

การศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน

จตุพล ตั้งปกาศิต¹ แสวง ทรงหมู่² ชัย จาตุรพิทักษ์กุล³ และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล³
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
โทร. 0-2470-9137 โทรสาร 0-2427-9063 E-mail : chai.jat@kmutt.ac.th

รับเมื่อ 29 มีนาคม 2548 ตอรับเมื่อ 20 มิถุนายน 2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยทำการบดวัสดุปอซโซลานและทรายให้มีขนาดใกล้เคียงกันสามขนาด คือมีน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 , 13.5 ± 2 (ซึ่งเป็นน้ำหนักของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้ในการศึกษาค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 13.5) และ 34 ± 2 ตามลำดับ และนำไปใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยมีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงร้อยละ ± 5 ของมอร์ตาร์ควบคุม และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

การศึกษาพบว่า การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยทรายบดละเอียดที่มีน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 และ 34 ± 2 ทำให้มีค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 และลดลงร้อยละ 3 ตามลำดับ ส่วนค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของมอร์ตาร์ที่แทนที่ด้วยทรายบดละเอียดร้อยละ 20 ซึ่งมีน้ำหนักค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 80 สำหรับค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 มีค่าเท่ากับร้อยละ 11 และ 5 ที่อายุ 3 วัน ร้อยละ 20 และ 18 ที่อายุ 28 วัน และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 25 และ 23 ที่อายุ 90 วัน ตามลำดับ

1 นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

2 นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

3 รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

A Study of Strength Activity Index of Mortar Due to Hydration Reaction, Packing Effect, and Pozzolanic Reaction of Rice Husk-Bark Ash and Palm Oil Fuel Ash

**Jatuphon Tangpagasit ¹, Sawang Songmue ², Chai Jaturapitakkul ³,
and Kraiwood Kiattikomol ³**

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

Received 29 March 2005 ; accepted 20 June 2005

Abstract

The objective of this research is to study the strength activity index of mortar due to hydration reaction, packing effect, and pozzolanic reaction of rice husk-bark ash and palm oil fuel ash. Pozzolanic materials and river sand were ground into 3 different sizes as retained on a sieve No. 325 as $5\pm 2\%$, $13.5\pm 2\%$ (Portland cement was retained on a sieve No. 325 as 13.5%) and $34\pm 2\%$. Portland cement type I was replaced by the pozzolanic materials or the ground river sand at 20% by weight of cementitious material. The flow of mortar was maintained between $\pm 5\%$ from the flow of standard mortar. Compressive strengths of mortars were determined at 3, 7, 14, 28, 60 and 90 days.

It was found that the strength activity index of mortar due to packing effect increased 2% when the ground river sand retained on a sieve No. 325 as $5\pm 2\%$ was used and decreased 3% when the ground river sand retained on a sieve No. 325 as $34\pm 2\%$ was used. Strength activity index due to hydration reaction of mortar containing ground sand with particles retained on a sieve No. 325 as those of Portland cement was 80%. The strength activity index of mortar due to pozzolanic reaction of rice husk-bark ash and palm oil fuel ash with particle size retained on a sieve No. 325 of $5\pm 2\%$ were 11 and 5% at 3 days, 20 and 18% at 28 days, and increased to 25 and 23% at 90 days, respectively.

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

² Graduate Student, Department of Civil Engineering.

³ Associate Professor, Department of Civil Engineering.

1. บทนำ

ค่าดัชนีกำลังเป็นข้อกำหนดทางกายภาพตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่ใช้วัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุที่จะนำมาใช้ในงานคอนกรีต ซึ่งวิธีการทดลองเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 311 โดยระบุว่าดัชนีกำลังต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 75 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 7 หรือ 28 วัน โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ไม่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานได้กำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันรวมกับผลของการอัดตัวของอนุภาคขนาดเล็ก หรือการเรียงตัวของอนุภาคที่เหมาะสมโดยไม่ต้องอาศัยปฏิกิริยาทางเคมี สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมวัสดุปอซโซลานจะได้กำลังอัดเพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ซึ่งได้แก่ แกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าชีวมวล มีสมบัติเป็นสารปอซโซลานชนิดหนึ่ง [1-2] และสามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ [3-4]

