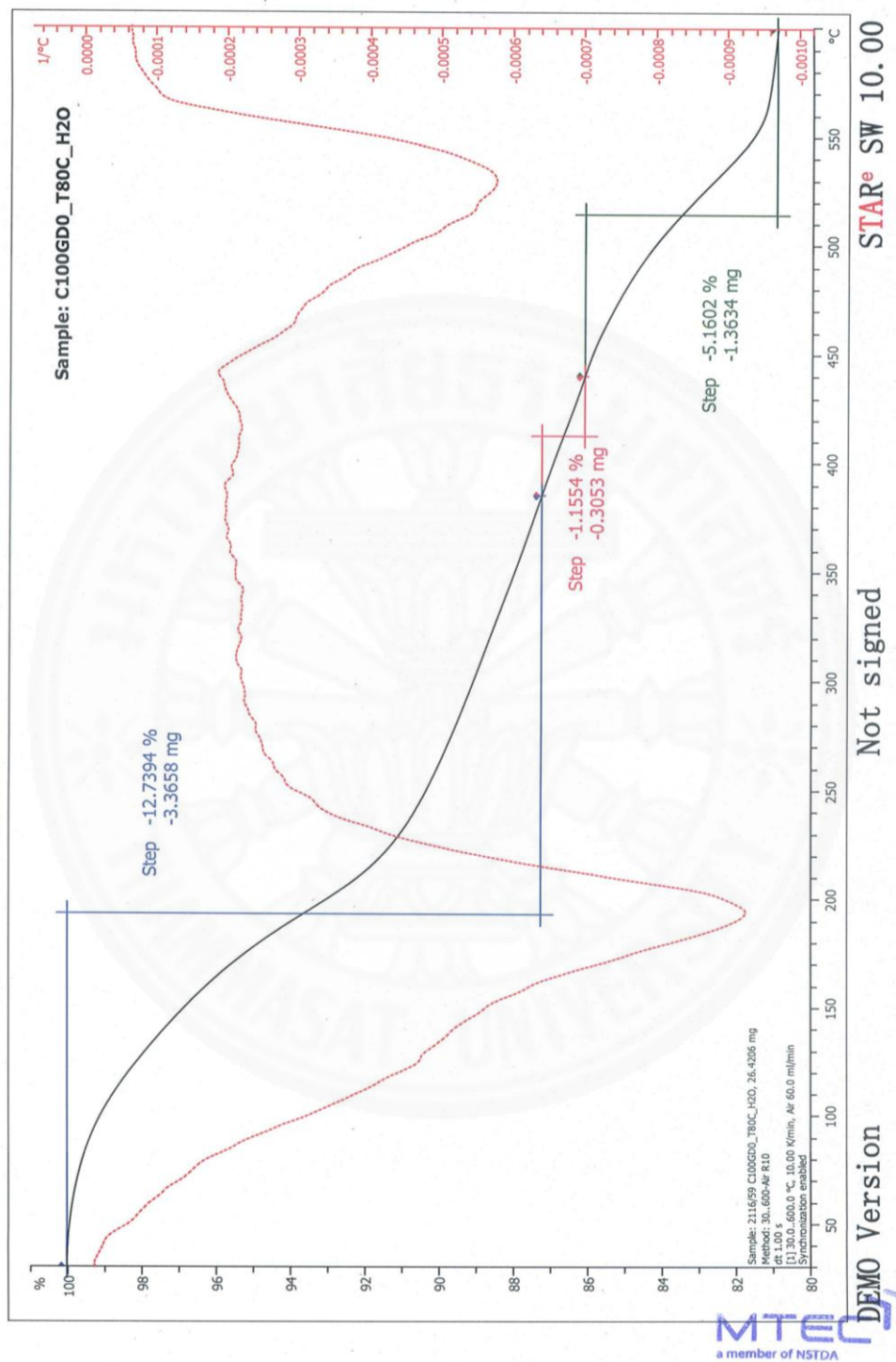
ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้ว



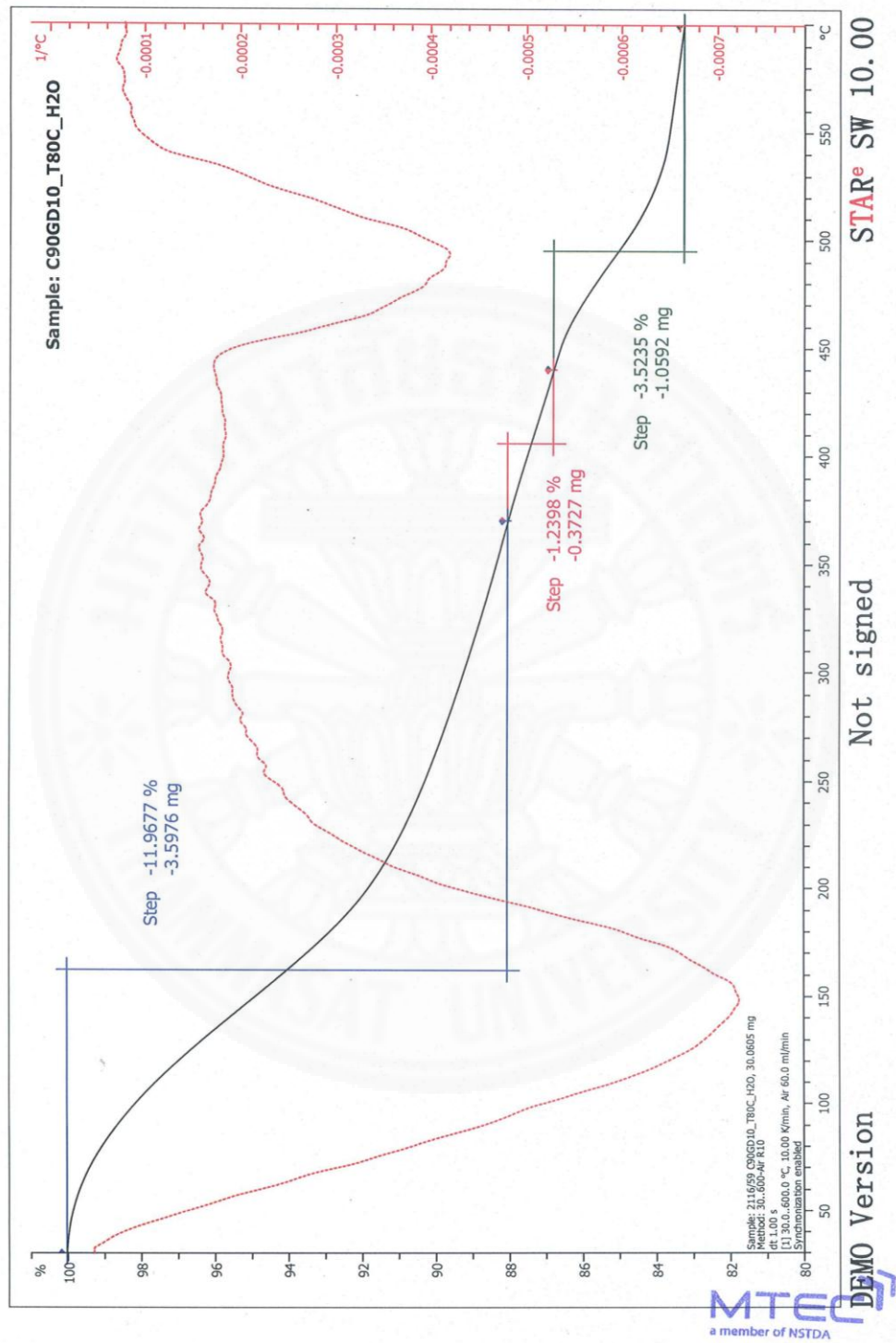
รูปที่ ฉ-1 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฟีนแกวร้อยละ 0 ปมที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่ในน้ำ ที่



