

ผลกระทบของความละเอียดเก้ถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมด และขนาดโพรงในซีเมนต์เพสต์

ธีรวัฒน์ สิ้นศิริ¹ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

ปริญญา จินดาประเสริฐ²

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ถนนมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

รับเมื่อ 22 เมษายน 2547 ตอบรับเมื่อ 13 สิงหาคม 2547

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของความละเอียดเก้ถ่านหินต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมด และขนาดโพรงในเพสต์ที่แข็งตัวแล้ว โดยนำเก้ถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่ไม่ได้แยกขนาดมีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 19.1 ไมครอน และเก้ถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 6.41 ไมครอน แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้มีค่าเท่ากับ 0.35

ผลการทดสอบพบว่า เพสต์ที่ผสมเก้ถ่านหินแยกขนาดให้กำลังอัดสูงกว่าเพสต์ผสมเก้ถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด การแทนที่และความละเอียดของเก้ถ่านหินมีผลกระทบที่สำคัญต่อปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเก้ถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดในอัตรา การแทนที่ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์เพิ่มขึ้นแต่ขนาดโพรงคาปิลลารีลดลง ขณะที่การแทนที่ เก้ถ่านหินที่คัดแยกในเพสต์ ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีของเพสต์ลดลงเมื่อเทียบกับเพสต์ ที่ผสมเก้ถ่านหินที่หยาบกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดและขนาดโพรงคาปิลลารีลดลง เมื่อแทนที่ เก้ถ่านหินที่ละเอียดลงในเพสต์ทุกระดับของการแทนที่

¹ นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength, Total Pore Volume and Pore Size of Blended Cement Paste

Theerawat Sinsiri¹ Chai Jaturapitakkul²

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

Prinya Chindaprasirt²

Khon Kaen University, Mitrapap Rd., Maung District, Khon Kaen 40002

Received 22 April 2004 ; accepted 13 August 2004

Abstract

This paper presents an experimental investigation on the effect of fly ash fineness on compressive strength, total pore volume, and pore size of hardened blended cement pastes. Class F fly ash with two finenesses; an original fly ash and a classified fly ash with median particle size of 19.1 and 6.4 micron, respectively were used to partially replace Portland cement type I at the rate of 0, 20, and 40% by weight of binder. The water to binder ratio (W/B) of 0.35 was used for all the blended cement paste mixtures.

Tested results indicated that the blended cement paste with classified fly ash produced paste with higher compressive strength than that with original fly ash. The pore size of blended cement paste was significantly affected by the rate replacement and fineness of fly ash. The replacement of Portland cement by the original fly ash increased the total pore volume but decreased the capillary pore size of the paste. The incorporation of the classified fly ash decreased the total pore volume and the capillary pore size of the paste as compared to that with ordinary fly ash. The total pore volume and capillary pore size of the pastes decreased as a result of the addition of finer fly ash at all replacement levels.

¹ Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างทั่วไป เช่น ถนน สะพาน อาคาร เขื่อน อุโมงค์ เป็นต้น ในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีต นอกจากความสามารถในการต้านทานแรงทั้งหมดของโครงสร้างแล้ว ความทนทานเป็นคุณสมบัติที่ควรให้ความสนใจอย่างมาก โดยทั่วไปความทนทานของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับการต้านทานการผ่านเข้าไปของสารที่ทำให้เกิดอันตรายต่อโครงสร้างจากสิ่งแวดล้อม คอนกรีตเป็นวัสดุผสมที่ซับซ้อน และเป็นวัสดุที่มีความพรุน มีโครงสร้างระดับอนุภาค (microstructure) ขนาดต่างกัน แคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุที่มีขนาดนาโนเมตร ขณะที่ซีเมนต์เฟสเป็นโครงสร้างที่ระดับขนาดไมโครเมตร และเมื่อผสมทรายและหินทำให้คอนกรีตมีขนาดระดับมิลลิเมตร [1] การศึกษาโครงสร้างระดับอนุภาคของซีเมนต์เฟสเป็นสิ่งสำคัญเพราะทำให้เข้าใจพฤติกรรมของมอร์ตาร์และคอนกรีต ปริมาตรของโพรง (pore volume) และการกระจายขนาดของโพรง (pore size distribution) เป็นส่วนประกอบระดับอนุภาคที่สำคัญของซีเมนต์เฟสที่แข็งตัว เพราะมีผลต่อสมบัติทางด้านกายภาพของซีเมนต์เฟส เช่น กำลัง การคืบ การหดตัว การซึมผ่าน และความทนทาน เป็นต้น สมบัติของคอนกรีตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโพรงในซีเมนต์เฟส โครงสร้างโพรงเป็นตัวควบคุมอัตราการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวที่ทำให้เกิดอันตรายต่อคอนกรีตจากสิ่งแวดล้อม โพรงขนาดใหญ่และโพรงคาпилลารีมีผลกระทบที่สำคัญต่อกำลังอัดและการซึมผ่านของซีเมนต์เฟส ซีเมนต์เฟสประกอบด้วยโพรง 2 ชนิดคือ โพรงคาпилลารี (capillary pore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 ถึง 10,000 นาโนเมตร และโพรงเจล (gel pore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10 นาโนเมตร [2]

