การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดทดแทนซิลิกาฟูมในการทำคอนกรีตกำลังสูง

Utilization of classified fly ash as a replacement of silica fume in high strength concrete

ธีรราช ลีกีรติกุล และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

โทร.470-9133 โทรสาร 427-9063 E-mail : chai.jat@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเถ้าถ่านหินเพื่อใช้แทนซิลิกาฟูมควบแน่นในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง โดยนำเถ้าถ่านหินแม่เมาะผ่านการแยกด้วยเครื่อง Air Classifier ให้มีความละเอียดสูงได้เป็น เถ้าถ่านหินแยกละเอียด มีรูปร่างทรงกลม ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมครอน จากนั้นนำเถ้าถ่านหินแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ I ในปริมาณร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นจากสองแหล่งผลิตแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก ผลการวิจัยพบว่าคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมควบแน่นให้กำลังอัดสูงที่สุด ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ให้กำลังอัดสูงสุด การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 ถึง 35 สามารถใช้แทนซิลิกาฟูมควบแน่นร้อยละ 5 ถึง 15 ได้ เนื่องจากมีกำลังอัดใกล้เคียงกันเมื่อคอนกรีตมีอายุ 180 วัน นอกจากนี้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 15 ถึง 50 มีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 180 วัน แสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีศักยภาพสูงที่จะนำไปใช้แทนที่ซิลิกาฟูมควบแน่นหรือทำคอนกรีตกำลังสูง

Abstract

This paper presents the improvement of fly ash in order to replace the imported condensed silica fume to make high strength concrete. Mae Moh fly ash was classified by air classifier to have high fineness. The classified fly ash has spherical shape with average particle size of 3.2 micron. The classified fly ash was used to replace Portland cement type I with the replacement content of 0, 15, 25, 35 and 50% by weight in order to produce high strength concrete. In addition, 2 samples of condensed silica fume obtained from different sources were also used to produce high strength concrete with cement replacement of 5, 10 and 15% by weight. Compressive strength of concretes containing classified fly ash and condensed silica fumes was determined and compared. The results revealed that concrete mixed with condensed silica fume produced the highest compressive strength. For concrete mixed with fly ash, it was found that concrete with 25% of classified fly ash produced the highest compressive strength. The use of classified fly ash between 15 to 35% or condensed silica fume between 5 to 15% in replacing cement gave almost the same compressive strength of concrete at the curing age of 180 days. In addition, the concrete containing classified fly ash 15 to 50% as cement replacement tended to have higher compressive strengths than those of condensed silica fume concretes after 180-day. The results, therefore, suggested that classified fly ash had a high potential to replace condensed silica fume to produce high strength concrete.

1. บทนำ

นักวิจัยด้านคอนกรีตให้ความสำคัญในการพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงมาโดยตลอดเพราะสามารถลดน้ำหนักตายตัวเนื่องจากคอนกรีตลง และทำให้การสร้างอาคารสูง ๆ หรือคานที่มีช่วงยาวมาก ๆ ทำได้โดยไม่ถูกควบคุมด้วยน้ำหนักของคอนกรีต การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงเริ่มมามากกว่าครึ่งศตวรรษ ในสหรัฐอเมริกาประมาณ ปี ค.ศ. 1950 คอนกรีตที่มีกำลังอัดสูงกว่า 340 กก./ตร.ซม. ถือว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูง [1] จากนั้นได้พัฒนากำลังให้สูงขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงปัจจุบันได้มีการนำสารปอซโซลานและสารเคมีผสมเพิ่มมาใช้ในการผสมคอนกรีตทำให้ได้กำลังอัดสูงกว่า 1,100 กก./ตร.ซม. สารปอซโซลานที่นิยมใช้ในประเทศไทยได้แก่ ซิลิกาฟูมและเถ้าถ่านหิน

ซิลิกาฟูมหรือไมโครซิลิกาเป็นผลพลอยได้จากขบวนการแปลงแร่ควอร์ตบริสุทธิ์เป็นซิลิคอน ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมครอน องค์ประกอบทางเคมีของซิลิกาฟูมมีซิลิคอนออกไซด์มากกว่าร้อยละ 90 มีพื้นที่ผิวสูงและมีโครงสร้างไม่เป็นผลึกจึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วมาก ดังนั้นซิลิกาฟูมจึงนิยมใช้ทำคอนกรีตกำลังอัดสูง สำหรับประเทศไทยไม่สามารถผลิตซิลิกาฟูมได้ จำเป็นต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศทำให้มีราคาแพงคือตั้งแต่ 15 ถึง 30 บาท/กก. หรือสูงกว่าปูนซีเมนต์ประมาณ 6 ถึง 12 เท่า ส่วนเถ้าถ่านหินเป็นผลพลอยได้จากขบวนการเผาถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงของโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ปัจจุบันโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะผลิตเถ้าถ่านหินออกมาประมาณวันละประมาณ 8,000 ตัน [2] ขณะนี้เถ้าถ่านหินได้นำมาใช้ใน

ประมาณวันละประมาณ 8,000 ตัน [2] ขณะนี้เถ้าถ่านหินได้นำมาใช้ในงานคอนกรีตมากขึ้นซึ่งเห็นได้จากโรงงานคอนกรีตผสมเสร็จหลายโรงงานได้นำมาเป็นส่วนผสมคอนกรีต โครงการก่อสร้างขนาดใหญ่หลายแห่งก็ได้ใช้เถ้าถ่านหินเช่น งานก่อสร้างเขื่อนปากมูล สถานีรถไฟฟ้า BTS สถานีรถไฟใต้ดิน MRTA โรงไฟฟ้าพลังความร้อนราชบุรี เป็นต้น ซึ่งพบว่าในปี พ.ศ. 2542 เพียงปีเดียวมีการใช้เถ้าถ่านหินแม่เมาะถึง 600,000 ตัน ในอนาคตอันใกล้นี้มีโครงการก่อสร้างเขื่อนท่าด่านจังหวัดนครนายกซึ่งคาดว่าจะใช้เถ้าถ่านหินเกือบ 1 ล้านตัน

การผลิตคอนกรีตกำลังสูงในประเทศไทยยังต้องอาศัยซิลิกาฟูมและสารลดน้ำพิเศษที่มีราคาสูงซึ่งต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ หากสามารถนำวัสดุในประเทศมาปรับปรุงพัฒนาให้มีคุณสมบัติเทียบเท่าหรือดีกว่าซิลิกาฟูมจะสามารถลดค่าใช้จ่ายทั้งทางตรงและทางอ้อมที่เกิดจากการนำเข้าซิลิกาฟูมและสารลดน้ำพิเศษในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง จากรายงานของ สมิตร และ ชัย [3], ไกรวุฒิ และคณะ [4], Angsuwattana และคณะ [5], Mukhergee และคณะ [6] พบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์โดยเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็ก มีพื้นที่ผิวมาก จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วจึงพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้น ๆ ได้สูงและรวดเร็ว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการนำเอาเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านขบวนการคัดแยกขนาดให้มีความละเอียดจนมีขนาดอนุภาคเล็กมาก ๆ เพื่อใช้เป็นส่วนผสมทำคอนกรีตกำลังสูง ลดปริมาณการสั่งซื้อซิลิกาฟูมจากต่างประเทศ ลดต้นทุนการผลิตคอนกรีตกำลังสูง และที่สำคัญได้วัสดุปอซโซลานที่มีศักยภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าซิลิกาฟูมใช้ภายในประเทศต่อไป

2. วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงใช้ทดแทนซิลิกาฟูมควบแน่นที่มีราคาแพงจากต่างประเทศในการผลิตคอนกรีตกำลังสูง และเปรียบเทียบกำลังอัดกับคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นที่จำหน่ายในประเทศไทย

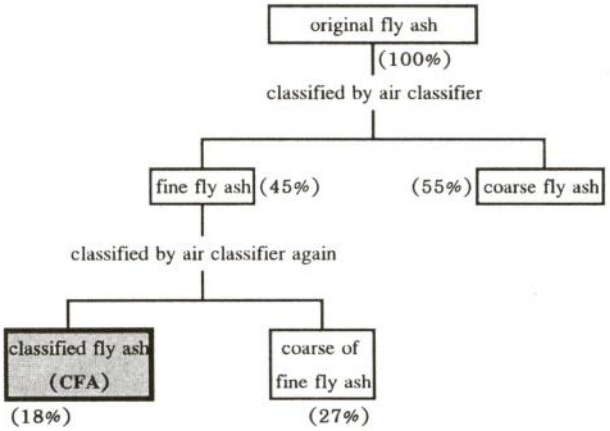
3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ปูนซีเมนต์	ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
ซิลิกาฟูม	ใช้ซิลิกาฟูมควบแน่นที่มีจำหน่ายในประเทศไทยจากสองแหล่งผลิต
เถ้าถ่านหิน	ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะผ่านการแยกให้มีความละเอียดสูง มีอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 3.2 ไมครอน และประมาณร้อยละ 88 มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน
ทราย	ใช้ทรายน้ำจืด ร่อนผ่านตระแกรงเบอร์ 4 ล้างน้ำจนสะอาด
หิน	ใช้หินปูนย่อยขนาด ½ นิ้ว ล้างน้ำจนสะอาด
น้ำ	ใช้น้ำประปา
สารลดน้ำพิเศษ	ใช้สารลดน้ำพิเศษประเภท F ชนิดเนฟทาลีน (Sulphonated Naphthalene Formaldehyde)

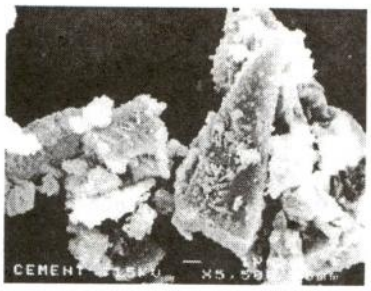
กำหนดทุก ๆ ส่วนผสมของคอนกรีตให้มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 554 กก./ลบ.ม. [7] อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.27 ใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตสดให้อยู่ระหว่าง 20±2.5 ซม. อัตราส่วนทรายต่อหินเท่ากับ 45:55 โดยปริมาตร ซิลิกาฟูมเป็นประเภทควบแน่น (Condensed Silica Fume, CSF) ที่จำหน่ายในประเทศไทยจากสองแหล่งผลิตซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า CSFI และ CSFII เถ้าถ่านหินแยกละเอียด (Classified Fly Ash, CFA) จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะคัดแยกด้วยเครื่อง Air Classifier ขั้นตอนขบวนการแยกเถ้าถ่านหินแสดงในรูปที่ 1 รายละเอียดการแยกดูได้จากเอกสารอ้างอิง [7]

สำหรับขั้นตอนในการวิจัยมีดังนี้ นำเถ้าถ่านหินแยกละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 0, 15, 25, 35 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และซิลิกาฟูมควบแน่นแต่ละแหล่งแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสานเพื่อหล่อคอนกรีตกำลังสูง เก็บตัวอย่างทดสอบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ผลการทดสอบกำลังอัดแต่ละอายุได้จากค่าเฉลี่ย 3 ตัวอย่าง ยกเว้นที่อายุ 28 วันใช้ 5 ตัวอย่าง เนื่องจากต้องการความแม่นยำสูงและอายุดังกล่าวนิยมใช้ในการออกแบบ โดยมีตัวอย่างรวมทั้งสิ้น 187 ตัวอย่าง

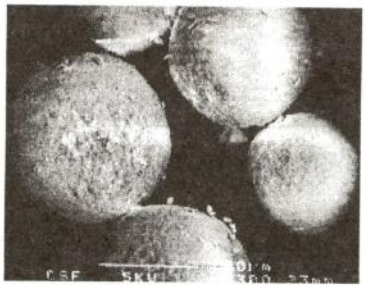


รูปที่ 1 ขบวนการแยกเถ้าถ่านหินด้วยเครื่อง Air Classifier

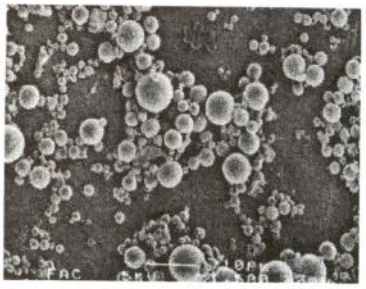
ปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมรูปทรงไม่แน่นอน (รูปที่ 2) ความถ่วงจำเพาะ 3.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 12 ไมครอน พื้นที่ผิวเบลน 3,230 ตร.ซม./ก. มีส่วนค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 โดยการร่อนแบบเปียกเท่ากับร้อยละ 4.7 และองค์ประกอบทางเคมีเป็นไปตาม ASTM C 150 ส่วนซิลิกาฟูมควบแน่นทั้ง 2 แหล่งผลิตจะมีรูปร่างคล้ายกันดังแสดงในรูปที่ 3 โดย CSFI และ CSFII มีความถ่วงจำเพาะ 2.22 และ 2.19 ตามลำดับ เนื่องจากเป็นซิลิกาฟูมทั้งคู่เป็นประเภทควบแน่น ดังนั้นจึงมี



รูปที่ 2 ปูนซีเมนต์



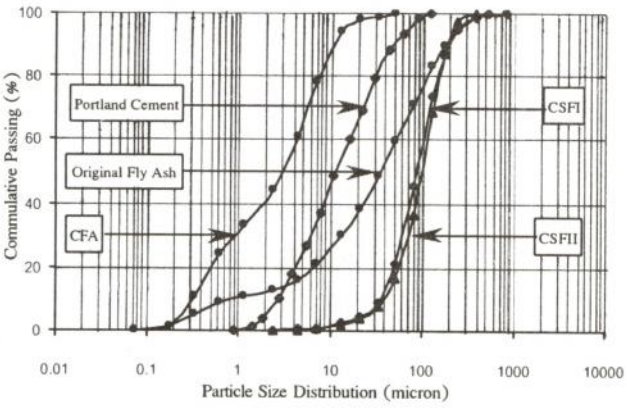
รูปที่ 3 ซิลิกาฟูมควบแน่น



รูปที่ 4 เถ้าถ่านหินแยกละเอียด

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

Chemical Composition (%)		Cement	CSFI	CSFII	CFA
Silicon Oxide	SiO_2	21.16	93.80	94.09	46.28
Aluminum Oxide	Al_2O_3	6.04	0.21	0.17	24.16
Iron Oxide	Fe_2O_3	3.15	0.09	0.07	10.17
Sulfur Oxide	SO_3	2.88	-	-	0.81
Calcium Oxide	CaO	63.96	0.12	0.18	12.06
Magnesium Oxide	MgO	0.87	0.33	0.34	2.78
Sodium Oxide	Na_2O	0.05	-	-	0.08
Potassium Oxide	K_2O	0.54	0.38	0.35	3.20
Loss on Ignition	LOI	1.39	4.89	4.65	2.70



รูปที่ 5 การกระจายขนาดของวัสดุประสาน

อนุภาคทรงกลมขนาดใหญ่กว่าปกติคือประมาณ 89 และ 105 ไมครอน ตามลำดับ แต่เมื่อถูกน้ำจะแตกตัวสู่ขนาดเดิมคือประมาณ 0.1 ไมครอน เมื่อทดสอบองค์ประกอบทางเคมี (ในตารางที่ 1) ปรากฏว่าซิลิกาฟูมควบแน่นทั้งคู่มี SiO_2 มากกว่าร้อยละ 93 และ LOI ไม่เกินร้อยละ 6 จึงมีคุณสมบัติตาม ASTM C 1240 สำหรับเถ้าถ่านหินแยกละเอียด (รูปที่ 4) มีรูปร่างเป็นทรงกลมผิวเรียบ ความถ่วงจำเพาะ 2.40 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 3.2 ไมครอน พื้นผิว 5,325 ตร.ซม./ก. ร้อยละค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับศูนย์ ขณะที่ผลรวมขององค์ประกอบหลักทางเคมีคือ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_3O_2 เท่ากับร้อยละ 80.61 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 จึงจัดอยู่ใน Class F ตาม ASTM C 618 การกระจายขนาดของวัสดุประสานสามารถดูได้จากรูปที่ 5

3.2 คอนกรีตสด

งานวิจัยนี้นอกจากผลิตคอนกรีตให้มีกำลังสูงแล้วคอนกรีตดังกล่าวต้องมีความสามารถทำงานได้ด้วย ดังนั้นจึงกำหนดค่ายุบตัวอยู่ที่ 20±2.5 ซม. เพื่อให้ใช้ได้กับงานทุก ๆ ประเภทไม่ว่าจะเป็นงานเทเสาคาน พื้น หรือแม้กระทั่งงานคอนกรีตปั๊ม โดยใช้สารลดน้ำพิเศษในการลดปริมาณน้ำเพื่อให้ได้ค่ายุบตัวตามที่ต้องการ โดยทั่วไปสารลดน้ำพิเศษจะมีน้ำเป็นส่วนผสมอยู่มาก การใช้ในปริมาณน้อย ๆ อาจไม่มีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมากนัก แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่มากจะส่งผลให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีค่าสูงขึ้นและทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง [5] ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประมาณว่ามีปริมาณน้ำอยู่ในสารลดน้ำพิเศษร้อยละ 50 เพื่อใช้ในการปรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานไว้ที่ 0.27 ตลอดการวิจัย ซึ่งอัตราส่วนผสมคอนกรีตกำลังสูงได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

จากการทดสอบพบว่า คอนกรีตที่มีเถ้าถ่านหินแยกละเอียดเป็นส่วนผสมจะทำงานได้ง่ายโดยเฉพาะเมื่อใช้แทนที่ร้อยละ 50 คอนกรีตจะลื่นไหลได้ดีมาก เนื่องจากเถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีอนุภาคเป็นทรงกลมและผิวเรียบ ส่วนคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟูมจะทำงานยากเนื่องจากซิลิกาฟูมควบแน่นเกิดการแตกตัวเป็นขนาดเดิมที่เล็กมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก จึงมีความต้องการน้ำที่สูง ดังนั้นจึงมีความเหนียวขึ้นโดยเฉพาะการแทนที่ร้อยละ 15 คอนกรีตสดมีลักษณะเหนียวหนืบและต้องใช้พลังงานสูงในการเทและกระทุ้ง ความยากง่ายดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากปริมาณของสารลดน้ำพิเศษที่ใช้ในแต่ละส่วนผสม

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูง

Mix No.	Symbol	Mix Proportion (kg/m^3)								W/C	Slump (mm)
		OPC	CSFI	CSFII	CFA	Sand	Agg	Water	Super P.		
1	Control	554	-	-	-	780	976	146.3	5.54	0.27	190
2	$CSFI_{05}$	526	28	-	-	786	983	142.4	12.00	0.27	205
3	$CSFI_{10}$	499	55	-	-	782	978	140.4	15.23	0.27	190
4	$CSFI_{15}$	471	83	-	-	775	969	138.5	18.47	0.27	185
5	$CSFII_{05}$	526	-	28	-	785	983	142.7	11.54	0.27	210
6	$CSFII_{10}$	499	-	55	-	776	971	140.4	15.23	0.27	200
7	$CSFII_{15}$	471	-	83	-	782	979	138.8	18.01	0.27	195
8	CFA_{15}	471	-	-	83	779	975	147.9	2.77	0.27	195
9	CFA_{25}	416	-	-	138	775	970	148.2	2.31	0.27	200
10	CFA_{35}	360	-	-	194	769	962	148.5	1.85	0.27	205
11	CFA_{50}	277	-	-	277	765	958	148.7	1.38	0.27	215

หมายเหตุ ในสารลดน้ำพิเศษมีน้ำผสมอยู่ร้อยละ 50

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ตารางที่ 3 เป็นผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตควบคุม (Control) พบว่าทุก ๆ ส่วนผสมสามารถถือได้ว่าเป็นคอนกรีตกำลังสูงเนื่องจากกำลังอัดที่อายุ 28 วันมีค่ามากกว่า 410 กก./ตร.ซม. ตาม ACI 363 [1] โดยกำลังอัดที่ต่ำที่สุดคือ CFA_{50} มีค่าเท่ากับ 672 กก./ตร.ซม. พิจารณาคอนกรีตควบคุมเห็นได้ว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอายุเริ่มต้นจนถึงอายุ 60 วัน หลังจากนั้นการพัฒนากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นในอัตราช้า ๆ

ตารางที่ 3 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงในส่วนผสมต่าง ๆ

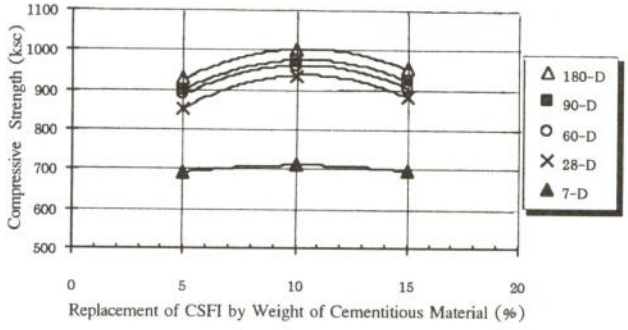
Mix No.	Symbol	Compressive Strength (ksc)					Normalized Comp. Str. (%)				
		7-d	28-d	60-d	90-d	180-d	7-d	28-d	60-d	90-d	180-d
1	Control	580	749	837	874	912	100	100	100	100	100
2	$CSFI_{05}$	692	853	886	899	927	119	114	106	103	102
3	$CSFI_{10}$	710	937	962	976	1002	122	125	115	112	110
4	$CSFI_{15}$	696	882	906	924	953	120	118	108	106	104
5	$CSFII_{05}$	606	789	838	857	880	104	105	100	98	96
6	$CSFII_{10}$	725	858	885	902	933	125	115	106	103	102
7	$CSFII_{15}$	681	820	855	870	895	117	109	102	100	98
8	CFA_{15}	611	739	804	832	891	105	99	96	95	98
9	CFA_{25}	605	793	857	885	944	104	106	102	101	104
10	CFA_{35}	599	742	828	864	937	103	99	99	99	103
11	CFA_{50}	560	672	713	733	786	97	90	85	84	86

รูปที่ 6 และ 7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 5, 10 และ 15 ที่อายุต่าง ๆ สำหรับซิลิกาฟูม CSFI และ CSFII ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 7 วันกำลังอัดของคอนกรีตมีค่าระหว่าง 606 ถึง 725 กก./ตร.ซม. เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นอนุภาคที่กลับสู่ขนาดเดิมที่เล็กมาก ๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวมาก และปริมาณของ SiO_2 ที่มีสูงกว่าร้อยละ 93 ในซิลิกาฟูมควบแน่นทั้งคู่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับ $Ca(OH)_2$ ได้อย่างรวดเร็วจึงพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างมากจนถึงอายุ 28 วันมีค่าอยู่ระหว่าง 789 ถึง 937 กก./ตร.ซม. ซึ่งเพิ่มขึ้นเท่ากับ 183 ถึง 227 กก./ตร.ซม. ในช่วงเวลาเพียง 21 วัน จากนั้นการพัฒนากำลังอัดจะเริ่มช้าลงเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้นโดยมีค่า 880 ถึง 1002 กก./ตร.ซม. ที่อายุ 180 วัน ซึ่งผลการทดสอบคล้ายกับงานวิจัยของสุดา [8] และ Cornelissen และคณะ [9] สำหรับการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูมร้อยละ 10 คอนกรีต CSFI และ CSFII ให้กำลังอัดสูงกว่าการแทนที่ร้อยละ 15 และ 5 ตลอดการทดสอบ พิจารณารูปที่ 8 และ 9 พบว่าที่อายุไม่เกิน 28 วันซิลิกาฟูมคอนกรีตมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมอย่างชัดเจนโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 105 ถึง 125 แต่เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นกำลังอัดจะมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 96 ถึง 110 ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 180 วัน

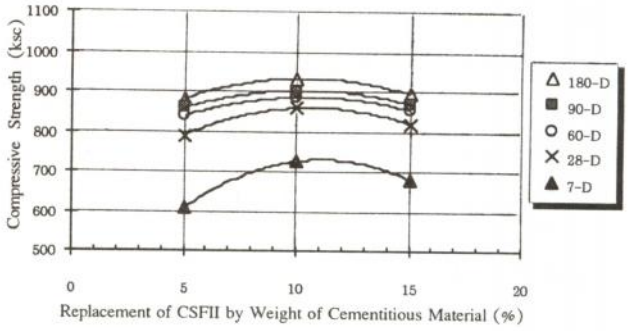
รูปที่ 10 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน CFA ร้อยละ 15, 25, 35 และ 50 ที่อายุต่าง ๆ พบว่าที่อายุ 7 วัน คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 15, 25 และ 35 มีกำลังอัดใกล้เคียงกันมากอยู่ในช่วง 599 ถึง 611 กก./ตร.ซม. เมื่อคอนกรีตมีอายุ 28 วัน อนุภาคที่เป็นทรงกลมผิวเรียบมีความละเอียดถึง 3.2 ไมครอนสามารถเข้าไปแทรกตามช่องว่างในเนื้อคอนกรีตได้ดี พื้นที่ผิวที่มากถึง 5,328 ตร.ซม./ก. และมีปริมาณของ SiO_2 กับ Al_2O_3 รวมกันเท่ากับร้อยละ 70.44 จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วทำให้คอนกรีตพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยมีค่าเท่ากับ 739 ถึง 793 กก./ตร.ซม. ซึ่งเพิ่มขึ้นระหว่าง 143 ถึง 188 กก./ตร.ซม. และยังคงพัฒนากำลังอัดต่อเนื่องไปเรื่อย ๆ ตลอดอายุการทดสอบ ส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 พบว่าการพัฒนากำลังในอายุต้น ๆ จะต่ำกว่าการแทนที่ร้อยละ 15, 25 และ 35 แต่ยังมีการพัฒนากำลังเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตลอดอายุการทดสอบ ซึ่งผลการศึกษาเป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยเถ้าถ่านหินโดยทั่วไป [5, 10, 11, 12, 13, 14] รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน CFA ร้อยละ 25 ให้กำลังอัดสูงกว่าการแทนที่ร้อยละ 15, 35 หรือ 50 จนถึงอายุ 180 วัน นอกจากนี้การแทนที่ร้อยละ 15, 25 และ 35 ให้กำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมตลอดการทดสอบโดยมีค่าระหว่างร้อยละ 95 ถึง 105 ของคอนกรีตควบคุม แต่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณร้อยละ 50 จะให้กำลังต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมทุก ๆ อายุการทดสอบโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 84 ถึง 97 การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดทุกการแทนที่มีแนวโน้มว่าจะมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกเมื่อคอนกรีตมีอายุมากกว่า 180 วัน เพราะที่อายุปลายของการทดสอบเส้นกราฟมีความชันเพิ่มขึ้น

รูปที่ 12 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย CSFI หรือ CFA ที่อายุต่าง ๆ เห็นได้ว่ากำลังอัดของซิลิกาฟูมคอนกรีต CSFI ที่อายุเริ่มต้นจนถึง 60 วัน มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหินแยกละเอียด เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นซิลิกาฟูมคอนกรีตมีการพัฒนากำลังอย่างช้า ๆ ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ โดยที่อายุ 180 วันคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 15 ถึง 35 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตที่แทนที่ด้วยซิลิกาฟูม CSFI ร้อยละ 5 ถึง 15 ส่วนรูปที่ 13 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย CSFII หรือ CFA ที่อายุต่าง ๆ พบว่าที่อายุ 7 วันการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน CFA ร้อยละ 15, 25 และ 35 มีกำลังอัดใกล้เคียงกับการแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม CSFII ร้อยละ 5 สารปอซโซลานทั้งคู่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานให้กำลังกับคอนกรีตต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงอายุ 180 วันจะเห็นได้ว่าการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 15, 25 และ 35 มีกำลังอัดเทียบเท่าหรือสูงกว่าซิลิกาฟูมคอนกรีต CSFII และเป็นไปได้ว่าเมื่อคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีอายุมากกว่า 180 วันจะมีกำลังอัดสูงกว่าซิลิกาฟูมคอนกรีต CSFI และ CSFII ซึ่งสังเกตได้จากการพัฒนากำลังของเส้นกราฟระยะปลายการทดสอบที่มีความชันเพิ่มขึ้น

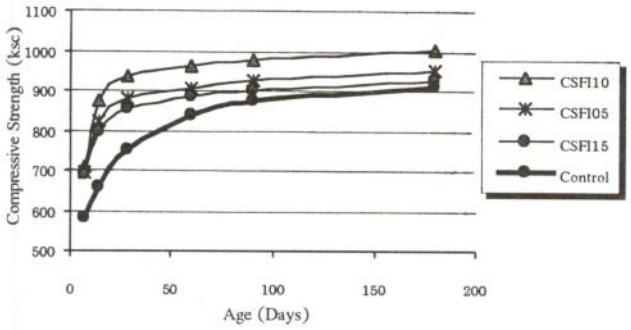
การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 15 ถึง 35 สามารถใช้แทนซิลิกาฟูมควบแน่นจากสองแหล่งผลิตในปริมาณร้อยละ 5 ถึง 15 ได้ดี แม้ว่าที่อายุก่อน 28 วันจะมีกำลังอัดต่ำกว่าบ้างก็ตาม แต่เมื่อพิจารณากำลังอัดที่อายุ 180 วัน จะเห็นได้ว่ามีกำลังอัดเทียบเท่าหรือสูงกว่าซิลิกา



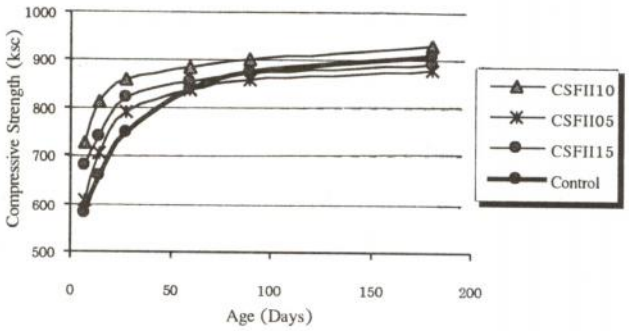
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม CSFI ร้อยละ 5, 10 และ 15 ที่อายุต่าง ๆ



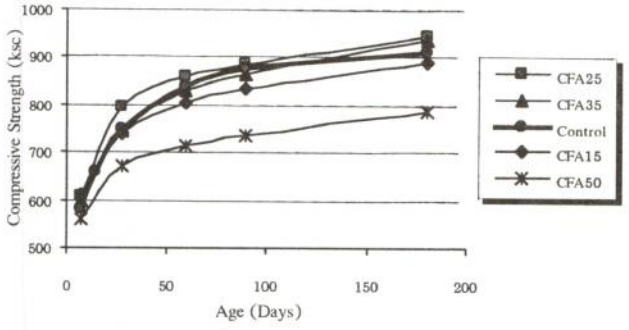
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟูม CSFII ร้อยละ 5, 10 และ 15 ที่อายุต่าง ๆ



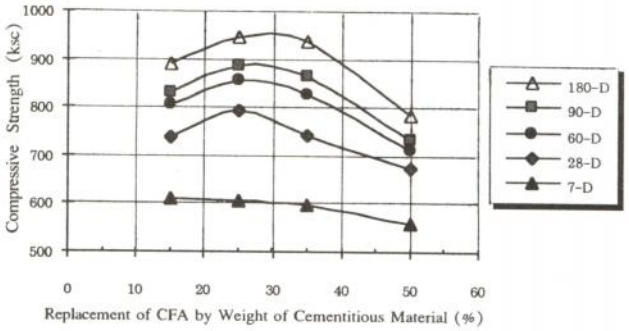
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม CSFI ร้อยละ 5, 10 และ 15



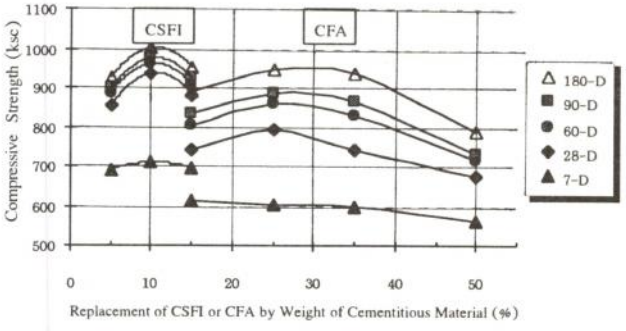
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตแทนที่ด้วยซิลิกาฟูม CSFII ร้อยละ 5, 10 และ 15



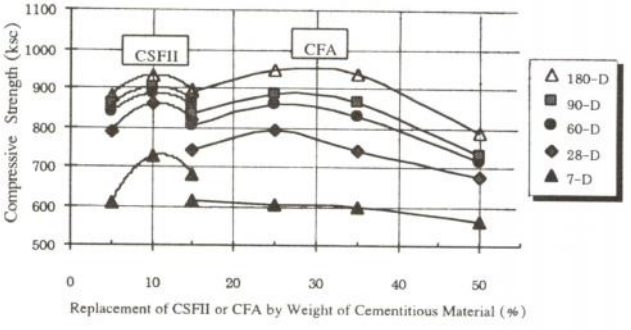
รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน CFA ร้อยละ 5, 10 และ 15 ที่อายุต่าง ๆ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน CFA ร้อยละ 15, 25, 35 และ 15



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย CSFI หรือ CFA ที่อายุต่าง ๆ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย CSFII หรือ CFA ที่อายุต่าง ๆ

ฟูมคอนกรีต และมีส่วนที่ดีกว่าคือคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินแยกละเอียด CFA มีความสามารถในการทำงานสูงกว่า

พิจารณาการนำเถ้าถ่านหินแยกละเอียด CFA ไปใช้งานก่อสร้างจริงต้องคำนึงถึงด้านต้นทุนการผลิตร่วมด้วย จากงานวิจัยของธีรราช [7] ชี้ให้เห็นว่าต้นทุนในการปรับปรุงคุณภาพเถ้าถ่านหินให้มีความละเอียดสูง (ต้นทุนการผลิตเถ้าถ่านหินแยกละเอียดประกอบด้วยราคาของเถ้าถ่านหิน ค่าขนส่ง ค่าไฟฟ้าและค่าแรงในการแยก แต่ไม่รวมราคาของเครื่องแยกเถ้าถ่านหิน) มีราคาประมาณ 1.25 บาทต่อกิโลกรัมหรือถูกกว่าราคาของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และซิลิกาฟูมควบแน่นถึงกิโลกรัมละ 1.25 และ 13.75 ถึง 28.75 บาท ตามลำดับ ทำให้คอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมระหว่างร้อยละ 9 ถึง 33 และถูกกว่าซิลิกาฟูมคอนกรีตมากถึงร้อยละ 28 ถึง 67 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยในห้องทดลองขนาดเล็ก แต่ถ้านำมาประยุกต์ทำเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ต้องพิจารณาในเชิงเศรษฐศาสตร์ด้วย เช่น ต้นทุน ดอกเบี้ย ค่าบำรุงรักษาระยะเวลา เป็นต้น แต่ผู้เขียนเชื่อว่าการใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีราคาที่น่าสนใจเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมในงานคอนกรีตกำลังสูง และเมื่อพิจารณาร่วมกับข้อดีต่าง ๆ ของเถ้าถ่านหินแยกละเอียดดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น การใช้เถ้าถ่านหินความละเอียดสูงเพื่อทำคอนกรีตกำลังอัดสูงก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ควรพิจารณาอย่างยิ่ง

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัย การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดและซิลิกาฟูมควบแน่นจากสองแหล่งผลิตทำคอนกรีตกำลังสูง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 15 ถึง 35 สามารถผลิตคอนกรีตมีกำลังอัดเทียบเท่าหรือสูงกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดอายุการทดสอบโดยปริมาณการแทนที่ร้อยละ 25 จะให้กำลังอัดสูงสุด ส่วนการแทนที่ร้อยละ 50 จะมีกำลังอัดอยู่ระหว่างร้อยละ 84 ถึง 97 ของคอนกรีตควบคุม

2. การใช้เถ้าถ่านหินแยกละเอียดร้อยละ 15 ถึง 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์สามารถใช้แทนซิลิกาฟูมควบแน่นร้อยละ 5 ถึง 15 ได้ โดยคอนกรีตมีกำลังอัดเทียบเท่าหรือสูงกว่าเมื่อมีอายุ 180 วัน

3. เถ้าถ่านหินแยกละเอียดมีศักยภาพสูงมากในการใช้ทดแทนซิลิกาฟูมควบแน่นที่มีราคาแพงในการทำคอนกรีตกำลังสูง

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้สามารถสำเร็จลงได้ด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนจากโครงการทุนส่งเสริมวิชาชีพนักวิจัย จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีที่ให้ความสะดวกด้านธุรการ อุปกรณ์เครื่องมือและห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

1. American Concrete Institute 1992, "ACI 363R-84: State of the Art Report on High Strength Concrete," In ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, pp. 1-48.
2. สมชัย กกกำแหง, 2542, "การใช้เถ้าลอยในงานก่อสร้างของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย," การสัมมนาเรื่องการใช้เถ้าลอยในงานคอนกรีต, 17 กุมภาพันธ์ 2542, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, หน้า 65-79
3. สมิตร ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2538, การศึกษาการบดเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะเพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต, วารสารวิจัยและพัฒนา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ปีที่ 18 ฉบับที่ 2, หน้า 51-64
4. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรนิสรากุล, พยูร เกตุกราย, อำนาจ เลิศประเสริฐวงศ์, พิชัย นิมิตยงสกุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย และทิน เกตุรัตนบวร, 2540, "บทบาทความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัดและการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริคของมอร์ต้าร์," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 3, สงขลา, หน้า MAT (2-1)– (2-10)
5. 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.
6. Mukhergee, P.K., Loughborough, M.T. and Malhotra, V.M., 1982, "Developments of High-Strength Concrete Incorporating a Large Percentage of Fly Ash and Superplasticizers," Cement Concrete and Aggregates, Vol. 4, pp. 81-86.
7. ธีรราช ลีกีรติกุล, 2542, การศึกษากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมซิลิกาฟูมควบแน่น เถ้าถ่านหินแยกละเอียด และเถ้าถ่านหินหยาบบดละเอียด, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 171 หน้า
8. สุดา เถลิงพงษ์, 2537, ผลกระทบของมวลรวมหยาบต่อคอนกรีตกำลังสูงในประเทศไทย, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 113 หน้า
9. Cornelissen, H.A.W, Hellewaard, R.E. and Vissers, J.L.J., 1995, "Processed Fly Ash for High Performance Concrete," Proceedings of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP 153-4, Wisconsin, American Concrete Institute, pp. 67-79.

10. ชูโชค ศิวะคุณากร, 2536, การพัฒนาคอนกรีตกำลังสูงด้วยการผสมเถ้าถ่านหิน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 104 หน้า

11. Lane, R.O. and Best, J.F., 1982, "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete," Concrete International, Vol. 4, No. 7, pp. 81-92.

12. Mehta, P.K., 1985, " Influence of Fly Ash Characteristics on the Strength of Portland Fly Ash Mixtures," Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp. 669-674.

13. 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.

14. Giergiczny, Z. and Werynska, A., 1989, "Influence of Fineness of Fly Ashes on Their Hydraulic Activity," Proceedings of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP-114, American Concrete Institute, pp. 97-115.