

การศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน

บุรฉัตร ฉัตรวีระ^{1*} และ เพิ่มพล ศรีนวล²

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของมอร์ตาร์ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน 2 ชนิด โดยสมบัติที่ศึกษาประกอบด้วย สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เถ้าแกลบบดและผงหินปูน สมบัติของมอร์ตาร์ได้แก่ ความต้องการน้ำ กำลังอัด การสูญเสียกำลังอัด และการหดตัวแบบแห้ง สารละลายที่ใช้ได้แก่ สารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM C 1012 โดยใช้เถ้าแกลบบดและผงหินปูน 2 ชนิดที่มีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเท่ากับ 29, 12 และ 128 ไมโครเมตร ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ค่าการไหลแปรร้อยละ 110 ± 5

จากการทดสอบพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ลดลงตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูนที่เพิ่มขึ้น โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 180 วัน ทุกชุดทดสอบต่ำกว่าชุดควบคุม มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 20 (C80R10LS,10) มีการพัฒนากำลังอัดดีที่สุดและใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ปกติ ส่วนการทดสอบความทนทานต่อซัลเฟต พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนเพิ่มมากขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัดและการหดตัวแห้งมีค่าลดลง การสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

* Corresponding author. E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

A Study of Properties of Mortar Portland Cement Type V Mixed with Ground Rice Husk Ash and Limestone Powder

Burachat Chatveera^{1*} and Permphon Srinourn²

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong 1, Khlong Luang, Pathum Thani 12121

Abstract

The objective of this research is to study the Properties of Portland cement mortar Type V mixed with Ground Rice Husk Ash (GRHA) and two types of limestone powder (LS1 and LS2). The physical and chemical properties of Portland cement Type V, ground rice husk ash, and limestone powder were tested. The properties of mortar such as water requirement, compressive strength, compressive strength loss and drying shrinkage were investigated. The solutions used in this study were sodium sulfate (Na_2SO_4) and magnesium sulfate (MgSO_4). The concentrations of both solutions were 5% by weight in accordance with the ASTM C 1012 standard. GRHA, LS1, and LS2 have particle sizes of 29, 12 and 128 μm . The replacement levels of GRHA, LS1, and LS2 in Portland cement Type V were 0%, 20% and 40% wt. of cementitious materials. The ratio of water to cementitious material was controlled based on the water requirements conforming to flow value at $110 \pm 5\%$.

The results showed that the compressive strength of mortar was decreased with increase the percentage replacements of GRHA and LS in Portland cement Type V. At 180 days, the compressive strength of all mortars was lower than that of the control mortar. Mortar containing 20% of GRHA and LS (C80R10LS₁10) was the highest development in compressive strength and as high as that of the control mortar. From the results of sulfate resistance, it was found that the higher was the percentage replacements of GRHA and LS in Portland cement Type V, the lower was the strength loss and drying shrinkage of mortar. The strength loss of mortars in magnesium sulfate solution was more than those in sodium sulfate solution.

* Corresponding author. E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th

¹ Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ประเทศไทยมีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลถึง 2 ด้าน ทั้งชายฝั่งทะเลตะวันออก บริเวณอ่าวไทย ด้านมหาสมุทรแปซิฟิก และชายฝั่งตะวันตกติดทะเลอันดามัน มหาสมุทรอินเดีย มีความยาวชายฝั่งประมาณ 2,600 กิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ชายฝั่งทะเล 23 จังหวัด มีประชากรอาศัยอยู่มากกว่า 11 ล้านคน มีความสำคัญในด้านเป็นที่อยู่อาศัย พื้นที่เพื่อการอุตสาหกรรม พาณิชยกรรม และการท่องเที่ยว มีการก่อสร้างมากมายเพื่อรองรับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและสังคม การก่อสร้างอาคารในบริเวณหรือที่ใกล้กับทะเล เช่น ตอม่อ ท่าเรือ กระจาด เรือ เขื่อน ฯลฯ ต้องคำนึงถึงผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตต่อคอนกรีต เพราะถ้าไม่ป้องกันผลกระทบของการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตในตอนเริ่มแรกของการก่อสร้างแล้ว คอนกรีตอาจเสียหายได้ในอนาคตอันใกล้ ทำให้ต้องซ่อมแซมคอนกรีตที่เสียหายจะมีค่าใช้จ่ายสูงมาก คุณสมบัติของปูนซีเมนต์ที่นำมาใช้ต้องเหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆ มาตรฐานการทดสอบวัสดุตาม ASTM C150 ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resisting Portland Cement) เป็นปูนปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ต้านทานซัลเฟตได้สูง สามารถทนทานต่อสารละลายซัลเฟตได้ดี แต่การป้องกันเหล็กจากสนิมมีน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทอื่น [1] ดังนั้นการเลือกชนิดของปูนซีเมนต์ที่เหมาะสมและใช้วัสดุปอซโซลานสามารถช่วยลดผลกระทบจากซัลเฟตและคลอไรด์ในน้ำทะเลได้ การพัฒนาและปรับปรุงสมบัติบางอย่างของคอนกรีตสามารถใช้วัสดุบางชนิดผสมเพิ่มเติมในปูนซีเมนต์หรือคอนกรีต ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ วัสดุเฉื่อย (Inert Materials) วัสดุซีเมนต์ (Cementing Materials) และวัสดุปอซโซลาน (Pozzolanic Materials) การนำเอาผงหินปูนและเถ้าแกลบซึ่งเป็นผลผลิตจากอุตสาหกรรมการเกษตรโดยได้จากโรงสีข้าว โรงไฟฟ้าที่ใช้พลังความร้อนจากการเผาถ่านในเตาเผาอิฐ มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุเฉื่อยและวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตเพื่อปรับปรุงสมบัติบางประการของคอนกรีตและเป็นการลดต้นทุนของคอนกรีต นอกจากนั้นยังเป็นการนำ

วัสดุผลพลอยได้ภายในประเทศมาทำให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าแกลบ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบทางกล ทางกายภาพ และความทนทานต่อซัลเฟตของมอร์ตาร์ผสมผงหินปูนและเถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตราที่ทีโอเอสพี จากบริษัท ทีทีโอโพลีน จำกัด (มหาชน) (TPIPL) จังหวัดสระบุรี

2) ผงหินปูนที่ใช้วิจัยจากบริษัท ทีทีโอโพลีน จำกัด (มหาชน) (TPIPL) สระบุรี มี 2 ขนาด คือขนาด 0 ถึง 100 ไมโครเมตร (LS1) และขนาด 100 ถึง 600 ไมโครเมตร (LS2)