เพื่อให้คอนกรีตมีกำลังสูงขึ้น ความทนทานดีขึ้น และลดการซึมผ่านน้ำ จำเป็นต้องลดปริมาตรและขนาดโพรงในซีเมนต์เฟส วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ได้นำมาใช้แทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อลดการซึมผ่านลดปริมาตรและขนาดของโพรงในซีเมนต์เฟส กลไกการทำงานของวัสดุปอซโซลานมี 2 ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งอุดช่องว่างทำให้โครงสร้างโพรงในซีเมนต์เฟสแน่นขึ้น และส่วนที่สองทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ เป็นผลให้ปริมาตรและขนาดโพรงในซีเมนต์เฟสลดลง และมีผลทำให้การซึมผ่านน้ำลดลงด้วย ถ้าถ่านหินเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าและมีสมบัติขึ้นอยู่กับชนิดและขั้นตอนการเผาถ่านหิน ในปัจจุบันประเทศไทยมีการผลิตถ่านหินประมาณ 3.5 ล้านตันต่อปี มีนักวิจัยจำนวนมากศึกษาผลกระทบของถ่านหินต่อคุณสมบัติทางกายภาพของคอนกรีต แต่มีนักวิจัยส่วนน้อยที่ศึกษาผลของถ่านหินต่อสมบัติโครงสร้างของคอนกรีตระดับอนุภาค เช่น โครงสร้างโพรง ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตที่ผสมถ่านหิน งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาผลกระทบของความละเอียดของถ่านหินต่อสมบัติการพัฒนา กำลังอัด ปริมาตร และขนาดโพรงในซีเมนต์เฟส ผลการศึกษาจะทำให้เข้าใจพฤติกรรมของเฟสผสมถ่านหินมากขึ้น และเป็นข้อมูลพื้นฐานระดับอนุภาค เพื่อพัฒนาคอนกรีตผสมถ่านหินให้มีความทนทานสูงและทำให้อายุการใช้งานโครงสร้างคอนกรีตยาวนานขึ้น

2. วัตถุประสงค์

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความละเอียดของถ่านหิน ที่มีผลต่อกำลังอัด ปริมาตรโพรงทั้งหมด และขนาดโพรงในซีเมนต์เฟส

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วย

ปูนซีเมนต์ ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ตามมาตรฐาน ASTM C 150

เถ้าถ่านหิน ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงงานไฟฟ้าแม่เมาะที่ไม่ผ่านการแยกขนาดมีขนาดอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 19.1 ไมครอน ใช้สัญลักษณ์คือ OFA และนำมาแยกให้มีความละเอียดสูงด้วยเครื่อง air classifier มีขนาดอนุภาคที่ d_{50} เท่ากับ 6.4 ไมครอน ใช้สัญลักษณ์คือ CFA

น้ำ ใช้น้ำประปา

3.2 ส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์กับเถ้าถ่านหิน) ได้จากการใช้เถ้าถ่านหิน OFA หรือ CFA แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน และควบคุมอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.35 หล่อเพลสต์ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 50x50x50 มม.³ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 เมื่อหล่อเสร็จจึงคลุมด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ภายหลังจากหล่อตัวอย่าง 24 ชั่วโมง จึงถอดแบบออก และนำก้อนตัวอย่างไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องตามเวลาที่กำหนด แบ่งก้อนตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกนำไปทดสอบกำลังอัด ที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน และส่วนที่ 2 ทดสอบปริมาตรและขนาดโพรงที่อายุ 28 และ 90 วัน

