บทที่ 5

ผลการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลทดสอบประกอบด้วย ผลการทดสอบคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบบดและผงหินปูน และคุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดและผงหินปูน โดยรายละเอียดมีดังนี้

5.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุผง

5.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 5.1 แสดงผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุผง พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 65.30 มีปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 20.58 เถ้าแกลบบดมีปริมาณของ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 88.75 ปริมาณ CaO ของผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) และ LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) มีปริมาณที่ใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 46.77 และ 44.94 ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณของ $CaCO_3$ ประมาณร้อยละ 83.40 และ 80.14 ตามลำดับ และจากปริมาณของแมกนิเซียมออกไซด์ (MaO) ของผงหินปูนทั้งสองชนิด เท่ากับ 2.38 และ 2.92 แล้วพิจารณาภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.9 พบว่าหินปูนทั้งสองชนิดเป็นหินปูนประเภท โดโลมิติค (Dolomitic Limestone)

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีเบลนของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบบด ผงหินปูน LS1 และ LS2 มีค่าเท่ากับ 3200, 4900, 6375 และ 409 ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.13, 2.12, 2.76 และ 2.77 ตามลำดับ ค่าความต้องการน้ำมีค่าเท่ากับร้อยละ 100, 109, 101 และ105 ตามลำดับ ค่าดัชนีกำลังโดยเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ซีเมนต์ปกติที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 100, 82, 84 และ 79 ตามลำดับ ที่อายุ 28 วันมีค่าเท่ากับ 100, 86, 89 และ 81 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบซึ่งเป็นวัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติผ่านตามเกณฑ์มาตฐาน ASTM C 618 ดังนั้นเถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมง จึงสามารถนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ได้ (อนัญญ์, 2547)

ตารางที่ 5.1

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบบด และผงหินปูน

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM C 618 (Class N)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบบด	ผงหินปูน LS1	ผงหินปูน LS2
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	-	20.58	88.75	8.97	11.27
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	-	5.30	0.85	1.02	0.80
3. ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	-	3.41	1.07	0.37	0.32
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	ร้อยละ ต่ำสุด 70	29.29	90.67	10.36	12.39
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	-	65.30	0.44	46.77	44.94
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	-	1.39	0.07	2.38	2.92
6. โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	-	0.35	1.74	0.13	0.14
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	ร้อยละ สูงสุด 1.5	0.02	0.05	0.02	0.02
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	ร้อยละ สูงสุด 4.0	2.26	0.02	0.33	0.12
9. ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	-	-	0.06	-	-
10. ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักจากการเผาไหม้(LOI)	ร้อยละ สูงสุด 10	1.40	7.27	39.54	38.68

ตารางที่ 5.2

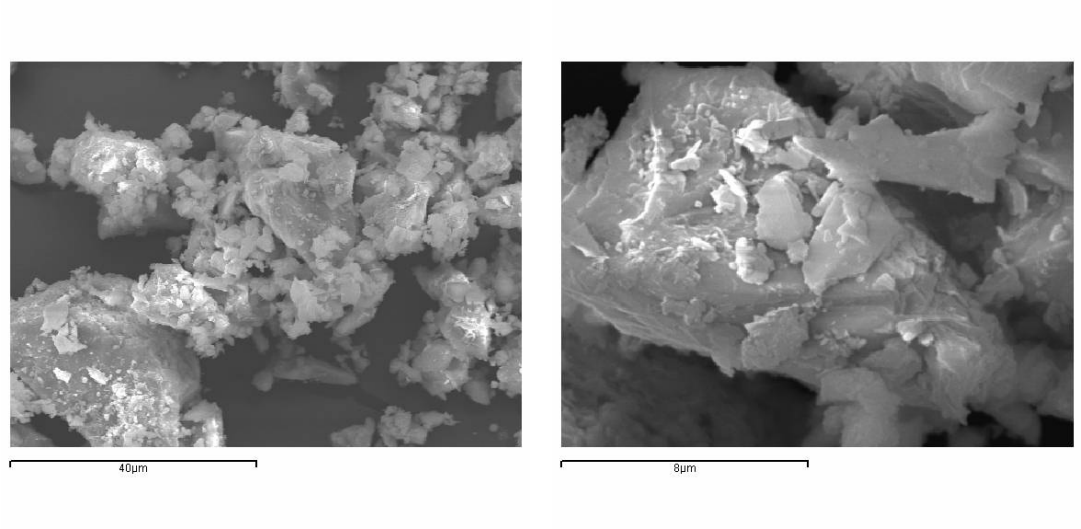
คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบบด และผงหินปูน

คุณสมบัติทางกายภาพ	ASTM C 618 (Class N)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1	เถ้าแกลบบด	ผงหินปูน LS1	ผงหินปูน LS2
1. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ร้อยละสูงสุด 3.0	0.19	0.26	0.15	0.17
2. พื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีเบลน (ตร.ซม.ต่อกรัม)	-	3,200	4,900	6,375	409
3. ความถ่วงจำเพาะ	-	3.13	2.12	2.76	2.77
4. ความละเอียด (ขนาดของอนุภาค, ร้อยละค้าง)	-				
- 75 ไมโครเมตร		0.98	13.00	11.04	88.98
- 45 ไมโครเมตร		7.34	30.34	19.90	91.12
- 36 ไมโครเมตร		10.94	39.00	23.40	91.68
5. ดัชนีกำลัง					
ที่อายุ 7 วัน (ร้อยละเทียบเท่าตัวอย่างควบคุม)	ร้อยละต่ำสุด 75	100	82	84	79
ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละเทียบเท่าตัวอย่างควบคุม)	ร้อยละต่ำสุด 75	100	86	89	81
6. ความต้องการปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	ร้อยละสูงสุด 115	100	109	101	105

5.1.2 **ลักษณะอนุภาคของวัสดุผง**

1. ลักษณะอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ภาพที่ 5.1 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1500 และ 7500 เท่า ตามลำดับ พบว่าลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ และมีขนาดอนุภาคคละกัน

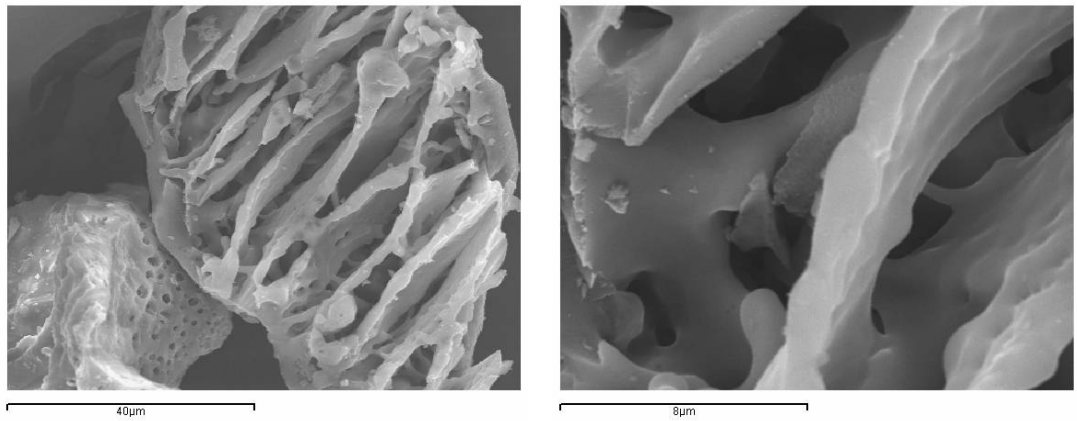


(ก) SEM กำลังขาย 1500 เท่า (ข) SEM กำลังขาย 7500 เท่า

ภาพที่ 5.1
ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

2. ลักษณะอนุภาคเถ้าแกลบ

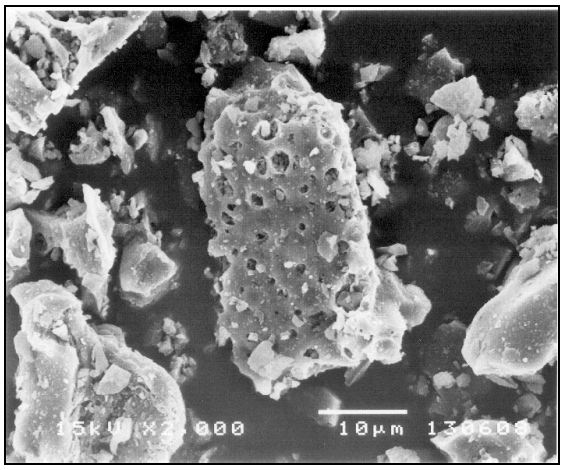
ภาพที่ 5.2 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะอนุภาคของเถ้าแกลบด้วยเทคนิค SEM ที่กำลังขยาย 1500 และ 7500 เท่า ของเถ้าแกลบไม่บด พบว่ามีลักษณะของอนุภาคเป็นโพรง พื้นผิวมีความพรุนและขรุขระเห็นได้ชัดเจน ซึ่งส่งผลต่อความต้องการน้ำที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นผิวที่มีความพรุนและขรุขระ มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ดีกว่าอนุภาคที่มีพื้นผิวเรียบ



(ก) SEM กำลังขาย 1500 เท่า (ข) SEM กำลังขาย 7500 เท่า

ภาพที่ 5.2
ลักษณะอนุภาคของเถ้าแกลบไม่บด

ภาพที่ 5.3 แสดงภาพถ่ายขยายของเถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมง พบว่าขนาดของโพรงและรูพรุนมีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับเถ้าแกลบไม่บด การนำเถ้าแกลบมาใช้ต้องผ่านการบดให้ละเอียดเพื่อลดปริมาณโพรง และให้มีขนาดอนุภาคที่เหมาะสมเพื่อใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ ซึ่งความเป็นโพรงและรูพรุนของเถ้าแกลบมีผลต่อการดูดซับน้ำ

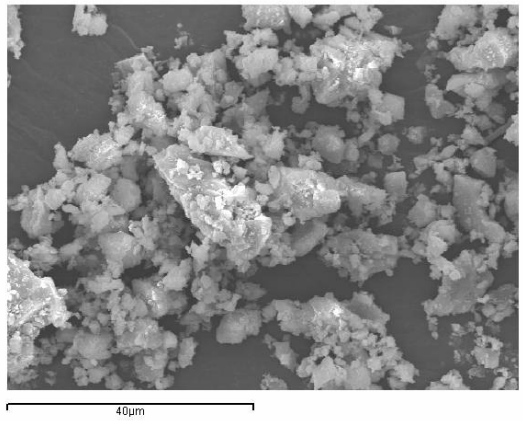


ภาพที่ 5.3
ลักษณะอนุภาคของเถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมง

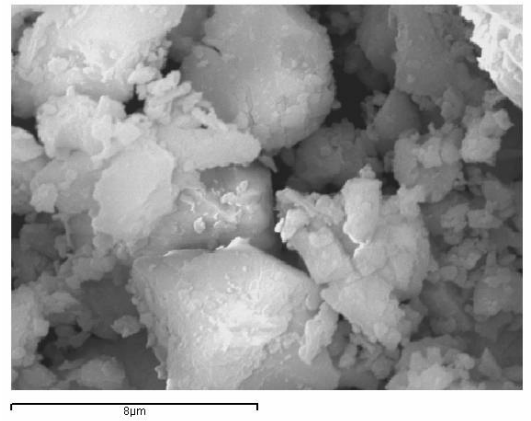
3. ลักษณะอนุภาคผงหินปูน

(1) ผงหินปูน LS1

ภาพที่ 5.4 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะอนุภาคของผงหินปูน LS1 ที่กำลังขยาย 1500 และ 7500 ตามลำดับ พบว่าอนุภาคของผงหินปูนมีขนาดเล็กและละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะอนุภาคเหลี่ยม โค้งมนคละกัน พื้นผิวขรุขระ อนุภาคโดยรวมมีขนาดไม่ต่างกันมาก



(ก) SEM กำลังขาย 1500 เท่า

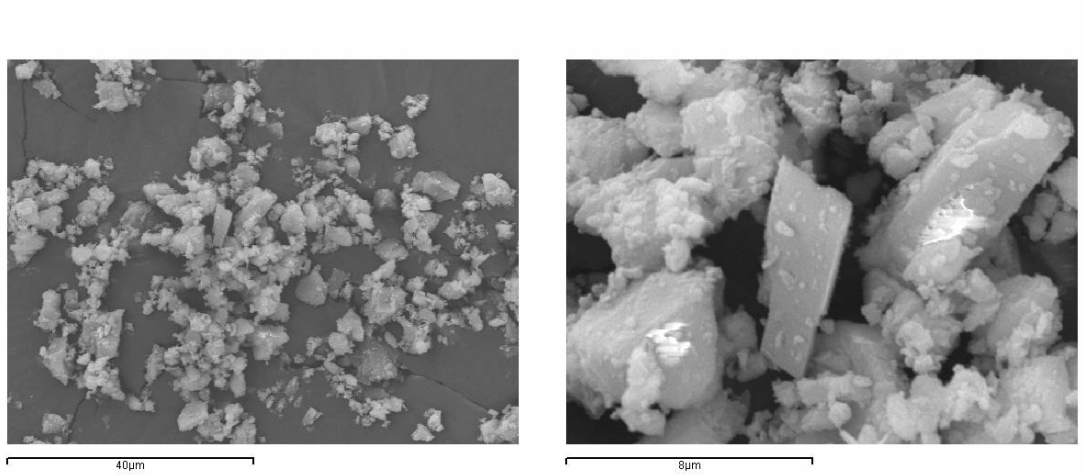


(ข) SEM กำลังขาย 7500 เท่า

ภาพที่ 5.4
ลักษณะอนุภาคของผงหินปูน LS1

(2) ผงหินปูน LS2

ภาพที่ 5.5 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะอนุภาคของผงหินปูน LS2 ที่กำลังขยาย 1500 และ 7500 เท่า ตามลำดับ พบว่าอนุภาค คล้ายกับ LS1 มีทั้งส่วนหยาบและส่วนละเอียดคละกัน โดยมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม พื้นผิวขรุขระ



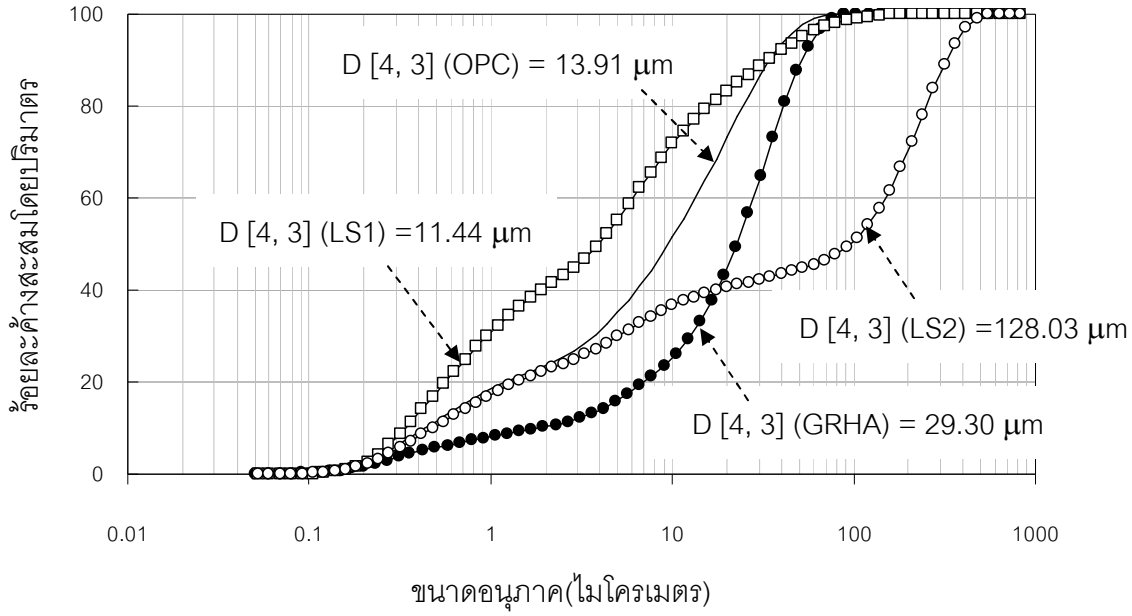
(ก) SEM กำลังขาย 1500 เท่าของส่วนละเอียด (ข) SEM กำลังขาย 7500 เท่าของส่วนละเอียด

ภาพที่ 5.5

ลักษณะอนุภาคของผงหินปูน LS2

5.1.3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคผง

ภาพที่ 5.6 แสดงผลทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคผง พบว่าการกระจายของอนุภาคปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบบด และผงหินปูน LS1 อยู่ในช่วง 0.1-100 ไมโครเมตร ส่วนผงหินปูน LS2 มีการกระจายของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-1000 ไมโครเมตร พิจารณาขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยเชิงปริมาตร (D[4, 3]) พบว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบบด ผงหินปูน LS1 และ LS2 มีขนาด 13.91, 29.30, 11.44 และ 128.03 ไมโครเมตร ตามลำดับ โดยผงหินปูน LS1 มีขนาดเฉลี่ยเชิงปริมาตรใกล้เคียงปูนซีเมนต์มากที่สุด



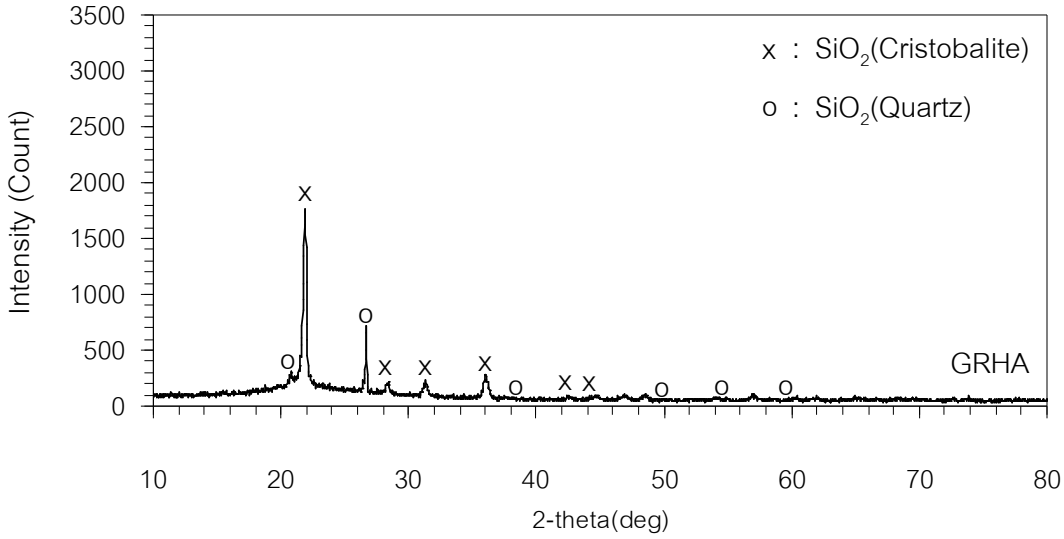
ภาพที่ 5.6

การกระจายขนาดคละของอนุภาคผง

สัญลักษณ์ OPC, GRHA, LS1 และ LS2 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมง ผงหินปูน LS1 และ LS2 ตามลำดับ

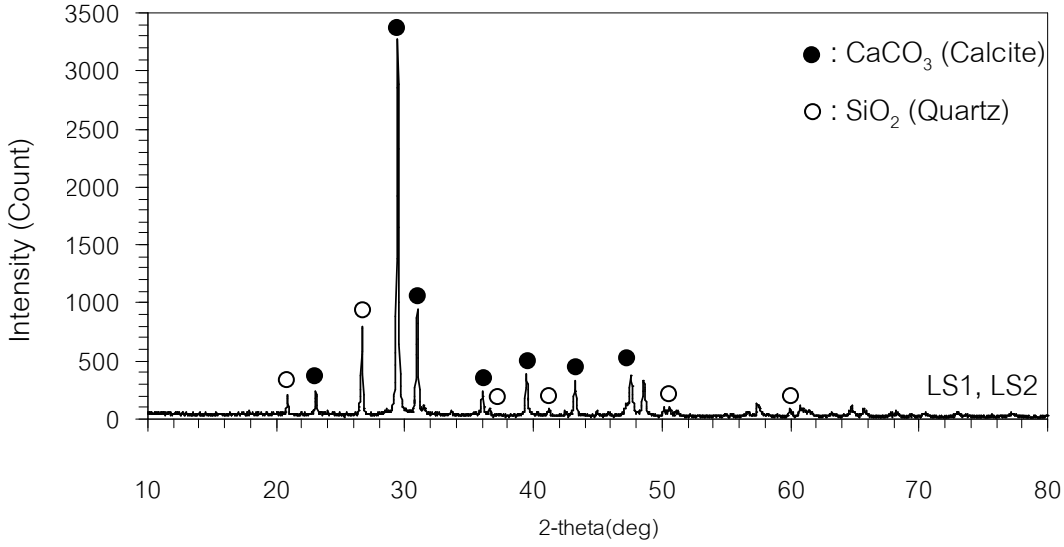
5.1.4 **ความเป็นผลึกของอนุภาค**

ภาพที่ 5.7 แสดงผลทดสอบ X-Ray ของเถ้าแกลบบดด้วยเทคนิค XRD พบว่า จุด Peak Intensity ของเถ้าแกลบบด แสดงซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ปรากฏชัดเจนที่มุม 2-Theta เท่ากับ 22 และ 27 ซึ่งเป็น Cristobalite และ Quartz ตามลำดับ ส่วนผงหินปูน LS1 และผงหินปูน LS2 ดังภาพที่ 5.8 มี Peak Intensity ของ SiO_2 (Quartz) ปรากฏชัดเจนที่มุมเท่ากับ 26.5 และมีแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ปรากฏชัดเจนที่มุม 2-Theta เท่ากับ 29.44 และ 30.97



ภาพที่ 5.7

ผลการตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD ของเถ้าแกลบบด



ภาพที่ 5.8

ผลการตรวจวัดด้วยเทคนิค XRD ของผงหินปูน LS1และ LS2

5.2 คุณสมบัติของซีเมนต์มอร์ต้าร์

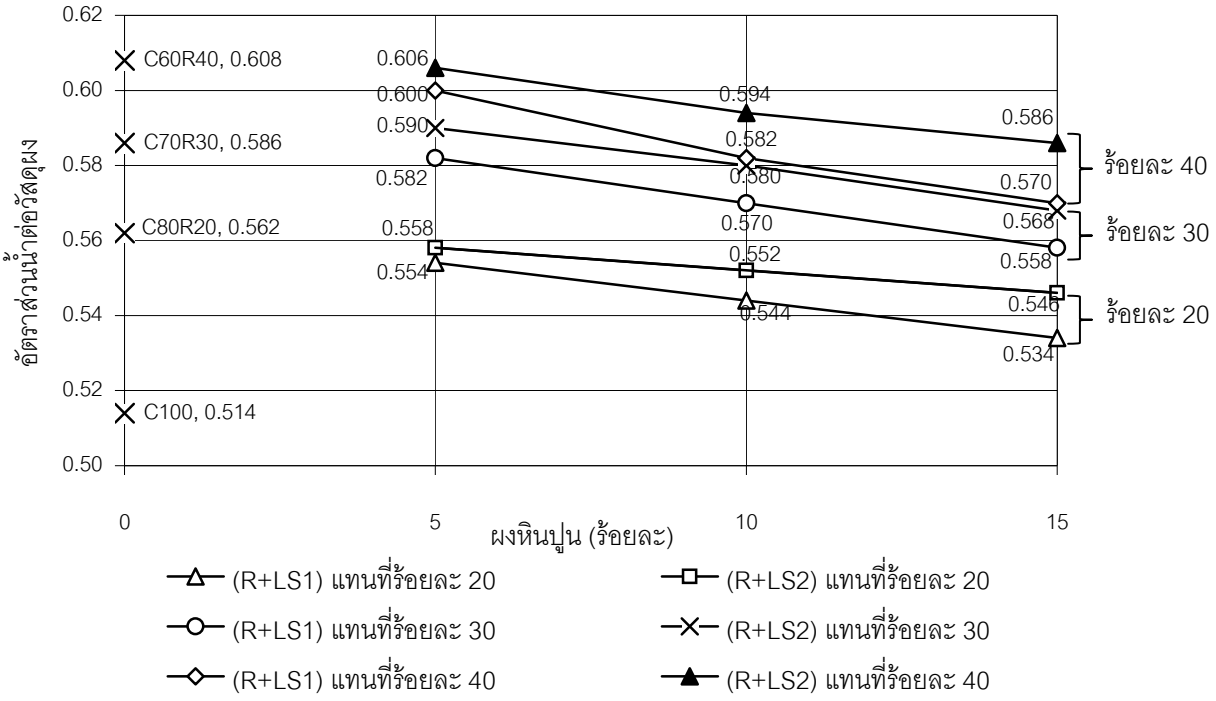
5.2.1 ปริมาณน้ำที่เหมาะสม

ภาพที่ 5.9 แสดงผลการทดสอบความต้องน้ำของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนการแทนที่ ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่า ปริมาณน้ำที่ให้ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ของมอร์ต้าร์ควบคุม เท่ากับ 0.514 และทุกอัตราส่วนผสมมีค่าความต้องการน้ำมากกว่าชุดควบคุม