3) เถ้าแกลบที่ใช้วิจัยจากโรงไฟฟ้าปทุมไรชมิล แอนด์ แกรนารี จำกัด (มหาชน) จังหวัดปทุมธานี โดยผ่านการบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง [2] ที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (AIT)

4) น้ำประปาจากห้องปฏิบัติการทางด้านวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

5) ทรายแม่น้ำผ่านการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 33 [3]

3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างมอร์ตาร์โดยใช้เถ้าแกลบและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่อัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) จากการทดสอบการไหลผ่าน (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C 1437 [4] โดยใช้อัตราส่วนน้ำที่ทำให้ค่าการไหลผ่านเท่ากับร้อยละ 110 ± 5 เพื่อทำการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 [5] ที่อายุ 7, 28, 90, 120 และ 180 วัน ตามลำดับ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT5)

แก้วกลมบด (GRHA) ฟงหินปูน (LS)

ส่วนผสม	ร้อยละการแทนที่					
	CT5	GRHA	LS1	LS2	W/B	Flow(%)
C100	100	-	-	-	0.610	110.5
C80R20	80	20	-	-	0.660	111.5
C80R15LS ₁ ,5	80	15	5	-	0.655	109.5
C80R10LS ₁ ,10	80	10	10	-	0.644	109.0
C80R5LS ₁ ,15	80	5	15	-	0.632	106.0
C80R15LS ₂ ,5	80	15	-	5	0.660	107.5
C80R10LS ₂ ,10	80	10	-	10	0.652	112.0
C80R5LS ₂ ,15	80	5	-	15	0.645	108.0
C60R40	60	40	-	-	0.721	110.5
C60R35LS ₁ ,5	60	35	5	-	0.710	110.0
C60R30LS ₁ ,10	60	30	10	-	0.693	113.0
C60R25LS ₁ ,15	60	25	15	-	0.674	108.5
C60R35LS ₂ ,5	60	35	-	5	0.716	112.5
C60R30LS ₂ ,10	60	30	-	10	0.701	114.5
C60R25LS ₂ ,15	60	25	-	15	0.690	107.0

3.3 วิธีการทดสอบ**3.3.1 การทดสอบสมบัติของปูนซีเมนต์ ฟงหินปูน และแก้วกลมที่ใช้ในงานวิจัย**

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี หาปริมาณสารประกอบประเภทออกไซด์ อาทิเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ไอออนออกไซด์ (Fe₂O₃) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) การทดสอบสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ การทดสอบความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่นรวม (Bulk Density) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดด้วยวิธีเบลน การทดสอบลักษณะพื้นฐานของวัสดุวิจัย ได้แก่ การทดสอบกระจายขนาดคละของอนุภาค (Particle Size Distribution, PSD) ความเป็นผลึกด้วยเทคนิค X – Ray Diffraction (XRD) การถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.2 การทดสอบสมบัติทางกลและทางกายภาพของมอร์ตาร์

1) การทดสอบการหดตัวแห้งของมอร์ตาร์ (Drying Shrinkage) โดยใช้มอร์ตาร์ขนาด 25 x 25 x 285 มม. วัดการหดตัวที่เกิดขึ้นระหว่างหมุด 2 ตัวของแท่งตัวอย่างด้วยเครื่อง Elongation Strain Gauge ถอดแบบเมื่ออายุครบ 24 ชั่วโมง บ่มในน้ำ 30 นาที วัดความยาวครั้งแรก จากนั้นบ่มในน้ำเมื่ออายุ 28 วัน วัดความยาวครั้งที่สอง เก็บแท่งตัวอย่างในตู้บ่มซึ่งควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60±5 และอุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส วัดความยาวแท่งตัวอย่างทุก 7 วันจนความยาวที่เปลี่ยนแปลงมีค่าคงที่ตามมาตรฐาน ASTM C 490 [6]

2) ทดสอบการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้มอร์ตาร์รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด

50×50×50 มม. ลัดส่วนผสมของวัสดุผงต่อทรายเท่ากับ 1 ต่อ 2.75 ใช้น้ำที่ได้จากการทดสอบการไหลแผ่นที่ให้ค่าการไหลแผ่นเท่ากับร้อยละ 110±5 วัดค่ากำลังอัดหลังจากแช่ในสารละลายซัลเฟตที่อายุ 3, 7, 28, 56, 90, 120 และ 180 วัน

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ พบว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 60.50 มีปริมาณของ SiO₂ เท่ากับร้อยละ 18.40 เถ้าแกลบชนิดที่ 4 ชั่วโมง มีปริมาณของ SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 88.75 พงหินปูน LS1 และ LS2 มีปริมาณ CaO เป็น

องค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 46.77 และ 44.94 ตามลำดับ ผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของวัสดุ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบชนิด พงหินปูน LS1 และ LS2 มีค่าเท่ากับ 3400, 4900, 6375 และ 409 cm²/g ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.17, 2.12, 2.76 และ 2.77 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของ เถ้าแกลบจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [7] ในส่วนของพงหินปูนซึ่งมีแคลเซียมออกไซด์สูงเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ Ca(OH)₂ สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับซิลิคอนไดออกไซด์ SiO₂ จากเถ้าแกลบชนิดได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT5) เถ้าแกลบชนิด (GRHA) และพงหินปูน (LS1, LS2)

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	CT5	GRHA	LS1	LS2
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂)	18.40	88.75	8.97	11.27
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al ₂ O ₃)	4.80	0.85	1.02	0.80
ไออนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃)	3.50	1.07	0.37	0.32
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	60.50	0.44	46.77	44.94
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.00	0.07	2.38	2.92
โปแตสเซียมออกไซด์ (K ₂ O)	0.40	1.74	0.13	0.14
โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O)	0.30	0.05	0.02	0.02
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃)	2.60	0.02	0.33	0.12
ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้ (LOI)	1.82	7.27	39.54	38.68
สมบัติทางกายภาพ	CT5	GRHA	LS1	LS2
ความละเอียดแบบเบลน (cm ² /g)	3400	4900	6375	409
ความถ่วงจำเพาะ	3.17	2.12	2.76	2.77
อนุภาคเฉลี่ยเชิงปริมาตร (µm)	11.1	29	12	128

4.2 ลักษณะอนุภาคของวัสดุผง

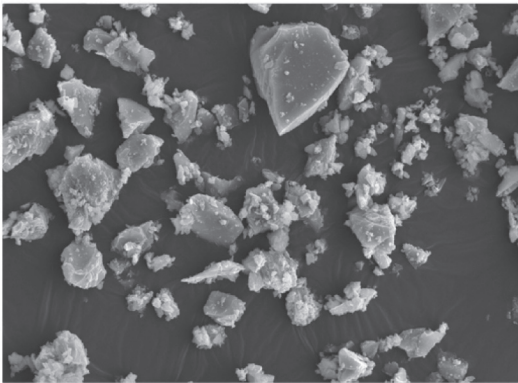
รูปที่ 1 แสดงลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีลักษณะเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระ และมีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน

รูปที่ 2 แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าแกลบก่อนบดด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่ามีลักษณะของอนุภาคค่อนข้างหยาบ มีความพรุนสูง และ

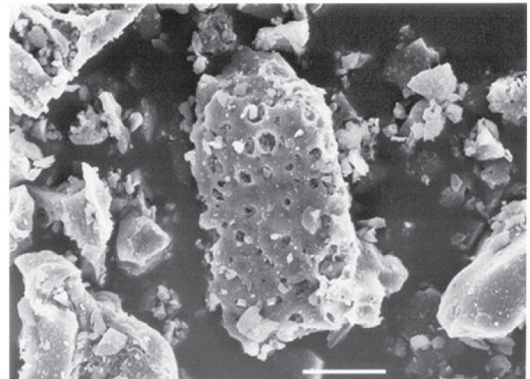
ผิวขรุขระเป็นโพรง

รูปที่ 3 แสดงลักษณะอนุภาคของผงหินปูน LS1 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเล็กและมีลักษณะเป็นเหลี่ยม อนุภาคโดยรวมมีขนาดไม่ต่างกันมาก

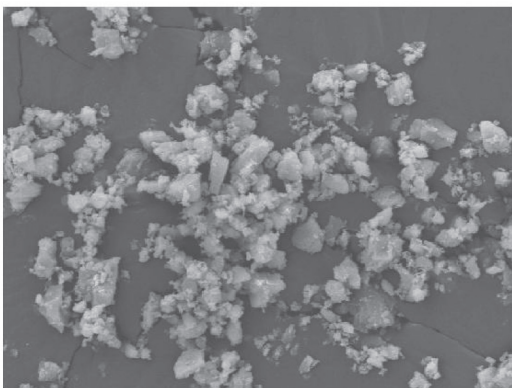
รูปที่ 4 แสดงลักษณะอนุภาคของผงหินปูน LS2 ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่ามีรูปร่างหยาบละเอียดแตกต่างกัน มีเหลี่ยมมุม และขนาดของอนุภาคใหญ่กว่า LS1



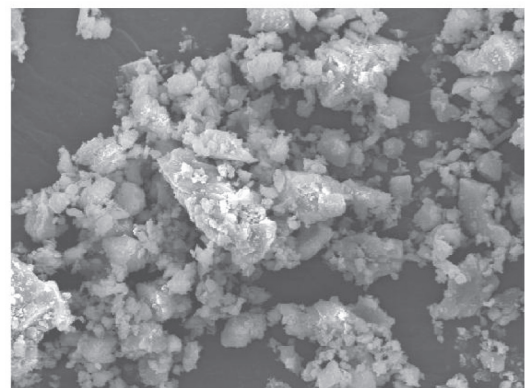
รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมง (กำลังขยาย 1,500 เท่า)



รูปที่ 3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของผงหินปูน LS1 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

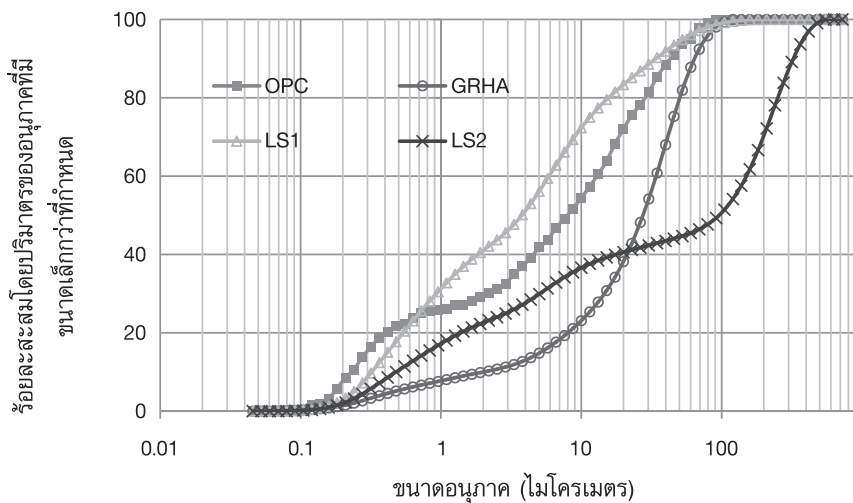


รูปที่ 4 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของผงหินปูน LS2 (กำลังขยาย 1,500 เท่า)

4.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผง

รูปที่ 5 แสดงผลทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคผง พบว่าการกระจายของอนุภาคปูนซีเมนต์เจ้าแกลบบด และผงหินปูน LS1 อยู่ในช่วง 0.1-100 ไมโครเมตร ส่วนผงหินปูน LS2 มีการกระจายของอนุภาค

อยู่ในช่วง 0.1-1000 ไมโครเมตร พิจารณาขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเชิงปริมาตร พบว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์เจ้าแกลบบด ผงหินปูน LS1 และ LS2 มีขนาด 11.10, 29, 12 และ 128 ไมโครเมตร ตามลำดับ

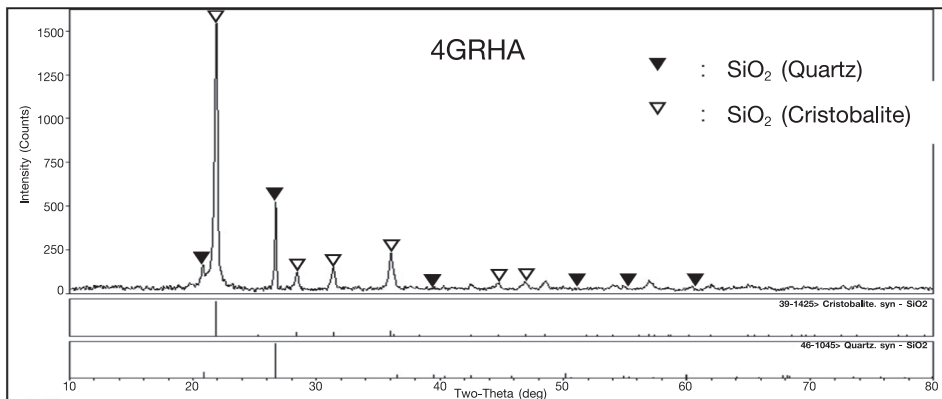


รูปที่ 5 การกระจายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เจ้าแกลบบด ผงหินปูน LS1 และ LS2