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 สมบัติของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน พบว่าปูนซีเมนต์มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.15 เถ้าถ่านหินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยแยกขนาดให้มีความละเอียดมากขึ้นทำให้ความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจาก 2.33 เป็น 2.54 ส่วนความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่แยกขนาด CFA มีค่าเท่ากับ 5,070 ซม.²/ก. ในขณะที่ความละเอียดของเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้ผ่านการแยกละเอียดและปูนซีเมนต์มีค่าเป็น 3,570 และ 3,050 ซม.²/ก. ตามลำดับ รูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวของวัสดุประสาน พบว่าหลังจากการแยกเถ้าถ่านหินให้มีความละเอียดมากขึ้น เถ้าถ่านหินมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยลดลงจาก 19.1 ไมครอนเป็น 6.4 ไมครอน ลักษณะผิวของเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดส่วนมากมีรูปร่างกลม มีบางอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ถึง 150 ไมครอน โดยผิวของขนาดอนุภาคที่ใหญ่จะไม่เรียบ มีรูปร่างไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2ก ขณะที่เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาดมีรูปร่างกลมมน ผิวเรียบ ดังในรูปที่ 2ข ซึ่งผลการศึกษานี้สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Angsuwattana และคณะ [3] ที่พบว่าเถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะที่ผ่านการแยกด้วยเครื่อง air classifier เป็นเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดสูงและยังคงมีรูปร่างกลมมน ส่วนปูนซีเมนต์มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุมรูปร่างไม่แน่นอน (รูป 2ก)

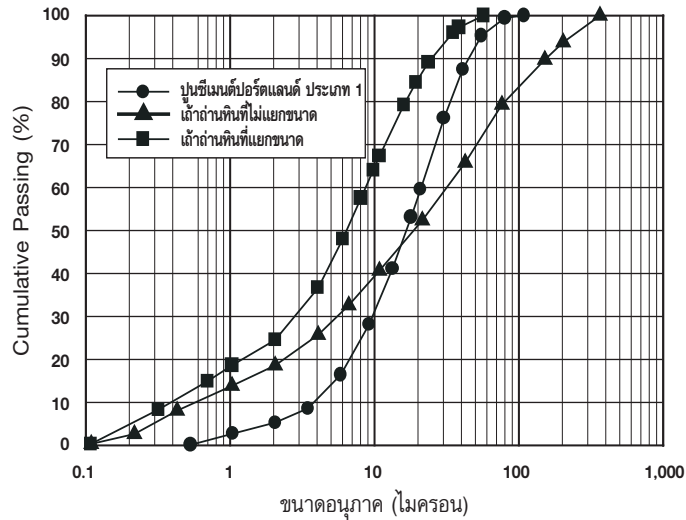
ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน พบว่าเถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาดและผ่านการแยกขนาด มีองค์ประกอบทางเคมีใกล้เคียงกันและจัดอยู่ใน Class F ตาม ASTM C 618 เนื่องจากมีผลรวมองค์ประกอบทางเคมีของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 83.39 และ 80.61 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 มีค่า LOI (Loss On Ignition) และปริมาณ SO_3 ไม่เกินร้อยละ 6 และ 5 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

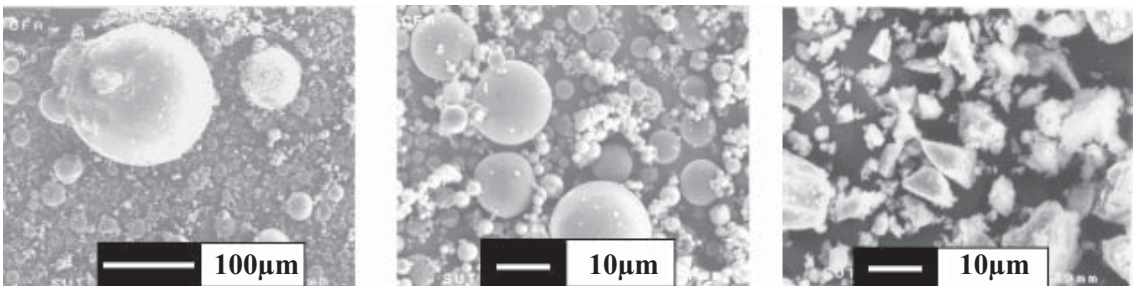
สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์	เถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาด	เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด
ค่าความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.33	2.54
Retained on Sieve No. 325 (%)	4.8	31.0	0.0
ความละเอียด (ซม. ² /ก.)	3,570	3,050	5,070
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย d_{50} (ไมครอน)	14.1	19.1	6.4

