การศึกษาผลกระทบของการอัดตัวของอนุภาคต่อค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด

จตุพล ตั้งปกาศิต [1] แสวง ทรงหมู่ [2] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล [3] และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล [3]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

บทคัดย่อ

มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์สำหรับการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานล้วน และกำหนดให้วัสดุปอซโซลานมีปริมาณน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 การระบุปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 และค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วัน ยังไม่เพียงพอที่จะแสดงถึงความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดและกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด ซึ่งมีความเป็นผลึกสูงและไม่เป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีความละเอียด 3 ขนาด คือมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5±2, 13.5±2 (ปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ของปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 13.5) และ 34±2

ผลการทดลองพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดที่มีความละเอียดเท่ากับปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าลดลง โดยอัตราการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีค่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่ากับร้อยละ 87, 81, 72 และ 57 ของมอร์ต้าร์ควบคุม ตามลำดับ สำหรับกำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของทรายแม่น้ำบด หากทรายแม่น้ำบดมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์จึงทำให้กำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวต่ำลง การใช้ทรายแม่น้ำบดซึ่งมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 34 และร้อยละ 5.8 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานพบว่ากำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคแตกต่างกันร้อยละ 6 และมีแนวโน้มของความแตกต่างของกำลังเพิ่มขึ้นตามความแตกต่างของความละเอียดของวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่า ข้อกำหนดของ ASTM C 618 ที่กำหนดให้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 ต้องมีดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน อาจไม่เหมาะสมเพราะทรายแม่น้ำบดละเอียดซึ่งไม่ได้เป็นวัสดุปอซโซลาน แต่เมื่อมีความละเอียดสูงจะสามารถผ่านข้อกำหนดได้ โดยเฉพาะการใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 33.8 มีดัชนีกำลังที่สูงกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วัน

---

[1] *นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

[2] *นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

[3] *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา*

A Study of Packing Effect on Strength Activity Index of Mortar as Specified by ASTM C 618 by Using Ground River Sand

Jatuphon Tangpagasit [1] Sawang Songmue [2] Chai Jaturapitakkul [3] and Kraiwood Kiattikomol [3]

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

Abstract

ASTM C 618 specifies that the strength activity index of mortar containing a pozzolanic material used to replace Portland cement shall be higher than 75% of control cement mortar at 7 or 28 days. Additionally, it defines that the percentage of particle size of a pozzolanic material retained on a sieve No. 325 should not be higher than 34%. The values of particle retained on a sieve No. 325 and the strength activity index at 7 or 28 days may not sufficient to specify a good quality of pozzolan. The objective of this research is to investigate the effect of fineness and replacement level of ground river sand, which having high crystalline and non pozzolan, on compressive strength. Portland cement type I was replaced by ground river sand at 10, 20, 30, and 40% by weight of cementitious materials. The ground river sand used in this study was ground into 3 different sizes as retained on a sieve No. 325 of 5±2%, 13.5±2% (the retained on a sieve No. 325 of Portland cement was 13.5%) and 34±2%.

The results showed that the compressive strength due to hydration reaction of ground river sand mortar having the same particle size as that of Portland cement was decreased when the replacement of ground river sand was increased. The percentages of compressive strength of ground river sand mortars were 87, 81, 72, and 57%, respectively as compared to the control mortar when the replacements of ground river sand of 10, 20, 30, and 40% were used. In addition, the compressive strength due to packing effect of smaller particle size of ground river sand was higher than the coaser one. The use of 20% of ground river sand with particles retained on a sieve No. 325 of 34% and 5.8% to replace Portland cement produced a difference in compressive strength due to packing effect of 6% of the control strength. The difference tended to be higher as the higher difference of fineness of ground river sand. The results suggested that ASTM C 618 specification is not practically suitable for the high fineness material since the strength activity index of mortar containing ground river sand (has high crystalline phase) with particle retained on a sieve No. 325 of 33.8% and used to replace Portland cement of 20% was higher than 75% at 7 and 28 days.