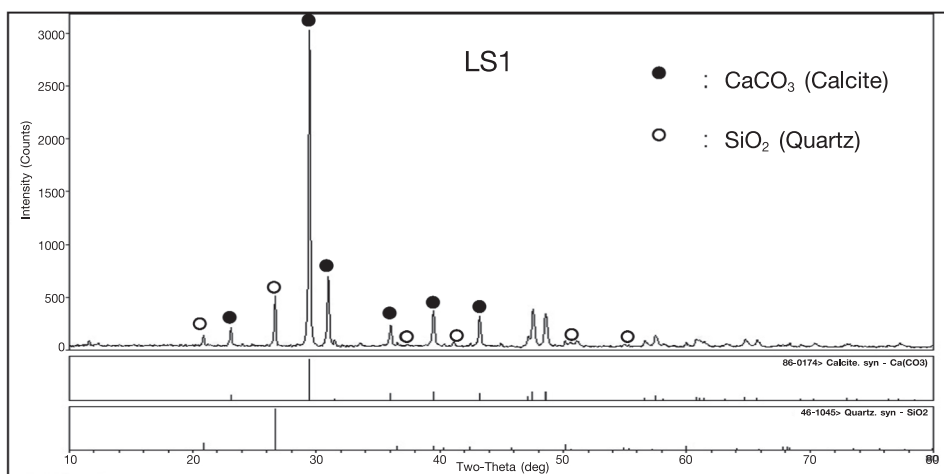
4.4 ความเป็นผลึกของอนุภาค

รูปที่ 6 แสดงผลทดสอบ X-Ray ของเจ้าแกลบบดด้วยเทคนิค XRD พบว่า จุด Peak Intensity ของเจ้าแกลบบด แสดงซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีมุม 2-Theta เท่ากับ 22 Counts สูงสุดเท่ากับ 1,600 มีสถานะเป็นผลึก Cristobalite และมุม 2-Theta เท่ากับ 27 Counts สูงสุดเท่ากับ 600 มีสถานะเป็นผลึก Quartz ซึ่งจะเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาเนื่องจากโครงสร้างจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ส่วนผงหินปูน LS1 และผงหินปูน LS2 รูปที่ 7 และรูปที่ 8 มี Peak Intensity ของ SiO_2 ที่

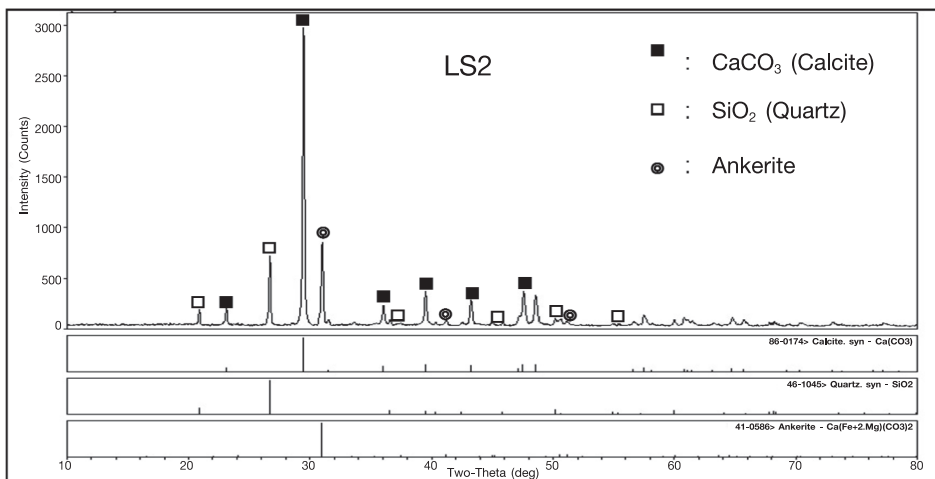
มุม 2-Theta เท่ากับ 26.5 Counts สูงสุดเท่ากับ 600 มีสถานะเป็นผลึก Quartz แต่ผงหินปูนมีสถานะเป็นอสัณฐานเนื่องจากมีแคลเซียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีมุม 2-Theta เท่ากับ 29.44 Counts สูงสุดเท่ากับ 2,900 และมุม 2-Theta เท่ากับ 30.97 Counts สูงสุดเท่ากับ 3,100 สถานะอสัณฐานของแคลเซียมคาร์บอเนตมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาได้ดีเนื่องจากโครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ [8]



รูปที่ 6 ความเป็นผลึกของอนุภาคแก้วเคลือบด GRHA



รูปที่ 7 ความเป็นผลึกของอนุภาคผงหินปูน LS1

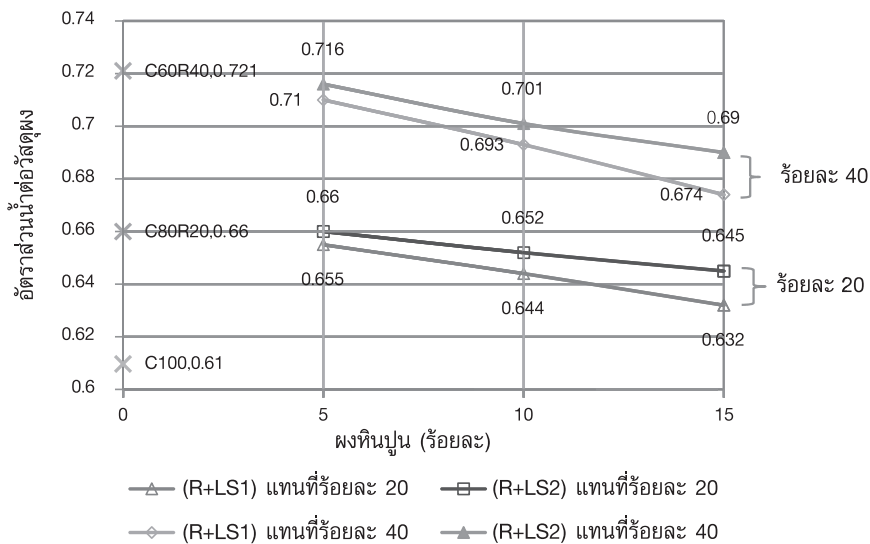


รูปที่ 8 ความเป็นผลึกของอนุภาคผงหินปูน LS2

4.5 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม

รูปที่ 9 แสดงความต้องการน้ำของมอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าความต้องการน้ำที่ทำให้ค่า (W/B) ให้ค่าการไหลแผ่เท่ากับ 110 ± 5 ของมอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับ 0.61 โดยที่อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้องการน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุมทุกอัตราส่วนผสม การแทนที่ของเถ้าแกลบเพิ่มขึ้นทำให้มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบมีลักษณะอนุภาคเป็นโพรงช่องว่างและมีรูพรุน ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำสูง [9]

เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนร้อยละการแทนที่เดียวกัน การเพิ่มปริมาณผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) ค่าความต้องการน้ำมีค่าลดลง เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณของผงหินปูนเป็นการลดปริมาณของเถ้าแกลบ ทำให้ช่องว่างภายในมอร์ตาร์ลดลง ความต้องการน้ำจึงมีค่าลดลง การแทนที่ด้วยผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) พบว่า มีค่าความต้องการน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมผงหินปูน LS1 ในอัตราส่วนการแทนที่เดียวกัน เพราะขนาดอนุภาคของผงหินปูน LS2 มีขนาดใหญ่และหยาบกว่า LS1 และเถ้าแกลบบด ทำให้กระจายตัวไม่ดี เกิดช่องว่างและโพรงในส่วนผสม การไหลลื่นของส่วนผสมลดลง จึงมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 9 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

4.6 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ตาร์

รูปที่ 10 ถึง รูปที่ 11 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า มอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนทุกชุดทดสอบ มีกำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมชุดทดสอบที่มีค่ากำลังใกล้เคียงชุดควบคุมมากที่สุด คือ ชุดปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 เถ้าแกลบบดร้อยละ 10 ผงหินปูน

LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 (C80R10LS₁,10) เท่ากับร้อยละ 94

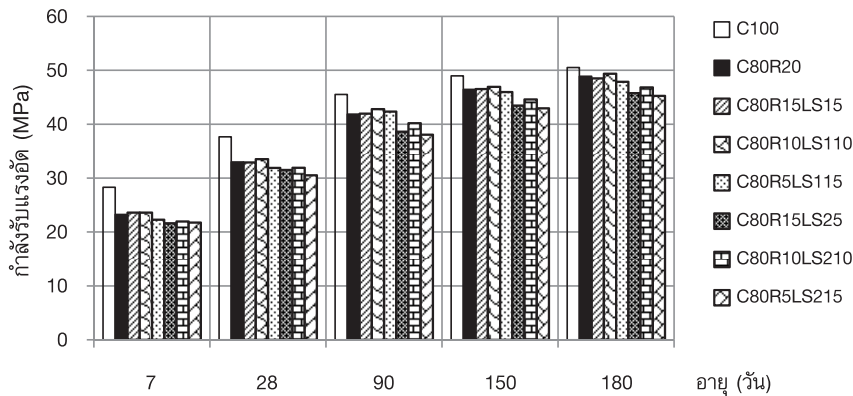
การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าชุดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) มีกำลังอัดมากที่สุด ตามด้วยมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วน และชุดทดสอบของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS2

(ขนาด 128 ไมโครเมตร) ตามลำดับ

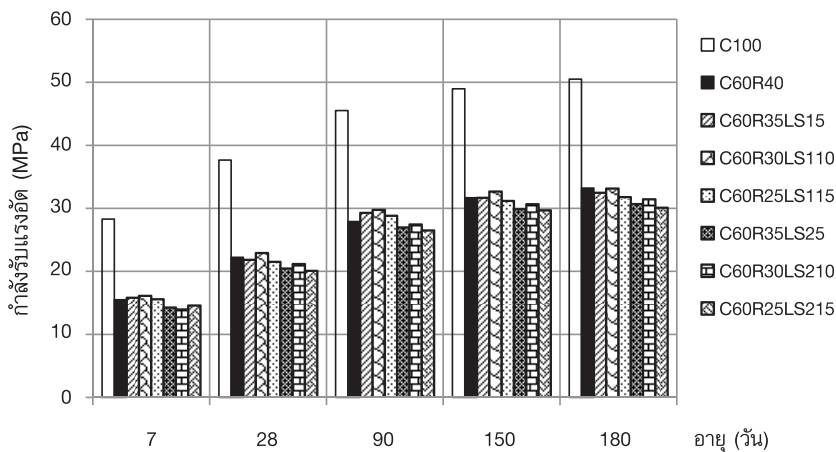
การเพิ่มปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 40 เป็นการแทนที่ส่วนผสมมากเกินไป ส่งผลให้กำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุมมาก เนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นอยู่กับปูนซีเมนต์ อีกปัจจัยหนึ่งคืออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ยิ่งมากกำลังอัดจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดสอบความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ในรูปที่ 9 และตารางที่ 1 ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 20 เป็นการแทนที่ส่วนผสมที่เหมาะสมเมื่ออายุมากขึ้นการพัฒนา กำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ควบคุมมากขึ้น สังเกตได้จากกำลังอัดที่อายุ 7 วัน เปรียบ

เทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 87 ที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 92

ความสามารถในการรับกำลังขึ้นอยู่กับผลจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุผสม [10] การแทนที่ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนเพิ่มขึ้นเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ลง ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันน้อยลง การรับกำลังอัดจึงน้อยลง การผสมผงหินปูน LS1 ร่วมกับซึ่งมีขนาดอนุภาคที่เล็กและใกล้เคียงปูนซีเมนต์ช่วยสอดแทรกการกระจายตัวได้ดีในเฟสตัวรวมทั้งยังช่วยแทรกอุดช่องว่างของโพรง (filler) ทำให้โครงสร้างเฟสตัวแน่นขึ้น ความสามารถในการรับกำลังและการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงทำได้ดีกว่าผงหินปูน LS2 ซึ่งมีอนุภาคใหญ่และหยาบกว่า



รูปที่ 10 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนร้อยละ 20 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



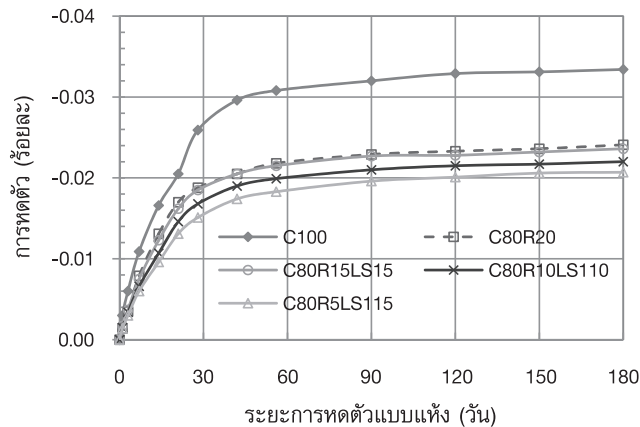
รูปที่ 11 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนร้อยละ 40 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5

