

ผลการอัดตัวของอนุภาคและอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานในมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

Packing effect and rate of pozzolanic reaction in ground bottom ash mortar

ไกรวุฒิ ตันติสุขารมย์ จตุพล ตั้งปกาศิต และ เรืองรุชชี ชีระโรจน์

Kraiwut Tuntisukrarom, Jatuphon Tangpagasit, and Raungrut Cheerarat

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ต.ขามเรียง อ.กันทรวิชัย จ.มหาสารคาม 44150

โทร 01-5559481, โทรสาร 043-754316, E-mail: raungrut@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากำลัังอัดของมอร์ตาร์เนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าก้นเตาบดละเอียดที่มีขนาดต่างกัน 3 ขนาด ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.3, 13.6 และ 19.8 ไมโครเมตร เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยกำลัังอัดเนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาคและจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถหาได้จากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและทรายบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกันและใช้แทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากัน ซึ่งกำลัังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบดละเอียดประกอบด้วยกำลัังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและผลการอัดตัวของอนุภาค ดังนั้นผลต่างของกำลัังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบดขนาดต่างๆคือกำลัังอัดเนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาค ในขณะที่ผลต่างของกำลัังอัดระหว่างมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและมอร์ตาร์ที่ผสมทรายบดละเอียดขนาดเท่ากันคือกำลัังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน จากผลการทดลองพบว่ากำลัังอัดที่ต่างกันเนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาคเถ้าก้นเตาขนาดใหญ กลาง และเล็ก มีค่าต่างกันประมาณร้อยละ 5 ของกำลัังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานตลอดอายุการทดสอบ และมีกำลัังอัดเนื่องจากปอซโซลานเพิ่มขึ้นตามความละเอียดของเถ้าก้นเตา อายุการทดสอบและอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ โดยที่อายุ 180 วัน มีค่ากำลัังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงสุดประมาณร้อยละ 33, 42 และ 50 ของกำลัังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานสำหรับเถ้าก้นเตาขนาดใหญ กลางและเล็กตามลำดับ

Abstract

This research is the study of compressive strength due to packing effect and pozzolanic reaction of ground bottom ash mortar. Bottom ash was ground to have 3 different sizes which had median particle sizes of 6.3, 13.6, and 19.8 μm to replace Portland cement type I at the rate of 0, 10, 20, 30, 40, 50, and 60% by weight of cementitious materials. Compressive strength of mortar due to packing effect and pozzolanic reaction can be determined by using ground bottom ash and ground river sand which have approximately the same particle size and the same replacement of Portland cement. The compressive strength of

ground river sand mortar are from hydration reaction plus packing effect. Thus the difference in compressive strength of mortar containing ground river sand with different fineness is the strength due to packing effect while the difference in compressive strength between ground bottom ash mortar and ground river sand mortar can be considered to be the strength due to pozzolanic reaction of ground bottom ash. From the result, it was found that the difference of compressive strength due to packing effect among large, medium, and small sizes of ground bottom ash was about 5% of the strength of standard mortar at all ages. The compressive strengths of ground bottom ash mortars due to pozzolanic reaction increased with the increased of ground bottom ash fineness, curing age, and percent replacement of Portland cement. The maximum compressive strengths of large, medium, and small size ground bottom ash mortar due to pozzolanic reaction at the age of 180 days were about 33, 42, and 50 of the strength of standard mortar, respectively.

1. บทนำ

วัสดุปอซโซลานเช่นเถ้าก้นเตาหินนำมาใช้ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย เพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้น อีกทั้งช่วยลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต และเป็นที่ทราบกันดีว่าการใช้วัสดุปอซโซลานจะให้กำลัังอัดต่อคอนกรีตสองส่วนคือ กำลัังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) และจากผลการอัดตัวของอนุภาคหรือการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของอนุภาค (Packing effect) ซึ่งกำลัังอัดทั้งสองส่วนนี้ขึ้นกับขนาดอนุภาคของวัสดุปอซโซลานเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามการหาคำลัังอัดในแต่ละส่วนมีงานวิจัยที่ทำเรื่องนี้้อยมาก ซึ่งบางครั้งอาจพบว่ากำลัังอัดของวัสดุปอซโซลานที่ผ่านตามข้อกำหนดของ ASTM C 618 [1] อาจไม่มีคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานเลย แต่กำลัังอัดที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของอนุภาคเล็กๆเท่านั้น ดังนั้นหากทราบถึงกำลัังอัดที่เกิดขึ้นในแต่ละส่วนก็จะทำให้เข้าใจถึงพฤติกรรมที่ส่งผลต่อกำลัังอัดของวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดได้

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับการหาคำลัังอัดจากผลการอัดตัวของอนุภาคและจากปฏิกิริยาปอซโซลานเช่น ในปี ค.ศ. 1993 Goldman และ Bentur [2] ได้ใช้ซิลิกาฟุ้งและคาร์บอนดำ (Carbon black)

ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆและมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 15 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ในคอนกรีตกำลังสูง จากผลการศึกษาพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมคาร์บอนดำมีกำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุมตลอดอายุการทดสอบ ซึ่งกำลังอัดที่ต่างกันนี้คือกำลังอัดจากผลการอัดตัวของอนุภาค ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมในช่วง 7 วันแรกมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมคาร์บอนดำ และมีค่าต่างกันหลังจากอายุ 7 วัน ซึ่งกำลังอัดที่ต่างกันนี้คือกำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน และพบว่าที่อายุ 56 วันกำลังอัดจากผลการอัดตัวของอนุภาคมีค่าเป็น 3 เท่าของกำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน จึงสรุปผลได้ว่ากำลังอัดที่สูงเพิ่มขึ้นของคอนกรีตกำลังสูงผสมซิลิกาฟูมเกิดเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคเป็นหลัก ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับ Isaiia และคณะ [3] และในปี ค.ศ. 2005 Tangpagasit และคณะ [4] ได้ทำการหาค่ากำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันพบว่าดัชนีกำลังเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคของวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (วัสดุเฉื่อย) ขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคแต่ไม่ขึ้นกับอายุทดสอบ โดยจากผลการทดลองที่ผ่านมาสรุปได้ว่ารูปร่างการกระจายตัวของอนุภาคและขนาดอนุภาคมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีตแต่ปัจจุบันที่มีผลกระทบต่อกำลังอัดอย่างมากคือขนาดอนุภาคของวัสดุปอซโซลาน [4-8]

เถ้าถ่านเตาเกิดจากอุณหภูมิการเผาถ่านหินสูงกว่าจุดหลอมเหลวของเถ้าถ่านหิน ทำให้เถ้าถ่านหินจับตัวกันเป็นก้อนตกลงสู่พื้นเตาเผา ดังนั้นเถ้าถ่านเตาที่ได้จากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าโดยตรง จึงไม่สามารถใช้เป็นส่วนผสมในคอนกรีตได้เนื่องจากเถ้าถ่านเตามีขนาดอนุภาคที่ใหญ่มากและมีรูพรุนสูงเมื่อเทียบกับเถ้าถ่านหิน ส่งผลให้มีความต้องการน้ำสูงและกำลังอัดที่ต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องพัฒนาคุณภาพเถ้าถ่านเตาโดยวิธีการบดเพื่อให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง [5-6] สำหรับโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง มีปริมาณเถ้าถ่านเตาประมาณ 1,600 ตันต่อวัน ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมากแต่มีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากหรือไม่เลย ดังนั้นเพื่อนำเถ้าถ่านเตามาใช้ประโยชน์และเพิ่มมูลค่าให้กับเถ้าถ่านเตา งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจเกี่ยวกับผลกระทบจากการอัดตัวของอนุภาคและจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านเตาบดละเอียดที่มีขนาดต่างกันต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ โดยใช้ทรายบดละเอียดซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยที่มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าถ่านเตาช่วยในการหาค่ากำลังอัดทั้งสองส่วน ซึ่งกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมทรายบดละเอียดเกิดจากกำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมกับกำลังอัดจากการอัดตัวของอนุภาค ดังนั้นกำลังอัดจากค่าการอัดตัวโดยประมาณของอนุภาคสามารถหาได้จากกำลังอัดที่ต่างกันของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านเตาบดละเอียดที่มีความละเอียดต่างกัน ส่วนกำลังอัดมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าถ่านเตาบดละเอียด เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลาน ดังนั้นกำลังอัดจาก

ปฏิกิริยาปอซโซลานโดยประมาณคือกำลังอัดที่ต่างกันของมอร์ตาร์ผสมเถ้าถ่านเตาบดละเอียดกับมอร์ตาร์ผสมทรายบดละเอียดนั่นเอง

2. การเตรียมวัสดุและขั้นตอนการทดลอง

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทรายแม่น้ำที่ล้างจนสะอาดแล้วอบจนแห้งและนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 จากนั้นนำส่วนที่ค้างตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 100 ใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการหล่อมอร์ตาร์และใช้สำหรับเตรียมทรายบดละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับเถ้าถ่านเตาบด โดยเถ้าถ่านเตาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง ที่ใช้เตาเผาระบบฟลูเวอไรต์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

