

ผลกระทบของการใช้เถ้าถ่านหิน 5 แหล่งในปริมาณสูงต่อกำลังอัด และการต้านทานกรดของคอนกรีต

สหลาภ หอมวุฒิวงศ์¹ ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง² และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³

Abstract

Homwuttiwong, S.¹, Vivatanachang, N.², and Jaturapitakkul, C.¹

Effect of high volume of fly ash from 5 sources on compressive strength and acid resistance of concrete

Songklanakarin J. Sci. Technol., 2004, 26(2) : 269-283

The purpose of this research was to examine the effect of high volume of fly ash from various sources on compressive strength and acid resistance of concrete. Fly ashes from 5 sources were collected and classified by an air classifier into 3 groups of different degree of fineness; low, medium, and high fineness. Portland cement type I was replaced by fly ash at the rate of 50% by weight of cementitious materials (Portland cement type I and fly ash) to cast concrete cylinders of 10 cm in diameter and 20 cm in height. After fly ash concretes were cured in water for 28 days, they were tested to determine the compressive strength. In addition, the

¹Department of Civil Engineering, King Mongkut's University Technology Thonburi, Bangmod, Toong Khru, Bangkok 10140 ²Department of Civil Engineering, Rajamangala Institute of Technology, Suphan Buri Campus, Yan Yaow, Sam Chook, Suphan Buri, 72130 Thailand.

¹นักศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมโยธา ³Ph.D. (Civil Engineering) รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140 ²M.Eng. (Civil Engineering) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตสุพรรณบุรี ตำบลย่านยาว อำเภอสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี 72130

Corresponding e-mail: chai.jat@kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ 4 สิงหาคม 2546

รับลงพิมพ์ 29 ตุลาคม 2546

specimens were immersed in 3% of sulfuric acid solution and the weight losses of concretes were measured from 3 to 90 days. It was found that the compressive strengths of fly ash concretes were more than 77% of the control concrete when the high fineness fly ashes were used. Each source of the fly ash had different effect on the compressive strength as well as on the sulfuric acid resistance of concrete. The compressive strength of fly ash concrete was improved with the use of high fineness fly ash; however, the sulfuric acid resistance of the concrete tended to decrease as the fineness of fly ash increased.

Key words : fly ash, fineness, high volume, compressive strength, acid resistance

บทคัดย่อ

สพลาก หอมวุฒิวงศ์ อนุรักษ์ชัย วิวัฒนาช่าง และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
ผลกระทบของการใช้เถ้าถ่านหิน 5 แหล่งในปริมาณสูงต่อกำลังอัด
และการต้านทานกรดของคอนกรีต

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2547 26(2) : 269-283

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าถ่านหินปริมาณสูงจากแหล่งที่ต่างกันที่มีผลกระทบต่อคอนกรีตในด้านกำลังอัดและการต้านทานการกัดกร่อนของกรด โดยนำเถ้าถ่านหินจาก 5 แหล่งมาทำการแยกขนาดด้วยเครื่องคัดขนาดด้วยแรงลมเพื่อให้มีความละเอียด 3 ระดับ คือ ละเอียดน้อย, ละเอียดปานกลาง, และละเอียดสูง จากนั้นใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง 50% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งและเถ้าถ่านหิน) ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินหลังจากบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน นอกจากนี้ยังนำตัวอย่างคอนกรีตไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนักเป็นเวลา 3 ถึง 90 วัน เพื่อประเมินการกัดกร่อนในรูปการสูญเสียน้ำหนัก ผลการศึกษาพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงสามารถให้กำลังอัดไม่ต่ำกว่า 77% ของคอนกรีตควบคุม คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินจากแหล่งที่ต่างกันมีกำลังอัดและการต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกไม่เท่ากัน การใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น แต่มีแนวโน้มการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกลดลง

เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย (Fly Ash) เป็นวัสดุปอซโซลานที่ได้จากกระบวนการเผาถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า ในแต่ละปีมีเถ้าถ่านหินที่ต้องกำจัดทิ้งเป็นจำนวนมากจึงมีการศึกษาเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาเพื่อนำเถ้าถ่านหินมาแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต ซึ่งพบว่าเถ้าถ่านหินช่วยให้คุณสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีตดีขึ้น เช่น ลดความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ลดปริมาณน้ำในส่วนผสมคอนกรีต เพิ่มการต้านทานต่อซัลเฟตหรือความคงทนต่อสภาพสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ในปัจจุบันมีการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์อยู่ในช่วง 20-30% เพื่อไม่ให้มีผลกระทบต่อกำลังอัดของคอนกรีตมากนัก ทำให้การนำเถ้าถ่านหิน

มาใช้ประโยชน์ยังน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่ผลิตขึ้นปีละประมาณ 3.5 ล้านตัน ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินให้สูงมากขึ้น เช่น งานวิจัยของ Torii และ Kawamura (1994) พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินมากกว่า 30% ทำให้คอนกรีตต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดีขึ้น Bouzoubaa และคณะ (2000) ใช้เถ้าถ่านหินเผาพร้อมกับปูนเม็ดในอัตราส่วน 55% แล้วนำมาทดสอบ พบว่าคุณสมบัติในการต้านทานต่อคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้น แต่การใช้เถ้าถ่านหินในปริมาณสูงดังกล่าวมีข้อเสียคือทำให้กำลังอัดของคอนกรีตที่อายุต้นต่ำกว่าคอนกรีตปกติค่อนข้างมาก (Mehta, 1985) การศึกษาของ Slanicka (1991) และ

Paya และคณะ (1995) พบว่าการใช้เถาถ่านหินที่มีความละเอียดสูงเป็นตัวแปรสำคัญต่อการเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตได้ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้เถาถ่านหินที่มีความละเอียดสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนมากขึ้น เพื่อผลิตคอนกรีตให้มีกำลังอัดที่เทียบเท่าหรือใกล้เคียงกับคอนกรีตซึ่งไม่ใช้เถาถ่านหิน

เถาถ่านหินที่เกิดขึ้นในแต่ละแหล่งมีความแตกต่างกันทั้งองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะทางกายภาพ ซึ่งส่งผลกระทบต่อกำลังอัดและความต้านทานต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีของคอนกรีต คุณสมบัติดังกล่าวสามารถบ่งชี้ถึงคุณภาพของคอนกรีตที่นำไปใช้งานได้ระดับหนึ่ง ดังนั้นการศึกษาเปรียบเทียบเถาถ่านหินที่ได้จากแหล่งต่างๆ โดยตรงและเถาถ่านหินที่ปรับปรุงขนาดอนุภาคจะทำให้เข้าใจคุณสมบัติของเถาถ่านหินได้ดียิ่งขึ้น การปรับปรุงขนาดอนุภาคของเถาถ่านหินที่ใช้โดยทั่วไปมีอยู่สองวิธีคือ การใช้เครื่องคัดแยกขนาดด้วยแรงลม (Air Classifier) และ การใช้เครื่องบดให้เถาถ่านหินมีขนาดเล็กกลง ซึ่งมีงานวิจัยหลายเรื่องที่จะระบุว่า การปรับปรุงขนาดของเถาถ่านหินทั้งสองวิธีมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก (Berry *et al.*, 1989), (สมิตร และ ชัย, 2538), (Erdogdu and Turker, 1998)

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการศึกษา กำลังอัดและความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกของคอนกรีตที่ใช้เถาถ่านหินจากแหล่งต่างๆ ซึ่งมีความละเอียดต่างกัน แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนสูงถึง 50% ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนาการใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงๆให้ดียิ่งขึ้นในอนาคต

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ทรายแม่น้ำที่มีโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus) เท่ากับ 2.4 หินปูนย่อยขนาดใหญ่สุด $1/2$ นิ้ว น้ำประปา สารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก และเถาถ่านหินจาก 5 แหล่งผลิต

