

บทที่ 4

วิธีศึกษาและวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการศึกษาและวิจัย ประกอบด้วย วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ สถานที่ใช้ในการทดสอบ รายละเอียดวิธีการทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบ และผงหินปูนที่ใช้ในงานวิจัย สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติ มอร์ตาร์ จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ และการประเมินคุณสมบัติการทดสอบ

4.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) ปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยเป็นปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 จากบริษัทที่พีไอโพลีน จำกัด (มหาชน) จังหวัดสระบุรี (TPIPL)
- 2) เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash, RHA) จากโรงไฟฟ้าปทุมไรซ์มิล แอนด์ แกรนารี จำกัด (มหาชน) จังหวัดปทุมธานี บด 4 ชั่วโมงด้วยเครื่องบดที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)
- 3) ผงหินปูน (Limestone Powder, LS) จาก TPIPL สระบุรี 2 ชนิด คือ
 - (1) ขนาด 0 ถึง 100 ไมโครเมตร (LS1)
 - (2) ขนาด 100 ถึง 600 ไมโครเมตร (LS2)
- 4) มวลรวมละเอียด มีขนาดคละเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 33
- 5) น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (รังสิต)
- 6) สารโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) และแมกนีเซียมซัลเฟต มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก หรือคิดเป็นปริมาณเท่ากับ 50 และ 42.36 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) แบบหล่อก่อนทดสอบทรงลูกบาศก์ ขนาด 50×50×50 มม.
- 2) แบบหล่อก่อนทดสอบทรงกระบอก ขนาด 25×25×285 มม.
- 3) โต๊ะการไหล และแบบหล่อรูปกรวย ตามมาตรฐาน ASTM C 230
- 4) เครื่องผสมมาตรฐานตามมาตรฐาน ASTM C 305
- 5) เครื่องชั่ง

- 6) เกรียง
- 7) เวอร์เนียร์
- 8) เครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล
- 9) เครื่องวัดการยืดหดตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 490

4.3 สถานที่ใช้ในการทดสอบ

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (รังสิต) และสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)

4.4 รายละเอียดวิธีการทดสอบ

รายละเอียดการทดสอบได้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ขั้นตอนส่วนที่ 1 ทำการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผง และทดสอบมอร์ตาร์เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618 และขั้นตอนส่วนที่ 2 เมื่อวัสดุผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ทำการทดสอบผลกระทบทั้งทางกล ทางกายภาพ และด้านความทนทานของวัสดุ (แสดงรายละเอียดแผนการทำงานทั้งหมด ดังภาพที่ 4.1) ซึ่งรายละเอียดมีดังนี้

4.4.1 ขั้นตอนส่วนที่ 1

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมี ลักษณะของวัสดุวิจัยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบและผงหินปูน แล้วทดสอบหาค่าความต้องการน้ำและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASTM C 618 รายละเอียด ดังนี้

1. ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผง คือปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบและผงหินปูน

1.1 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผง อาทิเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al_2O_3) ไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น ทดสอบโดย บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