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบล้วนมีความต้องการน้ำมากกว่าชุดควบคุม เท่ากับ 0.562, 0.586 และ 0.608 ตามลำดับ การเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบทำให้ความต้องการน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบมีลักษณะอนุภาคเป็นโพรงและมีรูพรุน มีความสามารถในการกักเก็บน้ำสูง การผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการเก็บน้ำในโพรงเพิ่มขึ้น อีกทั้งอนุภาคที่เป็นเหลี่ยม และ ผิวขรุขระ ของเถ้าแกลบบด เกิดการเสียดสีกับอนุภาคผสมทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อให้ค่าการไหลแผ่เท่ากันมีค่าเพิ่มขึ้น (Damer, 1976)

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบผสมร่วมผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) พบว่า ที่ร้อยละ 20 มีความต้องการน้ำมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมเล็กน้อย และความต้องการน้ำน้อยกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนที่อัตราส่วนเดียวกัน เป็นเพราะขนาดอนุภาคของ LS1 มีขนาดเล็กกว่าทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ ซึ่งช่วยเพิ่มการกระจายตัวของวัสดุผงได้ดีขึ้น ลดช่องว่างลงปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อทำให้ค่าการไหลแผ่เท่ากันจึงมีค่าน้อยลง แต่เนื่องด้วยมีส่วนผสมของเถ้าแกลบ จึงทำให้ค่าความต้องการน้ำมีค่ามากกว่าชุดมอร์ต้าร์ควบคุม เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนร้อยละการแทนที่เดียวกันการเพิ่มปริมาณผงหินปูน LS1 ค่าความต้องการน้ำมีค่าลดลง เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณของผงหินปูนเป็นการลดปริมาณของเถ้าแกลบ ความต้องการน้ำจึงมีค่าลดลง

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบผสมร่วมผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) พบว่า มีค่าความต้องการน้ำมากกว่ามอร์ต้าร์ที่ผสมผงหินปูน LS1 แต่ยังน้อยกว่ามอร์ต้าร์เถ้าแกลบล้วน ทั้งนี้เป็นเพราะขนาดอนุภาคของผงหินปูน LS2 มีขนาดใหญ่ สามารถสอดแทรกระหว่างอนุภาคผงได้ไม่ดี การกระจายตัวของวัสดุผงจึงไม่ดี เกิดช่องว่างทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้เพื่อทำให้ค่าการไหลแผ่เท่ากันมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ที่น้อยกว่ามอร์ต้าร์เถ้าแกลบล้วน เป็นเพราะเถ้าแกลบสามารถดูดน้ำแล้วกักเก็บไว้ในโพรง เมื่อมีส่วนผสมของผงหินปูน LS2 ทำให้ลดปริมาณของแกลบทำให้ความต้องการน้ำมีค่าลดลง



ภาพที่ 5.9

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ทำให้ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก สัญลักษณ์ C, R, LS1, LS2 คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าแกลบบด ผงหินปูน LS1 และ LS2 ตามลำดับ

5.2.2 ระยะเวลาการพัฒนากำลัง

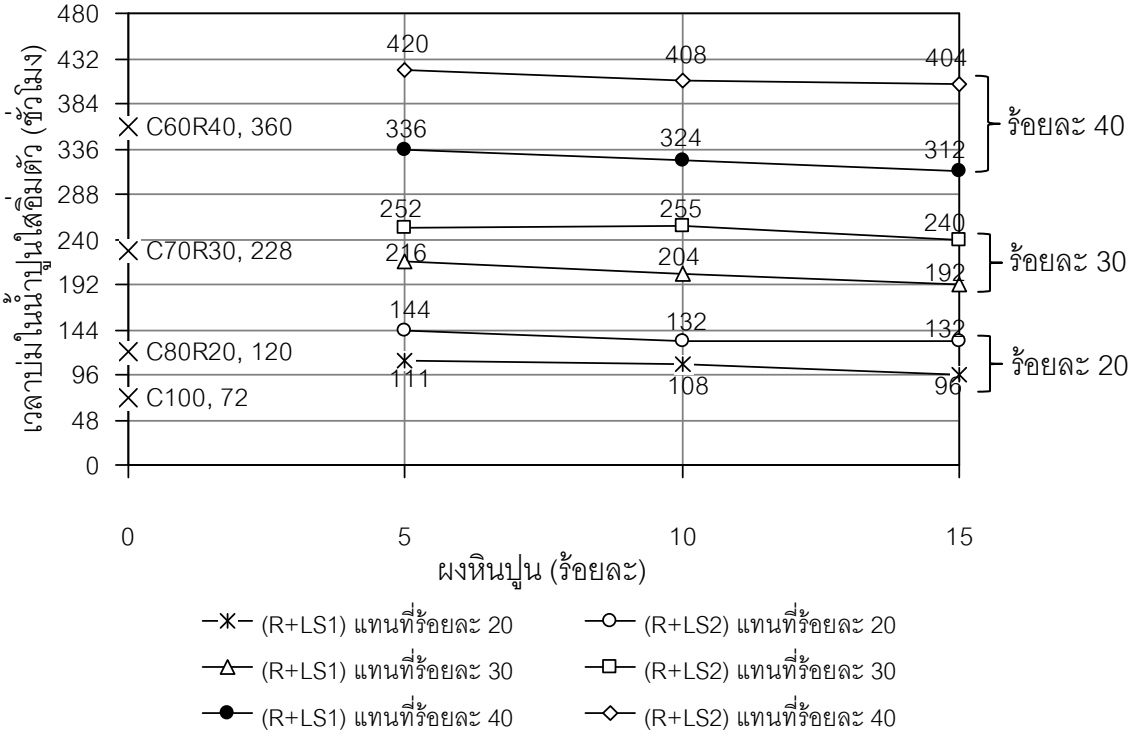
ภาพที่ 5.10 แสดงผลการทดสอบเวลาที่ใช้บ่มมอร์ต้าร์ในน้ำปูนใสอิ่มตัวจนมีค่ากำลังอัดในช่วง 20 ± 1 MPa พบว่า มอร์ต้าร์ควบคุมใช้เวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัวเท่ากับ 72 ชั่วโมง สามารถมีกำลังอัดเท่ากับ 20 ± 1 MPa การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนทุกส่วนผสมใช้เวลาบ่มในน้ำปูนใสมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนใช้เวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มเท่ากับ 120, 228 และ 360 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม เป็นเพราะการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงมีค่าลดลง อีกทั้งกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วน มีค่าต่ำในช่วงแรกเพราะการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคของ SiO_2 ใน

เถ้าแกลบต้องรอทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ได้ C-S-H ซึ่งการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้การพัฒนากำลังอัดใช้เวลาเพิ่มขึ้น

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 ใช้เวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมเล็กน้อย และน้อยกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนที่ร้อยละการแทนที่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูน LS1 มีอนุภาคเล็กกว่าทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบบด ซึ่งสามารถสอดแทรกเข้ากระจายขนาดคละของอนุภาคผงได้ดียิ่งขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงดีกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบล้วน ส่วนสาเหตุที่การพัฒนากำลังอัดน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม เป็นเพราะมีปริมาณของปูนซีเมนต์น้อยกว่าการพัฒนากำลังจึงช้ากว่า ผลจากการทดสอบนี้อาจกล่าวได้ว่าการเพิ่มการกระจายตัวด้วยการแทนที่ผงหินปูน LS1 ช่วยให้กำลังอัดพัฒนาเร็วขึ้นได้ ซึ่งผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่น ปฏิกิริยาปอซโซลานิค และลักษณะทางกายภาพ สามส่วนนี้จะส่งเสริมกันและมีความสำคัญต่อกำลังอัดของคอนกรีต (Isaia G.C., Gastaldini A.L.G., Moraer R., 2003)

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบผสมผงหินปูน LS2 พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 ใช้เวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม และมอร์ต้าร์ทุกส่วนผสมที่ร้อยละการแทนที่เท่ากัน เนื่องจากผงหินปูน LS2 มีอนุภาคใหญ่กว่าทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบบด ทำให้สอดแทรกระหว่างอนุภาคผงได้ไม่ดี การทำปฏิกิริยาจึงเกิดได้ไม่ดี กำลังในช่วงต้นจึงไม่ดีเมื่อเทียบกับชุดทดสอบอื่นๆ



ภาพที่ 5.10
เวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก จนสามารถรับกำลังอัดได้ 20±1 MPa

5.2.3 กำลังอัดของซีเมนต์มอร์ต้าร์

ภาพที่ 5.11 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนทุกชุดทดสอบ มีกำลังอัดน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมตลอดอายุการทดสอบ (0-180 วัน) โดย ที่อายุ 180 วัน ชุดที่มีค่ากำลังใกล้เคียงชุดควบคุมมากที่สุด คือ ชุดปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 เถ้าแกลบบดร้อยละ 10 ผงหินปูนขนาด 12 ไมโครเมตรร้อยละ 10 (C80R10LS1#10) เท่ากับร้อยละ 96

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) มีกำลัง

อัดมากที่สุด ตามด้วยมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) ตามลำดับ สามารถแยกรายละเอียดได้ดังนี้

- ช่วงอายุ 3-28 วันพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 มีค่ามากที่สุด คือ ชุดทดสอบ C80R10LS1#10 โดยมีกำลังรับแรงอัดที่ 28 วันเท่ากับร้อยละ 88

- ช่วงอายุ 28-90 วัน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 มีค่ามากที่สุด คือ ชุดทดสอบ C80R10LS1#10 โดยมีกำลังอัดที่ 90 วันเท่ากับร้อยละ 93

- ช่วงอายุ 90-180 วัน ชุดทดสอบที่มีค่ากำลังอัดมากที่สุดคือชุด C80R10LS1#10 มีกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 96 ในส่วนนี้สังเกตุได้ว่าการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วนร้อยละ 20 มีการพัฒนากำลังอัดที่ดีขึ้น โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับร้อยละ 95 ซึ่งใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 มีกำลังอัดมากที่สุด ตามด้วยมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS2 ตามลำดับ รายละเอียดดังนี้

- ช่วงอายุ 3-28 วันพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 มีค่ามากที่สุด คือ ชุดทดสอบ C80R20LS1#10 โดยมีกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับร้อยละ 68

- ช่วงอายุ 28-90 วัน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 มีค่ามากที่สุด คือชุดทดสอบ C80R20LS1#10 โดยมีกำลังอัดที่ 90 วันเท่ากับร้อยละ 73

- ช่วงอายุ 90-180 วัน มีแน้วโน้มเช่นเดียวกับการแทนที่ร้อยละ 20 กล่าวคือ ชุดทดสอบที่มีค่ากำลังอัดมากที่สุดคือชุด C80R25LS1#5 เท่ากับร้อยละ 82 และการพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20 การพัฒนากำลังอัดดีขึ้นโดยมีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 มีกำลังอัดมากที่สุด ตามด้วยมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS2 ตามลำดับ

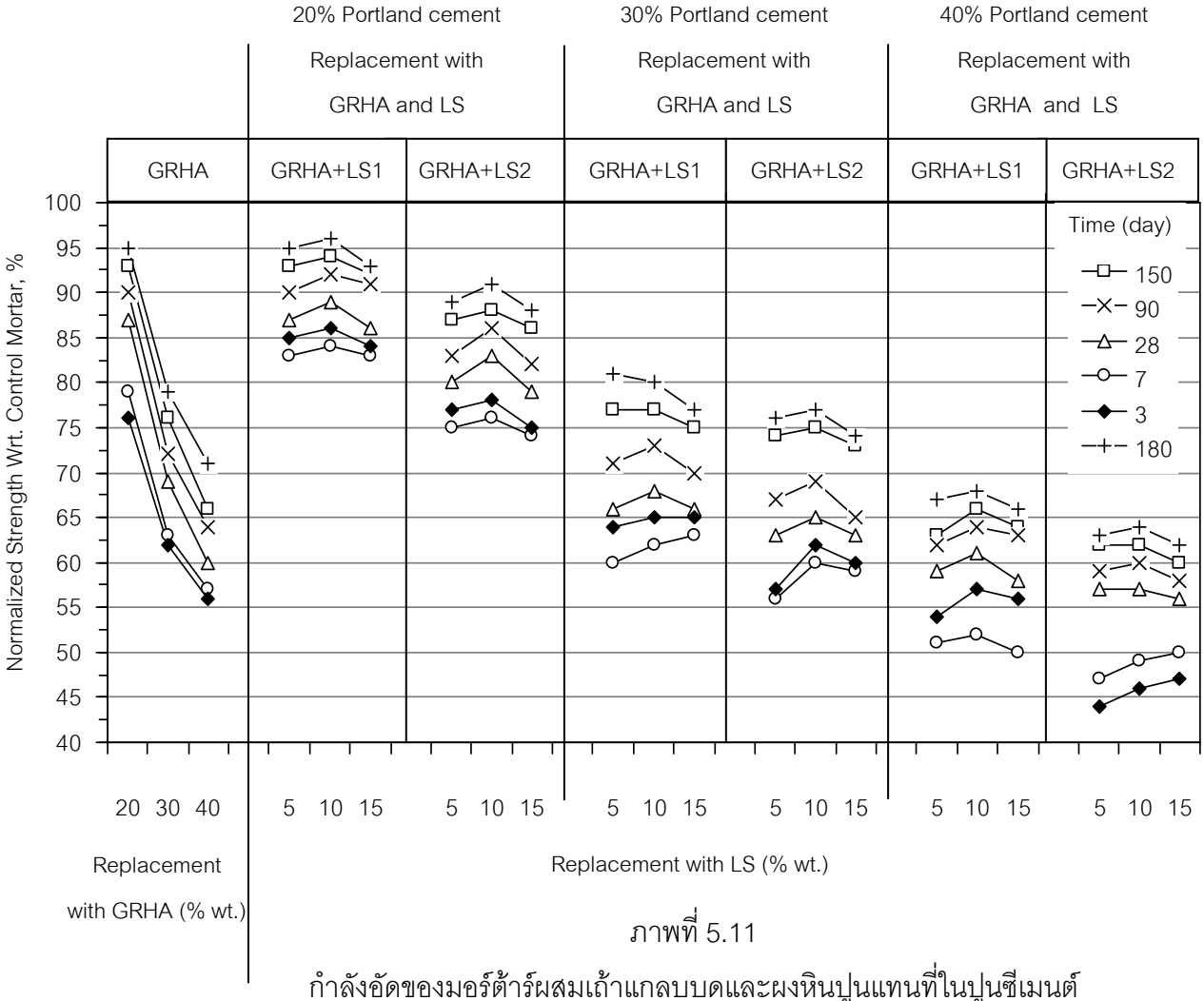
- ช่วงอายุ 3-28 วันพบว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 มีค่ามากที่สุด คือ ชุดทดสอบ C80R30LS1#10 โดยมีกำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับร้อยละ 62

- ช่วงอายุ 28-90 วัน มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 มีค่ามากที่สุด คือ ชุดทดสอบ C80R30LS1#10 โดยมีกำลังอัดที่ 90 วันเท่ากับร้อยละ 64

- ช่วงอายุ 90-180 วัน การพัฒนากำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนมีกำลังมากที่สุดคือร้อยละ 72 ตามด้วย มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 และ LS2

ผลการทดสอบกำลังอัดสามารถอธิบายได้ว่า ความสามารถในการรับกำลังขึ้นอยู่กับผลจากลักษณะทางกายภาพของวัสดุ (Isaia G.C., Gastaldini A.L.G., Moraer R., 2003) วัสดุแทนที่ปูนซีเมนต์ควรมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงหรือเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถสอดแทรกช่วยกระจายตัวของปูนซีเมนต์ได้ดี การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงทำได้ดีกว่าวัสดุแทนที่ที่มีอนุภาคใหญ่กว่า รวมทั้งอนุภาคขนาดเล็กยังช่วยอุดช่องว่างของโพรง ทำให้โครงสร้างเพสต์แน่นยิ่งขึ้น

ส่วนผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคยังไม่มากนักทั้งนี้คงเป็นเพราะอนุภาคของเถ้าแกลบมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยไป ส่งผลให้ปฏิกิริยาปอซโซลานิคยังทำได้ไม่ดีเท่าที่ควร กำลังอัดจึงไม่สูงมากนัก และถึงแม้เถ้าแกลบที่เป็นวัสดุปอซโซลานที่มีอนุภาคขนาดเล็กระดับไมโครเมตร ปริมาณของการเกิดปฏิกิริยายังน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Mehta P. K., Aitcin P. C. 1990)



ภาพที่ 5.11

กำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์

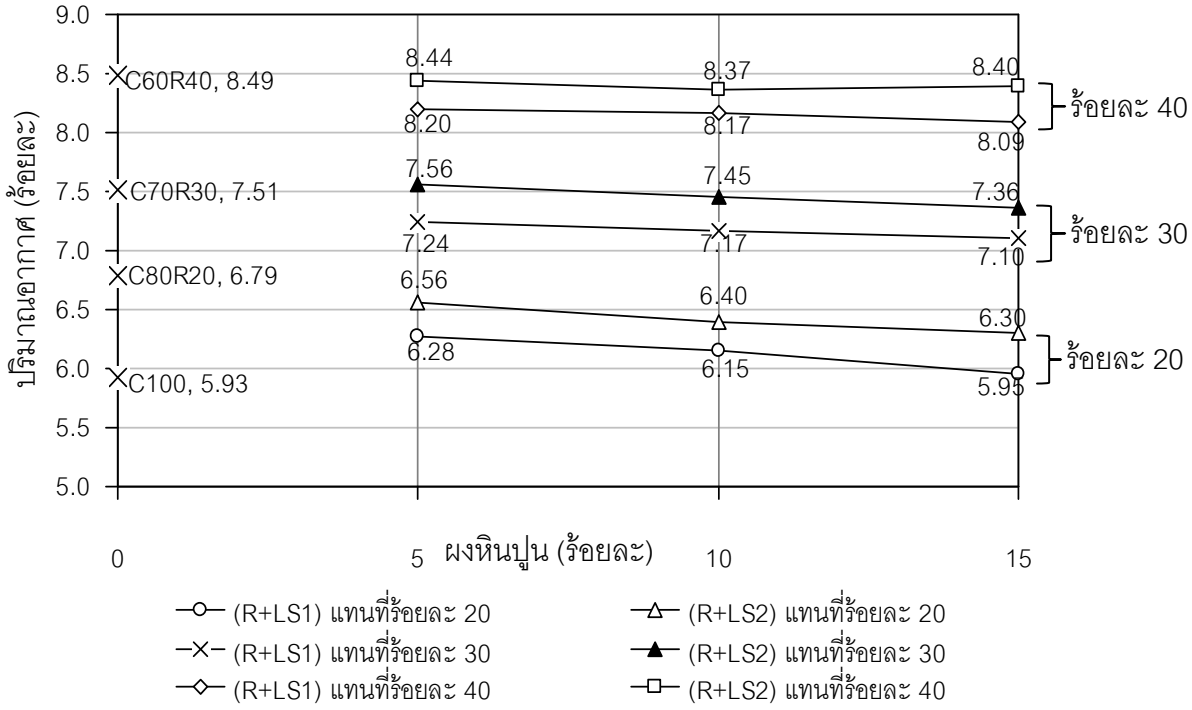
5.2.4 ปริมาณอากาศ (Air Content)

การหาปริมาณอากาศของมอร์ต้าร์ทดสอบตามมาตรฐาน BS EN 413-2 ดังภาพที่ 5.12 แสดงผลการทดสอบปริมาณอากาศของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณอากาศของมอร์ต้าร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 5.93 ปริมาณอากาศของทุกอัตราส่วนผสมมีค่ามากกว่าชุดมอร์ต้าร์ควบคุม

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนมีปริมาณอากาศเท่ากับร้อยละ 6.79, 7.51 และ 8.49 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม อาจเนื่องจากเถ้าแกลบมีความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ คือเถ้าแกลบมีความจำเพาะ 2.21 ส่วนปูนซีเมนต์มีความถ่วงจำเพาะ 3.13 การเพิ่มเถ้าแกลบเป็นการเพิ่มปริมาณของเพสต์ ทำให้ปริมาณอากาศของมอร์ต้าร์สดเพิ่มขึ้น

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 มีปริมาณอากาศมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม แต่น้อยกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วน เนื่องจากผงหินปูน LS1 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.76 ซึ่งมากกว่าเถ้าแกลบ ปริมาณเพสต์จึงมีค่าลดลง พิจารณาที่ร้อยละการแทนที่เท่ากัน เมื่อปริมาณของผงหินปูนเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณอากาศมีค่าลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณผงหินปูน ช่วยเพิ่มการกระจายขนาดคละของวัสดุผง สามารถช่วยลดปริมาณของช่องว่างได้การจัดเรียงตัวของเพสต์ดีขึ้น อีกทั้งปริมาณเถ้าแกลบมีค่าลดลงซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำสุด ปริมาณอากาศจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเถ้าแกลบที่เพิ่มขึ้น

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบผสมผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 มีปริมาณอากาศมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม มากกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 ที่ร้อยละการแทนที่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะผงหินปูน LS2 มีอนุภาคใหญ่ การสอดแทรกจึงทำได้ไม่ดี ทำให้การกระจายตัวของมอร์ต้าร์สดไม่ดี มีช่องว่างให้อากาศเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณอากาศลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วน เพราะเถ้าแกลบมีช่องว่างของโพรงเยอะอีกทั้งความถ่วงจำเพาะของผงหินปูน LS2 มากกว่าเถ้าแกลบทำให้ปริมาณเพสต์มีน้อยลง



ภาพที่ 5.12

ปริมาณอากาศของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ใน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

5.2.5 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของมอร์ต้าร์จากการทดสอบ TGA

ภาพที่ 5.13 แสดงผลการทดสอบ TGA ที่อายุ 28 และ 180 วัน ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งสามารถสรุปค่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากการทดสอบค่าน้ำหนักที่สูญเสียไปในช่วงอุณหภูมิ 460 – 550 องศาเซลเซียส ได้ดังต่อไปนี้

จากการเปรียบเทียบปริมาณ $Ca(OH)_2$ ระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วนกับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบด 4 ชั่วโมง ที่อายุ 28 วัน (ภาพที่ 5.43 (ก)) พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วนร้อยละ 20 มีปริมาณคงเหลือของ $Ca(OH)_2$ อยู่ที่ร้อยละ 1.652 (ดังตารางที่ 5.3) โดยน้ำหนักมอร์ต้าร์ ในขณะที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วนมีค่าเท่ากับร้อยละ 2.350 โดยน้ำหนักมอร์ต้าร์ และที่อายุ 180 วัน ยังปรากฏผลในลักษณะเช่นเดียวกัน กล่าวคือ มอร์ต้าร์ควบคุมยังคงมีปริมาณของ $Ca(OH)_2$ ที่มากกว่า การที่ปริมาณของ $Ca(OH)_2$ น้อยลงในมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วนเนื่องจาก

การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิค ดังแสดงในสมการที่ (5.1) โดยสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชั่นของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาปอซโซลานิคของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ดังนั้นปริมาณของแคลเซียมซึ่งถูกผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นจึงลดลงตามลำดับ

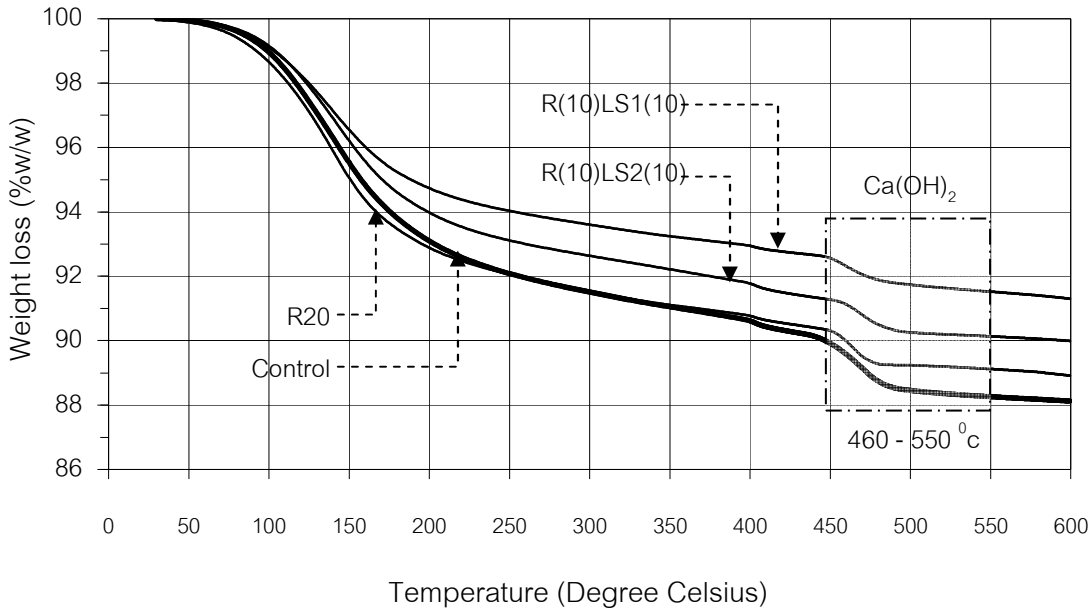
$$2SiO_2 + 3Ca(OH)_2 \xrightarrow{H_2O} 3CaO.2SiO_2.3H_2O \qquad (5.1)$$

สำหรับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดร้อยละ 10 และผงหินปูน LS1 (12 ไมโครเมตร) หรือ LS2 (128 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 พบว่าการลดลงของปริมาณ $Ca(OH)_2$ ที่อายุ 28 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วน คือมีปริมาณของ $Ca(OH)_2$ คงเหลือน้อยกว่าชุดควบคุม ในขณะที่มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูนขนาด 12 ไมโครเมตร ปริมาณคงเหลือของ $Ca(OH)_2$ ไม่แตกต่างจากผงหินปูนชนิดที่ 2 ทั้งนี้การลดลงของปริมาณ $Ca(OH)_2$ จึงมาจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าแกลบอย่างเดียวในขณะที่ผงหินปูนไม่ทำปฏิกิริยา

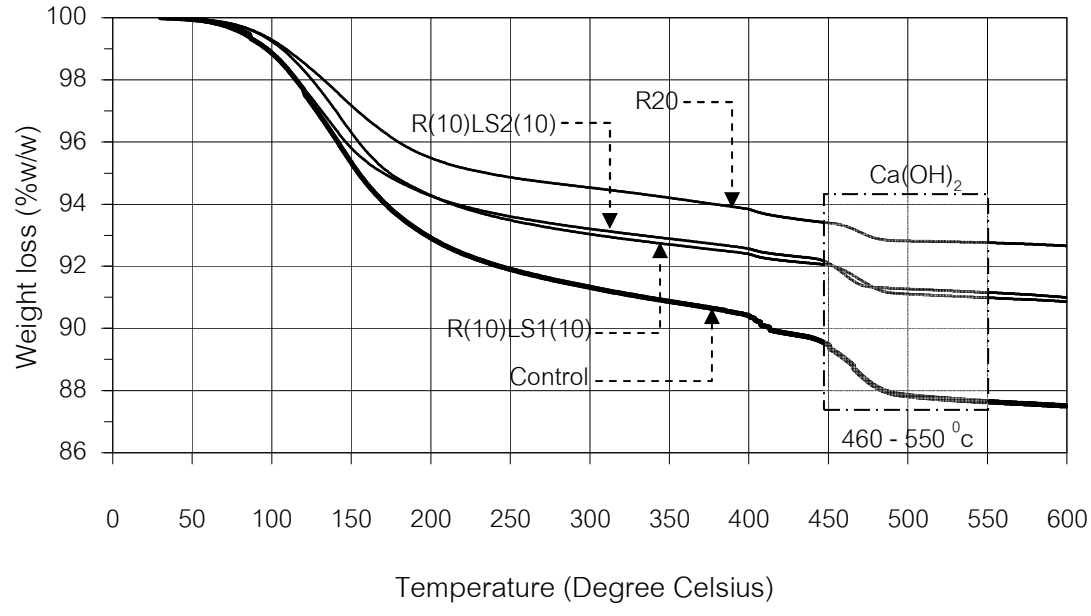
ตารางที่ 5.3

ปริมาณคงเหลือของแคลเซียมไฮดรอกไซด์จากการทดสอบ TGA

ส่วนผสม	ปริมาณคงเหลือของ $Ca(OH)_2$ (ร้อยละโดยน้ำหนักของมอร์ต้าร์)	
	28 วัน	180 วัน
C100	2.349	2.768
R20	1.652	1.0758
R(10)LS1(10)	1.4265	1.4052
R(10)LS2(10)	1.6452	1.4112



(ก) ที่อายุ 28 วัน



(ข) ที่อายุ 180 วัน

ภาพที่ 5.13

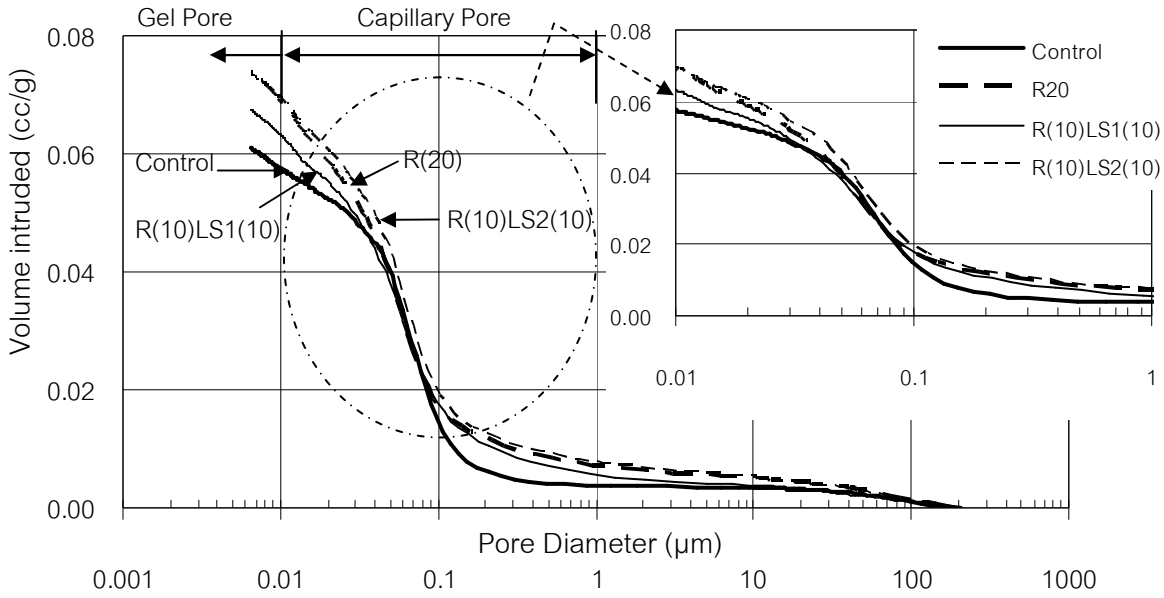
ผลการทดสอบ TGA ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน

แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

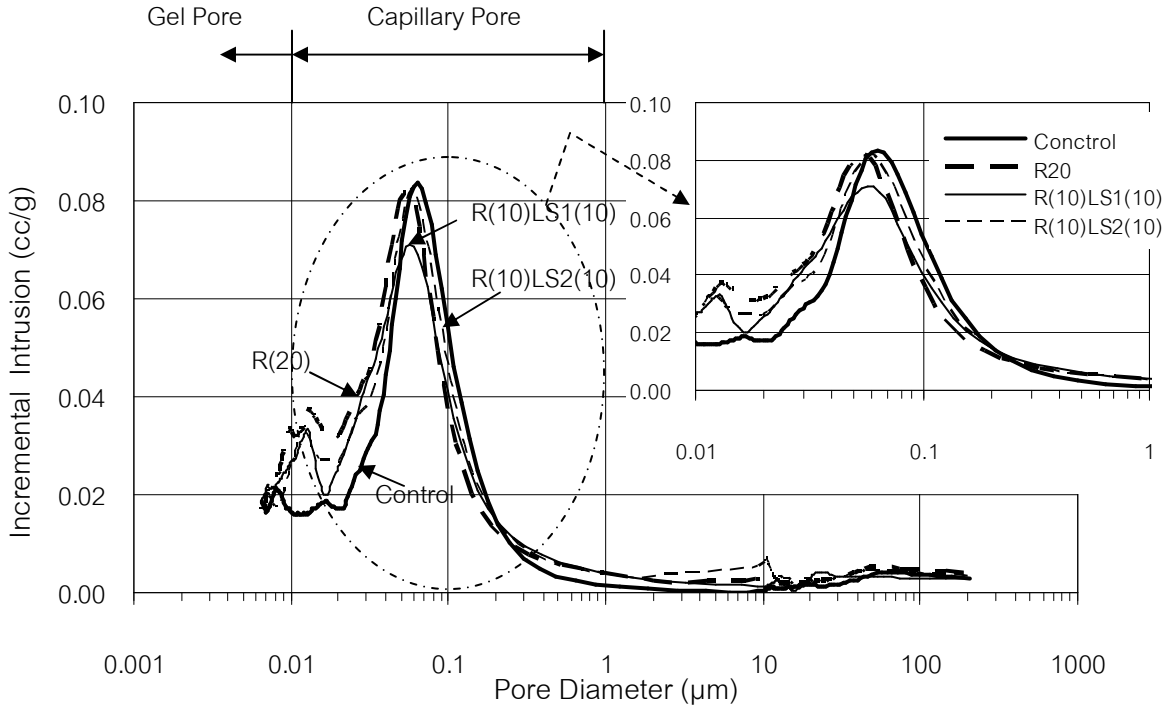
5.2.6 ปริมาตรของโพรงและการกระจายตัวของโพรง

ภาพที่ 5.14 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและการสะสมปริมาตรโพรงที่อายุการบ่ม 28 วัน ของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าแกลบและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ประกอบด้วย มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20 และมอร์ต้าร์แทนที่ร่วมระหว่างเถ้าแกลบบดร้อยละ10 ผงหินปูนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก จากการทดสอบพบว่า มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วนมีปริมาตรโพรงต่ำที่สุด ตามด้วยมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดร้อยละ 10 ผสมผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 ตามด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20 และเถ้าแกลบบดร้อยละ10 ผสมผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) ร้อยละ 10 ตามลำดับ จะเห็นว่า ในช่วงโพรงเจล (Gel Pore $<$0.01 μm) จนถึงโพรงคาปิลลารี (Capillary Pore 0.01-1 μm) ปริมาตรของโพรงมีแน้มโน้มไม่แตกต่างกันมากนัก กล่าวคือ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วนยังมีปริมาตรโพรงที่ต่ำกว่าทุกส่วนผสม เมื่อพิจารณาถึงผลทางกายภาพของผงหินปูนที่ถือว่าเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา ภายใต้สมมุติฐานที่ว่าผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคของเถ้าแกลบบดมีเท่ากัน (ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเท่ากัน) จะเห็นว่าผงหินปูน LS1 ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าผงหินปูน LS2 จะมีปริมาตรโพรงต่ำกว่า อาจกล่าวได้ว่าขนาดของวัสดุที่นำมาใช้แทนที่มีผลต่อปริมาตรของโพรง โดยผงหินปูนที่มีขนาดเล็กกว่ามีความสามารถสอดแทรกได้ดี ทำให้ปริมาตรของโพรงต่ำกว่าผงหินปูนที่มีขนาดใหญ่ ข้อสังเกตอีกอย่างจะพบว่า การแทนที่ด้วยผงหินปูน LS1 ผสมเถ้าแกลบบดมีปริมาตรโพรงต่ำกว่าการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วน อาจเป็นไปได้ว่าส่วนผสมที่มีผงหินปูน LS1 มีความสามารถสอดแทรกได้ดีจึงทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชั่นในช่วง 28 วันแรก ทำได้ดีกว่าส่วนผสมที่มีเถ้าแกลบดล้วน เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิคยังคงต้องรอผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ (สอดคล้องกับผลการทดสอบ TGA) ทำให้ปริมาตรโพรงของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยถ้าแกลบบดล้วนยังคงมีมากกว่าซึ่งสอดคล้องกับกำลังรับแรงอัดด้วย

ภาพที่ 5.18 (ข) แสดงการกระจายขนาดของปริมาตรโพรงของมอร์ต้าร์ เมื่อพิจารณาพื้นที่ใต้กราฟ พบว่ากราฟการกระจายตัวของโพรงจะมีขนาดของโพรงคาปิลลารีอยู่มากที่สุด โพรงเจลมีปริมาณน้อยกว่า และโพรงขนาดใหญ่ที่มากกว่า 10 ไมโครเมตรมีปริมาณอยู่เล็กน้อย โดยในช่วงของโพรงคาปิลลารีของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วน มีปริมาณมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ล้วน ในขณะที่โพรงคาปิลลารีของมอร์ต้าร์ผสมผงหินปูนมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์เถ้าแกลบล้วน



(ก) ปริมาตรโพรงที่ 28 วัน (แทนที่ร้อยละ 20)



(ข) การกระจายของโพรงที่ 28 วัน (แทนที่ร้อยละ 20)

ภาพที่ 5.14

ปริมาตรและการกระจายตัวของโพรงในมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20

5.2.7 การหดตัวแบบแห้ง

ดังภาพที่ 5.15-5.21 แสดงการหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ผลการทดสอบหลังจากหลังจากบ่มตัวอย่างมอร์ต้าร์ในน้ำประปาครบ 28 วัน พบว่า การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ควบคุมที่อายุ 180 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0435 ซึ่งมากกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนทุกส่วนผสม โดยกลไกของการหดตัวแบบแห้งเกิดจากการสูญเสียน้ำหรือความชื้นให้กับสิ่งแวดล้อมที่มีสภาวะความชื้นต่ำกว่าและส่วนใหญ่เป็นน้ำอิสระในโพรงคาปิลลารี

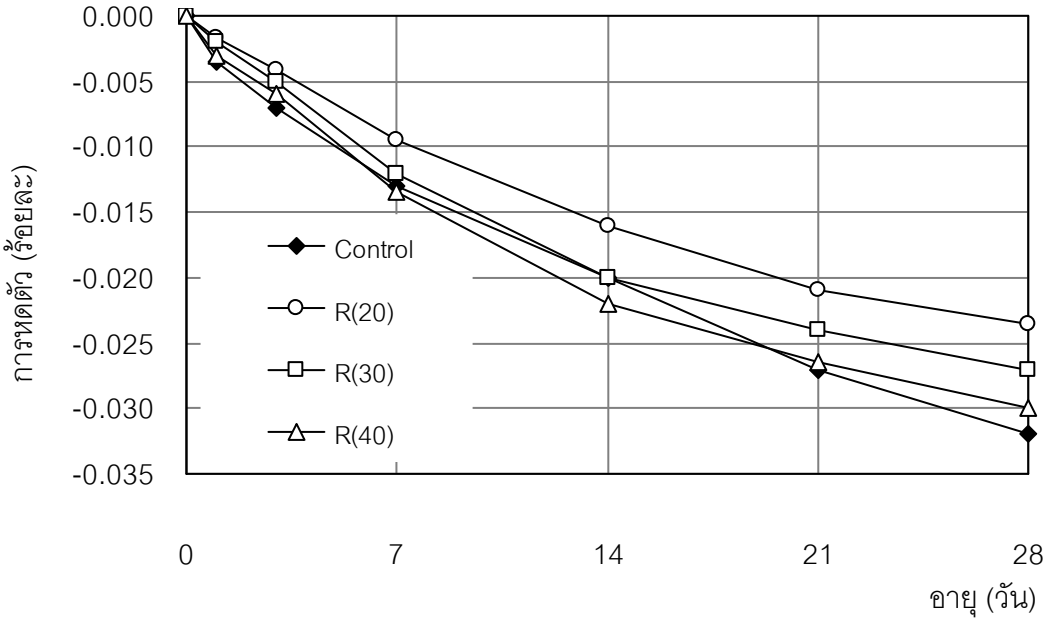
ในช่วงแรก (อายุ 0-28 วัน) การหดตัวของมอร์ต้าร์ควบคุมมีอัตราการหดตัวลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากช่วงแรกน้ำอิสระซึ่งมีปริมาณมากสามารถเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกโดยผ่านทางช่องคาปิลลารีได้ง่าย จนกระทั้งน้ำอิสระมีปริมาณลดลง ประกอบกับการที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้นการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นเพิ่มขึ้นส่งผลให้ในมอร์ต้าร์มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้นทำให้ช่องคาปิลลารีมีขนาดเล็กลง น้ำอิสระที่ยังคงหลงเหลือเคลื่อนที่ออกได้ยากขึ้น อัตราการหดตัวจึงลดลงอย่างช้าๆ

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบล้วนมีการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 0.0317, 0.0371 และ 0.040 ตามลำดับ ซึ่งค่าการหดตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม ถึงแม้ค่าความต้องการน้ำของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบยังทำให้การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ลดลง อาจเป็นเพราะอนุภาคของเถ้าแกลบบดสามารถเข้าอุดช่องว่างระหว่างโพรงคาปิลลารีทำให้โพรงไม่ต่อเนื่องกัน ส่งผลให้น้ำอิสระในโพรงคาปิลลารีระเหยออกสู่ภายนอกได้ยากขึ้น

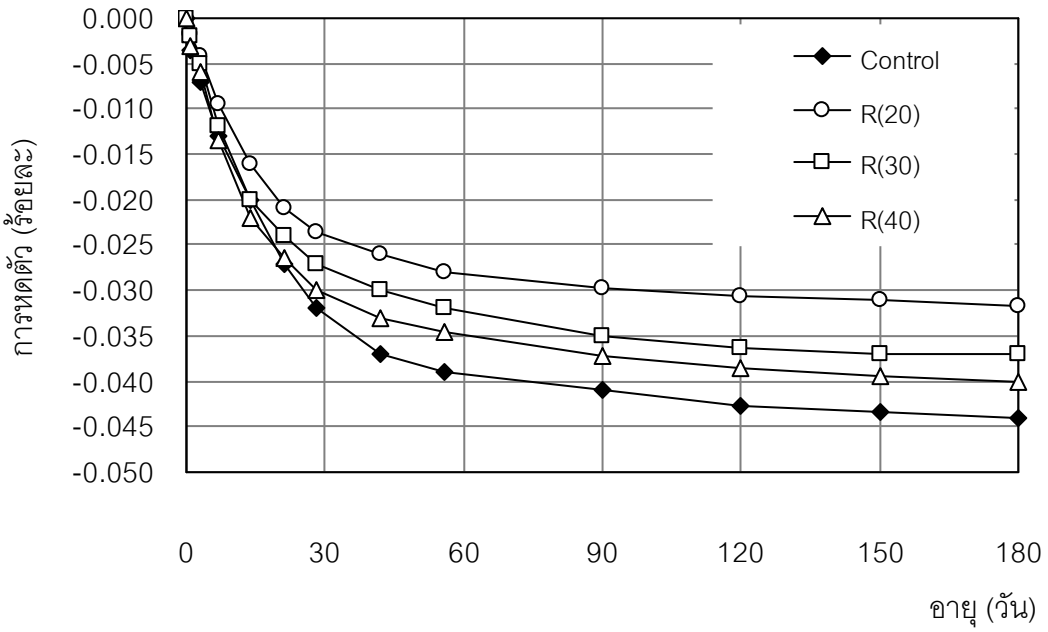
การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 มีการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 180 วัน น้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมและมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วน เนื่องจากอนุภาคผงหินปูน LS1 มีขนาดเล็กความสามารถสอดแทรกเข้าช่องว่างระหว่างโพรงคาปิลลารีจึงสูงกว่ามอร์ต้าร์เถ้าแกลบบดล้วน (ช่องว่างน้อยกว่าสอดคล้องกับผลการทดสอบ MIP) อีกทั้งความต้องการน้ำมีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำอิสระในโพรงคาปิลลารีจึงมีน้อยกว่า อัตราการเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกของน้ำหรือความชื้นจึงน้อยกว่า ส่งผลให้ค่าการหดตัวแบบแห้งน้อยกว่า และในช่วงแรกผงหินปูน LS1 ซึ่งมีอนุภาคเล็กเข้าสอดแทรกทำให้การกระจายของเม็ดปูนดีขึ้นทำให้การ

เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำได้เร็วและสมบูรณ์ขึ้น (Mathews J. D., 1994) ความสามารถในการเคลื่อนตัวออกของน้ำอิสระในโพรงคาปิลลารีจึงมีค่าต่ำกว่า

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูน S2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS2 มีการหดตัวแบบแห้งที่อายุ 180 วัน มากกว่าทุกส่วนผสมแต่ยังน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม เนื่องจากผงหินปูน LS2 มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่สุดในวัสดุผง อีกทั้งความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำ การแทนที่ด้วยผงหินปูน LS2 นี้เป็นการเพิ่มปริมาตรของโพรง ทำให้น้ำอิสระในโพรงคาปิลลารีมีเพิ่มขึ้นอัตราการสูญเสียน้ำออกสู่ภายนอกจึงสูงขึ้นการหดตัวแบบแห้งจึงมีค่าสูง



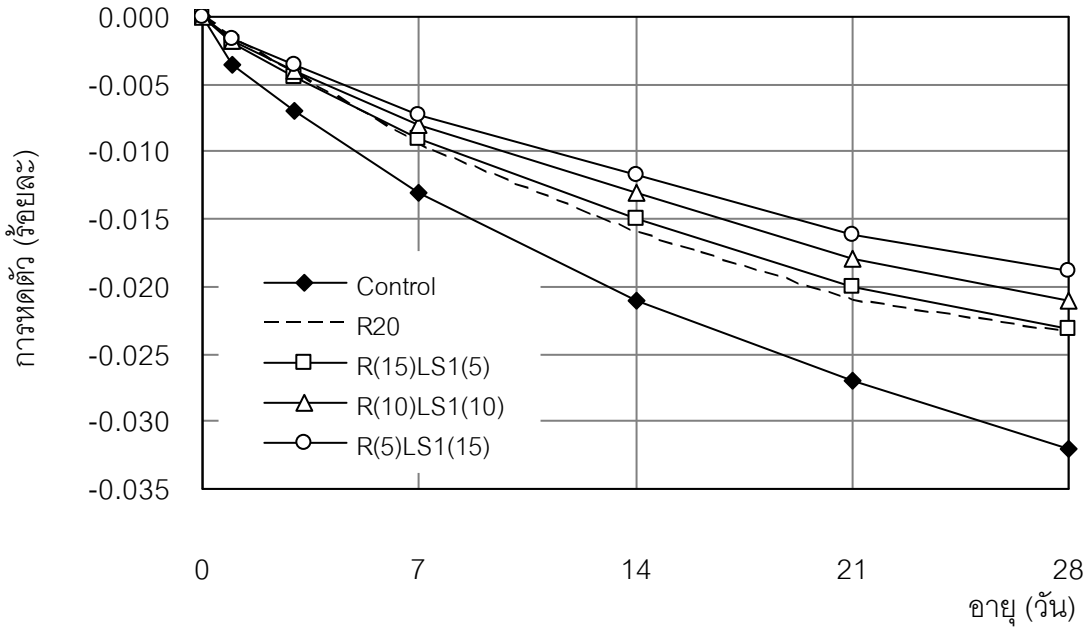
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



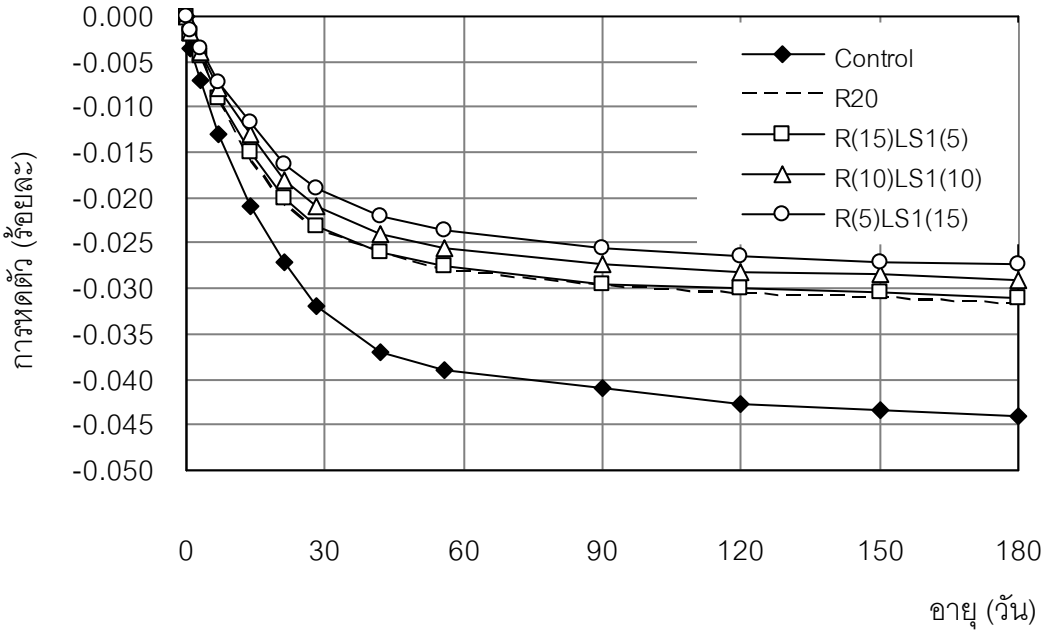
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.15

การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



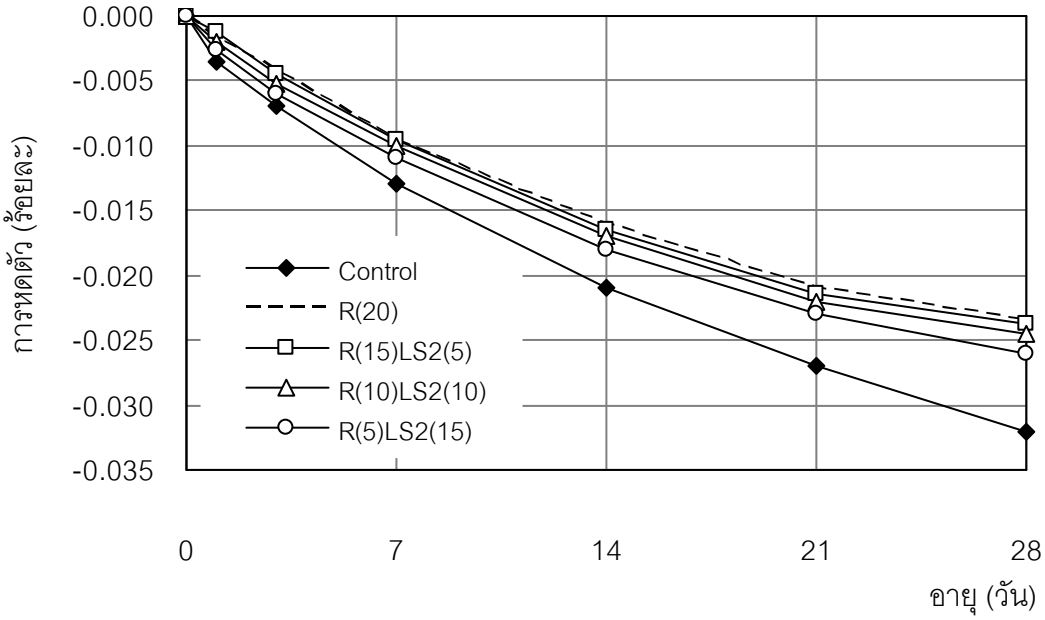
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



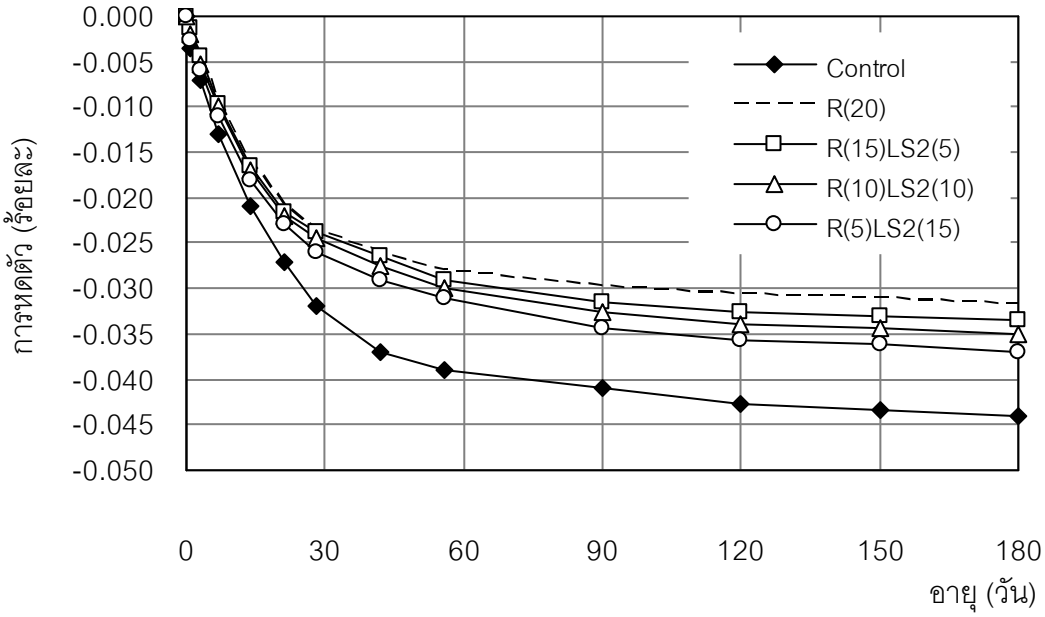
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.16

การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



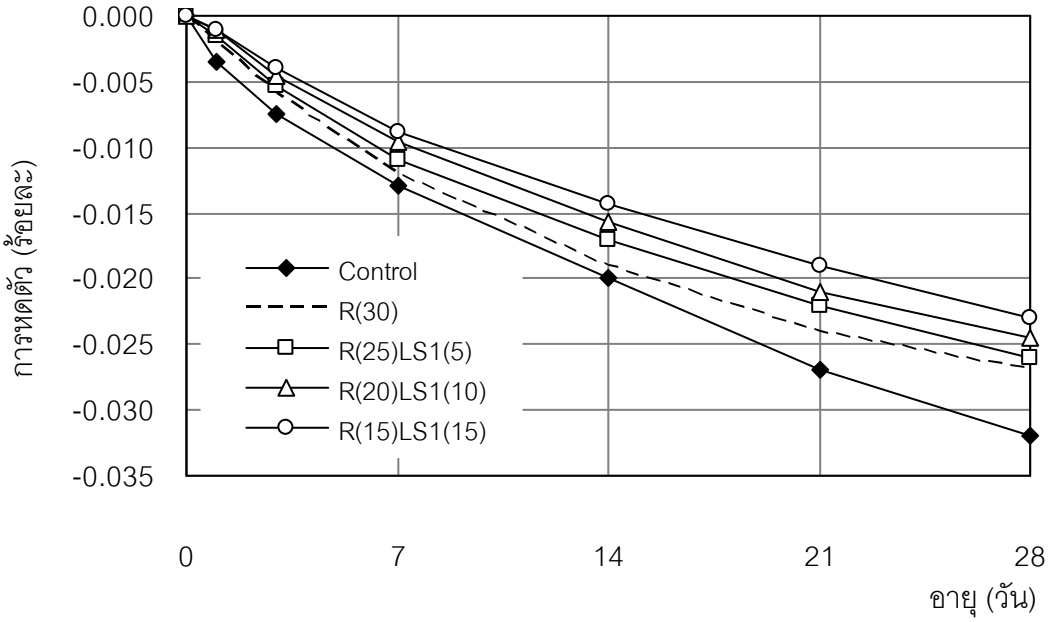
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



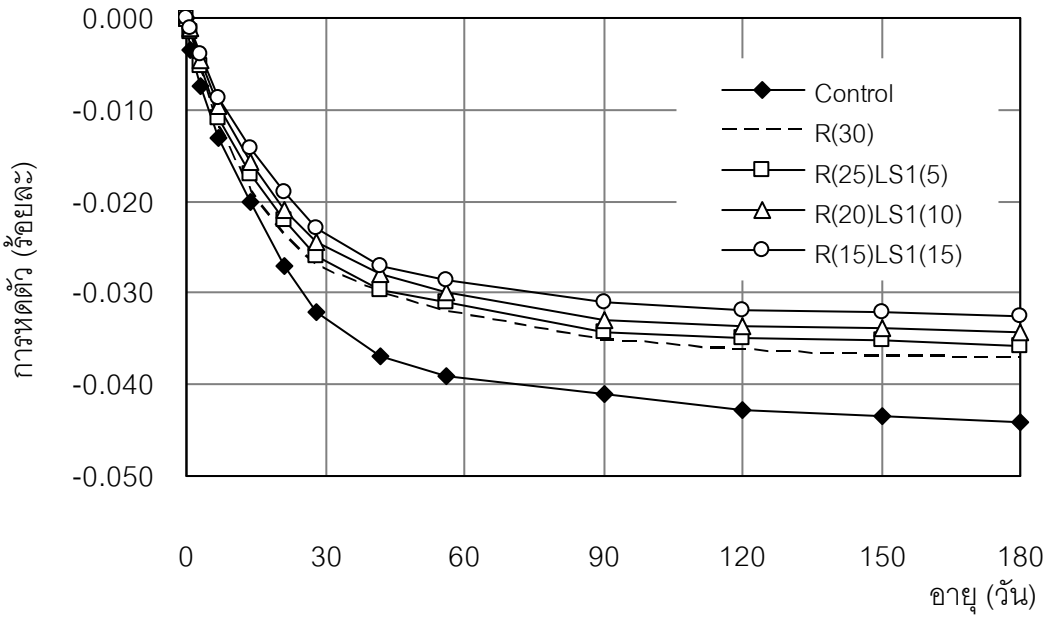
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.17

การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



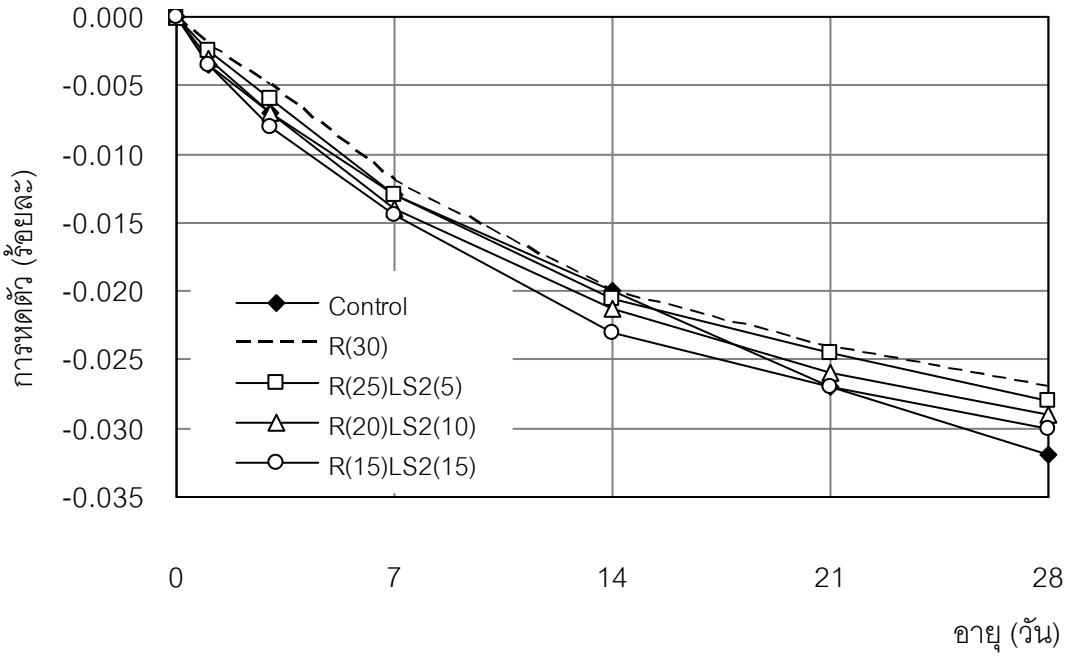
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



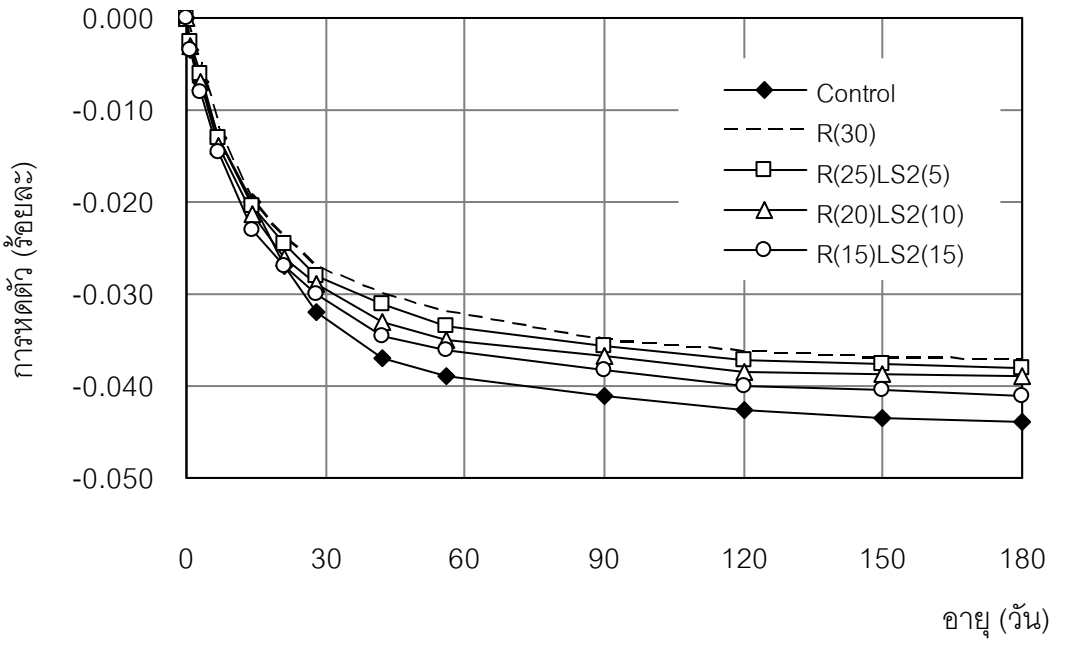
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.18

การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



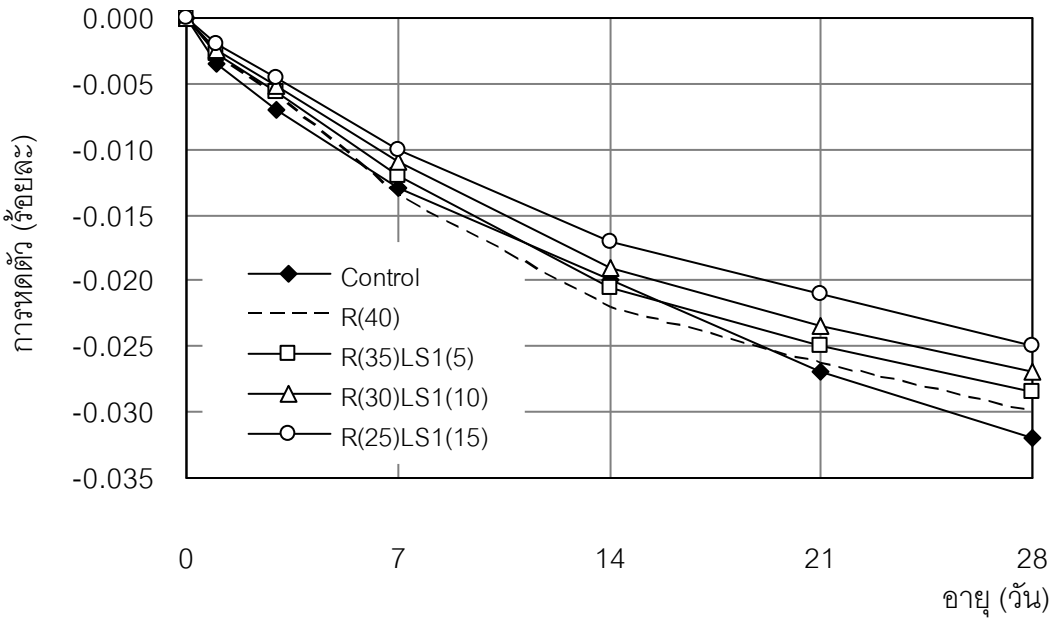
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



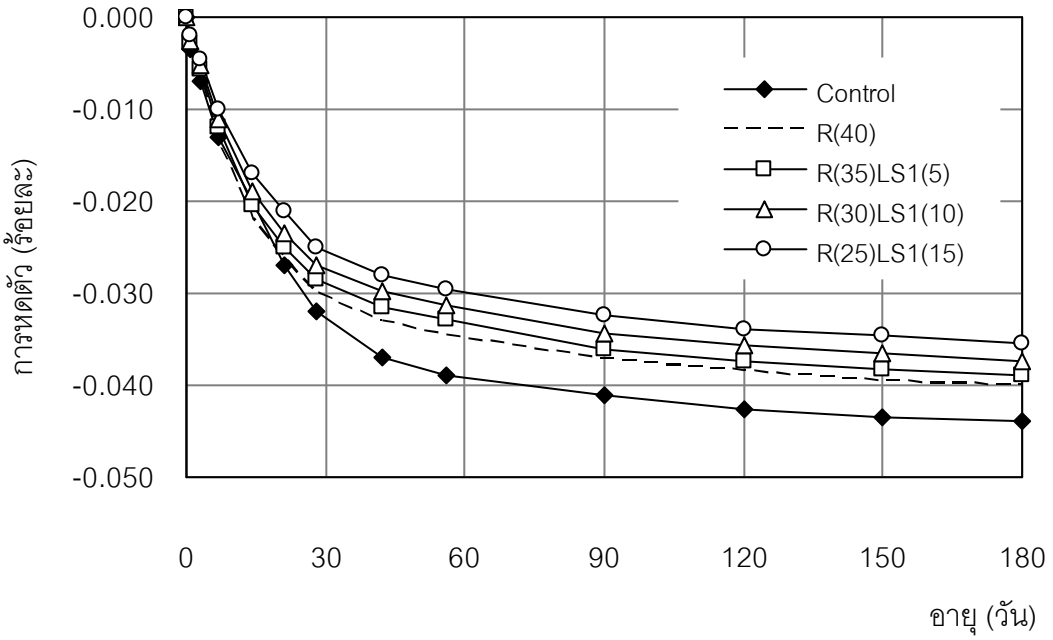
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.19

การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 แทนที่ใน
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก

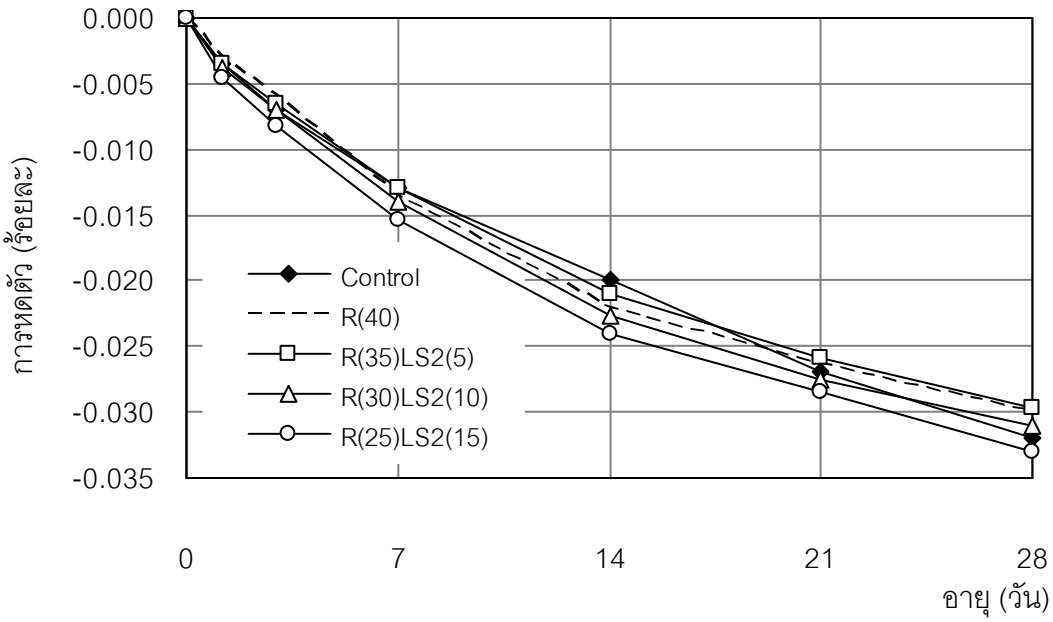


(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน

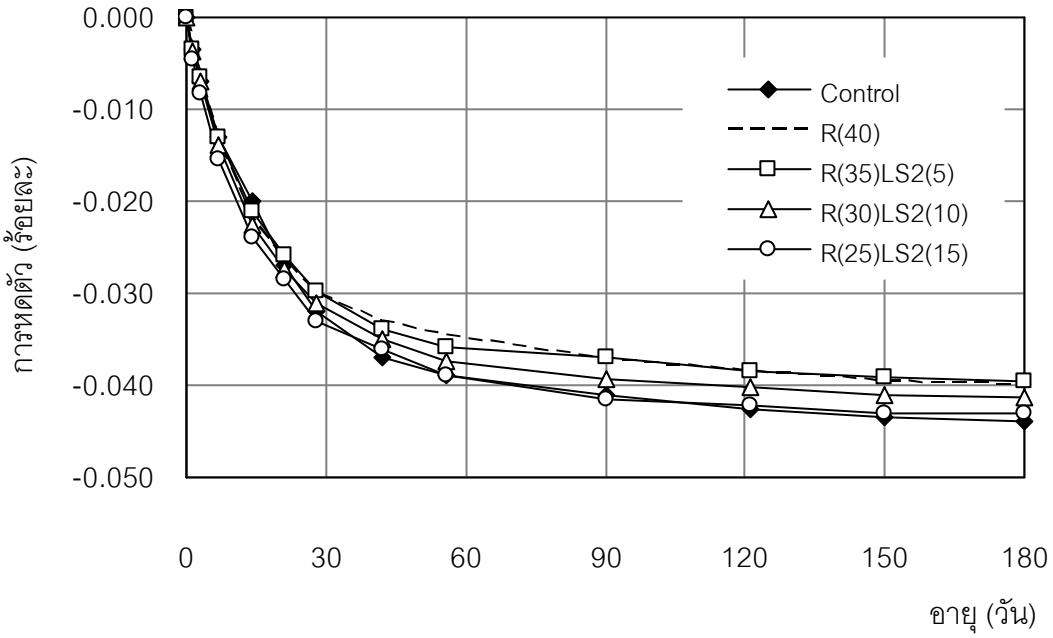


(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.20 การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.21

การหดตัวแบบแห้งของมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

5.2.8 การหดตัวแบบออโตจีเนียส

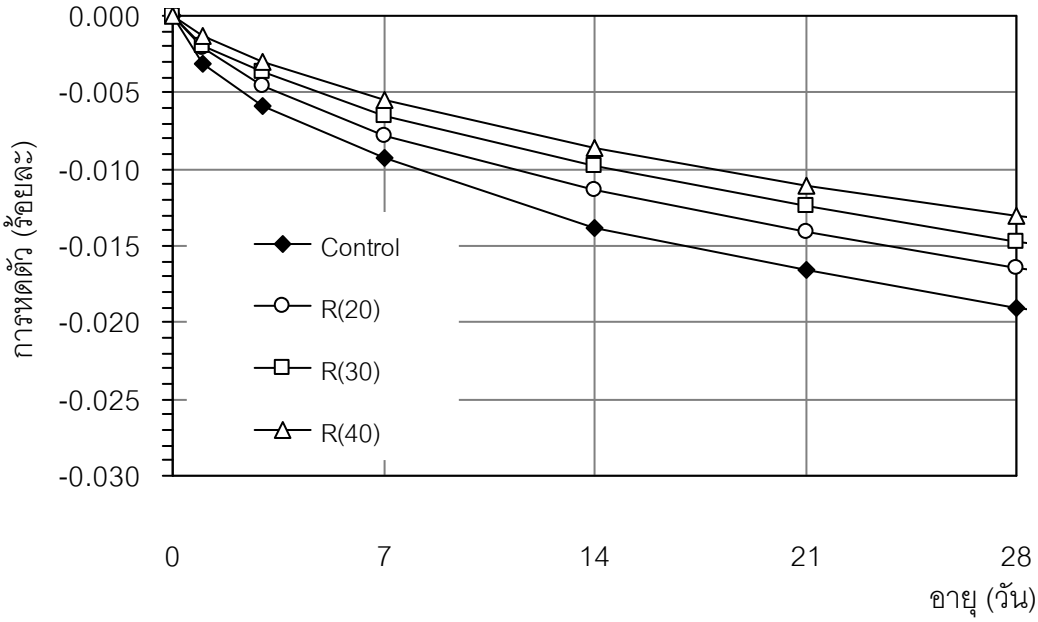
ภาพที่ 5.22 ถึง 5.28 แสดงผลการทดสอบการหดตัวแบบออโตจีเนียสของซีเมนต์มอร์ต้าร์ใช้เถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่า การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์ควบคุมมีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนทุกส่วนผสม โดยที่อายุ 180 วัน ของมอร์ต้าร์ควบคุมมีค่าการหดตัวเท่ากับร้อยละ 0.027

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดล้วน พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนมีการหดตัวแบบออโตจีเนียสที่อายุ 180 วัน น้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม เมื่อแทนที่ด้วยเท่าแกลบบดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น (จากร้อยละ 20 ไป 30 และ 40) ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสยิ่งมีค่าน้อยลงทั้งนี้เพราะ การแทนที่เถ้าแกลบบดในปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของปูนซีเมนต์ลดลง ส่งผลให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง อีกทั้งเถ้าแกลบบดมีอนุภาคเป็นโพรงและมีรูพรุน ความสามารถในการดูดน้ำสูง เมื่อแทนที่ปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้น ทำให้มีปริมาณของน้ำอิสระมีเพิ่มมากขึ้น และการที่ขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบมีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ เป็นสาเหตุให้การกระจายตัวของเม็ดปูนทำได้ไม่ดี สามารถดึงน้ำอิสระมาใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นได้น้อยลง