---

[1] *Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering.*
[2] *Graduate Student, Department of Civil Engineering.*
[3] *Associate Professor, Department of Civil Engineering.*

1. บทนำ

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอรต์แลนด์บางส่วนเพื่อผลิตคอนกรีตในประเทศไทยมีอยู่ 2 กลุ่มหลักๆ คือ เถ้าถ่านหินและเถ้าชีวมวล โดยบางแหล่งสามารถนำไปใช้งานได้ ในขณะที่บางแหล่งไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากมีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าข้อกำหนดใน ASTM C 618 [1] ซึ่งกำหนดค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุปอซโซลานร้อยละ 20 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน มีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์ควบคุม และกำหนดให้ขนาดของวัสดุปอซโซลานมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 เมื่อใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485

เนื่องจากตามมาตรฐานมีการกำหนดความละเอียดของวัสดุปอซโซลานสำหรับการใช้งาน ทำให้มีการศึกษาวิจัยเพื่อที่จะนำวัสดุวัสดุปอซโซลานบางส่วนที่มีขนาดใหญ่กว่าข้อกำหนดมาใช้งานโดยการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดวัสดุให้มีขนาดเล็กตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ซึ่งอนุภาคขนาดเล็กของวัสดุมีผลทำให้มอร์ต้าร์หรือคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้นเป็นผลให้กำลังอัดสูงขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี [2] ซึ่งเกิดจากการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของอนุภาคที่มีขนาดเล็กและแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างปูนซีเมนต์และทรายหรือหิน กำลังอัดส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นกำลังอัดที่เกิดขึ้นนอกเหนือจากกำลังอัดที่เป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่ได้จากปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับน้ำ

จากผลงานวิจัยของเรืองรุชดิ์และชัย [3] ได้ทำการศึกษาเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน พบว่าการนำมาใช้โดยไม่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพจะมีกำลังอัดต่ำ แต่หลังจากผ่านการบดให้มีอนุภาคเล็กลงจะมีค่ากำลังอัดสูงขึ้น โดยมีค่ากำลังอัดมากกว่าข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 618 [1] ต่อมาได้มีการศึกษาถึงวัสดุปอซโซลานจากผลิตผลทางการเกษตร โดยวีรชาติและคณะ [4] ได้ทำการศึกษาความเป็นวัสดุปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมันในส่วนผสมมอร์ต้าร์ พบว่าเมื่อทำการบดให้มีความละเอียดมากขึ้นจะมีกำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งผลของงานวิจัยสอดคล้องกับการศึกษาของ Detwiler และ Mehta [5] และ Goldman และ Bentur [6] ที่ศึกษาถึงผลกระทบของอนุภาคขนาดเล็กต่อกำลังอัดโดยใช้คาร์บอนแบล็คซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาคเหมือนซิลิกาฟูม แต่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี และพบว่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจากการอัดตัวของอนุภาค โดยกำลังอัดที่อายุ 7 วัน เป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพ และเมื่ออายุ 28 วันกำลังอัดจะเกิดจากคุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับเถ้าถ่านหินที่มีอนุภาคขนาดเล็กโดย Isaia และคณะ [7] พบว่าการอัดตัวของอนุภาคมีผลต่อกำลังอัดมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน ต่อมา Ranganath และคณะ [8] พบว่าความละเอียดของวัสดุปอซโซลานจะมีผลต่อกำลังอัดในช่วงอายุต้นซึ่งเป็นผลของการอัดตัวของอนุภาค เรืองรุชดิ์และคณะ [2] พบว่าเมื่อทรายบดมีความละเอียดมากขึ้น ค่ากำลังอัดสูงขึ้นและสูงกว่าร้อยละ 75 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม และการใช้ทรายบดที่มีความละเอียดค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 มีค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 75 ที่การแทนที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักตามมาตรฐาน ASTM C 618 [1]

งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การนำวัสดุที่มีความละเอียดสูงหรือขนาดเล็กมากๆ มาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่ว่าจะเป็นวัสดุปอซโซลานหรือไม่ก็ตาม สามารถที่จะเป็นไปตามเงื่อนไขที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 618 [1] โดยไม่สามารถแยกได้ว่ากำลังอัดที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาปอซโซลาน หรือกำลังอัดที่เกิดขึ้นมาจากการอัดตัวของอนุภาค นอกจากนี้ การกำหนดน้ำหนักวัสดุปอซโซลานค้างบนตะแกรง 325 ไม่เกินร้อยละ 34 อาจไม่เพียงพอที่จะบอกว่าวัสดุปอซโซลานที่นำมาใช้มีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีหรือไม่ เพราะค่าดัชนีกำลังเพียงร้อยละ 75 มีค่าค่อนข้างต่ำและกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดมาจากวัสดุที่มีความละเอียดสูง โดยมีค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเพียงเล็กน้อย