2.1 การเตรียมตัวอย่างเถ้าถ่านเตาบดละเอียด

เถ้าถ่านเตาที่ได้จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 โดยน้ำหนักเนื่องจากกระบวนการจัดทิ้ง ดังนั้นจึงต้องนำมาอบจนแห้งสนิทแล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดที่แตกต่างกัน 3 ขนาด คือ เถ้าถ่านเตาบดละเอียดขนาดใหญ่ (LB) ขนาดกลาง (MB) และขนาดเล็ก (SB) โดยเถ้าถ่านเตาบดละเอียดทั้งสามขนาดมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ให้อยู่ในช่วงร้อยละ 30-34, 15-20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับการกำหนดขนาดเถ้าถ่านเตาขนาดใหญ่สุดอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C 618 [1] คือมีปริมาณวัสดุที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

2.2 การเตรียมตัวอย่างทรายบดละเอียด

นำทรายแม่น้ำที่เตรียมเช่นเดียวกับที่ใช้เป็นมวลรวมละเอียดของมอร์ตาร์ไปบดให้มีความละเอียดต่างกัน 3 ขนาด คือ ทรายบดละเอียดขนาดใหญ่ (LS) ขนาดกลาง (MS) และขนาดเล็ก (SS) โดยทรายบดแต่ละขนาดจะบดให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าถ่านเตาบดที่มีความละเอียดเดียวกัน คือมีปริมาณทรายบดที่ค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 30-34, 15-20 และน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

2.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุประสาน

ทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ของปูนซีเมนต์ เถ้าถ่านเตาบดละเอียด และทรายบดละเอียด ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ ปริมาณอนุภาคค้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 และขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50})

2.4 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์

ในการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ใช้เถ้าถ่านเตาบดละเอียดและทรายบดละเอียดแต่ละขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ใน

อัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำหนดอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายขี้ที่ คือ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ควบคุมปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานของมอร์ตาร์มาตรฐานให้มีค่าการไหลเผื่ออยู่ในช่วงร้อยละ 105 ถึง 115 ส่วนมอร์ตาร์ที่เหลือใช้น้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) เท่ากับมอร์ตาร์มาตรฐาน เพื่อป้องกันกำลังอัดที่แตกต่างกันเนื่องจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่างกัน จากนั้นทำการหล่อมอร์ตาร์ขนาด $50 \times 50 \times 50$ มม. และถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำก้อนมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าแกวและทรายบดละเอียด พบว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มีปริมาณวัสดุข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 13.2 มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.4 ไมโครเมตร ส่วนเถ้าแกว SB, MB และ LB มีปริมาณข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 4.9, 18.3 และ 33.6 โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.3, 13.6 และ 19.8 ไมโครเมตรและมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.82, 2.79 และ 2.77 ตามลำดับ จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าเมื่อเถ้าแกวมีขนาดอนุภาคเล็กลงค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกวมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Sample	Retained on Sieve No. 325 (%)	Specific Gravity	Median Particle Size, d_{50} (micrometer)
Cement	13.2	3.14	19.4
SB	4.9	2.82	6.3
MB	18.3	2.79	13.6
LB	33.6	2.77	19.8
SS	4.7	2.66	6.7
MS	18.0	2.67	12.4
LS	33.7	2.66	20.5

ส่วนทรายบดละเอียด SS, MS และ LS มีปริมาณข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ร้อยละ 4.7, 18.0 และ 33.7 โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 6.7, 12.4 และ 20.5 ไมโครเมตรและมีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66, 2.67 และ 2.66 ตามลำดับ จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเถ้าแกวและทรายบดละเอียดที่ขนาดเดียวกันมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยและปริมาณการข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่าเถ้าแกวและทรายบดละเอียดแต่ละขนาดมี

อนุภาคเท่ากัน โดยเถ้าแกวและทรายบดละเอียดและทรายบดละเอียดขนาดใหญ่สุดและขนาดกลางมีขนาดประมาณ 3 และ 2 เท่าของเถ้าแกวและทรายบดละเอียดและทรายบดละเอียดขนาดเล็กสุด

3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกวและทรายบดละเอียดได้แสดงในตารางที่ 2 พบว่าเถ้าแกวและทรายบดละเอียดมีผลรวมออกไซด์ของซิลิกา อะลูมินา และ เหล็ก เกินกว่าร้อยละ 70 ขององค์ประกอบทั้งหมด มีออกไซด์ของกำมะถันน้อยกว่าร้อยละ 5 ของน้ำหนัก และมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) น้อยกว่าร้อยละ 6 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C 618 [1] สามารถจัดเถ้าแกวอยู่ในกลุ่มเถ้าแกวหินชนิด F ส่วนทรายบดละเอียดมีองค์ประกอบหลักคือออกไซด์ของซิลิกา โดยมีประมาณร้อยละ 92 ขององค์ประกอบทั้งหมด เนื่องจากทรายแม่น้ำมีความเป็นผลึกสูงในรูปของควอตซ์ นั่นคือทรายแม่น้ำบดละเอียดจึงเป็นวัสดุเฉื่อย [4,7]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	Bottom Ash (SB)	Ground River Sand (SS)
SiO ₂	46.02	92.86
Al ₂ O ₃	22.31	3.17
Fe ₂ O ₃	10.64	0.27
CaO	11.48	0.55
MgO	3.47	0.49
Na ₂ O	0.07	0.42
K ₂ O	3.47	0.32
SO ₃	1.52	0.55
LOI	2.72	0.67

3.3 กำลังอัดของมอร์ตาร์

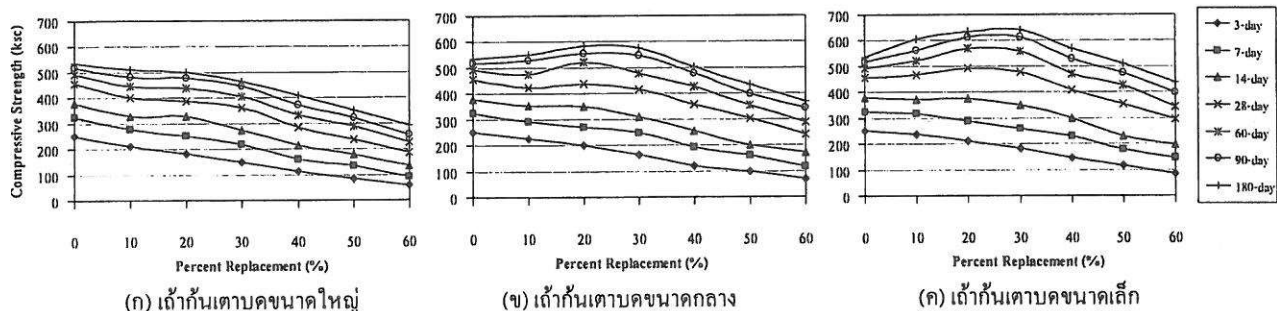
กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกวและทรายบดละเอียดและทรายบดละเอียดทั้ง 3 ขนาดได้แสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่ามอร์ตาร์มาตรฐานหรือมอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวมีกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน เท่ากับ 253, 324, 380, 454, 492, 518 และ 536 กก./ซม.² ตามลำดับ พิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ LGB20 ซึ่งใช้เถ้าแกวและทรายบดละเอียดขนาดใหญ่สุดที่อายุ 7 และ 28 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 78 และ 85 ของมอร์ตาร์มาตรฐานตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกวและทรายบดละเอียดที่มีปริมาณการข้างบนตะแกรงมาตรฐาน 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนักสามารถใช้เป็นวัสดุปอชโซลานได้ เนื่องจากมีกำลังอัดที่อายุ 7 หรือ 28 วัน สูงกว่าร้อยละ

ละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ผ่านตามข้อกำหนดของ ASTM C 618 [1] ส่วนมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาละเอียดขนาดกลางและเล็กมีกำลังอัดเกินกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุตั้งแต่ 3 วันขึ้นไปและมีแนวโน้มกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อเถ้าก้นเตามีอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความละเอียดของเถ้าก้นเตามีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์และร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตาละเอียด พบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาละเอียดในปริมาณที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับความละเอียดของเถ้าก้นเตา

บทความคือหากเถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดมากกว่าจะสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ในปริมาณที่สูงกว่า จากรูปที่ 1(ก) เห็นได้ว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าก้นเตาขนาดใหญ่มากที่สุดมีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานทุกอัตราการแทนที่และทุกอายุทดสอบ ส่วนรูปที่ 1(ข) และ (ค) แสดงให้เห็นตั้งแต่ที่อายุ 60 วันขึ้นไป เมื่อใช้เถ้าก้นเตาขนาดกลางและขนาดเล็กที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และ 30 ให้กำลังอัดสูงสุดในแต่ละกลุ่ม อีกทั้งสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน เนื่องจากเถ้าก้นเตาที่มีความละเอียดสูงกว่าสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่า [5-6]

