

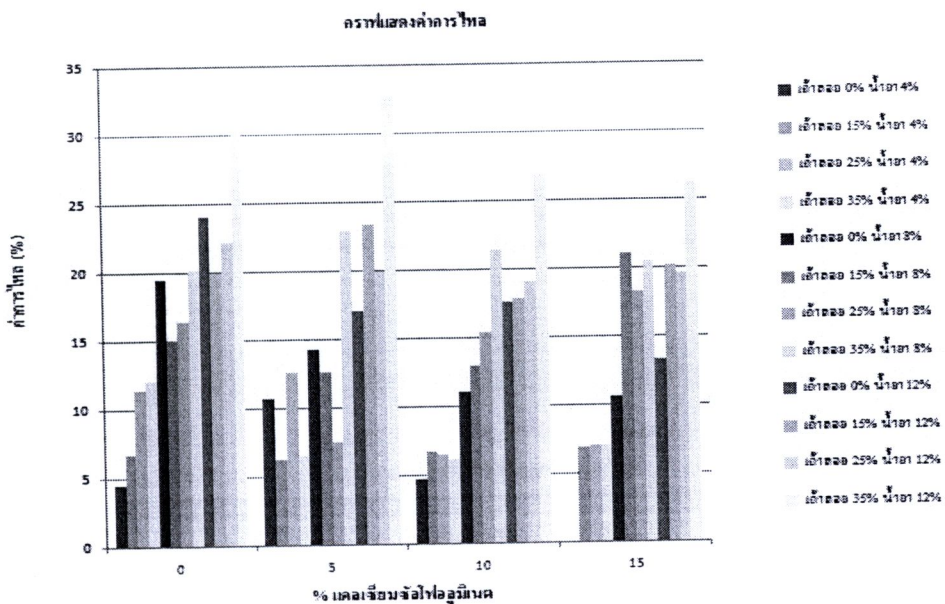


บทที่ 5

วิจารณ์ผลการวิจัย

การหาส่วนผสมที่เหมาะสมของซีเมนต์ชนิดเชยการหดตัวโดยส่วนผสมต่างๆ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 3, เถ้าลอยที่ร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 ทราชมะเน้ำที่ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16, 30, 50 และ 100 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่ออนุภาคละเอียด (W/B) เท่ากับ 0.32 สารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละ 4, 8 และ 12 และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

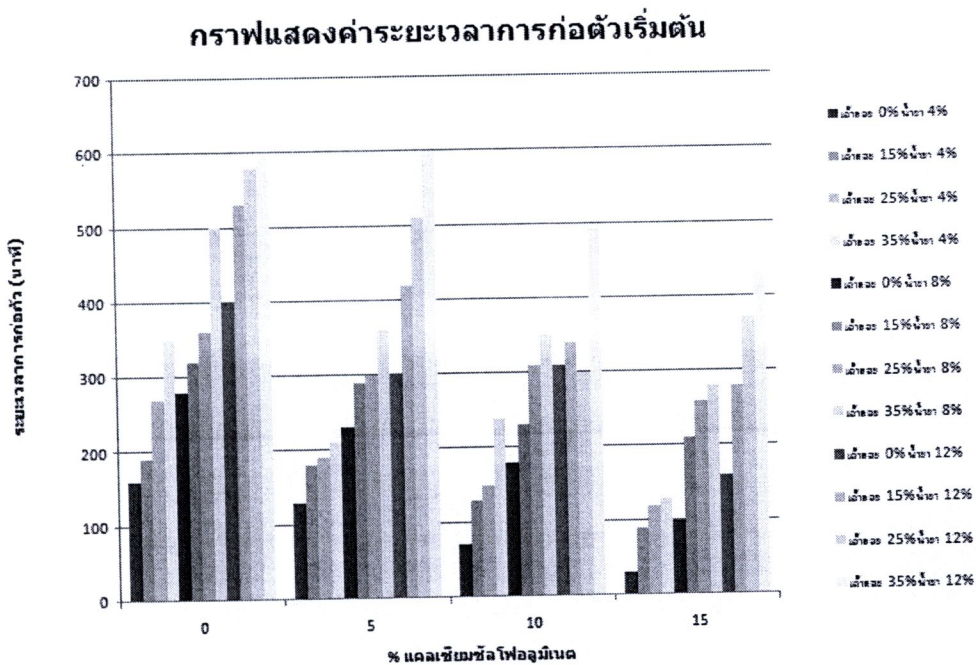
5.1 ผลการทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ชนิดเชยการหดตัว



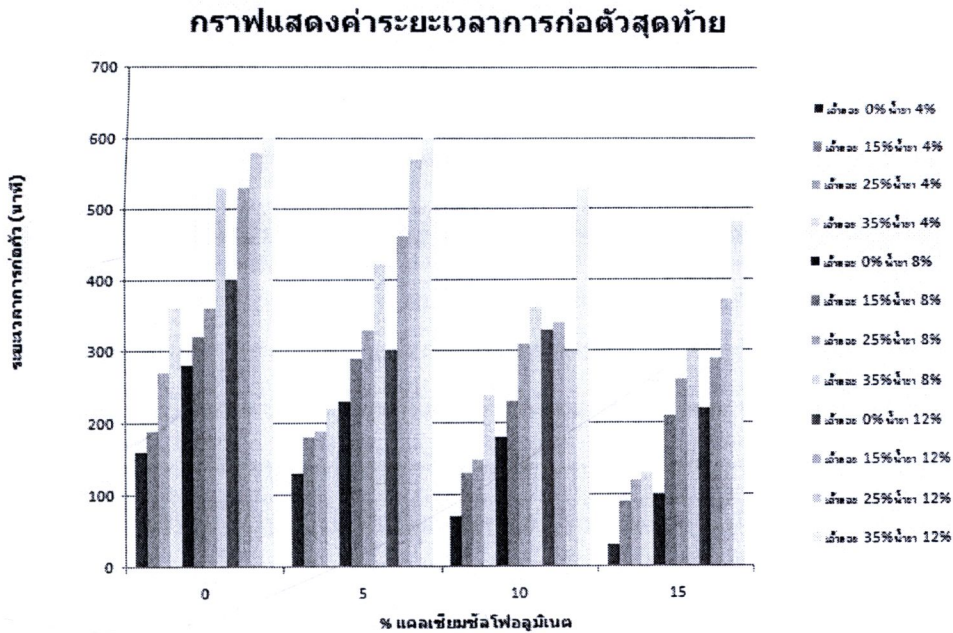
รูป 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับร้อยละเถ้าลอยและสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ

จากการทดสอบเปลี่ยนปริมาณของส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า เมื่อใส่ถั่วลันเตาในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น และสารผสมเพิ่มประเภท F เพิ่มขึ้น พบว่าการไหลมีแนวโน้มไหลดีขึ้น แต่เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวในปริมาณที่เพิ่มขึ้น พบว่าการไหลมีแนวโน้มไหลได้ลดลง เนื่องจากถั่วลันเตามีลักษณะของผลึกเป็นทรงกลม ไปขัดให้เม็ดปูนที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถไหลได้ดีขึ้น ส่วนสารผสมเพิ่มประเภท F เมื่อผสมเพิ่มเข้าไปในมอร์ตาร์ จากการสังเกตในการทำงานจริงพบว่า เมื่อเขย่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของสารลดน้ำจะสามารถไหลได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ไม่ใส่สารผสมเพิ่มประเภท F และเมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มเข้าไป พบว่าการไหลมีความสามารถลดลง เนื่องจากแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้น การก่อตัวจึงไวขึ้น ทำให้การไหลมีความสามารถลดลง

5.2 ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และสุดท้ายของมอร์ตาร์ชนิดเซกการหดตัว



รูป 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นกับร้อยละแคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ที่ส่วนผสมถั่วลันเตา และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ



รูป 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายกับ ร้อยละแคลเซียมซิลิโพลูมินเนต ที่ส่วนผสมเถ้าลอย และสารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละต่างๆ

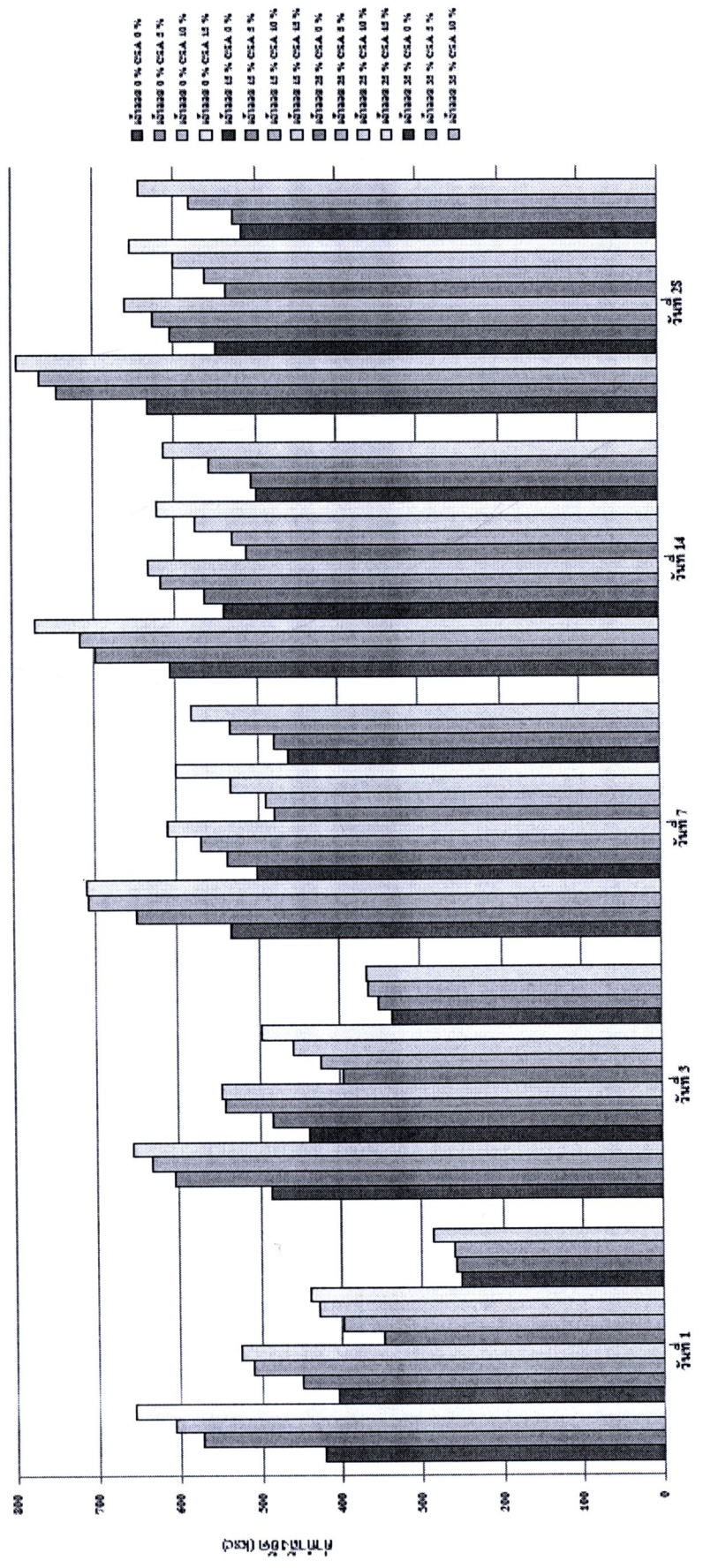
จากการทดสอบเปลี่ยนปริมาณของส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า เมื่อใส่เถ้าลอย พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น และสารเพิ่มการขยายตัวใน ปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้มลดลง และเมื่อใส่สาร ผสมเพิ่มประเภท F ในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าระยะเวลาการก่อตัวทั้งเริ่มต้นและสุดท้ายมีแนวโน้ม มากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอยจะเป็นตัวยืระยะเวลาการก่อตัวของมอร์ตาร์ เนื่องจากอัตราส่วนการ แทนที่ในปูนซีเมนต์ ส่วนการเพิ่มปริมาณสารเพิ่มการขยายตัวมากขึ้น จะไปเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันจึง ทำให้มอร์ตาร์ก่อตัวได้เร็วยิ่งขึ้น และสารผสมเพิ่มประเภท F เมื่อใส่ในปริมาณมากขึ้น จะพบว่า ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการใส่สารลดน้ำเพิ่มเข้าไป โดยคง อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อซีเมนต์เอาไว้เท่าเดิม ทำให้มอร์ตาร์ที่ได้มีลักษณะเหลวมากขึ้น จึงทำให้ การก่อตัวนานมากขึ้นนั่นเอง