ดังนั้นงานวิจัยนี้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของขนาดอนุภาค และผลกระทบจากร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยทรายแม่น้ำบดที่มีความละเอียดสูง ซึ่งในที่นี้ใช้ทรายแม่น้ำซึ่งเป็นวัสดุเฉื่อยหรือมีความเป็นผลึกสูง [9] เพื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการอัดตัวของอนุภาคของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีขนาดเล็กและขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคที่ต่างกันต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในการใช้ข้อกำหนดของค่าดัชนีกำลังตามมาตรฐาน ASTM C 618 เมื่อพิจารณาถึงความละเอียดของวัสดุ และอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ โดยการใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มวลรวมละเอียดเป็นทรายแม่น้ำร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100 และนำทรายแม่น้ำอีกส่วนหนึ่งมาบดให้ละเอียดเพื่อใช้เป็นวัสดุเฉื่อยในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยบดทรายแม่น้ำให้มีความละเอียด 3 ขนาด คือมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5±2, 13.5±2 (ปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 13.5) และ 34±2 สำหรับปริมาณของวัสดุปอซโซลานที่ยอมให้ค้างสูงสุดบนตะแกรงเบอร์ 325 ตาม ASTM C 618 [1] คือร้อยละ 34

3.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลองทั้งคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี ความถ่วงจำเพาะ และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์และทรายแม่น้ำบดละเอียด

3.3 อัตราส่วนผสมของมอร์ต้าร์

การหล่อตัวอย่างมอร์ต้าร์ ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดแต่ละขนาดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์บวกทรายแม่น้ำบดละเอียด) อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้คือค่าที่ทำให้ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์มีค่าเท่ากับการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ควบคุม โดยมอร์ต้าร์ควบคุมมีปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 ทำการหล่อมอร์ต้าร์ขนาด 5x5x5 ซม.^{3} และถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมอร์ต้าร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัวเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของมอร์ต้าร์ที่ผสมทรายแม่น้ำบดละเอียด ทั้ง 3 ขนาดซึ่งมีค่าการไหลแผ่คงที่เท่ากับค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ควบคุม (ค่าการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ควบคุมเท่ากับร้อยละ 13) เท่ากับร้อยละ 0.493 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจากมอร์ต้าร์ควบคุมประมาณร้อยละ 2

ตารางที่ 1 แสดงส่วนผสมของมอร์ต้าร์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการศึกษา สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยประกอบด้วย Control คือมอร์ต้าร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ส่วนทรายแม่น้ำบดละเอียดมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5.8, 12.6 และ 33.8 ใช้สัญลักษณ์คือ ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ หรือ S (Small), M (Medium) และ L (Large) ตามลำดับ และตัวเลข 10, 20, 30 และ 40 คือร้อยละการแทนที่ของทรายบดในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ตัวอย่างของการอ่านสัญลักษณ์เช่น S20 คือมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5.8 (หรือขนาดเล็ก) ในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของมอร์ต้าร์ควบคุมและมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยทรายแม่น้ำบดละเอียด

หมายเลข	สัญลักษณ์	ส่วนผสมโดยน้ำหนัก					W/B
		ซีเมนต์	S	M	L	ทราย	
1	Control	1	-	-	-	2.75	0.485
2	S10	0.9	0.1	-	-	2.75	0.493
3	S20	0.8	0.2	-	-	2.75	0.493
4	S30	0.7	0.3	-	-	2.75	0.493
5	S40	0.6	0.4	-	-	2.75	0.493
6	M10	0.9	-	0.1	-	2.75	0.493
7	M20	0.8	-	0.2	-	2.75	0.493
8	M30	0.7	-	0.3	-	2.75	0.493
9	M40	0.6	-	0.4	-	2.75	0.493
10	L10	0.9	-	-	0.1	2.75	0.493
11	L20	0.8	-	-	0.2	2.75	0.493
12	L30	0.7	-	-	0.3	2.75	0.493
13	L40	0.6	-	-	0.4	2.75	0.493

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์และทรายบดขนาดกลาง (M) มีขนาดใกล้เคียงกันมาก หรืออนุโลมว่ามีขนาดเท่ากันโดยมีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 13.5 และ 12.6 และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 12.1 และ 11.5 ไมครอน ตามลำดับ สำหรับทรายบดขนาดเล็ก (S) และขนาดใหญ่ (L) มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5.8 และ 33.8 และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d_{50}) เท่ากับ 8.1 และ 21.4 ไมครอน ตามลำดับ ในส่วนของความถ่วงจำเพาะของทรายบดละเอียดทั้ง 3 ขนาดพบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันโดยมีค่า 2.63 ถึง 2.64 แสดงว่าการบดไม่มีผลต่อความถ่วงจำเพาะของทรายเนื่องจากทรายที่ใช้ศึกษาเป็นวัสดุที่มีรูพรุนต่ำ

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และทรายบด

ประเภทของตัวอย่าง	น้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (%)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	ความถ่วงจำเพาะ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์	13.5	12.1	3.15
S	5.8	8.1	2.64
M	12.6	11.5	2.63
L	33.8	21.4	2.64

4.2 คุณสมบัติทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีแสดงในตารางที่ 3 พบว่าทรายแม่น้ำบดมีองค์ประกอบเคมีหลักคือ SiO_2 ซึ่งมีปริมาณถึงร้อยละ 93 แต่ไม่ได้เป็นวัสดุปอซโซลานเพราะงานวิจัยที่ผ่านมา [9] พบว่าทรายแม่น้ำบดเป็นวัสดุเฉื่อยมีความเป็นผลึกสูงจึงไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี ดังนั้นถึงแม้จะมี SiO_2 ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีหลักเพียงอย่างเดียว แต่ทรายแม่น้ำบดก็ไม่ได้เป็นวัสดุปอซโซลาน

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และทรายแม่น้ำบด

องค์ประกอบเคมี (%)	ปูนซีเมนต์	ทรายแม่น้ำบด (S)
SiO_2	20.90	93.00
Al_2O_3	4.76	3.32
Fe_2O_3	3.41	0.42
CaO	65.41	0.70
Na_2O	1.25	0.57
K_2O	0.24	0.47
SO_3	2.71	0.70
LOI	0.99	0.82

4.3 กำลังอัดของมอร์ต้าร์

ตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าลดลงตามอัตราส่วนการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของทรายแม่น้ำบดทั้ง 3 ขนาด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kiattikomol et al. [9] ที่พบว่า กำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลงตามสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นของปริมาณของวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุเฉื่อยเช่นกัน)

เมื่อพิจารณาค่าร้อยละกำลังอัดที่แสดงในรูปที่ 1 ถึง 3 สังเกตเห็นว่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์แต่ละชนิดที่แทนที่ด้วยทรายแม่น้ำบดมีแนวโน้มเกือบจะเป็นเส้นตรง แสดงว่ามีการพัฒนากำลังอัดที่คงที่เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม และอายุที่เพิ่มขึ้นของมอร์ต้าร์ไม่มีผลหรือมีผลน้อยมากต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละของกำลังอัดของมอร์ต้าร์ แสดงว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดละเอียดไม่มีหรือมีการพัฒนากำลังอัดจากปฏิกิริยาปอซโซลานน้อยมากเพราะกำลังอัดที่ได้มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่านั้น และร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดละเอียดที่อายุ 3, 7, 14 และ 28 วัน มีค่าเฉลี่ยตามตารางที่ 4

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดละเอียดร้อยละ 20 เห็นได้ว่าค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายบดทั้ง 3 ขนาดคือ มอร์ต้าร์ S20, M20 และ L20 มีกำลังอัดเท่ากับร้อยละ 83, 81 และ 77 ของมอร์ต้าร์ควบคุมตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดของ ASTM C 618 [1] นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดในปริมาณร้อยละที่เท่ากันแต่มีขนาดของความละเอียดแตกต่างกัน ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคแตกต่างกัน ส่งผลให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์มีค่าแตกต่างกัน นอกจากนี้การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดในปริมาณที่มากขึ้นทำให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์ลดลงมากขึ้น เพราะการแทนที่มากขึ้นย่อมทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลง ดังนั้นกำลังอัดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงน้อยลง ข้อมูลของเรืองรุชดิ์และคณะ [2] ที่ศึกษาถึงกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ด้วยวัสดุเฉื่อย พบว่ากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันลดลงร้อยละ 19.5 จากมอร์ต้าร์ควบคุม ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองครั้งนี้ที่มีค่าลดลงร้อยละ 17 ถึง 23 โดยขึ้นอยู่กับความละเอียดของทรายแม่น้ำบด

เมื่อพิจารณาถึงผลการทดสอบกำลังอัดในตารางที่ 4 ของตัวอย่าง M20 ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีปริมาณวัสดุค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 12.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ของปูนซีเมนต์ซึ่งเท่ากับร้อยละ 13.5 (อนุโลมว่ามีความละเอียดเท่ากัน) ดังนั้นค่าการอัดตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์และทราย M จึงถือว่ามีค่าเท่ากัน โดยมอร์ต้าร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อย ละ 20 (มีปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 80) มีกำลังอัดลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่หายไปประมาณร้อยละ 19 หรือมีค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่ากับร้อยละ 81 ของมอร์ต้าร์ควบคุม

