ตำนักหอสมุด

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาแนวทางการลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตบล็อกมวลเบาโดยใช้วัสดุทดแทนซีเมนต์จากกากอุตสาหกรรม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนเรศวร
วันลงทะเบียน 15 ธ.ค. 2564
เลขทะเบียน 039435
เลขเรียกหนังสือ จ TH
W156
2559

สนับสนุนโดย
งบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยนเรศวร
ประจำปีงบประมาณ 2559

บทคัดย่อ

ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่ใช้โดยทั่วไป สำหรับงานโครงสร้างคอนกรีต อย่างไรก็ตามกระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ต้องใช้พลังงานเชื้อเพลิงค่อนข้างมาก โดยทำการเผาเม็ดปูนที่อุณหภูมิประมาณ 1,400-1,500 องศาเซลเซียส ในปัจจุบันมีงานพัฒนาซีเมนต์ประเภทใหม่ที่มีอุณหภูมิในการเผาลดลงเหลือเพียง 1,200 องศาเซลเซียส ได้แก่ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ สารเชื่อมประสานที่เกิดจากแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์มีความสามารถในการรับกำลังอัดในระยะต้นได้ดี แต่ความสามารถในการรับกำลังอัดระยะยาวยังไม่ดีเท่ากับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมกับแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติการดูดซึมน้ำ ระยะเวลาการก่อตัว และความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ การทดสอบจะใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตในอัตราส่วน 0-40% โดยน้ำหนัก การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์จะทดสอบตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 6 ชั่วโมง, 12 ชั่วโมง, 24 ชั่วโมง 3, 7, 14 และ28 วัน ส่วนการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์จะทดสอบตัวอย่างที่มีอายุการบ่ม 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน

ผลการศึกษาพบว่าค่ากำลังอัดระยะต้นของตัวอย่างที่มีแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตผสมอยู่ในอัตราส่วนที่มากจะให้กำลังอัดสูง และตัวอย่างที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมอยู่ในอัตราส่วนที่มากจะมีกำลังอัดที่สูงในระยะยาว นอกจากนี้ตัวอย่างที่มีแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตผสมอยู่ในอัตราส่วนที่มากจะมีความต้องการน้ำมากขึ้น และระยะเวลาก่อตัวจะลดลง

Abstract

Ordinary Portland cement has been used a binding material for concrete structure. However, this cement production processes show high energy consumption by using firing temperature of 1400-1500 °C. Currently, the new type of cement has been developed with firing temperature of 1200 °C, called calcium sulfoaluminate cement (CSA). Although the calcium sulfoaluminate cement binding compound has good initial compressive strength, but the long-term compressive strength is not as good as the Ordinary Portland cement.

The process of this study covered the quantity of water required, setting times and the compressive strength, of the cement paste and the mortar. The calcium sulfoaluminate cement replacing Ordinary Portland cement percentages are between 0-40 by weight. The compressive strength of the cement paste would be tested by time : 6 hours, 12 hours, 24 hours, 3 days, 7 days, 14 days and 28 days. The compressive strength of the mortar would be tested by time : 1 days, 3 days, 7 days, 14 days and 28 days

For short-term strength test, the compressive strength of the sample with high calcium sulfoaluminate cement content showed higher value than the reference sample. By the way, the sample with low calcium sulfoaluminate cement content showed high long-term compressive strength. Moreover, the study results suggested increase of the calcium sulfoaluminate cement content caused the water requirement and setting times to increased and decreased, respectively.

สารบัญ

บทคัดย่อ ..... ก

สารบัญ ..... ค

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ช

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.4 ขอบเขตการศึกษา 2

1.5 แผนการดำเนินงาน ..... ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก

1.6 รายละเอียดและงบประมาณของโครงงาน ..... ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น 3

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3

- 2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต 4

2.2 แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 5

- 2.2.1 ส่วนประกอบหลักของวัตถุดิบในการสังเคราะห์ CSA 5
- 2.2.2 องค์ประกอบของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 9

2.3 ซีเมนต์เพสต์ 10

- 2.3.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต 10
- 2.3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต 10
- 2.3.3 การทดสอบกำลังอัดเพสต์ 11

สารบัญ (ต่อ)

2.4 มอร์ตาร์ 11

- 2.4.1 การสดสอบหาค่าการไหลแผ่ 11
- 2.4.2 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ 11

2.5 โต๊ะทดสอบการไหลแผ่ 11

2.6 เครื่องผสมมอร์ตาร์และเพสต์ 12

2.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 14

บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงงาน 20

3.1 การเตรียมตัวอย่างแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 20

- 3.1.1 วัสดุที่ใช้ทำแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 20
- 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ 20
- 3.1.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 22
- 3.1.4 อัตราส่วนผสมระหว่าง CSA กับ OPC 23

3.2 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคต 23

- 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 23
- 3.2.2 วิธีการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม 26
- 3.2.3 วิธีการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์ 27

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเพสต์และมอร์ตาร์ 28

- 3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ 28
- 3.3.2 วัสดุที่ใช้ทดสอบ 31
- 3.3.3 อุณหภูมิและความชื้น 31
- 3.3.4 การเตรียมตัวอย่างแบบทดสอบ 32
- 3.3.5 วิธีการผสมซีเมนต์เพสต์ 32
- 3.3.6 วิธีการผสมมอร์ตาร์ 32
- 3.3.7 การทดสอบกำลังอัด 40

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ 42
4.1 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต 42
- 4.1.1 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์โดยใช้ X-ray Diffractometer : XRD 42
- 4.1.2 วิเคราะห์ผลจากการทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF) 42

4.2 ผลการทดสอบการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและวิเคราะห์ผล 44
4.3 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวและวิเคราะห์ผล 45
4.4 ผลการทดสอบการหาค่าการไหลแผ่ของมอตาร์และวิเคราะห์ผล 46
4.5 ผลการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดและวิเคราะห์ผล 47

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 49

บรรณานุกรม 50
ภาคผนวก 58

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน..... **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก**
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงลักษณะเคมีฝุ่นหินอ่อน 6
ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมี, พื้นที่ผิว ของเถ้าหญ้าเนเปียร์และปูนซีเมนต์ 7
ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมซัลโฟอโลมิเนตซีเมนต์กับปอร์ตแลนซีเมนต์ 14
ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ซีเมนต์ CSAB 17
ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ CSAB 17
ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงองค์ประกอบของ CSAB ซีเมนต์โดยแสดงค่าเป็นร้อยละโดยมวล 19
ตารางที่ 3.1 สารผสมหลักที่ใช้ 20
ตารางที่ 3.2 สารผสมเพิ่ม 20
ตารางที่ 3.3 ตารางอัตราส่วนผสมระหว่าง CSA กับ OPC 23
ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของมอร์ตาร์ 32
ตารางที่ 3.5 แสดงอายุของการบ่มเพสต์ 40
ตารางที่ 3.6 แสดงอายุของการบ่มมอร์ตาร์ 40
ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์เคมีจากการยิงรังสี XRF ของวัตถุดิบต้นในการสังเคราะห์ CSA ซีเมนต์ 43
ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของ CSA ซีเมนต์เปรียบเทียบกับปอร์แลนด์ซีเมนต์ 43
ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ 44
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์แต่ละตัวอย่าง 45
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอัตราการไหลแผ่ 46
ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ 47
ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ 48

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการให้กำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3
รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 1,000 เท่า) 8
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 10,000 เท่า) 8
รูปที่ 2.4 โต๊ะทดสอบการไหลแผ่ 12
รูปที่ 2.5 เครื่องผสมมอร์ตาร์ 13
รูปที่ 2.6 การเปรียบความสามารถในการรับแรงของมอร์ตาร์(a)ซีเมนต์สีเทา(G)และ(b)ซีเมนต์สีขาว(W) 15
รูปที่ 2.7 แสดงผลการทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์ผสม 16
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของ CSAB ซีเมนต์ 18
รูปที่ 3.1 เครื่องผสมสาร 21
รูปที่ 3.2 ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ 21
รูปที่ 3.3 เตาเผาสาร 22
รูปที่ 3.4 แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส 23
รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งและขวดแก้วสำหรับตวงน้ำ 24
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบไวแคต 25
รูปที่ 3.7 เครื่องผสมปูนซีเมนต์เพสต์ 25
รูปที่ 3.8 เกรียงเหล็กและที่ตักวัสดุ 26
รูปที่ 3.9 แบบหล่อมอร์ตาร์และเครื่องชั่งน้ำหนัก 29
รูปที่ 3.10 เครื่องผสม ถ้วยผสมและใบกวน 29
รูปที่ 3.11 โต๊ะทดสอบการไหล (Flow table) 30
รูปที่ 3.12 กระบอกขวดแก้วตวงน้ำและเหล็กใช้กระทุ้ง (Tamper) 30
รูปที่ 3.13 เกรียงเหล็กและภาชนะควบคุมอุณหภูมิความชื้น 31
รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์และเพสต์ 31
รูปที่ 3.15 ประกอบหม้อผสมและใบผสม จากนั้นใส่น้ำและตามด้วยซีเมนต์ลงในหม้อผสม 33
รูปที่ 3.16 เปิดเครื่องผสมปูนซีเมนต์และน้ำด้วยอัตราผสมช้า 34
รูปที่ 3.17 การผสมต่อด้วยอัตราเร็วปานกลาง 34
รูปที่ 3.18 หยุดการผสมและปล่อยให้มอร์ตาร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 90 วินาที 35
รูปที่ 3.19 การนำภาชนะมาปิดปากหม้อผสมเพื่อกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากหม้อผสม 35

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.20 การอัดหรือกระทุ้งมอร์ตาร์ประมาณ 20 ครั้ง 36
รูปที่ 3.21 ลักษณะการแผ่ของมอร์ตาร์และการวัดระยะของการแผ่ 37
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการกระทุ้งมอร์ตาร์ในแบบหล่อ 38
รูปที่ 3.23 การตักมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อและการกระทุ้ง 38
รูปที่ 3.24 การกระทุ้งมอร์ตาร์ในแบบ 39
รูปที่ 3.25 การแต่งผิวมอร์ตาร์ให้เรียบเสมอ 39
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผล XRD ของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์ CSA ซีเมนต์ 42
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ 45
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวสุดท้าย 46
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ 47
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ 48

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างที่ใช้กันอย่างแพร่หลายตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยสารเชื่อมประสานที่เกิดจากซีเมนต์ที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจะมีชื่อเรียกเฉพาะที่แตกต่างกันไปตามส่วนผสม ได้แก่ ซีเมนต์เพสต์ (cement paste) ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ มอร์ตาร์ (mortar) ประกอบด้วย ซีเมนต์เพสต์ผสมกับทราย และคอนกรีต (concrete) ประกอบด้วย มอร์ตาร์ผสมกับหิน โดยส่วนผสมเหล่านี้จะมีน้ำเป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยาเมื่อนำมาผสมกันจะคงสภาพเป็นของเหลวอยู่ช่วงระยะหนึ่งพอที่จะนำมาเทลงในแบบหล่อที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ หลังจากนั้นก็จะแปรสภาพเป็นของแข็งที่มีความแข็งแรงและสามารถรับน้ำหนักได้มากขึ้นตามอายุของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น

สำหรับในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์พบว่ามีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมาจากการเปลี่ยนรูปทางเคมีของวัตถุดิบและการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นก๊าซเรือนกระจกและเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นหากสามารถใช้วัสดุที่ลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์จะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยในการลดการเกิดภาวะโลกร้อนได้ ซึ่งวัสดุที่เราสนใจนำมาศึกษาคือ Calcium sulfoaluminate cement (CSA)

องค์ประกอบที่สำคัญของปูน Calcium sulfoaluminate cement คือ Yeelilimite ($C_4A_3\bar{S}$) และ Belite β-C_2S ซึ่งได้จากการเผาหินปูน สารประกอบอลูมิเนียม (บอร์กไซด์และวัสดุรีไซเคิล) และแคลเซียมซัลเฟต ปูนที่ได้ถูกนำไปผสมต่อด้วยแคลเซียมซัลเฟตในปริมาณที่เหมาะสม ในระหว่างการผลิต ปูน CSA ซีเมนต์จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซน์ในปริมาณที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ทั่วไปเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการผลิตอยู่ที่ประมาณ 1,250 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้สำหรับทำปูนซีเมนต์ทั่วไปและการใช้ประโยชน์จากสารผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตสามารถทำมาใช้ควบคุมคุณสมบัติเฉพาะบางอย่างได้ เช่น การเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดช่วงต้นหรือการขยายตัวของคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งเน้นถึงการศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาในการก่อตัวและศึกษาค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ ของวัสดุซีเมนต์ผสมระหว่างปอร์ตแลนด์ซีเมนต์และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ เพื่อที่จะสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาคุณสมบัติเฉพาะของปูนซีเมนต์ได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษางานวิจัยชิ้นนี้คือเพื่อศึกษาคุณสมบัติการรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ และหาระยะเวลาก่อตัว โดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับซีเมนต์ที่ผลิตขึ้นเอง โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่าง 0-40% โดยน้ำหนัก

1.2.1 ศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต โดยใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นวัสดุตั้งต้น

1.2.2 เพื่อศึกษาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาในการก่อตัว ของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต

1.2.3 เพื่อศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ผลิตขึ้น

1.2.4 เพื่อศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ผลิตขึ้น

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 ทราบแนวทางในการสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต จากวัสดุกากอุตสาหกรรม

1.3.2 ทราบถึงระยะเวลาในการก่อตัวของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต

1.3.3 ทราบถึงความสามารถในการรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ ของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ผลิตขึ้น

1.3.4 ทราบถึงความสามารถในการรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ของวัสดุผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ผลิตขึ้น

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษาการสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต โดยใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมได้แก่ ฝุ่นหินอ่อน เถ้าหญ้าเนเปีย คาโอลินไนต์ อะลูมินาออกไซด์ และยิปซัม

1.4.2 ศึกษาการคุณสมบัติทางวิศวกรรมโดยใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับแคลเซียมซัลโฟลอลูมิเนต ซีเมนต์ ที่ผลิตขึ้นด้วยการทดลองดังต่อไปนี้ โดยจะใช้อักษรย่อปูนซีเมนต์ (Cement,C) แคลเซียมซัลโฟลอลูมิเนตซีเมนต์ (Calcium sulfoaluminate cement, CSA)
อัตราส่วนผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับแคลเซียมซัลโฟลอลูมิเนตซีเมนต์โดยน้ำหนัก (C : CSA) แสดงดังนี้ CSA0, CSA20, CSA25, CSA30, CSA35, CSA40

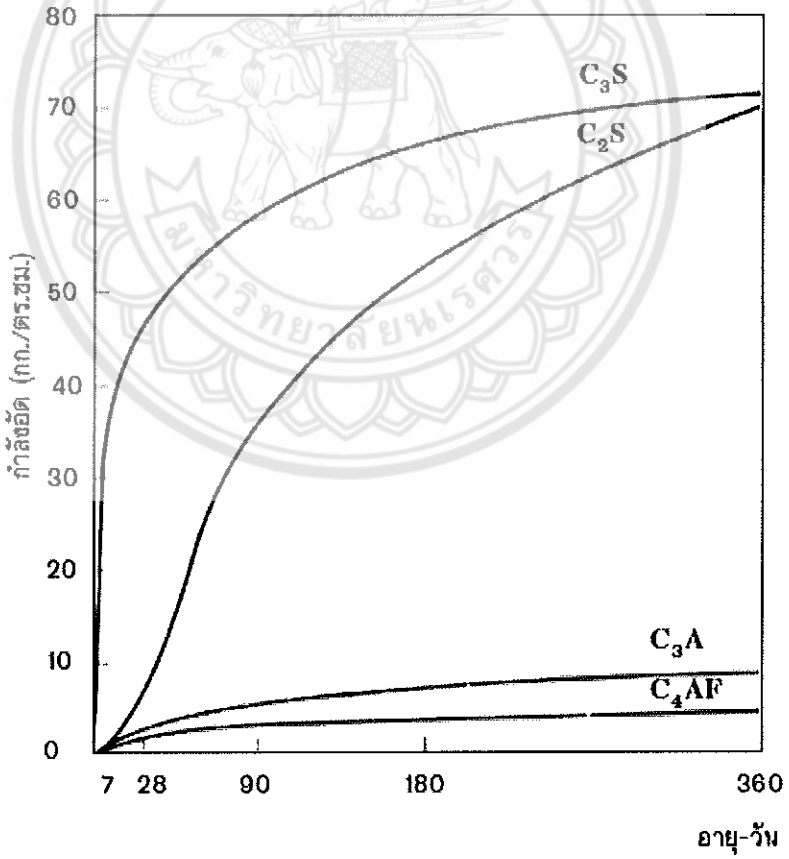
- การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมประกอบด้วย การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคต
- การทดสอบหากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์
- การทดสอบหาค่าการไหลแผ่ และการทดสองกำลังอัดของมอร์ตาร์
- การทดสอบหาค่าการยุบตัว และกำลังอัดของมอร์ตาร์

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุก่อสร้างชนิดหนึ่ง มีชื่อเต็มว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ลักษณะเป็นผงละเอียดสีเทา สามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ในน้ำ จึงใช้หล่อในแบบให้เป็นรูปร่างต่างๆ ตามที่ต้องการโดยมีสารประกอบที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังนี้

ชื่อของสารประกอบ	ส่วนประกอบทางเคมี	ชื่อย่อ
ไตรแคลเซียม ซิลิเกต	3 CaO. SiO_2	C_3S
ไดแคลเซียม ซิลิเกต	2 CaO. SiO_2	C_2S
ไตรแคลเซียม อะลูมิเนต	3 CaO. Al_2	C_3A
เตตระแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์	4 CaO. Al_2O_3. Fe_2O_3	C_4AF



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงการให้กำลังอัดของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ [1]

- ไตรแคลเซียมซิลิเกต C_3S เมื่อผสมกับน้ำจะแข็งตัวภายใน 2-3 ชั่วโมง และจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากในช่วงสัปดาห์แรกการเกิดปฏิกิริยากับน้ำจะก่อให้เกิดความร้อน 500 จูลต่อกรัม กำลัง

อัตของ C_3S ถูกกระทบโดยปริมาณยิบซัม โดยปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 35-55% [1]

- ไดแคลเซียมซิลิเกต C_2S ณ อุณหภูมิทั่วไป C_2S มีคุณสมบัติยึดเกาะ เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยปล่อยความร้อน 250 จูลต่อกรัม เมื่อแข็งตัวจะพัฒนากำลังอัดอย่างช้าๆ แต่ในระยะยาวจะได้กำลังอัดใกล้เคียงกับ C_3S โดยปริมาณ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมีประมาณ 15-35% [1]

- ไตรแคลเซียมอะลูมิเนต C_3A โดยจะทำปฏิกิริยาทันทีเมื่อสัมผัสกับน้ำ ก่อให้เกิด Flash Set และเกิดความร้อนจำนวนมาก ประมาณ 850 จูลต่อกรัม การป้องกัน Flash Set ทำได้โดยการเติมยิบซัมลงไปในระหว่างการบดซีเมนต์ กำลังอัดของ C_3A จะพัฒนาขึ้นภายใน 1-2 วันแต่กำลังอัดค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_3A อยู่ในปริมาณ 7-15% [1]

- เตตระแคลเซียม อะลูมิโน เฟอไรต์ C_4AF ทำปฏิกิริยากับน้ำรวดเร็วมาก และก่อตัวภายในไม่กี่วินาที ความร้อนที่เกิดปฏิกิริยาประมาณ 420 จูลต่อกรัม กำลังอัดของ C_4AF ค่อนข้างต่ำ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะมี C_4AF อยู่ในปริมาณ 5-10% [1]

จำนวนสารประกอบที่อยู่ในปูนซีเมนต์ทำให้คุณสมบัติของปูนซีเมนต์เปลี่ยนไป เช่น ทำให้ปูนซีเมนต์มีกำลังรับแรงเร็วหรือช้า ระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวอาจเร็วขึ้นหรือช้าลง ความร้อนที่ได้จากการปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับปูนซีเมนต์อาจสูงหรือต่ำ เป็นต้น

2.1.1 วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ แบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้

1. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของปูนขาว (Line Component) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate. $CaCo_3$) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ประมาณ 85 – 95% ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ หินปูน (Limestone) ชอล์ก (Chalk) และดินขาว (Marl)

2. วัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของดินดำ (Clay) เป็นวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบทางเคมีของซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide, SiO_2) อะลูมินัมออกไซด์ (Aluminum Oxide, Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric Oxide, Fe_2O_3) ตัวอย่างวัตถุเหล่านี้ตามธรรมชาติ ได้แก่ ดินดำ (Clay) และดินดาน (Shale)

3. วัตถุดิบปรับแต่งคุณสมบัติ (Corrective Materials) เป็นวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเพิ่มเติมสารประกอบบางตัวซึ่งมีไม่เพียงพอในดินดำหรือดินดาน วัตถุดิบเหล่านี้ได้แก่ ทราย (ในกรณีที่ต้องการซิลิคอนไดออกไซด์) แร่เหล็กหรือดินลูกรัง (ในกรณีที่ต้องการเฟอร์ริกออกไซด์) และดินอะลูมินา (ในกรณีที่ต้องการอะลูมินัมออกไซด์) เป็นต้น

2.2 แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ (CSA) ประกอบด้วย Yeelilimite ($C_4A_3\bar{S}$) Belite β-C_2S Ferrite (C_4AF) และ Anhydrite ($C\bar{S}$) โดยการสังเคราะห์ CSA นั้นต้องใช้วัตถุดิบที่มีต้นกำเนิดของ CaO เช่นหินปูนหรือฝุ่นหิน, SiO_2 เช่น ทราย, SO_3 เช่น ยิบซั่ม และ Al_2O_3 เช่น แร่บอร์กไซต์

2.2.1 ส่วนประกอบหลักของวัตถุดิบในการสังเคราะห์ CSA

ยิปซัม (Gypsum)

ยิปซัม (Gypsum) ($CaSO_4{\cdot}2H_2O$) $CaSO_4.H_2O$) หรือเรียกว่าเกลือจืด เรียกชื่อต่างกันออกไปตามลักษณะของเนื้อแร่ คือ ชนิดซาตินสปาร์ (satinspar) เป็นแร่ยิปซัมลักษณะที่เป็นเนื้อเสี้ยน มีความวาวคล้ายไหม ชนิดอะลาบาสเทอร์ (alabaster) มีเนื้อเป็นมวลเม็ดอัดกันแน่น และชนิดซีลีไนต์ (selenite) ใสไม่มีสี เนื้อแร่เป็นแผ่นบางโปร่งใส เกิดจากแร่ที่ตกตะกอนในแอ่งที่มีการระเหยของน้ำสูงมากและต่อเนื่อง ทำให้น้ำส่วนที่เหลือมีความเข้มข้นสูงขึ้น ถึงจุดที่แร่กลุ่มที่เรียกว่า "อีแวพอไรต์ (Evaporates)" จะสามารถตกตะกอนออกมาตามลำดับความสามารถในการละลาย (solubility) ซึ่งโดยทั่วไปเริ่มจากพวกคาร์บอเนต (carbonates), ซัลเฟต (sulphates) และเฮไลด์ (halides) การกำเนิดแร่ยิปซัมของไทยมีเนื้อเป็นเกล็ดเล็กๆ สมานแน่น เรียกว่า "อะลาบาสเตอร์ (alabaster)" ซึ่งมิได้เกิดจากการตกตะกอนทับถมกันในสภาพการณ์ปฐมภูมิจากการระเหยของน้ำ แต่เกิดจากการเติมน้ำ (rehydration) ให้กับช่วงบนสุดของมวลแอนไฮไดรต์จนเกิดการเปลี่ยนแปลง ชนิดแร่ยิปซัมในประเทศไทยมีประวัติที่ค่อนข้างซับซ้อน และการศึกษาธรณีวิทยาแหล่งแร่พบว่า เคยผ่านการเปลี่ยนแปลงชนิดแร่ไปมาระหว่างยิปซัมกับแอนไฮไดรต์ ($CaSO_4$) หลายครั้ง (Utha-aroon and Ratanajarurak, 1996) ก่อนจะมีสภาพเช่นในปัจจุบัน

อะลูมินาออกไซด์ (alumina oxide)

อะลูมินาออกไซด์เป็นสารประกอบเคมีของอะลูมิเนียมและออกซิเจนมีสูตรเคมีดังนี้ Al_2O_3 ในทางเซรามิก วัสดุศาสตร์และเหมือนเรียกว่าอะลูมินา (alumina) อะลูมิเนียมออกไซด์ เป็นส่วนประกอบหลักของแร่บอกไซต์ (bauxite) หรือแร่ อะลูมิเนียม ในอุตสาหกรรมบอกไซต์โดยทำให้บริสุทธิ์เป็นอะลูมิเนียมออกไซด์ โดยกระบวนการไบเออร์ (Bayer process) และเปลี่ยนเป็นโลหะอะลูมิเนียมโดย กระบวนการฮอลล์-ฮีรูลต์ (Hall-Heroult process) บอกไซต์ที่ไม่บริสุทธิ์จะประกอบด้วย

$Al_2O_3 + Fe_2O_3 + SiO_2$. โดยกระบวนการไบเออร์ ดังสมการ

$Al_2O_3 + 3H_2O + 2NaOH$ -- (heated) $\rightarrow$ $2NaAl(OH)_4$.

Fe_2O_3 ไม่ละลายในด่าง ส่วน SiO_2 ละลายเป็นซิลิเกต (silicate) Si (OH)6-6. โดยการกรอง Fe_2O_3 จะถูกกำจัดออก เมื่อเติมกรดลงไป Al (OH)3 จะตกตะกอน ซิลิเกต (silicate) จะเหลืออยู่ในสารละลาย ดังสมการ $Al(OH)_3$ -- (heated) $\rightarrow Al_2O_3 + 3H_2O$. Al_2O_3 คือ อะลูมินา (alumina)

ฝุ่นหินอ่อน

หินอ่อนเกิดจากแคลไซต์ หรือ หินปูน ที่สะสมอยู่ในท้องทะเลหรือมหาสมุทรมาก่อน กระทั่งเกิดการเคลื่อนไหวขึ้นในบริเวณดังกล่าวคือที่ๆ เคยเป็นทะเลหรือมหาสมุทรกลับกลายเป็นภูเขาขึ้นมา และที่ๆ เคยเป็นบกเป็นภูเขามากลับกลายเป็นทะเล รวมถึงผ่านกระบวนการทางธรณี เช่น เกิดมีแมกมาไหลออกมา และพอดีหินที่สะสมไว้ในทะเลไปโดนกับแมกมาเข้า สำคัญคือแมกมานั้นเต็มไปด้วยความร้อน ความดัน และก๊าซ จึงทำให้แคลเซียมคาร์บอเนต(หินปูน)ละลาย แล้วตกผลึก เกิดเป็นหินอ่อนขึ้นมาได้ในที่สุด แต่ในกรณีที่เกิดการหลอมละลายแล้วตกผลึกไม่หมดทีเดียว ก็จะเกิดหินปูนคล้ายหินอ่อน และจะพบพวกซากเปลือกหอยทะเลต่างๆ ซึ่งครั้งหนึ่งเคยอยู่รวมกับตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยฝุ่นหินอ่อนได้จากกรรมวิธีการผลิตหินอ่อน ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมี คือ $CaCO_3$

ลักษณะทางกายภาพ

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงลักษณะเคมีฝุ่นหินอ่อน [2]

properties of WMD and cement used.	
Oxide %	WMD
CaO	54.43
SiO_2	0.67
Al_2O_3	0.12
Fe_2O_3	0.08
MgO	0.59
SO_3	-
K_2O	-
Nd_2O	0.14
Loss on ignition	43.4

เถ้าหญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์ (Napier Grass) จัดเป็นหญ้าอาหารสัตว์ที่นิยมปลูกมาก เนื่องจาก ลำต้น และใบมีขนาดใหญ่ และมีคุณค่าทางอาหารสัตว์สูง รวมถึงสามารถเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตต่อไร่สูง สามารถเก็บเกี่ยวต้นได้ตลอดทั้งปี และเก็บเกี่ยวได้นาน 5-7 ปี ต่อการปลูก 1 ครั้ง โดยหญ้าเนเปียร์ (Pennisetum purpureum) มีถิ่นกำเนิดในแถบประเทศของแอฟริกา ปัจจุบันพบปลูกแพร่กระจายทั่วโลกในแถบประเทศอบอุ่น ส่วนประเทศไทยได้นำหญ้าเนเปียร์จากประเทศมาเลเซียเข้ามาปลูกครั้งแรกในปี พ.ศ.