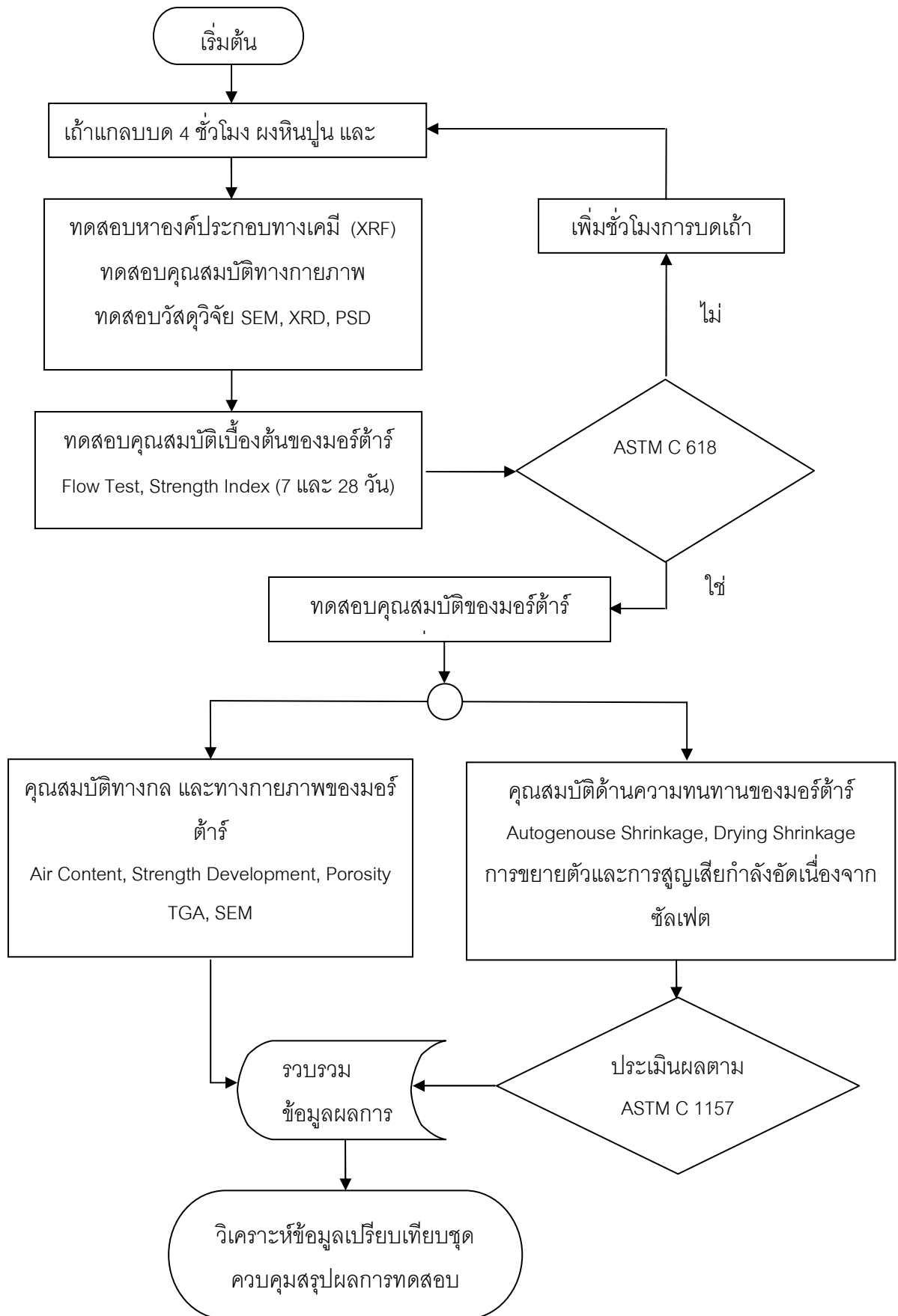
1.2 ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ ประกอบด้วย ความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) พื้นที่ผิวจำเพาะ (Blaine Fineness) ทดสอบโดย บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน)

1.3 ทดสอบลักษณะพื้นฐานทางวัสดุวิจัย ประกอบด้วยภาพขยาย (SEM) การกระจายขนาดคละของอนุภาค (PSD) การวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเทคนิครังสี X-Ray Diffraction (XRD) ทดสอบโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)

2. หาค่าความต้องการน้ำและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2.1 ค่าความต้องการน้ำทดสอบเพื่อหาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (W/B) ที่เหมาะสมโดยทดสอบการไหลแม่ (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 1437 โดยในส่วนผสมประกอบด้วยทรายต่อวัสดุผงโดยน้ำหนักเท่ากับ 2.75 ต่อ 1 บรรจุในแบบหล่อตามมาตรฐานรูปกรวยคว่ำเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนเท่ากับ 69.8 มิลลิเมตร และด้านล่าง 102 มิลลิเมตร สูง 12.7 มิลลิเมตร หลังจากถอดแบบหล่อทำการยกแท่นรองแล้วปล่อยให้ตกกระทบที่ระยะ 12.7 มิลลิเมตร 25 ครั้ง ในเวลา 15 วินาที ปริมาณน้ำที่เหมาะสม คือ ปริมาณน้ำที่ทำให้ค่าการไหลแม่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5

2.2 ทดสอบดัชนีกำลัง (Strength Index) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 ที่อายุ 7 และ 28 วัน โดยใช้มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. อัตราส่วนทรายต่อวัสดุผงโดยน้ำหนักเท่ากับ 2.75 ต่อ 1 ใช้ปริมาณน้ำจากการทดสอบการไหลแม่โดยให้ค่าการไหลแม่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง และบ่มในน้ำทันทีจนถึงเวลาทดสอบกำลังอัด