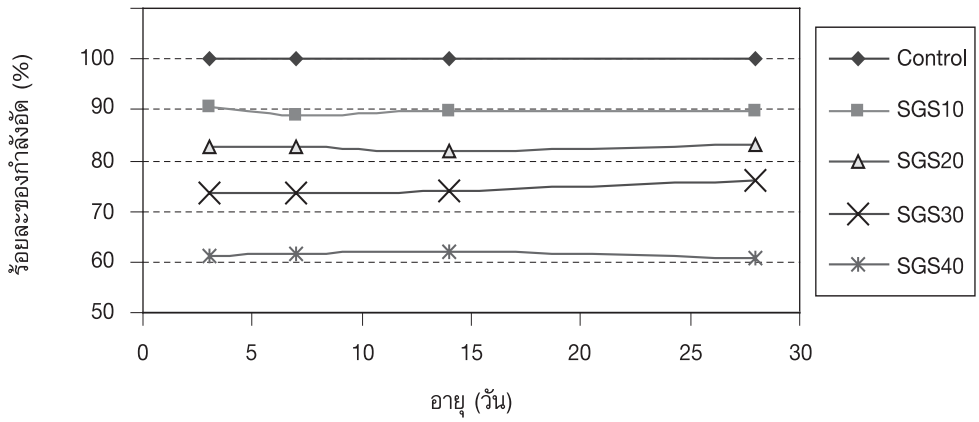
ค่าเฉลี่ยร้อยละของกำลังอัดในตารางที่ 4 พบว่ามอร์ต้าร์ S20 ใช้ทรายแม่น้ำบดขนาดเล็ก (S) แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 มีค่าร้อยละของกำลังอัดเท่ากับ 83 ซึ่งมากกว่ามอร์ต้าร์ M20 ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 81 ที่อัตราการแทนที่เท่ากัน หมายความว่ามอร์ต้าร์ทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณปูนซีเมนต์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันอยู่ร้อยละ 80 ของวัสดุประสาน ขณะที่มอร์ต้าร์ M20 ใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงหรือเท่ากับของปูนซีเมนต์ ดังนั้นจึงไม่มีการเปลี่ยนแปลงกำลังอัดเนื่องจากการอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็ก แต่เมื่อใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียด (ทราย S) ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคปูนซีเมนต์จึงมีค่าการอัดตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยมอร์ต้าร์ S20 มีกำลังอัดที่เกิดขึ้นจากการอัดตัวเพิ่มขึ้นเทียบกับมอร์ต้าร์ M20 เท่ากับร้อยละ 2 (83 - 81 = 2)

สำหรับค่าการอัดตัวของทรายแม่น้ำบดเมื่อมีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์และมีการแทนที่ปูนซีเมนต์เท่ากับร้อยละ 20 (มอร์ต้าร์ L20) มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่อายุ 3 ถึง 28 เท่ากับร้อยละ 77 เมื่อเทียบกับมอร์ต้าร์ M20 ที่มีกำลังอัดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 81 จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่าเท่ากับร้อยละ 4 (77 - 81 = -4) แสดงว่าเมื่ออนุภาคของวัสดุที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์มีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์จะทำให้ค่าการอัดตัวลดลง ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้ขนาดอนุภาคใหญ่สุดโดยมีปริมาณค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละประมาณ 34 ซึ่งเป็นปริมาณสูงที่สุดที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM C 618 [1] แต่ค่าร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ L20 ยังคงมีค่ามากกว่าร้อยละ 75 คือสูงกว่าค่าที่กำหนดในมาตรฐานร้อยละ 2

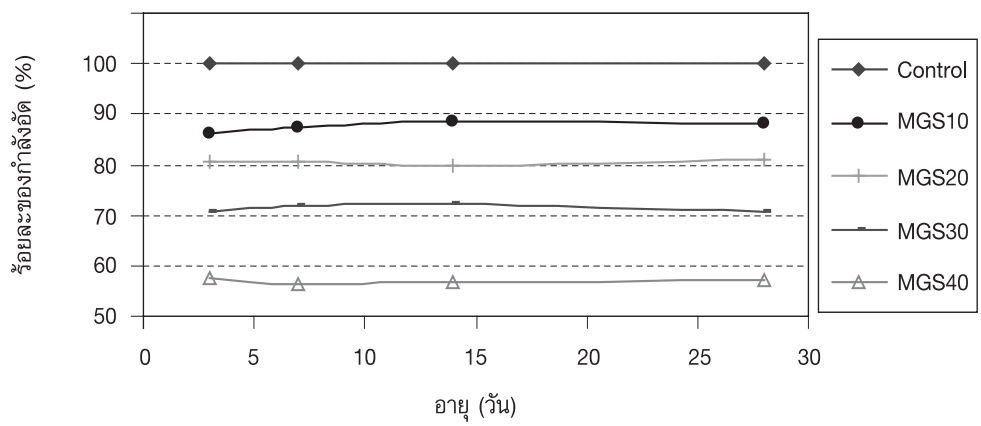
ตารางที่ 4 กำลังอัด ร้อยละกำลังอัด และค่าเฉลี่ยร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ต้าร์ควบคุม