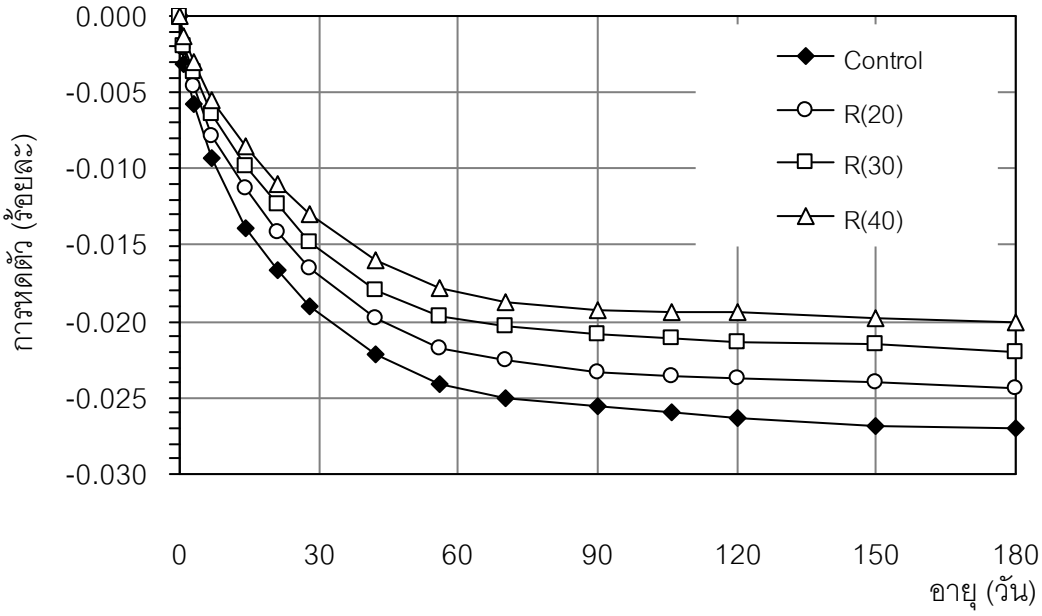
การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS1 เมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนผสมเดียวกันพบว่า ค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสที่อายุ 180 วัน ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 มีค่าการหดตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมแต่มีค่ามากกว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วน สาเหตุที่การหดตัวมีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุมอาจเป็นเพราะ เกิดจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของมอร์ต้าร์ควบคุมดีกว่า อันเนื่องมาจากปริมาณของปูนซีเมนต์มีมากกว่า การหดตัวของมอร์ต้าร์ควบคุมจึงมีค่ามากกว่าแต่เมื่อเปรียบเทียบการหดตัวกับกรณีแทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนอธิบายได้ว่า ผลจากการแทนที่ผงหินปูน LS1 ในส่วนผสม ทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคดีขึ้น เพราะขนาดอนุภาคของผงหินปูน LS1 มีขนาดเล็กกว่าทั้งปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบบด ความสามารถเข้าสอดแทรกระหว่างเม็ดปูนทำให้เกิดการกระจายตัวดีกว่า ส่งผลให้ปูนซีเมนต์สามารถดึงน้ำอิสระมาใช้ในปฏิกิริยาได้มากกว่าการหดตัวแบบออโตจีเนีสจึงมากกว่ามอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วน

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดผสมผงหินปูน LS2 พบว่าค่าการหดตัวแบบออโตจีเนียสที่อายุ 180 วัน ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 มีค่าการหดตัวน้อยกว่าทุกส่วนผสมที่ร้อยละการแทนที่เท่ากัน เนื่องจากผงหินปูน LS2

มีอนุภาคใหญ่การนำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์ ทำให้การกระจายตัวของเม็ดปูนไม่ดี ส่งผลให้การดึงน้ำอิสระมาใช้ในการทำปฏิกิริยาทำได้ไม่ดี อีกทั้งผงหินปูน LS2 ถือว่าเป็นวัสดุกึ่งเฉื่อย ความสามารถในการทำปฏิกิริยาของ CaO จึงไม่นำมาพิจารณา



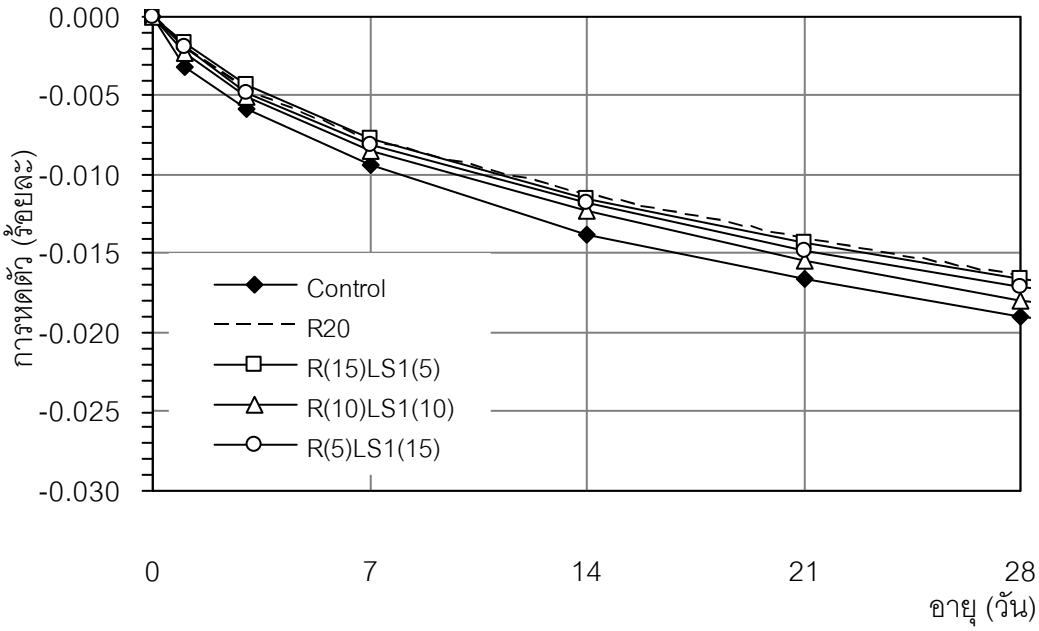
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



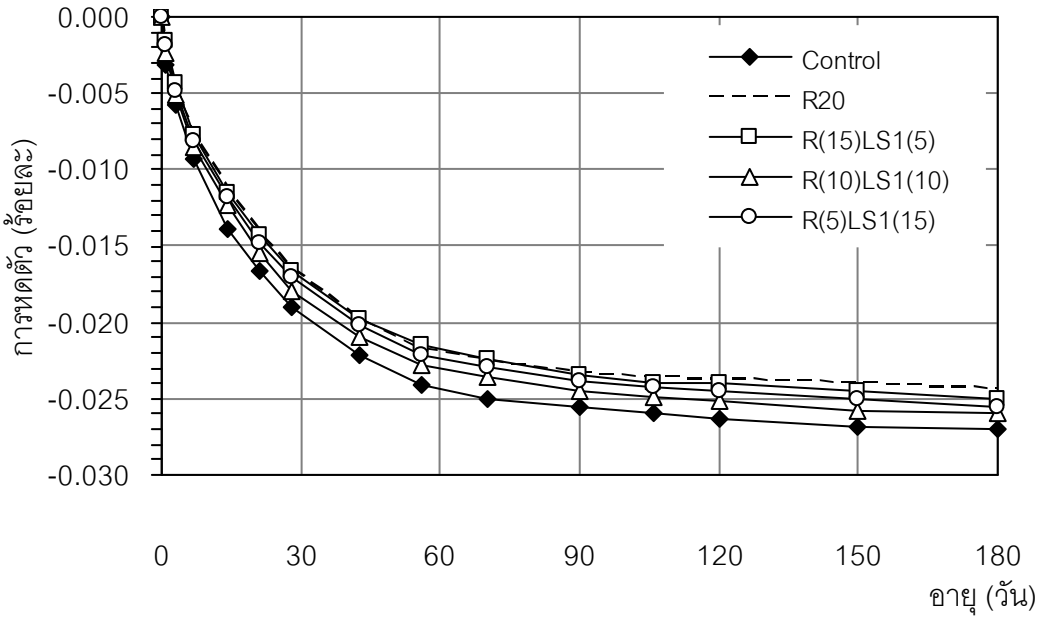
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.22

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20, 30, 40 โดยน้ำหนัก



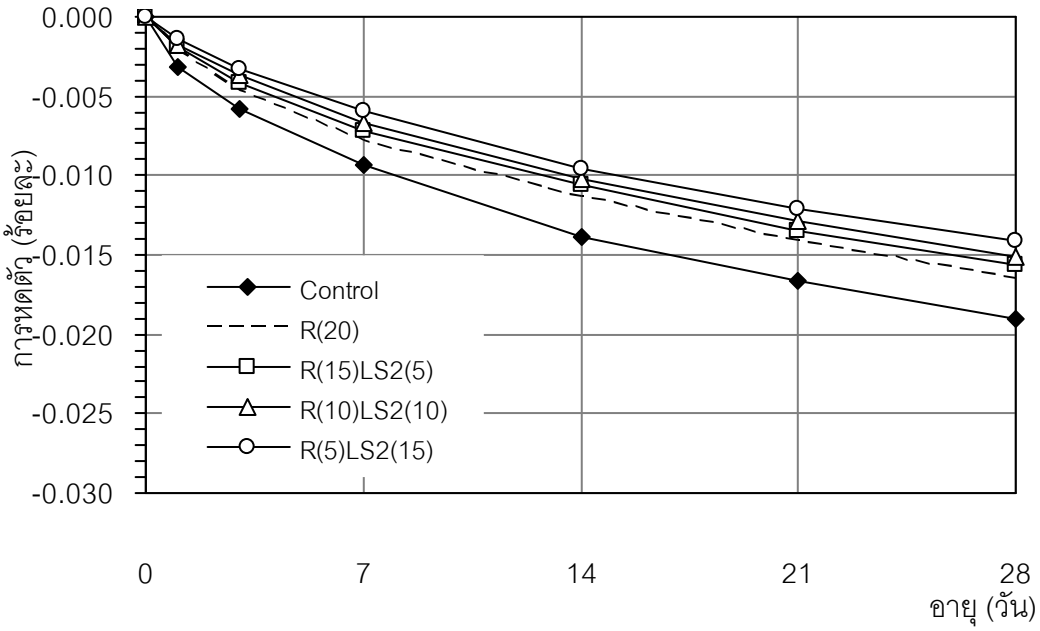
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



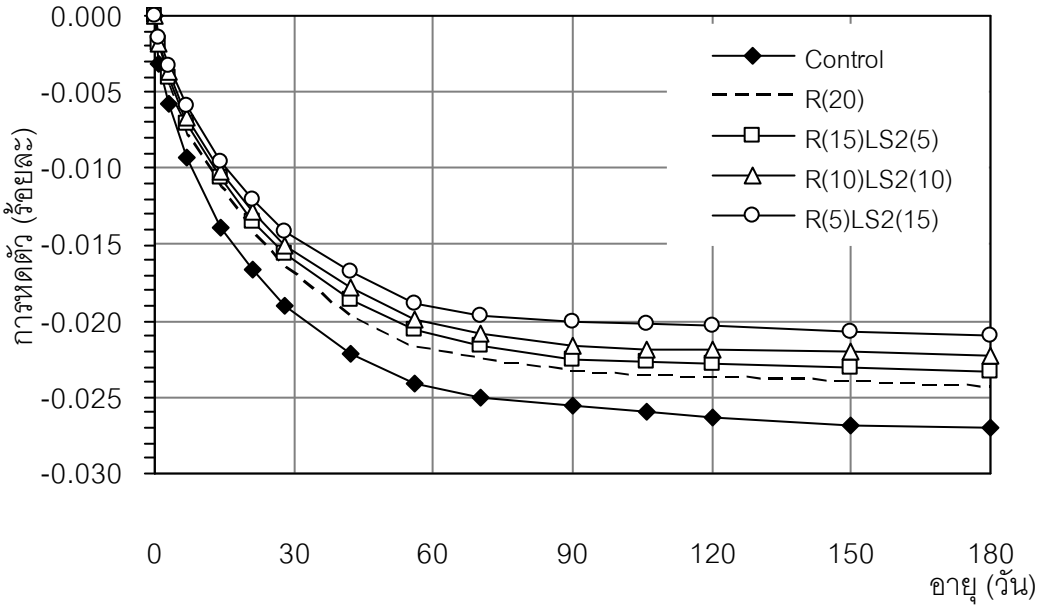
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.23

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนและผงหินปูน LS1 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



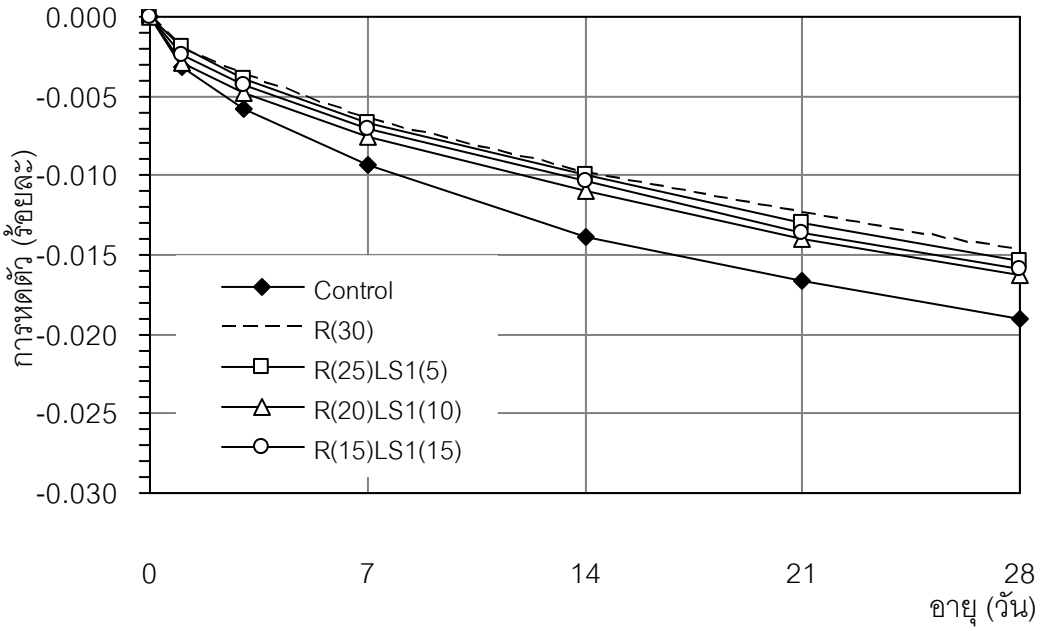
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



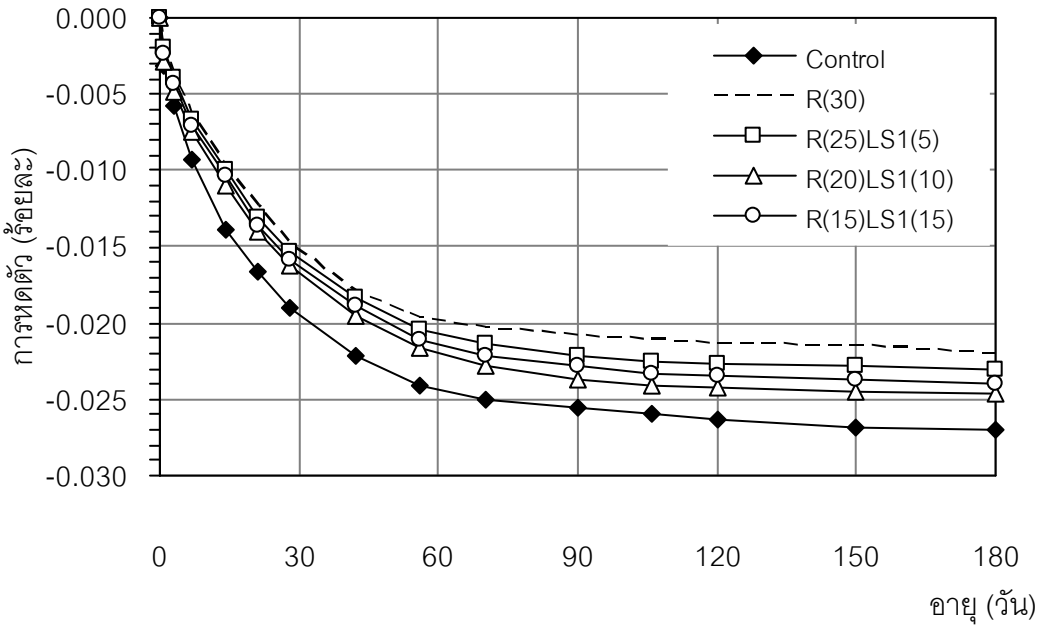
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.24

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนและผงหินปูน LS2 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



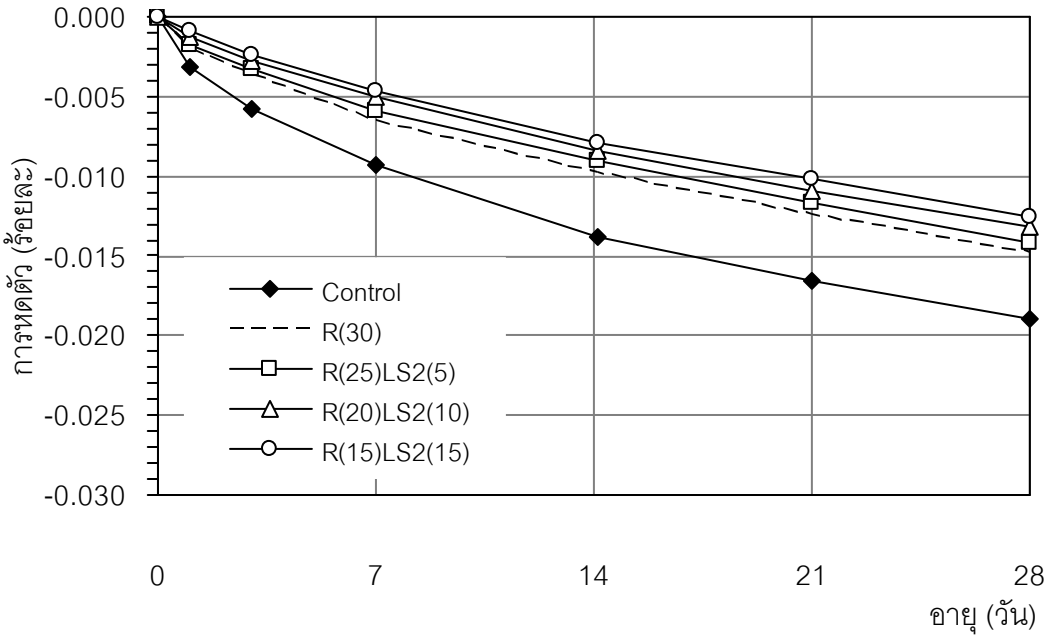
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



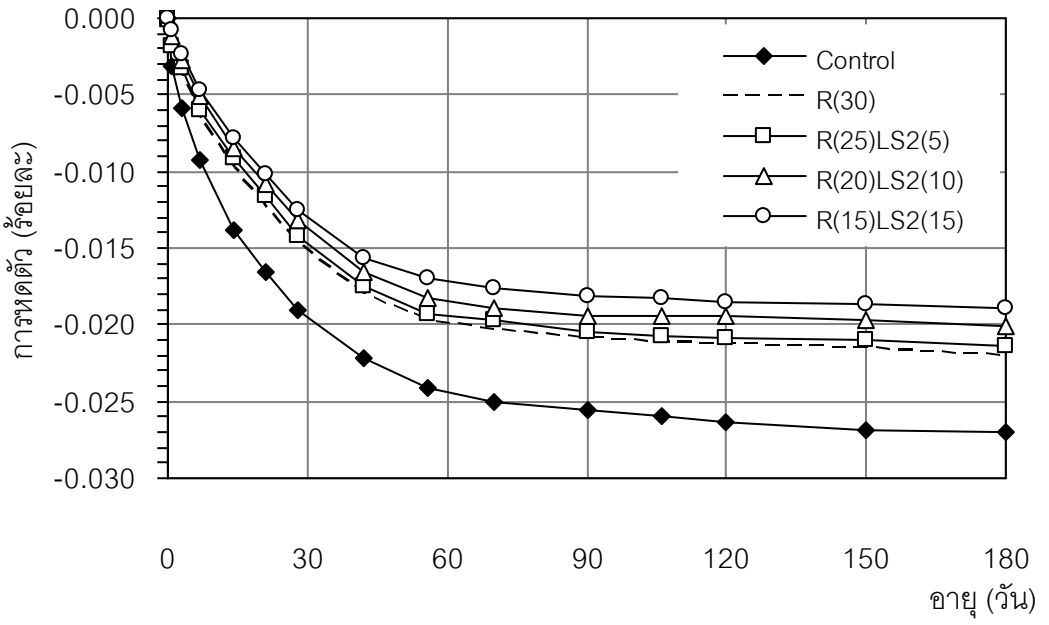
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.25

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนและผงหินปูน LS1 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



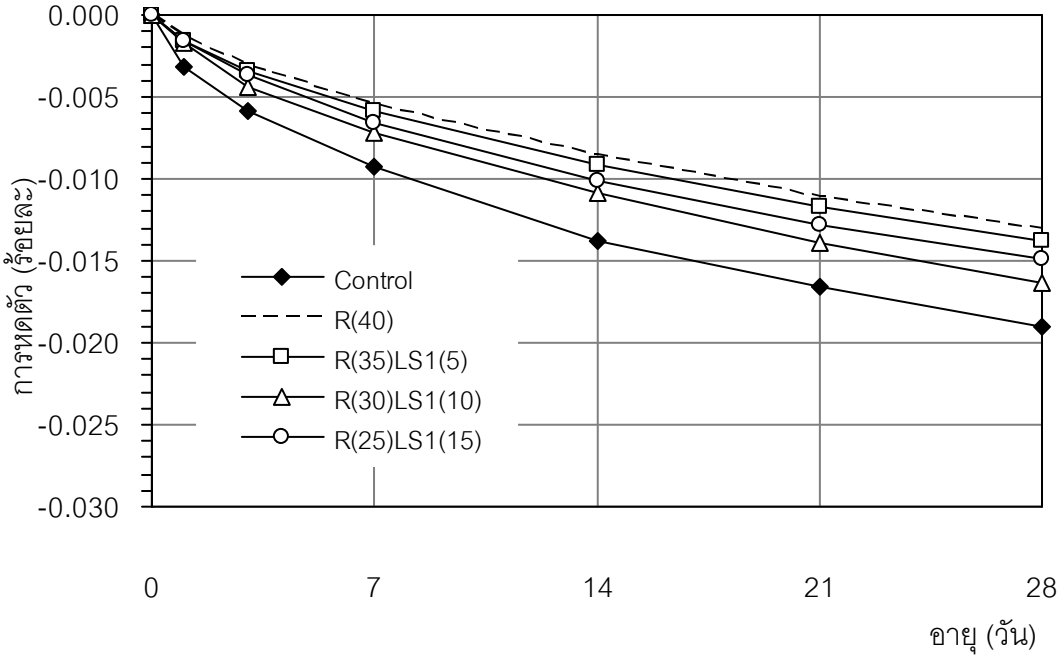
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



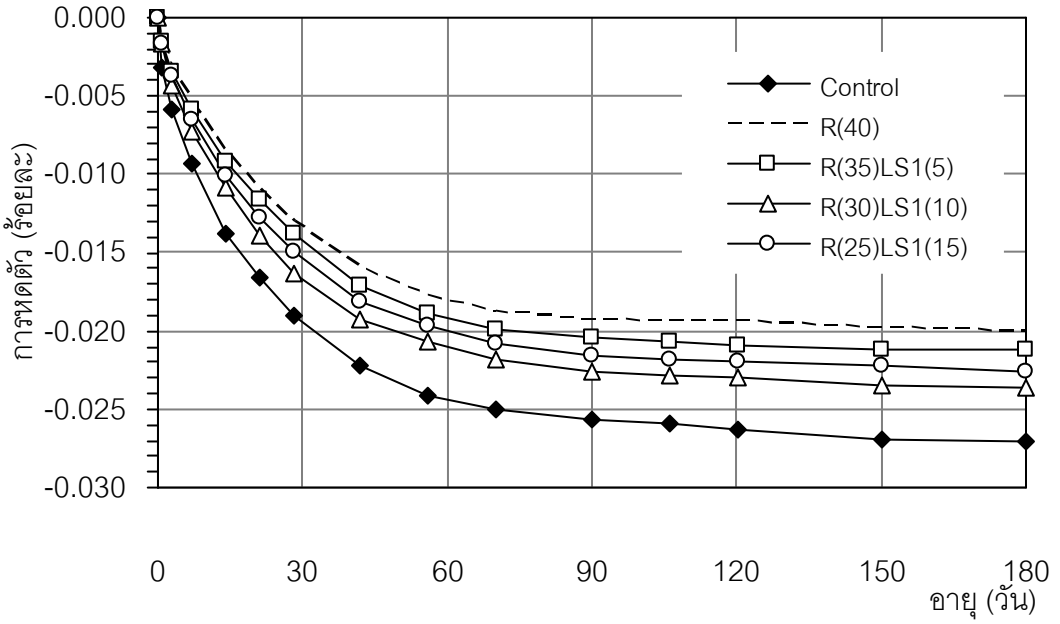
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.26