ภาพที่ 4.1 แผนการทำงาน

4.4.2 ขั้นตอนส่วนที่ 2

1. ทดสอบคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพของมอร์ตาร์

1.1 การทดสอบปริมาณอากาศ (Air Content) ทดสอบตามมาตรฐานของ BS EN 413-2 โดยใช้วิธีความดัน ขั้นแรกสอบเทียบปริมาณอากาศเท่ากับศูนย์ 3 ครั้ง ต่อจากนั้น ตักมอร์ตาร์ลงชุดทดสอบขนาด 1.0 ลิตร ทำให้แน่นด้วยแท่งกระทุ้ง ปาดผิวมอร์ตาร์ขีดด้วยผ้าชื้น ปิดฝาครอบแล้วขันให้แน่น ฉีดน้ำผ่านวาล์วเพื่อไล่อากาศออก บี้มอากาศจนเข็มความดันชี้ที่ระยะ เริ่มต้นปิดวาล์วแล้วเปิดวาล์วอัดอากาศ อ่านค่าปริมาณอากาศของมอร์ตาร์ที่ได้จากหน้าปัด แล้วเปิดวาล์วปล่อยอากาศออก ทำซ้ำอีกครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย

1.2 การทดสอบการพัฒนากำลัง (Strength Development) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยใช้มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 50×50×50 มม. ส่วนผสมทรายต่อวัสดุประสานโดยน้ำหนักเท่ากับ 2.75 อัตราส่วนของน้ำได้จากการทดสอบการไหลแผ่โดยค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110±5 ตัวอย่างทดสอบทำการถอดแบบเมื่ออายุ 24 ชั่วโมง และบ่มในน้ำที่จนถึงเวลาทดสอบกำลัง ที่อายุ 3, 7, 28, 56, 90, 120 และ 180 วัน

1.3 ทดสอบหาปริมาตรและการกระจายตัวของโพรง (Porosity Structure) ด้วยวิธี Mercury intrusion porosimetry (MIP) เป็นการวัดการกระจายของรูพรุนโดยใช้สารปรอท ซึ่งสามารถสอดแทรกเข้าไปในรูและช่องว่างในช่วง 0.003 ถึง 360 ไมโครเมตรได้ดี เพื่อหาปริมาตรและการกระจายของโพรงในมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่างๆ ทดสอบโดยสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

1.4 หาปริมาณของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ วิเคราะห์จากการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความร้อนด้วยวิธี Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ใช้วัดการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ โดยทำการวัดหาปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่คงเหลืออยู่ในมอร์ตาร์ ช่วงอุณหภูมิทดสอบประมาณ 450 ถึง 600 องศาเซลเซียส เครื่องที่ใช้ทดสอบ (ดังภาพที่ 4.2) มีแหล่งให้ความร้อนเป็นระบบเตาเผาสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 50 ถึง 1500 องศาเซลเซียส มีอัตราเพิ่มลดอุณหภูมิ 0.1 ถึง 200 องศาเซลเซียสต่ออนาที มีระบบทำให้เตาเผาเย็นอย่างรวดเร็วโดยใช้อากาศ ระบบการทำงานและการประมวลผลถูกควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์ แสดงผลการวิเคราะห์ในรูปของเทอร์โมแกรมระหว่างร้อยละน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ หรือเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ ทดสอบโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



ภาพที่ 4.2
เครื่องวิเคราะห์หาความร้อนทาง TGA

2. การทดสอบคุณสมบัติในด้านความทนทานของมอร์ตาร์

2.1. ทดสอบการหดตัวแบบแห้ง (Drying Shrinkage) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 วัดการหดตัวที่เกิดขึ้น โดยใช้เครื่องมือวัดการยืดหดตัว Analog Strain Gauge ทำการวัดการหดตัวระหว่างมุม (Demec) 2 ตัวของแท่งตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ถอดแบบหล่อเมื่ออายุครบ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มในน้ำ 30 นาที ก่อนที่จะวัดความยาวครั้งแรก (L_x) แล้วแช่แท่งตัวอย่างไว้ในน้ำเมื่อถึงอายุ 28 วัน (ในระหว่างนั้นนำขึ้นมาวัดทุกๆ 3 วัน) นำแท่งตัวอย่างขึ้นจากน้ำเช็ดผิวให้แห้ง วัดความยาว (L_y) เก็บแท่งตัวอย่างในตู้บ่มซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ± 5 และ 25 ± 2 องศาเซลเซียส นำแท่งตัวอย่างออกมาวัดความยาวทุกๆ สัปดาห์ (L_z) จนกระทั่งความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปมีแนวโน้มค่าคงที่

