บทที่ 5

ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

5.1 ทั่วไป

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลซึ่งได้แก่ คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าแกลบดำเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ คุณสมบัติทางกลของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำ การเปลี่ยนแปลงความยาว การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ การสูญเสียกำลังอัด และปริมาณคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ในมอร์ต้าร์

5.2 การประเมินศักยภาพเบื้องต้นของเถ้าแกลบดำบดที่เวลา 1 – 6 ชั่วโมง

การประเมินศักยภาพเบื้องต้นของเถ้าแกลบดำผ่านกระบวนการบดเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C 618 แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

5.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำซึ่งผ่านการบดเป็นเวลา 1 – 6 ชั่วโมง

จากตารางสรุปผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำในตารางที่ 5.1 เมื่อผ่านกระบวนการบดค่าองค์ประกอบทางเคมี ค่าที่ได้มีปริมาณใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงว่ากระบวนการบดเถ้าแกลบดำไม่มีผลทำให้องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบเกิดความเปลี่ยนแปลง

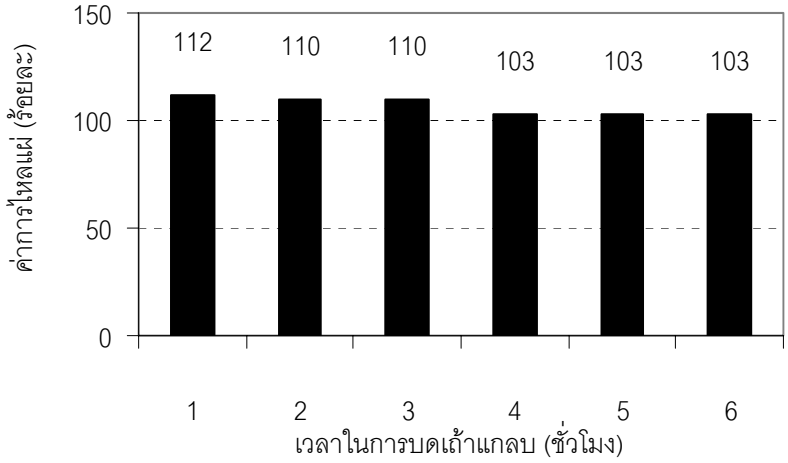
ตารางที่ 5.1

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำซึ่งผ่านการบดเป็นเวลา 1 – 6 ชั่วโมง

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ASTM C 618 (Class N)	เวลาที่ทำการบด (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
1. ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	-	90.61	91.84	91.02	90.63	93.10	90.62
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	-	0.50	0.50	0.53	0.52	0.52	0.50
3. ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	-	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
SiO_2+ Al_2O_3+ Fe_2O_3	ร้อยละ ต่ำสุด 70	92.51	93.74	92.95	92.55	95.02	92.52
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	-	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	-	0.5	0.5	0.5	0.2	0.4	0.3
6. โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	-	1.9	1.9	2.0	1.9	2.0	1.9
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	ร้อยละ สูงสุด 1.5	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	ร้อยละ สูงสุด 4.0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
10. ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	-	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06

5.2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำซึ่งผ่านการบดเป็นเวลา 1 – 6 ชั่วโมง

ในตารางที่ 5.2 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาการบดค่าความละเอียด (พื้นที่ผิวจำเพาะ) ของเถ้าแกลบดำผ่านการบดเป็นเวลา 1 – 6 ชั่วโมง โดยมีค่าเท่ากับ 2700, 3000, 4800, 5400, 5500 และ 5700 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ มีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นความต้องการน้ำของเถ้าแกลบดำบด 1 – 6 ชั่วโมง เมื่อเทียบกับตัวแปรควบคุม (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน) โดยมีค่าการไหลแผ่เท่ากัน เถ้าแกลบดำบดที่เวลา 1 – 6 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับร้อยละ 112, 110, 110, 103, 103 และ 103 ตามลำดับ ค่าความต้องการน้ำที่ลดลงเป็นผลมาจากเถ้าแกลบมีลักษณะพื้นที่ผิวที่หยาบ ขรุขระ และเป็นโพรงมากซึ่งโพรงเหล่านั้นมีความสามารถดูดซับและเก็บกักน้ำไว้ เมื่อผ่านกระบวนการบดเถ้าแกลบทำให้ปริมาณโพรงเหล่านั้นลดลงทำให้ความสามารถดูดซับและเก็บกักน้ำลดลงเป็นสาเหตุให้ค่าความต้องการน้ำมีค่าลดลง



ภาพที่ 5.1 ค่าความต้องการน้ำของเถ้าแกลบดำบดที่เวลา 1 - 6 ชั่วโมง

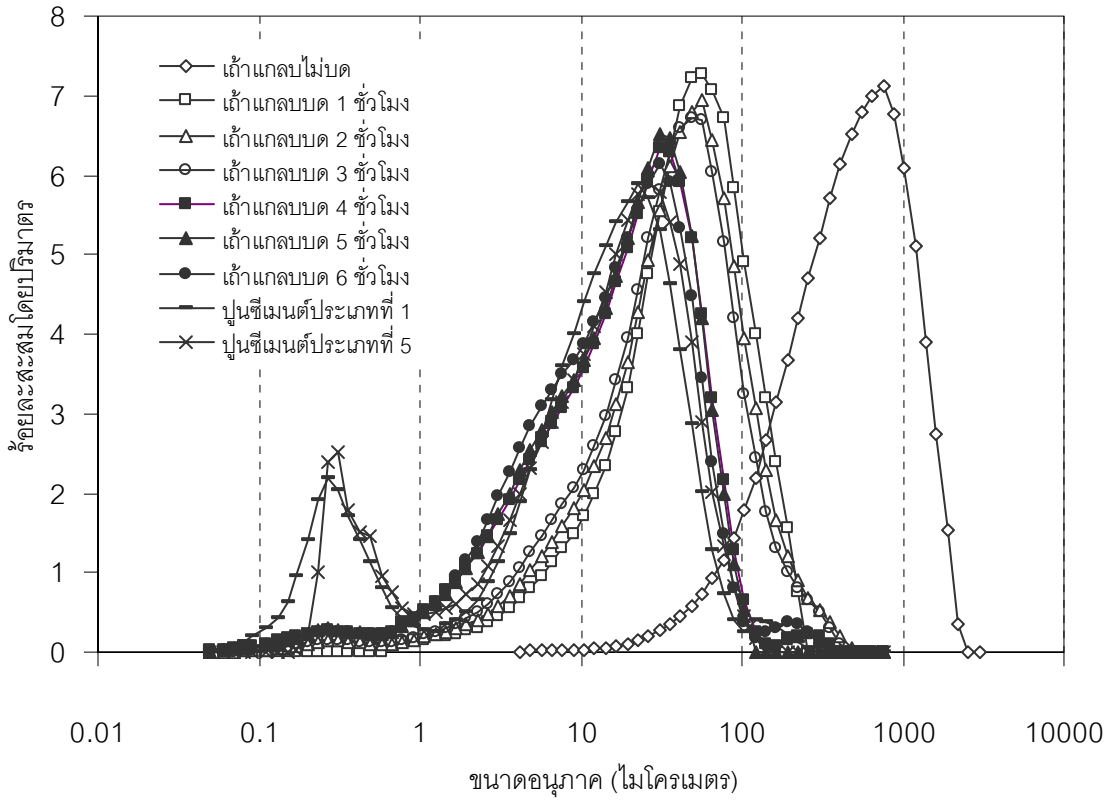
สำหรับดัชนีกำลังที่ 7 วัน ของเถ้าแกลบดำบดที่เวลา 1 – 6 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับร้อยละ 71, 77, 77, 79, 87 และ 91 ตามลำดับ ในขณะที่ดัชนีกำลังที่ 28 วัน ของเถ้าแกลบดำบดที่เวลา 1 – 6 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับร้อยละ 63, 73, 73, 77, 88 และ 91 ตามลำดับ ความละเอียดของเถ้าแกลบมีผลต่อการพัฒนากำลัง และเมื่อบดเถ้าแกลบนานขึ้นทำให้อนุภาคเล็กลง พื้นที่ผิวที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นทำให้มีการพัฒนากำลังที่เพิ่มขึ้น (บุรฉัตรและอนัญญ์, 2549)

ตารางที่ 5.2

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำบดเป็นเวลา 1 - 6 ชั่วโมง

คุณสมบัติทางกายภาพ	ASTM C 618 (Class N)	เวลาที่ทำการบด (ชั่วโมง)					
		1	2	3	4	5	6
1. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (ร้อยละ)	ร้อยละสูงสุด 10	0.82	0.65	0.58	0.84	0.64	0.62
2. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	ร้อยละสูงสุด 3	1.09	1.23	1.02	1.13	0.98	0.98
3. พื้นที่ผิว (ตร.ซม./กรัม)	-	2700	3000	4800	5400	5500	5700
4. ความถ่วงจำเพาะ	-	2.13	2.18	2.30	2.30	2.35	2.38
5. ความละเอียด (ขนาดของอนุภาค, ร้อยละผ่าน)							
- ≥ 75 ไมโครเมตร	-	15.63	11.32	7.88	0.95	0.56	0.34
- 75 ไมโครเมตร	-	23.0	20.76	20.47	6.06	6.34	3.51
- 45 ไมโครเมตร	-	7.89	7.04	7.18	5.50	4.63	3.82
- ≤ 36 ไมโครเมตร	-	53.48	60.88	64.47	87.49	88.47	92.33
6. ความละเอียด (ปริมาณค้างตะแกรงเบอร์ 325) ร้อยละ	ร้อยละสูงสุด 34	38.63	32.08	28.35	7.01	6.90	3.85
7. ดัชนีกำลัง (เทียบกับมอร์ต้าร์ผสมปูนซีเมนต์ล้วน)							
ที่อายุ 7 วัน (ร้อยละ)	ร้อยละต่ำสุด 75	71	77	77	79	87	91
ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละ)	ร้อยละต่ำสุด 75	63	73	73	75	88	91
8. ความต้องการปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	ร้อยละสูงสุด 115	112	110	110	103	103	103
9. ค่าความหนาแน่น (กก./ลิตร)		0.66	0.67	0.68	0.70	0.71	0.72

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าแกลบโดยใช้เครื่อง Laser Particle Size Analyzer ดังภาพที่ 5.2 สามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 การกระจายอนุภาคของเถ้าแกลบบดที่เวลา 4 - 6 ชั่วโมง มีค่าการกระจายขนาดคละใกล้เคียงกัน โดยมีค่าประมาณ 1 - 100 ไมโครเมตร ส่วนที่ 2 การกระจายขนาดคละของเถ้าแกลบบดที่เวลา 1 - 3 ชั่วโมง มีค่าประมาณ 1 - 1000 ไมโครเมตร



ภาพที่ 5.2 การกระจายขนาดคละของเถ้าแกลบบด 1 – 6 ชั่วโมง

จากตารางที่ 5.2 เมื่อเปรียบเทียบเถ้าแกลบดำบดที่เวลา 1 - 6 ชั่วโมง กับมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าเถ้าแกลบบดที่เวลา 1 ชั่วโมง มีค่าความละเอียดและดัชนีกำลังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ความต้องการน้ำสูงกว่ามาตรฐาน เถ้าแกลบดำบดที่เวลา 2 ชั่วโมง ค่าดัชนีกำลังมีค่าต่ำกว่ามาตรฐาน ในขณะที่เถ้าแกลบดำบด 4 - 6 ชั่วโมง จัดอยู่ในหมวด N ซึ่งเป็นสารปอซโซลานที่มีแหล่งมาจากธรรมชาติโดยมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นซิลิคอนไดออกไซด์หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ จากผลการทดสอบและการพิจารณาเวลาที่ใช้ในการบดเถ้าแกลบ สรุปได้ว่าเถ้าแกลบดำเท่ากับ 4 ชั่วโมง และมีอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 7 เป็นเวลาที่นำมาใช้ในงานวิจัย

5.3 คุณสมบัติพื้นฐานของเถ้าแกลบดำบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

ผลการทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบดำบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 และปูนซีเมนต์ประเภททนทานต่อการกระทำของคลอไรด์อิสระประกอบด้วย องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะในรูปของความละเอียดโดยวิธีเบลน ปริมาณความชื้น และการกระจายขนาดคละของอนุภาค เป็นต้น การวิเคราะห์ทางจุลภาคได้แก่ ภาพขยายลักษณะอนุภาคและการกระจายขนาดคละของอนุภาค

5.3.1 องค์ประกอบทางเคมี

จากการเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำบดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนทานต่อการกระทำของคลอไรด์ แสดงในตารางที่ 5.3 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำบดมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก ในขณะที่มีปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 0.50 และ 0.90 ตามลำดับ ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนคลอไรด์มีค่าซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เท่ากับร้อยละ 20.80, 18.40 และ 24.1 ตามลำดับ ในขณะที่อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่ากับร้อยละ 5.20, 4.80 และ 8.61 ตามลำดับ และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เท่ากับร้อยละ 66.30, 60.5 และ 55.05 ตามลำดับ

5.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำบด

ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำบดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์ ดังแสดงในตารางที่ 5.4 พบว่าความละเอียด (พื้นที่ผิวจำเพาะ) โดยวิธีเบลนมีค่าเท่ากับ 5400, 3300, 3400 และ 3800 ซม.^{2}/ก. ตามลำดับ ทั้งนี้การบดเถ้าแกลบมีผลทำให้อนุภาคเล็กลง แต่กระนั้นความพรุนภายในอนุภาคของเถ้าแกลบมีผลต่อค่าดังกล่าวตามเวลาที่ใช้ในการกักเก็บอากาศในระหว่างการทดสอบ

ตารางที่ 5.3

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำบดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	เถ้าแกลบดำบด	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	ประเภททนคลอไรด์
1. ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	90.63	20.8	18.4	24.14
2. อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	0.52	5.20	4.80	8.61
3. ไอออนออกไซด์ (Fe_2O_3)	1.40	3.20	3.50	6.15
4. แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	0.85	66.3	60.5	55.05
5. แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.37	1.20	1.00	1.90
6. โปตัสเซียมออกไซด์ (K_2O)	1.95	0.20	0.40	0.74
7. โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	0.01	0.10	0.30	0.53
8. ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	0.03	2.40	2.60	2.05
9. ปูนขาวอิสระ (Free CaO)	0.06	1.00	1.30	1.08

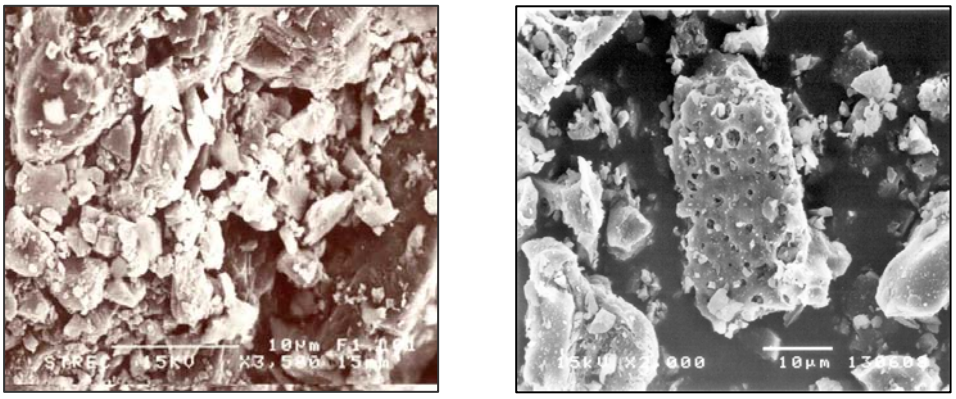
ตารางที่ 5.4

คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบดำบดและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