ตารางที่ 3 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาละเอียด

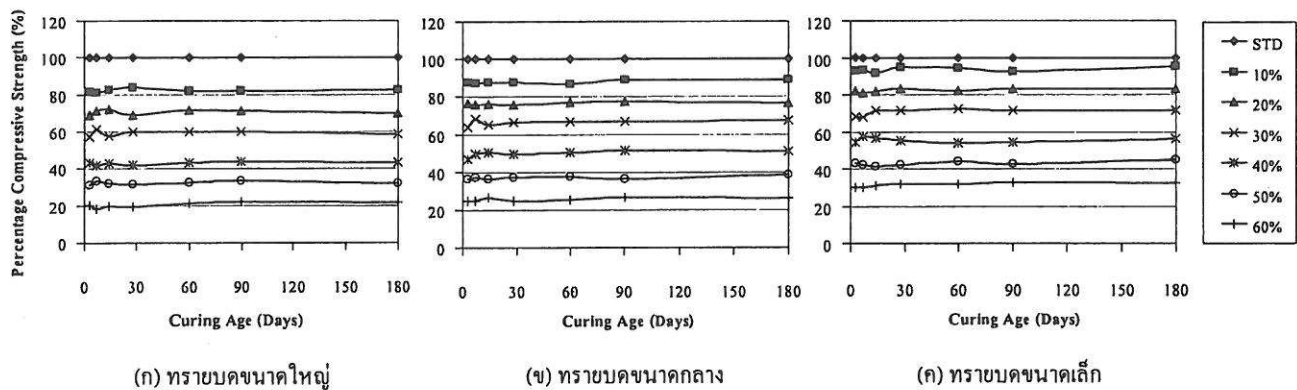
Sample	Compressive strength (ksc)-Percentage compressive strength (%)						
	3-day	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day	180-day
STD	253-(100)	324-(100)	380-(100)	454-(100)	492-(100)	518-(100)	536-(100)
LGB10	212-(84)	276-(85)	328-(86)	401-(88)	446-(91)	482-(93)	511-(95)
LGB20	182-(72)	252-(78)	328-(86)	387-(85)	438-(89)	477-(92)	501-(93)
LGB30	151-(60)	220-(68)	275-(72)	362-(80)	405-(82)	446-(86)	463-(86)
LGB40	113-(45)	161-(50)	215-(57)	284-(63)	333-(68)	372-(72)	408-(76)
LGB50	83-(33)	134-(42)	178-(47)	238-(52)	287-(58)	320-(62)	351-(65)
LGB60	58-(23)	92-(28)	135-(36)	185-(41)	227-(46)	257-(50)	290-(54)
MGB10	226-(89)	292-(90)	353-(93)	424-(93)	473-(96)	528-(102)	552-(103)
MGB20	199-(79)	268-(83)	349-(92)	439-(97)	520-(106)	555-(107)	584-(109)
MGB30	163-(64)	247-(76)	311-(82)	415-(91)	478-(97)	547-(106)	576-(107)
MGB40	122-(48)	194-(60)	255-(67)	358-(79)	426-(87)	478-(92)	504-(94)
MGB50	99-(39)	162-(50)	202-(53)	301-(66)	353-(72)	398-(77)	434-(81)
MGB60	68-(27)	118-(36)	171-(45)	242-(53)	287-(58)	342-(66)	370-(69)
SGB10	236-(93)	316-(98)	373-(98)	465-(102)	521-(106)	560-(108)	605-(113)
SGB20	213-(84)	287-(89)	377-(99)	494-(109)	569-(116)	613-(118)	636-(119)
SGB30	181-(71)	258-(80)	351-(92)	478-(105)	559-(114)	612-(118)	642-(120)
SGB40	145-(57)	228-(70)	298-(78)	407-(90)	469-(95)	527-(102)	567-(106)
SGB50	115-(45)	178-(55)	229-(60)	354-(78)	427-(87)	473-(91)	512-(95)
SGB60	83-(33)	145-(45)	197-(52)	294-(65)	343-(70)	398-(77)	438-(82)



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์และร้อยละการแทนที่ของเถ้าก้นเตาละเอียด

ตารางที่ 4 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมทรายบดละเอียด

Sample	Compressive strength (ksc)-Percentage compressive strength (%)						
	3-day	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day	180-day
STD	253-(100)	324-(100)	380-(100)	454-(100)	492-(100)	518-(100)	536-(100)
LGS10	207-(82)	263-(81)	313-(82)	380-(84)	404-(82)	424-(82)	443-(83)
LGS20	175-(69)	231-(71)	275-(72)	314-(69)	353-(72)	368-(71)	376-(70)
LGS30	145-(57)	198-(61)	220-(58)	273-(60)	295-(60)	310-(60)	315-(59)
LGS40	110-(43)	136-(42)	163-(43)	191-(42)	214-(43)	226-(44)	233-(43)
LGS50	79-(31)	108-(33)	121-(32)	143-(31)	161-(33)	173-(33)	171-(32)
LGS60	52-(20)	61-(19)	75-(20)	88-(19)	105-(21)	114-(22)	115-(21)
MGS10	222-(88)	283-(87)	334-(88)	398-(88)	427-(87)	461-(89)	478-(89)
MGS20	194-(77)	245-(76)	290-(76)	343-(76)	378-(77)	402-(78)	411-(77)
MGS30	161-(64)	221-(68)	247-(65)	301-(66)	328-(67)	347-(67)	360-(67)
MGS40	119-(47)	161-(50)	191-(50)	225-(50)	249-(51)	265-(51)	274-(51)
MGS50	92-(36)	121-(37)	138-(36)	168-(37)	185-(38)	189-(37)	207-(39)
MGS60	63-(25)	80-(25)	101-(27)	112-(25)	124-(25)	138-(27)	141-(26)
SGS10	235-(93)	302-(93)	349-(92)	430-(95)	465-(95)	480-(93)	511-(95)
SGS20	208-(82)	262-(81)	311-(82)	378-(83)	405-(82)	430-(83)	445-(83)
SGS30	173-(68)	220-(68)	271-(71)	325-(72)	355-(72)	370-(71)	383-(71)
SGS40	138-(55)	186-(57)	216-(57)	251-(55)	265-(54)	281-(54)	302-(56)
SGS50	110-(43)	137-(42)	157-(41)	192-(42)	217-(44)	222-(43)	242-(45)
SGS60	76-(30)	98-(30)	118-(31)	145-(32)	158-(32)	169-(33)	173-(32)