2472 โดย นายอาร์ พี โจนส์ และในช่วงปี พ.ศ. 2504-2507 ประเทศไทยได้นำเมล็ดพันธุ์จากต่างประเทศมาปลูกอย่างต่อเนื่อง อาทิ กรมปศุสัตว์ นำเข้าพันธุ์ลูกผสมจากประเทศอินเดียเข้ามาปลูก

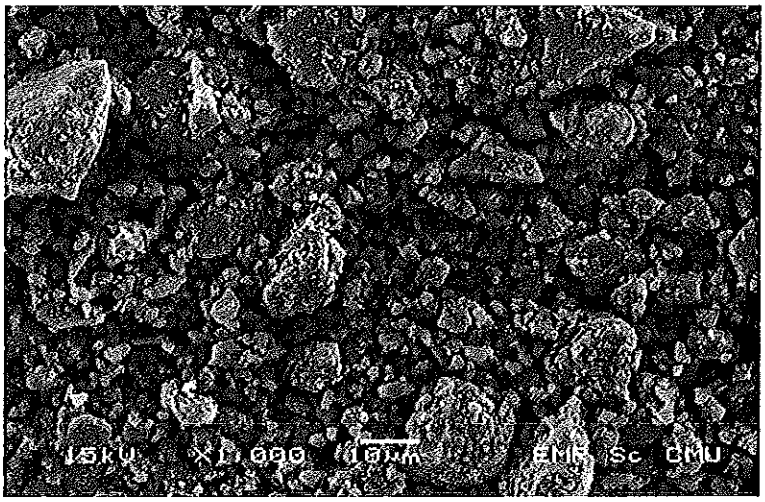
เถ้าหญ้าเนเปียร์มีองค์ประกอบของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันเท่ากับ 95.05% ซึ่งมากกว่าความต้องการทางเคมีที่มีข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C618-03 ผลิตภัณฑ์ปอซโซลานธรรมชาติตามที่กำหนดในมาตรฐาน ซึ่งผลรวมของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ต้องสูงกว่า 70% จึงมีความเป็นไปได้ว่าเถ้าหญ้าเนเปียร์อาจมีความเหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ดั้งนั้นเถ้าหญ้าเนเปียร์จึงถูกเลือกในการวิจัยศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติทางวิศวกรรมเพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุทดแทนซีเมนต์

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมี, พื้นที่ผิว ของเถ้าหญ้าเนเปียร์และปูนซีเมนต์ [3]

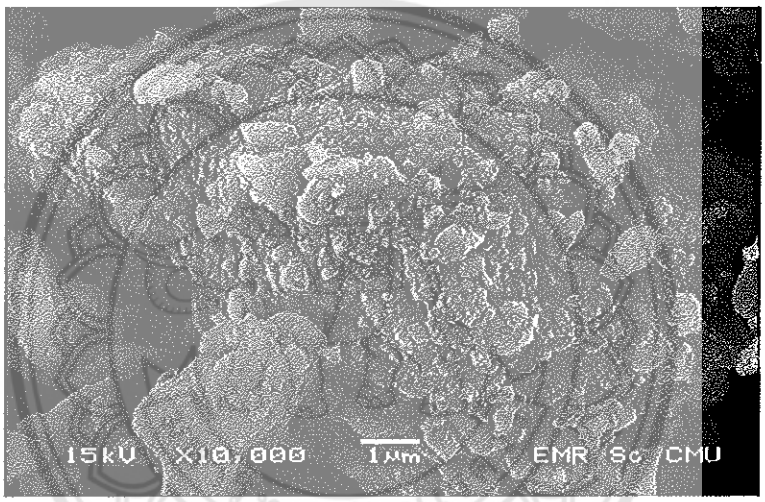
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	เถ้าหญ้าเนเปียร์
Al_2O_3 (%)	5.16	2.20
SiO_2 (%)	20.71	91.52
SO_3 (%)	2.14	0.55
K_2O (%)	0.48	2.45
CaO (%)	66.23	1.75
MnO_2 (%)	-	0.18
Fe_2O_3 (%)	3.22	1.31
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3 (%)	-	95.04
BET specific surface area (m^2/kg)	3.20	75.92

รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีขนาดอนุภาคคละกัน และมีรูปร่างไม่แน่นอน

รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ มีลักษณะผิวขรุขระ



รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 1,000 เท่า) [3]



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าหญ้าเนเปียร์ (กำลังขยาย 10,000 เท่า) [3]

คาโอลิไนต์

โอลิไนต์ (KaO) หรือ China Clay) ประกอบด้วยแร่คาโอลิน และมีแร่อื่นปะปนเช่น ควอตซ์ โดยองค์ประกอบหลักๆได้แก่ อลูมินา และซิลิกา ซึ่งโอลินไนต์ ที่นำมาใช้มากกว่าครึ่งหนึ่งใช้สำหรับอุตสาหกรรมเซรามิกส์ โดยสามารถจำแนกโอลินไนต์ ตามลักษณะการเกิดได้ 3 แบบหลักๆ ได้แก่

- แบบที่เกิดอยู่ที่เดิม (Residual Clay) ได้แก่ ดินขาวที่อยู่ในตำแหน่งเดิม ซึ่งมีการผุพังอยู่กับที่ หินเดิมอาจเป็น แกรนิต ไรโอไรต์ เพกมาไทต์ อัลไบต์ หรือหินอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ดินขาวจากแหล่งแร่ดีบุกทางภาคใต้ ดินขาวแบบนี้จะมีทรายหยาบปนอยู่ปริมาณมาก อาจถึงร้อยละ 75
- แบบที่ถูกพัดพาไปจากแหล่งกำเนิด (Transported Clay) เกิดจาก ดินขาวในแบบแรกและถูกกระแสน้ำพัดพาไปสะสมตัวยังแหล่งใหม่ จึงมีขนาดอนุภาคเล็ก มีความละเอียดสูงกว่า
- แบบที่ได้มาจากการแทนที่ด้วยน้ำร้อน (Hydrothermal Replacement) ได้แก่ ดินขาว ที่พบบริเวณแหล่งน้ำแร่ แบบน้ำร้อน

2.2.2 องค์ประกอบของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

yeelilimite ($C_4A_3\bar{S}$) [4]

Yeelimite ($C_4A_3\bar{S}$) เป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของซัลเฟตและปูนขาว ซึ่งทำให้เกิดการก่อตัวของ ettringite ($C_6AS_3H_{32}$) ดังปฏิกิริยา (1) หากไม่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ye'elimite จะทำให้เกิด ettringite และกิบบ์ไซต์ (AH_3) ดังปฏิกิริยา (2) หรือ monosulfoaluminate (C_4ASH_{12}) และกิบบ์ไซต์ในกรณีที่ไม่มีซัลเฟต ดังปฏิกิริยา (3) ในกรณีที่ไม่มีซัลเฟต แต่มีแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือhydrogarnet (C_3AH_6) และสารละลายของแข็ง ($C_3A.$ ½CS. ½CA. Hx)

$$C_4A_3\bar{S} + 8\ C\bar{S} + 6CH + 90H \rightarrow 3C_6A\bar{S}_3H_{32} \quad (1)$$

$$C_4A_3\bar{S} + 2\ C\bar{S} + 38H \rightarrow C_6A\bar{S}_3H_{32} + 2\ AH_3 \quad (2)$$

$$C_4A_3\bar{S} + 18\ H \rightarrow C_4A\bar{S}H_{12} + 2\ AH_3 \quad (3)$$

ปฏิกิริยาที่ (1) และ (2) แสดงให้เห็นว่า ปูนขาวสามารถปรับเปลี่ยนลักษณะและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ปูนขาวยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ye'elimite อีกด้วย ในการผสมของซีเมนต์ OPC และ CSA แคลเซียมไฮดรอกไซด์สามารถเพิ่มได้โดยตรงกับตัวประสาน หรือจาก OPC (ที่ไม่มีปูนขาว) หรือ ได้จากผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของ OPC (portlandite) ดังนั้นองค์ประกอบของ OPC มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการของปูนซีเมนต์ได้

Belite β-C_2S [5]

มีสูตรคือ β-C_2S ไดแคลเซียมซิลิเกต ซึ่งมีส่วนช่วยเล็กน้อยในการรับกำลังอัดในช่วงแรกแต่เป็นเฟสหลักของการรับแรงอัดในการไฮเดรชันซีเมนต์

Ferrite (C_4AF) [5]

เป็นเฟสใน Calcium sulfoaluminate Cement ที่มีการเกิดปฏิกิริยารวดเร็วกว่าใน Odinary Portland Cement (OPC) เนื่องจากมีการก่อตัวที่อุณหภูมิต่ำในระยะสั้นและเป็นส่วนรับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์นอกเหนือจาก Yeelimite และ C_2S

Anhydrite ($C\bar{S}$) [5]

คือเฟสที่จำเป็นสำหรับกระบวนการทำงานของเฟส Yeelimite ถ้าหาก ($C\bar{S}$) ไม่เกิดเฟสใน CSA ต้องเพิ่ม Gypsum เข้าไปผสมกับ Yeelimite เพื่อที่จะทำให้กำลังอัดช่วงแรกสูงและเพิ่มกำลงอัดให้สูงเมื่อเวลาผ่านไปโดยเปลี่ยนจาก CH และ AH_3 ไปเป็น เอททริงไกด์ ($C_6A\bar{S}_3H_{32}$)

2.3 ซีเมนต์เพสต์

2.3.1 การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต [6]

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต หรือ การทดสอบหาความข้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของปูนซีเมนต์ หมายถึงปริมาณที่ผสมลงไปในปูนซีเมนต์ แล้วทำให้เกิดสภาวะความข้นเหลวมาตรฐานคงที่ โดยจะพิจารณาให้เข็มมาตรฐานที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ม.ม. ของชุดทดสอบไวแคต จมลงในซีเมนต์เพสต์เป็นระยะ 10 ม.ม. ภายใน 30 วินาที โดยปริมาณน้ำที่ทำให้ปูนซีเมนต์เกิดความข้นเหลวปกตินี้ จะได้เป็นค่ามาตรฐาน เพื่อการหาคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ต่อไป เช่น ระยะการก่อตัว (Setting Time) ความอยู่ตัว (Soundness) และแรงดึงของซีเมนต์เพสต์หรือซีเมนต์มอร์ตา (Tensile Strength) ของปูนซีเมนต์เป็นต้น ค่าความข้นเหลวปกติของปูนซีเมนต์โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 24-28 %

2.3.2 การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต

การหาระยะการก่อตัวของซีเมนต์นั้นจะทำให้ทราบถึงระยะเวลาที่จะต้องทำงาน ไม่ว่าจะเป็นการผสม การหล่อ การทำให้แน่นให้แล้วเสร็จ ก่อนที่ซีเมนต์หรือคอนกรีตนั้นจะไม่คืนตัว และแข็งตัวในเวลาต่อมา โดยทั่วไปแล้วปูนซีเมนต์ต้องมีระยะเวลาการก่อตัวไม่น้อยกว่า 45 นาที แบ่งระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ออกได้เป็น 2 ระยะ คือ

1. ระยะเวลาการก่อตัวขั้นต้น (Initial Setting Time) คือ ระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวจนสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานไวแคตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ม.ม. ที่ปล่อยจมลงในซีเมนต์เพสต์ 25 ม.ม. ภายในเวลา 30 วินาที

2. ระยะเวลาการก่อตัวขั้นปลาย (Final Setting Time) คือระยะเวลาที่ซีเมนต์เพสต์ก่อตัวจนสามารถรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานไวแคตได้ โดยไม่จมลงในซีเมนต์เพสท์เลย เพียงแค่เป็นรอยกระแทกของเข็มเท่านั้น

เมื่อปูนซีเมนต์ผสมรวมกับน้ำจะได้ซีเมนต์เพสต์ (Cement Paste) มีลักษณะนุ่มเหลวปั้นง่าย ถ้าปล่อยทิ้งไว้โดยไม่รบกวนในไม่ช้าซีเมนต์เพสต์จะสูญเสียความไม่คืนตัวและถึงสถานะที่ไม่เปลี่ยนรูปร่างได้โดยปราศจากการแตกหัก การเปลี่ยนสภาวะนี้เรียกว่าการก่อตัวและการแข็งตัวของซีเมนต์ตัวแปรที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์มีหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิห้องทดสอบ ถ้าอุณหภูมิสูงการก่อตัวจะเร็วขึ้น ถ้าอุณหภูมิต่ำการก่อตัวก็จะช้าลง ความละเอียดของปูนซีเมนต์ยิ่งปูนซีเมนต์มีความละเอียดมาก การก่อตัวก็จะเร็วขึ้น ปริมาณน้ำที่ผสมในปูนซีเมนต์ และส่วนผสมที่เป็นส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ โดยทั่วไปการก่อตัวจะเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเพราะอุณหภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างซีเมนต์กับน้ำ ปริมาณของน้ำที่ใช้ในการผสมมีอิทธิพลมากต่อระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัว ด้วยเหตุนี้ในการทดสอบหาระยะการก่อตัวจึงได้กำหนดให้ใช้ปริมาณน้ำเพื่อผสมปูนซีเมนต์ให้ได้ซีเมนต์ที่ภาวะมาตรฐานคงที่เสมอ

2.3.3 การทดสอบกำลังอัดเพสต์

เพสต์ เป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ โดยเพสต์ถูกออกแบบเพื่อใช้การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคตและการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต ซึ่งในการทดสอบกำลังอัดนั้นแทบไม่มีการทดสอบอย่างเป็นทางการ ดังนั้นจึงไม่มีการกำหนดมาตรฐานในการทดสอบที่แน่นอน กลุ่มของข้าพเจ้าจึงใช้วิธีการหล่อแบบมอร์ตาร์และใช้วิธีในการผสมของการทดสอบหาระยะเวลาในการก่อตัวของซีเมนต์เพื่อไม่เป็นการที่แตกต่างจากการคำนวณหาค่ากำลังอัดของทั้งมอร์ตาร์และเพสต์ โดยในการหล่อซีเมนต์เพสต์นั้นจะใช้ขนาด 50x50x50 มิลลิเมตร การรับกำลังอัดของเพสต์เป็นสิ่งที่แสดงความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ ถ้าการรับกำลังอัดได้สูง ก็สามารถแสดงได้ว่าปูนซีเมนต์นั้นมีคุณภาพดี ซึ่งในอาคารประเภทต่างๆจะให้ส่วนโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตนี้ ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ ฉะนั้นความแข็งแรงของปูนซีเมนต์จึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาให้รับกำลังได้ตามที่กำหนดไว้

2.4 มอร์ตาร์

2.4.1 การสดสอบหาค่าการไหลแผ่

การทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์นั้นเป็นการทดสอบเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าอัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์นั้นเหมาะสมหรือไม่และเพื่อเป็นการกำหนดปริมาณน้ำใหม่ให้ได้ค่า 110±5% สำหรับซีเมนต์นิดอื่นๆ ในการนำไปทดสอบกำลังอัดต่อไป

2.4.2 การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

มอร์ตาร์ เป็นส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ ทราย น้ำ มอร์ตาร์ ถูกออกแบบเพื่อใช้สำหรับงานเทปรับระดับพื้นผิวคอนกรีตที่ไม่ต้องการกำลังอัด หรือเทหล่อเลี้ยงท่อก่อนการลำเลียงคอนกรีตโดยการใช้ปั๊ม การรับกำลังอัดของมอร์ตาร์เป็นสิ่งที่แสดงความแข็งแรงของปูนซีเมนต์ถ้าการรับกำลังอัดได้สูง ก็สามารถแสดงได้ว่า ปูนซีเมนต์นั้นมีคุณภาพดี ซึ่งในอาคารประเภทต่างๆจะให้ส่วนโครงสร้างที่เป็นคอนกรีตนี้ ทำหน้าที่รับแรงอัดเป็นส่วนใหญ่ ฉะนั้นความแข็งแรงของปูนซีเมนต์จึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาให้รับกำลังได้ตามที่กำหนดไว้

2.5 โต๊ะทดสอบการไหลแผ่ [7]

โต๊ะทดสอบ ทำด้วยทองเหลืองหรือทองแดงที่มีค่าความแข็ง Rockwell ไม่น้อยกว่า 25 HRB และมีความหนาขอบ 0.3 นิ้ว (7.5 มม.) และจะมีซี่โครงรัศมีแข็งตัวหกชิ้น ด้านบนโต๊ะและเพลาที่แนบมาจะต้องมีน้ำหนัก 9.± 0.1 ปอนด์ [4.08± 0.05 กก.] มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว ±0.1 นิ้ว (25 ซม ± 2.5 ซม.มีเพลาที่ติดตั้งตั้งฉากกับพื้นโต๊ะโดยใช้สกรูเกลียว ด้านบนของโต๊ะและเพลาที่มีไหล่สัมผัสจะต้องติดตั้งอยู่บนกรอบเพื่อให้สามารถยกและลดแนวตั้งได้ตามความสูงที่กำหนดไว้ที่ 0.5 ± 0.015 นิ้ว โครงรองรับของตารางการไหลต้องเป็นของเหล็กหล่อที่มีคุณภาพสูง ที่จะมีสามซี่โครงขยายเต็มความสูง

ของกรอบและตั้งอยู่ 120° ออกจากกัน ด้านบนของกรอบจะถูกชุบให้แข็งไว้ที่ความลึกประมาณ 1/4 นิ้ว (6 มิลลิเมตร) และด้านที่เป็นพื้นจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและด้านล่างของฐานกรอบจะต้องเป็นพื้นเพื่อป้องกันการสัมผัสกับเหล็กแผ่นด้านล่าง

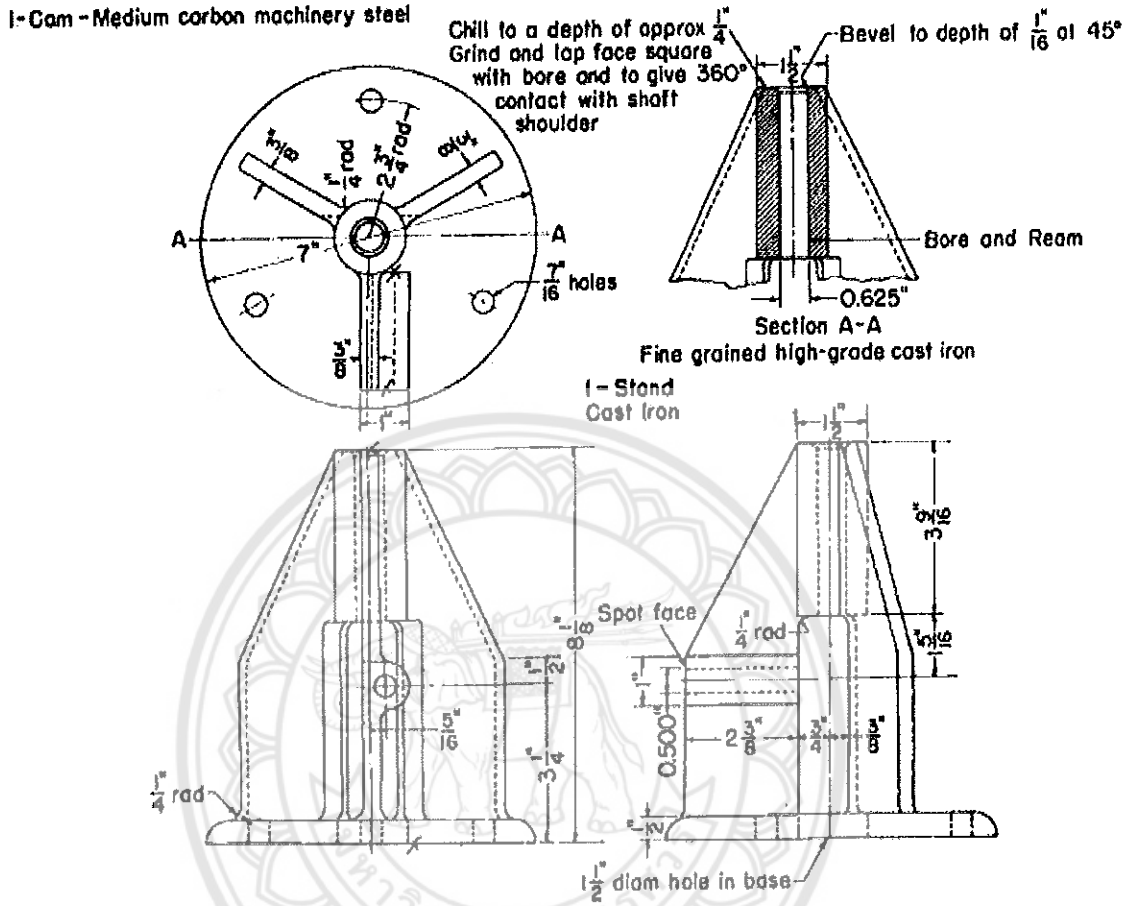


FIG. 1 Flow Table and Accessory Apparatus (Partial) (In./Lb)

รูปที่ 2.4 โต๊ะทดสอบการไหลแผ่

2.6 เครื่องผสมมอร์ตาร์และเพสต์ [8]

เครื่องผสมต้องเป็นเครื่องผสมเชิงกลที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าประเภท epicyclic ซึ่งจะให้ทั้งการเคลื่อนที่และการหมุนเวียนไปยังพายผสม เครื่องผสมต้องมีความเร็วอย่างน้อยสองความเร็วโดยควบคุมด้วยกลไกทางกลที่แน่นอน โดย ความเร็วแรกหรือช้าจะหมุนพายในอัตรา 140 ± 5 r/min โดยมีการเคลื่อนที่ประมาณ 62 รอบต่อนาที ความเร็วที่สองจะหมุนพายเรือในอัตรา 285 ±10 r/min โดยมีการเคลื่อนที่ประมาณ 125 r/min มอเตอร์ไฟฟ้าจะต้องมีอย่างน้อย 124 วัตต์ (1/6hp) เครื่องผสมต้องติดตั้ง สกรูปรับซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องผสมหรือแผ่นรองรับการกวาดล้าง เพื่อให้ช่องว่างระหว่างปลายล่างของใบพัดและด้านล่างของโถที่มีขนาดไม่เกิน 2.5 มม. แต่ต้องไม่น้อยกว่า 0.8 มม. เมื่อโถที่อยู่ในตำแหน่งผสม พายจะต้องถอดออกได้ง่ายทำจากสแตนเลสและต้องสอดคล้องกับการออกแบบขั้นพื้นฐานที่แสดงในรูป ตำแหน่งที่ใกล้เคียงที่สุดต้องมีขนาดประมาณ 4.0 มิลลิเมตร แต่ไม่น้อยกว่า 0.8

มิลลิเมตร ชามผสมที่ถอดออกได้ต้องมีความจุระบุ 4.73 ลิตรต้องมีรูปร่างทั่วไปและสอดคล้องกับขนาดที่ แสดงในรูป 2.5 และต้องทำด้วยสแตนเลส ชามจะติดตั้งให้ติดตั้งในเครื่องผสมในตำแหน่งคงที่ในระหว่างขั้นตอนการผสม จะต้องมีฝาปิดซึ่งทำจากวัสดุที่ไม่ใช่ซัลเฟอร์ซึ่งไม่ถูกทำร้ายโดยปูนซีเมนต์

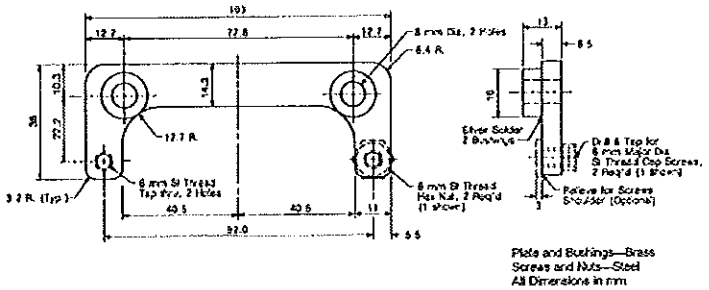


Plate and Bushings—Brass
Screws and Nuts—Steel
All Dimensions in mm

FIG. 1 Clearance Adjustment Bracket

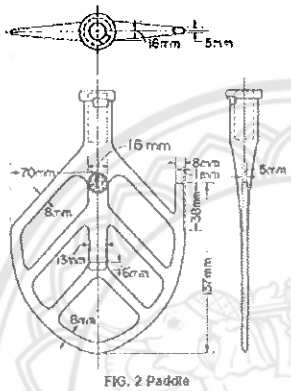


FIG. 2 Paddle

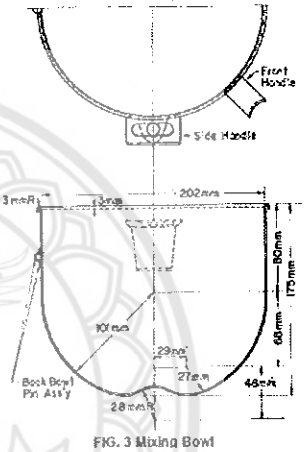


FIG. 3 Mixing Bowl

as specified in the method for the particular test for which the mortar is being prepared.