คุณสมบัติทางกายภาพ	เถ้าแกลบดำบด	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์		
		ประเภทที่ 1	ประเภทที่ 5	ชนิดทนคลอไรด์
1. การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ (ร้อยละ)	0.84	1.57	1.82	0.65
2. ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	1.13	0.19	0.46	0.35
3. พื้นที่ผิว (ตร.ซม./ ก.)	5400	3300	3400	3800
4. ความถ่วงจำเพาะ	2.3	3.11	3.17	2.87
5. ความละเอียด (ขนาดของอนุภาค, ร้อยละผ่าน)				
- ≥ 75 ไมโครเมตร	0.95	0.5	0.75	0.68
- 75 ไมโครเมตร	6.06	5.25	8.54	6.76
- 45 ไมโครเมตร	5.5	3.6	5.1	5.0
- ≤ 36 ไมโครเมตร	87.49	90.62	85.61	90.01
6. ดัชนีกำลัง (ร้อยละเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1)				
ที่อายุ 7 วัน (ร้อยละ)	79	100	96	84
ที่อายุ 28 วัน (ร้อยละ)	77	100	94	100
7. ความต้องการปริมาณน้ำ (ร้อยละ)	103	100	100	100
8. ค่าความหนาแน่น (กก./ล.)	0.70	1.03	1.07	1.04

5.3.3 ลักษณะของอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบดำบด

เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็คตรอนที่กำลังขยาย 2000 เท่า ของเถ้าแกลบดำบดที่เวลา 4 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 5.3 พบว่าอนุภาคของเถ้าแกลบดำมีลักษณะรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม มีขนาดอนุภาคเล็กใหญ่คละกันพื้นที่ผิวขรุขระมีลักษณะเป็นโพรง ในขณะที่อนุภาคปูนซีเมนต์มีความขรุขระน้อยและไม่มีรูโพรงด้วยเหตุนี้ทำให้เถ้าแกลบสามารถกักเก็บน้ำโดยการดูดซึมน้ำเข้าไปในอนุภาคและการดูดซับน้ำเนื่องจากแรงตึงที่ผิวของอนุภาค (Pongporncharoen S., 1997) เข้าไปในอนุภาคมากกว่าปูนซีเมนต์ทำให้ความต้องการน้ำของเถ้าแกลบสูงกว่าเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์



(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าแกลบดำบด

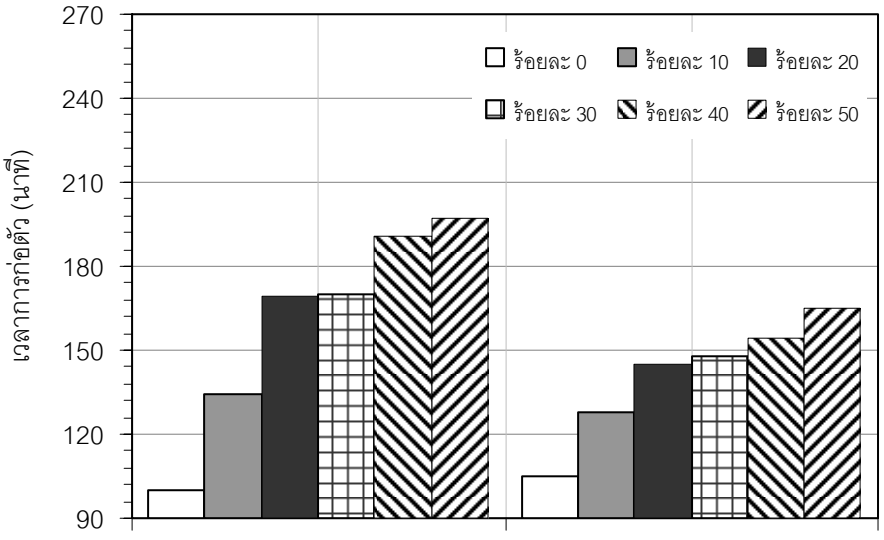
ภาพที่ 5.3 ภาพถ่ายขยายลักษณะผิวของอนุภาคเถ้าแกลบดำบดที่เวลา 4 ชั่วโมง

5.3.4 ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำบด

การทดสอบค่าปริมาณน้ำที่ทำให้เกิดการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำ ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความต้องการน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเถ้าแกลบมีลักษณะเป็นอนุภาคที่เป็นเหลี่ยม พื้นที่ผิวขรุขระเป็นโพรงและมีรูพรุนมีความสามารถในการกักเก็บน้ำ เมื่ออัตราส่วนของเถ้าแกลบดำบดเพิ่มขึ้นทำให้มีค่า การเก็บน้ำในโพรงเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำอิสระมีค่าลดลง นอกจากนั้นอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมและขรุขระของเถ้าแกลบดำบด เมื่อผสมกับปูนซีเมนต์จึงทำให้เกิดการเสียดสีของอนุภาคเถ้าแกลบดำกับอนุภาคปูนซีเมนต์มีมากขึ้น ทำให้ปริมาณน้ำที่ใช้ของเถ้าแกลบดำเพื่อทำให้ค่าการไหลแผ่เท่ากันมีค่าเพิ่มขึ้น

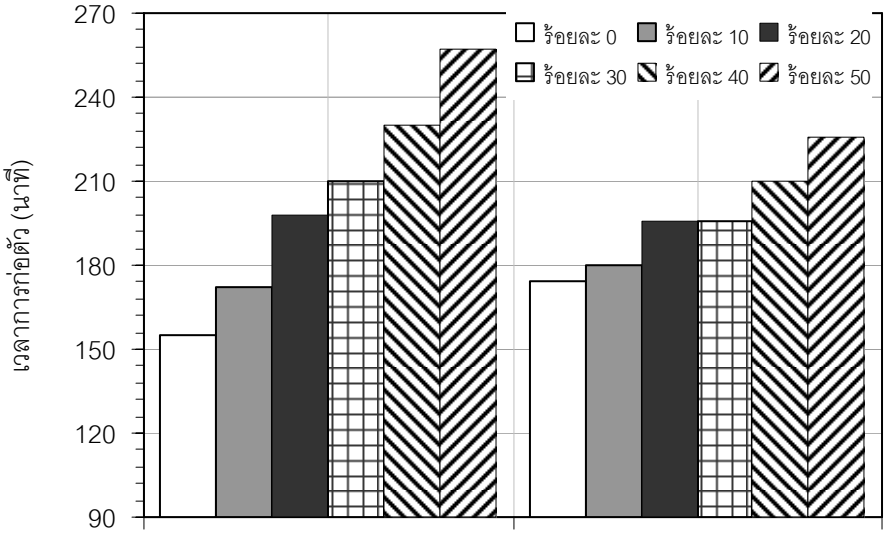
5.3.5 ระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้าย

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำ โดยควบคุมปริมาณน้ำในการผสมมอร์ต้าร์ให้มีการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5 ตามมาตรฐาน ASTM C 807 แสดงในภาพที่ 5.4 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะเวลาการก่อตัวแปรผกผันตามปริมาณของปูนซีเมนต์และแปรผันตามปริมาณน้ำ กล่าวคือ เมื่อปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้นตามอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นที่ลดลง ประกอบกับปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากการดูดซับของเถ้าแกลบทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวเพิ่มขึ้นทำให้น้ำที่ใช้ในละลายและตกผลึกของไอออนของสารประกอบหลักของปูนซีเมนต์ ต่อเนื่องไปถึงการตกผลึกของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ลดลงจึงทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น



(ก) ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น

ภาพที่ 5.4 ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าร์ที่ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5



(ข) ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย

ภาพที่ 5.4 (ต่อ) ระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ต้าร์ที่ค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5

5.4 คุณสมบัติทางกลของมอร์ต้าร์

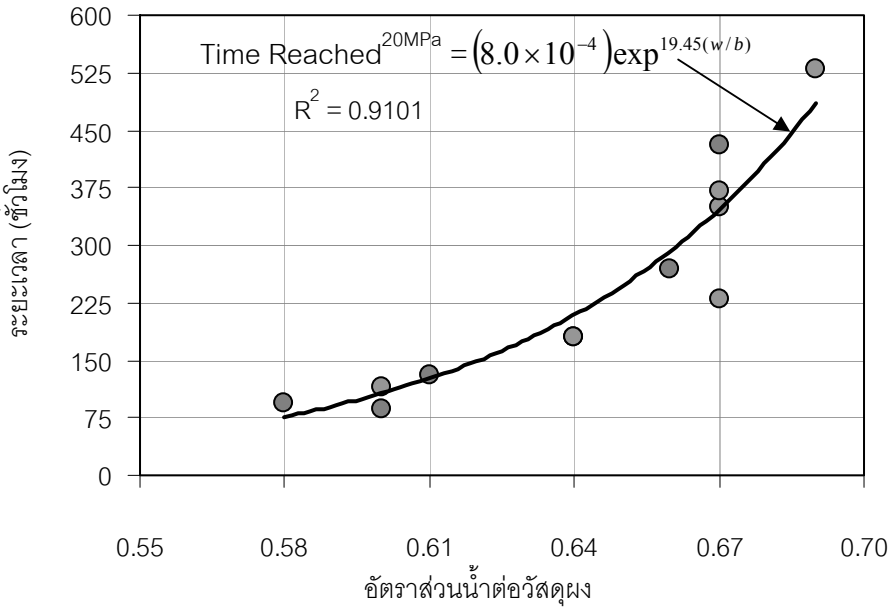
5.4.1 ระยะเวลาของการพัฒนากำลัง

จากผลการทดสอบระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มตัวอย่างในน้ำปูนใสอิ่มตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำจนมีค่ากำลังอัดในช่วง 20.0±1.0 เมกะปาสคาล พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะเวลาของการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.5 เนื่องจากการที่ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงทำให้การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชั่นลดลง ประกอบกับปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งเพื่อให้ความเข้มข้นของแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นอิ่มตัวที่ระดับหนึ่ง (Hewlett, P.C., 1998) จึงส่งผลให้การพัฒนากำลังมีค่าต่ำลงไปด้วย นอกจากนั้นจะสังเกตได้ว่ามอร์ต้าร์ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดมีอัตราการพัฒนากำลังที่ช้ากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นผลมาจากองค์ประกอบที่เป็นไตรแคลเซียมซิลิเกตที่มีผลต่อการพัฒนากำลังในช่วงต้นมีปริมาณต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 5.5
ระยะเวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัวของมอร์ต้าร์จนมีกำลังอัด 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล

ร้อยละ การแทนที่	เวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัว (ชั่วโมง)	ร้อยละ การแทนที่	เวลาบ่มในน้ำปูนใสอิ่มตัว (ชั่วโมง)
I-RHA0	95	V-RHA0	115
I-RHA10	105	V-RHA10	180
I-RHA20	130	V-RHA20	230
I-RHA30	180	V-RHA30	350
I-RHA40	270	V-RHA40	370
I-RHA50	430	V-RHA50	530

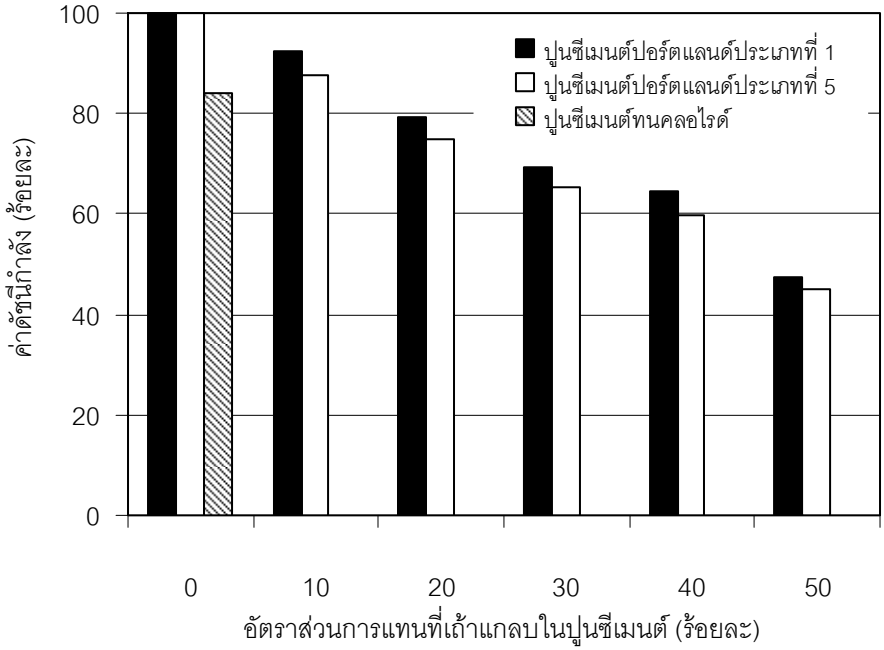
จากภาพที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์จากการวิเคราะห์ค่าความถดถอยระหว่างระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มน้ำปูนใสอิ่มตัวของมอร์ต้าร์ที่ค่ากำลังอัดเท่ากับ 20.0±1.0 เมกะปาสคาล และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) (ปูนซีเมนต์แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ) พบว่าการพัฒนากำลังของมอร์ต้าร์ปกติและเถ้าแกลบเป็นสัดส่วนเชิงเอกโพเนนเชียลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง



ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ของระยะเวลาที่ใช้ในการบ่มน้ำปูนใสอิ่มตัวของมอร์ต้าร์ที่ค่ากำลังอัดเท่ากับ 20.0 ± 1.0 เมกะปาสคาล

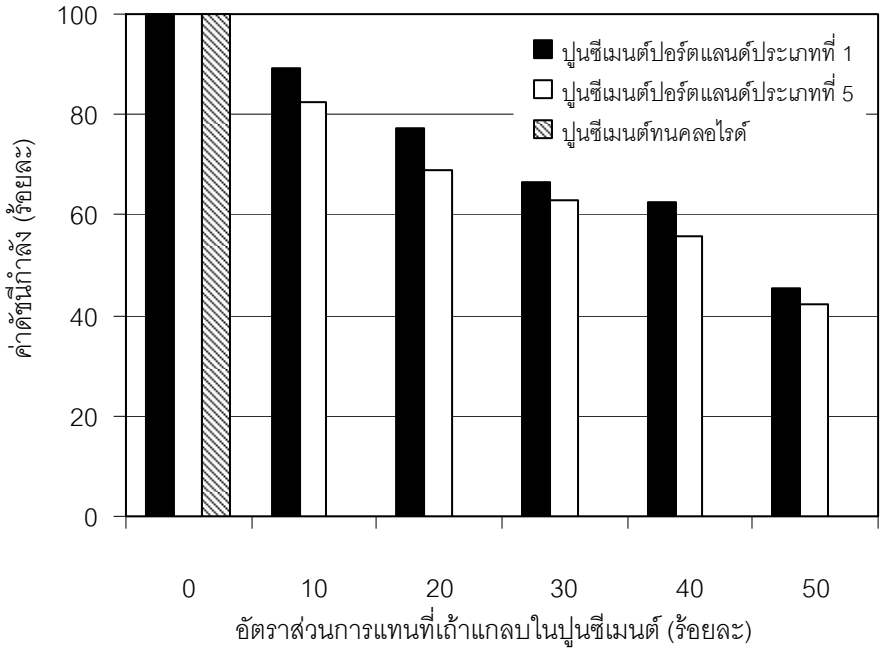
5.4.2 ดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำ

ดัชนีกำลังเป็นการทดสอบการพัฒนากำลังอัดโดยเปรียบเทียบกับตัวแปรควบคุม (มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5) โดยการแทนที่เถ้าแกลบทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง และปฏิกิริยาปอซโซลานต้องใช้เวลาที่ทำให้ความเข้มข้นของสารประกอบแคลเซียมโฮดรอกไซด์สูงถึงระดับหนึ่งจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นทำให้การพัฒนากำลังในระยะแรกมีค่าน้อยกว่าตัวแปรควบคุม จากภาพที่ 5.6 ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก เท่ากับ 100, 92.3, 79.2, 69.5, 64.7 และ 47.4 ตามลำดับ และค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักเท่ากับ 100, 87.5, 74.8, 65.2, 59.6 และ 45.2 ตามลำดับ ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 84 พบว่ากำลังอัดที่ได้มีค่าน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เนื่องจากปริมาณไดแคลเซียมซิลิเกต (C_2S) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดทนคลอไรด์มีค่าสูงทำให้เกิดกำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะหลัง



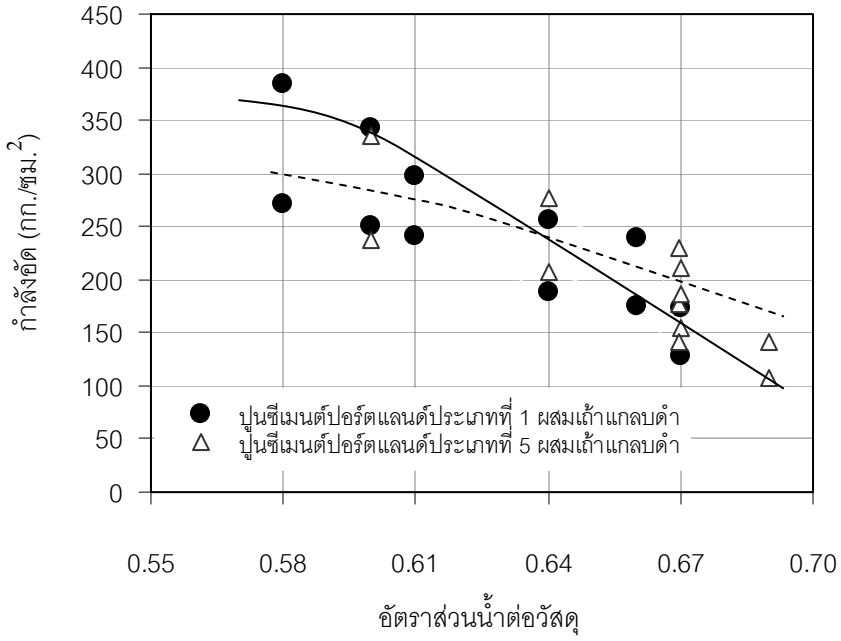
ภาพที่ 5.6 ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำบด

จากภาพที่ 5.7 ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสม เถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักเท่ากับ 100.0, 89.4, 77.4, 66.7, 62.7 และ 45.3 ตามลำดับ และค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักเท่ากับ 100.0, 82.6, 68.9, 62.8, 55.7 และ 42.1 ตามลำดับ พบว่าค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อเทียบอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก กำลังอัดที่ได้มีค่าน้อยกว่า ส่วนค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนการแทนที่ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เมื่อเทียบอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังอัดที่ได้มีค่าน้อยกว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เพิ่มขึ้นค่าดัชนีกำลังที่ได้มีค่าลดลง เนื่องจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต้องใช้แคลเซียม ไฮดรอกไซด์มีปริมาณลดลง



ภาพที่ 5.7 ค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วัน ของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำบด

ภาพที่ 5.8 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการพัฒนากำลังอัดและอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด ซึ่งพบว่า การพัฒนากำลังอัดจะแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง โดยสามารถอธิบายดังสมการที่ (5.7) และ (5.8)



ภาพที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุและกำลังอัดของมอร์ต้าร์

$$Strength_{Type\ I} = \frac{Rel.Strength^{7\,days}}{Rel.Strength^{28\,days}} = 1.25(w/b)^{0.94} \qquad (5.7)$$

$$Strength_{Type\ V} = \frac{\mathrm{Re}l.Strength^{7\,days}}{\mathrm{Re}l.Strength^{28\,days}} = 1.30(w/b)^{0.90} \qquad (5.8)$$

เมื่อกำหนดให้

Strength $_{\text{Type I}}$ = กำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, (กก./ซม.^{2})

Strength $_{\text{Type V}}$ = กำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5, (กก./ซม.^{2})

(w/b) = อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน

5.5 คุณสมบัติทางด้านความทนทานซัลเฟต

5.5.1 การขยายตัวเนื่องจากซัลเฟต

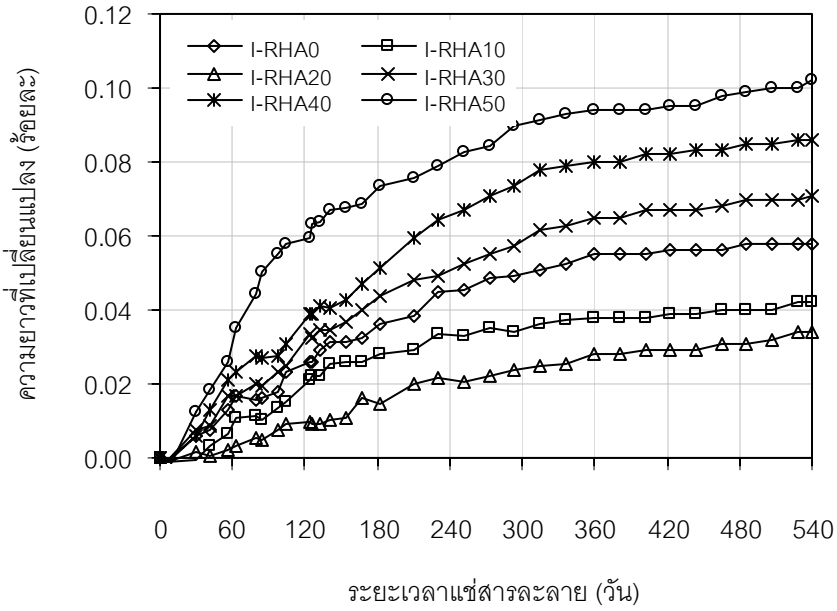
ผลการทดสอบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำบด 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนการแทนที่โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 โดยควบคุมปริมาณน้ำในการผสมมอร์ต้าร์ให้มีค่าการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5

การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต จากภาพที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ซึ่งใช้เป็นตัวเปรียบเทียบมีการขยายตัวร้อยละ 0.058 ที่อายุ 540 วัน ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.042 และ 0.034 หรือลดลงร้อยละ 27.6, 41.4 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน แต่เมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่าการขยายตัวจะสูงกว่าเมื่อเปรียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้โพรงน้ำอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อโพรงและช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้การซึมของซัลเฟตอิออนเข้าสู่ภายในง่ายขึ้นเป็นการเพิ่มการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Khatri R.P. and Sirivivatnanon V., 1997)

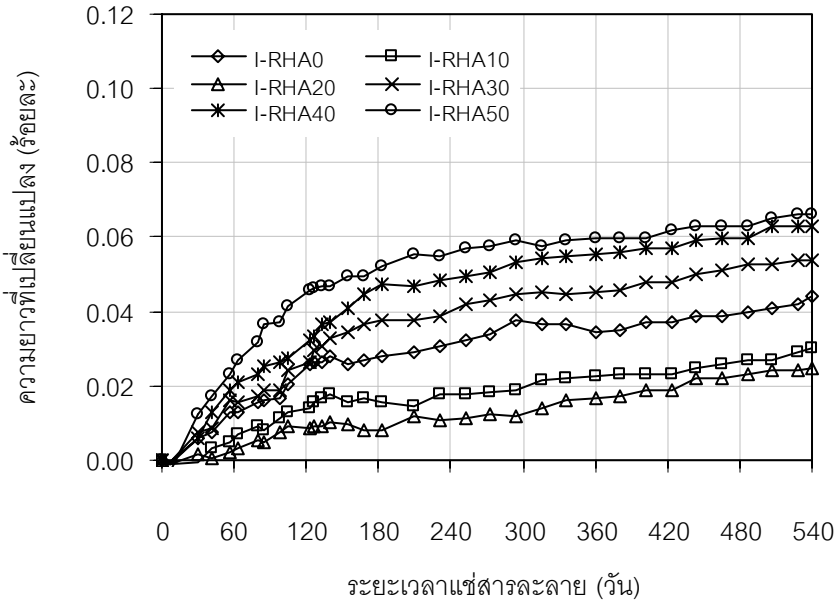
จากภาพที่ 5.10 แสดงการขยายตัวของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.044 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.030 และ 0.025 ตามลำดับ หรือลดลงร้อยละ 31.8, 43.2 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักจะมีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.054, 0.063 และ 0.066 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการขยายตัวสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้โพรงน้ำอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อโพรงและช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้การซึมของซัลเฟตอิออนเข้าสู่ภายในง่ายขึ้นเป็นการเพิ่มการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Khatri R.P. and Sirivivatnanon V., 1997)

จากภาพที่ 5.11 แสดงการขยายตัวของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.044 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.041 และ 0.029 ตามลำดับ หรือลดลงร้อยละ 22.6, 45.3 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.069, 0.076 และ 0.093 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการขยายตัวสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้โพรงน้ำอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อโพรงและช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้การซึมของซัลเฟตอิออนเข้าสู่ภายในง่ายขึ้นเป็นการเพิ่มการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Khatri R.P. and Sirivivatnanon V., 1997)

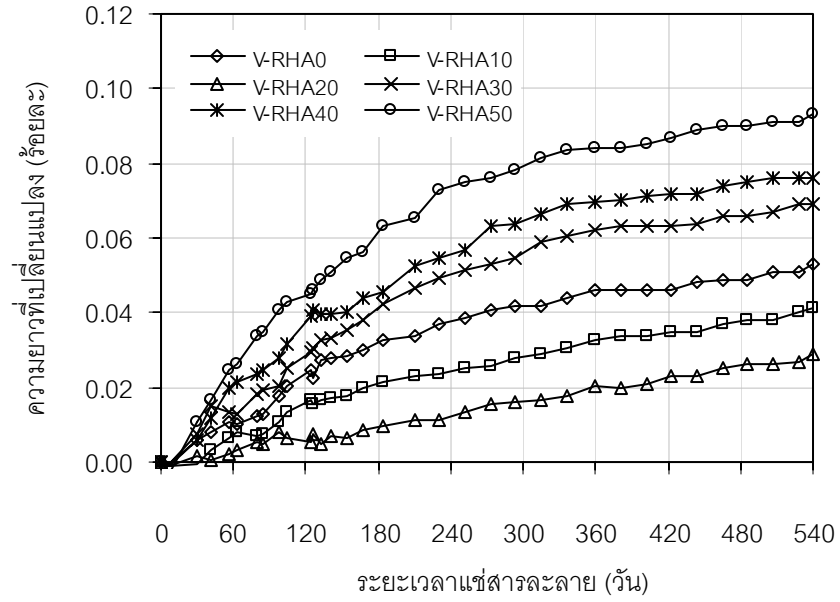
จากภาพที่ 5.12 แสดงการขยายตัวของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.035 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.025 และ 0.021 ตามลำดับ หรือลดลงร้อยละ 28.6, 40.0 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการขยายตัวร้อยละ 0.048, 0.053 และ 0.057 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการขยายตัวสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าแกลบดำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ได้ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก จะลดการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตได้



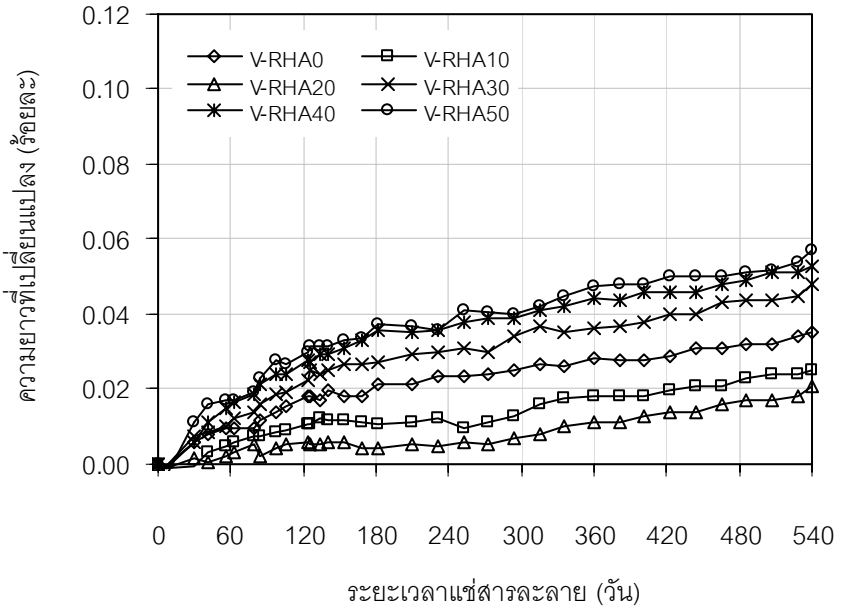
ภาพที่ 5.9 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



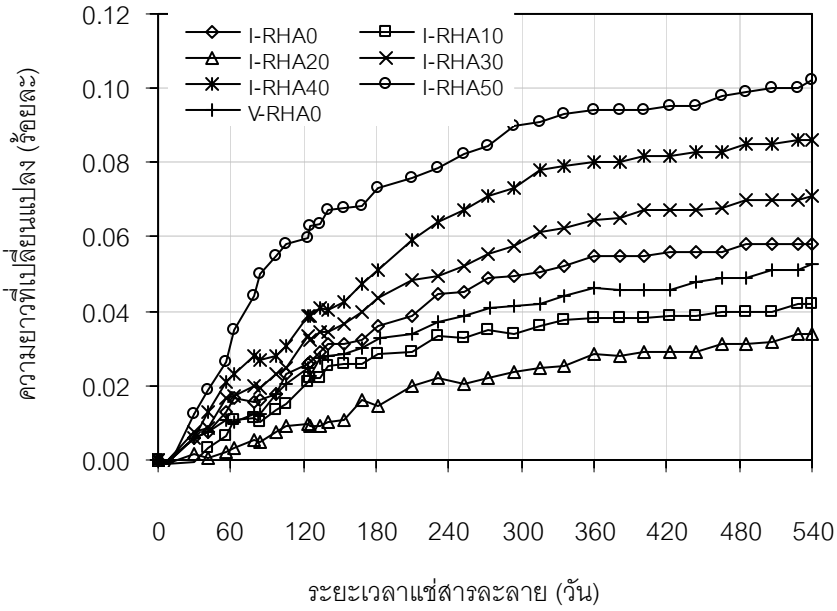
ภาพที่ 5.10 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



