คุณสมบัติทางกายภาพ และความต้านทานต่อซัลเฟต ของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย

นายจีรศักดิ์ สุพรมวัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2557

PHYSICAL PROPERTIES AND SULPHATE RESISTANCE OF CEMENT MORTAR WHEN SAND IS PARTIALLY REPLACED BY CALCITE TAILING

Jeerasak Supromwan

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2014

คุณสมบัติทางกายภาพ และความต้านทานต่อซัลเฟต
ของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)
ประธานกรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(ผศ. ดร.มงคล จิรวัชรเดช)
กรรมการ

_____ _____

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์) (รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จีรศักดิ์ สุพรมวัน : คุณสมบัติทางกายภาพ และความต้านทานต่อซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย (PHYSICAL PROPERTIES AND SULPHATE RESISTANCE OF CEMENT MORTAR WHEN SAND IS PARTIALLY REPLACED BY CALCITE TAILING) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ, 127 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและความต้านทานต่อซัลเฟตของซีเมนต์มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 และขนาดคละตามธรรมชาติ โดยใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายในสัดส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวม กำหนดใช้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อน้ำที่ 0.59 ทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 1, 3, 7 , 28 และ 60 วัน รายงานผลการทดสอบการหดตัวแห้ง การต้านทานต่อซัลเฟตที่อายุการแช่ในสารละลาย 112 วัน

ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ส่งกระทบต่อกำลังอัดเพียงเล็กน้อย (ลดลงร้อยละ 4 ถึง 7) เมื่อใช้ทรายขนาดคละตามธรรมชาติส่งผลให้กำลังอัดลดลงสูง (ลดลงร้อยละ 3 ถึง 15) และมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลไซต์ คุณสมบัติทางกายภาพด้านการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมส่งผลแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยโดยมีร้อยละการหดตัวแห้งที่ใกล้เคียงกัน ส่วนการต้านทานต่อซัลเฟต เนื่องจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ด้านการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ ปรากฏว่าผิวของมอร์ต้าร์ยังไม่เกิดการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลาย จึงส่งผลให้ไม่เกิดการสูญเสียน้ำหนัก มีเพียงแค่รอยแตกร้าวที่ผิวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การขยายตัวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ทรายล้วนและที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการขยายตัวสูงสุดและมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายคัดขนาดคละเล็กน้อย การใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายทั้งสองขนาดคละมีแนวโน้มขยายตัวลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของกากแร่แคลไซต์ และมีการขยายตัวใกล้เคียงกันในสารละลายทั้งสองชนิด การใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 40 และ 50) มีการขยายตัวต่ำใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2557 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

JEERASAK SUPROMWAN : PHYSICAL PROPERTIES AND SULPHATE RESISTANCE OF CEMENT MORTAR WHEN SAND IS PARTIALLY REPLACED BY CALCITE TAILING. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THEERAWAT SINSIRI, Ph.D., 127 PP.

MORTAR/CALCITE/COMPRESSIVESTRENGTH/SULPHATE RESISTANCE

This research was conducted to study physical properties and the sulfate resistance of cement mortar. Calcite was used to replace the sand classified the sizes according to ASTM C 33 and as-received sand at the 0, 10, 20, 30, 40, and 50% by weight. The water to cement ratio for mixing mortar was 0.59 and the compressive strength of mortars was determined at the ages of 1, 3, 7, 28, and 60 days. Drying shrinkage and expansion due to sulfate attack were reported at the 112 days.

The results showed that use of calcite to replace the sand resulted in slightly decreasing in compressive strength of the classified sand mortar (4-7%) but it provided highly decreasing in compressive strength of mortar using as-received sand (3-15%). These results suggested that the compressive strength of mortar decreased with the increasing of calcite replacement. In addition, the result of the physical properties of each mortar showed slightly different in term of drying shrinkage. For sulfate attack , the surface of mortars had small cracks and weight loss of mortar was not observed during the experiment. The mortar using Portland cement type I and as-received sand showed the highest expansion due to sulfate attack after being immersed in sodium sulfate solution and this expansion result was slightly higher

than mortar using the classified sand immersed in the same sulfate solution. It should be noted that, the expansion of mortar due to sulfate attack decreased when the replacement of calcite was increased. Moreover, the expansion of mortar containing high volume of calcite was slightly lower than the mortar using Portland cement type V.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Civil Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2014 Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ สินศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ ดูแลเอาใจใส่ในการศึกษาของผู้วิจัยเป็นอย่างดีมาโดยตลอด และได้สละเวลาดูแลให้คำปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้จนสำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี

ศาสตราจารย์ ดร.สุขสันติ์ หอพิบูลสุข ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำแนะนำในการวางแผนการศึกษาเป็นอย่างดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และกำลังใจในการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงคำแนะนำรูปแบบของการเขียนวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล จิรวัชรเดช กรรมการ ที่มอบความรู้อย่างมากและแนวคิดในหลายด้านในการวิจัยและการเรียนรู้ รวมทั้งคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ทุกท่าน

รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิชัย แสงอาทิตย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์อย่างมาก ในการให้ความรู้ในด้านวิชาการที่ท่านทุ่มเทในการสอนเป็นอย่างมาก และคำอบรมสั่งสอนที่ดี ซึ่งเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้ามาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.รัฐพล สมนา อาจารย์ศักดิ์สิทธิ์ พันทวี และ ดร.เกียรติสุดา สมนา อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ดูแลเอาใจใส่ให้คำแนะนำตลอดเวลาในการทำวิจัยในครั้งนี้

คุณสมนึก เต็งชาตะพันธ์ กรรมการผู้จัดการบริษัทสุรินทร์ออมย่า ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา เจ้าหน้าที่สถานวิจัย สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ ที่ดูแลเอาใจใส่และอำนวยความสะดวกอย่างมากในเรื่องเอกสารต่าง ๆ รวมถึงเพื่อนบัณฑิตศึกษา และผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ทุกท่าน

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคำปอง–คุณแม่ออ สุพรมวัน และคุณพ่อประเทือง-คุณแม่ประไพ เสงี่ยมโพธิ์ ที่ให้การอุปการะเลี้ยงดูอบรม ส่งเสริมการศึกษา และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอด และผู้ที่ข้าพเจ้าให้ความเคารพทุกท่าน

จีรศักดิ์ สุพรมวัน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ง
สารบัญ..... จ
สารบัญตาราง..... ซ
สารบัญรูป..... ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ณ

บทที่

1 บทนำ..... 1
1.1 ความสำคัญของปัญหา..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา..... 2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
2.1 แร่..... 4
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต..... 5
2.3 แคลไซต์ 6
2.3.1 คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐาน ASTM 6
2.3.2 คุณลักษณะของแร่แคลไซต์ตามมาตรฐานของออสเตรเลีย 7
2.3.3 คุณลักษณะของแร่แคลไซต์ตามมาตรฐานของอินเดีย..... 8
2.3.4 คุณลักษณะของแร่แคลไซต์ชนิด Micronised Natural Whiting ที่สั่งเข้ามาในประเทศเพื่อทำสี..... 9
2.3.5 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมยาง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมประเทศไทย..... 9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.6 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมสีและพลาสติกตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมประเทศไทย.....10
2.4 มอร์ต้าร์..... 12
2.4.1 ปูนซีเมนต์..... 12
2.4.2 วัสดุผสมละเอียด..... 16
2.4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีต 16
2.4.4 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต 22
2.5 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....25
3 วิธีดำเนินการวิจัย..... 35
3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย..... 36
3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของทราย.....36
3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์.....37
3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติของแคลไซต์..... 38
3.2 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์..... 38
3.2.1 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก..... 38
3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ต้าร์..... 48
3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์.....40
3.2.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านการขยายตัวทนซัลเฟต 40
3.2.5 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก 40
3.2.6 การเตรียมสารละลายซัลเฟต 41
3.3 ส่วนผสมสัญลักษณ์และจำนวนของก้อนตัวอย่าง..... 43
4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล.....48
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย..... 48
4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานและมวลรวมละเอียด..... 48
4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีมวลรวม..... ..51
4.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ต้าร์..... 52
4.2.1 การทดสอบหาอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม.....52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.2 การหาหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์.....54
4.2.3 คุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด..... 57
4.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้าร์..... 59
4.3.1 คุณสมบัติด้านการหดตัวแห้ง..... 59
4.3.2 การต้านทานทนซัลเฟตเนื่องจากแช่ในสารละลาย.....64
5 บทสรุป.....86
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....86
5.1.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานและมวลรวมละเอียด..... 86
5.1.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ต้าร์..... 86
5.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้าร์..... 87
5.2 ข้อเสนอแนะ.....88
รายการอ้างอิง.....90
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....93
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์.....101
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา..... 119
ประวัติผู้เขียน..... 127

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐาน ASTM (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่,2550) 7

2.2 คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานของออสเตรเลีย (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่,2550) 8

2.3 คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานของอินเดีย (กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่,2550) 8

2.4 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมการยาง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.402-2532) 10

2.5 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมการสีและพลาสติกตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.403-2532) ...11

2.6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547). 13

2.7 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547). 14

2.8 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1ถึง 5 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547). 15

2.9 การหดตัวทั่วไปของมอร์ต้าร์และคอนกรีต (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547). 20

3.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ CSCa …… ….....43

3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการรับแรงอัดของมอร์ต้าร์ NSCa ……..... 44

3.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa..... 44

3.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแห้ง ของมอร์ต้าร์ NSCa 45

3.5 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบด้านขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa 45

3.6 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบด้านการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa 46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa 46

3.8 จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa...47

4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสานและมวลรวม..... 48

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากแร่แคลไซต์.....51

4.3 ค่าอัตราส่วน Water-Cement Rotio..... 53

ก.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของกากแร่แคลไซต์
โดย X-Ray Fluorescen (XRF)..... 94

ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของกากแร่แคลไซต์…….. 95

ก.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายขนาดคละธรรมชาติ……..... 96

ก.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 …….....97

ก.5 ค่าโมดูลัสความละเอียดของกากแร่แคลไซต์..…….....98

ก.6 ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายขนาดคละธรรมชาติ..……..... 99

ก.7 ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33..…….....100

ข.1 ค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย
ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.59…….. 102

ข.2 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละ
ตามมาตรฐาน ASTM C33.....103

ข.3 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ..... 103

ข.4 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 …..... 104

ข.5 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM
C33 ที่ร้อยละ 10..... ...105

ข.6 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน
ASTM C33 ที่ร้อยละ 20..... 106

ข.7 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM
C33 ที่ร้อยละ 30..... 107

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข.8 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 40 ...108
ข.9 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 50 109
ข.10 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายขนาดคละตามธรรมชาติ 110
ข.11 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ ที่ร้อยละ 10 111
ข.12 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ ที่ร้อยละ 20 ...112
ข.13 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ ที่ร้อยละ 30 ...113
ข.14 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ ที่ร้อยละ 40 ...114
ข.15 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ ที่ร้อยละ 50 ...115
ข.16 ค่าการหดตัวแห้งมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคัดขนาดคละ ตามมาตรฐาน ASTM C33 ...116
ข.17 ค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละ ตามธรรมชาติ 116
ข.18 ค่าการขยายตัวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์ แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 117
ข.19 ค่าการขยายตัวแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์ แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ 117
ข.20 ค่าการขยายตัวแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์ แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 118

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ข.21 ค่าการขยายตัวแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ..... 118

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 แร่แคลไซต์ (แคลไซต์ . [ออนไลน์]. ,2550)..... 12

2.2 ภาพถ่ายขยาย SEM ของโครงสร้างจุลภาคที่ใช้แคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรก ที่ร้อยละ 15และ 45 (Y.Benachour และคณะ ,2008)..... 26

2.3 ขนาดของช่องว่างของมอร์ต้าร์ควบคุมกับมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรก ที่ร้อยละ 15, 25, 35 และ 45 (Y.Benachour และคณะ ,2008).....26

2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการแช่สารละลายกรดซัลฟูริกและการสูญเสียน้ำหนัก ของมอร์ต้าร์ (ประชุม คำพุฒ, 2548) 31

2.5 การถูกกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ผสมทรายปกติและมอร์ต้าร์ผสมหินฝุ่น ที่อายุ 90 วัน (ประชุม คำพุฒ, 2548)..... 32

3.1 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย.....35

3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย..... 36

3.3 การทดสอบหาขนาดคละของทราย.....37

3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์.....37

3.5 ชุดทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์..... 39

3.6 แบบหล่อและการเก็บตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ในการทดสอบการรับแรงอัด และทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก..... 39

3.7 ชุดแบบหล่อและเหล็กสตั๊ด สำหรับทดสอบการหดตัวและขยายตัวของมอร์ต้าร์..... 42

3.8 ชุดเครื่องทดสอบการหดตัวแห้งและขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์.....42

4.1 ขนาดคละของทรายและกากแร่แคลไซต์..... 49

4.2 ลักษณะสีรูปร่างของทราย และกากแร่แคลไซต์.....50

4.3 ภาพถ่ายขยาย 100 เท่าของอนุภาคของทรายและกากแร่แคลไซต์..... 50

4.4 ผลการทดสอบ X-Ray Diffraction ของกากแร่แคลไซต์.....52

4.5 ร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์กับการแทนที่ทรายด้วยแคลไซต์..... 54

4.6 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa …….. 55

4.7 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์แคลไซต์ NSCa …….. 55

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 ภาพกำลังสูงถ่าย SEM ของมอร์ต้าร์ NSCa ทุกสัดส่วนการใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทราย 56
4.9 การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa 57
4.10 การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์แคลไซต์ NSCa 58
4.11 เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa และ NSCa ที่อายุการบ่ม 60 วัน 59
4.12 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa 60
4.13 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 56 วัน 60
4.14 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 90 วัน 61
4.15 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 112 วัน 61
4.16 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa 62
4.17 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 56 วัน 63
4.18 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 90 วัน 63
4.19 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 112 วัน 64
4.20 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ CSCa แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน 65
4.21 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCa แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน 66
4.22 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ CSCa แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน 66
4.23 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCa แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน 67
4.24 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCe และ CSCe แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ที่อายุ 112 วัน 67
4.25 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCe และ CSCe แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ที่อายุ 112 วัน 68
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa 69
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน 70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน 70
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน 71
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa 72
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน 73
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน 73
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน 74
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa 75
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน 76
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน 76
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน 77
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa 78
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน 78
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน 79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน 79
4.42 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน.....81
4.43 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน.....82
4.44 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน.....83
4.45 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน.....84
4.46 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อายุการแช่ที่ 112 วัน.....85
4.47 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อายุการแช่ที่ 112 วัน.....85
ก.1 ผลการทดสอบ X-ray Diffraction ของกากแร่แคลไซต์.....94

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

มอก.	=	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
AAC	=	Autoclave Aerate Concrete
ACI	=	American Concrete Institute
ASTM	=	American Society for Testing and Materials
C	=	Portland Cement Type 1
$CaCO_3$	=	Calcium Carbonate
GCC	=	Ground Calcium Carbonate
PCC	=	Preciptated Calcium Carbonate
Ca/S	=	อัตราส่วนผสมระหว่างกากแร่แคลไซต์ต่อทราย
CS	=	ลักษณะเม็ดของทรายควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33
NS	=	ลักษณะเม็ดของทรายขนาดคละตามการกองเก็บธรรมชาติ
CSCa00	=	ส่วนผสมด้วยทรายควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33
CSCa10	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายควบคุมขนาดคละด้วยกากแร่แคลไซต์ 10 %
CSCa20	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายควบคุมขนาดคละด้วยกากแร่แคลไซต์ 20 %
CSCa30	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายควบคุมขนาดคละด้วยกากแร่แคลไซต์ 30 %
CSCa40	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายควบคุมขนาดคละด้วยกากแร่แคลไซต์ 40 %
CSCa50	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายควบคุมขนาดคละด้วยกากแร่แคลไซต์ 50 %
NSCa00	=	ส่วนผสมด้วยทรายลักษณะเม็ดธรรมชาติ
NSCa10	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายเม็ดธรรมชาติด้วยกากแร่แคลไซต์ 10 %
NSCa20	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายเม็ดธรรมชาติด้วยกากแร่แคลไซต์ 20 %
NSCa30	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายเม็ดธรรมชาติด้วยกากแร่แคลไซต์ 30 %
NSCa40	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายเม็ดธรรมชาติด้วยกากแร่แคลไซต์ 40 %
NSCa50	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายเม็ดธรรมชาติด้วยกากแร่แคลไซต์ 50 %
CSCe	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายควบคุมขนาดคละและใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 5 ทนซัลเฟต
NSCe	=	ส่วนผสมการแทนที่ทรายเม็ดธรรมชาติและใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 5 ทนซัลเฟต

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

PC	=	แคลเซียมคาร์บอเนตตกตะกอนอย่างสมบูรณ์
GC	=	ผลิตภัณฑ์ของแร่บด
SSD	=	Specific Surface Diameter
S	=	Sand
SEM	=	Scanning Electron Microscope
XRD	=	X-Ray Diffraction Analysis
XRF	=	X-Ray Fluorescence

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate : $CaCO_3$) เป็นวัตถุดิบชั้นกลางที่ผลิตจากหินปูน มีคุณสมบัติไม่เป็นพิษ มีความขาวและความสว่างสูง นำไปใช้ประโยชน์ เช่น การใช้เป็นตัวเติมเต็ม (Filler) และตัวเพิ่มปริมาณ (Extender) ในงานอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี และอุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน ผงซักฟอก ยา และเวชภัณฑ์ต่างๆ นอกจากนี้ ยังใช้ในการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ สายหุ้มโทรศัพท์ ฉนวนหุ้มสายไฟ ยางลบ ถุงมือ และแว่นตา เป็นต้น

กรรมวิธีการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติ (Ground Calcium Carbonate : GCC) ได้จากการบดแร่กลุ่มแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ เช่น หินปูน (Limestone), หินอ่อน (Marble), ชอล์ก (Chalk) และแร่แคลไซต์ (Calcite) กรรมวิธีการผลิตมีหลายขั้นตอน อาทิ การลดขนาดแร่ (Size Reduction) และการคัดขนาด (Classification) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ตามที่ตลาดต้องการ [1]

บริษัทเอกชนแห่งหนึ่งในตำบลโคกตูม อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ได้มีการขุดนำแร่แคลไซต์ (Calcite) ขึ้นมาเพื่อผลิตผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยผ่านกระบวนการแต่งแร่ (Crushing Plats) ขั้นตอนการผลิตจะทำให้มีกากแร่แคลไซต์ ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ๆ ขนาดเท่าและคล้ายเม็ดทรายหลงเหลืออยู่ประมาณ ร้อยละ 10-20 หรือ ประมาณ 36,000-72,000 ตัน/ปี [1] และในปัจจุบันเมื่อปริมาณกากแร่แคลไซต์มีสะสมทุกๆ ปี จึงทำให้ในพื้นที่ของบริษัทมีกากแร่แคลไซต์กองเก็บในปริมาณที่มาก เมื่อปีพุทธศักราช 2554 น้ำท่วมเขตพื้นที่ภาคกลางของประเทศไทยและในเขตพื้นที่จังหวัดลพบุรีเองก็มีน้ำท่วมขัง ทางบริษัทได้บริจาคกากแร่แคลไซต์ให้กับทางหน่วยงานราชการและประชาชนทั่วไปเพื่อบรรจุเป็นถุงทรายใช้กั้นน้ำที่ท่วม

ปัจจุบันกองกากแร่แคลไซต์ของทางบริษัท ยังคงมีอยู่ในปริมาณที่มาก และถูกกองเก็บในลักษณะเหมือนกองทรายที่รอดำเนินการ ปราศจากสิ่งปกคลุม ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะทำการศึกษาโครงงานวิจัยเบื้องต้น โดยการนำเอากากแร่แคลไซต์ มาใช้ผสมแทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของมอร์ต้าร์

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษาผลของการใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่มวลรวมละเอียดในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ต่อการรับกำลังอัด การหดตัวแห้งและการขยายตัวต้านทานต่อซัลเฟตของมอร์ต้าร์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษาโครงการวิจัยได้กำหนดขอบเขตของงานวิจัย ประกอบด้วยดังนี้

1.3.1 ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ตราช้าง)และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตประเภทที่ 5 (ทนซัลเฟต)

1.3.2 ทราย ใช้ทรายแม่น้ำจากจังหวัดนครราชสีมา โดยเลือกใช้ทรายคัดขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 33 และทรายที่มีขนาดคละตามธรรมชาติ

1.3.3 น้ำ ใช้น้ำประปา

1.3.4 แคลไซต์ที่ใช้นำมาจากบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งในจังหวัดลพบุรี นำมาร่อนผ่านตระแกรงเบอร์ 8 และใช้แทนทรายร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด

1.3.5 ใช้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อวัสดุมวลรวม 1:2.75 โดยน้ำหนัก ทุกอัตราส่วนผสมการใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายของมอร์ต้าร์

1.3.6 ทำการผสมมอร์ต้าร์โดยควบคุมอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ให้เป็นอัตราส่วนเดียวกัน ทุกอัตราส่วนผสม

1.3.7 ทำการหล่อก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50×50×50 มม. สำหรับทดสอบการรับกำลังอัด ที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 60 วัน โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109/C 109M-02 [2] และใช้สำหรับทดสอบการต้านทานต่อซัลเฟตด้านการสูญเสียน้ำหนัก

1.3.8 หล่อก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25×25×285 มม. สำหรับทดสอบการหดตัวแห้งโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1038/C1038M-10 [3] และสำหรับทดสอบการขยายตัวต้านทานต่อซัลเฟตโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1012 [4]

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงวิธีการในการทดสอบ

1.4.2 จัดหาวัสดุ อุปกรณ์ และวางแผนดำเนินการทดสอบ

1.4.3 ดำเนินการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ผสม และทดลองหาสัดส่วนผสมของมอร์ต้าร์

1.4.4 ทำการหล่อก้อนตัวอย่างทดสอบ และดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

1.4.6 สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงคุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด การหดตัวแห้งและการขยายตัวทนซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย

1.5.2 สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต และนำมาประยุกต์ในการดำเนินงานวิจัยต่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพื่อให้ทราบข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาเปรียบเทียบการใช้กากแร่แคลไซต์ผสมแทนทรายในอัตราส่วนร้อยละที่ต่างกันในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ จึงได้ทำการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติของแร่แคลไซต์ คุณสมบัติของมวลรวมละเอียด เพื่อหาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ มาใช้เป็นมวลรวมในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาข้อมูลดังนี้

2.1 แร่

แร่ เป็นสารประกอบอนินทรีย์หรือธาตุที่เกิดโดยธรรมชาติ นอกจากนี้ยังรวมไปถึงสารประกอบอินทรีย์บางชนิด เช่น ถ่านหินและน้ำมันอีกด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าแร่มีส่วนประกอบทางเคมีซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรเคมีแทนได้ แร่มีคุณสมบัติทางเคมี ทางฟิสิกส์ และทางแสงเฉพาะตัว ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงก็ไม่มากนัก การศึกษาเกี่ยวกับเรื่องแร่ให้ละเอียดนั้นเป็นไปได้ยากพอสมควร เนื่องจากแร่ที่ค้นพบในปัจจุบันนี้มีจำนวนนับร้อยชนิดและยังมีอีกจำนวนไม่น้อยที่ยังค้นหาไม่พบ การที่จะรู้จักให้กว้างขวางนั้นจะต้องพยายามศึกษาถึงความหมายที่แท้จริงของแร่ให้เข้าใจเสียก่อนว่า แร่แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันอย่างไร มีลักษณะอะไรที่สังเกตได้บ้าง ฯลฯ

เนื่องจากแร่มีเป็นจำนวนมาก เพื่อให้จดจำและเข้าใจได้ง่ายพอสมควร จึงจำเป็นต้องแบ่งแยกแร่ออกเป็นกลุ่มโดยอาศัยส่วนประกอบทางเคมีเป็นหลัก ซึ่งแบ่งได้ดังนี้

1) กลุ่มธาตุธรรมชาติ (Native Elements) เป็นแร่ที่เกิดขึ้นโดยมีธาตุเพียงธาตุเดียวในธรรมชาติ เช่น ทองคำธรรมชาติ, กำมะถัน, เพชร เป็นต้น

2) กลุ่มซัลไฟด์ (Sulphides) เป็นแร่ที่เกิดเป็นสารประกอบ คือ ประกอบด้วยโลหะกับธาตุ กำมะถัน ส่วนมากเป็นแร่โลหะ ได้แก่ กาลีนา (PbS) เป็นต้น

3) กลุ่มซัลโฟซอลต์ (Sulphosalt) เป็นแร่ที่ประกอบด้วยตะกั่วหรือทองแดง หรือเงินกับกำมะถันและมีพลวงหรืออาร์เซนิกหรือบิทมัสประกอบอยู่ด้วย

4) กลุ่มออกไซด์และไฮดรอกไซด์ (Oxides and Hydroxides) แร่จำพวกออกไซด์เป็นแร่ ที่ประกอบด้วยธาตุโลหะกับออกซิเจน เช่น เฮมาไตท์ (Fe_2O_3) ส่วนพวกไฮดรอกไซด์นั้นเป็นแร่ออกไซด์ที่มีน้ำปนอยู่ด้วย ซึ่งได้แก่ ลิมอไนต์

5) กลุ่มเฮไลด์ (Halides) เป็นแร่ที่ประกอบด้วย คลอไรด์, ฟลูออไรด์,โบร์ไมด์ ไอโอไดด์ เช่น ฟลูออไรท์ (CaF_2)

6) กลุ่มคาร์บอเนต (Carbonates) เป็นแร่ที่มีคาร์บอเนต(CO_3) ประกอบอยู่ด้วย เช่น แคลไซต์ ($CaCO_3$)

7) กลุ่มซัลเฟต (Sulphates) เป็นแร่ที่ประกอบด้วยซัลเฟต (SO_4) เช่น แบไรต์ ($BaSO_4$)

8) กลุ่มทังสเตต (Tungstates) และ โมลิบเดต (Molybdates) แร่บางชนิดที่ประกอบด้วยกลุ่มทังสเตต (WO_4) เช่น ชีไลต์ ($CaWO_4$) วุลฟีไนต์ ($PbMoO_4$)

9) กลุ่มฟอสเฟต (Phosphates) เป็นแร่ที่มีพวกฟอสเฟต (PO_4) ประกอบอยู่ เช่น อะพาไทต์ ($Ca_5(F,Cl)Po_4)_3$ โมนาไซด์ ($Ce,La,Y,Th)PO_4$

10) กลุ่มซิลิเกต (Silicates) เป็นกลุ่มแร่ที่เกิดมากที่สุด ส่วนประกอบสำคัญ คือ กลุ่มซิลิเกต (SLO_4) หรือซิลิกอนกับออกซิเจน แร่ในกลุ่มนี้ประกอบด้วยธาตุมากมายหลายชนิดต่าง ๆ กัน ที่พบอยู่เสมอได้แก่ โซเดียม, โปตัสเซียม, แคลเซียม, แมกนีเซียม, อลูมิเนียม และเหล็ก [5]

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) [6]

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate) มีสูตรเคมี $CaC0_3$ ส่วนประกอบทางเคมีประกอบด้วย CaO ร้อยละ 56 และ CO_2 ร้อยละ 44 มีความแข็ง 3 ความถ่วงจำเพาะ 2.71 สลายตัวเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 825 องศา ลักษณะทางกายภาพแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นผงสีขาวไม่ละลายน้ำ แต่ละลายน้ำได้เมื่อมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) น้ำที่มี $CaCO_3$ ละลายอยู่เรียกว่าน้ำกระด้างและจะตกตะกอนเมื่อเสีย CO_2 ออกไปเป็นต้น แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารประกอบที่มีลักษณะต่างกันหลายอย่าง แต่ละลักษณะจะมีชื่อเรียก โดยเฉพาะชื่อของแร่ที่ประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนตเรียกว่า แร่แคลไซต์ (Calcite) หรือแคลสปาร์ (Calspar) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ธรรมดาที่สุดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ผลึกของแคลไซต์ มีหลายชนิดทำให้มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น ด๊อกทูธสปาร์ ไอซแลนด์สปาร์ เนลเฮดสปาร์ และซาตินสปาร์ เป็นต้น

แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัตถุดิบขั้นกลางที่ผลิตจากหินปูนในอุตสาหกรรมกลางน้ำ และนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำเร็จรูปในอุตสาหกรรมปลายน้ำ ด้วยคุณสมบัติเฉพาะของแคลเซียมคาร์บอร์

บอเนตที่ไม่เป็นพิษ มีความขาวและความสว่างสูง จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่นใช้เป็นตัวเติมเต็ม (Filler) และตัวเพิ่มปริมาณ (Extender) ในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี และอุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นส่วนผสมในยาสีฟัน ผงซักฟิก ยา และเวชภัณฑ์ต่างๆ นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ สายหุ้มโทรศัพท์ ฉนวนหุ้มสายไฟ ปากกา ยางลบ และแว่นตาเป็นต้น [6]

2.3 แคลไซต์ (Calcite)[7]

แร่แคลไซต์หรือแคลสปาร์เป็นรูปแบบที่ธรรมดาที่สุดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นใน ธรรมชาติ ผลึกของแคลไซต์มีหลายชนิดทำให้มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น ด๊อกทูธสปาร์ (Dogtooth spar) ไอซแลนด์สปาร์ (Iceland spar) เนลเฮดสปาร์ (Nailhead spar) และซาตินสปาร์ (Satin spar) แคลไซต์เป็น ส่วนประกอบที่สำคัญของหินปูน หินอ่อน และชอล์ค

สูตรเคมี	$CaCO_3$		
ส่วนประกอบทางเคมี	CaO	56.0	เปอร์เซ็นต์
	CO_2	44.0	เปอร์เซ็นต์
คุณสมบัติทางกายภาพ	ความแข็ง	3	
	ความถ่วงจำเพาะ	2.72	

2.3.1. คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐาน ASTM

(American Society for Testing Materials : ASTM D 1199 (06.02)-91)

1) คุณลักษณะของแคลไซต์ซึ่งใช้ทำสีที่มีปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตสูง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิด PC และชนิด GC

ชนิด PC : คือตะกอนแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเตรียมโดยทำสารละลายให้ตกตะกอนอย่างสมบูรณ์ หรือโดยวิธีคาร์บอเนชั่นของปูนไลม์ (Lime)

ชนิด GC : คือผลิตภัณฑ์ของแร่บด

ตารางที่ 2.1 คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐาน ASTM

คุณลักษณะ	ชนิด PC	ชนิด GC
	ร้อยละ	ร้อยละ
แคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อไม่มีความชื้น ($CaCO_3$,moisture-free) ต่ำสุด	96.5*	-
ความชื้นและสารระเหิด (Moisture and other volatile matter) สูงสุด	0.7	0.2
ผลของแคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนตเมื่อไม่มีความชื้น (Total $CaCO_3$, $MgCO_3$ moisture-free) ต่ำสุด	-	94.0
แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($MgCO_3$) สูงสุด	-	-

*ยกเว้นแคลเซียมคาร์บอเนตบางตัว

2) คุณลักษณะของแร่แคลไซต์ซึ่งใช้ทำสี กำหนดตามขนาดของเม็ดแร่ แบ่งออกเป็น 4 เกรด ได้แก่

เกรด 1 ใช้ทำสีมีขนาดเม็ดแร่ละเอียด (Fine paint grade) ขนาดของเม็ดแร่ 15-20 ไมครอน วัตถุหยาบค้างบนตะแกรงขนาด 325 เมช (45 ไมครอน) สูงสุด 0.05 เปอร์เซ็นต์ เส้นผ่าศูนย์กลางผิวหน้าของเม็ดแร่ (Specific Surface Diameter, SSD) สูงสุด 2.5 ไมครอน

เกรด 2 ใช้ทำสีมีขนาดเม็ดแร่หยาบ (Coarse Paint Grade) ขนาดของเม็ดแร่ 5-45 ไมครอน วัตถุหยาบค้างบนตะแกรงขนาด 325 เมช (45 ไมครอน) สูงสุด 0.5 เปอร์เซ็นต์ เส้นผ่าศูนย์กลางผิวหน้าของเม็ดแร่ (SSD) สูงสุด 6 ไมครอน

เกรด 3 ใช้เป็นวัตถุเหลวสำหรับอุดเนื้อไม้ก่อนลงสี (Filler Grade) ขนาดของเม็ดแร่ 10-45 ไมครอน วัตถุหยาบค้างบนตะแกรงขนาด 325 เมช (45 ไมครอน) สูงสุด 25 เปอร์เซ็นต์ เส้นผ่าศูนย์กลางผิวหน้าของเม็ดแร่ (SSD) สูงสุด 9 ไมครอน

เกรด 4 เกรดผงสำหรับยากันรั่ว (Putty Powder Grade) ขนาดของเม็ดแร่มีความละเอียดน้อย วัตถุหยาบค้างบนตะแกรงขนาด 200 เมช (75 ไมครอน) สูงสุด 30 เปอร์เซ็นต์ เส้นผ่าศูนย์กลางผิวหน้าของเม็ดแร่ (SSD) สูงสุด 12 ไมครอน

2.3.2 คุณลักษณะของแร่แคลไซต์ตามมาตรฐานของออสเตรเลีย

(Australian Standard. AS : K 23-1927)

ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานของออสเตรเลีย

แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ต่ำสุด	ร้อยละ 97
สารที่ไม่ละลายน้ำ (Insoluble Matter) สูงสุด	ร้อยละ 1.0
สิ่งเจือปนอื่นๆ (Coarse Particles) สูงสุด	ร้อยละ 0.5
สารที่ระเหิดได้ (Volatile Matter)	ร้อยละ 0.5

จากตารางที่ 2.2 แสดงคุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานของออสเตรเลียซึ่งแสดงค่าของคุณสมบัติของแร่หลักและสารประกอบทั่วไป

2.3.3 คุณลักษณะของแร่แคลไซต์ตามมาตรฐานอินเดีย (Indian Standard : IS 918-1958)

1) แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับใช้ทำเครื่องสำอางและยาสีฟันชนิดเหลว
2) แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมยาง

ตารางที่ 2.3 คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานของอินเดีย

คุณลักษณะ	เครื่องสำอางและยาสีฟันเหลว	อุตสาหกรรมยาง
	ร้อยละ	ร้อยละ
แคลเซียมคาร์บอเนตเมื่อไม่มีความชื้น ($CaCO_3$ on dry basis) ต่ำสุด	96.0	-
แมกนีเซียมคาร์บอเนตเมื่อไม่มีความชื้น ($MgCO_3$ on dry basis) ต่ำสุด	3.0	-
อะลูมิเนียม+เหล็ก+ฟอสฟอรัส+สารที่ไม่ละลายในกรดเกลือ (Al+Fe+P+Matter insoluble in HCI) สูงสุด	0.6	-
เหล็ก (Fe) สูงสุด	0.1	-
อาร์เซนิกออกไซต์หรือสารหนูออกไซต์ (As_2O_3) สูงสุด	4 ppm	-
ตะกั่ว (Pb) สูงสุด	10 ppm	-
คลอรีน (Cl) สูงสุด	0.04	0.04
แคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงสุด	0.14	-
ความชื้น (Moisture) สูงสุด	1.0	-

คุณลักษณะ	เครื่องสำอางและยาสีฟันเหลว	อุตสาหกรรมยาง
	ร้อยละ	ร้อยละ
แคลเซียมคาร์บอเนต+แมกนีเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3 + MgCO_3$) ต่ำสุด	-	92.0
ออกไซด์รวม (Mixed oxide) สูงสุด	-	1.0
ทองแดง (Cu) สูงสุด	-	0.005
แมงกานีส (Mn) สูงสุด	-	0.02
สารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ซิลิกา (Insoluble matter as silica) สูงสุด	-	0.6
การสูญเสียน้ำหนักในการเผาไหม้ (Loss on ignition)	-	43-46
ความชื้นและสารที่ระเหิดได้ (Moisture and volatile matter) สูงสุด	-	1

2.3.4 คุณลักษณะของแคลไซต์ชนิด Micronised Natural Whiting ที่สั่งเข้ามาในประเทศเพื่อใช้ทำสี

แคลเซียมคาร์บอเนต $CaCO_3$ ประมาณ ร้อยละ 96

ขนาดของเม็ดแร่ (Particle size) เล็กกว่า 10 ไมครอน ร้อยละ95

การดูดซึมน้ำมัน (Oil absorption) 18 กรัมน้ำมัน/100กรัมสี

ความถ่วงจำเพาะ 2.63

2.3.5 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำ หรับอุตสาหกรรมยาง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.402-2532)

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ชนิดตกตะกอน เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีการตกตะกอน

2) ชนิดบด เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติคุณลักษณะที่ต้องการ

ตารางที่ 2.4 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมยาง ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.402-2532)

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			
	ชั้นคุณภาพ ก.1	ชั้นคุณภาพ ก.2	ชั้นคุณภาพ ข.1	ชั้นคุณภาพ ข.2
ความชื้น ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	0.4	0.4	0.4	0.4
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาร้อยละโดยน้ำหนัก	43.0-44.5	42.0-44.5	43.0-44.5	42.0-44.5
ปริมาณที่ค้างบนแร่ง ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน				
-แร่ง 125 ไมโครเมตร	0.005	0.005	0.1	0.1
-แร่ง 45 ไมโครเมตร	0.5	0.5	5.0	5.0
ความเป็นด่าง (คิดเป็น Na_2CO_3) ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	0.03	0.03	0.03	0.03
สารที่ไม่ละลายในกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละโดยน้ำหนักไม่เกิน	1.5	3.0	1.5	3.0
เหล็ก มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	250	1,000	250	1,000
ทองแดง มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	15	30	15	30
แมงกานีส มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	100	400	100	400
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละโดยน้ำหนักไม่น้อยกว่า	98	96	98	96

อักษร ก มีความละเอียดมากกว่าอักษร ข

เลข 1 มีความบริสุทธิ์มากกว่าเลข 2

2.3.6 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมสีและพลาสติก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.403-2532)

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) ชนิดตกตะกอน เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีการตกตะกอน

2) ชนิดบด เป็นแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการบดแคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ แคลเซียมคาร์บอเนตแต่ละชนิด แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

(1) แบบเคลือบผิว

(2) แบบไม่เคลือบผิว

โดยแต่ละแบบ แบ่งตามความบริสุทธิ์ออกเป็น 2 ชั้นคุณภาพ คือ

(1) ชั้นคุณภาพ 1

(2) ชั้นคุณภาพ 2

ตารางที่ 2.5 คุณลักษณะของแร่แคลเซียมคาร์บอเนตสำหรับอุตสาหกรรมสีและพลาสติก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย (มอก.403-2532)

คุณลักษณะ	เกณฑ์ที่กำหนด			
	ชนิดตะกอน		ชนิดบด	
	ชั้นคุณภาพ 1	ชั้นคุณภาพ 2	ชั้นคุณภาพ 3	ชั้นคุณภาพ 4
ความชื้น ร้อยละไม่เกิน	0.4	0.4	0.2	0.2
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผาร้อยละโดยน้ำหนัก	43.0-44.5	42.0-44.5	43.0-44.5	42.0-44.5
ปริมาณที่ค้างบนแร่ง 45 ไมโครเมตร ร้อยละไม่เกิน	0.1	0.1	0.01	0.01
ความเป็นด่าง (คิดเป็น Na_2CO_3) ร้อยละไม่เกิน	0.03	0.03	0.03	0.03
เหล็ก มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่เกิน	200	300	200	300
แคลเซียมคาร์บอเนตร้อยละน้ำหนักไม่น้อยกว่า	98	96	98	96
ความขาวสว่างเมื่อแห้ง(dry brightness) ร้อยละไม่น้อยกว่า	93	90	93	90
การดูดกลืนน้ำมัน กรัมน้ำมันต่อตัวอย่าง 100 กรัม ไม่เกิน				
-แบบเคลือบผิว	17	14	17	14
-แบบไม่เคลือบผิว	80	80	30	30

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 2.1 แร่แคลไซต์ [7]

จากรูปที่ 2.1 รูปผลึกของแร่แคลไซต์ พบเกิดเป็นรูปผลึกได้มากกว่า 300 แบบและเป็นผลึกที่ซับซ้อนมาก ทีพบบ่อยคือรูปผลึกที่เป็นสี่เหลี่ยมขนนมเปียกปูน หรือมีลักษณะเป็นแท่งหัวแหลมๆยาวๆคล้ายฟันสุนัขเรียกว่าแร่ฟันหมาหรือ หินเขี้ยวหมา ความวาวคล้ายแก้ว หรือด้านคล้ายดิน โปร่งใสถึงโปร่งแสง ปกติมีสีขาวหรือไม่มีสี แต่หากมีมลทินปน ทำให้มีสีอื่นเช่น สีเทา แดง เขียว เหลือง น้ำเงิน น้ำตาล หรือสีดำ ผงละเอียดสีขาวหรือสีเทา

2.4 มอร์ต้าร์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2555)

มอร์ต้าร์ เป็นส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานกับมวลรวมละเอียดและน้ำ ตามอัตราส่วนที่กำหนด ซึ่งขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของงาน โดยให้ความข้นเหลวที่พอเหมาะ และอาจมีสารเคมีผสมเพิ่ม เพื่อให้มีคุณสมบัติตามต้องการ วัสดุที่ใช้ในการทำมอร์ต้าร์ มีดังนี้ [8]

2.4.1 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานที่ให้กำลังแก่คอนกรีต ที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามความเหมาะสมกับการที่นำไปใช้ นอกจากนี้ยังมีปูนซีเมนต์อื่นที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้เหมาะสมกับงานที่หลากหลาย โดยเฉพาะด้านความแข็งแรง ความทนทาน ความสวยงาม และการใช้งานเฉพาะด้าน คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่เป็นวัตถุดิบและกรรมวิธีการผลิต สารประกอบเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันในขั้นตอนการเผาเพื่อให้ได้ปูนซีเมนต์ การปรับส่วนประกอบของวัตถุดิบจะทำให้ได้ปูนซีเมนต์ที่มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไปดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	สัญลักษณ์	ร้อยละโดยน้ำหนัก
CaO	C	60-67
SiO_2	S	17-25
Al_2O_3	A	3-8
Fe_2O_3	F	0.5-0.6
MgO	M	0.1-4.0
Na_2O	N	0.1-1.8
K_2O	K	0.1-1.8
SO_3	S	0.5-3.0
สารประกอบอื่น ๆ	-	0.5-3.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)	LOI	0.1-30
กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble Residue)	-	0.20-0.75

(ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547).