4.7 การหดตัวแบบแห้ง

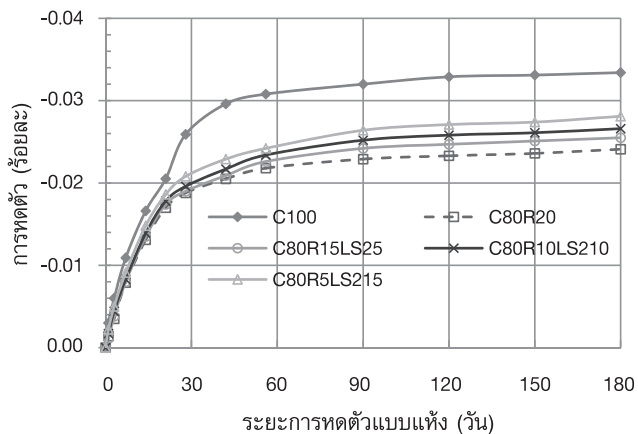
รูปที่ 12 ถึง 15 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก หลังจากบ่มตัวอย่างมอร์ตาร์ในน้ำประปาครบ 28 วัน พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 180 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0334 ซึ่งมากกว่าชุดทดสอบมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนทุกส่วนผสม

ในช่วงแรก (อายุ 0-28 วัน) การหดตัวของมอร์ตาร์มีอัตราการหดตัวลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากช่วงแรกน้ำอิสระซึ่งมีปริมาณมากสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกโดยผ่านทางช่องคาпилลารีได้ง่าย จนกระทั่งน้ำอิสระมีปริมาณลดลง ประกอบกับการที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น การทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ในมอร์ตาร์มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ทำให้ช่องคาпилลารีมีขนาดเล็กลง น้ำอิสระที่ยังคงหลงเหลือเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้น อัตราการหดตัวจึงลดลงอย่างช้าๆ [11]

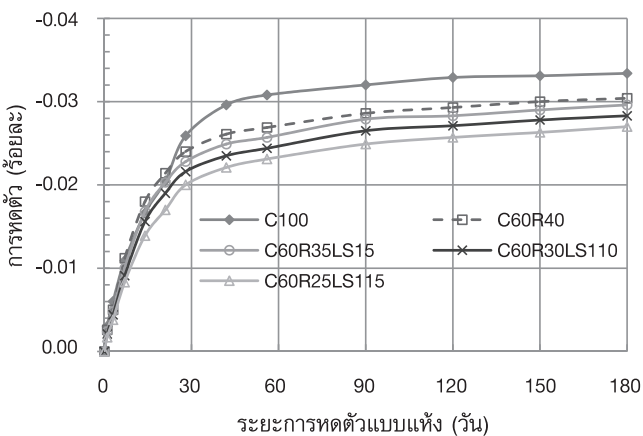
การแทนที่ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนเป็นการลดซีเมนต์เฟสที่เป็นต้นกำเนิดของการหดตัว [1] การแทนที่ด้วยผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) จึงมีการหดตัวน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบล้วน เนื่องจากอนุภาคผงหินปูน LS1 มีขนาดเล็กความสามารถสอดแทรกเข้าช่องว่างระหว่างโพรงคาпилลารีจึงสูงกว่ามอร์ตาร์เถ้าแกลบล้วน [11] อีกทั้งความต้องการน้ำมีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำอิสระในโพรงคาпилลารีจึงมีน้อยกว่า การแทนที่ด้วยผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) พบว่า มีการหดตัวมากกว่าทุกส่วนผสมแต่ยังน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากผงหินปูน LS2 มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดในวัสดุผง อีกทั้งความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำ การแทนที่ด้วยผงหินปูน LS2 นี้เป็นการเพิ่มปริมาตรของโพรง ทำให้น้ำอิสระในโพรงคาпилลารีมีเพิ่มขึ้น อัตราการสูญเสียน้ำออกสู่ภายนอกจึงสูงขึ้น การหดตัวแบบแห้งจึงมีค่าสูง



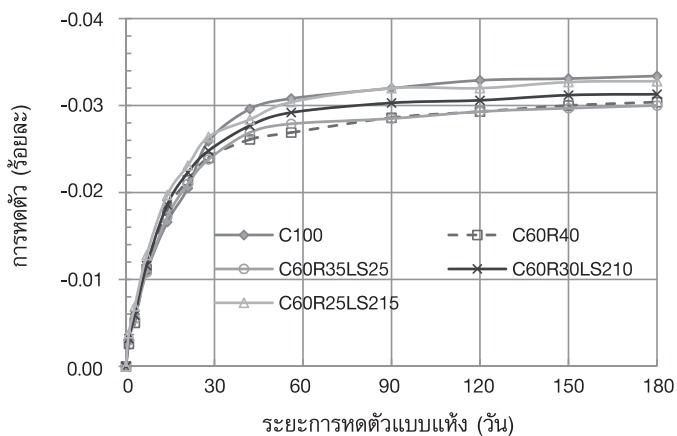
รูปที่ 12 มอร์ตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบผสมผงหินปูน LS1 ร้อยละ 20



รูปที่ 13 มอริตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 ร้อยละ 20



รูปที่ 14 มอริตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 ร้อยละ 40



รูปที่ 15 มอริตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 ร้อยละ 40

4.8 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

4.8.1 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลาย

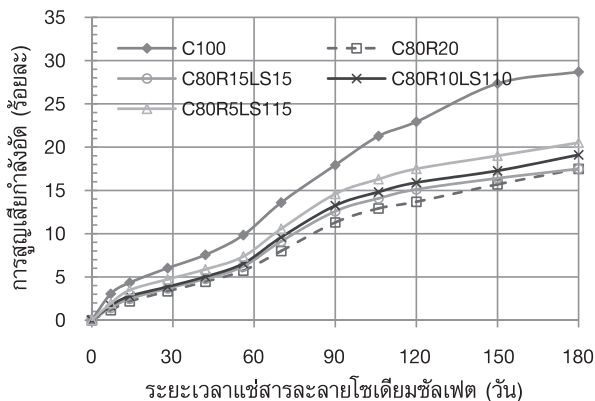
โซเดียมซัลเฟต (Na₂SO₄)

รูปที่ 16 ถึง รูปที่ 19 แสดงผลการทดสอบการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน แทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก แซในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า มอร์ตาร์ควบคุมมีการสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 180 วันเท่ากับร้อยละ 28.70 โดยที่มอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบลดล้นร้อยละ 20 (C80R20) มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 17.50 ค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดในสารซัลเฟตในช่วงต้น 0-60 วัน มีค่าต่างกันไม่มากนัก ทำให้ไม่เห็นผลกระทบของซัลเฟตได้ชัดเจนที่ช่วงอายุดังกล่าว การพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้นจะเห็นค่าที่ชัดเจนที่อายุ 60 วันขึ้นไป สังเกตได้ว่าที่อายุ 180 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบลดผสมผงหินปูน

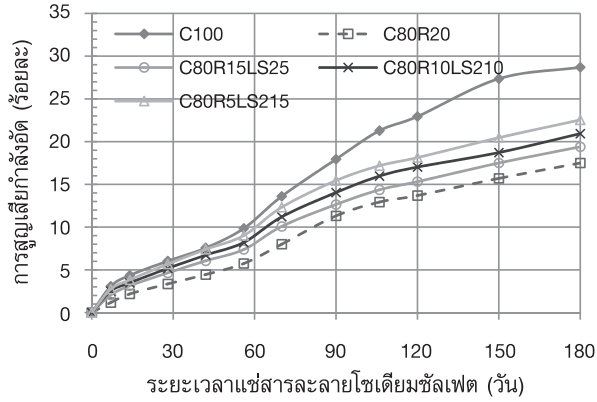
ทุกส่วนผสมสามารถต้านทานต่อโซเดียมซัลเฟตได้ดีกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

การแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 5 ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนชุด C80R15LS₅ ที่มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุดที่อายุ 180 วันเท่ากับร้อยละ 18.20 เป็นเพราะปริมาณของซิลิกาในเถ้าแกลบลดมีปริมาณที่พอเหมาะสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างแน่นขึ้นประกอบกับการลดลงของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยานี้เนื่องจากซัลเฟตลดลงทำให้ความรุนแรงจากการกระทำของสารละลายโซเดียมซัลเฟตลดลงหรือมอร์ตาร์มีความต้านทานต่อซัลเฟตเพิ่มขึ้น [12]

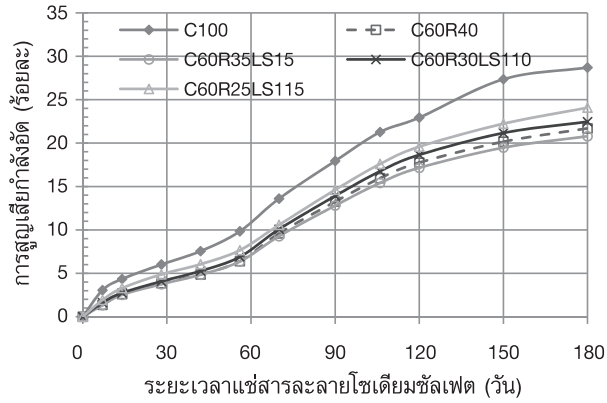
การแทนที่ผงหินปูน LS1 สูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าการแทนที่ผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) แสดงให้เห็นว่าวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดหยาบจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยกว่าการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีขนาดเล็กกว่า [13]



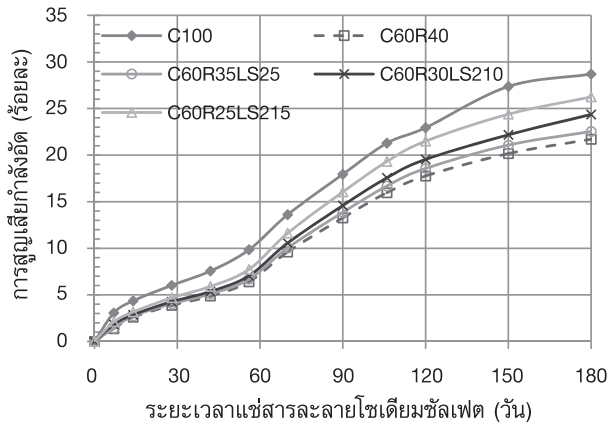
รูปที่ 16 มอร์ตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบลดผสมผงหินปูน LS1 ร้อยละ 20



รูปที่ 17 มอเตอร์น้ำมันที่แทนด้วยน้ำมันเกรดผสมผงหินปูน LS2 ร้อยละ 20



รูปที่ 18 มอเตอร์น้ำมันที่แทนด้วยน้ำมันเกรดผสมผงหินปูน LS1 ร้อยละ 40



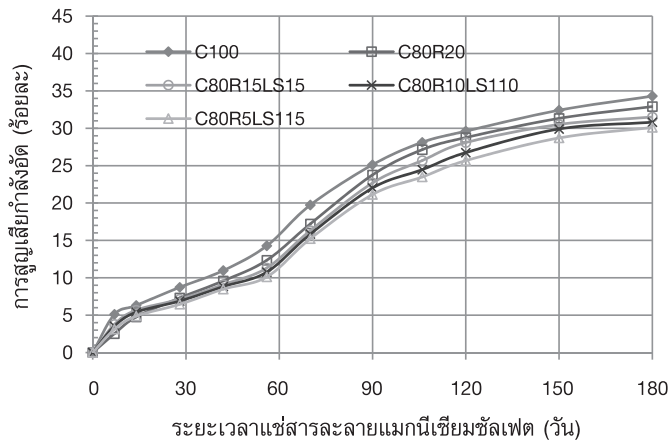
รูปที่ 19 มอเตอร์น้ำมันที่แทนด้วยน้ำมันเกรดผสมผงหินปูน LS2 ร้อยละ 40

4.8.2 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

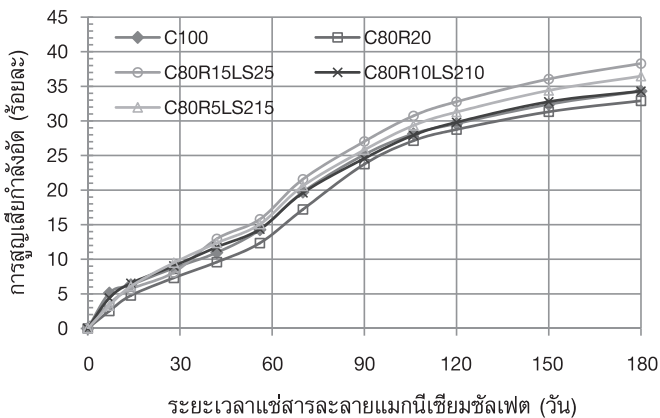
รูปที่ 20 ถึง รูปที่ 23 แสดงผลการทดสอบการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ตาร์ควบคุมมีการสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 34.30 และชุดที่สูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุดคือ ชุดมอร์ตาร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 5 ผสมรวมผงหินปูนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (C80R5LS₁₅) โดยสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 30.10

สังเกตได้ว่าที่อายุ 180 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบผสมผงหินปูน (LS1) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีกว่ามอร์ตาร์ควบคุม ส่วนอัตราส่วนผสมอื่นมีความต้านทานต่อแมกนีเซียมซัลเฟตต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม เนื่องจากการสูญเสียกำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนเพราะผลของการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกทำให้โครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความไม่

