

การศึกษาการบดเถ้านหินจากแม่เมาะ เพื่อใช้เป็นสารปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต

สมิตร ส่งพิริยะกิจ* และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล**

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอแนวทางการใช้เถ้านหินจากแม่เมาะซึ่งเป็นสารปอซโซลานชนิดหนึ่งเพื่อเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีตโดยทำให้เถ้านหินมีความละเอียดมากขึ้น จากนั้นใช้แทนที่ปูนซีเมนต์แล้วทำการศึกษาผลกระทบ ด้านการก่อตัว การไหล และกำลังอัด การศึกษากำลังอัดทำได้โดยการใช้ตัวอย่างปูนซีเมนต์มอร์ตาร์ขนาด 5 ซม. ด้วยอัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+เถ้านหิน) เท่ากับ 0.59 และแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด คือเถ้านหินที่ไม่บดมีพื้นที่ผิว Blaine 3730 ซม.²/กรัม เถ้านหินที่บด 6 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิว Blaine 5563 ซม.²/กรัม และเถ้านหินที่บด 12 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิว Blaine 17727 ซม.²/กรัม เถ้านหินซึ่งแทนที่ปูนซีเมนต์จะใช้ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25 และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ตามลำดับ และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28, 60, และ 90 วัน

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การแทนที่เถ้านหินในปูนซีเมนต์เป็นผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์เพสต์นานขึ้น และเมื่อความละเอียดของเถ้านหินมากขึ้น ระยะเวลาการก่อตัวจะสั้นลง นอกจากนี้การใช้เถ้านหินเป็นส่วนผสมของมอร์ตาร์ยังทำให้ค่าการไหลเพิ่มมากขึ้นในกรณีที่ใช้ไม่เกินร้อยละ 25 และค่าการไหลจะลดลงน้อยกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่มีเถ้านหินผสมอยู่เมื่อใช้ร้อยละ 35 และการใช้เถ้านหินที่มีความละเอียดมากขึ้นจะทำให้ค่าการไหลน้อยลง กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้านหินที่ไม่ได้บดทุกอัตราส่วนผสมให้ค่ากำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกๆ อายุการทดลอง คือตั้งแต่อายุ 1 วันจนถึงที่อายุ 90 วัน การใช้เถ้านหินที่ละเอียดขึ้นมีผลทำให้การพัฒนากำลังเกิดได้เร็วขึ้น และมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้านหินจะสามารถรับกำลังอัดได้ดีกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานเฉพาะในกรณีที่ใช้เถ้านหินที่บด ให้ละเอียดขึ้นเท่านั้น การใช้เถ้านหินที่ละเอียดที่สุดในส่วนผสมของมอร์ตาร์ร้อยละ 15 จะให้กำลังอัดที่เท่ากับหรือสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 7 วัน และเมื่อเพิ่มปริมาณของเถ้านหินเป็นร้อยละ 25 และ 35 พบว่าอายุของมอร์ตาร์ที่ทำให้ได้กำลังอัดเท่ากับมอร์ตาร์มาตรฐานคือที่อายุประมาณ 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

* นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

** ผู้ช่วยศาสตราจารย์

A Study of Ground Mae Moh Fly Ash as a Pozzolan for Increasing Concrete Strength

Smith Songpiriyakij* and Chai Jaturapitakkul**

Department of Civil Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Thonburi

Abstract

This paper proposed the use of Mae Moh fly ash as a pozzolan for increasing concrete strength. Fly ash was ground to increase its fineness and used as a replacement of cement. Setting times of cement-fly ash paste, flow, and compressive strength of mortar containing different fineness of fly ashes were investigated. Mortar cube of 5-cm was used to determine its compressive strength. The mix proportion of cementitious materials (cement+fly ash) to sand was 1 to 2.75 with water to cementitious materials ratio of 0.59. Three different fineness of fly ashes were used. There were the unground fly ash with Blaine fineness of 3730 cm^2/g , the 6-hr ground fly ash with Blaine fineness of 5563 cm^2/g , and the 12-hr ground fly ash with Blaine fineness of 17727 cm^2/g . Cement was replaced by fly ash 0, 15, 25, and 35 percent by weight of cement. The fly ash mortar cubes were tested for compressive strength at 1, 3, 7, 14, 28, 60, and 90 days.

The results revealed that use of fly ash in the mix resulted in the increase of setting times of cement-fly ash paste. With the same mix proportion, the finer fly ash reduced the setting times of cement-fly ash paste. Flow of mortar increased with the use of fly ash in the mix not more than 25 percent, but, decreased with the amount of fly ash higher than 35 percent. For the same mixture, the higher fineness of fly ash reduced the flow of mortar. All the compressive strengths of the mortar mixed with unground fly ash were lower than the standard mortar strength. The use of finer fly ash increased the rate of development of compressive strength of fly ash mortar. Only the ground fly ash mortar gave higher compressive strength than the standard mortar strength. With 15 percent of the finest fly ash in the mix, the compressive strength of fly ash mortar was equal to or higher than the standard mortar strength at 7 days. With the amount of the finest fly ash 25 and 35 percent in the mix, it took about 14 and 28 days, respectively, for the fly ash mortars to gain the same strength as of the standard strength.