ตารางที่ 2.6 แสดงถึง องค์ประกอบและสัญลักษณ์ของออกไซด์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งออกไซด์หลัก (Major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์ ทั้ง 4 นี้ รวมกันได้ร้อยละกว่า 90 ของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor oxides) ซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) ออกไซด์ของอัลคาไล (Na_2O และ K_2O) และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) และมีส่วนประกอบของออกไซด์อื่นผสมอยู่บ้าง เช่น ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) นอกจากนี้ยังมีสิ่งแปลกปลอมและส่วนประกอบอื่น ซึ่งจะจัดรวมอยู่ในรูปของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบ สารประกอบที่สำคัญมีอยู่ 4 อย่างคือ

1) ไตรแคลเซียมซิลิเกต (Tricalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO.SiO_2$ และย่อว่า C_3S

2) ไดแคลเซียมซิลิเกต (Dicalcium silicate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $2CaO.SiO_2$ และ ย่อว่า C_2S

3)ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (Tricalcium aluminate) องค์ประกอบทางเคมีคือ $3CaO.Al_2O_3$ และย่อว่า C_3A

4) เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (Tetracalcium aluminoferrite) องค์ประกอบทางเคมี คือ $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ และย่อว่า C_4AF

ตารางที่ 2.7 คุณสมบัติของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติ	สารประกอบ			
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
อัตราการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน	เร็ว (ชม.)	ช้า (วัน)	ทันทีทันได	เร็วกว่า (นาที)
การพัฒนากำลัง	เร็ว (วัน)	ช้า (สัปดาห์)	เร็วมาก (1วัน)	เร็วมาก (1วัน)
กำลังประลัย	สูง	สูง	ต่ำ	ต่ำ
ความร้อนเนื่องจาก ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	ปานกลาง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง

(ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

การศึกษาอิทธิพลของสารประกอบทำให้สามารถปรับคุณสมบัติของปูนซีเมนต์เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆ มาตรฐานการทดสอบตาม ASTM C150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภทตามองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.8

ประเภทที่ 1 หรือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต ประมาณได้ว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ที่ผลิตในสหรัฐอเมริกาเป็นปูนซีเมนต์ประเภทนี้ สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา และใช้ในการก่อสร้างปกติทั่วไป เช่น เสา คาน ฐานราก ของอาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์นี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนัก และให้ความร้อนปานกลาง ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ตราช้าง ตราเพชร ตราพญานาคสีเขียว ตราทีพีไอสีแดง ตราภูเขา ตราดาวเทียม และตราเอกซีเมนต์สีน้ำเงิน เป็นต้น

ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้เป็นปูนซีเมนต์ดัดแปลง (Modified Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนไม่สูงมากนัก ความร้อนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (ประเภทที่ 4) และให้กำลังใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภภที่ 1 เหมาะสำหรับการใช้ทำคอนกรีต หรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

ใดที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลานซัลเฟตได้ปานกลาง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีใช้ค่อนข้างน้อยในประเภทไทย ที่มีอยู่ได้แก่ ปูนพญานาคเจ็ดเศียร

ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid hardening Portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังสูงในช่วงแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมีปริมาณ C_3S สูง และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น งานซ่อมแซม หรืองานที่ต้องการถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็มคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีต ผลิตภัณฑ์คอนกรีตสำเร็จรูป (Precast Concrete) ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ตราเอราวัณ ตราสามเพชร ตราพญานาคสีแดง ตราทีพีไอสีดำ และเอกซีเมนต์สีแดง เป็นต้น

ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low heat Portland cement) ปูนซีเมนต์นี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ต่ำมากเพราะมีปริมาณของ C_3S ต่ำ คือ โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณร้อยละ 25 ถึง 30 แต่จะมี C_2S ที่ค่อนข้างสูงคือโดยเฉลี่ยประมาณ 50 ถึง 60 ปูนซีเมนต์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับใช้งานในการก่อสร้างคอนกรีตหลา เช่น เขื่อนคอนกรีตหรือตอม่อขนาดใหญ่ เนื่องจากคุณสมบัติให้อุณหภูมิคอนกรีตต่ำ ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ไม่มีจำหน่ายในท้องตลาดในประเทศไทยต้องสั่งโดยตรงจากผู้ผลิต

ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate resisting portland cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง ปูนซีเมนต์ประเภทนี้มีปริมาณ C_3A ต่ำมากโดยทั่วไปไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ C_3A จะทำให้เกิดการรวมตัวกับซัลเฟตได้ง่าย ดังนั้นเมื่อ C_3A มีปริมาณน้อยจึงมีการทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตลดลง ปูนซีเมนต์นี้จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่สร้างอยู่ในที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ได้แก่ ตราช้างสีฟ้า ตราปลาฉลาม และตราทีพีไอสีฟ้า เป็นต้น

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
C_3S	49	46	56	25	30
C_2S	25	29	15	50	46
C_3A	12	6	12	5	5
C_4AF	8	12	8	12	13
ความละเอียดของเบลน ($ซม^2$/กรัม)	3000	3000	4500	3000	3000

ตารางที่ 2.8 องค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติอื่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 5 (ต่อ)

ส่วนประกอบ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท				
	1	2	3	4	5
กำลังอัดที่อายุ 3 วัน (กก/ซม^2)*	180	150	310	80	120
ความร้อนปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ 28 วัน (จูล/กรัม)	400	330	430	270	310

หมายเหตุ : * กำลังอัดวัดจากลูกบาศก์มอร์ต้าร์ขนาด 50 มม.

2.4.2 วัสดุผสมละเอียด

มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ได้แก่ทรายที่มีขนาดเล็กกว่า 4.5 มิลลิเมตร หรือสามารถผ่านตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 4 แต่ต้องไม่เล็กกว่า 0.07 มิลลิเมตร หรือผ่านตระแกรงมาตรฐานเบอร์ 200 ทรายที่ใช้ในการผลิตคอนกรีต สามารถแบ่งตามแหล่งที่มาได้ 2 ชนิด คือ ทรายแม่น้ำและทรายบก ทรายแม่น้ำ เป็นทรายเกิดจากการกัดเซาะของกระแสน้ำแล้วค่อยๆ ตกตะกอนสะสมกลายเป็นแหล่งทรายอยู่ใต้ท้องน้ำ โดยทรายที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมาก จะตกตะกอนอยู่บริเวณต้นน้ำ ส่วนทรายละเอียดนั้นจะถูกกระแสน้ำพัดพามารวมกันบริเวณท้ายน้ำ ทรายบกเป็นทรายที่เกิดจากการตกตะกอนที่ทับถมของลำน้ำเก่าที่แปรสภาพเป็นพื้นดินโดยมีซากพืชซากสัตว์ทับถมกันบริเวณผิวหน้า ซึ่งเราเรียกกันว่าหน้าดิน มีความหนาประมาณ 2 ถึง 10 เมตร

ทรายมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์จะใช้ทรายมาตรฐานคละขนาด (Graded Standard Sand) ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน มอก.15 เล่ม 12 และ ASTM C778 ทรายมาตรฐานเป็นทรายซิลิกาตามธรรมชาติมาจากออตตาวา (Ottawa) มลรัฐอิลลินอยล์ (Illinois) หรือเทียบได้กับทรายดังกล่าว เม็ดทรายออตตาวามีลักษณะกลม ไม่มีเหลี่ยม ใสคล้ายกับน้ำตาลทรายขาว แต่ทรายออตตาวามีราคาแพงเนื่องจากต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ ดังนั้นในการทดสอบกำลังรับแรงและความคงทนทั่วไปของมอร์ต้าร์หรือแม้กระทั่งงานวิจัยในประเทศไทยจึงนิยมใช้ทรายแม่น้ำที่ล้างให้สะอาดที่มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 โมดูลัสความละเอียดในช่วง 2.5 ถึง 2.8 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ประมาณ 0.5 ที่ค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5 แทน [8]

2.4.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์

คอนกรีตนับตั้งแต่เริ่มผสมเสร็จใหม่ๆ ซึ่งอยู่ในสภาพเหลวจนกระทั่งสิ้นสุดอายุการใช้งานจะมีการใช้น้ำในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นและมีการเคลื่อนที่เข้าหรือออกของน้ำได้ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางปริมาตรของคอนกรีต การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของคอนกรีตสามารถจำแนกได้ดังนี้

1) การขยายตัว คอนกรีตหรือซีเมนต์เพสต์เมื่อบ่มในน้ำจะเกิดการขยายตัวหรือการบวม (Swelling) และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่ดูดเข้าไปในซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดแรงต้านแรงยึดเกาะกันและทำให้เกิดแรงตึงผิวของอนุภาคซีเมนต์เจลลดลง จึงทำให้คอนกรีตขยายตัว ซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการขยายตัวและมีการขยายตัวสูงประมาณ $2{,}000 \times 10^{-6}$ ม. ส่วนคอนกรีตมีการขยายตัวต่ำมากคือประมาณ 200×10^{-6} ม. เพราะคอนกรีตมีมวลรวมซึ่งไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงปริมาตรผสมอยู่ในปริมาณสูงประมาณร้อยละ 70 ของปริมาตรทั้งหมด การขยายตัวของคอนกรีตจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อคอนกรีตแช่อยู่ในน้ำทะเลซึ่งมีความดันสูงด้วย ที่ความลึก 100 เมตรน้ำทะเลจะมีความดัน 10.0 เมกะปาสกาล คอนกรีตที่แช่อยู่ในความลึกระดับนี้ 3 ปี มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นกว่า 8 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่อยู่ในบรรยากาศธรรมดา การขยายตัวที่เพิ่มขึ้นอย่างมากของคอนกรีตที่แช่อยู่ในน้ำทะเลเนื่องมาจากการแทรกซึมเข้าของน้ำทะเลภายใต้ความดัน และรวมถึงการแทรกซึมของคลอไรด์เข้าสู่เนื้อคอนกรีตปริมาณมากขึ้น

2) การหดตัวพลาสติก (Plastic Shrinkage) คือการหดตัวจากการสูญเสียน้ำในขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวหรือยังอยู่ในสภาพพลาสติก การทำปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้ปริมาตรของคอนกรีตลดลงและเกิดการหดตัว เนื่องจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายหลังการก่อตัวดังนั้นการหดตัวในช่วงนี้จึงเกิดขึ้นค่อนข้างสูง แต่ภายหลังจากการที่ซีเมนต์เพสต์เริ่มแข็งตัวแล้วการหดตัวจะเกิดขึ้นได้ยากเพราะซีเมนต์เพสต์เริ่มมีกำลังสูง นอกจากนี้คอนกรีตยังสูญเสียน้ำโดยการระเหยที่ผิวหน้าและการดูดน้ำออกจากคอนกรีตจึงทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ และการหดตัวของคอนกรีตจะมากขึ้นเมื่อมีปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสมสูงขึ้น

ในกรณีที่น้ำซึ่งระเหยออกจากคอนกรีตมีปริมาณมากกว่าน้ำที่เยิ้มขึ้นสู่ผิวหน้าของคอนกรีต การแตกร้าวแบบพลาสติกที่ผิวของคอนกรีตจะเกิดขึ้นได้บ่อยในการเทพื้นคอนกรีตที่อยู่บริเวณกลางแจ้ง มีแสงแดดจัด และไม่มีการป้องกันการระเหยของน้ำอย่างเพียงพอ ดังนั้นการป้องกันรอยแตกร้าวชนิดนี้จึงทำโดยป้องกันการระเหยของน้ำออกจากคอนกรีตที่เทเสร็จใหม่ๆโดยลดอัตราการระเหยของน้ำออกจากผิวหน้าคอนกรีตไม่ให้เกินกว่า 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร-ต่อชั่วโมง ซึ่งต่ำกว่าอัตราการเยิ้มของน้ำขึ้นสู่ผิวหน้าของคอนกรีต แต่ถ้าอัตราการระเหยของน้ำสูงกว่า 1.0 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง โอกาสเกิดรอยร้าวจากการหดตัวพลาสติกจะมีมากซึ่งต้องเพิ่มความระมัดระวังต่อคอนกรีตดังกล่าวในอากาศรอบๆและอาจทำให้เกิดการแตกร้าวแบบพลาสติกได้ถึงแม้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมาก ดังนั้นวิธีที่ดีที่สุดจึงต้องป้องกันคอนกรีตโดยใช้กำบังแดดและลม ทำการเท ตกแต่งผิวหน้าและบ่มคอนกรีตให้เร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้

3) การหดตัวด้วยตัวเอง (Autogenous Shrinkage) ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์จะยังคงมีต่อไปภายหลังจากการก่อตัว ในกรณีที่ไม่มีความชื้นหรือไม่มีน้ำเข้าออกอาจทำให้ซีเมนต์เพสต์เกิดการหดตัว การหดตัวในลักษณะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากมีการนำน้ำที่อยู่ในโพรงคาปิลารีมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและเรียกการหดตัวชนิดนี้ว่าการหดตัวด้วยตัวเอง (Autogenous Shrinkage) และในบางครั้งคอนกรีตอาจใช้น้ำจนแห้ง (Self Desiccation) การหดตัวด้วยตัวเองส่วนใหญ่เกิดขึ้นในแกนภายในของคอนกรีตขนาดใหญ่และในคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำโดยทฤษฎีคือต่ำกว่า 0.42 ขนาดของการหดตัวชนิดนี้มีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับการหดตัวอื่นๆ แม้ว่าการหดตัวด้วยตัวเองจะเกิดขึ้นทั้งสามทิศทาง แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมบอกเป็นค่าความยาวในรูปของหน่วยความเครียดเพื่อให้สามารถใช้พิจารณาร่วมกับการหดตัวแห้งได้ การหดตัวด้วยตัวเองของคอนกรีตมีค่าประมาณ $100x10^{-6}$ ม. การหดตัวด้วยตัวเองของคอนกรีต มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นและตามปริมาณความละเอียดของปูนซีเมนต์ที่มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณของไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) และ เตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไลท์ (C_4AF) สูงขึ้นมีแนวโน้มการหดตัวด้วยตัวเองที่สูงขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินในการแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการหดตัวนี้ได้ การดูดน้ำหรือความชื้นจากโพรงคาปิลารีจะมีค่าสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำ จึงทำให้เกิดการหดตัวด้วยตัวเองที่สูงขึ้นได้ กรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำมาก เช่น เท่ากับ 0.17 พบว่าการหดตัวด้วยตัวเองมีค่าสูงถึง $700x10^{-6}$ ม. การหดตัวด้วยตัวเองมีความสำคัญที่จำเป็นต้องพิจารณาในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำมากและในกรณีของงานคอนกรีตขนาดใหญ่

4) การหดตัวแห้ง (Drying Shrinkage) เป็นการเสียรูปของคอนกรีตอีกอย่างหนึ่ง เกิดจากการที่น้ำในคอนกรีตระเหยออกมา ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัว การหดตัวแห้งนี้เป็นการหดตัวที่สำคัญยิ่ง การออกแบบและการก่อสร้างถ้าไม่ได้เผื่อการหดตัวอย่างเพียงพอ จะทำให้เกิดรอยแตกร้าวและการบิดตัวของคอนกรีตขึ้นในอาคาร

5) กลไกลของการหดตัว การหดตัวแห้งของคอนกรีตขึ้นอยู่กับการหดตัวของซีเมนต์เพสต์ เพราะโดยทั่วไปมวลรวมมีการหดตัวต่ำมาก ความสัมพันธ์ระหว่างการหดตัวของซีเมนต์เพสต์กับความชื้นสัมพัทธ์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนด้วยกัน

(1) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำในโพรงคาปิลารีเป็นหลัก โดยในช่วงแรกน้ำในโพรงคาปิลารีขนาดใหญ่จะถูกขับมาก่อนตามด้วยน้ำในโพรงคาปิลารีที่มีขนาดเล็กลง การสูญเสียน้ำทำให้น้ำที่เหลืออยู่ในโพรงเกิดเป็นผิวโค้ง (Meniscus) และเกิดแรงตึงผิว (Surface Tension) ซึ่งมีขนาดสูงขึ้นเมื่อโพรงมีขนาด

เล็กลงนอกจากนี้การสูญเสียน้ำดูดซับที่อยู่ในซอก (Hindered Adsorbed Water) หรือที่อยู่ในโพรงขนาดเล็กมาก (Micro pore) มีส่วนทำให้เกิดการหดตัว ในการหดตัวพบว่าแผ่นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) จะเคลื่อนเข้าใกล้กันมากขึ้น แผ่น C-S-H บางแผ่นที่เคลื่อนเข้าใกล้กันมากพอก็จะยึดเกาะกันอย่างถาวรทำให้เกิดชั้น (Layer) ของแผ่น C-S-H ซึ่งการเคลื่อนตัวและการยึดเกาะกันดังกล่าวเป็นส่วนของการหดตัวอย่างถาวรซึ่งคืนกลับไม่ได้ (Irreversible Shrinkage)

(2) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 50 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดในอัตราที่ต่ำกว่าในช่วงความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 ที่ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 40 ถึง 50 น้ำในโพรงคาปิลารีถูกขจัดออกไปและแรงตึงผิวจะหมดไป การหดตัวในช่วงนี้เกิดจากการสูญเสียน้ำดูดซับ (Absorbed Water) ที่ผิวอนุภาคของเจลเป็นหลักซึ่งเริ่มมีความสำคัญเมื่อความหนาของชั้นน้ำลดลงเหลือเพียง 2 โมเลกุล ที่ความชื้นสัมพัทธ์เกินร้อยละ 50 การหดตัวจากการสูญเสียน้ำอาจยังคงมีอยู่แต่ไม่มากนัก เมื่อความชื้นลดลงจะเกิดการสูญเสียน้ำที่ดูดซับชั้นสุดท้ายและทำให้เกิดการหดตัวมากขึ้น การหดตัวในช่วงนี้เป็นการหดตัวแบบคืนกลับได้ (Reversible Shrinkage)

(3) การหดตัวในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่าร้อยละ 10 การหดตัวของซีเมนต์เพสต์ในช่วงนี้เกิดในอัตราที่สูง การตากแห้งที่สภาวะนี้ทำให้น้ำระหว่างแผ่นแคลเซียมซัลเฟอร์อลูมิเนตไฮ-เดรต (C - S - H) ถูกขจัดออกไป การสูญเสียน้ำในช่วงนี้ทำให้แผ่น C -S - H เคลื่อนที่เข้าหากัน การหดตัวจะเป็นแบบคืนกลับได้ แต่ถ้าการตากแห้งรุนแรงและนานพอแผ่น C -S - H ที่เคลื่อนที่เข้าใกล้กันจะสามารถยึดเกาะกันได้ ซึ่งทำให้เกิดการหดตัวแบบถาวร

6) องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีต องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อการหดตัวของคอนกรีตได้แก่มวลรวม ปริมาณของน้ำและปูนซีเมนต์ คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ รูปร่างและขนาดของคอนกรีต เป็นต้น การเสริมเหล็กในคอนกรีตสามารถลดการหดตัวเพราะเหล็กช่วยยึดไม่ให้คอนกรีตหดตัวแต่ทำให้เกิดแรงอัดในเหล็กและแรงดึงในคอนกรีตได้ คอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูงและความชื้นสัมพัทธ์ต่ำจะเกิดการหดตัวสูง

(1) มวลรวม (Aggregate) เนื่องจากซีเมนต์เพสต์เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว ดังนั้นการเพิ่มปริมาตรของมวลรวมจึงลดปริมาณซีเมนต์เพสต์และลดการหดตัวได้อย่างดี นอกจากนี้การหดตัวของคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม ได้แก่ กำลัง โมดูลัสยืดหยุ่น ความพรุน ลักษณะของผิว รูปร่าง ปริมาณ ขนาดและขนาดคละ มวลรวมที่แข็งแกร่งมีการดูดซึมน้ำน้อยและมีโมดูลัสยืดหยุ่นสูงทำให้คอนกรีตมีการหดตัวน้อย ส่วนกำลังของมวลรวมนั้นไม่เป็นปัจจัยที่สำคัญนักเพราะกำลังของมวลรวมจะสูงกว่าซีเมนต์เพสต์มาก การใช้หิน ทราย และมวล

รวมเบา ซึ่งไม่แข็งแกร่งจะทำให้คอนกรีตมีการหดตัวสูงกว่าการใช้หินควอร์ตในส่วนผสมคอนกรีต ขณะที่หินปูนและหินอ่อนจะให้การหดตัวต่ำ ส่วนหินบะซอลต์ กรวด และหินแกรนิตจะให้การหดตัวปานกลาง ขนาดคละและขนาดของวัสดุผสมจะมีผลทางอ้อมต่อการหดตัวของคอนกรีต คอนกรีตที่มีขนาดคละของวัสดุผสมที่ใช้กันทั่วจะมีการหดตัวใกล้เคียงกัน การใช้มวลรวมขนาดใหญ่ขึ้นทำให้ใช้ซีเมนต์เพสต์น้อยลงจึงทำให้การหดตัวน้อยลงด้วย ส่วนรูปร่างของวัสดุผสมจะมีผลเล็กน้อยต่อการหดตัว การใช้มวลรวมก้อนกลมสามารถลดปริมาณน้ำได้ซึ่งการลดปริมาณน้ำจะทำให้การหดตัวแห้งลดลงได้ การเพิ่มปริมาตรของหินโดยให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่ ทำให้การหดตัวลดลงแต่ทำให้ส่วนผสมมีค่าการยุบตัวต่ำลงด้วย

(2) ปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณน้ำและปูนซีเมนต์เป็นตัวกำหนดปริมาณและคุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์ ดังนั้นการหดตัวของคอนกรีตจึงขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำและปริมาณปูนซีเมนต์อย่างมาก ส่วนผสมที่มีปริมาณน้ำมากจะมีการหดตัวสูงและการหดตัวจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.9 เพราะการมีน้ำในส่วนผสมมากย่อมมีน้ำระเหยออกจากคอนกรีตมากขึ้น การหดตัวของไฮเดรตซีเมนต์มีค่าเป็นสัดส่วนตรงกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วงประมาณ 0.2 ถึง 0.6

ตารางที่ 2.9 ค่าการหดตัวทั่วไปของมอร์ต้าร์และคอนกรีต

อัตราส่วนมวลรวมต่อปูนซีเมนต์	การหดตัวที่อายุ 6 เดือนที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ			
	0.4	0.5	0.6	0.7
3	80	1200	-	-
4	550	850	1050	-
5	400	600	750	850
6	300	400	550	650
7	200	300	400	500

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

หมายเหตุ : แท่งทดสอบมีหน้าตัด 127 x 127 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50

(3) ความชื้นอาจแบ่งได้เป็นความชื้นขณะที่บ่มคอนกรีตและความชื้นของอากาศตอนตากแห้ง การบ่มมีผลต่อการหดตัวของคอนกรีตไม่มากนัก การบ่มที่ดีย่อมทำให้ปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำได้มากขึ้นและได้จำนวนของเจลเพิ่มขึ้น เม็ดปูนจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนเหลือเม็ดปูนที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาอยู่น้อย ซึ่งเม็ดปูนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะทำหน้าที่ต้านทานการหด

ตัว นอกจากนี้การบ่มที่ดีย่อมทำให้โพรงคาปิลารีน้อยลงและคอนกรีตมีความแข็งแรงขึ้น ดังนั้นการบ่มธรรมดาจึงมีผลต่อการหดตัวไม่มาก การใช้ความดันสูงในการบ่มสามารถลดการหดตัวได้มากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเจล ถ้าทิ้งคอนกรีตไว้ในน้ำจะมีการขยายตัวแต่ถ้าทิ้งไว้ในอากาศแห้งจะเกิดการหดตัว ความชื้นสัมพัทธ์ที่ทำให้คอนกรีตอยู่ในสภาพสมดุลมีค่าประมาณร้อยละ 94 สำหรับคอนกรีตที่ตากแห้งแล้วนำเอามาใส่ในน้ำสามารถขยายตัวกลับคืนมาบางส่วนแต่มีบางส่วนเป็นการหดตัวแบบถาวรและถ้าเอาไปตากแห้งอีกคอนกรีตจะหดตัวได้อีก

(4) ขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ อัตราการสูญเสียน้ำของคอนกรีตขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว พื้นที่ผิวที่มากทำให้การสูญเสียน้ำเกิดได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต กล่าวคือ คอนกรีตขนาดเล็กจะสูญเสียน้ำเร็วกว่าคอนกรีตขนาดใหญ่ คอนกรีตเมื่อสูญเสียน้ำจะเกิดการหดตัว การหดตัวเกิดที่ผิวของคอนกรีตและขยายเข้าไปส่วนในของคอนกรีตซึ่งใช้เวลานานมากเมื่อเป็นคอนกรีตขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงเป็นที่ยอมรับกันว่าการหดตัวจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของคอนกรีต โดยการหดตัวจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรของคอนกรีต

7) การประมาณค่าการหดตัว การหดตัวเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง การหดตัวแห้งเกิดขึ้นพร้อมกับการหดตัวเนื่องจากคาร์บอเนชั่นและการหดตัวด้วยตัวเอง ดังนั้นค่าการหดตัวจึงเป็นค่าการหดตัวรวมที่ไม่ได้เกิดจากการให้แรงกระทำต่อคอนกรีต ACI 209R ได้ให้ความสัมพันธ์ของการหดตัวของคอนกรีตและเวลาไว้คือ

$$S_t = \frac{t^{\sim}}{f + t^{\sim}} \cdot S_u \qquad (2.1)$$

เมื่อ S_t คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นจากการหดตัวที่อายุ t

S_u คือ ความเครียดสูงสุดที่เกิดจากการหดตัว (มีค่าระหว่าง 415 x 10^{-6} ถึง 1,070 x 10^{-6} โดยมีค่าเฉลี่ย 780 x 10^{-6})

t คือ ระยะเวลาหลังจากการบ่ม (วัน)

$\sim$ คือ ค่าคงที่ (ประมาณ 0.9 ถึง 1.1 โดยมีค่าเฉลี่ย 1.0)

f คือ ระยะเวลา (วัน) ที่การหดตัวเกิดขึ้นร้อยละ 50 ของการหดตัวสูงสุด (มีค่าระหว่าง 20 ถึง 130 วัน)

การหดตัวของคอนกรีตที่อายุ t ในกรณีบ่มชื้นคอนกรีต 7 วัน ให้ใช้

$$S_t = \frac{t}{35+t} \cdot S_u \quad (2.2)$$

การหดตัวของคอนกรีตที่อายุ t กรณีบ่มชื้นคอนกรีตด้วยไอน้ำเป็นเวลา 1 ถึง 3 วัน ให้ใช้

$$S_t = \frac{t}{55+t} \cdot S_u \quad (2.3)$$

ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลสำหรับมวลรวมและสภาพแวดล้อม ACI 209R ได้แนะนำให้ใช้ค่า

$$S_U = 780¥_{sh} \times 10^{-6} \quad \text{มม./มม.} \quad (2.4)$$

โดยที่ γ_{sh} เป็นแฟคเตอร์ปรับแก้ (correction factor) ขึ้นอยู่กับส่วนผสมของคอนกรีต ระยะเวลาของการบ่ม ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ขนาดและรูปร่างของคอนกรีต [8]

2.4.4 การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

ปัจจุบันการศึกษาความเสียหายเนื่องจากผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีตนับว่ามีความจำเป็นยิ่งขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเล เช่น ตอม่อ, ท่าเรือ, ประภาคาร, เขื่อน ฯลฯ เนื่องจากซัลเฟตมีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติทั้งในดินและในทะเล ซัลเฟต อาจเกิดขึ้นจากสารอินทรีย์ที่ผุเน่าซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อก๊าซนี้ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศจะกลายเป็นกรดกำมะถันหรือกรดซัลฟูริค (H_2SO_4) และแปรสภาพเป็นซัลเฟตในที่สุด อำนาจการทำลายของซัลเฟตต่อคอนกรีตขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซัลเฟตและความชื้น การทำลายของคอนกรีตไม่แสดงออกเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง แต่มีอำนาจรุนแรงเมื่อคอนกรีตเปียกชื้นและรุนแรงมากเมื่ออยู่ในสภาพที่เปียกและแห้งสลับกัน เช่น ในท่อระบายน้ำโสโครก ในอาคารส่งน้ำเพื่อการชลประทาน ฐานรากและพื้นอาคารในดินที่มีซัลเฟต

ความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตในทะเลเกิดขึ้นโดยการกัดกร่อนทางเคมีและการกัดเซาะทางกายภาพ เช่น การกระแทกของคลื่น และการที่คอนกรีตอยู่ในสภาพเปียกและแห้งสลับกัน สำหรับการกัดกร่อนทางเคมีพบว่าเกลือในรูปของสารละลายจะสามารถทำลายคอนกรีตได้ เพราะจะซึมเข้าทำปฏิกิริยากับซีเมนต์เพสต์ในคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์ได้ สารละลายซัลเฟตในน้ำทะเลที่กัดกร่อนคอนกรีตโดยตรงและรุนแรงคือ แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ส่วนเกลือแกง (NaCl) กับโปรตัสเซียมคลอไรด์ (KCl) ซึ่งพบมากในน้ำทะเลเช่นกัน จะทำให้คลอไรด์ซึมผ่านเข้าเนื้อคอนกรีตเป็นผลให้เหล็กเสริมในคอนกรีตเป็นสนิมได้ง่าย ในน้ำใต้ดินบริเวณที่มีแคลเซียมซัลเฟตหรือยิบซั่ม ($CaSO_4.2H_2O$) มักมีซัลเฟตปนอยู่เสมอ โดยทั่วไปดินมีซัลเฟตอยู่

เล็กน้อยคือประมาณร้อยละ 0.01 ถึง 0.05 ของน้ำหนักแต่จะเพิ่มสูงมากขึ้นเนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยธรรมชาติ [8]

1) กลไกการทำลายโดยโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Soduim Sulfate Attack)[9]

กลไกการทำลายวัสดุโดยโซเดียมซัลเฟต (Mechanisms of Soduim Sulfate Attack) [9] แสดงดังสมการที่ 2.6 ถึง 2.10 เริ่มต้นเมื่อโซเดียมซัลเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium Hydroxide, CH) ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ดังแสดงในสมการที่ 2.5 เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NH) มีความเป็นด่างสูงมาก (pH =13.5) จึงเป็นการรักษาสภาพทั้งแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และ Ettingite (C_6ASH_{32}) ไม่ทำให้ปฏิกิริยากลายเป็นผลผลิตอื่น โดยที่ยิบซั่ม ($C\underline{S}H_2$) จะทำปฏิกิริยากับผลผลิตไฮเดรชันบางตัว เช่น แคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C_4AH_{13}) โมโนซัลเฟต ($C_4A\underline{S}H_{12}$) และไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C_3A) ที่เหลือจากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้ได้ Secondary Ettringite โดยธรรมชาติแล้ว Ettringite จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าผลิตผลของปฏิกริยาไฮเดรชันชนิดอื่นมาก จึงทำให้เกิดการขยายตัว ดังนั้นการทำละลายของโซเดียมซัลเฟตจึงเป็นการขยายตัวและแตกร้าวของคอนกรีต

$$CH + N\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + NH \quad (2.5)$$

$$C_4AH_{13} + 3C\underline{S}H_2 + 14H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} + CH \quad (2.6)$$

$$C_4A\underline{S}H_{12} + 2C\underline{S}H_2 + 16H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.7)$$

$$C_3A + 3C\underline{S}H_2 + 26H \longrightarrow C_6A\underline{S}H_{32} \quad (2.8)$$

โดยที่ C = CaO, N = Na_2O, M = MgO, S = SiO_2 , S = SO_3 , และ H = H_2O

2) กลไกการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟต (Mechanisms of Magnesium Sulfate Attack) [9]

กลไกการทำลายของแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.9 ถึง 2.11 จะแตกต่างจากกรณีของโซเดียมซัลเฟต กล่าวคือแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (MH) หรือ Brucite มี

ความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยมาก และค่า pH ของสารละลาย MH ที่อิ่มตัวมีค่าประมาณ 10.5 ซึ่งมีความเป็นด่างที่ไม่สูง ดังนั้นจึงทำให้ทั้ง C-S-H และ Ettingite ไม่เสถียรภาพ นอกจากนี้ C-S-H จะถูกทำลายด้วยแมกนีเซียมซัลเฟตดังแสดงในสมการที่ 2.8 จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 ทั้ง $C\underline{S}H_2$ และ MH จะสะสมมากขึ้นโดย $C\underline{S}H_2$ จุถูกสะสมในช่องว่าง (Pores) ของคอนกรีต ส่วน MH จะทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล (S_2H) ดังแสดงในสมการที่ 2.9 ได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต (M-S-H) ซึ่งไม่มีความสามารถในการประสานเลยดังนั้นการทำลายโดยแมกนีเซียมซัลเฟตจึงเป็นการเปลี่ยน C-S-H เป็น M-S-H การทำลายดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของซีเมนต์ที่แข็งตัว และจะเกิดการสะสม $C\underline{S}H_2$ โดยไม่เกิดการขยายตัวมากดังกรณีการทำลายของโซเดียมซัลเฟต

$$CH + M\underline{S} + 2H \longrightarrow C\underline{S}H_2 + MH \quad (2.9)$$

$$C_xS_YH_Z + xM\underline{S} + (3x + 0.5y - z)H \longrightarrow xC\underline{S}H_2 + xMH + 0.5yS_2H \quad (2.10)$$

$$4MH + SH_{11} \longrightarrow M_4SH_{8.5} + (n - 4.5)H \quad (2.11)$$

3) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำลายของซัลเฟต [9]

(1) สิ่งแวดล้อมที่มีซัลเฟตตลอดจนความเข้มข้นของซัลเฟต

(2) ความทึบน้ำของคอนกรีต คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงจะทำให้ซัลเฟตเข้าไปได้ยาก ลดการทำลายขั้นรุนแรง

(3) ปริมาณ C_3A และ C_4AF ในปูนซีเมนต์ ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF น้อยมีแนวโน้มต้านทานการทำลายของซัลเฟตได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และ C_4AF สูง และปูนซีเมนต์ที่มีอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำก็มีความสามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น

(4) ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีต ถ้าลดปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตก็ช่วยลดความรุนแรงลงได้ด้วย วิธีการลด $Ca(OH)_2$ ในคอนกรีตอาจทำได้โดยใช้สารวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

(5) วิธีป้องกันการทำลายโดยซัลเฟต

ก) ใช้ปูนซีเมนต์ที่มี C_3A และอัตราส่วน C_2A และ C_3S ต่ำนั่นคือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

ข) การใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนซึ่งช่วยลดปริมาณบางส่วนของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH_2)$) รวมทั้งลด C_3A และยังช่วยเพิ่มความทึบน้ำให้คอนกรีตได้ด้วย

ค) ลดอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ให้ต่ำเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีความทึบน้ำสูงขึ้น

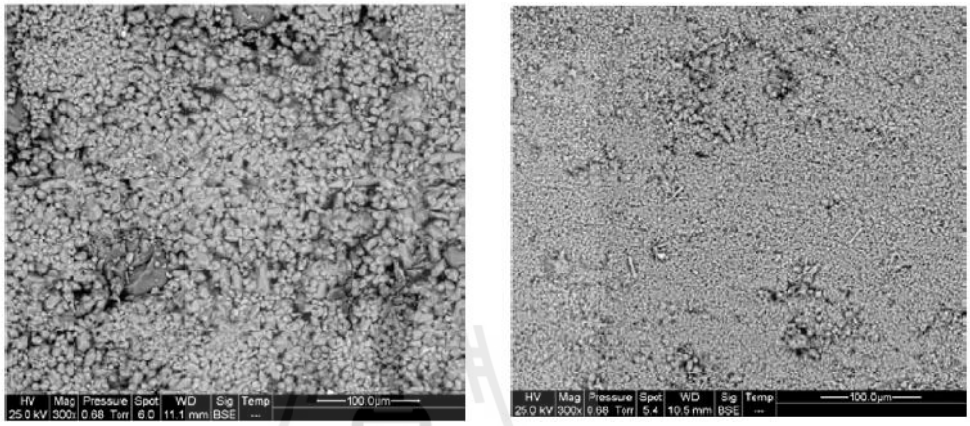
ง) ออกแบบให้คอนกรีตมีปริมาณซีเมนต์เพสต์ไม่มากเกินไป

ในการศึกษาเรื่องการทำลายโดยซัลเฟตสามารถทำได้โดยนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต แมกนีเซียมซัลเฟต หรือแคลเซียมซัลเฟต แต่เนื่องจากแคลเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการทำละลายได้น้อย ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้

2.5 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

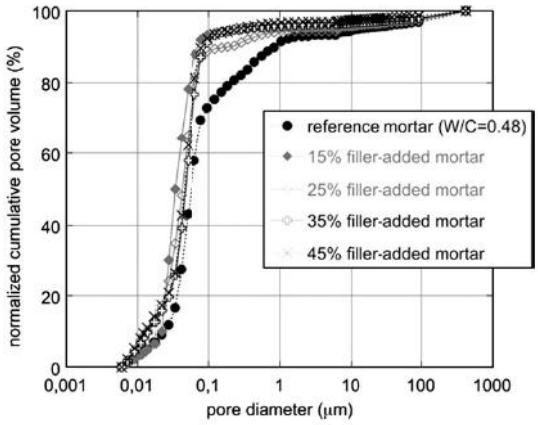
Y.Benachour และคณะ ,2008 ได้ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างจุลภาคด้านคุณสมบัติทางกล การหดตัวแห้ง และการซึมผ่านของมอร์ต้าร์โดยการเพิ่มผงแคลไซต์แทนที่ทรายในปริมาณที่สูง (ซึ่งในการศึกษาใช้คำว่า “วัสดุอัดแทรก”) วัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณสูงสุดของการเพิ่มเข้าเป็นวัสดุมวลรวม โดยไม่ให้เกิดการสูญเสียประสิทธิภาพของการทำงาน โดยวัดหาความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันของคุณสมบัติมอร์ต้าร์คือ ความหนาแน่น, ความพรุน, ความต่อเนื่องของช่องว่าง , การดูดซึมต่อเนื่อง, ผลกระทบของ Klinkenberg ศึกษาคุณสมบัติทางกลด้านความแข็งแกร่งคือกำลังอัดและกำลังดัดของมอร์ต้าร์ ทดสอบความทนทาน คือการซึมผ่านของก๊าซ, การหดตัวแห้ง และการสูญเสียน้ำหนัก การดำเนินการเริ่มใช้วัสดุอัดแทรกตั้งแต่ร้อยละ 15 ถึง 45 โดยน้ำหนักของทราย (หรือเพิ่มร้อยละ 45 ถึง 135 โดยน้ำหนักของซีเมนต์) ปฏิบัติการทดสอบและเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม ตามมาตรฐานของเจ บารอน [เจ บารอน เป็นมาตรฐานการเพิ่มเพื่องานคอนกรีต และเป็นข้อมูลในการกำหนดคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีต ซึ่งเป็นกระบวนการของสมาคมอุตสาหกรรมที่ใช้ปูนซีเมนต์ไฮดรอลิกผสม (ฝรั่งเศส) ,Eyrolles Ed . , ปารีส , 1996 , หน้า 47-57] ดำเนินการทดลองโดยควบคุมสัดส่วนของซีเมนต์และความสามารถเทได้ให้คงที่ ปรากฏว่ามอร์ต้าร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อมีวัสดุอัดแทรกจำนวนเพิ่มขึ้น ในการวิเคราะห์วิธี X-Ray Diffraction (XRD) เพื่อหาคุณสมบัติของวัสดุอัดแทรกเบื้องต้นเปรียบเทียบระหว่างแคลไซต์และโดโลไมต์ แสดงให้เห็นชัดเจนว่าแคลไซต์เป็นแร่ในกลุ่มแร่แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ผลการวิเคราะห์ในกระบวนการทดสอบดีที่สุดจากการใช้แคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรกในปริมาณสูง

โดยเฉพาะในการเพิ่มปริมาณที่สูง ความพรุนเพิ่มขึ้นแต่ขนาดของช่องว่างลดลง ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เมื่อเพิ่มแคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรกในปริมาณที่สูงทำให้โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่นที่ดี ค่าสัมประสิทธิ์ของ Klinkenberg ซึ่งหาจากการวัดค่าการซึมผ่านของแก๊สและผลของการดูดซึมน้ำต่อเนื่อง ยิ่งกว่านั้นการใช้แคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรกส่งผลให้การซึมผ่านภายในของแก๊ส การรับกำลังอัด และการรับกำลังดัด มีแนวโน้มในทางที่ดี ส่วนการหดตัวแห้งและการสูญเสียน้ำหนักไม่ส่งผลกระทบต่อมอร์ต้าร์ [10]



a) Sample with 15 % filler addition b) Sample with 45 % filler addition

รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายขยาย SEM ของโครงสร้างจุลภาคที่ใช้แคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรกที่ ร้อยละ 15 และ 45 [10]



รูปที่ 2.3 ขนาดของช่องว่างของมอร์ต้าร์ควบคุมกับมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรกที่ร้อยละ15, 25, 35 และ 45 [10]

สุชาติ ภาคภูมิเกียรติคุณ และคณะ,2550ได้ศึกษา คุณสมบัติต่างๆของมอร์ต้าร์ซีเมนต์เมื่อแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงฝุ่นหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยศึกษาถึงองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปคือ ความถ่วงจำเพาะ ระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ ปริมาณฟองอากาศ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดัด กำลังรับแรงดึง และการหดตัว โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่ได้จากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียวโดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 ในการดำเนินงานวิจัยได้กำหนดขอบเขตของส่วนผสมไว้ คือ อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อผงฝุ่นหินปูนเท่ากับ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 และ 75:25 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มน้ำเป็นเวลา 1, 3, 7, 28 และ 60 วัน ตามลำดับ และใช้สารผสมเพิ่มชนิดลดการใช้น้ำปริมาณมากประเภท F ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุผง โดยทำการหล่อตัวอย่างอัตราส่วนละ 3 ตัวอย่าง ผลจากการวิจัยพบว่าการนำผงฝุ่นหินปูนมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ จะส่งผลทำให้การหดตัวและร้อยละการไหลแผ่เพิ่มมากขึ้นตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณฟองอากาศและความสามารถในการก่อตัวจะลดลงเล็กน้อยตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้น ในส่วนคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงอัด, แรงดัด และแรงดึงจะลดลงตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้น ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ และพบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น กำลังรับแรงอัด, แรงดัด และแรงดึง ที่ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 5 และ 10 จะมีการพัฒนากำลังเข้าใกล้กำลังรับแรงของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว ส่วนที่ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 15, 20 และ 25 จะมีการพัฒนากำลังต่ำกว่ากำลังรับแรงของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อผงฝุ่นหินปูนที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก [11]

วชิรวิทย์ สำราญรมย์, 2553 ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ต้าร์ซึ่งใช้ผสมเถ้าแกลบดำและ/หรือผงหินปูน 2 ชนิด ที่มีอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 29.3, 3.8 และ 4.5 ไมโครเมตร โดยแบ่งการทดลองตามวัสดุที่ใช้ได้ 2 ชุดคือ 1.ใช้อัตราส่วนของเถ้าแกลบดำล้วนแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 20, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผง 2.ใช้อัตราส่วนของเถ้าแกลบดำผสมผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 0, 20, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ซึ่งอัตราส่วนผงหินปูนที่ใช้ผสมเถ้าแกลบดำมีอัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุผง โดยอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงกำหนดจากค่าปริมาณน้ำซึ่งทำให้เกิดค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5 ทดสอบคุณสมบัติทางกลได้แก่ การพัฒนากำลังของมอร์ต้าร์ ปริมาณอากาศ ปริมาณและการกระจายตัวของโพรง คุณสมบัติความทนทานได้แก่การหดตัวแบบแห้งและแบบออโตจีเนียส รวมถึงความทนทานต่อการกระทำของซัลเฟต จากการทดสอบพบว่าผงหินปูนสามารถช่วยลดความต้องการของน้ำ และ

ขนาดโพรงของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบดำได้เนื่องจากผงหินปูนสามารถแทรกเข้าไปช่องว่างของอนุภาคเถ้าแกลบดำได้ มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 15 ร่วมผงหินปูนร้อยละ 5 มีการพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วัน สูงที่สุดในขณะที่มอร์ต้าร์ที่อายุ 180 วัน มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 10 ร่วมผงหินปูนร้อยละ 10 มีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุด และใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปกติ ส่วนความทนทานต่อการหดตัวแบบแห้ง พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ ร้อยละ 5 และผงหินปูนร้อยละ 15 สามารถช่วยลดตัวแบบแห้งได้มากที่สุด โดยแนวโน้มการหดตัว มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูนมากขึ้น ส่วนกาหดตัวแบบออโตจีเนียส พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบดำล้วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ช่วยลดการหดตัวมากที่สุด โดยแนวโน้มการหดตัวเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ผงหินปูนแทนที่เถ้าแกลบดำมากขึ้น

สำหรับสารละลายซัลเฟตที่ใช้ คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C1012 ซึ่งการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 15 ร่วมผงหินปูนร้อยละ 5 มีอัตราการสูญเสียกำลังอัด และการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำล้วน [14]

กฤติยา แก้วมณี และคณะ,2550 ได้ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต โดยผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการศึกษามี 2 ขนาดได้แก่ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร และ 13 ไมโครเมตร (LP#2 และ LP#13) และทำการศึกษาทั้งการใช้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์และแทนที่บางส่วนของเถ้าลอย พบว่าผงแคลเซียมคาร์บอเนตทั้ง 2 ขนาด ที่ถูกนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์และเถ้าลอยบางส่วนนั้น ช่วยเร่งการก่อตัวของเพสต์ได้เป็นอย่างดี โดยยิ่งแทนที่ในอัตราส่วนที่มากและขนาดของผงแคลเซียมคาร์บอเนตเล็กลง เวลาในการก่อตัวของเพสต์ก็จะยิ่งลดลง การรับกำลังอัดด้วยการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ พบว่า การแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตทั้งสองขนาดนั้น ถ้าแทนที่ในปริมาณที่เหมาะสม (Optimum content) กำลังอัดของมอร์ต้าร์จะเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงระยะต้น แต่นั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วย เช่นปริมาณของวัสดุประสาน และขนาดอนุภาคของผงแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น ยิ่งขนาดอนุภาคของผงแคลเซียมคาร์บอเนตเล็กลง ก็จะทำให้เห็นผลในเรื่องกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นชัดเจนยิ่งขึ้น ในการทดสอบการรับกำลังอัดของคอนกรีต ทดสอบกับสัดส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานต่ำ (ไม่เกิน 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ทั้งในคอนกรีตที่

ใช้ซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย โดยคอนกรีตผสมเถ้าลอยนั้นจะมีปริมาณเถ้าลอยร้อยละ 30 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ทั้งนี้ปูนซีเมนต์บางส่วนจะถูกแทนที่ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต ในส่วนผสมที่เป็นคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยบางส่วนจะถูกแทนที่ด้วยผลแคลเซียมคาร์บอเนตใน อัตราส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ผลของกำลังอัดและการยุบตัวเห็นได้ชัดว่า การแทนที่ด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดหยาบไม่ส่งผลต่อกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งกำลังของของคอนกรีตเมื่อแทนทีซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยร้อยละ 30 ที่อายุ 7 วัน สามารถรับกำลังอัดได้ 294 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ 25 และ ผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด LP#13 ที่ร้อยละ 5 ที่อายุ 7 วัน สามารถรับกำลังอัดได้ 273 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ 20 และ ผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด LP#13 ที่ร้อยละ 10 ที่อายุ 7 วัน สามารถรับกำลังอัดได้ 194 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อใช้เถ้าลอยร้อยละ 10 และ ผงแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด LP#13 ที่ร้อยละ 20 ที่อายุ 7 วัน สามารถรับกำลังอัดได้ 184 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อใช้ปริมาณของวัสดุประสานต่ำกว่า 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร แต่ส่งผลต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตเมื่อมีปริมาณของผงแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้น

ความคงทนต้านทานต่อซัลเฟตโดยการทดสอบต้านทานสารละลายซัลเฟต (Sulfate Resistant) ทำการทดสอบโดยใช้แท่งมอร์ต้าร์ แบ่งส่วนผสมออกเป็น 2 กลุ่ม เช่นกัน แต่ทุกๆ สัดส่วนผสม ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ทุกๆ สัดส่วนผสมโดยแท่งตัวอย่างทดสอบใช้ขนาด 25x25x285 มิลลิเมตรแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) ผลจากการทดลองที่อายุ 277 วัน เห็นว่า การแทนที่ทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าลอยบางส่วนด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้ง 2 ขนาด นั้นจะส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานสารละลายซัลเฟตได้ดีขึ้น ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดหยาบ จะทำให้คุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตได้ดีกว่า ความต้านทานต่อคาร์บอเนชั่นการสึกกร่อนโดยขบวนการคาร์บอเนชั่นโดยทำการทดสอบความลึกที่ 28 และ 56 วัน ผลของการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความละเอียด ช่วยลดความรุนแรงที่เกิดคาร์บอเนชั่นในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย สำหรับการหดตัวแห้งเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นช่วยลดการหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวจะลดลงถ้าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่แทนที่นั้นหยาบขึ้นหรือแทนในอัตราส่วนที่ไม่มากนัก สำหรับการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นช่วยลดการหดตัวแบบแห้งเช่นเดียวกัน [13]

นพคุณ ผลโพธิ์, 2554 ได้ศึกษาผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานทนซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ในการทดลองการต้านทานทนซัลเฟตของมอร์ต้าร์ ใช้วิธีวัดค่าการขยายตัวและสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ ผสมเถ้าลอยและผงหินปูน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และสารละลายโซเดียมผสมสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

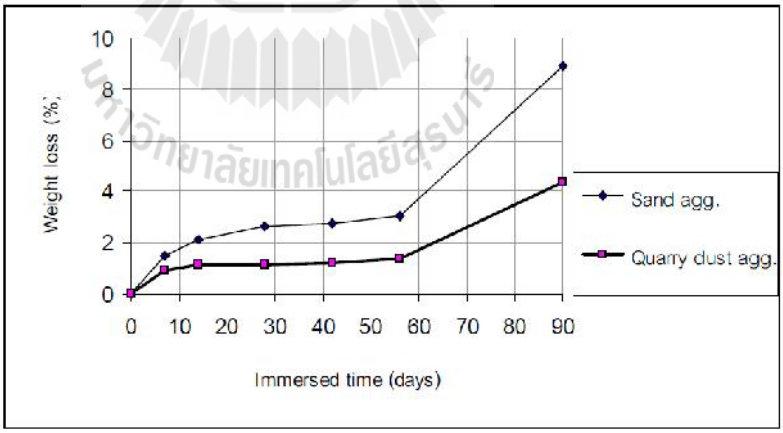
ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตจะให้ค่ามากที่สุดถัดมาเป็นโซเดียมซัลเฟตผสมแมกนีเซียมซัลเฟต ตามลำดับ และพบว่าทั้งการแทนที่และการบดผสมเถ้าลอยและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น ให้ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟตน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นกรณีของปูนซีเมนต์บดผสมผงหินปูนร้อยละ 10 และการแทนที่เถ้าลอย (ที่มีค่า CaO สูงๆ) ในปริมาณน้อยๆ ร่วมกับผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงหรือมากกว่าของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจะให้ค่า การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์มากกว่าในสารละลายโซเดียมซัลเฟต นอกจากนี้พบว่าการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตทั้งมอร์ต้าร์บดผสมและการแทนที่เถ้าลอยหรือผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีค่าน้อยหรือไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ส่วนการสูญเสียน้ำหนัก ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์เถ้าลอยไม่ว่าบดผสม หรือแทนที่ (เถ้าลอยปริมาณสูง) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ให้ค่ามากกว่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ล้วน ในขณะที่มอร์ต้าร์ผงหินปูนไม่ว่าบดผสมหรือแทนที่ หรือแทนที่ร่วมกับเถ้าลอย (เถ้าลอยปริมาณต่ำ) ให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ล้วน และสุดท้ายทราบสัดส่วนที่เหมาะสมของคอนกรีตที่สัมผัสสิ่งแวดล้อมซัลเฟต [9]

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และคณะ,2555 ได้ศึกษาสมบัติของมอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน 2 ชนิด โดยสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าแกลบบดและผงหินปูน สมบัติของมอร์ต้าร์ได้แก่ ความต้องการน้ำกำลังอัด การสูญเสียกำลังอัด และการหดตัวแบบแห้ง สารละลายที่ใช้ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยใช้เถ้าแกลบบดและผงหินปูน 2 ชนิดที่มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 29, 12 และ 128 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ควบคุมและวัดค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110±5

จากการทดสอบพบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้า

แกลบบดผสมผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น โดยกำลังอัด ของมอร์ต้าร์ที่อายุ 180 วัน ทุกชุดทดสอบต่ำกว่าชุดควบคุม มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 20 (C80R10LS110) มีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุดและใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปกติ ส่วนการทดสอบความทนทานต่อซัลเฟต พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนเพิ่มมากขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัด และการหดตัวแห้งมีค่าลดลง การสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าการสูญเสียกำลัง อัดมากกว่ามอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต [16]

ประชุม คำพุฒ, 2548 ได้ศึกษาการถูกกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียด ซึ่งงานวิจัยศึกษาการถูกกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นแทนทรายและมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริก โดยใช้หินฝุ่นแทนทรายร้อยละ 100 โดยน้ำหนักและอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ เท่ากับ 0.45 นำตัวอย่างมอร์ต้าร์บ่มในน้ำ 28 วัน แล้วแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบหาค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียดและมอร์ต้าร์ ปกติ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการแช่สารละลายกรดซัลฟูริกและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการแช่สารละลายกรดซัลฟูริกและการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ [17]

พบว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียดมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่าตัวอย่างมอร์ต้าร์ปกติ (ใช้ทรายเป็นมวลรวมละเอียด) แสดงว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นส่วนผสมแทนทรายจะถูกกัดกร่อนช้ากว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายเป็นส่วนผสม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากหินฝุ่นมีขนาด

เม็ดใหญ่กว่าทรายเล็กน้อยและมีเหลี่ยมคมมากกว่าทราย จึงทำให้ยึดเกาะตัวกับเพสต์ได้ดีกว่าทราย (ชัชวาลย์, 2540) เพราะว่าการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกจะทำปฏิกิริยากับเพสต์ แต่จะไม่ทำปฏิกิริยากับมวลรวมละเอียดทั้งหินฝุ่นและทราย ดังนั้นพฤติกรรมการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกที่กระทำกับมอร์ต้าร์จึงเป็นลักษณะการกัดเซาะรอบๆ ผิวของมวลรวมละเอียด การกัดเซาะในลักษณะดังกล่าวจึงทำให้ทรายที่มีขนาดเล็กกว่าเกิดการหลุดร่วงก่อนหินฝุ่น มีผลทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปกติมีค่ามากกว่าดังที่กล่าวมาแล้ว ในส่วนของระยะเวลาการแช่สารละลายกรดซัลฟูริกนั้นมีผลต่อการกัดกร่อน โดยที่ระยะเวลาการสัมผัส กับกรดซัลฟูริกยิ่งมากเท่าใด การกัดกร่อนก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งแสดงผลอย่างเด่นชัดที่อายุ 90 วัน (รูปที่ 2.5 ก. และ 2.5 ข.) ทั้งนี้อาจเป็นช่วงเวลาที่กรดซัลฟูริกสามารถกัดเพสต์บริเวณรอบมวลรวมละเอียดได้หมด จนหลุดร่วงออกไป และยังกัดต่อไปเรื่อยๆ ในขณะที่ช่วงแรกๆ ที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยก็เนื่องจากว่ากรดซัลฟูริกยังกัดเพสต์ได้ไม่รอบมวลรวมละเอียดนั่นเอง

ก) มอร์ต้าร์ที่ผสมหินฝุ่น ข) มอร์ต้าผสมทรายปกติ

รูปที่ 2.5 การถูกกัดกร่อนของมอร์ต้าร์ผสมทรายปกติและมอร์ต้าร์ผสมหินฝุ่นที่อายุ 90 วัน

สรุปผลการศึกษาการถูกกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียด โดยการเปรียบเทียบจากค่าการสูญเสียน้ำหนัก เมื่ออัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์: มวลรวมละเอียด เท่ากับ 1: 2.75 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.45 พบว่าเนื่องจากหินฝุ่นมีเหลี่ยมคมและมีขนาดโตกว่าทราย จึงส่งผลให้มอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียดจะถูกกัดกร่อนได้ช้ากว่ามอร์ต้าร์ปกติ แสดงว่าสามารถนำหินฝุ่นไปใช้ออกแบบเป็นส่วนผสมคอนกรีตในงานก่อสร้างบริเวณที่สัมผัสกับกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าคอนกรีตปกติที่ใช้ทรายผสม [15]

จากงานวิจัยดังกล่าว ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบต่อวัสดุที่ใช้เป็นมวลรวมของมอร์ต้าร์ทั้งในลักษณะการใช้แทนที่มวลรวมละเอียดและการแทรกเพิ่มเข้าเป็นวัสดุอัดแทรกเพื่อต้องการให้คุณสมบัติเของมอร์ต้าร์ ดีขึ้นทั้งคุณสมบัติทางกลด้านการรับกำลังอัดและคุณสมบัติทางกายภาพด้านความหนาแน่น ความพรุน ช่องว่าง Y.Benachour ได้ใช้ผงแคลไซต์ที่มีความละเอียดแทรกเข้าแทนที่ทราย ส่งผลให้ขนาดของช่องว่างลดลง โครงสร้างจุลภาคมีความหนาแน่น และการใช้แคลไซต์เป็นวัสดุอัดแทรกส่งผลให้การซึมผ่านภายในของแก๊สลดลง เมื่อใช้ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้มีแนวโน้มในการรับกำลังอัดดีขึ้น

สุชาติศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ถึงผลกระทบของการใช้ผงฝุ่นหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนตแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์พบว่าการนำผงฝุ่นหินปูนมาแทนที่ซีเมนต์ ส่งผลให้การหดตัวและร้อยละการไหลแผ่เพิ่มมากขึ้น คุณสมบัติด้านการรับแรงอัด, แรงดัด และแรงดึงลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของผงฝุ่นหินปูน แต่เมื่อใช้ปริมาณที่เหมาะสมที่ร้อยละ 5 และ 10 มีแนวโน้มในการพัฒนากำลังใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม

วชิรวิทย์ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลและความทนทานของมอร์ต้าร์ซึ่งใช้ผสมเถ้าแกลบดำและ/หรือผงหินปูน 2 ชนิด ที่มีอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 29.3, 3.8 และ 4.5 ไมโครเมตร พบว่าผงหินปูนสามารถช่วยลดความต้องการของน้ำ และขนาดโพรงของมอร์ต้าร์ลดลงเพราะผงหินปูนสามารถแทรกเข้าไปช่องว่างของอนุภาคเถ้าแกลบดำได้ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 15 ร่วมผงหินปูนร้อยละ 5 มีการพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วัน การหดตัวแบบแห้ง พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ ร้อยละ 5 และผงหินปูนร้อยละ 15 สามารถช่วยลดตัวแบบแห้งได้มากที่สุด โดยแนวโน้มการหดตัว มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณผงหินปูนมากขึ้น ส่วนการหดตัวแบบออโตจีเนียส พบว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบดำล้วนแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50 ช่วยลดการหดตัวมากที่สุด

การขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบร้อยละ 15 ร่วมผงหินปูนร้อยละ 5 มีอัตราการสูญเสียกำลังอัด และการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมด้วยปูนซีเมนต์ล้วนและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำล้วน [14]

กฤติยาและคณะได้ศึกษาถึงคุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร และ 13 ไมโครเมตร โดยใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนและแทนที่เถ้าลอย

บางส่วนพบว่าการใช้แทนที่ในปริมาณที่เหมาะสมกำลังอัดของมอร์ต้าร์จะเพิ่มขึ้นยิ่งวัสดุแทนที่มีขนาดเล็กลงยิ่งส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น ความคงทนต้านทานต่อซัลเฟตโดยการทดสอบต้านทานสารละลายซัลเฟต (Sulfate Resistant) พบว่าการแทนที่ทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าลอยบางส่วนด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนต ทั้ง 2 ขนาด นั้นจะส่งผลให้คอนกรีตสามารถต้านทานสารละลายซัลเฟตได้ดีขึ้น ผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดหยาบ จะทำให้คุณสมบัติในการต้านทานซัลเฟตได้ดีกว่า ความต้านทานต่อคาร์บอเนชั่นการศึกกร่อนโดยขบวนการคาร์บอเนชั่น เห็นว่าผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความละเอียด ช่วยลดความรุนแรงที่เกิดคาร์บอเนชั่นในคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนและคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย สำหรับการหดตัวแห้งเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นช่วยลดการหดตัวแบบแห้ง และการหดตัวจะลดลงถ้าขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตที่แทนที่นั้นหยาบขึ้นหรือแทนในอัตราส่วนที่ไม่มากนัก สำหรับการแทนที่เถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอเนตนั้นช่วยลดการหดตัวแบบแห้งเช่นเดียวกัน

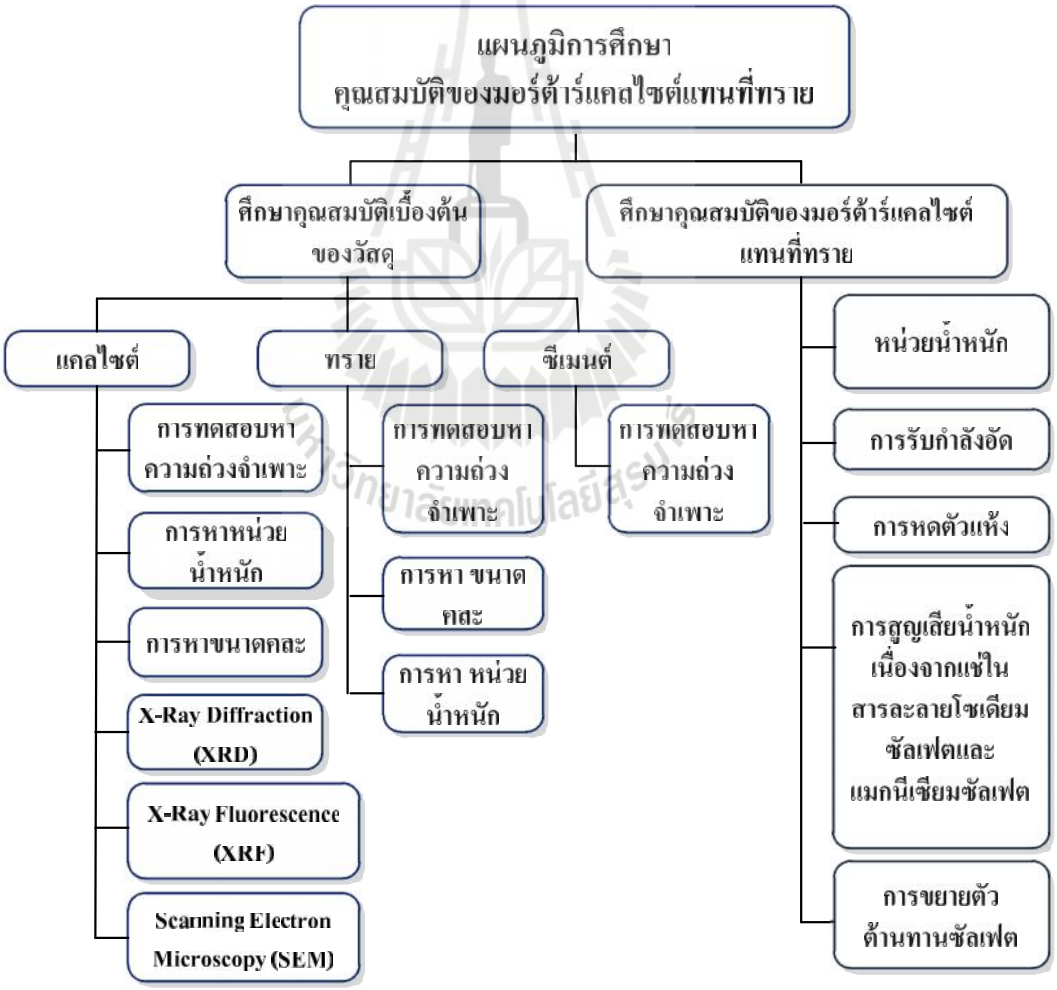
ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วัสดุผงกากแร่แคลไซต์ซึ่งเป็นกลุ่มแร่เดียวกันกับแร่แคลเซียมคาร์บอเนต มีลักษณะเม็ดตามธรรมชาติ คือผ่านกระบวนการตัดแต่งแร่ตามกรรมวิธีการคัดหาความบริสุทธิ์ ยังไม่ผ่านกระบวนการใดๆ กองเก็บและมีขนาดเม็ดที่ใกล้เคียงกับทรายละเอียด ใช้เป็นมวลรวมแทนทรายที่ร้อยละต่างๆ เพื่อเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการใช้เป็นวัสดุผสมคอนกรีต และนำมาประยุกต์ในการดำเนินงานวิจัยต่อไป

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบการใช้กากแร่แคลไซต์ มาใช้ทดแทนเป็นวัสดุผสมละเอียด ในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย
2) การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของทราย

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพต่าง ๆ ของทราย โดยเฉพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ร้อยละการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมละเอียด และนำค่าไปออกแบบส่วนผสมมอร์ต้าร์ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะนี้ จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของทรายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 ถึง3.0 และจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่ดูดซึมน้ำและไม่คายน้ำ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) [16] รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย

2) การทดสอบหาขนาดคละของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาการกระจายตัวและส่วนคละของทราย ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้ และแต่ละก้อนของทรายจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม ในการทดสอบใช้วิธีการตะแกรงร่อนให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2001) [17] ดังแสดงในรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 การทดสอบการหาขนาดคละของทราย

3) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อให้สามารถหาค่าหน่วยน้ำหนักของทรายได้ ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001) [18]

3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ในการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.15 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2001)[19] รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติของแคลไซต์

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของแคลไซต์

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของแคลไซต์ สามารถวัดได้โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) [16]

2) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของแคลไซต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของแคลไซต์โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001) [18]

3) การทดสอบหาขนาดคละของแคลไซต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาขนาดคละของแคลไซต์ โดยการทดสอบเช่นเดียวกับทราย โดยใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรง ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2001) [17]

4) การทดสอบหาค่าความเป็นผลึกของแคลไซต์

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อหาค่าความเป็นผลึก ของโครงสร้างกากแร่แคลไซต์ โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)

5) การทดสอบหาค่าส่วนประกอบทางเคมีของแคลไซต์

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometry

6) การถ่ายภาพขยายกำลังสูงของแคลไซต์

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผงของกากแร่แคลไซต์เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์กับขนาดของเม็ดทรายที่มีความละเอียดเท่ากัน โดยการทดสอบ Scanning Electron Microscope หรือ SEM

3.2 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

3.2.1 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 138 (2001) [20]

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ต้าร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมอร์ต้าร์ เพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2001) [2]

รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

รูปที่ 3.6 แบบหล่อและการเก็บตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ในการทดสอบการรับกำลังอัดและทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก

3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านการหดตัวแห้ง โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596-01 [3] หล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 25x25x285 มม. เมื่อแท่งตัวอย่างอายุครบ 24 ชั่วโมง ± 30 นาที นำแท่งตัวอย่างมาแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวจนครบ 48 ชั่วโมง ± 30 นาที จนกระทั่งอายุของแท่งตัวอย่างครบ 72 ชั่วโมง ± 30 นาที จึงนำแท่งตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดผิวให้แห้งแล้วนำแท่งตัวอย่างมาอ่านค่าความยาวช่วงเริ่มต้น จากนั้นจึงนำแท่งตัวอย่างไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 23± 2 ° C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ทำการอ่านค่าการหดตัวแห้งของแท่งตัวอย่างที่อายุการบ่มแห้งในอากาศ 4, 7, 14, 28, 56 , 90 และ 112 วัน โดยใช้เครื่องมือวัดตามมาตรฐาน ASTM C 490 – 00a [22]

3.2.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านการขยายตัวทนซัลเฟต

การทดสอบการขยายตัวทนซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1012 [5] หล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 25x25x285 มม. ในแบบหล่อดังรูปที่ 3.7 เมื่อแท่งตัวอย่างอายุครบ 24 ชั่วโมง ± 30 นาที นำแท่งตัวอย่างมาแช่ในน้ำปูนขาว (Saturated Limewater) จนกระทั่งมอร์ต้าร์สามารถรับกำลังอัดได้ถึง 20 ± 1 MPa (3000 ± 150 psi) หรือ เป็นเวลา 28 วัน จึงนำแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์มาเช็ดผิวให้แห้งแล้วอ่านค่าเป็นความยาวช่วงเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในบ่อเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23±2 ° C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 อ่านค่าการขยายตัวที่อายุ 7, 14, 21, 28, 56, 84 และที่ 112 วันของการแช่ในสารละลายซัลเฟต ค่าการหดตัวและการขยายตัวของมอร์ต้าร์คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{การหดตัวและการขยายตัว , \%} = [(L_t - L_i)/L_g] \times 100 \qquad (3.1)$$

เมื่อ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (มม.)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวตัวอย่างที่บ่มในอากาศ, แช่ในน้ำ และในสารละลาย (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 250 มม.

