

ผลกระทบของขนาดอนุภาคเก้าถ่านหินแม่เมาะ ต่อดัชนีกำลังของมอร์ตาร์

เรืองรุชดี ชีระโรจน์¹ จตุพล ตั้งปกาศิต² ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³ และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

รับเมื่อ 15 พฤศจิกายน 2545 ตอบรับเมื่อ 23 มกราคม 2546

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคเก้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ ต่อดัชนีกำลังที่เพิ่มขึ้นของมอร์ตาร์เนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคและจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเก้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน โดยดัชนีกำลังที่เพิ่มขึ้นทั้งสองส่วนสามารถหาได้จากความแตกต่างของดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้เก้าถ่านหินและวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเก้าถ่านหินแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ผลการทดลองพบว่าดัชนีกำลังที่เปลี่ยนแปลงไปของมอร์ตาร์ที่ผสมเก้าถ่านหินขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2.7 และ 160 ไมโครเมตร ในช่วงอายุ 3 ถึง 28 วัน เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคมากกว่าเกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยมีค่าดัชนีกำลังจากการอัดตัวของอนุภาคแตกต่างกันประมาณร้อยละ 22 ในขณะที่ดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานต่างกันเพียงร้อยละ 3 ที่อายุ 3 วัน และต่างกันร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน และที่อายุ 90 วัน ดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 29 เมื่อใช้เก้าถ่านหินขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.7 ไมโครเมตร

คำสำคัญ : ดัชนีกำลัง / การอัดตัวของอนุภาค / ปฏิกิริยาปอซโซลาน / เก้าถ่านหิน

¹ ผู้ช่วยนักวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

² นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

³ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

Effect of Particle Size of Mae Moh Fly Ash on Strength Activity Index of Mortar

Raungrut Cheerarot¹ Jatuphon Tangpagasit² Chai Jaturapitakkul³
and Kraiwood Kiattikomol³

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

Received 15 November 2002; accepted 23 January 2003

Abstract

The objective of this research is to study the effect of particle size of fly ashes from Mae Moh power plant on increasing strength activity index of mortar due to packing effect and pozzolanic reaction. Both effects can be determined by using insoluble material and fly ash which have almost the same particle size to replace Portland cement type I. From the results, it showed that strength activity index of mortar between 3 to 28 days due to the packing effect is higher than that of the pozzolanic reaction and the different of strength activity index due to packing effect is 22%. The different of strength activity indices due to the pozzolanic reaction of fly ashes with particle size of 2.7 and 160 microns are 3 and 20% at the ages of 3 and 28 days, respectively. At the age of 90 days, the strength activity index of mortar due to pozzolanic reaction increases to be 29% when fly ash with particle size of 2.7 microns is used.

Keywords : Strength Activity Index / Packing Effect / Pozzolanic Reaction / Fly Ash

¹ Research Assistant, Department of Civil Engineering.

² Ph.D. Student, Department of Civil Engineering.

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

เป็นที่ทราบกันดีว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ผสมวัสดุปอชโซลานเกิดจากสามส่วนหลักคือ ปฏิริยาไฮเดรชัน, ปฏิริยาปอชโซลาน, และการอัดตัวของอนุภาคซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของอนุภาค วัสดุปอชโซลานที่มีขนาดเล็กและแทรกอยู่ในช่องว่างของมอร์ตาร์ การจัดเรียงตัวที่เหมาะสมนี้ทำให้มอร์ตาร์หรือคอนกรีตมีเนื้อที่แน่นขึ้น เป็นผลให้มีกำลังอัดสูงขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยปฏิริยาทางเคมีดังเช่นในกรณีของปฏิริยาไฮเดรชันหรือปฏิริยาปอชโซลาน [1]

การใช้เถ้าถ่านหินจะให้กำลังอัดต่อมอร์ตาร์หรือคอนกรีตสองส่วนคือ กำลังอัดจากปฏิริยาปอชโซลานและจากการอัดตัวของอนุภาค (packing effect) โดยขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินเป็นปัจจัยสำคัญต่อกำลังอัดทั้งสองส่วน กล่าวคือหากเถ้าถ่านหินมีความละเอียดสูงจะให้กำลังอัดทั้งจากปฏิริยาปอชโซลานและจากการอัดตัวของอนุภาคมากกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า [2] อย่างไรก็ตาม ยังไม่สามารถระบุค่าได้แน่นอนว่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นจากปฏิริยาปอชโซลานและการอัดตัวของอนุภาคว่ามีปริมาณเท่าใด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อหาค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิริยาปอชโซลานและการอัดตัวของเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันโดยใช้วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง (insoluble material) ซึ่งเป็นผลึก (crystalline phase) ที่มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าถ่านหินแต่ไม่ทำปฏิริยาทางเคมีระหว่างวัสดุใดๆ ในมอร์ตาร์มาแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนเช่นเดียวกับเถ้าถ่านหิน

กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างเกิดเนื่องจากปฏิริยาไฮเดรชันและการอัดตัวของอนุภาคเท่านั้น โดยไม่มีปฏิริยาปอชโซลานเนื่องจากความเป็นผลึกของวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง ดังนั้นผลต่างของกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างที่มีขนาดอนุภาคต่างกันคือกำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน และผลต่างของกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันคือกำลังอัดที่เกิดจากปฏิริยาปอชโซลานนั่นเอง โดยทั้งมอร์ตาร์มาตรฐาน มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหิน และมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง จะใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากัน เพื่อป้องกันกำลังอัดแตกต่างกันเนื่องจากการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน

2. วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ทรายแม่น้ำที่ล้างน้ำจนสะอาด แล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน 16 และนำส่วนที่ค้างตะแกรงเบอร์ 100 มาใช้ในการทดลอง, เถ้าถ่านหินจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย อ. แม่เมาะ จ. ลำปาง และสารเคมีได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ แอมโมเนียมไนเตรตและเมธิลเรท เพื่อใช้เตรียมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง

3. วิธีการศึกษา

3.1 การแยกขนาดเถ้าถ่านหิน

การแยกขนาดเถ้าถ่านหินใช้เครื่องแยกขนาดด้วยลม (air classifier) เพื่อให้เถ้าถ่านหินมีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ เถ้าถ่านหินละเอียด (SF, small size fly ash) เถ้าถ่านหินละเอียดปานกลาง (MF, medium size fly ash) และเถ้าถ่านหินหยาบ (LF, large size fly ash) เมื่อรวมกับเถ้าถ่านหินที่ไม่ได้แยกขนาด (OF, original size fly ash) จึงมีเถ้าถ่านหินที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมด 4 ขนาด

3.2 การบดและแยกขนาดทราย

การเตรียมทรายสำหรับทำวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง เริ่มจากนำทรายมาล้างน้ำจนสะอาด จากนั้นฟุ้งแดดให้แห้งแล้วนำมาบดด้วยเครื่องลอสเองเจลิสจนมีขนาดแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ ทรายละเอียด ทรายละเอียดปานกลาง และทรายหยาบ โดยทรายบดทั้ง 3 ขนาดจะบดจนมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกับเถ้าถ่านหินที่ความละเอียดเดียวกัน

3.3 การเตรียมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง

การเตรียมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง [3] เริ่มจากนำทรายบดละเอียดที่เตรียมไว้ทั้ง 3 ขนาดมาละลายในน้ำเย็นและเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น และเติมน้ำร้อนจนได้ความเข้มข้นที่ต้องการ และเติมสารละลายให้ร้อน แล้วกรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง นำวัสดุที่ค้างบนกระดาษกรองใส่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นและเติมสารละลายให้ร้อน จากนั้นทำวัสดุให้มีค่าเป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น โดยใช้เมทิลเรทเป็นตัวตรวจสอบ และแยกวัสดุออกจากสารละลายเพื่อนำไปล้างในสารละลายแอมโมเนียมไนเตรดก่อนนำวัสดุที่ได้ไปล้างน้ำจนสะอาดและอบให้แห้ง โดยวัสดุที่ได้หลังการอบคือวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ซึ่งมี 3 ขนาดคือ วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างละเอียด (SI, small size insoluble material) วัสดุละเอียดปานกลาง (MI, medium size insoluble material) และวัสดุหยาบ (LI, large size insoluble material) ตามลำดับ โดยวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างนี้มีลักษณะเป็นผลึก เนื่องจากไม่ทำละลายทั้งกรดและด่างเข้มข้นตามมาตรฐาน ASTM C 114 [3] ดังนั้นเมื่อนำวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างแทนที่ปูนซีเมนต์ย่อมไม่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นต่างชนิดหนึ่งอย่างแน่นอน

3.4 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในการทดลองจะถูกทดสอบทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้แก่ ภาพขยายอนุภาค องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และการกระจายตัวของอนุภาค

3.5 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

ในการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ จะนำเถ้าถ่านหินหรือวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างแต่ละขนาดมาเป็นวัสดุประสานโดยแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้

อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายในอัตราส่วนที่คงที่คือ 1:2.75 โดยน้ำหนัก และกำหนดปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 ทุกอัตราส่วนผสม เพื่อหล่อมอร์ตาร์ขนาด 50x50x50 มม.³ และถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำก้อนมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

4. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ แก้วถ่านหิน และวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ซึ่งประกอบด้วยปริมาณร้อยละน้ำหนักของวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย และความถ่วงจำเพาะ จากผลการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณน้ำหนักของวัสดุที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ร้อยละ 13 และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 11 ไมโครเมตร

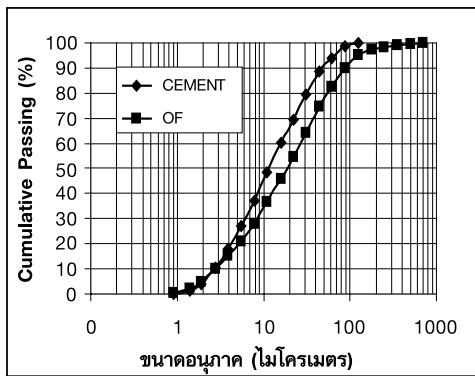
แก้วถ่านหินก่อนการแยกขนาด (OF) มีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 29 ส่วน แก้วถ่านหินหลังการแยกขนาด SF, MF และ LF มีปริมาณค้ำบนร้อยละ 0, 12 และ 83 ตามลำดับ แสดงว่าแก้วถ่านหิน OF มีความละเอียดอยู่ระหว่างแก้วถ่านหิน MF และ LF ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย โดยแก้วถ่านหิน SF, MF, OF และ LF มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 2.7, 16, 19 และ 160 ไมโครเมตร และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.60, 2.22, 2.12 และ 1.91 ตามลำดับ ผลการทดสอบความละเอียดของแก้วถ่านหินทั้งสองวิธีมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [4] [5] ส่วนวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง SI, MI และ LI มีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ร้อยละ 0, 23 และ 85 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 3.3, 19 และ 200 ไมโครเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ความละเอียดและความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