5.3 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้ารชดเชยการหดตัว

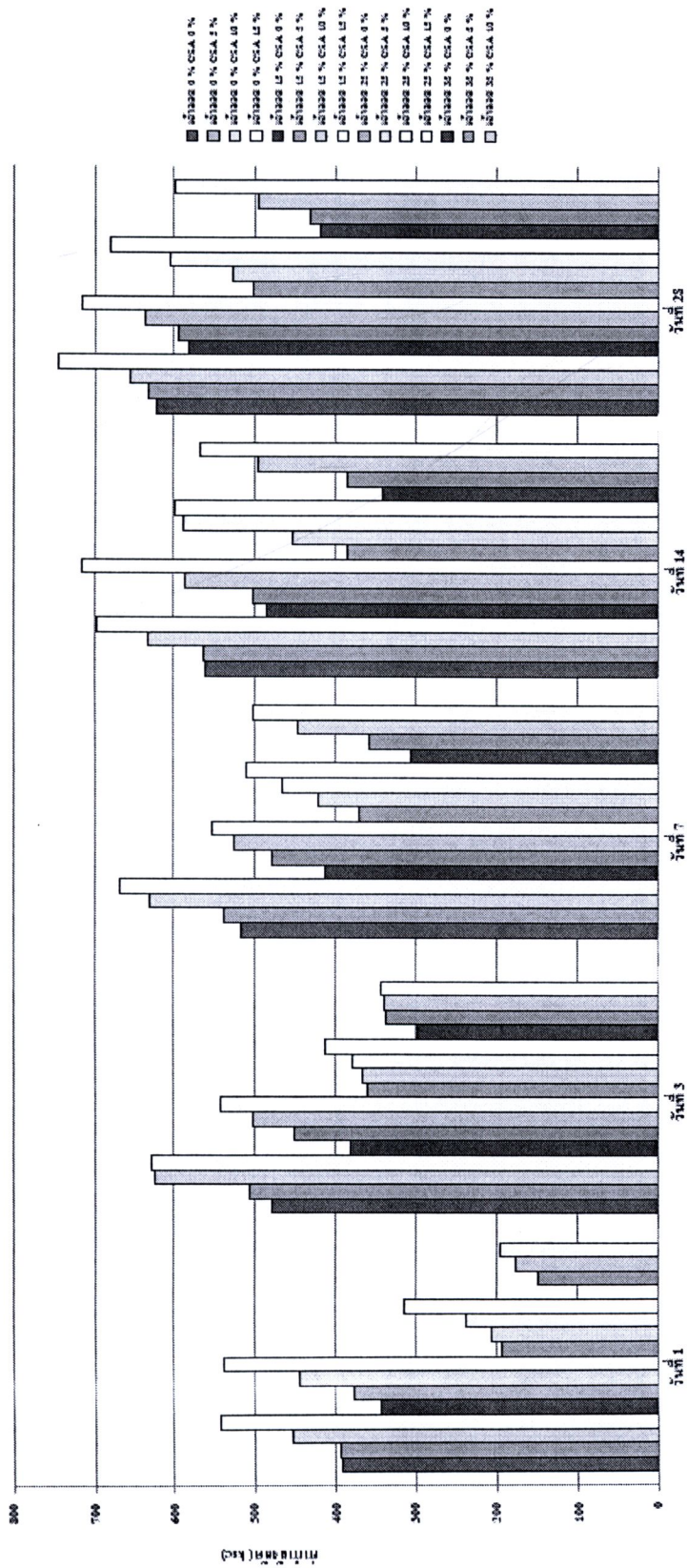
จากการทดสอบเปลี่ยนปริมาณของส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า เมื่อใส่เถ้าลอยแทนที่ลงในปูนซีเมนต์เพิ่มมากขึ้น กำลังอัดมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าลอย และแนวโน้มในช่วง 28 วันแรกเมื่อแทนที่เถ้าลอยในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่มากยิ่งขึ้นมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซีเมนต์กับเถ้าลอยจะทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นในระยะยาว และเมื่อใส่สารผสมเพิ่มประเภท F เพิ่มขึ้น กำลังอัดมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ซึ่งตามทฤษฎีเมื่อใส่สารลดน้ำเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม จะช่วยเพิ่มกำลังอัดให้กับมอร์ต้ารเนื่องจากสารลดน้ำจะไปช่วยผลึกอนุภาคของเม็ดปูนให้แยกออกจากกัน ทำให้น้ำสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดปูนได้อย่างสมบูรณ์ทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น แต่ในการทดสอบพบว่าเมื่อมีแนวโน้มลดลงอาจจะเนื่องมาจากการใส่ในปริมาณที่มากเกินไป แต่ใส่สารผสมเพิ่มประเภท F นี้เพิ่มเข้าไปในปริมาณมากเพราะช่วยในเรื่องของการไหล ทำให้สามารถไหลได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังได้ใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม จะเห็นได้ว่าเมื่อใส่ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น กำลังอัดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเอททริงไคต์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตที่เข้าไปอุดช่องว่างในเนื้อมอร์ต้าร ทำให้เนื้อมอร์ต้ารแน่นขึ้น น้ำหนักและปริมาตรของมอร์ต้ารมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่ออายุวันมากขึ้นทำให้กำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.4 – 5.6

5.4 ผลการทดสอบค่าความเครียดการขยายตัวของมอร์ต้ารชดเชยการหดตัว

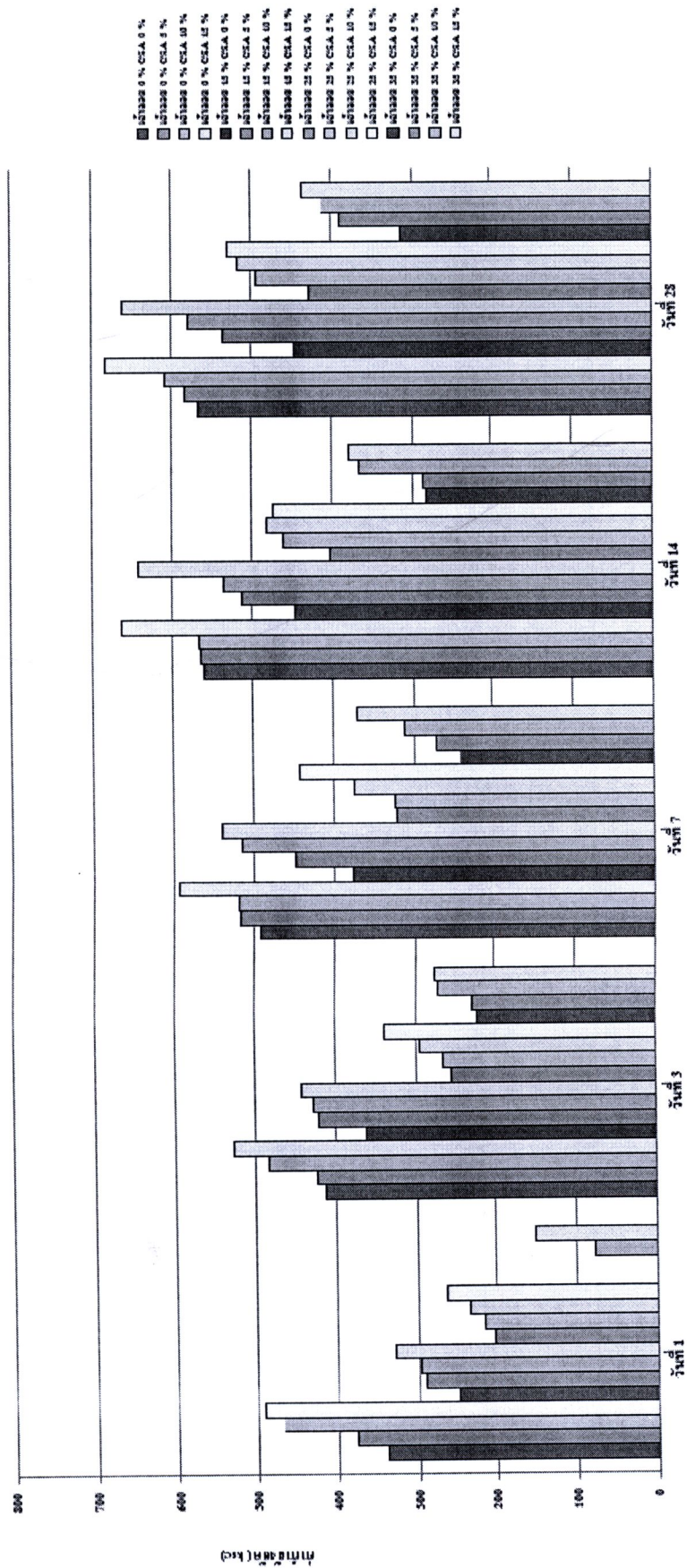
จากการทดสอบเปลี่ยนปริมาณของส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า เมื่อใส่เถ้าลอยแทนที่ลงในปูนซีเมนต์ ค่าความเครียดการขยายตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำที่ต้องการของมอร์ต้ารลดลงเป็นผลให้เกิดการระเหยของน้ำที่ผิวลดลงรวมทั้งการแทนที่ด้วยซีเมนต์ทำให้ลดการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างซีเมนต์และน้ำซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการหดตัว นอกจากนี้ยังได้ใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มเข้าไปในส่วนผสม พบว่าเมื่ออายุวันมากขึ้นค่าความเครียดการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง เพราะผลจากการขยายตัวของผลึกเอททริงไคต์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตจะผลัคนอนุภาคอื่นๆ ให้แยกออกจากกัน ซึ่งการผลัคนอนุภาคอื่นๆ นี้เองเป็นสาเหตุให้เกิดการขยายตัวของมอร์ต้าร และการขยายตัวจะยังคงดำเนินต่อไปจนกว่าอนุภาคการขยายตัวหรือจนกว่าไอออนของซัลเฟตถูกกลายจนหมด นอกจากนี้ผลึกเอททริงไคต์เกิดแทนที่ในช่องว่าง ทำให้ช่องว่างลดน้อยลง เมื่อความแข็งแรงของเพสต์ (Stiffness) มีความแข็งแรงมาก แรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลึกจะทำให้เกิดการบวมตัวของเพสต์น้อยกว่าเพสต์ที่มีความแข็งต่ำกว่า ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.7 – 5.9



รูป 5.4 แสดงกราฟกำลังอัตราหว่างที่ได้ออกกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่อายุวันต่างๆ

