ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
250747

การออกแบบส่วนผสมและการศึกษาผลกระทบต่อสมบัติของมอร์ตาร์ซีเมนต์การทดตัว

ลัดดาวัลย์ ขนะมนตรี

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กุมภาพันธ์ 2555

b00255868

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแ
250747

การออกแบบส่วนผสมและการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ของมอร์ตาร์ชดเชยการหดตัว

ภัณฑิรา ชนะชมภู

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กุมภาพันธ์ 2555

การออกแบบส่วนผสมและการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ของมอร์ตาร์ชดเชยการหดตัว

ภัณฑิรา ชนะชมภู

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ หรรษภิญโญ

.....กรรมการ
อาจารย์ ดร.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา

.....กรรมการ
ศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
อาจารย์ ดร.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย

17 กุมภาพันธ์ 2555

©ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ ดร. ปิติวัฒน์ วัฒนชัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้ความรู้ คำแนะนำ แนวทางในการทำวิจัย และสนับสนุนการทำวิจัยมาโดยตลอด จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชยานนท์ หรรษภิญโญ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ และมอบความเมตตาให้กับผู้เขียน จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกศรินทร์ พิมรักษา สำหรับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในด้านข้อมูลเชิงเคมีที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงกรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ จึงขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. สมนึก ตั้งเติมสิริกุล ที่กรุณารับเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ รวมถึงความเมตตาแก่ผู้เขียน ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน (BOI) และบริษัท พิบูลย์คอนกรีต จำกัด ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวก ด้านเอกสารและการดำเนินเรื่องเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณทศพล พัฒนเรืองกุล คุณบัญชา จิวเดช พี่ลิ่ว พี่กั้ง พี่กิต และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจคำปรึกษาที่ดี และความช่วยเหลือในการทำการทดลองและทำการทดสอบที่มีให้กับผู้เขียนตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ วิลาศ ชนะชมภู และคุณแม่ สุนันทา ชนะชมภู ที่รักยิ่ง ผู้ซึ่งเป็นทั้งกำลังใจ แรงผลักดัน และคอยให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านแก่ผู้เขียนมาโดยตลอด

ภัณฑิรา ชนะชมภู

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การออกแบบส่วนผสมและการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของมอร์ตาร์ชดเชยการหดตัว

ผู้เขียน นางสาวภัณฑิรา ชนะชมภู

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ปิติวัฒน์ วัฒนชัย

บทคัดย่อ

250747

ในปัจจุบันปัญหาในด้านการหดตัวและการคืบตัวอย่างต่อเนื่องของคอนกรีตเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลให้โครงสร้างของคอนกรีตเกิดความเสียหายเป็นอย่างมากทั้งในด้านกำลังและการแตกร้าวของโครงสร้าง โดยการแตกร้าวส่วนใหญ่นั้นจะเกิดจากการหดตัวเนื่องจากการสูญเสียน้ำก่อให้เกิดการแตกร้าวภายในขึ้น ดังนั้นการควบคุมการแตกร้าวดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้สารผสมเพิ่มการขยายตัวของซีเมนต์ซึ่งจะทำให้เกิดการขยายตัวที่สามารถชดเชยการหดตัวที่เกิดขึ้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงมั่นคงและลดการแตกร้าวให้กับข้อต่อของโครงสร้าง โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 3 เถ้าลอยแม่เมาะที่ร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 สารเคมีผสมเพิ่มที่ร้อยละ 4, 8 และ 12 และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 แล้วนำไปทำการทดสอบหาค่าการไหล ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย ค่ากำลังอัดและค่าความเครียดที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน เพื่อผสมให้ได้ส่วนผสมที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน และนำไปทำการทดสอบหาองค์ประกอบของผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และผลการทดสอบหาโครงสร้างผลึกภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของซีเมนต์ชดเชยการหดตัวเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ

ผลการวิจัยพบว่า ในการทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว พบว่า เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มขึ้น การไหลจะไหลได้ลดลง แต่สามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้โดยการใส่เถ้าลอยเพิ่มขึ้นในส่วนผสม เพราะเถ้าลอยมีลักษณะผลึกเป็นทรงกลม จะไปขัดเม็ดปูนที่มีขนาดใหญ่

250747

กว่าให้ไหลได้ดียิ่งขึ้น และใส่สารผสมเพิ่มประเภท F เพิ่มขึ้นจะช่วยให้การไหลไหลได้ดีขึ้น ในการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว พบว่า เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายจะก่อตัวได้เร็วขึ้น แต่เมื่อใส่เถ้าลอยและสารผสมเพิ่มประเภท F เพิ่มขึ้น จะช่วยให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายก่อตัวได้นานขึ้น ในการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว พบว่า เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มขึ้น กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเอททริงไกต์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และเมื่อใส่เถ้าลอยเพิ่มขึ้น กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงในช่วงแรกเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้พัฒนากำลังอัดในระยะยาว การวิจัยพบว่าปริมาณสารเพิ่มการขยายตัวที่เหมาะสมด้านกำลัง คือ ร้อยละ 15 ของซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมด้านกำลังและความสามารถในการทำงานได้ คือ ร้อยละ 15 ของการทดแทนซีเมนต์ ในการทดสอบความเครียดของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว พบว่า เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มขึ้น ความเครียดมีแนวโน้มขยายตัวมากขึ้น เนื่องจากผลึกเอททริงไกต์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต และเมื่อใส่เถ้าลอยเพิ่มขึ้นค่าการขยายตัวมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อใส่สารผสมเพิ่มประเภท F มากขึ้น การวิจัยพบว่าปริมาณสารเพิ่มการขยายตัวที่เหมาะสมด้านความเครียด คือ ร้อยละ 15 ของซีเมนต์ และปริมาณเถ้าลอยที่เหมาะสมด้านความเครียด คือ ร้อยละ 15 ของการทดแทนซีเมนต์ จากการทดสอบ XRD และ SEM สามารถอธิบายถึงผลการทดสอบต่างๆ ได้ ซึ่งจากการเมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มขึ้น และอายุวันมากขึ้น ผลึกเอททริงไกต์ที่มีรูปร่างผลึกคล้ายเข็ม เรียวยาวจะเกิดในปริมาณมากขึ้น และไปเติมเต็มในช่องว่างทำให้เพสต์แน่นขึ้น กำลังอัดจึงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลึกเอททริงไกต์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะผลักดันอนุภาคต่างๆ ในเพสต์ให้เกิดการขยายตัวของอนุภาค ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของมอร์ต้าร์ได้ และจากการศึกษาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พบว่า เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวลงในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จะช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้จริงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ โดยการผลิตสารเพิ่มการขยายตัวจะทำที่อุณหภูมิต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิง ลดพลังงานความร้อน และต้องการพลังงานการบดอัดน้อยกว่า ทำให้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ

Thesis Title	Mix Design and Study on Environmental Effect of Shrinkage - compensating Mortar
Author	Miss Phanthira Chanachompu
Degree	Master of Engineering (Civil Engineering)
Thesis Advisor	Lect.Dr. Pitiwat Wattanachai

Abstract

250747

In this recent time, problems about shrinkage and continuing creep of concrete become the main cause of the destruction of concrete's structure; in both strength and the structure's crack. Most of the cracks are caused by shrinkage from loosing water—causes the internal crack. Thus, to control the crack, it can be done by using expansive agent of cement. Using expansive agent of cement will lead to the expansion that can replace the happened shrinkage—to strengthen and reduce the crack in the joints of the structure. In this research, the 3rd type of Portland cement, Fly ash from Mae Moh 0, 15, 25 and 35 percent, chemical mixture 4, 8 and 12 percent, and expansive agent 0, 5, 10 and 15 percent are used to test for finding value of the flow, initial and final setting time, compressive strength and strain at 1, 3, 7, 14 and 28 days. It is for having the suitable component in use. Then, the components are tested to find the composition of ettringite by using X-Ray Diffraction (XRD), founded result of the internal ettringite's structure by using Scanning Electron Microscope (SEM). Finally, the effect on Environment of shrinkage compensating mortar comparing to normal Portland cement are studied. The research finds from the test of shrinkage compensating mortar's flowage that when add more expansive agent, the flowage decrease. However, the quality can be improved by adding more fly ash. It is because circular shape of fly ash's ettringite will rub the bigger cement grains to have a better flow. Not only improved by adding fly ash, but adding superplaticizer also helps improving the flow. According to the test of initial and final setting time of Shrinkage Compensating Mortar, it is

found that the speed of initial and final setting will increase after adding more expansive agent. Nevertheless, adding fly ash mixed with superplaticizer helps initial and final setting last longer. In according to the test of compressive strength of Shrinkage Compensating Mortar, it is proved that when adding more expansive agent, the compressive strength tends to increase because of ettringite created by the hydration of calcium sulfoaluminate. What is more, when adding more fly ash, compressive strength tends to fall at first as a result of pozzolanic reaction—leads to long term development of compressive strength. Furthermore, this research finds that the amount of expansive agent that suitable for strength is 15 percent of cement and the suitable amount of fly ash for strength and working ability is 15 percent of cement's replacement. According to the test of the strain of the Shrinkage compensating Mortar, it is found that, adding more expansive agent, strain tends to have more expansion. The strain's expansion results from ettringite created by hydration of calcium sulfoaluminate. Besides, adding more fly ash, the expansion tends to increase when adding more superplaticizer. The research finding shows that the amount of expansive agent suitable for strain is 15 percent of cement. The amount of fly ash suitable for strain is 15 percent of cement's compensation. The XRD and SEM tests can explain all of the results; adding more expansive agent and having more time create more amount of ettringite shaped long-thin like needle. The ettringite will fill the gap and make the paste tighter—compressive strength increase. What is more, ettringite that gets bigger will push the particles in the paste to create the expansion of particles. This will lead to the expansion of Mortar. The effect on environment of shrinkage compensating mortar, it can be analysed that adding expansive agent into Portland cement can really help reduce carbon dioxide when compare to normal Portland cement. For producing process, expansive agent is proceed in temperature lower than Portland cement's normal temperature. It will reduce fuel, heat, and lessen the need of compressed power--reduce carbon dioxide when compare to the production of normal Portland cement.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
สารบาญ	ซ
สารบาญตาราง	ฎ
สารบาญภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการศึกษา	3
1.5 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 ส่วนประกอบทางเคมีของซีเมนต์	13
2.2 การหดตัวของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	19
2.3 ซีเมนต์ที่สามารถขยายตัวได้	23
2.4 ทฤษฎีการขยายตัวของซีเมนต์	24
2.5 คอนกรีตชดเชยการหดตัว	28
2.6 เถ้าลอย	33
2.7 สารเคมีผสมเพิ่ม	37
2.8 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและพลังงานของซีเมนต์ชดเชยการหดตัว	40
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	42
3.1 การหาส่วนผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์ชดเชยการหดตัว	42
3.2 การศึกษาองค์ประกอบของผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	46
3.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	48
3.4 การตั้งชื่อตัวอย่าง	49

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 จำนวนชิ้นตัวอย่าง	
บทที่ 4 ผลงานวิจัย	52
4.1 ผลการทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	52
4.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	52
4.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	54
4.4 ผลการทดสอบค่าความเครียดของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	69
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการวิจัย	90
5.1 ผลการทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	93
5.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	94
5.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	96
5.4 ผลการทดสอบค่าความเครียดการขยายตัวของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	96
5.5 สมการที่ใช้ในการทำนาย	103
5.6 ผลการทดสอบหาองค์ประกอบของผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และผลการทดสอบหาโครงสร้างผลึกภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	106
5.7 การประเมินผลกระทบทางสิ่งเวดล้อมและพลังงานของซีเมนต์ชดเชยการหดตัว	107
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	121
6.1 สรุปผลการวิจัย	121
6.2 ข้อเสนอแนะ	123
บรรณานุกรม	124

สารบาญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	127
ภาคผนวก ก ข้อมูลคุณสมบัติวัสดุ	128
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์สมการทำนายค่ากำลังอัดและค่าความเครียดการขยายตัว	137
ภาคผนวก ค การคำนวณผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและพลังงาน	151
ประวัติผู้เขียน	153

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบระหว่างปูนเม็ดปอร์ตแลนด์กับปูนเม็ดซัลโฟอลูมิเนต	12
2.1 ตารางแสดงข้อกำหนดทางกายของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-97	35
2.2 ตารางแสดงข้อกำหนดทางด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618-93	36
5.1 ตารางแสดงส่วนผสมที่ดีที่สุด 10 ส่วนผสมจากการทดสอบ	106
ก-1 ตารางคุณสมบัติของปูนซีเมนต์ชนิดที่ 3 – ตราช้าง	129
ก-2 ตารางแสดงคุณสมบัติของสารผสมเพิ่มที่ใช้ทดสอบ	129
ก-3 ตารางแสดงคุณสมบัติของสารเพิ่มการขยายตัว	129
ก-4 ตารางแสดงคุณสมบัติของเถ้าลอย	129
ก-5 ตารางแสดงสัดส่วนส่วนผสมของมอร์ต้าร์ชดเชยการหดตัว	130
ค-1 ตารางแสดงขั้นตอนการคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการผลิตจากการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ	152
ค-2 ตารางแสดงขั้นตอนการคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาจากการผลิตจากการผลิตสารเพิ่มการขยายตัว	152

สารบาญภาพ

รูป	หน้า
1.1 กราฟแสดงการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตชดเชยการหดตัว	4
1.2 กราฟแสดงการหดตัวของคอนกรีตชดเชยการหดตัว	4
1.3 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของส่วนผสมต่างๆ สัมพันธ์กับเวลาที่อยู่ในสภาพไม่บ่มน้ำ	6
1.4 กราฟแสดงค่ากำลังอัดของส่วนผสมต่างๆ สัมพันธ์กับเวลาที่อยู่ในสภาพในน้ำและบ่มในที่แห้ง	7
1.5 กราฟแสดงค่าการหดตัวแบบแห้งของส่วนผสมต่างๆ ที่มีเถ้าลอยผสมอยู่	7
1.6 กราฟแสดงค่าการยืดหดตัวของส่วนผสมที่ไม่ใส่เถ้าลอยและใส่เถ้าลอย	8
1.7 กราฟแสดงค่าการยืดหดตัวของส่วนผสมที่ใส่เถ้าลอยและใส่สารเพิ่มการขยายตัว	9
1.8 กราฟแสดงค่าการยืดหดตัวของส่วนผสมที่ใส่เถ้าลอยร้อยละ 30 และสารเพิ่มการขยายตัว	9
1.9 กราฟแสดงค่าการยืดหดตัวของส่วนผสมที่ใส่เถ้าลอยร้อยละ 20 และสารเพิ่มการขยายตัว	10
2.1 รูปแสดงการพัฒนากำลังของสารประกอบหลักในปูนซีเมนต์	14
2.2 แผนภาพแสดงปฏิกิริยาของแคลเซียมซิลิเกต	15
2.3 ขบวนการหน่วงปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของ C_3A	16
2.4 ภาพขยายโมโนซัลเฟต และเอททริงไกต์	17
2.5 การหดตัวพลาสติกของซีเมนต์เพสต์มอร์ต้าร์ และคอนกรีต	20
2.6 การระเหยของน้ำในช่องว่างคาปิลารี	21
2.7 แรงดึงคาปิลารีทำให้คอนกรีตหดตัว	22
2.8 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายใน	22
2.9 กลไกการเกิดการแตกร้าวจากการยึดรั้งภายนอก	22
2.10 รูปร่างผลึกของเอททริงไกต์	24
2.11 การขยายตัวของเอททริงไกต์	25
2.12 การเปรียบเทียบความยาวที่เปลี่ยนแปลงระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับซีเมนต์ประเภท K	29

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
2.13 ซีเมนต์ประเภท K ต้านการแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวแบบแห้ง	29
3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตซีเมนต์ชดเชยการหดตัว	45
3.2 รูปแบบ XRD	47
3.3 ตัวอย่างทดสอบ XRD	47
3.4 ส่วนประกอบและการทำงานของ SEM	48
3.5 ภาพถ่ายจากกล้อง SEM	49
3.6 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษาหาผลึกของซีเมนต์ชดเชยการหดตัว	50
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับร้อยละแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ	53
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นกับ ร้อยละแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ	53
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายกับ ร้อยละแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ	54
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 0 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 1 วัน	55
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 0 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 3 วัน	55
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 0 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 7 วัน	56
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 0 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 14 วัน	56
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 0 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 28 วัน	57