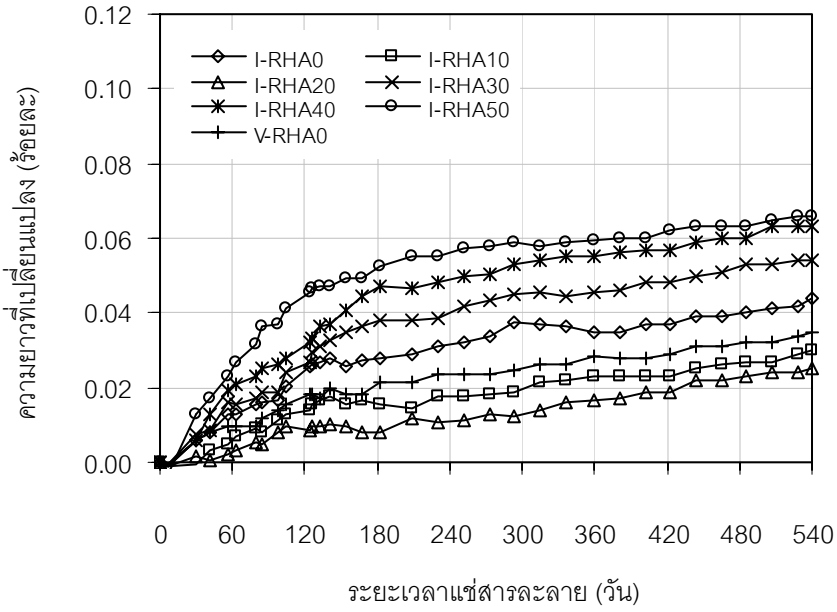
ภาพที่ 5.11 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 5.12 การขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 5.13 เปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 5.14 เปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

จากภาพที่ 5.13 และ 5.14 เมื่อเปรียบเทียบการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ที่แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30, 40 และ 50 มีการขยายตัวมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้โพรงน้ำอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อโพรงและช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้การซึมของซัลเฟตอิออนเข้าสู่ภายในง่ายขึ้นเป็นการเพิ่มการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Khatri R.P. and Sirivivatnanon V., 1997) แต่ในขณะที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการขยายตัวต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าแกลบดำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนจะลดการขยายตัวเนื่องจากโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตได้

ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบดำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนักสามารถช่วยลดการขยายตัวเนื่องจากสารละลายโซเดียมและแมกนีเซียมซัลเฟต เนื่องจากการแทนที่เถ้าแกลบดำทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นมีปริมาณลดลงส่งผลให้การเกิดของยิปซั่มและเอ็ททริงไกท์มีปริมาณลดลง การขยายตัวที่เกิดขึ้นในสารละลายโซเดียมซัลเฟตมีค่าสูงกว่าการขยายตัวที่เกิดในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านั้น (Omar S. Baghabra Al-Moudi et al, 1995)

5.5.2 การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากซัลเฟต

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำบด 4 ชั่วโมง อัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ควบคุมปริมาณน้ำในการผสมมอร์ต้าร์ให้มีค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5

จากภาพที่ 5.15 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 6.35 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่า

การสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 4.41 และ 3.38 ตามลำดับ หรือลดลงร้อยละ 30.6, 46.8 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 7.88, 9.78 และ 11.38 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

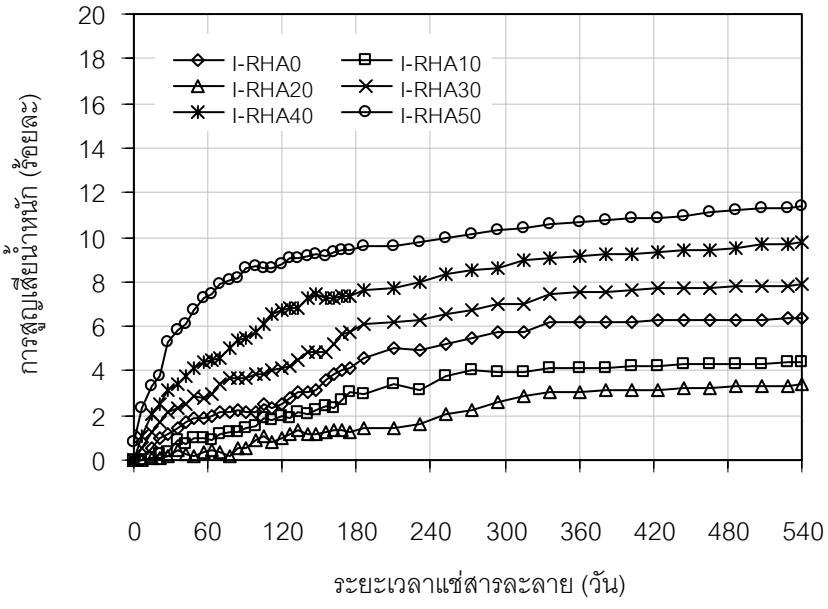
จากภาพที่ 5.16 แสดงการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 9.85 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 7.51 และ 5.49 ตามลำดับ หรือลดลงร้อยละ 23.8, 44.3 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 12.66, 13.88 และ 16.47 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เนื่องจากความพรุนของเถ้าแกลบทำให้มีความต้องการปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นทำให้โพรงน้ำอิสระที่เหลือจากปฏิกิริยามีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อโพรงและช่องว่างเพิ่มขึ้นทำให้การซึมของซัลเฟตอิออนเข้าสู่ภายในง่ายขึ้นเป็นการเพิ่มการกัดกร่อนจากซัลเฟต (Khatri R.P. and Sirivivatnanon V., 1997)

การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งแช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต จากภาพที่ 5.17 แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ซึ่งใช้เป็นตัวเปรียบเทียบมีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 6.16 ที่อายุ 540 วัน ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก มีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 4.61 และ 2.92 หรือลดลงร้อยละ 25.2, 52.6 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน แต่เมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ค่าการสูญเสียน้ำหนักจะสูงกว่าเมื่อเปรียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน เนื่องจากกลไกการสูญเสียน้ำหนักในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเกิดจากการยิปซั่มและเอ็ททริงไกท์ในสภาวะแข็งตัวของมอร์ต้าร์ (Santhanam M., 2003)

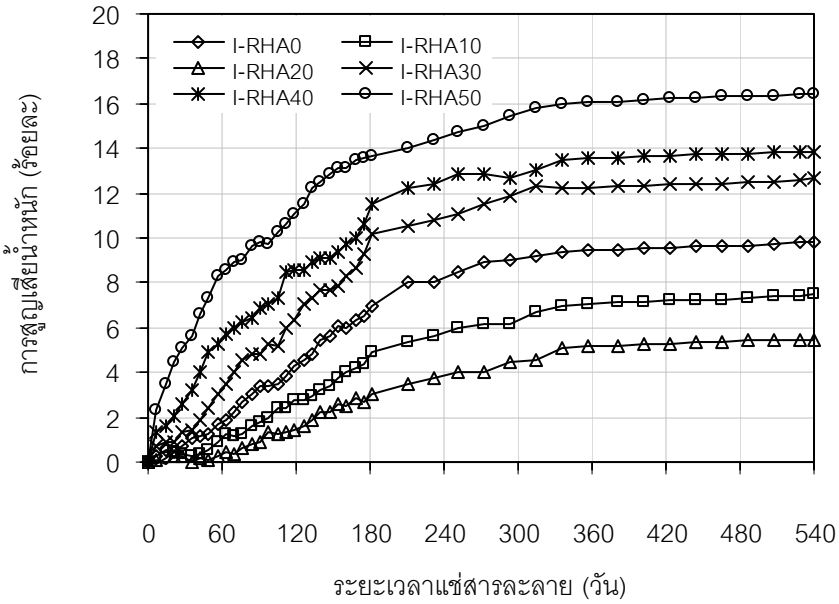
จากภาพที่ 5.18 แสดงให้เห็นว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีค่าการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 9.57 ที่อายุ 540 วัน ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 สามารถลดการสูญเสียน้ำหนักได้ร้อยละ 6.49 และ 4.99 ตามลำดับ แต่เมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดในอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 ที่อายุเดียวกันพบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มมากขึ้นที่

ร้อยละ 12.69, 14.57 และ 16.35 ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างแมกนีเซียมซัลเฟตและแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้ยิปซั่มและแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ของสารละลายลดลงทำให้เกิดความไม่เสถียรของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและเอ็ททริงไกท์เกิดการแตกตัวของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเพื่อทำให้ความเป็นกรดเป็นด่างสูงขึ้นได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และสารละลายซิลิคอน การลดลงของปริมาณแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์นั้นมาจากการที่แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับสารละลายซิลิคอนได้แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งไม่มีความสามารถในการเชื่อมประสาน การกัดกร่อนดังกล่าวทำให้เกิดการอ่อนตัวและเสื่อมสภาพของผิวซีเมนต์ที่แข็งตัว (Hekal E.E., al et., 2002)

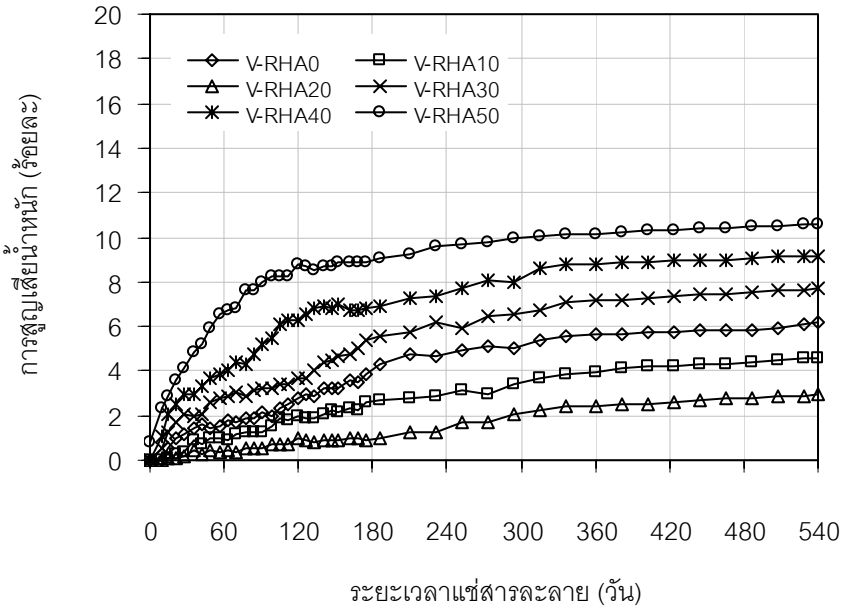
จากภาพที่ 5.19 และ 5.20 พิจารณาได้ว่าการสูญเสียน้ำหนักมอร์ต้าร์แทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 10 และ 20 มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ยกเว้นในมอร์ต้าร์ที่แทนที่เถ้าแกลบด้วยอัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปูนซีเมนต์ได้บางส่วน เพื่อลดการสูญเสียน้ำหนักจากสารละลายซัลเฟต



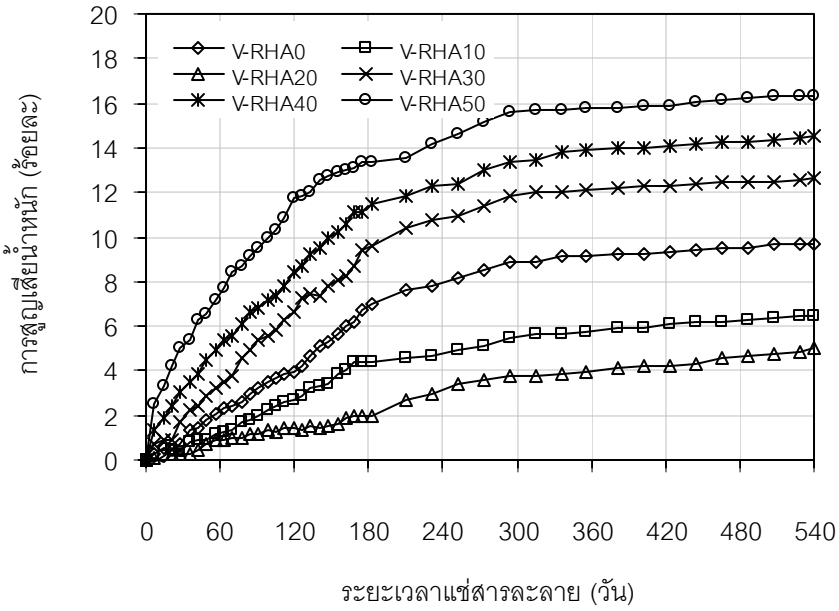
ภาพที่ 5.15 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



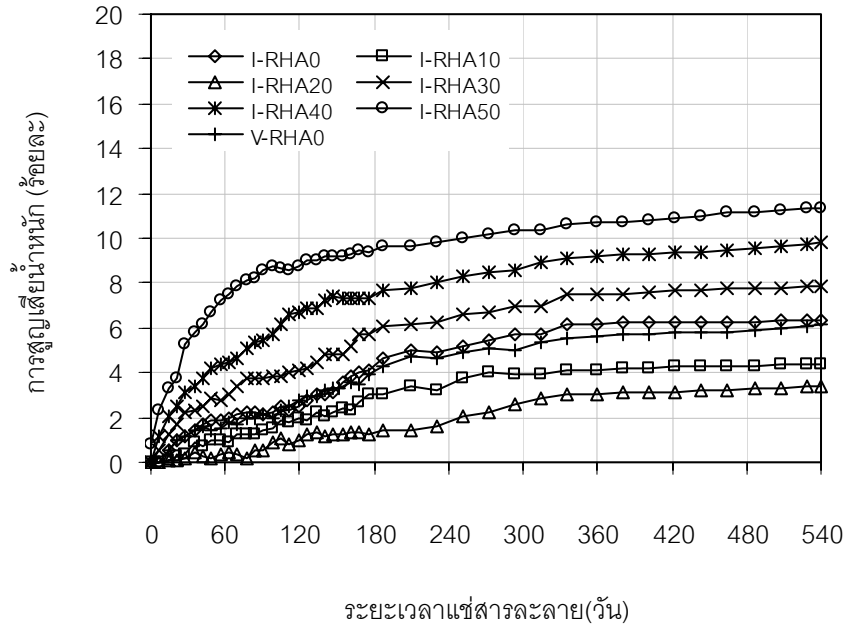
ภาพที่ 5.16 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