ชัย และคณะ [1] ได้นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มาบดละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 3.29 และ 29.07 โดยนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับหล่อมอร์ตาร์ พบว่ามีค่าดัชนีกำลังที่อายุ 7 และ 28 วันเท่ากับ 98, 89 และ 103, 102 ตามลำดับ วีรชาติ และคณะ [2] ได้นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดละเอียด และนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์สำหรับหล่อมอร์ตาร์ พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมีสมบัติที่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุปอซโซลาน แต่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดไม่เหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุปอซโซลาน

นอกจากนี้ เรืองรุชดี และคณะ [5] ทำการหาค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีน้ำหนักที่ข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 0 โดยเทียบกับการใช้วัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างในการแทนที่ปูนซีเมนต์ พบว่ามีค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานเท่ากับร้อยละ 29 ของมอร์ตาร์ควบคุมที่อายุ 90 วัน Larrard และ Sedran [6] พบว่าเถ้าถ่านหินมีความละเอียดสูงจะให้กำลังอัดทั้งจากปฏิกิริยาปอซโซลานและจากการอัดตัวของอนุภาคมากกว่าเถ้าถ่านหินที่หยาบกว่า Detwiler และ Mehta [7] และ Goldman และ Bentur [8] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอนุภาคขนาดเล็กต่อกำลังอัดโดยใช้ carbon black พบว่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นมีผลมาจากการอัดตัวของอนุภาค นอกจากนี้ Isaiia และคณะ [9] ทำการศึกษาถึงปฏิกิริยาปอซโซลานของวัสดุปอซโซลาน พบว่าการอัดตัวของอนุภาคมีผลต่อกำลังอัดมากกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่งานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการระบุค่ากำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคและปฏิกิริยาปอซโซลานแยกออกจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

กำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานหาได้จากค่าความแตกต่างระหว่างกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีวัสดุปอซโซลานและมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีที่มีขนาด การแทนที่ และอายุการบ่มที่เท่ากับวัสดุปอซโซลาน โดยในที่นี้จะใช้ทรายบดเป็นวัสดุที่ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี เนื่องจากทรายบดมีองค์ประกอบทางเคมีและความเป็นผลึกทั้งก่อนและหลังจากการทดสอบความเป็นวัสดุที่ไม่ละลายในกรดและต่างแตกต่างกันน้อยมาก [10]

ส่วนผลของการอัดตัวของอนุภาคของวัสดุหาได้จากความแตกต่างของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายบดที่มีขนาดต่างกัน หากใช้ทรายบดที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับของปูนซีเมนต์ จะไม่มีผลของการอัดตัวเนื่องจากอนุภาคเท่ากัน ดังนั้นดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่ใช้ทรายบดแทนที่ปูนซีเมนต์ จึงเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีผลของการอัดตัว แต่ถ้าใช้ทรายบดที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดของปูนซีเมนต์จะมีผลของการอัดตัวเนื่องจากอนุภาคของทรายบดที่มีขนาดเล็กกว่าจะสามารถแทรกไปในช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์และทำให้กำลังอัดสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ทรายบดที่มีขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่ออาศัยหลักการนี้ จะสามารถแยกดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานได้

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลาน

3. วิธีการศึกษา

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ปูนซีเมนต์เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้นำมาจากบริษัท ไทยเพาเวอร์ซัพพลาย จำกัด จังหวัดฉะเชิงเทรา และเถ้าปาล์มน้ำมันนำมาจากบริษัท ทักษิณน้ำมันปาล์ม จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี ส่วนทรายใช้ทรายแม่น้ำลำสะเดาตรอนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และใช้ส่วนที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 100 เพื่อใช้ผสมมอร์ตาร์ นอกจากนี้ทรายแม่น้ำบางส่วนจะนำไปบดจนมีอนุภาคต่างๆ กันเพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ โดยถือว่าเป็นวัสดุประสาน

3.2 การเตรียมวัสดุ

นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Rice husk-bark ash) เถ้าปาล์มน้ำมัน (Palm oil fuel ash) และทรายแม่น้ำ มาทำการบดเป็น 3 ขนาด โดยขนาดละเอียดมากมีน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 ใช้สัญลักษณ์เป็น FRHB FPOF และ FGS ตามลำดับ และขนาดละเอียดปานกลางมีน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 13.5 ± 2 (น้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 13.5) โดยใช้สัญลักษณ์เป็น MRHB, MPOF และ MGS ตามลำดับ และขนาดหยาบมีน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 34 ± 2 ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่ยอมให้ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 สูงสุดตาม ASTM C 618 มีสัญลักษณ์เป็น LRHB LPOF และ LGS ตามลำดับ

3.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาซึ่งประกอบด้วยค่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 และความถ่วงจำเพาะ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าร้อยละของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 และความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 13.5 และ 3.15 ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซึ่งเรียงจากขนาดละเอียดไปหาขนาดหยาบมีน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 3.8 12.2 และ 32.6 และเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าเท่ากับร้อยละ 4.3 13.7 และ 34.8 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของวัสดุ

ตัวอย่าง	ความถ่วงจำเพาะ	อนุภาคคงค้างบน ตะแกรงเบอร์ 325 (%)
ซีเมนต์	3.15	13.5
เถ้าแกลบ-เปลือกไม้	FRHB	2.21
	MRHB	2.16
	LRHB	2.13
เถ้าปาล์มน้ำมัน	FPOF	2.39
	MPOF	2.22
	LPOF	2.05
ทรายแม่น้ำ	FGS	2.64
	MGS	2.63
	LGS	2.64

จากตารางที่ 1 ค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันจะมีค่าสูงขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการบดจะไปทำลายรูพรุนและโพรงอากาศในอนุภาคทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [1-2] สำหรับทรายบดซึ่งเรียงจากขนาดละเอียดไปหาขนาดหยาบมีน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5.8 12.6 และ 33.8 ตามลำดับ ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะของทรายจะไม่ขึ้นอยู่กับความละเอียดที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5]

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะระบุว่าความละเอียดของวัสดุมีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีน้อยมาก [4] จึงศึกษาเฉพาะขนาดละเอียดมาก โดยปูนซีเมนต์มีองค์ประกอบหลักเป็น CaO สูงถึงร้อยละ 64.97 ขณะที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีองค์ประกอบรวมของ SiO₂ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 84.91 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 และมีปริมาณของ SO₃ และ LOI เท่ากับร้อยละ 0.60 และ 3.72 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าค่ามาตรฐาน ASTM C 618 คือร้อยละ 4 และ 10 ตามลำดับ และจัดให้อยู่ใน Class N ได้ ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบรวมของ SiO₂ Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เท่ากับร้อยละ 69.84 และมีปริมาณของ SO₃ เท่ากับร้อยละ 0.47 และ LOI เท่ากับ 10.05 สำหรับทรายบดมีองค์ประกอบหลักเป็น SiO₂ ที่เป็นผลึกและไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี [10]

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมี	ซีเมนต์	FRHB	FPOF	FGS
SiO ₂	20.80	84.75	65.30	92.86
Al ₂ O ₃	5.50	0.16	2.56	3.17
Fe ₂ O ₃	3.16	-	1.98	0.27
CaO	64.97	2.78	6.42	0.55
MgO	1.06	2.32	3.08	0.49
Na ₂ O	0.08	0.37	0.36	0.42
K ₂ O	0.55	2.57	5.72	0.32
SO ₃	2.96	0.60	0.47	0.55
LOI	2.89	3.72	10.05	0.67

3.4 ส่วนผสมของมอร์ตาร์

ในการหล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ จะนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และทรายบดทั้ง 3 ขนาดมาแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานและอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายในอัตราส่วนคงที่คือ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก และกำหนดค่าร้อยละการไหลแผ่คงที่เท่ากับ ± 5 ของค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 ทำการหล่อมอร์ตาร์ขนาด 5×5×5 ซม. และถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำมอร์ตาร์ไปปมในน้ำปูนขาวอิมตัวและทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 28 60 และ 90 วัน ตามลำดับ จำนวนตัวอย่างอายุละ 6 ก้อน

ตารางที่ 3 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) และค่าร้อยละของการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ทั้งหมด โดยมอร์ตาร์ควบคุมมีค่า W/B และค่าร้อยละของการไหลแผ่เท่ากับ 0.485 และ 13 ตามลำดับ ซึ่งมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และทรายบดทั้งหมดจะต้องมีค่าร้อยละของการไหลแผ่อยู่ในช่วง 13 ± 5 โดยมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีความต้องการน้ำมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยดูจากมอร์ตาร์ LRHB20 และ LPOF20 ซึ่งมีค่า W/B เท่ากับ 0.543 และ 0.523 ตามลำดับ และสำหรับมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายบดทุกขนาดมีค่า W/B ที่เท่ากันคือ 0.493