หมายเลข	กำลังอัด (ksc) - *ร้อยละของกำลังอัด* (%)				เฉลี่ย (%)
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	
Control	366-***100***	460-***100***	519-***100***	565-***100***	**100**
S10	332-***91***	409-***89***	465-***90***	507-***90***	**90**
S20	303-***83***	380-***83***	424-***82***	470-***83***	**83**
S30	270-***74***	339-***74***	385-***74***	430-***76***	**75**
S40	223-***61***	283-***61***	323-***62***	344-***61***	**61**
M10	316-***86***	401-***87***	459-***88***	497-***88***	**87**
M20	296-***81***	371-***81***	415-***80***	457-***81***	**81**
M30	259-*71*	331-***72***	375-***72***	399-***71***	**72**
M40	210-***57***	260-***57***	294-***57***	324-***57***	**57**
L10	309-***84***	385-***84***	439-***84***	478-***85***	**85**
L20	280-***77***	353-***77***	396-***76***	430-***76***	**77**
L30	249-***68***	308-***67***	358-***69***	388-***69***	**68**
L40	192-***52***	253-***55***	292-***56***	307-***54***	**54**

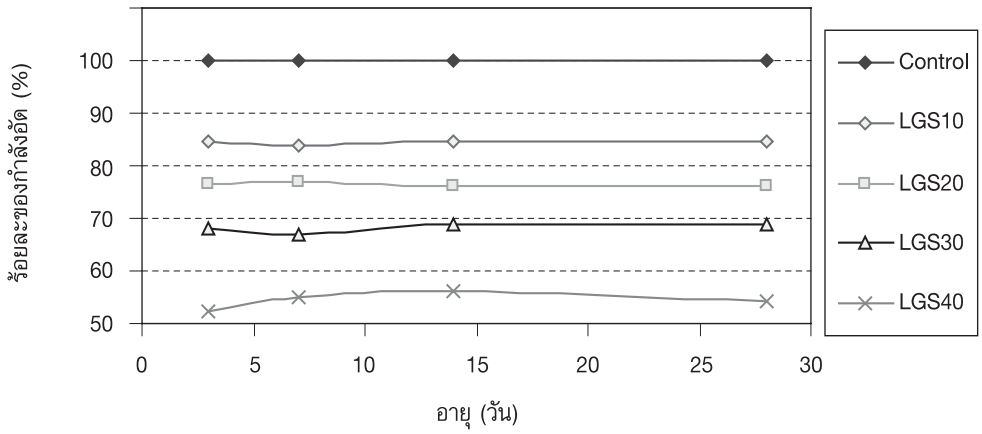
ผลการทดสอบข้างต้นแสดงให้เห็นว่าทรายแม่น้ำบดละเอียดซึ่งมีความเป็นผลึกสูง แต่เมื่อมีความละเอียดของอนุภาคค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 34 สามารถผ่านข้อกำหนดด้านกำลังอัดได้ แม้ว่าทรายดังกล่าว จะไม่ทำปฏิกิริยาปอซโซลานเพื่อให้กำลังอัดต่อมอร์ต้าร์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากการอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็กของมอร์ต้าร์ S20 ที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับร้อยละ 83 ของมอร์ต้าร์ควบคุมซึ่งมากกว่าข้อกำหนดใน ASTM C 618 [1] ถึงร้อยละ 8 ทำให้เห็นว่าในกรณีที่มีการนำวัสดุปอซโซลานที่มีขนาดค้างบนตะแกรง 325 ร้อยละ 5.8 มาใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ ควรจะมีค่าดัชนีกำลังมากกว่าร้อยละ 83 ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการพิจารณาถึงคุณสมบัติความเป็นวัสดุปอซโซลานโดยหาน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 และค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน นั้นไม่เพียงพอที่จะบอกได้ว่าวัสดุที่ทำการทดสอบมีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีได้



รูปที่ 1 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5±2 แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 3 ถึง 28 วัน



รูปที่ 2 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 13.5±2 แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 3 ถึง 28 วัน



รูปที่ 3 ร้อยละของกำลังอัดมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 34±2 แทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุ 3 ถึง 28 วัน