รูปที่ 2.5 เครื่องผสมมอร์ตาร์

2.7 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

R.Trauchessec *et al.* [4] ทำการศึกษาปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ในการศึกษานี้ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ คือปูนที่ผสมระหว่างปูนเม็ดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตและแอนไฮไดรต์ธรรมชาติโดยปูนเม็ดแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต(CSA)ที่ใช้มาจากการสังเคราะห์วัสดุรีไซเคิล ที่อุณหภูมิการเผาต่ำกว่า 1300 องศาเซลเซียส โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สองชนิดที่ใช้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สีเทา(G) และสีขาว(W)

จากตารางที่ 2.3 แสดงร้อยละของปูนซีเมนต์ผสม ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์-แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ ทั้งสามตัวอย่าง ใช้ตัวอย่างขนาด 4x4x16 ซม. โดยใช้ซีเมนต์ที่ผสมแล้วจำนวน 450 กรัม ทรายจำนวน 1350 กรัมและ น้ำต่อซีเมนต์ (W/C อัตราส่วน 0.5) จำนวน 225 กรัม

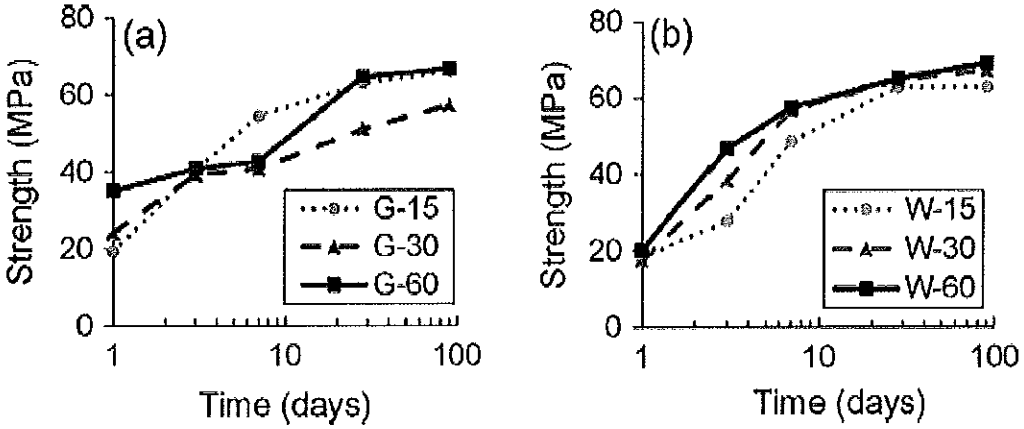
ตารางที่ 2.3 อัตราส่วนผสมระหว่างแคลเซียมซัลโฟอโลมิเนตซีเมนต์กับปอร์ตแลนซีเมนต์ [4]

Cement	Components (in weight percentages)	Mixtures		
		15%	30%	60%
CSA	Clinker	9	21	46.5
	Anhydrite	6	9	13.5
OPC	CEM I 52.5	85	70	40

จากรูปที่ 2.6 พบว่าค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของปูนซีเมนต์ผสมCSA ในสัดส่วนที่ต่างกัน (15%, 30% และ 60%) หลังจากผ่านไป 90 วัน ดังรูป2.6(a) และ 2.6(b) มีค่าการรับกำลังอัดที่แตกต่างกันในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกันของCSA ซีเมนต์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

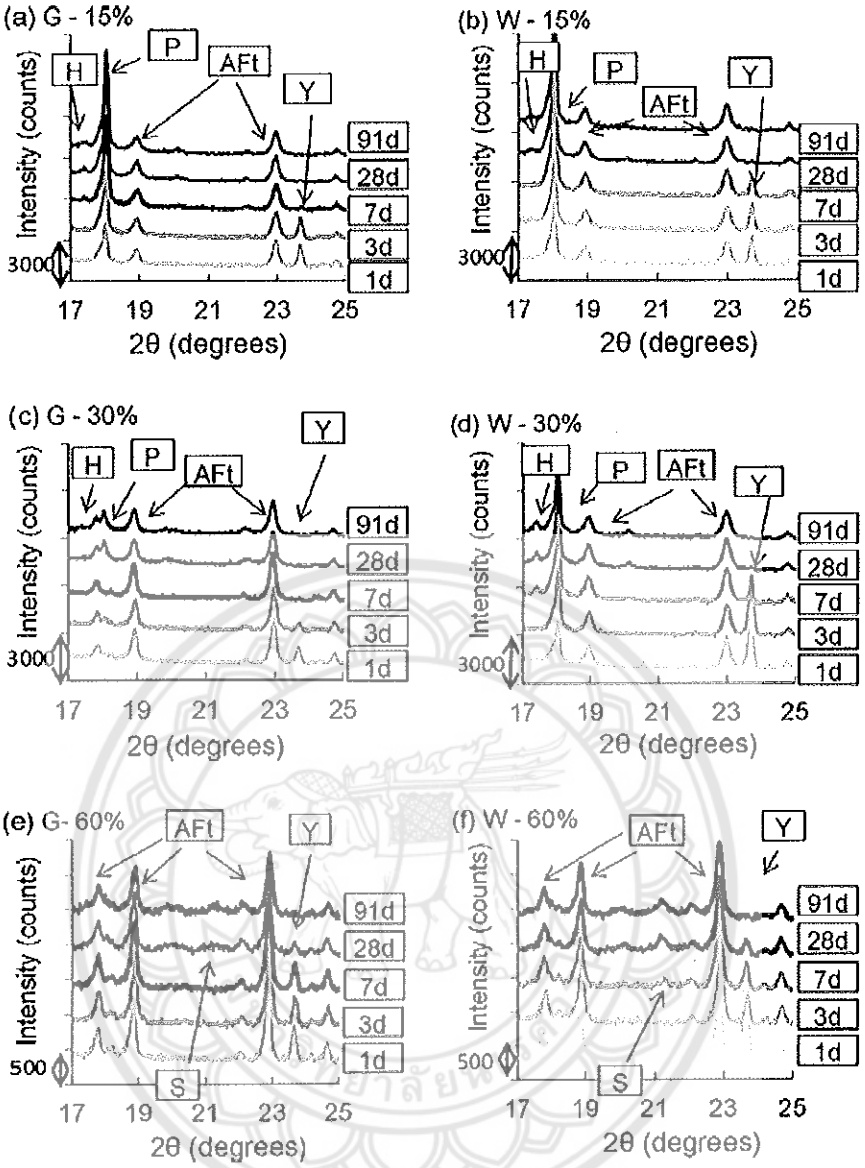
สำหรับ G-15 G-30 และ G-60 ดังรูป2.6(a) ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดที่ระยะเวลาการบ่ม 1 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระหว่าง 3 และ 7 วัน ค่าการรับกำลังอัดของตัวอย่างที่มีแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 30% และ 60% นั้นยังไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนในขณะที่ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของตัวอย่าง G-15 เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

สำหรับตัวอย่าง W-15 W-30 และ W-60 ดังรูปที่ 2.6(b). ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดที่ระยะเวลาในการบ่ม 1 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามระหว่าง 3 และ 7 วัน ค่าการรับกำลังอัดของตัวอย่างที่มีแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 30% และ 60% มีค่าใกล้เคียงกันแต่ในขณะที่ค่าความสามารถในการรับกำลังอัดของตัวอย่าง W-15 มีค่าต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 2.6 การเปรียบความสามารถในการรับแรงของมอร์ตาร์(a)ซีเมนต์สีเทา(G)และ(b)ซีเมนต์สีขาว(W) [4]

จากรูปที่ 2.7 แสดงผลการทดสอบ X-ray diffraction (XRD) ในสารผสมที่มีแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ 15%, 30% และ 60% นอกจากนี้ผล XRD แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่สำคัญระหว่าง ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทั้งสองชนิด ได้แก่การเปลี่ยนแปลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของ ye'elimite ซึ่งปฏิกิริยาของ ye'elimite เกิดช้าลงในตัวอย่าง G (G-15, G-30 และ G-60) มากกว่าตัวอย่าง W (W-15, W-30 และ W-60)



รูปที่ 2.7 แสดงผลการทดสอบ XRD ของปูนซีเมนต์ผสม[4]

จากรูปที่ 2.7 ในผลการทดสอบ X-ray Diffraction (a) G - 15%, (b) W - 15%, (c), G - 30%, (d) W - 30%, (e) G - 60%, (f) W - 60% จากสัญลักษณ์ที่แสดงในรูป โดยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สีเทา(G) และ สีขาว(W) ซึ่งมีสารประกอบที่ได้มาจากผลการทดสอบ XRD ดังนี้ Portlandite(P), yeelilimite(Y), ettringite(Aft), hydrogarnet(H) และ Stratlingite(S)

Eugênio Bastos da Costa *et al.* [9] ศึกษาเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ที่ได้จากตะกรันอลูมิเนียม โดยทำการศึกษาศักยภาพของกากตะกรันอลูมิเนียมเป็นแหล่งทดแทนของ Al_2O_3 ในการผลิต CSAB ซีเมนต์และการพัฒนากำลังอัดในระหว่างการบ่ม ใน

การสังเคราะห์ CSAB ซีเมนต์ออกแบบโดยสมการ Bogue-modified เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่เป็นออกไซด์และมีการสะสมของเฟส C_2S,=40%, C_4A_3S=40% และC_4AF=10% สัดส่วนวัตถุดิบแสดงในตารางที่ 2.4 และแสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงปริมาณสารที่ใช้สังเคราะห์ซีเมนต์ CSAB[9]

Raw materials	Clinker ID		
	CSAB-Ref	CSAB-Bx/AAS	CSAB-AAS
Calcium carbonate (reagent grade)	51.1	1.1	-
Calcium sulfate (reagent grade)	17.5	11.9	7.3
Aluminium oxide (reagent grade)	16.8	-	-
Silicon oxide (reagent grade)	12.2	-	0.2
Ferric oxide (reagent grade)	2.5	-	1.1
Limestone	-	68.6	72.9
Bauxite (Bx)	-	9.2	
Aluminium anodising sludge (AAS)*	-	9.2	18.5

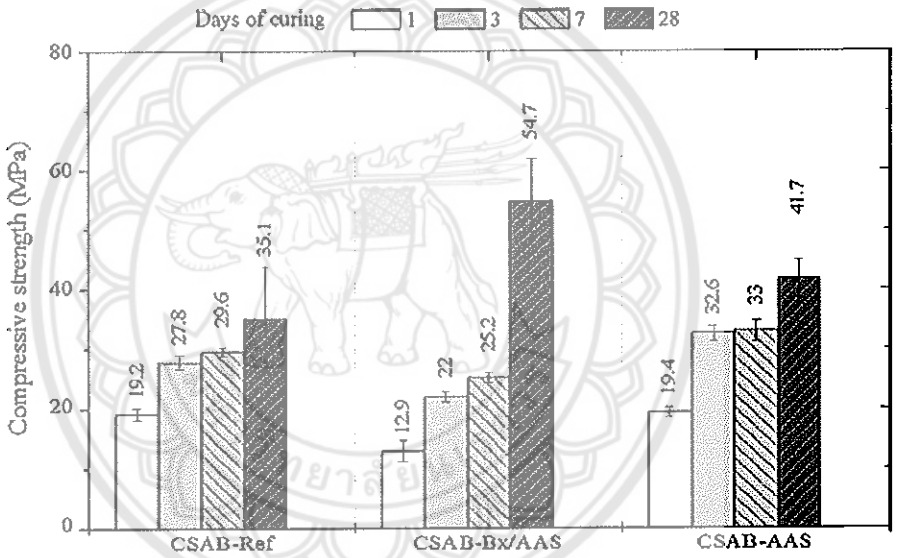
ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ CSAB[9]

Compound	CSAB-Ref	CSAB-Bx/AAS	CSAB-AAS
CaO	48.9	49.8	51.2
Al_2O_3	16.9	16.0	15.1
SiO_2	16.8	11.1	9.7
SO_3	12.4	10.9	12.1
Fe_2O_3	3.7	3.7	3.3
MgO	0.1	5.6	5.1
Na_2O	0.4	0.4	0.8
K_2O	0	0.7	0.7
Cl	0.03	0.02	0.02

ตารางแสดงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ CSAB (ต่อ)

Compound	CSAB-Ref	CSAB-Bx/AAS	CSAB-AAS
TiO_2	0	0.40	0.1
P_2O_5	0.02	0.1	0.1
Other components	0.18	0.40	0.29
LOI*	0.57	0.78	1.48

ผลการทดสอบการรับกำลังอัดของปูน CSAB ซีเมนต์ แต่ละชนิดที่มีอายุการบ่มแตกต่างกัน ดังรูป 2.8 ซึ่งปูน CSAB ซีเมนต์ที่ผลิตด้วยอะลูมินาแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่เด่นชัดแม้จะมีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกันก็ตาม



รูปที่ 2.8 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของ CSAB ซีเมนต์[9]

จากรูปที่ 2.8 แสดงผลการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดของ CSAB ซีเมนต์ พบว่าที่ 1 วัน CSAB-Bx/AAS ซีเมนต์สามารถรับกำลังอัดได้ 12.9 Mpa ซึ่งต่ำกว่า CSAB-AAS ซีเมนต์และ CSAB-Ref ซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม ตัวอย่าง CSAB-Bx/AAS และ CSAB-AAS ซีเมนต์ จะพัฒนาความสามารถในการรับแรงอัดได้ถึง 70% ตั้งแต่ 1 วันถึง 7 วัน หลังจากบ่มทำให้ประสิทธิภาพในการรับแรงอัดดีขึ้น หลังจากผ่านไป 28 วันจะมีกำลังอัดสูงกว่า CSAB-Ref ซีเมนต์ ความสามารถในการรับแรงอัดที่เพิ่มขึ้นของ CSAB-Bx/AAS ซีเมนต์ในระยะยาวซึ่งอาจเป็นผลมาจาก C_2S ของ CSAB-Bx/AAS ซีเมนต์ มีปริมาณสูงกว่า CSAB-Ref ซีเมนต์ ดังตาราง'ที่ 2.6 ซึ่งมีส่วนช่วยในการพัฒนาการรับกำลังอัดในระยะยาว

ตารางที่ 2.6 ตารางแสดงองค์ประกอบของ CSAB ซีเมนต์โดยแสดงค่าเป็นร้อยละโดยมวล

	CSAB-Ref	CSAB-Bx/AAS	CSAB-AAS
Orthorhombic ye'elimite (C_4A_3S)	37.0	25.5	28.8
Cubic ye'elimite (C_4A_3S)	3.5	5.3	6.7
Total ye'elimite (cubic+ orthorhombic)	40.5	30.8	35.5
Belite (C_2S)	32.1	41.1	39.1
Ternesite (C_5S_2S)	19.3	-	-
Brownmillerite-type phases (C_4AF)	4.6	11.9	7.4
Anhydrite (CS)	3.5	2.0	4.0
Alite (C_3S)	-	7.7	8.2
Periclase (MgO)	-	6.5	5.9
Agreement indices			
R expected – Rexp (%)	4.1	4.1	4.1
Weighted R profile – Rwp (%)	7.3	6.0	6.4
Goodness of fit – $X^2 = [\frac{R_{wp}}{R_{exp}}]^2$	-	2.2	2.4

บทที่ 3
วิธีดำเนินโครงงาน

3.1 การเตรียมตัวอย่างแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

3.1.1 วัสดุที่ใช้ทำแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

1. ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

2. สารผสมหลักที่ใช้

ตารางที่ 3.1 สารผสมหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

ชื่อส่วนประกอบ	ยิปซัม	อะลูมินาออกไซด์	ฝุ่นหินอ่อน (MDW)	เถ้าหญ้าเนเปียร์(NGA)	ฝุ่นกากเซรามิก (CDW)
อัตราส่วนผสม %	16.38	30.93	37.19	10.00	5.04

3. สารผสมเพิ่ม

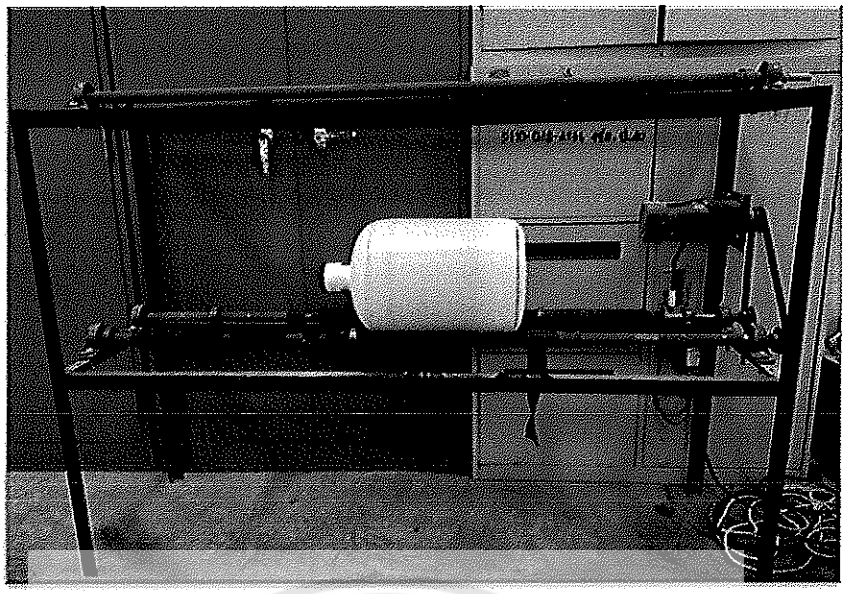
ตารางที่ 3.2 สารผสมเพิ่มที่ใช้ในการสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

ชื่อสารผสมเพิ่ม	Bi_2O_3	Fe_2O_3	CaF_2
อัตราส่วนผสม %ของทั้งหมด	0.4%	1.5%	0.74%

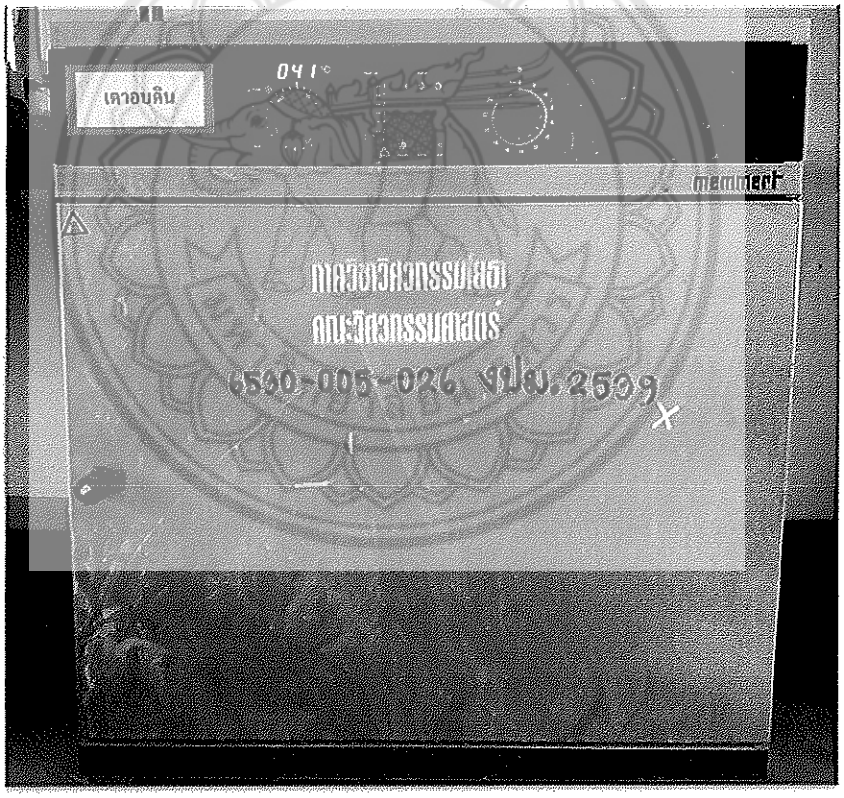
4. เอทิลแอลกอฮอล์ 95%

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้

1. เครื่องผสมสาร ให้เนื้อสารผสมกัน (รูปที่ 3.1)
2. ถุงมือยางกันความชื้น
3. ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ (รูปที่ 3.2)
4. เตาเผาสาร ที่ควบคุมอุณหภูมิได้ (รูปที่ 3.3)
5. ตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 100
6. เครื่องชั่ง ชั่งได้ละเอียดและแม่นยำในช่วงน้ำหนัก 0.01 กรัม. (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.1 เครื่องผสมสาร



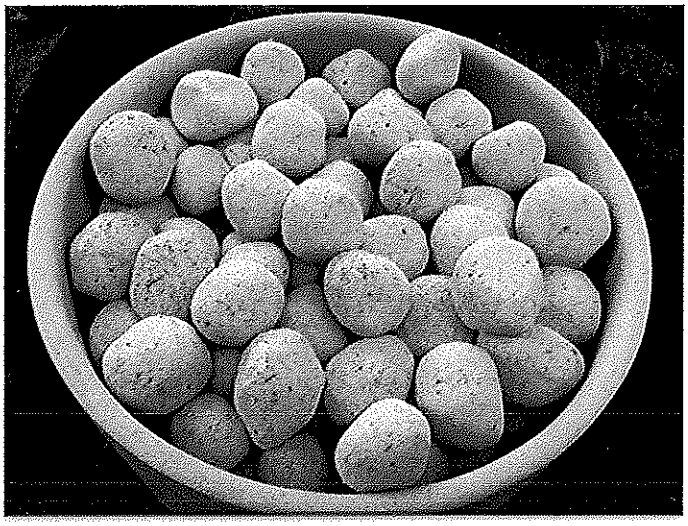
รูปที่ 3.2 ตู้อบที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้

รูปที่ 3.3 เตาเผาสาร

3.1.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

1. นำฝุ่นหินอ่อนร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เผื่อให้ได้ขนาดคละของเม็ดปูนและ เพื่อกรองสิ่งปนเปื้อน ใบไม้ ใบหญ้า ที่อาจปนมา
2. นำฝุ่นหินอ่อนที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 800 องสาเซลเซียส
3. เตรียมสารผสมอันได้แก่ ยิปซัม อะลูมินาออกไซด์ เถ้าหญ้าเนเปียร์ และคาโอลินไนต์ แล้วนำฝุ่นหินอ่อนที่เผาที่อุณหภูมิ 800 องสาเซลเซียส ตวงสารเพื่อที่จะทำการผสมโดนเครื่องบอนสาร โดยเฉลี่ยเวลาประมาณ 4 ชม.
4. หลังบอนสารเรียบร้อยแล้ว ให้นำสารนั้นมาผสมกับเอทิลแอลกอฮอล์ 95% เพื่อให้สารที่ผสมเข้ากับฝุ่นหินอ่อนจับตัวกันเป็นก้อน
5. นำสารก้อนสารที่ผสม ไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เพื่อไล่ความชื้น
6. นำก้อนสารที่อบเสร็จ เข้าเตาเผาสาร โดยใช้อุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เนื้อสารเปลี่ยนเฟทจะได้เป็น แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต (รูปที่ 3.4)
7. นำก้อนแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ที่เผาแล้วไปทำการบดโดยใช้เครื่องบอนสาร ประมาณ 3-5 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ขนาดที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 เป็นอย่างต่ำ
8. นำแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ที่บดแล้วไปผสมกับปูนปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ตามอัตราส่วนที่กำหนดโดย จะเพิ่มยิบซั่มเข้าไปอีก 20% ของน้ำหนักแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต

สำนักหอสมุด
15 ... 2564



รูปที่ 3.4 แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,250 องศาเซลเซียส

3.1.4 อัตราส่วนผสมระหว่าง CSA กับ OPC

ตารางที่ 3.3 ตารางอัตราส่วนผสมระหว่าง CSA กับ OPC

ชื่อตัวอย่าง	CSA0	CSA20	CSA25	CSA30	CSA35	CSA40
CSA (%)	-	20	25	30	35	40
OPC (%)	100	80	75	70	65	60
ยิบซั่ม (% ของน้ำหนัก CSA)	-	20	20	20	20	20

3.2 การหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์โดยวิธีเข็มไวแคต [10]

3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องชั่ง ชั่งได้ละเอียดและแม่นยำในช่วงน้ำหนัก 0.01 กรัม. (รูปที่ 3.5)

2. ขวดแก้วสำหรับตวงน้ำขนาด 250 หรือ 500 มิลลิกรัม. (รูปที่ 3.5)

3. เครื่องทดสอบไวแคต (รูปที่ 3.6) ซึ่งประกอบด้วย

- ขาตั้ง A

- ก้านเข็ม B ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามแนวดิ่ง โดยมีน้ำหนักเท่ากับ 300±0.5 ก.

- ที่ปลายก้านเข็ม B ตรงตำแหน่ง C มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 10±0.05 มม. มีความยาวไม่น้อยกว่า 50 มม. และปลายอีกด้านหนึ่งเป็นเข็มที่สามารถหมุนออกมาได้ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง D โดยมีเข็มที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1±0.05 มม. ยาวไม่น้อยกว่า 50 มม.

- ก้านเข็ม B สามารถถอดหมุนกลับด้าน หรือปรับตำแหน่ง โดยการหมุนสกรู E

- ตำแหน่ง F คือ สเกลบอกระยะทางที่มีหน่วยเป็น มม.

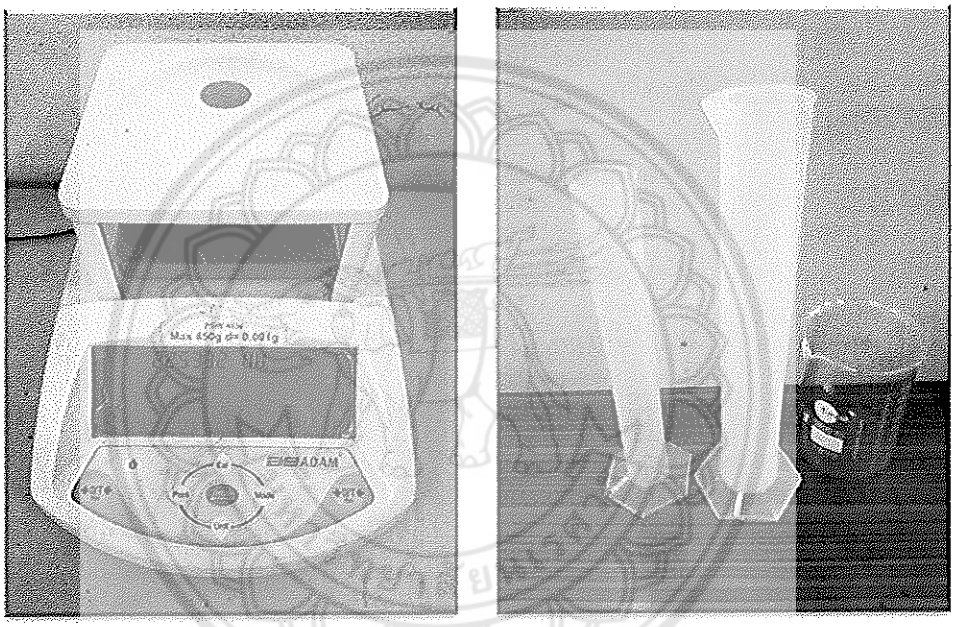
- แบบหล่อ G เป็นรูปกรวยซึ่งมีความสูง 40±1 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่ด้านล่างและด้านบนเท่ากับ 70±3 มม. และ 60±3 มม. ตามลำดับ

4. อุณหภูมิห้องที่ทำการทดลองให้อยู่ระหว่าง 20-27.5 องสาเซลเซียส และน้ำที่ใช้ในการผสมปูนซีเมนต์มีอุณหภูมิระหว่าง 21-25 องศาเซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์ของห้องทดลองไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

5. น้ำที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์ควรเป็นน้ำกลั่น หรือน้ำสะอาด

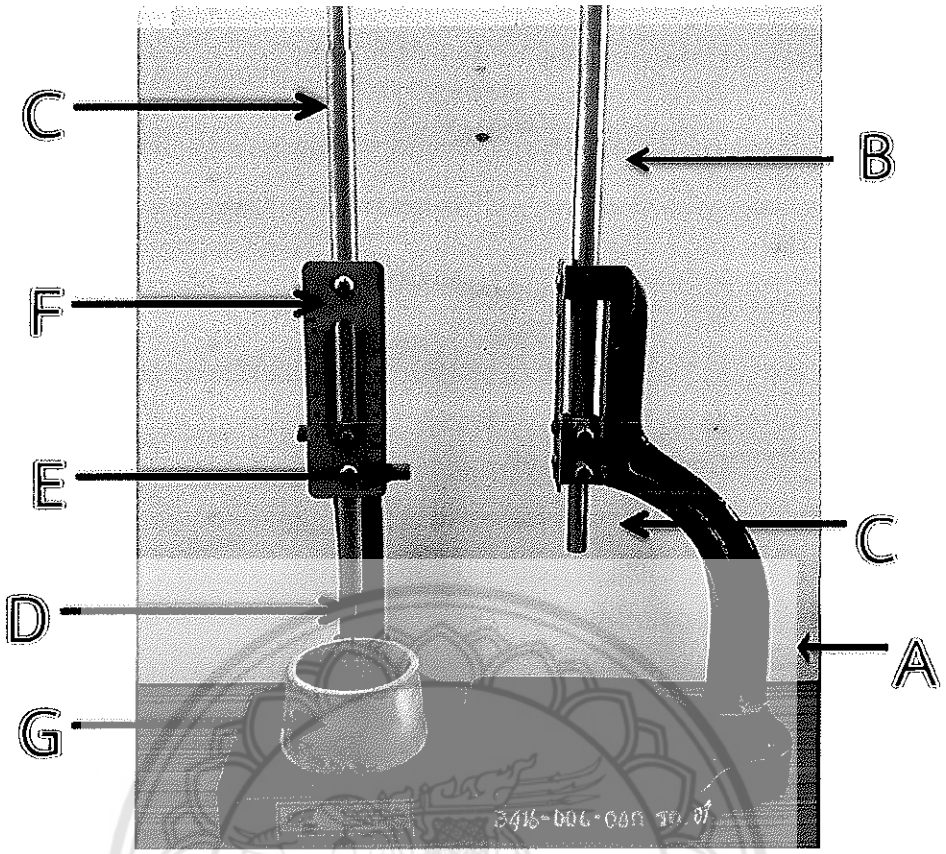
6. เครื่องผสมปูนซีเมนต์เพสต์ (รูปที่ 3.6) ที่สามารถปรับความเร็วขอบของใบผสมที่ใช้ในการกวนได้

7. อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับผสม เช่น เกรียงเหล็ก, ที่ตักวัสดุ (Scoop) และที่ปาดวัสดุ (Scraper) เป็นต้น



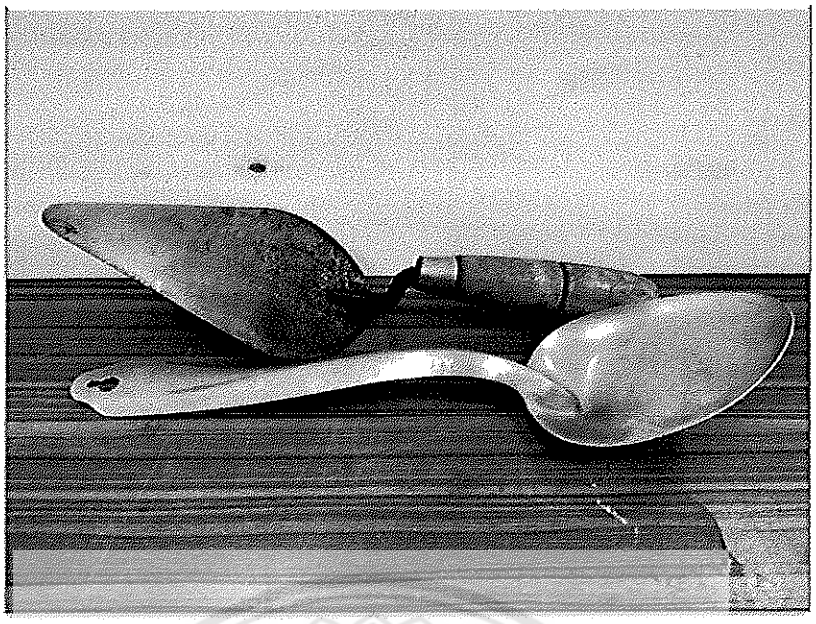
รูปที่ 3.5 เครื่องชั่งและขวดแก้วสำหรับตวงน้ำ

1039035
TH
1491
W156J
2559



รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบไวแคต

รูปที่ 3.7 เครื่องผสมปูนซีเมนต์เพสต์



รูปที่ 3.8 เกรียงเหล็กและที่ตักวัสดุ

3.2.2 วิธีการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

1. ชั่งปูนซีเมนต์จำนวน 650 ก. และตวงน้ำตามปริมาณที่กำหนดเพื่อให้เข้มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ตกลงอย่างอิสระและจมลงในซีเมนต์เพสต์น้อยกว่า 10 มม. จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเข็มไวแคตจมลงในซีเมนต์เพสต์มากกว่า 10 มม. จากนั้นจึงเพิ่มปริมาณน้ำขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเข็มไวแคตจมลงในซีเมนต์เพสต์มากกว่า 10 มม. ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองอย่างน้อยต้องมี 3 ค่า เป็นปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ซึ่งเป็นการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2. ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้งเข้ากับเครื่องผสม
3. ใส่น้ำที่จะผสมเข้าในหม้อผสมจนหมด
4. ใส่ปูนซีเมนต์ลงในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำและปล่อยให้น้ำซึมเข้าไปในปูนซีเมนต์ 30 วินาที
5. เมื่อครบ 30 วินาที จึงเดินเครื่องผสมเพื่อให้ใบผสมกวนส่วนผสมอย่างช้าๆโดยใช้อัตราช้า (140±5รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที
6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 วินาทีระหว่างที่หยุดนี้ให้ปากซีเมนต์เพสต์ที่ติดข้างหม้อผสมลงยังก้นหม้อ
7. เมื่อครบ 15 วินาที เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง (285±40 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที เป็นอันเสร็จขั้นตอน
8. ให้ผู้ทดสอบใส่ถุงมือยางทั้ง 2 ข้างนำซีเมนต์เพสต์ทั้งหมดออกจากหม้อผสมจากนั้นปั้นให้เป็นก้อนลูกบอลกลมๆ โยนสลับมือในแนวราบเป็นระยะทางห่างกันประมาณ 15 ซม.จำนวน 6 ครั้ง ซึ่งซีเมนต์เพสต์ที่ได้ควรเป็นเนื้อเดียวกัน
9. นำซีเมนต์เพสต์ใส่ยังแบบรูปกรวย G โดยใส่จากด้านฐาน (ด้านที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใหญ่กว่า) เพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ออกไปอีกด้านหนึ่ง
10. ปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนเกินออกจากแบบ G โดยใช้เกรียงเหล็กปาด ภายหลังจากปาดซีเมนต์ส่วนเกินออกแล้ว หากผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์ยังไม่เรียบให้ใช้เกรียงเหล็กปาดแต่งหน้าเบาๆและ

ระมัดระวังอย่าใช้เกรียงเหล็กปาดกดบนผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์จากนั้นนำแบบรูปกรวย G ที่มีซีเมนต์เพสต์วางบนเครื่องทดสอบไวแคต

11. เลื่อนก้านเข็มลงมา จนกระทั่งปลายเข็ม C สัมผัสกับผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์ จากนั้นยึดก้านเข็มให้แน่นด้วยกรู E

12. ปรับสเกลบอกระยะ F ให้อ่านที่ค่าศูนย์

13. ปริมาณน้ำทีความข้นเหลวปกติ คือปริมาณน้ำที่ทำให้เข็มไวแคตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. จมลงในซีเมนต์เพสต์ 10 มม. ในเวลา 30 วินาที ดังนั้นหากผลการทดลองพบว่าเข็มไวแคตจมน้อยกว่า 10 มม. แสดงว่าปริมาณน้ำน้อยเกินไป ให้เพิ่มปริมาณน้ำในการผสมซีเมนต์เพสต์ในครั้งต่อไป แต่ถ้าเข็มไวแคตจมมากกว่า 10 มม. แสดงว่าปริมาณน้ำมากเกินไป ดังนั้นในการผสมซีเมนต์เพสต์ครั้งต่อไปให้ใช้ปริมาณน้ำที่น้อยลงสำหรับการทดลอง 3 ครั้งเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

14. นำค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (%) และระยะจมของเข็มไวแคต (มม.) ไปสร้างความสัมพันธ์จะได้ร้อยละของปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับปูนซีเมนต์

3.2.3 วิธีการทดสอบเพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์

1. ชั่งน้ำหนักของปูนซีเมนต์ 650 ก. และตวงน้ำซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม จากวิธีการทดสอบปริมาณน้ำที่ได้

2. ทำการผสมซีเมนต์เพสต์ตามวิธีการที่ได้ผสมซีเมนต์เพสต์เพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม

3. ปรับเครื่องทดสอบไวแคตให้เป็นไปตามรูปที่ ซึ่งทำได้โดยการกลับก้านเข็ม B และใส่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม.

4. นำซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเรียบร้อยแล้ว โยนสลับมือจำนวน 6 ครั้งใส่ซีเมนต์เพสต์เข้าไปในแบบรูปกรวย G ทางด้านล่าง ปาดซีเมนต์เพสต์ส่วนเกินออกจากด้านบนของกรวย G จากนั้นปล่อยซีเมนต์เพสต์ทิ้งไว้ในที่ที่มีความชื้นสูงๆ (เช่นในอ่างน้ำที่เปียก แต่ไม่มีน้ำสัมผัสกับซีมนต์เพสต์) โดยไม่รบกวนเป็นเวลา 30 นาที

5. ภายหลังจากการทิ้งตัวอย่างไว้ครบ 30 นาทีจึงนำตัวอย่างวางบนเครื่องทดสอบไวแคตปรับระยะเข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มม. ให้ลงมาสัมผัสกับผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์ปรับสเกลระยะทางให้เป็นศูนย์

6. ปล่อยให้เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ตกอิสระเป็นเวลา 30 วินาที (โดยการคลายสกรู E) เมื่อครบ 30 วินาที ให้ล็อกสกรู E อ่านค่าระยะจมของเข็มไวแคตจากสเกลระยะทาง F ทำการทดสอบเพื่อหาระยะจมของเข็มไวแคตทุกๆ 15 นาที (หรือ 10 นาทีสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3) จนกระทั่งได้ระยะจมของเข็มไวแคตน้อยกว่า หรือเท่ากับ 25 มม. เมื่อปล่อยให้ตกอย่างอิสระเป็นเวลา 30 วินาที ระยะห่างระหว่างจุดที่ทดสอบต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 6.5 มม. และต้องห่างจากขอบของแบบกรวย G ไม่น้อยกว่า 9.5 มม.

7. ระหว่างทำการทดสอบอย่าให้มีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเพราะจะทำให้ผลการทดสอบผิดพลาด เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. ต้องตรงสะอาด และไม่คดงอ หากมีการคด หรืองอต้องดัดให้ตรงและทำความสะอาดทุกครั้งที่ใช้งาน

8. เวลาการก่อตัวระยะต้นของปูซีเมนต์เพสต์คือ ระยะเวลาที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. น้ำหนัก 300 ก. จมลงในซีเมนต์เพสต์เป็นระยะทาง 25 มม. เมื่อปล่อยให้ตกอย่างเป็นอิสระเป็นเวลา 30 วินาที ส่วนเวลาการก่อตัวระยะปลายของซีเมนต์เพสต์คือ ระยะเวลาที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์ จนถึงเวลาที่เข็มไวแคตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม.

น้ำหนัก 300 ก. ไม่สามารถจมลงในเนื้อซีเมนต์เพสต์ (มองด้วยตาเปล่า) เมื่อปล่อยให้ตกอย่างเป็นอิสระเป็นเวลา 30 วินาที ให้สิ้นสุดการทดสอบ

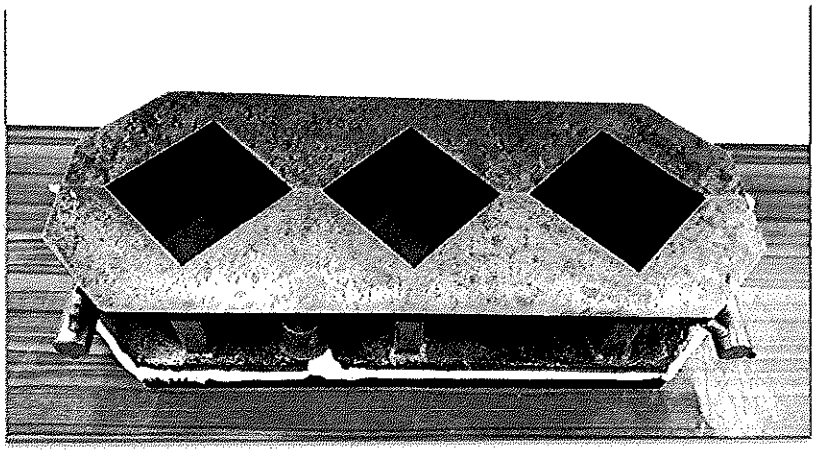
3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของเพสต์และมอร์ตาร์

เนื่องจากในการทดสอบกำลังอัดของเพสต์นั้นไม่พบข้อกำหนดในการทดสอบดังนั้นเพื่อให้ได้มาตรฐานที่คงที่จำใช้ข้อกำหนดในแบบเดียวกับการทดสอบมอร์ตาร์

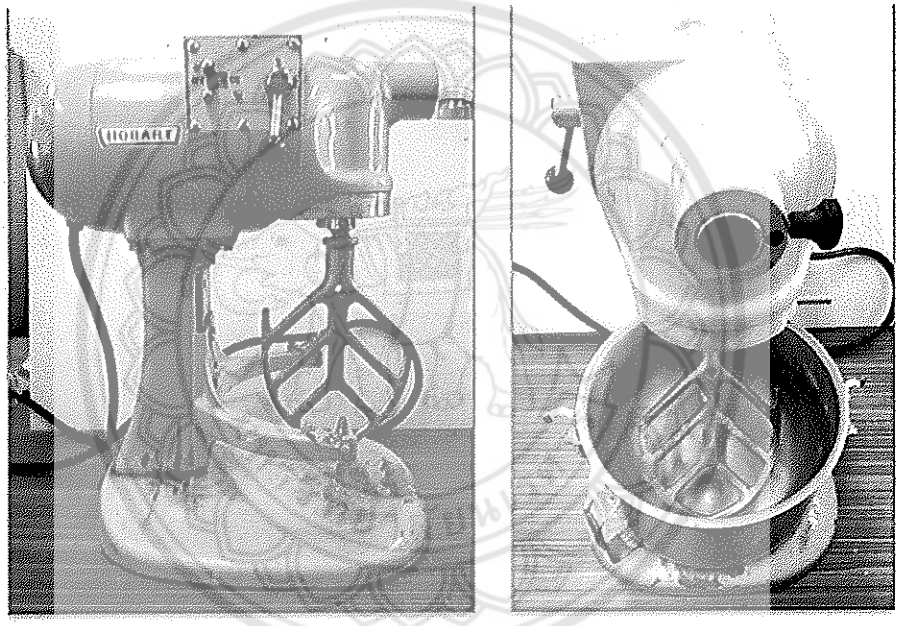
3.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. แบบหล่อมอร์ตาร์
2. เครื่องชั่งน้ำหนักที่สามารถชั่งที่อ่านได้ละเอียด 0.1 กรัม
3. เครื่องผสม ถ้วยผสมและใบกวน ต้องมีความจำเพาะตามข้อกำหนดของ ASTM ซึ่งรายละเอียดเพิ่มเติมของเครื่องผสมสามารถศึกษาได้จาก ASTM C305
4. ชุดทดสอบค่าการไหลของมอร์ตาร์ แบบการทดสอบ (Flow mold) และโต๊ะทดสอบการไหล (Flow table) รายละเอียดและสเปคสำหรับ Flow table ศึกษาได้จาก ASTM C230
5. กระบอก/ขวดแก้วตวงน้ำ
6. เหล็กใช้กระทุ้ง (Tamper) ยาวประมาณ 15 ซม. มีขนาดยาวเท่ากันตลอด มีหน้าตัดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 13x25 มม.
7. เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์
8. เทอร์โมมิเตอร์สำหรับวัดอุณหภูมิ
9. เกรียงเหล็ก ซึ่งมีความยาวเกรียงยาว 100 หรือ 150 มม. ใช้ในการผสมหรือตักมอร์ตาร์เข้าแบบ
10. ภาชนะควบคุมอุณหภูมิความชื้น เช่นถุงพลาสติก หรือห้องที่ควบคุมอุณหภูมิความชื้นได้
11. ซิลิโคน ดินน้ำมัน หรือวัสดุทากันน้ำรั่วซึมออกจากแบบหล่อมอร์ตาร์
12. ตะแกรงร่อนทรายมาตรฐานเบอร์ 30 และเบอร์ 100
13. เครื่องทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ซึ่งสามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึงร้อยละ ±1.0 ของกำลังที่ทดสอบได้

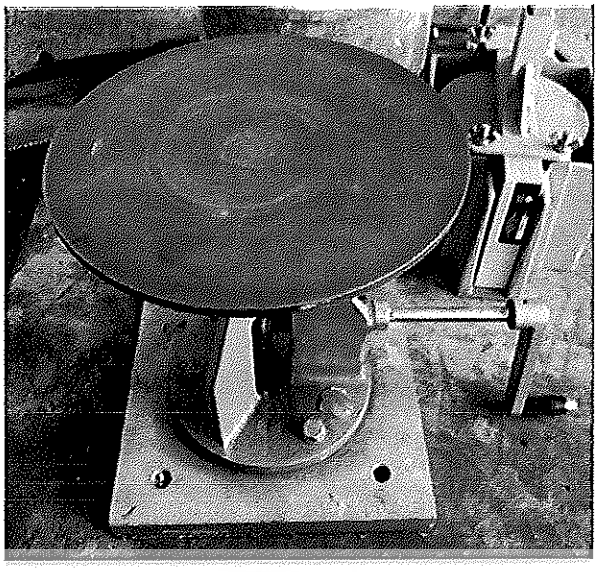
- แผ่นกดด้านบนเป็นบล็อกที่นั่งทรงกลมที่ทำจากโลหะแข็ง ศูนย์กลางของวงกลมควรวางที่ศูนย์กลางของพื้นผิวของบล็อกที่เชื่อมกับตัวอย่าง และเป็นอิสระที่จะเอียงไปได้หลายทิศทางอย่างอิสระ
- แผ่นรองที่ใช้ทำแบริ่ง (Bearing plate) ทำจากโลหะหรือเหล็ก เพื่อใช้รองปรับระดับการทดสอบมอร์ตาร์ได้ระนาบ และพอดีกับขนาดที่ทดสอบ ขนาดของเหล็กที่ใช้แบริ่งด้านบนควรมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของมอร์ตาร์ (5x5 ซม.) ไม่มากนัก



รูปที่ 3.9 แบบหล่อมอร์ตาร์และเครื่องชั่งน้ำหนัก

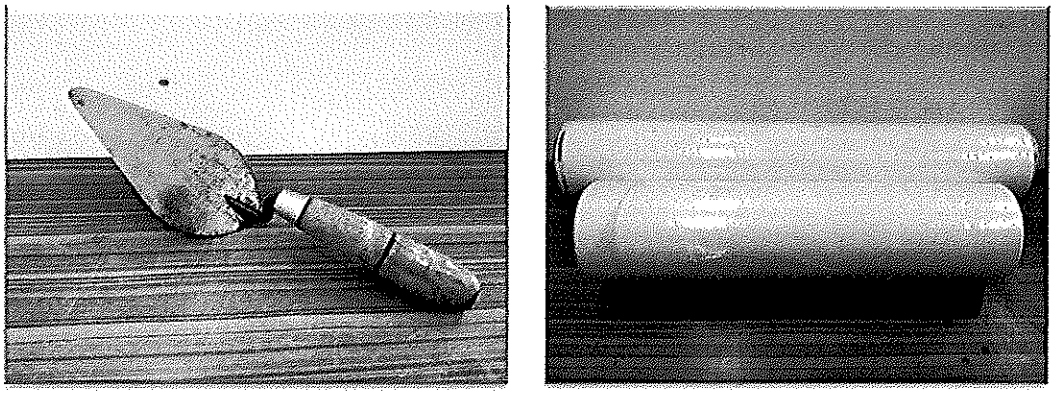


รูปที่ 3.10 เครื่องผสม ถ้วยผสมและใบกวน

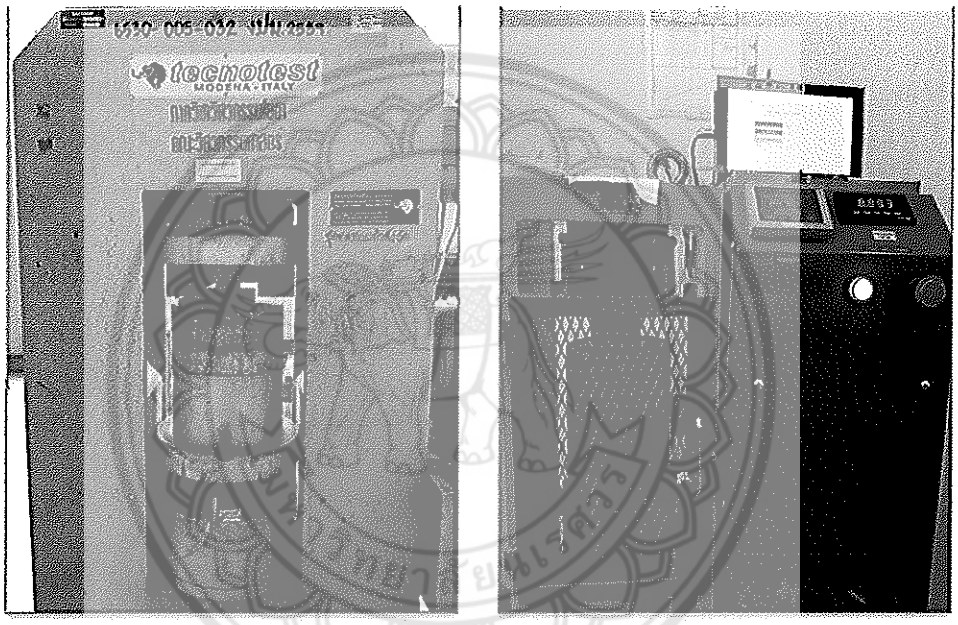


รูปที่ 3.11 โต๊ะทดสอบการไหล (Flow table)

รูปที่ 3.12 กระบอกขวดแก้วตวงน้ำและเหล็กใช้กระทุ้ง (Tamper)



รูปที่ 3.13 เกรียงเหล็กและภาชนะควบคุมอุณหภูมิความชื้น



รูปที่ 3.14 เครื่องทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์และเพสต์

3.3.2 วัสดุที่ใช้ทดสอบ

1. ทรายมารตราฐานที่ใช้คือทรายแม่น้ำ
2. วัสดุปูนซีเมนต์ที่นำมาทดสอบ
3. น้ำสะอาด อุณหภูมิตาม ASTM
4. น้ำมันเครื่อง สำหรับทารอบแบบเพื่อป้องกันแบบหล่อติดกับมอร์ตาร์ขณะถอดแบบ

3.3.3 อุณหภูมิและความชื้น

อุณหภูมิของอากาศในบริเวณใกล้เคียง รวมทั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ควรอยู่ระหว่าง 68-81.5 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 20-27.5 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิของ ของผสม ความชื้นของห้อง น้ำในแทงก์ที่

เก็บไว้ ควรตั้งไว้ที่ 73.5 ± 3.5 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 23 ± 2 องศาเซลเซียสและไม่ควรคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมินี้เกิน ± 3 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ ± 1.7 องศาเซลเซียส

ความชื้น ความชื้นสัมพัทธ์ของแลปไม่ควรต่ำกว่า 50 % ความชื้นของห้องควรเป็นไปตาม ASTM C511

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างแบบทดสอบ

1. เตรียมตัวอย่างแบบหล่อและตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดสอบ
2. ทำความสะอาดแบบหล่อให้สะอาด เช็คคราบสิ่งสกปรกที่ติดข้างในแบบออกให้หมด
3. ใช้แปรงขนอ่อนหรือผ้าบางๆชุบน้ำมัน ทาข้างในแบบหล่อบางๆไม่มากนัก เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้มอร์ตาร์ติดกับแบบหล่อในขณะถอดแบบ ระวังอย่าทาน้ำมันมากเกินไปมิฉะนั้นน้ำมันจะเข้าไปผสมกับกับเนื้อของมอร์ตาร์อาจทำให้มีผลต่อค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงได้
4. บริเวณรอยต่อของแบบ หรือมุมของแบบควรทาซิลิโคนหรือใช้ดินน้ำมันมาอุดบริเวณมุมรอยต่อของแบบ (ด้านนอก) เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำที่ผสมในมอร์ตาร์ไหลออกมาด้านนอก เพราะอาจเกิดรอยรั่วขึ้นได้บริเวณมุมหรือรอยต่อ ทำเกิดการสูญเสียน้ำ

3.3.5 วิธีการผสมซีเมนต์เพสต์

การทดสอบการรับกำลังอัดของซีเมนต์นี้ จะใช้อัตราส่วนผสมตามค่าเฉลี่ยของการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคตคือ ซีเมนต์ 1 ส่วน น้ำ 0.333 ของน้ำหนักซีเมนต์โดยการทดสอบจะใช้ทั้งหมด 21 ก้อนตัวอย่างโดยใช้ 3 ก้อนต่อกำลังอัด 1 ชุด โดยจะมีทั้งหมด 7 ชุดด้วยกันคือ 1/4,1/2,1,3,7,14 และ28 วัน ซึ่งมีวิธีการผสมดังนี้

1. ชั่งปูนซีเมนต์จำนวน 6,000 ก. และตวงน้ำตามปริมาณที่กำหนดปริมาณน้ำที่กำหนด
2. ประกอบหม้อผสมที่แห้งและใบผสมที่แห้งเข้ากับเครื่องผสม
3. ใส่น้ำที่จะผสมเข้าในหม้อผสมจนหมด
4. ใส่ปูนซีเมนต์ลงในหม้อผสมเพื่อสัมผัสกับน้ำและปล่อยให้น้ำซึมเข้าไปในปูนซีเมนต์ 30 วินาที
5. เมื่อครบ 30 วินาที จึงเดินเครื่องผสมเพื่อให้ใบผสมกวนส่วนผสมอย่างช้าๆโดยใช้อัตราช้า (140±5รอบต่อนาที) เป็นวลา 30 วินาที
6. หยุดเครื่องผสมเป็นเวลา 15 นาทีระหว่างที่หยุดนี้ให้ปากซีเมนต์เพสต์ที่ติดข้างหม้อผสมลงยังก้นหม้อ
7. เมื่อครบ 15 วินาที เดินเครื่องผสมด้วยอัตราปานกลาง (285±40 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที เมื่อครบ 1 นาทีเป็นการเสร็จสิ้นการผสมซีเมนต์เพสต์

3.3.6 วิธีการผสมมอร์ตาร์

ส่วนผสมสำหรับวัสดุมอร์ตาร์

อัตตราส่วนผสมมอร์ตาร์ที่ใช้ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.6 โดยก้อนทดสอบจะหล่อเป็นก้อนลูกบาศก์มาตรฐานขนาด (50x50x50 มม.) โดยจะใช้มอร์ตาร์ในการทดสอบ ทั้งหมด 15 ก้อนตัวอย่างโดยใช้ 3 ก้อนต่อกำลังอัด 1 ชุด โดยจะมีทั้งหมด 5 ชุดด้วยกันคือ 1,3,7,14 และ 28 วัน

ตารางที่ 3.4 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

วัสดุ	จำนวนก้อนตัวอย่างที่ต้องการ	
	15 ก้อน	18 ก้อน
ปูนซีเมนต์ (ก.)	1,250	1,500
ทราย (ก.)	3,438	4,125
น้ำ (ก.)	762.5	900

การผสมตัวอย่างมอร์ตาร์

1) ประกอบหม้อผสม และตรวจเช็คหม้อ ใบพัดที่ใช้ผสม ให้เรียบร้อยพร้อมใช้งาน

2) นำน้ำที่ทำการตวงใส่ลงในเครื่องผสมจนหมด

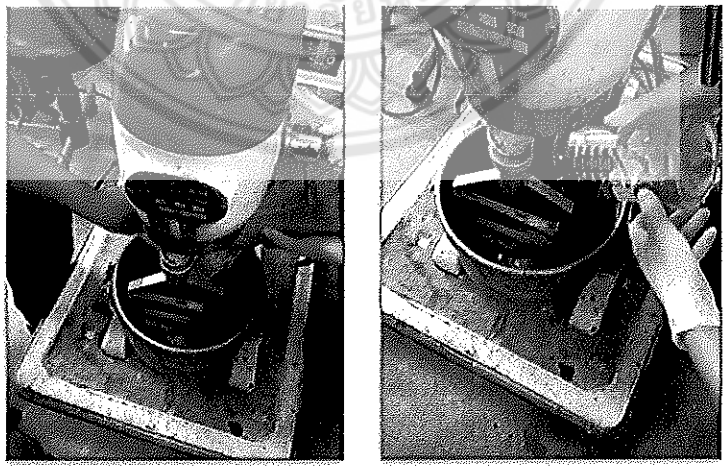
3) นำซีเมนต์ที่ใช้ในการทดสอบใส่ลงหม้อผสมจนหมด จากนั้นเดินเครื่องผสมเพื่อผสมส่วนผสมระหว่างซีเมนต์และน้ำให้เข้ากัน โดยใช้อัตราช้า รอบการผสมอยู่ที่ (140±5 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 30 วินาที