3.2.5 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. โดยหลังจากที่แช่ตัวอย่างลูกบาศก์ในน้ำปูนขาวที่อิ่มตัว เป็นเวลา 28 วัน แล้วทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก, ร้อยละการสูญเสีย} = [(W_i - W_t)/(W_t)]x100 \quad (3.2)$$

เมื่อ W_i คือ น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์หลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุต่างๆ (กรัม)

3.2.6 การเตรียมสารละลายซัลเฟต [11]

สำหรับการเตรียมสารละลายซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

1) สารละลายโซเดียมซัลเฟต ใช้โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate) เท่ากับ 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

2) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้แมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulphate) เท่ากับ 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

รูปที่ 3.7 ชุดแบบหล่อและเหล็กสตั๊ด สำหรับทดสอบการหดตัวแห้งและการขยายตัวของมอร์ต้าร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รูปที่ 3.8 ชุดเครื่องทดสอบการหดตัวแห้งและขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์

3.3 ส่วนผสม สัญลักษณ์ และจำนวนของก้อนตัวอย่าง

จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยแยกตามส่วนผสมโดยสัญลักษณ์ของแท่งตัวอย่างมีดังนี้ อักษรข้างหน้าเป็นสัญลักษณ์ของการใช้ทรายซึ่งมีสองลักษณะคือ ควบคุมขนาดคละ(CS) ตามมาตรฐาน ASTM C33 [23] และขนาดคละตามธรรมชาติ (NS) ส่วนสัญลักษณ์ตัวอักษรสองตัวด้านหลังเป็นตัวอักษรของแคลไซต์ (Calcite, Ca) ส่วนตัวเลขด้านหลังเป็นอัตราส่วนการใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย

สำหรับการทดสอบกายภาพทางด้านการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตนั้น จะใช้สัญลักษณ์ด้วยอักษร Ce เป็นการแสดงว่าเป็นมอร์ต้าร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพื่อใช้เป็นมอร์ต้าร์สำหรับควบคุมและเปรียบเทียบ โดยมีสัญลักษณ์ดังนี้ คือ CSCe และ NSCe ส่วนตารางแสดงจำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแต่ละการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.7

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:CS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่างๆ (วัน)					หน่วยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน	จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			1	3	7	28	60		
1	CSCa00	0:100	6	6	6	6	6	6	36
2	CSCa10	10:90	6	6	6	6	6	6	36
3	CSCa20	20:80	6	6	6	6	6	6	36
4	CSCa30	30:70	6	6	6	6	6	6	36
5	CSCa40	40:60	6	6	6	6	6	6	36
6	CSCa50	50:50	6	6	6	6	6	6	36
			รวมก้อนตัวอย่าง						216

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่างๆ (วัน)					หน่วยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน	จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			1	3	7	28	60		
1	NSCa00	0:100	6	6	6	6	6	6	36
2	NSCa10	10:90	6	6	6	6	6	6	36
3	NSCa20	20:80	6	6	6	6	6	6	36
4	NSCa30	30:70	6	6	6	6	6	6	36
5	NSCa40	40:60	6	6	6	6	6	6	36
6	NSCa50	50:50	6	6	6	6	6	6	36
			รวมก้อนตัวอย่าง						216

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:S (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง อายุการบ่มแห้งในอากาศที่ 4,7,14,28,56,90 และ 112 วัน	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
1	CSCa00	0:100	4	4
2	CSCa10	10:90	4	4
3	CSCa20	20:80	4	4
4	CSCa30	30:70	4	4
5	CSCa40	40:60	4	4
6	CSCa50	50:50	4	4
			รวมก้อนตัวอย่าง	24

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง อายุการบ่มแห้งในอากาศที่ 4,7,14,28,56,90 และ 112 วัน	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
1	NSCa00	0:100	4	4
2	NSCa10	10:90	4	4
3	NSCa20	20:80	4	4
4	NSCa30	30:70	4	4
5	NSCa40	40:60	4	4
6	NSCa50	50:50	4	4
			รวมก้อนตัวอย่าง	24

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง แบ่งตามลักษณะการแช่ในสารละลาย		จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
			อายุการแช่ตัวอย่าง 7,14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	อายุการแช่ตัวอย่าง 7,14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	
1	CSCe	0:100	4	4	8
2	CSCa00	0:100	4	4	8
3	CSCa10	10:90	4	4	8
4	CSCa20	20:80	4	4	8
5	CSCa30	30:70	4	4	8
6	CSCa40	40:60	4	4	8
7	CSCa50	50:50	4	4	8
			รวมก้อนตัวอย่าง		56

ตารางที่ 3.6 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง แบ่งตามลักษณะการแช่ในสารละลาย		จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
			อายุการแช่ตัวอย่าง 14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	อายุการแช่ตัวอย่าง 14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	
1	NSCe	0:100	4	4	8
2	NSCa00	0:100	4	4	8
3	NSCa10	10:90	4	4	8
4	NSCa20	20:80	4	4	8
5	NSCa30	30:70	4	4	8
6	NSCa40	40:60	4	4	8
7	NSCa50	50:50	4	4	8
			รวมก้อนตัวอย่าง		56

ตารางที่ 3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:CS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการแช่ในสารละลายที่ 7,14,21,28,56,84 และ 105 วัน		จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
1	CSCe	0:100	35	35	70
2	CSCa00	0:100	35	35	70
3	CSCa10	10:90	35	35	70
4	CSCa20	20:80	35	35	70
5	CSCa30	30:70	35	35	70
6	CSCa40	40:60	35	35	70
7	CSCa50	50:50	35	35	70
			รวมก้อนตัวอย่าง		490

ตารางที่ 3.8 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:CS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการแช่ในสารละลายที่ 7,14,21,28,56,84 และ 105 วัน		จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
1	NSCe	0:100	35	35	70
2	NSCa00	0:100	35	35	70
3	NSCa10	10:90	35	35	70
4	NSCa20	20:80	35	35	70
5	NSCa30	30:70	35	35	70
6	NSCa40	40:60	35	35	70
7	NSCa50	50:50	35	35	70
			รวมก้อนตัวอย่าง		490

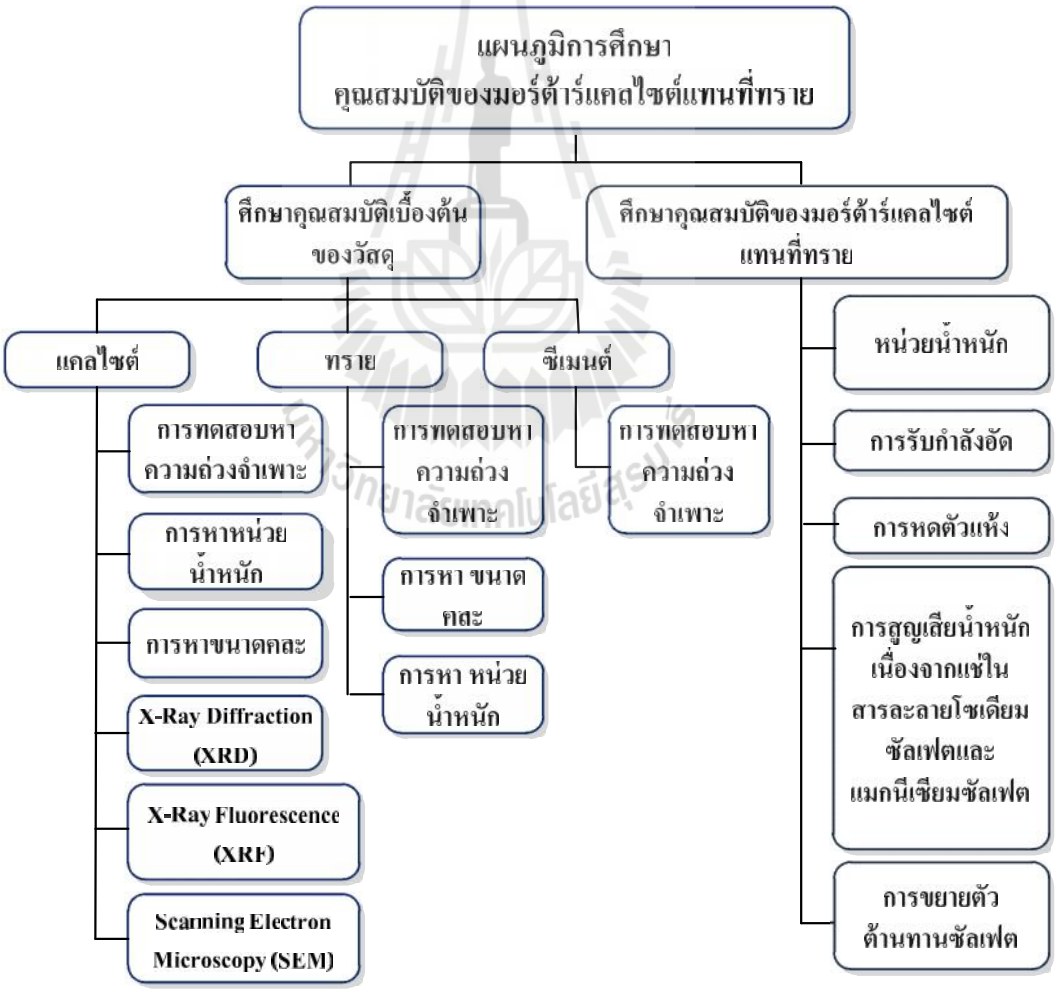
รวมจำนวนก้อนตัวอย่างของมอร์ต้าร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. ที่ใช้ทดสอบการรับกำลังอัดและทางกายภาพด้านสูญเสียน้ำหนักทั้งหมด 1,412 ก้อนตัวอย่าง ส่วนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพด้านการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตและการหดตัวแห้งใช้ขนาดก้อนตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. ใช้จำนวนก้อนตัวอย่างทั้งสิ้น จำนวน 160 ก้อนตัวอย่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาวิจัยเปรียบเทียบการใช้กากแร่แคลไซต์ มาใช้ทดแทนเป็นวัสดุผสมละเอียด ในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย
2) การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการดำเนินงานวิจัย

3.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 การทดสอบคุณสมบัติของทราย

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพต่าง ๆ ของทราย โดยเฉพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry) ร้อยละการดูดซึมน้ำ (Absorption) ของมวลรวมละเอียด และนำค่าไปออกแบบส่วนผสมมอร์ต้าร์ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะนี้ จะหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่างมวลรวมต่อน้ำหนักของน้ำที่มีปริมาตรเท่ากัน โดยทั่วไปค่าความถ่วงจำเพาะของทรายจะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.4 ถึง3.0 และจะใช้ค่าความถ่วงจำเพาะในสภาพอิ่มตัวผิวแห้ง ซึ่งเป็นสภาพที่ไม่ดูดซึมน้ำและไม่คายน้ำ ส่วนค่าการดูดซึมน้ำบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำไว้ ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) [16] รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย

2) การทดสอบหาขนาดคละของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาการกระจายตัวและส่วนคละของทราย ส่วนคละของมวลรวมจะมีผลต่อความสามารถเทได้ และแต่ละก้อนของทรายจะต้องถูกห่อหุ้มด้วยซีเมนต์เพสต์ ไม่ว่ามวลรวมนั้นจะมีขนาดใหญ่หรือเล็กก็ตาม ในการทดสอบใช้วิธีการตะแกรงร่อนให้ได้ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2001) [17] ดังแสดงในรูปที่ 3.3

รูปที่ 3.3 การทดสอบการหาขนาดคละของทราย

3) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของทราย

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อให้สามารถหาค่าหน่วยน้ำหนักของทรายได้ ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001) [18]

3.1.2 การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ ในการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะประมาณ 3.15 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 หรือปูนซีเมนต์ชนิดทนซัลเฟต ซึ่งทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 188 (2001)[19] รูปการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.4

รูปที่ 3.4 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์

3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติของแคลไซต์

1) การทดสอบหาความถ่วงจำเพาะของแคลไซต์

เพื่อหาค่าความถ่วงจำเพาะของแคลไซต์ สามารถวัดได้โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 128 (2001) [16]

2) การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนักของแคลไซต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักของแคลไซต์โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับทราย ตามมาตรฐาน ASTM C 29 (2001) [18]

3) การทดสอบหาขนาดคละของแคลไซต์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาขนาดคละของแคลไซต์ โดยการทดสอบเช่นเดียวกับทราย โดยใช้วิธีการร่อนผ่านตะแกรง ตามมาตรฐาน ASTM C 136 (2001) [17]

4) การทดสอบหาค่าความเป็นผลึกของแคลไซต์

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อหาค่าความเป็นผลึก ของโครงสร้างกากแร่แคลไซต์ โดยวิธี X-Ray Diffraction (XRD)

5) การทดสอบหาค่าส่วนประกอบทางเคมีของแคลไซต์

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometry

6) การถ่ายภาพขยายกำลังสูงของแคลไซต์

จุดประสงค์ของการทดสอบ เพื่อแสดงให้เห็นลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ขนาด และรูปร่างของอนุภาคผงของกากแร่แคลไซต์เพื่อเปรียบเทียบและวิเคราะห์กับขนาดของเม็ดทรายที่มีความละเอียดเท่ากัน โดยการทดสอบ Scanning Electron Microscope หรือ SEM

3.2 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

3.2.1 การทดสอบหาค่าหน่วยน้ำหนัก

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่ม 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C 138 (2001) [20]

3.2.2 การทดสอบคุณสมบัติด้านกำลังอัดของมอร์ต้าร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของมอร์ต้าร์ เพื่อหาค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์เป็นส่วนผสม แล้วเปรียบเทียบกับก้อนตัวอย่างมอร์ต้าร์ควบคุม โดยจะทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 (2001) [2]

รูปที่ 3.5 ชุดทดสอบหาค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

รูปที่ 3.6 แบบหล่อและการเก็บตัวอย่างแท่งมอร์ต้าร์ในการทดสอบการรับกำลังอัดและทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนัก

3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติด้านการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์

จุดประสงค์การทดสอบ เพื่อหาคุณสมบัติทางกายภาพด้านการหดตัวแห้ง โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C596-01 [3] หล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 25x25x285 มม. เมื่อแท่งตัวอย่างอายุครบ 24 ชั่วโมง ± 30 นาที นำแท่งตัวอย่างมาแช่ในน้ำปูนขาวอิ่มตัวจนครบ 48 ชั่วโมง ± 30 นาที จนกระทั่งอายุของแท่งตัวอย่างครบ 72 ชั่วโมง ± 30 นาที จึงนำแท่งตัวอย่างขึ้นจากน้ำ เช็ดผิวให้แห้งแล้วนำแท่งตัวอย่างมาอ่านค่าความยาวช่วงเริ่มต้น จากนั้นจึงนำแท่งตัวอย่างไปบ่มในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 23± 2 ° C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ทำการอ่านค่าการหดตัวแห้งของแท่งตัวอย่างที่อายุการบ่มแห้งในอากาศ 4, 7, 14, 28, 56 , 90 และ 112 วัน โดยใช้เครื่องมือวัดตามมาตรฐาน ASTM C 490 – 00a [22]

3.2.4 การทดสอบคุณสมบัติด้านการขยายตัวทนซัลเฟต

การทดสอบการขยายตัวทนซัลเฟตของมอร์ต้าร์ โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C1012 [5] หล่อแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ขนาด 25x25x285 มม. ในแบบหล่อดังรูปที่ 3.7 เมื่อแท่งตัวอย่างอายุครบ 24 ชั่วโมง ± 30 นาที นำแท่งตัวอย่างมาแช่ในน้ำปูนขาว (Saturated Limewater) จนกระทั่งมอร์ต้าร์สามารถรับกำลังอัดได้ถึง 20 ± 1 MPa (3000 ± 150 psi) หรือ เป็นเวลา 28 วัน จึงนำแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์มาเช็ดผิวให้แห้งแล้วอ่านค่าเป็นความยาวช่วงเริ่มต้นด้วยเครื่องวัดความยาว (Length Comparator) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ต่อจากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ในบ่อเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิ 23±2 ° C และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 อ่านค่าการขยายตัวที่อายุ 7, 14, 21, 28, 56, 84 และที่ 112 วันของการแช่ในสารละลายซัลเฟต ค่าการหดตัวและการขยายตัวของมอร์ต้าร์คำนวณได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{การหดตัวและการขยายตัว , \%} = [(L_t - L_i)/L_g] \times 100 \qquad (3.1)$$

เมื่อ L_i คือ ค่าเฉลี่ยความยาวเริ่มต้นของตัวอย่างหลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว (มม.)

L_t คือ ค่าเฉลี่ยความยาวตัวอย่างที่บ่มในอากาศ, แช่ในน้ำ และในสารละลาย (มม.)

L_g คือ ค่าความยาวของ Gauge Length หรือเท่ากับ 250 มม.

3.2.5 การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก

การทดสอบการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss) ของตัวอย่างมอร์ต้าร์ลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. โดยหลังจากที่แช่ตัวอย่างลูกบาศก์ในน้ำปูนขาวที่อิ่มตัว เป็นเวลา 28 วัน แล้วทำการชั่งน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต สำหรับค่าการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์คำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{การสูญเสียน้ำหนัก, ร้อยละการสูญเสีย} = [(W_i - W_t)/(W_t)]x100 \quad (3.2)$$

เมื่อ W_i คือ น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์หลังจากแช่ในน้ำที่อิ่มตัวด้วยปูนขาว 28 วัน (กรัม)

W_t คือ น้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุต่างๆ (กรัม)

3.2.6 การเตรียมสารละลายซัลเฟต [11]

สำหรับการเตรียมสารละลายซัลเฟตในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้สารละลายซัลเฟต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต

1) สารละลายโซเดียมซัลเฟต ใช้โซเดียมซัลเฟต (Sodium Sulphate) เท่ากับ 50 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

2) สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ใช้แมกนีเซียมซัลเฟต (Magnesium Sulphate) เท่ากับ 42.36 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร เพื่อให้ได้ปริมาณอิออนซัลเฟต (SO_4^{2-}) เท่ากับ 33,800 ppm

รูปที่ 3.7 ชุดแบบหล่อและเหล็กสตั๊ด สำหรับทดสอบการหดตัวแห้งและการขยายตัวของมอร์ต้าร์

รูปที่ 3.8 ชุดเครื่องทดสอบการหดตัวแห้งและขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.3 ส่วนผสม สัญลักษณ์ และจำนวนของก้อนตัวอย่าง

จำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยแยกตามส่วนผสมโดยสัญลักษณ์ของแท่งตัวอย่างมีดังนี้ อักษรข้างหน้าเป็นสัญลักษณ์ของการใช้ทรายซึ่งมีสองลักษณะคือ ควบคุมขนาดคละ(CS) ตามมาตรฐาน ASTM C33 [23] และขนาดคละตามธรรมชาติ (NS) ส่วนสัญลักษณ์ตัวอักษรสองตัวด้านหลังเป็นตัวอักษรของแคลไซต์ (Calcite, Ca) ส่วนตัวเลขด้านหลังเป็นอัตราส่วนการใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย

สำหรับการทดสอบกายภาพทางด้านการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตนั้น จะใช้สัญลักษณ์ด้วยอักษร Ce เป็นการแสดงว่าเป็นมอร์ต้าร์ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพื่อใช้เป็นมอร์ต้าร์สำหรับควบคุมและเปรียบเทียบ โดยมีสัญลักษณ์ดังนี้ คือ CSCe และ NSCe ส่วนตารางแสดงจำนวนก้อนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแต่ละการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.7

ตารางที่ 3.1 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:CS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่างๆ (วัน)					หน่วยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน	จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			1	3	7	28	60		
1	CSCa00	0:100	6	6	6	6	6	6	36
2	CSCa10	10:90	6	6	6	6	6	6	36
3	CSCa20	20:80	6	6	6	6	6	6	36
4	CSCa30	30:70	6	6	6	6	6	6	36
5	CSCa40	40:60	6	6	6	6	6	6	36
6	CSCa50	50:50	6	6	6	6	6	6	36
			รวมก้อนตัวอย่าง						216

ตารางที่ 3.2 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการบ่มต่างๆ (วัน)					หน่วยน้ำหนักที่อายุ 28 วัน	จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			1	3	7	28	60		
1	NSCa00	0:100	6	6	6	6	6	6	36
2	NSCa10	10:90	6	6	6	6	6	6	36
3	NSCa20	20:80	6	6	6	6	6	6	36
4	NSCa30	30:70	6	6	6	6	6	6	36
5	NSCa40	40:60	6	6	6	6	6	6	36
6	NSCa50	50:50	6	6	6	6	6	6	36
			รวมก้อนตัวอย่าง						216

ตารางที่ 3.3 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:S (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง อายุการบ่มแห้งในอากาศที่ 4,7,14,28,56,90 และ 112 วัน	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
1	CSCa00	0:100	4	4
2	CSCa10	10:90	4	4
3	CSCa20	20:80	4	4
4	CSCa30	30:70	4	4
5	CSCa40	40:60	4	4
6	CSCa50	50:50	4	4
			รวมก้อนตัวอย่าง	24

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.4 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง อายุการบ่มแห้งในอากาศที่ 4,7,14,28,56,90 และ 112 วัน	จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
1	NSCa00	0:100	4	4
2	NSCa10	10:90	4	4
3	NSCa20	20:80	4	4
4	NSCa30	30:70	4	4
5	NSCa40	40:60	4	4
6	NSCa50	50:50	4	4
			รวมก้อนตัวอย่าง	24

ตารางที่ 3.5 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง แบ่งตามลักษณะการแช่ในสารละลาย		จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
			อายุการแช่ตัวอย่าง 7,14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	อายุการแช่ตัวอย่าง 7,14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	
1	CSCe	0:100	4	4	8
2	CSCa00	0:100	4	4	8
3	CSCa10	10:90	4	4	8
4	CSCa20	20:80	4	4	8
5	CSCa30	30:70	4	4	8
6	CSCa40	40:60	4	4	8
7	CSCa50	50:50	4	4	8
			รวมก้อนตัวอย่าง		56

ตารางที่ 3.6 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:NS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่าง แบ่งตามลักษณะการแช่ในสารละลาย		จำนวนก้อนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
			อายุการแช่ตัวอย่าง 14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	อายุการแช่ตัวอย่าง 14, 28, 56, 90 และ 112 วัน	
1	NSCe	0:100	4	4	8
2	NSCa00	0:100	4	4	8
3	NSCa10	10:90	4	4	8
4	NSCa20	20:80	4	4	8
5	NSCa30	30:70	4	4	8
6	NSCa40	40:60	4	4	8
7	NSCa50	50:50	4	4	8
			รวมก้อนตัวอย่าง		56

ตารางที่ 3.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:CS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการแช่ในสารละลายที่ 7,14,21,28,56,84 และ 105 วัน		จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
1	CSCe	0:100	35	35	70
2	CSCa00	0:100	35	35	70
3	CSCa10	10:90	35	35	70
4	CSCa20	20:80	35	35	70
5	CSCa30	30:70	35	35	70
6	CSCa40	40:60	35	35	70
7	CSCa50	50:50	35	35	70
			รวมก้อนตัวอย่าง		490

ตารางที่ 3.8 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa

ลำดับที่	สัญลักษณ์	อัตราส่วน Ca:CS (%)	จำนวนก้อนตัวอย่างที่อายุการแช่ในสารละลายที่ 7,14,21,28,56,84 และ 105 วัน		จำนวนตัวอย่าง (ก้อน)
			โซเดียมซัลเฟต	แมกนีเซียมซัลเฟต	
1	NSCe	0:100	35	35	70
2	NSCa00	0:100	35	35	70
3	NSCa10	10:90	35	35	70
4	NSCa20	20:80	35	35	70
5	NSCa30	30:70	35	35	70
6	NSCa40	40:60	35	35	70
7	NSCa50	50:50	35	35	70
			รวมก้อนตัวอย่าง		490

รวมจำนวนก้อนตัวอย่างของมอร์ต้าร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม. ที่ใช้ทดสอบการรับกำลังอัดและทางกายภาพด้านสูญเสียน้ำหนักทั้งหมด 1,412 ก้อนตัวอย่าง ส่วนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพด้านการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตและการหดตัวแห้งใช้ขนาดก้อนตัวอย่างขนาด 25x25x285 มม. ใช้จำนวนก้อนตัวอย่างทั้งสิ้น จำนวน 160 ก้อนตัวอย่าง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4
ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย คุณสมบัติเบื้องต้นด้านการรับกำลังอัด การหดตัวแห้งและความต้านทานต่อซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย โดยนำผลการศึกษาที่ได้จากการใช้แคลไซต์แทนที่ทราย ที่ร้อยละต่างๆ มาเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม ที่อายุการบ่มต่าง ๆ

4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทรายลักษณะเม็ดตามธรรมชาติ และทรายที่ควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 และกากแร่แคลไซต์ที่มีขนาดอนุภาคของเม็ดเท่ากับทรายละเอียดมาทำการวิเคราะห์เบื้องต้น ได้แก่คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุมวลรวม

4.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานและมวลรวมละเอียด

สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ที่ศึกษาคือความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภท พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ประเภทต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงระหว่าง 3.11 ถึง 3.18 ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ตารางที่ 4.1)

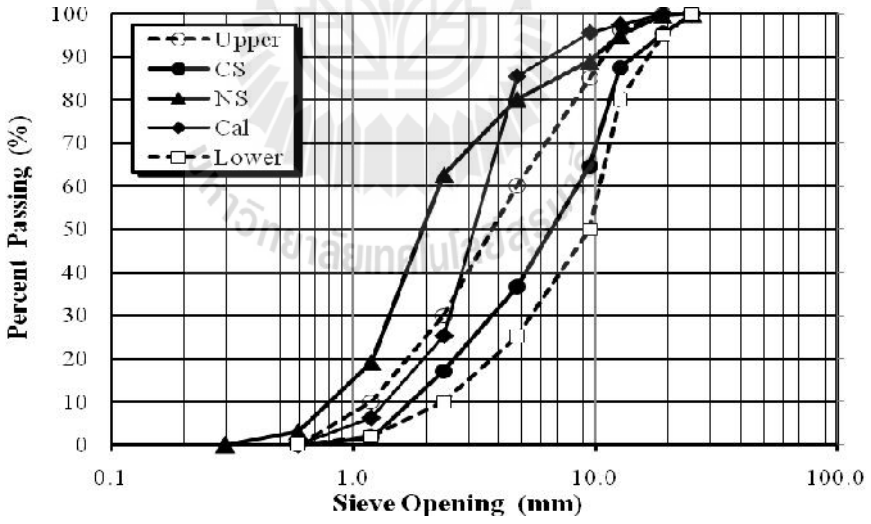
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุประสานและมวลรวม

Description	Cement Type 1	Cement Type 5	Sand		Calcite
			CS	NS	
Specific Gravity	3.12	3.13	2.54	2.56	2.60
Percent Absorption (%)	-	-	0.24	0.36	0.47
Fineness Modulus	-	-	2.90	2.50	1.86
Bulk Unit Weight (Kg/m^3)	-	-	1,766	1,680	1,761
Percent of Void	-	-	29.29	32.90	31.23

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานและวัสดุมวลรวมคือ ทรายทั้งสองลักษณะขนาดเม็ดพบว่ามีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันมาก โดยทราย CS และทราย NS มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.54 และ 2.56 ตามลำดับ ร้อยละการดูดซึมน้ำ 0.24 และ 0.36 ตามลำดับ ส่วนกากแร่แคลไซต์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.86 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคลไซต์มีความละเอียดมากกว่าทราย NS และCS ส่วนการดูดซึมน้ำของแคลไซต์มีค่าเท่ากับ 0.47 ซึ่งสูงกว่าทราย ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคที่เล็กกว่าจึงทำให้มีพื้นผิวจำเพาะในการดูดซับน้ำได้มากกว่า

ส่วนค่าหน่วยน้ำหนักของทราย CS เท่ากับ 1,766 กก/ซม^3 ทราย NS เท่ากับ 1,680 กก/ซม^3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าทรายที่คัดขนาดคละ ทรายที่มีขนาดคละที่ดีทำให้มวลที่มีขนาดเล็กสามารถแทรกระหว่างมวลที่มีขนาดใหญ่ได้ดีกว่าทำให้มีหน่วยน้ำหนักที่มากและเกิดช่องว่างน้อยกว่าทรายลักษณะเม็ดตามธรรมชาติ ร้อยละของช่องว่างของทราย CS เท่ากับร้อยละ 29.29 และทราย NS เท่ากับ 32.90

สำหรับหน่วยน้ำหนักของแคลไซต์มีค่าเท่ากับ 1,760 กก/ซม^3 มีค่าใกล้เคียงกับทราย CS ร้อยละของช่องว่างเท่ากับ 31.23 มีค่ามากกว่าทราย CS และใกล้เคียงกับทราย NS



รูปที่ 4.1 ขนาดคละของทรายและกากแร่แคลไซต์

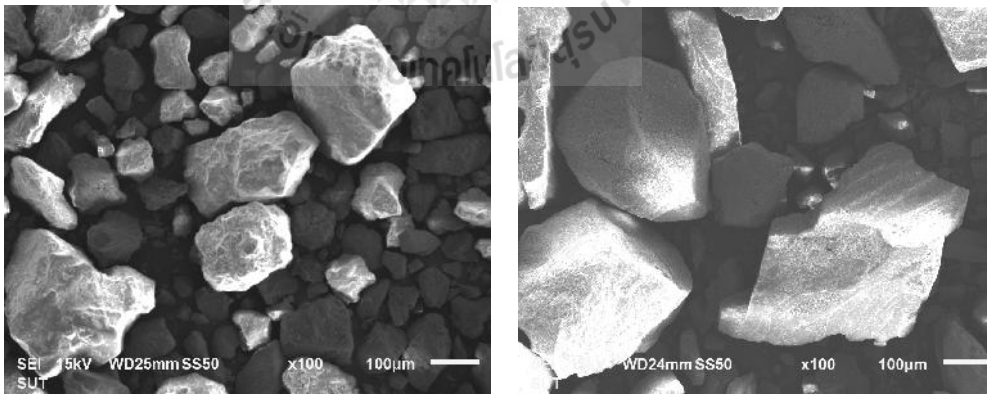
รูปที่ 4.1 แสดงขนาดคละของทรายและกากแร่แคลไซต์ ซึ่งพบว่าทราย NS มีขนาดอนุภาคละเอียดมากกว่าทราย CS และแคลไซต์มีขนาดอนุภาคความละเอียดมากกว่าทรายทั้งสองลักษณะ ทราย NS และกากแร่แคลไซต์มีขนาดคละของอนุภาคความละเอียดสามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 30 เท่ากับร้อยละ 62 และ 85 ตามลำดับ ซึ่งมาตรฐานขนาดคละของมวลรวมละเอียดที่สามารถผ่าน

ตะแกรงเบอร์ 30 กำหนดไว้ที่ช่วงร้อยละ 25 ถึง 60 เห็นได้ว่าทั้งทราย NS และกากแร่แคลไซต์มีค่าการผ่านตะแกรงมากกว่ากำหนด และลักษณะเส้นกราฟขนาดคละของแคลไซต์เป็นลักษณะของมวลรวมที่มีขนาดเดียวเพราะมีการค้างตะแกรงเบอร์เดียวอยู่ถึงร้อยละ 60 ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ (คือร้อยละ50)

รูปลักษณะของอนุภาคและสีของแคลไซต์และทรายขนาดคละตามธรรมชาติในรูปที่ 4.2 ซึ่งพบว่าลักษณะของแคลไซต์มีความละเอียดมากกว่าทราย NS

ก) ทรายขนาดคละตามธรรมชาติ (NS) ข) กากแร่แคลไซต์

รูปที่ 4.2 ลักษณะสีรูปร่างของทราย และกากแร่แคลไซต์



ก) ทราย ข) กากแร่แคลไซต์

รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายขยาย 100 เท่าของอนุภาคของทรายและกากแร่แคลไซต์

รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะรูปร่างและผิวของทรายและกากแร่แคลไซต์ จากการถ่ายภาพขยายของอนุภาคของมวลรวมละเอียดโดยใช้เครื่อง Scanning Electronic Microscope : SEM พบว่าทรายมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอมีเหลี่ยมมีมุมเช่นเดียวกับเม็ดหิน เพราะทรายได้มาจากการผุพังแตกสลายของหินแล้วทับถมกันไป ส่วนกากแร่แคลไซต์มีลักษณะเป็นรูปไม่สม่ำเสมอเช่นกันเพราะแคลไซต์ได้มาจากกระบวนการตัดแต่งแร่เพื่อคัดแยกเอาส่วนที่ไม่บริสุทธิ์ออกทำให้เหลือกากแร่ที่มีลักษณะและรูปร่างที่มีเหลี่ยมมุมเช่นเดียวกันกับเม็ดทราย

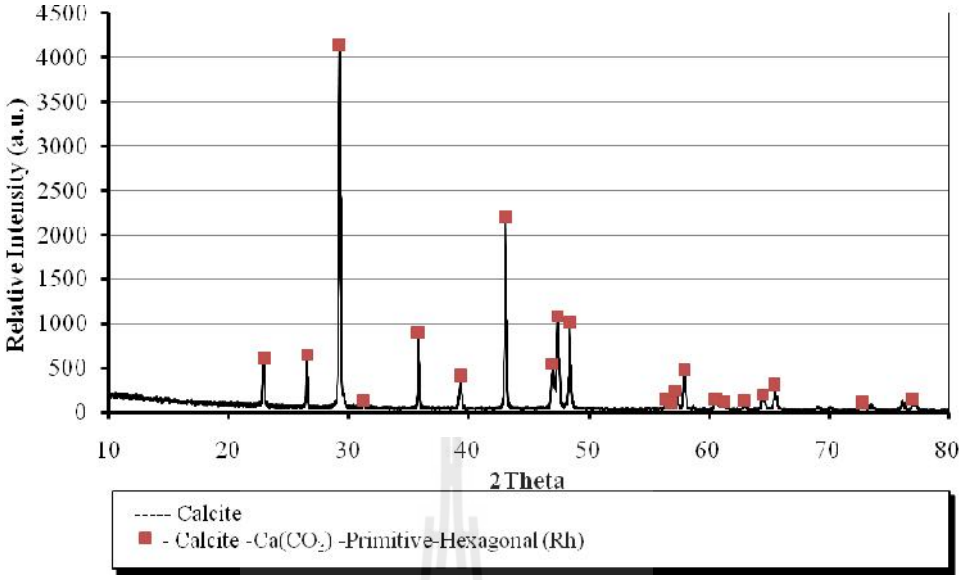
4.1.2 คุณสมบัติทางเคมีของมวลรวม

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของกากแร่แคลไซต์ โดยการวิเคราะห์ส่วนประกอบของธาตุด้วยเทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) Spectrometry หลังจากการทดสอบค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา พบว่ากากแร่แคลไซต์มีส่วนประกอบหลักคือ CaO มีอยู่ร้อยละ 54.64 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 41.69

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของกากแร่แคลไซต์

Compositions	Calcite
MgO	0.51
Al_2O_3	0.74
SiO_2	1.57
SO_3	0.20
Cl	0.15
K_2O	0.02
CaO	54.64
MnO	0.03
Fe_2O_3	0.30
ZnO	0.27
LOI	41.69

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบ X-ray Diffraction ของกากแร่แคลไซต์

รูปที่ 4.4 แสดงค่าลักษณะโครงสร้างของกากแร่แคลไซต์โดยวิธีการทดสอบ X-ray Diffraction (XRD) ซึ่งกากแร่แคลไซต์เป็นรูปผลึกระบบเฮกซาโกนัล จากการทดสอบวิเคราะห์ธาตุทางเคมี พบว่ากากแร่แคลไซต์มีโครงสร้างทางเคมีเป็นไปตามองค์ประกอบดังแสดงในตารางที่ 4.2 คือมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก

4.2 การทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ต้าร์

4.2.1 การทดสอบหาอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม

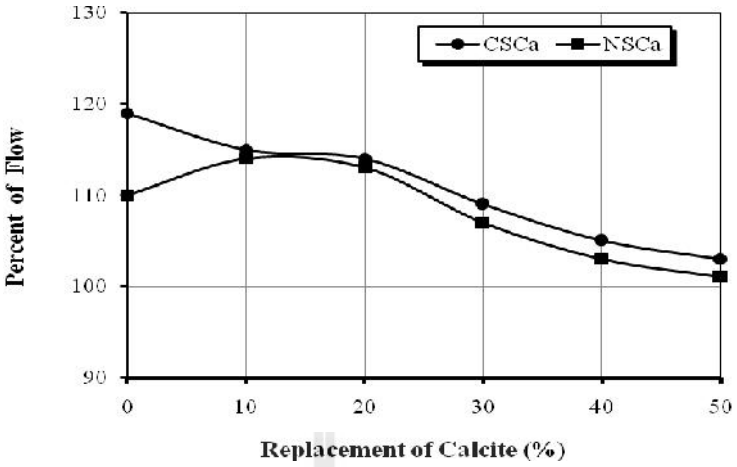
กระบวนการทดสอบหาอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม ดำเนินการโดย ทดลองผสมตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วนทั้งสองลักษณะเม็ด และที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย CS และ NS ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ทำการหาร้อยละการไหลแผ่มีค่าอยู่ในช่วง 105 ถึง 115 ดังแสดงในตารางที่ 4.3 จากนั้นนำค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ของมอร์ต้าร์ทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งได้เท่ากับ 0.59 จึงนำค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.59 มาใช้ในการผสมมอร์ต้าร์ทุกอัตราส่วนผสม