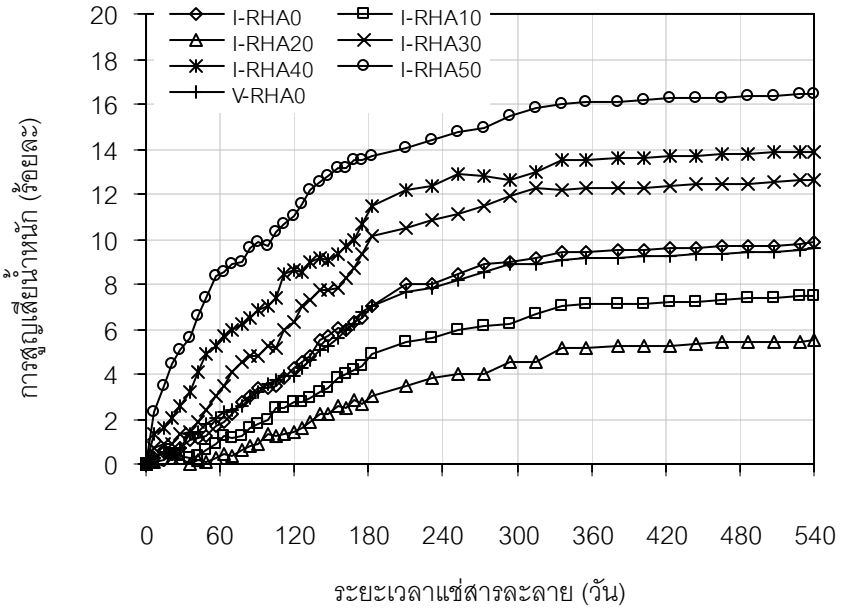
ภาพที่ 5.17 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 5.18 การสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



ภาพที่ 5.19 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 5.20 เปรียบเทียบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

5.5.3 การสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากซัลเฟต

ผลการทดสอบการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำบด 4 ชั่วโมง ที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ตามลำดับ แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ควบคุมปริมาณน้ำในการผสมมอร์ต้าร์ให้มีค่าการไหลแผ่ร้อยละ 110 ± 5

จากภาพที่ 5.21 แสดงการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 32.4 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก สามารถลดการสูญเสียกำลังอัดเหลือเพียงร้อยละ 27.2 และ 21.1 ตามลำดับ และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 40.6, 45.4 และ 51.2 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน

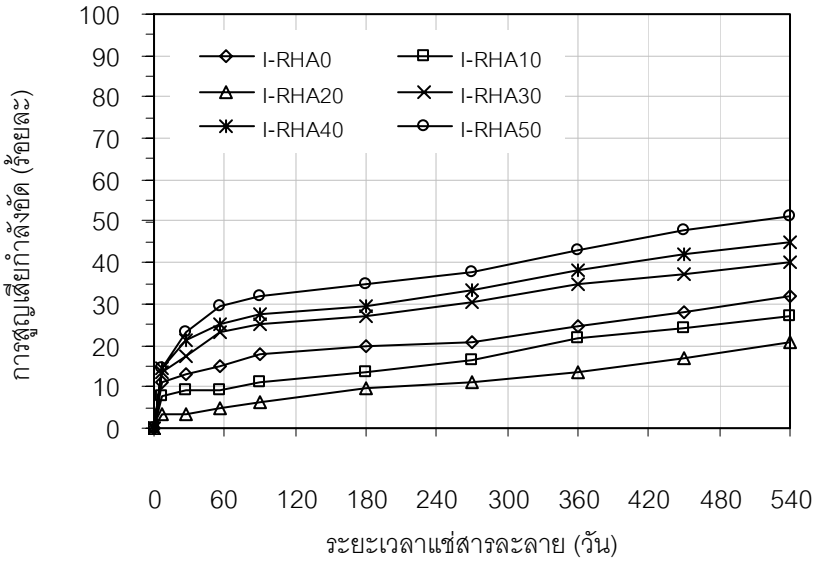
จากภาพที่ 5.22 แสดงการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน มีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 65.2 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก สามารถลดการสูญเสียกำลังอัดเหลือเพียงร้อยละ 43.3 และ 40.9 ตามลำดับ และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 59.4, 63.1 และ 70.4 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน เมื่อเปรียบเทียบมอร์ต้าร์ซึ่งแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมีอัตราการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ต้าร์แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟตตั้งแต่อายุเริ่มต้น ทั้งนี้เนื่องจากการที่แมกนีเซียมซัลเฟตละลายน้ำได้ดีกว่าโซเดียมซัลเฟตจึงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีกว่า ประกอบทั้งปฏิกิริยาที่เกิดระหว่างสารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมซัลเฟตจะเปลี่ยนโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ไม่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสานจึงมีผลทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลง (Omar S. Baghabra Al-Moudi, 1995)

จากภาพที่ 5.23 แสดงการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 30.1 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก สามารถลดการสูญเสียกำลังอัดเหลือเพียงร้อยละ 25.4 และ 20.3 ตามลำดับ และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 39.4, 41.5 และ 44.3 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบดำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

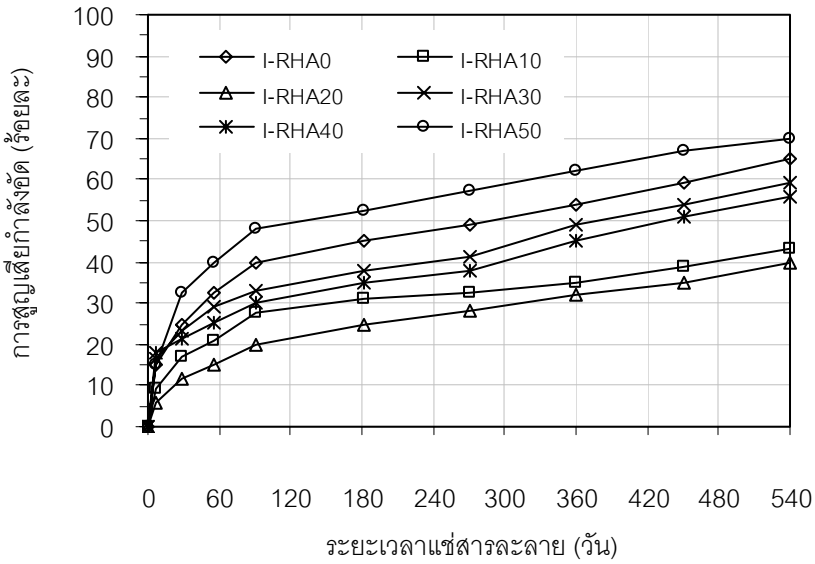
จากภาพที่ 5.24 แสดงการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์โดยใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าที่อายุ 540 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน มีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 28.1 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก สามารถลดการสูญเสียกำลังอัดเหลือเพียงร้อยละ 31.0 และ 24.4 ตามลำดับ และเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก จะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดร้อยละ 43.1,

51.2 และ 55.5 ตามลำดับ ซึ่งจะมีค่าการสูญเสียกำลังอัดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ล้วน ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบดำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนสามารถช่วยลดการสูญเสียกำลังอัดเนื่องจากสารละลายโซเดียมซัลเฟต

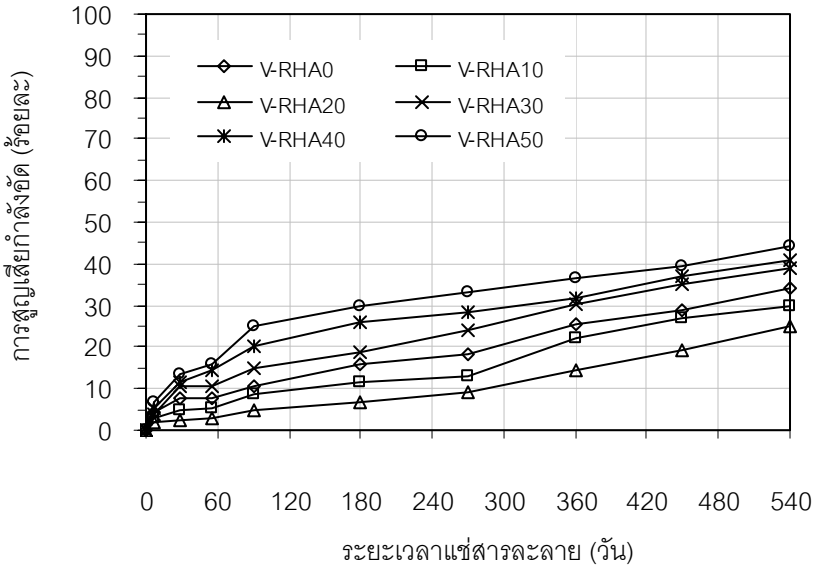
กลไกการสูญเสียกำลังอัดในสารละลายโซเดียมซัลเฟตเกิดจากการขยายตัวของยิปซั่มและเอ็ททริงไกท์ที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นจากเดิม เมื่อแรงต้านแรงดึงน้อยกว่าแรงดึงที่เกิดจากการขยายตัวทำให้เกิดการแตกร้าว เกิดความไม่ต่อเนื่องของพื้นที่ผิวทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง ในส่วนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตการเปลี่ยนโครงสร้างสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตเกิดการสลายตัวแล้วเปลี่ยนไปเป็นแมกนีเซียมอิออนแทน ทำให้สารประกอบอัลคาไลน์แมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตในที่สุดซึ่งสารประกอบดังกล่าวไม่มีความสามารถการเชื่อมประสานทำให้เกิดการกร่อนของพื้นที่ผิวรับแรงเมื่อพื้นที่ผิวมีปริมาณลดลงทำให้ความสามารถรับกำลังอัดลดลง (Gollop R.S., and Taylor H.F.W., 1995)



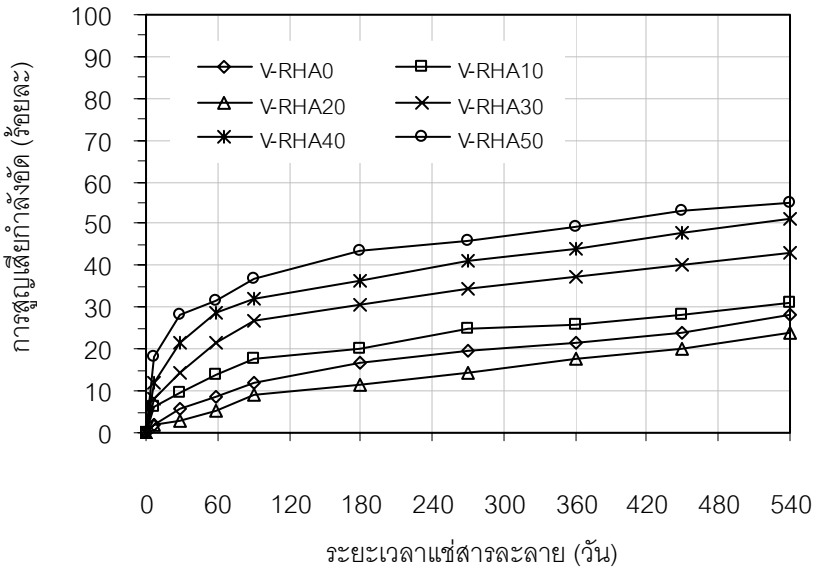
ภาพที่ 5.21 อัตราการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



ภาพที่ 5.22 อัตราการสูญเสียกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต



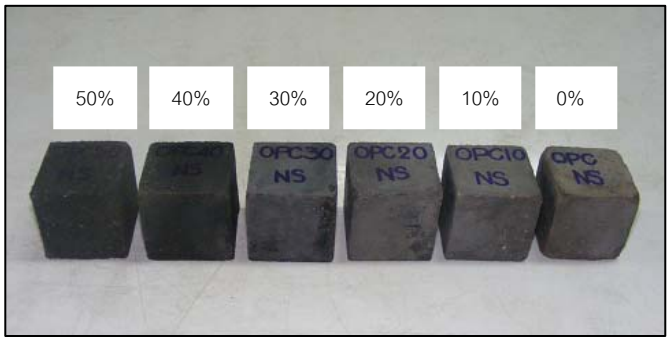
ภาพที่ 5.23 อัตราการสูญเสียกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายโซเดียมซัลเฟต



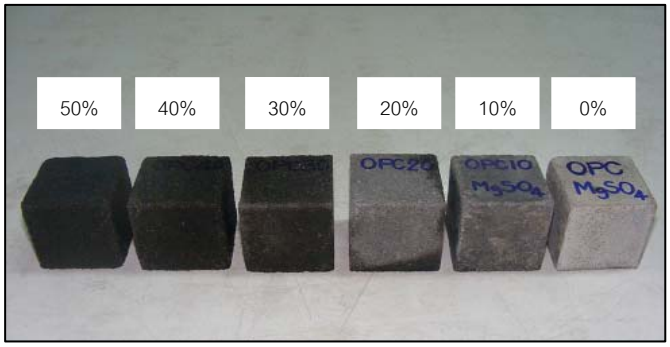
ภาพที่ 5.24 อัตราการสูญเสียกำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด แช่สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

เมื่อเปรียบเทียบการสูญเสียกำลังอัดของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีค่าอัตราการสูญเสียกำลังอัดมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ล้วน โดยปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบดำบดในปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้นทำให้การสูญเสียกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานต้องใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิคอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งปกติในโพรงจะมีแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) และไฮดรอกไซด์ (OH^-) ละลายอยู่ เมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปในระยะยาวไอออนทั้งสองชนิดมีปริมาณลดลงระบบจึงพยายามรักษาสมดุลโดยเหนี่ยวนำให้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ละลายจากภายในโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตออกมาเพื่อทำปฏิกิริยา จากผลดังกล่าวทำให้โครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตมีความไม่เสถียรจึงทำให้ไอออนของแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งมีความสามารถในการแทนที่แคลเซียมไอออนของโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้สูงมากและมีบทบาทมากขึ้น ผลที่ตามมา คือโครงสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตถูกเปลี่ยนเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตทำให้กำลังของมอร์ต้าร์ลดลงมาก (Bebdsted J. and Barnes P., 2002) ในขณะเมื่อพิจารณาในกรณีของการกระทำของโซเดียมซัลเฟต ข้อสังเกตประการหนึ่งที่สำคัญคือ โซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งมีวาเลนต์อิเล็กตรอน (จำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดของโครงสร้างอะตอม โดยอะตอมของโซเดียมมี

ค่า +1 ในขณะที่อะตอมของแมกนีเซียมมีค่า +2 (Mg^{2+})) ไม่เท่ากับแคลเซียม (จำนวนวาเลนต์อิเล็กตรอนเท่ากับ +2 (Ca^{2+})) ดังนั้นความสามารถในการแทนที่ในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต จึงต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแมกนีเซียมไอออน เมื่อโครงสร้างดังกล่าวเปลี่ยนไปเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรตซึ่งมีความสามารถในการยึดประสานต่ำจึงทำให้กำลังอัดลดลงตามไปด้วย (Cohen M. D. and Benter A., 1998) ดังนั้นการใช้เถ้าแกลบดำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนมีผลต่อการสูญเสียกำลังอัดโดยในสารละลายโซเดียมซัลเฟตการใช้เถ้าแกลบดำบดแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนทำให้ค่าการสูญเสียกำลังอัดมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามการสูญเสียกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