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 1 วัน	57
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 3 วัน	58
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 7 วัน	58
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 14 วัน	59
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 15 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 28 วัน	59
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 25 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 1 วัน	60
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 25 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 3 วัน	60
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 25 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 7 วัน	61
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 25 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 14 วัน	61
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 25 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 28 วัน	62
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 35 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 1 วัน	62
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 35 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 3 วัน	63
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 35 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 7 วัน	63

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 35 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 14 วัน	64
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเถ้าลอยร้อยละ 35 ที่ส่วนผสมสารผสมเพิ่มประเภท F และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 28 วัน	64
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 1 วัน	65
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 3 วัน	65
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 7 วัน	66
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 14 วัน	66
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 28 วัน	67
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 1 วัน	67
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 3 วัน	68
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 7 วัน	68
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 14 วัน	69
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 28 วัน	69

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 1 วัน	70
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 3 วัน	70
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 7 วัน	71
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 14 วัน	71
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละต่างๆ ที่ 28 วัน	72
4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	73
4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	73
4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	74
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	74
4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	75
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	75
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	76
4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	76

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	77
4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	77
4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	78
4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	78
4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 0	79
4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 5	79
4.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 10	80
4.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 0 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15	80
4.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 0	81
4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 5	81
4.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 10	82
4.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 15 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15	82
4.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 0	83

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 5	83
4.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 10	84
4.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 25 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15	84
4.63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 0	85
4.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 5	85
4.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 10	86
4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมเถ้าลอยร้อยละ 35 และสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15	86
4.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 0 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	87
4.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 5 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	87
4.69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 10 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	88
4.70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4	88
4.71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 0 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	89
4.72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 5 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	89

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
4.73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 10 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	90
4.74 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8	90
4.75 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 0 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	91
4.76 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 5 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	91
4.77 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 10 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	92
4.78 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับอายุวันต่างๆ ที่ส่วนผสมสารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15 และสารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12	92
5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับร้อยละแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ	93
5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นกับร้อยละ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ	94
5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายกับร้อยละ แคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ	95
5.4 กราฟกำลังอัดระหว่างเถ้าลอยกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่อายุวันต่างๆ	97
5.5 กราฟกำลังอัดระหว่างเถ้าลอยกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่อายุวันต่างๆ	98
5.6 กราฟกำลังอัดระหว่างเถ้าลอยกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่อายุวันต่างๆ	99

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
5.7 กราฟความเครียดระหว่างเถ้าลอยกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่อายุวันต่างๆ	100
5.8 กราฟความเครียดระหว่างเถ้าลอยกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่อายุวันต่างๆ	101
5.9 กราฟความเครียดระหว่างเถ้าลอยกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่อายุวันต่างๆ	102
5.10 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร X ในสมการการทำนายค่ากำลังอัด (Y_1)	103
5.11 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร X ในสมการการทำนายค่าความเครียด (Y_2)	104
5.12 เปรียบเทียบ Peak Intensities ของผลึกเอททริงไกต์ช่วงมุม 2Theta ประมาณ 29 ที่อายุวันต่างๆ	109
5.13 เปรียบเทียบ Peak Intensities ของผลึกเอททริงไกต์ช่วงมุม 2Theta ประมาณ 27 ที่อายุวันต่างๆ	110
5.14 เปรียบเทียบ Peak Intensities ของผลึกเอททริงไกต์ช่วงมุม 2Theta ประมาณ 29 ที่อายุวันต่างๆ	111
5.15 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 0 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนตร้อยละ 5 ที่อายุวันต่างๆ	112
5.16 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 0 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 5 ที่อายุวันต่างๆ	113
5.17 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 10 ที่อายุวันต่างๆ	114
5.18 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 10 ที่อายุวันต่างๆ	115
5.19 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 35 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 15 ที่อายุวันต่างๆ	116

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
5.20 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 25 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 15 ที่อายุวันต่างๆ	117
5.21 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 15 ที่อายุวันต่างๆ	118
5.22 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 15 ที่อายุวันต่างๆ	119
5.23 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 0 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 และแคลเซียมซัลโฟอลูมิเนต ร้อยละ 15 ที่อายุวันต่างๆ	120