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราส่วน Water-Cement Ratio

Mortar	Percent of Flow Control 110±5	Water-Cement Ratio
CSCa00	109	0.58
CSCa10	107	0.57
CSCa20	111	0.59
CSCa30	113	0.60
CSCa40	107	0.61
CSCa50	115	0.61
NSCa00	108	0.57
NSCa10	113	0.58
NSCa20	115	0.59
NSCa30	114	0.59
NSCa40	109	0.60
NSCa50	114	0.62

จากตารางที่ 4.3 ยังพบว่า เมื่อปริมาณกากแร่แคลไซต์ที่ใช้แทนทรายเพิ่มขึ้นในปริมาณที่ร้อยละ 50 ค่าร้อยละการไหลแผ่อยู่ที่ 115 และ 114 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.61 และ 0.62 แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าร์มีความต้องการน้ำในการผสมเพิ่มขึ้นและเพิ่มขึ้นตามปริมาณกากแร่แคลไซต์ เนื่องจากมวลรวมมีความละเอียดมากขึ้น พื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมมีมากขึ้น ความต้องการน้ำในการหล่อลื่นจึงเพิ่มขึ้นตาม

จากรูปที่ 4.5 เป็นร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายทุกสัดส่วนผสม เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.59 เห็นได้ว่าขนาดคละของมวลรวมมีผลต่อการไหลแผ่ มอร์ต้าร์ที่ใช้ทราย CS ล้วน ค่าร้อยละการไหลแผ่มีค่าสูงกว่ามาตรฐานซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 119 เมื่อแทนทราย CS ด้วยกากแร่แคลไซต์ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้การไหลแผ่ลดลงตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้ทราย NS เมื่อแทนทรายด้วยแคลไซต์ที่ร้อยละ 10 ถึง 30 ค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงตามมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 105 ถึง 115 ส่วนการแทนทรายของแคลไซต์ที่ร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าค่าการไหลแผ่มีค่าลดลงต่ำกว่าร้อยละ 105

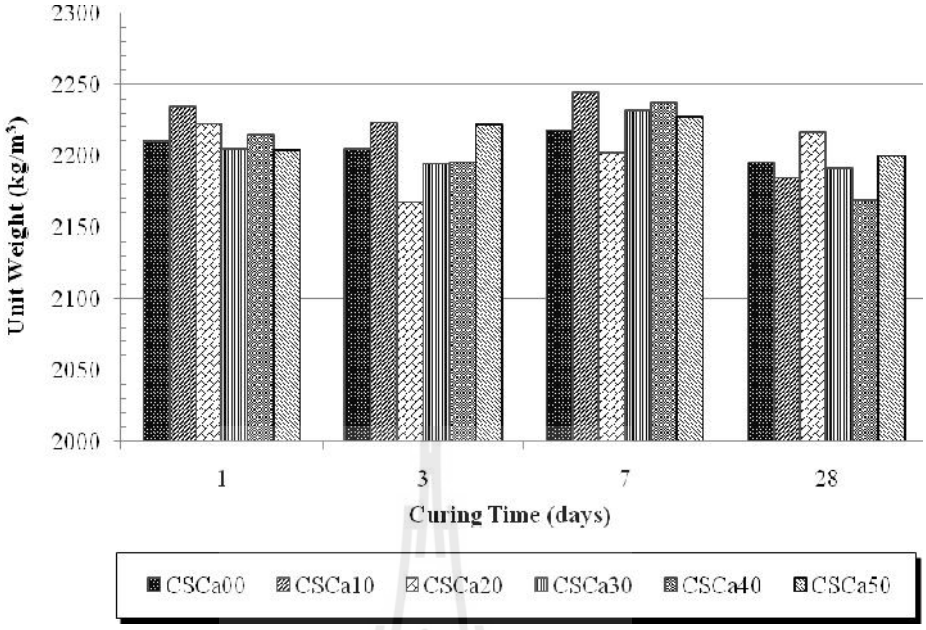


รูปที่ 4.5 ร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์กับการแทนที่ทรายด้วยแคลไซต์

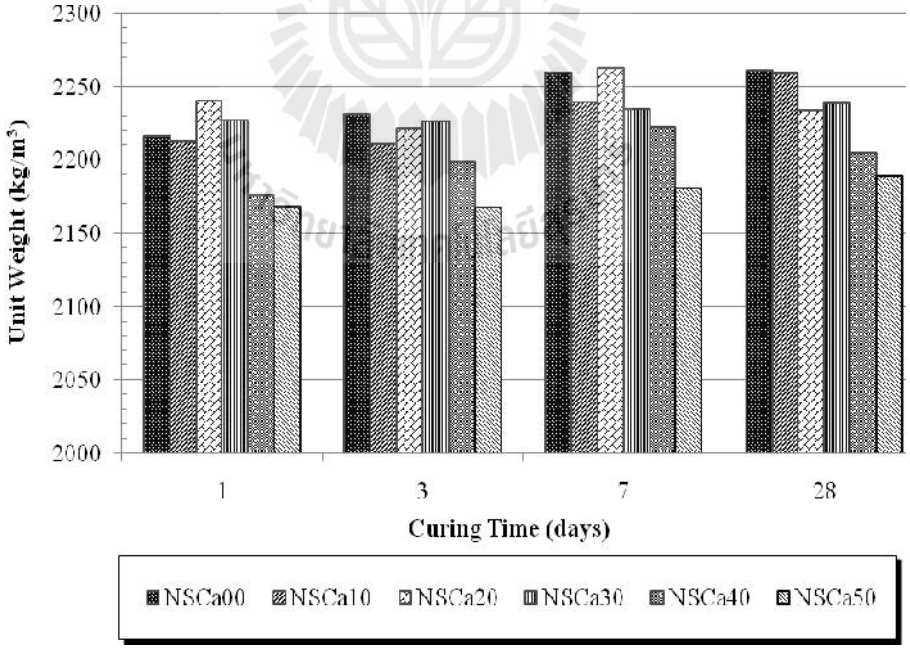
4.2.2 การทดสอบหาหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์

จากรูปที่ 4.6 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์โดยทดสอบอายุการบ่มที่ 1, 3, 7 และ 28 วัน เห็นพบว่ามอร์ต้าร์ CSCa ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวัสดุมวลรวมแต่ละชนิดมีร้อยละของช่องว่างไม่ต่างกันมากแม้จะมีขนาดของอนุภาคต่างกันก็ตามเมื่อนำมาผสมมอร์ต้าร์จึงทำให้หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์แตกต่างกันไม่มาก

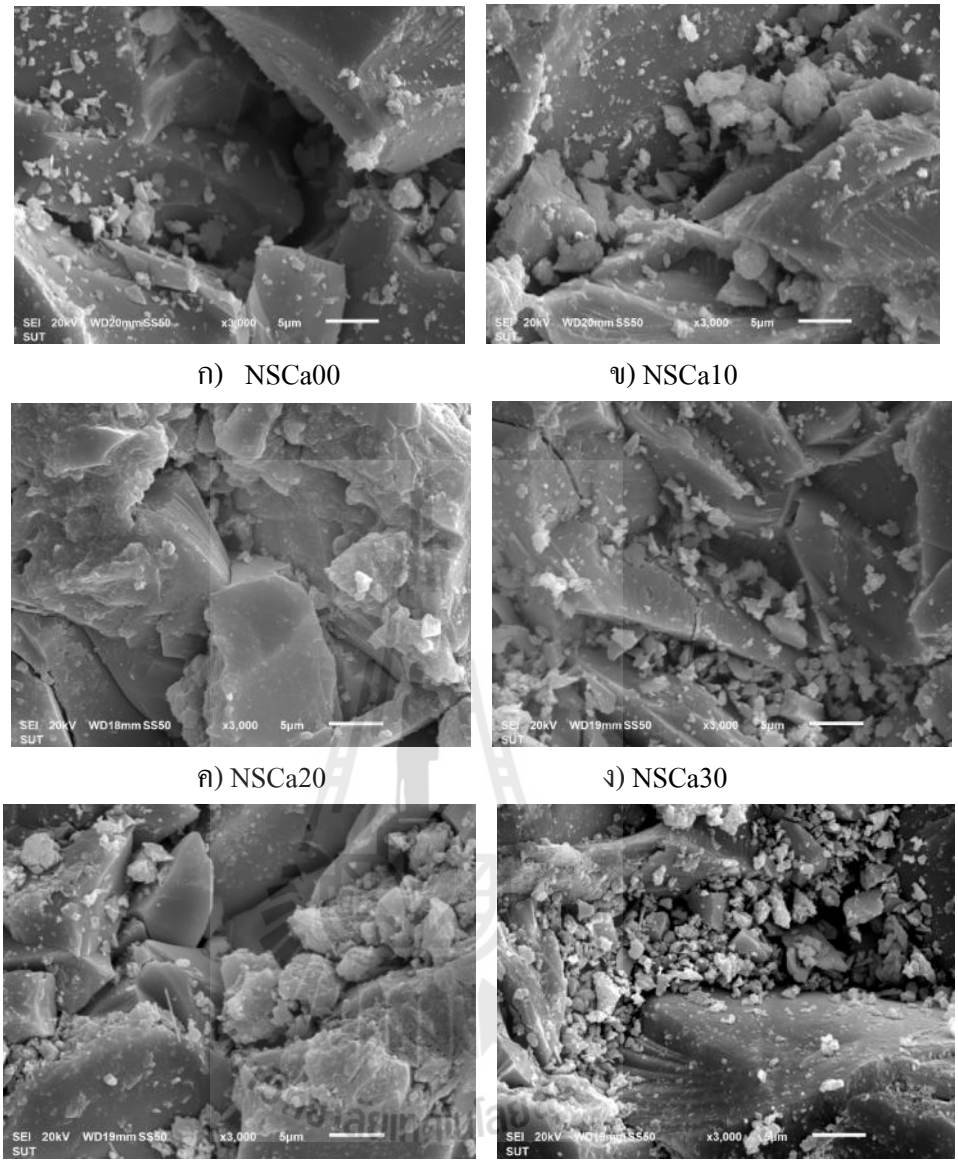
จากรูปที่ 4.7 ค่าหน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายลักษณะเม็ดธรรมชาติ NSCa00, NSCa10, NSCa20 และ NSCa30 มีหน่วยน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เกิดจากความสามารถเทได้ของมอร์ต้าร์ เพราะมีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa40 และ NSCa50 มีหน่วยน้ำหนักน้อยกว่าเล็กน้อย เพราะปริมาณแคลไซต์เพิ่มขึ้นความต้องการน้ำในการผสมเพิ่มขึ้นตาม เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากันทุกสัดส่วนผสม ทำให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ต่ำ และเกิดความสามารถเทได้ต่ำเช่นเดียวกัน ทำให้เนื้อของมอร์ต้าร์มีความพรุนและเกิดช่องว่างภายในเนื้อของมอร์ต้าร์ จึงทำให้เกิดหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 4.6 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ CSCa



รูปที่ 4.7 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ NSCa



ก) NSCa00 ข) NSCa10

ค) NSCa20 ง) NSCa30

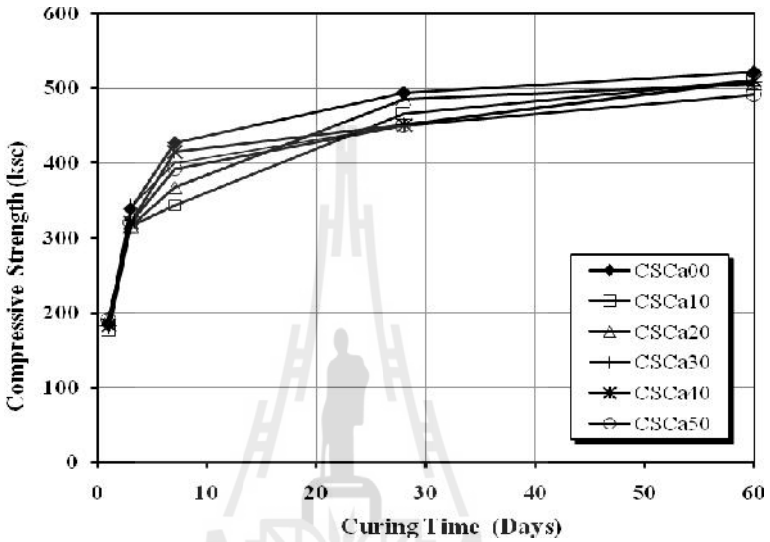
จ) NSCa40 ฉ) NSCa50

รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายกำลังสูง SEM ของมอร์ต้าร์ NSCa ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทราย

จากรูปที่ 4.8 รูปถ่าย SEM ลักษณะของโครงสร้างภายในของเนื้อมอร์ต้าร์ ขยาย 3,000 เท่า พบว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วน NSCa00 และมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์ร้อยละการแทนที่ในปริมาณที่ต่ำคือ NSCa10, NSCa20 และ NSCa30 มีลักษณะเนื้อแน่น มีความพรุนต่ำ ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa40 และ NSCa50 ลักษณะเนื้อของมอร์ต้าร์มีความพรุน เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณแคลไซต์ในส่วนผสม จะส่งผลให้มอร์ต้าร์มีค่าร้อยละการไหลแผ่ต่ำ นั่นคือความสามารถเทได้ต่ำเช่นเดียวกัน ทำให้เนื้อของมอร์ต้าร์มีความพรุนและเกิดช่องว่างภายในเนื้อของมอร์ต้าร์

4.2.3 คุณสมบัติด้านการรับกำลังอัด

รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดสอบการรับกำลังอัด ของมอร์ต้าร์ CSCa พบว่าช่วงอายุ 1 และ 3 วัน กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย CS ทุกสัดส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม CSCa00

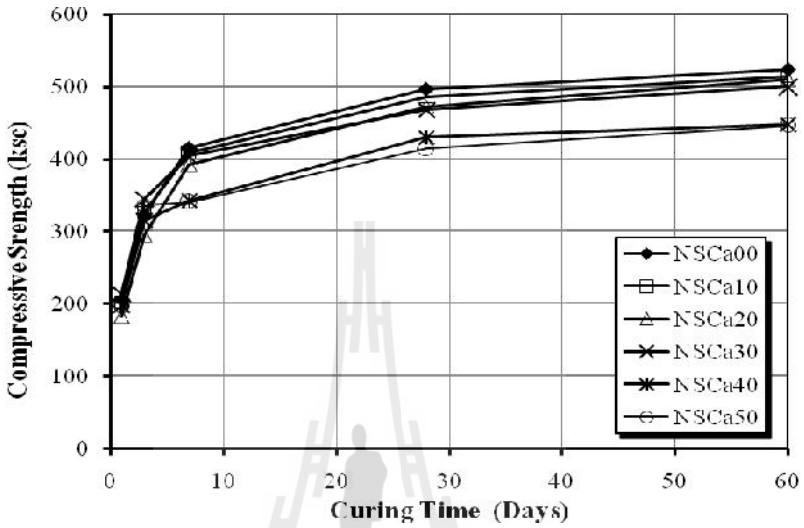


รูปที่ 4.9 การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa

เมื่ออายุมอร์ต้าร์เพิ่มเป็น 7 วัน กำลังของมอร์ต้าร์ควบคุม CSCa00 มีค่าเท่ากับ 426 กก./ซม^2 ที่สัดส่วนการใช้แคลไซต์แทนที่ทรายมีแนวโน้มในการรับกำลังลดลง CSCa10 มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 343 กก./ซม^2. โดยการรับกำลังสามารถรับได้เป็นร้อยละ 81 ของ CSCa00 ในช่วงอายุการบ่มที่ 28 วัน กำลังอัดของ CSCa00 มีค่าเท่ากับ 493 กก./ซม^2 สำหรับมอร์ต้าร์ CSCa20 สามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม คือ 485 กก./ซม^2 ส่วนมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa10, CSCa30, CSCa40 และ CSCa50 รับกำลังได้ 465, 450, 451 และ 450 กก./ซม^2 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้แคลไซต์แทนที่ทรายที่ควบคุมขนาดคละในส่วนผสมมอร์ต้าร์ ส่งผลให้กำลังอัดลดลงในปริมาณที่น้อย ประมาณร้อยละ 4-7

เมื่ออายุการบ่มที่ 60 วัน การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CSCa00 สามารถรับกำลังได้เท่ากับ 521 กก./ซม^2 มอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa10, CSCa20, CSCa30 และ CSCa40 สามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ CSCa00 เท่ากับ 510, 506, 508, และ 510 กก./ซม^2 หรือคิดเป็นความสามารถในการรับกำลังเฉลี่ยเป็นร้อยละ 98 ของมอร์ต้าร์ CSCa00 ส่วนมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa50 สามารถ

รับกำลังได้เท่ากับ 490 กก./ซม^2 หรือความสามารถในการรับคิดเป็นร้อยละ 94 ของ CSCa00 จะเห็นได้ว่าเมื่ออายุการบ่มที่ 60 วัน การใช้แคลไซต์แทนที่ทรายที่ควบคุมขนาดคละในส่วนผสมมอร์ตาร์ส่งผลให้กำลังอัดลดลงในปริมาณที่น้อย ประมาณร้อยละ 2-6



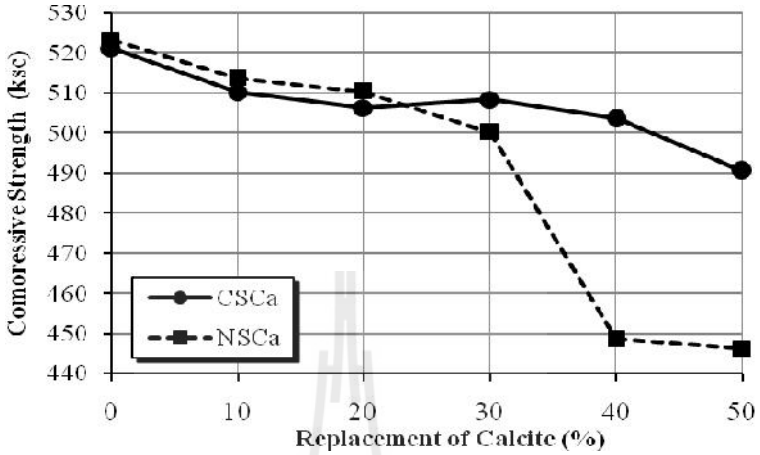
รูปที่ 4.10 การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์แคลไซต์ NSCa

จากรูปที่ 4.10 แสดงผลการทดสอบการรับกำลังอัดของ มอร์ต้าร์ NSCa ที่ช่วงอายุ 1 และ 3 วัน มอร์ต้าร์ NSCa00 สามารถรับกำลังได้ 206 และ 323 กก./ซม^2. ตามลำดับ สำหรับมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย NS ทุกสัดส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม

ที่ช่วงอายุ 28 วันพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa00 มีค่าเท่ากับ 497 กก./ซม^2. ส่วนกำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa10, NSCa20 และ NSCa30 มีค่าเท่ากับ 485, 472 และ 467 กก./ซม^2 ซึ่งกำลังลดลงคิดเป็นร้อยละ 2, 5, และ 6 ของมอร์ต้าร์ NSCa00 ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa40 และ NSCa50 สามารถรับกำลังได้เท่ากับ 430 และ 414 กก./ซม^2 กำลังลดลงคิดเป็นร้อยละ 13 และ 17 ของมอร์ต้าร์ NSCa00 ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของแคลไซต์

ที่อายุการบ่ม 60 วัน การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa00 สามารถรับกำลังได้เท่ากับ 523 กก./ซม^2. มอร์ต้าร์แคลไซต์ NSCa10, NSCa20 และ NSCa30 สามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ CSCa00 เท่ากับ 513, 510, และ 500 กก./ซม^2 หรือคิดเป็นความสามารถในการรับกำลังเฉลี่ยเป็นร้อยละ 97 ของมอร์ต้าร์ NSCa00 ส่วนมอร์ต้าร์แคลไซต์ NSCa40 และ NSCa50 สามารถรับกำลังได้เท่ากับ 448 กก./ซม^2 และ 446 กก/ซม^2 หรือความสามารถในการรับคิดเป็นเฉลี่ยร้อยละ 87

ของ NSCa00 จะเห็นได้ว่าเมื่ออายุการบ่มที่ 60 วัน การใช้แคลไซต์แทนที่ทรายขนาดคละธรรมชาติในส่วนผสมมอร์ต้าร์ส่งผลให้กำลังอัดลดลงในปริมาณที่น้อย ประมาณร้อยละ 3-15



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa และ NSCa ที่อายุการบ่ม 60 วัน

รูปที่ 4.11 ที่อายุการบ่ม 60 วัน การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CSCa และ NSCa พบว่าการใช้แคลไซต์แทนที่ทรายที่ร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 การรับกำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้เม็ดทรายธรรมชาติ NSCa สามารถรับกำลังได้เทียบเท่ากับมอร์ต้าร์ที่ควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแคลไซต์สูงขึ้น มอร์ต้าร์ NSCa มีการรับกำลังลดลงมากจากมอร์ต้าร์ควบคุม (CSCa00)

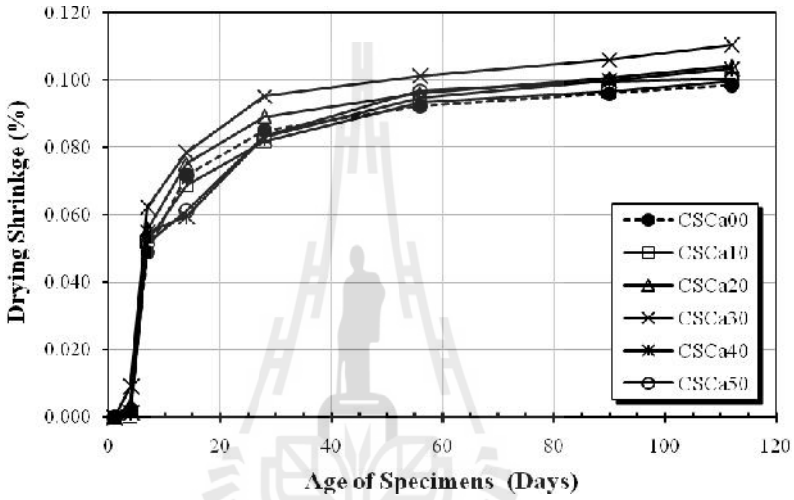
การใช้แคลไซต์แทนที่ร้อยละ 40 และ 50 สามารถรับกำลังได้ร้อยละ 86 ของมอร์ควบคุม CSCa00 กำลังลดลงคิดเป็นร้อยละ 14 ซึ่งเห็นได้ว่าการใช้แคลไซต์แทนที่ทราย CS ที่ร้อยละสูงส่งผลให้การรับกำลังลดลงในปริมาณที่น้อย เมื่อใช้แคลไซต์แทนที่ทราย NS การรับกำลังลดลงในปริมาณที่สูง เมื่อใช้แคลไซต์แทนที่ทรายที่มีความละเอียด (NS) ส่งผลให้มอร์ต้าร์มีค่าร้อยละการไหลแผ่ต่ำ ไม่มีความสามารถเทได้ ส่งผลให้มอร์ต้าร์มีความพรุนดังรูปที่ 4.8 ทำให้มอร์ต้าร์สามารถรับกำลังได้ต่ำกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม (CSCa00)

4.3 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้าร์

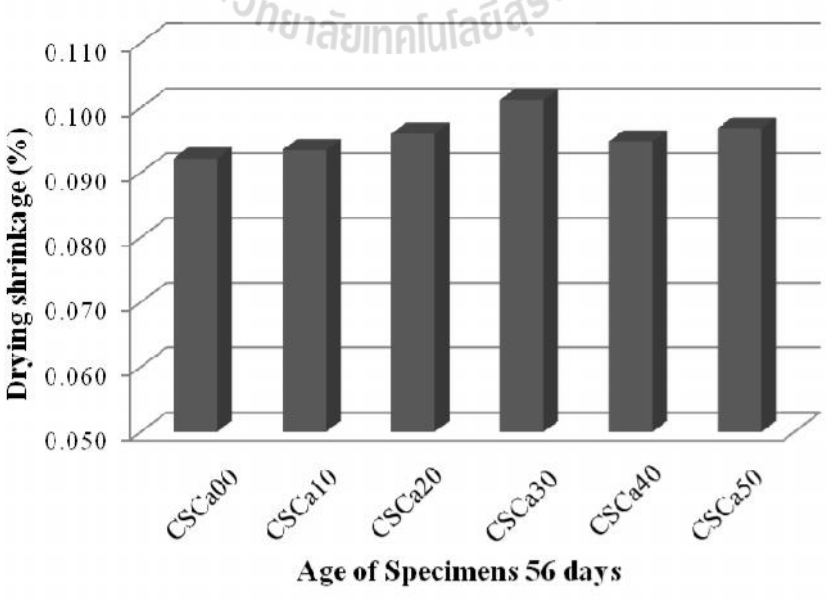
การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้าร์ในการศึกษาครั้งนี้คือ คุณสมบัติการหดตัวแห้งการสูญเสียน้ำหนักและการต้านทานการขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

4.3.1 คุณสมบัติด้านการหดตัวแห้ง

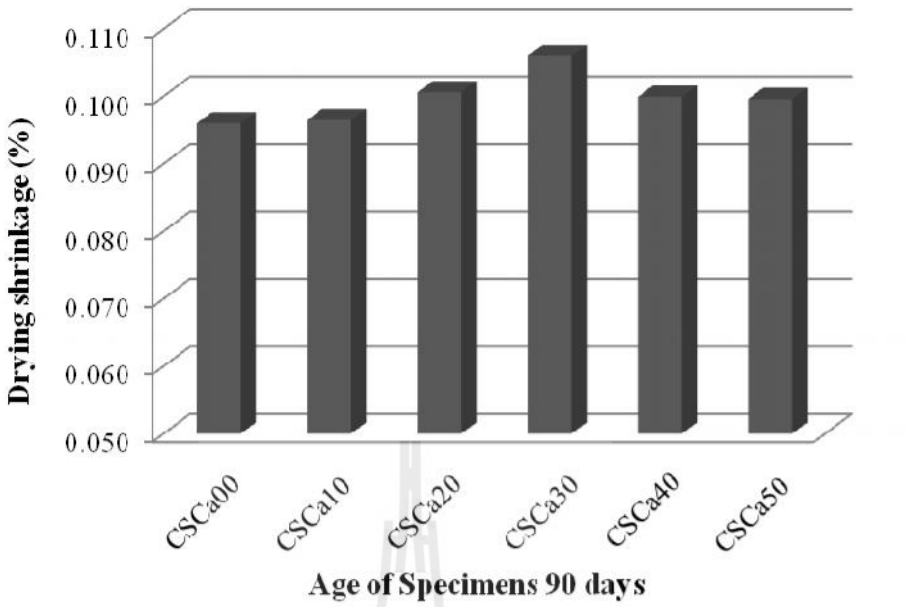
จากรูปที่ 4.12 แสดงค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa พบว่ามอร์ต้าร์ CSCa มีการหดตัวแห้งในช่วงอายุต้นถึงอายุ 14 วัน ที่สูง การใช้แคลไซต์แทนที่ทรายไม่มีผลกระทบต่อการหดตัวแห้ง ที่อายุ 28 วัน การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ยังคงเพิ่มขึ้น แต่มีการเพิ่มขึ้นในอัตราที่ต่ำจนถึงช่วงอายุปลายของการทดสอบ ซึ่งค่าความชันของเส้นกราฟมีการลดลง พฤติกรรมการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมไม่แตกต่างกัน เห็นได้ว่ากากแร่แคลไซต์ไม่ส่งผลกระทบต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์



รูปที่ 4.12 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa

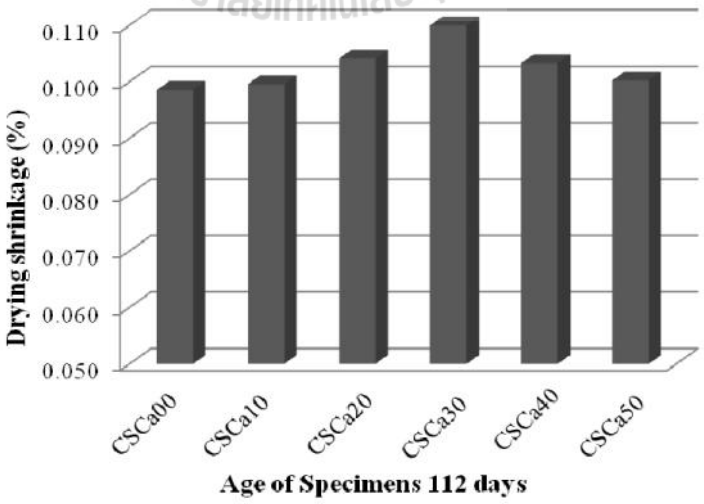


รูปที่ 4.13 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 56 วัน



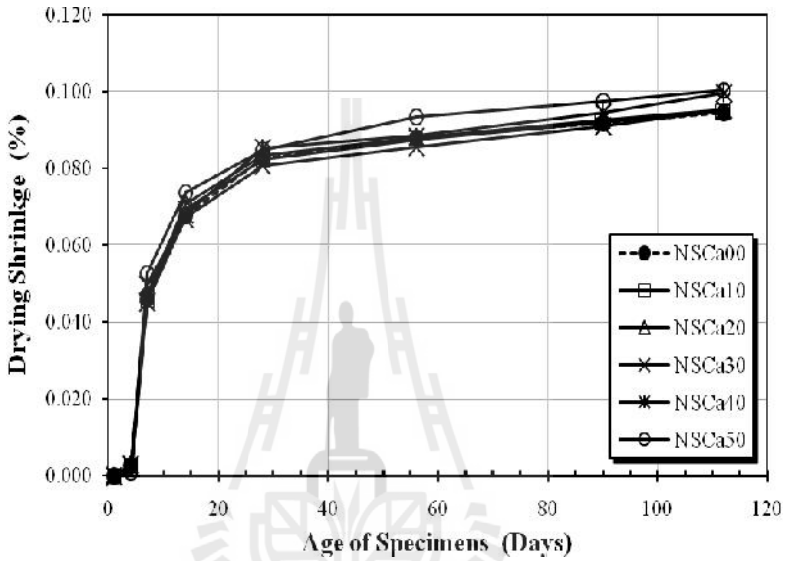
รูปที่ 4.14 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 4.13 และ4.14 แสดงค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 56 วันและ 90 วัน พบว่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa00, CSCa10, CSCa20, CSCa40 และ CSCa50 มีค่าการหดตัวใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ CSCa00 เท่ากับร้อยละ 0.09 มอร์ต้าร์ CSCa30 มีการหดตัวแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.10 และการหดตัวสูงกว่าทุกสัดส่วนผสม มีค่าความแตกต่างการหดตัวจากมอร์ต้าร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 0.01



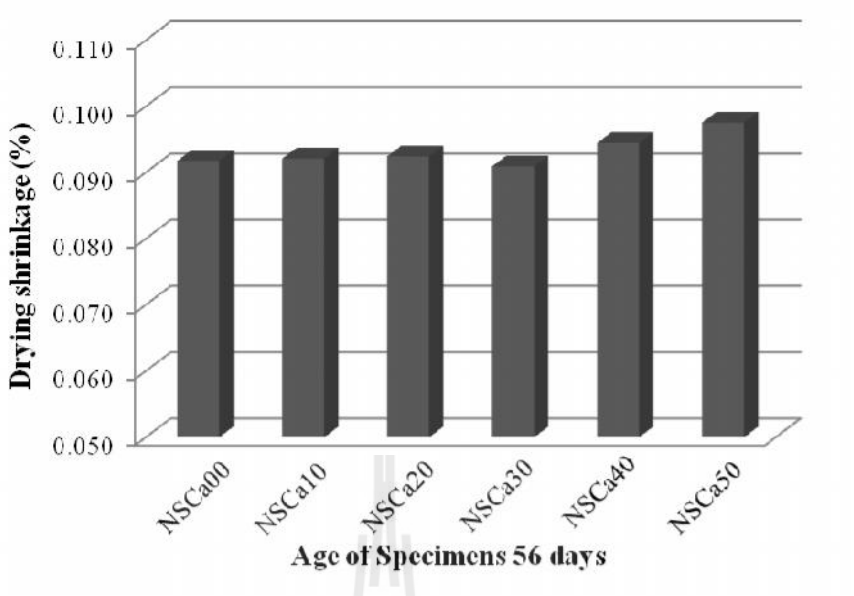
รูปที่ 4.15 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 112 วัน

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa ที่อายุการบ่ม 112 วัน พบว่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa00, CSCa10 และ CSCa20 มีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 0.09 ส่วนมอร์ต้าร์ CSCa40 และ CSCa50 มีค่าการหดตัวแห้งเท่ากับร้อยละ 0.10 มอร์ต้าร์ CSCa30 มีการหดตัวแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.11 และการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ CSCa30 มีการหดตัวสูงกว่าทุกสัดส่วนผสม มีค่าความแตกต่างการหดตัวจากมอร์ต้าร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 0.02

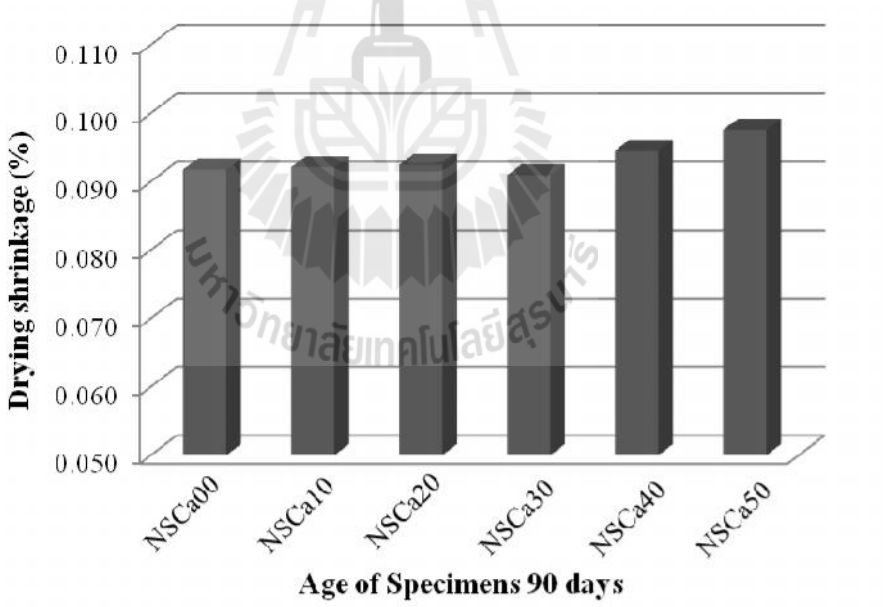


รูปที่ 4.16 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa

จากรูปที่ 4.16 ค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ในช่วงอายุต้นถึงอายุ 14 วัน มอร์ต้าร์มีการหดตัวแห้งที่สูงเช่นเดียวกันกับมอร์ต้าร์ CSCa ซึ่งเส้นกราฟมีความชันค่อนข้างมากและการใช้แคลไซต์แทนที่ทรายไม่มีผลกระทบต่อการหดแห้งตัวเช่นกัน ที่อายุ 28 วัน การหดตัวของมอร์ต้าร์ยังคงเพิ่มขึ้น แต่มีการเพิ่มขึ้นในอัตราต่ำลง โดยค่าความชันของเส้นกราฟมีการลดลง พฤติกรรมการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมไม่แตกต่างกัน เห็นได้ว่าขนาดคละของทรายและกากแร่แคลไซต์ไม่ส่งผลกระทบต่อการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์เช่นเดียวกันกับมอร์ต้าร์ CSCa



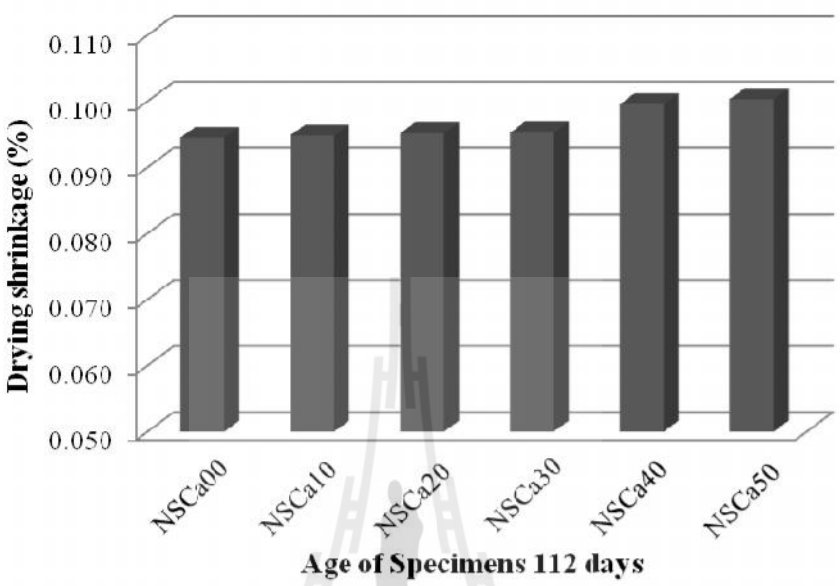
รูปที่ 4.17 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 56 วัน



รูปที่ 4.18 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 4.17 และ 4.18 ค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 56 วันและ90 วัน พบว่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa00, NSCa10, NSCa20, NSCa30, NSCa40 มีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 0.092 แต่มอร์ต้าร์ NSCa50 มีการหดตัวแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.097 ซึ่งมีค่า

ความแตกต่างของการหดตัวเท่ากับร้อยละ 0.005 ของมอร์ต้าร์ควบคุม ซึ่งมีอัตราการหดตัวแห้งแตกต่างกันน้อยมาก



รูปที่ 4.19 การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 112 วัน

จากรูปที่ 4.19 แสดงค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ NSCa ที่อายุการบ่ม 112 วัน เห็นได้ว่าการหดตัวแห้งสำหรับมอร์ต้าร์ NSCa00, NSCa10, NSCa20, NSCa30, NSCa40 มีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 0.09 แต่มอร์ต้าร์ NSCa50 มีการหดตัวแห้งสูงสุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.10 ซึ่งมีค่าความแตกต่างของการหดตัวเท่ากับร้อยละ 0.01 ของมอร์ต้าร์ควบคุม

ทั้งนี้กากแร่แคลไซต์เป็นสายแร่ได้จากหินปูนและหินอ่อน ซึ่งเป็นกลุ่มชนิดของมวลรวมที่ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวต่ำ ดังนั้นเมื่อผสมเข้าแทนที่ทรายจึงไม่ส่งผลให้การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์เกิดความแตกต่างกัน

4.3.2 การต้านทานทนต่อซัลเฟตเนื่องจากแช่ในสารละลาย

การต้านทานซัลเฟตในครั้งนี้จะพิจารณาถึงผลกระทบจากการสูญเสียน้ำหนักและการต้านทานต่อการขยายตัวที่แช่ในสารละลายซัลเฟต โดยพิจารณาจากการแช่ในสารละลาย 2 ชนิด คือ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

1) การสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ในสารละลายซัลเฟต

การประเมินผลการต้านทานซัลเฟตโดยการวัดการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50x50x50 มม. ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานและใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายทุกสัดส่วนผสม ทำการเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

กรณีแช่ในสารละลายทั้งสองชนิดคือ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าที่อายุการแช่ในสารละลายเท่ากับ 112 วัน ตัวอย่างมอร์ต้าร์ยังไม่ถูกกัดกร่อนจากสารละลายทั้งสองชนิด ทุกสัดส่วนผสมไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก ทั้งนี้เป็นเพราะว่ากลไกการทำลายมิได้สูญเสียเนื้อเพสต์ไป จึงทำให้ไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก

รูปที่ 4.20 และ 4.21 แสดงภาพถ่ายของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่แช่ในสารละลาย 112 วันทั้งสองชนิด ซึ่งจะเห็นถึงลักษณะของตัวอย่างได้ชัดเจนว่าไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก หรือผิวของมอร์ต้าร์ยังไม่มีการผุกร่อนแต่อย่างใด จะมีเพียงลักษณะของการแตกร้าวมากกว่า

รูปที่ 4.20 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ CSCa แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน

รูปที่ 4.21 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCa แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน

รูปที่ 4.22 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ CSCa แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCa แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน

ก) NSCe

ข) CSCe

รูปที่ 4.24 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCe และ CSCeแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน

ก) NSCe

ข) CSCe

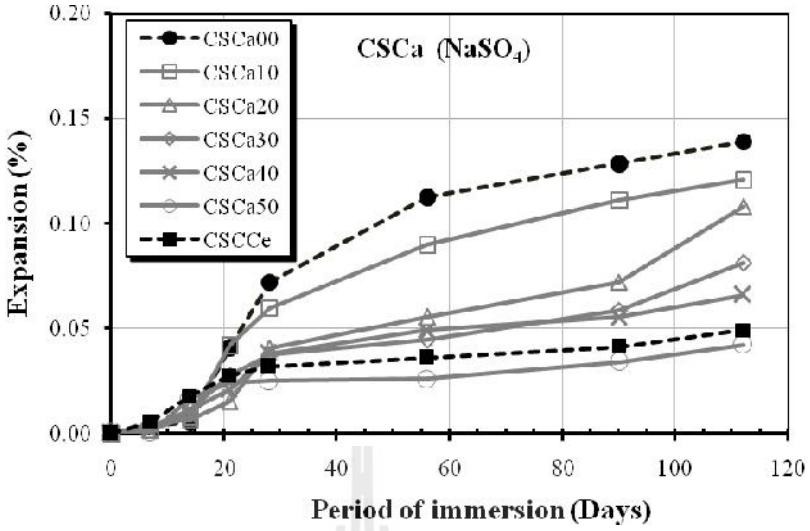
รูปที่ 4.25 ตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCe และ CSCe แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน

ส่วนผลกระทบของสารละลายซัลเฟตต่อการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 พบว่าเมื่ออายุการแช่ในสารละลายซัลเฟตที่ 112 วัน สารละลายทั้งสองชนิดยังไม่กัดกร่อนแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ ก้อนตัวอย่างจึงไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก ทั้งนี้เป็นเพราะว่ากลไกการทำลายมิได้สูญเสียเนื้อเพสต์ไป จึงทำให้ไม่มีการสูญเสียน้ำหนักเช่นกัน รูปตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่แช่ในสารละลายซัลเฟต ดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25

2) การต้านทานต่อการขยายตัวเนื่องจากแช่ในสารละลายซัลเฟต

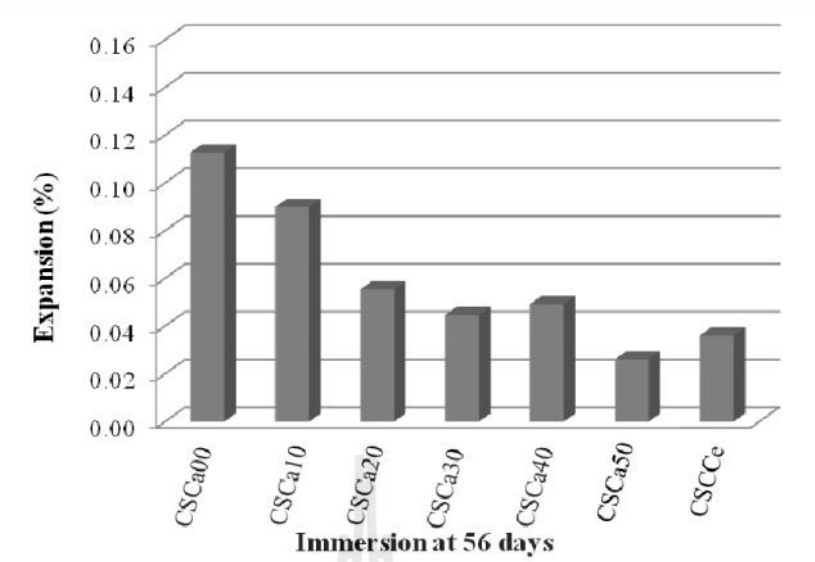
การต้านทานต่อการขยายตัวทนซัลเฟต โดยวัดการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 25x25x285 มม. ซึ่งได้พิจารณาถึงผลกระทบของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานและใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายทุกสัดส่วนผสม ทำการเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

2.1) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa

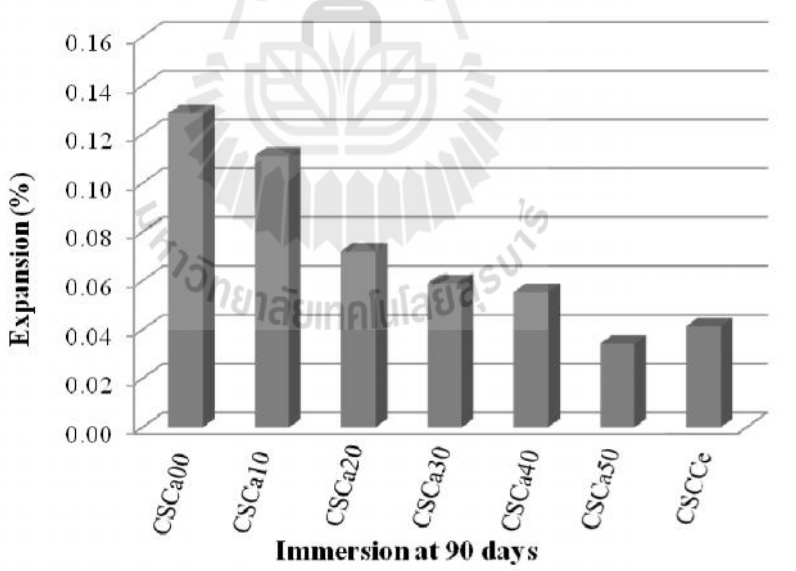


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa

จากรูปที่ 4.26 พบว่ามอร์ต้าร์ CSCa ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงทำให้เกิดปริมาณยิบซั่ม และ Ettringite น้อยกว่า ทำให้เกิดการขยายตัวน้อยกว่า การขยายตัวของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมมีการขยายตัวใกล้เคียงกันที่ช่วงอายุต้นถึง 21 วัน ที่อายุการแช่ในสารละลายที่ 28 วัน ถึง 112 วัน การขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทราย ขยายตัวต่ำกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วน และCSCa50 มีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เล็กน้อย



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน

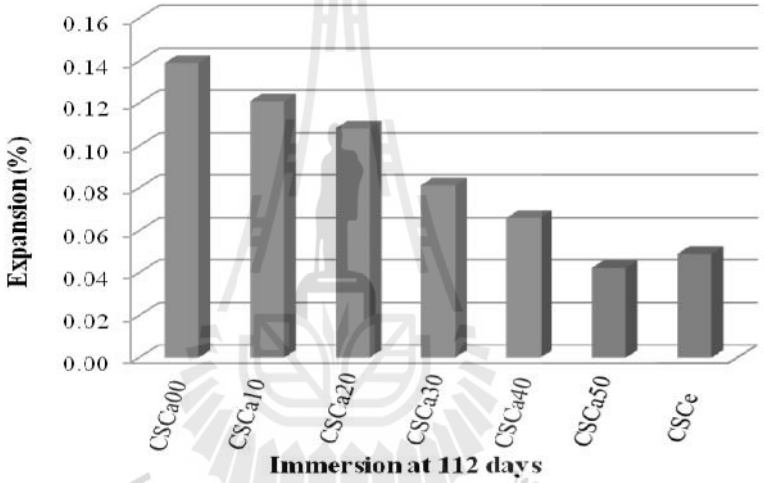


รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน

จากรูปที่ 4.27 อายุการแช่ในสารละลายเท่ากับ 56 วัน พบว่าการขยายตัวของ CSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.113 และ CSCa10, CSCa20 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.090 และ

0.055 มอร์ต้าร์ CSCa30 และ CSCa40 มีการขยายตัวที่ใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.045 และ 0.049 มอร์ต้าร์ CSCa50 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.026 สำหรับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.036

จากรูปที่ 4.28 อายุการแช่ในสารละลายเท่ากับ 90 วัน พบว่าการขยายตัวของ CSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.129 มอร์ต้าร์ CSCa10, CSCa20 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.111 และ 0.072 มอร์ต้าร์ CSCa30 และ CSCa40 มีการขยายตัวที่ใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.059 และ 0.055 มอร์ต้าร์ CSCa50 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.034 สำหรับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.041

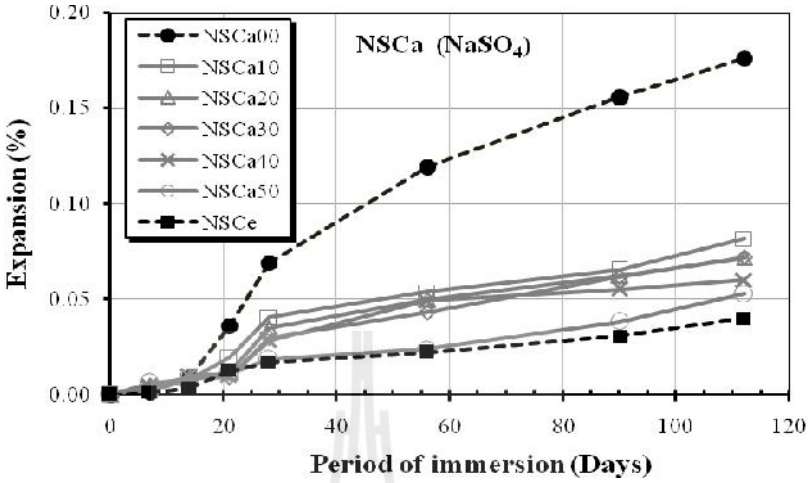


รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

รูปที่ 4.29 อายุการแช่ในสารละลายเท่ากับ 112 วัน พบว่าการขยายตัวของ CSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.139 มอร์ต้าร์ CSCa10, CSCa20, CSCa30, CSCa40 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.121, 0.108, 0.081, 0.066 ส่วน มอร์ต้าร์ CSCa50 มีการขยายตัวใกล้เคียงและมีแนวโน้มในการขยายตัวต่ำกว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.042

เห็นได้ว่าการใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายส่งผลให้การขยายตัวทนซัลเฟตลดลงจากการใช้ทรายล้วน เมื่ออายุการแช่ในสารละลาย 112 วัน

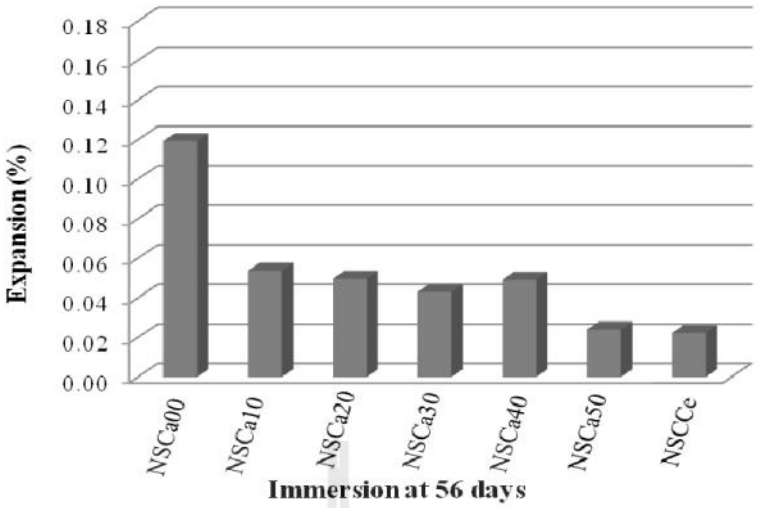
2.2) กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa



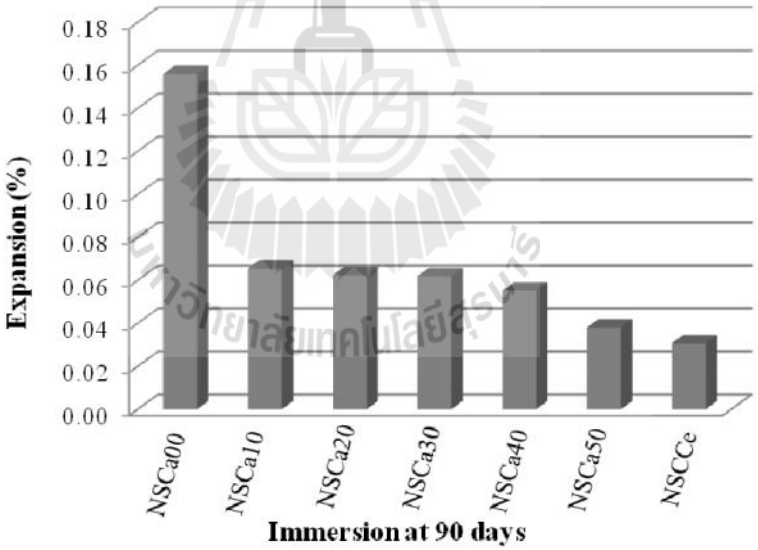
รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa

จากรูปที่ 4.30 กรณีแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการขยายตัวมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายทุกสัดส่วนผสม ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa50 จากอายุต้นถึงช่วงอายุ 56 วัน มีการขยายตัวใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

จากรูปที่ 4.31 อายุการแช่ในสารละลายที่ 56 วัน พบว่าการขยายตัวของ NSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.119 มอร์ต้าร์ NSCa10 และ NSCa20 มีการขยายตัวใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.054 และ 0.050 สำหรับ NSCa30 และ NSCa40 มีการขยายตัวใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.043 และ 0.049 ส่วน NSCa50 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.024 ซึ่งใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.022



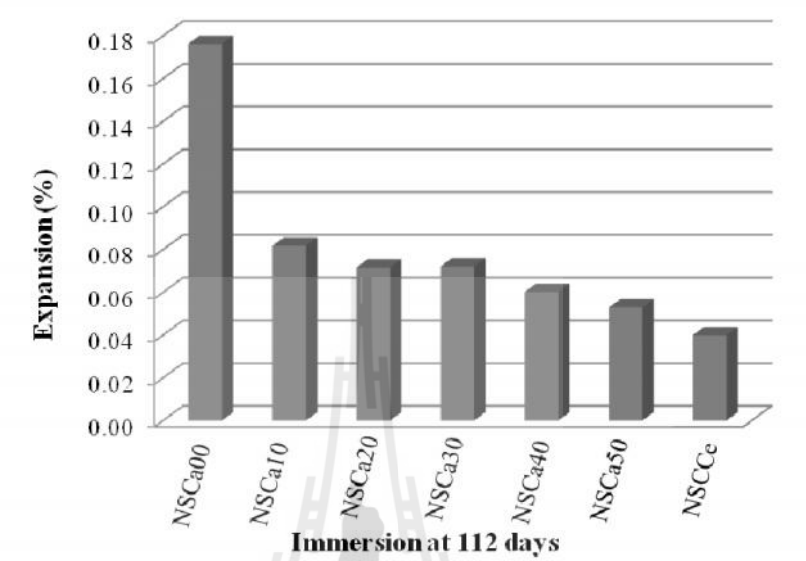
รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน

จากรูปที่ 4.32 อายุการแช่ในสารละลายที่ 90 วัน พบว่าการขยายตัวของ NSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.156 มอร์ต้าร์ NSCa10, NSCa20 และ NSCa30 มีการขยายตัวใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.066 และ 0.062 สำหรับ NSCa40 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.055 ส่วน

NSCa50 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.038 มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.031

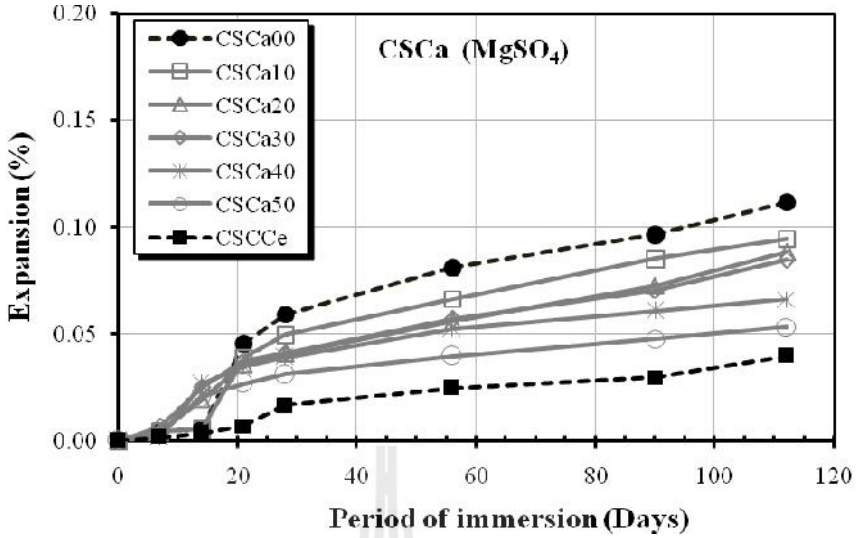


รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.33 อายุการแช่ในสารละลายที่ 112 วัน พบว่าการขยายตัวของ NSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.176 มอร์ต้าร์ NSCa10 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.082 NSCa20 และ NSCa30 มีการขยายตัวเท่ากันเท่ากับร้อยละ 0.072 สำหรับ NSCa40, NSCa50 มีการขยายตัวใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.060, 0.053 และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.040

จากมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายขนาดคละธรรมชาติ และทรายที่คัดขนาดคละเมื่อแช่ในสารละลายที่อายุ 112 วัน มีการขยายตัวที่ใกล้เคียงกัน การใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายส่งผลให้การขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟตลดลงจากการใช้ทรายล้วนเช่นกัน

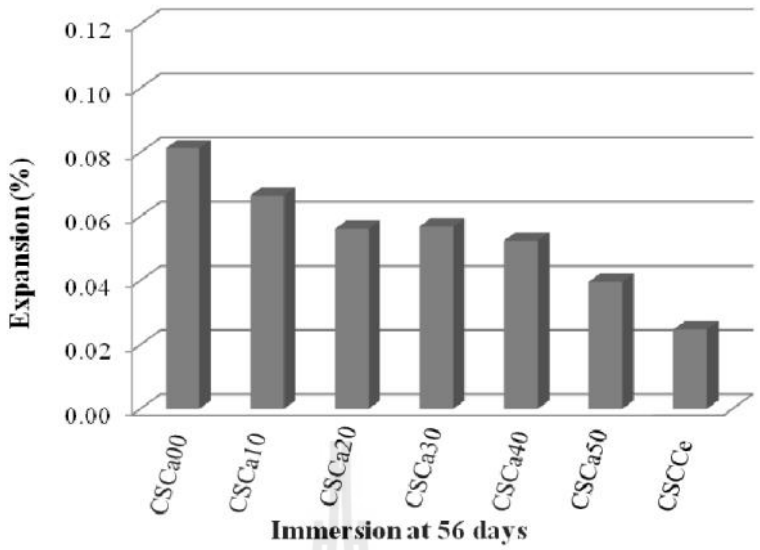
2.3) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa



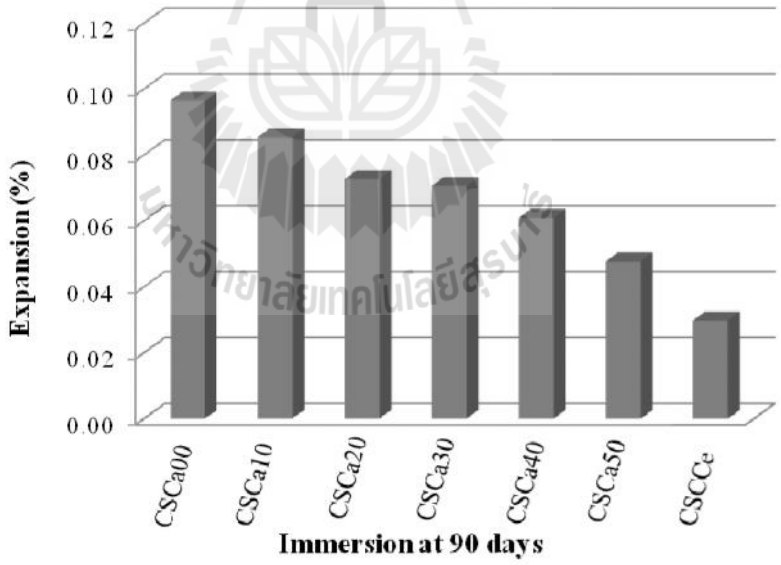
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa

จากรูปที่ 4.34 กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุต้นถึง 28 วัน การขยายตัวมีแปรปรวน และมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เช่นกัน และที่อายุของการแช่ในสารละลาย 28 วัน ถึง 112 วัน มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายทุกสัดส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วน และขยายตัวจะลดต่ำลงตามปริมาณการแทนที่ของแคลไซต์ที่เพิ่มขึ้น ส่วน CSCa50 มีการขยายตัวใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

จากรูปที่ 4.35 อายุการแช่ในสารละลายที่ 56 วัน พบว่าการขยายตัวของ CSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.081 มอร์ต้าร์ CSCa10 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.067 มอร์ต้าร์CSCa20, CSCa30, CSCa40 มีการขยายตัวไกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.056, 0.057, 0.052 และ CSCa50 มีการขยายตัวต่ำเท่ากับร้อยละ 0.040 สำหรับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.025



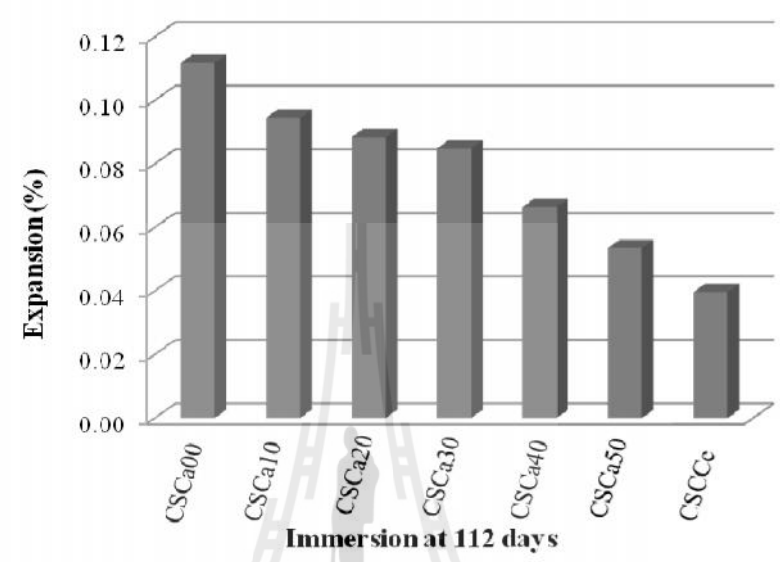
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน

จากรูปที่ 4.36 อายุการแช่ในสารละลายที่ 90 วัน พบว่าการขยายตัวของ CSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.097 มอร์ต้าร์ CSCa10 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.085 มอร์ต้าร์CSCa20,

CSCa30 มีการขยายตัวใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.073, 0.071 และ CSCa40, CSCa50 มีการขยายตัวต่ำเท่ากับร้อยละ 0.061, 0.048 สำหรับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.030



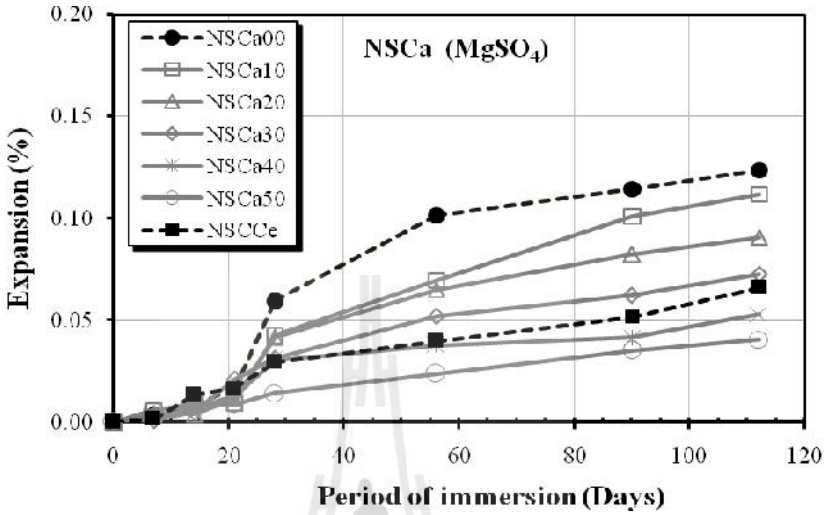
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.37 อายุการแช่ในสารละลายที่ 112 วัน พบว่าการขยายตัวของ CSCa00 เท่ากับร้อยละ 0.112 มอร์ต้าร์ CSCa10 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.094 มอร์ต้าร์ CSCa20, CSCa30 มีการขยายตัวใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 0.088, 0.085 ส่วน CSCa40, CSCa50 มีการขยายตัวในอัตราต่ำเท่ากับร้อยละ 0.066, 0.054 สำหรับมอร์ต้าร์ปูนที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.040

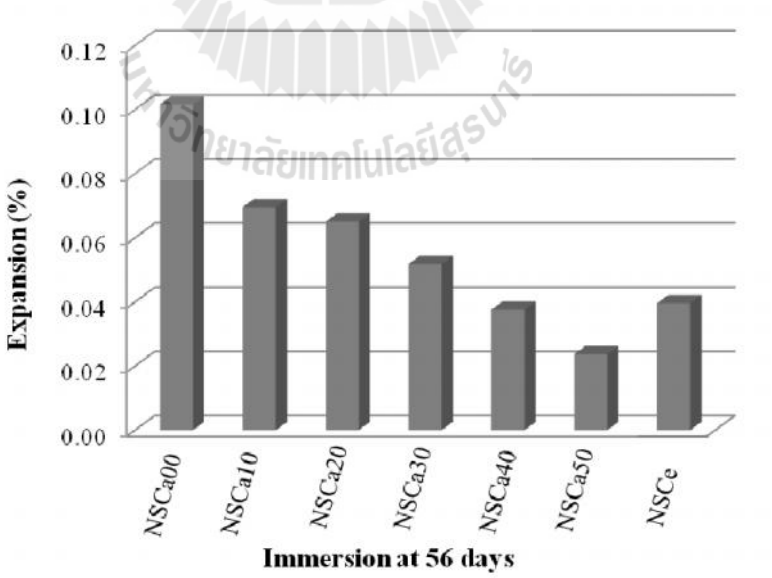
2.3) กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa

จากรูปที่ 4.38 กรณีแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ช่วงอายุต้นถึง 28 วัน มีความแปรปรวน และมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อายุของการแช่ในสารละลาย 28 วัน ถึง 112 วัน พบว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายทุกสัดส่วนผสม มีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วน

ขยายตัวลดต่ำตามการเพิ่มขึ้นของแคลไซต์ ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa50 ขยายตัวต่ำใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

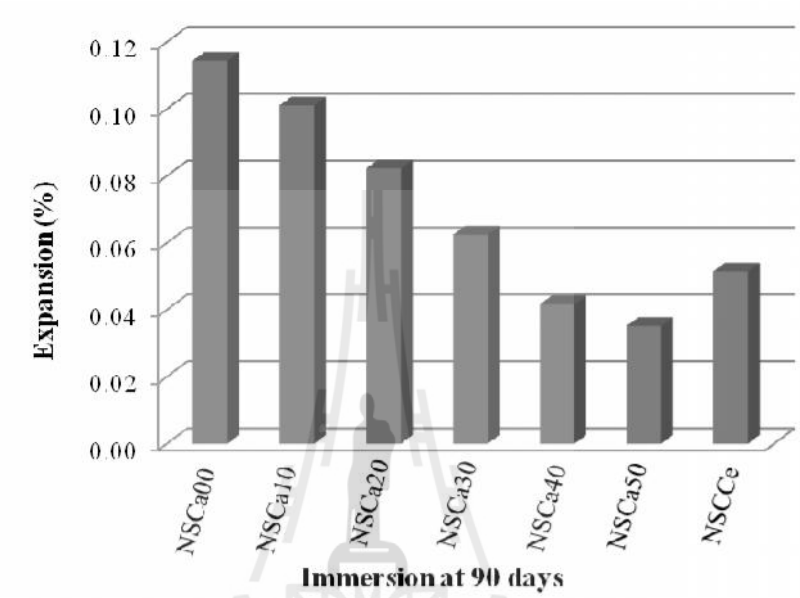


รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa

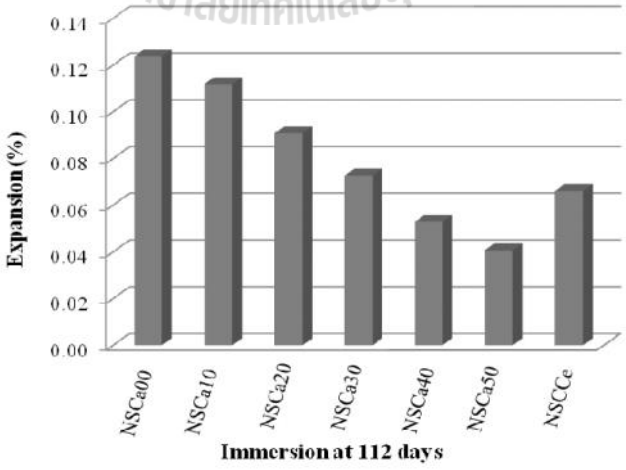


รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 56 วัน

จากรูปที่ 4.39 พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ NSCa00 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.102 ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa10, NSCa20, NSCa30, NSCa40 และ NSCa50 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.070, 0.065, 0.052, 0.038 และ 0.024 ตามลำดับ สำหรับมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.040



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 90 วัน



รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.40 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ NSCa00 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.114 ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa10, NSCa20, NSCa30, NSCa40 และ NSCa50 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.101, 0.082, 0.062, 0.042 และ 0.035 ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ปูนที่ใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.051

จากรูปที่ 4.41 อายุการแช่ในสารละลายที่ 112 วัน พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ NSCa00 ขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.124 ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa10, NSCa20, NSCa30, NSCa40 และ NSCa50 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.112, 0.091, 0.073, 0.053 และ 0.041 ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.066

การต้านทานต่อการขยายตัวที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วนและใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีการขยายตัวมากกว่าแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเล็กน้อย ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายทุกสัดส่วนผสมมีการขยายตัวลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย ทั้งนี้กระบวนการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตเกิดปฏิกิริยากับมวลรวมน้อยมาก จะเกิดปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างปูนซีเมนต์กับซัลเฟตเท่านั้น โดยสารละลายซัลเฟตค่อยๆ ซึมเข้าไปภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตหรือมอร์ต้าร์และทำปฏิกิริยากับเพสต์ ทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ซึ่งมีการขยายตัวและแตกร้าวจนมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตไม่สามารถรับกำลังได้ [23] การใช้กากแร่แคลไซต์ที่ร้อยละสูงผสมแทนทรายส่งผลให้การขยายตัวต่ำเนื่องจาก เมื่อการซึมเข้าเนื้อมอร์ต้าร์เนื่องจากสารละลายซัลเฟตทั้งสองชนิด ค่อยๆ ซึมเข้าภายในเนื้อเข้าไปทำลายแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตแล้วทำให้ภายในเนื้อของมอร์ต้าร์เกิดการขยายตัว การขยายตัวภายในเนื้อมอร์ต้าร์ยังไม่เกิดแรงดันออกสู่ภายนอก เพราะเนื้อของมอร์ต้าร์มีความพรุน ดังรูปที่ 4.8 จึงส่งผลการขยายตัวของมอร์ต้าร์เกิดการขยายตัวต่ำเมื่อแช่มในสารละลายที่อายุ 112 วัน

ก) CSCa00 ข) CSCa10

ค) CSCa20 ง) CSCa30

จ) CSCa40 ฉ) CSCa50

รูปที่ 4.42 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.42 ลักษณะแท่งตัวอย่างของมอร์ต้าร์ CSCa แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน พบว่าลักษณะผิวของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมแตกร้าวเป็นแนวยาวตามมุมของแท่งตัวอย่างทั้ง 4 มุม ส่วนลักษณะผิวของมอร์ต้าร์ยังไม่ถูกกัดกร่อนด้วยสารละลาย

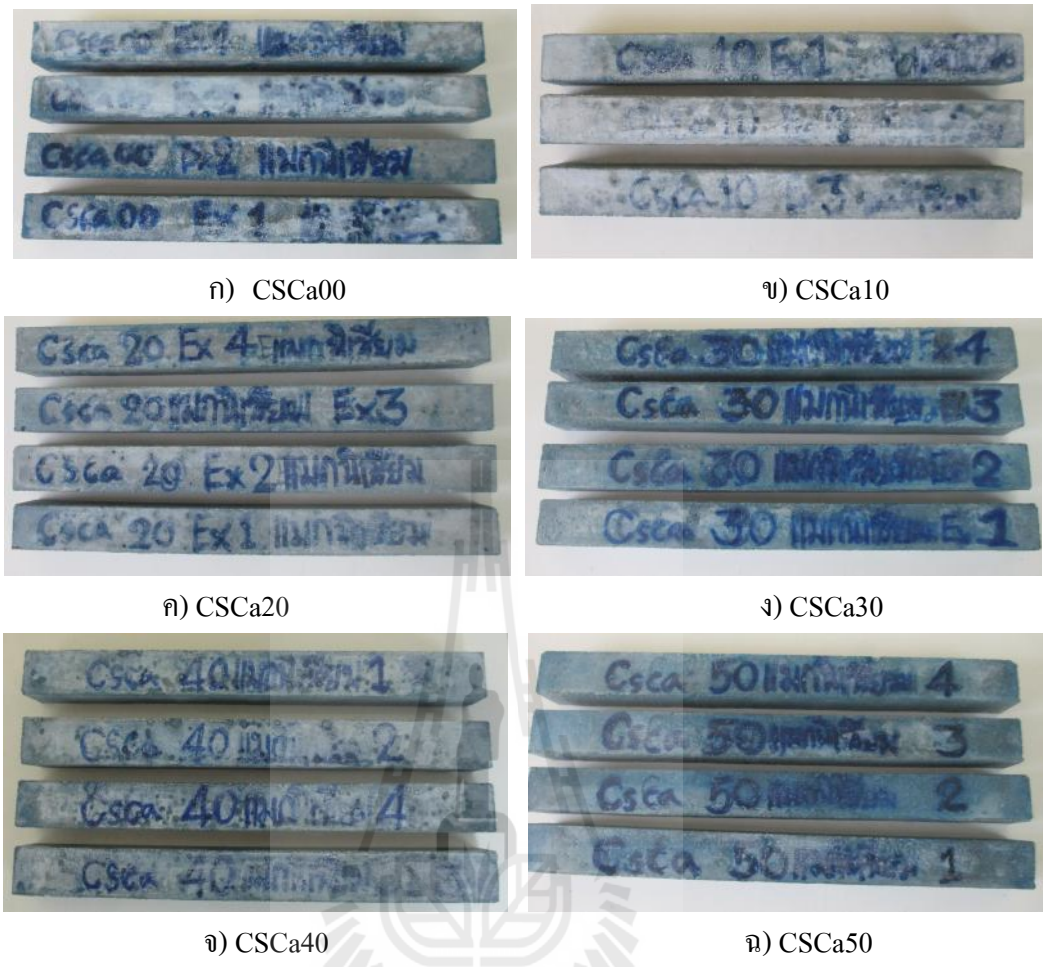
ก) NSCa00 ข) NSCa10

ค) NSCa20 ง) NSCa30

จ) NSCa40 ฉ) NSCa50

รูปที่ 4.43 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.43 ลักษณะแท่งตัวอย่างของมอร์ต้าร์ NSCa แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน พบว่าลักษณะผิวของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมแตกร้าวเป็นแนวยาวตามมุมของแท่งตัวอย่างทั้ง 4 มุม เช่นกันกับมอร์ต้าร์ CSCa และลักษณะผิวยังไม่ถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายเช่นเดียวกัน