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ประเภท 1	เถ้าถ่านหินที่ไม่ผ่านการแยกขนาด	เถ้าถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด
SiO_2	20.90	45.69	44.72
Al_2O_3	4.76	24.59	23.69
Fe_2O_3	3.41	11.26	11.03
SO_3	2.71	1.57	1.28
CaO	64.41	12.15	12.67
MgO	1.25	2.87	2.63
Na_2O	0.24	0.07	0.07
K_2O	0.35	2.66	2.87
Loss On Ignition	0.39	1.23	1.42
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	-	83.39	80.61



รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน



ก. แก้วถ่านหินไม่ได้แยกขนาด

ข. แก้วถ่านหินแยกขนาด

ค. ปูนซีเมนต์

รูปที่ 2 ภาพขยายกำลังสูงของวัสดุประสาน

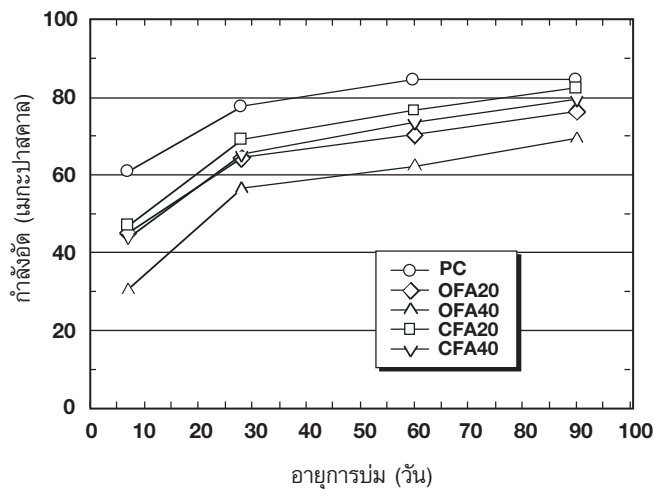
4.2 กำลังอัดของเพสต์

ผลทดสอบกำลังอัดแสดงไว้ในรูปที่ 3 พบว่ากำลังอัดของเพสต์ OFA และ CFA ทุกอัตราส่วน ให้กำลังอัดต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ และเมื่ออัตราการแทนที่ด้วย OFA และ CFA เพิ่มขึ้น ค่าของกำลังอัดของเพสต์ ก็ลดลงทุกอายุของการบ่มจนถึง 90 วัน แต่มีแนวโน้มว่ากำลังอัดของเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินจะสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ เมื่อมีอายุมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินที่ผ่านการแยกขนาด

ที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของเพสต์ OFA20 และ OFA40 มีค่าเท่ากับ 45.2 และ 30.6 เมกะปาสคาล โดยที่ซีเมนต์เพสต์มีกำลังอัดเท่ากับ 60.9 เมกะปาสคาล ขณะที่เพสต์ CFA20 และ CFA40 มีกำลังอัดเท่ากับ 47.2 และ 44.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบปริมาณการแทนที่ที่เท่ากัน พบว่ากำลังอัดของเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินที่มีขนาดเล็กมีค่าสูงกว่าเพสต์ที่ผสมแก้วถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ เช่น กำลังอัดของเพสต์ CFA20 และ OFA20 มีค่าเท่ากับ 47.2 และ 45.2 เมกะปาสคาล ส่วนเพสต์ CFA40 และ OFA40 มีค่าเท่ากับ

44.1 และ 30.6 เมกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่ออายุของเพสต์เพิ่มเป็น 28 และ 60 วัน พบว่ามีแนวโน้มการพัฒนากำลังอัดของเพสต์เหมือนกับที่อายุ 7 วัน

ที่อายุ 90 วัน ค่ากำลังอัดของเพสต์ OFA20, OFA40, CFA20, และ CFA40 มีค่าเท่ากับ 74.5, 61.4, 81.4, และ 78.5 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และยังคงต่ำกว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งเท่ากับ 84.8 เมกะปาสคาล ในกรณีของเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทั้งหมดพบว่าเพสต์ CFA20 ให้กำลังอัดสูงสุด และมีแนวโน้มที่จะให้กำลังอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์เมื่ออายุมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามเพสต์ OFA40 ให้กำลังอัดต่ำสุด เพราะขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ และมีอัตราส่วนการแทนที่สูง



รูปที่ 3 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA, และ เพสต์ CFA
ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน = 0.35

- หมายเหตุ : PC = ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
OFA20, OFA40 = เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด (OFA) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ
CFA20, CFA40 = เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่แยกขนาด (CFA) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ

ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า เมื่อมีการแยกขนาดของเถ้าถ่านหินให้มีขนาดเล็กลง กำลังอัดและการพัฒนา กำลังอัดของเพสต์มีค่าเพิ่มขึ้น สาเหตุที่ทำให้กำลังอัดแตกต่างกัน เนื่องจากปัจจัย 3 ประการ ประการแรกคือ ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่แตกต่างกันเพราะเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็ว และมากกว่าเถ้าถ่านหินที่มีขนาดใหญ่ ประการที่สอง เนื่องจากผลของการอัดตัว (packing effect) ของอนุภาค เพราะเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กและมีความละเอียดสูง จะแทรกอยู่ในโพรงของเพสต์ ทำให้เพสต์แน่นขึ้น เป็นผลให้กำลังอัดสูงขึ้น และประการที่สาม ผลจากการกระจายตัวของเถ้าถ่านหินในเพสต์ทำให้เกิดกระบวนการ Nucleation กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดีขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Erdogdu และ Turker [4] Slanicka

[5] Paya และคณะ [6] และ Jaturapitakkul และคณะ [7] ซึ่งพบว่าเมื่อนำเม็ดถ่านหินมาแยกให้มีความละเอียดต่างกัน มอริตาร์ทหรือคอนกรีตที่ผสมเม็ดถ่านหินที่มีความละเอียดสูง จะมีค่ากำลังอัดสูงกว่ามอริตาร์ทหรือคอนกรีตที่ผสมด้วยเม็ดถ่านหินที่หยาบ

4.3 ผลกระทบของความละเอียดเม็ดถ่านหินต่อการกระจายขนาดโพรง

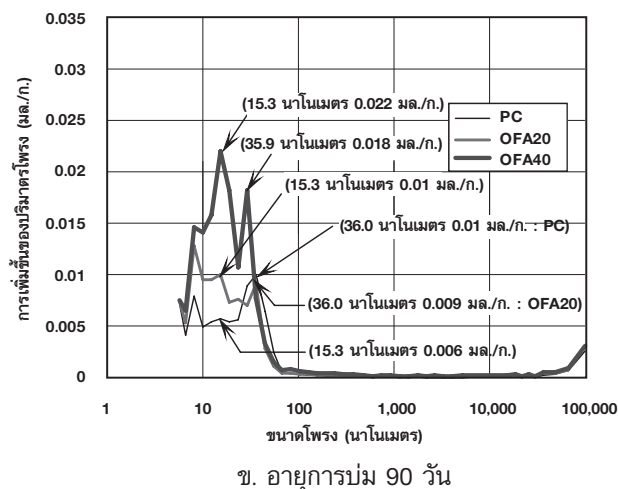
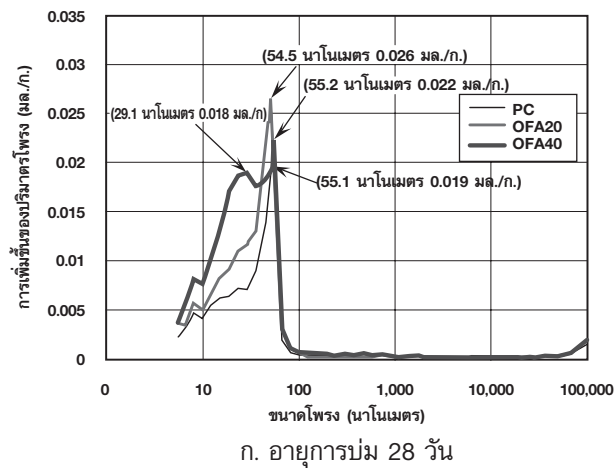
รูปที่ 4ก และ 4ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA20, และ OFA40 ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ ในขณะที่รูปที่ 5ก และ 5ข แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เพสต์, เพสต์ CFA20, และ CFA40 ที่อายุ 28 วัน และ 90 วัน ตามลำดับ พบว่าเพสต์ CFA20 และ CFA40 มีขนาดโพรงคาบิลลารีลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ OFA20 และ OFA40 พิจารณาที่อายุ 28 วัน จุดยอดโพรงคาบิลลารีของเพสต์ CFA20 และ CFA40 มีค่าเท่ากับ 50.4 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0266 มล./ก. และ 44.7 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0195 มล./ก. ตามลำดับ ในขณะที่เพสต์ OFA20 มีค่าเท่ากับ 54.5 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.026 มล./ก. และ OFA40 มีค่าเท่ากับ 55.1 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.019 มล./ก. ที่จุดยอดจุดที่หนึ่ง และ 29.1 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.018 มล./ก. ที่จุดยอดจุดที่สอง ตามลำดับ ในช่วงอายุต้นกล่าวได้ว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก ส่วนปฏิกิริยาปอซโซลานจากเม็ดถ่านหินเกิดขึ้นน้อย ดังนั้นเมื่อมีการแทนที่เม็ดถ่านหินในปริมาณและขนาดที่เหมาะสมจะช่วยลดขนาดโพรงคาบิลลารีลงได้ โดยอาศัยอนุภาคขนาดเล็กช่วยอุดโพรงในเพสต์

ที่อายุ 90 วัน พบว่ามีจุดยอดขนาดโพรง 2 จุดที่ชัดเจน จุดแรกแสดงขนาดโพรงที่ใหญ่กว่า 10 นาโนเมตรเรียกว่าโพรงคาบิลลารี และจุดที่ 2 แสดงขนาดโพรงที่เล็กกว่า 10 นาโนเมตรเรียกว่าโพรงเจล เช่น จุดยอดจุดที่หนึ่งและสองของโพรงคาบิลลารีของเพสต์ CFA20 มีค่าเท่ากับ 29.0 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0204 มล./ก. และ 15.3 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.0114 มล./ก. ในขณะที่เพสต์ OFA20 มีค่าเท่ากับ 36.0 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.009 มล./ก. ที่จุดยอดจุดที่หนึ่ง และ 15.3 นาโนเมตร ที่การเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรง 0.01 มล./ก. ที่จุดยอดจุดที่สอง ตามลำดับ และพบว่าขนาดโพรงคาบิลลารีของเพสต์ผสมเม็ดถ่านหินมีขนาดเล็กลงเมื่อมีการแทนที่เม็ดถ่านหินในปริมาณที่เพิ่มขึ้นและอายุของเพสต์เพิ่มขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon และคณะ [8, 9] และ Chindaprasirt และคณะ [10] นอกจากนี้ยังพบว่าเพสต์ผสมเม็ดถ่านหินที่มีความละเอียดสูงมีขนาดโพรงคาบิลลารีของเพสต์ลดลงด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับเพสต์ผสมเม็ดถ่านหินที่หยาบกว่า

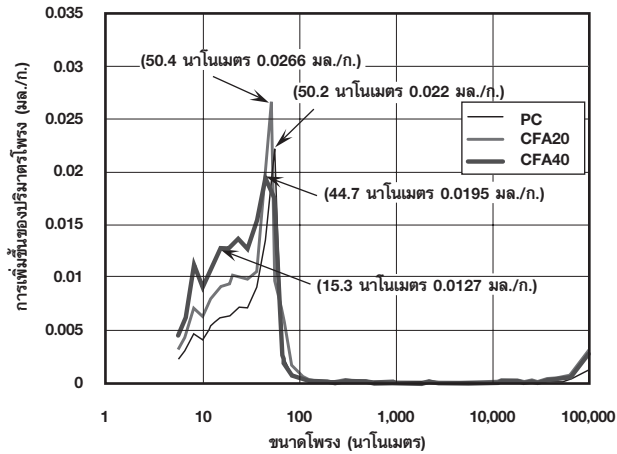
4.4 ผลกระทบของความละเอียดเม็ดถ่านหินต่อปริมาตรโพรง

รูปที่ 6 แสดงปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ที่อายุ 28, 60, และ 90 วัน พบว่าปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ CFA20 ที่อายุ 28, 60, และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 138.5, 108.8, และ 88.75 มม.³/ก. ต่ำกว่าเพสต์ OFA20 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 140.8, 125.9, และ 101.3 มม.³/ก. ที่อายุเดียวกัน ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาตรโพรงทั้งหมดของซีเมนต์เพสต์มีค่าเท่ากับ 120.1, 86.6, และ 82.8 มม.³/ก. ที่อายุ 28, 60, และ 90 วัน ตามลำดับ สำหรับการแทนที่เม็ดถ่านหินร้อยละ 40 พบว่าปริมาณโพรงทั้งหมดของเพสต์ CFA40 ที่อายุ 28, 60, และ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 159.0, 145.5, และ 138.7 มม.³/ก. ในขณะที่เพสต์ OFA40 มีค่าเท่ากับ 174.2, 160.8, และ 155.4 มม.³/ก. ที่

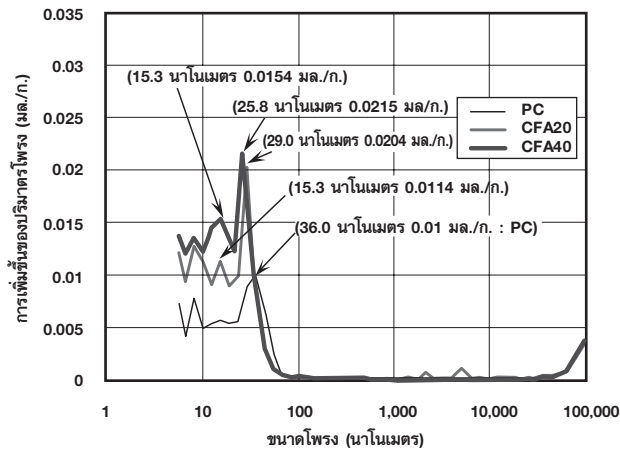
อายุเดียวกัน การทดลองครั้งนี้สามารถสรุปได้ว่า ปริมาตรโพรงทั้งหมดของเพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินทุกอัตราส่วนการแทนที่มีค่าสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อร้อยละการแทนที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากช่องว่างที่สูงขึ้นระหว่างอนุภาคของเถ้าถ่านหินและรูพรุนในอนุภาคบางส่วนของเถ้าถ่านหินเอง เมื่อมีการแทนที่ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรทั้งหมดของโพรงสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าถ่านหินพบว่าเพสต์ผสมเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดลดลงเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดผลดังกล่าวประการแรก คือ ขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กและกลมช่วยอุดช่องว่างของโพรงได้ดี ทำให้โครงสร้างของโพรงแน่นขึ้น ประการที่สอง คือ อนุภาคเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็กเมื่อผสมในเพสต์ ทำให้อนุภาคเม็ดปูนซีเมนต์สามารถกระจายตัวในเพสต์ได้ดีและสามารถสัมผัสกับน้ำได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ดี และประการที่สาม เป็นผลเนื่องจากเถ้าถ่านหินที่มีความละเอียดทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีขึ้น ได้เคลือบผิวซิลิเกตไฮเดรตเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดในเพสต์ลดลง



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เพสต์, เพสต์ OFA20 และเพสต์ OFA40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน = 0.35



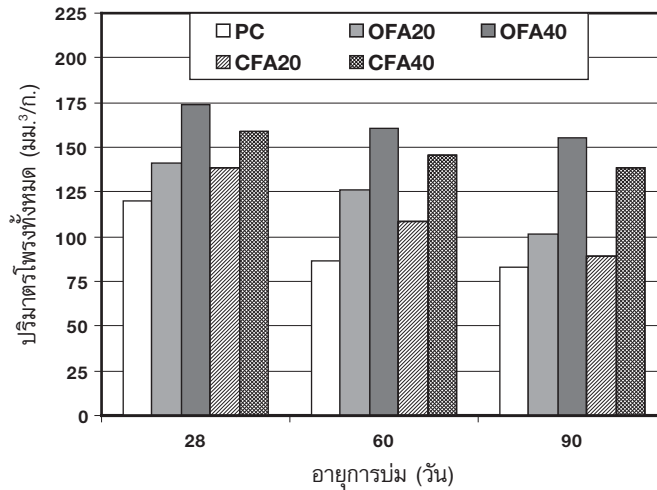
ก. อายุการบ่ม 28 วัน



ข. อายุการบ่ม 90 วัน

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดโพรงและการเพิ่มขึ้นของปริมาตรโพรงในซีเมนต์เฟสท์, เฟสท์ CFA20 และเฟสท์ CFA40 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน = 0.35

กรณีนี้ที่พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรโพรงทั้งหมดกับกำลังอัด พบว่าเฟสท์ที่ผสมเถ้าถ่านหินในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าของกำลังอัดของเฟสท์ลดลงด้วย (รูปที่ 3) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Poon และคณะ [9] Khan และคณะ [11] และ Pandey และ Sharma [12]



รูปที่ 6 ปริมาตรโพรงทั้งหมดของซีเมนต์เฟสท์, เฟสท์ OFA และ เฟสท์ CFA

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาเฟสท์ของปูนซีเมนต์ที่มีการแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การแทนที่เถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาดในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในซีเมนต์เฟสท์ ทำให้ปริมาตรโพรงทั้งหมดสูงขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังอัดต่ำลง
2. การแทนที่เถ้าถ่านหินที่แยกขนาดให้มีขนาดเล็ก จะทำให้ขนาดโพรงคาปิลลารีและปริมาตรโพรงทั้งหมดของเฟสท์ต่ำลงเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า และมีผลทำให้กำลังอัดสูงขึ้น
3. เฟสท์ผสมเถ้าถ่านหินที่มีขนาดเล็ก ทำให้เฟสท์มีความสม่ำเสมอและแน่นขึ้น เนื่องจากผลของการกระจายตัวที่ดีในเฟสท์ ช่วยกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Nucleation Effect) มีการอุดช่องว่างในเฟสท์ได้ดี และทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเฟสท์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่หยาบ

6. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา ภายใต้โครงการพัฒนาอาจารย์สาขาขาดแคลนเพื่อศึกษาภายในประเทศ ตามความต้องการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก นอกจากนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความสะดวกด้านอุปกรณ์ เครื่องมือ และห้องปฏิบัติการ

7. เอกสารอ้างอิง

1. Garboczi, E. J. and Bentz, D. P., 1996, "Multi-scale Picture of Concrete and Its Transport Properties: Introduction for Non-cement Research," *NISTIR 5900*, U.S., Department of Commerce.
2. Mindess, S. and Young, J. F., 1981, "Concrete," *Prentice-Hall Inc.*, Englewood Cliffs, N.J.
3. Angsuwattana, E., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., and Ketratanabovorn, T., 1998, "Use of Classified Mae Moh Fly Ash in High Strength Concrete," *Supplementary Paper of the Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete*, Bangkok, Thailand, pp. 49-60.
4. Erdogdu, K. and Turker, P., 1998, "Effect of Fly Ash Particle Size on Compressive Strength of Portland Cement Fly Ash Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 9, pp. 1217-1222.
5. Slanicka, S., 1991, "The Influence of Fly Ash Fineness on the Strength of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 21, Nos. 2/3, pp. 285-296.
6. Paya', J., Monzo', J., Peris-Mora, E., Borrachero, M. V., Tercero, R., and Pinillos, C., 1995, "Early-strength Development of Portland Cement Mortars Containing Air Classified Fly Ash," *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 6, pp. 449-456.
7. Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Siripanichgorn, A., Woranisrakul, J., Keatkrai, P., Nimityongskul, P., Chindaprasirt, P., Tangsathikulchai, C., Lertprasertwong, A., and Ketratanaborvorn, T., 1998, "Classifying and Selecting of Mae Moh Fly Ash for Using as a Cement Based Material," *In : CEPSI 12th*, Thailand, pp. 226-234.
8. Poon, C. S., Lam, L., and Wong, Y. L., 1999, "Effect of Fly Ash and Silica Fume on Interfacial Porosity of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 197-205.
9. Poon, C. S., Lam, L., and Wong, Y. L., 2000, "A Study on High Strength Concrete Prepared with Large Volume of Low Calcium Fly Ash" *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 3, pp. 447-455.
10. Chindaprasirt, P., Cao, T., and Suwanvitaya, P., 2000, "Influence of Binder Type on Quality of Concrete for Durable Structures," *Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology*, Tokyo, Japan, pp. 581-590.
11. Khan, M. I., Lynsdale, C. J., and Waldrom, P., 1990, "Porosity and Strength of PFA/SF/OPC Ternary Blended Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 20, No. 8, pp. 591-601.
12. Pandey, S. P. and Sharma, R. L., 2000, "The Influence of Mineral Additions on the Strength and Porosity of OPC Mortar," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 19-23.