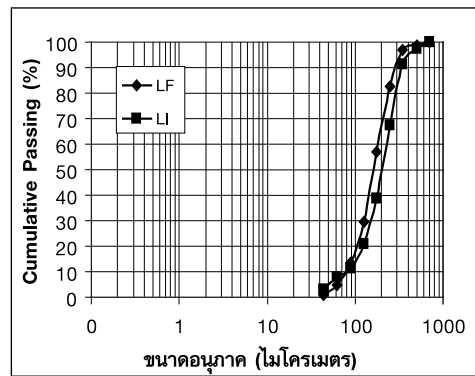
ประเภทของวัสดุ	ปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (%)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมโครเมตร)	ความถ่วงจำเพาะ
Cement	13	11	3.15
OF	29	19	2.12
SF	0	2.7	2.60
MF	12	16	2.22
LF	83	160	1.91
SI	0	3.3	2.61
MI	23	19	2.60
LI	85	200	2.59

รูปที่ 1 แสดงการกระจายตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์ แก้วถ่านหินก่อนแยกขนาด แก้วถ่านหินแยกขนาด และวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง โดยรูปที่ 1(ข), 1(ค) และ 1(ง) เปรียบเทียบการกระจายตัวของแก้วถ่านหินแยกขนาดและวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน พบว่าวัสดุทั้งสองชนิดมีลักษณะการกระจายตัวที่ใกล้เคียงกัน

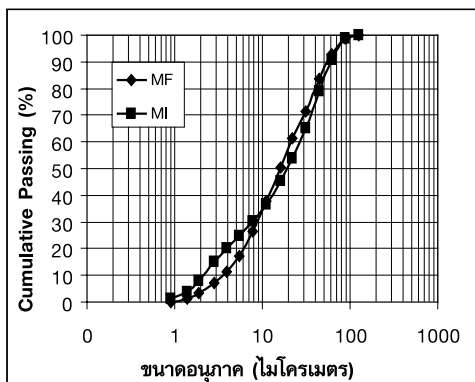
รูปที่ 2(ข)- 3(จ) แสดงภาพขยายของแก้วถ่านหิน OF, SF, MF และ LF พบว่าแก้วถ่านหินแต่ละขนาดมีลักษณะรูปร่างเป็นทรงกลมเหมือนกัน แตกต่างกับลักษณะรูปร่างของปูนซีเมนต์และวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง SI, MI และ LI ซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน ลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นมุมเนื่องมาจากการบด (ตามรูปที่ 2(ก), 2(ฉ)-2(ข) แม้ว่าแก้วถ่านหินและวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างจะมีรูปร่างที่แตกต่างกัน แต่วัสดุทั้งสองมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก กล่าวคือมีอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 200 ไมโครเมตร อีกทั้งมีขนาดอนุภาคที่ใกล้เคียงกัน จึงอนุมานว่าผลกระทบเนื่องจากรูปร่างที่แตกต่างกันของวัสดุทั้งคู่ต่อการยึดตัวของอนุภาคในมอร์ตาร์มีค่าน้อยมาก