ตารางที่ 5 แสดงค่าร้อยละกำลังอัดที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและร้อยละกำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน จากผลการคำนวณพบว่าค่ากำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของทรายแม่น้ำบดที่ใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ โดยทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคขนาดเล็กหรือมีความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์จะมีค่าการอัดตัวที่สูงขึ้น ขณะที่ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปูนซีเมนต์จะมีค่าการอัดตัวของอนุภาคน้อยลงเมื่อเทียบกับอนุภาคของปูนซีเมนต์

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยของร้อยละกำลังอัด ร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และร้อยละกำลังอัดจากการอัดตัวของอนุภาค

หมายเลข	ค่าเฉลี่ยของร้อยละกำลังอัด (%)	ร้อยละกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (%)	ร้อยละกำลังอัดจากการอัดตัวของอนุภาค (%)
Control	100	100	0
S10	90	87	3
S20	83	81	2
S30	75	72	3
S40	61	57	4
M10	87	87	0
M20	81	81	0
M30	72	72	0
M40	57	57	0
L10	85	87	-2
L20	77	81	-4
L30	68	72	-4
L40	54	57	-3

กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 (มอร์ต้าร์ S10) ซึ่งใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดร้อยละ 90 ซึ่งมากกว่ามอร์ต้าร์ M10 ที่มีค่าร้อยละ 87 โดยเป็นกำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากการอัดตัวของอนุภาคเท่ากับร้อยละ 3 ส่วนมอร์ต้าร์ L10 ซึ่งใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคใหญ่กว่าขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์มีค่ากำลังอัดร้อยละ 85 ซึ่งลดลงเนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้ค่าการอัดตัวลดลง (เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า) เท่ากับร้อยละ 2 ส่วนมอร์ต้าร์ M10 ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับขนาดอนุภาคของปูนซีเมนต์ จึงถือว่าค่าการอัดตัวของอนุภาคไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคขนาดเล็กสามารถให้กำลังอัดของมอร์ต้าร์จากการอัดตัวของอนุภาคมากกว่ามอร์ต้าร์ที่แทนที่ด้วยทรายแม่น้ำบดที่มีอนุภาคใหญ่ และยังพบว่าผลของการอัดตัวของอนุภาคไม่ขึ้นกับอายุของมอร์ต้าร์เพราะมีค่าค่อนข้างคงที่ที่อายุ 3 ถึง 28 วัน

สำหรับการแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 30 ด้วยทรายแม่น้ำบด จะมีผลต่างของร้อยละกำลังอัดระหว่างมอร์ต้าร์ S30 และ มอร์ต้าร์ M30 เท่ากับ 3 (75 - 72 = 3) ส่วนมอร์ต้าร์ L30 ซึ่งมีร้อยละกำลังอัดเท่ากับ 68 มีค่าน้อยกว่ามอร์ต้าร์ M30 เท่ากับร้อยละ 4 (68 - 72 = -4) แนวโน้มของค่าการอัดตัวมีทิศทางเดียวกันกับที่การแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 กล่าวคืออนุภาคขนาดเล็กจะให้ค่าการอัดตัวมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาถึงการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายแม่น้ำบดร้อยละ 40 ก็ยังคงมีผลไปในทิศทางเดียวกัน คือ อนุภาคขนาดเล็กจะให้ค่าการอัดตัวที่มากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และเมื่อทำการเปรียบเทียบถึงความแตกต่างของค่าการอัดตัวของอนุภาคเทียบกับร้อยละการแทนที่ของทรายแม่น้ำบดแต่ละขนาดพบว่าทรายแม่น้ำบดในแต่ละขนาดมีค่าการอัดตัวของอนุภาคแตกต่างกันน้อย หรือ ร้อยละการแทนที่ของทรายแม่น้ำบดมีผลต่อค่าการอัดตัวน้อยมากเมื่อเทียบกับผลของขนาดอนุภาคของทรายแม่น้ำบด