เถาถ่านหินทั้ง 5 แหล่งผลิตมีสัญลักษณ์ M, P, I, T และ N ตามลำดับ โดยเถาถ่านหินชนิด M ได้จากการ

เผาถ่านหินลิกไนต์ ส่วน I และ P เป็นเถาถ่านหินที่ได้จากการเผาถ่านหินประเภทซบิพูมินัส เถาถ่านหิน T ได้จากเผาถ่านหินแอนทราไซต์ และเถาถ่านหิน N เป็นเถาถ่านหินจากต่างประเทศแต่ไม่ทราบชนิดของถ่านหิน ส่วนสัญลักษณ์ O และ F หมายถึงเถาถ่านหินก่อนคัดขนาดและเถาถ่านหินที่ผ่านการคัดขนาด ตามลำดับ โดยกระบวนการคัดขนาดเถาถ่านหินแสดงใน Figure 1 ซึ่งในการคัดขนาดแต่ละครั้งจะได้ปริมาณส่วนหยาบและส่วนละเอียดที่เท่าๆ กันหรือคิดเป็นปริมาณ 50 25 และ 12.5% โดยน้ำหนักของเถาถ่านหินก่อนคัดขนาดสำหรับเถาถ่านหินที่มีความละเอียด F1, F2 และ F3 ตามลำดับ

ส่วนผสมคอนกรีตและการทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาเป็นทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยที่คอนกรีตควบคุม (Control) ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง เป็นวัสดุประสานล้วน และคอนกรีตผสมเถาถ่านหินใช้อัตราส่วนทราย หิน และวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถาถ่านหิน) เหมือนกับคอนกรีตควบคุมแต่ใช้เถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ 50% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมโดยให้คอนกรีตสดมีค่ายุบตัวอยู่ในช่วง 9 ถึง 12 ซม. ส่วนผสมของคอนกรีตควบคุมมีอัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ทราย : หิน เท่ากับ 1 : 2.2 : 2.4 โดยน้ำหนัก สำหรับค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและค่ายุบตัวของคอนกรีตสดแสดงใน Table 1

ภายหลังจากหล่อคอนกรีต 24 ชั่วโมงจึงถอดแบบและนำไปบ่มในน้ำ 27 วัน จากนั้นนำมาทดสอบกำลังอัดและนำคอนกรีตส่วนที่เหลือไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก และทำการประเมินการกัดกร่อนของคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกเป็นเวลา 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน โดยหลังจากแช่ตัวอย่างตามเวลาที่กำหนดจึงนำคอนกรีตมาขัดผิวที่สัมผัสกรดด้วยแปรงลวดเพื่อขจัดคอนกรีตที่ถูกกัดกร่อนออก จากนั้นนำคอนกรีตมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักที่สูญหายไปโดยเปรียบเทียบกับน้ำหนักของคอนกรีตก่อนแช่ในสารละลายกรด

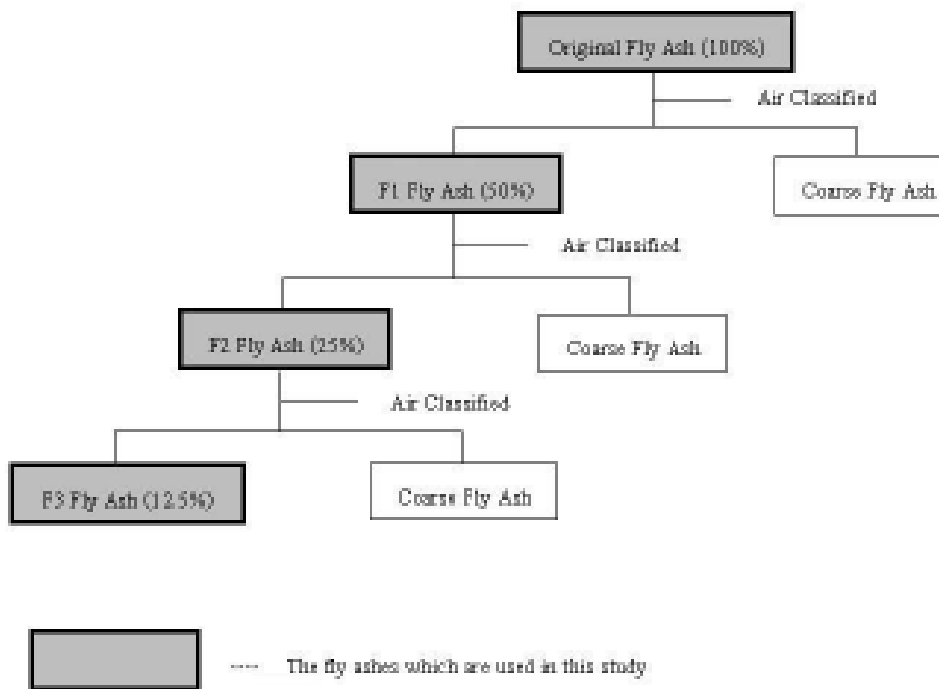


Figure 1. Schematic process of classified fly ash.

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

Figure 2 เป็นภาพถ่ายอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมุมมีหลายขนาดคล้ายคลึงกับเถ้าถ่านหินชนิด T แต่อนุภาคของเถ้าถ่านหิน T มีผิวที่ขรุขระมากกว่า เถ้าถ่านหิน M มีอนุภาครูปร่างทรงกลมผิวเรียบเป็นส่วนใหญ่ สำหรับเถ้าถ่านหิน P และ N ประกอบด้วยอนุภาครูปร่างกลมผสมกับอนุภาคที่เป็นเหลี่ยมมุมและมีลักษณะผิวที่ไม่เรียบ ส่วนเถ้าถ่านหิน I มีรูปร่างของอนุภาคที่ไม่แน่นอนมีรูพรุน เป็นก้อนปนกับรูปร่างแท่งยาวที่ต่อเนื่องกัน

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการคัดขนาดจากแหล่งต่างๆ แสดงใน Table 2 พบว่าปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบหลัก คือ CaO และ SiO₂ รวมกันเท่ากับ 85.61% ขององค์ประกอบทั้งหมด ส่วนเถ้าถ่านหินทั้ง 5 แหล่งมีปริมาณของ SiO₂, Al₂O₃ และ

Fe₂O₃ รวมกันอยู่ในช่วง 75-90% และมีปริมาณของ SO₃ อยู่ในช่วง 0.18 - 3.38% ซึ่งเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้จัดอยู่ใน Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่กำหนดปริมาณของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ รวมกันไม่น้อยกว่า 70% ปริมาณของ SO₃ และค่า LOI (Loss On Ignition) ไม่เกิน 5 และ 6% โดยน้ำหนักตามลำดับ สำหรับเถ้าถ่านหินชนิด P มีปริมาณของ LOI สูงกว่ามาตรฐานกำหนดเล็กน้อยคือเท่ากับ 7.52%

Table 3 พบว่าเถ้าถ่านหินทั้ง 5 แหล่งก่อนการคัดขนาดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d₅₀) ระหว่าง 18 ถึง 44 ไมครอนซึ่งใหญ่กว่าขนาดเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ที่มีค่าเท่ากับ 11 ไมครอน เมื่อคัดขนาดเถ้าถ่านหินแล้วพบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคจะลดลงตามลำดับและส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าของปูนซีเมนต์

พื้นที่ผิวจำเพาะที่วัดด้วยวิธีของเบลนของปูนซีเมนต์เท่ากับ 3,150 ซม²/ก เถ้าถ่านหินก่อนการคัดขนาดจาก 4 แหล่งคือ P, I, T และ N มีความละเอียดของเบลนสูงกว่าปูนซีเมนต์เพราะเป็นเถ้าถ่านหินที่มีรูพรุนสูงและรูปร่างไม่แน่นอน และเมื่อทำการคัดขนาดให้มีความละเอียดสูง

Table 1. Properties of fresh concrete, compressive strength, and percentage of weight loss after immersing in 3% of H₂SO₄

Type	W/(C+F)	Slump (cm)	Compressive Strength at 28 Days		Weight Loss after Immersing in 3% of H ₂ SO ₄ (%)					
			(ksc)	(%)	3 Days	7 Days	14 Days	28 Days	60 Days	90 Days
Control	0.55	11	405	100	0.9	1.9	3.4	4.2	8.0	14.4
M	0.51	10	298	74	0.5	1	1.4	3.1	7.3	10.1
MF1	0.48	11	335	83	0.1	0.3	1	4.6	8.1	11.4
MF2	0.46	10	352	87	0.5	0.7	1.7	5	8.5	11.9
MF3	0.45	9	362	89	2.7	2.9	3.8	7.1	10.3	12.1
P	0.65	12	240	59	0.3	0.7	1.7	1.6	3.5	8.1
PF1	0.64	10	294	73	0.5	0.8	1.4	2.3	4.3	10.1
PF2	0.62	11	315	78	0.6	0.8	1.3	1.8	4.7	10.5
PF3	0.61	12	328	81	0.4	0.6	1.1	1.7	5.2	11.5
I	0.62	12	217	54	0.3	0.4	1.3	1.7	5	10.7
IF1	0.6	10	272	67	0.3	0.2	1	1.4	5.2	11.4
IF2	0.58	11	307	76	1	1.5	2.4	3.3	5.4	11.8
IF3	0.57	12	332	82	0.9	1.3	2.7	4.2	6.7	11.9
T	0.79	10	191	47	0.2	0.4	0.7	2.1	8.6	10.4
TF1	0.72	10	261	64	0.2	0.7	1.2	2.8	9.4	11.5
TF2	0.7	9	280	69	0.4	0.7	1.4	2.4	9.9	12.1
TF3	0.69	10	316	78	0.6	1.4	2.2	4.3	10.5	13.3
N	0.67	12	196	48	0.2	0.4	1	1.4	3.6	9.1
NF1	0.64	11	276	68	0.4	1	1.6	1.7	4.1	9.3
NF2	0.62	9	292	72	0.2	0.3	0.9	1	4.7	9.4
NF3	0.61	11	312	77	0.2	0.4	0.8	1.1	5.2	9.8

(F3) เถ้าถ่านหินทั้ง 4 แหล่งดังกล่าวมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก

Figure 3 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินจากแหล่งต่างๆ ซึ่งพบว่า เถ้าถ่านหินก่อนการคัดขนาดจากทุกแหล่งมีขนาดของอนุภาคประมาณ 80% กระจายตัวอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึง 100 ไมครอน เมื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวระหว่างปูนซีเมนต์กับเถ้าถ่านหินจากทุกแหล่งก่อนการคัดขนาดพบว่า การกระจายตัวของเถ้าถ่านหินประกอบด้วยอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าและเริ่มมีอนุภาคที่เล็กกว่าเมื่อเถ้าถ่านหินผ่านการ

คัดขนาดในแต่ละครั้ง (Figures 3a 3b และ 3c) จนกระทั่งได้เถ้าถ่านหินละเอียดสูง (F3) ซึ่งมีการกระจายตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ (Figure 3d)

เถ้าถ่านหิน M และ I มีการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวมากที่สุด แสดงว่าสามารถทำการคัดแยกขนาดได้ดี ซึ่งตรงกันข้ามกับเถ้าถ่านหิน P, N และ T ที่พบว่าการคัดแยกด้วยเครื่องดังกล่าวมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเถ้าถ่านหิน โดยเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคแน่นตัน (เถ้าถ่านหิน M และ I) สามารถแยกขนาดได้ดีกว่าเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคกลวง

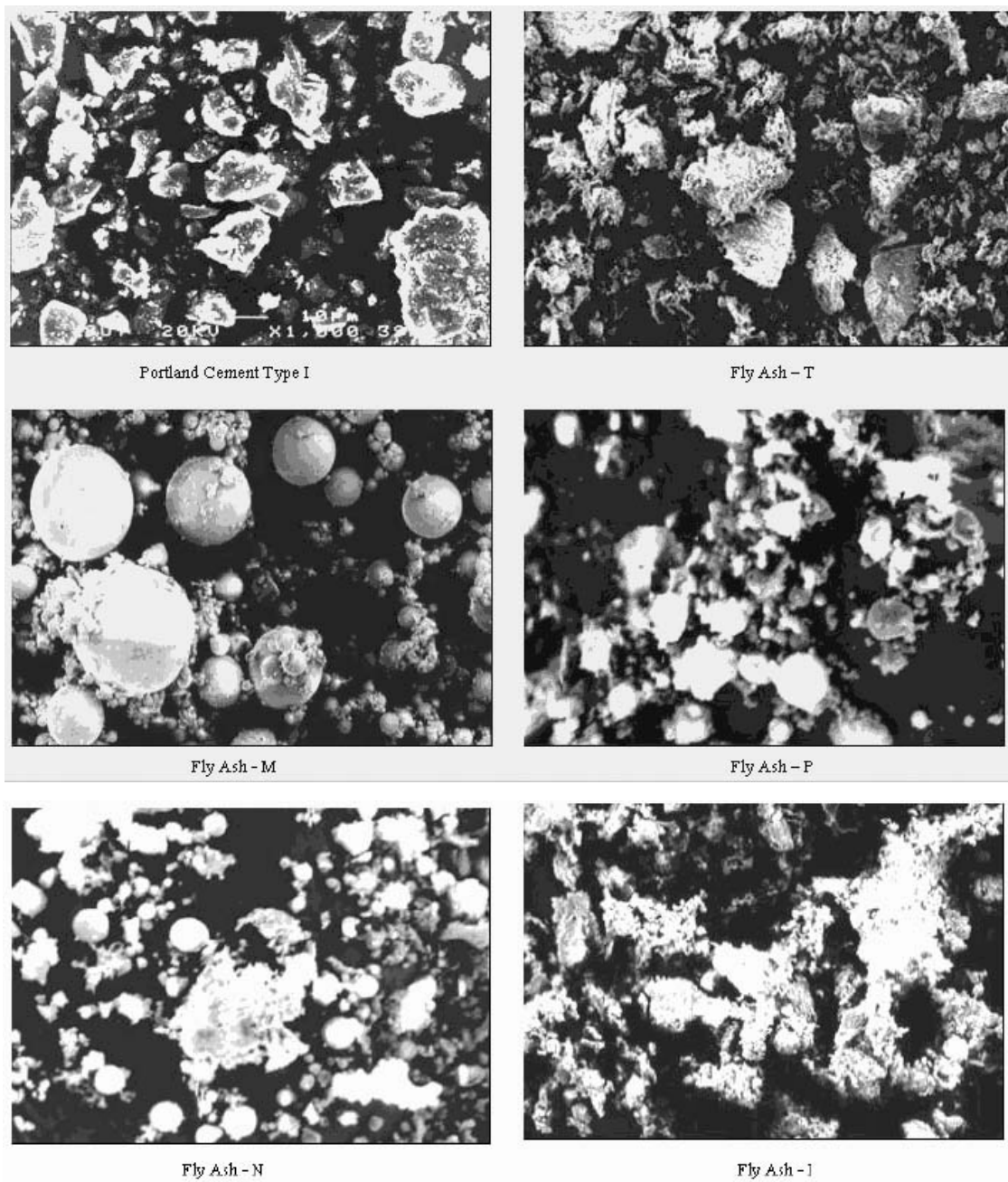


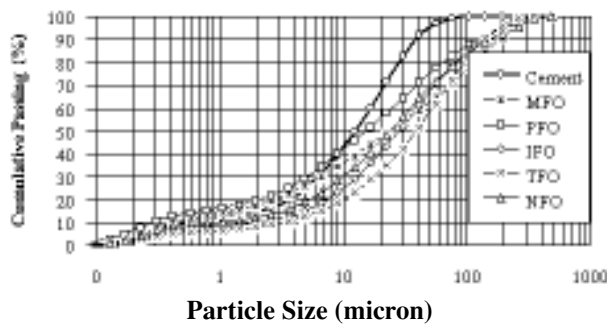
Figure 2. Scanning electron microscope of Portland cement type I and original fly ash from different sources

หรือมีความพรุนสูง (ถ้าถ่านหิน P, N และ T) เพราะเครื่องคัดขนาดด้วยแรงลมมีหลักการว่า วัตถุที่มีน้ำหนักเบาจะถูกแรงลมเป่าให้ลอยในอากาศนานกว่าวัตถุที่มีน้ำหนักมากกว่า ดังนั้นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และเบา (เนื่องจากมี

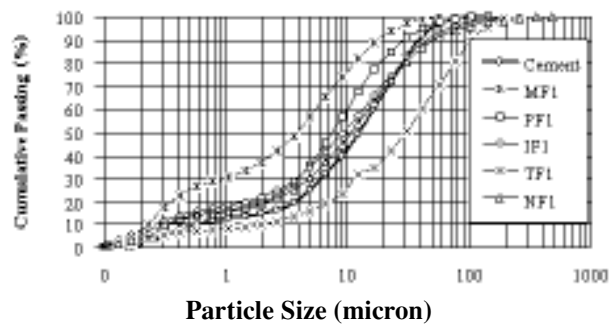
ความพรุน) จึงถูกแรงลมเป่าให้ลอยอยู่ได้เหมือนกับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า การคัดแยกขนาดด้วยเครื่องที่ใช้แรงลมจึงมีประสิทธิภาพไม่เต็มที่เมื่อใช้กับถ่านหินที่มีความพรุนสูง

Table 2. Chemical composition of Portland cement type I and original fly ashes from 5 sources

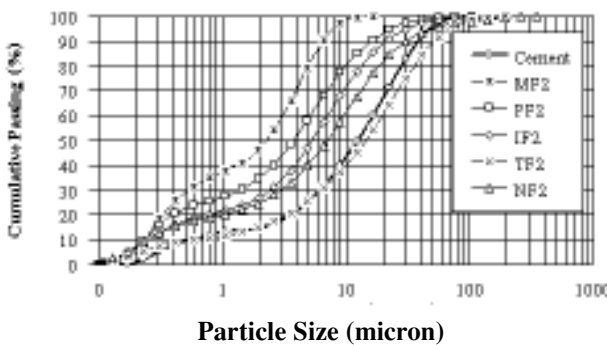
Material	Chemical Composition (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
Cement	20.62	5.22	3.10	64.99	2.70	0.91	0.77	0.50	1.13
M	46.25	26.43	10.71	7.61	1.85	2.21	1.11	3.07	0.05
P	43.92	36.62	3.97	3.05	0.64	0.55	0.38	0.44	7.52
Fly Ash									
I	45.02	36.21	4.09	3.64	0.48	0.54	0.44	0.31	5.32
T	47.39	22.73	6.29	8.36	3.38	2.64	0.63	2.95	3.12
N	49.04	37.91	2.75	1.03	0.18	0.39	0.38	0.52	4.70



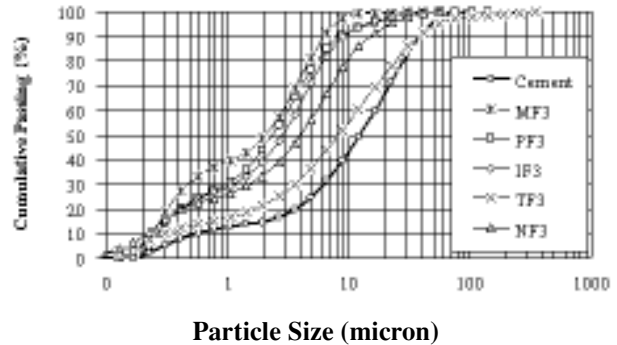
a. Particle size distribution of original fly ashes (O)



b. Particle size distribution of low fineness fly ashes (F1)



c. Particle size distribution of medium fineness fly ashes (F2)



d. Particle size distribution of high fineness fly ashes (F3)

Figure 3. Particle size distribution of Portland cement type I and fly ashes

คุณสมบัติของเพสต์และมอร์ตาร์

Table 3 แสดงผลการทดสอบความชื้นเหลวปกติ (normal consistency) ของเพสต์ ระยะเวลาการก่อตัว

(setting time) ของเพสต์ และดัชนีกำลัง (strength activity index) ของมอร์ตาร์ เมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วน 20% ตามมาตรฐาน ASTM C 311

Table 3. Physical properties of materials, properties of cement pastes, and properties of mortars

Materials	Physical Properties of Materials				Properties of Pastes			Properties of Mortars	
	d ₅₀ (micron)	Blaine (cm ² /g)	Specific Gravity	Normal Consistency (%)	Setting Time (min)		Strength Activity Index (%)		
					Initial	Final	7 Days	28 Days	
Cement	11.0	3150	3.15	25.6	116	186	100	100	
M	28.5	2310	2.02	25.0	124	216	93	99	
MF1	4.4	3970	2.3	23.7	118	205	121	132	
MF2	2.7	5850	2.47	23.2	107	193	134	144	
MF3	2.4	6150	2.51	22.7	100	177	142	151	
P	18.3	5240	2.24	28.2	136	232	89	103	
PF1	8.7	7020	2.23	27.7	129	224	100	114	
PF2	4.4	8680	2.34	27.4	120	218	118	122	
PF3	2.7	11920	2.47	26.7	115	210	113	124	
I	32.0	3420	2.11	28.8	140	228	78	90	
IF1	10.7	5070	2.27	27.1	131	215	99	104	
IF2	6.2	6820	2.33	26.4	125	206	101	115	
IF3	3.3	8570	2.34	25.3	117	200	120	122	
T	44.2	7530	2.50	36.1	173	262	90	86	
TF1	34.8	9400	2.49	34.0	165	248	102	95	
TF2	16.8	12640	2.50	32.3	155	238	100	100	
TF3	9.8	14290	2.51	31.0	140	230	109	106	
N	27.0	4750	2.23	30.0	168	226	97	106	
NF1	12.5	6050	2.25	28.8	150	220	96	109	
NF2	8.2	7350	2.28	28.2	136	214	110	113	
NF3	4.7	9270	2.34	27.3	125	209	122	122	

ซึ่งเป็นการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลาน พบว่า การก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากทุกแหล่งมีระยะเวลามากกว่าเพสต์ของปูนซีเมนต์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น มีเพียงเพสต์ MF2, MF3 และ PF3 ที่มีเวลาการก่อตัวระยะต้นน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ

ไกรวุฒิ และคณะ (2539) ที่พบว่าเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงจะใช้น้ำในส่วนผสมน้อยลงและส่งผลให้การก่อตัวของเพสต์เร็วขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวจากน้อยไปหามากสำหรับเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินคือ M, P, I, N และ T ตามลำดับ

มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดให้ดัชนีกำลัง

ของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่อายุ 7 หรือ 28 วันไม่ต่ำกว่า 75% ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วน จึงจะถือว่าเถ้าถ่านหินดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในงานคอนกรีตได้ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าเถ้าถ่านหินจากทุกแหล่งมีดัชนีกำลังสูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ และดัชนีกำลังเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเถ้าถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กลง โดยพบว่าเถ้าถ่านหิน M มีดัชนีกำลังสูงที่สุด รองลงมาคือเถ้าถ่านหิน I, P, N และ T ตามลำดับ และดัชนีกำลังสูงสุดคือมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหิน MF3 มีค่า 151% ของมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ล้วนเป็นวัสดุประสานเมื่ออายุ 28 วัน

กำลังอัดของคอนกรีต

กำลังอัดของคอนกรีตส่วนผสมต่างๆ ที่อายุ 28 วัน แสดงใน Table 1 โดยคอนกรีตควบคุม (Control) มีกำลังอัดเท่ากับ 405 กก/ซม² สูงกว่าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทุกชนิด เพราะคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินมีการพัฒนากำลังอัดในอายุต้นชั่วโมงเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดจากออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาในเถ้าถ่านหินทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเริ่มหลังจากการผสมคอนกรีตประมาณหนึ่งสัปดาห์ (Fraay *et al*, 1989) นอกจากนี้กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน โดยเถ้าถ่านหินที่คัดขนาดให้มีความละเอียดมากจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มสูงขึ้นด้วย ซึ่ง

สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sybertz และ Wiens (1991) กำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินคือ MF3 มีค่า 89% ของคอนกรีตควบคุม

Figure 4 แสดงร้อยละของกำลังอัดคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทั้ง 5 แหล่งเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมพบว่าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน M มีกำลังอัดสูงที่สุดในกลุ่มของเถ้าถ่านหินทั้งหมดเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มของเถ้าถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการคัดขนาดโดยมีกำลังอัด 298 กก/ซม² หรือประมาณ 74% ของคอนกรีตควบคุม การที่เถ้าถ่านหิน M ให้กำลังอัดที่ค่อนข้างสูงเนื่องจากมีค่า $W/(C+F)$ ต่ำกว่าคอนกรีตชนิดอื่นๆ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้คัดขนาดด้วยกันระหว่าง M, P และ N พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต P และ N ต่ำกว่าคอนกรีต M ทั้งๆ ที่เถ้าถ่านหินทั้งสองมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กกว่าและมีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าเถ้าถ่านหิน M แต่เนื่องจากค่า $W/(C+F)$ ของคอนกรีตทั้งสองชนิดมีค่าสูงกว่านั่นเอง

คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน P ถึงแม้ว่ามีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่เล็กกว่าและมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงกว่าเถ้าถ่านหิน M ก็ตาม แต่เนื่องจากค่า $W/(C+F)$ ที่สูงกว่าทำให้คอนกรีต P มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีต M โดยมีค่าประมาณ 60% ของคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน I, T และ N มีกำลังอัดค่อนข้างต่ำคือประมาณ 50% ของคอนกรีตควบคุม เมื่อพิจารณาพบว่าคอนกรีต T

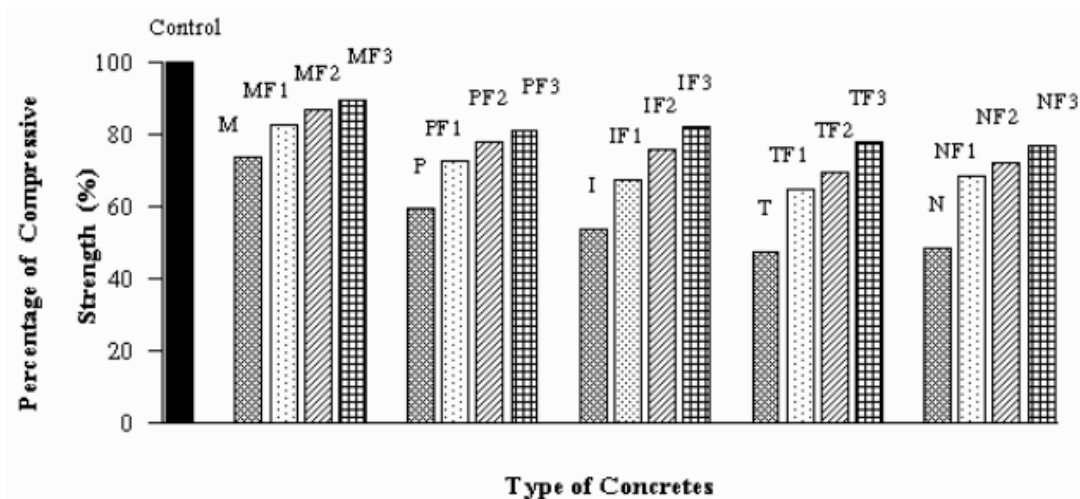


Figure 4. Comparison between compressive strength of fly ash concretes and control concrete

มีค่า $W/(C+F)$ สูงและใช้เถ้าถ่านหินมีอนุภาคขนาดใหญ่ ส่วนคอนกรีต I และ N นั้นถึงแม้ว่าค่า $W/(C+F)$ ต่ำกว่า และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเล็กกว่าเถ้าถ่านหิน T ก็ตาม แต่เถ้าถ่านหิน T มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่ามาก จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตทั้งสามประเภทมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อใช้เถ้าถ่านหินความละเอียดน้อย (F1) พบว่าคอนกรีต MF1 มีค่าร้อยละของกำลังอัดสูงสุด รองลงมาคือคอนกรีต PF1, NF1, IF1 และ TF1 ซึ่งมีกำลังเท่ากับ 73, 68, 67 และ 64% ของคอนกรีตควบคุมตามลำดับ คอนกรีต NF1 มีอัตราการเพิ่มของกำลังมากกว่าคอนกรีตอื่น โดยเพิ่มจากคอนกรีต N ที่มีกำลัง 48 เป็น 68% เป็นผลเนื่องจากการลดลงของขนาดอนุภาคเถ้าถ่านหินจาก 27 ไมครอน เหลือ 12.5 ไมครอน ปริมาณน้ำที่ลดลงจาก 0.67 เป็น 0.64 และประกอบกับกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน N มีค่าค่อนข้างต่ำจึงทำให้อัตราการเพิ่มของกำลังอัดมีค่ามากกว่าคอนกรีตชนิดอื่น

ร้อยละกำลังอัดสูงสุดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินละเอียดปานกลาง (F2) เป็นของคอนกรีต MF2 โดยมีค่าเท่ากับ 87% ของคอนกรีตควบคุม รองลงมาคือคอนกรีต PF2 และ IF2 มีค่า 78 และ 76% ตามลำดับ สำหรับคอนกรีต TF2 และ NF2 ยังคงมีกำลังต่ำคือมีค่าประมาณ

69 และ 72% ตามลำดับ คอนกรีต IF2 มีการพัฒนา กำลังอัดจาก IF1 ค่อนข้างสูงโดยพัฒนาจาก 67 เป็น 76% เนื่องจากขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหิน IF2 มีขนาดเล็กกว่า เถ้าถ่านหิน IF1 อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าถ่านหินชนิดอื่น ในขณะที่ค่า $W/(C+F)$ ของคอนกรีตแต่ละชนิดลดลงใกล้เคียงกัน

เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูง (F3) พบว่าคอนกรีต MF3, PF3 และ IF3 มีค่ากำลังอัดสูงกว่า 80% ของคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีต TF3 และ NF3 มีค่า 78 และ 77% ตามลำดับ เนื่องจากเถ้าถ่านหินทุกชนิดมีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคที่เล็กใกล้เคียงกันประมาณ 2.4 ถึง 4.7 ไมครอน ยกเว้นเถ้าถ่านหิน TF3 ที่มีอนุภาคใหญ่กว่าเถ้าถ่านหินชนิดอื่นมากแต่ก็มีพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงที่สุดเท่ากับ 14290 ซม²/ก จึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีต TF3 ใกล้เคียงกับคอนกรีตชนิดอื่น

Figure 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินกับค่า $W/(C+F)$ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่า $W/(C+F)$ เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า $W/(C+F)$ ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ในช่วง 0.55 ถึง 0.70 ซึ่งกำลังอัดของคอนกรีตในช่วงดังกล่าวมีค่าประมาณ 50 ถึง 80% ของคอนกรีตควบคุม เมื่อ

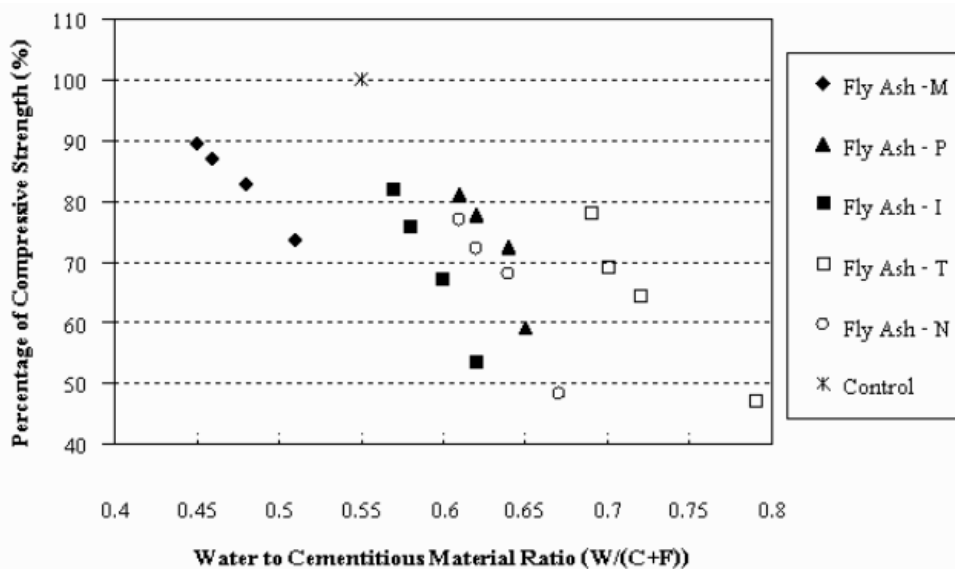


Figure 5. Relationship between percentage of compressive strength of fly ash concretes and water to cementitious material ratio ($W/(C+F)$)

พิจารณาคอนกรีตที่มีค่า $W/(C+F)$ เท่ากับ 0.62 คือ PF2, NF2 และ I พบว่ามีกำลังอัดเท่ากับ 315, 292 และ 217 กก/ซม² และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหินมีค่าเท่ากับ 4.4, 8.2 และ 32 ไมครอนตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคของเถ้าถ่านหินมีอิทธิพลอย่างมากต่อกำลังอัดของคอนกรีต โดยที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหินแปรผกผันกับกำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Slanicka (1991), Paya และคณะ (1995) และ Erdogdu และ Turker (1998) ที่พบว่าเถ้าถ่านหินความละเอียดสูงให้กำลังอัดของคอนกรีตสูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินความละเอียดต่ำ

Figure 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินกับขนาดเฉลี่ย (d_{50}) ของอนุภาคเถ้าถ่านหิน พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลงเมื่ออนุภาคเถ้าถ่านหินมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อพิจารณาคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียงกันคือ MF1, PF2 และ NF3 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 335, 315 และ 312 กก/ซม² ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหินเท่ากับ 4.4, 4.4 และ 4.7 ไมครอนตามลำดับ พบว่าความแตกต่างของกำลังอัดไม่มากนัก

แม้ว่าค่า $W/(C+F)$ ของคอนกรีตทั้ง 3 ชนิดมีค่าที่แตกต่างกันมากคือ 0.48, 0.62 และ 0.61 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าขนาดและรูปร่าง (กลมตัน ขรุขระหรือพรุน) ของอนุภาคเถ้าถ่านหินมีผลต่อกำลังของคอนกรีตอย่างมาก

การต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

Figure 7 แสดงร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีต ควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดพบว่าคอนกรีต P I และ N สูญเสียน้ำหนักใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 3.5 5.0 และ 3.6% ที่อายุ 60 วัน และมีค่าต่ำกว่าคอนกรีต T และ M ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.6 และ 7.3% เนื่องจากเถ้าถ่านหิน P I และ N มีปริมาณ SO_3 เท่ากับ 0.64, 0.48 และ 0.18% ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าเถ้าถ่านหิน M และ T ที่มีปริมาณของ SO_3 เท่ากับ 1.85 และ 3.38% เป็นผลให้คอนกรีต M และ T มีการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกบริเวณผิวตัวอย่างที่เป็นมอร์ตาร์ได้รุนแรงและมากกว่า

คอนกรีต N มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักต่ำสุดและมีปริมาณของ SO_3 ต่ำสุดด้วยเช่นกัน ส่วนคอนกรีต P และ I มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักค่อนข้างต่ำในช่วงแรกของการ

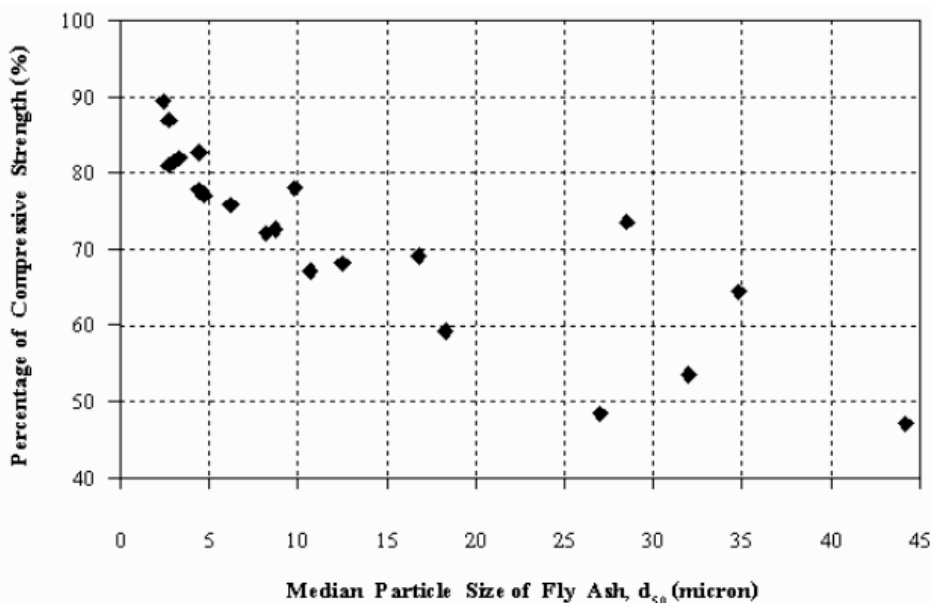


Figure 6. Relationship between percentage of compressive strength of fly ash concretes and median particle size of fly ash (d_{50})

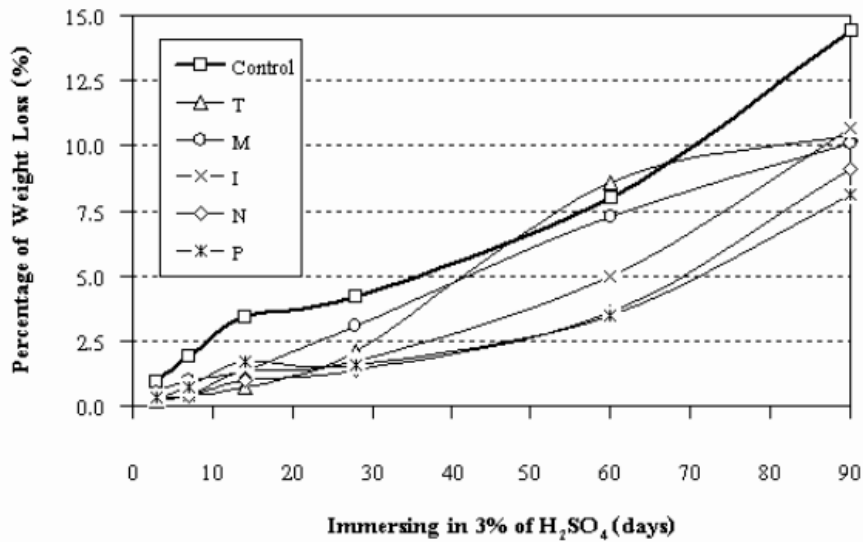


Figure 7. Percentage of weight loss of original fly ash concretes in 3% of H₂SO₄

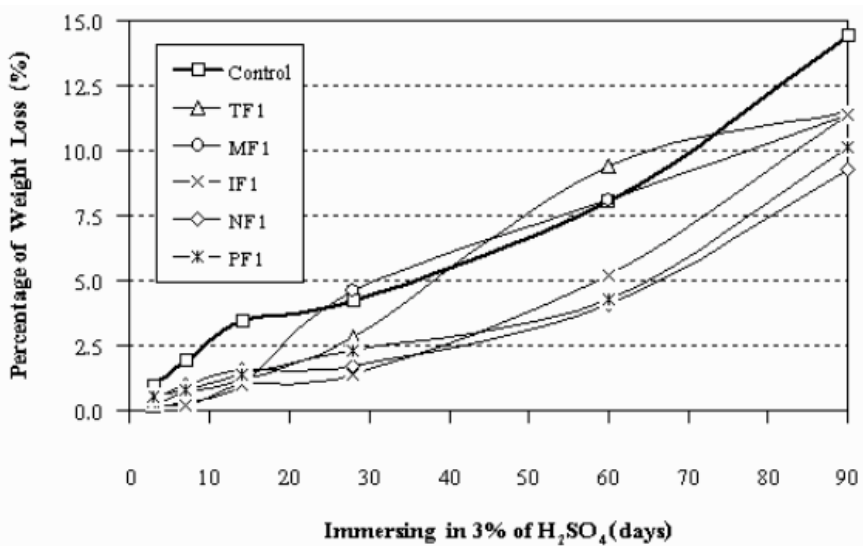


Figure 8. Percentage of weight loss of low fineness fly ash concretes in 3% of H₂SO₄

ทดสอบคืออยู่ในช่วง 1.6 ถึง 1.7% เมื่อแช่กรด 28 วัน และมีอัตราเพิ่มขึ้นเป็น 8.1 และ 10.7% เมื่อแช่กรด 90 วัน เนื่องจากคอนกรีตทั้งสองชนิดมีค่า W/(C+F) ค่อนข้างสูงทำให้มีความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดต่ำ ซึ่งผลการศึกษาเป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยของ Wilson และ Wallbank (1993) สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน T ถึงแม้จะมีค่า W/(C+F) สูงมากแต่ก็ประกอบด้วยอนุภาคขนาดใหญ่จึงสามารถต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดได้ดี

(ไกรวุฒิและคณะ, 2540) แสดงว่าเมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดสูงขึ้นจะเป็นผลให้การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

พิจารณาจาก Figures 8 และ 9 ซึ่งแสดงการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินความละเอียดน้อย (F1) และความละเอียดปานกลาง (F2) พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักที่ใกล้เคียงกัน คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินความละเอียดน้อยมีการสูญเสียน้ำหนักเล็กน้อยในช่วงอายุ

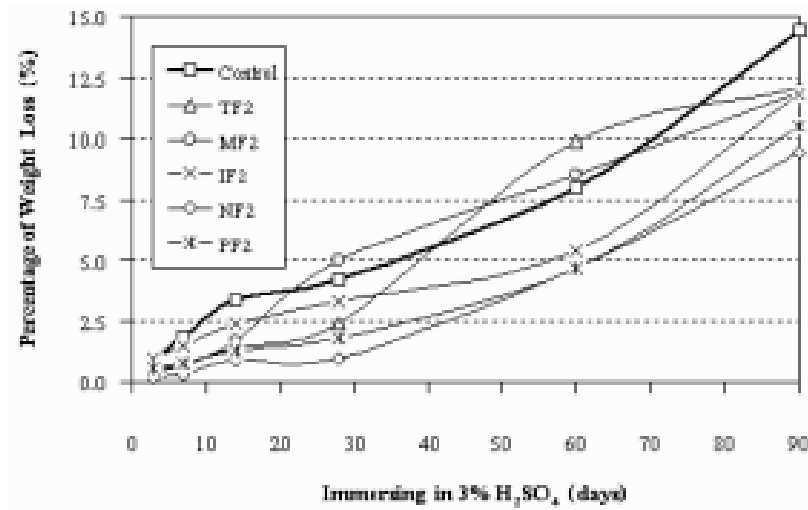


Figure 9. Percentage of weight loss of medium fineness fly ash concretes in 3% of H_2SO_4

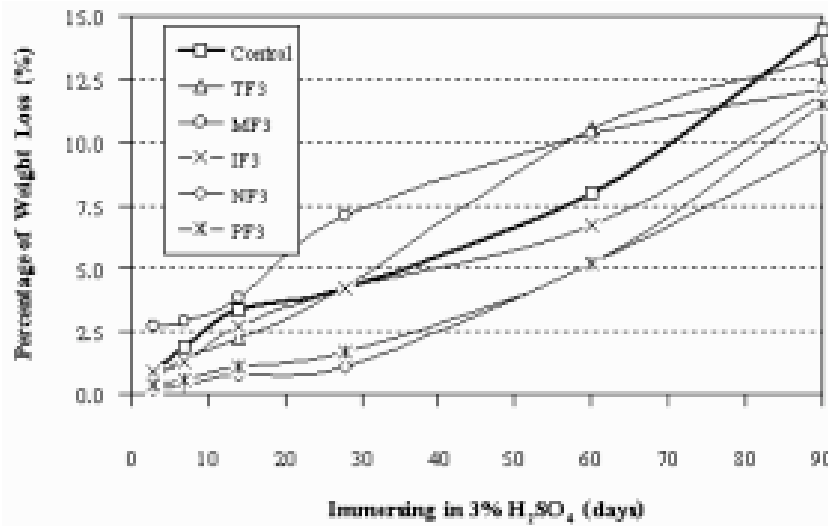


Figure 10. Percentage of weight loss of high fineness fly ash concretes in 3% of H_2SO_4

ต้นๆ ของการแทรกซึม แต่ก็มียอดการแทรกซึมบางส่วนที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินความละเอียดปานกลาง เช่น คอนกรีต NF1 มีอัตราการสูญเสียน้ำหนัก 1.6% เมื่อแช่กรด 28 วัน มากกว่าคอนกรีต NF2 ที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนัก 0.9% เมื่อแช่กรดเป็นเวลาเท่ากัน

คอนกรีต MF1, MF2, TF1 และ TF2 มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่แช่กรด 28 และ 60 วัน เนื่องจากการกัดกร่อนอย่างรุนแรงที่บริเวณผิว

ตัวอย่างในระยะแรก ซึ่งมีแนวโน้มเหมือนกับคอนกรีต M และ T แต่อัตราการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อแช่กรดเป็นเวลา 90 วัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ ไกรวุฒิวังศ์และคณะ (2540) ที่พบว่ามอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณ SO_3 ต่ำ สามารถทนทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้มากกว่าเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณ SO_3 สูงกว่า สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินความละเอียดสูง (F3) (ดู Figure 10 ประกอบ) พบว่ามีแนวโน้มของการสูญเสียน้ำหนักไม่แตกต่างจากคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน

ความละเอียดน้อยและละเอียดปานกลางและมีแนวโน้มของอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่มากกว่า โดยเฉพาะคอนกรีต MF3 มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักมากขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อแช่ตัวอย่างในกรด 28 และ 60 วัน โดยมีค่าเท่ากับ 7.1 และ 10.3% ตามลำดับ

เมื่อพิจารณา Figure 11 ซึ่งแสดงค่าร้อยละของน้ำหนักที่สูญเสียของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินต่างๆ ที่แช่กรดเป็นเวลา 90 วัน พบว่าเถ้าถ่านหิน M, P, I และ T เมื่อคัดขนาดอนุภาคเถ้าถ่านหินให้เล็กลง (F3) จะทำให้ความสามารถต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกของคอนกรีตลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินไม่ผ่านการคัดขนาด (O) แต่คอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน N พบว่าการคัดขนาดอนุภาคให้เล็กลงทำให้อัตราการสูญเสียน้ำหนักแตกต่างกันเพียง 0.70% แสดงว่าการคัดขนาดอนุภาคมีผลกระทบค่อนข้างน้อยต่อความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน N ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากเถ้าถ่านหิน N มีปริมาณของ SO_3 ที่ต่ำมากนั่นเอง แสดงว่าเถ้าถ่านหินที่มีปริมาณของ SO_3 ต่ำ มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกเมื่อลดขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหิน

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลกระทบของคอนกรีตเนื่องจากการใช้เถ้าถ่านหิน 5 แหล่งที่มีความละเอียดต่างกันเพื่อแทนที่

ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูง 50% ต่อกำลังอัดและการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริกความเข้มข้น 3% โดยน้ำหนัก สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. เถ้าถ่านหินแต่ละแหล่งมีคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันและเมื่อทำการคัดแยกด้วยเครื่องคัดขนาดด้วยแรงลม พบว่าเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคกลมตันสามารถทำการคัดแยกได้ดีและง่ายกว่าเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคกลวงและพรุน
2. มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินมีระยะเวลาการก่อตัวเพิ่มขึ้น แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น ส่วนค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์มีแนวโน้มสูงขึ้นตามความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่เพิ่มขึ้น
3. ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหิน การใช้เถ้าถ่านหินความละเอียดสูง (F3) จากทั้ง 5 แหล่งแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงถึง 50% สามารถให้กำลังอัดของคอนกรีตมากกว่า 77% ของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน
4. ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริกของคอนกรีตผสมเถ้าถ่านหินทั้ง 5 แหล่งมีค่าแตกต่างกัน ความต้านทานจะดีขึ้นเมื่อลดปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม เถ้าถ่านหินมีอนุภาคใหญ่มีปริมาณ SO_3 ต่ำ และ ค่า $W/(C+F)$ ของส่วนผสมคอนกรีตต่ำ
5. คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินทั้งที่ไม่ได้คัดขนาดและที่คัดขนาดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงมีความต้านทาน

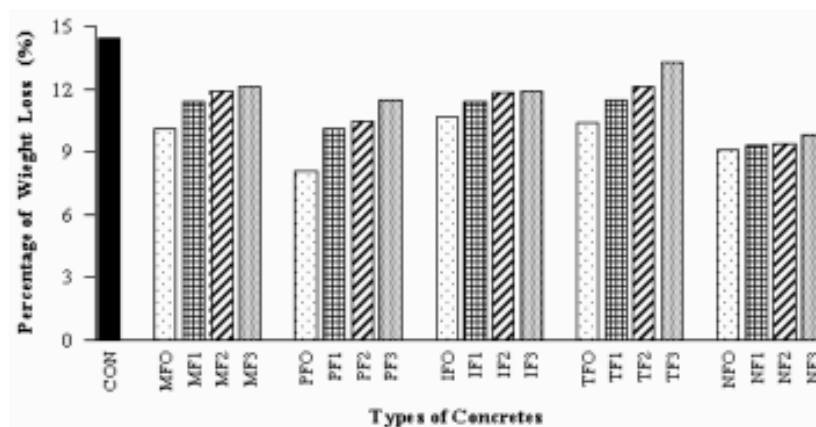


Figure 11. Comparison between the weight loss of fly ash concretes and control concrete after immersing in 3% of H_2SO_4 at 90 days

การกักกรองของกรดซัลฟูริกดีกว่าคอนกรีตควบคุม แต่
ทั้งนี้การต้านทานการกักกรองจะลดลงเมื่อเถ้าถ่านหินมี
ความละเอียดสูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการ
วิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก
(คปก.) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
แห่งชาติ (สทช.) ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- ไกรวุฒิ เกียรติโกมล ชัย จาตุรพิทักษ์กุล เอนก ศิริพานิชกร
จารุรัตน์ วรนิสรากุล ผยูร เกตุกราย สมิตร์ ส่งพิริยะ-
กิจ พิชัย นิमितยงสกุล ปริญญา จินดาประเสริฐ ชัยยศ
ตั้งสถิตย์กุลชัย และ ทิน เกตุรัตน์บวร. 2539. การ
คัดเลือกเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมกับงานคอนกรีต. การ
ประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2539, สมาคม
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.,
15-18 สิงหาคม 2539 : 257-269
- ไกรวุฒิ เกียรติโกมล ชัย จาตุรพิทักษ์กุล เอนก ศิริพานิชกร
จารุรัตน์ วรนิสรากุล ผยูร เกตุกราย อำนาจ เลิศ-
ประเสริฐวงศ์ พิชัย นิमितยงสกุล ปริญญา จินดาประเสริฐ
ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย และ ทิน เกตุรัตน์บวร. 2540.
บทบาทของความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการ
แยกขนาดต่อกำลังอัดและการกักกรองเนื่องจากกรด
ซัลฟูริก. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ
ครั้งที่ 3, กทม., 16-18 มกราคม 2540 : (MAT 2-1)-
(MAT2-10).
- สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล. 2538. การศึกษา
การบดเถ้าถ่านหินแม่เมาะเพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานใน
การเพิ่มกำลังอัดคอนกรีต, ว.วิจัยและพัฒนา สจ.บ., 18:
52-64.
- Berry, EE., Hemmings, RT., Langley, WS. and Carette,
GG. 1989. Beneficiated fly ash: hydration, mi-
crostructure, and strength development in Port-
land cement. Proceedings of the First Interna-
tional Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag,
and Natural Pozzolans in Concrete., Detroit,
USA; 241-273.
- Bouzoubaa, N., Zhang, MH. and Molhotra, VM. 2000.
Laboratory-produced high-volume fly ash
blended cements compressive strength and re-
sistance to the chloride-ion penetration of con-
crete, Cem. Conc. Res., 30: 1037-1046
- Erdogdu, K. and Turker, P. 1998. Effects of fly ash
particle size on strength of portland cement fly
ash mortars, Cem. Conc. Res., 28: 1217-1222.
- Fraay, ALA., Bijen, JM. and Haan, DYM. 1989. The
reaction of fly ash in concrete: a critical exami-
nation, Cem. Conc. Res., 19: 235-246.
- Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S. and
Chutubtim, S. 2001. A study of ground coarse
fly ashes with different finenesses from various
sources as pozzolanic materials, Cem. Conc.
Com., 23: 335-343.
- Mehta, P.K. 1985. Influence of fly ash characteristics
on the strength of Portland - fly ash mixture, Cem.
Conc. Res., 15: 669-674.
- Paya, J., Monzo, J., Peris-Mora, E., Borrachero, MV.,
Tercero, R. and Pinillos, C. 1995. Early-strength
development of Portland cement mortars con-
taining air classified fly ash, Cem. Conc. Res.,
25: 449-456.
- Peris-Mora, E., Paya, J. and Monzo J. 1993. Influence
of different sized fractions of a fly ash on work-
ability of mortars, Cem. Conc. Res., 23: pp. 917-
924.
- Slanicka, S. 1991. The influence of fly ash fineness on
the strength of concrete, Cem. Conc. Res., 21:
285-296.
- Sybertz, F. and Wiens, U. 1991. Effect of fly ash fine-
ness on hydration characteristics and strength
development. Proceedings of the international
conference on blened cement in construction.,
Sheffield University, UK : 152-165
- Torii, K. and Kawamura, M. 1994. Effects of fly ash
and silica fume on the resisistance of mortar to
sulfuric acid and sulfate attack, Cem. Conc. Res.,
24: 361-370
- Wilson, KR. and Wallbank, EJ. 1993. Design for Du-
rability. Proceedings of the International Con-
ference on Concrete 2000-Economic and Du-
rable Construction through Excellence., Dandee
University, Scotland. Vol. 1 : 85-97.