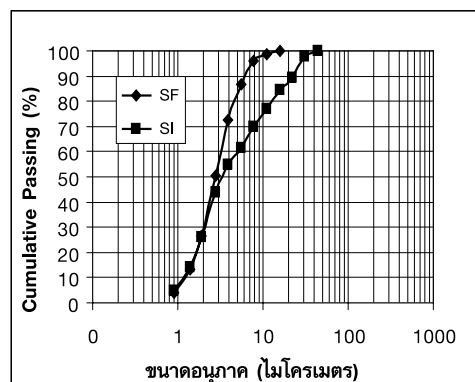
(ก) ปูนซีเมนต์ และ OF



(ข) LF และ LI

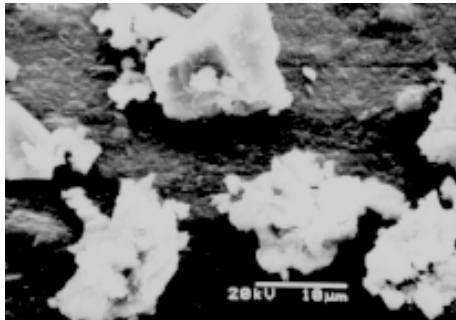


(ค) MF และ MI

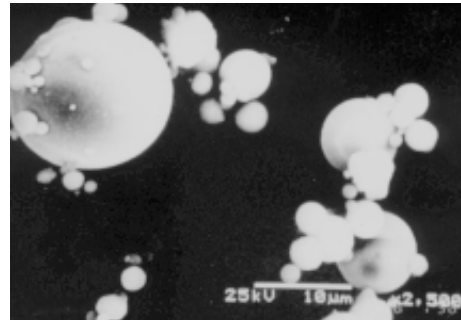


(ง) SF และ SI

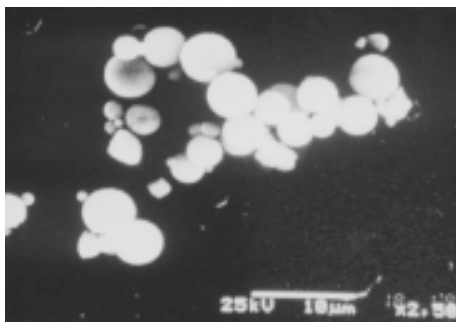
รูปที่ 1 การกระจายตัวของอนุภาควัสดุ



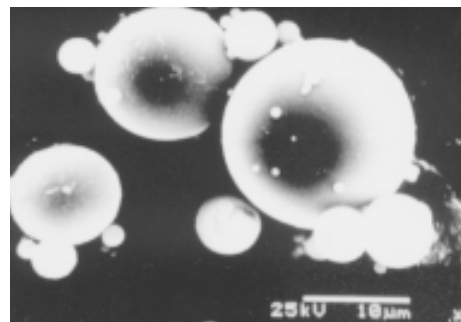
(ก) ปูนซีเมนต์



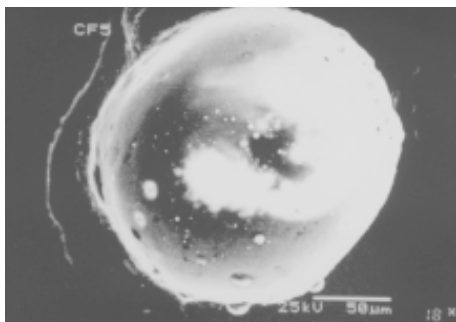
(ข) ใ้้าถ่านหิน OF



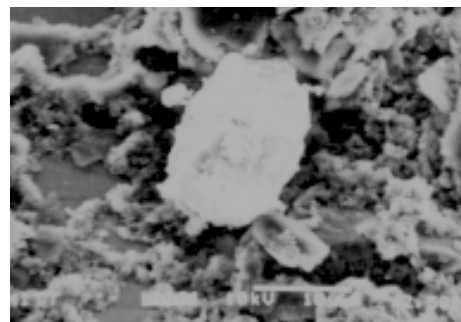
(ค) ใ้้าถ่านหิน SF



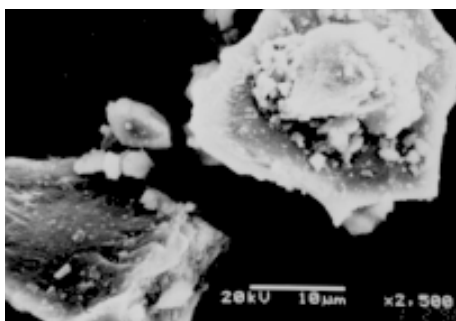
(ง) ใ้้าถ่านหิน MF



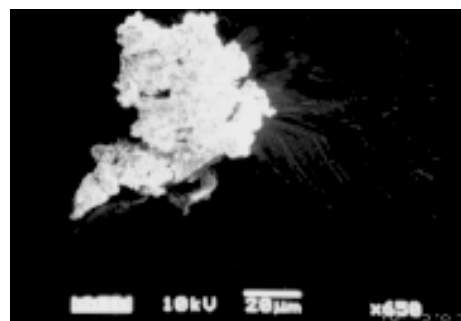
(จ) ใ้้าถ่านหิน LF



(ฉ) วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง SI



(ช) วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง MI



(ซ) วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง LI

รูปที่ 2 ภาพขยายของปูนซีเมนต์ ใ้้าถ่านหิน และวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ แก้วถ่านหิน และวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง ได้แสดงในตารางที่ 2 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่ของปูนซีเมนต์ประกอบด้วย ออกไซด์ของแคลเซียม ซิลิกา เหล็ก และอลูมินา ซึ่งมีผลรวมประมาณร้อยละ 90 โดยมีออกไซด์ของแคลเซียมสูงถึงร้อยละ 63.8 ของปริมาณทั้งหมด ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีโดยทั่วไปของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี	ประเภทของวัสดุ							
	ปูนซีเมนต์	แก้วถ่านหิน				วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง		
		OF	SF	MF	LF	SI	MI	LI
SiO ₂	20.2	40.0	38.2	42.1	43.2	91.3	91.8	91.7
Al ₂ O ₃	5.4	20.9	20.7	21.2	21.5	5.8	7.4	4.7
Fe ₂ O ₃	2.9	11.8	11.6	11.8	12.1	1.8	0.0	1.4
CaO	63.8	12.7	14.0	13.2	13.4	0.9	0.2	0.2
MgO	1.5	2.4	2.2	2.5	2.7	0.1	0.1	0.1
Na ₂ O	2.7	1.4	1.2	1.3	1.8	0.2	0.3	0.2
K ₂ O	0.3	2.8	2.7	2.9	2.6	2.9	3.8	2.4
SO ₃	2.3	2.3	5.0	1.9	0.4	-	-	-
LOI	2.9	2.3	4.5	1.4	2.3	1.8	0.5	0.6

องค์ประกอบทางเคมีของแก้วถ่านหินแต่ละขนาดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีผลรวมของออกไซด์ของซิลิกา อลูมินา และเหล็ก เกินกว่าร้อยละ 70 ขององค์ประกอบทั้งหมด ตามมาตรฐาน ASTM C 618 [6] สามารถจัดแก้วถ่านหินทั้ง 4 ขนาดเป็นแก้วถ่านหินชนิด F สำหรับองค์ประกอบเคมีของวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่างทั้ง 3 ขนาดจะมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือจะมีออกไซด์ของซิลิกาประมาณร้อยละ 92 เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการศึกษาเป็นทรายแม่น้ำซึ่งมีออกไซด์ของซิลิกาอยู่สูง

4.3 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์

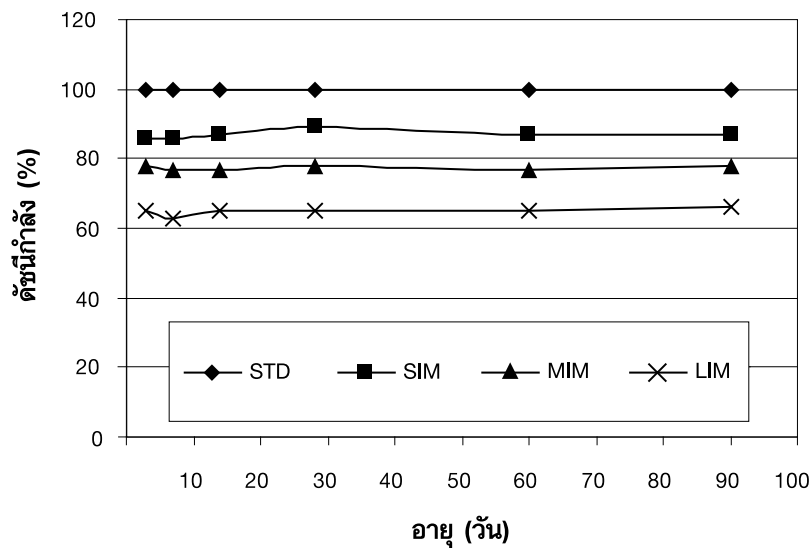
ตารางที่ 3 แสดงค่ากำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง โดยดัชนีกำลังคืออัตราส่วนร้อยละระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าถ่านหินหรือวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กับกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน (STD) ซึ่งใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์มาตรฐานมีกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 227, 289, 330, 365, 389 และ 395 กก/ซม² ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ OFM มีดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันเท่ากับร้อยละ 77 และ 81 ตามลำดับ ดังนั้นจากข้อกำหนด ASTM C 618 [6] เถ้าถ่านหินก่อนคัดขนาด (OF) สามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้ เนื่องจากมีดัชนีกำลังที่อายุ 7 หรือ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ 75

พิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ SFM, MFM, OFM และ LFM ซึ่งเรียงตามขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินจากเล็กไปหาใหญ่ พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ามีกำลังอัดตลอดช่วงอายุการทดสอบสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า ตัวอย่างเช่นที่อายุ 3 และ 90 วัน มอร์ตาร์ SFM, MFM, OFM และ LFM มีกำลังอัดเท่ากับ 206, 184, 168, 144 และ 462, 409, 360, 268 กก/ซม² ตามลำดับ ผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะให้กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอชโซลานและการอัดตัวของอนุภาคมากกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5], [7]-[10] อย่างไรก็ตามยังไม่มีการวิจัยใดระบุค่าที่แน่นอนของกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากขนาดเถ้าถ่านหินที่เป็นผลจากปฏิกิริยาปอชโซลานและการอัดตัวของอนุภาค

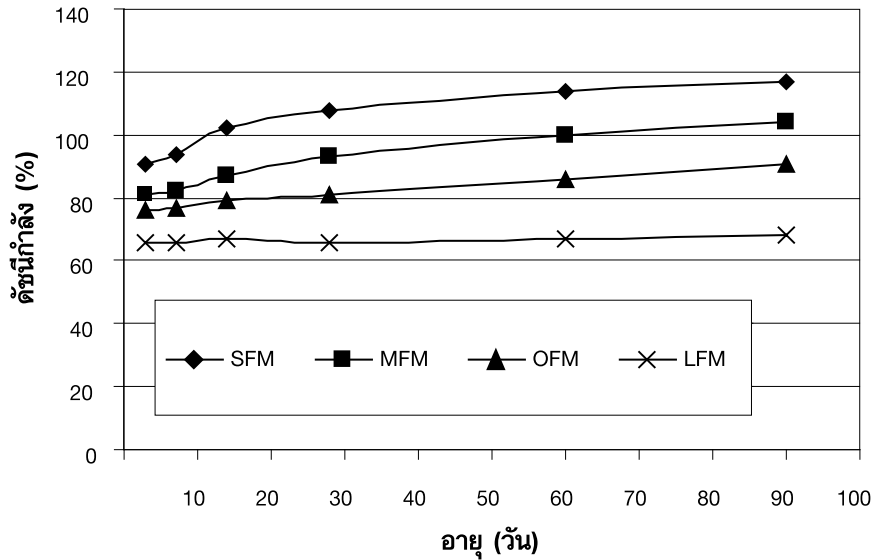
ตารางที่ 3 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินและที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

วัสดุ	กำลังอัด (กก./ซม. ²) - ดัชนีกำลัง (%)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
STD	227-100	289-100	330-100	365-100	389-100	395-100
SFM	206-91	271-94	336-102	394-108	445-114	462-117
MFM	184-81	239-82	286-87	339-93	389-100	409-104
OFM	174-77	222-77	262-79	296-81	334-86	360-91
LFM	150-66	190-66	220-67	241-66	262-67	268-68
SIM	195-86	248-86	286-87	326-89	343-87	344-87
MIM	176-78	223-77	255-77	285-78	301-77	310-78
LIM	148-65	181-63	215-65	238-65	254-65	259-66

ตารางที่ 3 พบว่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ท์ SIM, MIM และ LIM ในช่วงระหว่างอายุ 3 ถึง 90 วัน มีค่าค่อนข้างคงที่ เช่นดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ท์ SIM ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน มีค่าร้อยละ 86, 86, 87, 89, 87 และ 87 ตามลำดับ และเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปที่ 3 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ท์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างกับอายุทดสอบ พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ขนานกับแกนอายุทดสอบ แสดงว่าวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างเป็นวัสดุเฉื่อย (inert material) และอายุมอร์ตาร์ท์ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ท์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง หรือสรุปได้ว่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ท์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างไม่ขึ้นกับอายุทดสอบ แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่าง กล่าวคือหากมอร์ตาร์ท์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างมีขนาดเล็กก็จะมีดัชนีกำลังสูงกว่ามอร์ตาร์ท์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างขนาดใหญ่ ซึ่งต่างกับกรณีของมอร์ตาร์ท์ที่ผสมเถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีดัชนีกำลังสูงขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น เพราะเถ้าถ่านหินสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าหากเถ้าถ่านหินยังมีความละเอียดสูง ค่าดัชนีกำลังจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่หากเถ้าถ่านหินมีขนาดอนุภาคใหญ่ การเพิ่มขึ้นของดัชนีกำลังจะเพิ่มได้เพียงเล็กน้อย ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้เถ้าถ่านหินที่มีขนาดแตกต่างกันจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะซึ่งเป็นแหล่งเดียวกับงานวิจัยนี้ [5]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ท์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างกับอายุทดสอบ



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านหินกับอายุทดสอบ

4.4 ดัชนีกำลังจากการอัดตัวของอนุภาคและจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

พิจารณารูปที่ 3 พบว่ามอร์ตาร์ SIM, MIM และ LIM มีดัชนีกำลังเฉลี่ยที่อายุระหว่าง 3 ถึง 90 วัน เท่ากับร้อยละ 87.0, 77.5 และ 64.8 ตามลำดับ เมื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีกำลังกับขนาดอนุภาคเฉลี่ยตามรูปที่ 5 จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1) คือ

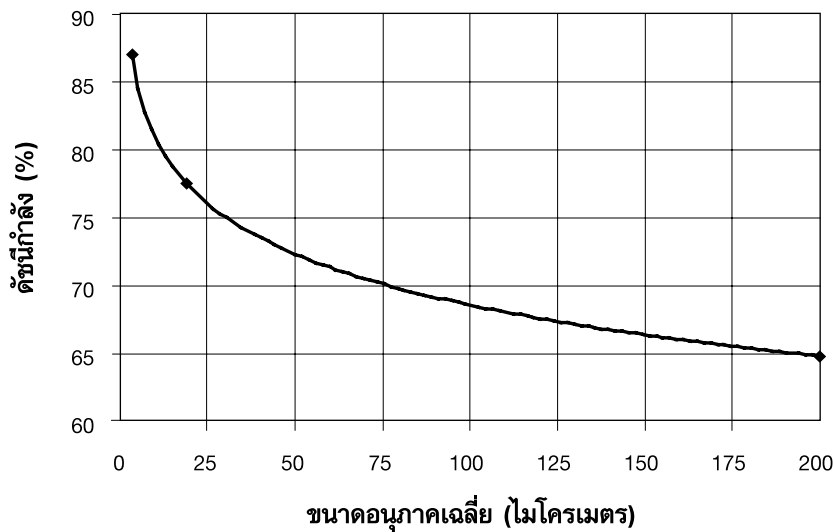
$$Y = -5.4081 \ln (X) + 93.445 \quad (1)$$

เมื่อ Y คือ ดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการอัดตัวของอนุภาค และ X คือ ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างในหน่วยไมโครเมตร

พิจารณารูปที่ 5 เห็นได้ว่าเมื่อวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า 30 ไมโครเมตร ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุดังกล่าวมีดัชนีกำลังเกินกว่าร้อยละ 75 แม้ว่าวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุเฉื่อยก็ตาม เมื่อแทนที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถ้าถ่านหิน SF, MF, OF และ LF ซึ่งมีขนาด 2.7, 16, 19 และ 160 ไมโครเมตร ในสมการที่ (1) จะได้ว่าดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการอัดตัวของอนุภาคของมอร์ตาร์ SFM, MFM, OFM และ LFM มีค่าร้อยละ 88.0, 78.5, 77.5 และ 66.0 ตามลำดับ และเมื่อแทนขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ 11 ไมโครเมตร (โดยสมมติว่าร้อยละ 20 ของปูนซีเมนต์เป็นวัสดุเฉื่อย) ในสมการที่ (1) ได้ดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 80.5 แสดงว่าดัชนีกำลังลดลงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่หายไปจากการแทนที่ด้วยวัสดุเฉื่อยเท่ากับร้อยละ 19.5 ดังนั้นจึงกล่าว

ได้ว่า การแทนที่ด้วยเถาถ่านหินในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน จะมีกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันร้อยละ 19.5 และจะมีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจากการอัดตัวของอนุภาคของเถาถ่านหิน กล่าวคือหาก เถาถ่านหินมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์จะมีกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากการอัดตัวของอนุภาค แต่หากเถาถ่านหินมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ กำลังอัดจากการอัดตัวของอนุภาคจะมีค่าลดลง

ตัวอย่างเช่น เถาถ่านหินก่อนแยกขนาด (OF) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 19 ไมโครเมตร มีค่าดัชนีกำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการอัดตัวของอนุภาคคำนวณตามสมการที่ (1) เท่ากับร้อยละ 77.5 ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจากการทดสอบกำลังอัดในตารางที่ 3 ซึ่งมอร์ตาร์ OFM มีดัชนีกำลังที่อายุ 3 วันเท่ากับร้อยละ 77 แสดงว่าการใช้เถาถ่านหินก่อนแยกขนาด (OF) แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 20 ทำให้ดัชนีกำลังที่อายุ 3 วันลดลงเท่ากับร้อยละ 23 (ผลต่างระหว่างดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ STD และ OFM) ซึ่งดัชนีกำลังที่ลดลงนี้จะประกอบด้วยส่วนที่ลดลงจากการแทนที่ของวัสดุที่มีอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ร้อยละ 3.5 และอีกร้อยละ 19.5 เป็นส่วนที่ลดลงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่หายไปเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถาถ่านหิน



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย

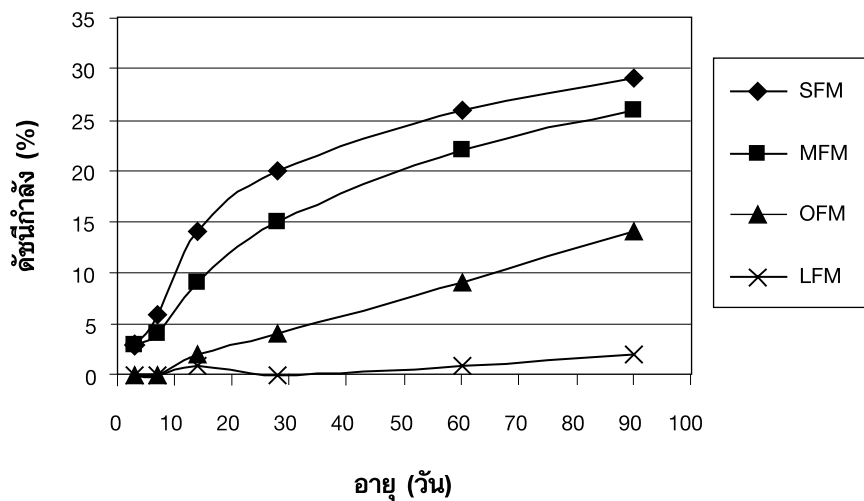
ดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถหาได้จากผลต่างของดัชนีกำลังระหว่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถาถ่านหินกับดัชนีกำลังที่ได้จากสมการที่ (1) เมื่อแทนขนาดอนุภาคเฉลี่ยของเถาถ่านหินในสมการ โดยดัชนีกำลังที่ได้จากสมการที่ (1) จะเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมทั้งผลของการอัดตัวของอนุภาคเถาถ่านหิน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4 ขณะที่รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถาถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะกับอายุทดสอบ พบว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเถาถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น และหากเถาถ่านหินมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้น การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้เถาถ่านหินบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันจากแหล่งต่างๆ [5][11] นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เถาถ่านหินที่มีอนุภาคใหญ่กว่าปูน

ซีเมนต์ จะทำให้กำลังจากการอัดตัวของอนุภาคของวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าค่าการอัดตัวของอนุภาคปูนซีเมนต์เป็นผลให้กำลังอัดของมอร์ตาร์ยิ่งลดลง

ตารางที่ 4 ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ผสมเข้ากันจากปฏิกิริยาปอซโซลานและจากปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมกับการอัดตัวของอนุภาค

วัสดุ	ดัชนีกำลัง (%)						จากการอัดตัวร่วมกับปฏิกิริยาไฮเดรชัน*
	จากปฏิกิริยาปอซโซลาน**						
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน	
SFM	3	6	14	20	26	29	88
MFM	2.5	3.5	8.5	14.5	21.5	25.5	78.5
OFM	-0.5	-0.5	1.5	3.5	8.5	13.5	77.5
LFM	0	0	1	0	1	2	66

* คำนวณจากสมการที่ (1), ** คำนวณจากดัชนีกำลังที่อายุต่างๆ ลบด้วยค่าจากสมการที่ (1)



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานกับอายุทดสอบ

พิจารณาเมอร์ดาร์ LFM พบว่ามีดัชนีกำลังที่อายุ 3 และ 7 วันเท่ากับร้อยละ 66 ดังนั้นดัชนีกำลังที่ลดลงคือร้อยละ 34 (จากตารางที่ 3) โดยประกอบด้วยดัชนีกำลังที่ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันร้อยละ 19.5 และจากการอัดตัวของอนุภาคร้อยละ 14.5 และที่อายุ 90 วัน เมอร์ดาร์ LFM มีดัชนีกำลังเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 68 หรือมีดัชนีกำลังที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานร้อยละ 2 (จากตารางที่ 4) แต่เมื่อแก้ค่ากันห็นมีความละเอียดมากขึ้น พบว่าดัชนีกำลังของเมอร์ดาร์ SFM ที่อายุ 90 วันเท่ากับร้อยละ 117 โดยมีดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงถึงร้อยละ 29 (ตามตารางที่ 4) โดยดัชนีกำลังที่เพิ่มจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้สามารถชดเชยกับกำลังอัดที่ลดลงจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ อีกทั้งแก้ค่ากันห็น SF มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์จึงมีดัชนีกำลังที่เพิ่มจากการอัดตัวของอนุภาคอีกส่วนหนึ่ง เป็นผลให้ดัชนีกำลังรวมเท่ากับร้อยละ 117 ที่อายุ 90 วัน

ดัชนีกำลังที่อายุ 90 วันของเมอร์ดาร์ SFM และ LFM ซึ่งใช้แก้ค่ากันห็นที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2.7 และ 160 ไมโครเมตร มีค่าเท่ากับร้อยละ 117 และ 68 ตามลำดับ หรือมีค่าต่างกันร้อยละ 49 และจากตารางที่ 4 พบว่าที่อายุเดียวกันเมอร์ดาร์ SFM และ LFM มีดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานร้อยละ 29 และ 2 ตามลำดับ ขณะที่ดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมกับการอัดตัวของอนุภาคของเมอร์ดาร์ดังกล่าวเท่ากับร้อยละ 88 และ 66 ตามลำดับ โดยดัชนีกำลังที่ต่างกันของเมอร์ดาร์ทั้งคู่ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเท่ากับร้อยละ 27 (ผลต่างของดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ 29 ลบ 2) และจากการอัดตัวของอนุภาคร้อยละ 22 (ผลต่างของดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและการอัดตัว คือ 88 ลบ 66)

5. สรุปผลการทดลอง

1. ดัชนีกำลังที่เปลี่ยนแปลงไปของเมอร์ดาร์ที่ผสมแก้ค่ากันห็นที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยระหว่าง 2.7 ถึง 160 ไมโครเมตร ที่อายุ 3 ถึง 28 วัน เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคมากกว่าที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยมีค่าดัชนีกำลังจากการอัดตัวของอนุภาคต่างกันร้อยละ 22 ในขณะที่มีดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานต่างกันเพียงร้อยละ 3 ที่อายุ 3 วัน และต่างกันเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 20 ที่อายุ 28 วัน
2. ดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานจะมีผลอย่างมากต่อเมอร์ดาร์ที่อายุมากขึ้น เช่นที่อายุ 90 วัน เมอร์ดาร์ที่ผสมแก้ค่ากันห็นที่มีขนาดเฉลี่ยอนุภาค 2.7 ไมโครเมตร มีดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเท่ากับร้อยละ 29
3. แม้ว่าจะงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเฉพาะผลของขนาดของแก้ค่ากันห็นแม่เมาะ อย่างไรก็ตาม หลักการหาดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลานและการอัดตัวของอนุภาคแก้ค่ากันห็นจากแหล่งอื่นๆ หรือวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นสามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

1. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., and Tangpagasit, J., 2000, "Effect of Insoluble Residue on Properties of Portland Cement," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1209-1214.
2. Larrard, F. and Sedran, T., 1994, "Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model," *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 6, pp. 997-1007.
3. American Society for Testing and Materials, 1995, "ASTM C 114 : Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 90-117.
4. Monzo, J., Paya, J., Peris-Mora, E. and Borrachero, M. V., 1995, "Mechanical Treatment of Fly Ash: Strength Development and Workability of Mortars Containing Ground Fly Ashes" Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, *Proceedings of the 5th International Conference*, Milwaukee, Wisconsin, pp. 339-354.
5. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S., and Chutubtim, S., 2001, "Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness from Various Sources as Pozzolanic Materials," *Cement and Concrete Composition*, Vol. 23, pp. 335-343.
6. American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use Mineral Admixture in Portland Cement Concrete," *1997 Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 298-296.
7. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Peris, E., and Amahjour, F., 2000, "Mechanical Treatments of Fly Ashes. Part IV : Strength Development of Ground Fly Ash-Cement Mortars Cured at Different Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 543-551.
8. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Peris, E., and Gonzalez Lopez, E., 1996, "Mechanical Treatments of Fly Ashes. Part II: Particle Morphologies in Ground Fly Ashes (GFA) and Workability of GFA - Cement Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 225-235.
9. Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Peris, E., and Gonzalez Lopez, E., 1997, "Mechanical

Treatments of Fly Ashes. Part III: Studies on Strength Development of Ground Fly Ashes (GFA) - Cement Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 9, pp. 1365-1377.

10. Ranganath, R. V., Sharma, R. C., and Krishnamoorthy, S., 1995, "Influence of Fineness and Silica Content of Fly Ashes on Their Strength Development with Respect to Age" Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzonzlans in Concrete, *Proceedings of the 5th International Conference*, Milwaukee, Wisconsin, pp. 355-366.

11. Bouzoubaa, N., Zhang, M. H., Bilodeau, A., and Malhotra, V. M., 1997, "The Effect of Grinding on the Physical Properties of Fly Ashes and a Portland Cement Clinker," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 12, pp. 1861-1874.