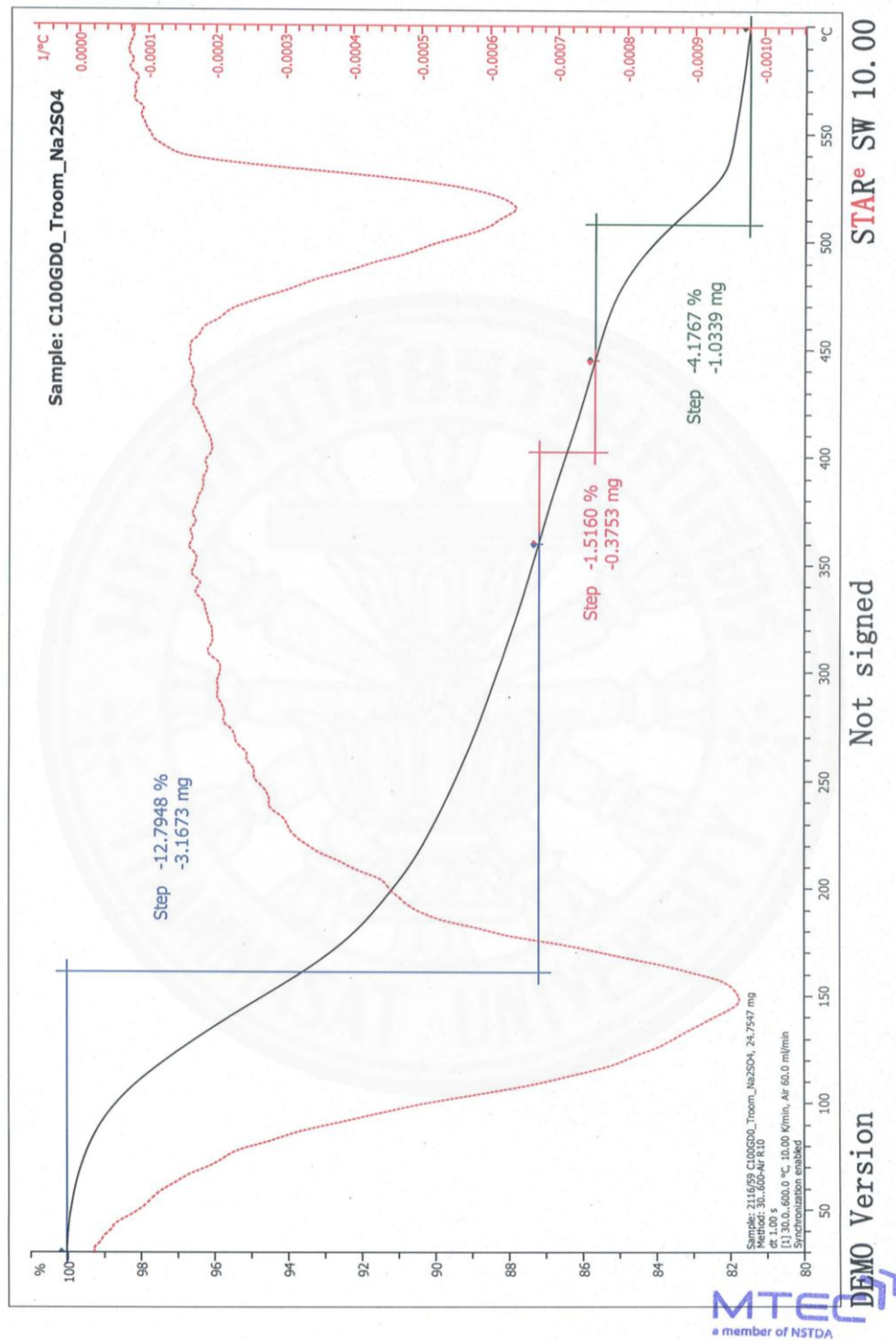
รูปที่ ฉ-2 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์โพสที่ได้จากการแทนที่ด้วยแผ่นแก้วยอละ 10 บมที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่น้ำที่