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานและค่าการไหลแพที่ใช้ในการศึกษา

หมายเลขส่วนผสม	สัญลักษณ์	W/B	ค่าการไหลแพ (%)
1	Control	0.485	13
2	FRHB	0.503	15
3	MRHB	0.523	11
4	LRHB	0.543	15
5	FPOF	0.503	16
6	MPOF	0.503	15
7	LPOF	0.523	13
8	FGS	0.493	12
9	MGS	0.493	16
10	LGS	0.493	17

3.5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยมีความหมายดังนี้คือ

{F, M, L} {RHB, POF, GS} {20}

{F, M, L} หมายถึง ระดับความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และทรายบด โดยเริ่มจากขนาดละเอียดมาก (Fine) ขนาดละเอียดปานกลาง (Medium) และขนาดหยาบ (Large) ตามลำดับ {RHB, POF, GS} หมายถึง เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และทรายบด ตามลำดับ {20} หมายถึง ร้อยละของการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และทรายบด โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์

กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์แสดงไว้ในตารางที่ 4 พบว่ามอร์ตาร์ควบคุมมีกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 28 60 และ 90 วัน เท่ากับ 370 460 519 565 587 และ 591 กก./ซม.² ตามลำดับ โดยที่กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอชโซลานที่ละเอียดกว่าจะให้กำลังอัดที่สูงกว่า โดยกำลังอัดของมอร์ตาร์ FRHB20 มีกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 28 60 และ 90 วัน เท่ากับ 343 437 516 575 613 และ 638 กก./ซม.² หรือมีค่าดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 93 95 100 102 104 และ 107 ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์ FPOF20 มีกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 28 60 และ 90 วัน เท่ากับ 322 414 480 564 612 และ 626 กก./ซม.² หรือมีค่าดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 87 90 93 100 104 และ 105 ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ด้วยทรายบด พบว่ามีอัตรากำลังอัดลดลงตามขนาดของทรายบดที่หยาบขึ้น และมีค่าร้อยละของดัชนีกำลังของทรายบดแต่ละขนาดค่อนข้างคงที่ตลอดอายุการบ่ม โดยมอร์ตาร์ FGS20 มีกำลังอัดที่อายุ 3 7 14 28 60 และ 90 วัน เท่ากับ 303 380 417 470 483 และ 494 กก./ซม.² หรือมีค่าดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 82 83 80 83 82 และ 84 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ค่ากำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์

สัญลักษณ์	กำลังอัด (ksc) – ดัชนีกำลัง (%)					
	3 วัน	7 วัน	14 วัน	28 วัน	60 วัน	90 วัน
Control	370-100	460-100	519-100	565-100	587-100	591-100
FRHB	343-93	437-95	516-100	575-102	613-104	638-107
MRHB	306-83	391-85	456-88	515-91	550-94	564-96
LRHB	274-75	337-75	412-77	453-79	493-83	503-84
FPOF	322-87	414-90	480-93	564-100	612-104	626-105
MPOF	303-82	384-83	437-84	486-85	519-89	535-91
LPOF	278-75	336-75	376-70	423-75	463-77	466-78
FGS	303-82	380-83	417-80	470-83	483-82	494-84
MGs	295-80	371-81	415-80	457-81	461-79	469-79
LGS	280-76	342-74	412-77	441-78	463-79	459-78

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึง ค่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ค่าเท่ากับหรือมากกว่ามอร์ตาร์ควบคุม

4.2 ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถหาค่าร้อยละของดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายบดที่มีอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับปูนซีเมนต์ (MGS20) ซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 สำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน จากผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4 ค่าร้อยละของดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ MGS20 ที่อายุ 3 วัน จนถึง 90 วัน มีค่าระหว่างร้อยละ 79 ถึง 81 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80 ค่าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ เรืองรุชดี และคณะ [5] ที่พบว่าดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเท่ากับร้อยละ 80.5 สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสำหรับการทดลองครั้งนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 80

4.3 ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาค

ความแตกต่างของค่าร้อยละของดัชนีกำลังระหว่างมอร์ตาร์ที่มีทรายบดขนาดละเอียดกว่า (หรือขนาดหยาบกว่า) อนุภาคของปูนซีเมนต์กับมอร์ตาร์ที่มีทรายบดขนาดเท่ากับปูนซีเมนต์ คือค่าการอัดตัวของอนุภาค

ในที่นี้จะถือว่าค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายบดที่มีขนาดความละเอียดเท่ากับปูนซีเมนต์ไม่มีผลของการอัดตัวของอนุภาค ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 4 พบว่าดัชนีกำลังเฉลี่ยที่อายุ 3 ถึง 90 วันของมอร์ตาร์ FGS20 MGS20 และ LGS20 มีค่าเท่ากับ 82 80 และ 77 ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจากการแทนที่ด้วยทรายบดที่มีขนาดที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ (FGS20) โดยมีค่าเท่ากับ $82-80 = 2$ ซึ่งเป็นค่าบวกแสดงว่าการอัดตัวของอนุภาคทำให้กำลังเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 2

แต่ในทางกลับกันการแทนที่ด้วยทรายบดที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ (LGS20) ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคเนื่องจากการแทนที่ด้วยวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ลดลงร้อยละ 3 ($77-80 = -3$)

4.4 ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถหาได้จากค่าดัชนีกำลังที่แตกต่างกันระหว่างมอร์ตาร์ดที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานและทรายบดที่มีความละเอียด การแทนที่ และอายุการบ่มที่เท่ากัน ซึ่งค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงไว้ดังตารางที่ 5 เช่น ค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่อายุ 3 วัน ของ FRHB20 หาได้จากค่าดัชนีกำลังที่อายุ 3 วัน ของตัวอย่าง FRHB20 ในตารางที่ 4 มีค่าเท่ากับ 93 ลบด้วยค่าดัชนีกำลังจากตัวอย่าง FGS20 ที่อายุ 3 วัน มีค่า 82 ดังนั้น ค่าดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่าง FRHB20 มีค่าเท่ากับ $93 - 82 = 11$ หรือค่าดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่าง MPOF20 ที่อายุ 3 วัน เท่ากับ $82 - 80 = 2$ เป็นต้น

ตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมาก หากวัสดุปอซโซลานที่ใช้มีขนาดหยาบ แต่ถ้าใช้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดมากขึ้น จะทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้นตามไปด้วย โดยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ด FRHB20 มีค่ามากที่สุด และลดลงตามขนาดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่หยาบขึ้น มีข้อสังเกตว่ามอร์ตาร์ด LRHB20 และ LPOF20 มีค่าติดลบในช่วง 3 ถึง 28 วัน ซึ่งการติดลบนี้มาจากวิธีคำนวณที่ต้องอาศัยมอร์ตาร์ด MGS เป็นตัวเปรียบเทียบ เพราะมอร์ตาร์ด MGS มีค่า W/B คงที่ แต่มอร์ตาร์ด LRHB20 และ LPOF20 มีค่า W/B สูงกว่ามาก ดังนั้นค่าติดลบเป็นผลกระทบจากค่า W/B ที่แตกต่างกัน และไม่พิจารณาเป็นค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน แต่มอร์ตาร์ด LRHB20 และ LPOF20 สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานขึ้นมาชดเชยผลกระทบนี้ได้หลังจากอายุ 28 วันไปแล้ว

ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของมอร์ตาร์ด มีทิศทางเหมือนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ คือ มอร์ตาร์ด FPOF20 มีค่ามากที่สุด และลดลงตามขนาดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใหญ่ขึ้น แต่มีค่าน้อยกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทุกอายุการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานของการทดลองนี้กับผลของเรื่องรุชดี [5] พบว่า ค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานในช่วงอายุ 3 ถึง 7 วัน ของเถ้าถ่านหินขนาดละเอียดที่สุดมีค่าน้อยกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน แต่มีค่ามากกว่าที่อายุ 28 ถึง 90 วัน

ค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค ปฏิกิริยาปอซโซลาน และผลรวมของดัชนีกำลังทั้งหมด แสดงไว้ในตารางที่ 6 ซึ่งจะเห็นถึงการพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอซโซลาน โดยในช่วงอายุ 3 ถึง 7 วัน มีการพัฒนากำลังช้า แต่เมื่อมีอายุมากขึ้นจะมีการพัฒนากำลังที่มากขึ้น และยังคงขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุปอซโซลานด้วย คือ วัสดุละเอียดจะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้มากกว่าวัสดุที่หยาบกว่า

ตารางที่ 5 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

สัญลักษณ์	กำลังอัด (ksc) - ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจาก ปฏิกิริยาปอซโซลาน (%)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
FRHB20	40-11	57-13	105-20	144-25
MRHB20	11-3	20-5	58-11	95-16
LRHB20	(-6)-(-2)	(-5)-(-2)	12-2	44-7
FPOF20	19-5	34-8	94-18	132-23
MPOF20	8-2	13-3	29-5	66-11
LPOF20	(-2)-(-2)	(-6)-(-2)	(-18)-(-2)	7-1

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึง ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันระหว่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันกับมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยทรายบดขนาดหยาบ ซึ่งไม่นำมาพิจารณาเป็นค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

ตารางที่ 6 ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

สัญลักษณ์	ดัชนีกำลัง (%)				ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (%)	Packing Effect (%)	ปฏิกิริยาปอซโซลาน (%)			
	3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน			3 วัน	7 วัน	28 วัน	90 วัน
FRHB20	93	95	102	107	80	2	11	13	20	25
MRHB20	83	85	91	96	80	0	3	5	11	16
LRHB20	75	75	79	84	80	(-3)	(-2)	(-2)	2	7
FPOF20	87	90	100	105	80	2	5	8	18	23
MPOF20	82	83	85	91	80	0	2	3	5	11
LPOF20	75	75	75	78	80	(-3)	(-2)	(-2)	(-2)	1

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึง ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันระหว่างมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันกับมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยทรายบดขนาดหยาบ ซึ่งไม่นำมาพิจารณาเป็นค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

5. สรุปผลการทดลอง

1. การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ด้วยทรายบดละเอียดซึ่งมีน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 และ 34 ± 2 ทำให้ดัชนีกำลังที่เกิดจากการอัดของอนุภาคเพิ่มขึ้นร้อยละ 2 และลดลงร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับการใช้ทรายบดละเอียดที่มีอนุภาคเท่ากับปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ผลของการอัดตัวของอนุภาคแต่ละขนาดพบว่ามีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับอายุทดสอบ

2. การแทนที่ปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 ด้วยทรายบดละเอียด ซึ่งมีน้ำหนักที่ค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับของปูนซีเมนต์ ทำให้ดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเท่ากับ 80

3. ดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ขนาดละเอียดมาก (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 2) ที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 11 13 20 และ 25 ตามลำดับ
4. ดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 5 ± 2) ที่อายุ 3 7 28 และ 90 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 5 8 18 และ 23 ตามลำดับ

6. กิตติกรรมประกาศ

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

7. เอกสารอ้างอิง

1. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธ์ วงษ์พา และ สุรพันธ์ สุคันธปรีย์, 2545, "การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต", *การประชุมทางวิชาการโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8*, 23-25 ตุลาคม, ขอนแก่น, หน้า MAT 164-172.
2. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แวงคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546, "วัสดุปอซโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน", *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 4, หน้า 459-473.
3. Makaratat, N., Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., and Siripanichgorn, A., 2004, "Utilization of Rice Husk-Bark Ash as a Cement Replacement", *Proceedings of the First International Conference of Asian Concrete Federation*, 28-29 October, Chiangmai, Thailand, pp. 650-659.
4. วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, "การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง", *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 2, หน้า 27-32.
5. เรืองรุชดี ชีระโรจน์, จตุพล ตั้งปกาศิต, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, "ผลกระทบของขนาดอนุภาคเถ้าถ่านหินต่อดัชนีกำลังของมอร์ตาร์", *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, หน้า 295-310.
6. 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.
7. 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.
8. Goldman, A. and Bentur, A., 1993, "The Influence of Microfillers on Enhancement of Concrete Strength," *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp. 962-972.

9. Isaia, G. C., Gastaldini, A. L. G. and Morases, R., 2003, "Physical and Pozzolan Action of Mineral Additions on the Mechanical Strength of High Performance Concrete," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 25, pp. 69-76.
10. Kiattikomol, K., Jaturapitakkul, C., and Tangpagasit, J., 2000, "Effect of Insoluble Residue on Portland Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1209-1214.