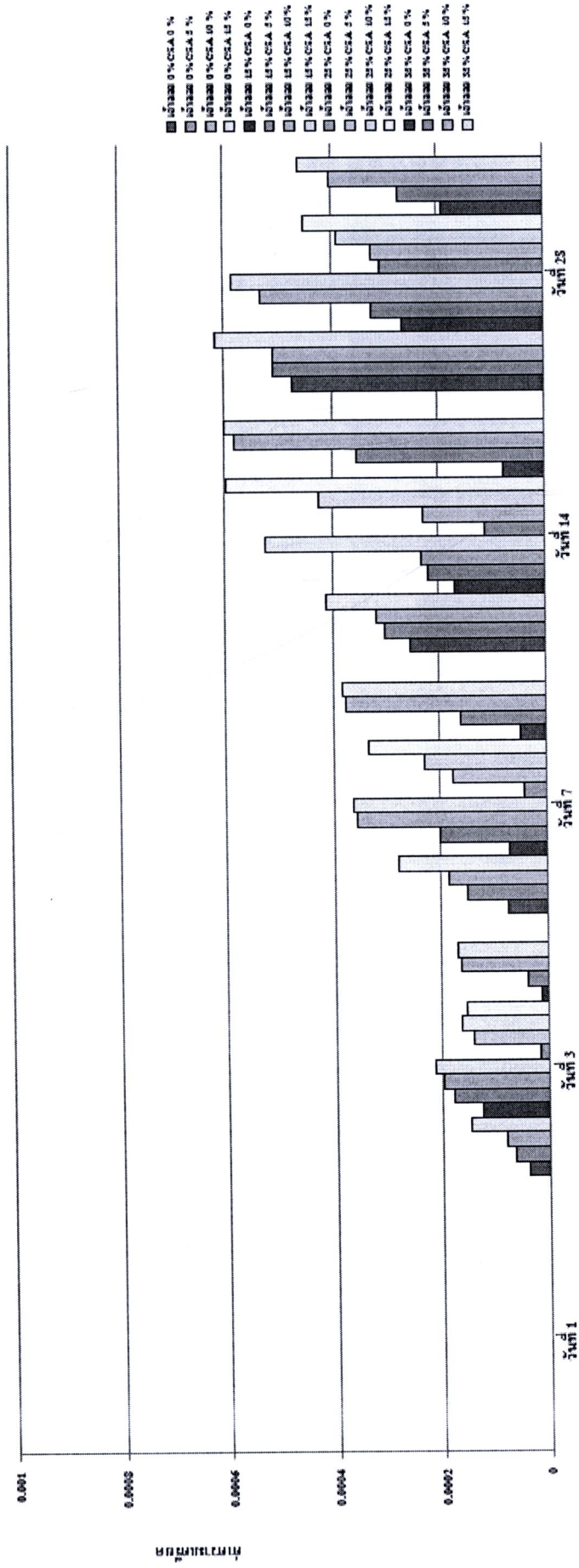


รูป 5.5 แสดงกราฟกำลังอัตราระหว่างธาตุอาหารกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่อายุวันต่างๆ



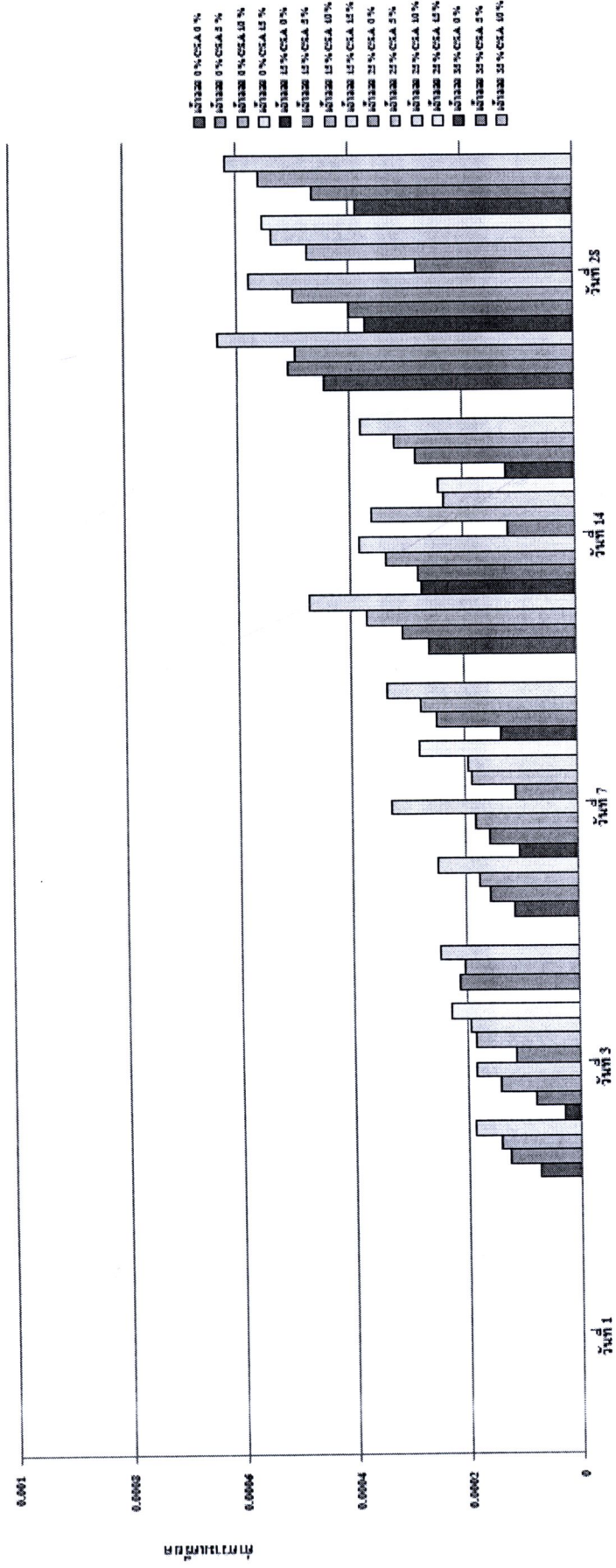
รูป 5.6 แสดงกราฟกำลังอัตราระหว่างเกลือกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่อายุวันต่างๆ

น้ำยา 4%

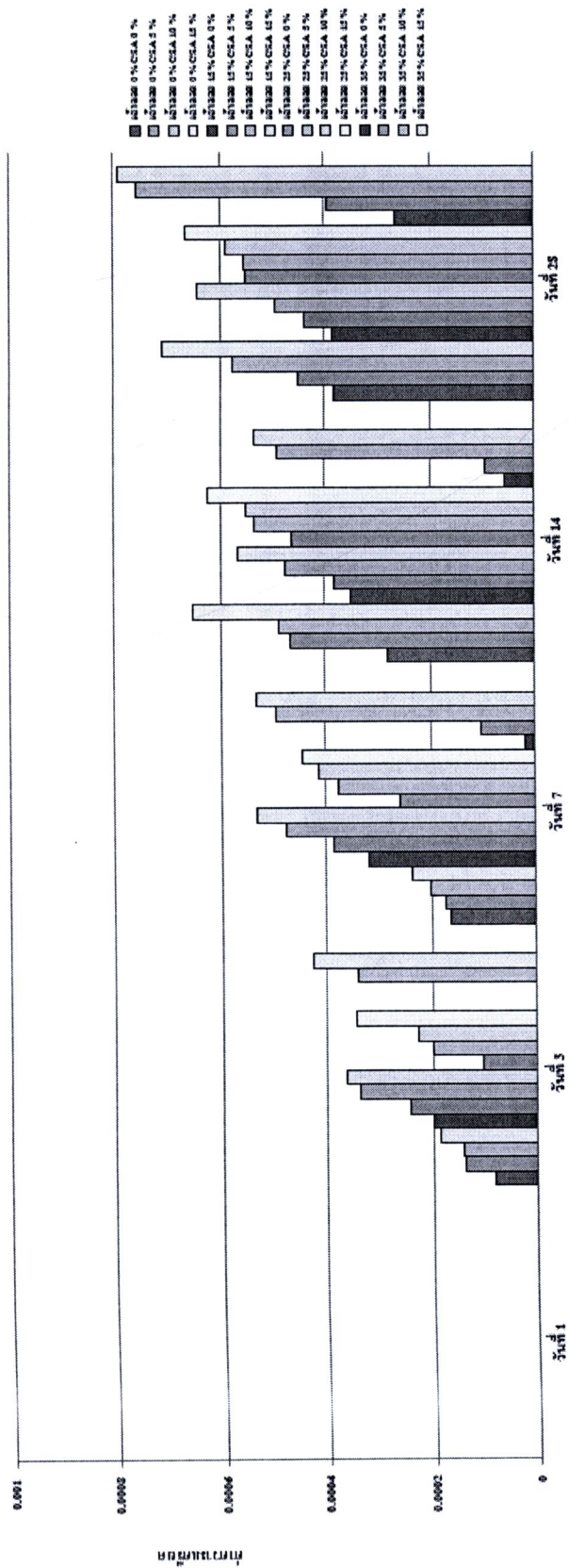


รูป 5.7 แสดงกราฟความเครียดระหว่างเส้นใยกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 4 ที่อายุวันต่างๆ

น้ำยา 8%



รูป 5.8 แสดงกราฟความเครียดระหว่างเถาเลอกับสารเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 ที่อายุวันต่างๆ



รูป 5.9 แสดงกราฟความเครียดระหว่างแต่ละกับการเพิ่มการขยายตัว ที่สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 ที่อายุวันต่างๆ

5.5 สมการที่ใช้ในการทำนาย

จากการวิเคราะห์สมการที่ใช้ทำนายค่ากำลังอัดและค่าการยืดหดตัว โดย SPSS 16 จะได้สมการในการวิเคราะห์ ดังนี้

$$Y_1 = 575.224-19.207X_1-50.437X_2+26.285X_3+7.800X_4$$
 (5.1)

และ

$$Y_2 = -109.027+34.897X_2+37.477X_3+16.245X_4$$
 (5.2)

โดยที่	Y_1	คือ	กำลังอัด (ksc)
	Y_2	คือ	ความเครียด
	X_1	คือ	ปริมาณเถ้าลอย (g)
	X_2	คือ	ปริมาณสารผสมเพิ่มประเภท F (g)
	X_3	คือ	ปริมาณสารเพิ่มการขยายตัว (g)
	X_4	คือ	อายุวัน (วัน) ขอบเขตสมการนี้จะอยู่ในช่วง 1 – 28 วัน

จากสมการทั้งสองสมการ ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่อยู่ด้านหน้าของตัวแปร X วิเคราะห์จากโปรแกรม SPSS 16 ดังรูป

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
2	Fly ash	-19.207	1.431	-.562	-13.417	.000
	Day	7.800	.632	.517	12.348	.000
3	(Constant)	640.938	16.157		39.670	.000
	Fly ash	-19.207	1.170	-.562	-16.417	.000
	Day	7.800	.516	.517	15.110	.000
	Superplasticizer	-50.437	4.627	-.373	-10.902	.000
4	(Constant)	575.224	13.605		42.281	.000
	Fly ash	-19.207	.909	-.562	-21.139	.000
	Day	7.800	.401	.517	19.455	.000
	Superplasticizer	-50.437	3.593	-.373	-14.037	.000
	Calcium Sulfoaluminate	26.285	2.103	.332	12.501	.000

a. Dependent Variable: Compressive Strength

รูป 5.10 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร X ในสมการการทำนายค่ากำลังอัด (Y_1)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	77.723	12.395		6.271	.000
	Day	16.245	.860	.775	18.893	.000
2	(Constant)	-15.969	14.147		-1.129	.260
	Day	16.245	.726	.775	22.377	.000
	Calcium Sulfoaluminate	37.477	3.808	.341	9.843	.000
3	(Constant)	-109.027	21.028		-5.185	.000
	Day	16.245	.682	.775	23.823	.000
	Calcium Sulfoaluminate	37.477	3.577	.341	10.478	.000
	Superplasticizer	34.897	6.112	.186	5.710	.000

a. Dependent Variable: y2M

รูป 5.11 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร X ในสมการการทำนายค่าความเครียด (Y_2)

จะสามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร Y กับ X ได้ดังนี้

- ด้านกำลังอัด เมื่อใส่เถ้าลอยแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่ากำลังอัดลดลง

เนื่องจากการทดสอบเราได้ทำการทดสอบในช่วงอายุ 1 – 28 วัน ซึ่งเถ้าลอยจะช่วยพัฒนากำลังอัดให้เพิ่มมากขึ้นในระยะยาว เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าลอยนั่นเอง และเมื่อเพิ่มสารผสมเพิ่มประเภท F ในส่วนผสมมากเกินไป จะทำให้กำลังอัดมีค่าลดลง เนื่องจากการทดสอบได้ใส่สารผสมเพิ่มประเภท F ในปริมาณที่มากเกินไป เนื่องจากต้องการให้ไปช่วยในเรื่องของความสามารถในการทำงานได้ แต่เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวในส่วนผสมมากขึ้น พบว่าทำให้กำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลึกเอททริงไคต์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารเพิ่มการขยายตัวเข้าไปอุดช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น และเมื่ออายุวันมากขึ้นพบว่ากำลังอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