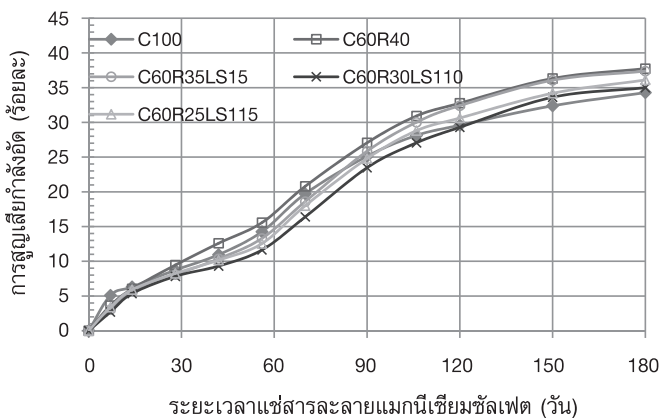
เสถียร [14] ทำให้ไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งมีความสามารถในการแทนที่แคลเซียมไอออนของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้สูงมาก [15] ทำให้โครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตถูกเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ส่วนมอร์ตาร์แทนที่ด้วยผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่ามอร์ตาร์แทนที่ด้วยผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) เป็นเพราะผงหินปูน LS1 สามารถเป็นวัสดุสอดแทรกได้ดี ทำให้โครงสร้างแน่นขึ้น การซึมผ่านเข้าทำปฏิกิริยาของซัลเฟตไอออนทำได้ยากขึ้น การสูญเสียกำลังอัดจึงน้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าค่าร้อยละการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์ที่บ่มในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตละลายน้ำได้ดีกว่าโซเดียมซัลเฟตทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีกว่า อีกทั้งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมซัลเฟตจะเปลี่ยนโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีสมบัติเชื่อมประสาน [12]



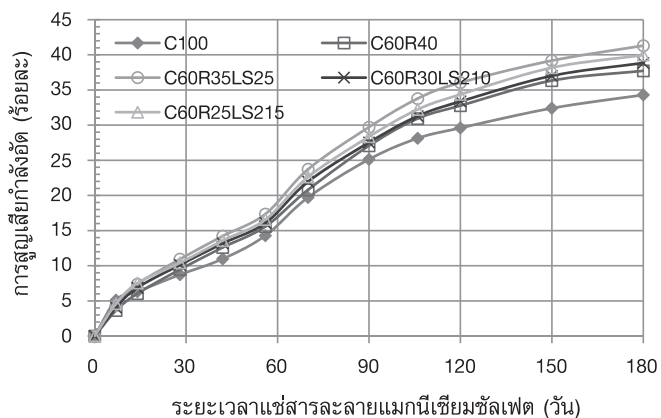
รูปที่ 20 มอร์ตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบผสมผงหินปูน LS1 ร้อยละ 20



รูปที่ 21 มอร์ตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 ร้อยละ 20



รูปที่ 22 มอร์ตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 ร้อยละ 40



รูปที่ 23 มอร์ตาร์ที่แทนด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 ร้อยละ 40

5. สรุปผลการวิจัย

1. การแทนที่เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความต้องการน้ำน้อยกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยที่มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS1) สามารถลดความต้องการน้ำมากกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS2)

2. มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS1) พัฒนากำลังอัดในช่วงต้นได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS2) แต่ยังคงต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

3. การแทนที่เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูนมีค่าการหดตัวแบบแห้งต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยที่มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS1) ช่วยลดการหดตัวได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS2)

4. ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) การแทนที่เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูนมีการสูญเสียกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยที่มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS1) ลดการสูญเสียกำลังอัดได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS2)

5. ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) การแทนที่เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูนมีการสูญเสียกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม แต่มอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน (LS1) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 มีการสูญเสียกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ควบคุม โดยที่ส่วนผสม C80R5LS,15 ช่วยลดการสูญเสียกำลังอัดได้ดีที่สุด

6. กิติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ บริษัทที่พีโอ โพลีน จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และผงหินปูน โรงไฟฟ้าปทุมโรสมิล แอนด์ แกรนารี จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์เถ้าแกลบดำ และบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวงจำกัด (มหาชน) ที่อนุเคราะห์การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

7. เอกสารอ้างอิง

1. Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C., 2006, *Cement, Pozzolan and Concrete*, Thailand Concrete Association, Bangkok, pp. 214-244. (In Thai)
2. Columnna, V.B., 1974, "The Effect of Rice Husk Ash in Cement and Concrete Mixes," *Master's Thesis*, No. 678, AIT, Thailand.
3. American Society for Testing and Materials, 2008, "ASTM C33 / C33M - 08 Standard Specification for Concrete Aggregates," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4.02, PA, USA.
4. American Society for Testing and Materials, 2007, "ASTM C1437 - 07 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4.01, PA, USA.
5. American Society for Testing and Materials, 2008, "ASTM C109 / C109M - 08 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4.01, PA, USA.
6. American Society for Testing and Materials, 2009. "ASTM C490 / C490M - 09 Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4.02, PA, USA.
7. American Society for Testing and Materials, 2008, "ASTM C618 - 08a Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4.02, PA, USA.
8. Umnuipornlert, S., 2004, *The Effect of Limestone Powder and Pulverized Fuel Ash on*

Mechanical Properties of Concrete, Master's Thesis, Thammasat, Thailand, pp. 60. (In Thai)

9. Damer, S.A. 1976, "Rice Husk Ash as a Pozzolanic Material," *Master's Thesis*, AIT, Thailand.

10. Isaia. G. C., Gastaldini. A. L. G., and Moraes. R. 2003, "Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High-performance Concrete." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 25(1), pp. 69-76.

11. Chatveera, B., Makul, N., and Sitijinda, A., 2010, "Effect of Limestone Powder and Ground Rice Husk Ash on Properties of Mortar Portland Cement," *Proceeding of the 15th Nation Convention on Civil Engineering*, May 12-14, Ubon Ratchathani, Thailand (In Thai)

12. Chatveera, B., Makul, N., and Rodanan, A., 2006, "Durability of Cement Mortar Containing

Black Rice Husk Ash under Sodium Sulfate and Magnesium Sulfate Attack", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 29, No. 1, pp. 55-71. (In Thai)

13. Tangpagasit, J., Songmue, S., Jaturapitakul, C., and Kiattikomol, K., 2005, "A Study of Strength Activity Index of Mortar Due to Hydration Reaction, Packing Effect, and Pozzolanic Reaction of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 28, No. 4, pp. 465-476. (In Thai)

14. Bendsted, J. and Barnes, P., 2002, *Structure and Performance of Cement*, London, English.

15. Cohen M.D. and Bemter A., 1998, "Durability of Portland Cement-Silica Fume Pastes in Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Solution", *ACI Materials Journal*, No. 85-M18. pp. 148-157.