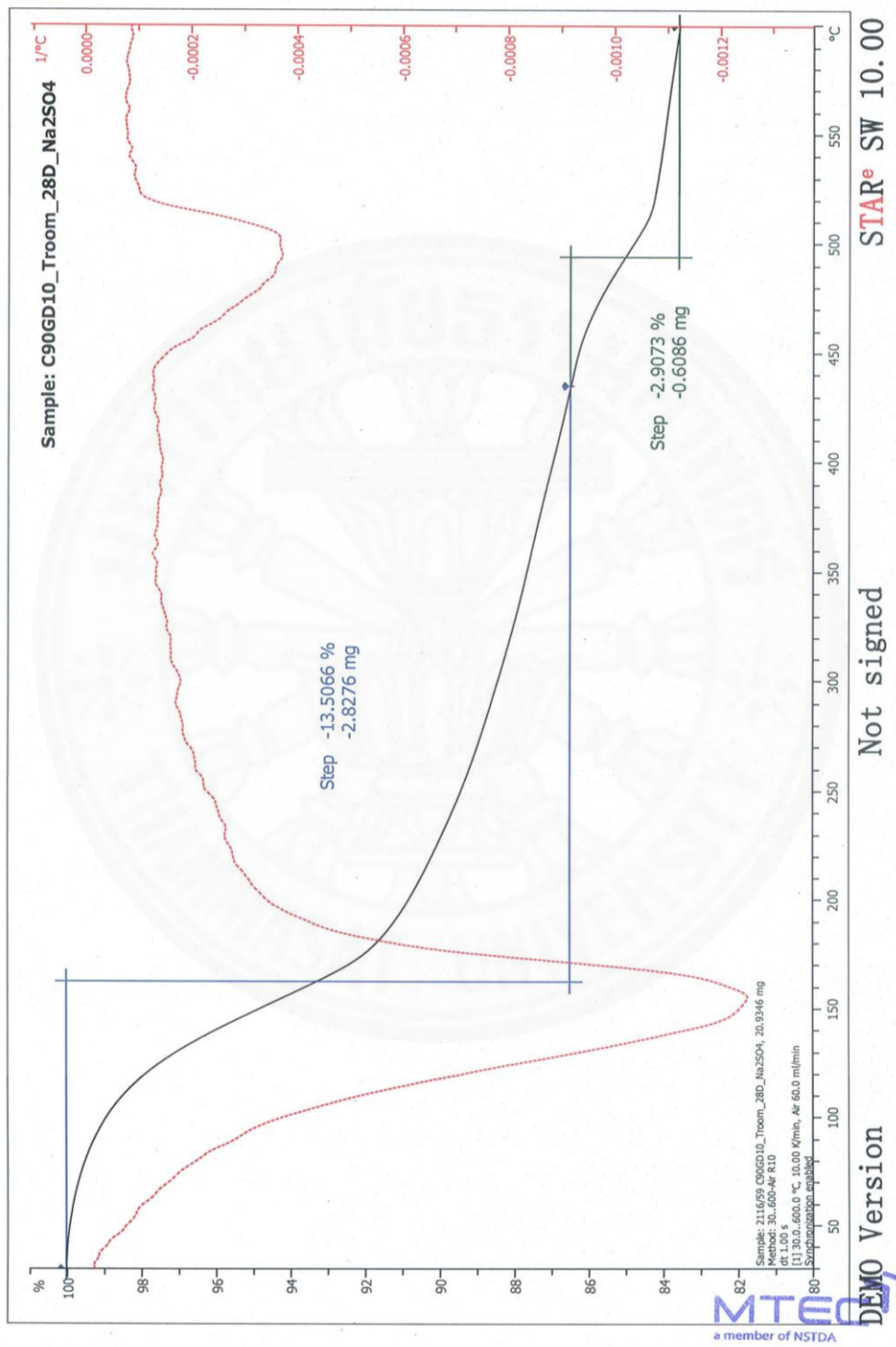
รูปที่ จ-3 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยฝุ่นแก้วร้อยละ 0 บมที่อุณหภูมิ 80 °C และเส้นน้ำ ที่ 28



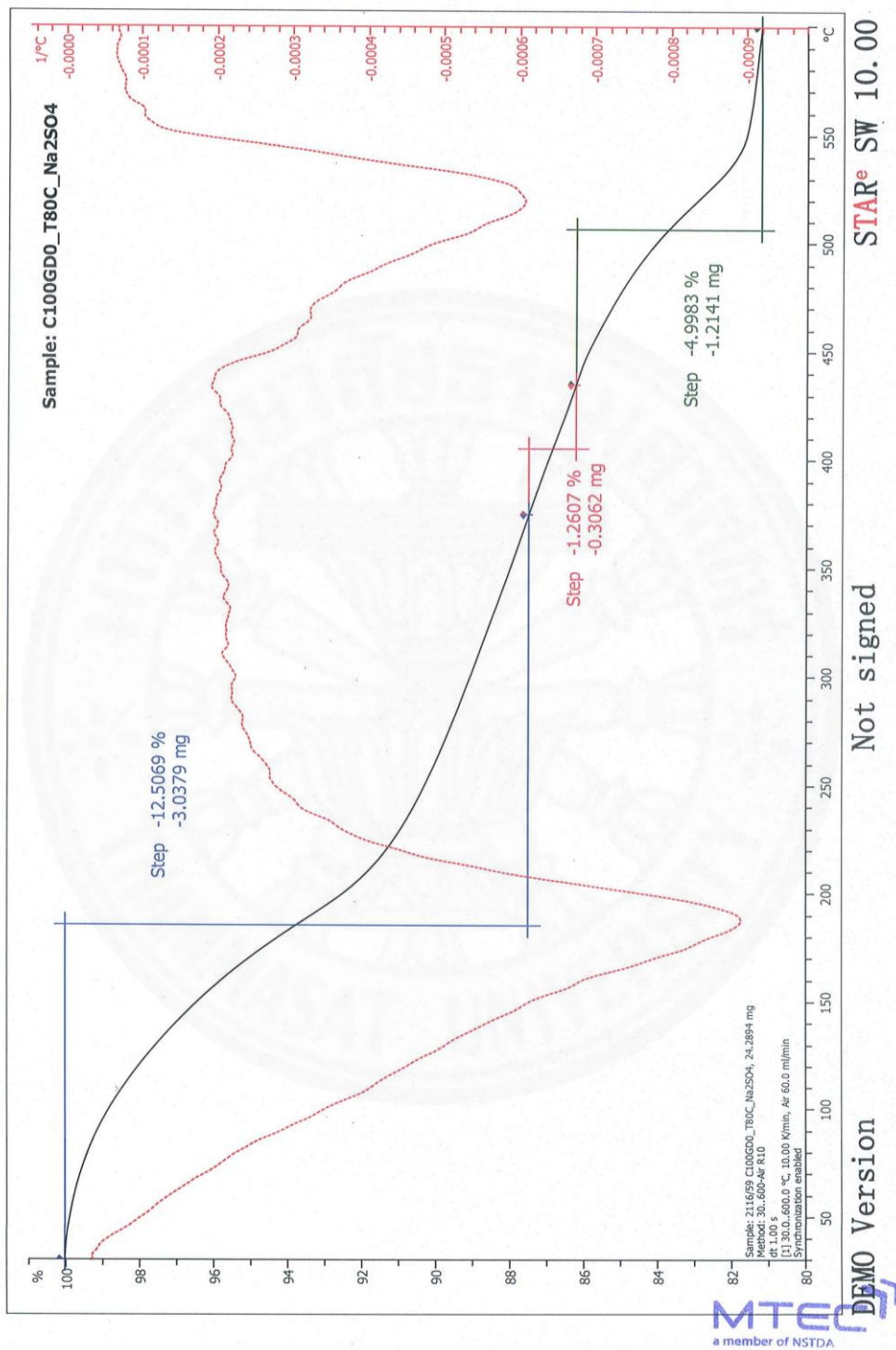
รูปที่ ฉ-4 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยแผ่นแก้วร้อยละ 10 บมที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ในน้ำ ที่ 28



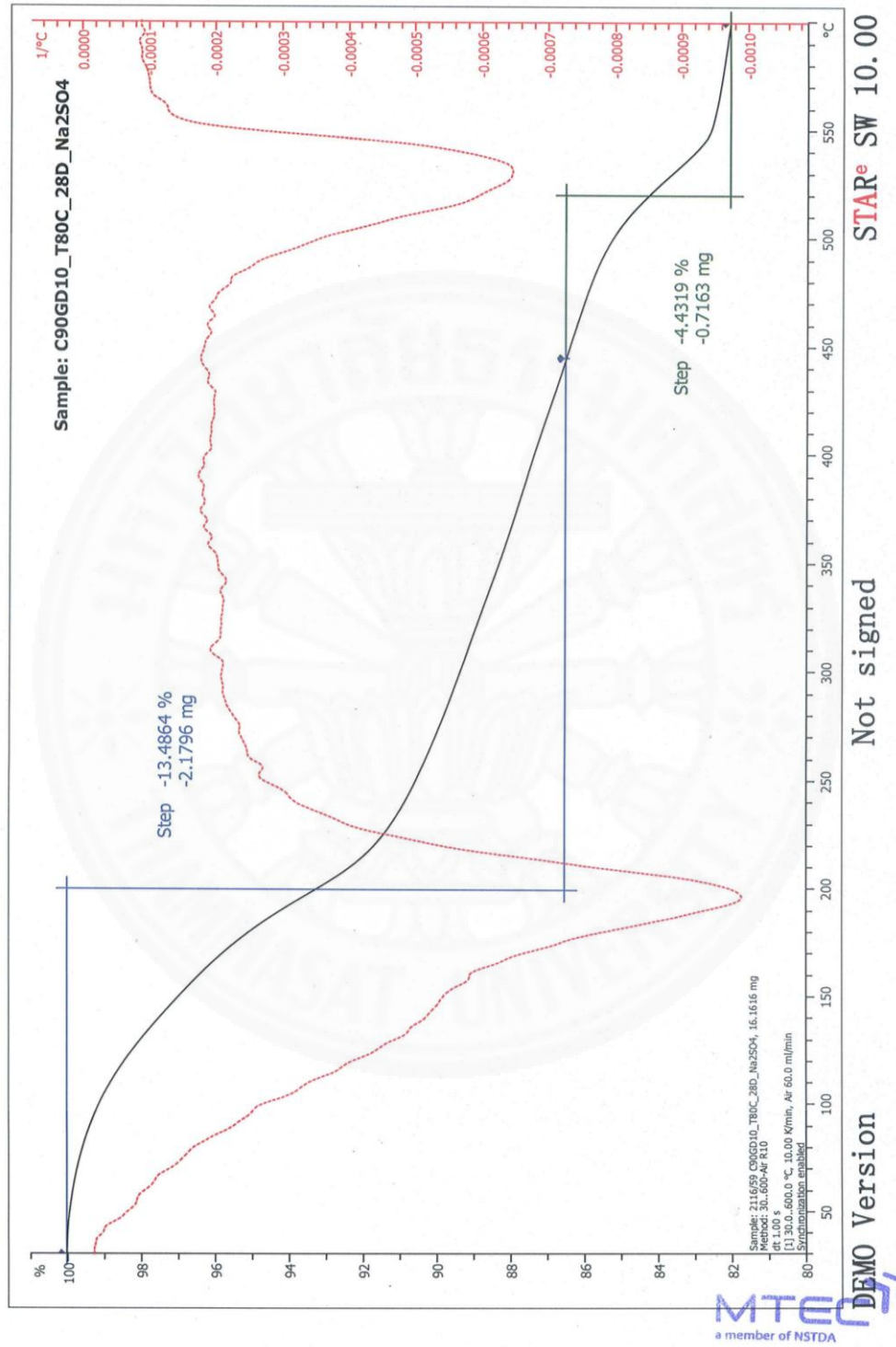
รูปที่ จ-5 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสดีที่มีการแทนที่ด้วยผงแก้วร้อยละ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่



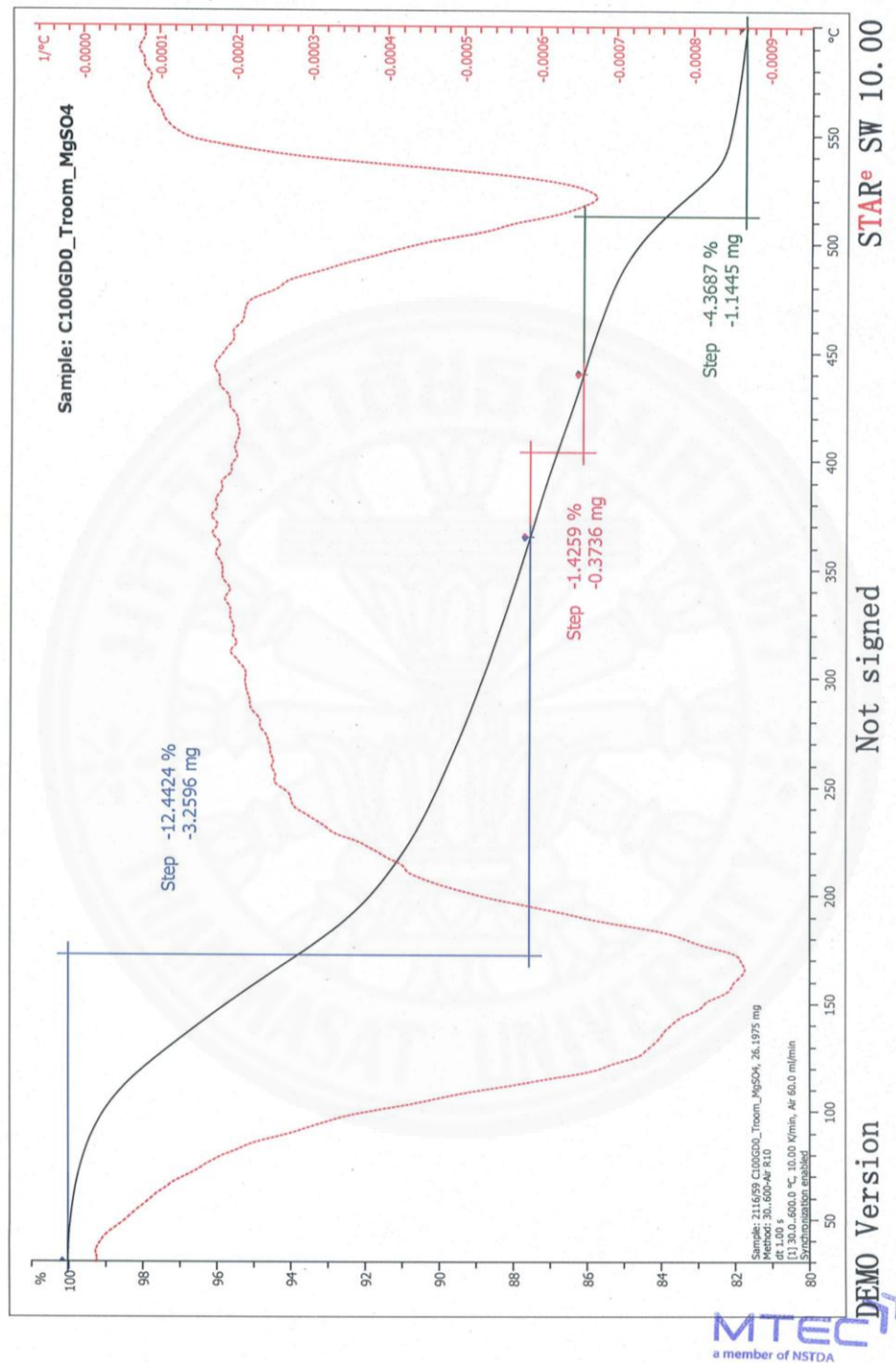
รูปที่ ฉ-6 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 10 พบที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่



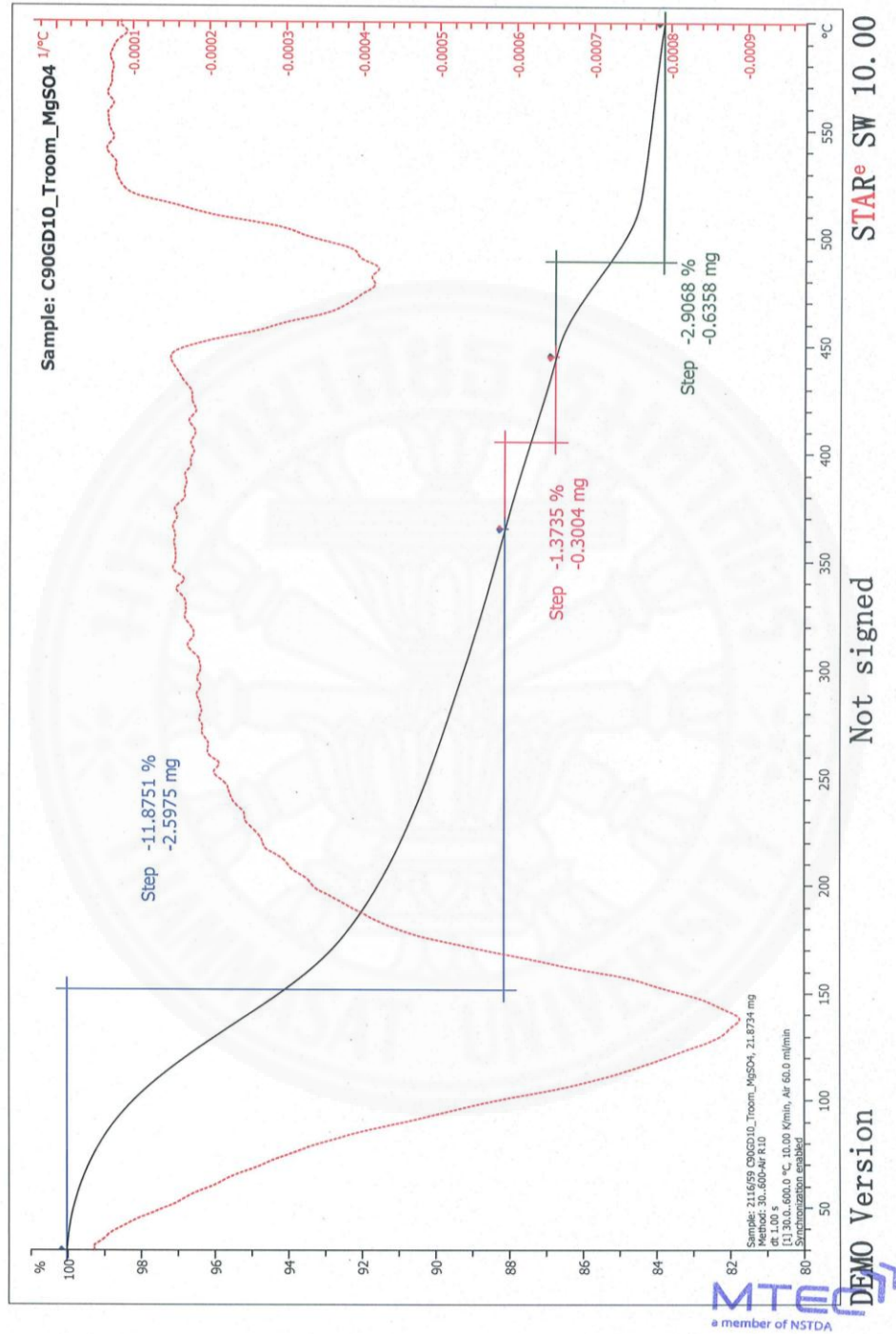
รูปที่ ฉ-7 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยผงแกล้วร้อยละ 0 บมที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ Na₂SO₄ ที่



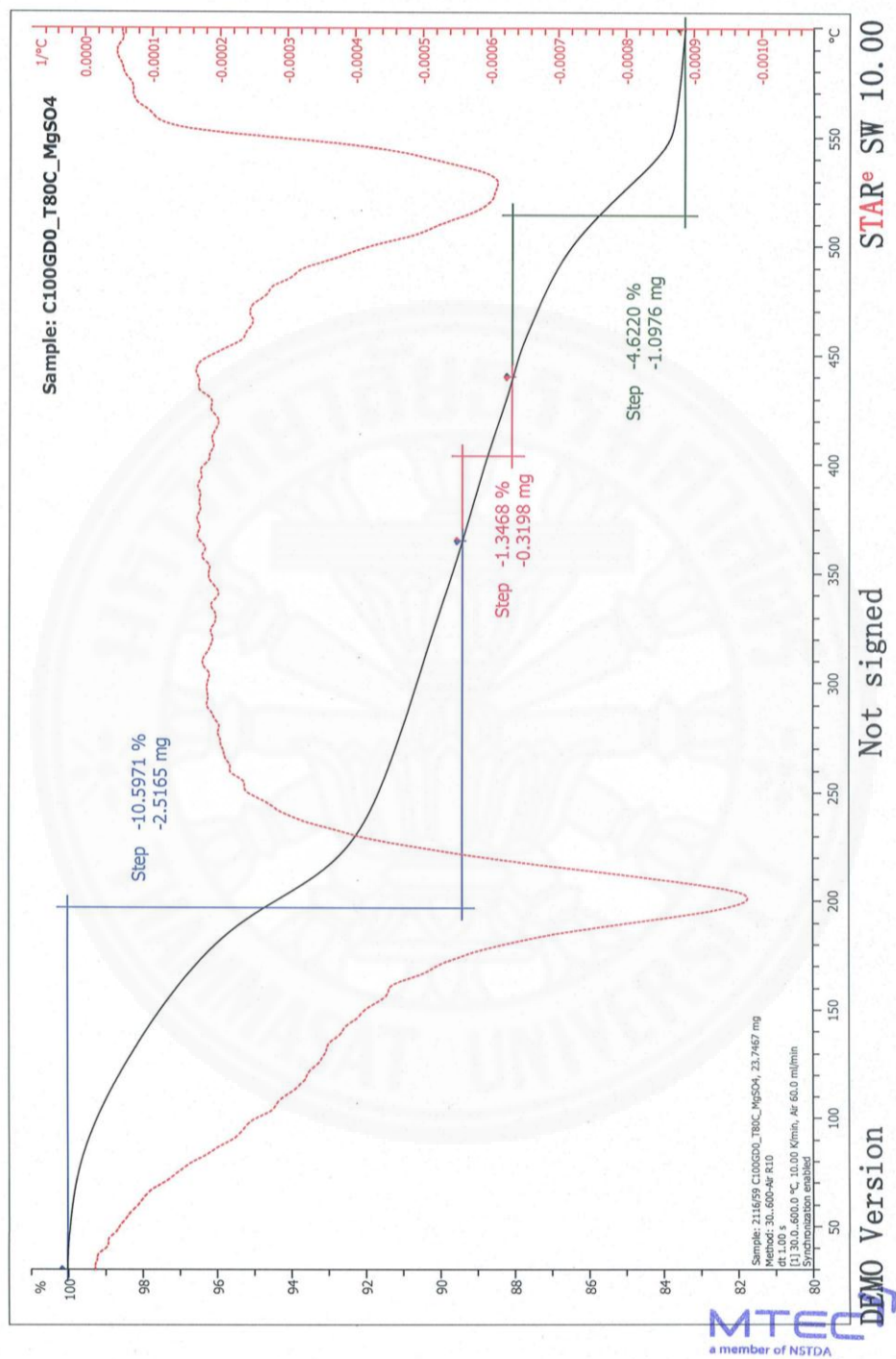
รูปที่ ๘-8 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ีมีการแทนที่ด้วยฟีนแกว์ร้อยละ 10 บ่มที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ Na₂SO₄



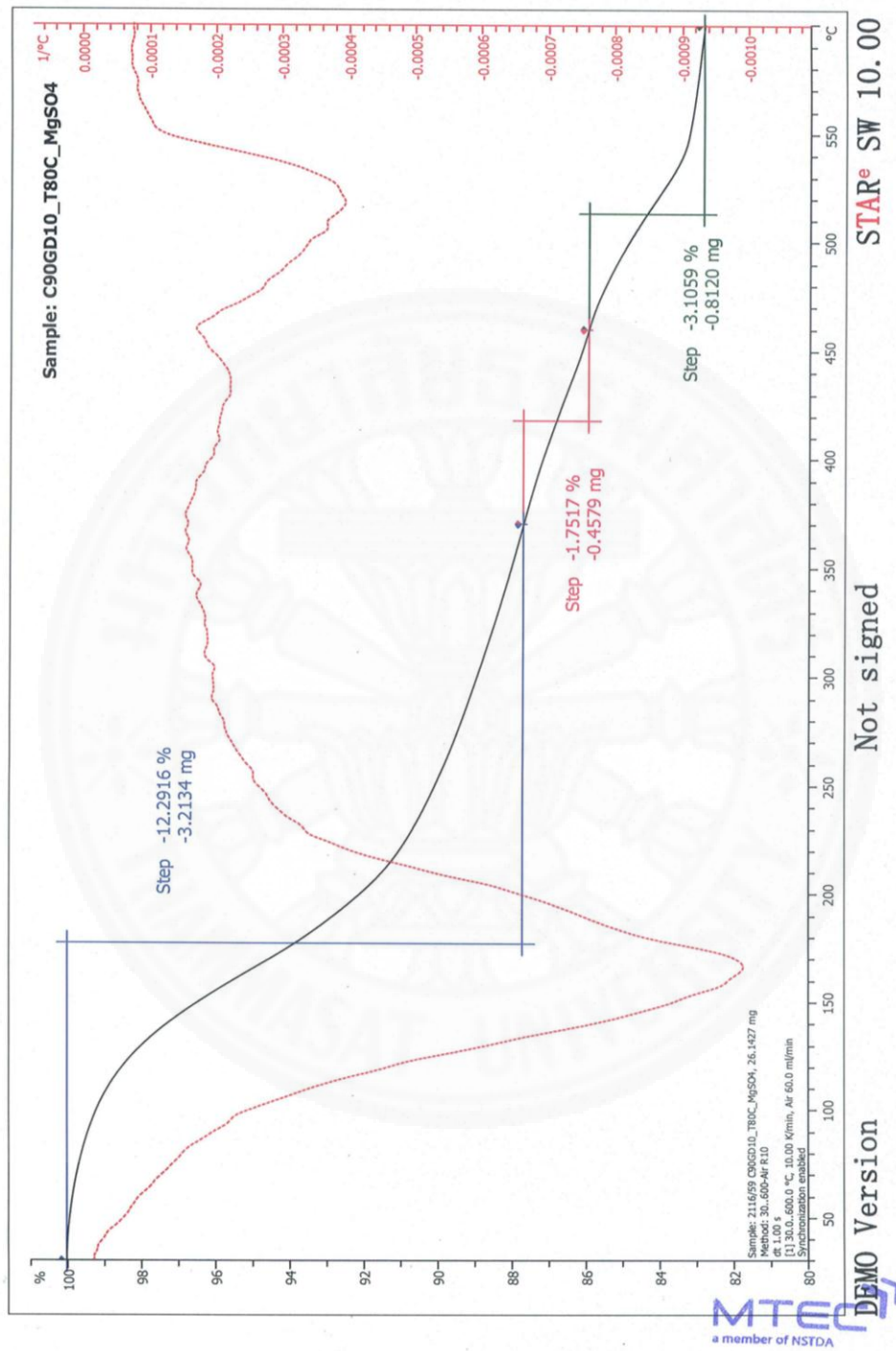
รูปที่ จ-9 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 0 บ่มที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่



รูปที่ จ-10 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เพสต์ที่มีการแทนที่ด้วยแผ่นแก้วร้อยละ 10 ปั่นที่อุณหภูมิห้อง (31 °C) และแช่



รูปที่ จ-11 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่ 1 ที่มีการแทนที่ด้วยแผ่นแก้วร้อยละ 0 ปมที่อุณหภูมิ 80 °C และแช่ MgSO_4 ที่



รูปที่ จ-12 ผลการทดสอบ TGA ของซีเมนต์เฟสที่มีการแทนที่ด้วยแผ่นแก้วร้อยละ 10 ปกติอุณหภูมิ 80 °C และแช่ MgSO_4

ภาคผนวก ข
รูปประกอบการทำวิจัย



รูปที่ ข-1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



รูปที่ ข-2 ฝุ่นแก้ว



รูปที่ ข-3 เครื่องผสมซีเมนต์เฟสค์



รูปที่ ข-4 เต้าอบไฟฟ้า



รูปที่ ข-5 ก้อนตัวอย่าง



รูปที่ ข-6 หม้ออบเศษแก้ว



รูปที่ ข-7 เครื่องชั่งน้ำหนัก



รูปที่ ข-8 เครื่องทดสอบกำลังอัด UTM



รูปที่ ข-9 โซเดียมซัลเฟต



รูปที่ ข-10 แมกนีเซียมซัลเฟต

ภาคผนวก ซ

ตารางค่า Emission Factor ของปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

[illegible][illegible]

ลำดับที่	ชื่อ	รายละเอียด	หน่วย	ค่าแฟกเตอร์ (kgCO ₂ eq/หน่วย)	แหล่งข้อมูลอ้างอิง	วันที่อัปเดต
600.	Preservative (Benzaldehyde)	Preservative (Benzaldehyde), at plant	kg	4.9355	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
601.	Preservative (Wood preservative)	Wood preservative, creosote, at plant	kg	1.6545	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
602.	Silica	Silica sand, at plant	kg	0.0223	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
603.	Silicon tetrahydride	silicon tetrahydride, at plant	kg	79.8509	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
604.	Sodium chlorate	Sodium chlorate, powder, at plant	kg	4.2407	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
605.	Sodium hydroxide	Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, membrane cell, at plant	kg	1.1148	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
606.	Sodium hypochlorite	Sodium hypochlorite, 15% in H ₂ O, at plant	kg	0.8712	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
607.	Sodium Silicate	Sodium silicate, spray powder 80%, at plant	kg	1.5922	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
608.	Sodium tripolyphosphate	Sodium tripolyphosphate, at plant	kg	5.8902	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
609.	Sulfur	Sulfur from Refinery	kg	0.4529	Thai national database	Update_24Sep12
610.	Sulfuric acid	Sulphuric acid, liquid, at plant	kg	0.1219	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
611.	Urea (การผลิต)	Urea, as N, at regional storehouse	kg	3.2826	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
612.	Varnish	Vanish (Acrylic varnish, 87.5% in H ₂ O, at plant)	kg	1.8823	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
613.	Zinc	Zinc, primary, at regional storage	kg	4.5455	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
614.	Acetylene	Acetylene, at regional storehouse	kg	2.2804	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
615.	Aluminium Sulphate Al ₂ (SO ₄) ₃	Aluminium sulphate, powder, at plant	kg	0.5311	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
616.	Solvents	Solvents, organic, unspecified, at plant	kg	2.3893	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
617.	Magnesium sulphate	Magnesium sulphate, at plant	kg	0.3385	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12

ลำดับที่	ชื่อ	รายละเอียด	หน่วย	ค่าแฟกเตอร์ (kgCO ₂ eq/หน่วย)	แหล่งข้อมูลอ้างอิง	วันที่อัปเดต
635.	Phosphoric acid	Phosphoric acid, industrial grade, 85% in H ₂ O, at plant	kg	1.4063	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
636.	Sodium sulphate	Sodium sulphate, from Mannheim process, at plant	kg	0.4695	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
637.	Sodium sulphate	Sodium sulphate, from natural sources, at plant	kg	0.1454	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
638.	Sulphur dioxide, liquid	Sulphur dioxide, liquid, at plant	kg	0.5202	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
639.	Zinc oxide	Zinc oxide, at plant	kg	2.9066	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
640.	Soap (สบู่)	Soap, at plant	kg	1.6685	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
641.	Nitrogen	Nitrogen, liquid, at plant	kg	0.4970	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
642.	Oxygen	Oxygen, liquid, at plant	kg	0.4690	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
19. โลหะเหล็ก						
643.	Sinter iron (เหล็กถลุง)	Sinter, iron, at plant	kg	0.3493	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
644.	Cast iron (เหล็กหล่อ)	Cast iron, at plant	kg	1.6382	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
645.	Pig iron (เหล็กดิบ / เหล็กคืบ)	Pig iron, at plant	kg	1.5143	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
646.	Galvanized steel sheet	Galvanized steel sheet, at plant	kg	2.7073	USLCI	Update_24Sep12
20. โลหะที่มีไขเหล็ก						
647.	Aluminium Sheet	Aluminium sheet, primary prod., prod. mix. aluminium semi-finished sheet product	kg	3.2231	ELCD 2.0	Update_24Sep12
648.	Aluminium Primary	Aluminium, primary, at plant	kg	12.2359	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
649.	Aluminium Secondary	Aluminium, secondary, from new scrap, at plant	kg	0.4329	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12
650.	Aluminium Secondary	Aluminium, secondary, from old scrap, at plant	kg	1.4682	Ecoinvent 2.2, IPCC 2007 GWP 100a	Update_24Sep12

ภาคผนวก ณ

ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าที่เกิดจากการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

ตารางที่ ณ-1 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยไม่มีการใช้เตาอบไฟฟ้า