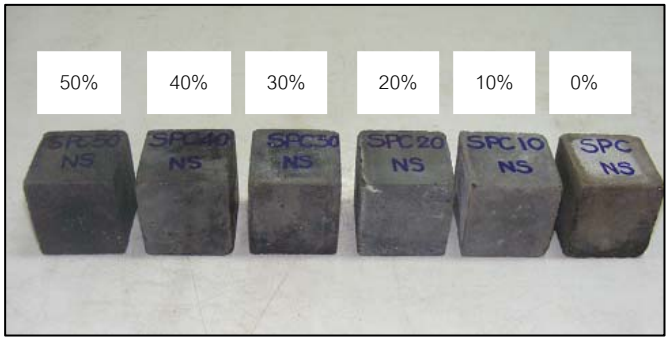


(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต

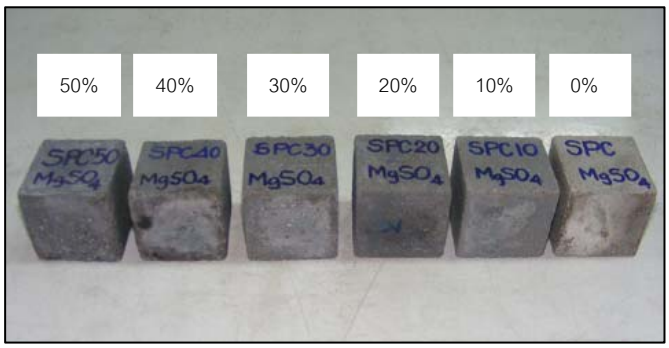


(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 5.25 มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด



(ก) แช่ในสารละลายโซเดียมซัลเฟต



(ข) แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต

ภาพที่ 5.26 มอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด

5.6 การประเมินศักยภาพระดับความทนทานต่อซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C 1157

เมื่อเปรียบเทียบระดับความทนทานต่อการกระทำของสารละลายโซเดียมซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C 1157 โดยการประเมินค่าการขยายตัวที่อายุ 6 เดือน ซึ่งกำหนดระดับของความทนทานปานกลางไม่เกินร้อยละ 0.10 และระดับของความทนทานสูงไม่เกินร้อยละ 0.05 พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.10 ซึ่งเป็นระดับความทนทานซัลเฟตปานกลาง ส่วนระดับความทนทานสูงไม่เกินร้อยละ 0.05 พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการขยายตัวใกล้เคียงและไม่เกิน 0.05 ซึ่งเป็นระดับความทนทานสูง ส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.05

ในส่วนของการประเมินค่าการขยายตัวที่อายุ 1 ปี ซึ่งกำหนดระดับความทนทานสูงไม่เกินร้อยละ 0.10 พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบดำในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการขยายตัวไม่เกินร้อยละ 0.10

ตารางที่ 5.6

การประเมินศักยภาพระดับความทนทานต่อซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C 1157

ชั้นของความทนทาน ต่อการกระทำของซัลเฟต			ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ (ร้อยละ)		
			6 เดือน	12 เดือน	
ปานกลาง			0.10	-	
สูง			0.05	0.10	
ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ (ร้อยละ) ที่ระดับชั้นของความทนทานต่อการกระทำของซัลเฟต					
มอร์ต้าร์ที่ทำจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1			มอร์ต้าร์ที่ทำจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5		
ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ (โดยน้ำหนัก)	6 เดือน	12 เดือน	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ (โดยน้ำหนัก)	6 เดือน	12 เดือน
0	0.036	0.055	0	0.033	0.046
10	0.028	0.038	10	0.021	0.033
20	0.015	0.028	20	0.010	0.020
30	0.044	0.065	30	0.042	0.062
40	0.051	0.080	40	0.046	0.070
50	0.073	0.094	50	0.063	0.084

ตารางที่ 5.6 (ต่อ)

การประเมินศักยภาพระดับความทนทานต่อซัลเฟตตามมาตรฐาน ASTM C 1157

ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ (ร้อยละ) ที่ระดับชั้นของความทนทานต่อการกระทำของซัลเฟต ปานกลาง					
มอร์ต้าร์ที่ทำจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1			มอร์ต้าร์ที่ทำจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5		
ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ (โดยน้ำหนัก)	6 เดือน	12 เดือน	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ (โดยน้ำหนัก)	6 เดือน	12 เดือน
0	ผ่าน	-	0	ผ่าน	-
10	ผ่าน	-	10	ผ่าน	-
20	ผ่าน	-	20	ผ่าน	-
30	ผ่าน	-	30	ผ่าน	-
40	ผ่าน	-	40	ผ่าน	-
50	ผ่าน	-	50	ผ่าน	-
ค่าการขยายตัวของมอร์ต้าร์ (ร้อยละ) ที่ระดับชั้นของความทนทานต่อการกระทำของซัลเฟต สูง					
มอร์ต้าร์ที่ทำจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1			มอร์ต้าร์ที่ทำจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5		
ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ (โดยน้ำหนัก)	6 เดือน	12 เดือน	ร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบ (โดยน้ำหนัก)	6 เดือน	12 เดือน
0	ผ่าน	ผ่าน	0	ผ่าน	ผ่าน
10	ผ่าน	ผ่าน	10	ผ่าน	ผ่าน
20	ผ่าน	ผ่าน	20	ผ่าน	ผ่าน
30	ผ่าน	ผ่าน	30	ผ่าน	ผ่าน
40	ไม่ผ่าน	ผ่าน	40	ผ่าน	ผ่าน
50	ไม่ผ่าน	ผ่าน	50	ไม่ผ่าน	ผ่าน

5.7 คุณสมบัติทางด้านความทนทานคลอไรด์

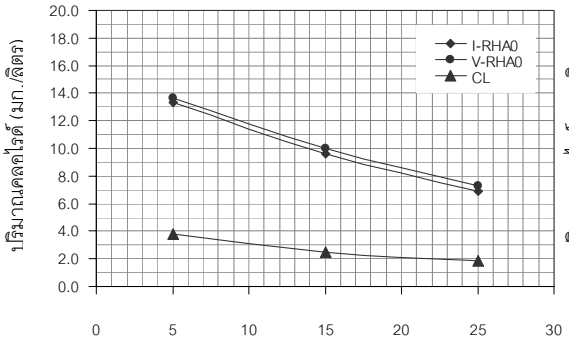
ในหัวข้อนี้เป็นการนำเสนอผลการทดสอบหาปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ที่ผสมและไม่ผสมเถ้าแกลบดำบดด้วยอัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งทำการแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภททนคลอไรด์ ปริมาณคลอไรด์ที่ได้จากการวิเคราะห์นี้เป็นคลอไรด์อิสระ (Free Chloride) ซึ่งสามารถซึมผ่านเข้าไปในเนื้อมอร์ต้าร์ได้โดยไม่ถูกจับยึดทั้งทางกายภาพและเคมี ปริมาณคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ที่อายุ 28, 90 และ 180 วัน เมื่อเวลาการบ่มนานขึ้นปริมาณการซึมผ่านคลอไรด์มีมากขึ้นในทุกอัตราส่วน แต่จะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

5.7.1 ผลกระทบจากระดับความลึกจากผิวหน้า

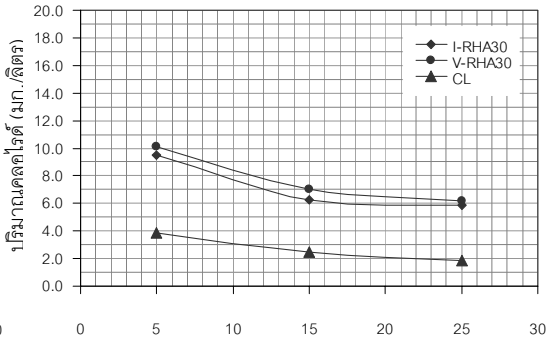
5.7.1.1 ปริมาณคลอไรด์ที่อายุ 28 วัน

จากภาพที่ 5.27 (ก) เมื่อพิจารณาปริมาณของคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์ทุกระดับความลึกสูงกว่ามอร์ต้าร์ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 2.50 มก./ลิตร ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 9.64 มก./ลิตร และ 10.03 มก./ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ทำให้มีความสามารถในการดูดซับคลอไรด์ได้มากขึ้น (Neville, A.M., 1995)

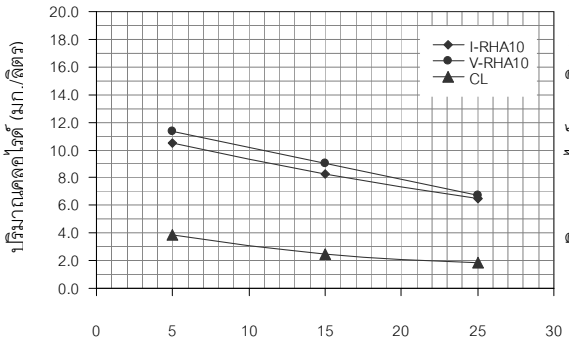
จากภาพที่ 5.27 (ข) เมื่อพิจารณาปริมาณของคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดมีปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ทุกระดับความลึกสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 2.50 มก./ลิตร ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 8.25 มก./ลิตร และ 9.00 มก./ลิตร ตามลำดับ



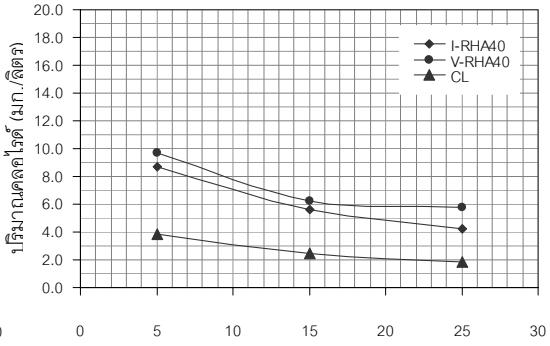
(ก) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



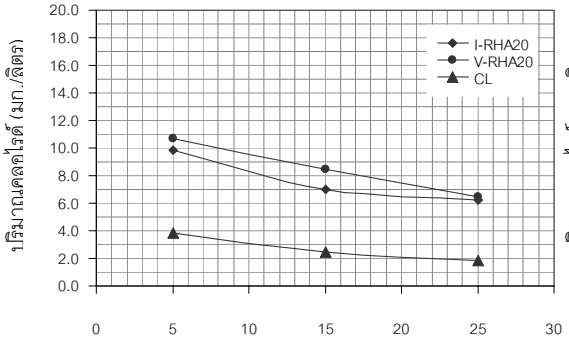
(ง) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



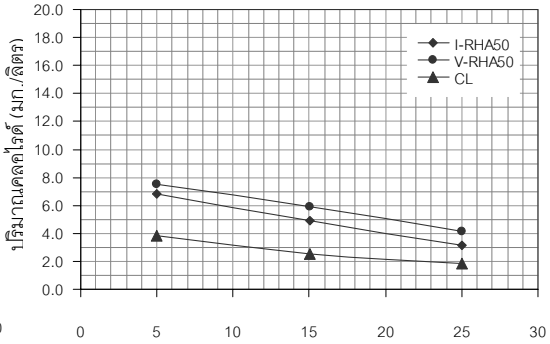
(ข) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



(จ) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



(ค) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



(ฉ) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 5.27 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ ที่อายุ 28 วัน

จากภาพที่ 5.27 (ค) เมื่อพิจารณาปริมาณของคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด มีปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ทุกระดับความลึกสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 2.50 มก./ลิตร ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 7.00 มก./ลิตร และ 8.50 มก./ลิตร ตามลำดับ

จากภาพที่ 5.27 (ง) เมื่อพิจารณาปริมาณของคลอไรด์ที่ซึมผ่านในมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดอัตราส่วนร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด มีปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปในมอร์ต้าร์ทุกระดับความลึกสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 2.50 มก./ลิตร ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 6.25 มก./ลิตร และ 7.00 มก./ลิตร ตามลำดับ

จากภาพที่ 5.27 (จ) - (ฉ) เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในมอร์ต้าร์ที่ทุกระดับความลึกมีปริมาณมากกว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 และ C_3A มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ (Rasheeduzzafar, P., et al., 1991) เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดมีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 5.62, 6.25, 5.37 และ 5.25 มก./ลิตร ซึ่งจะสังเกตได้ว่าปริมาณคลอไรด์มีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำบดมากขึ้น ดังนั้นระดับความลึกที่ใช้ในการพิจารณาก็มีผลที่ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของปริมาณคลอไรด์ได้แตกต่างกัน

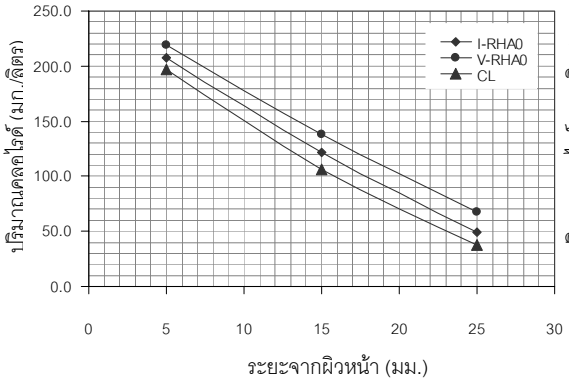
5.7.1.2 ปริมาณคลอไรด์ที่อายุ 90 วัน (แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์)

จากภาพที่ 5.28 (ก) เมื่อพิจารณาปริมาณของคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดและปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ทุกระดับความลึกสูง

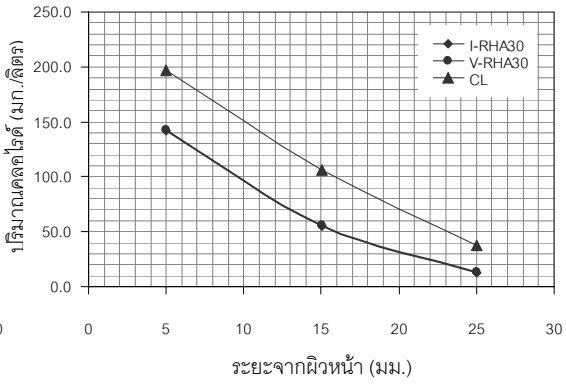
กว่ามอร์ต้าร์ซึ่ง ทำจากปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 106.59 มก./ลิตร ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 121.94 มก./ลิตร และ 138.00 มก./ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ทำให้มีความสามารถในการเก็บกักคลอไรด์ได้มากขึ้น (Neville, A.M., 1995)

จากภาพที่ 5.28 (ข) เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ ทุกระดับความลึก พบว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณคลอไรด์น้อยกว่ามอร์ต้าร์ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ปริมาณคลอไรด์อในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดมีค่าเท่ากับ 78.35 มก./ลิตร ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดและปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 95.00 มก./ลิตร และ 106.59 มก./ลิตร ตามลำดับ และที่ระดับความลึกมากขึ้นมีแนวโน้มค่อนข้างชัดเจนว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วย เถ้าแกลบดำบดในปริมาณที่มากขึ้นให้ผลในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ดีขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นผลให้มอร์ต้าร์มีการซึมผ่านน้ำต่ำและสามารถลดการ ซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (Thomas M.D.A., 2007)

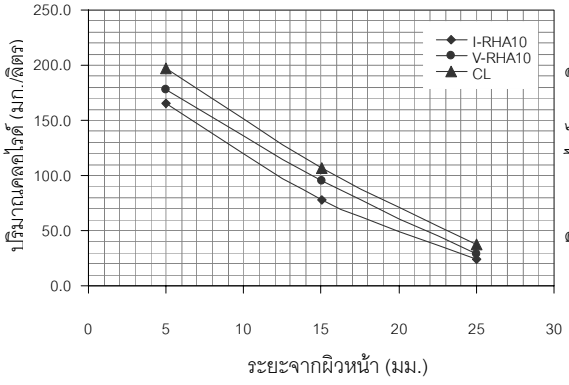
จากภาพที่ 5.28 (ค) ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. จะเห็นว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์อิสระที่น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ โดยปริมาณคลอไรด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 151.62, 64.50 และ 13.50 มก./ลิตร ตามลำดับ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 160.96, 67.48 และ 14.40 มก./ลิตร ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 197.00, 106.59 และ 37.83 มก./ลิตร ตามลำดับ



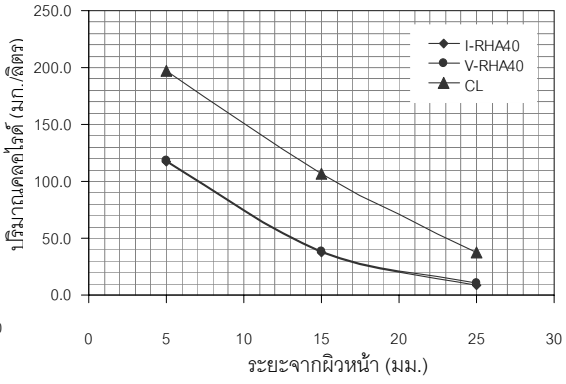
(ก) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



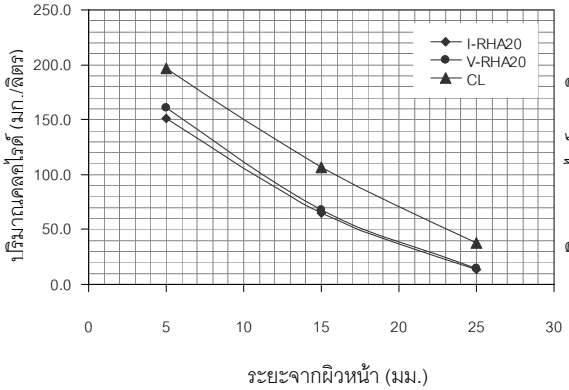
(ง) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



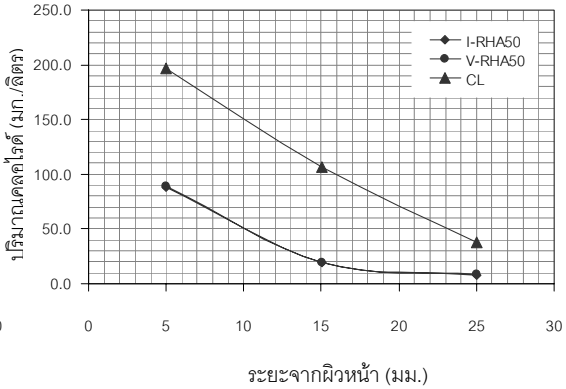
(ข) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



(จ) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



(ค) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



(ฉ) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

ภาพที่ 5.28 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุ 90 วัน
(แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์)

จากภาพที่ 5.28 (ง) – (ฉ) เมื่อพิจารณาปริมาณของคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ที่ทุกระดับความลึกมีปริมาณน้อยกว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ โดยพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นคลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปจะมีค่าน้อยลง เช่น เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกจากผิวหน้า 15 มม. ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 54.73, 37.24 และ 19.37 มก./ลิตร ตามลำดับ และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 55.50, 38.92 และ 19.37 มก./ลิตร ตามลำดับ ดังนั้นมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบดำบดมีความสามารถในการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เจลไปแทรกในช่องว่างของโพรง ซึ่งทำให้อัตราส่วนของความพรุนต่อซีเมนต์เพสต์ลดลง และมอร์ต้าร์มีความหนาแน่นขึ้นทำให้การซึมผ่านลดลง (Naik T.R. and Singh S.S., 1994)

5.7.1.3 ปริมาณคลอไรด์ที่อายุ 180 วัน (แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์)

จากภาพที่ 5.29 (ก) เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ซึ่งทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์ทุกระดับความลึกสูงกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึกจากผิวหน้า 15 มม. ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 615.10 มก./ลิตร ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 688.97 มก./ลิตร และ 714.95 มก./ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากในปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) และเตตระแคลเซียมอะลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C_4AF) ที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ทำให้ความสามารถในการต้านทานการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ดี (Neville, A.M., 1995)

จากภาพที่ 5.29 (ข) เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ ทุกระดับความลึก พบว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณคลอไรด์น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ปริมาณคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดมีค่าเท่ากับ 581.79 มก./ลิตร หรือเทียบ

เป็นร้อยละกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์แล้วมีปริมาณคลอไรด์ลดลงร้อยละ 5.4 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 591.79 มก./ลิตร หรือลดลงร้อยละ 3.8 ซึ่งจะเห็นว่าการแทนที่เถ้าแกลบดำบดทำให้ความสามารถในการจับยึดคลอไรด์ (Chloride Binding Capacity) ของมอร์ต้าร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากคลอไรด์บางส่วนจะถูกจับยึดทางกายภาพ (Physical Binding) จากแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และการจับยึดทางเคมี (Chemical Binding) ในรูปของ Friedel's salt ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$) (Yuan, Q., et al., 2008) แสดงดังภาพที่ 3.1

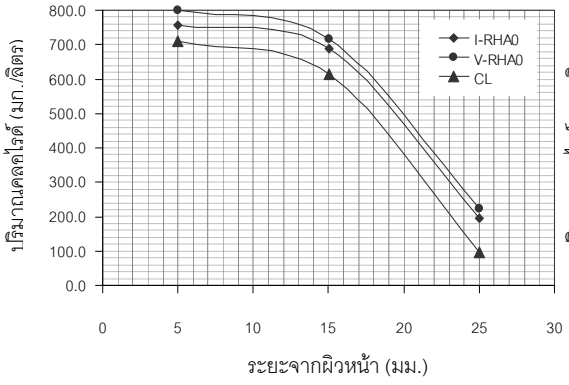
จากภาพที่ 5.29 (ค) ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 20 โดยน้ำหนักในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 พบว่าเมื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอไรด์ในมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. จะเห็นว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีปริมาณคลอไรด์ที่น้อยกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ โดยปริมาณคลอไรด์ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ 577.00, 411.10 และ 91.64 มก./ลิตร ตามลำดับ มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 617.00, 459.00 และ 99.92 มก./ลิตร ตามลำดับ เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) เจลไปแทรกในช่องว่างของโพรง ซึ่งทำให้อัตราส่วนของความพรุนต่อซีเมนต์เพสต์ลดลง และมอร์ต้าร์มีความหนาแน่นขึ้นทำให้การซึมผ่านลดลง (Naik T.R. and Singh S.S., 1994)

จากภาพที่ 5.29 (ง) เมื่อพิจารณาปริมาณสารประกอบคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ ทุกระดับความลึก พบว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณคลอไรด์ที่น้อยกว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ เช่น ที่ระดับความลึก 15 มม. ปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดมีค่าเท่ากับ 309.64 มก./ลิตร หรือเทียบเป็นร้อยละกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์แล้วมีปริมาณคลอไรด์ลดลงร้อยละ 49.7 ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 324.06 มก./ลิตร หรือลดลงร้อยละ 47.3

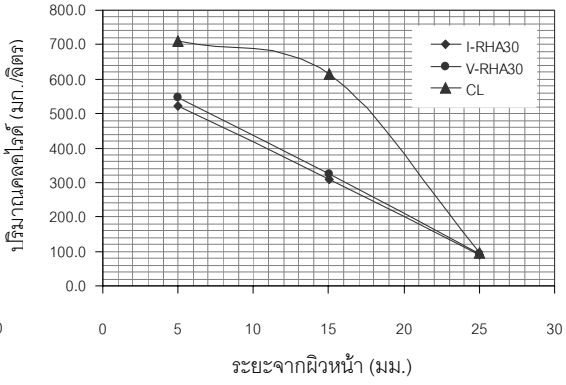
ซึ่งปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อมอร์ต้าร์เป็นผลรวมของคลอไรด์ที่ถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไฮเดรชั่น และที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปในรูปของแคลเซียมคลอโรอะลูมิเนตไฮเดรต (Calcium chloroaluminate hydrate) หรือ (Friedel's salt) และในส่วนของคลอไรด์อิสระ (Free chloride) ที่ละลายอยู่ในโพรงของมอร์ต้าร์ซึ่งสามารถแพร่เข้าไปยังมอร์ต้าร์ที่มีความเข้มข้น

ของคลอไรด์ที่ต่ำกว่า และเป็นส่วนที่ทำให้ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ลดลง (Ramachandran, VS., 1971)

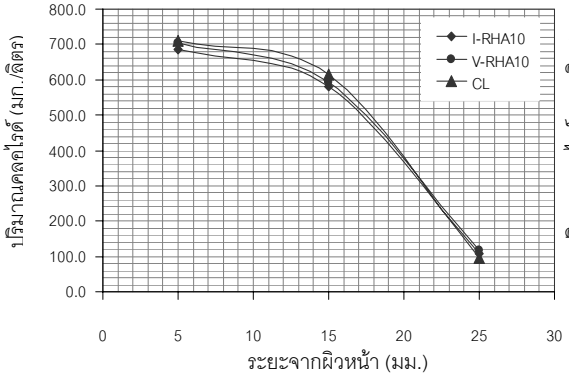
จากภาพที่ 5.29 (จ) – (ฉ) เมื่อพิจารณาปริมาณของคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด พบว่าเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมเข้าไปในมอร์ต้าร์ที่ทุกระดับความลึกมีปริมาณน้อยกว่ามอร์ต้าร์ของปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ โดยพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดในปริมาณที่เพิ่มขึ้น คลอไรด์ที่ซึมผ่านเข้าไปจะมีค่าน้อยลง เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นผลให้มอร์ต้าร์มีการซึมผ่านน้ำต่ำและสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (Thomas M.D.A., 2007) เมื่อพิจารณาที่ระดับความลึกจากผิว 15 มม. ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 258.00 และ 163.63 มก./ลิตร ตามลำดับ หรือเทียบเป็นร้อยละกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์ลดลงร้อยละ 58.1 และ 73.4 ตามลำดับ และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 260.00 และ 167.98 มก./ลิตร ตามลำดับ และเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์มีปริมาณคลอไรด์ลดลงร้อยละ 57.7 และ 72.7 ตามลำดับ



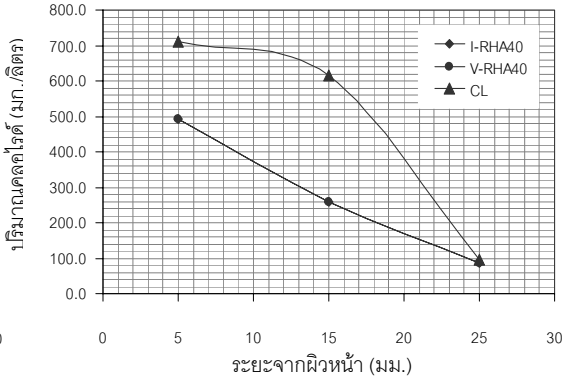
(ก) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 0 โดยน้ำหนัก



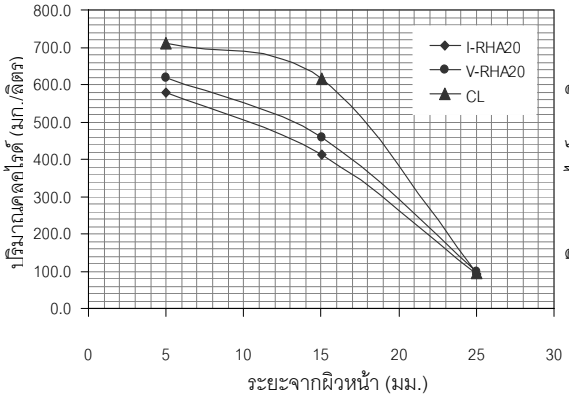
(ง) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก



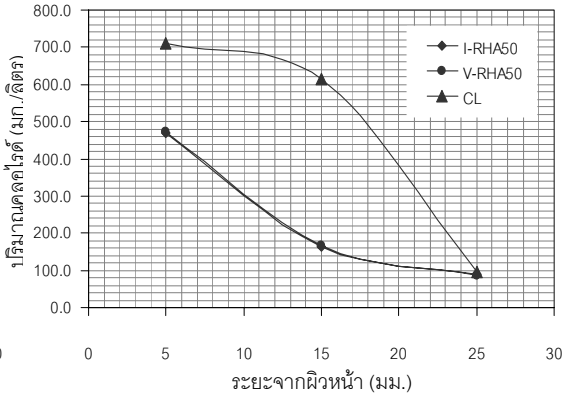
(ข) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก



(จ) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



(ค) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

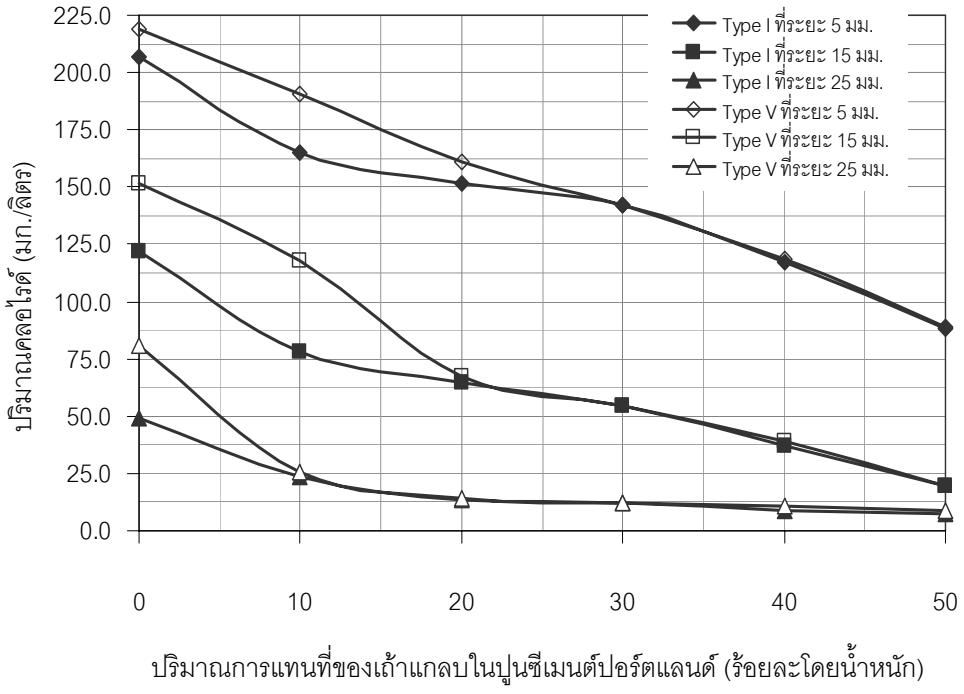


(ฉ) อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

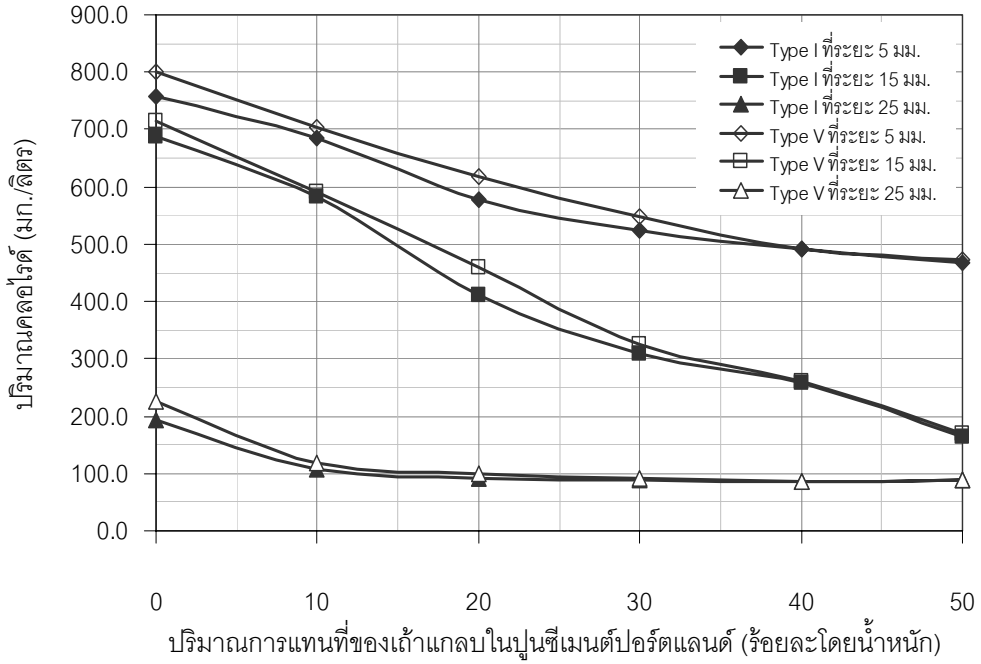
ภาพที่ 5.29 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุ 180 วัน
(แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์)

5.7.2 ผลกระทบเนื่องจากอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบดำบด

จากภาพที่ 5.30 – 5.31 เมื่อพิจารณาปริมาณคลอไรด์ในเนื้อมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ที่อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำบดร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณคลอไรด์ในมอร์ต้าร์จะลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำบดในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะเห็นว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 0 – 10 โดยน้ำหนัก มีปริมาณของคลอไรด์ที่ซึมผ่านมากกว่ามอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกระดับความลึก กล่าวคือองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต (C_3A) สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และ C_3A มีคุณสมบัติในการยึดจับคลอไรด์ส่งผลให้เหลือปริมาณคลอไรด์ลดน้อยลง (Rasheeduzzafar P., et al., 1991) แต่เมื่ออัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบดำบดเพิ่มขึ้นร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าสามารถลดปริมาณคลอไรด์ได้ เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต เป็นผลให้มอร์ต้าร์มีการซึมผ่านน้ำต่ำและสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (Thomas M.D.A., 2007)



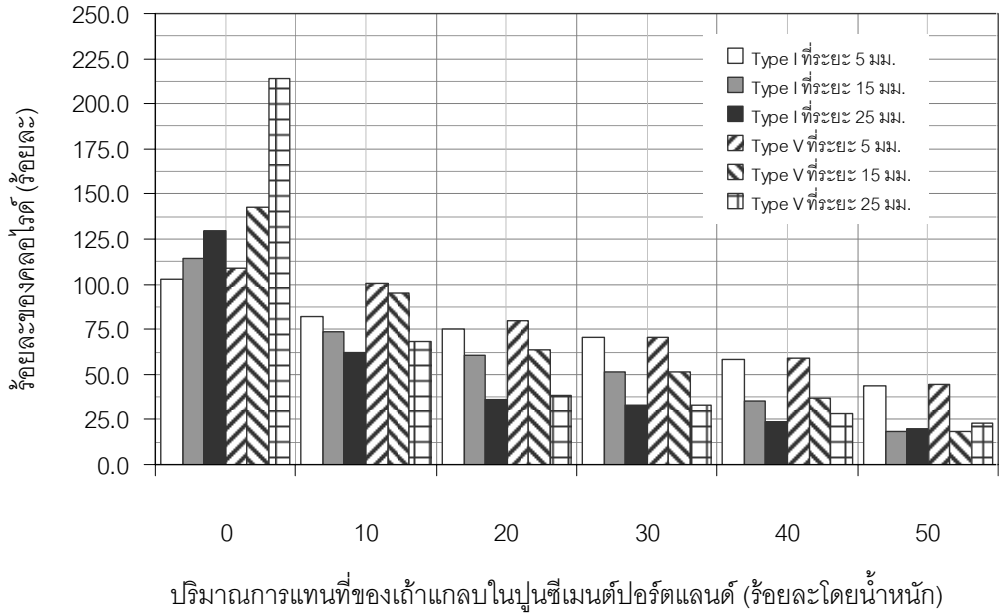
ภาพที่ 5.30 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุ 90 วัน
(แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์)



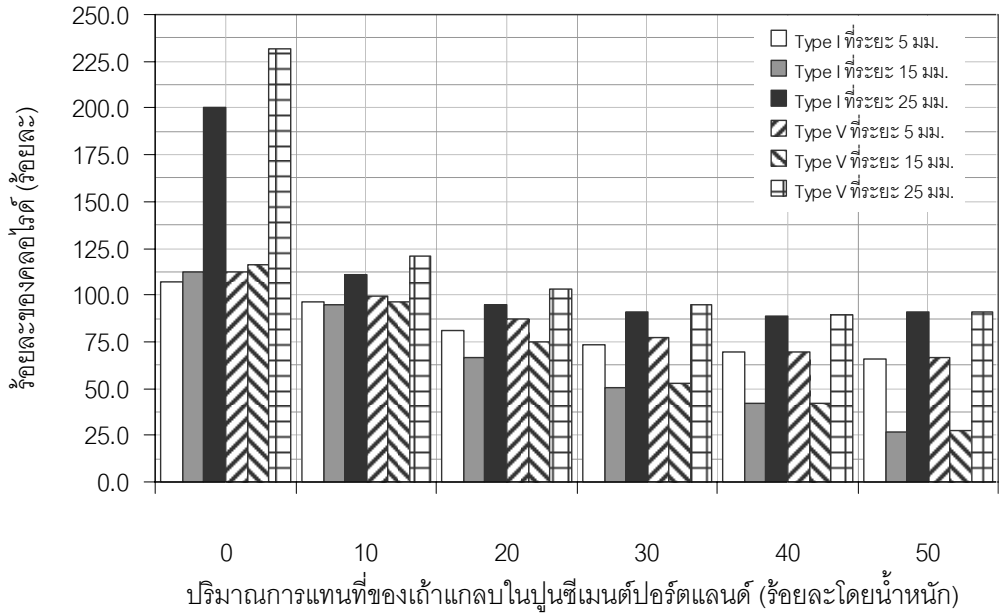
ภาพที่ 5.31 ปริมาณการซึมผ่านของคลอไรด์ที่อายุ 180 วัน
(แช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์)

5.7.3 ปริมาณคลอไรด์อิสระเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์

จากภาพที่ 5.32 – 5.33 แสดงผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์ของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ พบว่าเมื่อปริมาณร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบสูงขึ้นมีผลทำให้ปริมาณคลอไรด์ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบดำบดมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 90.63 ซึ่งทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ทำให้มอร์ต้าร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และความทึบน้ำเพิ่มขึ้นทำให้การซึมผ่านของคลอไรด์ลดลง (Yuan, Q. et al., 2008)



ภาพที่ 5.32 ร้อยละของคลอไรด์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ที่อายุ 90 วัน

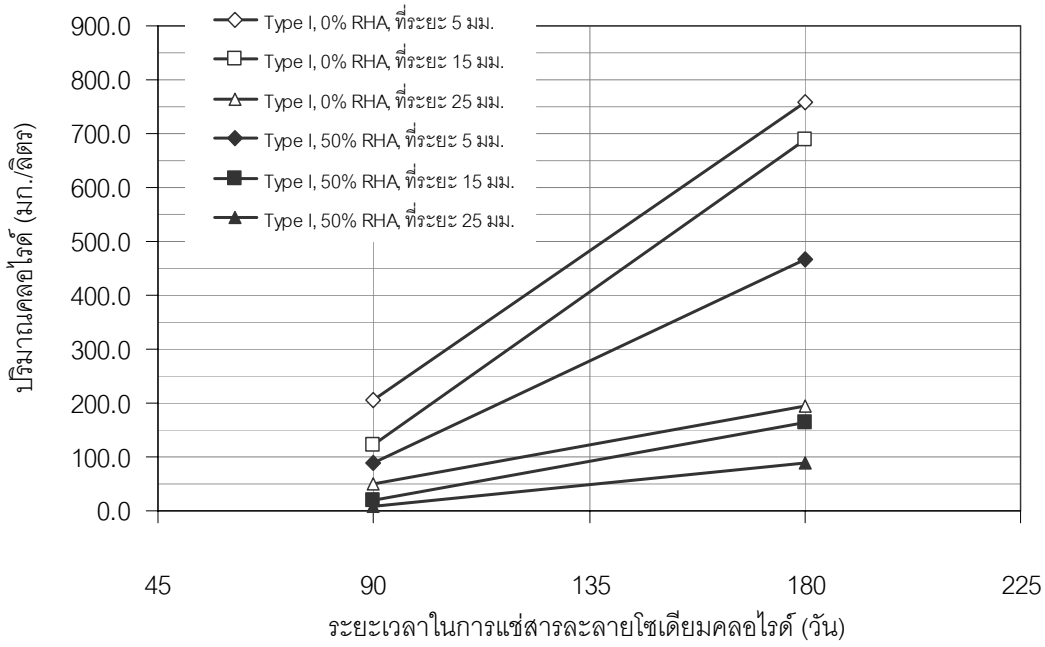


ภาพที่ 5.33 ร้อยละของคลอไรด์เปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ทนคลอไรด์ที่อายุ 180 วัน

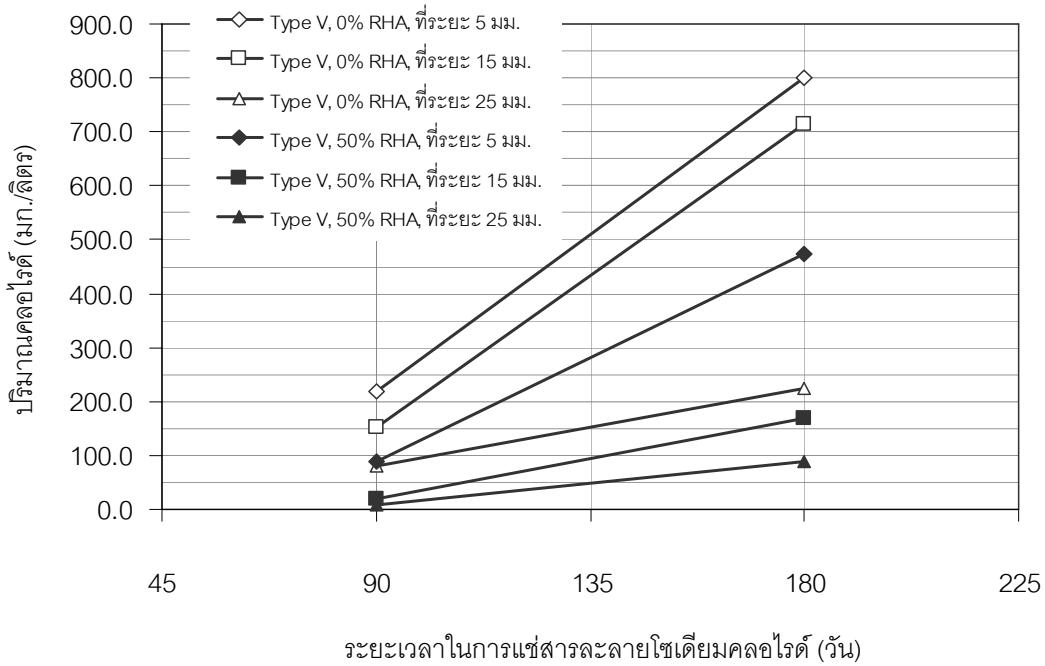
5.7.4 ระยะเวลาในการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์

จากภาพที่ 5.34 แสดงระยะเวลาการแช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. ตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ระยะเวลา 90 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ล้วน ที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 208.00, 121.94 และ 49.11 มก./ลิตร ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 88.14, 19.37 และ 7.62 มก./ลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแทนที่เถ้าแกลบดำบดในปูนซีเมนต์จะทำให้ปริมาณคลอไรด์ลดลง เนื่องจากเถ้าแกลบดำบดมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และน้ำได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ส่งผลให้มอร์ต้าร์มีการซึมผ่านน้ำต่ำและสามารถลดการซึมผ่านของคลอไรด์ได้ (Thomas M.D.A., 2007) และที่ระยะเวลา 180 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้น โดยที่มอร์ต้าร์ปกติที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 758.00, 688.97 และ 194.14 มก./ลิตร ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 468.02, 163.63 และ 88.19 มก./ลิตร ตามลำดับ

จากภาพที่ 5.35 แสดงระยะเวลาการแช่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. ตามลำดับ โดยการเปรียบเทียบระหว่างมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่ไม่ผสมเถ้าแกลบดำบด และมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ระยะเวลา 90 วัน มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ที่ไม่ผสมเถ้าแกลบดำบดที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 218.93, 151.67 และ 80.97 มก./ลิตร ตามลำดับ ส่วนมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 89.24, 19.37 และ 8.62 มก./ลิตร ตามลำดับ และที่ระยะเวลา 180 วัน พบว่าปริมาณคลอไรด์เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยที่มอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ที่ไม่ผสมเถ้าแกลบดำบดที่ระดับความลึก 5, 15 และ 25 มม. มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 800, 714.95 และ 224.53 มก./ลิตร ตามลำดับ ในส่วนของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์ที่ผสมเถ้าแกลบดำบดที่อัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก มีปริมาณคลอไรด์เท่ากับ 474, 167.98 และ 87.96 มก./ลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 5.34 ปริมาณคลอไรด์ที่ซึมผ่านของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผสมเถ้าแกลบดำบด



ภาพที่ 5.35 ปริมาณคลอไรด์การซึมผ่านของมอร์ต้าร์ปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ผสมเถ้าแกลบดำบด