- ด้านความเครียด เมื่อใส่เถ้าลอยแทนที่ในปริมาณที่มากขึ้น พบว่าไม่มีผลในด้านการยึดหรือหดตัวของมอร์ต้าร์นี้ และเมื่อเพิ่มสารผสมเพิ่มประเภท F ในส่วนผสมมากยิ่งขึ้นจะสามารถช่วยลดการหดตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวในส่วนผสมมากขึ้น พบว่าทำให้ค่าความเครียดมีค่าลดลง เนื่องจากการขยายตัวของผลึกเอททริงไคต์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของสารเพิ่มการขยายตัว และเมื่ออายุวันเพิ่มมากขึ้น พบว่าความเครียดมีแนวโน้มลดลง จากการวิเคราะห์สมการพบว่าเมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละ 15 จะให้ค่ากำลังอัดและค่า

ความเครียดมีแนวโน้มดีที่สุด เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์จากรูป 5.10 และ 5.11 ของสารเพิ่มการขยายตัวมีค่ามาก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกส่วนผสมที่เหมาะสมของปูนซีเมนต์ชนิดเชยการหดตัวโดยการนำเอาผลที่ดีที่สุด มาใช้ผสมกับส่วนผสมอื่นๆ ได้แก่ อัตราส่วนระหว่างน้ำต่ออนุภาคละเอียด (W/B) เท่ากับ 0.32 อัตราส่วนระหว่างทรายต่อคอนกรีต (S/C) เท่ากับ 2.00 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ชนิดที่ 3 etailoy ที่ร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 ทรายแม่น้ำที่ทำการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16, 30, 50 และ 100 สารผสมเพิ่มประเภท F ที่ร้อยละ 4, 8 และ 12 และสารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละ 0, 5, 10 และ 15

เนื่องจากการนำมอร์ตาร์ไปใช้งานนั้นได้มีการกำหนดคุณสมบัติการนำไปใช้งาน ซึ่งได้แก่

1. ค่าการไหลจะต้องเพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น (ร้อยละ 100) มากกว่าร้อยละ 12.5
2. ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น – ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้าย มีค่าในช่วง 45 - 675 นาที
3. ค่ากำลังอัด ที่ 7 วันมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 500 ksc
4. ค่าความเครียดการขยายตัวที่ 7 วันมีค่าเท่ากับ 0 ถึง +0.003 เนื่องจากค่าความเครียดอัด

ที่จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสียหายมีค่าเท่ากับ +0.003 จึงได้นำค่านี้เป็นเกณฑ์ไม่ให้มอร์ตาร์ขยายตัวเกินค่า +0.003 และค่าความเครียดคั้งที่จะทำให้โครงสร้างคอนกรีตเสียหายมีค่าเท่ากับ -0.00013245 จึงได้นำค่าเท่ากับ 0 เป็นเกณฑ์ไม่ให้มอร์ตาร์หดตัวต่ำกว่า 0 ซึ่งจะนำไปสู่ความเสียหายแก่โครงสร้างได้

5. ราคาของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ชนิดที่ 3 , ทราย , etailoy , สารผสมเพิ่มประเภท F และ สารเพิ่มการขยายตัว

จากส่วนผสมทั้ง 10 ส่วนผสมที่ได้เลือกมานั้น ดังแสดงตามตารางที่ 5.1 ได้นำมาทำการวิเคราะห์หาลักษณะประกอบของผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) และหาโครงสร้างผลึกภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM และ EDS) ได้ผลการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงส่วนผสมที่ดีที่สุด 10 ส่วนผสมจากการทดสอบ

อันดับ	ร้อยละ ละเอียด ลอย	ร้อยละ สาร ผสม เพิ่ม ประเภท F	ร้อยละ แคลเซียม ซัลโฟ ลูมิ เนต	ร้อยละ การ ไหล	ระยะเวลา การก่อ ตัว เริ่มต้น (นาทีก)	ระยะเวลา การก่อ ตัว สุดท้าย (นาทีก)	ค่ากำลัง อัดที่ 7 วัน (ksc)	ค่าความ เครียด ที่ 7 วัน (strain)	ราคา ต่อ หน่วย (บาท)
1	0	8	5	14.3	230	230	538.5	0.000158	4.03
2	0	12	5	17.0	300	300	516.8	0.000175	4.23
3	15	8	10	12.9	230	230	524.9	0.000180	6.23
4	15	12	10	17.8	340	340	514.1	0.000476	6.40
5	0	12	10	17.6	310	330	519.2	0.000203	6.49
6	35	8	15	20.5	280	300	501.5	0.000339	8.33
7	25	8	15	18.3	260	260	511.1	0.000283	8.39
8	15	8	15	21.0	210	210	553.1	0.000331	8.45
9	15	12	15	20.1	280	290	540.3	0.000531	8.59
10	0	12	15	13.3	160	220	594.4	0.000238	8.69

5.6 ผลการทดสอบหาค่าประกอบของผลึก โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) และผลการทดสอบหาโครงสร้างผลึกภายใน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM และ EDS)

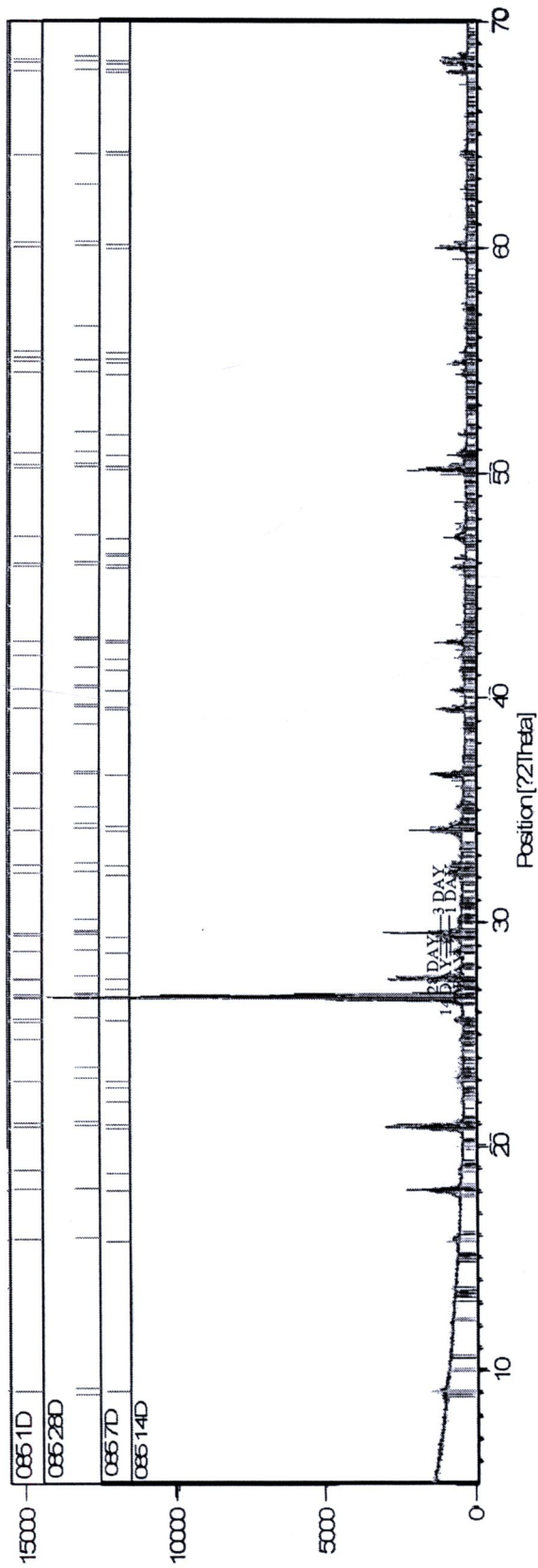
จากการทดสอบ พบว่า เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวในปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบด้วย XRD เอททริงไคต์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจากการทดสอบ SEM สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อใส่สารเพิ่มการขยายตัวในปริมาณที่มากขึ้น เมื่ออายุวันเพิ่มมากขึ้นผลึกเอททริงไคต์เริ่มเกิดคงที่ โดยลักษณะของผลึกที่เกิดในช่วง 1-7 วันแรก พบว่า การกระจายตัวของผลึกเอททริงไคต์ที่ใส่สารเพิ่มการขยายตัวร้อยละ 15 กระจายตัวได้ดีในซีเมนต์เพสต์มากกว่าใส่สารเพิ่มการขยายตัวที่ร้อยละ 5 และ 10 และมีรูปร่างและขนาดที่ยาวและใหญ่กว่าสามารถไปเติมเต็มภายในช่องว่าง ทำให้กำลังอัดสูงมากยิ่งขึ้น และเมื่ออายุ 14 และ 28 วัน พบว่า มีการเจริญเติบโตของผลึกเอททริงไคต์ลดลง โดยรูปและขนาดของผลึกเอททริงไคต์นั้นเริ่มคงที่ เนื่องจากแคลเซียมซัลโฟลูมิเนตได้ถูกทำละลายไปจนเกือบหมดหรือหมดแล้ว และผลึกเอททริงไคต์จะกลายเป็นโมโนซัลเฟต ทำให้ค่ากำลังอัดและ

การขยายตัวของมอร์ตาร์เริ่มคงที่ และเมื่อใส่เถ้าลอยในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบ XRD และ SEM พบว่าเอททริงไคต์มีแนวโน้มเกิดลดลง เพราะปฏิกิริยาระหว่างเถ้าลอยกับ Ca(OH)_2 ทำให้ช่องว่างในเนื้อคอนกรีตลดลงและเถ้าลอยแทนที่ในปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การเกิดผลึกและการกระจายตัวของผลึกเอททริงไคต์ลดลง จากการทดสอบด้วย SEM พบว่าเถ้าลอยมากกว่าร้อยละ 15 จะทำให้ผลึกเอททริงไคต์เกิดได้ลดลง ซึ่งผลการทดสอบมีความสอดคล้องกับการทดสอบ XRD นอกจากนี้ได้ใส่สารผสมเพิ่มประเภท F ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบ XRD พบว่าเมื่อใส่สารผสมเพิ่มประเภท F มากขึ้น พบว่าเกิดการกระจายช่องว่างภายในซีเมนต์เพสต์ และมีความสม่ำเสมอของฟองอากาศดี ทำให้ผลึกเอททริงไคต์ที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเกิดการกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ในปริมาณน้ำที่เท่ากัน แสดงในรูป 5.12 – 5.23

5.7 การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและพลังงานของซีเมนต์ชดเชยการหดตัว

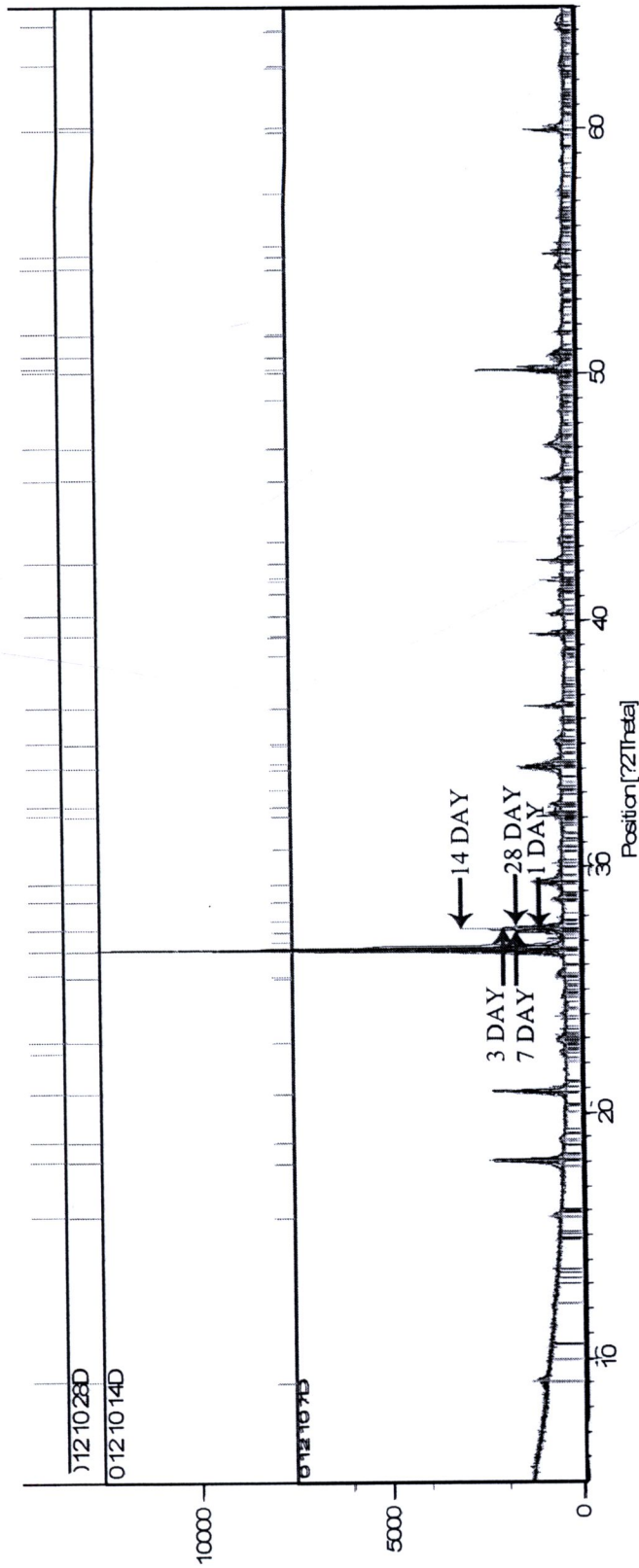
การประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและพลังงานของซีเมนต์ชดเชยการหดตัว จากงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติกับการผลิตสารเพิ่มการขยายตัวจากการอ้างอิง Ong Chin How (2007) พบว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ ซึ่งได้แก่ หินปูน ดินเหนียว และขี้เถ้า เมื่อนำไปแปลงโดยใช้ค่า Emission factor โดยอ้างอิงจากองค์การก๊าซเรือนกระจกแห่งประเทศไทย (TGO) ในการแปลงข้อมูลจากฐานข้อมูลของมาเลเซียให้ใกล้เคียงกับหน่วยของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 1368 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปูนซีเมนต์ 1 ตัน ส่วนการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใส่สารเพิ่มการขยายตัว ข้อมูลได้มาจากการสังเคราะห์สารเพิ่มการขยายตัวบริสุทธิ์ เมื่อนำมาแปลงให้ได้หน่วยของปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย จะปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 434 กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปูนซีเมนต์ 1 ตัน ซึ่งในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติจะทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิประมาณ $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ แต่การผลิตสารเพิ่มการขยายตัวจะผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า คือ $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ทำให้ลดปริมาณเชื้อเพลิง ลดพลังงานความร้อน และต้องการพลังงานการบดอัดน้อยกว่า นอกจากนี้ยังต้องการหินปูนที่นำมาเป็นวัตถุดิบน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำให้ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติ ดังนั้นปูนซีเมนต์ที่ใส่สารเพิ่มการขยายตัวเพิ่มเข้าไปในส่วนผสมจะช่วยให้กระบวนการผลิตที่มีการปล่อยความร้อนมาก พลังงานในการบดอัดมากของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปกติลดลงได้ ทำให้ต้นทุนในการผลิตปูนซีเมนต์ที่มีการใส่สารเพิ่มการขยายตัวลดลง นอกจากนี้การใส่เถ้าลอยแทนที่ลงในปูนซีเมนต์ ช่วยลดการใช้พลังงานและเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตลดลง และยังช่วยลดต้นทุนการผลิตในเรื่องของราคาวัสดุได้ เนื่องจากเถ้าลอยเป็น

วัสดุทดแทนไม้จำเป็นต้องเผา สามารถผสมลงในปูนซีเมนต์ได้เลย และถ้าวายเป็นวัสดุพลอยได้ที่ได้จากการผลิตไฟฟ้าทำให้ช่วยลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปัญหาสิ่งแวดล้อมอันเกิดจากการทิ้งทำลายถ้าวายจากโรงไฟฟ้า



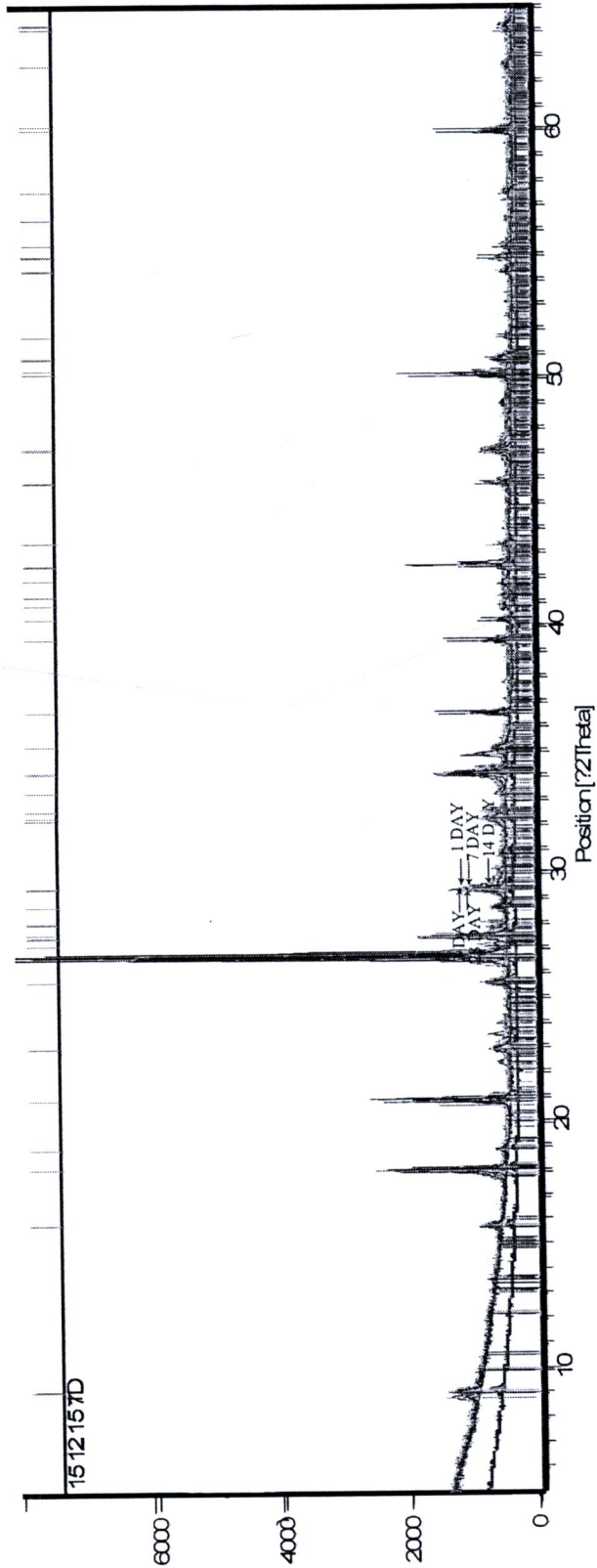
Peak List	
00-046-1045; Quartz, syn Si O ₂ 63[%]	
00-004-0733; Portlandite, syn Ca(OH) ₂ 47[%]	
00-005-0566; Cadeite, syn CaCO ₃ 28[%]	
00-041-1451; Ettringite, syn Ca ₆ A ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·2H ₂ O 33[%]	
01-066-0402; Hemite, syn Ca ₃ Si ₂ O ₇ 34[%]	
01-084-1304; Moscovite ZIMRG#1; KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂ 19[%]	
00-019-0332; Morodine, intermediate; KAl ₃ Si ₃ O ₈ 26[%]	

รูป 5.12 แสดงการเปรียบเทียบ Peak Intensities ของผลึกเอททริงไคต์ช่วงมุม 2Theta ประมาณ 29 ที่อายุวันต่างๆ



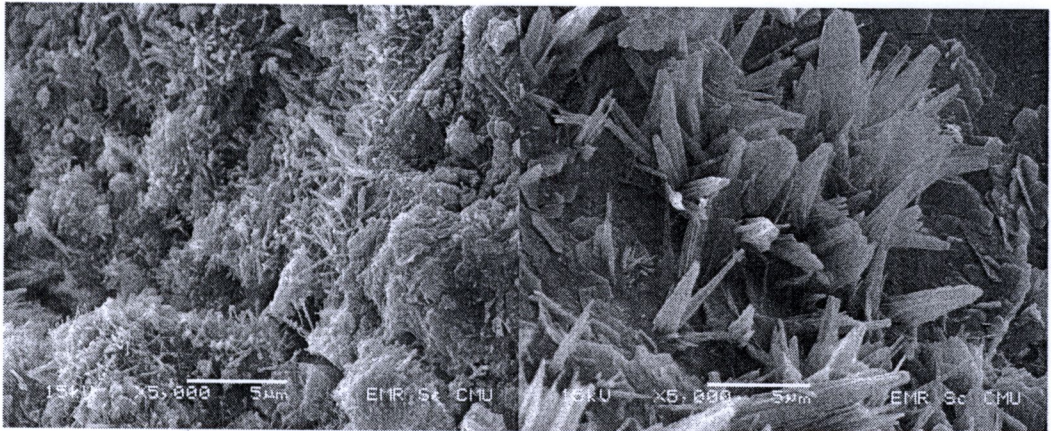
Peak List	
00-046-1045; Quartz, syn SiO ₂ 66 [%]	
00-004-0733; Portlandite, syn Ca(OH) ₂ 47 [%]	
00-004-1451; Ettringite, syn Ca ₆ A ₂ (SO ₄) ₃ (OH)12 H ₂ O 37 [%]	
00-005-0588; Calcite, syn CaCO ₃ 33 [%]	
00-029-0389; Calcium Silicate, Ca ₂ SiO ₄ 25 [%]	
01-036-0402; Hematite, syn Ca ₃ SiO ₅ 24 [%]	
00-019-0332; Merodine, intermediate; KAlSi ₃ O ₈ 24 [%]	

รูป 5.13 แสดงการเปรียบเทียบ Peak Intensities ของผลิตภัณฑ์จริงกับ 2Theta ประมาณ 27 ที่อายุวันต่างๆ



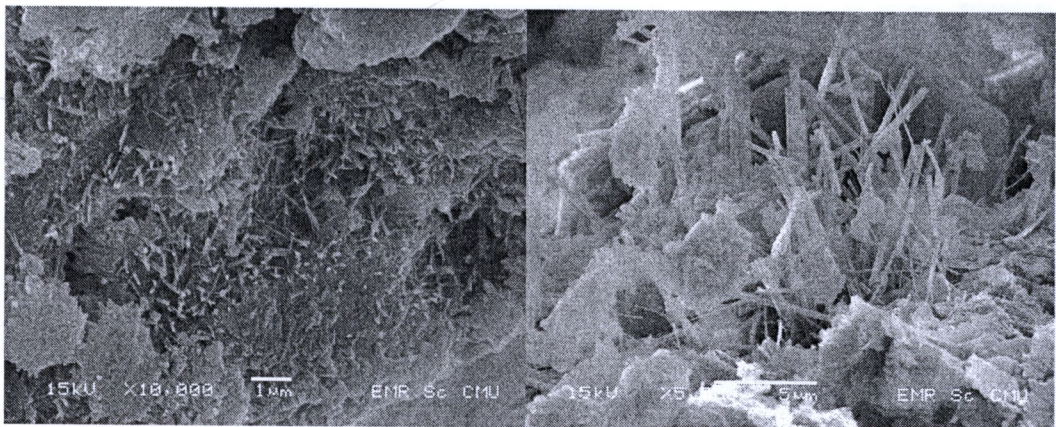
Peak List	
00-046-1045; Quartz, syn	Si O ₂ 60 [%]
00-004-0733; Portland, syn	Ca (OH) ₂ 45 [%]
00-005-0535; Caddis, syn	Ca C O ₃ 32 [%]
01-086-0402; Hemite, syn	Ca ₃ Si O ₅ 26 [%]
00-041-1451; Hemite, syn	Ca ₃ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₂ 26 H ₂ O 40 [%]
01-072-1114; Macodiremaximum	KAl Si ₃ O ₈ 21 [%]
00-041-1486; Araratite, ordered	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ 17 [%]

รูป 5.14 แสดงการเปรียบเทียบ Peak Intensities ของผลึกเอทริงไกต์ช่วงมุม 2Theta ประมาณ 29 ที่อายุวันต่างๆ



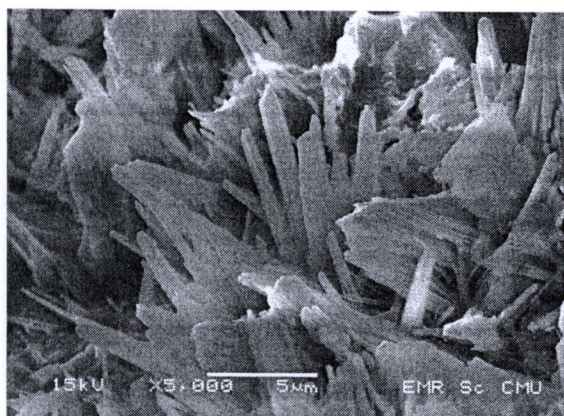
(ก)

(ข)



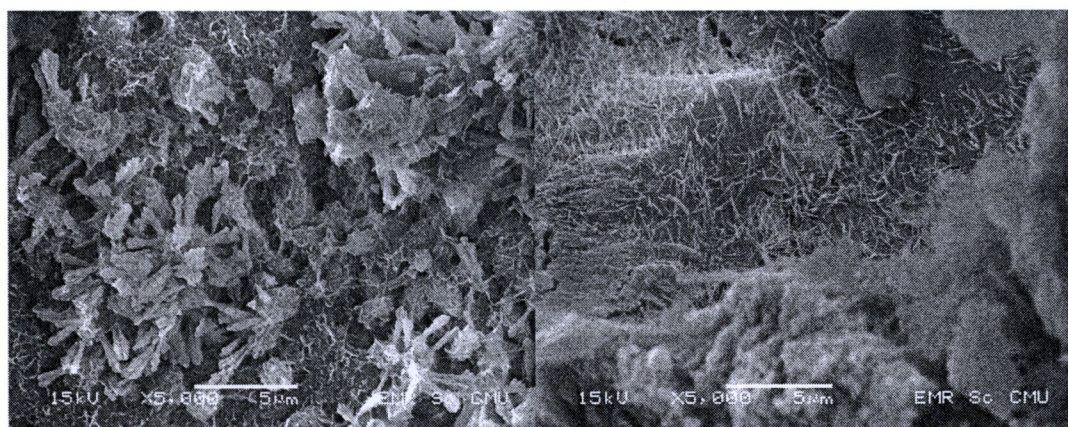
(ค)

(ง)



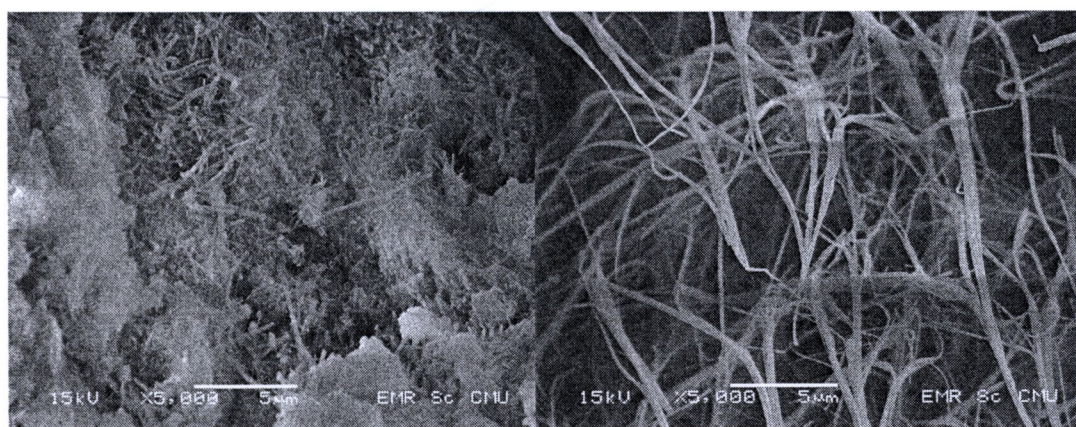
(จ)

รูป 5.15 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 0 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตร้อยละ 5 ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



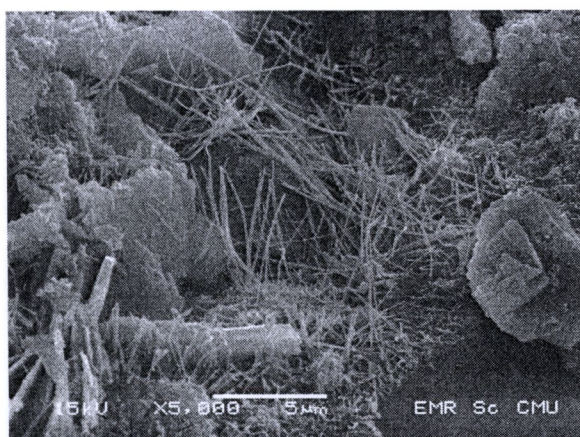
(ก)

(ข)



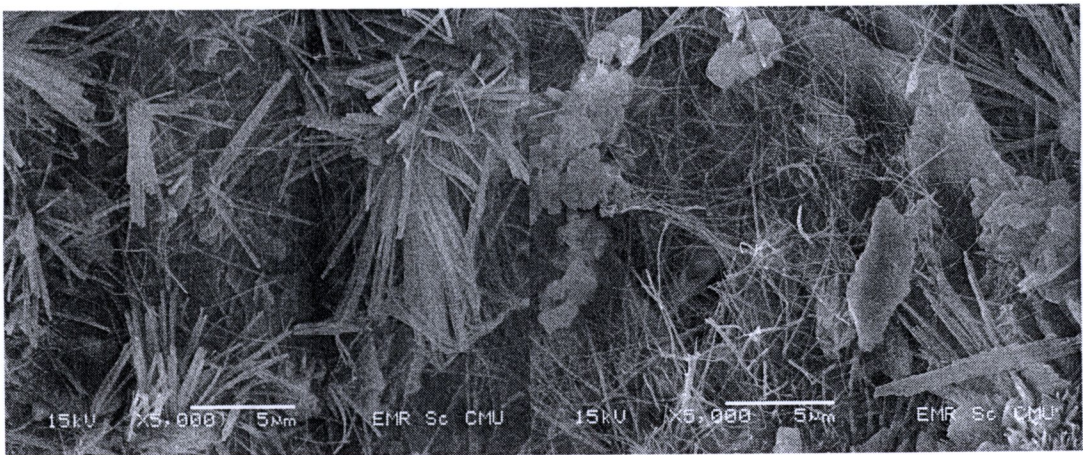
(ค)

(ง)



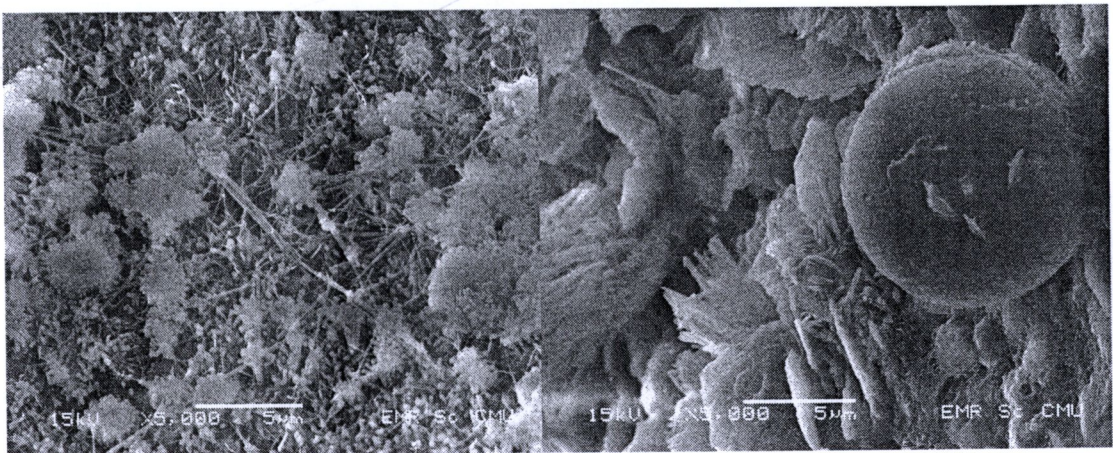
(จ)

รูป 5.16 SEM ของเถาวัลย์ร้อยละ 0 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ร้อยละ 5 ที่อายุวัน 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



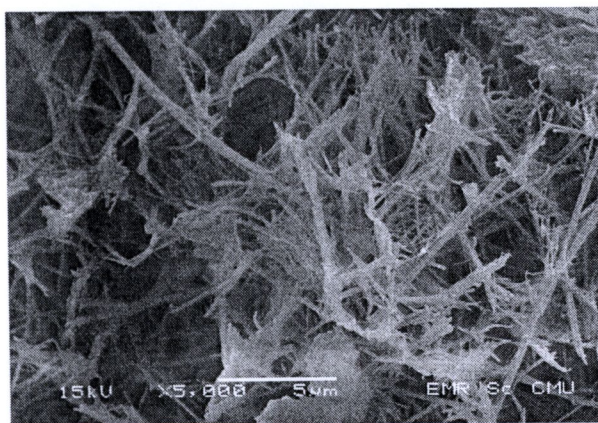
(ก)

(ข)



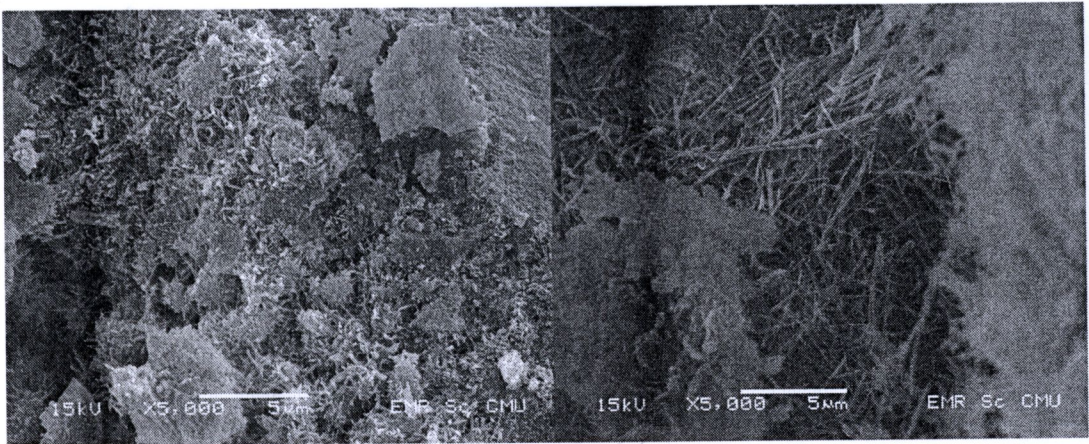
(ค)

(ง)



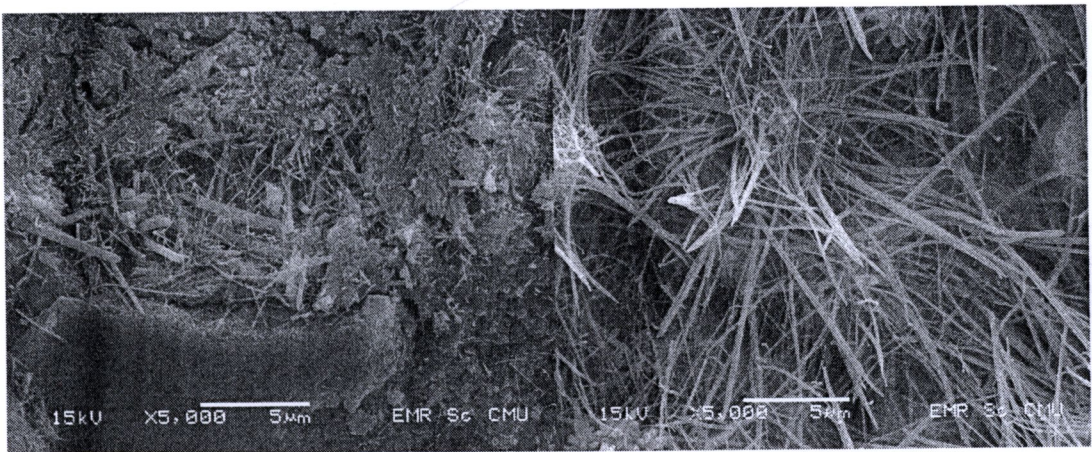
(จ)

รูป 5.17 SEM ของเถาวัลย์ร้อยตะ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยตะ 8 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ร้อยตะ 10 ที่อายุวัน 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



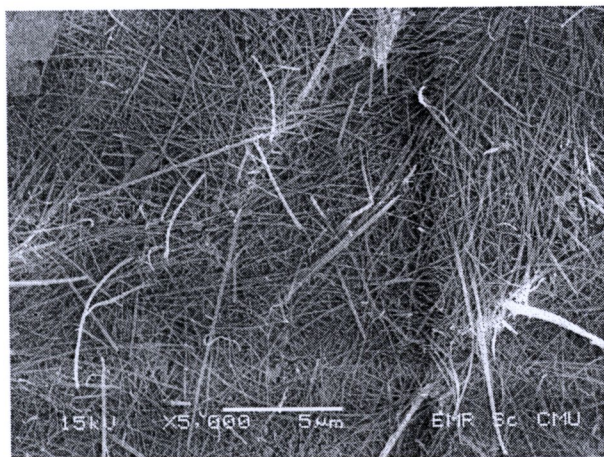
(ก)

(ข)



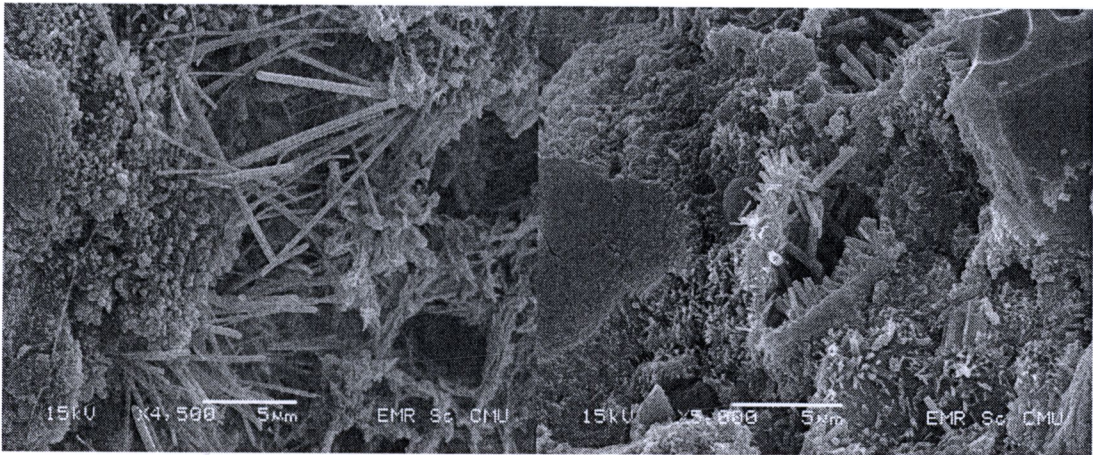
(ค)

(ง)



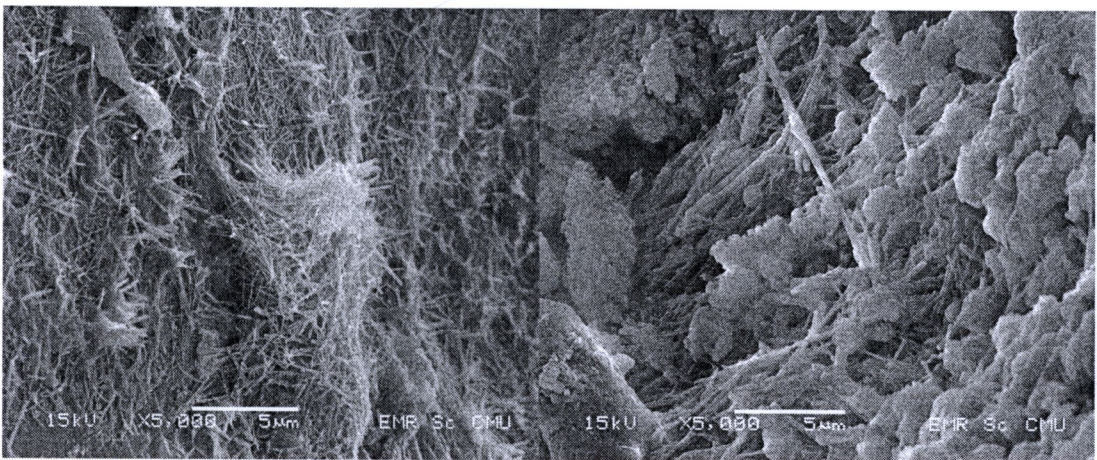
(จ)

รูป 5.18 SEM ของเส้นใยรอยละ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 และ
แคลเซียมซิลิโพลูมินต ร้อยละ 10 ที่อายุวัน 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



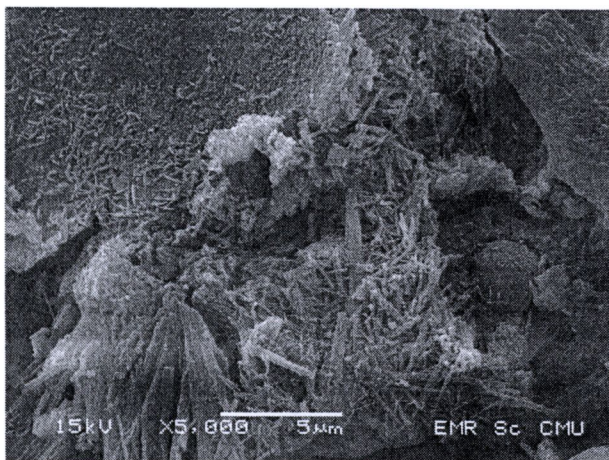
(ก)

(ข)



(ค)

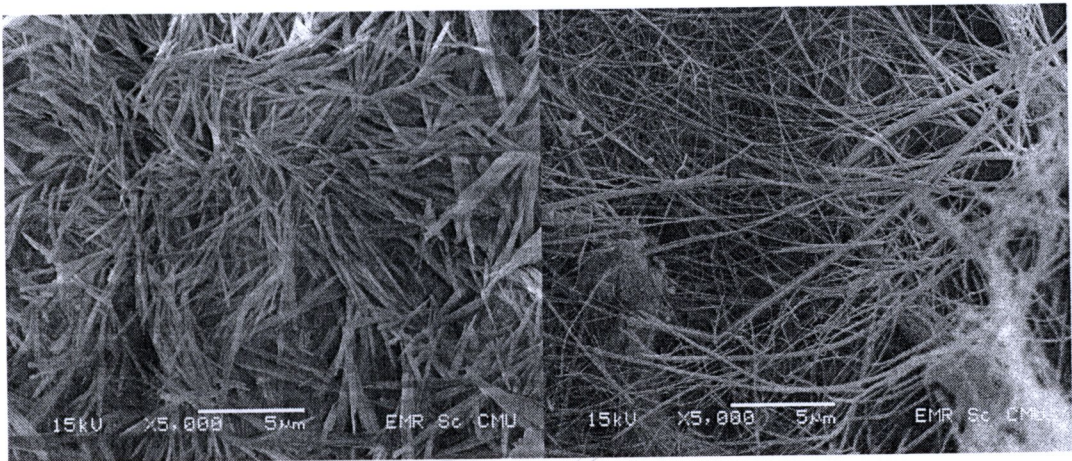
(ง)



(จ)

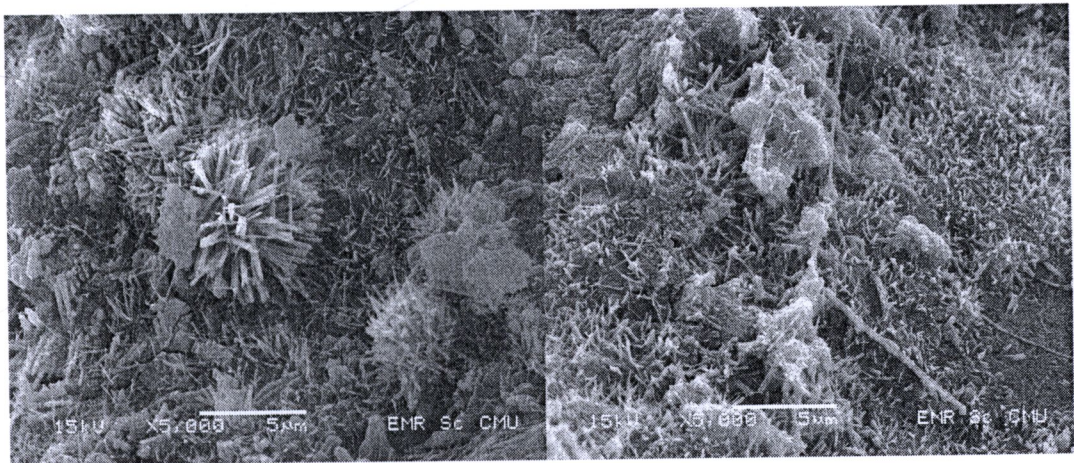


รูป 5.19 SEM ของเถ้าลอยร้อยละ 35 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมินัตร้อยละ 15 ที่อายุวัน 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



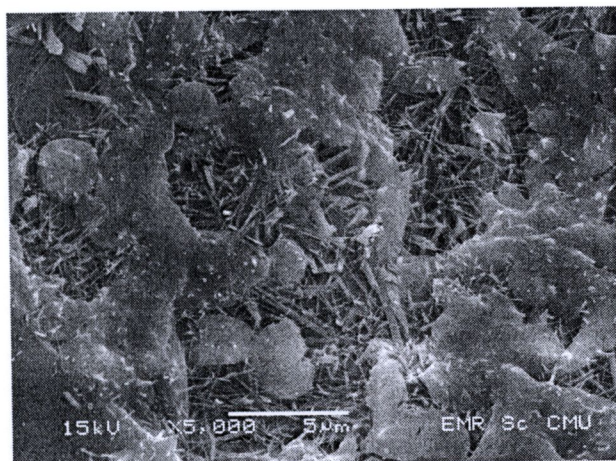
(ก)

(ข)



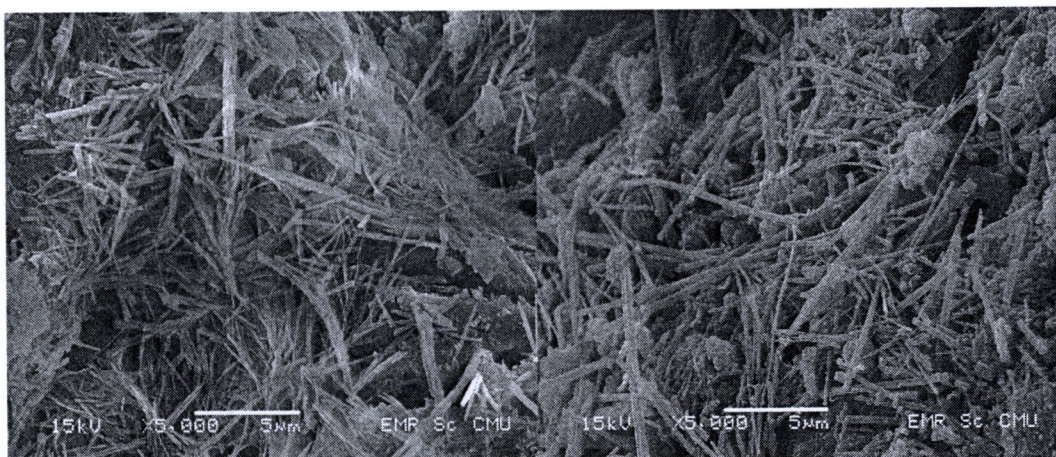
(ค)

(ง)



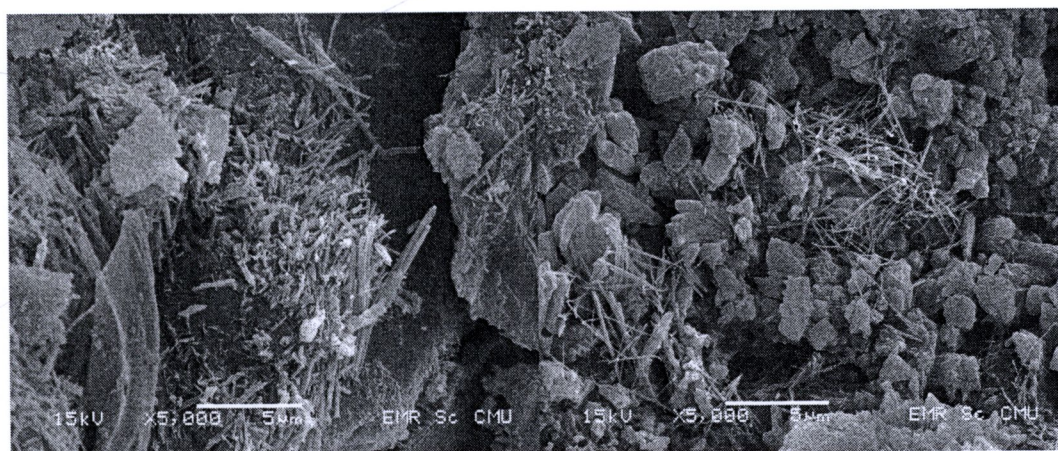
(จ)

รูป 5.20 SEM ของเส้นใยรีดรีด 25 สารผสมเพิ่มประเภท F รีดรีด 8 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต รีดรีด 15 ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



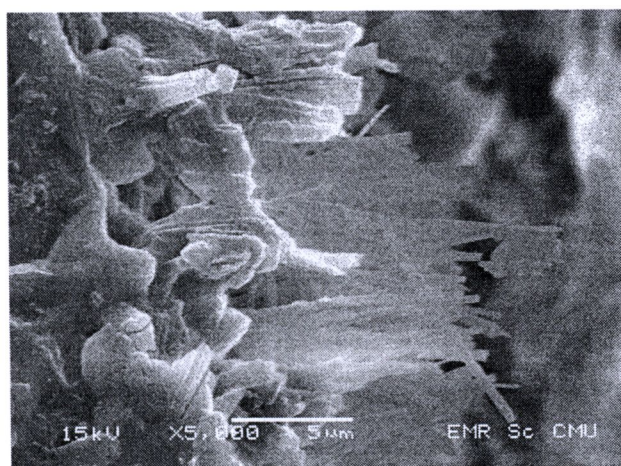
(ก)

(ข)



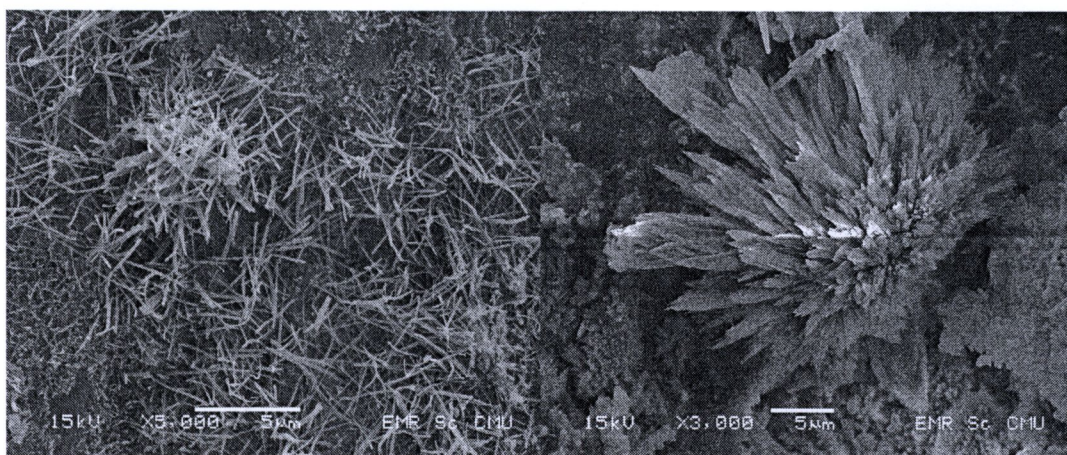
(ค)

(ง)



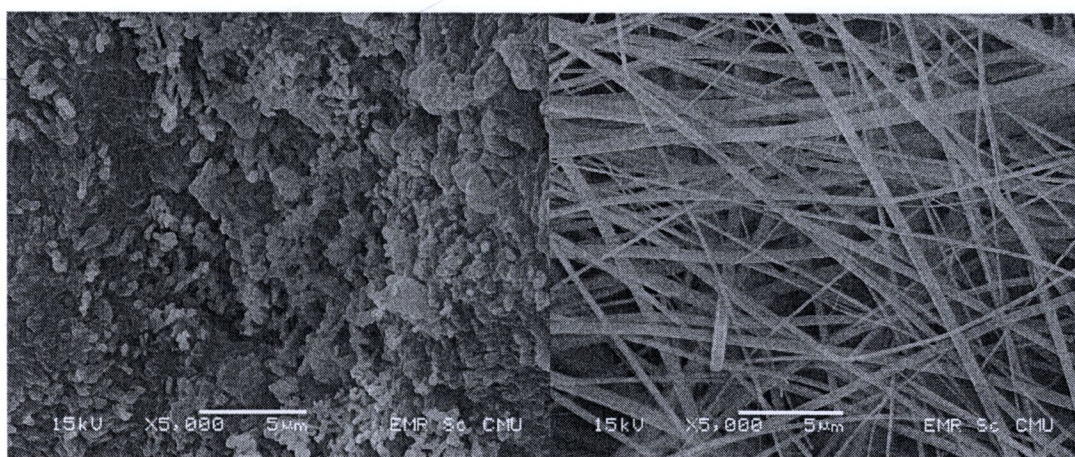
(จ)

รูป 5.21 SEM ของถ้ำลอยร้อยละ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 8 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมินเนตร้อยละ 15 ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



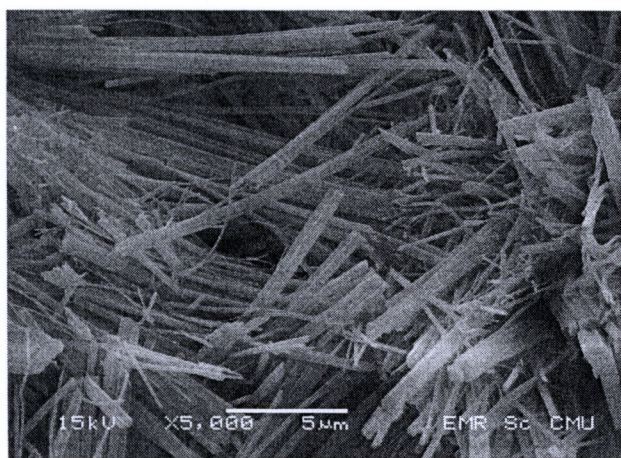
(ก)

(ข)



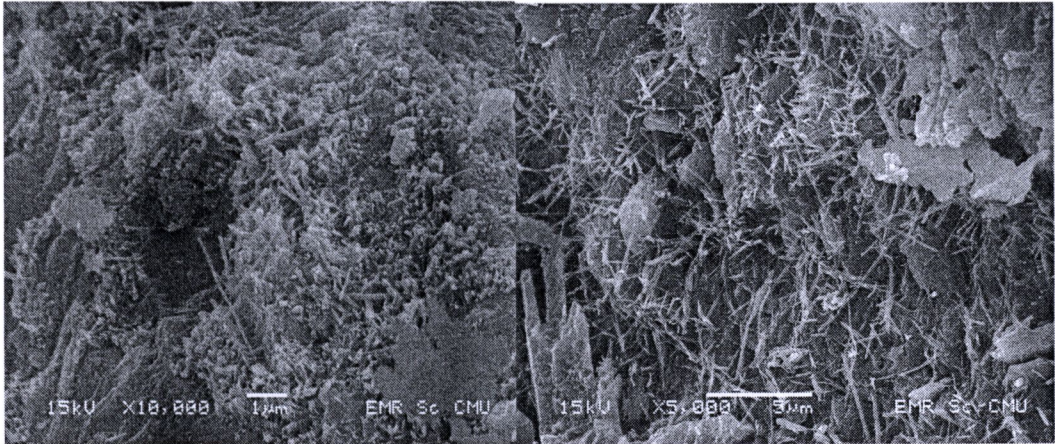
(ค)

(ง)



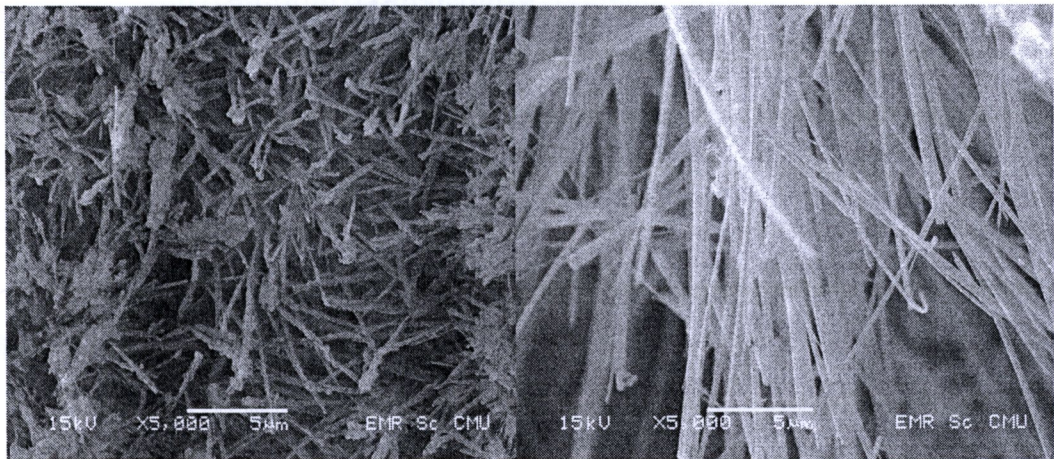
(จ)

รูป 5.22 SEM ของเถาขอยร้อยตะ 15 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยตะ 12 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ร้อยตะ 15 ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน



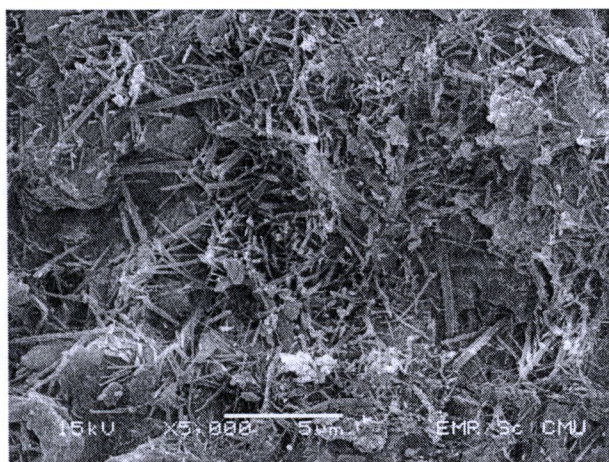
(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

รูป 5.23 SEM ของเถาวัลย์ร้อยละ 0 สารผสมเพิ่มประเภท F ร้อยละ 12 และ
แคลเซียมซัลโฟลูมิเนต ร้อยละ 15 ที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน