

การใช้ซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดในการทำคอนกรีตกำลังสูง

ธีรราช ลีเกียรติกุล¹ วันชัย สะตะ² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดในการทำคอนกรีตกำลังสูง โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ด้วยซิลิกาฟุ่มควบแน่นจากสองแหล่งผลิตในอัตราร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะที่ผ่านการแยกด้วยเครื่อง Air Classifier ให้มีความละเอียดสูงและเล็กจนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมครอน ในอัตราร้อยละ 0, 5, 15, 25 และ 40 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบผลกับการใช้ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แต่ละส่วนผสมคอนกรีตใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.27 โดยให้คอนกรีตมีค่ายุบตัวอยู่ระหว่าง 20 ± 2.5 ซม. ใช้ตัวอย่างทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. เพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ผลการวิจัยพบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดไม่เกินร้อยละ 15 จะได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าหรือเทียบเท่ากับการใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นร้อยละ 10 นอกจากนี้ยังให้กำลังอัดมากกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวตลอดอายุการทดสอบ

¹ อดีตนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Utilization of Condensed Silica Fume and Classified Fly Ash in High Strength Concrete

Theerarach Leekeeratikul¹ Vanchai Sata² and Chai Jaturapitakkul³

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Abstract

This paper illustrates the study of condensed silica fume in combination with classified fly ash to make high strength concrete. Two brands of condensed silica fume were used in this experimental program. Fly ash from Mae Moh power plant was classified by air classifier to have high fineness ($d_{50} = 3.2$ micron). Condensed silica fume at 10% and classified fly ash at 0, 5, 15, 25, and 40% were used to replace Portland cement type I (by weight) to produce high strength concrete in order to compare with control concretes. The water to cementitious material ratio (W/B) of 0.27 was kept constant and the superplasticizer was employed in all concrete mixes to maintain the slump of fresh concrete between 20 ± 2.5 cm. All concrete samples were cast in cylindrical molds of diameter 10-cm and 20-cm in height. They were tested to determine the compressive strength at the ages of 7, 28, 60, 90, and 180 days. The obtained results show that the replacement of cement by 10% of condensed silica fume and classified fly ash not more than 15% can give equal or higher compressive strength than those of the concrete with 10% replacement of condensed silica fume and also higher than the control concretes.

¹ Formerly, Graduate Student, Department of Civil Engineering.

² Graduate Student, Department of Civil Engineering.

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

นักวิจัยคอนกรีตได้ให้ความสนใจคอนกรีตกำลังสูง เนื่องจากคอนกรีตกำลังสูงสามารถลดขนาดและน้ำหนักของโครงสร้างได้โดยเฉพาะในการก่อสร้างอาคารสูงหรือคานที่มีความยาวมากๆ ซึ่งทำให้ขนาดของเสาและฐานรากลดลง ACI 363 [1] กำหนดให้คอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ที่มีกำลังอัดที่อายุ 28 วันมากกว่า 410 กก/ซม² ถือว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูง โดยทั่วไปในการทำคอนกรีตกำลังสูงจะใส่สารเคมีผสมเพิ่มประสิทธิภาพลดน้ำพิเศษเพื่อลดอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ให้ต่ำลง และใส่สารผสมเพิ่มประสิทธิภาพวัสดุปอซโซลานเพื่อเพิ่มกำลังอัดประลัยเมื่อคอนกรีตอายุมากขึ้น โดยวัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง ได้แก่ ซิลิกาฟูม รองลงมาคือเถ้าถ่านหิน

ซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกาเป็นผลพลอยได้จากขบวนการแปรงแร่ควอร์ตบริลูทึเป็นซิลิคอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมครอน องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมมีซิลิคอนออกไซด์มากกว่าร้อยละ 90 มีพื้นที่ผิวสูง และมีโครงสร้างส่วนมากไม่เป็นผลึกจึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ดังนั้นซิลิกาฟูมจึงนิยมใช้ทำคอนกรีตกำลังสูง ซึ่ง Duval และ Kadri [2] พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมในอัตราร้อยละ 10 และ 20 จะได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว

เถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากขบวนการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันประเทศไทยได้นำเอาเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งในการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในคอนกรีตผสมเสร็จ จากรายงานของ ไกรวุฒิและคณะ [3], Slanicka [4] พบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วจึงพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นได้สูงและรวดเร็ว Hague และ Kayali [5] ได้ศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงในการทำคอนกรีตกำลังสูงและได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดอยู่ระหว่าง 940-1110 กก/ซม² เมื่อใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 นอกจากนี้ อีรราชและชัย [6] พบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ถึง 35 สามารถทดแทนการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นร้อยละ 5 ถึง 15 ได้ และมีกำลังอัดในระดับเดียวกัน จากการศึกษาของ Angsuwattana และคณะ [7] พบว่าการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นจะทำให้คอนกรีตมีความต้องการสารลดน้ำพิเศษจำนวนมากกว่าการใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดในขณะที่กำหนดค่ายุบตัวของคอนกรีตเท่ากัน

การศึกษาที่ผ่านมามักเป็นการศึกษาเรื่องการใช้ซิลิกาฟูมหรือเถ้าถ่านหินแต่เพียงอย่างเดียวในการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูง แต่การศึกษาถึงการใช้วัสดุปอซโซลานทั้งสองร่วมกันในคอนกรีตกำลังสูงยังมีค่อนข้างน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เถ้าถ่านหินที่ผลิตในประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นร่วมกับเถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะที่ผ่านการแยกละเอียดเพื่อแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำคอนกรีตกำลังสูง

2. วัตถุประสงค์

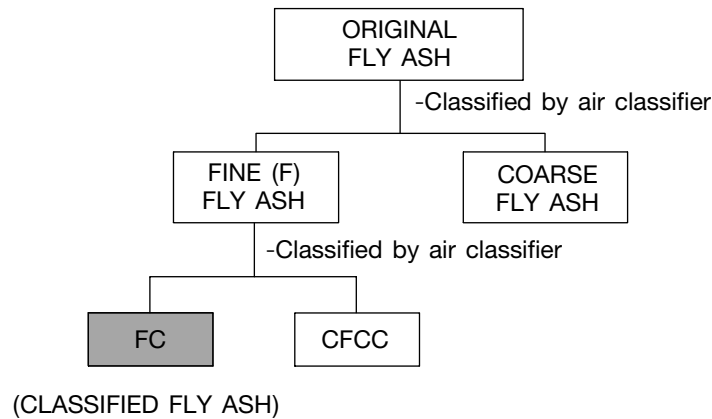
การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ซิลิกาฟวมควบแน่นร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละเอียด ในการทำคอนกรีตกำลังสูงและเปรียบเทียบกำลังอัดกับการใช้ซิลิกาฟวมควบแน่นเพียงอย่างเดียว

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

ปูนซีเมนต์	ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150
เถ้าถ่านหิน	ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะที่นำมาผ่านการแยกให้มีความละเอียดสูงด้วยเครื่อง Air Classifier จนมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมครอน ซึ่งเถ้าถ่านหินดังกล่าวประมาณร้อยละ 90 มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน โดยขบวนการแยกแสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งเถ้าถ่านหินแยกขนาดที่นำมาใช้ศึกษาคือ “FC”
ซิลิกาฟวม	เป็นซิลิกาฟวมควบแน่นที่มีจำหน่ายในประเทศไทยจากสองแหล่งผลิต ใช้สัญลักษณ์คือ SI และ SII
สารลดน้ำพิเศษ	ใช้ประเภท F ชนิดแนฟทาลีน (Sulphonated Naphthalene Formaldehyde) โดยใส่สารลดน้ำพิเศษทุกส่วนผสมทั้งนี้เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ตามที่กำหนด
น้ำ	ใช้น้ำประปา
หิน	ใช้หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุด 12 มม. ล้างน้ำจนสะอาด
ทราย	ใช้ทรายน้ำจืดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 ล้างน้ำจนสะอาด



รูปที่ 1 ขบวนการแยกแ่้าผ่านหินละเอียดด้วยเครื่อง Air Classifier

3.2 ส่วนผสมคอนกรีต

เนื่องจากการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแ่้าผ่านหินโดยการแยกละเอียดมาใช้ร่วมกับซิลิกาฟูมควมแน่นในการทำคอนกรีตกำลังสูง จึงกำหนดทุกสัดส่วนผสมให้มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 554 กก/ม³ อัตราส่วนทรายต่อหินเท่ากับ 45:55 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.27 ใช้สารลดน้ำพิเศษปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 20 ± 2.5 ซม.

ส่วนผสมคอนกรีตแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นคอนกรีตควบคุม (control) ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว กลุ่มที่สอง (SI10, SII10) เป็นคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูม SI และ SII แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งสัดส่วนนี้ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดในการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมทั้งสองชนิด [6] ส่วนกลุ่มสุดท้าย เป็นคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูม SI และ SII ร้อยละ 10 ร่วมกับแ่้าผ่านหินแยกละเอียด (FC) อีกร้อยละ 5, 15, 25 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานในการแทนที่ปูนซีเมนต์ เช่น SI10FC05 หมายถึง คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม SI ร้อยละ 10 ร่วมกับแ่้าผ่านหินแยกละเอียดอีกร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เป็นต้น สำหรับอัตราส่วนผสมต่างๆ แสดงในตารางที่ 1 จากนั้นผสมคอนกรีตและเก็บตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. หลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมง ทำการถอดแบบแล้วป่มในน้ำสะอาด ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ในการศึกษา

Mix No.	Symbol	Mix Proportion (kg/m ³)								W/B	Slump (mm)
		Cement	SI	SII	FC	Sand	Agg.	Water	Super P.		
1	Control	554	-	-	-	780	976	146.3	5.54	0.27	190
2	SI10	499	55	-	-	771	965	140.4	15.23	0.27	190
3	SII10	499	-	55	-	771	965	140.4	15.23	0.27	200
4	SI10FC05	471	55	-	28	768	961	142.9	11.08	0.27	205
5	SI10FC15	416	55	-	83	761	954	144.9	7.85	0.27	200
6	SI10FC25	360	55	-	139	755	946	146.4	5.31	0.27	190
7	SI10FC40	277	55	-	222	745	934	147.0	4.38	0.27	185
8	SII10FC05	499	-	55	28	767	961	143.5	10.16	0.27	190
9	SII10FC15	416	-	55	83	761	953	144.9	7.85	0.27	200
10	SII10FC25	360	-	55	139	754	945	146.3	5.54	0.27	205
11	SII10FC40	277	-	55	222	744	933	146.8	4.52	0.27	215

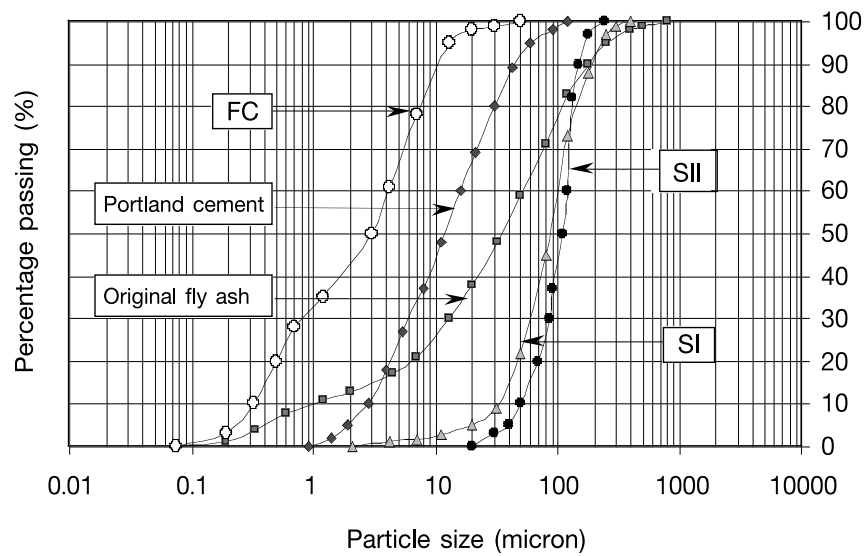
4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติของวัสดุประสาน

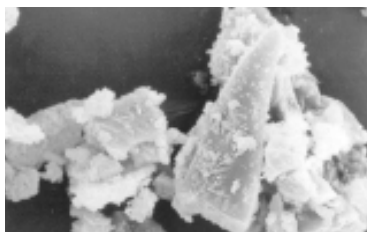
ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน ส่วนผลการวิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาคแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงว่าหลังจากการแยกแฉาด้านหินให้มีความละเอียดมากขึ้น แฉาด้านหินมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงจาก 28.5 ไมครอน เป็น 3.2 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะเพิ่มจาก 2.02 เป็น 2.40 ส่วนความละเอียดโดยวิธีเบลนเพอร์มีอะบิลิตี้ มีค่าเท่ากับ 5330 ซม²/ก ในขณะที่ความละเอียดของแฉาด้านหินที่ไม่ได้ผ่านการแยกละเอียดและปูนซีเมนต์มีค่าเป็น 2370 และ 3230 ซม²/ก ตามลำดับ ลักษณะผิวของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอน ส่วนแฉาด้านหินแยกละเอียดและซิลิกาฟูมมีรูปร่างกลมมน ดังในรูปที่ 3 ซึ่งผลการศึกษาค้นนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Angsuwattana และคณะ [7] ที่พบว่าแฉาด้านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะที่ผ่านการแยกด้วยเครื่อง Air Classifier เป็นแฉาด้านหินที่มีความละเอียดสูงและยังคงมีรูปร่างกลมมน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Property	portland cement	original fly ash	classified fly ash	silica fume (SI)	silica fume (SII)
Specific gravity	3.14	2.02	2.40	2.22	2.19
Retained on sieve No. 325 (%)	4.7	37.4	0.0	1.6	2.8
Blaine fineness (cm ² /g)	3230	2370	5330	-	-
Median particle size, d ₅₀ (micron)	12.0	28.5	3.2	89.0	105.0



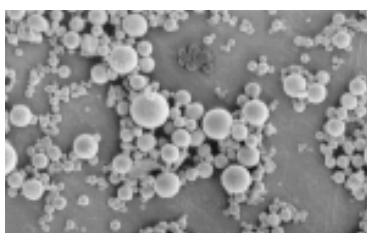
รูปที่ 2 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน



ก. ปูนซีเมนต์



ข. ซิลิกาฟุมควบแน่น



ค. เถ้าถ่านหินแยกละเอียด

รูปที่ 3 ภาพขยายกำลังสูงของวัสดุประสาน

ตารางที่ 3 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน พบว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดและผ่านการแยกละเอียดมีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกันและจัดอยู่ใน Class F ตาม ASTM C 618 เนื่องจากมีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 83.39 และ 80.61 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 มีค่า LOI (Loss On Ignition) และปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 6 และ 5 ตามลำดับ สำหรับซิลิกาฟุม SI และ SII มีปริมาณ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 93.80 และ 94.09 มีค่า LOI เท่ากับร้อยละ 4.89 และ 4.65 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด ASTM C 1240 ที่กำหนดให้ซิลิกาฟุมต้องมีปริมาณ SiO_2 มากกว่าร้อยละ 85 และมีค่า LOI น้อยกว่าร้อยละ 6

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical compositions (%)	cement type 1	original fly ash	classified fly ash (FC)	silica fume (SI)	silica fume (SII)
SiO ₂	21.16	46.25	46.28	93.80	94.09
Al ₂ O ₃	6.04	26.43	24.16	0.21	0.17
Fe ₂ O ₃	3.15	10.71	10.17	0.09	0.07
SO ₃	2.88	1.85	0.81	-	-
CaO	63.96	7.61	12.06	0.12	0.18
MgO	0.87	2.21	2.78	0.33	0.34
Na ₂ O	0.05	1.11	0.08	-	-
K ₂ O	0.54	3.07	3.20	0.38	0.35
Loss on ignition	1.39	0.23	2.70	4.89	4.65

4.2 คอนกรีตสด

จากการควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้คงที่เท่ากับ 0.27 และใช้สารลดน้ำพิเศษปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 20 ± 2.5 ซม. ผลในตารางที่ 1 แสดงว่าคอนกรีตที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มควมแน่นทั้งสองชนิดในอัตราร้อยละ 10 ต้องใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษในปริมาณที่มากกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้เป็นเพราะว่าหลังจากที่ซิลิกาฟุ่มควมแน่นแตกตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ถึง 100 เท่า ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้นจึงต้องใช้สารลดน้ำพิเศษมากขึ้นเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามที่ต้องการ [7] ในขณะที่การนำเม็ดถ่านหินแยกละเอียดในอัตราร้อยละ 5, 15, 25 และ 40 มาใช้ร่วมกับซิลิกาฟุ่มควมแน่นร้อยละ 10 จะใช้ปริมาณสารลดน้ำพิเศษลดลง และจะลดลงตามปริมาณของเม็ดถ่านหินแยกละเอียดที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าอนุภาคของเม็ดถ่านหินแยกละเอียดแม้ว่าจะมีขนาดเล็กประมาณ 3.2 ไมครอน แต่ยังมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของซิลิกาฟุ่มที่แตกตัวแล้วอย่างมาก นอกจากนี้ยังมีรูปร่างที่กลมมน ผิวเรียบ ทำให้คอนกรีตไหลลื่นและทำงานได้ง่ายขึ้น [8] ส่งผลให้การใช้สารลดน้ำพิเศษน้อยกว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มควมแน่นเพียงอย่างเดียว

4.3 กำลังอัดของคอนกรีต

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตและการเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม แสดงดังตารางที่ 4 พบว่าทุกๆ ส่วนผสมถือได้ว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงเนื่องจากกำลังอัดที่ 28 วันมีค่ามากกว่า 410 กก/ซม² โดยกำลังอัดที่อายุ 28 วันต่ำที่สุดคือคอนกรีต SII10FC40 มีค่าเท่ากับ 637 กก/ซม² และกำลังอัดสูงสุดเท่ากับ

937 กก/ชม² ในคอนกรีต SI10 ส่วนคอนกรีตควบคุม มีค่าเท่ากับ 749 กก/ชม²

ตารางที่ 4 กำลังอัดของคอนกรีตในส่วนผสมต่างๆ

Mix No.	Symbol	Compressive Strength (ksc)					Normalized Comp. Strength (%)				
		7-d	28-d	60-d	90-d	180-d	7-d	28-d	60-d	90-d	180-d
1	Control	580	749	837	874	912	100	100	100	100	100
2	SI10	710	973	962	976	1002	122	125	115	112	110
3	SII10	725	858	885	902	933	125	115	106	103	102
4	SI10FC05	768	903	951	973	1008	132	121	114	111	111
5	SI10FC15	769	902	943	959	996	133	120	113	110	109
6	SI10FC25	673	807	860	881	914	116	108	103	101	100
7	SI10FC40	592	702	750	770	804	102	94	90	88	88
8	SII10FC05	762	860	928	970	1000	131	115	111	111	110
9	SII10FC15	724	797	876	913	945	125	106	105	104	104
10	SII10FC25	666	735	797	834	873	115	98	95	95	96
11	SII10FC40	545	637	711	753	793	94	85	85	86	87

4.3.1 ผลของการใช้ซิลิกาฟุ่ม SI และ SII ที่ร้อยละ 10 ต่อกำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม SI และ SII ร้อยละ 10 ที่อายุต่างๆ กัน แสดงดังตารางที่ 4 ใน Mix No. 2 และ 3 พบว่าที่อายุ 7 วันกำลังอัดมีค่าเป็น 710 และ 725 กก/ชม² ในคอนกรีต SI10 และ SII10 ตามลำดับ เมื่อคอนกรีตอายุเพิ่มมากขึ้นปริมาณของ SiO₂ ที่มีสูงกว่าร้อยละ 93 ในซิลิกาฟุ่ม ความแน่นทั้งคู่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ Ca(OH)₂ ได้อย่างรวดเร็วจึงพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากจนอายุ 28 วัน ซึ่งมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 937 และ 858 กก/ชม² ในคอนกรีต SI10 และ SII10 ตามลำดับ ซึ่งเพิ่มขึ้น 227 และ 133 กก/ชม² ในช่วงเวลา 21 วัน จากนั้นการพัฒนาำลังอัดเริ่มช้าลงเมื่อคอนกรีตอายุมากขึ้นโดยมีค่าเป็น 1002 และ 933 กก/ชม² ที่อายุ 180 วัน ถ้าพิจารณาเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม พบว่าที่อายุไม่เกิน 28 วันคอนกรีตที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัดโดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 115 ถึง 125 แต่เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังอัดมีค่าเป็นร้อยละ 110 และ 102 ตามลำดับ ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 180 วัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hassan และคณะ [9] ที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต ซึ่งให้เห็นว่าซิลิกาฟุ่มสามารถเพิ่มกำลังอัดที่ระยะต้นและระยะยาวของคอนกรีตให้สูงกว่าคอนกรีตที่ไม่ใช้ซิลิกาฟุ่ม

4.3.2 ผลของการใช้ซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละเยียดต่อกำลังอัดของ

คอนกรีต

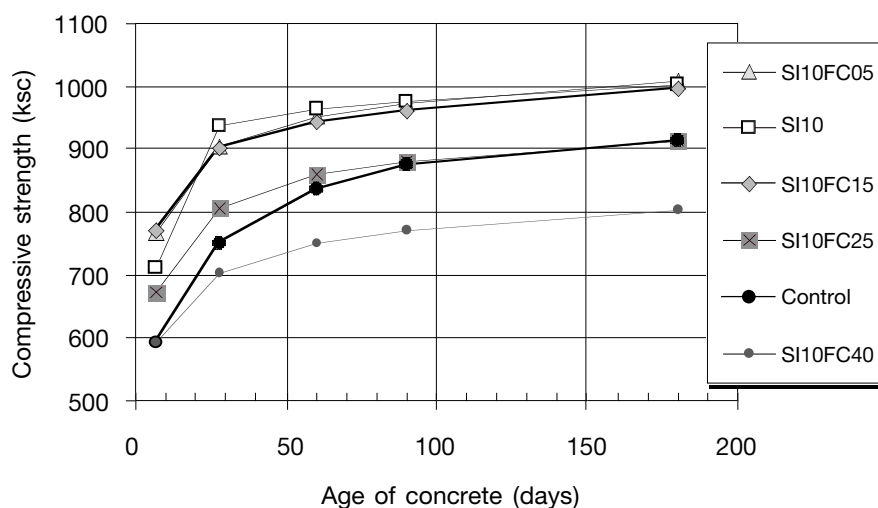
ผลการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละเยียด (FC) ร้อยละ 5, 15, 25, และ 40 แสดงในตารางที่ 4 ตั้งแต่ Mix No. 4 ถึง 7 ส่วนรูปที่ 4 ก. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหิน FC ร้อยละ 5, 15, 25, และ 40 ที่อายุต่างๆ พบว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุ 7 วันถึง 28 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นระหว่าง 110 ถึง 135 กก/ซม² ทำให้กำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่าเท่ากับ 903, 902, 807, และ 702 กก/ซม² ตามลำดับ จากนั้นการพัฒนากำลังอัดยังดำเนินต่อไปเรื่อยๆ เมื่อสังเกตส่วนผสม SI10FC05 กับ SI10FC15 จะเห็นว่าคอนกรีตทั้งคู่มีกำลังอัดใกล้เคียงกันมากซึ่งมีค่าสูงกว่าคอนกรีต SI10FC25 และ SI10FC40 ตลอดอายุการทดสอบ

ส่วนในรูปที่ 5 ก. แสดงกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม เห็นได้ว่าการใช้ SI ร้อยละ 10 ร่วมกับ FC ในปริมาณร้อยละ 5 และ 15 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 109 ถึง 133 ตลอดอายุการทดสอบ ส่วนคอนกรีต SI10FC25 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 108 ถึง 116 ที่อายุไม่เกิน 28 วัน เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นจะมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อยจนสิ้นสุดการทดสอบ ทั้งนี้เพราะว่าการแทนที่ด้วยซิลิกาฟุ่มร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละเยียดจะเกิดผลดีของวัสดุทั้งสองชนิดร่วมกันคือซิลิกาฟุ่มที่อนุภาคขนาดเล็กจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็วทำให้การพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นๆ ได้ดี ในขณะที่เถ้าถ่านหินแกละเยียดที่มีอนุภาคค่อนข้างเล็กจะเยียดที่สามารถเข้าไปอุดช่องว่างเล็กๆ ระหว่างปูนซีเมนต์และหินหรือทรายได้ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้น และรูปร่างที่กลมมนของเถ้าถ่านหินจะทำให้คอนกรีตไหลลื่นและทำงานได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Shannag [10] ที่ใช้สารปอซโซลานจากธรรมชาติร่วมกับซิลิกาฟุ่มในการทำคอนกรีตกำลังสูง พบว่าได้คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่าการใช้สารปอซโซลานหรือซิลิกาฟุ่มเพียงอย่างเดียว แต่ทั้งนี้จะให้กำลังอัดสูงในช่วงที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 ร่วมกับสารปอซโซลานไม่เกินร้อยละ 15

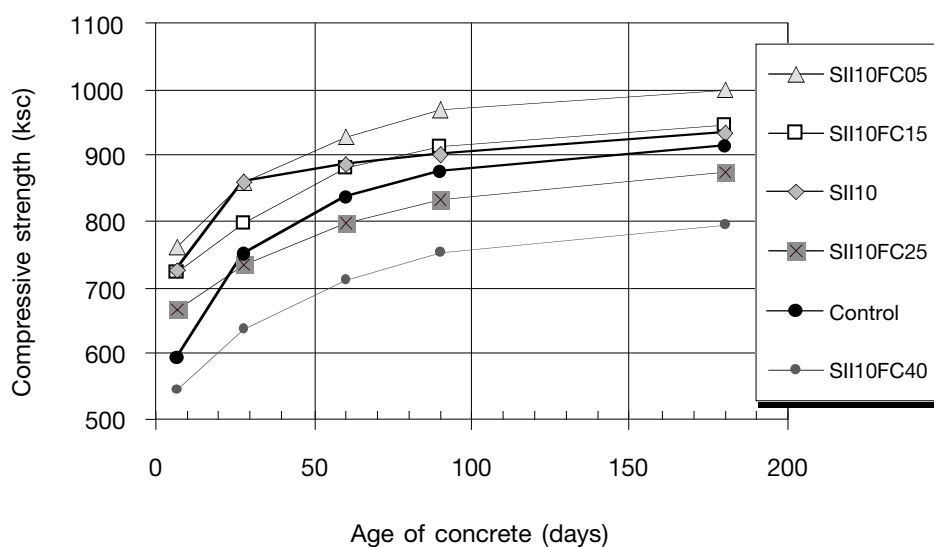
อย่างไรก็ตาม คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหิน FC ร้อยละ 40 ให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมตั้งแต่อายุทดสอบ 7 วันจนถึง 180 วัน ทั้งนี้เพราะว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานมากถึงร้อยละ 50 (ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 และเถ้าถ่านหินแกละเยียดร้อยละ 40) ส่งผลให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงจนทำให้ Ca(OH)_2 ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับวัสดุปอซโซลานทั้งสองชนิดกำลังอัดจึงต่ำลง นอกจากนั้นปริมาณสารปอซโซลานที่ใส่เข้าไปเป็นส่วนเกินจากช่องว่างในเนื้อคอนกรีต ทำให้คอนกรีตไม่แน่นตัวทำให้กำลังอัดลดลง [10] แสดงว่าการใช้เถ้าถ่านหิน FC ในปริมาณมากเกินไปผสมร่วมกับซิลิกาฟุ่มจะเป็นผลเสียต่อกำลังของคอนกรีต ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้เถ้าถ่านหิน FC ในปริมาณสูงขณะที่การใช้ซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหิน FC ในปริมาณร้อยละ 5 ถึง 15 จะมีกำลังอัดใกล้เคียงกันซึ่งทั้งคู่จะให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหิน FC ร้อยละ 25 ขึ้นไป

รูปที่ 5 แสดงค่าร้อยละกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตแทนที่ด้วย SI, SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละเยียด ร้อยละ 0, 5, 15, 25 และ 40 แสดงให้เห็นว่าในช่วงอายุต้นๆ (7-28 วัน) คอนกรีตที่ผสมด้วย SI, SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละเยียดไม่เกินร้อยละ 15 มีการพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมมาก หลังจาก

นั้นค่อยๆ ลดลงและค่อนข้างคงที่เมื่ออายุ 90 วัน ทั้งนี้เพราะว่ากำลังอัดที่สูงขึ้นของคอนกรีตขึ้นอยู่กับผลของปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดตัว (packing effect) จากการที่คอนกรีตมีซิลิกาฟุ่มซึ่งมีอนุภาคขนาดเล็กมากเป็นส่วนผสม ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดตัวได้รวดเร็วมากที่อายุต้นๆ ส่งผลให้กำลังอัดเพิ่มสูงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นการพัฒนากำลังอัดจะช้าลง เนื่องจากได้ทำปฏิกิริยาไปส่วนใหญ่แล้ว

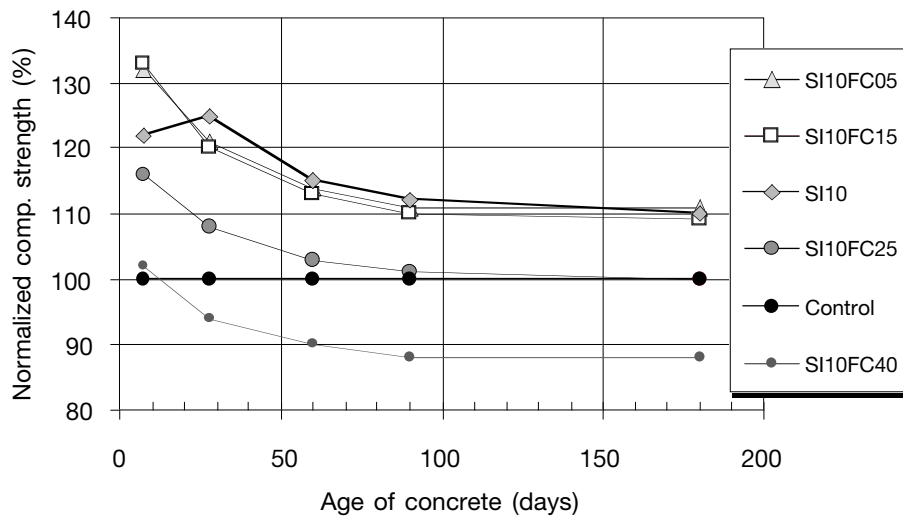


ก. ซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10

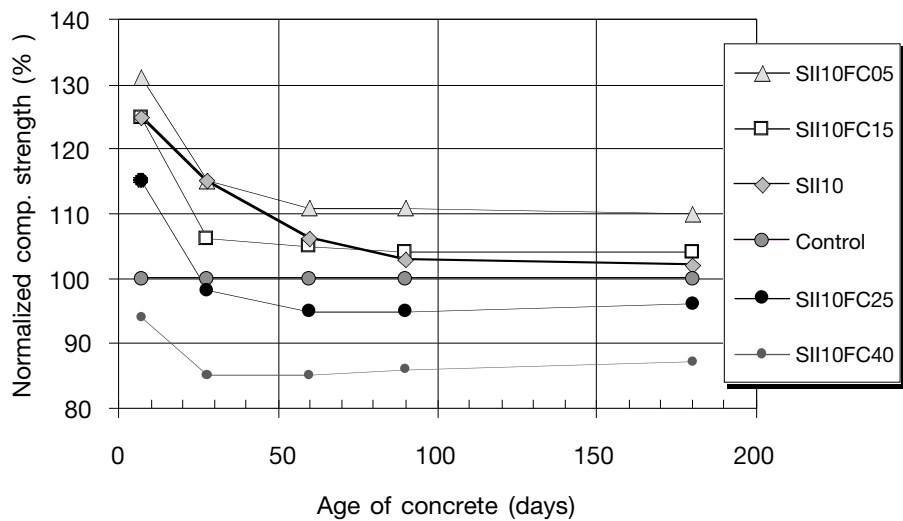


ข. ซิลิกาฟุ่ม SII ร้อยละ 10

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตแทนที่ด้วย SI, SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละละเอียด ร้อยละ 0, 5, 15, 25 และ 40



ก. ซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10



ข. ซิลิกาฟุ่ม SII ร้อยละ 10

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตแทนที่ด้วย SI, SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 0, 5, 15, 25 และ 40

4.3.3 ผลของการใช้ซิลิกาฟุ่ม SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดต่อกำลังอัดของคอนกรีต

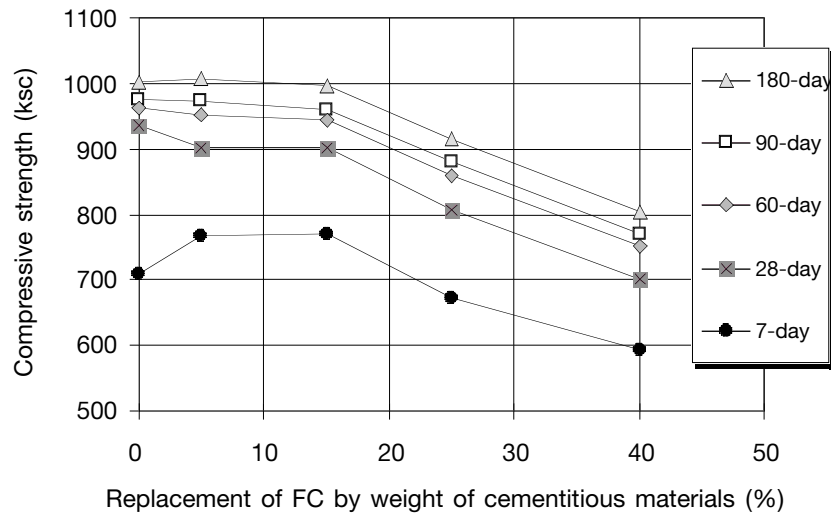
ผลการทดสอบกำลังคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหิน FC ร้อยละ 5, 15, 25, และ 40 แสดงในตารางที่ 4 ตั้งแต่ Mix No. 8 ถึง 11 ส่วนรูปที่ 4 ข. และ 5 ข. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดกับอายุของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหิน FC ร้อยละ 5, 15, 25, และ 40 พบว่าการพัฒนากำลังอัดและความชันของเส้นกราฟในรูปมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกันกับคอนกรีตแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหิน FC ร้อยละ 5, 15, 25, และ 40 แต่มีกำลังอัดที่ต่ำกว่า ความแตกต่างของกำลังอัดดังกล่าวอาจมีสาเหตุมาจากขบวนการผลิตและคุณภาพของซิลิกาฟุ่มควบแน่นแต่ละชนิด

รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม SI และ SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหิน FC ร้อยละ 5, 15, 25, และ 40 ที่อายุต่างๆ พบว่าการใช้ซิลิกาฟุ่มทั้งสองแหล่งผลิตที่ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดไม่เกินร้อยละ 15 ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดมากกว่าหรือเทียบเท่ากับการใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 10 เพียงอย่างเดียว ในขณะที่การใช้ร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดที่ร้อยละ 25 และ 40 จะให้กำลังอัดต่ำกว่า

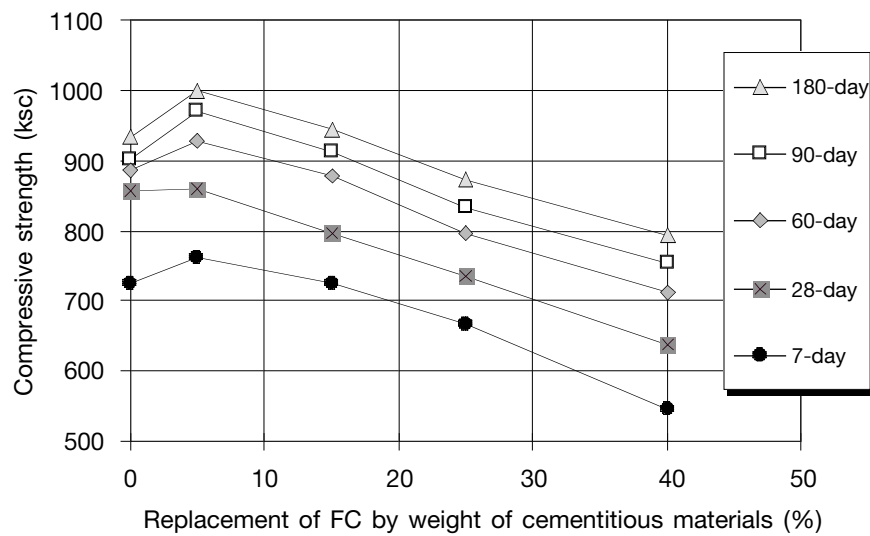
5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย การใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดในการทำคอนกรีตกำลังสูง สรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่มควบแน่นร้อยละ 10 สามารถทำคอนกรีตกำลังสูงที่ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดอายุการทดสอบ โดยมีค่าเป็นร้อยละ 102 ถึง 125 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม
2. การใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแยกละเอียดในปริมาณไม่เกินร้อยละ 15 ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าเป็นร้อยละ 104 ถึง 133 และให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับการใช้ซิลิกาฟุ่มควบแน่นร้อยละ 10 แต่จะใช้ปริมาณปูนซีเมนต์และสารลดน้ำพิเศษน้อยกว่าในขณะที่มีค่ายุบตัวของคอนกรีตเท่ากัน



ก. ซีลิกาฟุ่ม SI ร้อยละ 10



ข. ซีลิกาฟุ่ม SII ร้อยละ 10

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย SI, SII ร้อยละ 10 ร่วมกับเถ้าถ่านหินแกละเอียด ร้อยละ 0, 5, 15, 25 และ 40 ที่อายุต่างๆ กัน

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนจากโครงการทุนส่งเสริมวิชาชีพวิจัย จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.) นอกจากนี้ขอขอบคุณภาคีวิศวกรกรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความสะดวกด้านธุรการ อุปกรณ์เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการ

7. เอกสารอ้างอิง

1. ACI Committee 363, 2000, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete," ACI 363R-92, *ACI Manual of Concrete Practice Part I*, American Concrete Institute, Detroit, 47 pp.
2. Duval, R. and Kadri, E. H., 1998 "Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 533-547.
3. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรรณิสรากุล, พยุร เกตุกราย, อำนาจ เลิศประเสริฐวงศ์, พิชัย นิमितยงสกุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย และทิน เกตุรัตน์บวร, 2540, "บทบาทความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัดและการกักร้อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์," *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 3*, สงขลา, หน้า MAT (2-1)- (2-10).
4. Slanicka, S., 1980, "The Influence of Fly Ash Fineness on the Strength of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, No. 2/3, pp. 285-296.
5. Haque, M. N. and Kayali, O., 1998, "Properties of High-Strength Concrete Using a Fine Fly Ash," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 10, pp. 1445-1452.
6. อีรราช ลีเกียรติกุล และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543, "การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดทดแทนซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตกำลังสูง," *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ฉบับที่ 4, ปีที่ 11, หน้า 22-28.
7. Angsuwattana, E., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Ketratanabovorn, T., 1998, "Use of Classified Mae Moh Fly Ash in High Strength Concrete," *Supplementary Paper of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Bangkok, Thailand, pp. 49-60.
8. Chutubtim, S., Songpiriyakij, S., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., 1999, "A Comparative Study on Properties and Compressive Strength of 5-source Fly Ashes Concrete," *Proceedings of Inter-Regional Symposium on Sustainable Development (ISSD)*, Kanchanaburi, Thailand, pp. 360-369.

9. Hassan, K. E., Cabrera, J. G., and Maliehe, R. S., 2000, "The Effect of Mineral Admixtures on the Properties of High-Performance Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, pp. 267-271.

10. Shannag, M. J., 2000, "High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 22, pp. 399-406.