$$Strain = \frac{L_x - L_i}{G} \times 100 \quad (4.1)$$

โดยที่ (G) คือ ความยาวสุทธิของแท่งมอร์ตาร์

2.2 ทดสอบการหดตัวแบบออโตจีเนียส (Autogenous Shrinkage) ตามมาตรฐาน ASTM C 490 วัดการหดตัวที่เกิดขึ้นโดยใช้เครื่องมือวัดการยืดหดตัว Analog Strain Gauge ทำการวัดการหดตัวระหว่างมุม (Demec) 2 ตัวของแท่งตัวอย่างโดยใช้แบบหล่อขนาด 25x25x285 มิลลิเมตร ถอดแบบเมื่ออายุครบ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง วัดค่าหลังจากถอดแบบเป็นค่า

เริ่มต้น บ่มด้วยการห่อพลาสติก และเก็บในตู้บ่มซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60±5 และ 25±2 องศาเซลเซียส นำแท่งตัวอย่างออกมาวัดความยาวทุกๆ สัปดาห์ จนกระทั่งความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปมีแนวโน้มค่าคงที่

2.3 ทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยใช้มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 50×50×50 มม. และตัวอย่างปริซึมขนาด 25×25×285 มม. สัดส่วนผสมของทรายต่อวัสดุผงเท่ากับ 2.75 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก หลังจากถอดแบบมอร์ตาร์นำก้อนตัวอย่างมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ และมอร์ตาร์ทรงปริซึมบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัว ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์จนสามารถกำลังอัดได้เท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล หรือมากกว่า หลังจากนั้นนำมอร์ตาร์ปริซึมที่แช่ในน้ำปูนใสอิ่มตัวที่มีอายุเท่ากับมอร์ตาร์ทรงลูกบาศก์ที่รับกำลังอัดได้ 20.0±1.0 เมกะปาสคาล นำมาวัดความยาวตามมาตรฐาน ASTM C 1012 ควบคุม pH ในสารละลายซัลเฟตให้อยู่ในช่วง 6 ถึง 8 ด้วยสารละลายกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาริตี (M) ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวทุกๆ สัปดาห์ โดยใช้เครื่อง Analog Length Comparator แล้วประเมินคุณสมบัติการขยายตัวตามตารางที่ 4.1

2.4 ทดสอบการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 50×50×50 มม. สัดส่วนผสมของทรายต่อวัสดุผงเท่ากับ 2.75 ต่อ 1 ใช้น้ำที่ได้จากการทดสอบการไหลแฉ่ที่ให้ค่าการไหลแฉ่เท่ากับ 110±5 วัดค่ากำลังอัดหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 3, 7, 28, 56, 90, 120 และ 180 วัน

ตารางที่ 4.1

คุณสมบัติการขยายตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 1157

Cement Type	GU	HE	MS	HS	MH
Sulfate Expansion (Sulfate Resistance) ^E					
6 months, max, %	-	-	0.10	0.05	-
1 year, max, %	-	-	-	0.10	-

หมายเหตุ GU เป็นปูนซีเมนต์ที่ใช้สำหรับในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมใดที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดาและใช้ในงานก่อสร้างตามปกติทั่วไป

HE เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้กำลังอัดสูงเร็วในระยะแรก

MS เป็นปูนซีเมนต์ที่ทนทานต่อซัลเฟตได้ปานกลาง

HS เป็นปูนซีเมนต์ที่ทนทานต่อซัลเฟตได้สูง

MH เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันปานกลาง

LH เป็นปูนซีเมนต์ที่ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำ

E สำหรับการทดสอบปูนซีเมนต์ทนทานซัลเฟตสูง จะใช้การทดสอบที่อายุตัวอย่าง 1 ปี และ 6 เดือน การทดสอบความเสียหายของปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตสูงที่อายุ 6 เดือน จะสามารถใช้ได้เว้นแต่จะเกิดการเสียหายที่อยู่ในค่าที่กำหนดสำหรับอายุ 1 ปี

4.6 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติมอร์ตาร์

แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.2

4.7 จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

จำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 4.3 ถึงตารางที่ 4.8

4.8 การประเมินคุณสมบัติการทดสอบ

ประเมินคุณสมบัติของเก้าอี้แกลบบดและผิงหินปูนที่นำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยการเปรียบเทียบผลการทดสอบในด้านต่างๆของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเก้าอี้แกลบบดล้วน มอร์ตาร์แทนที่ด้วยเก้าอี้แกลบบดผสมผิงหินปูน และมอร์ตาร์ควบคุม ตามการทดสอบทั้งหมด ดังนี้

1. ความต้องการน้ำ
2. การพัฒนากำลังอัด
3. ปริมาณอากาศ
4. กำลังอัดที่อายุต่างๆ
5. การหดตัวแบบแห้ง
6. การหดตัวแบบอโตจีเนียส
7. การขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต
8. การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายซัลเฟต
9. ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่คงเหลือ
10. ปริมาตรและการกระจายของโพรง

ตารางที่ 4.2

ส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบบดและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
อัตราส่วนร้อยละ 20, 30, และ 40 โดยน้ำหนัก

ลำดับ	ส่วนผสม	สัดส่วนที่ใช้ (ร้อยละ)		
		ปูนซีเมนต์	เถ้ากลบบด	ผงหินปูน
1	C100R0LS0	100	0	0
2	C80R20	80	20	0
3	C70R30	70	30	0
4	C60R40	60	40	0
5	C80R15LS5	80	15	5
6	C80R10LS10	80	10	10
7	C80R5LS15	80	5	15
8	C70R25LS5	70	25	5
9	C70R20LS10	70	20	10
10	C70R15LS15	70	15	15
11	C60R35LS5	60	35	5
12	C60R30LS10	60	30	10
13	C60R25LS15	60	25	15

หมายเหตุ

สัญลักษณ์ C, R และ LS คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้ากลบบด และผงหินปูน ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3

จำนวนตัวอย่างการทดสอบปริมาณอากาศ การไหลผ่าน และ ดัชนีกำลัง

ส่วนผสม	การทดสอบ			
	ปริมาณอากาศ	การไหลผ่าน	ดัชนีกำลัง (วัน)	
			7	28
C100	2	4	3	3
C80R20	2	4	3	3
C70R30	2	4	3	3
C60R40	2	4	3	3
C80R15LS1#5	2	4	3	3
C80R10LS1#10	2	4	3	3
C80R5LS1#15	2	4	3	3
C80R15LS2#5	2	4	3	3
C80R10LS2#10	2	4	3	3
C80R5LS2#15	2	4	3	3
C70R25LS1#5	2	4	3	3
C70R20LS1#10	2	4	3	3
C70R15LS1#15	2	4	3	3
C70R25LS2#5	2	4	3	3
C70R20LS2#10	2	4	3	3
C70R15LS2#15	2	4	3	3
C60R35LS1#5	2	4	3	3
C60R30LS1#10	2	4	3	3
C60R25LS1#15	2	4	3	3
C60R35LS2#5	2	4	3	3
C60R30LS2#10	2	4	3	3
C60R25LS2#15	2	4	3	3
รวม	44	88	66	66
	264			

ตัวอย่างสัญลักษณ์ C80R10LS1#10 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 80 ผสมเถ้าแกลบบด ร้อยละ 10 และผสมผงหินปูน LS1 ร้อยละ 10 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4
จำนวนตัวอย่างการทดสอบ TGA และ Porosity (MIP)

ส่วนผสม	อายุ (วัน)			
	TGA		MIP	
	28	180	28	180
C100	1	1	1	-
C80R20	1	1	1	-
C70R30	-	-	-	-
C60R40	1	1	-	-
C80R15LS1#5	-	-	-	-
C80R10LS1#10	1	1	1	-
C80R5LS1#15	-	-	-	-
C80R15LS2#5	-	-	-	-
C80R10LS2#10	1	1	1	-
C80R5LS2#15	-	-	-	-
C70R25LS1#5	-	-	-	-
C70R20LS1#10	-	-	-	-
C70R15LS1#15	-	-	-	-
C70R25LS2#5	-	-	-	-
C70R20LS2#10	-	-	-	-
C70R15LS2#15	-	-	-	-
C60R35LS1#5	-	-	-	-
C60R30LS1#10	-	-	-	-
C60R25LS1#15	-	-	-	-
C60R35LS2#5	-	-	-	-
C60R30LS2#10	-	-	-	-
C60R25LS2#15	-	-	-	-
รวม	5	5	4	