4) เมื่อกวนผสมซีเมนต์และน้ำครบเวลา 30 วินาที จึงใส่ทรายลงในหม้อผสมอย่างช้าๆ ภายในเวลา 30 วินาที โดยที่เครื่องผสมยังทำงานและใบกวนยังคงกวนต่อเนื่องด้วยอัตราช้า (140±5 รอบต่อนาที)

5) หยุดเครื่องผสม จากนั้นเปลี่ยนอัตราการผสมเป็นอัตราปานกลาง ซึ่งมีอัตราการกวนอยู่ที่ 285±10 รอบต่อนาที และผสมต่อเป็นเวลา 30 วินาที

6) เมื่อครบเวลาที่กำหนด ปิดเครื่องผสมและปล่อยมอร์ตาร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 90 วินาที โดย 15 วินาทีแรก ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดอยู่ริมหรือข้างขอบหม้อผสมลงในหม้อ จากนั้นนำภาชนะปิดปากหม้อผสมเพื่อป้องกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากหม้อผสมจนครบเวลา 90 วินาที

7) หลังจากครบเวลา 90 วินาที ให้เดินเครื่องต่อเนื่องด้วยอัตราปานกลาง (285±10 รอบต่อนาที) เป็นเวลา 1 นาที เป็นอันสิ้นสุดการผสมมอร์ตาร์



รูปที่ 3.15 ประกอบหม้อผสมและใบผสม จากนั้นใส่น้ำและตามด้วยซีเมนต์ลงในหม้อผสม

8. เปิดเครื่องผสมปูนซีเมนต์และน้ำด้วยอัตราผสมช้า (140±5 รอบต่อวินาที) ครบ 30 วินาทีจึงใส่ทรายลงหม้อผสมอย่างช้าๆ ภายใน 30 วินาทีซึ่งขณะเททรายกวนยังคงกวนอย่างต่อเนื่อง ด้วยอัตราช้า (140±5 รอบต่อวินาที)

รูปที่ 3.16 เปิดเครื่องผสมปูนซีเมนต์และน้ำด้วยอัตราผสมช้า

9. การผสมต่อด้วยอัตราเร็วปานกลาง (285±10 รอบต่อวินาที) เป็นเวลา 30 วินาที

รูปที่ 3.17 การผสมต่อด้วยอัตราเร็วปานกลาง

10. หยุดการผสมและปล่อยให้มอร์ตาร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 90 วินาที และระหว่างเวลา 15 วินาที แรกให้ทำการปาดมอร์ตาร์ที่ติดข้างหม้อผสมลงในหม้อ

รูปที่ 3.18 หยุดการผสมและปล่อยให้มอร์ตาร์ทิ้งไว้เป็นเวลา 90 วินาที

11. นำภาชนะมาปิดปากหม้อผสมเพื่อกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากหม้อผสม จนครบเวลา 90 วินาที เมื่อครบ 90 วินาที เดินเครื่องผสมต่อด้วยอัตราปานกลาง (285±10 รอบต่อวินาที) เป็นเวลา 1 นาที เป็นอันเสร็จสิ้นการผสมมอร์ตาร์

รูปที่ 3.19 การนำภาชนะมาปิดปากหม้อผสมเพื่อกันไม่ให้ความชื้นระเหยออกจากหม้อผสม

การทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

1) ทำความสะอาดผิวหน้าของโต๊ะการไหลให้สะอาดและแห้ง และนำแบบที่ใช้ทดสอบวางตรงกลาง

2) ตักมอร์ตาร์ที่จะใช้ทดสอบใส่ในแบบทดสอบการไหลให้หนาประมาณ 1 นิ้ว (25 มม.) และทำการอัดหรือกระทุ้งประมาณ 20 ครั้ง ให้ทั่วหน้าตัดด้วยแรงอย่างสม่ำเสมอ

3) เมื่อกระทุ้งครบชั้นแรกให้ตักมอร์ตาร์ใส่ชั้นที่ 2 ซึ่งมีความสูงประมาณ 1 นิ้ว (25 มม.) โดยให้มีความสูงกว่าแบบเล็กน้อยเพื่อจะได้ทำการปาดหน้า โดยกระทุ้งเหมือนกับชั้นแรก

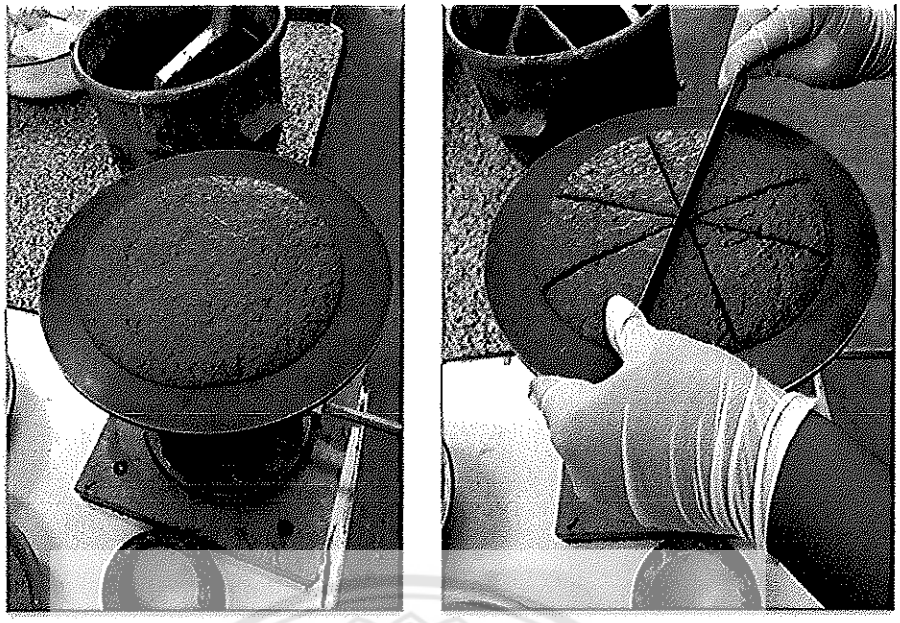
4) หลังจากกระทุ้งเสร็จเรียบร้อยให้ทำการปาดผิวหน้า โดยใช้เกรียงเหล็กเกือบตั้งฉากกับผิวหน้าของแบบ โดยตัดแต่งผิวหน้าด้านบนให้มีความเรียบและมีระดับเดียวกับขอบของแม่แบบ นอกจากนี้ในการขึ้นรูปจะต้องทำให้บริเวณที่เตรียมนั้นแห้งและสะอาดอยู่เสมอ ถ้ามีน้ำไหลออกใต้ฐานให้เช็ดน้ำออกให้สะอาด และถ้ามีเศษมอร์ตาร์ที่ตกรอบๆข้างแบบให้นำออกให้หมด

5) ยกแบบขึ้นแนวดิ่งอย่างช้าๆ แล้วทำการหมุนโต๊ะการไหล ซึ่งยกจานของโต๊ะการไหลขึ้นและทำการปล่อยชิ้นงานให้ตกอย่างอิสระที่ความสูง 0.5 นิ้ว (13 มม.) จำนวน 25 ครั้ง เป็นเวลา 15 วินาที

6) ข้อควรระวัง ในขณะที่ทำการทำการหมุนที่หมุนของโต๊ะการไหล ให้ยึดโต๊ะการไหลให้แน่น อย่าให้มีการเคลื่อนที่เพราะจะทำให้ค่าการไหลที่ได้เกิดความผิดพลาด

7) ทำการวัดการไหลของมอร์ตาร์ โดยใช้คาลิเปอร์วัดผ่านเส้นผ่านศูนย์กลางของมอร์ตาร์จำนวน 4 ครั้ง ซึ่งผลรวมของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางที่บันทึกได้จากคาลิเปอร์ ทั้ง 4 ครั้งคือ เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์จากเดิม (เส้นผ่านศูนย์กลางของแบบทดสอบการไหลเท่ากับ10 ซม.)

รูปที่ 3.20 การอัดหรือกระทุ้งมอร์ตาร์ประมาณ 20 ครั้ง



รูปที่ 3.21 ลักษณะการแผ่ของมอร์ตาร์และการวัดระยะของการแผ่

การหล่อมอร์ตาร์เข้าแบบ

1. หลังจากการผสมมอร์ตาร์และทดสอบหาค่าการไหล ให้นำมอร์ตาร์ที่อยู่บนจานทดสอบค่าการไหล ใส่คืนหม้อผสมให้หมด และผสมมอร์ตาร์อีกครั้งเป็นเวลา 15 วินาที ด้วยอัตราการผสมปานกลาง

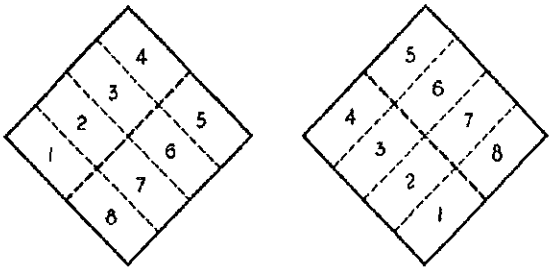
-กรณีต้องผสมมอร์ตาร์เพื่อใส่แบบหล่อตัวอย่างจำนวณมาก ให้ใช้ส่วนผสมเดิมเพื่อหล่อตัวอย่างโดยไม่ต้องทำการหาค่าการไหลหลายครั้ง แต่ต้องผสมอย่างต่อเนื่อง

2. ทำการหล่อมอร์ตาร์ทั้งหมดลงในแบบหล่อโดยใช้เวลาทั้งหมดในการหล่อแบบไม่เกิน 2 นาที 30 วินาทีหลังจากกวนผสมมอร์ตาร์เสร็จสิ้น โดยเติมมอร์ตาร์ลงในแม่แบบหนา 1 นิ้ว (25 มม.) หรือประมาณครึ่งหนึ่งของความลึกของตัวอย่างมอร์ตาร์

3. กระทุ้งมอร์ตาร์ด้วยไม้กระทุ้ง จำนวน 32 ครั้งต่อ 1 ตัวอย่างในเวลา 10 วินาที โดยแบ่งการกระทุ้งเป็น 4 รอบ รอบละ 8 ครั้ง โดยแต่ละรอบการกระทุ้งจะต้องตั้งฉากซึ่งกันและกัน น้ำหนักที่กระทุ้งมีความสม่ำเสมอกัน กระทุ้ง 4 รอบ 32 ครั้ง ให้เสร็จสิ้นในแต่ละตัวอย่างของมอร์ตาร์จากนั้นจึงเริ่มกระทุ้งตัวอย่างต่อไป

4. เมื่อกระทุ้งชั้นที่ 1 เสร็จสิ้นทุกตัวอย่างแล้ว จึงใส่มอร์ตาร์ชั้นที่ 2 โดยให้มีความหนาประมาณ 25 มม. จากนั้นทำการกระทุ้งตัวอย่างมอร์ตาร์ 4 รอบ 32 ครั้ง เช่นเดียวกับครั้งแรก (แต่ละตัวอย่างจะกระทุ้งทั้งหมด 64 ครั้ง)

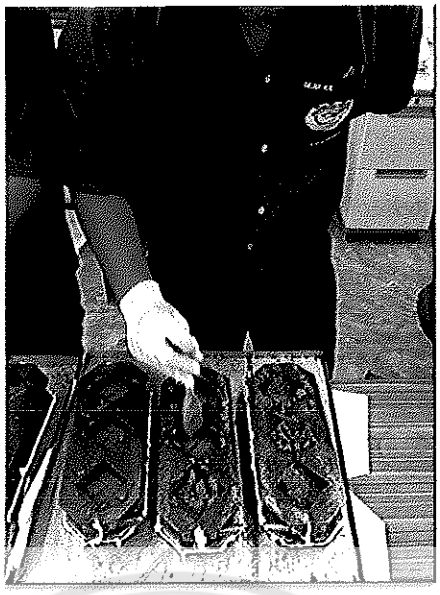
5. เมื่อเสร็จสิ้นการกระทุ้ง ให้ทำการดันมอร์ตาร์ที่ล้มเข้าไปในแบบและใช้เกรียงเหล็กปาดหน้ามอร์ตาร์ให้เรียบเสมอกับแบบหล่อ



การกระทุ้งรอบที่ 1 และ 3 การกระทุ้งรอบที่ 2 และ 4

รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการกระทุ้งมอร์ตาร์ในแบบหล่อ

รูปที่ 3.23 การตักมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อและการกระทุ้ง



รูปที่ 3.24 การกระทุ้งมอร์ตาร์ในแบบ

รูปที่ 3.25 การแต่งผิวมอร์ตาร์ให้เรียบเสมอ

การเก็บตัวอย่างและการบ่ม

1. ภายหลังจากการหล่อตัวอย่างเสร็จเรียบร้อย ให้นำตัวอย่างเก็บไว้ในห้องที่คงอุณหภูมิ ความชื้นตามที่กำหนด คือต้องมีความชื้นไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

2. เมื่อมอร์ตาร์มีอายุได้ 24 ชั่วโมง (นับเวลาจากที่เริ่มผสมซีเมนต์กับน้ำก็ได้) จึงถอดแบบหล่อออกและตรวจสอบสภาพความสมบูรณ์ของคอนกรีต เมื่อเรียบร้อยจากนั้นจึงนำไปบ่มในน้ำปูนขาวเมื่อครบอายุตามที่กำหนดไว้ (3,7,14,28 วัน) จึงนำไปทดสอบกำลังอัดประลัย

3.3.7 การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์ กรณีที่ทดสอบมอร์ตาร์ที่อายุ 24 ชั่วโมง ให้ทำการทดสอบทันทีภายหลังจากนำมอร์ตาร์ออกจากแบบหล่อ กรณีหากทดสอบที่อุณหภูมิอื่นๆ ให้ทำการทดสอบทันทีที่นำมอร์ตาร์ออกจากบ่อที่ทำการบ่ม ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนของอายุมอร์ตาร์ที่ยอมให้ไม่เกินตามที่ระบุไว้ใน

ตารางที่ 3.5 แสดงอายุของการบ่มเพสต์

อายุการทดสอบ	เวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมให้
6 ชั่วโมง	± 1/8 ชั่วโมง
12 ชั่วโมง	± 1/4 ชั่วโมง
24 ชั่วโมง	± 1/2 ชั่วโมง
3 วัน	± 1 ชั่วโมง
7 วัน	± 3 ชั่วโมง
14 วัน	± 6 ชั่วโมง
28 วัน	± 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.6 แสดงอายุของการบ่มมอร์ตาร์

อายุที่ทดสอบ	เวลาคลาดเคลื่อนที่ยอมให้
24 ชั่วโมง	±1/2 ชั่วโมง
3 วัน	±1 ชั่วโมง
7 วัน	±3 ชั่วโมง
14 วัน	±6 ชั่วโมง
28 วัน	±12 ชั่วโมง

1. กรณีที่ทำการทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์มากกว่า 1 ตัวอย่างขึ้นไปที่อายุ 24 ชั่วโมง ให้ใช้ผ้าชุบน้ำหรือพลาสติกคลุมตัวอย่างก้อนที่เหลือเพื่อให้ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่จะทำการทดสอบอยู่ในสภาพที่ชื้น

2. กรณีที่ทำการทดสอบตัวอย่างมากกว่า 1 ตัวอย่างที่อายุ ที่ทำการบ่มในน้ำ ให้นำตัวอย่างขึ้นจากน้ำมาทดสอบทีละ 1 ตัวอย่าง มอร์ตาร์ที่รอทำการทดสอบแช่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ 23±2 องศาเซลเซียส และรอจนกว่าจะทำการทดสอบ เพื่อให้มอร์ตาร์อยู่ในสภาพคงความชื้น

3. ก่อนการทดสอบให้ใช้ผ้าเช็ดก้อนตัวอย่างให้แห้งเพื่อทำความสะอาดและขจัดสิ่งสกปรกที่ติดกับก้อนตัวอย่างออก

4. เลือกด้านที่เรียบทั้ง 2 ด้านที่อยู่ตรงข้ามกันเพื่อรับแรงจากเครื่องทดสอบ หากเลือกด้านไม่เรียบจะส่งผลต่อกำลังของมอร์ตาร์อย่างมาก

5. ทำการชั่งน้ำหนัก วัดความกว้างยาว เพื่อหาพื้นที่ จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดโดยนำก้อนตัวอย่างวางบนเครื่องทดสอบนำแบริ่งให้ตรงกับศูนย์กลางเครื่อง ปรับระดับให้ได้ระนาบพร้อมจะทดสอบ

6. ทำการทดสอบโดยให้น้ำหนักกดแก่ตัวอย่างมอร์ตาร์ ด้วยอัตราคงที่ประมาณ 90-180 กิโลกรัมต่อวินาที จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ

7. ทำการบันทึกค่าน้ำหนักประลัยของตัวอย่าง

การคำนวณ

การคำนวณกำลังรับแรงอัดได้จากสมการณ์ดังต่อไปนี้

สมการ $\sigma = \frac{P}{A}$

เมื่อ σ คือ กำลังอัดประลัยของมอร์ตาร์ (กก/ซม^2)

P คือ แรงอัดประลัยที่ทำให้มอร์ตาร์วิบัติ (กก)

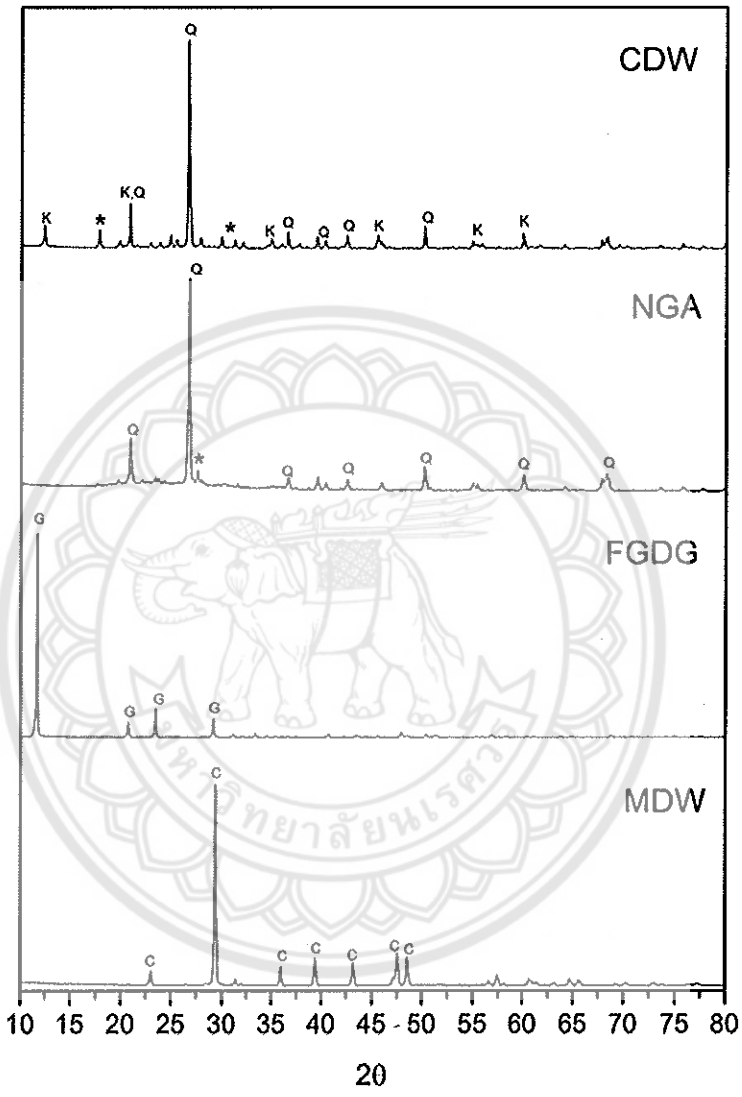
A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับแรงของมอร์ตาร์ (ซม^2)

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

4.1 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต

4.1.1 ผลการวิเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์โดยใช้ X-ray Diffractometer : XRD



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผล XRD ของวัตถุดิบหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์ CSA ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.1 MDW คือ ฝุ่นหินอ่อน, FGDG คือ ยิปซัม, NGA คือ หญ้าเถ้าเนเปียร์ และ CDW คือ ฝุ่นกากเซรามิก ซึ่งกราฟในส่วนของฝุ่นหินอ่อนจะเห็นได้ว่ามีองค์ประกอบ C (แคลไซต์ : Calcite) เป็นหลัก กราฟส่วนของยิปซัมจะมีองค์ประกอบ g (ยิปซัม : gypsum) เป็นหลัก กราฟส่วนของหญ้าเถ้าเนเปียร์จะมีองค์ประกอบ Q (ผลึกควอตซ์ : Quartz) เป็นหลัก และในกราฟส่วนฝุ่นกากเซรามิก จะมีองค์ประกอบ K (แร่ดินขาว : Kaolinite) , Q (ผลึกควอตซ์ : Quartz) เป็นหลัก

4.1.2 วิเคราะห์ผลจากการทดสอบ X-ray Fluorescence (XRF)

การวิเคราะห์สัดส่วนทางเคมีที่อยู่ในตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ผลวิเคราะห์เคมีจากการยิงรังสี XRF ของวัตถุดิบในการสังเคราะห์ CSA ซีเมนต์

Oxide	Material				
	MDW	NGA	CDW	FGDG	Al_2O_3
CaO	100	3.58	-	49.34	-
SiO_2	-	69.92	68.65	-	-
Al_2O_3	-	8.42	15.62	-	100
Fe_2O_3	-	7.74	5.37	-	-
MnO	-	0.29	-	-	-
TiO_2	-	1.30	0.47	-	-
K_2O	-	7.23	9.62	-	-
SO_3	-	-	-	49.25	-
MgO	-	-	-		-
P_2O_5	-	1.18	-	1.28	-

ตารางที่ 4.2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของ CSA ซีเมนต์เปรียบเทียบกับปอร์ตแลนด์ซีเมนต์

Oxide (%)	Portland Cement	CSA	ออกไซด์ที่กำหนด
CaO	61.39	44.71	60-67
SiO_2	19.55	11.99	1-25
Al_2O_3	4.82	28.79	3-8
Fe_2O_3	3.52	2.20	0.5-6
TiO_2	-	0.09	-
K_2O	0.74	0.41	-
SO_3	2.76	7.20	1-3
P_2O_5	-	0.09	-
MgO	1.83	1.93	0.1-5.5
Na_2O	0.14	0.20	-
Mn_2O_3	-	0.04	-
MnO	-	-	-

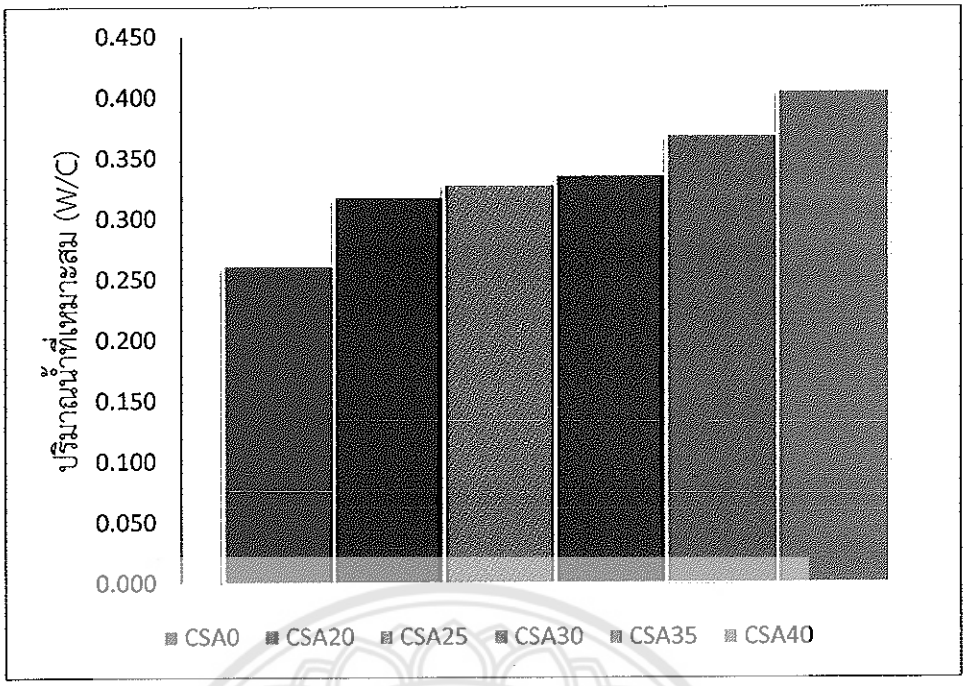
จากผลการทดสอบทางเคมีของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ซึ่งวิเคราะห์ผลจากการยิงรังสี XRF วิเคราะห์ได้จากตารางที่ 4.2 พบว่าออกไซด์ที่ได้หลังจากการเผาด้วยอุณหภูมิ 1250 องศาเซลเซียส ของ CSA ซีเมนต์ทั้ง 3 ประเภทมีออกไซด์ใกล้เคียงกับ Portland Cement อีกทั้งร้อยละของออกไซด์ CaO มีปริมาณลดลง ส่งผลให้สามารถเผาCSA ซีเมนต์ในอุณหภูมิที่ต่ำลงได้ จึงสามารถนำมาใช้ทดแทน Portland Cement ได้

4.2 ผลการทดสอบการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและวิเคราะห์ผล

ปริมาณน้ำในส่วนผสมซีเมนต์เพสต์มีผลอย่างมากต่อระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นก่อนจะทำการทดลองเพื่อหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จึงต้องทำการหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมและใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมเพื่อทดลองหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ต่อไป

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของตัวอย่างซีเมนต์เพสต์

ปริมาณน้ำ	CSA0 ระยะเข็มจม (mm.)	CSA20 ระยะเข็มจม (mm.)	CSA25 ระยะเข็มจม (mm.)	CSA30 ระยะเข็มจม (mm.)	CSA35 ระยะเข็มจม (mm.)	CSA40 ระยะเข็มจม (mm.)
150	3.5	-	-	-	-	-
160	6	-	-	-	-	-
170	10	1.5	-	-	-	-
180	14	3	2.5	-	-	-
190	-	4.5	5	-	-	-
200	-	7	7	3	2	-
210	-	11.5	9	7.5	-	-
220	-	16.5	12	10.5	6	-
230	-	-	-	16.5	9	5
240	-	-	-	-	10	6
250	-	-	-	-	11	8
260	-	-	-	-	14.5	9.5
270	-	-	-	-	-	11
280	-	-	-	-	-	12.5
290	-	-	-	-	-	-
ปริมาณน้ำที่เหมาะสม	170	207	213	218	240	263
W/C เท่ากับ	0.262	0.318	0.328	0.336	0.369	0.405



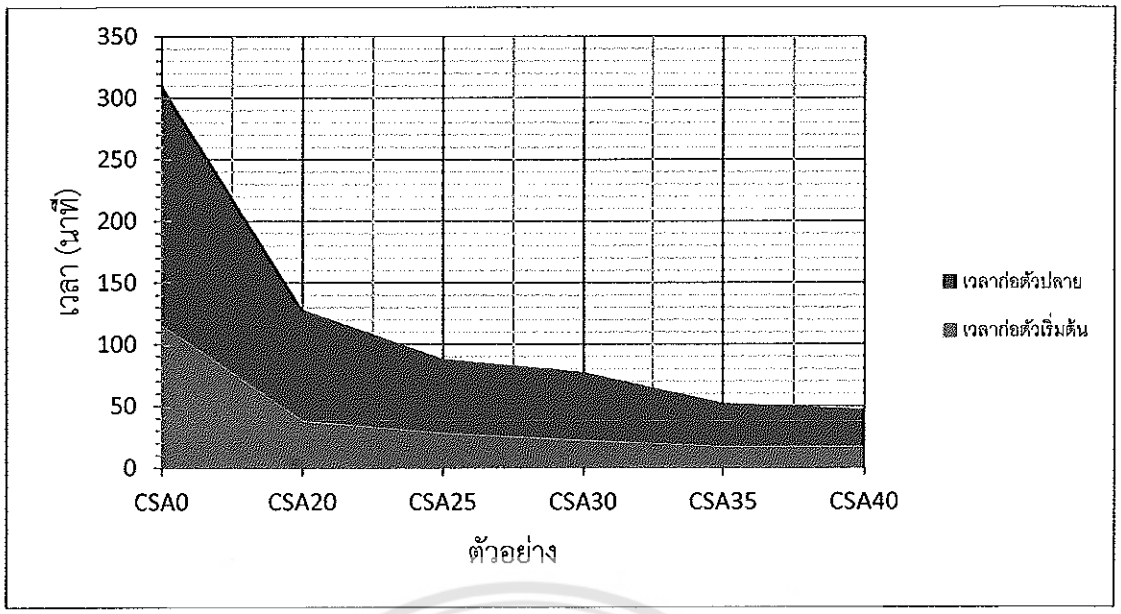
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมของซีเมนต์เพสต์ ของตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ จะเห็นได้ว่ายิ่งปริมาณ CSA ซีเมนต์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ต้องใช้เพิ่มปริมาณน้ำเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันที่จะสามารถเพิ่มกำลังอัดได้อย่างสูงสุด เนื่องจาก CSA ซีเมนต์มีเฟสหลักที่ประกอบด้วย yeelimite ($C_4A_3\overline{S}$) จากปฏิกิริยาไฮเดรชันตามสมการ ($C_4A_3\overline{S} + 18\ H \rightarrow C_4A\overline{S}H_{12} + 2\ AH_3$) จะเห็นว่า yeelimite มีความต้องการน้ำมากในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังนั้นยิ่งมี CSA ซีเมนต์ผสมอยู่ในปริมาณที่มากขึ้นจึงต้องใช้ปริมาณน้ำมากขึ้น

4.3 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์แต่ละตัวอย่าง

ตัวอย่าง	% CSA	อัตราส่วน W/C	เวลาก่อตัวเริ่มต้น (นาที)	เวลาก่อตัวปลาย (นาที)
CSA0	0	0.262	116	195
CSA20	20	0.318	38	90
CSA25	25	0.328	28	60
CSA30	30	0.336	22	55
CSA35	35	0.369	17	35
CSA40	40	0.405	17	30



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาก่อตัวปลาย

จากตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.3 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์แต่ละตัวอย่าง จะเห็นได้ว่ายิ่งปริมาณ CSA ซีเมนต์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้นตามลำดับ เห็นได้จากที่ CSA0 มีปริมาณ CSA ซีเมนต์ 0% จะใช้เวลาในการก่อตัวมากว่า CSA40 ที่มีปริมาณ CSA ซีเมนต์ 40 % อย่างเห็นได้ชัด

4.4 ผลการทดสอบการหาค่าการไหลแผ่ของมอตาร์และวิเคราะห์ผล

การทดลองนี้ครอบคลุมถึงการทดสอบเพื่อหากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ ซึ่งผลที่ได้เป็นข้อมูลบ่งชี้ถึงคุณภาพของปูนซีเมนต์ให้ใช้ปริมาณน้ำในส่วนผสมที่ทำให้มอร์ตาร์มีค่าการไหล (Flow) เท่ากับ 110±5 จากนั้นหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม.และปล่อยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบนำมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวและทดสอบกำลังอัดตามอายุที่ต้องการ

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าอัตราการไหลแผ่ของมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	W/C	วัดครั้งที่ 1 (cm)	วัดครั้งที่ 2 (cm)	วัดครั้งที่ 3 (cm)	วัดครั้งที่ 4 (cm)	เฉลี่ย (cm)	ค่า ± 3% (cm)	% Flow ที่ได้
CSA0	0.60	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	±0.75	147.525
CSA20	0.60	22.50	23.00	22.90	22.70	22.78	±0.68	125.495
CSA25	0.60	22.00	21.60	21.80	22.00	21.85	±0.66	116.337
CSA30	0.60	20.20	20.70	20.30	20.50	20.43	±0.61	102.228
CSA35	0.60	19.80	19.90	20.00	19.80	19.88	±0.60	96.782
CSA40	0.60	18.00	18.20	18.00	18.20	18.10	±0.54	79.208

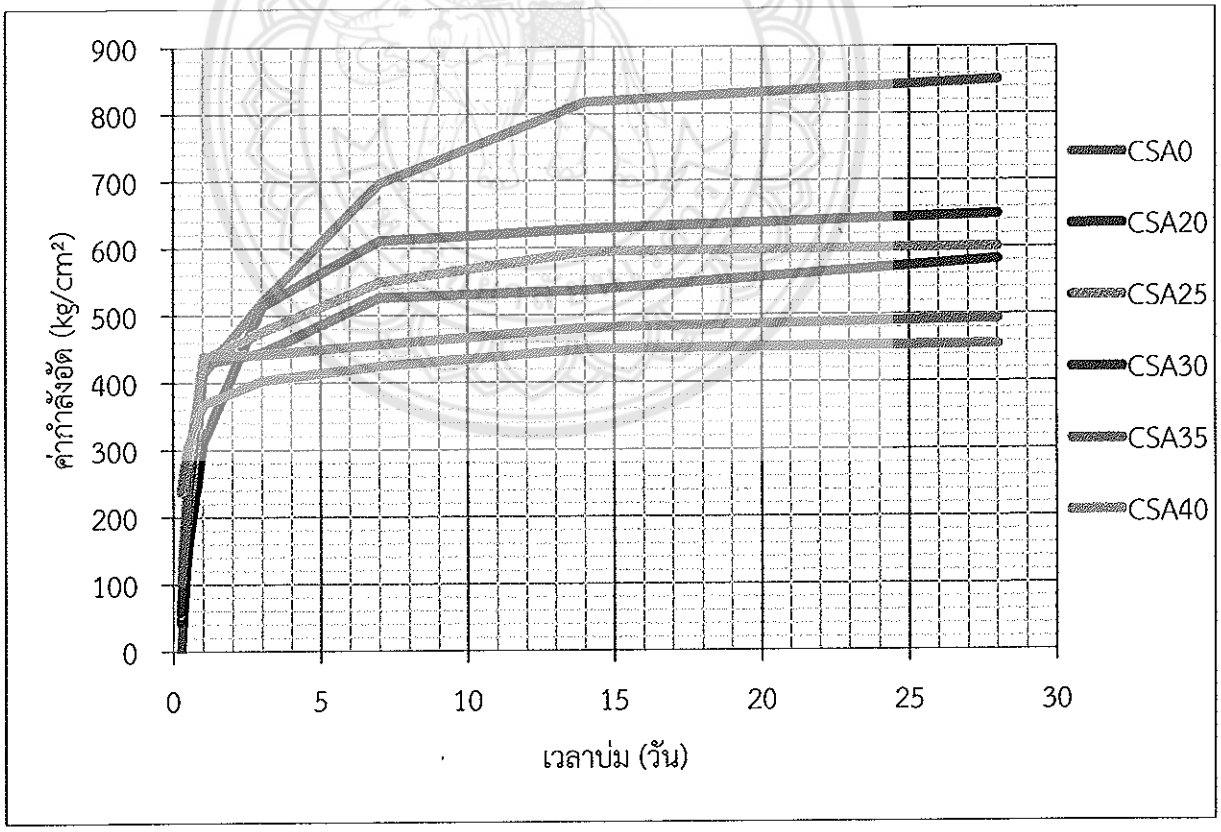
ตารางที่4.5 แสดงค่าอัตราการไหลแผ่ (Flow) เนื่องจากในการทดสอบนี้ได้มีการกำหนดค่า W/C ที่ 0.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มปริมาณของ CSA ซีเมนต์ จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การไหลแผ่

นั้นลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาปริมาณน้ำที่เหมาะสม คือ ปริมาณ CSA ซีเมนต์เพิ่มขึ้นก็จะทำให้ต้องใช้ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน

4.5 ผลการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

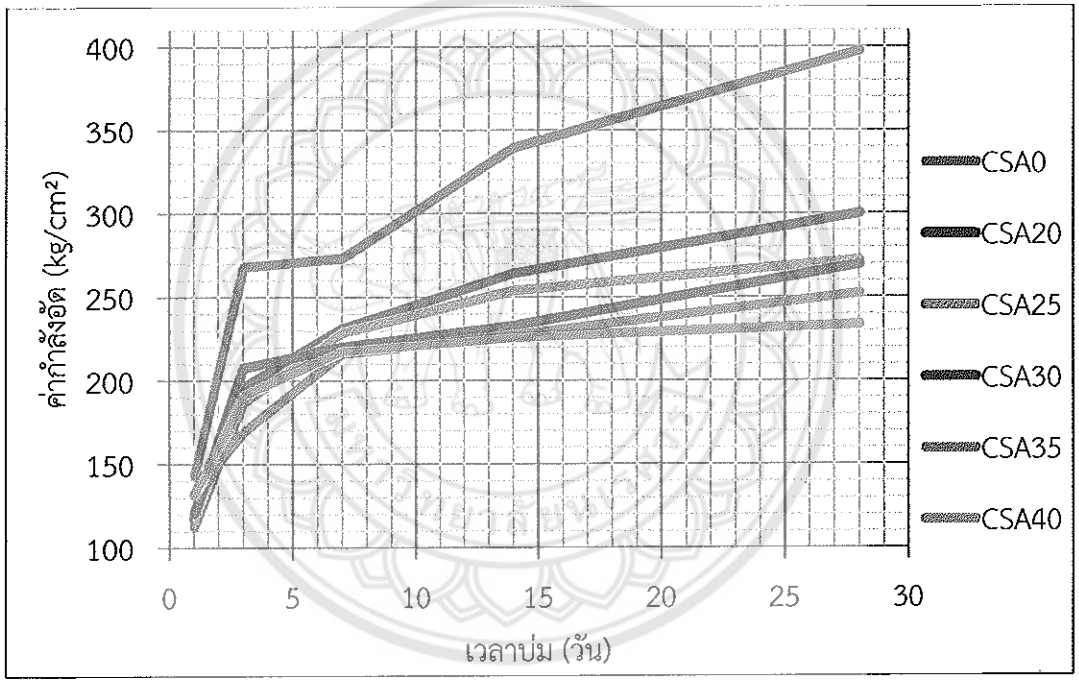
ตัวอย่าง	% CSA	6 ชั่วโมง kg/cm^2	12 ชั่วโมง kg/cm^2	1 วัน kg/cm^2	3 วัน kg/cm^2	7 วัน kg/cm^2	14 วัน kg/cm^2	28 วัน kg/cm^2
CSA0	0	0	171	413	519	697	817	850
CSA20	20	43	156	310	514	610	627	649
CSA25	25	54	212	434	476	549	594	600
CSA30	30	59	244	428	444	526	536	582
CSA35	35	101	274	439	442	456	481	493
CSA40	40	239	305	367	402	424	448	455



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

ตัวอย่าง	% CSA	1 วัน kg/cm^2	3 วัน kg/cm^2	7 วัน kg/cm^2	14 วัน kg/cm^2	28 วัน kg/cm^2
CSA0	0	143	268	273	339	397
CSA20	20	117	195	231	263	300
CSA25	25	112	186	228	253	272
CSA30	30	120	207	220	232	269
CSA35	35	132	169	216	227	252
CSA40	40	131	191	217	225	233



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดสอบกำลังอัดมอร์ตาร์

จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดจะพบว่าในช่วง 6 - 12 ชั่วโมงค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด จะอยู่ในช่วง CSA35 และ CSA40 ซึ่งเรียงลำดับจากล่างขึ้นบน แต่หลังจาก 1 วัน ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดคือ CSA0 และ CSA0 ซึ่งเรียงลำดับจากบนลงล่าง จึงสรุปได้ว่า เมื่อซีเมนต์เพสต์ และมอร์ตาร์ มีเปอร์เซ็นต์ของ CSA ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะให้กำลังรับแรงอัดสูงในช่วงต้นและกำลังอัดจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับ แต่จะมีการให้กำลังอัดที่น้อยลงกว่าเดิมซึ่งแหมะกับงานที่ไม่ต้องรับกำลังอัดที่มากแต่ต้องการการแข็งตัวที่รวดเร็ว

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองที่ได้ดำเนินการสามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สามารถศึกษาองค์ประกอบและสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต โดยใช้วัสดุกากอุตสาหกรรมเป็นวัสดุตั้งต้นได้ โดยที่สามารถใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์ที่ 1,250 องศาเซลเซียส

5.2 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตในร้อยละต่างๆทำให้ ซีเมนต์ผสมนั้นต้องการปริมาณน้ำมากขึ้น แต่ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้น (Initial Sitting Time) นั้นลดลงเมื่อมีปริมาณแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน

5.3 ค่าการทดสอบการรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ซีเมนต์ในร้อยละต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มของทุกตัวอย่าง โดยช่วงแรกหากมีร้อยละของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ ผสมอยู่มากจะให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูง ซึ่งที่ 6 ชั่วโมงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั่วไปนั้นไม่สามารถรับกำลังอัดได้ แต่กำลังอัดในระยะยาวนั้นปูนซีเมนต์ผสมมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่ผสมแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต

5.4 ค่าการทดสอบการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมกับ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ในร้อยละต่างๆมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่มของทุกตัวอย่าง โดยช่วงแรกหากมีร้อยละของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์ ผสมอยู่มากจะให้ได้ค่ากำลังอัดที่สูง แต่กำลังอัดในระยะยาวนั้นมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ไม่ผสมแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต

บรรณานุกรม

[1] หนังสือวิชาการของซีแพค คอนกรีตเทคโนโลยี Concrete Technology, บทที่ 2,

[2] ดร.พงษ์ธร จุฬพันธ์ทอง. (2557). การพัฒนาวัสดุผสมฝุ่นหินอ่อน-เถ้าชานอ้อยเพื่อเป็นวัสดุซีเมนต์สาหรับอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตบล็อก.

[3] กฤษฎา ดอนไฟร, ภัครภัทร พูลทองคำ, และ ณัฐพล เอี่ยมสะอาด. (2557). การศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และวิศวกรรมของเถ้าหญ้าเนเปียร์เพื่อเป็นวัสดุปอซโซลาน. พิษณุโลก.

[4] R. Trauchessec, J.-M. Mechling, A. Lecomte, A. Roux, B. Le Rolland (2015). Hydration of ordinary Portland cement and calcium sulfoaluminatecement blends ,Cement & Concrete Composites

[5] ธีรนาฏ ธรรมใจ,นิภาภรณ์ ศรีธิบุตร,วิลาสินี ใหม่ต๊ะ (2559) การสังเคราะห์แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์จากวัสดุกากอุตสาหกรรม

[6] pla. (22 กุมภาพันธ์ 2557). ดร.เรืองรุชดิ์. เรียกใช้เมื่อ 1 พฤษภาคม 2560 จาก sungkomonline.com: http://sungkomonline.com/file/Webboard_ans.php

[7] ASTM C230 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement

[8] ASTM C305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

[9] Eugênio Bastos da Costa, Erich D. Rodríguez, Susan A. Bernal, John L. Provis c, Luciano A. Gobbo, Ana Paula Kirchheim (2016) Production and hydration of calcium sulfoaluminate-belite cements derived from aluminium anodising sludge

[10] ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, และ ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2556). คู่มือการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ มวลรวม และคอนกรีต (เล่มที่ 1). กรุงเทพ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

ภาคผนวก

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

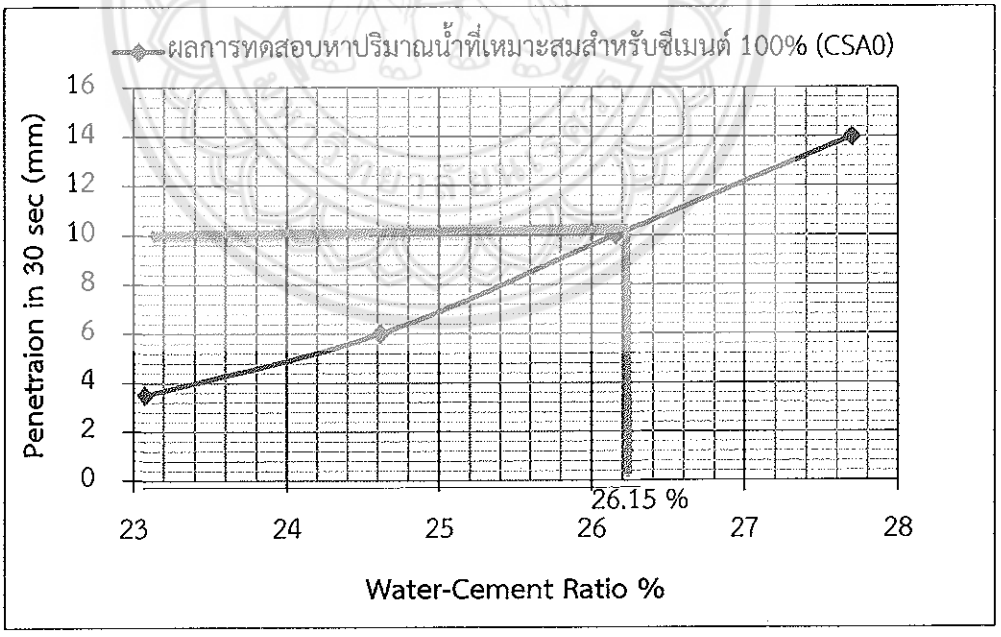
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์ 100% (CSA0)

การผสม ครั้งที่	ปริมาณซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (g)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (%)	ระยะจมของเข็มไวแคต (mm.)
1	650	150	23.077	3.5
2	650	160	24.615	6
3	650	170	26.154	10
4	650	180	27.692	14



อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ระยะจมของเข็มไวแคตที่ 10 มม. (%)	26.15
ปริมาณน้ำที่ใช้ (g)	170

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

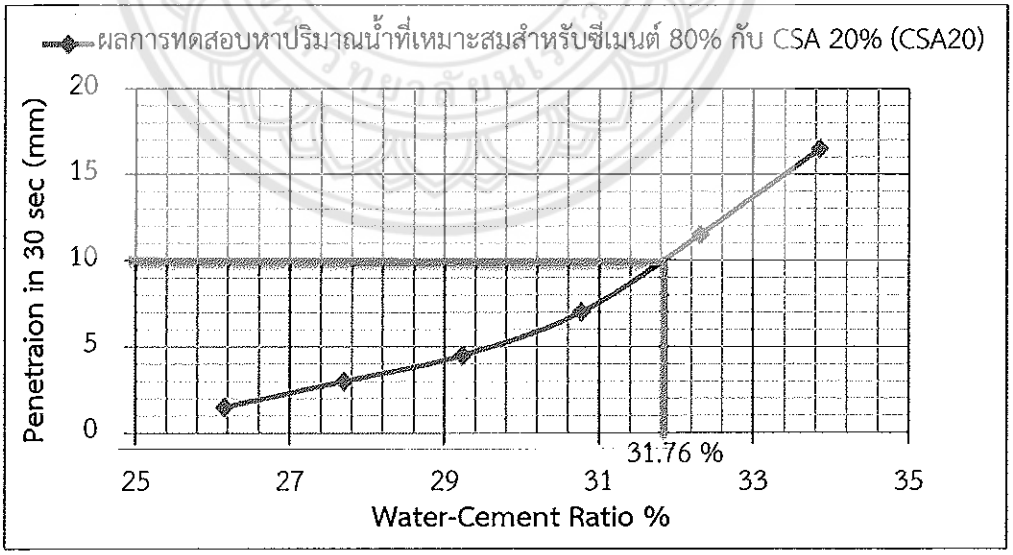
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์ 80% กับ CSA 20% (CSA20)

การผสมครั้งที่	ปริมาณซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (g)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (%)	ระยะจมของเข็มไวแคต (mm.)
1	650	170	26.154	1.5
2	650	180	27.692	3
3	650	190	29.231	4.5
4	650	200	30.769	7
5	650	210	32.308	11.5
6	650	220	33.846	16.5



อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ระยะจมของเข็มไวแคตที่ 10 มม. (%)	31.76
ปริมาณน้ำที่ใช้ (g)	206

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

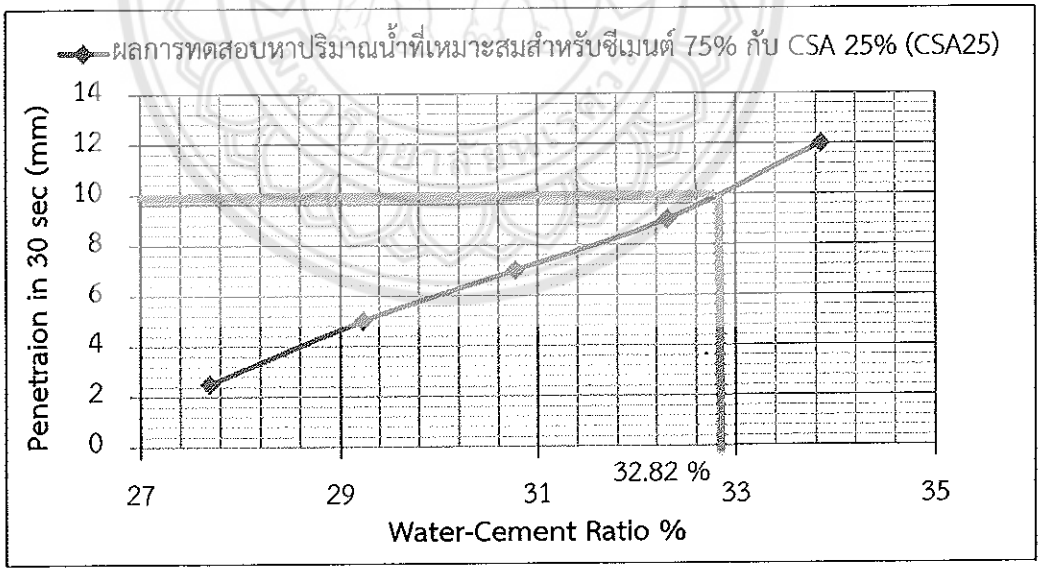
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์ 75% กับ CSA 25% (CSA25)

การผสมครั้งที่	ปริมาณซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (g)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (%)	ระยะจมของเข็มไวแคต (mm.)
1	650	180	27.692	2.5
2	650	190	29.231	5
3	650	200	30.769	7
4	650	210	32.308	9
4	650	220	33.846	12



อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ระยะจมของเข็มไวแคตที่ 10 มม. (%)	32.82
ปริมาณน้ำที่ใช้ (g)	213

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

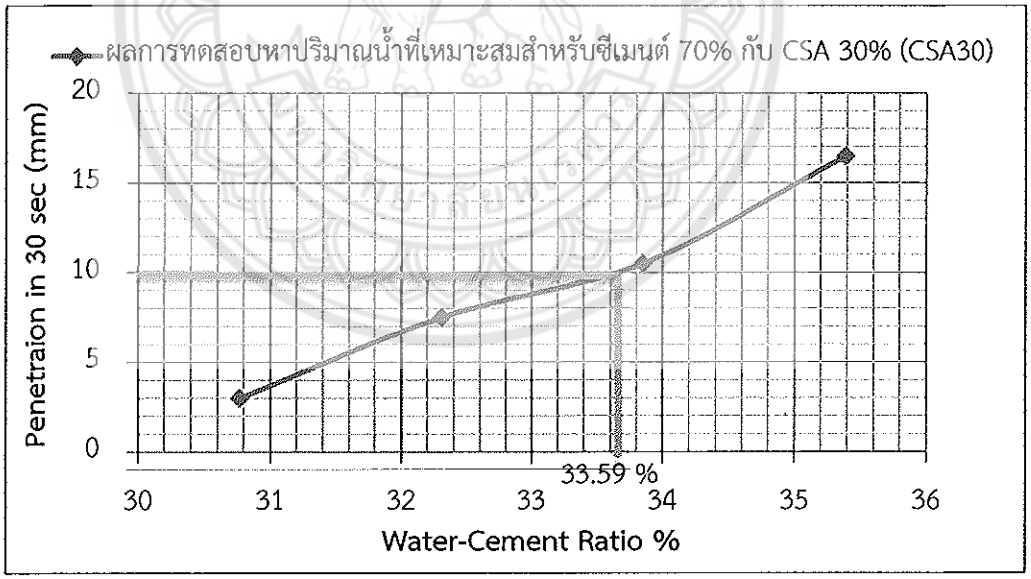
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์ 70% กับ CSA 30% (CSA30)

การผสม ครั้งที่	ปริมาณซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (g)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (%)	ระยะจมของเข็มไวแคต (mm.)
1	650	200	30.769	3
2	650	210	32.308	7.5
3	650	220	33.846	10.5
4	650	230	35.385	16.5



อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ระยะจมของเข็มไวแคตที่ 10 มม. (%)	33.59
ปริมาณน้ำที่ใช้ (g)	218

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

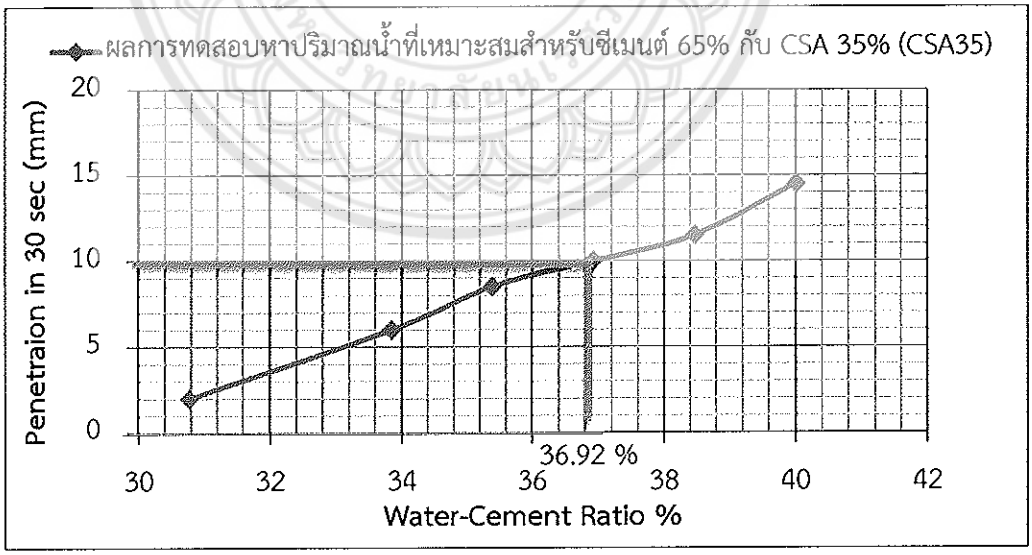
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์ 65% กับ CSA 35% (CSA35)

การผสม ครั้งที่	ปริมาณซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (g)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (%)	ระยะจมของเข็มไวแคต (mm.)
1	650	200	30.769	2
2	650	220	33.846	6
3	650	230	35.385	8.5
4	650	240	36.923	10
5	650	250	38.462	11.5
6	650	260	40.000	14.5



อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ระยะจมของเข็มไวแคตที่ 10 มม. (%)	36.92
ปริมาณน้ำที่ใช้ (g)	240