* Graduate Student

** Assistant Professor

บทนำ

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) เป็นสารปอซโซลานชนิดหนึ่ง ซึ่งได้จากการเผาถ่านหินในขบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2535 พบว่าโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ใช้ถ่านหินในการเผาเพื่อผลิตไฟฟ้าถึงปีละ 12 ล้านตัน และได้เถ้าถ่านหินประมาณ 3 ล้านตัน [1] ซึ่งเถ้าถ่านหินจำนวนมากเหล่านี้ได้สร้างปัญหาในการกำจัดทิ้งให้แก่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตอย่างมาก ดังนั้นหากสามารถนำเถ้าถ่านหินเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้จะเป็นสิ่งที่ดียิ่ง เพราะนอกจากจะเป็นการประหยัดทรัพยากรแล้วยังเป็นการนำสิ่งที่ไม่ใช่ประโยชน์มาใช้ให้เป็นประโยชน์ขึ้นมา

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการวิจัยเพื่อนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในส่วนผสมคอนกรีตหรือปูนซีเมนต์กันอย่างกว้างขวาง โดยส่วนใหญ่มุ่งเน้นทางด้านเศรษฐศาสตร์เพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีราคาต่ำลง แต่อย่างไรก็ตามในทศวรรษหลัง ผู้ทำวิจัยจำนวนมากพบว่าคุณสมบัติที่สำคัญอื่นๆ ของเถ้าถ่านหิน คือการช่วยเพิ่มกำลังอัดแก่คอนกรีตและทำให้คอนกรีตมีความทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น ซึ่งทำให้การวิจัยเพื่อนำเถ้าถ่านหินไปใช้ประโยชน์เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะการใช้เถ้าถ่านหินเป็นสารปอซโซลาน (Pozzolan)

สารปอซโซลาน (Pozzolan) หมายถึงสารซิลิเซียหรืออลูมิโน-ซิลิเซียซึ่งโดยตัวของมันเองจะมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่เลย แต่ถ้ามีความละเอียดสูง มีความชื้นที่พอเพียงจะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับด่างอัลคาไลน์ ได้สารใหม่ซึ่งมีคุณสมบัติในทางวัสดุประสาน [2] เถ้าถ่านหินมีคุณสมบัติตรงตามที่ต้องการสำหรับสารปอซโซลานเพราะมีองค์ประกอบทางเคมีของซิลิกอนไดออกไซด์ (Si_2O) อลูมินาไดออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์รัสออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นส่วนใหญ่ และสามารถทำปฏิกิริยากับด่างที่ได้จากขบวนการไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำได้เป็นอย่างดี

ในปี 1937 David และคณะ [3] ได้ร่วมกันทดสอบ มอร์ต้าร์ผสมเถ้าถ่านหิน จากแหล่งที่มา 15 แห่ง โดยแยกตัวอย่างเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีคาร์บอนสูงและที่มีคาร์บอนต่ำ ปรากฏว่ากลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำให้ค่ากำลังอัดมากกว่า แต่กำลังที่ได้ที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน มีค่าไม่เกินร้อยละ 80 ของมอร์ต้าร์มาตรฐานที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่ แต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 110 เมื่ออายุเลย 6 เดือนไปแล้ว ทั้งนี้ความละเอียดของตัวอย่างเถ้าถ่านหินมีค่าอยู่ระหว่าง 1600 - 2390 ซม.²/กรัม และความละเอียดของปูนซีเมนต์อยู่ระหว่าง 1600 - 2200 ซม.²/กรัม ต่อมาในปี 1982 Lane และ Best [4] พยายามทำคอนกรีตให้มีกำลังสูงขึ้นโดยใช้เถ้าถ่านหินและประสบความสำเร็จเฉพาะการเพิ่มเถ้าถ่านหินลงไปในส่วนผสมของคอนกรีตเท่านั้น ส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินนั้นยังไม่ประสบความสำเร็จ เพราะพบว่าการใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์มีจุดอ่อนที่การพัฒนากำลังในช่วงเริ่มต้นเป็นไปอย่างช้ามาก Mukherjee และคณะ [5] ใช้สารลดน้ำพิเศษ (Superplasticizers) ผสมในเถ้าถ่านหินคอนกรีตเพื่อลดจุดอ่อนของการพัฒนากำลังที่ช้าในช่วงอายุต้นๆ ปรากฏว่าสารลดน้ำพิเศษ

สามารถทำให้การพัฒนากำลังในช่วงแรกดีขึ้น และในปีต่อมา Carette และ Malhotra [6] ได้ใช้ Silica Fume ผสมกับเถ้าถ่านหินคอนกรีตเพื่อเพิ่มการพัฒนากำลัง ปรากฏว่าได้ผลดีเช่นกัน และจากผลงานวิจัยของ Mehta [7] พบว่าความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลต่อการพัฒนากำลังของคอนกรีต คือเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากจะพัฒนากำลังในระยะเริ่มต้นได้ดีกว่า โดยศึกษาที่อัตราส่วนผสมที่เท่ากัน การใช้เถ้าถ่านหิน Class F ที่คัดขนาดให้เล็กลงผสมกับปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 25 พบว่า สามารถลดปัญหาของการพัฒนากำลังอัดในช่วงอายุต้นๆ ลงได้ โดยสามารถให้กำลังอัดมอร์ตาร์ที่เท่ากันหรือสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่ [8]

ปัญหาและอุปสรรคของการนำเถ้าถ่านหินไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตคือการที่เถ้าถ่านหินคอนกรีตมีการพัฒนากำลังในระยะเวลาเริ่มต้นต่ำ ต้องอาศัยระยะเวลาจนถึงได้กำลังที่ต้องการ อีกทั้งการปรับปรุงคุณภาพตามข้อด้อยดังกล่าวต้องใช้สารเคมีที่มีราคาแพง เช่น Silica Fume หรือ สารลดน้ำพิเศษ และที่สำคัญที่สุดคือในประเทศไทยมีผลการวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าถ่านหินอยู่เป็นจำนวนน้อยมาก ทำให้มีข้อโต้แย้งว่าผลงานวิจัยจากต่างประเทศอาจไม่เหมาะสมหรือใช้ไม่ได้กับเถ้าถ่านหินในประเทศไทย เนื่องจากชนิดของเถ้าถ่านหิน สภาพการเผาหรืออุณหภูมิของการเผาถ่านหิน หรือสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้เถ้าถ่านหินในงานคอนกรีตจึงไม่ได้รับความนิยมในประเทศไทย แต่จากผลงานวิจัยที่ผ่านมาพอจะเห็นได้ว่า เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะมีศักยภาพพอที่จะนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ โดยการปรับปรุงคุณภาพเถ้าถ่านหินให้ดีขึ้นซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดการปฏิกิริยาปอซโซลานระหว่างเถ้าถ่านหินกับปูนซีเมนต์เร็วขึ้น และจะเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้เถ้าถ่านหินจากแม่เมาะมากขึ้น

วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าถ่านหิน โดยการใช้เถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดแตกต่างกัน แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสมต่างกัน นอกจากนี้ยังหาระยะเวลาการก่อตัว และความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าถ่านหินเหล่านี้ผสมอยู่ด้วย

การทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์	ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
ทราย	ใช้ทรายแม่น้ำ ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 และมีค่ามอดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.65
เถ้าถ่านหิน	ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตไฟฟ้าที่ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

การบดเถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหินที่ได้จากโรงงานไฟฟ้า จะนำมาบดให้ละเอียดขึ้นด้วยเครื่อง Los Angeles

Abrasion ซึ่งอาศัยลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว จำนวน 16 ลูกเป็นเวลา 6 ชั่วโมง และ 12 ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้มีเม็ดถ่านหินที่มีความละเอียดแตกต่างกัน 3 ชนิด คือเม็ดถ่านหินที่ยังไม่ผ่านการบด, เม็ดถ่านหินที่บด 6 ชั่วโมง และเม็ดถ่านหินที่บด 12 ชั่วโมง โดยให้สัญลักษณ์เป็น FA1, FA2, และ FA3 ตามลำดับ

การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหิน

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหินทุกความละเอียดที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้หาโดยวิธี X-Ray Fluorescence Spectrometry

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหิน

ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหินหาโดยใช้ขวดทดลอง Le Chatelier ตามวิธี ASTM C 188 (Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement) การทดสอบหาน้ำหนักของวัสดุที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) ตามวิธี ASTM C 430 (Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-Micron Sieve) การทดสอบหาความละเอียดโดยวิธี Air Blaine Fineness ตาม ASTM C 204 (Test Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus) การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคของตัวอย่างโดยเครื่อง Particle Analyzer Microtrac 2 และสุดท้ายนำปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหินทุกความละเอียดไปถ่ายภาพขยายด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

การทดลองหาระยะเวลาการก่อตัว

การทดลองใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์+เม็ดถ่านหิน)เท่ากับ 0.246 ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการหาความชื้นเหลวปกติ (Normal Consistency) ของปูนซีเมนต์เพสต์ และใช้ค่านี้ตลอดการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของเม็ดถ่านหินที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์โดยไม่แปรผันปัจจัยอื่นๆ อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อเม็ดถ่านหินที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือ 100:0, 85:15, 75:25, และ 65:35 ทุกๆ ความละเอียดของเม็ดถ่านหิน การทดลองนี้กระทำตาม ASTM C 191 (Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle)

การทดสอบกำลังอัด

การทดสอบกำลังอัด ใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 และใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (W/C+F) เท่ากับ 0.59 ซึ่งอัตราส่วนนี้หาได้จากการทดลองหาปริมาณน้ำที่ทำให้ค่าการไหล (Flow) ของมอร์ตาร์มาตรฐานมีค่าเท่ากับ 110 ± 5 หลังจากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเม็ดถ่านหินที่มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด ตามอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 25, และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนผสมได้แสดงในตารางที่ 1 ภายหลังจากหล่อตัวอย่างแล้ว 1 วัน จะนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำ และทำการทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, 28, 60, และ 90 วันโดยทดสอบตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. ตามมาตรฐาน ASTM C 109 (Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement

Mortars Using 2-in. or 50-mm Cube Specimen) ชุดละ 5 ตัวอย่าง รวม 35 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วนผสม หรือต้องใช้ตัวอย่างทั้งหมด 350 ตัวอย่างตลอดการทดลองกำลังอัด

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ในการทดสอบกำลังอัด

Material	Mix Proportion (Cement:Fly Ash)			
	100:0	85:15	75:25	65:35
Cement (g)	100	85	75	65
Fly Ash (g)	0	15	25	35
Sand (g)	275	275	275	275
Water (cm) ³	59	59	59	59
W/(C+F)	0.59	0.59	0.59	0.59

ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

ตารางที่ 2 แสดงผลวิเคราะห์ทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินที่ใช้ในการทดลองนี้ เมื่อจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C 618 (Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete) พบว่าสามารถจัดให้เถ้าถ่านหิน FA1 (ไม่ได้บด) อยู่ใน Class F เพราะมีร้อยละของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 28.54$ เถ้าถ่านหินมี CaO ค่อนข้างต่ำคือร้อยละ 7.61 แต่ปูนซีเมนต์มี CaO สูงมากคือ ร้อยละ 63.82

การบดเถ้าถ่านหินให้ละเอียดขึ้น คือ ในตัวอย่าง FA2 และ FA3 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกันเล็กน้อยหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลย ค่าที่แตกต่างกันเล็กน้อยนี้คาดว่าเกิดจากความละเอียดของเครื่องมือในการวัดค่า แต่อย่างไรก็ตามปริมาณร้อยละของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ยังคงมีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่าร้อยละ 79.39 และร้อยละ 80.32 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน

Material	Chemical Composition								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI.
CEMENT	20.20	5.42	2.92	63.82	1.50	2.72	0.30	2.30	2.92
FA1	45.59	25.90	12.13	7.61	2.18	2.18	4.88	-	0.40
FA2	43.79	25.08	10.52	11.87	2.18	2.54	4.43	-	0.98
FA3	43.82	25.01	11.49	11.27	2.09	1.32	4.45	-	1.39

LOI หมายถึง การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition)

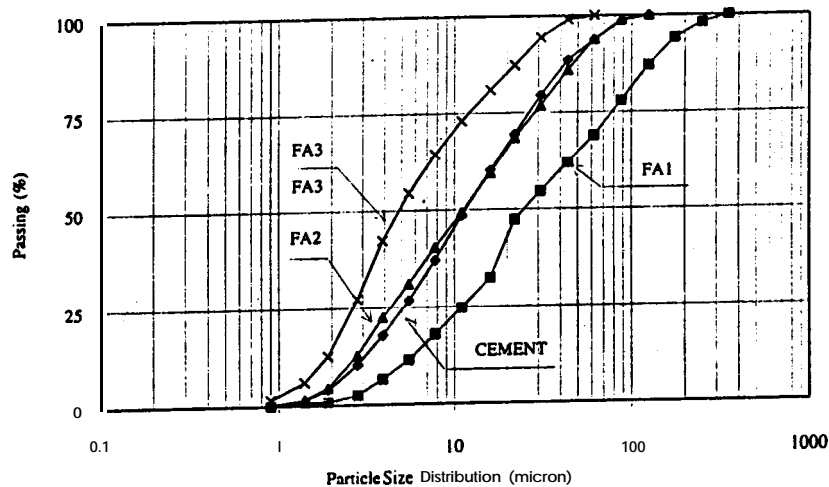
ผลการวิเคราะห์ขนาดของเม็ดถ่านหิน

ตารางที่ 3 แสดงถึงคุณสมบัติต่างๆ ของปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหินที่ไม่บดและบด ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 3.15 ซึ่งถือเป็นค่าปกติ เพราะโดยทั่วไปความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 3.05 ถึง 3.15 ส่วนความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหินจะอยู่ระหว่าง 1.97 ถึง 2.89 แต่มักมีค่าอยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.7 [4] ในการทดลองนี้พบว่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดถ่านหินที่ไม่บดมีค่า 2.04 (ตัวอย่าง FA1) แต่เมื่อทำการบด 6 ชั่วโมงแล้ว จะทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นจาก 2.04 เป็น 2.70 (ตัวอย่าง FA2) และเมื่อบดจนครบ 12 ชั่วโมงค่าความถ่วงจำเพาะจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นอีกคือมีค่าเป็น 2.95 (ตัวอย่าง FA3) ค่าความถ่วงจำเพาะที่เพิ่มมากขึ้นในตัวอย่าง FA2 และ FA3 เพราะเมื่อเม็ดถ่านหินถูกบดเป็นเวลานานขึ้นก็จะมีผลให้ความละเอียดมากขึ้น ช่องว่างหรือรูพรุนในอนุภาคลดน้อยลงเป็นผลให้ความถ่วงจำเพาะมากขึ้น

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาคของปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหิน

Material	Specific Gravity	Retained on #325 (%)	Air Blaine (cm ² /g)	Mean Particle (micron)
CEMENT	3.15	3.40	3386	11
FA1	2.04	10.40	3730	26
FA2	2.70	0	5563	11
FA3	2.95	0	17727	5

ผลของการบดทำให้เม็ดถ่านหินมีขนาดเล็กลงจนกระทั่งสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ได้หมดในตัวอย่าง FA2 และ FA3 และจะเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอนุภาคเม็ดถ่านหินในรูปที่ 1 จากลักษณะของการกระจายตัวของเม็ดถ่านหิน

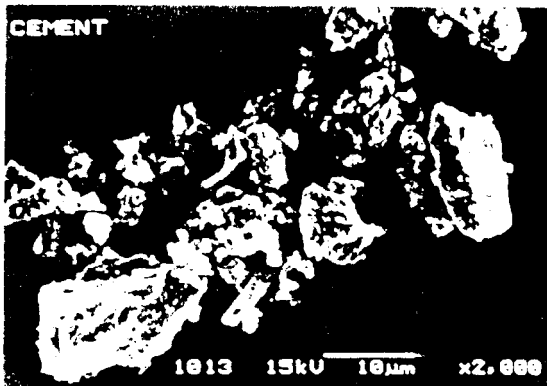


รูปที่ 1 การกระจายตัวของขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และเม็ดถ่านหิน

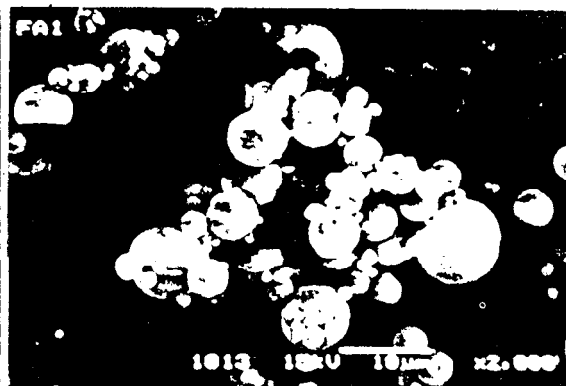
ในรูปที่ 1 จะพบว่าตัวอย่าง FA1 มีขนาดของอนุภาคใหญ่ที่สุดคือค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค เท่ากับ 26 ไมครอน โดยมี FA2 เท่ากับ 11 ไมครอน และของ FA3 มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 5 ไมครอน ส่วนปูนซีเมนต์ (ตัวอย่าง CEMENT) มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเท่ากับ 11 ไมครอน

ค่าความละเอียดในเทอมของพื้นที่ผิวจำเพาะของ FA1 มีค่ามากกว่าของ CEMENT ทั้งที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคใหญ่กว่า เป็นการขัดแย้งกัน สาเหตุที่ทำเป็นเช่นนี้อธิบายได้ โดย รูปภาพถ่ายขยายของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหินในรูปที่ 2, 3, 4, และ 5 จะเห็นว่า รูปร่างของเถ้าถ่านหินมีลักษณะทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ แม้ว่าจะถูกบดให้แตกก็ยังคงมีสภาพเป็นทรงกลมเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นเมื่อถูกอัดให้แน่นในการทดสอบหาค่า Blaine จะมีความเป็นระเบียบและอัดแน่นได้มากกว่าของปูนซีเมนต์ทำให้อากาศผ่านได้ยาก ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่คำนวณได้จึงมีค่าสูง ในทางตรงกันข้ามรูปร่างของปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ขรุขระ และมีรูปร่างไม่แน่นอนเมื่อถูกอัดจะเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ อากาศผ่านได้ง่ายจึงทำให้ค่าพื้นที่ผิวของปูนซีเมนต์มีค่าต่ำลง

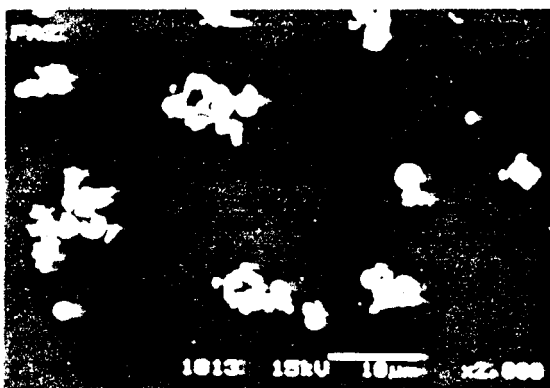
จากผลการทดลองที่ได้ในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าการบดสามารถทำให้ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินเล็กลงได้ ซึ่งผลที่ได้ไม่ว่าจะเป็น ความถ่วงจำเพาะ ขนาดเฉลี่ยของอนุภาค การร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 ความละเอียดของ Blaine หรือภาพถ่ายขยายกำลังสูงล้วนยืนยันตรงกันทั้งหมด



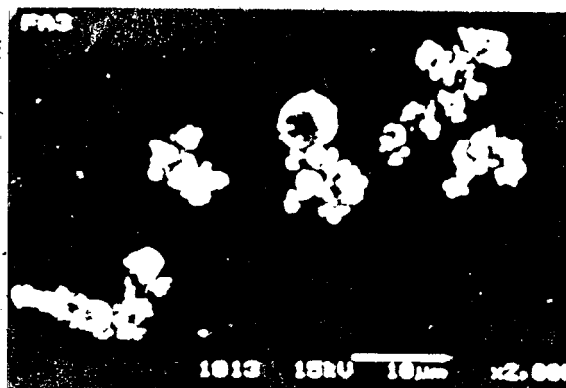
รูปที่ 2 ภาพถ่ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (CEMENT)



รูปที่ 3 ภาพถ่ายเถ้าถ่านหินที่ไม่บด (FA1)



รูปที่ 4 ภาพถ่ายเถ้าถ่านหินที่บด 6 ชั่วโมง (FA2)



รูปที่ 5 ภาพถ่ายเถ้าถ่านหินที่บด 12 ชั่วโมง (FA3)

ระยะเวลาการก่อตัว

ระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์เพสต์และปูนซีเมนต์เพสต์ที่มีเถ้าถ่านหินความละเอียดต่าง ๆ ผสมอยู่แสดงในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินในแต่ละส่วนผสมจะให้ผลในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อความละเอียดของเถ้าถ่านหินมากขึ้นระยะเวลาการก่อตัวจะสั้นลง แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาการก่อตัวของตัวอย่างที่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่ยังคงนานกว่าของปูนซีเมนต์เพสต์ โดยระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของปูนซีเมนต์เพสต์เท่ากับ 105 นาที เมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ส่วนผสมของปูนซีเมนต์ร้อยละ 15 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 140 นาทีเมื่อใช้ FA1 เมื่อใช้ FA2 เวลาการก่อตัวเริ่มต้นลดลงเหลือ 132 นาที และเมื่อใช้ FA3 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเหลือเท่ากับ 118 นาที เมื่อปริมาณของเถ้าถ่านหินเพิ่มเป็นร้อยละ 25 การก่อตัวของตัวอย่างที่มี FA1, FA2, และ FA3 ผสมอยู่จะเปลี่ยนเป็น 155 นาที, 152 นาที, และ 135 นาที ตามลำดับ สำหรับการก่อตัวระยะปลายพบว่าปูนซีเมนต์เพสต์ที่ไม่มีเถ้าถ่านหินผสมอยู่จะมีระยะเวลาการก่อตัวที่เร็วที่สุดคือ 180 นาที โดยค่าการก่อตัวระยะปลายของตัวอย่างที่ผสมเถ้าถ่านหินจะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักคือมีค่าระหว่าง 195 นาที ถึง 225 นาที โดยมีแนวโน้มว่าตัวอย่างที่ผสมเถ้าถ่านหินในปริมาณมากๆ จะมีระยะเวลาการก่อตัวระยะปลายนานขึ้น

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัว

Cement : Fly Ash	Specimen	Initial Setting Time (min)	Final Setting Time (min)
100:00	CEMENT	105	180
85:15	FA 1	140	210
	FA2	132	195
	FA3	118	195
75:25	FA 1	155	225
	FA2	152	210
	FA3	135	195
65:35	FA 1	140	225
	FA2	135	210
	FA3	125	210

ความสามารถในการไหล

ตารางที่ 5 แสดงถึงความสามารถในการไหลของมอร์ตาร์ในทุกๆ อัตราส่วนผสม เมื่อความละเอียดของเถ้าถ่านหินมากขึ้นความสามารถในการไหลจะมีค่าน้อยลง โดยมอร์ตาร์มาตรฐาน (ตัวอย่าง CEM) มีค่าการไหลที่เท่ากับ 110 เมื่อใช้เถ้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์

ในอัตราร้อยละ 15 จะทำให้ค่าการไหลเปลี่ยนไปเป็น 142, 125, และ 107 เมื่อใช้เถ้านหินชนิด FA1, FA2, และ FA3 ตามลำดับ ค่าการไหลที่ใช้ปริมาณของเถ้านหินที่เท่ากันจะมีค่าลดลงถ้าใช้เถ้านหินที่ละเอียดขึ้น การใช้เถ้านหินในปริมาณร้อยละ 25 จะทำให้ค่าการไหลมากที่สุดและมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเป็นร้อยละ 35 สิ่งที่น่าสังเกตประการหนึ่งในการทดลองนี้คือการใช้เถ้านหิน FA3 มีแนวโน้มที่จะให้ค่าการไหลใกล้เคียงหรือน้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน

กำลังอัดของมอร์ตาร์

ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้านหินได้แสดงไว้ในตารางที่ 5 ตัวเลข 15, 25, และ 35 ซึ่งอยู่ข้างหน้าชนิดของตัวอย่าง หมายถึงร้อยละของการแทนที่ของปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหิน สัญลักษณ์ FA1, FA2, และ FA3 หมายถึงชนิดของเถ้านหินที่ใช้ในการแทนที่ของปูนซีเมนต์ ดังนั้นตัวอย่าง 25FA2 หมายถึงมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหิน FA2 ซึ่งบด 6 ชั่วโมงในปริมาณร้อยละ 25 ของน้ำหนักปูนซีเมนต์ ตัวอย่าง CEM หมายถึงมอร์ตาร์มาตรฐานที่ไม่มีเถ้านหินผสมอยู่ ส่วนตารางที่ 6 เป็นค่าร้อยละของกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้านหินผสมอยู่เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน

ตารางที่ 5 ค่าการไหลและกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีและไม่มีเถ้านหินผสมอยู่

Sample	Compressive Strength (ksc)							Flow
	1-day	3-day	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day	
CEM	107	239	263	361	381	458	476	110
15FA1	90	180	210	332	346	400	460	142
15FA2	92	228	260	370	417	455	485	125
15FA3	100	218	284	380	441	474	520	107
25FA1	62	111	187	248	320	410	462	>156
25FA2	72	149	185	303	407	477	523	156
25FA3	82	160	245	357	475	518	584	122
35FA1	62	144	185	249	316	368	390	126
35FA2	68	168	207	230	372	428	455	110
35FA3	75	197	226	289	400	470	480	104

พิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ในกรณีที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้านหินร้อยละ 15 (ดูรูปที่ 6) จะพบว่ามอร์ตาร์ CEM ซึ่งเป็นมอร์ตาร์มาตรฐานจะให้กำลังอัดสูงสุดที่อายุ 3 วัน โดยมอร์ตาร์ 15FA1 มีกำลังอัดเพียงร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ CEM เท่านั้น ส่วนมอร์ตาร์ 15FA2 และ 15FA3 ซึ่งมีเถ้านหินที่ละเอียดกว่าจะมีกำลังประมาณร้อยละ 90 ของมอร์ตาร์ CEM แต่ภายหลังจากที่อายุเกิน 7 วันขึ้นไปมอร์ตาร์ 15FA3 จะให้กำลังอัดสูงสุดโดยมีค่า

เป็นร้อยละ 115.7 ที่อายุ 28 วัน และร้อยละ 109.2 ที่อายุ 90 วัน ส่วนมอร์ตาร์ 15FA1 มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุก ๆ อายุ โดยมีกำลังอัดที่อายุ 90 วัน ใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐาน คือมีค่าร้อยละ 96.6

ตารางที่ 6 ร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้านหินผสมอยู่เปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน

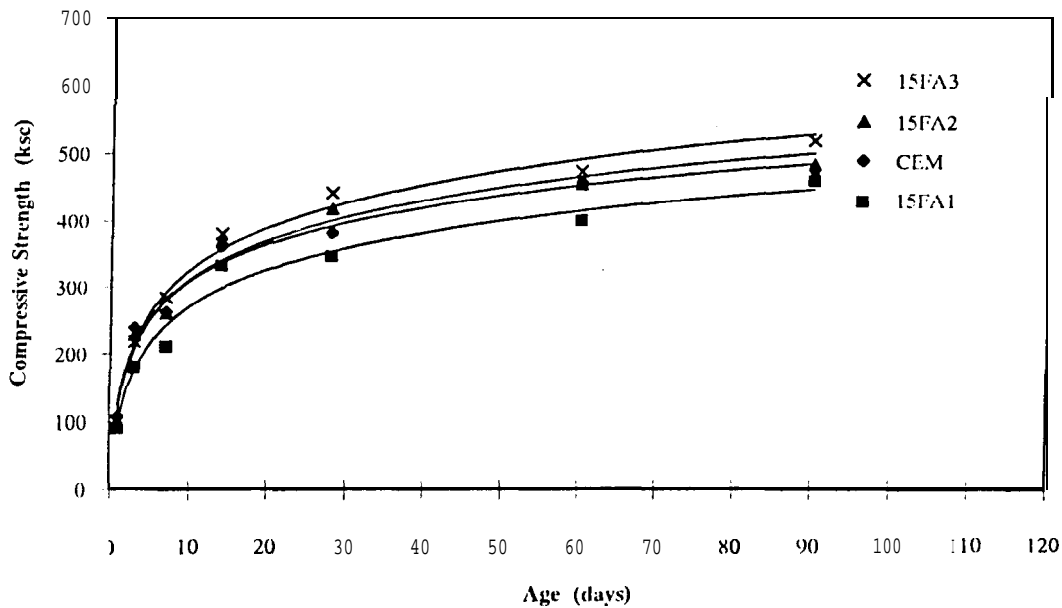
Sample	Percentage of Compressive Strength (%)						
	1-day	3-day	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day
CEM	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
15FA1	84.1	75.3	79.8	91.9	90.8	87.3	96.6
15FA2	85.9	95.3	98.8	102.5	109.4	99.3	101.8
15FA3	93.4	91.2	107.9	105.2	115.7	103.4	109.2
25FA1	57.9	46.4	71.1	68.6	83.9	89.5	97.0
25FA2	67.2	62.2	70.3	83.9	106.8	104.1	109.8
25FA3	76.6	66.9	93.1	98.8	124.6	113.1	122.6
35FA1	57.9	60.2	70.3	68.9	82.9	80.3	81.9
35FA2	63.5	70.2	78.7	63.7	97.6	93.4	95.5
35FA3	70.0	82.4	85.9	80.0	104.9	102.6	100.8

ส่วนที่แลเงาคืออัตราส่วนผสมที่ให้กำลังอัดมากกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน

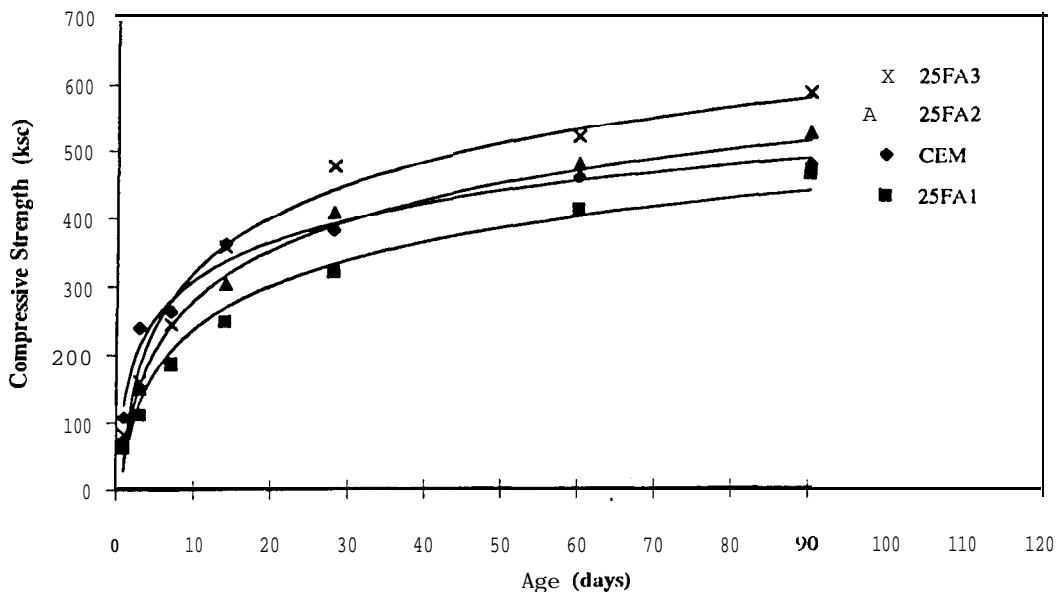
จากรูปที่ 7 เมื่อเพิ่มปริมาณเถ้านหินเป็นร้อยละ 25 จะยิ่งให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุต้น ๆ มีค่าต่ำลง กล่าวคือมอร์ตาร์ 25FA1, 25FA2, และ 25FA3 มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 57.9, 67.2, และ 76.6 ของมอร์ตาร์ CEM ที่อายุ 1 วัน เมื่อมอร์ตาร์มีอายุมากขึ้น มอร์ตาร์ที่มีเถ้านหินที่มีความละเอียดมากผสมอยู่จะมีอัตราการเพิ่มกำลังที่เร็วกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CEM เช่นตัวอย่าง 25FA3 มีค่ากำลังอัดเป็นร้อยละ 98.8 เมื่อมีอายุ 14 วัน และเมื่ออายุยิ่งมากขึ้นกำลังอัดของมอร์ตาร์ 25FA3 จะยังมีค่าสูงกว่าของมอร์ตาร์ CEM มากขึ้น คือที่อายุ 90 วัน มอร์ตาร์ 25FA3 มีค่ากำลังอัดสูงเป็นร้อยละ 122.6 ของมอร์ตาร์ CEM สำหรับมอร์ตาร์ 25FA2 ต้องใช้เวลาอย่างน้อย 28 วัน จึงจะสามารถมีกำลังที่มากกว่ามอร์ตาร์ CEM ได้ แต่มอร์ตาร์ 25FA1 ซึ่งใช้เถ้านหินที่ไม่ได้บดมีกำลังที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์ CEM ทุก ๆ อายุที่ทดลองโดยมีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 462 กก./ซม.² หรือคิดเป็นร้อยละ 97.0 ของมอร์ตาร์ CEM

เมื่อปริมาณเถ้านหินในมอร์ตาร์เพิ่มเป็นร้อยละ 35 (ดูรูปที่ 8) กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีเถ้านหินผสมอยู่มีค่าต่ำกว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ CEM ค่อนข้างมากที่อายุก่อน 14 วัน มอร์ตาร์ 35FA1 ที่อายุ 90 วันมีกำลังอัดเท่ากับ 390 กก./ซม.² หรือคิดเป็นร้อยละ 81.9 ของมอร์ตาร์ CEM เท่านั้น ส่วนมอร์ตาร์ 35FA2 ซึ่งใช้เถ้านหินที่บด 6 ชั่วโมง พบว่า

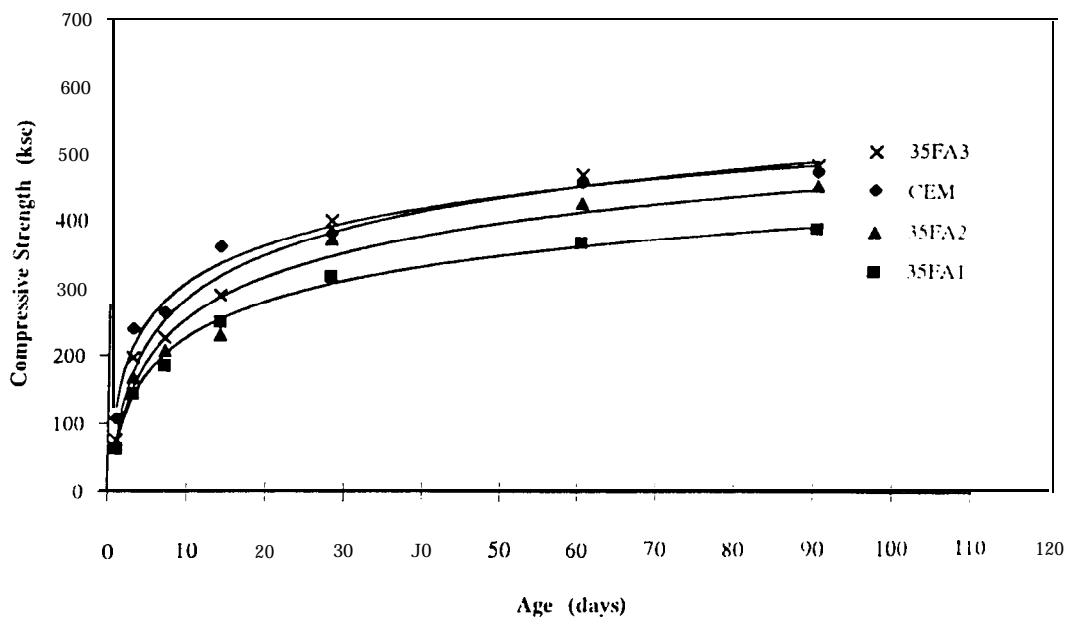
ให้กำลังอัดที่สูงกว่ามอร์ตาร์ 35FA1 และเมื่ออายุ 90 วันจะมีกำลังอัดเกือบเท่ากับมอร์ตาร์ CEM คือเท่ากับ 455 กก./ชม.² หรือคิดเป็นร้อยละ 95.5 การใช้เถาถ่านหินที่บดเป็นเวลา 12 ชั่วโมงตั้งในมอร์ตาร์ 35FA3 พบว่าสามารถให้กำลังอัดเป็นที่น่าพอใจ แม้ว่าจะมีปริมาณของปูนซีเมนต์ในส่วนผสมเพียงร้อยละ 65 เท่านั้น แต่สามารถให้กำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ CEM ที่อายุ 28 วันได้ โดยมีค่าเท่ากับ 470 กก./ชม.² หรือคิดเป็นร้อยละ 104.9 และเมื่อตัวอย่างดังกล่าวมีอายุ 90 วัน จะสามารถรับกำลังได้เท่ากับ 480 กก./ชม.² หรือคิดเป็นร้อยละ 100.8 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CEM



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาถ่านหินร้อยละ 15



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาถ่านหินร้อยละ 25



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุของมอร์ตาร์เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินร้อยละ 35

สรุปผลการทดลอง

1. คุณสมบัติทางเคมีของเถ้าถ่านหินไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อบดเถ้าถ่านหินให้เล็กลง แต่ความถ่วงจำเพาะจะเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเถ้าถ่านหิน
2. การบดเถ้าถ่านหินด้วยเครื่อง Los Angeles Abrasion เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้น้ำหนักเฉลี่ยของเถ้าถ่านหินเปลี่ยนจาก 26 ไมครอน เป็น 11 ไมครอน และเมื่อใช้เวลาดบ 12 ชั่วโมงจะทำให้ขนาดเฉลี่ยลดลงเหลือ 5 ไมครอน
3. การใช้เถ้าถ่านหินผสมในปูนซีเมนต์จะทำให้เวลาการก่อตัวนานมากกว่ากรณีไม่ใช้เถ้าถ่านหิน ในส่วนผสมที่มีเถ้าถ่านหินในปริมาณเท่ากัน ความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์เพสต์ โดยเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดมากขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวสั้นลง
4. ความละเอียดของเถ้าถ่านหินมีผลอย่างมากต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ เมื่อเถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น การพัฒนากำลังอัดก็จะยิ่งเร็วมากขึ้น
5. การใช้เถ้าถ่านหินที่ละเอียดที่สุดในส่วนผสมมอร์ตาร์จะให้กำลังอัดที่เท่ากันหรือสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานเมื่อใช้แทนที่ร้อยละ 15, 25, และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ที่อายุของมอร์ตาร์เท่ากับ 7, 14, และ 28 วัน ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานเหล่านี้ที่ได้มีส่วนร่วมทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งได้แก่ อาจารย์พันธทิพย์ มั่นตะจิตร์ และ คุณวิลาสินี สุทร จากสายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความช่วยเหลือในการถ่ายภาพขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์และเถ้าถ่านหิน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบจากบริษัท ชลประทานซีเมนต์ จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี และท้ายที่สุดนี้ผู้เขียนต้องขอขอบคุณ นายสุรศักดิ์ พงศ์พรเจริญ นายเจริญบุญ วาดสันทัด และนายประสพสุข ฤทธิ์คุ้ม นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลการวิจัยด้วยความระมัดระวังอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

1. Somchai Kokkamhaeng, "Fly Ash Utilization as Earth Construction Material", **Proceedings of the Utilization of Mae Moh Fly Ash**, Department of Research and Development, Electricity Generating Authority of Thailand, 27 - 28 April, 1993.
2. ACI Committee 116, "Cement and Concrete Terminology", ACI 116-85, **ACI Manual of Concrete Practice Part I**, American Concrete Institute, Detroit, 58 pp, 1992.
3. David, R.E., Carlson, R.W., Kelly, J.W., and Davis, H.E., "Properties of Cement and Concrete Containing Fly Ash", **Proceedings of the American Concrete Institute**, Vol. 33, May-June, pp 577-612, 1937.
4. Lane, R.O. and Best, J.F., "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete", **Concrete International: Design & Construction**, Vol. 4, No.7, July, pp 81-92, 1982.
5. Mukherjee, P.K., Loughborough, M.T., and Malhotra, V.M., "Developments of High-Strength Concrete Incorporating a Large Percentage of Fly Ash and Superplasticizers", **Cement, Concrete and Aggregates**, Vol 4, pp 81-86, 1982.
6. Carrette, G. and Malhotra, V.M., "Early-Age Strength Development of Concrete Incorporating Fly Ash and Condensed Silica Fume", **Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete SP-79**, American Concrete Institute, Detroit, pp 765-784, 1983.
7. Mehta, P.K., "Influence of Fly Ash Characteristics on the Strength of Portland-Fly Ash Mixtures," **Cement and Concrete Research**, Vol.15, pp 669-674, 1985.
8. Chai Jaturapitakkul, "Utilization of Fly Ash in Concrete", **Ph.D. Dissertation**, Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, New Jersey, 1993.