เมื่อเปลี่ยนใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 34 เป็นทรายแม่น้ำบดละเอียดที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5.8 พบว่ามอร์ต้าร์มีค่าการอัดตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้น โดยคำนวณจากผลต่างร้อยละกำลังอัดของมอร์ต้าร์ S20 และ มอร์ต้าร์ L20 ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 6 (83 - 77 = 6) และเมื่อพิจารณาถึงการแทนที่ของทรายแม่น้ำบดในอัตราร้อยละ 30 หรือ 40 พบว่ามีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของค่าการอัดตัวตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้นของอนุภาคของวัสดุที่ใช้แทนที่ ซึ่งอนุภาคของวัสดุที่แทนที่ในปูนซีเมนต์มีผลต่อกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ถึงแม้ว่าวัสดุดังกล่าว (ทรายแม่น้ำบด) จะไม่ใช่วัสดุปอซโซลาน แต่สามารถให้ค่ากำลังอัดที่มากกว่าข้อกำหนดได้ (มากกว่าร้อยละ 75) เนื่องจากผลการอัดตัวของอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ ดังนั้นการกำหนดดัชนีกำลังร้อยละ 75 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน และกำหนดความละเอียดของวัสดุปอซโซลานค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ที่ไม่เกินร้อยละ 34 ใน ASTM C 618 จึงอาจไม่เหมาะสมในการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุปอซโซลานเพราะการใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดที่ไม่เป็นวัสดุปอซโซลาน และมีน้ำหนักค้างบนตะแกรง 325 ร้อยละ 34 สามารถผ่านข้อกำหนดเรื่องดัชนีกำลังได้ ด้วยเหตุนี้การพิจารณาความเป็นวัสดุปอซโซลานจะต้องคำนึงถึงความไม่เป็นผลึกของอนุภาค และค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานต้องมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้นเพื่อแสดงให้เห็นว่าวัสดุปอซโซลานดังกล่าวมีการทำปฏิกิริยากับด่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์และเพิ่มกำลังให้กับมอร์ต้าร์

5. สรุปผลการทดสอบ

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยทรายแม่น้ำบดที่มีขนาดอนุภาคเท่ากับปูนซีเมนต์จะทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าลดลง และมีค่าลดลงมากขึ้นตามปริมาณการแทนที่ทรายบดที่มากขึ้น โดยที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีกำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเท่ากับร้อยละ 87, 81, 72 และ 57 ตามลำดับ

2. กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เกิดขึ้นจากค่าการอัดตัวของอนุภาคของทรายบดละเอียดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความละเอียดที่มากขึ้นและมีค่าค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้ยังไม่ขึ้นกับอายุของมอร์ต้าร์

3. กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากค่าการอัดตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้นร้อยละ 6 เมื่อเปลี่ยนความละเอียดของทรายบดจากที่มีน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 34 เป็นค้างบนตะแกรงร้อยละ 5.8 เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

4. การพิจารณาความเป็นวัสดุปอซโซลานต้องพิจารณาความละเอียดของวัสดุจากค่าการอัดตัวของอนุภาคและอัตราการพัฒนากำลังของมอร์ต้าร์ โดยสังเกตจากร้อยละของกำลังอัดหรือค่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วันควรมีค่ามากกว่าที่อายุ 7 วัน เพื่อแสดงว่าวัสดุนั้นๆ มีการทำปฏิกิริยาปอซโซลาน

5. ผลการทดลองแนะนำว่าค่าดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่ใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ร้อยละ 20 ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ควรมีค่าไม่ต่ำกว่าร้อยละ 77 หากกำหนดให้ใช้ความละเอียดของวัสดุค้างบนตะแกรง 325 ไม่เกินร้อยละ 34 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแนะนำว่าควรปรับมาตรฐานให้มีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 และที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่าร้อยละ 77

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้โครงการวุฒิเมธีวิจัยและทุนวิจัยในโครงการปริญญาเอกกาญจนาภิเษก (คปก.)

7. เอกสารอ้างอิง

1. American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 618 : Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcind Natural Pozzolan for Use Mineral Admixture in Portland Cement Concrete,” *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 310-313.

2. เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์, จตุพล ตั้งปกาศิต, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, “ผลกระทบของขนาดอนุภาคเถ้าถ่านหินแม่เมาะต่อดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, หน้า 295-310.

3. เรืองรุชดิ์ ชีระโรจน์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2543, “การพัฒนาเถ้าถ่านหินที่ทิ้งแล้วเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน,” *วิศวกรรมสารวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 4, หน้า 10-21.

4. วีรชาติ ตั้งจีรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546, “วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน,” *วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ.*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, หน้า 459-473.

5. Detwiler, R.J. and Mehta, P.K., 1989, “Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 86, pp. 609-614.

6. Goldman, A. and Bentur, A., 1993, “The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 962-972.

7. Isaia, G.C., Gastaldini, A.L.G., and Morases, R., 2003, “Physical and Pozzolanic Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High Performance Concrete,” *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 69-76.

8. Ranganath, R.V., Sharma, R.C., and Krishnamoorthy, S., 1995, “Influence of Fineness and Soluble Silica Content of Fly Ash on Their Strength Development with Respect to Age”, *The Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 4-9 June 1995, Milwaukee, Wisconsin, USA, pp. 355-366.

9. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., and Tangpagasit, J., 2000, “Effect of Insoluble Residue on Portland Cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1209-1214.