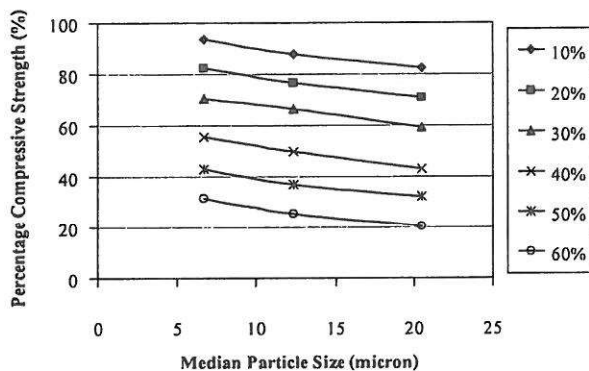
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมทรายบดละเอียดและอายุทดสอบ

3.4 กำลังอัดของมอร์ต้าร์เนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาค

กำลังอัดของมอร์ต้าร์เนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาคสามารถหาได้จากกำลังอัดที่ต่างกันของมอร์ต้าร์ที่ผสมทรายบดละเอียดขนาดต่างกันและแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนเดียวกัน และจากรูปที่ 2

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมทรายบดและอายุทดสอบเห็นว่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ผสมทรายบดมีลักษณะเป็นเส้นตรงขนานกับแกนอายุทดสอบแสดงว่าร้อยละกำลังอัดไม่ขึ้นกับอายุทดสอบ และจากตารางที่ 4 ซึ่งแสดงค่ากำลังอัดและร้อยละ

กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบดละเอียดทั้ง 3 ขนาด เมื่อนำค่าร้อยละ กำลังอัดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบดและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของทรายบด จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 3 เห็นได้ว่ากำลังอัดที่ต่างกันเนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาคสำหรับทรายบดละเอียดหรือวัสดุเล็บบางชนิดใหญ่ (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20.5 ไมโครเมตร) ขนาดกลาง (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 12.4 ไมโครเมตร) และขนาดเล็ก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.7 ไมโครเมตร) มีค่าประมาณร้อยละ 5 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานสำหรับแต่ละช่วงขนาด และการแทนปูนซีเมนต์ในช่วงอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 60 กำลังอัดของมอร์ตาร์จะลดลงในสัดส่วนประมาณร้อยละ 10-14 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐานทุกๆ การแทนที่ที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 10 โดยขึ้นอยู่กับขนาดวัสดุเป็นสำคัญ กล่าวคือหากวัสดุมีขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าเมื่อใช้อัตราส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับกำลังอัดที่ลดลงจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุที่มีขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่า เนื่องจากกำลังอัดเพิ่มขึ้นจากการอัดตัวของอนุภาค [4]



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมทรายบดและขนาดอนุภาคเฉลี่ย

3.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

ตารางที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งสามารถหาได้จากผลต่างของร้อยละกำลังอัดระหว่างมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและมอร์ตาร์ผสมทรายบดละเอียดที่ขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ปริมาณการแทนที่เท่ากันและอายุทดสอบเดียวกัน จากตารางพบว่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ MGB10, MGB20, MGB30, MGB40, MGB50 และ MGB60 ที่อายุ 3 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.6, 2.0, 0.8, 1.2, 2.8 และ 2.1 ของมอร์ตาร์มาตรฐานตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าที่อายุช่วงต้น (อายุ 3 วัน) ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดให้กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงเล็กน้อยโดยกำลังอัดส่วนใหญ่ของมอร์ตาร์ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและบางส่วนจากผลการอัดตัวของอนุภาค [4,7] อย่างไรก็ตาม ที่อายุ 180 วัน มอร์ตาร์ดังกล่าวสามารถ

พัฒนากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 13.8, 32.3, 40.3, 42.9, 42.4, 42.7 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน แสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าก้นเตาบดละเอียดในมอร์ตาร์ด้วยปริมาณที่สูงขึ้นสามารถให้กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานสูงขึ้นด้วยเช่นกัน [6]

เมื่อทดสอบเถ้าก้นเตาให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงพบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดอนุภาคที่เล็กกว่ามีการพัฒนา กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้รวดเร็วและสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าที่ทุกอายุการทดสอบ ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ LGB40 และ SGB40 ที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วันเท่ากับร้อยละ 1.2, 7.6, 13.7, 20.5, 24.3, 28.2, 32.6 และ 2.8, 13.0, 21.6, 34.4, 41.5, 47.5, 49.4 ของมอร์ตาร์มาตรฐานตามลำดับ ผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่ามีพื้นที่ผิวมากกว่าเป็นผลให้สามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ได้รวดเร็วและมากกว่าวัสดุปอซโซลานขนาดใหญ่กว่าส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่า [8-12] โดยสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดและอายุทดสอบ พบว่าเมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้นกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยเมื่อเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 19.8 ไมโครเมตร กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่อายุ 180 วันมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 33 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน และมีค่าประมาณร้อยละ 42 และ 50 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน เมื่อเถ้าก้นเตาบดละเอียดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 13.6 และ 6.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ

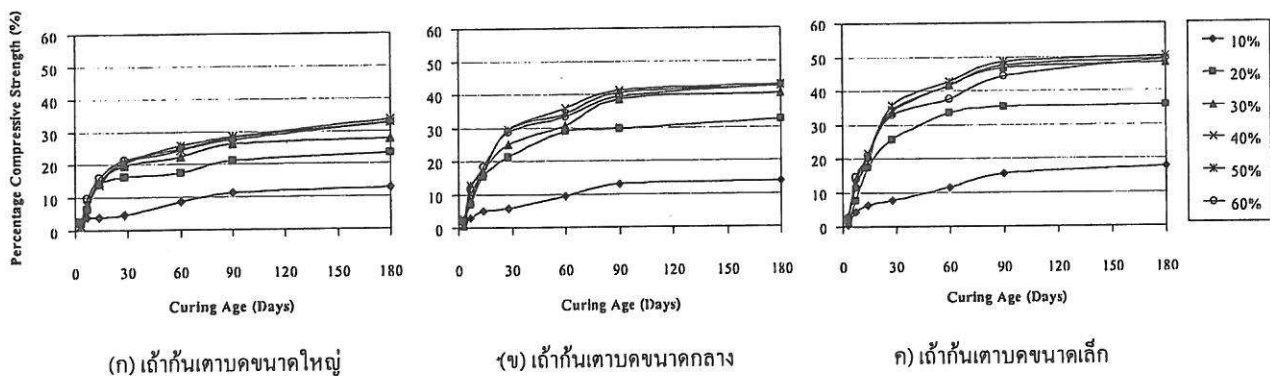
พิจารณาการผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน การเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งอายุช่วงต้นและช่วงปลาย ตัวอย่างเช่น มอร์ตาร์ SGB40, SGB50 และ SGB60 ที่อายุ 3 และ 180 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.8, 2.1, 2.8 และ 49.4, 50.3, 49.4 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณไม่เพียงพอในการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน เมื่อเถ้าก้นเตาบดมีปริมาณที่สูงกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังนั้นเห็นได้ว่าการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสานจะไม่สามารถเพิ่มกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้ อีกทั้งกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดยังลดลง

4. สรุปผลการทดลอง

1. กำลังอัดที่ต่างกันเนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาคสำหรับวัสดุขนาดใหญ่ (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20.5 ไมโครเมตร) ขนาดกลาง (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 12.4 ไมโครเมตร) และขนาดเล็ก (ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 6.7 ไมโครเมตร) มีค่าประมาณร้อยละ 5 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน

ตารางที่ 5 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียด

Sample	Compressive strength (ksc)-Percentage compressive strength (%) of bottom ash mortar due to pozzolanic reaction						
	3-day	7-day	14-day	28-day	60-day	90-day	180-day
LGB10	5-(2.0)	13-(4.0)	15-(3.9)	21-(4.6)	42-(8.5)	58-(11.2)	68-(12.7)
LGB20	7-(2.8)	21-(6.5)	53-(14.1)	73-(16.1)	85-(17.3)	109-(21.1)	125-(23.3)
LGB30	6-(2.4)	22-(6.8)	55-(14.5)	89-(19.6)	110-(22.3)	136-(26.3)	148-(27.6)
LGB40	3-(1.2)	24-(7.6)	52-(13.7)	93-(20.5)	119-(24.3)	146-(28.2)	175-(32.6)
LGB50	4-(1.6)	26-(8.2)	57-(14.9)	95-(20.9)	127-(25.7)	147-(28.4)	180-(33.6)
LGB60	6-(2.3)	31-(9.7)	61-(15.9)	97-(21.3)	122-(24.8)	142-(27.5)	175-(32.6)
MGB10	4-(1.6)	9-(2.8)	19-(5.0)	26-(5.7)	46-(9.4)	67-(12.9)	74-(13.8)
MGB20	5-(2.0)	23-(7.1)	59-(15.5)	96-(21.1)	142-(28.9)	153-(29.5)	173-(32.3)
MGB30	2-(0.8)	26-(8.0)	64-(16.8)	114-(25.1)	150-(30.5)	200-(38.6)	216-(40.3)
MGB40	3-(1.2)	33-(10.2)	64-(16.8)	133-(29.3)	177-(35.9)	213-(41.1)	230-(42.9)
MGB50	7-(2.8)	41-(12.7)	64-(16.8)	133-(29.3)	168-(34.2)	209-(40.4)	227-(42.4)
MGB60	5-(2.1)	38-(11.9)	70-(18.3)	130-(28.7)	163-(33.2)	204-(39.4)	229-(42.7)
SGB10	1-(0.4)	14-(4.3)	24-(6.3)	35-(7.7)	56-(11.4)	80-(15.4)	94-(17.5)
SGB20	5-(2.0)	25-(7.7)	66-(17.4)	116-(25.5)	164-(33.4)	183-(35.3)	191-(35.6)
SGB30	8-(3.2)	38-(11.7)	80-(20.9)	153-(33.7)	204-(41.5)	242-(46.7)	259-(48.3)
SGB40	7-(2.8)	42-(13.0)	82-(21.6)	156-(34.4)	204-(41.5)	246-(47.5)	265-(49.4)
SGB50	5-(2.1)	41-(12.7)	72-(18.9)	162-(35.7)	210-(42.7)	251-(48.5)	270-(50.3)
SGB60	7-(2.8)	47-(14.5)	79-(20.8)	149-(32.8)	185-(37.6)	229-(44.2)	265-(49.4)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ต้าร์ผสมเถ้าก้นเตาบดละเอียดและอายุทดสอบ

สำหรับแต่ละช่วงขนาดอนุภาค และการแทนปูนซีเมนต์ในช่วงอัตราส่วน ร้อยละ 10 ถึง 60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน กำลังอัดของมอร์ต้าร์จะลดลง ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 10-14 ของกำลังอัดมอร์ต้าร์มาตรฐานทุกการ

แทนที่ร้อยละ 10 โดยขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุเป็นสำคัญ โดยขนาด ยิ่งใหญ่อัตราการผลิตจะมีค่าเพิ่มขึ้น

2. กำลังอัดของมอร์ตาร์เนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น และจะมีค่าคงที่เมื่อแทนที่ในปริมาณร้อยละ 40-60 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

3. กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่อายุ 180 วันของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกวบละเอียดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 19.8, 13.6 และ 6.3 ไมโครเมตรมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 33, 42 และ 50 ของกำลังอัดมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และกองส่งเสริมการวิจัย มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] American Society for Testing and Materials, 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 1997, pp. 298-296.
- [2] A. Goldman and A. Bentur, "The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength", Cement and Concrete Research, Vol. 23, 1993, pp. 962-972.
- [3] G.C. Isaia, A.L.G. Gastaldini and R. Morases, "Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High Performance Concrete", Cement & Concrete Composites, Vol. 25, 2003, pp. 69-76.
- [4] J. Tangpagasit, R. Cheerarot, C. Jaturapitakkul and K. Kiattikomol, "Packing Effect and Pozzolanic Reaction of Fly Ash in Mortar", Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 1145-1151.
- [5] เรืองรุชดี ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล "การใช้เถ้าแกวบละเอียดเป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต". วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา ฉบับที่ 2 ปีที่ 14 พ.ศ. 2546 หน้า 1-7
- [6] C. Jaturapitakkul and R. Cheerarot, "Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 15, No. 1, 2003, pp. 48-53.
- [7] R. Cheerarot, J. Tangpagasit and C. Jaturapitakkul, "Compressive Strength of Mortars due to Pozzolanic Reaction of Fly Ash", The Eighth International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, Las Vegas, Nevada, 2004, pp. 412-425.
- [8] K. Kiattikomol, C. Jaturapitakkul, S. Songpiryakij and S. Chutubtim, "Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness

from Various Sources as Pozzolanic Materials", Cement & Concrete Composites, Vol. 23, 2001, pp. 335-343.

[9] J. Paya, J. Monzo, M.V. Borrachero, E. Peris and F. Amahjour, "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, 2000, pp. 543-551.

[10] J. Paya, J. Monzo, M.V. Borrachero, E. Peris and E. Gonzalez Lopez, "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, 1996, pp. 225-235.

[11] J. Paya, J. Monzo, M.V. Borrachero, E. Peris and E. Gonzalez Lopez, "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, 1997, pp. 1365-1377.

[12] R.V. Ranganath, R.C. Sharma and S. Krishnamoorthy, "Influence of Fineness and Silica Content of Fly Ashes on Their Strength Development with Respect to Age", The Fifth International Conference of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, Wisconsin, 1995, pp. 355-366.