หมายเหตุ: การทดสอบในส่วนนี้ได้สุ่มส่วนผสมที่มีแนวโน้มกำลังอัดมากที่สุดที่อัตราส่วนแทนที่ร้อยละ 20 ของแต่ละส่วนผสม เนื่องจากการทดสอบมีค่าใช้จ่ายสูง จึงไม่สามารถทำทั้งหมดได้

ตารางที่ 4.5

จำนวนตัวอย่างทดสอบคุณสมบัติด้านความทนทานของมอร์ต้าร์

ส่วนผสม	การหัดตัว		การขยายตัว			
	แบบแห้ง	แบบ ออกโตจีเนียส	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
			มอร์ต้าร์ปริซึม		มอร์ต้าร์ลูกบาศก์	
C100	2	2	2	2	3	
C80R20	2	2	2	2	3	
C70R30	2	2	2	2	3	
C60R40	2	2	2	2	3	
C80R15LS1#5	2	2	2	2	3	
C80R10LS1#10	2	2	2	2	3	
C80R5LS1#15	2	2	2	2	3	
C80R15LS2#5	2	2	2	2	3	
C80R10LS2#10	2	2	2	2	3	
C80R5LS2#15	2	2	2	2	3	
C70R25LS1#5	2	2	2	2	3	
C70R20LS1#10	2	2	2	2	3	
C70R15LS1#15	2	2	2	2	3	
C70R25LS2#5	2	2	2	2	3	
C70R20LS2#10	2	2	2	2	3	
C70R15LS2#15	2	2	2	2	3	
C60R35LS1#5	2	2	2	2	3	
C60R30LS1#10	2	2	2	2	3	
C60R25LS1#15	2	2	2	2	3	
C60R35LS2#5	2	2	2	2	3	
C60R30LS2#10	2	2	2	2	3	
C60R25LS2#15	2	2	2	2	3	
รวม	44	44	44	44	66	
	242					

ตารางที่ 4.6

จำนวนตัวอย่างทดสอบการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

ส่วนผสม	การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (วัน)						
	7	28	56	90	120	150	180
C100	3	3	3	3	3	3	3
C80R20	3	3	3	3	3	3	3
C70R30	3	3	3	3	3	3	3
C60R40	3	3	3	3	3	3	3
C80R15LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C80R10LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C80R5LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C80R15LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C80R10LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C80R5LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
C70R25LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C70R20LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C70R15LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C70R25LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C70R20LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C70R15LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
C60R35LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C60R30LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C60R25LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C60R35LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C60R30LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C60R25LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
รวม	66	66	66	66	66	66	66
	462						

ตารางที่ 4.7

จำนวนตัวอย่างทดสอบการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ส่วนผสม	การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (วัน)						
	7	28	56	90	120	150	180
C100	3	3	3	3	3	3	3
C80R20	3	3	3	3	3	3	3
C70R30	3	3	3	3	3	3	3
C60R40	3	3	3	3	3	3	3
C80R15LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C80R10LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C80R5LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C80R15LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C80R10LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C80R5LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
C70R25LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C70R20LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C70R15LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C70R25LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C70R20LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C70R15LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
C60R35LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C60R30LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C60R25LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C60R35LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C60R30LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C60R25LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
รวม	66	66	66	66	66	66	66
	462						

ตารางที่ 4.8
จำนวนตัวอย่างทดสอบกำลังอัด (บ่มในน้ำปกติ)

ส่วนผสม	อายุ (วัน)						
	7	28	56	90	120	150	180
C100	3	3	3	3	3	3	3
C80R20	3	3	3	3	3	3	3
C70R30	3	3	3	3	3	3	3
C60R40	3	3	3	3	3	3	3
C80R15LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C80R10LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C80R5LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C80R15LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C80R10LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C80R5LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
C70R25LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C70R20LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C70R15LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C70R25LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C70R20LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C70R15LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
C60R35LS1#5	3	3	3	3	3	3	3
C60R30LS1#10	3	3	3	3	3	3	3
C60R25LS1#15	3	3	3	3	3	3	3
C60R35LS2#5	3	3	3	3	3	3	3
C60R30LS2#10	3	3	3	3	3	3	3
C60R25LS2#15	3	3	3	3	3	3	3
รวม	66	66	66	66	66	66	66
	462						