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

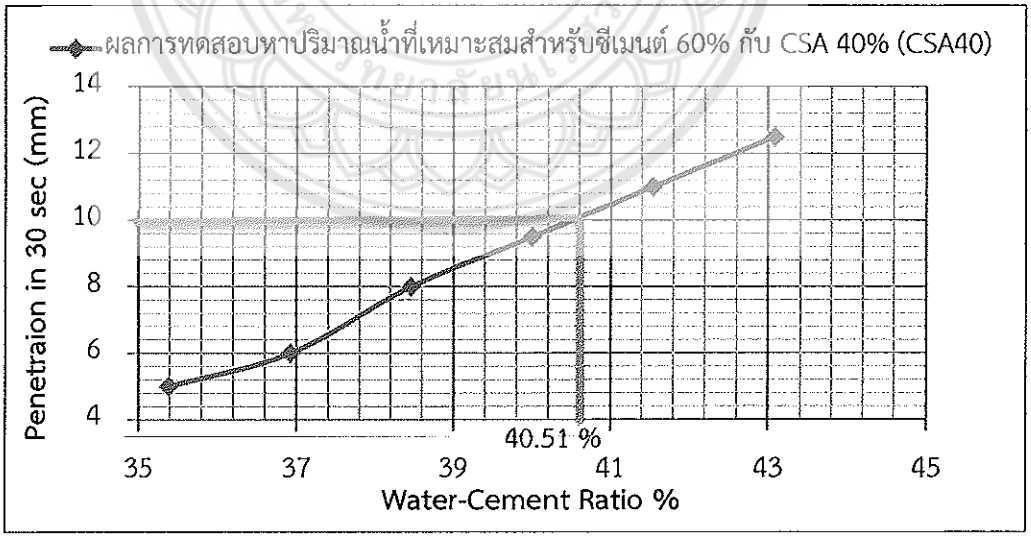
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับซีเมนต์ 60% กับ CSA 40% (CSA40)

การผสม ครั้งที่	ปริมาณซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (g)	อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (%)	ระยะจมของเข็มไวแคต (mm.)
1	650	230	35.385	5
2	650	240	36.923	6
3	650	250	38.462	8
4	650	260	40.000	9.5
5	650	270	41.538	11
6	650	280	43.077	12.5



อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ระยะจมของเข็มไวแคตที่ 10 มม. (%)	40.51
ปริมาณน้ำที่ใช้ (g)	263

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

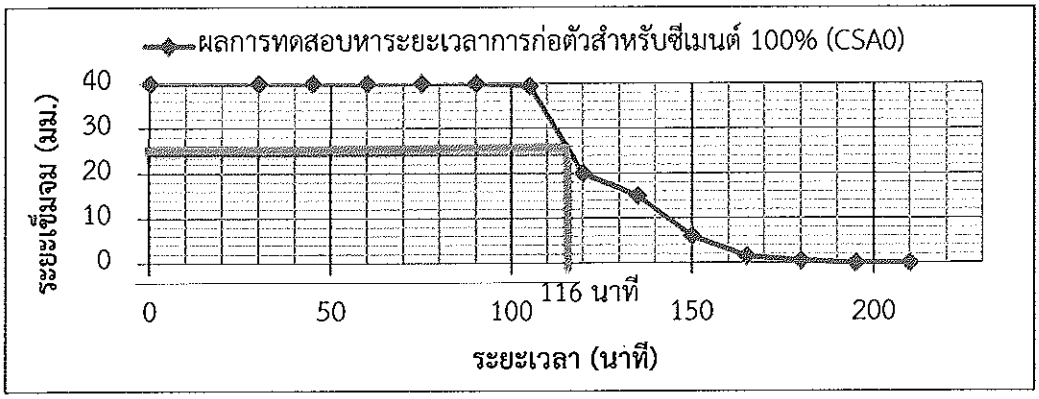
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวสำหรับซีเมนต์ 100% (CSA0)

Setting time test			
น้ำหนักปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มม.)
650	170	0	40
		30	40
		45	40
		60	40
		75	40
		90	40
		105	39.5
		120	20
		135	15
		150	6
		165	1.5
		180	0.5
		195	. 0
		210	0



Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

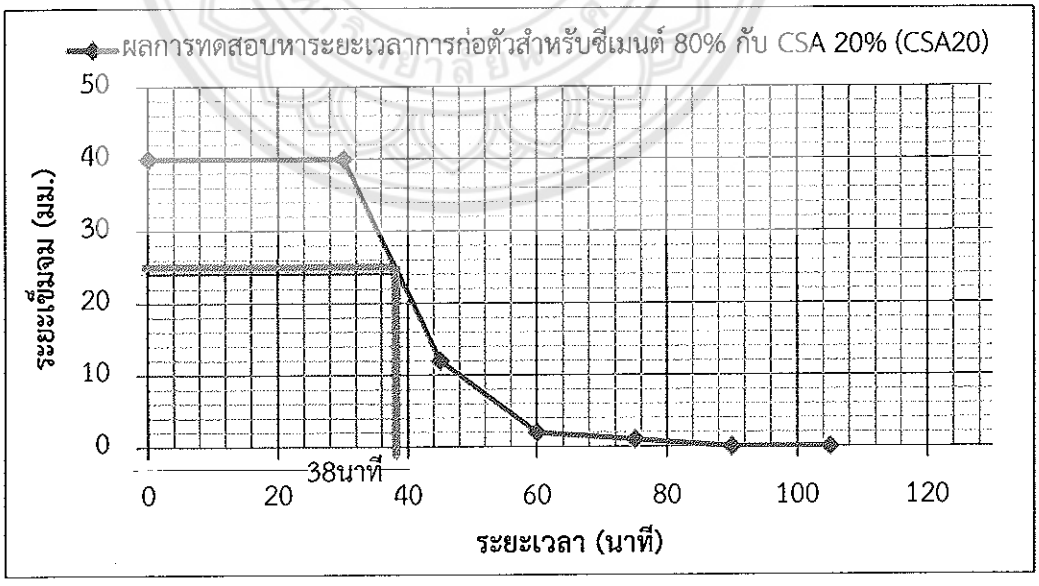
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวสำหรับซีเมนต์ 80% กับ CSA 20% (CSA20)

Setting time test			
น้ำหนักปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มม.)
650	206	0	40
		30	40
		45	12
		60	2
		75	1
		90	0
		105	0



Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

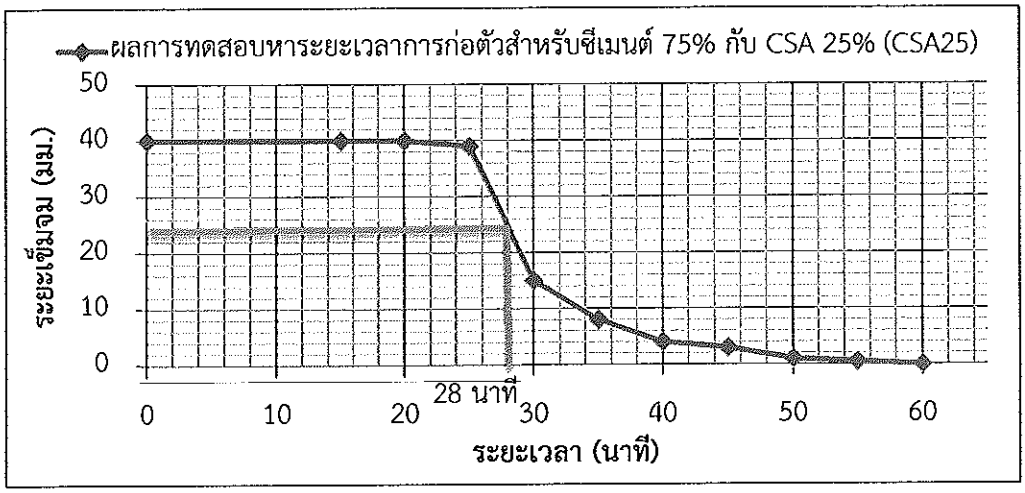
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 9 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวสำหรับซีเมนต์ 75% กับ CSA 25% (CSA25)

Setting time test			
น้ำหนักปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มม.)
650	213	0	40
		15	40
		20	40
		25	39
		30	15
		35	8
		40	4
		45	3
		50	1
		55	0.5
		60	0



Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

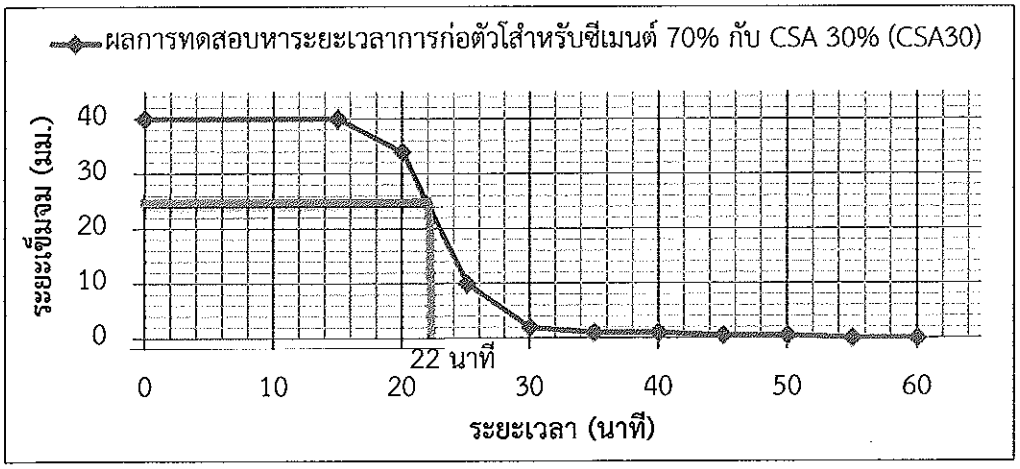
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 10 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโสำหรับซีเมนต์ 70% กับ CSA 30% (CSA30)

Setting time test			
น้ำหนักปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มม.)
650	218	0	40
		15	40
		20	34
		25	10
		30	2
		35	1
		40	1
		45	0.5
		50	0.5
		55	0
		60	0



Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

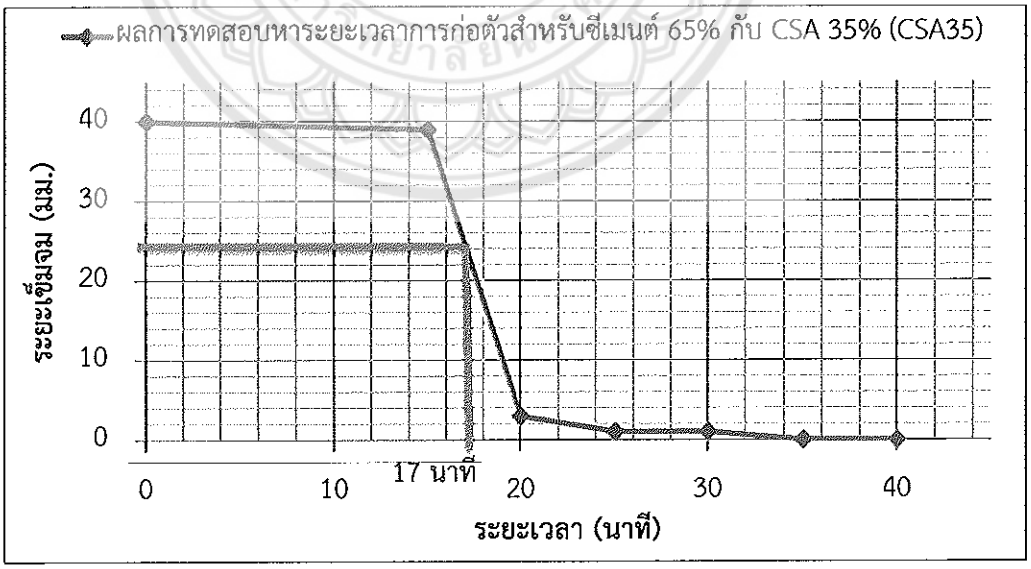
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวสำหรับซีเมนต์ 65% กับ CSA 35% (CSA35)

Setting time test			
น้ำหนักปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มม.)
650	240	0	40
		15	39
		20	3
		25	1
		30	1
		35	0
		40	0



Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

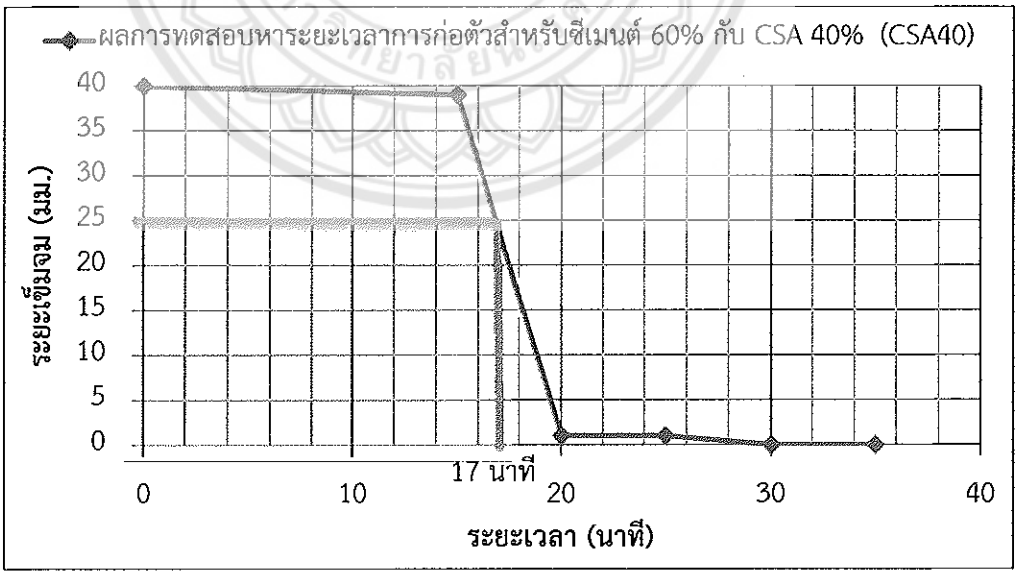
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่างซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมะสมโดยวิธีเข็มไวแคต

การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวโดยวิธีเข็มไวแคต

ตารางที่ 12 ผลการทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวสำหรับซีเมนต์ 60% กับ CSA 40% (CSA40)

Setting time test			
น้ำหนักปูนซีเมนต์ (g)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ระยะเวลา (นาที)	ระยะเข็มจม (มม.)
650	263	0	40
		15	39
		20	1
		25	1
		30	0
		35	0



Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

อัตราส่วนผสมของเพสท์สำหรับซีเมนต์ 100% (CSA0)

1. น้ำหนัก Cement 6,000 กรัม 2. น้ำหนัก น้ำ 1,998 กรัม

3. ค่า W/C = 0.333

ผลการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักเพสท์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	6 ชั่วโมง	255.99	50.20	50.62	49.78	0	0
2		258.45	50.22	50.74	49.84	0	
3		255.11	50.12	50.66	50.04	0	
4	12 ชั่วโมง	262.69	50.28	50.68	50.02	175.929	171.985
5		262.07	50.02	51.10	50.00	175.351	
6		261.54	50.10	50.52	50.26	164.675	
7	1 วัน	260.69	50.30	50.54	50.10	432.663	413.213
8		259.38	49.70	50.20	50.60	389.068	
9		263.30	50.10	51.28	50.06	417.907	
10	3 วัน	260.20	50.44	51.20	49.66	518.755	519.843
11		259.14	50.30	50.32	49.92	501.206	
12		260.17	50.00	50.80	50.50	539.567	
13	7 วัน	259.53	50.20	50.02	50.10	719.712	697.157
14		260.46	49.96	50.50	49.98	706.070	
15		264.32	49.98	51.48	50.34	665.690	
16	14 วัน	260.82	49.82	50.58	50.24	812.573	817.497
17		261.94	50.20	50.88	50.54	811.612	
18		261.10	49.62	50.80	50.50	828.307	
19	28 วัน	272.26	50.60	51.80	50.58	845.377	850.798
20		272.96	50.86	51.68	50.40	860.471	
21		272.87	50.50	52.06	50.80	846.548	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

อัตราส่วนผสมของเพสท์สำหรับซีเมนต์ 80% กับ CSA 20% (CSA20)

1. น้ำหนัก Cement 6,000 กรัม 2. น้ำหนัก น้ำ 1,998 กรัม

3. ค่า W/C = 0.333

ผลการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักเพสท์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ขนาดหน้าตัด ยาว (mm.)	ขนาดหน้าตัด สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	6 ชั่วโมง	258.89	50.04	52.78	50.08	45.288	43.251
2		259.53	50.52	52.14	50.12	41.039	
3		260.24	50.60	52.20	50.82	43.425	
4	12 ชั่วโมง	258.93	50.40	52.38	50.20	149.472	156.889
5		260.99	50.10	52.00	50.50	154.307	
6		257.36	50.90	49.82	50.48	166.888	
7	1 วัน	257.54	50.10	51.60	50.20	306.132	310.523
8		258.17	50.30	51.80	50.00	301.780	
9		256.42	50.10	51.68	50.02	323.656	
10	3 วัน	256.31	50.32	51.22	50.12	531.739	514.242
11		257.22	50.34	51.02	50.04	509.744	
12		259.19	50.40	51.78	50.10	501.243	
13	7 วัน	259.53	50.02	52.20	50.58	601.522	610.897
14		260.70	50.20	52.32	50.22	594.221	
15		257.97	50.18	51.68	50.08	636.948	
16	14 วัน	257.08	49.90	50.22	50.46	646.734	627.898
17		259.22	52.23	52.20	52.22	609.410	
18		259.28	50.10	52.42	52.22	627.551	
19	28 วัน	269.75	51.10	52.50	50.80	670.096	649.419
20		270.84	51.28	52.60	51.20	642.302	
21		268.72	50.40	52.90	51.82	635.858	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

อัตราส่วนผสมของเพสท์สำหรับซีเมนต์ 75% กับ CSA 25% (CSA25)

1. น้ำหนัก Cement 6,000 กรัม 2. น้ำหนัก น้ำ 1,998 กรัม

3. ค่า W/C = 0.333

ผลการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักเพสท์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	6 ชั่วโมง	251.77	50.12	50.80	50.2	54.829	54.784
2		255.53	50.04	50.50	50.4	57.419	
3		254.99	50.10	50.76	50.22	52.102	
4	12 ชั่วโมง	253.09	49.70	51.48	50.80	212.972	212.985
5		257.63	50.22	51.72	50.22	224.226	
6		251.58	50.32	51.18	49.64	201.757	
7	1 วัน	255.68	50.32	51.68	50.12	453.022	434.710
8		254.57	50.02	51.58	50.22	428.530	
9		252.05	50.22	51.02	50.04	422.578	
10	3 วัน	254.21	50.22	51.48	50.18	488.526	476.333
11		254.28	50.12	51.32	50.28	460.481	
12		252.32	50.28	51.38	50.36	479.990	
13	7 วัน	250.11	50.42	50.74	50.04	549.230	549.397
14		252.24	50.32	51.64	50.04	560.972	
15		252.37	50.46	51.56	50.64	537.991	
16	14 วัน	249.68	49.98	50.80	50.82	576.530	593.998
17		250.27	50.04	50.62	50.02	591.980	
18		251.49	50.62	50.92	49.82	613.485	
19	28 วัน	263.04	50.48	52.06	50.90	598.975	600.799
20		263.95	50.48	51.70	51.22	597.743	
21		268.60	50.58	50.22	50.94	605.678	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

อัตราส่วนผสมของเพสท์สำหรับซีเมนต์ 70% กับ CSA 30% (CSA30)

1. น้ำหนัก Cement 6,000 กรัม 2. น้ำหนัก น้ำ 1,998 กรัม

3. ค่า W/C = 0.333

ผลการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักเพสท์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	6 ชั่วโมง	250.14	50.26	50.08	50.02	56.972	59.311
2		248.29	50.10	50.42	50.02	59.500	
3		248.55	50.38	50.22	50.12	61.460	
4	12 ชั่วโมง	266.17	50.90	52.88	50.78	245.478	244.607
5		263.30	50.72	52.52	50.68	236.947	
6		261.24	51.02	51.52	50.54	251.396	
7	1 วัน	259.90	50.62	51.32	50.62	427.782	428.959
8		263.29	51.18	52.36	50.60	438.058	
9		254.26	50.72	52.62	50.82	421.037	
10	3 วัน	249.32	49.92	50.58	50.42	458.464	444.785
11		255.20	50.12	51.98	50.22	441.342	
12		253.80	50.42	51.52	49.78	434.549	
13	7 วัน	250.00	50.02	50.54	50.48	515.583	526.444
14		250.90	50.22	50.62	50.04	523.335	
15		248.84	50.68	50.66	49.76	540.412	
16	14 วัน	247.89	50.36	50.52	49.88	524.961	536.628
17		253.56	50.08	51.98	50.28	534.889	
18		250.37	50.12	51.68	50.02	550.034	
19	28 วัน	248.13	50.06	51.38	50.28	575.759	582.026
20		246.87	50.15	50.12	50.06	597.131	
21		249.86	50.32	51.42	50.06	573.189	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

อัตราส่วนผสมของเพสท์สำหรับซีเมนต์ 65% กับ CSA 35% (CSA35)

1. น้ำหนัก Cement 6,000 กรัม 2. น้ำหนัก น้ำ 1,998 กรัม

3. ค่า W/C = 0.333

ผลการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักเพสท์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	6 ชั่วโมง	253.04	50.48	51.66	49.82	101.764	101.662
2		251.41	50.02	51.62	50.28	98.566	
3		249.01	49.44	51.08	51.02	104.657	
4	12 ชั่วโมง	248.55	50.02	50.14	50.58	282.257	274.298
5		249.37	50.32	51.04	50.28	263.673	
6		250.80	50.46	51.64	50.22	276.964	
7	1 วัน	250.69	50.20	51.82	50.22	415.551	439.220
8		252.98	50.48	51.72	50.44	454.875	
9		250.20	50.22	51.42	50.24	447.235	
10	3 วัน	246.58	50.32	51.12	50.04	437.031	442.176
11		250.81	50.12	50.78	50.32	447.842	
12		252.63	49.88	52.42	50.54	441.655	
13	7 วัน	247.50	50.28	50.82	50.14	459.098	456.948
14		248.62	50.22	51.38	50.18	459.597	
15		250.73	50.22	51.72	50.34	452.148	
16	14 วัน	250.87	51.40	51.82	50.22	469.562	481.040
17		251.92	50.36	52.22	50.18	473.572	
18		249.93	50.14	51.98	50.24	499.985	
19	28 วัน	261.77	50.72	51.78	50.62	499.451	493.528
20		258.79	50.98	51.72	50.98	475.749	
21		261.27	50.82	52.22	50.62	505.385	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

อัตราส่วนผสมของเพสท์สำหรับซีเมนต์ 60% กับ CSA 40% (CSA40)

1. น้ำหนัก Cement 6,000 กรัม 2. น้ำหนัก น้ำ 1,998 กรัม

3. ค่า W/C = 0.333

ผลการทดสอบกำลังอัดของเพสต์

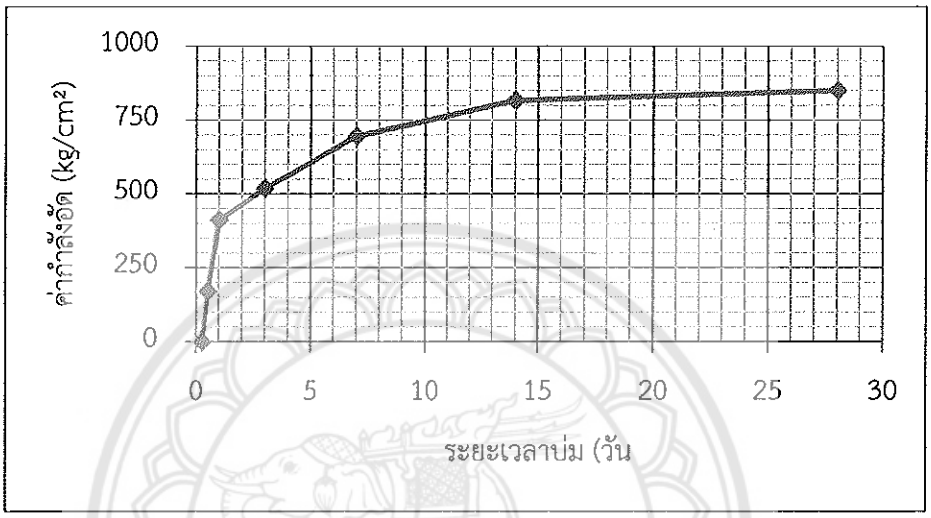
ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักเพสท์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ขนาดหน้าตัด ยาว (mm.)	ขนาดหน้าตัด สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	6 ชั่วโมง	247.52	49.84	51.20	50.42	247.315	239.039
2		247.06	50.84	50.44	50.12	243.725	
3		247.06	50.36	51.18	49.96	226.078	
4	12 ชั่วโมง	261.48	50.82	52.58	50.42	307.734	305.489
5		260.17	51.22	52.52	50.32	310.252	
6		259.05	51.12	52.32	50.64	298.483	
7	1 วัน	261.51	50.94	52.28	50.72	382.856	367.579
8		258.99	51.14	52.14	50.62	373.944	
9		260.60	51.18	52.68	50.64	345.936	
10	3 วัน	248.92	50.42	52.12	50.14	398.076	402.618
11		247.89	50.30	51.08	50.34	406.333	
12		247.09	50.42	51.22	50.08	403.444	
13	7 วัน	244.93	50.14	50.98	50.42	413.710	424.187
14		248.87	50.32	51.58	50.22	423.232	
15		248.97	50.32	52.02	50.04	435.620	
16	14 วัน	250.00	50.20	50.12	50.42	448.803	448.154
17		251.37	50.04	51.76	50.62	444.583	
18		249.70	50.32	51.22	50.34	451.076	
19	28 วัน	250.83	50.02	51.38	50.32	466.843	455.091
20		248.02	50.04	50.92	50.52	462.434	
21		247.06	50.52	51.22	49.80	435.997	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

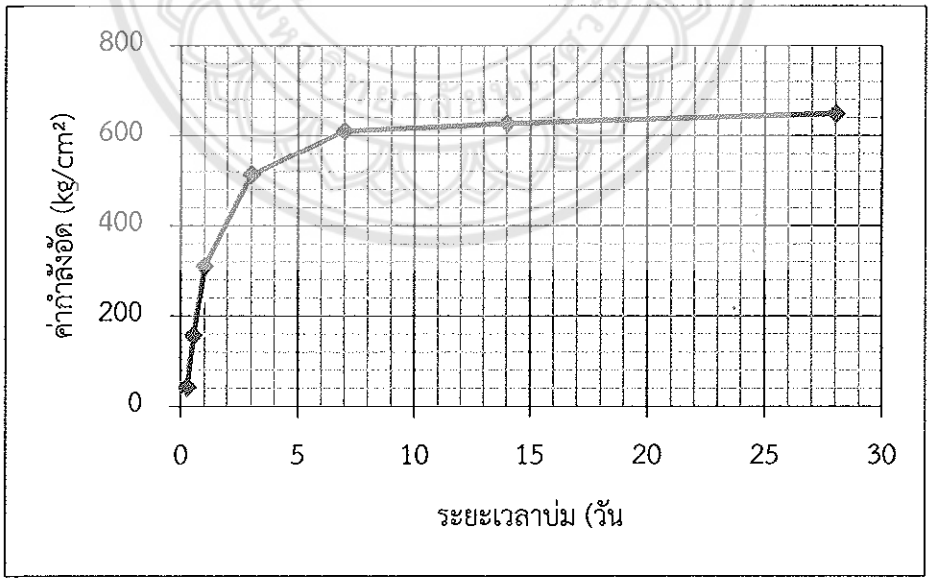
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

กราฟที่ 1 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของเพสท์โดยใช้ซีเมนต์ 100% (CSA0)



กราฟที่ 2 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของเพสท์โดยใช้ซีเมนต์ 80% กับ CSA 20% (CSA20)

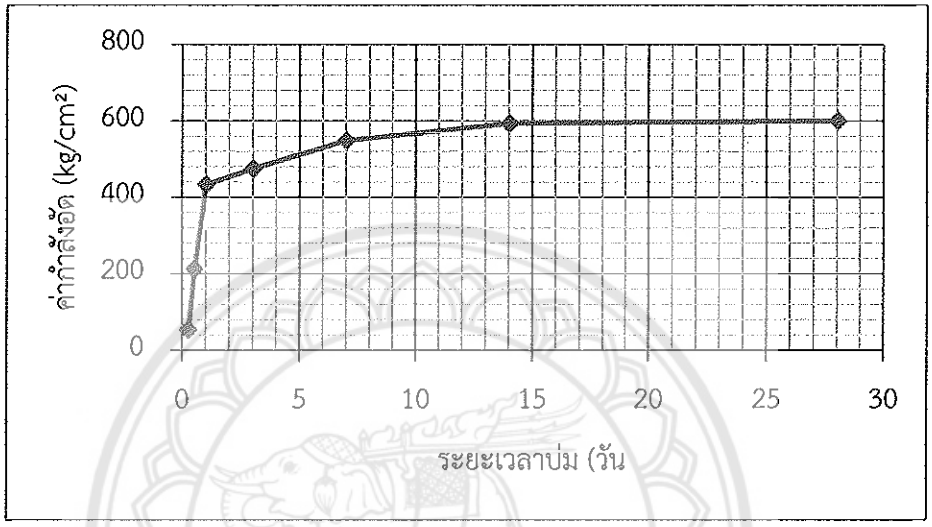


Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

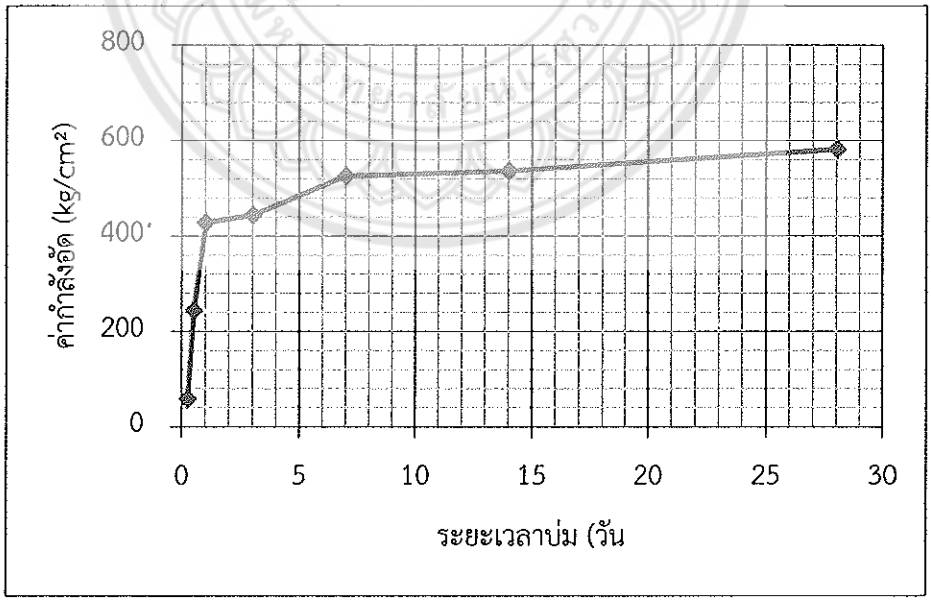
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

กราฟที่ 3 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของเพสท์โดยใช้ซีเมนต์ 75% กับ CSA 25% (CSA25)



กราฟที่ 4 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของเพสท์โดยใช้ซีเมนต์ 70% กับ CSA 30% (CSA30)

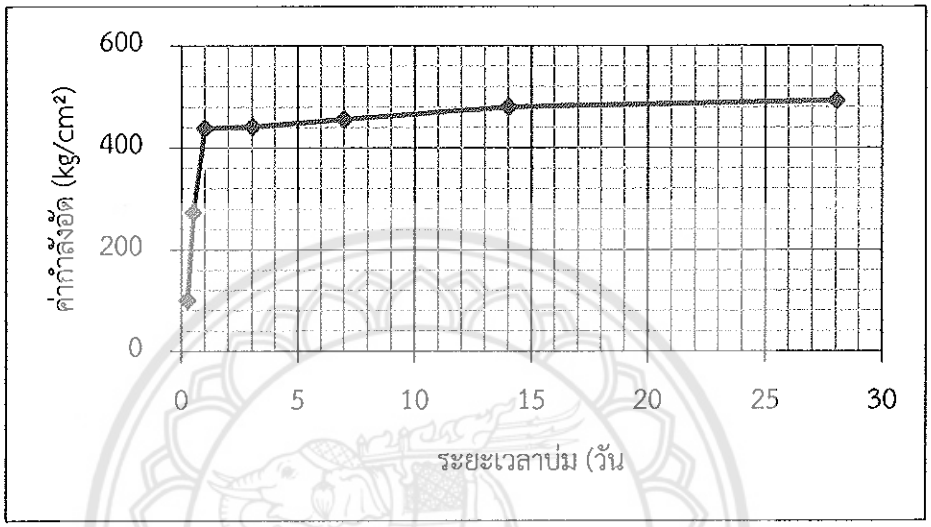


Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

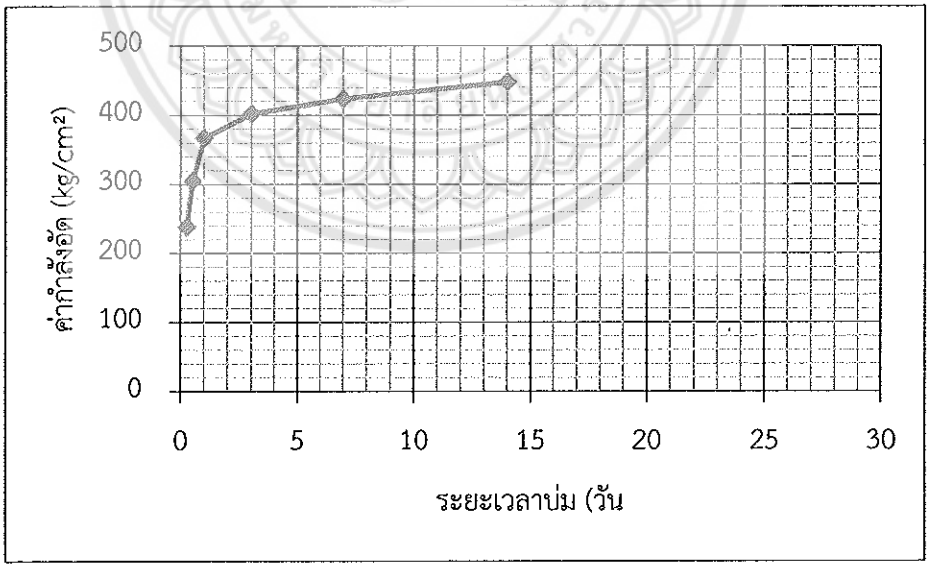
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของเพสต์

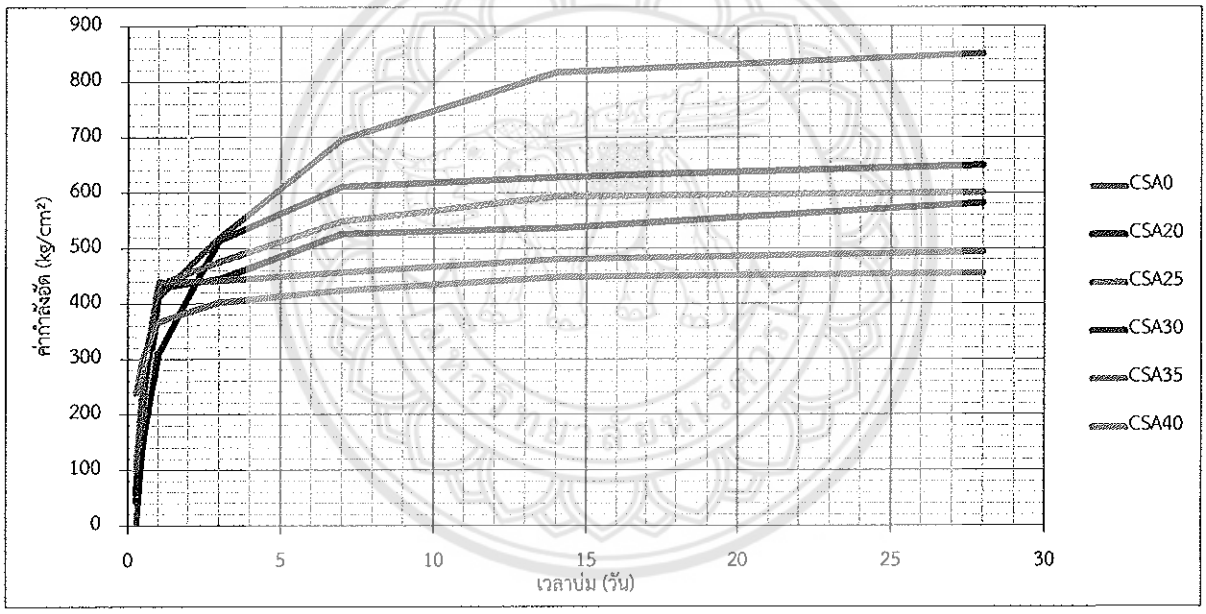
กราฟที่ 5 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของเพสท์โดยใช้ซีเมนต์ 65% กับ CSA 35% (CSA35)



กราฟที่ 5 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของเพสท์โดยใช้ซีเมนต์ 60% กับ CSA 40% (CSA40)



กราฟแสดงค่ากำลังอัดของเพสท์ทุกอัตราส่วนผสม



Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับซีเมนต์ 100% (CSA0)

1. น้ำหนัก Cement	1,500	กรัม	2. น้ำหนักทราย	4,125	กรัม
3. น้ำหนักน้ำ	900	กรัม	4. ค่า W/C =	0.60	

ผลการทดสอบการไหลแผ่

ค่าที่	1	2	3	4	ค่าเฉลี่ย
ค่าที่ได้ (cm.)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
ดังนั้นเปอร์เซ็นการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับ					147.53%

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักมอร์ต้าร์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	1 วัน	266.977	50.00	49.90	50.22	146.240	143.204
2		267.221	50.18	49.82	50.26	139.661	
3		267.228	50.24	49.62	50.22	143.710	
4	3 วัน	267.861	50.00	49.36	50.28	270.721	268.022
5		268.786	50.48	49.12	49.92	267.179	
6		272.416	50.78	49.60	49.80	266.167	
7	7 วัน	268.311	50.10	50.60	50.22	279.323	273.42
8		266.895	50.18	49.90	49.98	268.191	
9		267.416	50.28	49.84	50.00	272.745	
10	14 วัน	269.206	50.52	49.62	49.64	349.660	339.54
11		268.162	50.22	50.00	49.82	327.395	
12		269.604	50.00	49.72	50.30	341.564	
13	28 วัน	269.229	50.42	49.42	49.94	407.347	397.564
14		266.595	50.00	49.52	50.12	389.130	
15		265.835	49.80	49.62	50.44	396.214	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับซีเมนต์ 80% กับ CSA 20% (CSA20)

1. น้ำหนัก Cement	1,500	กรัม	2. น้ำหนักทราย	4,125	กรัม
3. น้ำหนักน้ำ	900	กรัม	4. ค่า W/C =	0.60	

ผลการทดสอบการไหลแผ่

ค่าที่	1	2	3	4	ค่าเฉลี่ย
ค่าที่ได้ (cm.)	22.50	23.00	22.90	22.70	22.78
ดังนั้นเปอร์เซ็นการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับ					125.495%

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักมอร์ต้าร์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	1 วัน	270.132	50.44	50.80	49.82	116.384	117.396
2		269.585	49.84	50.88	50.40	115.878	
3		271.848	50.82	51.10	49.32	119.927	
4	3 วัน	269.874	50.32	50.66	49.82	196.336	195.830
5		272.129	50.18	50.72	50.24	190.77	
6		270.225	50.18	51.00	49.92	200.384	
7	7 วัน	272.628	50.00	51.14	50.30	231.251	231.082
8		272.459	50.08	51.20	50.14	226.191	
9		272.206	49.90	51.00	50.38	235.805	
10	14 วัน	272.522	50.34	50.78	50.42	257.058	263.986
11		270.789	50.18	50.68	50.10	270.251	
12		271.823	50.28	50.66	50.00	264.649	
13	28 วัน	274.382	50.54	50.80	49.74	307.66	300.070
14		270.688	50.00	51.08	50.18	296.528	
15		273.313	50.48	51.26	49.82	296.022	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับซีเมนต์ 75% กับ CSA 25% (CSA25)

1. น้ำหนัก Cement	1,500	กรัม	2. น้ำหนักทราย	4,125	กรัม
3. น้ำหนักน้ำ	900	กรัม	4. ค่า W/C =	0.60	

ผลการทดสอบการไหลแผ่

ค่าที่	1	2	3	4	ค่าเฉลี่ย
ค่าที่ได้ (cm.)	22.00	21.60	21.80	22.00	21.85
ดังนั้นเปอร์เซ็นการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับ					116.337%

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักมอร์ต้าร์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ขนาดหน้าตัด ยาว (mm.)	ขนาดหน้าตัด สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	1 วัน	270.418	49.92	50.90	50.36	111.324	112.505
2		271.756	49.94	51.18	50.12	110.818	
3		272.28	50.44	51.10	49.62	115.372	
4	3 วัน	270.236	50.14	50.66	50.06	186.721	186.721
5		269.752	50.22	50.70	50.18	181.155	
6		270.22	50.16	51.00	50.00	192.288	
7	7 วัน	271.047	49.60	50.98	50.40	226.191	228.721
8		271.277	50.10	50.92	50.08	227.203	
9		268.191	50.00	50.50	50.18	232.769	
10	14 วัน	266.805	50.12	50.38	49.94	255.54	253.853
11		267.917	50.12	50.82	50.02	251.492	
12		270.201	50.28	50.96	50.00	254.528	
13	28 วัน	268.399	50.00	50.22	50.50	272.239	272.239
14		269.544	50.08	50.60	50.28	268.191	
15		269.72	49.76	50.42	50.62	276.287	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับซีเมนต์ 70% กับ CSA 30% (CSA30)

1. น้ำหนัก Cement 1,500 กรัม 2. น้ำหนักทราย 4,125 กรัม

3. น้ำหนักน้ำ 900 กรัม 4. ค่า W/C = 0.60

ผลการทดสอบการไหลแผ่

ค่าที่	1	2	3	4	ค่าเฉลี่ย
ค่าที่ได้ (cm.)	20.20	20.70	20.30	20.50	20.43
ดังนั้นเปอร์เซ็นการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับ					102.228%

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักมอร์ต้าร์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	1 วัน	274.527	50.20	51.70	50.00	118.915	120.602
2		267.309	50.06	51.70	50.20	119.927	
3		276.922	49.88	51.74	50.60	122.963	
4	3 วัน	274.989	49.92	51.58	50.34	212.022	207.637
5		274.132	50.14	50.40	50.36	206.456	
6		273.543	50.00	51.40	50.68	204.432	
7	7 วัน	270.703	50.00	51.22	50.00	219.107	220.119
8		271.355	50.10	51.18	50.12	219.107	
9		272.036	50.00	50.74	50.10	222.143	
10	14 วัน	269.738	50.30	50.20	50.00	243.396	232.769
11		267.188	50.00	50.38	50.06	222.649	
12		269.221	50.28	50.30	50.18	232.263	
13	28 วัน	267.467	50.48	50.62	49.52	270.721	269.372
14		270.281	50.20	51.00	50.00	265.155	
15		266.293	50.28	50.36	49.72	272.239	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับซีเมนต์ 65% กับ CSA 35% (CSA35)

1. น้ำหนัก Cement	1,500	กรัม	2. น้ำหนักทราย	4,125	กรัม
3. น้ำหนักน้ำ	900	กรัม	4. ค่า W/C =	0.60	

ผลการทดสอบการไหลแผ่

ค่าที่	1	2	3	4	ค่าเฉลี่ย
ค่าที่ได้ (cm.)	19.80	19.90	20.00	19.80	19.88
ดังนั้นเปอร์เซ็นการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับ					96.782%

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักมอร์ต้าร์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	1 วัน	270.929	50.12	50.78	49.92	130.553	132.071
2		270.308	49.98	50.70	50.00	133.083	
3		270.096	50.24	51.18	49.96	132.577	
4	3 วัน	269.129	50.20	50.94	49.94	171.541	169.348
5		269.248	50.28	51.12	50.10	166.987	
6		270.908	49.64	51.60	50.68	169.517	
7	7 วัน	270.172	50.00	5.60	50.10	216.071	216.239
8		269.412	50.00	51.10	50.32	220.625	
9		268.718	50.00	50.68	50.10	212.022	
10	14 วัน	272.851	50.42	51.40	49.82	227.208	227.301
11		270.78	50.12	51.24	50.00	229.759	
12		269.802	49.94	50.90	50.34	224.937	
13	28 วัน	269.194	50.32	50.78	49.88	257.89	252.328
14		267.816	50.10	51.00	50.00	242.396	
15		269.493	49.62	50.78	50.34	256.697	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์สำหรับซีเมนต์ 60% กับ CSA 40% (CSA40)

1. น้ำหนัก Cement	1,500	กรัม	2. น้ำหนักทราย	4,125	กรัม
3. น้ำหนักน้ำ	900	กรัม	4. ค่า W/C =	0.60	

ผลการทดสอบการไหลแผ่

ค่าที่	1	2	3	4	ค่าเฉลี่ย
ค่าที่ได้ (cm.)	18.00	18.20	18.00	18.20	18.10
ดังนั้นเปอร์เซ็นการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับ					79.208%

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

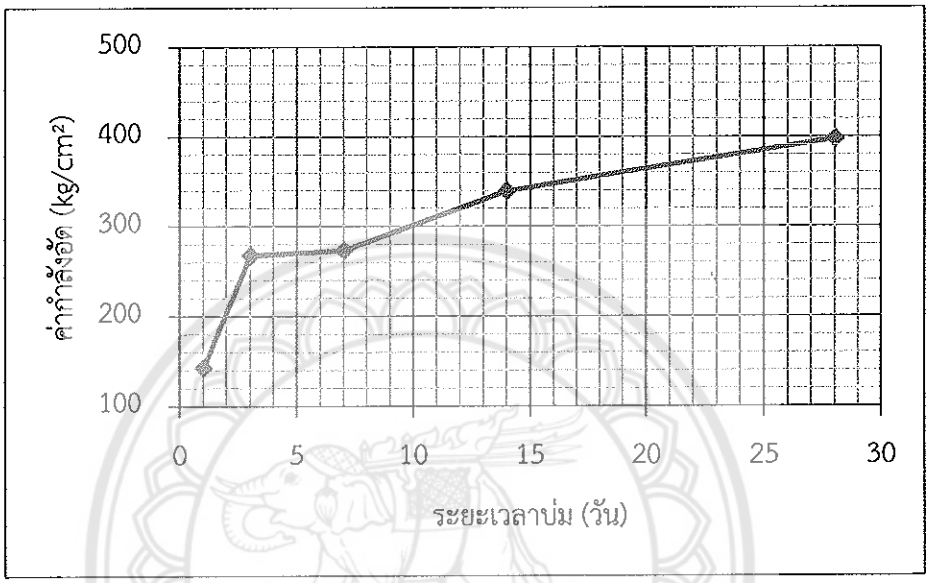
ก้อนตัวอย่างที่	อายุการบ่ม (วัน)	น้ำหนักมอร์ต้าร์ (g)	ขนาดหน้าตัด กว้าง (mm.)	ยาว (mm.)	สูง (mm.)	ค่ากำลังอัดที่ได้ kg/cm²	ค่ากำลังอัดเฉลี่ย kg/cm²
1	1 วัน	274.27	50.04	52.00	50.08	135.107	131.228
2		271.383	50.08	51.40	50.18	128.529	
3		272.664	50.00	51.62	50.06	130.047	
4	3 วัน	270.779	50.02	50.50	50.40	193.806	191.276
5		271.948	50.20	50.92	50.00	189.251	
6		269.743	49.62	50.60	50.62	190.77	
7	7 วัน	270.382	50.84	50.98	50.28	216.191	217.669
8		274.226	50.32	51.58	49.98	211.637	
9		273.031	50.40	51.52	49.94	225.179	
10	14 วัน	273.645	50.10	51.22	50.12	225.179	225.555
11		273.936	50.22	51.32	50.00	228.721	
12		274.357	50.00	51.58	50.14	222.764	
13	28 วัน	274.56	50.52	51.28	49.92	217.589	233.444
14		277.201	50.42	52.00	50.08	242.384	
15		276.327	50.12	51.68	50.12	240.36	

Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

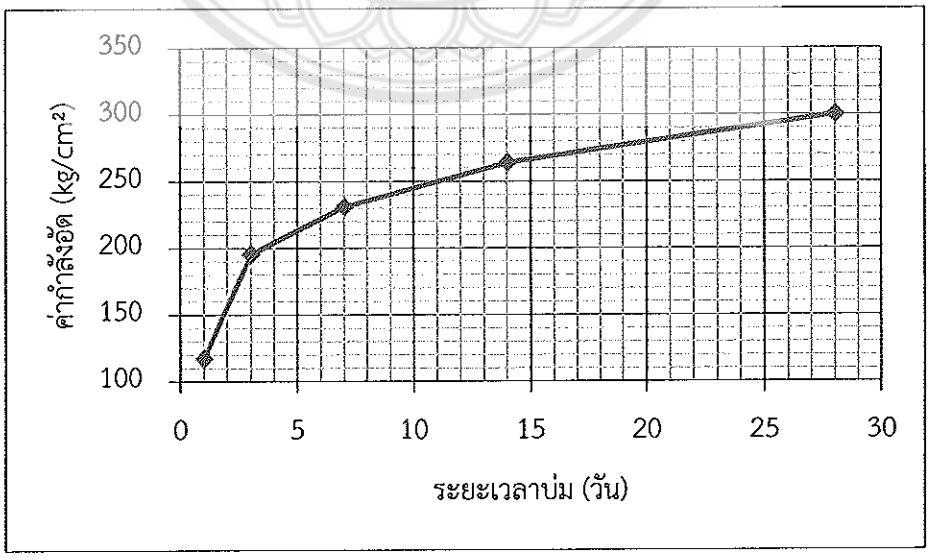
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

กราฟที่ 1 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์โดยใช้ซีเมนต์ 100% (CSA0)



กราฟที่ 2 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์โดยใช้ซีเมนต์ 80% กับ CSA 20% (CSA20)

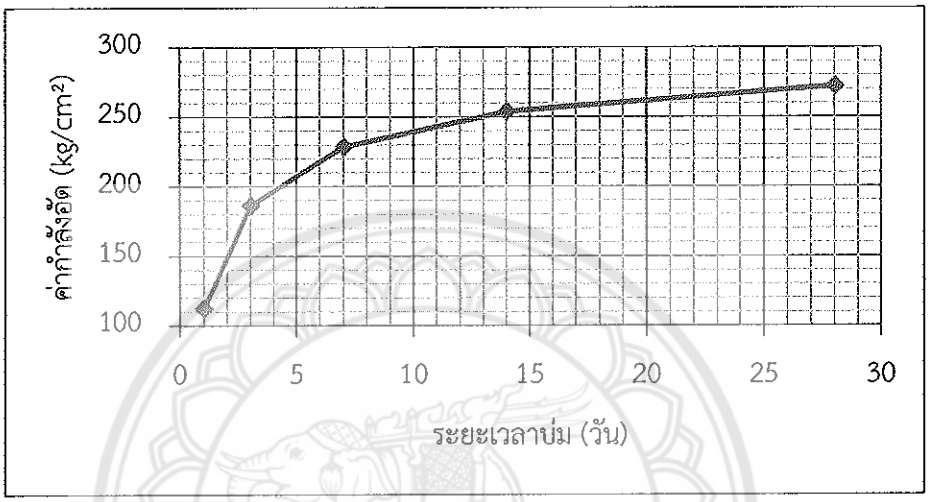


Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

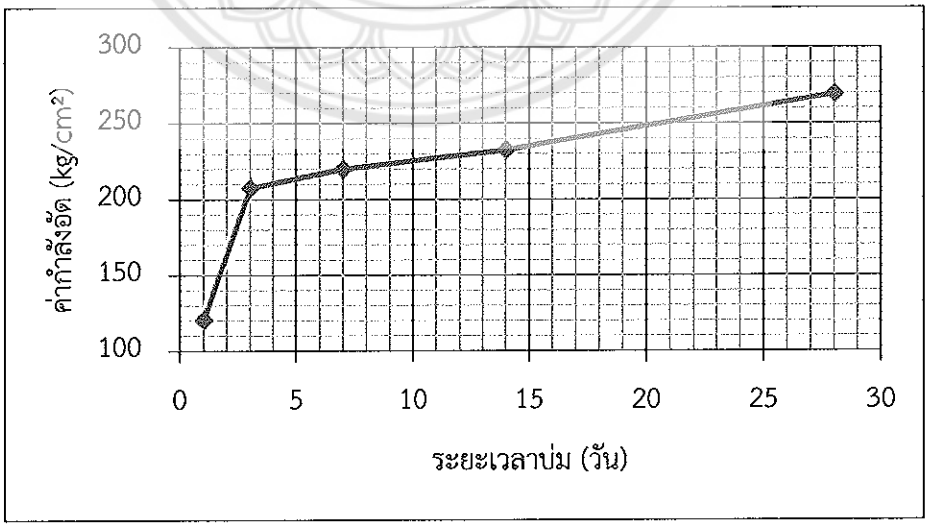
Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

กราฟที่ 3 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์โดยใช้ซีเมนต์ 75% กับ CSA 25% (CSA25)



กราฟที่ 4 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์โดยใช้ซีเมนต์ 70% กับ CSA 30% (CSA30)

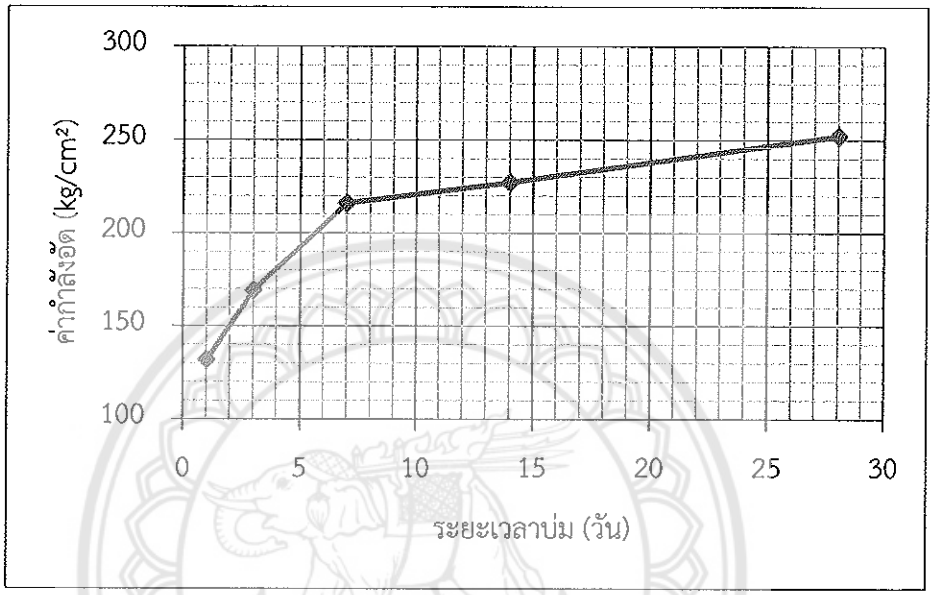


Client: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Project: การศึกษาความสามารถในการรับกำลังอัดของวัสดุผสมระหว่าง ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ – แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตซีเมนต์

การทดสอบหากำลังอัดของมอร์ตาร์

กราฟที่ 5 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์โดยใช้ซีเมนต์ 65% กับ CSA 35% (CSA35)



กราฟที่ 5 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์โดยใช้ซีเมนต์ 60% กับ CSA 40% (CSA40)