ก) CSCa00 ข) CSCa10

ค) CSCa20 ง) CSCa30

จ) CSCa40 ฉ) CSCa50

รูปที่ 4.44 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ CSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.44 ลักษณะแท่งตัวอย่างของมอร์ต้าร์ CSCa แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน พบว่าลักษณะผิวของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง มีเพียงลักษณะผิวภายนอกของแท่งตัวอย่างที่มีสีเข้มขึ้นเนื่องจากการแทรกซึมของสารละลาย แต่ลักษณะผิวยังไม่ถูกกัดกร่อนด้วยสารละลาย

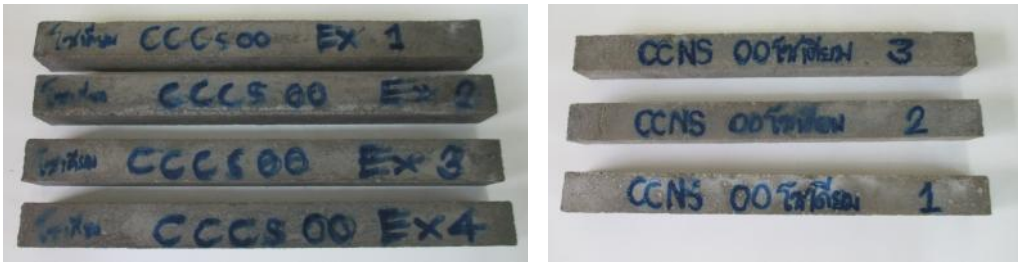
ก) NSCa00 ข) NSCa10

ค) NSCa20 ง) NSCa30

จ) NSCa40 ฉ) NSCa50

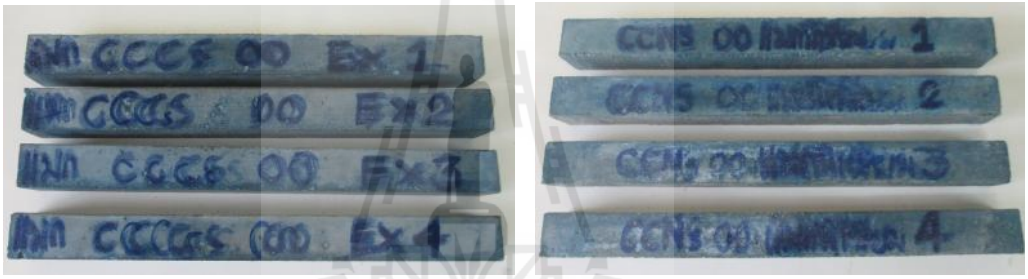
รูปที่ 4.45 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ NSCa อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.45 ลักษณะแท่งตัวอย่างของมอร์ต้าร์ NSCa แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 112 วัน พบว่าลักษณะผิวของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเช่นกันกับมอร์ต้าร์ CSCa มีเพียงลักษณะผิวภายนอกของแท่งตัวอย่างที่มีสีเข้มขึ้นเนื่องจากการแทรกซึมของสารละลาย และผิวยังไม่ถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายเช่นกัน



ก) CSCe ข) NSCe

รูปที่ 4.46 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์แลนด์ประเภทที่ 5 อายุการแช่ที่ 112 วัน



ก) CSCe ข) NSCe

รูปที่ 4.47 ลักษณะแท่งตัวอย่างแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อายุการแช่ที่ 112 วัน

จากรูปที่ 4.46 และ 4.47 ลักษณะแท่งตัวอย่างของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตอายุ 112 วัน พบว่าลักษณะผิวของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง มีเพียงลักษณะผิวภายนอกของแท่งตัวอย่างที่มีสีเข้มขึ้นเนื่องจากการแทรกซึมของสารละลาย และลักษณะผิวยังไม่ถูกกัดกร่อนด้วยสารละลายเช่นกัน ทั้งนี้สารละลายทั้งสองชนิดยังไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อของมอร์ต้าร์ได้เต็มที่จึงไม่สามารถเข้าไปทำลายแคลเซียมซิลิเตไฮเดรตทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อของเพสต์

บทที่ 5
บทสรุป

จากผลการทดสอบด้านกำลังอัด หน่วยน้ำหนัก และการต้านทานต่อซัลเฟต ของการใช้กากแร่แคลไซต์เป็นมวลรวมละเอียดแทนที่ทรายทั้งสองขนาดคละ สามารถสรุปได้ ดังนี้

5.1 สรุปผลงานวิจัย

5.1.1 คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุประสานและมวลรวมละเอียด

1) คุณสมบัติเบื้องต้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ คือระหว่าง 3.11 ถึง 3.15

2) ทรายทั้งสองลักษณะเม็ดคือลักษณะของเม็ดคือทราย CS และ NS มีค่าความถ่วงจำเพาะใกล้เคียงกันคือ 2.54 และ 2.56 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.24 และ 0.36 การดูดซึมน้ำทราย NS มีปริมาณที่มากกว่าเล็กน้อย ส่วนค่าโมดูลัสความละเอียด ทราย NS เท่ากับ 2.50 ต่ำกว่าทราย CS เท่ากับ 2.90 นั่นคือทราย NS มีความละเอียดมากกว่า ส่วนหน่วยน้ำหนักปรากฏของทราย CS เท่ากับ 1,766 กก/ม^3 มากกว่าทราย NS ซึ่งเท่ากับ 1,680 กก/ม^3 และค่าร้อยละช่องว่างของทราย CS เท่ากับ 29.29 น้อยกว่าทราย NS

3) คุณสมบัติเบื้องต้นของกากแร่แคลไซต์ มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60 ร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับ 0.41 ค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.86 ซึ่งกากแร่แคลไซต์มีความละเอียดมากกว่าทรายทั้งสองลักษณะเม็ด และค่อนข้างมีขนาดคละเป็นขนาดเดียว ค่าหน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1,761 กก/ม^3 และค่าร้อยละของช่องว่างเท่ากับร้อยละ 31.23

4) คุณสมบัติทางเคมีของกากแร่แคลไซต์ มีส่วนประกอบหลักคือ CaO มีอยู่ร้อยละ 54.64 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเท่ากับร้อยละ 41.69

5.1.2 คุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ต้าร์

1) ค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยทดลองค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์และหาค่าเฉลี่ยค่า แล้วกำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.59 ทุกสัดส่วนผสม ส่งผลให้การใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายทำให้มอร์ต้าร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นและจะเพิ่มขึ้น

ตามปริมาณการแทนที่ของกากแร่แคลไซต์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากแคลไซต์มีอนุภาคที่ละเอียดกว่าทราย จึงทำให้ต้องใช้น้ำในการเคลือบผิวมากขึ้น

2) หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ทดสอบที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน มอร์ต้าร์ CSCa มีหน่วยน้ำหนักอยู่ระหว่าง 2,153 ถึง 2,244 กก/ม^3 ใกล้เคียงกันทุกสัดส่วนผสม ส่วนมอร์ต้าร์ NSCa สัดส่วนการใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายที่ร้อยละ 0, 10, 20, และ 30 มีหน่วยน้ำหนักใกล้เคียงกัน คือระหว่าง 2,211 ถึง 2,262 กก/ม^3 ส่วนที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายที่ร้อยละ 40 และ 50 มีความพรุนและเกิดช่องว่างภายในเนื้อของมอร์ต้าร์ จึงทำให้เกิดหน่วยน้ำหนักต่ำกว่าเล็กน้อยมีค่าเท่ากับ 2,167 ถึง 2,222 กก/ม^3

หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ทรายล้วนและทั้งที่ใช้กากแร่แคลไซต์ในส่วนผสมมีค่าต่างกันไม่มาก เนื่องจากทั้งทรายและแคลไซต์มีค่าความถ่วงจำเพาะไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีร้อยละของช่องว่างไม่แตกต่างด้วยเช่นกัน

3) การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 สามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม (CSCa00) คิดเป็นความสามารถในการรับกำลังเฉลี่ยเป็นร้อยละ 98 ของมอร์ต้าร์ควบคุม ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ร้อยละ 50 สามารถรับกำลังร้อยละ 94 ของมอร์ต้าร์ควบคุม การใช้แคลไซต์แทนที่ทรายที่ควบคุมขนาดคละส่งผลให้กำลังอัดลดลงในปริมาณที่น้อย ประมาณร้อยละ 2-6

มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแคลไซต์แทนทรายขนาดคละธรรมชาติที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 สามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม (NSCa00) การรับกำลังเฉลี่ยเป็นร้อยละ 97 ของมอร์ต้าร์ควบคุม ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายที่ร้อยละ 40 และ 50 กำลังคิดเป็นร้อยละ 87 ของมอร์ต้าร์ควบคุม การไช้แคลไซต์แทนที่ทรายขนาดคละธรรมชาติในส่วนผสมมอร์ต้าร์ส่งผลให้กำลังอัดลดลงในปริมาณที่มาก ประมาณร้อยละ 3-15

มอร์ต้าร์ CSCa และ NSCa เมื่อใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 สามารถรับกำลังได้เทียบเท่าและใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม(CSCa00) เมื่อเพิ่มปริมาณแคลไซต์สูงขึ้นที่ร้อยละ 40 และ 50 ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายขนาดคละธรรมชาติการรับกำลังลดลงคิดเป็นร้อยละ 12 และ 9 ทั้งนี้เพราะว่ามอร์ต้าร์มีความพรุนจึงส่งผลให้การรับกำลังลดลงเช่นกัน

5.1.3 คุณสมบัติทางกายภาพของมอร์ต้าร์

1) การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายทั้งสองลักษณะเม็ดไม่มีความแตกต่างกันซึ่งมีลักษณะการหดตัวแห้งเหมือนกัน เพราะกากแร่แคลไซต์เป็นสายแร่ได้

จากหินปูนและหินอ่อน ซึ่งเป็นกลุ่มชนิดของมวลรวมที่ทำให้คอนกรีตเกิดการหดตัวต่ำดังนั้นเมื่อผสมเข้าแทนที่มวลรวมละเอียดจึงไม่ส่งผลให้การหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์เกิดความแตกต่างกัน

2) การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการแช่ในสารละลายทั้งสองชนิดคือ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต มอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมต่างไม่มีการสูญเสียน้ำหนัก โดยเป็นการเพิ่มน้ำหนักที่มีค่าไม่แตกต่างกัน หรือแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการเพิ่มขึ้นของน้ำหนัก ทั้งนี้เป็นเพราะว่ากลไกการทำลายของซัลเฟตยังไม่มีการทำลายเนื้อของมอร์ต้าร์ จึงมิได้สูญเสียเนื้อเพสต์ไป

3) การขยายตัวเนื่องจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa และมอร์ต้าร์ NSCa การขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมมีการขยายตัวใกล้เคียงกันที่ช่วงอายุต้นถึงเมื่ออายุการแช่ในสารละลายที่ 112 วัน การขยายตัวของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย ขยายตัวต่ำกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายล้วน ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายที่ร้อยละ 50 มีการขยายตัวต่ำกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เล็กน้อย

4) การขยายตัวเนื่องจากแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ CSCa และมอร์ต้าร์ NSCa การขยายตัวของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุต้นถึงอายุการแช่ในสารละลายที่ 28 วัน การขยายตัวแปรปรวน และมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการขยายตัวค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อายุของการแช่ในสารละลายของที่ 112 วัน มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนที่ทรายทุกสัดส่วนผสม มีการขยายตัวต่ำตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้กากแร่แคลไซต์แทนทราย มอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายที่ร้อยละ 50 มีการขยายตัวลดลงใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์เป็นวัสดุมวลรวมละเอียดในครั้งนี้ พยายามจะใช้วัสดุในลักษณะที่เป็นเม็ดกองเก็บตามธรรมชาติ โดยยังไม่ผ่านกระบวนการบดละเอียดหรือการเผา เพราะกากแร่แคลไซต์เมื่อเผาในอุณภูมิที่สูงหรือประมาณ 1,100 ºC ขึ้นไปคุณสมบัติทางเคมี มีการเปลี่ยนแปลงโดยเมื่อผสมกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยา หรือความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อทิ้งไว้ประมาณ 24 ชั่วโมง มีการจับตัวกัน แต่การหาคุณลักษณะทางเคมีของกากแร่แคลไซต์ที่ผ่านการเผานี้ ยังไม่ได้ดำเนินการหาตามมาตรฐานของการทดสอบ โดยเป็นการนำวัสดุที่ใช้ในการทดสอบหา LOI มาทำการผสมกับน้ำเพื่อดูปฏิกิริยาเบื้องต้นเท่านั้น

2) หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายทั้งสองลักษณะเม็ดและการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแคลไซต์ไม่ส่งผลแตกต่างกัน โดยค่าหน่วยน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกัน

3) การใช้ปริมาณกากแร่แคลไซต์แทนทรายทั้งสองขนาดคละที่ร้อยละ 10 ถึง 30 ไม่ส่งผลให้การรับกำลังของมอร์ต้าร์ลดลง

4) คุณสมบัติด้านการหดตัวแห้งมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายทุกสัดส่วนผสมและทุกลักษณะของเม็ดทรายไม่ส่งผลต่อการหดตัวแห้งเพราะคุณสมบัติของมวลรวมมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

5) การขยายตัวต้านทานต่อซัลเฟตเกิดการขยายตัวต่ำตามปริมาณการใช้กากแร่แคลไซต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากเนื้อของมอร์ต้าร์มีความพรุน จึงทำให้เนื้อเพสต์เกิดการขยายตัวและเกิดแรงดันได้ไม่เต็มที่ ส่งผลให้มอร์ต้าร์เกิดการขยายตัวต่ำ

6) คุณสมบัติการต้านทานต่อซัลเฟตควรทำการศึกษาในช่วงอายุที่ใช้เวลานานมากกว่านี้ เพราะตามมาตรฐาน ASTM C1012 [5] กำหนดไว้คือสามารถรายงานผลได้เมื่ออายุการแช่ในสารละลายที่ 105 วัน (15 สัปดาห์) แต่กระบวนการแทรกซึมของสารละลายยังไม่สามารถเข้าไปทำลายเนื้อเพสต์ของมอร์ต้าร์ได้เต็มที่ จึงไม่สามารถทำให้เนื้อเพสต์เกิดการขยายตัวและเกิดการกัดกร่อนเนื้อมอร์ต้าร์ได้

7) ควรทำการศึกษาในรายละเอียดของงานคอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการอ้างอิง

เอกสาร . [ออนไลน์]. ได้จาก www.thaipr.net/general1/105881

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)**. Annual Book of ASTM Standards. Vol.04.01. (ASTM C 109/ C 109 M-99).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement1** (ASTM C 596-01)

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution1** (ASTM C1012-02)

แร่ . [ออนไลน์]. ได้จาก: (http://**teacher.snru.ac.th**/preechasat/admin/news/files/IT%252002. doc **)**

เอกสาร.[ออนไลน์] ได้จาก (http://caco3calciumcarbonate.blogspot.com/2012_03_01_archive.html)

แคลไซต์ . [ออนไลน์]. (2550). **กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่** .เอกสารวิชาการเรื่อง " คุณลักษณะของแร่ตามมาตรฐานการใช้งาน"

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). **ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต,** กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีตไทย.

นพคุณ ผลโพธิ์ (2554) .**ผลกระทบของชนิดวัสดุประสานต่อการต้านทานซัลเฟตของมอร์ต้าร์**

Y.Benachour, C.A.Davy, F.Skocylas, H.Houary. **Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of a mortar.** Cement and Concrete Research 38. PP.727–736**. Feb.2008**

สุชาติ ภาคภูมิเกียรติคุณ (2550) . **คุณสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูน.**การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1

วชิรวิทย์ สำราญรมย์ (2553).**สมบัติเชิงกลและความทนทานของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสม ผงหินปูนและเถ้าแกลบดำบด.**เอกสารงานวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

กฤติยา แก้วมณี (2550) .**คุณสมบัติพื้นฐานและความคงทนของคอนกรีตและคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ และเถ้าลอยด้วยผงแคลเซียมคาร์บอร์เนต ($CaCO_3$).** วารสารคอนกรีตฉบับที่ 2 ประจำเดือนธันวาคม 2007. สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย

บุรฉัตร ฉัตรวีระและเพิ่มพล ศรีนวล (2555). **การศึกษาสมบัติของมอร์ต้าร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน.** วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 เมษายน - มิถุนายน 2555

ประชุม คำพุฒ (2548). **การศึกษาการถูกกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ต้าร์ที่ใช้หินฝุ่นเป็นมวลรวมละเอียด.** เอกสารออนไลน์งานวิจัยแห่งชาติ (วช.)

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregates**. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 128-97).

American Society for Testing and Materials. (2001). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates1.** Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 136).

American Society for Testing and Materials. (2003). **Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate**[1]. Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 29/C29M-97).

American Society for Testing and Materials. (2003). **Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement**[1]**.** Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 188).

American Society for Testing and Materials. (2003). **Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete**[1]**.** Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 138/C138M-01a).

American Society for Testing and Materials. (2003). **Standard Specification for Concrete Aggregates**[1]**.** Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 33-03).

American Society for Testing and Materials. (2003). **Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete**[1]**.** Annual Book of ASTM Standards Vol.04.02. (ASTM C 490-00a).

ศ.ดร.ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ดร.วีรชาติ ตั้งจิรภัทร.**การใช้ประโยชน์จากเถ้าและวัสดุเหลือทิ้ง จากโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อเป็นวัสดุในงานคอนกรีต** (2556). ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.พิมพ์ครั้งที่ 3

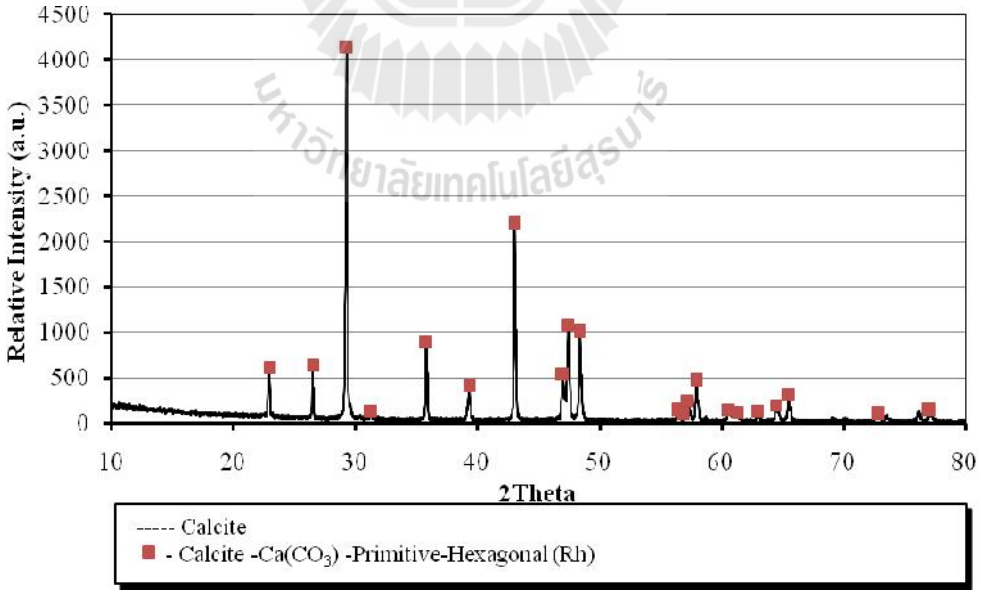
ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของกากแร่แคลไซต์โดย X-Ray Fluorescence (XRF)

Composition	Calcite
MgO	0.51
Al_2O_3	0.74
SiO_2	1.57
SO_3	0.20
Cl	0.15
K_2O	0.02
CaO	54.64
MnO	0.03
Fe_2O_3	0.30
ZnO	0.27
LOI	41.69



รูปที่ ก.1 ผลการทดสอบ X-ray Diffraction ของกากแร่แคลไซต์

ตารางที่ ก.2 ค่าความถ่วงจำเพาะของกากแร่แคลไซต์

Date of Test 20-June-2013

Temperature of Tested in Laboratory Lab 31° C

SPECIFIC GRAVITY OF CALCITE TAILING

Determination	No1	No2	No3
Weight of Glass Graduate, (g)	443.38	441.4	443.38
Weight of Glass Graduate + Water, B (g)	1383.5	1376	1383.5
Weight of Saturated Surface-Dry Calcite , D (g)	500.83	505.42	502
Weight of Water + Calcite + Graduate, C g)	1694.54	1674.26	1696.3
Weight of Oven-Dry Calcite, A (g)	498.67	502.5	499.97
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.63	2.43	2.64
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.64	2.44	2.65
Apparent Specific Gravity	2.66	2.46	2.67
Absorbtion (%)	0.43	0.58	0.41
Average Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.57		
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	2.58		
Average Apparent Specific Gravity	2.60		
Average Absorption (%)	0.47		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.3 ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายขนาดคละธรรมชาติ

Date of Test 20-June-2013

Temperature of Tested in Laboratory Lab 31° C

Determination	No1	No2	No3
Weight of Glass Graduate, (g)	443.38	441.4	443.38
Weight of Glass Graduate + Water, B (g)	1383.5	1377.9	1383.5
Weight of Saturated Surface-Dry Sand , D (g)	500.32	500.88	500.52
Weight of Water + Sand + Graduate, C (g)	1683.29	1688.51	1683.29
Weight of Oven-Dry Sand, A (g)	498.5	499	498.8
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.49	2.62	2.48
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.49	2.63	2.49
Apparent Specific Gravity	2.51	2.65	2.51
Absorbtion (%)	0.37	0.38	0.34
Average Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.53		
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	2.54		
Average Apparent Specific Gravity	2.55		
Average Absorption (%)	0.36		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.4 ค่าความถ่วงจำเพาะของทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

Date of Test 20-June-2013

Temperature of Tested in Laboratory Lab 31° C

Determination	No1	No2	No3
Weight of Glass Graduate, (g)	443.38	441.4	443.38
Weight of Glass Graduate + Water, B (g)	1383.5	1377.9	1383.5
Weight of Saturated Surface-Dry Sand , D (g)	500.2	501.2	500.5
Weight of Water + Sand + Graduate, C (g)	1689.71	1672.1	1690.21
Weight of Oven-Dry Sand, A (g)	499.26	499.75	499.3
Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.57	2.41	2.58
Bulk Specific Gravity (SSD)	2.58	2.42	2.58
Apparent Specific Gravity	2.59	2.43	2.59
Absorbtion (%)	0.19	0.29	0.24
Average Bulk Specific Gravity (Oven-Dry)	2.52		
Average Bulk Specific Gravity (SSD)	2.53		
Average Apparent Specific Gravity	2.54		
Average Absorption (%)	0.24		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.5 ค่าโมดูลัสความละเอียดของกากแร่แคลไซต์

Calcite Sample 1 Calcite

Dry Weight Of Original Sample 1500 g.

Seive No.	Seive Opening (mm.)	WT. Seive (gm.)	WT.Seive + Sample (gm.)	WT.Sample Retained (gm.)	Percent Retained	Cumulative Percent Retained	Percent Finer Or Passing
1 #	25.40	-	-	-	-	-	-
3/4 #	19.05	-	-	-	-	-	-
1/2 #	12.70	-	-				
3/8 #	9.52						100.00
4	4.76	744.02	744.04	0.02	0.00	0.00	100.00
8	2.38	685.06	723.69	38.63	2.58	2.58	97.42
16	1.19	499.00	525.99	26.99	1.80	4.38	95.62
30	0.595	303.81	453.80	149.99	10.00	14.38	85.62
50	0.297	276.93	1179.59	902.66	60.18	74.56	25.44
100	0.149	259.08	546.45	287.37	19.16	93.71	6.29
PAN	0.000	382.83	476.76	93.93	6.26		0.00
			SUM.	1499.59	99.98	189.60	

Error (Original WT.-Total WT.Retained) 0.41 gm.

Percent Error 0.03 %

Fineness Modulus 1.89

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ก.6 ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายขนาดคละตามธรรมชาติ

Fine Aggregates (Natural Sand) Sample 1

Dry Weight Of Original Sample 1500 g.

Seive No.	Seive Opening (mm.)	WT. Seive (gm.)	WT.Seive + Sample (gm.)	WT.Sample Retained (gm.)	Percent Retained	Cumulative Percent Retained	Percent Finer Or Passing
1 #	25.40	-	-	-	-	-	-
3/4 #	19.05	-	-	-	-	-	-
1/2 #	12.70	-	-				100.00
3/8 #	9.52	755.04	759.27	4.23	0.28	0.28	99.72
4	4.76	744.05	815.00	70.95	4.73	5.01	94.99
8	2.38	559.60	648.64	89.04	5.94	10.95	89.05
16	1.19	634.59	768.60	134.01	8.93	19.88	80.12
30	0.595	304.06	565.90	261.84	17.46	37.34	62.66
50	0.297	279.50	931.00	651.50	43.43	80.77	19.23
100	0.149	260.00	502.00	242.00	16.13	96.91	3.09
PAN		490.45	535.86	45.41	3.03		0.00
			SUM.	1498.98	99.94	251.15	

Error (Original WT.-Total WT.Retained) 1.02 gm.

Percent Error 0.07 %

Fineness Modulus 2.51

ตารางที่ ก.7 ค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

Fine Aggregates (Gradation of Sang) Sample 1

Dry Weight Of Original Sample 1500 g.

Seive No.	Seive Opening (mm.)	WT. Seive (gm.)	WT.Seive + Sample (gm.)	WT.Sample Retained (gm.)	Percent Retained	Cumulative Percent Retained	Percent Finer Or Passing
1 #	25.40	-	-	-	-	-	-
3/4 #	19.05	-	-	-	-	-	-
1/2 #	12.70	-	-	-	-	-	-
3/8 #	9.52					-	100.00
4	4.76	744.05	813.75	69.70	4.65	4.65	95.35
8	2.38	559.60	679.50	119.90	7.99	12.64	87.36
16	1.19	634.59	974.49	339.90	22.66	35.30	64.70
30	0.595	303.70	725.56	421.86	28.12	63.43	36.57
50	0.297	278.14	569.28	291.14	19.41	82.84	17.16
100	0.149	260.27	492.44	232.17	15.48	98.31	1.69
PAN	0.000	490.45	515.73	25.28	1.69	100.00	0.00
			SUM.	1499.95	100.00	297.17	

Error (Original WT.-Total WT.Retained) 0.05 gm.

Percent Error 0.00 %

Fineness Modulus 2.97

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.1 ค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.59

Ca : S	Percentage of Flow	
	CSCa	NSCa
0	119	110
10	115	114
20	114	113
30	109	107
40	105	103
50	103	101

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.2 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33

Sample	Unit Weight (kg/m^3) Age of Sample (days)					Remark
	1	3	7	28	60	
CSCa00	2210	2205	2218	2195	2165	
CSCa10	2235	2223	2244	2185	2153	
CSCa20	2223	2168	2202	2217	2139	
CSCa30	2205	2195	2231	2191	2159	
CSCa40	2214	2196	2237	2169	2221	
CSCa50	2204	2221	2227	2200	2176	

ตารางที่ ข.3 หน่วยน้ำหนักของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ

Sample	Unit Weight (kg/m^3) Age of Sample (days)					Remark
	1	3	7	28	60	
NSCa00	2217	2231	2259	2261	2363	
NSCa10	2213	2211	2240	2259	2206	
NSCa20	2241	2222	2262	2234	2135	
NSCa30	2227	2226	2235	2239	2237	
NSCa40	2176	2198	2222	2205	2218	
NSCa50	2168	2167	2181	2189	2176	

ตารางที่ ข.4 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

Sample	Shape of Specimens			Weight of sample gm.	Area of sample cm^2	Load kg.	Compressive Strength ksc	Age of Sample Days.	Units Weight $kg./m^3$
	B cm	L cm	H cm						
1	5.14	5.11	5.11	291.68	26.27	4810.00	183.13	1.00	2175.34
2	5.12	5.11	5.09	295.20	26.05	4750.00	182.34	1.00	2218.45
3	5.10	5.09	5.11	297.00	26.06	4870.00	186.91	1.00	2237.64
4	4.99	5.01	5.02	278.31	25.04	8280.00	330.67	3.00	2217.62
5	5.03	4.99	5.00	276.93	25.14	8630.00	343.28	3.00	2207.08
6	5.00	5.01	5.08	278.32	25.39	8700.00	342.65	3.00	2190.17
7	5.01	5.02	5.03	281.45	25.19	10640.00	422.39	7.00	2225.25
8	5.00	5.01	5.06	282.45	25.30	10900.00	430.83	7.00	2230.57
9	5.05	5.04	5.03	281.14	25.37	10850.00	427.73	7.00	2198.62
10	5.17	5.12	5.18	298.50	26.79	12940.00	483.09	28.00	2176.56
11	5.17	5.11	5.20	299.00	26.86	13440.00	500.41	28.00	2179.87
12	5.09	5.08	5.09	294.00	25.94	12850.00	495.40	28.00	2229.87
13	5.08	5.07	5.13	289.88	26.05	13680.00	525.24	60.00	2195.25
14	5.13	5.13	5.10	289.09	26.17	13630.00	520.86	60.00	2154.32
15	5.08	5.16	5.19	291.04	26.31	13610.00	517.22	60.00	2145.14

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.5 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 10

Sample	Shape of Specimens			Weight of sample gm.	Area of sample cm^2	Load kg.	Compressive Strength ksc	Age of Sample Days.	Units Weight $kg./m^3$
	B cm	L cm	H cm						
1	4.95	5.02	5.10	287.88	25.25	4450.00	176.24	1.00	2270.73
2	5.06	5.06	5.08	291.44	25.68	4480.00	174.46	1.00	2243.36
3	5.09	5.14	5.10	292.30	25.96	4580.00	176.40	1.00	2189.82
4	5.02	5.15	5.05	296.20	25.33	8090.00	319.44	3.00	2271.87
5	4.98	5.02	5.01	275.59	24.95	7810.00	313.03	3.00	2202.54
6	5.05	5.02	5.00	278.50	25.25	7940.00	314.49	3.00	2196.05
7	5.09	5.07	5.07	287.50	25.83	9550.00	369.66	7.00	2196.30
8	5.05	5.01	5.07	292.00	25.56	8220.00	321.56	7.00	2280.90
9	4.98	5.07	5.09	290.10	25.37	8630.00	340.16	7.00	2254.21
10	5.06	5.11	5.13	290.50	25.91	11760.00	453.85	28.00	2193.94
11	5.16	5.19	4.95	291.00	25.54	12110.00	474.11	28.00	2194.71
12	5.13	5.19	5.18	298.80	26.56	12430.00	468.03	28.00	2166.13
13	5.03	5.16	5.10	287.66	25.64	12500.00	487.56	60.00	2173.61
14	5.03	5.19	5.10	285.93	25.65	13470.00	525.09	60.00	2149.27
15	5.17	5.06	5.12	285.77	26.45	13700.00	517.86	60.00	2134.82

ตารางที่ ข.6 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 20

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B cm	L cm	H cm	of sample gm.	of sample cm^2	kg.	Strength ksc	Sample Days.	Weight $kg./m^3$
1	5.03	5.10	5.03	287.56	25.29	4930.00	194.97	1.00	2228.57
2	5.07	5.14	5.02	290.24	25.48	4870.00	191.12	1.00	2215.99
3	5.04	5.18	5.05	293.17	25.47	4940.00	193.92	1.00	2223.41
4	5.05	5.05	5.18	285.30	26.12	8070.00	308.92	3.00	2163.05
5	5.11	5.02	5.07	284.20	25.90	8120.00	313.48	3.00	2186.50
6	5.09	5.13	5.13	288.27	26.11	8440.00	323.23	3.00	2153.29
7	5.09	5.11	5.12	287.11	26.08	9420.00	361.25	7.00	2155.54
8	5.11	5.05	5.05	288.60	25.78	9500.00	368.57	7.00	2215.88
9	5.11	5.10	5.07	295.20	25.91	9700.00	374.33	7.00	2235.48
10	5.08	5.09	5.03	289.70	25.53	12300.00	481.84	28.00	2229.60
11	5.09	5.09	5.06	290.00	25.76	12400.00	481.36	28.00	2212.13
12	5.02	5.01	5.01	278.00	25.15	12400.00	493.14	28.00	2208.07
13	5.08	5.07	5.04	281.12	25.62	13070.00	510.18	60.00	2165.66
14	5.16	5.11	5.08	286.94	26.21	13240.00	505.09	60.00	2143.85
15	5.18	5.11	5.14	286.48	26.61	13400.00	503.48	60.00	2107.67

ตารางที่ ข.7 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 30

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B cm	L cm	H cm	of sample gm.	of sample cm^2	kg.	Strength ksc	Sample Days.	Weight $kg./m^3$
1	4.98	5.11	5.11	294.07	25.42	4770.00	187.63	1.00	2263.46
2	5.17	5.14	5.15	291.06	26.60	4600.00	172.92	1.00	2127.60
3	5.02	5.00	5.01	279.30	25.15	4730.00	188.07	1.00	2223.28
4	5.08	5.04	5.03	284.64	25.54	8950.00	350.47	3.00	2213.29
5	5.08	5.08	5.04	284.71	25.61	8700.00	339.67	3.00	2189.85
6	5.09	5.08	5.04	284.43	25.67	8500.00	331.08	3.00	2180.40
7	5.07	5.09	5.05	291.00	25.57	10460.00	409.07	7.00	2234.97
8	5.05	5.09	5.17	295.50	26.07	10090.00	386.99	7.00	2226.21
9	4.96	5.09	5.13	289.20	25.44	10210.00	401.41	7.00	2232.93
10	4.95	5.21	5.14	290.00	25.44	12560.00	493.65	28.00	2187.72
11	5.22	5.11	5.02	292.50	26.18	10600.00	404.82	28.00	2185.20
12	5.07	5.20	5.10	296.00	25.84	11680.00	451.98	28.00	2201.06
13	5.12	5.03	5.15	283.74	26.32	13500.00	512.88	60.00	2145.21
14	5.09	5.00	5.14	284.07	26.18	13100.00	500.32	60.00	2168.57
15	5.06	5.08	5.08	282.44	25.68	13150.00	511.98	60.00	2163.81

ตารางที่ ข.8 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 40

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B cm	L cm	H cm	of sample gm.	of sample cm^2	kg.	Strength ksc	Sample Days.	Weight $kg./m^3$
1	5.01	5.20	5.20	302.23	26.05	4730.00	181.56	1.00	2233.10
2	5.05	5.10	5.13	295.48	25.92	4840.00	186.72	1.00	2234.00
3	5.09	5.08	5.17	291.52	26.36	4830.00	183.24	1.00	2176.23
4	5.13	5.09	5.15	291.91	26.43	8430.00	318.96	3.00	2169.46
5	5.10	5.04	5.15	291.67	26.25	8080.00	307.84	3.00	2203.54
6	5.09	5.00	5.04	283.68	25.65	8620.00	336.05	3.00	2213.63
7	5.09	5.20	5.07	302.60	25.80	10640.00	412.47	7.00	2256.30
8	5.10	5.12	5.16	300.04	26.32	10900.00	414.08	7.00	2226.41
9	5.13	5.21	5.06	301.42	25.94	10850.00	418.32	7.00	2229.04
10	5.22	5.20	5.07	299.50	26.45	12340.00	466.54	28.00	2175.86
11	5.22	5.05	5.19	299.50	27.09	11920.00	440.07	28.00	2189.10
12	5.23	5.05	5.21	294.80	27.25	12150.00	445.81	28.00	2142.82
13	5.07	5.20	5.02	298.88	25.46	12800.00	502.82	60.00	2256.56
14	5.11	5.20	5.04	292.87	25.73	13200.00	512.93	60.00	2188.14
15	5.00	5.16	5.21	298.01	26.06	12900.00	495.09	60.00	2218.69

ตารางที่ ข.9 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ที่ร้อยละ 50

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B cm	L cm	H cm	of sample gm.	of sample cm^2	kg.	Strength ksc	Sample Days.	Weight $kg./m^3$
1	5.04	5.00	5.00	278.05	25.20	4750.00	188.53	1.00	2205.63
2	5.02	5.04	4.98	276.91	25.02	4850.00	193.81	1.00	2197.50
3	5.07	4.98	5.02	280.19	25.45	4880.00	191.78	1.00	2209.05
4	5.11	5.04	5.04	287.81	25.77	8240.00	319.69	3.00	2214.24
5	5.09	5.05	5.03	284.50	25.63	8230.00	321.13	3.00	2196.93
6	4.96	5.10	5.03	286.76	24.95	8030.00	321.86	3.00	2253.05
7	5.06	5.15	5.11	294.63	25.86	10170.00	393.25	7.00	2211.30
8	5.12	5.05	5.09	291.96	26.05	10170.00	390.47	7.00	2217.98
9	5.10	5.06	5.05	294.16	25.78	10080.00	390.96	7.00	2253.20
10	5.15	5.08	5.18	299.00	26.70	10670.00	399.66	28.00	2206.36
11	5.14	5.06	5.11	292.50	26.24	12500.00	476.37	28.00	2201.69
12	5.16	5.10	5.10	294.20	26.32	12480.00	474.24	28.00	2191.22
13	5.14	5.13	5.04	291.19	25.86	12980.00	501.84	60.00	2196.28
14	5.14	5.07	5.09	286.34	26.14	12620.00	482.75	60.00	2161.68
15	5.15	5.09	5.06	287.76	26.07	12700.00	487.07	60.00	2169.06

ตารางที่ ข.10 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายขนาดคละตามธรรมชาติ

Sample	Shape of Specimens			Weight of sample gm.	Area of sample cm^2	Load kg.	Compressive Strength ksc	Age of Sample Days	Units Weight $kg./m^3$
	B cm	L cm	H cm						
1	5.05	5.08	5.06	288.00	25.53	5270.00	206.44	1.00	2223.02
2	5.04	5.10	5.06	287.50	25.45	5220.00	205.09	1.00	2213.34
3	5.16	5.04	5.00	287.50	25.78	5340.00	207.18	1.00	2213.14
4	5.24	5.05	5.09	291.24	26.62	8370.00	314.43	3.00	2166.47
5	5.20	5.05	5.03	291.50	26.13	8410.00	321.85	3.00	2209.06
6	4.97	4.93	4.94	280.25	24.53	8160.00	332.69	3.00	2317.67
7	4.96	4.94	4.92	270.20	24.38	10530.00	431.94	7.00	2243.64
8	4.96	4.97	4.91	274.58	24.35	10020.00	411.44	7.00	2270.84
9	4.99	4.95	4.93	275.40	24.58	9940.00	404.46	7.00	2263.87
10	5.02	5.03	4.92	278.60	24.70	12260.00	496.39	28.00	2244.79
11	4.91	5.00	5.00	275.20	24.53	12090.00	492.96	28.00	2246.45
12	4.93	5.01	4.94	279.50	24.33	12230.00	502.68	28.00	2293.04
13	4.97	5.00	5.00	294.90	24.85	12240.00	492.56	60.00	2373.44
14	4.87	4.89	4.85	270.24	23.62	12400.00	524.99	60.00	2342.15
15	4.83	4.87	4.88	271.82	23.55	13000.00	552.10	60.00	2372.89

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ ข.11 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติที่ร้อยละ 10

Sample	Shape of Specimens			Weight of sample gm.	Area of sample cm^2	Load kg.	Compressive Strength ksc	Age of Sample Day	Units Weight $kg./m^3$
	B cm	L cm	H cm						
1	4.98	4.98	5.05	276.50	25.15	4800.00	190.86	1.00	2207.73
2	4.97	5.02	5.06	281.56	25.15	5300.00	210.75	1.00	2230.28
3	5.00	4.97	5.00	273.20	24.99	5090.00	203.68	1.00	2199.67
4	5.13	5.04	5.00	284.97	25.65	8050.00	313.84	3.00	2204.35
5	5.09	5.04	5.01	283.86	25.50	8360.00	327.83	3.00	2208.61
6	5.05	4.95	5.02	278.50	25.35	8580.00	338.45	3.00	2219.35
7	4.90	4.97	4.96	270.46	24.30	9080.00	373.60	7.00	2239.53
8	4.96	4.94	4.95	273.07	24.55	10710.00	436.22	7.00	2251.44
9	4.98	4.94	4.95	271.30	24.65	10240.00	415.40	7.00	2227.86
10	5.00	5.05	5.00	288.60	25.00	12300.00	492.00	28.00	2285.94
11	5.09	5.07	5.06	291.20	25.76	11610.00	450.78	28.00	2230.05
12	5.00	5.08	5.06	290.60	25.30	12990.00	513.44	28.00	2261.06
13	5.07	5.07	5.06	281.98	25.65	12890.00	502.45	60.00	2168.39
14	5.10	5.01	5.06	287.82	25.81	13400.00	519.26	60.00	2226.19
15	5.07	5.09	5.02	287.94	25.45	13220.00	519.42	60.00	2222.66

ตารางที่ ข.12 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติที่ร้อยละ 20

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B	L	H	of sample	of sample		Strength	Sample	Weight
	cm	cm	cm	gm.	cm^2	kg.	ksc	Day	$kg./m^3$
1	4.98	5.00	5.07	286.20	25.25	4550.00	180.21	1.00	2267.06
2	5.09	5.01	5.00	282.02	25.43	4410.00	173.45	1.00	2214.02
3	5.00	5.03	4.99	281.20	24.95	4850.00	194.39	1.00	2240.66
4	5.06	5.06	5.07	285.95	25.68	7780.00	302.99	3.00	2203.05
5	5.02	5.03	5.07	286.30	25.46	7550.00	296.53	3.00	2235.48
6	5.03	5.04	5.06	285.74	25.45	7240.00	284.49	3.00	2227.08
7	4.80	5.03	4.97	273.56	23.83	9920.00	416.25	7.00	2284.32
8	4.99	5.18	5.15	296.75	25.69	9750.00	379.47	7.00	2228.36
9	5.13	4.93	5.09	292.30	26.08	9910.00	379.97	7.00	2274.23
10	5.03	5.06	5.06	288.90	25.47	12200.00	478.96	28.00	2239.71
11	5.05	5.03	5.10	287.30	25.75	11700.00	454.28	28.00	2219.05
12	5.04	5.06	5.03	287.70	25.35	12300.00	485.18	28.00	2244.13
13	5.09	5.04	5.08	282.18	25.81	13260.00	513.83	60.00	2169.55
14	5.11	5.13	5.13	280.51	26.19	12960.00	494.87	60.00	2087.93
15	5.02	5.14	5.19	287.11	26.05	13600.00	522.00	60.00	2146.03

ตารางที่ ข.13 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติที่ร้อยละ 30

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B cm	L cm	H cm	of sample gm.	of sample cm^2	kg.	Strength ksc	Sample Day	Weight $kg./m^3$
1	5.07	5.05	5.13	294.75	25.98	5590.00	215.14	1.00	2246.29
2	5.14	5.16	5.08	295.33	26.09	5590.00	214.29	1.00	2196.21
3	5.03	5.10	5.10	292.96	25.65	5410.00	210.89	1.00	2239.24
4	4.96	5.02	4.97	275.04	24.63	8650.00	351.25	3.00	2224.81
5	4.99	4.99	4.97	274.11	24.78	8500.00	343.08	3.00	2217.19
6	4.95	4.98	4.98	274.50	24.65	8400.00	340.76	3.00	2236.03
7	4.99	4.99	4.97	275.53	24.80	10070.00	406.04	7.00	2226.44
8	5.05	4.96	4.97	275.86	25.10	10070.00	401.22	7.00	2215.95
9	5.03	5.06	5.02	289.06	25.25	10230.00	405.14	7.00	2262.38
10	5.09	5.08	5.08	294.50	25.83	12420.00	480.80	28.00	2246.44
11	5.07	5.04	5.07	287.50	25.68	12180.00	474.31	28.00	2221.36
12	5.07	5.07	5.05	291.50	25.58	11480.00	448.82	28.00	2247.81
13	5.10	5.13	5.05	292.57	25.76	12910.00	501.26	60.00	2216.53
14	5.05	5.12	5.04	294.05	25.45	12700.00	498.98	60.00	2256.47

ตารางที่ ข.14 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติที่ร้อยละ 40

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B	L	H	of sample	of sample		Strength	Sample	Weight
	cm	cm	cm	gm.	cm^2	kg.	ksc	Day	$kg./m^3$
1	5.03	5.18	5.15	287.50	25.85	4930.00	190.69	1.00	2146.78
2	5.02	5.03	4.97	275.60	24.92	5120.00	205.42	1.00	2200.49
3	5.02	5.07	5.04	279.80	25.30	5030.00	198.81	1.00	2181.25
4	5.08	5.08	4.99	277.32	25.35	7880.00	310.86	3.00	2155.66
5	5.03	4.97	5.00	276.02	25.15	8010.00	318.49	3.00	2210.46
6	5.02	5.01	4.96	277.75	24.87	7910.00	318.00	3.00	2228.76
7	5.08	5.02	5.06	288.03	25.65	9200.00	358.62	7.00	2236.54
8	5.07	5.05	5.12	293.03	25.96	8800.00	339.00	7.00	2235.34
9	5.18	5.00	5.17	293.57	26.75	8820.00	329.66	7.00	2194.53
10	5.02	5.03	4.99	276.80	25.05	11390.00	454.69	28.00	2199.00
11	5.10	5.02	5.06	285.70	25.79	10780.00	418.06	28.00	2209.34
12	5.13	5.05	5.05	288.54	25.91	10830.00	418.04	28.00	2205.49
13	5.10	5.10	5.09	287.95	25.96	11500.00	443.01	60.00	2175.00
14	5.08	5.08	5.05	288.41	25.60	11600.00	453.07	60.00	2217.43
15	5.13	5.09	5.00	295.15	25.65	11530.00	449.51	60.00	2262.90

ตารางที่ ข.15 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติที่ร้อยละ 50

Sample	Shape of Specimens			Weight	Area	Load	Compressive	Age of	Units
	B	L	H	of sample	of sample		Strength	Sample	Weight
	cm	cm	cm	gm.	cm^2	kg.	ksc	Day	$kg./m^3$
1	5.10	5.03	5.12	286.73	26.13	5150.00	197.11	1.00	2183.95
2	5.11	5.17	5.14	288.92	26.25	5100.00	194.29	1.00	2128.92
3	5.08	5.17	5.20	299.83	26.44	5160.00	195.18	1.00	2192.00
4	5.08	5.13	5.10	290.99	25.87	9240.00	357.14	3.00	2191.57
5	5.03	5.30	5.26	302.69	26.46	8430.00	318.56	3.00	2159.82
6	5.08	5.18	5.16	292.27	26.22	8730.00	332.98	3.00	2150.43
7	5.07	5.01	5.03	278.26	25.50	8940.00	350.56	7.00	2178.77
8	5.09	5.13	5.08	290.56	25.85	8950.00	346.27	7.00	2193.47
9	5.14	5.14	5.11	292.97	26.28	8540.00	325.02	7.00	2169.65
10	5.17	5.17	5.18	302.00	26.80	10650.00	397.45	28.00	2181.21
11	5.18	5.17	5.01	295.50	25.93	11180.00	431.14	28.00	2205.43
12	5.18	5.14	5.13	297.70	26.55	11010.00	414.65	28.00	2181.26
13	5.14	5.17	5.15	295.54	26.49	11200.00	422.86	60.00	2158.25
14	5.02	4.99	5.03	274.09	25.24	11900.00	471.46	60.00	2177.92
15	5.11	5.12	5.00	286.80	25.56	11360.00	444.44	60.00	2191.96

ตารางที่ ข.16 ค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

Sample	Percent of Drying shrinkage Age of Specimen (days.)							
	1	4	7	14	28	56	90	112
CSCa00	0.000	0.0023	0.0490	0.0719	0.0851	0.0922	0.0960	0.0986
CSCa10	0.000	0.0003	0.0522	0.0687	0.0816	0.0935	0.0965	0.0996
CSCa20	0.000	0.0038	0.0556	0.0752	0.0892	0.0960	0.1006	0.1041
CSCa30	0.000	0.0091	0.0623	0.0786	0.0952	0.1013	0.1060	0.1104
CSCa40	0.000	0.0014	0.0549	0.0596	0.0830	0.0948	0.0999	0.1033
CSCa50	0.000	0.0020	0.0515	0.0613	0.0833	0.0969	0.0996	0.1002

ตารางที่ ข.17 ค่าการหดตัวแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ

Sample	Percent of Drying shrinkage Age of Specimen (days.)							
	1	4	7	14	28	56	90	112
NSCa00	0.000	0.0027	0.0461	0.0677	0.0826	0.0881	0.0918	0.0945
NSCa10	0.000	0.0027	0.0457	0.0694	0.0823	0.0874	0.0921	0.0948
NSCa20	0.000	-0.0010	0.0471	0.0708	0.0833	0.0881	0.0925	0.0952
NSCa30	0.000	-0.0005	0.0452	0.0671	0.0808	0.0856	0.0909	0.0953
NSCa40	0.000	0.0030	0.0498	0.0681	0.0853	0.0884	0.0945	0.0996
NSCa50	0.000	0.0010	0.0528	0.0737	0.0848	0.0935	0.0975	0.1003

ตารางที่ ข.18 ค่าการขยายตัวเนื่องจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

Specimens	Percent of Expansion (%) Period of immersion, (days)							
	0	7	14	21	28	56	90	112
CSCa00	0.000	0.004	0.005	0.041	0.072	0.113	0.129	0.139
CSCa10	0.000	0.002	0.008	0.042	0.060	0.090	0.111	0.121
CSCa20	0.000	0.005	0.007	0.015	0.041	0.055	0.072	0.108
CSCa30	0.000	0.004	0.011	0.028	0.038	0.045	0.059	0.081
CSCa40	0.000	0.001	0.011	0.021	0.038	0.049	0.055	0.066
CSCa50	0.000	0.001	0.017	0.024	0.025	0.026	0.034	0.042
CSCCe	0.000	0.006	0.018	0.028	0.032	0.036	0.041	0.049

ตารางที่ ข.19 ค่าการขยายตัวเนื่องจากแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ

Specimens	Percent of Expansion (%) Period of immersion, (days)							
	0	7	14	21	28	56	90	112
NSCa00	0.000	0.002	0.009	0.036	0.069	0.119	0.156	0.176
NSCa10	0.000	0.002	0.008	0.019	0.041	0.054	0.066	0.082
NSCa20	0.000	0.004	0.009	0.012	0.035	0.050	0.062	0.072
NSCa30	0.000	0.004	0.009	0.009	0.030	0.043	0.062	0.072
NSCa40	0.000	0.004	0.009	0.010	0.028	0.049	0.055	0.060
NSCa50	0.000	0.006	0.008	0.011	0.019	0.024	0.038	0.053
NSCCe	0.000	0.001	0.003	0.013	0.017	0.022	0.031	0.040

ตารางที่ ข.20 ค่าการขยายตัวแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายคัดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33

Specimens	Percent of Expansion (%) Period of immersion, (days)							
	0	7	14	21	28	56	90	112
CSCa00	0.000	0.005	0.006	0.046	0.059	0.081	0.097	0.112
CSCa10	0.000	0.005	0.006	0.039	0.050	0.067	0.085	0.094
CSCa20	0.000	0.004	0.020	0.036	0.041	0.056	0.073	0.088
CSCa30	0.000	0.007	0.025	0.038	0.041	0.057	0.071	0.085
CSCa40	0.000	0.002	0.027	0.035	0.039	0.052	0.061	0.066
CSCa50	0.000	0.004	0.021	0.027	0.031	0.040	0.048	0.054
CSCCe	0.000	0.002	0.004	0.007	0.017	0.025	0.030	0.040

ตารางที่ ข.21 ค่าการขยายตัวทนแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ที่ใช้กากแร่แคลไซต์แทนทรายขนาดคละตามธรรมชาติ

Specimens	Percent of Expansion (%) Period of immersion, (days)							
	0	7	14	21	28	56	90	112
NSCa00	0.000	0.004	0.009	0.017	0.060	0.102	0.114	0.124
NSCa10	0.000	0.006	0.009	0.010	0.043	0.070	0.101	0.112
NSCa20	0.000	0.004	0.004	0.012	0.042	0.065	0.082	0.091
NSCa30	0.000	0.001	0.005	0.021	0.031	0.052	0.062	0.073
NSCa40	0.000	0.002	0.007	0.013	0.030	0.038	0.042	0.053
NSCa50	0.000	0.006	0.007	0.009	0.014	0.024	0.035	0.041
NSCCe	0.000	0.002	0.014	0.017	0.029	0.040	0.051	0.066

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

จีรศักดิ์ สุพรมวันและ ธีรวัฒน์ สินศิริ (2556). **กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย**, การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 9 ณ โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, ประเทศไทย, 21-23 ตุลาคม 2556: หน้า 242-247

กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย

Compressive Strength of Mortar Containing Calcite as a Replacement of Sand

จีรศักดิ์ สุพรมวัน (Jeerasuk Supromwan)[1]

ธีรวัฒน์ สินศิริ (Theerawat Sinsiri)[2]

[1]นักศึกษาระดับปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, Email address : konderndin_idealize@hotmail.com

[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา, Email address : sinsiri@g.sut.ac.th

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้ศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์เป็นมวลรวมแทนที่ทราย โดยใช้ทรายสองลักษณะคือขนาดคละตามธรรมชาติและควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C 33 กำหนดใช้อัตราส่วนระหว่างปูนซีเมนต์ต่อน้ำที่ 0.59 แคลไซต์แทนที่ทรายในสัดส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่อายุ 1, 3, 7 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่ามอร์ต้าร์แคลไซต์ที่ใช้ทรายควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ส่งกระทบต่อกำลังอัดเพียงเล็กน้อย (ลดลงร้อยละ 4 ถึง 7) เมื่อใช้ทรายขนาดคละตามธรรมชาติส่งผลให้กำลังอัดลดลงสูง (ลดลงร้อยละ 2 ถึง 17) และนอกจากนั้นการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลไซต์

ABSTRACT : This research studied on compressive strength of mortar using calcite as a replacement of sand .Two gradations of sand, as received and as specified by ASTM C33, were used in the mortar mixtures. Mortar cubes were cast by using the water to cement ratio of 0.59. Calcite was used to replace sand at 0, 10, 20, 30, 40, and 50 % by weight. The compressive strength of mortar was determined at the ages of 1, 3, 7, and 28 days. The results showed that use of calcite to partially replace sand slightly affected the compressive strength of mortar using a sand prepared the gradation as specified by ASTM C33 (decrease 4-7 %). Use of calcite to partially replace as-received sand resulted in highly decreasing the compressive strength of mortar (decrease 2-17 %). Moreover, the compressive strength of mortar decreased with increasing in calcite content.

KEYWORDS : Mortar, Calcite, Natural Sand, Control Sand, Compressive Strength

1. บทนำ

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate: $CaCO_3$) เป็นวัตถุดิบที่ผลิตจากหินปูน มีคุณสมบัติไม่เป็นพิษ มีความขาวและความสว่างสูง ดังภาพที่ 1

ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดบดจากธรรมชาติได้จากการบด กลุ่มแร่ แคลเซียม คาร์บอเนตธรรมชาติ เช่น หินปูน, หินอ่อน, ชอล์ก และแร่แคลไซต์ (Calcite) กรรมวิธีการผลิตมีหลายขั้นตอน อาทิ การลดขนาดแร่ (Size Reduction) และการคัดขนาด (Classification) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ ตามที่ตลาดต้องการ

ใน ปัจจุบัน ประเทศไทยมีการ ผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณ 800,000 เมตริกตัน / ปี จากผู้ผลิตภายในประเทศกว่า 10 ราย ซึ่งกว่า 95% ของผลิตภัณฑ์เป็นการใช้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศ [1]

ภาพที่ 1 แร่แคลไซต์ [2]

จากงานวิจัยของ Benachour และคณะ [3] ใช้แร่แคลไซต์ที่มีความละเอียดใกล้เคียงกับซีเมนต์แทนที่ทรายเพื่อใช้เป็นการเติมเต็มของช่องว่างของโครงสร้างจุลภาค โดยแทนที่ทรายที่ร้อยละ 0, 15 , 25, 35 และ 45 ทำให้ค่าโมดูลัสความละเอียดของมวลรวมลดลง มวลรวมมีความละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้มอร์ต้าร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตาม การรับกำลังอัดและการกำลังดัดของมอร์ต้าร์ลดลง โดย กำลังอัดของมอร์ต้าร์ ที่ใช้แคลไซต์ร้อยละ 15 มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 23 ส่วนการเพิ่มที่ร้อยละ 45 พบว่ากำลังลดลงร้อยละ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุม ดังนั้น อัตราส่วนการเติมแทนที่ของแคลไซต์ที่เหมาะสม อยู่ระหว่างร้อยละ 0 - 25 ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 27

สุชาติ และคณะ[4] ได้ศึกษาคุณสมบัติของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูนแคลเซียมคาร์บอเนต โดยนำมาแทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยผงฝุ่นหินปูน ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของผงฝุ่นหินปูนและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพที่เปลี่ยนไปคือ ความถ่วงจำเพาะ ระยะเวลาการก่อตัว การไหลแผ่ ปริมาณฟองอากาศ กำลังอัด กำลังดัด กำลังดึง และการหดตัว โดยเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่ได้จากปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 3 กำหนดขอบเขตของส่วนผสมระหว่างปูนซีเมนต์ต่อผงฝุ่นหินปูนเท่ากับ 100:0, 95:5, 90:10, 85:15, 80:20 และ 75:25 โดยน้ำหนัก บ่มน้ำเป็นเวลา 1, 3,7, 28 และ 60 วัน และใช้สารผสมเพิ่มชนิดลดการใช้น้ำปริมาณมากประเภท F ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของวัสดุผง ผลจากการวิจัยพบว่าการนำผงฝุ่นหินปูนมาแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อัตราส่วนร้อยละต่างๆ จะส่งผลทำให้การหดตัวและร้อยละการไหลแผ่จะเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้นด้วย แต่ปริมาณฟองอากาศและความสามารถในการก่อตัวจะลดลงเล็กน้อย ส่วนคุณสมบัติด้านกำลังอัด, กำลังดัด และกำลังดึงจะลดลงตามปริมาณผงฝุ่นหินปูนที่เพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อระยะเวลาในการบ่มเพิ่มมากขึ้น ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 5 และ 10 จะมีการพัฒนากำลังเข้าใกล้กำลังรับแรงของมอร์ต้าร์ควบคุม ส่วนที่ร้อยละผงฝุ่นหินปูน 15, 20 และ 25 จะมีการพัฒนากำลังต่ำกว่า อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อผงฝุ่นหินปูนที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 90:10 โดยน้ำหนัก

2. วัตถุประสงค์ในงานวิจัย

เพื่อศึกษากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย

3. ขอบเขตและวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทำวิจัย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

2) ทราย เป็นทรายแม่น้ำจากอำเภอชุมพวง จังหวัดนครราชสีมา โดยงานวิจัยนี้ใช้ทรายที่มีขนาดคละตามธรรมชาติ ซึ่งใช้สัญลักษณ์ NS และทรายจากการร่อนและนำมาผสมกันให้มีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ซึ่งใช้สัญลักษณ์ CS

3) น้ำ ใช้น้ำประปาในพื้นที่จังหวัดนครราชสีมา

4) แคลไซต์ เป็นกากแร่จากบริษัทเอกชนในจังหวัดลพบุรีร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8

3.2 วิธีการวิจัย

1) อัตราส่วนผสมมอร์ต้าร์ควบคุมใช้อัตราส่วนซีเมนต์ต่อทราย 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก

2) อัตราส่วนการใช้แคลไซต์แทนที่ทรายทั้งสองชนิดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก

3) สัญลักษณ์ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายที่ควบคุมขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 คือ CSCa ส่วนมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายที่มีขนาดคละตามธรรมชาติ คือ NSCa สำหรับร้อยละการแทนที่ของแคลไซต์คือตัวเลข 10, 20, 30, 40 และ 50 ที่อยู่ถัดมา

3.3 ทำการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

3.4 ทำการทดลองผสมเพื่อหาปริมาณน้ำที่ทำให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงหรือใกล้ช่วง 105 ถึง 115 มากที่สุด แล้วจึงกำหนดอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ให้เป็นอัตราส่วนเดียวกันทุกอัตราส่วนผสม จากนั้นทำการหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด 50 x50x50 มม. ทำการถอดแบบหลัง 24 ชั่วโมง วัดขนาดและชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าหน่วยน้ำหนักก่อนนำไปดำเนินการทดสอบการรับกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7 และ 28วัน ตามมาตรฐาน ASTM C109

4. ผลและการอภิปรายผลการวิจัย

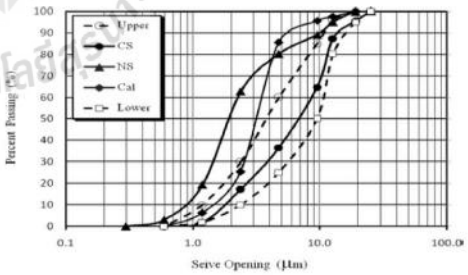
จากการศึกษาสามารถแบ่งผลการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

4.1 การทดสอบหาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุ

กากแร่แคลไซต์ *ทราย NS*

ภาพที่ 2 *ลักษณะอนุภาคของกากแร่แคลไซต์และทรายที่มีขนาดคละตามธรรมชาติ (NS)*

ภาพที่ 2 แสดงรูปลักษณะของอนุภาคและสีของแคลไซต์และทรายที่มีขนาดคละตามธรรมชาติ พบว่าแคลไซต์จะมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่าทราย และมีขนาดคละค่อนข้างเป็นขนาดเดียว (ดูภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 *ขนาดคละของทราย CS, NS และแคลไซต์ (Cal)*

ภาพที่ 3 เห็นได้ว่าทราย NS และแคลไซต์มีความละเอียดมากกว่าทรายที่ควบคุมขนาดคละ ซึ่งร้อยละอนุภาคของทราย NS และแคลไซต์ที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 มีค่าอยู่ที่ร้อยละ 80 และ 95 ตามลำดับ ส่วนทราย CS มีขนาดคละของอนุภาคที่ผ่านของตะแกรงเบอร์ 16 ในช่วง 50 ถึง 85 จะเห็นได้ว่าลักษณะกราฟขนาดคละของแคลไซต์เป็นลักษณะของมวลรวมที่มีขนาดเดียวเพราะมีการค้างตะแกรงเบอร์เดียวอยู่ถึงร้อยละ 60 ซึ่งมากกว่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ (ร้อยละ 50)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

Description	Cement	Sand		Calcite
		CS	NS	
Specific Gravity	3.15	2.61	2.56	2.77
Absorption (%)	-	0.62	1.21	3.49
Fineness Modulus	-	2.90	2.50	1.86
Bulk Unit Weight (kg/m^3)	-	1680	1680	1711
Percent of Voids	-	32.95	32.90	34.34

จากตารางที่ 1 พบว่า ความถ่วงจำเพาะปรากฏของทราย CS และ NS มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.61 และ 2.56 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการดูดซึมน้ำ 0.62 และ 1.21 ตามลำดับ แคลไซต์มีโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 1.86 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแคลไซต์มีความละเอียดมากกว่าทราย CS และ NS ส่วนการดูดซึมน้ำของแคลไซต์มีค่าเท่ากับ 3.49 ซึ่ง สูงกว่าทราย CS และ NS ค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากอนุภาคที่เล็กกว่าจึงทำให้มีพื้นผิวจำเพาะในการดูดซับน้ำได้มากกว่า ส่วนค่าหน่วยน้ำหนักของทรายและแคลไซต์มีค่าเท่ากับ 1680 และ 1711 กก./ม^3.

4.2 การทดสอบคุณสมบัติของมอร์ต้าร์

1) ปริมาณน้ำที่เหมาะสม ทำการทดสอบโดยทดลองผสมตัวอย่างมอร์ต้าร์ NSCa00 และมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย NS ร้อยละ 10, 30 และ 50 โดยน้ำหนัก ทดลองใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์หาร้อยละการไหลแผ่ที่ใกล้เคียง 105 ถึง 115 แล้วจึงนำค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์มาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งได้เท่ากับ 0.59

ผลจากการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณแคลไซต์แทนที่ทรายเพิ่มขึ้น ความต้องการน้ำในการผสมเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะของมวลรวมมากขึ้นความต้องการน้ำในการหล่อลื่นจึงเพิ่มขึ้นตาม

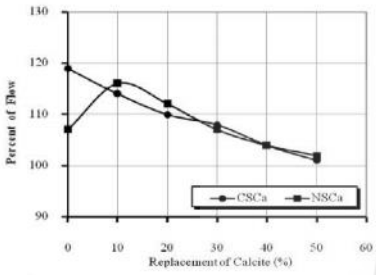
จากตารางที่ 2 เมื่อใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.59 การไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลไซต์แทนที่ทราย

ตารางที่ 2 ค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์

Mortar	W/C	Percent of Flow
NSCa00	0.59	107
NSCa10	0.59	116
NSCa20	0.59	112
NSCa30	0.59	107
NSCa40	0.59	104
NSCa50	0.59	102
CSCa00	0.59	119
CSCa10	0.59	107
CSCa20	0.59	110
CSCa30	0.59	108
CSCa40	0.59	104
CSCa50	0.59	101

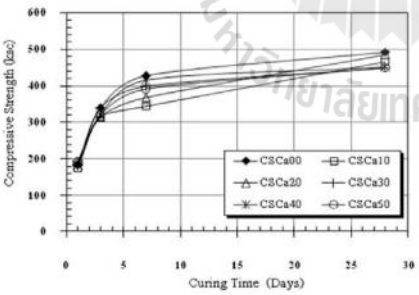
ภาพที่ 4 เป็นร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์แคลไซต์ทุกสัดส่วนผสมเห็นได้ว่าขนาดคละของมวลรวมมีผลต่อการไหลแผ่ มอร์ต้าร์ที่ใช้ทราย CS เมื่อแทนที่ด้วยแคล

ไซต์ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 ส่งผลให้การไหลแผ่ลดลงตามลำดับ ส่วนที่ใช้ทราย NS เมื่อแทนที่ด้วยแคลไซต์ที่ร้อยละ 0 และ 10 ค่าการไหลแผ่อยู่ใกล้ช่วงตามมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 105 ถึง 115 เมื่อแทนที่ด้วยแคลไซต์เพิ่มขึ้นค่าการไหลแผ่ลดลงเช่นกัน



ภาพที่ 4 ร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์กับการแทนที่ทรายด้วยแคลไซต์

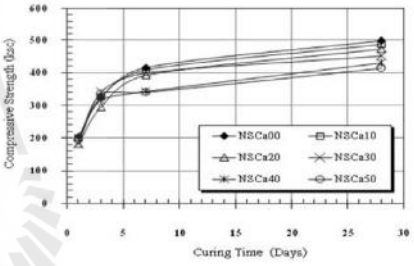
2) การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ภาพที่ 5 แสดงผลการทดสอบการรับกำลังอัด ของมอร์ต้าร์ CSCa เห็นได้ว่าที่ช่วงอายุ 1 และ 3 วัน กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย CS ทุกสัดส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม (CSCa00)



ภาพที่ 5 การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ CSCa

เมื่อช่วงอายุมอร์ต้าร์เพิ่มเป็น 7 วัน กำลังของมอร์ต้าร์ควบคุม CSCa00 มีค่าเท่ากับ 426 กก./ซม^2. ที่อัตราส่วนการแทนที่ทรายมีแนวโน้มในการรับกำลังลดลง CSCa10 มีค่ากำลังอัดต่ำสุดเท่ากับ 343 กก./ซม^2. โดยการรับกำลังสามารถรับได้เป็นร้อยละ 81 ของ CSCa00

ช่วงอายุการบ่ม 28 วัน กำลังอัดของ CSCa00 มีค่าเท่ากับ 493 กก./ซม^2. สำหรับมอร์ต้าร์ CSCa20 สามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม คือ 485กก./ซม^2. ส่วนมอร์ต้าร์แคลไซต์ CSCa10, CSCa30, CSCa40 และ CSCa50 รับกำลังได้ 465, 450, 451 และ 450 กก./ซม^2. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการใช้แคลไซต์แทนที่ทรายที่ควบคุมขนาดคละในส่วนผสมมอร์ตาร์ส่งผลให้กำลังอัดลดลงในปริมาณที่น้อย ประมาณร้อยละ 4-7



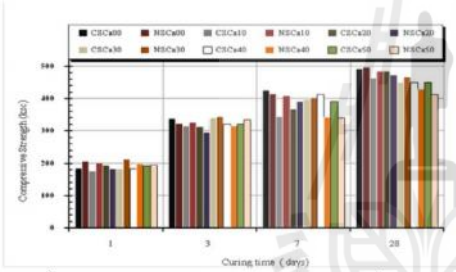
ภาพที่ 6 การรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa

จากภาพที่ 6 แสดงผลการทดสอบการรับกำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa ที่ช่วงอายุ 1 และ 3 วัน มอร์ต้าร์ NSCa00 สามารถรับกำลังได้ 206 และ 323 กก./ซม^2. ตามลำดับ สำหรับมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย NS ทุกสัดส่วนผสมสามารถรับกำลังอัดได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม

ที่ช่วงอายุ 28 วันพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa00 มีค่าเท่ากับ 497 กก./ซม^2. ส่วนกำลังอัดของมอร์ต้าร์ NSCa10, NSCa20, NSCa30, NSCa40 และ NSCa50 มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของแคลไซต์ คือ 485,

472, 467, 430, และ 414 กก./ซม ^{2} ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 2, 5, 6, 13 และ 17 ของมอร์ต้าร์ NSCa00

จากภาพที่ 7. แสดงกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ที่ใช้ทรายควบคุมขนาดคละ และมีขนาดคละตามธรรมชาติ ซึ่งพบว่ากำลังอัดไม่ได้แปรผันตามขนาดคละของทรายและความละเอียดของแคลไซต์ ที่ช่วงอายุ 1 และ 3 วัน การรับกำลังของมอร์ต้าร์ทุกสัดส่วนผสมสามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกัน ส่วนที่อายุ 28 วัน พบว่าเมื่อใช้แคลไซต์แทนที่ทรายในปริมาณเพิ่มขึ้นกำลังอัดของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มในการรับกำลังลดลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายขนาดคละตามธรรมชาติ



ภาพที่ 7 กำลังอัดของมอร์ต้าร์ CSCa และ NSCa ที่อายุต่างๆ

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้แคลไซต์แทนที่ทราย โดยใช้ลักษณะทรายธรรมชาติ เปรียบเทียบกับการควบคุมขนาดคละของทราย พบว่า

1) ค่าร้อยละการไหลแผ่มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคลไซต์ ในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ที่ใช้มวลรวมทั้งสองลักษณะเม็ดทราย

2) กำลังอัดของมอร์ต้าร์ในช่วงอายุต้นสามารถรับกำลังได้ใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ควบคุม เมื่ออายุเพิ่มเป็น 28 วัน กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของแคลไซต์

3) กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายที่ควบคุมและมีขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C33 ลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อใช้แคลไซต์แทนที่ทราย (ลดลงร้อยละ 4 ถึง 7 ที่อายุ 28 วัน) ในขณะที่กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายที่มีขนาดคละตามธรรมชาติลดลงอย่างมากเมื่อใช้แคลไซต์แทนที่ทราย (ลดลงร้อยละ 2 ถึง 17 ที่อายุ 28 วัน)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผู้จัดการบริษัทเอกชนแห่งหนึ่งในจังหวัดลพบุรีที่ให้ ความอนุเคราะห์วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ที่ให้ความสะดวกในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] ThaiPR.net (**Thailand Press Release ข่าวประชาสัมพันธ์**. [ออนไลน์]. ได้จาก http://www.thaipr.net/general/105881

[2] กรมทรัพยากรธรณี . (2548). **แคลไซต์** . [ออนไลน์]. ได้จาก www.dmr.go.th/main.php?filename=calcite

[3] Y. Benachour, C.A.Davy, F. Skoczylas, H. Houary. "Effect of High calcite addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of mortar", Cement and Concrete Research, 38, PP.727-736, Feb.2008

[4] สุชาติ ภาคภูมิเกียรติคุณ และคณะ, 2550, คุณสมบัติของมอร์ต้าร์ซีเมนต์ผสมฝุ่นหินปูน ,การประชุมวิชาการ ด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุครั้งที่ 1, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์) นครนายก

ประวัติผู้เขียน

นายจีรศักดิ์ สุพรมวัน เกิดวันที่ 30 มกราคม 2519 ที่อำเภอเมือง จังหวัดหนองคาย เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษา ที่โรงเรียนบ้านเหล่าฝ้ายผดุงวิทย์ จังหวัดหนองคาย ศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 ถึง 3 ที่โรงเรียนการศึกษาผู้ใหญ่(การศึกษาภาคค่ำ)ที่โรงเรียนเทศบาล 1 สว่างวิทยา จังหวัดหนองคาย ศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ แผนกช่างก่อสร้างที่วิทยาลัยเทคนิคหนองคาย ศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูงแผนกวิชาช่างก่อสร้าง ที่สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา และเมื่อปี พ.ศ. 2549 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคตะวันออกเฉียงเหนือ นครราชสีมา (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ในปัจจุบัน) ก่อนศึกษาในระดับปริญญาตรี ปฏิบัติหน้าที่เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบคอนกรีต และห้องปฏิบัติการโครงสร้างเป็นเวลา 3 ปี ภายหลังจบการศึกษาระดับปริญญาตรีทำงานกับบริษัทรับเหมาก่อสร้างในเขตปริมณฑลเป็นเวลา 2 ปี หลังจากนั้นมาปฏิบัติหน้าที่สอน ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา ในวุฒิปริญญาตรี ดังนั้น เพื่อเป็นการพัฒนาตนเองทั้งในด้านความรู้ ความสามารถในด้านการสอน และแนวความคิดริเริ่มใหม่ ๆ ในด้านงานวิจัย จึงเกิดแรงจูงใจเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2555 ในระหว่างการศึกษาได้มีบทความวิจัยตีพิมพ์ภายในประเทศ 1 บทความ ดังปรากฏรายละเอียดในภาคผนวก ค.