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

รายการ	Factor	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	1.0676	1.60140	1.44126	1.28112	1.12098	0.96084	0.80070
Glass Dust	0.8289	0.00000	0.12434	0.24867	0.37301	0.49734	0.62168
H ₂ O	0.7043	0.26411	0.25707	0.24651	0.23594	0.22185	0.19016
Mixer	0.6093	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408
Oven	0.6093	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
CO ₂ (kgCO ₂ e)		1.86959	1.82675	1.78038	1.73401	1.68412	1.61662

ตารางที่ ณ-2 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการใช้เตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	1.70150	1.70150	1.70150	1.70150	1.70150	1.70150

รายการ	Factor	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	1.0676	1.60140	1.44126	1.28112	1.12098	0.96084	0.80070
Glass Dust	0.8289	0.00000	0.12434	0.24867	0.37301	0.49734	0.62168
H ₂ O	0.7043	0.26411	0.25707	0.24651	0.23594	0.22185	0.19016
Mixer	0.6093	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408
Oven	0.6093	1.03672	1.03672	1.03672	1.03672	1.03672	1.03672
CO ₂ (kgCO ₂ e)		2.90632	2.86347	2.81710	2.77073	2.72084	2.65334

ตารางที่ ฅ-3 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการใช้เตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	1.93420	1.93420	1.93420	1.93420	1.93420	1.93420

รายการ	Factor	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	1.0676	1.60140	1.44126	1.28112	1.12098	0.96084	0.80070
Glass Dust	0.8289	0.00000	0.12434	0.24867	0.37301	0.49734	0.62168
H ₂ O	0.7043	0.26411	0.25707	0.24651	0.23594	0.22185	0.19016
Mixer	0.6093	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408
Oven	0.6093	1.17851	1.17851	1.17851	1.17851	1.17851	1.17851
CO ₂ (kgCO ₂ e)		3.04810	3.00525	2.95889	2.91252	2.86262	2.79513

ตารางที่ ฅ-4 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการใช้เตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	2.18595	2.18595	2.18595	2.18595	2.18595	2.18595

รายการ	Factor	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	1.0676	1.60140	1.44126	1.28112	1.12098	0.96084	0.80070
Glass Dust	0.8289	0.00000	0.12434	0.24867	0.37301	0.49734	0.62168
H ₂ O	0.7043	0.26411	0.25707	0.24651	0.23594	0.22185	0.19016
Mixer	0.6093	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408	0.00408
Oven	0.6093	1.33190	1.33190	1.33190	1.33190	1.33190	1.33190
CO ₂ (kgCO ₂ e)		3.20149	3.15865	3.11228	3.06591	3.01602	2.94852

ภาคผนวก ญ

ผลกระทบทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมการผลิตซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว

ตารางที่ ญ-1 ต้นทุนในการผลิตโดยไม่มีการใช้เตาอบไฟฟ้า

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

รายการ	ราคา	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	3.6	5.40000	4.86000	4.32000	3.78000	3.24000	2.70000
Glass Dust	0.8	0.00000	0.12000	0.24000	0.36000	0.48000	0.60000
H ₂ O	0.0085	0.00319	0.00310	0.00298	0.00285	0.00268	0.00230
Mixer	2.35	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575
Oven	2.35	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
ต้นทุน (บาท)		5.41893	4.99885	4.57872	4.15859	3.73842	3.31804

ตารางที่ ญ-2 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการใช้เตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	1.70150	1.70150	1.70150	1.70150	1.70150	1.70150

รายการ	ราคา	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	3.6	5.40000	4.86000	4.32000	3.78000	3.24000	2.70000

Glass Dust	0.8	0.00000	0.12000	0.24000	0.36000	0.48000	0.60000
H ₂ O	0.0085	0.00319	0.00310	0.00298	0.00285	0.00268	0.00230
Mixer	2.35	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575
Oven	2.35	3.99853	3.99853	3.99853	3.99853	3.99853	3.99853
ต้นทุน (บาท)		9.41746	8.99737	8.57725	8.15712	7.73695	7.31657

ตารางที่ ญ-3 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการใช้เตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	1.93420	1.93420	1.93420	1.93420	1.93420	1.93420

รายการ	ราคา	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	3.6	5.40000	4.86000	4.32000	3.78000	3.24000	2.70000
Glass Dust	0.8	0.00000	0.12000	0.24000	0.36000	0.48000	0.60000
H ₂ O	0.0085	0.00319	0.00310	0.00298	0.00285	0.00268	0.00230
Mixer	2.35	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575
Oven	2.35	4.54537	4.54537	4.54537	4.54537	4.54537	4.54537
ต้นทุน (บาท)		9.96430	9.54422	9.12409	8.70396	8.28379	7.86341

ตารางที่ ญ-4 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการใช้เตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

รายการ	หน่วย	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	kg	1.50000	1.35000	1.20000	1.05000	0.90000	0.75000
Glass Dust	kg	0.00000	0.15000	0.30000	0.45000	0.60000	0.75000
H ₂ O	m ³	0.37500	0.36500	0.35000	0.33500	0.31500	0.27000
Mixer	kWh	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670	0.00670
Oven	kWh	2.18595	2.18595	2.18595	2.18595	2.18595	2.18595

รายการ	ราคา	C100GD0	C90GD10	C80GD20	C70GD30	C60GD40	C50GD50
Cement	3.6	5.40000	4.86000	4.32000	3.78000	3.24000	2.70000
Glass Dust	0.8	0.00000	0.12000	0.24000	0.36000	0.48000	0.60000
H ₂ O	0.0085	0.00319	0.00310	0.00298	0.00285	0.00268	0.00230
Mixer	2.35	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575	0.01575
Oven	2.35	5.13698	5.13698	5.13698	5.13698	5.13698	5.13698
ต้นทุน (บาท)		10.55592	10.13583	9.71570	9.29558	8.87541	8.45502

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางภัสดา ภูพูล
 วันเดือนปีเกิด 27 สิงหาคม 2526
 วุฒิการศึกษา ปีการศึกษา 2549 : วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผลงานทางวิชาการ

ภัสดา มาตยาคุณ, บุรฉัตร ฉัตรวีระ. “พฤติกรรมทางกลของซีเมนต์เพสต์ผสมฝุ่นแก้ว”, การประชุม
 วิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 11, 2559, MAT-261.

ประสบการณ์ทำงาน 2556-2558 : วิศวกรโยธา บริษัท อาควา นิธิฮาร่า คอร์
 ปอเรชั่น จำกัด
 2554-2556 : วิศวกรโยธา บริษัท เอ็น เอส แอล คอน
 สตรัคชั่น จำกัด
 2550-2554 : วิศวกรโยธา บริษัท ปัญญา คอนซัลแทนท์
 จำกัด