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนและผงหินปูน LS2 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



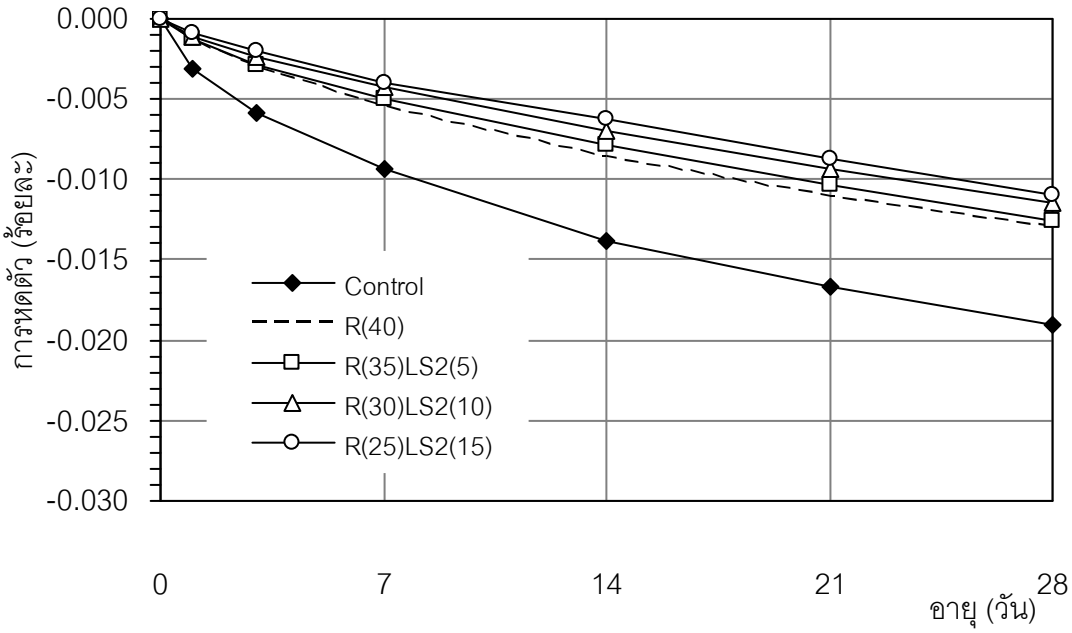
(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



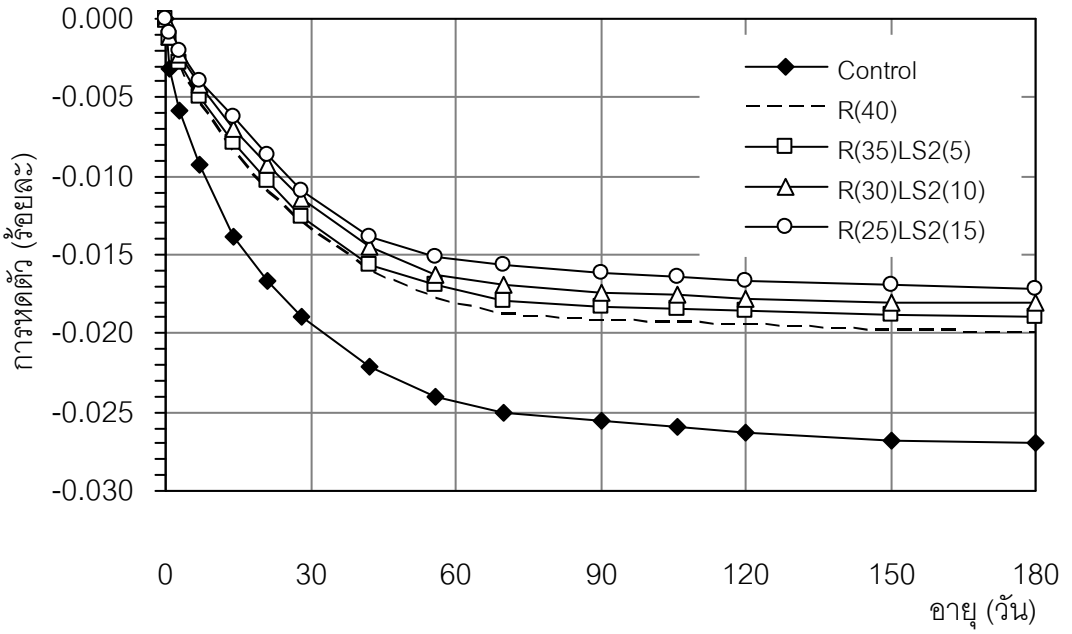
(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.27

การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนและผงหินปูน LS1 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



(ก) ช่วงอายุ 0-28 วัน



(ข) ช่วงอายุ 0-180 วัน

ภาพที่ 5.28
การหดตัวแบบออโตจีเนียสของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนและผงหินปูน LS2
ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

5.2.9 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

1. การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

ภาพที่ 5.30 (ก) ถึง 5.36 (ก) แสดงผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ควบคุมที่อายุ 180 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.096 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนทุกชุดทดสอบ มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าชุดมอร์ต้าร์ควบคุม

การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูนในอัตราส่วนร้อยละ 30 ของชุดทดสอบ C70R25LS1#5 มีค่าการขยายตัวที่อายุ 180 วันน้อยสุด เท่ากับร้อยละ 0.022 อธิบายได้ว่าเป็นผลมาจากปริมาณของเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) มีปริมาณที่เหมาะสม โดยปริมาณของ SiO_2 ในเถ้าแกลบสามารถทำปฏิกิริยากับ $Ca(HO)_2$ ที่ได้จากผลผลิตไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ได้ดีที่สุด ช่วยลดปริมาณของ $Ca(HO)_2$ ซึ่งเป็นสาเหตุของการขยายตัว อีกทั้งเป็นการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ทำให้ปริมาณของ $Ca(HO)_2$ ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ส่วนผงหินปูน LS1 ทำหน้าที่เป็นตัวสอดแทรกให้ปูนซีเมนต์กระจายตัวได้ดียิ่งขึ้นทำให้การทำปฏิกิริยาไฮเดรชั่นสมบูรณ์ขึ้น โครงสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้น การซึมเข้าทำปฏิกิริยาของซัลเฟตจึงทำได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าการขยายตัวน้อยลง ในขณะที่การแทนที่เถ้าแกลบบดและผงหินปูนที่มากกว่าร้อยละ 30 มีผลต่อค่าความพรุนของโครงสร้างเพสต์ที่เพิ่มขึ้น ไอออนซัลเฟตสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ดีจึงทำให้ค่าการขยายตัวเพิ่มขึ้น

ชุดทดสอบที่ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 มีค่าการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตน้อยกว่าชุดทดสอบที่ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 (ขนาด 128ไมโครเมตร) ที่อัตราส่วนเดียวกัน เนื่องจากความแตกต่างทางกายภาพของผงหินปูนทั้งสองชนิด ซึ่งผงหินปูน LS1 ทำหน้าที่เป็นวัสดุสอดแทรกได้ดีกว่าผงหินปูน LS2

การเพิ่มปริมาณร้อยละแทนที่ของผงหินปูนทำให้การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มปริมาณของผงหินปูน เป็นการลดปริมาณของเถ้าแกลบลง ทำให้ปริมาณของ SiO_2 ลดลง การลดลงของ SiO_2 ทำให้มีปริมาณของ $Ca(HO)_2$ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนซัลเฟตเพิ่มขึ้น เกิดยิปซัมและเอททริงไกต์ ซึ่งเป็นสาเหตุของการขยายตัว

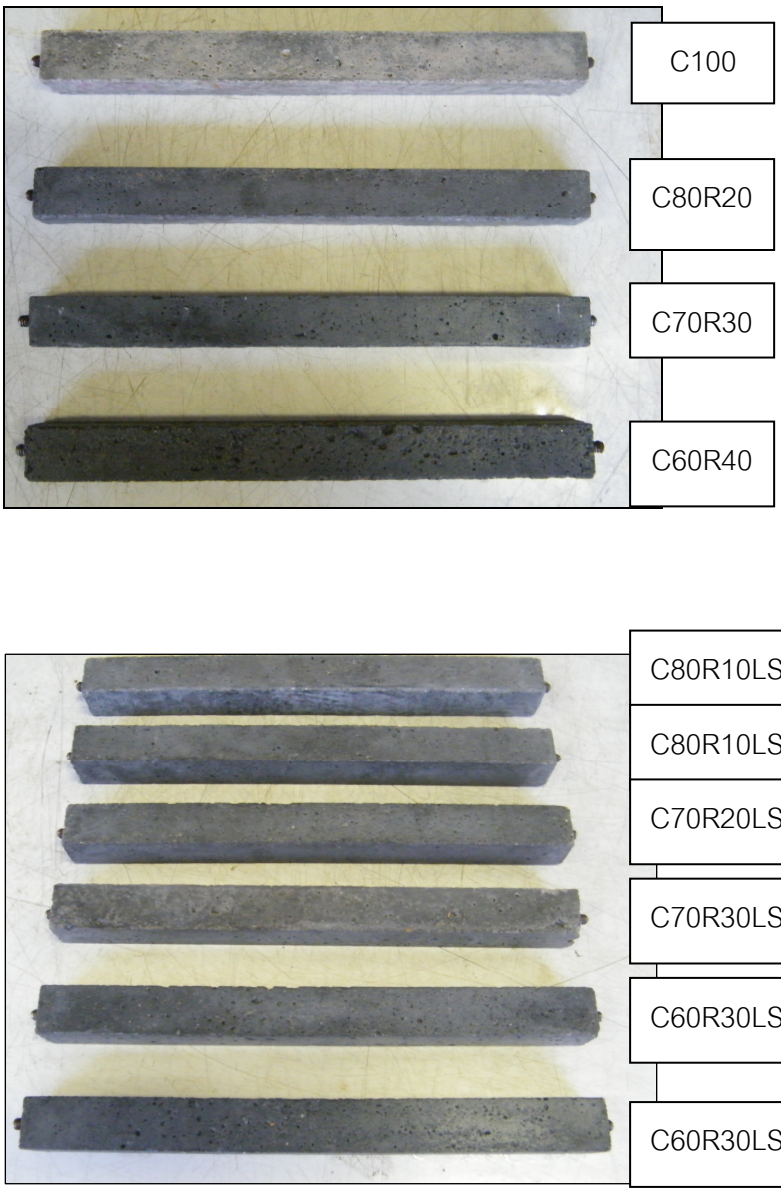
2. การขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

ภาพที่ 5.30 (ข) ถึง 5.36 (ข) แสดงผลการทดสอบการขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่า มอร์ต้าร์ควบคุมที่อายุ 180 วัน มีการขยายตัวเท่ากับ 0.0507 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนทุกชุดทดสอบ มีค่าการขยายตัวน้อยกว่าชุดมอร์ต้าร์ควบคุม โดยชุดทดสอบ C70R25LS1#5 มีการขยายตัวน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 0.0152 อาจเป็นไปได้ที่ปริมาณของ SiO_2 ในเถ้าแกลบมีพอเหมาะสามารเข้าทำปฏิกิริยากับคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ดี และปริมาณผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) ช่วยสอดแทรกอุดช่องว่างได้ดีทำให้ค่าการขยายตัวมีค่าน้อยสุด

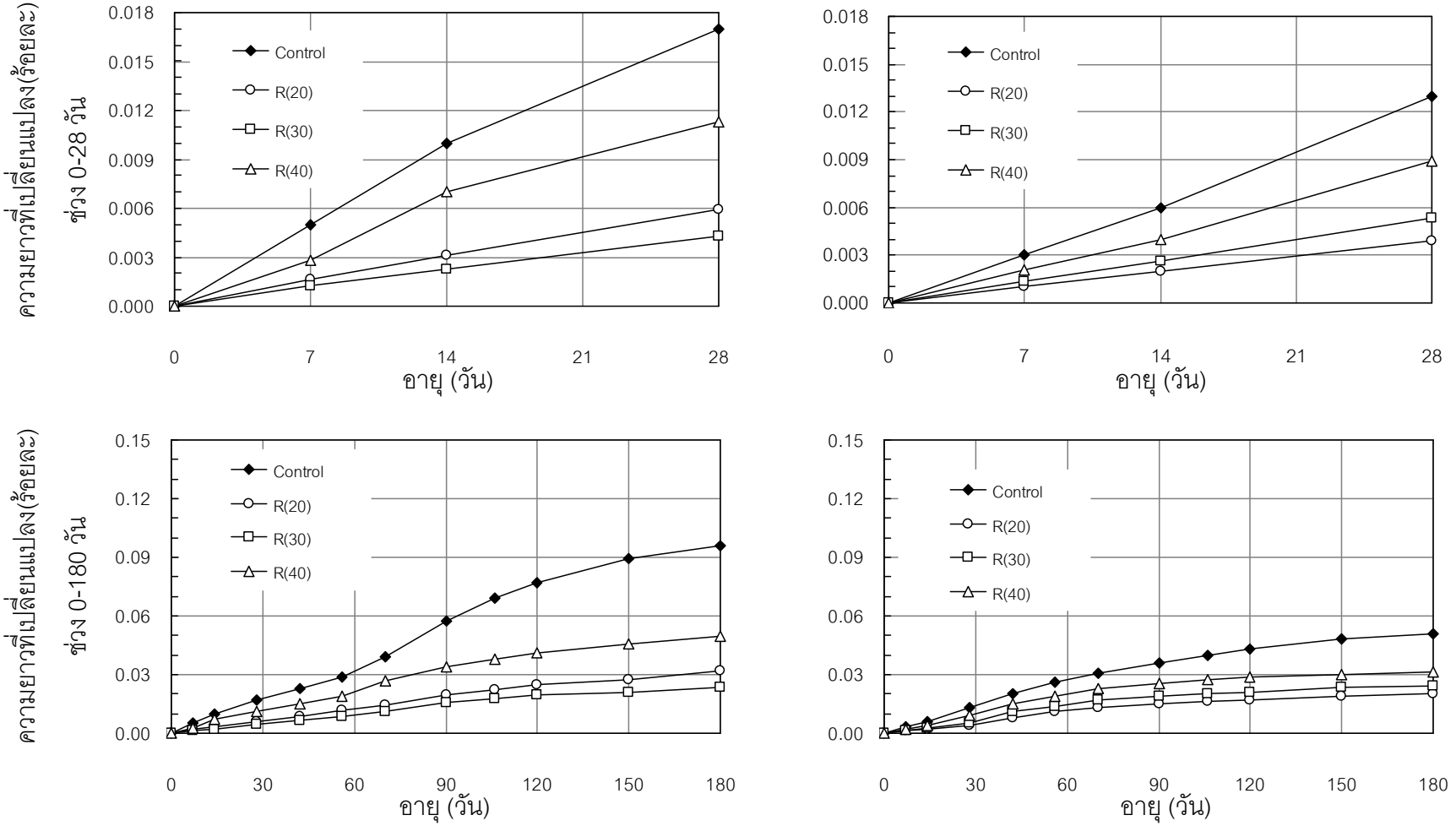
การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนมีการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม โดยมีการขยายตัวที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 0.02, 0.024 และ 0.031 ตามลำดับ

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณของผงหินปูน LS1 (จากร้อยละ 5 ไป 10 และ 15) การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะการเพิ่มปริมาณของผงหินปูนเป็นการลดปริมาณของเถ้าแกลบ ซึ่งลดปริมาณ SiO_2 ของเถ้าแกลบที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิค ดังนั้นไอออนซัลเฟตจึงสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้มากกว่า ส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่มากกว่า

การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) พบว่า มอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS2 มีการขยายตัวน้อยกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม และมากว่ามอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบและผงหินปูน LS1 ที่อัตราส่วนร้อยละแทนที่เท่ากัน เป็นเพราะขนาดอนุภาคที่ใหญ่ของผงหินปูน LS2 ทำให้ความพรุนของโครงสร้างเพิ่มขึ้น ซัลเฟตไอออนสามารถเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า การขยายตัวจึงมีค่ามากกว่า ยิ่งเพิ่มปริมาณร้อยละการแทนที่ผงหินปูน LS2 พบว่าการขยายตัวยิ่งมีค่ามากขึ้น



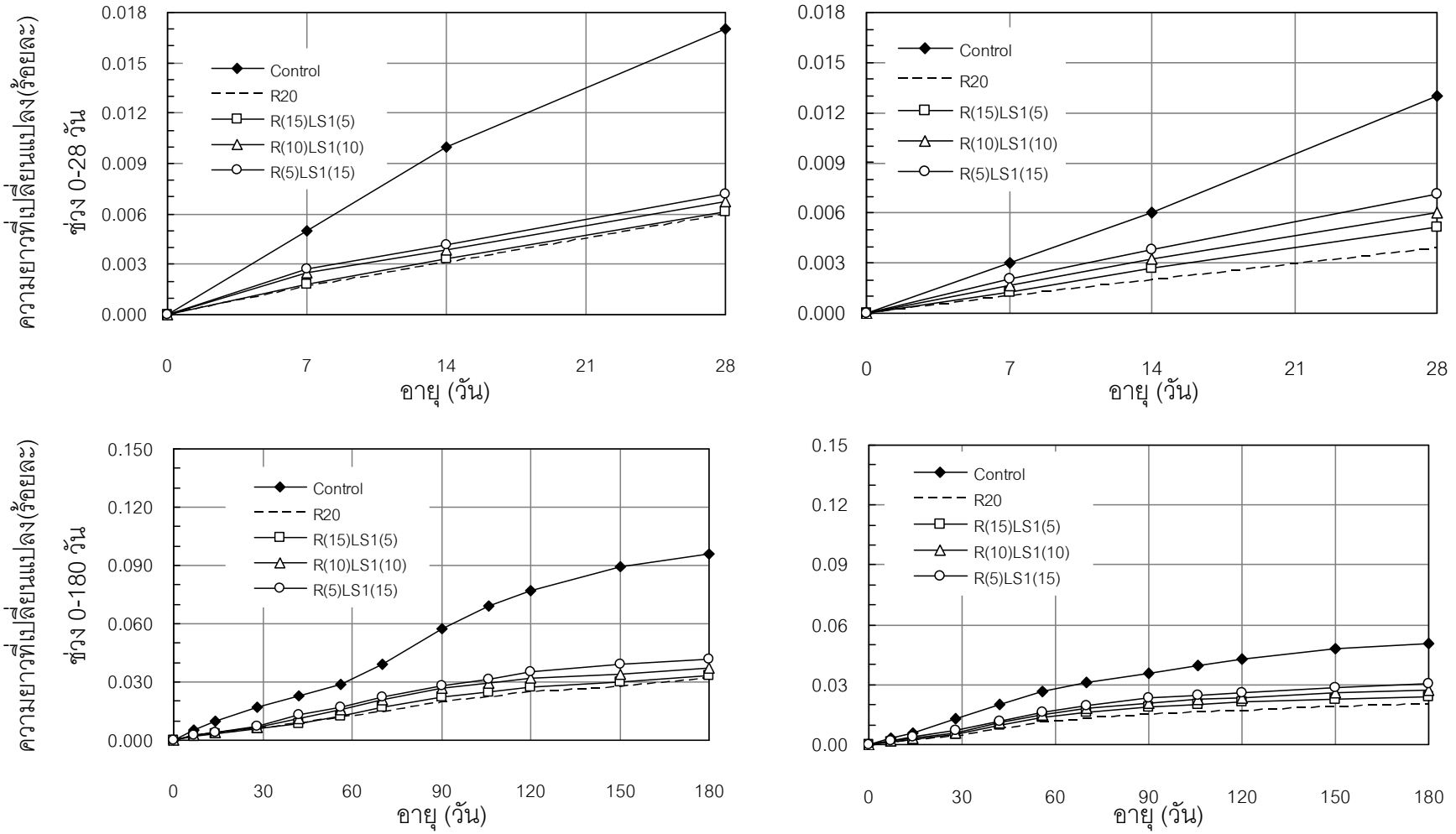
ภาพที่ 5.29
ตัวอย่างชุดทดสอบการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต
ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1
ร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 60 วัน



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

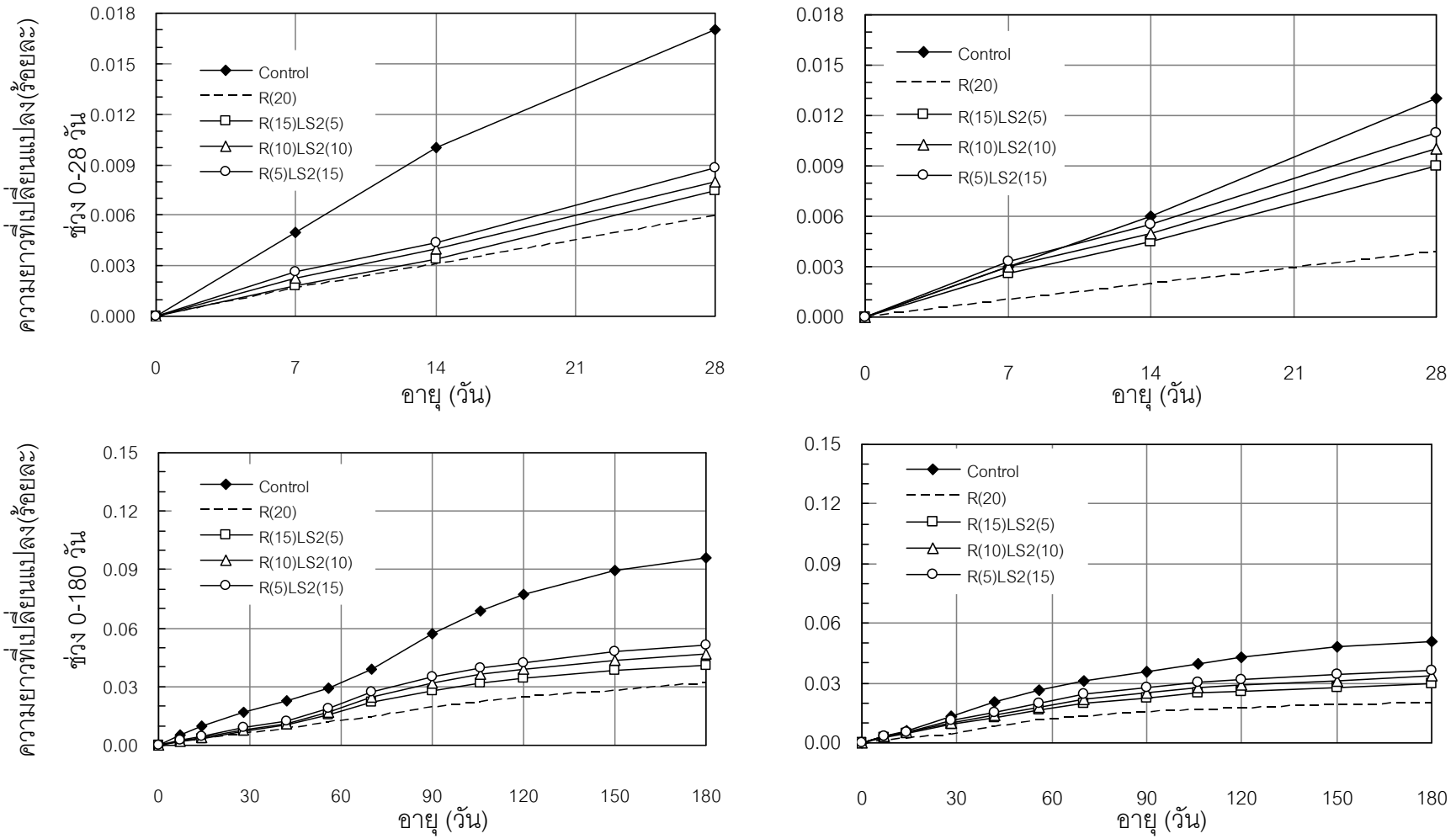
ภาพที่ 5.30 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

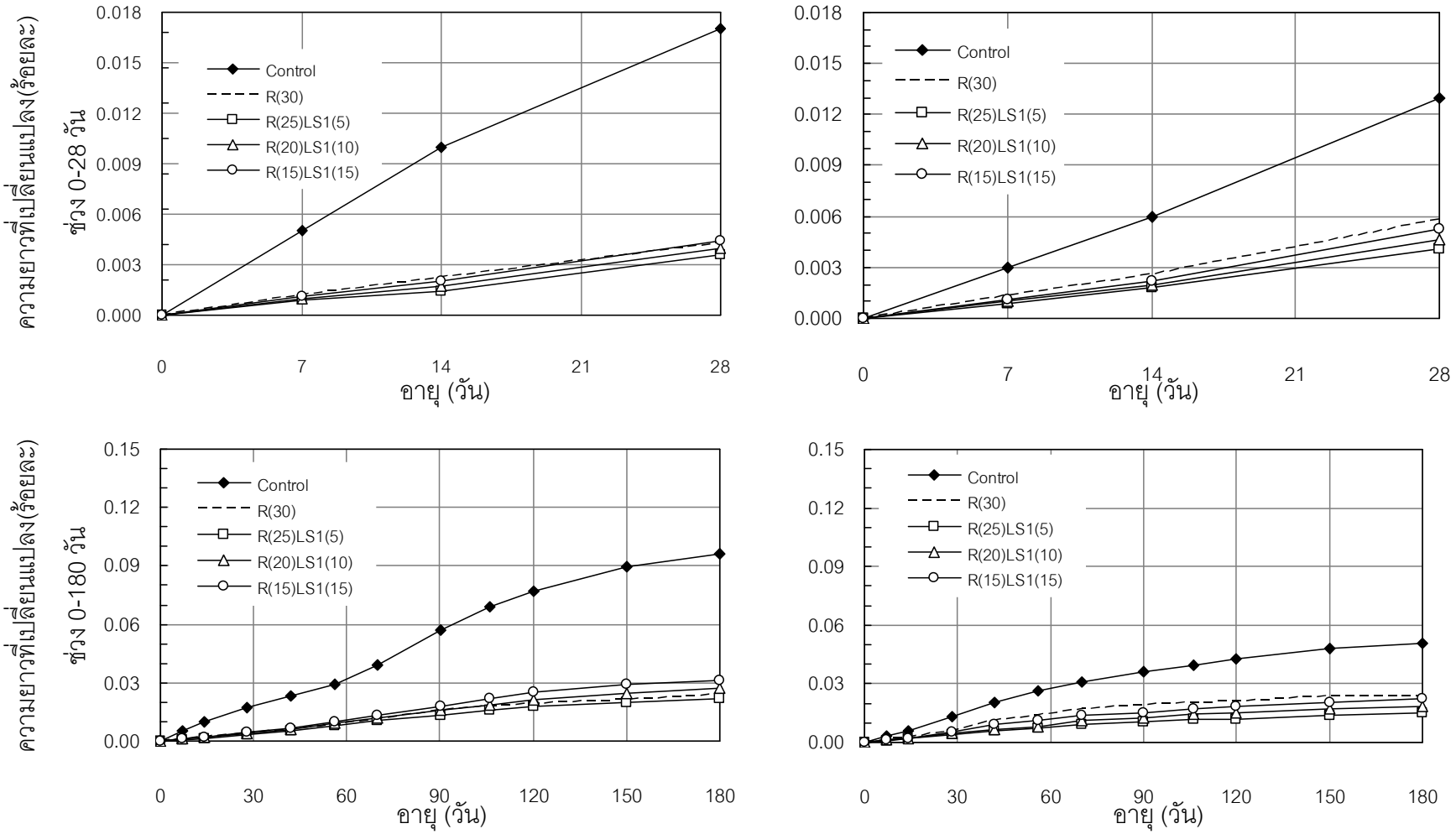
ภาพที่ 5.31 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

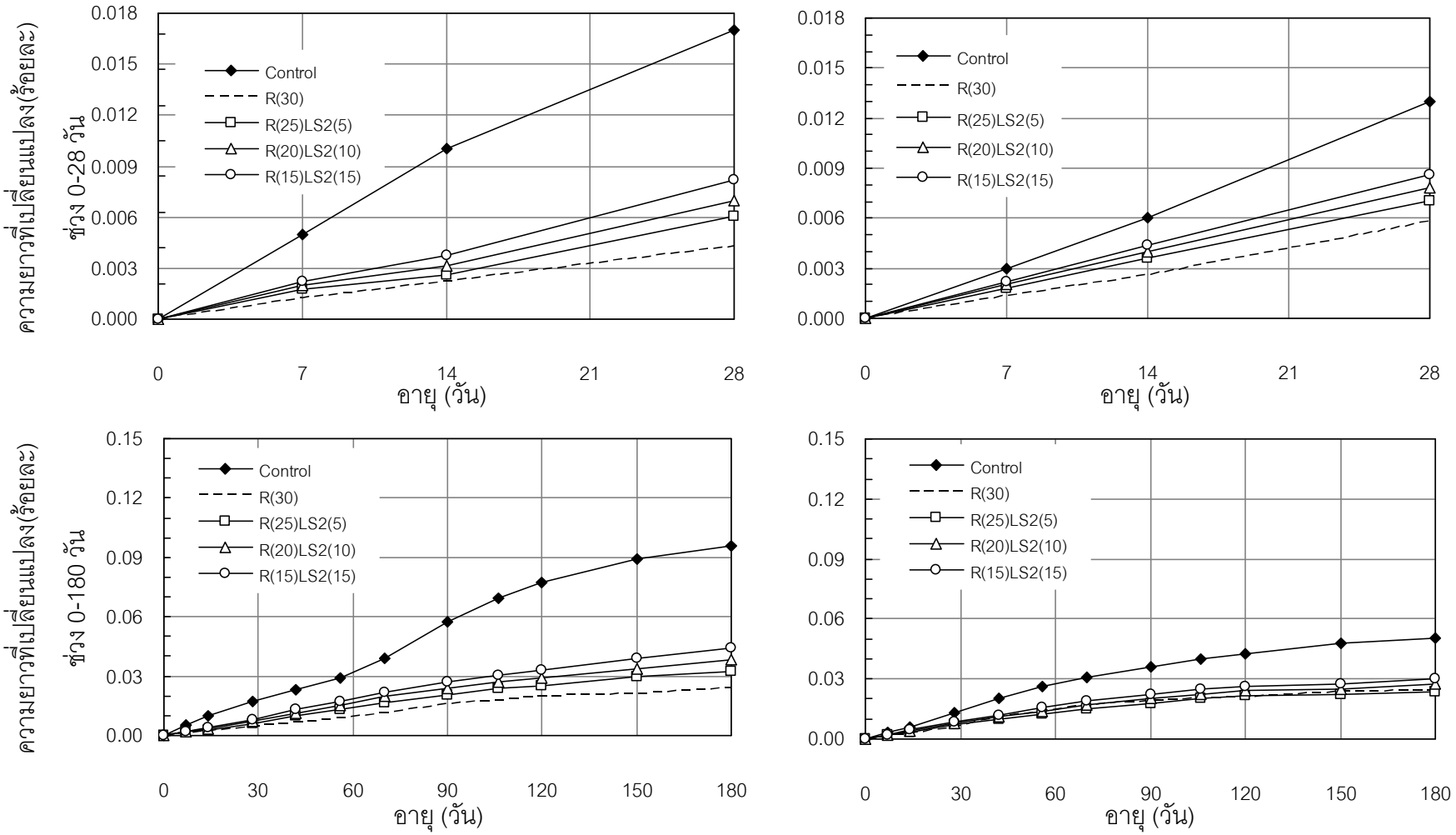
ภาพที่ 5.32 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนเซียมซัลเฟต

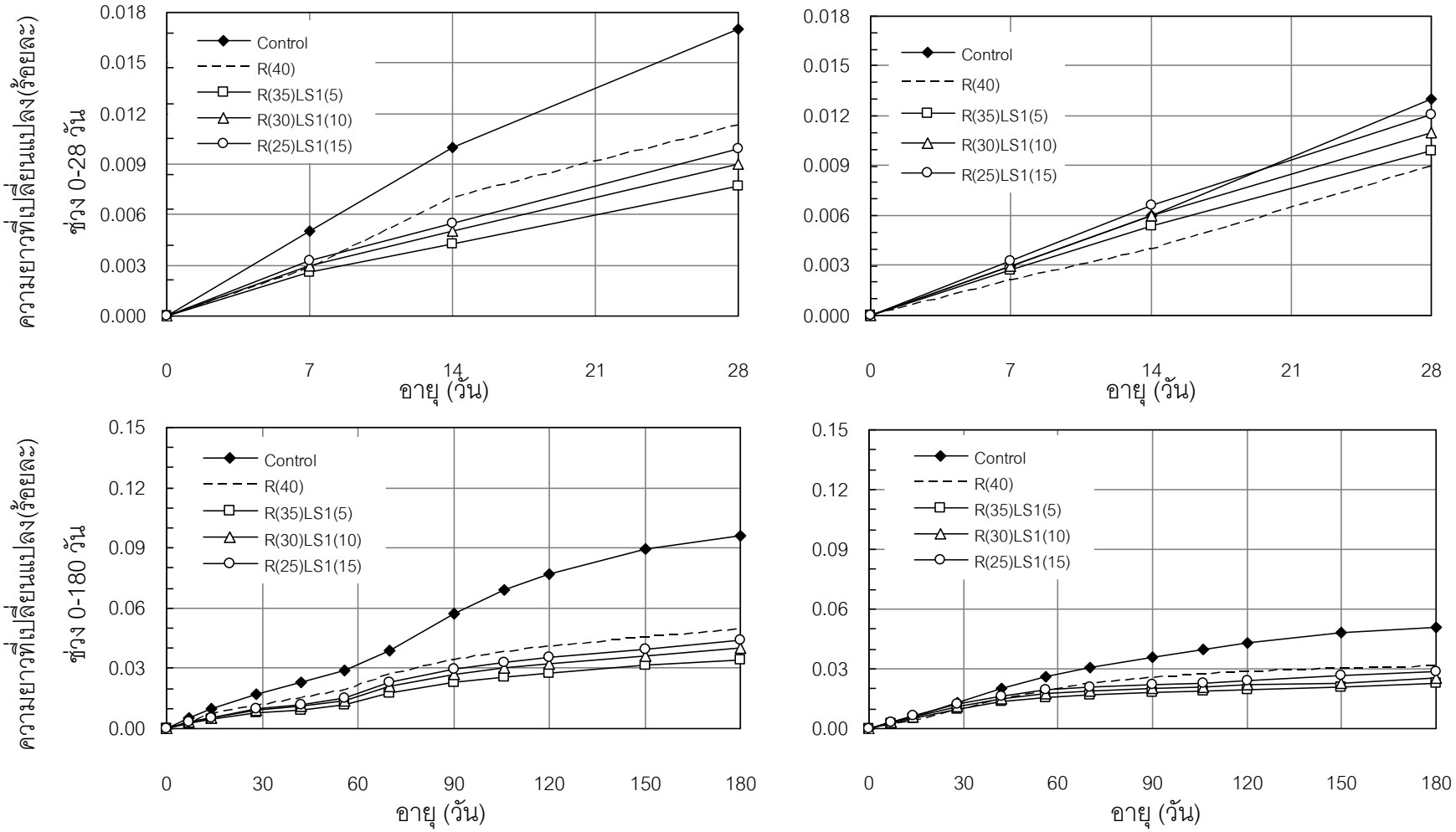
ภาพที่ 5.33 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

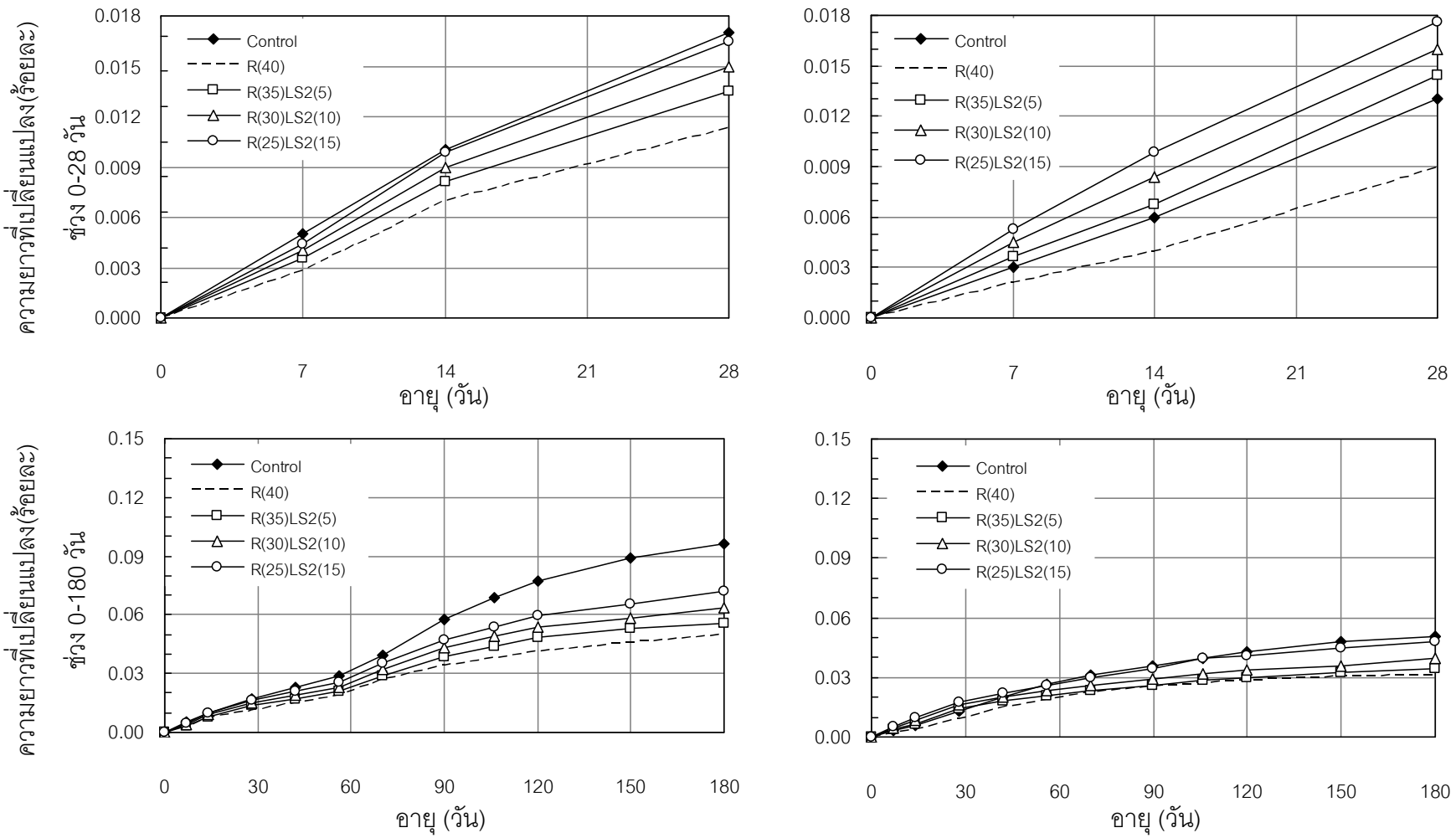
ภาพที่ 5.34 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 5.35 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 5.36 การขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก

5.2.10 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายซัลเฟต

1. การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)

ผลการทดสอบการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 5.38 (ก) ถึง 5.44 (ก) พบว่า มอร์ต้าร์ควบคุมมีการสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 41 โดยที่มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดล้วนร้อยละ 30 (C70R30) มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 23 และเมื่อแทนที่ร่วมระหว่างเถ้าแกลบบดและผงหินปูนชุดที่มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยสุด คือมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดร้อยละ 25 และผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) ร้อยละ 5 (C70R25LS1#5) มีค่าการสูญเสียกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 23.4

กลไกของการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายโซเดียมซัลเฟต เกิดจากการขยายตัวของยิปซั่มและเอททริงไกต์ที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อแรงดึงที่เกิดจากการขยายตัวมากกว่าแรงต้านบริเวณพื้นผิวของมอร์ต้าร์เป็นสาเหตุให้ผิวมอร์ต้าร์แตกร้าว สารละลายโซเดียมซัลเฟตสามารถซึมผ่านเข้าสู่ก้อนตัวอย่างเกิดการขยายตัวภายในทำให้เกิดการแตกร้าวภายในก้อนมอร์ต้าร์ส่งผลให้กำลังอัดมีค่าลดลง

พิจารณาการแทนที่ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบและผงหินปูนชุด C70R25LS1#5 ที่มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุดที่อายุ 180 วัน อาจเป็นเพราะปริมาณของซิลิกาในเถ้าแกลบบดมีปริมาณที่พอเหมาะ สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคได้ดี มีปริมาณของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างแน่นขึ้น ปริมาณซิลิก้าในเถ้าแกลบที่เหมาะสมจะช่วยการสูญเสียกำลังให้มีค่าน้อยลง การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณเกินร้อยละ 30 มีแนวโน้มการสูญเสียกำลังอัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ ทำให้ความต้องการน้ำมากขึ้น โครงสร้างพรุนมากขึ้น กำลังอัดจึงน้อยลง ส่วนผงหินปูนสามารถช่วยเป็นวัสดุเติมเต็ม เนื่องจากเป็นวัสดุเฉื่อยความสามารถในการทำปฏิกิริยาต่ำและไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร การแทนที่ผงหินปูน LS1 สูญเสียกำลังอัดน้อยกว่าการแทนที่ผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) เป็นเพราะขนาดอนุภาค LS1 มีขนาดเล็กกว่า LS2 ความสามารถในการสอดแทรกดีกว่าทำให้โครงสร้างแน่นขึ้นกำลังรับแรงอัดจึงสูญเสียน้อยกว่า

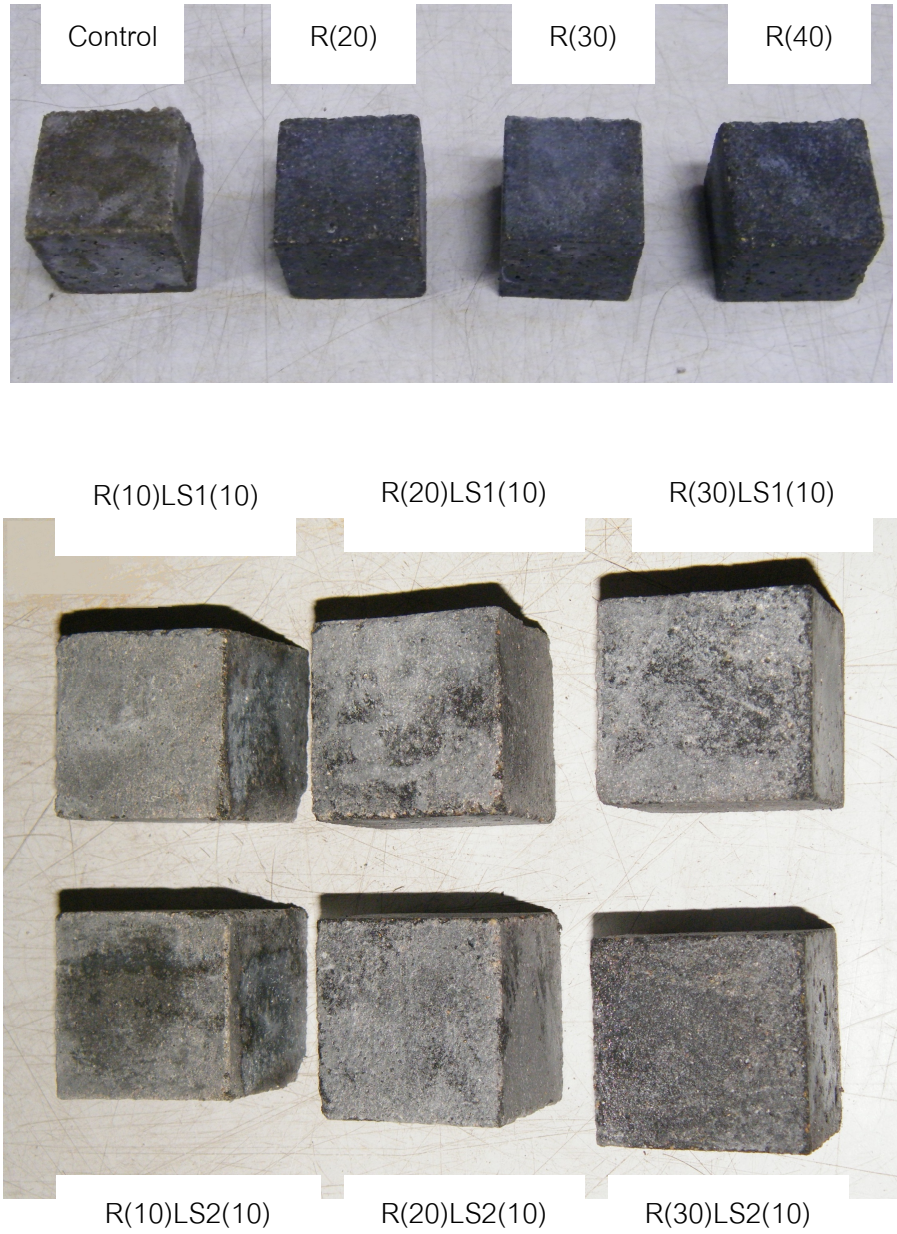
2. การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$)

ผลการทดสอบการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก

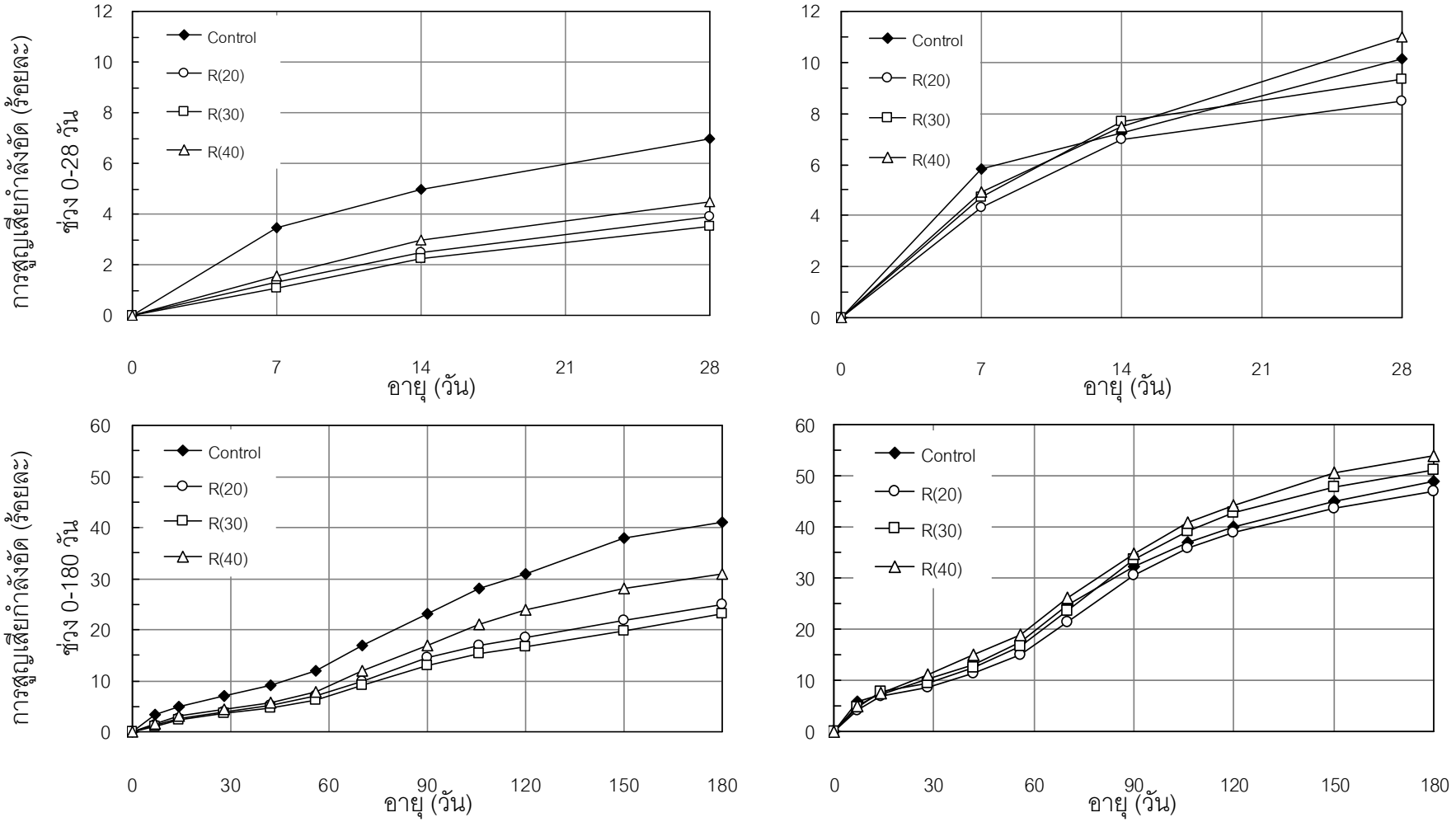
แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่ 5.38 (ข) ถึง 5.44 (ข) พบว่า มอร์ต้าร์ควบคุมมีการสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 49 และชุดที่สูญเสียกำลังอัดน้อยที่สุดคือ ชุดมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบบดร้อยละ 5 ผสมร่วมผงหินปูนร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (C80R5LS1#15) โดยสูญเสียกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับร้อยละ 43

กลไกของการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต คือ การทำปฏิกิริยาของแมกนีเซียมซัลเฟตกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ ยิปซั่ม และ แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายลดลง เกิดความไม่เสถียรของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ทำให้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดการแตกตัวเพื่อให้ค่าความเป็นกรดด่างสูงขึ้น ได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารละลายซิลิกอน สำหรับแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายซิลิกอน ได้เป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีความสามารถในการเชื่อมประสาน

เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบผสมผงหินปูน LS1 (ขนาด 12 ไมโครเมตร) และผงหินปูน LS2 (ขนาด 128 ไมโครเมตร) พบว่ามอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบผสมร่วมผงหินปูน LS1 มีการสูญเสียกำลังอัดน้อยกว่ามอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบผสมร่วมผงหินปูน LS2 เป็นเพราะ ผงหินปูน LS1 สามารถเป็นวัสดุสอดแทรกได้ดี ทำให้โครงสร้างแน่นขึ้น การซึมผ่านเข้าทำปฏิกิริยาของซัลเฟตไอออนทำได้ยากขึ้นการสูญเสียกำลังอัดจึงน้อยกว่า ตรงกันข้ามกับ มอร์ต้าร์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบผสมร่วมผงหินปูน LS2 ซึ่งผงหินปูน LS2 มีขนาดใหญ่ โครงสร้างพรุนเพิ่มขึ้นทำให้ซัลเฟตไอออนเข้าทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า การสูญเสียกำลังอัดจึงมากกว่าทุกส่วนผสม



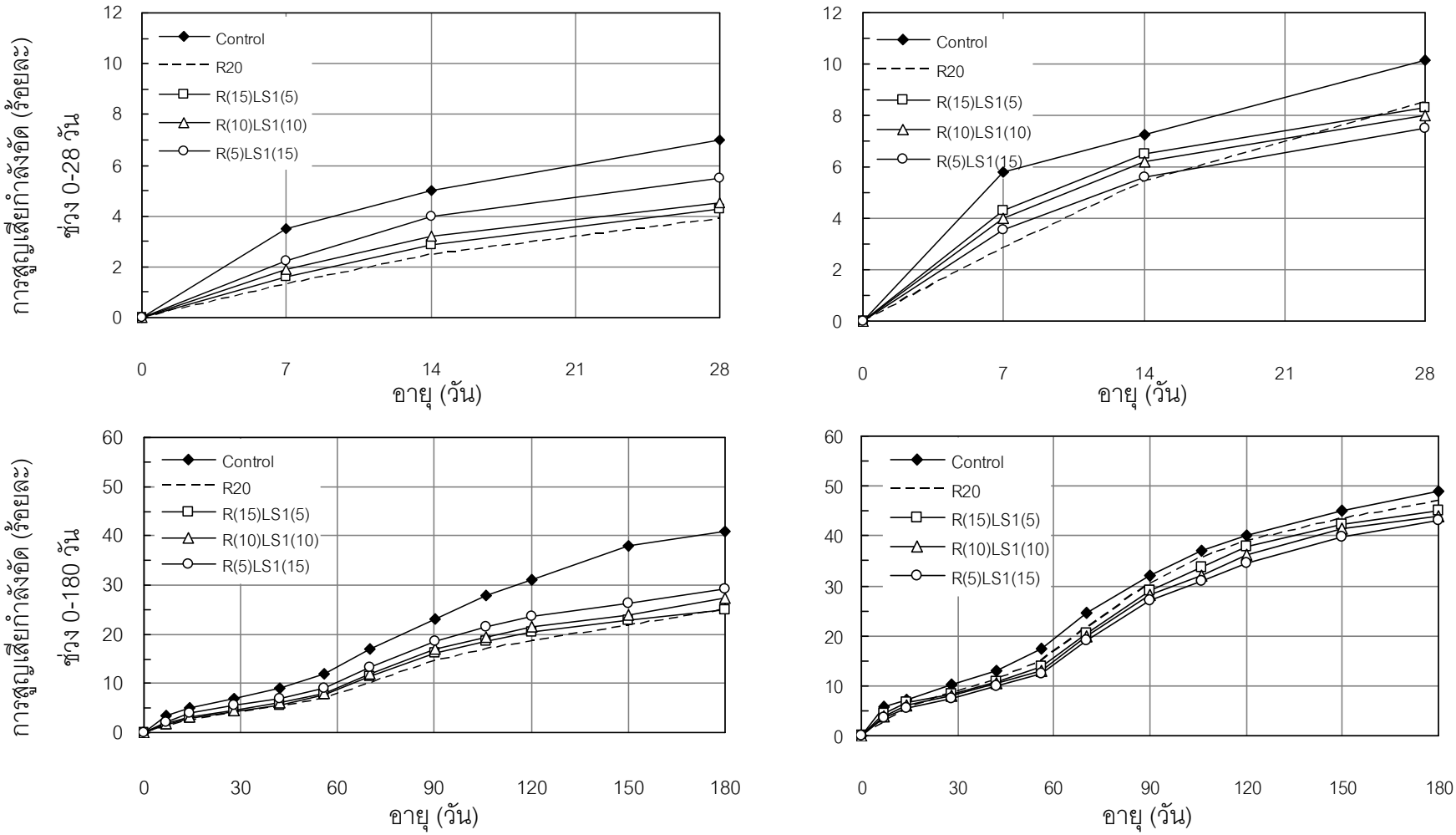
ภาพที่ 5.37
ตัวอย่างมอร์ต้าร์ทดสอบการสูญเสียกำลังอัดจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดและผงหินปูน
ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ที่อายุ 60 วัน



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

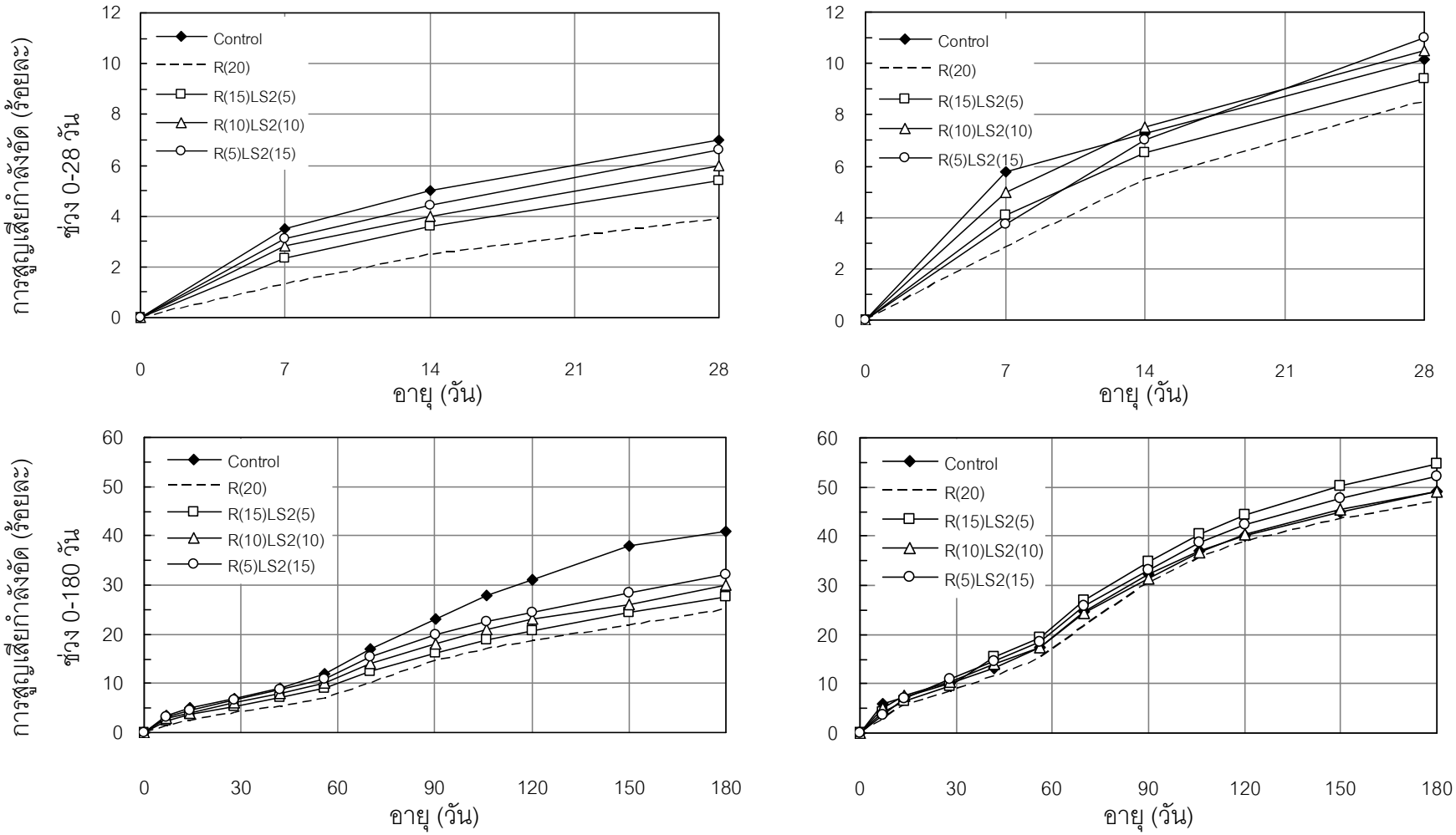
ภาพที่ 5.38 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดล้วนแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

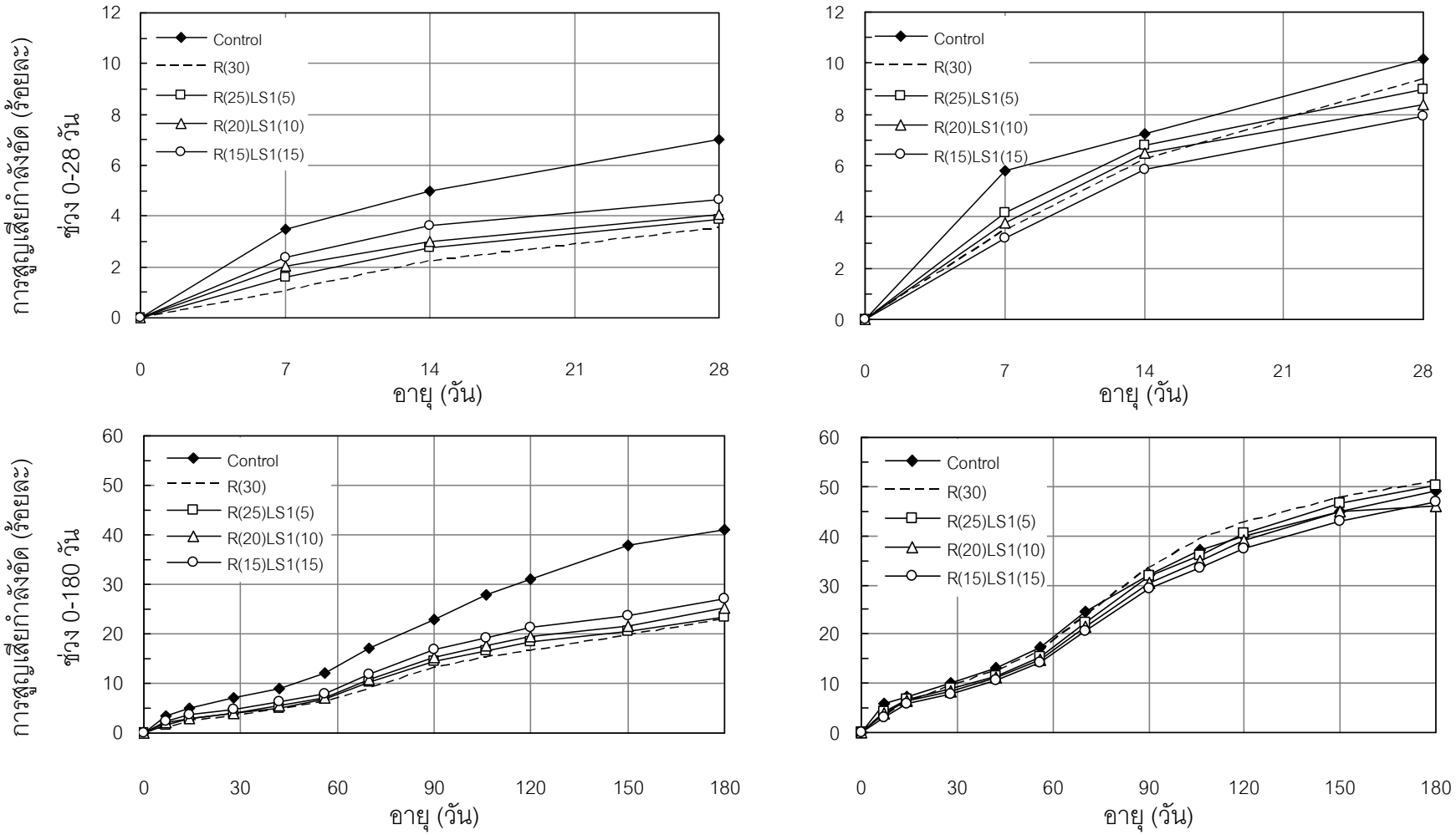
ภาพที่ 5.39 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

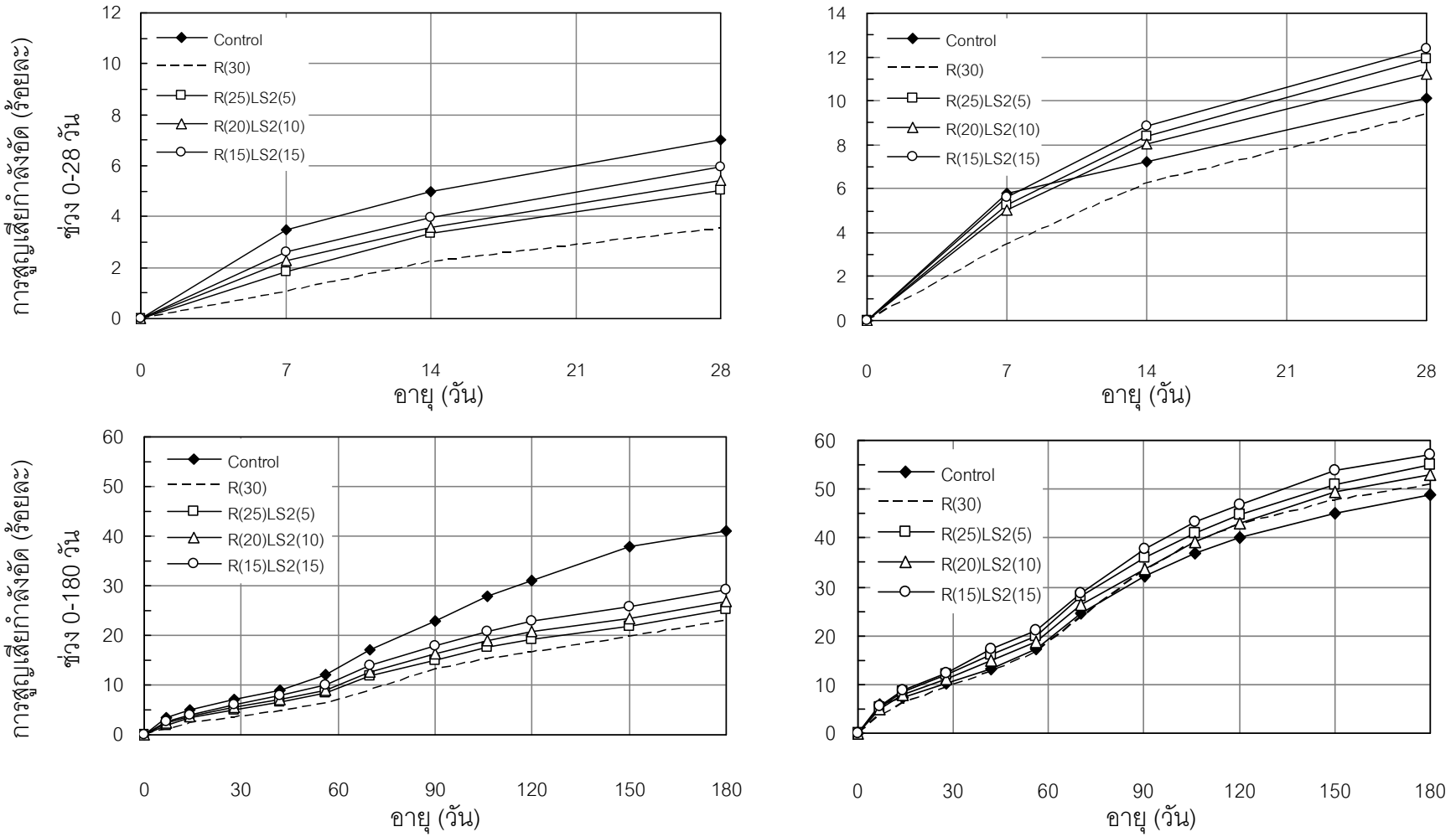
(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 5.40 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

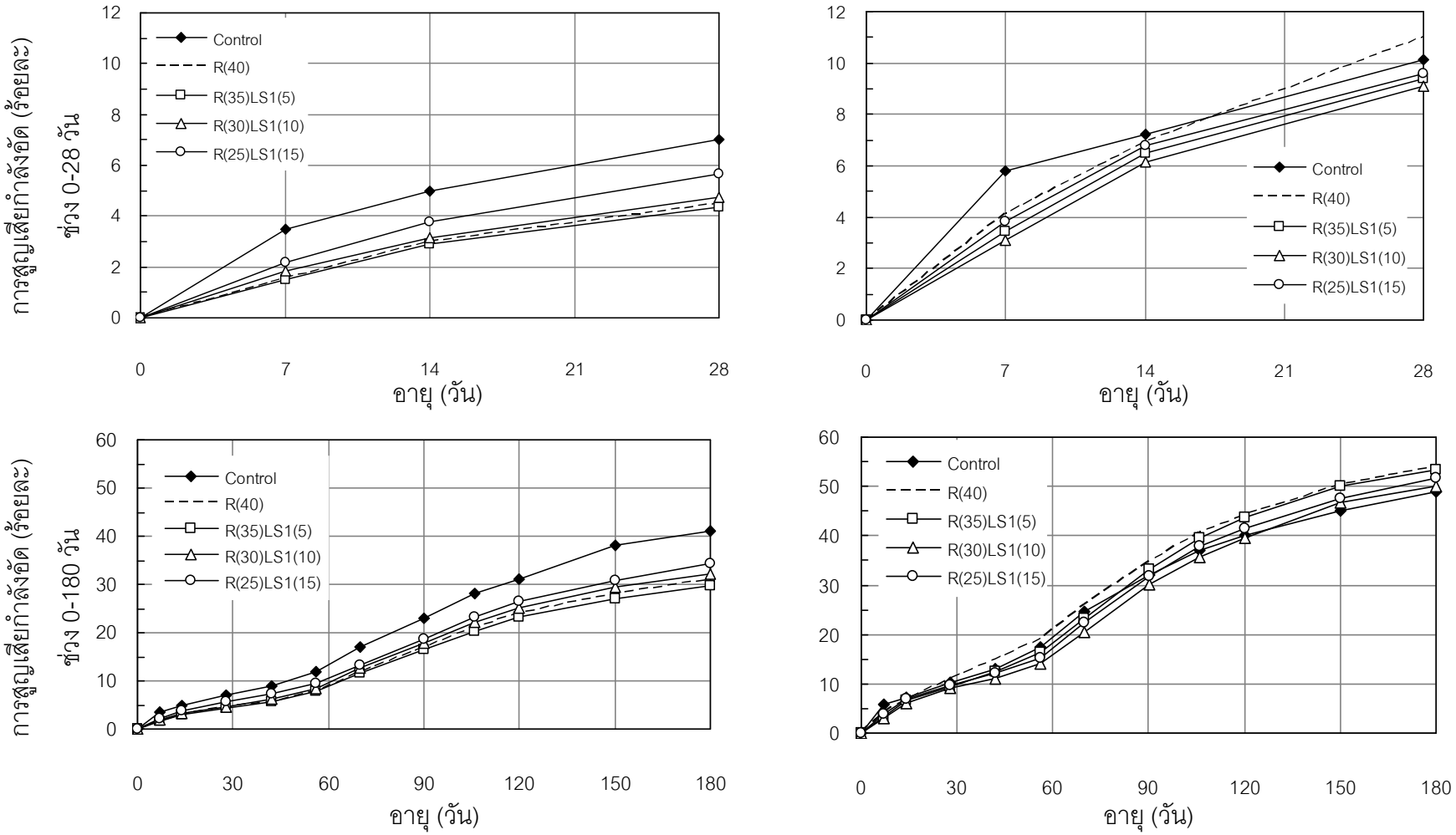
ภาพที่ 5.41 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

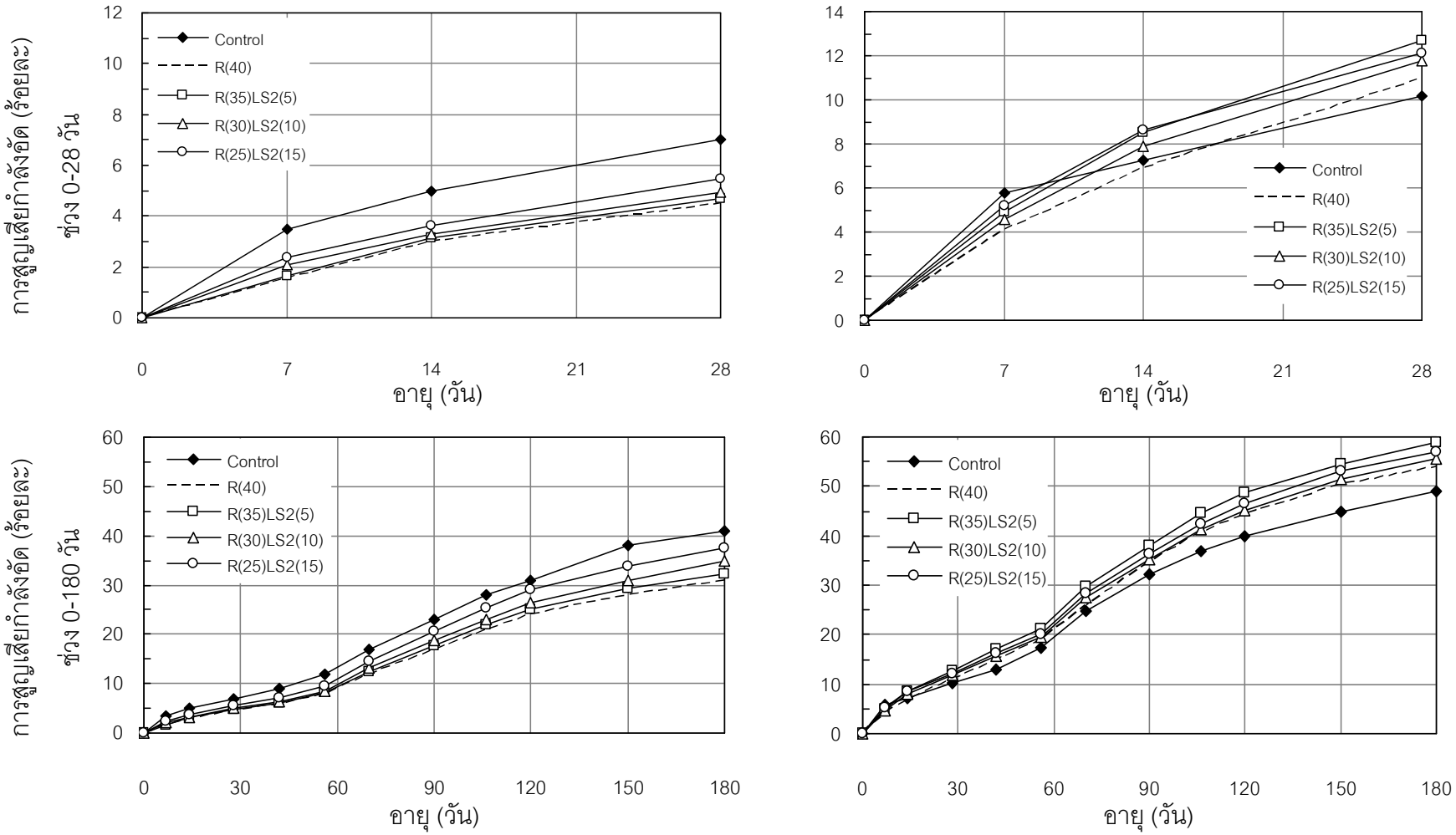
ภาพที่ 5.42 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 5.43 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS1 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต (ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 5.44 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบบดและผงหินปูน LS2 แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก