

ผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน ในส่วนผสมคอนกรีตต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

พงษ์จันทร์ จิราสิต¹

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตภาคพายัพ

ชัย จาตุรพิทักษ์กุล² เอนก ศิริพานิชกร² และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล³

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินในส่วนผสมคอนกรีตต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก โดยใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะแทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมคอนกรีตด้วยอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก และแปรค่าปริมาณวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน) ที่ 300, 400, 500 และ 600 กก./ม.³ ส่วนผสมคอนกรีตที่ทำการศึกษามีจำนวน 20 ส่วนผสม โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. จำนวน 160 ตัวอย่าง นำตัวอย่างทั้งหมดไปบ่มในน้ำ 28 วัน จากนั้นแบ่งตัวอย่างคอนกรีตออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกสำหรับทดสอบกำลังอัดที่อายุ 28 วัน และกลุ่มที่สองนำไปแช่ในกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 3, 7, 14, 21 และ 28 วัน เพื่อหาหน้าตัดที่สูญเสียของคอนกรีตอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริก

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเถ้าถ่านหินให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงที่สุดในทุกส่วนผสมที่มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากัน โดยมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันยังสามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ด้วยเมื่อกำหนดค่ายุบตัวในช่วงที่เท่ากัน แต่ไม่สามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ ในทางตรงกันข้ามกลับเป็นการทำให้เกิดการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์สามารถช่วยลดการกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ไม่ใช้เถ้าถ่านหินและมีวัสดุประสานที่เท่ากัน การเลือกใช้วัสดุประสานในปริมาณน้อยที่ 300 กก./ม.³ และแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีที่สุด แต่ก็ให้ค่ากำลังอัดต่ำที่สุดด้วยเช่นกัน ดังนั้นในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตเพื่อต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก จึงต้องพิจารณาเลือกใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ วัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินที่พอเหมาะเพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดและความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน

¹ อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา อดิศักดิ์ศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มจร

² ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Effects of Cement and Fly Ash Contents in Concrete against Sulfuric Acid Attack

Fongjan Jirasit ¹

Rajamangala Institute of Technology Northern Campus

Chai Jaturapitakkul ² Anek Siripanchgorn ² and Kraiwood Kiattikomol ³

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

In this investigation, the effects of cement and fly ash contents in concrete against sulfuric acid attack were studied. Fly ash from Mae Moh thermal power plant was used as cement replacements of 0, 20, 30, 40 and 50% by weight. The cementitious material contents (cement plus fly ash) in concrete were varied as 300, 400, 500 and 600 kg/m³. Twenty mix proportions were prepared to cast 160 specimens of 10x20 concrete cylinder. The concrete specimens were removed from the mold after 24 hours and then cured in water for 28 days, after that they were divided into 2 groups. The first group was tested for 28 days compressive strength and the second group was immersed in 3% by weight of sulfuric acid solution. Weight losses of concrete specimens were measured after immersing in the acid solution at the age of 3, 7, 14, 21 and 28 days.

The results showed that concrete having the same cementitious material contents and without fly ash gave the highest compressive strength at 28 days for every mix proportion, and the compressive strength was higher as increasing the cement content. The increase of cement content in concrete resulted in the less required of water-cement ratio for concrete with the same slump, however it did not reduce the weight loss due to the sulfuric acid attack. In contrast, it even increased the attack by the sulfuric acid. The concrete with cement replaced by fly ash reduced the degree of sulfuric acid attack as compared to the one without fly ash which having the same cementitious material content. Concrete with cementitious material content of 300 kg/m³ and with 50% of fly ash replacing cement was the best to stand against the sulfuric acid attack, however its compressive strength was also low. In summary, the selection of concrete mix proportion against the sulfuric acid attack must be considered on cement content, cementitious material content, and the percentage of cement replacement by fly ash in order to achieve a good resistance to sulfuric acid attack as well as a reasonable compressive strength.

¹Lecturer, Department of Civil Engineering ; Formerly, Graduate Student, KMUTT

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering

³Associate Professor, Department of Civil Engineering

บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าถ่านหินมาใช้ประโยชน์ทั้งในงานด้านวิศวกรรม และในงานด้านอื่นอย่างกว้างขวาง เช่น การนำเถ้าถ่านหินผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อลดชั้นโลหะหนักจากตะกอนน้ำเสีย [1,2] การใช้เป็นวัสดุก่อสร้างงานดินเป็นชั้นรองพื้นทางและชั้นพื้นทางสำหรับงานถนน เพื่อทดแทนดินลูกรังและหินคลุกที่มีราคาแพง และยังให้คุณสมบัติทางวิศวกรรมที่ดีกว่า [3] การก่อสร้างถนนและเชื่อมด้วยวิธีคอนกรีตบดอัด (Roller-Compacted Concrete) [4,5] การผสมทดแทนปูนซีเมนต์ในงานคอนกรีตขนาดใหญ่ เพื่อลดความร้อนเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน [6,7] งานคอนกรีตเหลวที่ต้องการเทให้ไหลเข้าแบบได้เองโดยไม่ต้องใช้เครื่องสั่นสะเทือน [8,9] นอกจากนี้ยังได้นำไปใช้ในงานคอนกรีต และงานอื่นๆ [10,11] จะเห็นว่าเถ้าถ่านหินสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดีและมีคุณสมบัติที่เหมาะสมเฉพาะตัว

คุณสมบัติอีกประการหนึ่งของเถ้าถ่านหินด้านวิศวกรรมที่ได้มีการวิจัยทั้งในและต่างประเทศ คือ ความสามารถของคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินในการต้านทานการกัดกร่อนต่อสารละลายเคมี โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารละลายเคมีที่อยู่ในรูปของกรดซัลฟูริก เช่น ในระบบระบายน้ำเสีย ฝนกรดในย่านอุตสาหกรรม [12] หรือในบริเวณบ่อน้ำพุร้อน [13] ซึ่งจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงต่อโครงสร้างคอนกรีต ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตให้สามารถทนต่อสภาวะดังกล่าวนี้ได้ โดยการใช้สารผสมเพิ่มในคอนกรีต การบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำ หรือการเคลือบผิวคอนกรีต ทั้งนี้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มค่ากำลังอัดของคอนกรีต ลดการซึมผ่านของสารละลายหรือปรับปรุงสภาพผิวของคอนกรีตให้ดีขึ้น [13,14]

การเคลือบผิวคอนกรีตสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่าการใช้สารผสมเพิ่ม แต่เนื่องจากมีราคาค่อนข้างสูง จึงได้มีความพยายามที่จะพัฒนาการใช้สารปอซโซลาน เช่น เถ้าถ่านหิน มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มในงานคอนกรีต โดยอาศัยคุณสมบัติจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ที่เกิดจากการรวมตัวระหว่างซิลิกาออกไซด์และอลูมินาออกไซด์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นการลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริก ทำให้คอนกรีตที่ใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์เกิดการกัดกร่อนน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว

ผลการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าต้องใช้ปริมาณเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ค่อนข้างสูงคือ ตั้งแต่ร้อยละ 50 โดยน้ำหนักขึ้นไป จึงจะสามารถลดการกัดกร่อนอย่างรุนแรงอันเนื่องมาจากซัลเฟตและกรดซัลฟูริกลงได้ แต่จะมีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง [15,16,17,18] การตัดแยกขนาดของเถ้าถ่านหินให้เล็กลงก่อนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ สามารถแก้ปัญหากำลังอัดคอนกรีตที่ลดลงได้ [17,19,20] แต่การเพิ่มกำลังอัดคอนกรีตด้วยการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ หรือการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์กลับพบว่าให้ผลในทางตรงกันข้าม กล่าวคือ คอนกรีตที่ได้ถึงแม้มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำแต่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์สูงจะเกิดการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นด้วย [21,22]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่า การใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต สามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ แต่ต้องคำนึงถึงปริมาณวัสดุประสานที่ใช้เป็นสำคัญ โดยควบคุมให้มีปริมาณที่เหมาะสมเพียงพอที่จะทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานได้ เพราะฉะนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาปริมาณวัสดุประสานและอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ของเถ้าถ่านหิน เพื่อให้คอนกรีตมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้เป็นอย่างดี และให้กำลังอัดที่เหมาะสมกับการใช้งาน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลกระทบของปริมาณปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินที่มีต่อกำลังอัดคอนกรีต และความต้านทานต่อการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก

การทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

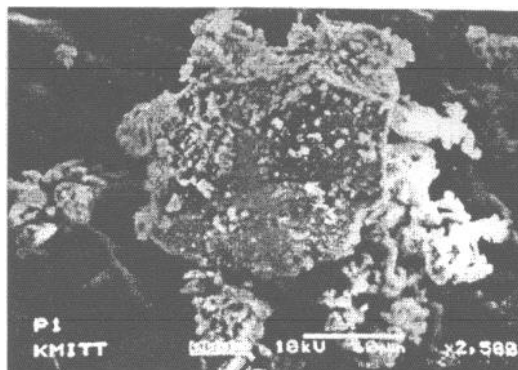
วัสดุที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าถ่านหินจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง, ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.33, หินย่อยขนาดโตสุดไม่เกิน 1 นิ้ว, น้ำประปา และสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 96 ชนิด Commercial Grade

ตารางที่ 1 เป็นองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน องค์ประกอบหลักทางเคมีของเถ้าถ่านหิน คือ SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 มีปริมาณรวมกันเท่ากับร้อยละ 79.82 ปริมาณ SO_3 และ Loss On Ignition (LOI) มีค่าไม่เกินร้อยละ 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นเถ้าถ่านหิน Class F ตาม ASTM C 618 ค่าความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 มีปริมาณค้างร้อยละ 33 ซึ่งใกล้เคียงกับขีดจำกัดสูงสุดตามมาตรฐานที่ยอมให้ไม่เกินร้อยละ 34

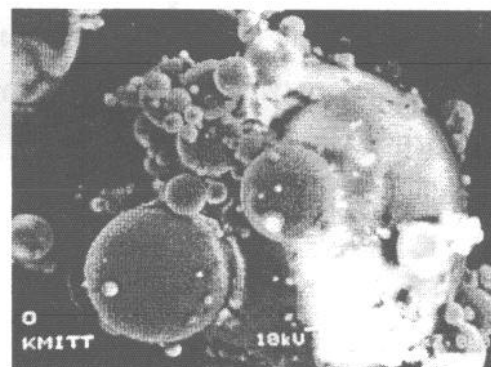
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

Chemical Composition / Physical Properties	Cement Type I	Fly Ash
Silicon Dioxide, SiO ₂ (%)	20.62	45.75
Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ (%)	5.22	25.27
Iron Oxide, Fe ₂ O ₃ (%)	3.10	8.80
Calcium Oxide, CaO (%)	64.99	9.32
Magnesium Oxide, MgO (%)	0.91	2.29
Sodium Oxide, Na ₂ O (%)	0.07	1.53
Potassium Oxide, K ₂ O (%)	0.50	2.79
Sulfur Trioxide, SO ₃ (%)	2.70	1.82
Loss On Ignition, LOI (%)	1.13	1.12
Specific Gravity	3.16	2.00
Retained On Sieve No. 325 (%)	-	33
Blaine Fineness (cm ² /g)	3420	3322
Mean Diameter (micron)	17.3	46.6

ลักษณะทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินแสดงได้จากภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคด้วยเครื่อง SEM พบว่าปูนซีเมนต์จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมคม รูปร่างไม่แน่นอนดังรูปที่ 1(ก) ส่วนเถ้าถ่านหินจะเป็นทรงกลม มีขนาดเล็กใหญ่คละกันดังรูปที่ 1(ข) ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินเท่ากับ 17.3 และ 46.6 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีลักษณะการกระจายตัวค่อนข้างกว้าง (ดูรูปที่ 2) ส่วนผลการทดสอบ Blaine Fineness พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินมีค่าเท่ากับ 3420 และ 3322 ซม.²/ก. ตามลำดับ จัดว่าอยู่ในเกณฑ์ตาม ASTM C 150 ซึ่งกำหนดค่าความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ต้องไม่ต่ำกว่า 2800 ซม.²/ก. ส่วนความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่จะนำมาผสมคอนกรีตควรอยู่ระหว่าง 2500-4000 ซม.²/ก. [23]

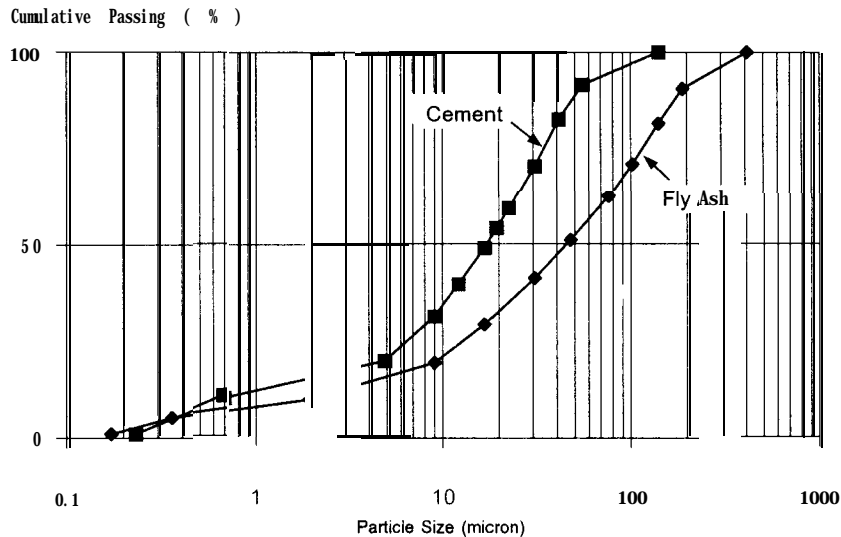


(ก) ปูนซีเมนต์



(ข) เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ

รูปที่ 1 ภาพถ่ายขยายขนาดอนุภาคด้วย Scanning Electron Microscope



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคกับร้อยละสะสมของเถ้าถ่านหินและปูนซีเมนต์

ตัวอย่างคอนกรีต

การศึกษานี้ใช้ตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. มีอัตราส่วนผสมของคอนกรีตดังแสดงในตารางที่ 2 ปริมาณปูนซีเมนต์กำหนดที่ 300, 400, 500 และ 600 กก./ม.³ จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน) ดังนั้นจึงมีส่วนผสมคอนกรีตทั้งสิ้นจำนวน 20 ส่วนผสม ทั้งนี้ได้ออกแบบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพื่อให้ได้ค่าการยุบตัวอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ทำการหล่อตัวอย่างคอนกรีตตาม ASTM C 192 และถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปบ่มในน้ำจนอายุครบ 28 วัน ในแต่ละส่วนผสมมีตัวอย่างคอนกรีต 8 ตัวอย่าง ดังนั้นจึงมีจำนวนตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมด 160 ตัวอย่าง เมื่อบ่มในน้ำจนครบ 28 วัน จึงแบ่งตัวอย่างคอนกรีตเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกนำมาทดสอบกำลังอัดตาม ASTM C 39 จำนวน 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม และส่วนที่ 2 นำมาแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เทียบเท่ากับค่า pH 0.5 ส่วนผสมละ 5 ตัวอย่าง และชั่งน้ำหนักตัวอย่างคอนกรีตตามอายุของการแช่สารละลายกรดที่ 3, 7, 14, 21, และ 28 วัน เพื่อศึกษาสภาพการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกในรูปของน้ำหนักที่สูญเสียของตัวอย่างคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

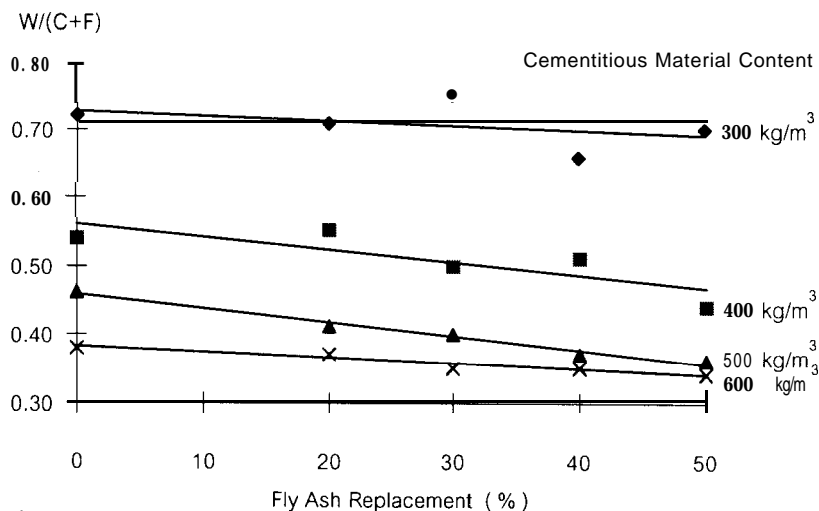
Mix Design No.	Fly Ash in Replacement (%)	Mix Proportion (kg/m ³)					W/(C+F) Ratio	Slump (cm)
		Cement (C)	Fly Ash (F)	Coarse Aggregate	Fine Aggregate	Water		
1		300		876	885	215	0.72	6.0
2		400		880	804	216	0.54	7.0
3		500		880	720	230	0.46	8.0
4		600		882	636	228	0.38	7.5
5	20	240	60	876	885	213	0.71	7.0
6	20	320	80	880	804	220	0.55	9.0
7	20	400	100	880	720	205	0.41	6.0
8	20	480	120	882	636	222	0.37	6.0
9	30	210	90	876	885	225	0.75	6.0
10	30	280	120	880	804	200	0.50	7.0
11	30	350	150	880	720	200	0.40	6.5
12	30	420	180	882	636	209	0.35	7.5
13	40	180	120	876	885	201	0.66	8.0
14	40	240	160	880	804	203	0.51	5.0
15	40	300	200	880	720	185	0.37	5.5
16	40	360	240	882	636	210	0.35	6.0
17	50	150	150	876	885	210	0.70	5.0
18	50	200	200	880	804	176	0.44	5.5
19	50	250	250	879	719	180	0.36	8.0
20	50	300	300	882	636	206	0.34	10.0

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

ผลกระทบของปริมาณวัสดุประสานต่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เมื่อกำหนดค่าการยุบตัวในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม.

ส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำหนดให้มีความสามารถในการทำงานได้เท่ากัน โดยควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วงระหว่าง 7.5 ± 2.5 ซม. ผลการทดสอบในตารางที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณวัสดุประสานทั้งในกรณีแทนที่และไม่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินจาก 300 เป็น 400 และ 500 กก./ม.³ สามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้เกิดการยุบตัวในช่วงดังกล่าวลงได้ค่อนข้างมาก และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากปริมาณวัสดุประสานที่เพิ่มขึ้นเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างมวลรวมในคอนกรีต และช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของมวลรวมหยาบ ประกอบกับรูปร่างที่เป็นทรงกลมของเถ้าถ่านหินเมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล

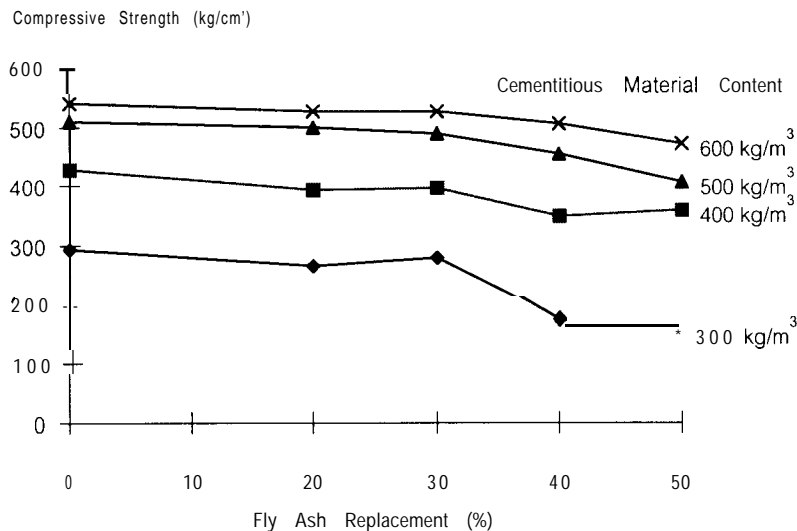
ในการลดแรงเสียดทานและเพิ่มความสามารถในการทำงานให้ดีขึ้น [17,19,20] แต่ในกรณีเพิ่มปริมาณวัสดุประสานจาก 500 เป็น 600 กก./ม.³ และแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานเพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 400 หรือ 500 กก./ม.³ ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากในส่วนผสมคอนกรีตซึ่งมีปริมาณวัสดุประสานสูงๆ เช่นที่ 500 หรือ 600 กก./ม.³ จะมีมวลละเอียดในปริมาณที่มากเกินไปพอแทรกตัวอยู่ระหว่างมวลรวมของคอนกรีต ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในกรณีนี้จึงช่วยแต่เฉพาะลดแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคลงบ้างเท่านั้นและช่วยทำให้ความต้องการปริมาณน้ำของส่วนผสมคอนกรีตลดลงบ้างเล็กน้อยเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณที่มากขึ้น



รูปที่ 3 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม.

กำลังอัดของคอนกรีต

ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดคอนกรีตที่อัตราส่วนผสมต่างๆ กัน รวมทั้งแสดงค่าร้อยละของกำลังอัดเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังอัดคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหิน จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสานที่เท่ากัน คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินให้กำลังอัดสูงที่สุดในแต่ละกลุ่ม โดยกำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณวัสดุประสาน และเมื่อผสมเถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วันและร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหิน

ในกรณีแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก พบว่ากำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จะลดลงเหลือร้อยละ 91.4 ถึง 95.2 เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 300 และ 400 กก./ม.³ และเหลือร้อยละ 96.1 ถึง 98.4 เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 500 และ 600 กก./ม.³ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้วัสดุประสานในปริมาณมาก การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินจะมีผลต่อการลดกำลังอัดที่น้อยกว่าในกรณีที่ใช้วัสดุประสานในปริมาณน้อย ทั้งนี้อาจเป็นผลเนื่องจากการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่สูงกว่าจะทำให้ได้แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันในปริมาณที่มากกว่าส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อย ดังนั้นจึงมีแคลเซียมไฮดรอกไซด์มากเพียงพอในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าถ่านหินซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มกำลังอัดแก่คอนกรีตอีกทางหนึ่ง

ตารางที่ 3 ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน และน้ำหนักที่สูญเสียของคอนกรีต

Mix Design No.	Fly Ash in Replac. (%)	Cementitious Material (kg/m ³)	W/(C+F) Ratio	Comp. Strength at 28-day (kg/cm ²)	Normalized Comp. Strength (%)	Weight Loss (%)				
						3-d	7-d	14-d	21-d	28-d
1		300	0.72	291	100.0	1.13	1.29	3.73	5.65	6.60
5	20	300	0.71	266	91.4	0.34	0.45	1.53	2.10	3.20
9	30	300	0.75	277	95.2	0.38	0.52	1.16	2.00	3.19
13	40	300	0.66	175	60.1	0.77	0.81	0.81	0.99	1.21
17	50	300	0.70	151	51.9	0.03	0.06	0.06	0.07	0.08
2	-	400	0.54	427	100.0	2.33	3.34	7.26	9.98	11.59
6	20	400	0.55	392	91.8	1.11	2.26	5.75	7.93	9.28
1.0	30	400	0.50	395	92.5	1.24	2.33	5.46	8.33	9.01
14	40	400	0.51	350	82.0	0.90	1.17	1.47	3.75	5.68
18	50	400	0.44	360	84.3	0.40	0.96	2.16	5.04	6.42
3	-	500	0.46	507	100.0	2.52	3.51	7.28	9.55	11.27
7	20	500	0.41	499	98.4	2.31	3.97	8.07	10.41	11.87
11	30	500	0.40	487	96.1	2.29	3.88	7.48	10.17	11.75
15	40	500	0.37	453	89.3	1.53	3.39	6.74	9.43	11.53
19	50	500	0.36	408	80.5	0.14	1.68	4.44	7.31	8.84
4	-	600	0.38	539	100.0	2.11	4.85	8.13	11.83	13.34
8	20	600	0.37	527	97.8	2.25	4.14	8.49	11.10	12.63
12	30	600	0.35	527	97.8	2.60	4.42	8.41	11.04	12.49
16	40	600	0.35	505	93.7	1.75	4.19	7.28	9.49	11.19
20	50	600	0.34	471	87.4	0.28	1.79	4.26	7.23	9.14

สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนักนั้น กำลังอัดคอนกรีตมีค่ามากกว่าร้อยละ 80 เมื่อมีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 400, 500 และ 600 กก./ม.³ โดยที่ปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 600 กก./ม.³ ยังคงมีค่ากำลังอัดสูงสุด แต่ที่ปริมาณวัสดุประสาน 300 กก./ม.³ กำลังอัดคอนกรีตมีค่าเพียงร้อยละ 51.9 เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณน้อย และใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณมากจะทำให้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้สมบูรณ์ภายในเวลา 28 วัน จึงทำให้กำลังอัดที่อายุ 28 วัน ต่ำลงไปในอัตราที่สูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตในส่วนผสมอื่นๆ

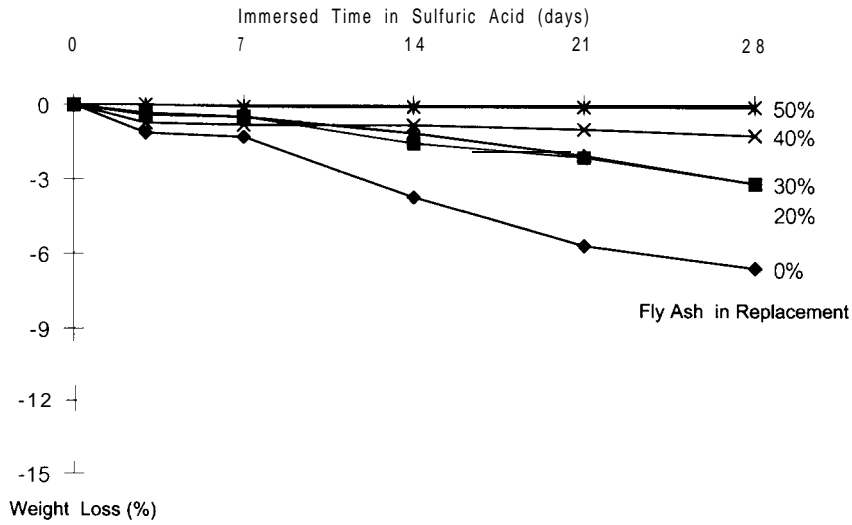
เมื่อควบคุมค่าการยุบตัวให้อยู่ในช่วง 7.5 ± 2.5 ซม. ตัวอย่างคอนกรีตที่ให้ค่ากำลังอัดประมาณ 500 กก./ซม.² มี 3 อัตราส่วนผสม คือ อัตราส่วนผสมที่ 16, 7 และ 3 (ดูตารางที่ 3) ซึ่งมีปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินเท่ากับร้อยละ 40, 20 และไม่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ตามลำดับ โดยอัตราส่วนผสมที่ 16 มีปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินสูงที่สุดในกลุ่มและมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำที่สุด โดยมีความสามารถในการทำงานเท่ากัน ในทำนองเดียวกับอัตราส่วนผสมที่ 19, 10 และ 6 มีกำลังอัด

ใกล้เคียงกันประมาณ 400 กก./ชม.² และมีเถาถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 50, 30 และ 20 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยอัตราส่วนผสมที่ 19 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากมีปริมาณวัสดุประสาน 500 กก./ม.³ และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานน้อยกว่าในอัตราส่วนผสมที่ 10 และ 6 ซึ่งมีปริมาณวัสดุประสานเพียง 400 กก./ม.³ ดังนั้นจึงเป็นการชี้ให้เห็นว่าการพัฒนา กำลังอัด โดยการเพิ่มปริมาณวัสดุประสานจะให้ผลที่ชัดเจน ส่วนการใช้เถาถ่านหินเข้ามาแทนที่ปูนซีเมนต์นั้นสามารถใช้แทนที่ได้ในปริมาณมากถึงร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 400, 500 และ 600 กก./ม.³ ซึ่งในกรณีเหล่านี้สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในส่วนผสมของคอนกรีต และยังช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงาน โดยส่งผลกระทบต่อค่ากำลังอัดคอนกรีตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

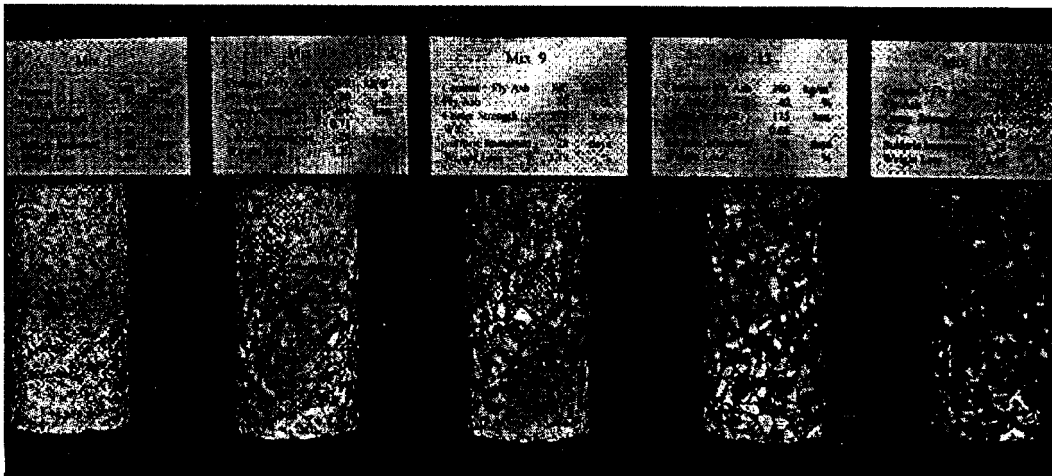
การกักกรองคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีค่า pH 0.5

จากการศึกษาความต้านทานต่อการกักกรองของกรดซัลฟูริกในตัวอย่างคอนกรีต พบว่าเมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 300 กก./ม.³ ตัวอย่างคอนกรีตเกิดการกักกรองน้อยกว่าอัตราส่วนอื่นๆ (ดูรูปที่ 5, 6 และ 11) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะเกิดการกักกรองน้อยมากเพียงร้อยละ 0.08 ที่อายุการแช่ในกรดซัลฟูริก 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งที่อัตราส่วนผสมดังกล่าวน่าจะเป็นการชี้ให้เห็นถึงจุดที่เถาถ่านหินทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้พอดี และเมื่อลดปริมาณการแทนที่ด้วยเถาถ่านหินลงเหลือร้อยละ 40, 30 และ 20 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เกิดการกักกรองเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 1.21, 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาปอซโซลานเข้าทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟูริกนั่นเอง ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่แทนที่ด้วยเถาถ่านหินจะเกิดการกักกรองสูงสุดเท่ากับร้อยละ 6.60 ที่อายุการแช่ในกรดซัลฟูริก 28 วัน แสดงให้เห็นว่า การลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน สามารถลดการกักกรองของคอนกรีตลงได้อย่างเป็นผล

เมื่อเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์ในส่วนผสม การกักกรองของตัวอย่างคอนกรีตเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่จะลดลงเป็นลำดับเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถาถ่านหิน โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการแช่ในกรดซัลฟูริก รูปที่ 7 ได้แสดงให้เห็นถึงปริมาณการสูญเสียน้ำหนักของคอนกรีตที่ใช้ปริมาณวัสดุประสาน 500 กก./ม.³ และแทนที่ด้วยเถาถ่านหินร้อยละ 0, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันประมาณร้อยละ 12 ที่อายุการแช่ในกรดซัลฟูริก 28 วัน แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถาถ่านหินเป็นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะช่วยลดการกักกรองลงได้ประมาณร้อยละ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่แทนที่ด้วยเถาถ่านหิน (ดูรูปที่ 8 และ 11) แต่ในกรณีที่คอนกรีตมีปริมาณวัสดุประสาน 300 กก./ม.³ และแทนที่ด้วยเถาถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถลดการกักกรองลงได้ถึงประมาณร้อยละ 6 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่แทนที่ด้วยเถาถ่านหิน (ดูรูปที่ 5) ตัวอย่างคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 400 และ 600 กก./ม.³ จะมีลักษณะการกักกรองคล้ายกับกรณีที่มีปริมาณวัสดุประสาน 500 กก./ม.³



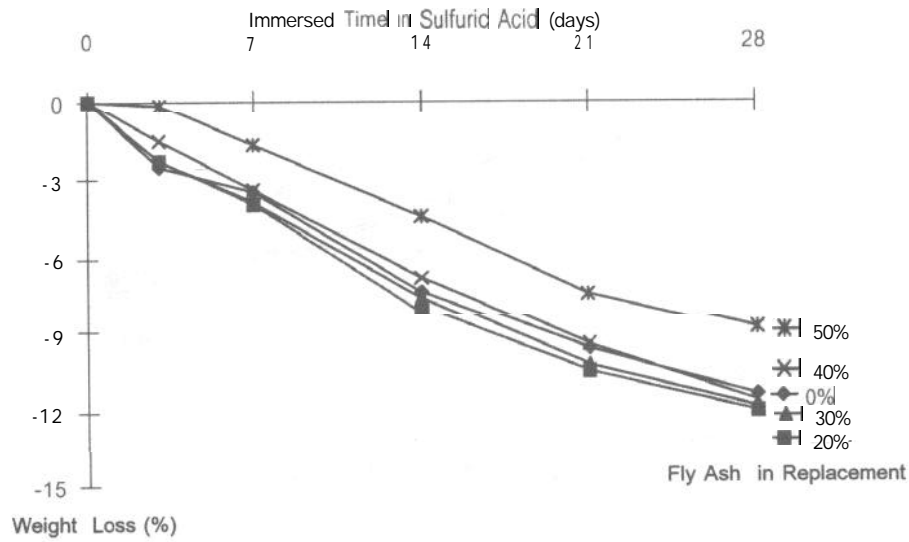
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 300 กก./ม.³ และระยะเวลาที่แช่ในกรดซัลฟูริกจนถึง 28 วัน



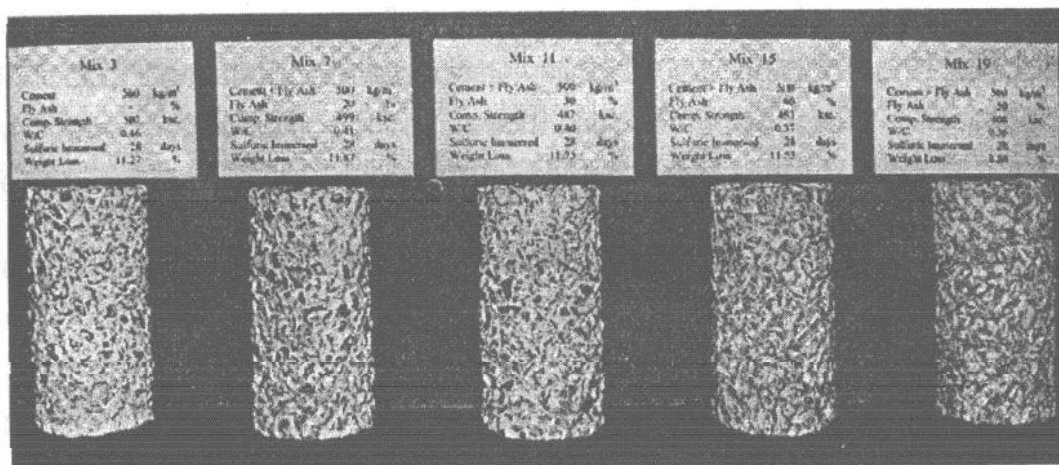
รูปที่ 6 ตัวอย่างคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 300 กก./ม.³ ที่อายุการแช่ในกรดซัลฟูริก 28 วัน

รูปที่ 9 แสดงผลการกัดกร่อนและกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ส่วนผสมที่มีปริมาณวัสดุประสาน 300 กก./ม.³ เกิดการกัดกร่อนน้อยที่สุดและมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อปริมาณวัสดุประสานเพิ่มจาก 300 เป็น 400 กก./ม.³ เป็นช่วงที่พบว่าแนวโน้มเกิดการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นมากที่สุด คือเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณร้อยละ 6 ในทุกส่วนผสม ซึ่งน่าจะเป็นจุดที่มีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างมาก และการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนต่างๆ ไม่สามารถลดปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลงได้มากนัก โดยการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 20 และ 30 โดยน้ำหนัก ช่วยลดการกัดกร่อนลงได้ประมาณร้อยละ 3 ในขณะที่การแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 40 และ 50 โดยน้ำหนัก ช่วยลดการกัดกร่อนลงได้ประมาณร้อยละ 6 และเมื่อเพิ่มปริมาณ

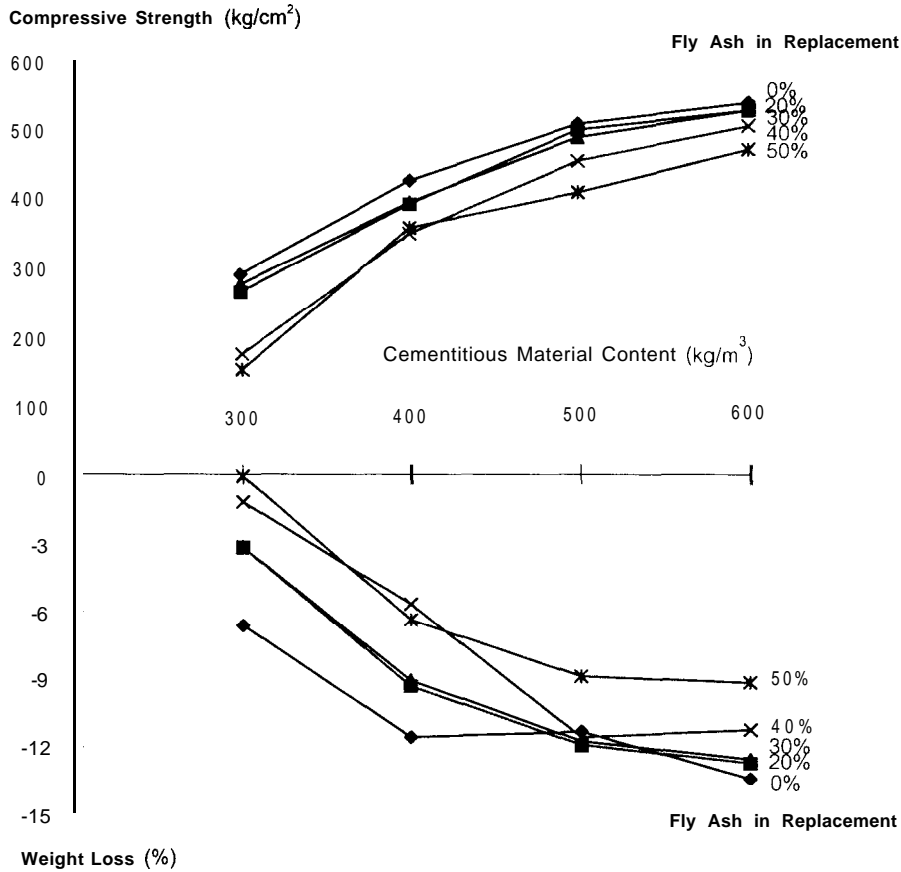
วัสดุประสานเป็น 500 และ 600 กก./ม.³ พบว่า เกิดการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยในอัตราที่ต่ำลง เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดคอนกรีตในแต่ละส่วนผสมพบว่า การกัดกร่อนที่เกิดขึ้นกับกำลังอัดคอนกรีตมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกัน คือ เมื่อปริมาณวัสดุประสานเพิ่มขึ้น กำลังอัดคอนกรีตเพิ่มขึ้นและการกัดกร่อนก็เพิ่มมากขึ้นด้วยในขณะเดียวกัน เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตลดลง และการกัดกร่อนก็ลดลงด้วยเช่นเดียวกัน ดังนั้นในการปรับปรุงคุณภาพคอนกรีตเพื่อลดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก โดยการเพิ่มกำลังอัดคอนกรีต ด้วยวิธีการเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน ไม่สามารถป้องกันหรือลดการกัดกร่อนลงได้แต่กลับมีผลทำให้เกิดการกัดกร่อนเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีส่วนของปูนซีเมนต์ในอัตราสูง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ N. I. Fattuhi and B. P. Hughes [14,21,22]



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 500 กก./ม.³ และระยะเวลาที่แช่ในกรดซัลฟูริกจนถึง 28 วัน



รูปที่ 8 ตัวอย่างคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 500 กก./ม.³ ที่อายุการแช่ในกรดซัลฟูริก 28 วัน

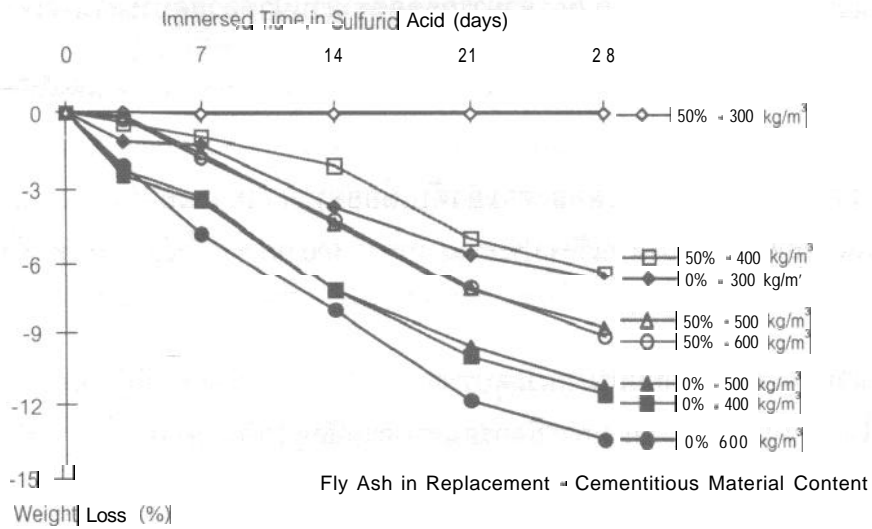


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดคอนกรีตที่อายุ 28 วันและร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเปรียบเทียบกับปริมาณวัสดุประสาน

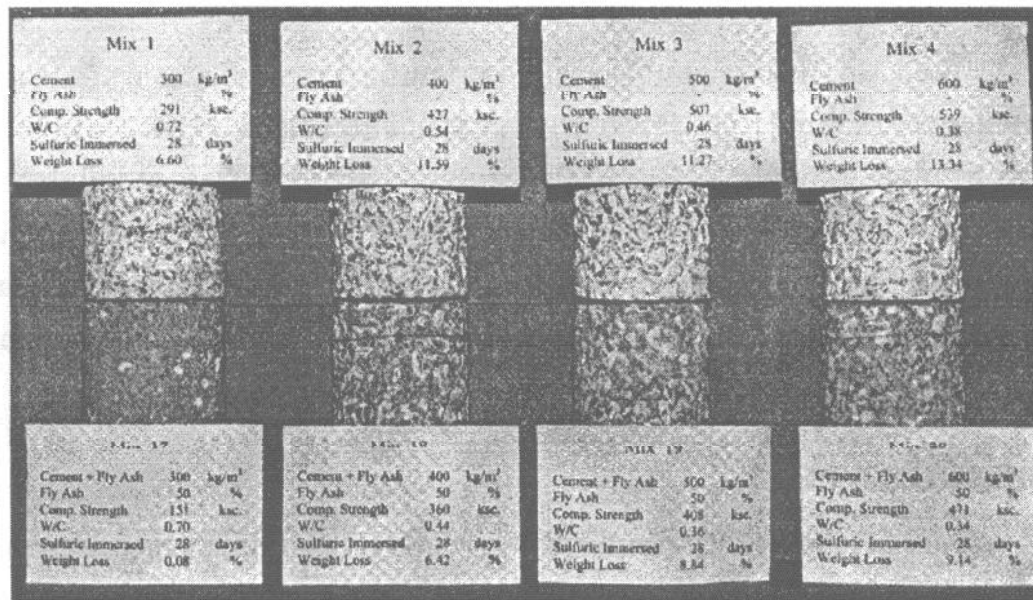
รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักคอนกรีตกับระยะเวลาการแช่ในกรดซัลฟูริก เมื่อเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างที่ไม่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินกับตัวอย่างที่แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ใช้วัสดุประสานปริมาณมากในระดับ 400, 500 และ 600 กก./ม.³ และไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน จะเป็นกลุ่มที่เกิดการกัดกร่อนสูงถึงประมาณร้อยละ 12 แต่เมื่อแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 สามารถลดการกัดกร่อนเมื่อแช่ในกรดซัลฟูริก 28 วัน ลงได้ประมาณร้อยละ 4 สำหรับส่วนผสมที่มีปริมาณวัสดุประสานน้อยที่ 300 กก./ม.³ แม้ว่าจะเกิดการกัดกร่อนต่ำที่สุดเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 แต่ค่ากำลังอัดคอนกรีตก็ต่ำที่สุดเช่นเดียวกัน (ดูรูปที่ 9)

เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานเพื่อป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก กำลังอัดคอนกรีตเป็นสิ่งที่มองข้ามมิได้ จากการเปรียบเทียบแต่ละส่วนผสมพบว่าการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในส่วนผสมที่ใช้ปริมาณวัสดุประสานสูง แม้จะช่วยลดการกัดกร่อนลงได้ไม่มากนัก แต่สามารถให้กำลังอัดสูงตามต้องการในราคาประหยัด และมีความสามารถในการทำงานที่ดีขึ้น ตัวอย่างเช่น เมื่อใช้ปริมาณวัสดุประสาน 300 กก./ม.³ และไม่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.72 ได้คอนกรีตที่มีกำลังอัด 291 กก./ซม.² เกิดการกัดกร่อนร้อยละ 6.60 แต่เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสานเป็น 400 กก./ม.³ และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก สามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้ 100 กก./ม.³ ยังได้คอนกรีตที่มีกำลังอัด 360 กก./ซม.²

และมีค่าการกัดกร่อนใกล้เคียงกันเท่ากับร้อยละ 6.42 (ดูตารางที่ 2 และ 3) และยังคงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเหลือเพียง 0.44 โดยที่มีความสามารถในการทำงานใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตเพื่อป้องกันการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกโดยการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินในปูนซีเมนต์จัดว่าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจและให้ผลที่ดีพอสมควร แต่ต้องพิจารณาเลือกใช้ปริมาณวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งาน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักคอนกรีตและระยะเวลาที่แช่ในกรดซัลฟูริก



รูปที่ 11 ตัวอย่างคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินและที่ได้แทนที่ด้วยเถ้าถ่านหิน ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก เมื่อมีอายุการแช่ในกรดซัลฟูริก 28 วัน

สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษาวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อกำหนดค่ายุบตัวของคอนกรีตให้อยู่ระหว่าง 7.5 ± 2.5 ซม. การเพิ่มปริมาณวัสดุประสานและปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินจะลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลงได้ การเพิ่มปริมาณวัสดุประสานในช่วง 300 ถึง 500 กก./ม.³ สามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้มากแต่การเพิ่มวัสดุประสานจาก 500 เป็น 600 กก./ม.³ สามารถลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานได้เพียงเล็กน้อย
2. เมื่อกำหนดปริมาณวัสดุประสานเท่ากัน คอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าถ่านหินให้กำลังอัดสูงกว่าส่วนผสมคอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหิน เมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุประสาน พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณของวัสดุประสาน แต่กำลังอัดจะลดลงตามลำดับเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินเพิ่มขึ้น และในส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสานมากกว่า 400 กก./ม.³ ขึ้นไป การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินจนถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะมีผลต่อการลดกำลังอัดเพียงเล็กน้อย
3. ส่วนผสมคอนกรีตที่มีปริมาณวัสดุประสาน 300 กก./ม.³ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะต้านทานการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกที่มี pH 0.5 ได้มากที่สุด
4. เมื่อใช้วัสดุประสานในปริมาณตั้งแต่ 400 กก./ม.³ ขึ้นไป การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินจะช่วยลดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้เพียงเล็กน้อย ดังนั้นในการป้องกันการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกจำเป็นต้องควบคุมปริมาณวัสดุประสาน ซึ่งจะมีผลกระทบต่อค่ากำลังอัดคอนกรีตโดยตรง
5. ในสภาพการใช้งานที่คอนกรีตอาจถูกกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก ถ้าเป็นโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกรดในระดับที่ค่า pH ต่ำมาก ควรพิจารณาเลือกใช้ปริมาณวัสดุประสานให้น้อยที่สุดและใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ให้มากที่สุดแต่จะส่งผลให้กำลังอัดคอนกรีตต่ำลง แต่ในโครงสร้างคอนกรีตทั่วไปที่สัมผัสเพียงกรดอ่อน การเลือกใช้วัสดุประสานในปริมาณที่สูงขึ้นและแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในปริมาณมาก นอกจากจะช่วยลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ผสมในคอนกรีตลงแล้ว ยังสามารถเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าการใช้ปูนซีเมนต์แต่เพียงอย่างเดียว และยังคงให้กำลังอัดคอนกรีตสูงตามต้องการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้เล็งเห็นความสำคัญของงานวิจัยนี้ และได้มอบทุนอุดหนุนงานวิจัยผ่านตามโครงการพัฒนาวิชาชีพนักวิจัยช่วยให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณสำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ที่ได้สนับสนุนเถ้าถ่านหินเพื่อใช้ในการวิจัย ตลอดจนคุณจตุรงค์ ธรรมโกศล คุณทวี โพธิ์งาม และคุณประวิตร สิงห์ผาสุข นักศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Gordon, G. J., Merkel, J. B. and Lamond, J. F., 1995, "Concrete for Stabilization/Solidification of Waste Materials," *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, USA, pp. 623-639.
2. อนุวัฒน์ ปูนพันธ์ฉาย, 2539 "การทำตะกอนโลหะหนักซัลไฟต์ให้เป็นก้อนโดยใช้ปูนซีเมนต์และซีเถ้าลอยลิกไนต์เป็นตัวประสาน," *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*
3. สมชัย กกกำแหง, 2535 "การนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ประโยชน์เป็นวัสดุก่อสร้างงานดิน," *เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า 297-319*
4. Marchand, J., Pigeon M., Boisvert, J., Isabelle, H. L. and Houdusse, O., 1992, "Deicer Salt Scaling Resistance of Roller-Compacted Concrete Pavements Containing Fly Ash and Silica Fume," *Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Istanbul, Turkey, pp. 151-177.
5. สมชัย กกกำแหง, 2537 "การใช้เถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะเป็นส่วนผสมสำคัญในงานก่อสร้างเขื่อนคอนกรีตบดอัดที่ปากมูล," *เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2537, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, หน้า CE-31- CE-53*
6. Kanazawa, K., Yamada, K., and Sogo, S., 1992, "Properties of Low-Heat Generating Concrete Containing Large Volumes of Blast-furnace Slag and Fly Ash," *Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Istanbul, Turkey, pp. 97 - 117.
7. Amtsbuchler, R. , 1995, "Fly Ash in Large Water Supply Project : A South African Case History," *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, USA, pp. 531-545.
8. Ambrose, J. and Pera, J., 1995, "Development of Self-Levelling High Volume Fly Ash Concrete," *Proceedings of the 5th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Milwaukee, USA, pp. 361-372.

9. สมชัย กกก้าแหง, 2538, "การทดลองนำเถ้าลอยลิกไนต์แม่เมาะมาใช้ในงานคอนกรีตที่โครงการก่อสร้างโรงไฟฟ้าแม่เมาะ," *เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2538, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*, หน้า CE-95-CE-120
10. Manz, O. E., 1998, "Worldwide Production and Utilization of Coal Ash in Concrete and Other Products -A Survey for the Period 19 5 9 - 19 9 5 ,," *Proceedings of the 6th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Bangkok, Thailand, pp. 12 5 - 13 2.
11. Brandstetr, J. and Havlica, J., 1998, "Properties and Some Possibilities of the Utilization of Solid Residue of Fluidized Bed Combustion of Coal and Lignite," *Proceedings of the 6th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Bangkok, Thailand, pp. 133-1 60.
12. Perkins, P. H., 198 1, "The Corrosion Resistance of Concrete Sanitary Engineering Structures," *Concrete International: Design & Construction*, April, pp. 75-81.
13. S. Kurihara, H. Matsushita and S. Matsui, 1995, "A Protection Method for Concrete under Severe Acidic Conditions," *Environment and Loading*, Vol. 2, pp. 1275-1280.
14. Fattuhi, N. I. and Hughes, B. P., 1983, "Effect of Acid Attack on Concrete with Different Admixtures or Protective Coatings," *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, pp. 655-665.
15. สมหมาย แสงวงกิจ, เอนก ศิริพานิชกร, ชัย จาดูรพิทักษ์กุล, จารุรัตน์ วรรณิสรากุล และ เมธี เวชารัตนา, 2535, "การใช้เถ้าถ่านหินในการป้องกันการกัดกร่อนของคอนกรีต," *เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2535, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*, หน้า 337-349
16. ชัย จาดูรพิทักษ์กุล และ เอนก ศิริพานิชกร, 2538, "ผลกระทบของความละเอียดของเถ้าถ่านหินต่อคุณสมบัติการกัดกร่อนของมอร์ตาร์," *เอกสารการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 2*, หน้า 105-110
17. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาดูรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรรณิสรากุล, พยूर เกตุกราย, อำนาจ เลิศประเสริฐวงศ์, พิชัย นิमितยงสกุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย และทิน เกตุรัตน์บวร, 2540, "บทบาทของความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ได้จากการแยกขนาดต่อกำลังอัดและการกัดกร่อน เนื่องจากการดซัลฟูริกของมอร์ตาร์," *เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 3*, หน้า MAT 2-1 - MAT 2-10

18. Torii, K. and Kawamura, M., 1994, "Effects of Fly Ash and Silica Fume on the Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack," *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 2, pp. 361-370.
19. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, เอนก ศิริพานิชกร, จารุรัตน์ วรนิสรากุล, พยूर เกตุกราย, สมิตร ส่งพิริยะกิจ, พิชัย นิमितยงสกุล, ปริญญา จินดาประเสริฐ, ชัยยศ ตั้งสถิตย์กุลชัย และทิน เกตุรัตน์บวร, 2539, "การคัดเลือกเถ้าถ่านหินที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต," *เอกสารการประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2539, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์*, หน้า 257-269
20. ทศมาตุ คันฉ่อง, ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง, อรรถพล มาลัย และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2540, "การศึกษาค่าดัชนีกำลังของเถ้าถ่านหินหยาบที่บดละเอียดกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1," *เอกสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 4*, หน้า 164-172
21. Fattuhi, N. I. and Hughes, B. P., 1988, "Ordinary Portland Cement Mixes with Selected Admixtures Subjected to Sulfuric Acid Attack," *ACI Materials Journal*, November-December, pp. 5 12 - 5 18.
22. Fattuhi, N. I. and Hughes, B. P., 1988, "The Performance of Cement Paste and Concrete Subjected to Sulfuric Acid Attack," *Cement and Concrete Research*, Vol. 18, pp. 545-553.
23. Davis, R. E., Carlson, R. W., Kelly, J. W. and Davis, H. E., 19 37, "Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash", *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 33, pp. 577-612.

