



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การศึกษาเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต

โดย

รศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

รศ.ดร. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มกราคม 2549

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยเรื่อง

การศึกษาเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต

โดย

รศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล

รศ.ดร. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว. ปี 2545)

เรื่อง การศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

(ระหว่าง พฤศจิกายน 2545 – ตุลาคม 2548)

บทสรุปผู้บริหาร : ตามที่ทางสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้สนับสนุนให้นายชัย จาตุรพิทักษ์กุล และนายไกรวุฒิ เกียรติโกมล ทำการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาประจำปี 2545 ตามสัญญาเลขที่ BRG4680001 เพื่อวิจัยเรื่องการศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต ขณะนี้ได้ดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นแล้ว ผลการดำเนินงานวิจัยตลอดระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา ได้มีบทความวิจัยที่เผยแพร่หรือได้รับการยอมรับให้ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติจำนวน 4 เรื่อง, ในวารสารวิชาการระดับประเทศจำนวน 3 เรื่อง, ในการประชุมวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 เรื่อง และในการประชุมวิชาการระดับประเทศจำนวน 1 เรื่อง หรือรวมทั้งสิ้นจำนวน 9 เรื่อง และยังมีบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการพิจารณาในระดับนานาชาติและระดับชาติอีกอย่างละ 1 เรื่อง มีนักศึกษาที่จบการศึกษาระดับปริญญาโทจากโครงการนี้จำนวน 4 คน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. รายละเอียดของโครงการวิจัย

คณะผู้ดำเนินการวิจัย : รศ.ดร. ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (หัวหน้าโครงการ)
รศ.ดร. ไกรวุฒิ เกียรติโกมล (ผู้ร่วมโครงการ)
ระยะเวลาดำเนินการ : 3 ปี (ระหว่างเดือน ตุลาคม 2545 ถึง พฤศจิกายน 2548)
งบประมาณ : 1,913,000 บาท

2. สรุปผลการวิจัย

- เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมี พบว่าสามารถจัดเป็นวัสดุปอชโซลาน Class N ได้ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด พบว่ามีระยะเวลานานกว่าซีเมนต์เพสต์อย่างมาก แต่หลังจากเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าสามารถลดระยะเวลาการก่อตัวจนใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ โดยมีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายอยู่ระหว่าง 124 ถึง 137 และ 195 ถึง 225 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์มีเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 114 นาที และระยะปลายเท่ากับ 180 นาที
- มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดแทนที่ปูนซีเมนต์ทุกอัตราทดแทนที่มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานอย่างมาก แต่หลังปรับปรุงคุณภาพโดยการบดสามารถทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นและมีค่าสูงเทียบเท่ากับมอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 90 วันขึ้นไป เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 10 และ 20 สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดและบดละเอียดมาก ตามลำดับ ดังนั้นเถ้าปาล์มน้ำมันหลังปรับปรุงคุณภาพจึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดี คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนานมากยิ่งขึ้นเมื่อการแทนที่สูงขึ้น ส่วนการบด

เจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวลดลงเมื่อเทียบกับการใช้เจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด โดยคอนกรีตที่ผสมเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 10 มีเวลาก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

3. กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเจ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 7 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 14, 13, 13 และ 16 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน และที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 15, 20, 25 และ 29 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเจ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 7 วันมีค่าเป็นร้อยละ 6, 8, 6 และ 9 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน และที่อายุ 28 วันมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8, 18, 22 และ 28 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ แสดงว่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเจ้าแกลบ-เปลือกไม้มีค่ามากกว่าเจ้าปาล์มน้ำมัน ทุกอัตราการแทนที่ เมื่อมีความละเอียดเท่ากัน
4. การผสมเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดต่ำ และการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง แต่เมื่อทำการบดเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยคอนกรีตกำลังธรรมดาที่ผสมเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปานกลาง (ข้างตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20) ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นส่วนผสมที่สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน ส่วนการผสมเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมาก (ข้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5) ในอัตราร้อยละ 20 พบว่ามีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไป โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 425 และ 395 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 110 และ 103 ของคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามลำดับ
5. การต้านทานการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าการผสมเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น พบว่าการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมากทุกอัตราส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 1 ปี นอกจากนี้ทุกอัตราส่วนผสมของเจ้าแกลบ-เปลือกไม้ขนาดละเอียดมากและที่การแทนที่ร้อยละ 40 ของเจ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อีกด้วย
6. การแทนที่เจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสม และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่ก็จะทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตสูงขึ้น คอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีการซึมผ่านน้ำที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเจ้าแกลบ-

เปลือกไม้ทุกอายุการทดสอบ นอกจากนี้ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์ม น้ำมันบดละเอียด ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์และอายุของคอนกรีต โดยทั่วไปแล้วค่าการซึมผ่าน น้ำลดลงเมื่อกำลังอัดและอายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น

7. เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดจนมีความละเอียดสูงสามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ได้สูงถึงร้อยละ 30 เพื่อทำคอนกรีตกำลังสูง โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์ม น้ำมันสามารถให้กำลังอัดแก่คอนกรีตได้สูงกว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นส่วนผสม และมีกำลังอัดที่อายุ 90 วันมากกว่า 900 กก/ซม² นอกจากนี้การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด มากแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูงได้ ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่น พบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัด ของคอนกรีตกำลังสูง แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้ง 2 ชนิดมีศักยภาพสูงในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนในการทำ คอนกรีตกำลังสูงได้ดี
8. อัตราส่วนที่เหมาะสมในการอัดอิฐคอนกรีต คือ ใช้อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราส่วนไม่เกิน ร้อยละ 20 สำหรับอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ได้จากโรงงานโดยตรง และสามารถแทนที่ได้ถึงร้อยละ 35 สำหรับอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียด ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดจนมีความ ละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสม ของอิฐคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ใช้อัตราส่วนต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75) โดยอิฐ คอนกรีตที่ได้มีกำลังมากกว่า 400 กก/ซม² ที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 30 (ใช้อัตราส่วนต่อ วัสดุประสาน เท่ากับ 0.65) จะให้ผลของกำลังอัดที่ดีที่สุดคือ 532 กก/ซม² ที่อายุ 50 วัน

3. บทความวิชาการและบทความที่เผยแพร่

ผลการดำเนินงานวิจัยตลอดระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา ได้มีบทความวิจัยที่เผยแพร่หรือได้รับการยอมรับเพื่อตีพิมพ์จำนวน 9 เรื่อง และมีบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์อีกจำนวน 2 เรื่อง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทความในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ผลงานที่ได้รับการตอบรับตีพิมพ์แล้วในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ มีดังนี้

1. Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2004, Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 16, No. 6, pp. 623-628 (Impact Factor 0.348).
2. Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., and Siripanichgorn, A., Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete, Accepted for Publication in Waste Management (Impact Factor 1.151).
3. Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., Influence of By-Product Materials on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, Accepted for Publication in Construction and Building Materials (Impact Factor 0.565).

4. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Jaturapitakkul, C., Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash, Accepted for Publication in Construction and Building Materials (Impact Factor 0.565).

บทความในวารสารวิชาการระดับประเทศ

5. วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546, วัสดุปอชโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปลาล์มน้ำมัน, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 26, ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม, หน้า 459-474
6. วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, การใช้เถ้าปลาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 14 ฉบับที่ 2, หน้า 27-32.
7. วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547, การศึกษากำลังอัดและการยตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 15 ฉบับที่ 3, หน้า 32-39.

บทความในประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

8. 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, Vol. 2, Chiang Mai, Thailand, pp. 650-659.

บทความในประชุมวิชาการระดับประเทศ

9. ชิริสิทธิ์ แซ่ตั้ง, วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547, การพัฒนาเถ้าปลาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2, 26-27 ตุลาคม 2547, หน้า 17-22.

บทความที่เสนอในวารสารวิชาการระดับนานาชาติและอยู่ในระหว่างการพิจารณา

10. Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Siripanichgorn, A., and Kiattikomol, K., Utilization of Palm Oil Fuel Ash as a Pozzolanic Material ใน Cement and Concrete Research (อยู่ในระหว่างการพิจารณาครั้งที่ 2)

บทความที่เสนอในวารสารวิชาการระดับประเทศและอยู่ในระหว่างการพิจารณา

11. จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, การศึกษาดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดเพื่อแทนวัสดุปอชโซลาน, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

4. เอกสารแนบที่เกี่ยวข้อง

1. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
2. รายงานการเงินฉบับล่าสุด
3. สำเนาบัญชีเงินฝาก
4. แผ่นบันทึกข้อมูลสรุปรายงานและรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
5. สำเนาบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว
6. จดหมายตอบรับการตีพิมพ์ และบทคัดย่อสำหรับบทความที่อยู่ระหว่างการรอพิมพ์และอยู่ในระหว่างการพิจารณา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมัน มาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน เถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ทำการปรับปรุงคุณภาพเถาทั้งสองโดยการบดให้ได้ความละเอียด 2 ขนาด ได้แก่ บดละเอียดปานกลาง (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20) และบดละเอียดมาก (ค้ำตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5) รวมกับเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงเป็น 3 ขนาด จากนั้นนำเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำการหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต ศึกษาค่าดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมัน ศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต ศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้เถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และศึกษาการทำอิฐคอนกรีตเมื่อใช้เถาเกลบ-เปลือกไม้หรือเถาปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม

ผลการดำเนินงานวิจัย พบว่าเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันเมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าสามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ ระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์เมื่อแทนที่เถาปาล์มน้ำมันก่อนบด พบว่ามีระยะเวลานานกว่าซีเมนต์เพสต์อย่างมาก แต่เมื่อเพิ่มความละเอียดของเถาปาล์มน้ำมัน ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง

มอร์ตาร์ที่ผสมเถาปาล์มน้ำมันก่อนบดทุกอัตราการแทนที่มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานอย่างมาก แต่หลังการบดสามารถทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นและมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 180 วัน เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 10 และ 20 สำหรับเถาปาล์มน้ำมันบดละเอียดปานกลางและบดละเอียดมาก ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันพบว่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถาเกลบ-เปลือกไม้มีค่ามากกว่าเถาปาล์มน้ำมัน ทุกอัตราการแทนที่ เมื่อมีความละเอียดเท่ากัน

คอนกรีตที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันก่อนบดมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และนานมากยิ่งขึ้นเมื่อการแทนที่สูงขึ้น ส่วนการบดเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวลดลง ด้านกำลังอัดพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันก่อนบดทำให้มีการพัฒนากำลังอัดต่ำ และการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นยิ่งทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลง แต่เมื่อบดเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น โดยคอนกรีตที่ผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์มน้ำมันบดละเอียดปานกลางในอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 90 วัน ส่วนการผสมเถาเกลบ-เปลือกไม้และเถาปาล์ม

น้ำมันที่บดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 20 พบว่ามีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตั้งแต่อายุ 7 วันขึ้นไป

การต้านทานการขยายตัวของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากทุกอัตราส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 1 ปี นอกจากนี้ทุกอัตราส่วนผสมของเถ้ากลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมากและการแทนที่ร้อยละ 40 ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อีกด้วย

การแทนที่เถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่มากขึ้นทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตสูงขึ้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าการซึมผ่านน้ำที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้ทุกอายุการทดสอบ

เถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดมากมีศักยภาพสูงในการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 บางส่วนเพื่อทำคอนกรีตกำลังสูงได้ดี ซึ่งสามารถนำมาใช้แทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30 โดยกำลังอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมและมีค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันมากกว่า 900 กก/ชม² นอกจากนี้การใช้เถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูงได้ ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นพบว่ามีค่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมมากนัก

ในการอัดอิฐคอนกรีตพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการแทนที่เถ้ากลบ-เปลือกไม้ที่ได้จากโรงงานโดยตรงไม่เกินร้อยละ 20 และแทนที่ได้ถึงร้อยละ 35 สำหรับเถ้ากลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมาก ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากสามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของอิฐคอนกรีตได้ถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน (ใช้อัตราน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.75) โดยอิฐคอนกรีตที่ได้มีกำลังมากกว่า 400 กก/ชม² ที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไป

ผลการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีและมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ในงานคอนกรีต อย่างไรก็ตามเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต้องมีความละเอียดสูงจึงจะมีการทำปฏิกิริยาปอชโซลานได้ดี

คำสำคัญ : เถ้ากลบ-เปลือกไม้ / เถ้าปาล์มน้ำมัน / มอร์ตาร์ / คอนกรีต / คอนกรีตกำลังสูง / อิฐคอนกรีต / ปอชโซลาน / ระยะเวลาการก่อตัว / กำลังอัด / การซึมผ่านน้ำ / การขยายตัว / ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน / โมดูลัสยืดหยุ่น

Abstract

This research aimed to utilize rice husk-bark ash (RHBA) and palm oil fuel ash (POFA) as a cement replacement in concrete. RHBA and POFA are by-products from thermal power plants which rice husk and eucalyptus, and palm oil residues are burnt as fuel. RHBA and POFA were ground to have different finenesses as high (retained on a sieve No. 325 less than 5% by weight), medium (retained on a sieve No. 325 of 15-20% by weight), and original (unground RHBA and POFA). Portland cement type I was partially replaced by RHBA and POFA at the rate of 10, 20, 30, and 40 by weight of binder. The properties of paste, mortar, and concrete were investigated such as normal consistency, setting times, compressive strength, strength activity index, expansion of mortar and concrete due to magnesium sulfate attack, water permeability of concrete mixed with 20 and 40% of RHBA and POFA by weight of binder. The properties of high strength concrete containing 10, 20, and 30 of RHBA and POFA by weight of binder were investigated such as compressive strength, heat evolution, and modulus of elasticity. In addition, concrete blocks mixed with RHBA and POFA were prepared and investigated.

The results revealed that RHBA and POFA can be classified as class N pozzolan based on the chemical compositions. The setting times of paste containing original POFA were higher than that of cement paste and decreased as the increase of POFA fineness.

The compressive strengths of mortars mixed with original POFA were lower than that of Portland cement type I mortar at all cement replacement levels. However, the mortars mixed with medium and high fineness POFA at 10 and 20%, respectively gave the compressive strength higher than that of Portland cement type I mortar at the age of 180 days. The results of strength activity index of RHBA and POFA showed that the compressive strength due to pozzolanic reaction of RHBA was higher than that of POFA at same fineness and same cement replacement.

For concretes containing RHBA and POFA, it was found that the use of RHBA and POFA in concretes caused delay in both initial and final setting times, depending on the fineness and level replacement of RHBA and POFA. Concretes mixed with original RHBA and POFA had the compressive strength lower than that of Portland cement Type I concrete and decreased as the increase of RHBA and POFA replacement. However, concretes mixed with medium fineness of RHBA and POFA at 10% gave the compressive strength higher than that of Portland cement Type I concrete at 90 days. In addition, the

compressive strengths of concretes mixed with 20% of high fineness RHBA and POFA were higher than that of Portland cement Type I concrete at 7 days.

For concrete immersed in 5% of magnesium sulfate solution, it was found that the expansions of concrete bars containing high fineness RHBA and POFA at 364 days were less than that of concrete bar made from Portland cement Type I. Moreover, at 40% replacement of high fineness of POFA, the expansion was less than that of concrete bar made from Portland cement Type V.

The use of 20 and 40% of high fineness RHBA and POFA in concrete produced lower water permeability than that of Portland cement Type I concrete. The water permeability increased with increasing in the replacement level. In addition, the results also suggested that POFA concretes had the water permeability lower than RHBA concretes at same percentage replacement.

For high strength concrete, it was suggested that RHBA and POFA with high fineness had high potential and can be used as cement replacement up to 30% for making high strength concrete. The compressive strength at 90 days of concrete containing RHBA and POFA was higher than that of high strength concrete made from Portland cement Type I and was higher than 900 ksc. In addition, the high strength concrete containing higher replacement level of RHBA and POFA could reduce the rate and peak of temperature rise from the heat evolution as comparing with the high strength concrete made from Portland cement Type I. The use of RHBA and POFA of 10-30% as a cement replacement in high strength concrete had a slightly effect on the modulus of elasticity of concrete.

For concrete block, it was found that the suitable cement replacement of original RHBA was not more than 20% and could increase to 35% for high fineness of RHBA. With 50% of high fineness POFA as cement replacement (w/b of 0.75), the compressive strength of concrete block at 28 days was higher than 400 ksc.

The overall results suggested that RHBA and POFA are good pozzolanic materials and have high potential to be used as partial cement replacement in concrete. However, RHBA and POFA must have high fineness so that they can have high pozzolanic activity.

Keywords : Rice Husk-Bark Ash / Palm Oil Fuel Ash / Mortar / Concrete / High Strength Concrete / Concrete Block / Pozzolan / Setting Times / Compressive Strength / Water Permeability / Expansion / Heat Evolution / Modulus of Elasticity

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทสรุปผู้บริหาร	๑-๔
บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ค
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
รายการตาราง	ซ
รายการรูปประกอบ	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 เนื้อหาของรายงานวิจัย	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา	
2.1 วัสดุพอลิโซลัน	4
2.2 ปฏิกิริยาพอลิโซลัน	4
2.3 เถ้าเคลือบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	5
2.4 การนำเถ้าเคลือบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์	7
2.5 การกักกร่อนเนื่องจากซัลเฟต	9
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	11
3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	15
3.3 วิธีการทดสอบ	15
3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	24

บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	26
4.2 องค์ประกอบทางเคมี	33
4.3 คุณสมบัติของเพสต์	35
4.4 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์	38
4.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์	39
4.6 ดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	45
4.7 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์	49
4.8 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	60
4.9 กำลังอัดของคอนกรีต	63
4.10 การขยายตัวของคอนกรีต	71
4.11 การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	81
4.11 คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	84
4.12 อิฐคอนกรีต	89

บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ	94
5.2 ข้อเสนอแนะ	96

เอกสารอ้างอิง	97
----------------------	-----------

ภาคผนวก ก	103
------------------	------------

รายชื่อนักศึกษาในระดับปริญญาโทที่สำเร็จการศึกษาภายใต้โครงการนี้	103
รายชื่อนักศึกษาในระดับปริญญาเอกที่ทำวิจัยบางส่วนในโครงการนี้	103
บทความวิจัยที่เผยแพร่	103

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	21
3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	22
3.3 อัตราส่วนผสมของอิฐคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบ-เปลือกไม้	23
3.4 อัตราส่วนผสมของอิฐคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน	24
3.5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา	24
4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ	30
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ	35
4.3 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	36
4.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของมอร์ตาร์	38
4.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์	40
4.6 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์	45
4.7 กำลังและดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน	48
4.8 ดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน, การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลาน	48
4.9 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้ (R) และเถ้าปาล์มน้ำมัน	62
4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้	63
4.11 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	67
4.12 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	81
4.13 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง	85
4.14 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูง	88
4.15 กำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่ใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูป 50 กก/ซม ²	89
4.16 กำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน และใช้แรงดันอัดอิฐ 50 กก/ซม ²	90
4.17 กำลังอัดที่สูงสุดของอิฐคอนกรีตในแต่ละร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน	93
4.18 การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดในแต่ละ W/B	93

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า
2.1 บริเวณที่กองเกลบและเปลือกไม้ก่อนนำไปเผา	6
2.2 บริเวณที่ทิ้งเถ้าเกลบ-เปลือกไม้	6
2.3 บริเวณที่กองกากของผลปาล์มน้ำมันก่อนนำไปเผา	7
2.4 บริเวณที่ทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมัน	7
3.1 เครื่องบดวัสดุ	12
3.2 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต	12
3.3 เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต	13
3.4 เครื่องมีวัดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	13
3.5 เครื่องมีวัดการขยายตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีต	14
3.6 เครื่องอัดอิฐแบบปรับแรงดันได้	14
3.7 เซลล์ทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	21
3.8 แบบหล่อหุ้มฉนวนและการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ล	22
3.9 หน้าจอสำหรับอ่านค่าอุณหภูมิ	22
4.1 เปรียบเทียบสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าเกลบ-เปลือกไม้	27
4.2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	28
4.3 ภาพถ่ายขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5	28
4.4 ภาพขยายอนุภาคเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ OR	28
4.5 ภาพขยายอนุภาคเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ G1R	28
4.6 ภาพขยายอนุภาคเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ G2R	28
4.7 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน OP	29
4.8 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P	29
4.9 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P	29
4.10 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าเกลบ-เปลือกไม้	31
4.11 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน	32

4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R	73
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R	74
4.34 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 เมื่อแช่ในสารละลาย แมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 364 วัน	74
4.35 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 364 วัน	75
4.36 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 364 วัน	75
4.37 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 364 วัน	76
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP	78
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P	79
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P	79
4.41 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 364 วัน	80
4.42 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 364 วัน	80
4.43 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เป็นเวลา 364 วัน	81
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าการซึมผ่านน้ำ ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน	83
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าการซึมผ่านน้ำ ของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน	83
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้	85
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	86
4.48 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	87
4.49 ความร้อนของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้	88

4.50 ความร้อนของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	88
4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุ 7 วัน	91
4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุ 28 วัน	91

คำสำคัญ : เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ / เถ้าปาล์มน้ำมัน / มอร์ตาร์ / คอนกรีต / คอนกรีตกำลังสูง / อิฐคอนกรีต / ปอซโซลาน / ระยะเวลาการก่อตัว / กำลังอัด / การซึมผ่านน้ำ / การขยายตัว / ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน / โมดูลัสยืดหยุ่น

Keywords : Rice Husk-Bark Ash / Palm Oil Fuel Ash / Mortar / Concrete / High Strength Concrete / Concrete Block / Pozzolan / Setting Times / Compressive Strength / Water Permeability / Expansion / Heat Evolution / Modulus of Elasticity

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาถ้าเกลบ-เปลือกไม้และถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต” คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้สนับสนุนทุนเพื่อใช้ในการงานวิจัยดังกล่าว รวมระยะเวลาในการทำวิจัย 3 ปี คือ ตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ. 2545 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 ภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว. ปี 2545) มีสัญญาเลขที่ BRG4680001

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยเพาเวอร์ โอเพอร์เรชัน จำกัด, บริษัท ยูนิวานิชน้ำมันปาล์ม จำกัด, บริษัท ชุมพร อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด, บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งได้สนับสนุนตัวอย่างถ้าเกลบ-เปลือกไม้, ถ้าปาล์มน้ำมัน และสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการวิจัย

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คุณวันชัย สะตะ, คุณสพลาภ หอมวุฒิวงศ์, คุณจุฑพล ตั้งปกาศิต, คุณวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, คุณณัฐพงศ์ มกระธัช, คุณชิริสิทธิ์ แซ่ตั้ง และคุณแสวง ทรงหนู ที่ได้ทำการเตรียมตัวอย่างตลอดจนทดสอบ และเก็บข้อมูลต่างๆ อย่างอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายผู้วิจัยหวังว่ารายงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาถ้าเกลบ-เปลือกไม้และถ้าปาล์มน้ำมันตลอดจนถ้าชีวมวลอื่นๆ เพื่อใช้ในการงานคอนกรีต และทำให้ปัญหาของการกำจัดถ้าเหล่านี้ค่อยลงหรือหมดสิ้นไป

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาถ้าเกลบ-เปลือกไม้และถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต” คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้สนับสนุนทุนเพื่อใช้ในการงานวิจัยดังกล่าว รวมระยะเวลาในการทำวิจัย 3 ปี คือ ตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ. 2545 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 ภายใต้งโครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิเมธีวิจัย สกว. ปี 2545) มีสัญญาเลขที่ BRG4680001

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยเพาเวอร์ โอเพอร์เรชัน จำกัด, บริษัท ยูนิวานิชน้ำมันปาล์ม จำกัด, บริษัท ชุมพร อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด, บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งได้สนับสนุนตัวอย่างถ้าเกลบ-เปลือกไม้, ถ้าปาล์มน้ำมัน และสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการวิจัย

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คุณวันชัย สะตะ, คุณสหลาภ หอมวุฒิวงศ์, คุณจุฑพล ตั้งปกาศิต, คุณวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, คุณณัฐพงศ์ มกระธัช, คุณธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง และคุณแสวง ทรงหนู ที่ได้ทำการเตรียมตัวอย่างตลอดจนทดสอบ และเก็บข้อมูลต่างๆ อย่างอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายผู้วิจัยหวังว่ารายงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาถ้าเกลบ-เปลือกไม้และถ้าปาล์มน้ำมันตลอดจนถ้าชีวมวลอื่นๆ เพื่อใช้ในการงานคอนกรีต และทำให้ปัญหาของการกำจัดถ้าเหล่านี้ค่อยลงหรือหมดสิ้นไป

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตร ทำให้มีวัสดุที่เกิดจากผลิตผลทางการเกษตรมากมาย ทั้งที่ใช้เป็นประโยชน์ทางการค้าได้และบางส่วนเป็นของเหลือใช้หรือใช้ไม่ได้ แกลบ เปลือกไม้ และกากของผลปาล์ม ก็เป็นส่วนหนึ่งของวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว จากข้อมูลของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ [1] พบว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่ปลูกข้าวเป็นอันดับ 6 และปลูกปาล์มเป็นอันดับที่ 4 ของโลก ซึ่งในปี 2543/44 ปริมาณของแกลบมีประมาณ 5,600,000 ตัน กากของผลปาล์มน้ำมันในปี 2543 มีปริมาณประมาณ 618,000 ตัน โดยที่แกลบเป็นของเหลือที่ได้มาจากการสีข้าว และในส่วนของกากปาล์มน้ำมันได้มาจากเปลือกของผลปาล์มน้ำมันหลังสิ้นสุดกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ดังนั้นในแต่ละวันจึงมีปริมาณที่สูงแต่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย เป็นผลทำให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมตามมา เช่น การกองเก็บ และการกำจัดทิ้ง เป็นต้น

อย่างไรก็ตามได้มีการพยายามนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น แกลบ เปลือกไม้ และกากของผลปาล์ม เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) หรือเดิมคือสำนักงานคณะกรรมการนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) ได้สนับสนุนส่งเสริมการพัฒนาการก่อสร้างโรงไฟฟ้าที่ใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งเป็นพลังงานที่ไม่มีวันหมด ก่อมลภาวะน้อย ไม่มีการปล่อยก๊าซกำมะถัน ราคาถูกกว่าพลังงานเชิงพาณิชย์อื่น และที่สำคัญมีแหล่งผลิตอยู่ภายในประเทศไทย โดยที่ภาคเอกชนได้มีการนำเอาพลังงานชีวมวลไปใช้ในเชิงพาณิชย์บ้างแล้ว เช่น บริษัท ไทยเพาเวอร์ซัพพลาย จำกัด ได้นำแกลบและเปลือกไม้ของต้นยูคาลิปตัส ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และยังมีอีกหลายบริษัทที่นำเปลือกปาล์มน้ำมันมาเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งการดำเนินงานดังกล่าวเป็นการนำวัสดุเหลือใช้มาทำประโยชน์และลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมทั้งทางตรงและทางอ้อม แต่ก็ยังมีปัญหาที่เกิดจากแกลบ-เปลือกไม้ และ แก้วปาล์มน้ำมัน ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยแกลบ-เปลือกไม้จากโรงไฟฟ้าเพียงโรงเดียวมีกำลังผลิตประมาณ 200 ตันต่อวัน หรือ 73,000 ตันต่อปี ส่วนแก้วปาล์มน้ำมันจากข้อมูลของโรงงานแห่งหนึ่งของจังหวัดในภาคใต้มีปริมาณแก้วปาล์มน้ำมันที่ได้จากการผลิตไฟฟ้า 10 ตันต่อวัน ซึ่งเป็นปริมาณเพียง 1 แห่งเท่านั้นจากบริษัทที่ผลิตน้ำมันปาล์มจำนวน 49 โรงงานที่ขออนุญาตถูกต้องจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นข้อมูลในปี 2539 ดังนั้นจึงมีปริมาณแก้วปาล์มน้ำมันเป็นจำนวนมากเช่นกัน ซึ่งถ้าทั้งสองชนิดมีลักษณะเป็นผงฝุ่นและน้ำหนักเบาสามารถฟุ้งกระจายได้ ทำให้มีผลกระทบต่อด้านมลภาวะทางอากาศและทางด้านสภาวะแวดล้อมโดยรอบ อีกทั้งยังเป็นสิ่งที่จะต้องทิ้งไปโดยไม่สามารถทำให้เกิดประโยชน์ได้

ดังนั้นหากสามารถนำ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน มาใช้ประโยชน์ได้ก็สามารถลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งได้ เหมือนกับโรงไฟฟ้าถ่านหินของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง มีปริมาณเถ้าถ่านหินออกมาเป็นจำนวนมากประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ทำให้เป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมบริเวณโดยรอบโรงงานเนื่องจากมีลักษณะเป็นผงฝุ่น ไม่เหมาะที่จะใช้ทำการเกษตรและอยู่อาศัย ทางโรงไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จึงได้ส่งเสริมให้มีการวิจัยและพัฒนาจนสามารถนำเอาเถ้าถ่านหินไปใช้ในงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน มีคุณสมบัติเบื้องต้นที่สามารถจะพัฒนาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตได้ ซึ่งหากทำได้จะเป็นวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประเทศและยังเป็นการจัดการปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย อีกทั้งเป็นการประหยัดพลังงานเพราะในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานและความร้อนในการเผาวัตถุดิบและก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ออกมาสู่อากาศ หากสามารถนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ หรือ เถ้าปาล์มน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์โดยรวมลดลงซึ่งเป็นการประหยัดพลังงาน และลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ยังคงได้ปริมาณคอนกรีตจำนวนเท่าเดิม และเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติไม่ด้อยไปกว่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน นำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต
2. เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเหลือใช้ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งได้มาจากกระบวนการผลิตทางเกษตรและอุตสาหกรรมของ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน
3. เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพ และมูลค่าของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ทำให้มีมูลค่าในเชิงพาณิชย์ได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยเพื่อนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีต และงานทำอิฐคอนกรีต เริ่มจากการศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งได้แก่ การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเถ้า ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ศึกษาโครงสร้างระดับอนุภาคโดยการถ่ายภาพขยายกำลังสูง เพื่อพิจารณาคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน ไปใช้งาน พร้อมทำการปรับปรุงคุณสมบัติของเถ้าทั้งสองให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานตามมาตรฐาน ASTM C 618 [2]

หลังจากนั้นนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ เถ้าปาล์มน้ำมัน ไปแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยนำนักวัสดุประสาน ทำการหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์ ทำการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ ศึกษาหาค่าดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ศึกษาอัตราการขยายตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต ศึกษาอัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยนำนักวัสดุประสาน ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และปาล์มน้ำมันเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วนในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยนำนักวัสดุประสาน ทดสอบหาค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต

ศึกษาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมในการทำอิฐคอนกรีตเมื่อใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ หรือ เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน และเปรียบเทียบกับอิฐคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมที่ใช้ทำอิฐ เช่น มอก. 58-2530 และ มอก. 59-2516 เป็นต้น

1.4 เนื้อหาของรายงานวิจัย

ในบทที่ 2 ของงานวิจัยกล่าวถึงเอกสารงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน, ปฏิกริยาปอซโซลาน, กระบวนการกักร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อมอร์ตาร์หรือคอนกรีตและแนวทางการป้องกัน บทที่ 3 กล่าวถึงอุปกรณ์ วัสดุ และการทดสอบต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา เช่น การเตรียมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน การบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน การทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีและคุณลักษณะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และปูนซีเมนต์ การทดสอบการก่อตัวของเพสต์และคอนกรีต การหลอมมอร์ตาร์และคอนกรีต การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต การกักร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีต่อมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน การศึกษาเพื่อพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ไปใช้ในคอนกรีตกำลังสูง การศึกษาเพื่อหาค่าการอัดตัวและค่ากำลังอัดจากปฏิกริยาปอซโซลานของวัสดุทั้ง 2 ชนิด บทที่ 4 เป็นผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลของการศึกษาที่ได้ศึกษาในแต่ละหัวข้อ และบทที่ 5 เป็นบทสรุปผลของการศึกษาและข้อเสนอแนะที่น่าสนใจในการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน จากนั้นตามด้วยเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ใช้ประกอบในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายเป็นภาคผนวกที่แสดงรายชื่อนักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกที่ได้รับการสนับสนุนจากโครงการและรายละเอียดของบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างพิจารณาเพื่อตีพิมพ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

ในบทนี้เป็น การกล่าวถึงความหมายของวัสดุปอซโซลาน ศักยภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์ม น้ำมัน ปฏิริยาปอซโซลาน การกักกร่อนของมอร์ตาร์และคอนกรีตเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตและแนวทางป้องกัน ตลอดจนงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศและต่างประเทศ

2.1 วัสดุปอซโซลาน

วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ตามคำจำกัดความของ ASTM C 618 [2] หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานมีคุณสมบัติของวัสดุประสานน้อยมากหรือไม่มีเลย แต่เมื่อมีความละเอียดที่เหมาะสมและมีความชื้นที่เพียงพอจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่างหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้ดีคล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) โดยทั่วไปวัสดุปอซโซลานที่มีอยู่ในปัจจุบันแบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ วัสดุปอซโซลานธรรมชาติ (Natural Pozzolan) ซึ่งเกิดจากกระบวนการตามธรรมชาติ เช่น เถ้าภูเขาไฟ และดินขาว (Metakaolin) เป็นต้น ส่วนอีกประเภทหนึ่ง คือ วัสดุปอซโซลานสังเคราะห์ (Artificial Pozzolan) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตในงานอุตสาหกรรม เช่น ซิลิกาฟุ้ง เถ้าถ่านหิน และเถ้าแกลบ เป็นต้น [3]

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานนิยมนำมาใช้ในงานคอนกรีตในรูปของการแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านการรับกำลังอัด ความทนทานต่อสารเคมีจากรถบรรทุกหรือซัลเฟต และสามารถลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างลดลง เนื่องจากวัสดุปอซโซลานมักมีราคาถูกกว่าปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดอาจส่งผลดีต่อคอนกรีตแตกต่างกันขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยองค์ประกอบทางแร่ธาตุที่ไม่เป็นผลึกและความละเอียดของวัสดุปอซโซลาน คือ ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี [4]

2.2 ปฏิริยาปอซโซลาน

เมื่อปูนซีเมนต์รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration Reaction) และมีผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่สำคัญ คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ C-A-H)

ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหลังจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์กับน้ำ โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เป็นสารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมินาไตรออกไซด์ (Al_2O_3) ในวัสดุปอซโซลาน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลาน คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอลูมิเนียมไฮเดรต (C-A-H) ซึ่งทั้ง C-S-H และ C-A-H ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานนี้ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น และลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ลง ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น โดยปฏิกิริยาปอซโซลานจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่ออายุประมาณ 7 วัน [5] และทำปฏิกิริยาต่อไปเรื่อยๆ แม้ว่าคอนกรีตมีอายุมากกว่า 3 ปีครึ่งก็ตาม [6]

2.3 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบที่ได้จากโรงสีข้าวและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบต่อเปลือกไม้ก่อนการเผาเท่ากับ 65:35 โดยน้ำหนัก และมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่ประมาณ $800-900^\circ\text{C}$ หลังจากการเผาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จะถูกทิ้งลงตามปล่องทิ้ง และมีการรดน้ำเพื่อลดอุณหภูมิรวมถึงป้องกันการฟุ้งกระจายก่อนขนไปทิ้งยังพื้นที่ทิ้งต่อไป

ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุพลอยได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม ที่ใช้กากของผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เมล็ด เศษกะลา เส้นใย และทลายปาล์มเปล่าของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ $800-1000^\circ\text{C}$ เถ้าปาล์มน้ำมันที่เกิดขึ้นมีการนำมาใช้ประโยชน์น้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละปี ส่วนใหญ่ต้องนำไปทิ้ง ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการกำจัดทิ้งตามมา และเป็นการเสียพื้นที่ในการทิ้งโดยสูญเปล่า นอกจากนั้นยังทำให้เกิดมลภาวะเนื่องจากการฟุ้งกระจายของเถ้าปาล์มน้ำมันอีกด้วย

รูปที่ 2.1 และ 2.2 แสดงกองแกลบและเปลือกไม้ และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่นำมาทิ้งโดยไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ ส่วนรูปที่ 2.3 และ 2.4 แสดงกากของผลปาล์มน้ำมันที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการเผาเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า และบริเวณที่ทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งต้องมีการฉีดน้ำเพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจาย ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 บริเวณที่กองเกลบและเปลือกไม้ก่อนนำไปเผา



รูปที่ 2.2 บริเวณที่ทิ้งเถ้าเกลบ-เปลือกไม้



รูปที่ 2.3 บริเวณที่กองกากของผลปาล์มน้ำมันก่อนนำไปเผา



รูปที่ 2.4 บริเวณที่ทิ้งเถ้าปาล์มน้ำมัน

2.4 การนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้ประโยชน์

งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในงานคอนกรีตมีการศึกษาน้อยมาก โดยชัย และคณะ [7] ได้ศึกษาการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังปรับปรุงคุณภาพโดยการบดในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบดมีคุณสมบัติการเป็นวัสดุปอซโซลานต่ำ แต่หลังจากปรับปรุงคุณภาพโดยการบดละเอียดสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

ได้ดี โดยถ้าเกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดที่มีปริมาณอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 29.07 โดยน้ำหนัก สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ถึงร้อยละ 20 และมีกำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานเมื่อมีอายุ 28 วันขึ้นไป

ส่วนการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตเริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1990 โดย Tay [8] ได้ศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสานเพื่อทำคอนกรีต พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานต่ำ และคอนกรีตที่แทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันมากกว่าร้อยละ 10 มีกำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้มีอนุภาคขนาดใหญ่ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันยังมีความหนาแน่นน้อยกว่าและการดูดซึมน้ำมากกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมด้วย [9]

ในปี ค.ศ. 1996 Hussin และ Awal [10] นักวิจัยชาวมาเลเซียได้ศึกษาการนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน โดยบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ และแทนที่ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 60 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่อื่นๆ และกำลังอัดที่ช่วงอายุก่อน 28 วันมีค่าต่ำ แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติด้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮดรอกซิดริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว [11] ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Awal และ Hussin [12] ยังได้ศึกษาคอนกรีตที่แช่น้ำทะเลโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 30 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการพัฒนา กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แม้ว่าแช่น้ำทะเลเป็นเวลา 2 ปี และจากงานวิจัยของ Ishida และคณะ [13] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการหดตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในคอนกรีต โดยบ่มแท่งคอนกรีตในน้ำเป็นเวลา 7 วัน จากนั้นบ่มในอุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 91 วัน พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 30 มีค่าการหดตัวเท่ากับ 430×10^{-6} ซึ่งมีค่าน้อยกว่าแท่งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่มีค่าการหดตัวเท่ากับ 448×10^{-6}

สำหรับในประเทศไทย สุรพันธ์ และคณะ [14] พบว่าดัชนีกำลังอัดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดละเอียดมากมีค่าสูงกว่าร้อยละ 75 ที่อายุ 7 และ 28 วันตามลำดับ และกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 30 ยังมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานที่อายุ 28 วันขึ้นไป

จากงานวิจัยข้างต้นเห็นได้ว่าการศึกษาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเถ้าปาล์มน้ำมันในต่างประเทศ และเป็นการศึกษาเริ่มต้นเท่านั้น โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันว่าสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ หากมีการปรับปรุงคุณภาพโดยการเพิ่มความ

ละเอียดเสียก่อน แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดและปริมาณการแทนที่ของ แก้วปาล์มน้ำมันต่อคุณสมบัติในการรับกำลังอัด รวมถึงการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตยัง ไม่มีการศึกษาหรือมีน้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย จึงเป็นแนวคิดของการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อเป็น ประโยชน์ในการพัฒนาการใช้แก้วปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตให้เป็นที่รู้จักมากขึ้น

2.5 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของแข็งโดยทั่วไปจะไม่ทำอันตรายต่อคอนกรีต แต่ถ้าอยู่ในรูปของสารละลายจะทำอันตรายต่อคอนกรีตได้มาก เนื่องจากสารละลายซัลเฟตค่อยๆ ซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเนื้อ คอนกรีตและทำปฏิกิริยากับสารประกอบเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการ ขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้ ซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้าง คอนกรีต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี จึงสามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้รุนแรง มากกว่าสารละลายซัลเฟตชนิดอื่นๆ [15-17] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้สารละลายแมกนีเซียม ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเพื่อต้องการให้บรรลุผลในเวลาประมาณ 1 ปี

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) และแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากับสารละลาย แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และได้สารประกอบใหม่ที่ส่งผลทำลายเนื้อคอนกรีต โดยมีกระบวนการกัด กร่อนดังนี้ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ได้ สารประกอบ คือ แคลเซียมซัลโฟลูมินิต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) หรือ Ettringite, แมกนีเซียม ไฮดรอกไซด์ (3Mg(OH)_2) หรือ Brucite และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (2Al(OH)_3) [18]

แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) เกิดเป็นแคลเซียม ซัลเฟต (CaSO_4) หรือยิบซัม (Gypsum) และแคลเซียมซัลเฟต (Gypsum) ที่ได้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียม อลูมินไฮเดรต (C-A-H) ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมินิต (Ettringite)

นอกจากนี้แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ได้สารประกอบ ใหม่ คือ แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) และซิลิกาเจล ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)

แคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ที่เกิดขึ้นยังทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมินิต (Ettringite) และแมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ (Mg(OH)_2) ทำปฏิกิริยากับซิลิกาเจล เกิดเป็นแมกนีเซียมซิลิเกตไฮเดรต ($4\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8.5\text{H}_2\text{O}$ หรือ M-S-H)

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้น แคลเซียมซัลโฟลูมิเนตหรือ Ettringite มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดแรงดันภายใน ส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตเกิดการแตกร้าวในที่สุด นอกจากนี้การสลายตัวของ C-S-H ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานและให้กำลังอัดแก่คอนกรีตไปเป็น M-S-H ที่ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานแทน จึงทำให้คุณสมบัติการรับกำลังของคอนกรีตลดลง

การกัดกร่อนของคอนกรีตเนื่องจากสารละลายเมกนีเซียมซัลเฟต นอกจากทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวแล้วยังทำให้คอนกรีตเกิดการเสื่อมกำลังอัดด้วย ซึ่งแนวทางในการป้องกันสามารถทำได้ดังนี้ [19]

1. การเลือกใช้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3A ต่ำ ซึ่งทำให้ C-A-H ลดลง และเมื่อ C-A-H ลดลงก็จะทำให้ปริมาณการเกิดยิปซัม, Ettringite และ M-S-H ลดลงด้วย นั่นคือการกัดกร่อนของซัลเฟตจึงลดลงตาม เช่น ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นอกจากนี้ปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3S หรืออัตราส่วนของ C_3S/C_2S ต่ำ สามารถต้านทานซัลเฟตได้ดีขึ้น [20, 21]
2. การลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เพื่อให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์โดยคงที่ปริมาณน้ำ การลดปริมาณน้ำโดยคงที่ปริมาณปูนซีเมนต์ หรือทั้งการเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์และลดปริมาณน้ำ ก็จะทำให้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ลดลง แต่การเพิ่มปริมาณปูนซีเมนต์มีผลทำให้การกัดกร่อนสูงขึ้น เนื่องจากปริมาณของ $Ca(OH)_2$ และ C-A-H ที่เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ทำปฏิกิริยากับซัลเฟตเพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ให้ผลดี คือ การลดปริมาณน้ำลง ซึ่งจะมีผลทำให้ความพรุนของคอนกรีตลดลงด้วย การซึมผ่านของซัลเฟตจึงลดลงตาม [22]
3. การใช้สารผสมเพิ่มที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งหลักการป้องกันการกัดกร่อนโดยการใช้วัสดุปอซโซลาน คือ SiO_2 ในวัสดุปอซโซลานทำปฏิกิริยากับ $Ca(OH)_2$ เกิดเป็น C-S-H ทำให้ปริมาณ $Ca(OH)_2$ ลดน้อยลง ดังนั้น $Ca(OH)_2$ ที่จะไปทำปฏิกิริยากับซัลเฟตไดออน (SO_4^{2-}) ของ $MgSO_4$ ซึ่งเกิดเป็นยิปซัม และ Ettringite ที่ทำลายคอนกรีตลดน้อยลงด้วย นอกจากนี้วัสดุปอซโซลานที่มีความละเอียดสูงยังทำหน้าที่เป็นวัสดุอุดช่องว่าง (Filler) ภายในคอนกรีต ทำให้เนื้อคอนกรีตแน่นขึ้น จึงลดการซึมผ่านของสารละลายซัลเฟตที่จะเข้าไปทำอันตรายกับเนื้อคอนกรีตภายใน

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าหากสามารถพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันให้เป็นวัสดุปอซโซลานได้จะทำให้มีทางเลือกของวัสดุปอซโซลานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้หากวัสดุดังกล่าวสามารถใช้เพื่อเพิ่มความทนทานของคอนกรีต เช่น มีความทนทานต่อสารละลายซัลเฟตมากขึ้นหรือมีการซึมผ่านน้ำน้อยลง ย่อมทำให้คุณภาพของคอนกรีตดีขึ้นและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ตลอดจนวิธีการที่ใช้ในการทดสอบและตัวแปรต่างๆ ที่ทำการศึกษาในแต่ละหัวข้อ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

อุปกรณ์และเครื่องมือที่สำคัญที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย

- เครื่องบด (ดูรูปที่ 3.1)
- เครื่องทดสอบกำลังอัด (ดูรูปที่ 3.2)
- เครื่องผสมมอร์ต้าร์
- ชุดทดสอบการไหลของมอร์ต้าร์ (Flow Table)
- ขวดแก้วทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Le Chatelier)
- ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาพื้นที่ผิวจำเพาะของเบลม (Blaine Air Permeability)
- ตะแกรงวิเคราะห์ขนาด
- เครื่องถ่ายภาพกำลังสูง (Scanning Electron Microscope)
- เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle Size Analyzer Microtrac II)
- เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence)
- อุปกรณ์ทดสอบความชื้นเหลือปกติ และระยะเวลาการก่อดำของเพสต์โดยวิธี Vicat Apparatus
- เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อดำของคอนกรีต (ดูรูปที่ 3.3)
- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- แบบหล่อมอร์ต้าร์สำหรับทดสอบกำลังอัดขนาด 5x5x5 ซม. และแบบหล่อแท่งมอร์ต้าร์สำหรับทดสอบการขยายตัวขนาด 2.5x2.5x28.5 ซม.
- แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบกำลังอัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. และแบบหล่อแท่งคอนกรีตสำหรับทดสอบการขยายตัวขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม.
- เครื่องทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (ดูรูปที่ 3.4)
- ตู้อบปรับอุณหภูมิได้
- เครื่องมือวัดการขยายตัวของมอร์ต้าร์และคอนกรีต (ดูรูปที่ 3.5)
- ชุดทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต
- เทอร์โมคัปเปิลสำหรับวัดอุณหภูมิของคอนกรีต
- เครื่องอัดอิฐแบบปรับแรงดันได้ (ดูรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.1 เครื่องบดวัสดุ



รูปที่ 3.2 เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต



รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต



รูปที่ 3.4 เครื่องมือวัดการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต



รูปที่ 3.5 เครื่องมือวัดการขยายตัวของมอร์ต้าร์และคอนกรีต



รูปที่ 3.6 เครื่องอัดอิฐแบบปรับแรงดันได้

3.2 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5
- ทราซสำหรับทำมอร์ตาร์เป็นทรายแม่น้ำนำมาล้างให้สะอาดเพื่อเอาเศษฝุ่นและดินออก แล้วร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ค้างเบอร์ 100
- ทรายหยาบสำหรับทำคอนกรีต
- หินปูนย่อยสำหรับทำคอนกรีต ขนาดโตสุดไม่เกิน 19 มม.
- น้ำประปา
- เถ้าแกลบ-เปลือกไม้
- เถ้าปาล์มน้ำมัน
- แมกนีเซียมซัลเฟตชนิด Commercial Grade
- หินฝุ่นสำหรับทำอิฐคอนกรีต

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ นำมาจากโรงไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยแกลบเป็นวัสดุที่เหลือจากโรงสีข้าว ส่วนเปลือกไม้เป็นวัสดุที่เหลือจากการใช้ไม้ยูคาลิปตัสในการทำเยื่อกระดาษ มีอัตราส่วนระหว่างแกลบและเปลือกไม้ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงก่อนนำเข้าเตาเผาเท่ากับ 64:36 โดยน้ำหนัก มีการควบคุมอุณหภูมิในการเผาที่ประมาณ $800-900^{\circ}\text{C}$ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้จะทิ้งลงมาตามปล่องทิ้งและพรมน้ำเพื่อลดอุณหภูมิและไม่ให้ฝุ่นกระจายก่อนนำไปทิ้งยังบ่อทิ้งต่อไป นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ได้มาแตกให้แห้งก่อนทำการบดให้มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G1R และขนาดอนุภาคที่บดละเอียดมากจนค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G2R

เถ้าปาล์มน้ำมันที่นำมาศึกษาได้จากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มซึ่งใช้กากของผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ประมาณ $800-1000^{\circ}\text{C}$ นำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ออก จากนั้นนำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ใช้สัญลักษณ์ OP มาบดให้มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ คือ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ในช่วงร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G1P และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมากปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์ G2P

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

ทดสอบความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยใช้ขวดทดลองมาตรฐาน Le Chatelier ตามมาตรฐาน ASTM C 188 [23] ซึ่งค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของวัสดุต่อน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุนั้น โดยการทดสอบนี้ใช้น้ำมันก๊าดเป็นของเหลวในการทดสอบเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับวัสดุทดสอบ

ทดสอบน้ำหนักค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (มีขนาดช่องเปิดเท่ากับ 45 ไมโครเมตร) ของเถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ด้วยวิธี Wet Sieve Analysis [24] ซึ่งทำโดยการเอาตัวอย่างมาร่อนผ่านตะแกรงโดยใช้น้ำ เมื่อนำไปอบให้แห้งจะได้ส่วนที่เหลือนบนตะแกรง ซึ่งเป็นน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325

ทดสอบความละเอียดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยวิธี Blaine Air Permeability ตามมาตรฐาน ASTM C 204 [25] เป็นการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface Area) ด้วยการวัดระยะเวลาที่อากาศไหลผ่านวัสดุตัวอย่าง ซึ่งตัวอย่างที่มีความละเอียดสูงระยะเวลาที่อากาศไหลผ่านจะนานกว่าตัวอย่างที่มีความละเอียดต่ำ ค่าที่ทดสอบได้จะอยู่ในรูปของพื้นที่ผิวของวัสดุต่อหน่วยน้ำหนัก (cm^2/g)

วิเคราะห์การกระจายตัวของอนุภาค (Particle Size Distribution) ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยทดสอบด้วยเครื่อง Particle Size Analyzer Microtrac II (Standard Range Analyzer : Model 7997-10 : Size 0.7 to 700 microns)

ถ่ายภาพขยายกำลังสูงของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, เถ้าปาล์มน้ำมัน และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF)

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของเพสต์

ทดสอบความขึ้นเหลวปกติโดยใช้เครื่องมือไวเคต (Vicat Apparatus) เป็นวิธีการทดสอบหาปริมาณน้ำที่เหมาะสมสำหรับเพสต์ เพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานในการทดสอบคุณสมบัติอื่นๆ ของซีเมนต์เพสต์ต่อไป เช่น การทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ โดยพิจารณาจากการจมของเข็มมาตรฐานขนาด

เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เป็นระยะ 10 ± 1 มม. ภายในเวลา 30 วินาที ตามมาตรฐาน ASTM C 187 [26] ซึ่งวิธีการผสมเพสต์เป็นไปตาม ASTM C 305 [27]

ทดสอบหาระยะเวลาการก่อตัว โดยทำการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายตามมาตรฐาน ASTM C 191 [28] ใช้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมจากการทดสอบความชื้นเหลือปกติ ซึ่งการก่อตัวระยะต้น คือ ระยะเวลาที่การจมของเข็มมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มม. เป็นระยะ 25 มม. ภายในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาที่เพสต์แข็งตัวแล้วจนเข็มมาตรฐานไม่สามารถจมลงในเพสต์ด้วยน้ำหนักของตัวเองได้

3.3.4 การทดสอบดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

นำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และทรายแม่น้ำ มาบดเป็น 3 ขนาด โดยขนาดละเอียดมากมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 โดยน้ำหนัก ใช้สัญลักษณ์เป็น FRHB, FPOF และ FGS ตามลำดับ และขนาดละเอียดปานกลางมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 13.5 ± 2 โดยน้ำหนัก (น้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เท่ากับร้อยละ 13.5) โดยใช้สัญลักษณ์เป็น MRHB, MPOF และ MGS ตามลำดับ และขนาดหยาบมีน้ำหนักข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 34 ± 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่ยอมให้ข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 สูงสุดตาม ASTM C 618 [2] สำหรับวัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานมีสัญลักษณ์เป็น LRHB, LPOF และ LGS ตามลำดับ หล่อตัวอย่างมอร์ตาร์ โดยนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และทรายบดทั้ง 3 ขนาดแทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสานอัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายคงที่เท่ากับ 1 : 2.75 โดยน้ำหนัก และกำหนดค่าร้อยละการไหลแผ่ของมอร์ตาร์เท่ากับ 13 ± 5 ของค่าการไหลแผ่ของมอร์ตาร์ควบคุมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.485 (ซึ่งมีค่าการไหลแผ่เท่ากับ 13) ทำการหล่อมอร์ตาร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. และถอดแบบมอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำมอร์ตาร์ไปบ่มในน้ำปูนขาวอิ่มตัว และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

3.3.5 การเตรียมและทดสอบตัวอย่างมอร์ตาร์

การทดสอบหาความสามารถในการไหลตัวของซีเมนต์มอร์ตาร์ และมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 ควบคุมค่าการไหลตัว (Flow) ของมอร์ตาร์ทุกอัตราส่วนผสมให้มีค่าอยู่ระหว่าง 105 ถึง 115 เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างมีค่าความสามารถเท่าได้ (Workability) ใกล้เคียงกัน

การทดสอบกำลังอัดใช้ตัวอย่างมอร์ต้าร์ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. โดยมีมอร์ต้าร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และมอร์ต้าร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสานต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 และควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมของมอร์ต้าร์ให้มีค่าการไหลเผื่ออยู่ในช่วงระหว่าง 105 ถึง 115 ทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นบ่มในน้ำประปา และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ

3.3.6 การเตรียมและทดสอบตัวอย่างคอนกรีต

งานวิจัยนี้ทำการออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว (คอนกรีตควบคุม) ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 300 กก./ซม^2 และแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังบดในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน และควบคุมการยุบตัวของคอนกรีตให้มีค่าระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. ซึ่งอัตราส่วนผสมทั้งหมดของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

การทดสอบหาเวลาการก่อตัวของคอนกรีต (Setting Time of Concrete) ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C 403 [29] มีระยะเวลาสำคัญแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ เวลาการก่อตัวระยะต้นและเวลาการก่อตัวระยะปลาย ซึ่งค่าทั้งสองนี้หาได้จากการวัดค่าแรงต่อพื้นที่ที่ใช้ในการกดหัวกดให้จมลงไปในเนื้อคอนกรีต 2.5 ซม. ที่ระยะเวลาต่างๆ กัน จากนั้นนำค่าแรงกดต่อพื้นที่และระยะเวลาลงผสมมาเขียนกราฟ โดยเวลาการก่อตัวระยะต้นและเวลาการก่อตัวระยะปลาย คือ ระยะเวลาที่แรงต้านทานของคอนกรีตต่อพื้นที่มีค่าเท่ากับ 500 ปอนด์/ตร.นิ้ว (3.50 MPa) และ 400 ปอนด์/ตร.นิ้ว (27.6 MPa) ตามลำดับ

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยมีอัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ โดยทำการทดสอบกำลังอัดคอนกรีตทุกอัตราส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C 39 [30]

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Sample		Mix Proportion by Weight (kg/m ³)						W	W	Slump	
R	P	Cement	R or P	Water		Sand	Coarse Aggregate	C+R	C+P	(cm.)	
				R	P					R	P
CT1		300	0	210		915	1080	0.70		6.5	
CT5		300	0	210		915	1080	0.70		6.5	
OR10	OP10	270	30	225	216	901	1063	0.75	0.72	6.0	6.5
OR20	OP20	240	60	243	231	876	1033	0.81	0.77	8.0	6.0
OR30	OP30	210	90	282	261	832	982	0.94	0.87	8.5	8.0
OR40	OP40	180	120	327	285	796	939	1.09	0.95	7.5	8.0
G1R10	G1P10	270	30	222	216	902	1065	0.74	0.72	8.0	8.0
G1R20	G1P20	240	60	224	219	894	1055	0.74	0.73	7.0	7.5
G1R30	G1P30	210	90	225	219	888	1049	0.75	0.73	6.0	7.0
G1R40	G1P40	180	120	231	222	880	1038	0.77	0.74	5.5	7.0
G2R10	G2P10	270	30	208	204	918	1084	0.69	0.68	5.5	5.5
G2R20	G2P20	240	60	214	210	907	1070	0.71	0.70	5.5	6.0
G2R30	G2P30	210	90	214	213	899	1061	0.71	0.71	5.5	6.0
G2R40	G2P40	180	120	218	216	891	1052	0.72	0.72	6.0	6.0

หมายเหตุ : R หมายถึง เถ้ากลบ-เปลือกไม้ และ P หมายถึง เถ้าปาล์มน้ำมัน

3.3.7 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านการทนของมอร์ต้าร์และคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

การทดสอบหาอัตราการขยายตัวของมอร์ต้าร์และคอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ใช้ตัวอย่างขนาด 2.5x2.5x28.5 ซม. สำหรับตัวอย่างมอร์ต้าร์ และขนาด 7.5x7.5x28.5 ซม. สำหรับตัวอย่างคอนกรีต โดยมีอัตราส่วนผสมเดียวกับตัวอย่างที่ใช้ทดสอบกำลังอัด หลังจากทำการหล่อตัวอย่างเสร็จเป็นเวลา 1 วัน จึงนำตัวอย่างลงแช่ในสารละลายซัลเฟตทันที และวัดอัตราการขยายตัวที่เกิดขึ้นทุกๆ 14 วัน จนตัวอย่างมีอายุครบ 364 วัน วิธีการคำนวณค่าร้อยละการขยายตัวของแท่งตัวอย่างมอร์ต้าร์หรือคอนกรีตแสดงไว้ในสมการที่ 3.1

$$\Delta L = \frac{(L_x - L_i)}{L_g} \times 100 \quad (3.1)$$

- เมื่อ ΔL คือ ร้อยละการขยายตัว
- L_x คือ ค่าการวัดที่เวลาใดๆ เปรียบเทียบกับแท่งเหล็กมาตรฐาน (Reference Bar)
- L_i คือ ค่าเริ่มต้นที่วัดหลังการถอดแบบ (อายุ 1 วัน)
- เปรียบเทียบกับแท่งเหล็กมาตรฐาน (Reference Bar)
- L_g คือ ค่าความยาวแท่งตัวอย่างหลังจากหักความยาวเนื้อที่ฝังภายในออกแล้ว

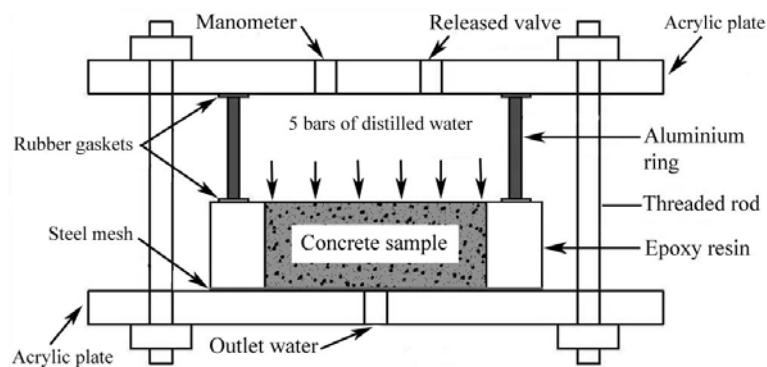
3.3.8 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยในหัวข้อนี้คือ การศึกษาสัมประสิทธิ์ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีต ซึ่งสัมประสิทธิ์ค่าการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตสามารถเป็นดัชนีบ่งชี้ถึงคุณสมบัติหลายด้านของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือคุณสมบัติในเรื่องความทนทานของคอนกรีตเนื่องจากกระบวนการที่บั่นทอนความแข็งแรงของคอนกรีต เช่น การกัดกร่อนของสารเคมีต่างๆ การเป็นสนิมของเหล็กที่เสริมอยู่ในเนื้อคอนกรีต ฯลฯ เกิดจากสารละลายที่เป็นของเหลวหรือน้ำเป็นตัวกลาง และมีสารเคมีละลายอยู่ซึมผ่านหรือเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อคอนกรีต ในการศึกษาที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปลาล้วนน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ซึ่งส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

การทดสอบใช้ตัวอย่างคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. ที่อายุ 28 วัน โดยนำคอนกรีตที่ครบอายุการทดสอบมาตัดแบ่งส่วนตามขวางที่ตำแหน่งตรงกลางของก้อนตัวอย่างคอนกรีตให้มีความสูง 4 ซม. ทำการขัดผิวด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีตโดยรอบ และทำความสะอาดตัวอย่างคอนกรีตให้ปราศจากฝุ่น ทำให้ผิวตัวอย่างแห้งโดยการนำไปตากแดดประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นทำการหล่ออีพอกซีบริเวณด้านข้างของก้อนตัวอย่างให้มีความหนา 2.5 ซม. และสูง 4 ซม. โดยรอบก้อนคอนกรีต ต้องระวังไม่ให้อีพอกซีสัมผัสกับผิวด้านบนและด้านล่างของก้อนตัวอย่างเนื่องจากมีผลต่อการทดสอบ ทำได้โดยใช้กระดาษกาวปิดผิวทั้งสองด้านของก้อนตัวอย่างให้สนิทและไม่มีฟองอากาศ หลังจากทำการหล่ออีพอกซีเป็นเวลา 24 ชั่วโมงจึงทำการแกะแบบและปล่อยให้อีพอกซีแข็งตัวเป็นเวลา 1 วัน จึงนำก้อนตัวอย่างที่หล่ออีพอกซีแล้วมาประกอบกับเซลล์ทดสอบดังรูปที่ 3.7 แล้วจึงนำไปประกอบกับเครื่องมือทดสอบหาค่าการซึมผ่านน้ำ (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) จากนั้นทำการอัดน้ำที่ความดัน 0.5 MPa ให้ไหลผ่านคอนกรีต วัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกับเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการใช้สมการของความต่อเนื่องและทฤษฎีการไหลของดาร์ซี ซึ่งแสดงในสมการที่ 3.2

$$K = \frac{\rho L g Q}{P A} \quad (3.2)$$

เมื่อ	K	=	ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต (m/s)
	ρ	=	ความหนาแน่นของน้ำ (kg/m ³)
	g	=	แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s ²)
	Q	=	อัตราการไหลแบบคงที่ (m ³ /s)
	L	=	ความหนาหรือความสูงของก้อนตัวอย่าง (m)
	P	=	แรงดันน้ำที่ไหลผ่านก้อนตัวอย่างคอนกรีต (kg.m/sec ²)/(m ²)
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (m ²)



รูปที่ 3.7 เซลล์ทดสอบค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

3.3.9 การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตกำลังสูง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในการทำคอนกรีตกำลังสูงที่ต้องการกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 700 กก/ซม² ทุกส่วนผสมของคอนกรีตกำหนดให้มีปริมาณวัสดุประสานเท่ากับ 560 กก/ซม³ แทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดบดละเอียดมากในปูนซีเมนต์ที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน อัตราส่วนทรายต่อหินเท่ากับ 45:55 โดยปริมาตร อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานคงที่เท่ากับ 0.28 และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับค่ายุบตัวของคอนกรีตให้มีค่าอยู่ระหว่าง 20 ± 2.5 ซม. เมื่อหล่อคอนกรีตเสร็จแล้วทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน และนำไปบ่มในน้ำประปาตลอดเวลา ซึ่งอัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงแสดงในตารางที่ 3.2

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม. สูง 20 ซม. โดยมีอัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10, 20, และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 7, 28, 60, 90 และ 180 วัน ตามลำดับ

การทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (E) ของคอนกรีตกำลังสูง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการหดตัวของคอนกรีต การทดสอบทำโดยใช้ตัวอย่างที่มีขนาดเดียวกับการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต และติดตั้ง Compressometer เข้ากับตัวอย่าง ทำการให้น้ำหนักกับก้อนตัวอย่างพร้อมกับอ่านค่าการหดตัว ซึ่งการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM C 469 [31]

การทดสอบหาความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ใช้แบบหล่อคอนกรีตขนาด 35x35x35 ซม. ที่มีฉนวนหุ้มกันความร้อนแต่ละด้านหนา 5 ซม. และทำการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermo Couple) ไว้ที่กึ่งกลางก้อนคอนกรีตเพื่อวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.8 ทำการวัดอุณหภูมิเป็นระยะๆ จนคอนกรีตมีอายุครบ 168 ชั่วโมง (หรือ 7 วัน) ด้วยเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (ดูรูปที่ 3.9)

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

Sample	Mix Proportion (kg/m ³)								Slump (cm)
	OPC	G2R	G2P	Sand	C-Agg	Water	Super P.	W/C	
Control	560	-	-	764	981	152.9	7.9	0.28	20
RHBA10	504	56	-	754	968	152.9	7.9	0.28	20
RHBA20	448	112	-	745	956	152.3	9.0	0.28	20.5
RHBA30	392	168	-	735	943	150.0	13.5	0.28	22
POFA10	504	-	56	757	971	152.6	8.5	0.28	20
POFA20	448	-	112	749	962	150.9	11.8	0.28	18.5
POFA30	392	-	168	742	952	148.3	16.9	0.28	18.5



รูปที่ 3.8 แบบหล่อหุ้มฉนวนและการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ล

รูปที่ 3.9 หน้าจอสำหรับอ่านค่าอุณหภูมิ

3.3.10 การทดสอบคุณสมบัติของอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

ในการศึกษาหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาอัตราการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพื่อใช้เป็นส่วนผสมของอิฐคอนกรีต โดยมีเป้าหมายกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่อายุ 28 วัน ไม่น้อยกว่า 400 กก/ชม² ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมคอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น มอก. 827-2531 [32] เครื่องอัดอิฐคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถอัดอิฐคอนกรีตให้มีขนาดเท่ากับ 10x20x6 ซม. และสามารถควบคุมความดันในการอัดขึ้นรูป โดยมีมาตรวัดความดันเป็นตัวควบคุมความดันในการอัดขึ้นรูปอิฐคอนกรีต (ดังแสดงในรูปที่ 3.6)

อิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการศึกษานี้ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานต่อทรายต่อหินเกล็ด เท่ากับ 1 : 3 : 3 โดยน้ำหนัก และเพิ่มส่วนละเอียดของมวลรวมด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ชนิด GR ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ และอัดอิฐคอนกรีตด้วยแรงดัน 50 กก/ชม² สำหรับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ใช้ในการทดสอบนี้มีค่าเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 0.60, 0.65, 0.70, และ 0.80 ตามลำดับ เพื่อศึกษาว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานใดบ้างที่ทำให้กำลังอัดของอิฐคอนกรีตไม่น้อยกว่า 400 กก/ชม² ที่อายุ 28 วัน ส่วนผสมของอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้แสดงในตารางที่ 3.3

สำหรับอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันใช้อัตราส่วนผสมระหว่างวัสดุประสานต่อทรายต่อหินเกล็ด เท่ากับ 1 : 3 : 3 โดยน้ำหนัก มีอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 0, 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แปรอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานระหว่าง 0.40 ถึง 0.75 โดยแปรผันตามค่าร้อยละการแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันในปูนซีเมนต์ ส่วนผสมของอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของอิฐคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

Sample	W/B Ratio	Mix Proportion (kg/m ³)			
		OPC	Rice Husk-Bark Ash	Sand	Crushed Agg.
60GR50	0.60	192	192	1,150	1,150
65GR50	0.65	192	192	1,150	1,150
70GR50	0.70	192	192	1,150	1,150
70GR80	0.80	192	192	1,150	1,150

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของอิฐคอนกรีตเมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

Sample	W/B Ratio	Mix Proportion (kg/m ³)			
		OPC	Palm Oil Fuel Ash	Sand	Crushed Agg.
CON	0.40, 0.45, 0.50	310	0	930	930
GP20	0.50, 0.55, 0.60	248	202	930	790
GP30	0.55, 0.60, 0.65	217	233	930	790
GP40	0.60, 0.65, 0.70	186	264	930	790
GP50	0.65, 0.70, 0.75	155	295	930	790

สาเหตุที่ต้องแปรค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน เนื่องจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้แทนที่บางส่วนในปูนซีเมนต์มีแนวโน้มจะใช้น้ำในส่วนผสมมากกว่ากรณีที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว ดังนั้นการแปรวัสดุประสานจากค่ามาสูงจะทำให้ได้ปริมาณน้ำที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปอิฐคอนกรีตในแต่ละส่วนผสม ซึ่งหลังจากทำการอัดอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อขึ้นรูปแล้วจึงทำการทดสอบกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่อายุ 7 และ 28 วัน

3.4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เนื่องจากตัวอย่างที่ใช้ทดสอบในการศึกษานี้ได้แยกออกเป็นหลายประเภท ดังนั้นจึงได้กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละประเภทเพื่อให้เกิดความชัดเจน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน	
Control	มอร์ตาร์ควบคุม
RHB	เถ้าแกลบ-เปลือกไม้
POF	เถ้าปาล์มน้ำมัน
GS	ทรายบด
F	วัสดุขนาดละเอียดมากมีน้ำหนักร้อยละ 325 เท่ากับร้อยละ 5±2 โดยน้ำหนัก
M	วัสดุขนาดละเอียดปานกลางมีน้ำหนักร้อยละ 325 เท่ากับร้อยละ 13.5±2 โดยน้ำหนัก
L	วัสดุขนาดหยาบมีน้ำหนักร้อยละ 325 เท่ากับร้อยละ 34±2 โดยน้ำหนัก

การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีต และการซึมน้ำของคอนกรีต	
CT {1, 5}	มอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว
O, G1, G2	ขนาดความละเอียดของเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดหยาบที่ไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพ, เถ้ากลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลาง ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดให้มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ร้อยละ 15-20 โดยน้ำหนัก และขนาดละเอียดมาก มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
R, P	เถ้ากลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามลำดับ
10, 20, 30, 40	ปริมาณการแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ
การศึกษาคอนกรีตกำลังสูง	
Control	คอนกรีตกำลังสูงที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว
RHBA, POFA	เถ้ากลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน ขนาดละเอียดมากมีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ
10, 20, 30	ปริมาณการแทนที่ในปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ตามลำดับ
การศึกษาอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้	
CON	อิฐคอนกรีตควบคุม
GR	เถ้ากลบ-เปลือกไม้บดละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
60GR50, 65GR50, 70GR50, 80GR50	อิฐคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบ-เปลือกไม้ GR ในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ของอิฐคอนกรีตเท่ากับ 0.60, 0.65, 0.70 และ 0.80 ตามลำดับ
การศึกษาอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	
CON	อิฐคอนกรีตควบคุม
GP	เถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
GP20, GP30, GP40, GP50	อิฐคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน GP ในอัตราส่วนร้อยละ 20, 30, 40 และ 50 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้ตลอดจนการวิเคราะห์ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมัน การใช้ถั่วแกลบ-เปลือกไม้ในการแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อหล่ออมอร์ต้าร์และคอนกรีต และผลกระทบของการใช้ถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันต่อปริมาณน้ำที่ใช้ผสม กำลังอัด การขยายตัวของแท่งอมอร์ต้าร์และคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต การใช้ถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันในการผลิตอิฐคอนกรีต และศักยภาพของการใช้ถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตกำลังสูง

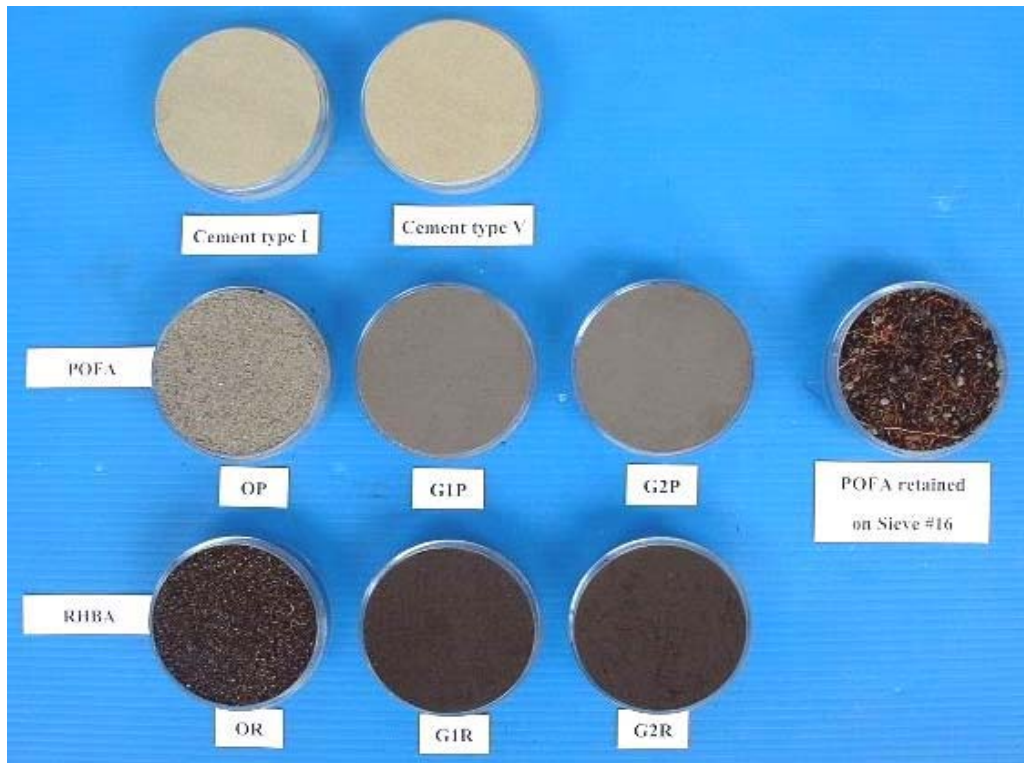
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมัน

คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ ถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมัน เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญและมีผลกระทบต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตโดยตรง เช่น ความสามารถในการเท, ความต้องการน้ำ, กำลังอัด และความทนทานของคอนกรีต เป็นต้น ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, ถั่วแกลบ-เปลือกไม้ และถั่วปาล์มน้ำมัน

4.1.1 ลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุ

รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะทั่วไปและสีของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีสีเทาอ่อนใกล้เคียงกันมาก ส่วนถั่วแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด (OR) มีลักษณะหยาบมากสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า มีสีดำ และสีขาวปะปนเล็กน้อย และหลังบดละเอียดถั่วแกลบ-เปลือกไม้ (G1R และ G2R) มีสีดำเข้มมากกว่าถั่วปาล์มน้ำมัน (G1P และ G2P) และส่วนที่เป็นสีขาวหายไป

ส่วนถั่วปาล์มน้ำมันที่ได้จากโรงงาน โดยตรงมีลักษณะค่อนข้างหยาบ และมีบางส่วนที่ไม่ได้ถูกเผาปะปน เช่น เส้นใย และเมล็ด จึงนำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 ก่อนนำไปบด โดยสีของถั่วปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) มีสีเทาและสีดำปะปนทำให้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนที่เป็นสีดำมีลักษณะคล้ายถ่านหรือคาร์บอนซึ่งเกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ แต่หลังจากบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น (G1P และ G2P) สีของถั่วปาล์มน้ำมันมีสีเทาออกดำและเข้มขึ้นตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น เพราะว่าส่วนที่เป็นคาร์บอนได้ถูกบดพร้อมกับเนื้อถั่วปาล์มน้ำมันทำให้สีของถั่วปาล์มน้ำมันหลังบดมีสีค่อนข้างดำ และเป็นเนื้อเดียวกัน

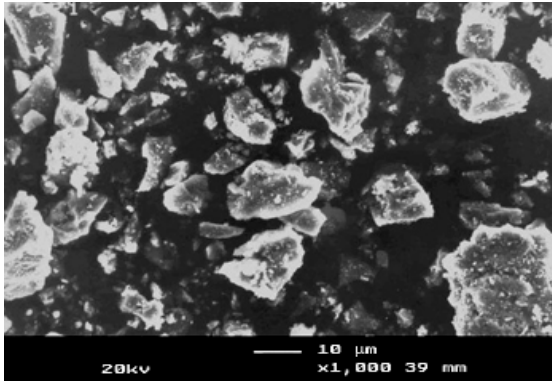


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, ถ้ำปาล์มน้ำมัน และถ้ำเกลบ-เปลือกไม้

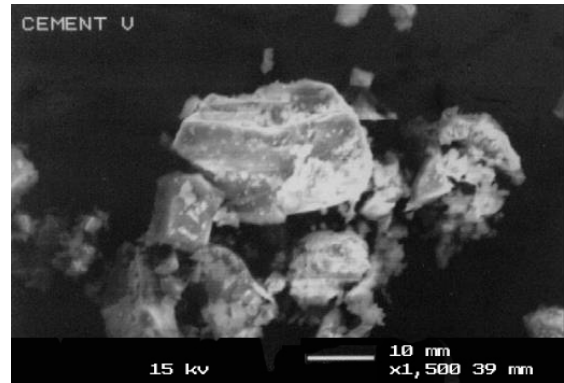
4.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 แสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ พบว่ามีลักษณะรูปร่างคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และมีเนื้อแน่น รูปที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงลักษณะอนุภาคของถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังบด พบว่าถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด (OR) มีลักษณะหยาบสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า รูปร่างเป็นเหลี่ยมมุม ผิวขรุขระ และความพรุนสูง ส่วนถ้ำเกลบ-เปลือกไม้หลังบด G1R และ G2R อนุภาคมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน และมีผิวขรุขระเหมือนถ้ำเกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด

สำหรับลักษณะอนุภาคของปาล์มน้ำมันแสดงในรูปที่ 4.7 ถึง 4.9 โดยถ้ำปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) มีลักษณะรูปร่างโดยรวมค่อนข้างหยาบ ความพรุนสูง รูปร่างกลมมนติดต่อกันเป็นกลุ่มก้อน และขนาดไม่สม่ำเสมอ ส่วนถ้ำปาล์มน้ำมันหลังบด G1P และ G2P มีลักษณะอนุภาคคล้ายกัน คือ เป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน อนุภาคมีขนาดและความพรุนลดลงเมื่อเทียบกับถ้ำปาล์มน้ำมัน OP แต่อย่างไรก็ตาม ถ้ำปาล์มน้ำมัน G1P ยังคงมีอนุภาคบางส่วนที่มีรูปร่างกลมมน และมีความพรุนปะปนอยู่ ทั้งนี้เกิดจากอนุภาคนาโนเล็กของถ้ำปาล์มน้ำมัน OP ไม่ถูกบด



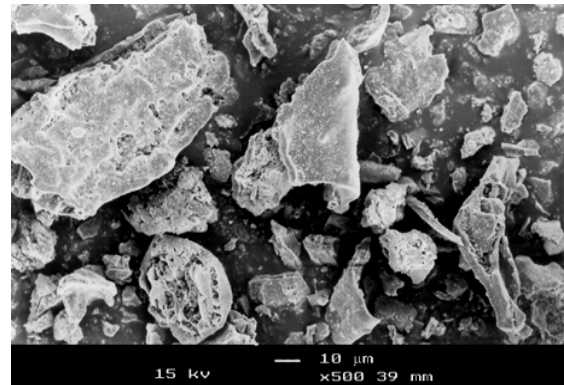
รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์
พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



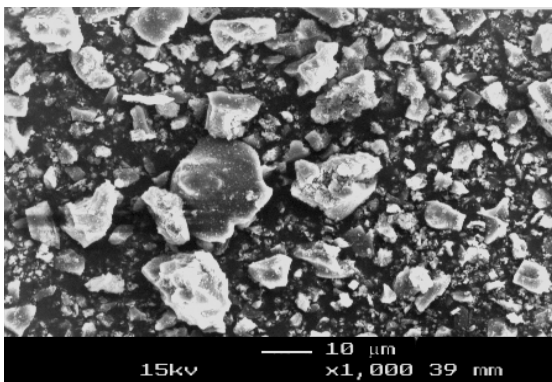
รูปที่ 4.3 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์
พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



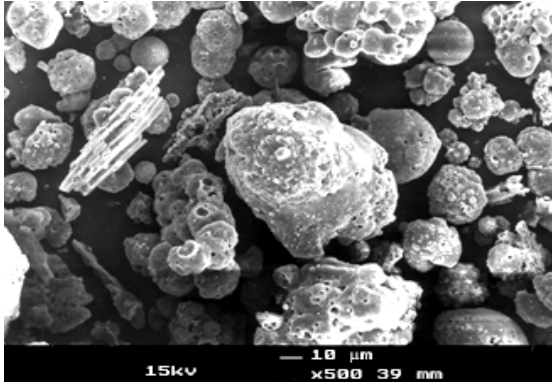
รูปที่ 4.4 ภาพขยายอนุภาคแก้ว-เปลือกไม้ OR



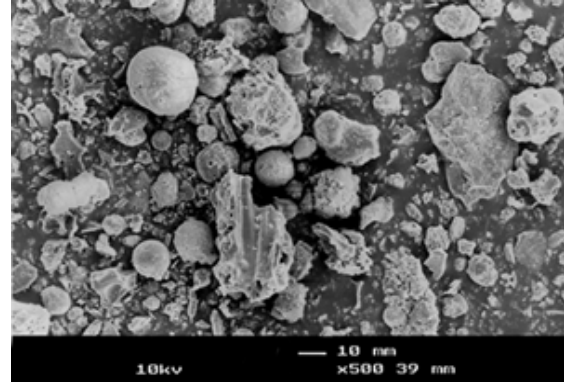
รูปที่ 4.5 ภาพขยายอนุภาคแก้ว-เปลือกไม้ GIR



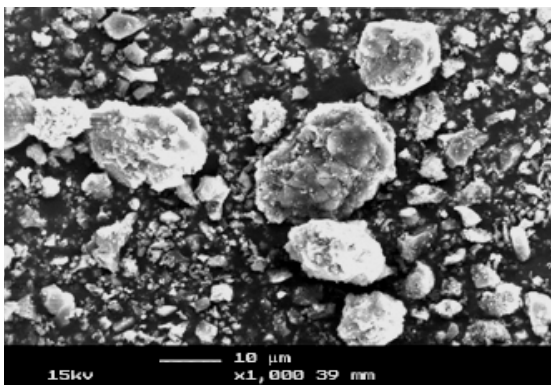
รูปที่ 4.6 ภาพขยายอนุภาคแก้ว-เปลือกไม้ G2R



รูปที่ 4.7 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



รูปที่ 4.8 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.9 ภาพขยายอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

4.1.3 ความถ่วงจำเพาะ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และ 3.17 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในเกณฑ์ปกติทั่วไปของปูนซีเมนต์ คือ มีค่าอยู่ระหว่าง 3.00 ถึง 3.20 [3] ส่วนความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR, G1R และ G2R มีค่าเท่ากับ 2.03, 2.10 และ 2.15 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านมาของ ชัย และคณะ [7] ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.89 ถึง 2.24 และมีค่าไม่แตกต่างจากเถ้าแกลบที่มีค่าเท่ากับ 2.18 [33] นอกจากนี้เห็นได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R มีค่าเพิ่มขึ้นจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ตามความละเอียดที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้ว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบดมีความพรุน และเมื่อบดให้ละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถลดความพรุนของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ได้เป็นอย่างดี ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น

ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.97, 2.17 และ 2.33 ตามลำดับ เห็นได้ว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความถ่วงจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีความพรุนและมีโพรงอากาศภายในอนุภาคสูง (เห็นได้ชัดจาก

ภาพถ่ายขยายอนุภาคในรูปที่ 4.7) แต่เมื่ออบแล้วทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความพรุนแตกออกเป็นอนุภาคที่มีขนาดเล็กลง รุพรุนจึงน้อยลง ส่งผลให้ค่าความถ่วงจำเพาะเพิ่มขึ้น [34] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของ Jaturapitakkul และ Cheerarot [35] ที่พบว่าการอบไม่เพียงแต่ลดขนาดอนุภาคของวัสดุ แต่ยังสามารถลดความพรุนได้ด้วย

ตารางที่ 4.1 ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ

Sample	Specific Gravity	Retained on Sieve No. 325 (%)	Blaine Fineness (cm ² /g)	Median Particle Size, d ₅₀ (micron)
Cement Type I	3.14	N/A	3,630	14.65
Cement Type V	3.17	N/A	4,440	7.50
OP	1.97	41.23	N/A	65.62
G1P	2.17	17.11	6,990	19.91
G2P	2.33	1.53	12,220	10.18
OR	2.03	68.70	N/A	75.26
G1R	2.10	16.86	7,180	27.45
G2R	2.15	1.92	11,800	10.89

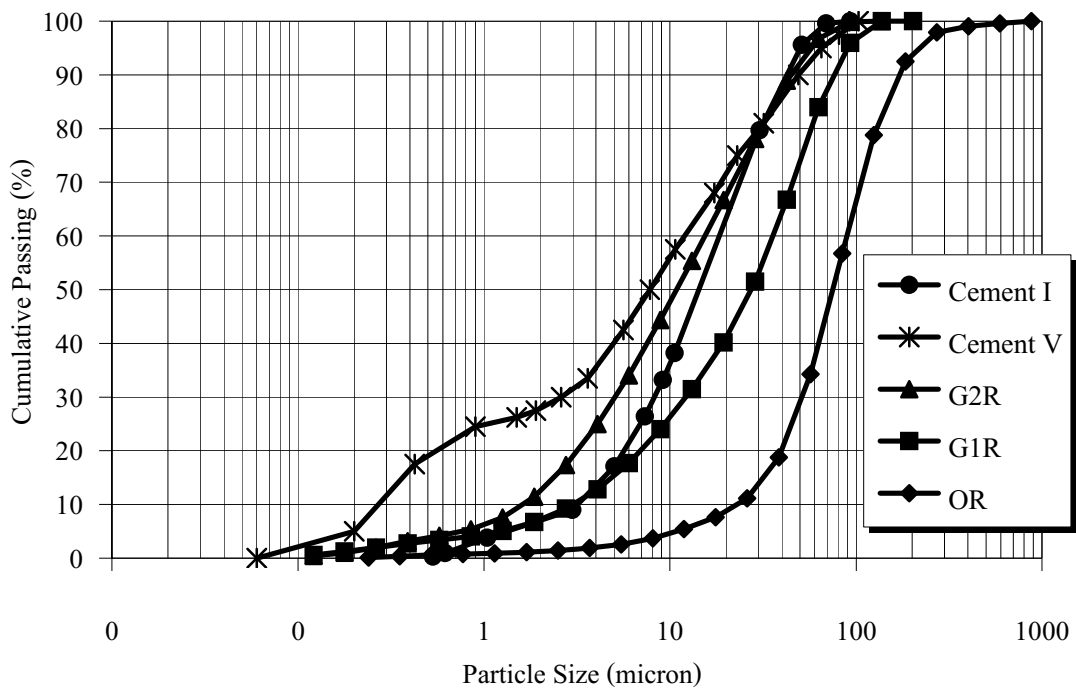
หมายเหตุ : N/A = Not Applied

4.1.4 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

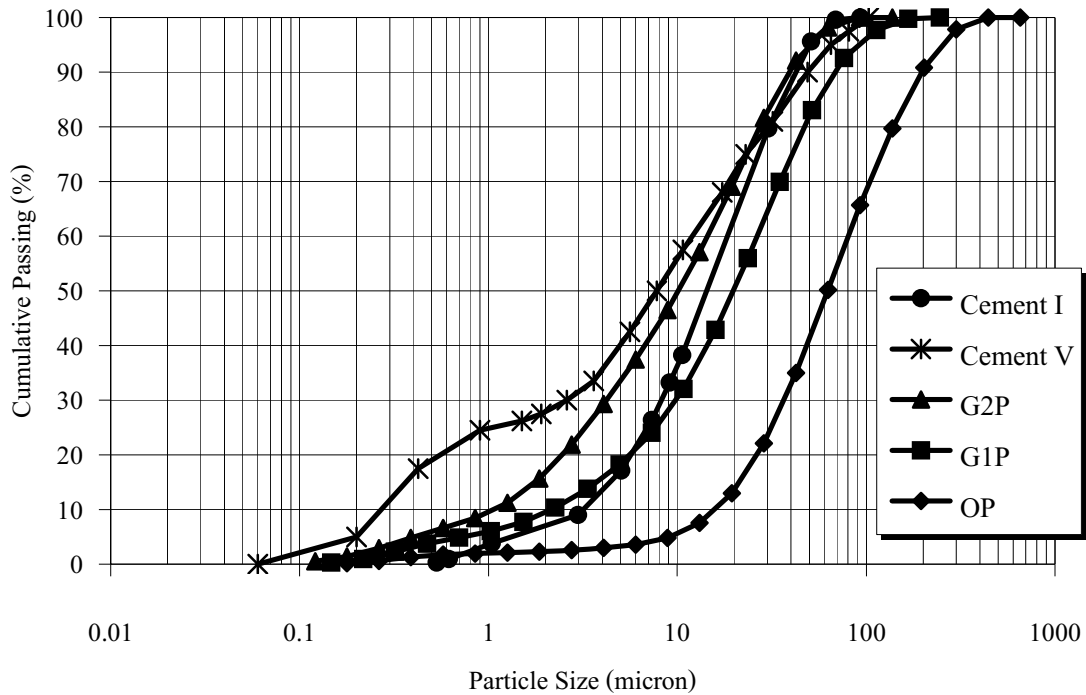
ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ และตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 40 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.65 ไมครอน ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 0.3 ถึง 50 ไมครอน ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างอนุภาคขนาดเล็กกับขนาดใหญ่ค่อนข้างสูง แต่อย่างไรก็ตามขนาดอนุภาคเฉลี่ยของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ยังมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ มีค่าเท่ากับ 7.50 ไมครอน

ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนบด (OR) พบว่ามีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 25 ถึง 180 ไมครอน มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 75.62 ไมครอน แต่หลังจากการบดทำให้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงเท่ากับ 27.45 และ 10.89 ไมครอน และมีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 80 และ 2 ถึง 40 ไมครอน สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ตามลำดับ

สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 15 ถึง 200 ไมครอน ซึ่งมีการกระจายตัวของอนุภาคขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทั้งสองประเภทอย่างมาก เห็นได้ชัดจากเส้นกราฟการกระจายตัวที่มีลักษณะค่อนข้างชันไปทางด้านขวา และเมื่อพิจารณาขนาดอนุภาคเฉลี่ย พบว่ามีขนาดเท่ากับ 65.62 ไมครอน ซึ่งใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มาก แต่หลังปรับปรุงคุณภาพโดยการบด พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีการกระจายตัวของอนุภาคแคบลง และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กลงใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 2 ถึง 70 และ 1 ถึง 40 ไมครอน และขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.91 และ 10.18 ไมครอน ซึ่งลดลงจากเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ประมาณ 3 และ 6 เท่า ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



รูปที่ 4.11 การกระจายตัวอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.1.5 ความละเอียด

เมื่อพิจารณาความละเอียดของวัสดุโดยการหาปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 (ขนาดช่องเปิด 45 ไมครอน) (แสดงในตารางที่ 4.1) พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีค่าเท่ากับร้อยละ 68.70 ซึ่งสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [2] อยู่มาก ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R มีปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงลดลงจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR อย่างมาก คือมีค่าเท่ากับร้อยละ 16.86 และ 1.92 และมีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 7,180 และ 11,800 ซม²/ก ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เนื่องจากมีอนุภาคนขนาดใหญ่ ทำให้อากาศไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะสมสำหรับการหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลน

เถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P มีปริมาณอนุภาคที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 41.23, 17.11 และ 1.53 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่ค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 มีค่าสูงกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [2] กำหนดไว้ คือ ไม่เกินร้อยละ 34 สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีของเบลน พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 3,630 และ 4,440 ซม²/ก ในขณะที่เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าปูนซีเมนต์ถึง 2 และ 3 เท่า คือ มีค่าเท่ากับ 6,990 และ 12,220 ซม²/ก ตามลำดับ แสดงให้

เห็นว่าเมื่อทำการบดเจ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น นอกจากสามารถลดขนาดอนุภาคได้แล้วยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุด้วย ส่วนเจ้าปาล์มน้ำมัน OP เนื่องจากมีอนุภาคที่ใหญ่และความพรุนสูง จึงไม่สามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะได้เช่นเดียวกับเจ้าเกลบ-เปลือกไม้ และเมื่อพิจารณาความละเอียดของเจ้าเกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันพบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ ความละเอียดมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคที่เล็กลง นอกจากนี้พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุทั้งสองหลังการบดมีค่าแตกต่างกันมากนักเช่นเดียวกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย

สังเกตว่าเจ้าเกลบ-เปลือกไม้และปาล์มน้ำมันหลังบดทั้งสองขนาด (G1 และ G2) มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะสูงมาก ในขณะที่ค่าความถ่วงจำเพาะต่ำกว่าปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยยังมีค่าใกล้เคียงและใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ประกอบกับภาพถ่ายขยายอนุภาคของวัสดุทั้งสอง แสดงให้เห็นได้ว่าอนุภาคมีความพรุนเหลืออยู่ ดังนั้นพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นอาจรวมถึงพื้นที่ผิวที่เกิดจากโพรงอากาศภายในอนุภาคของเจ้าปาล์มน้ำมันและเจ้าเกลบ-เปลือกไม้ ซึ่งแตกต่างจากปูนซีเมนต์ที่อนุภาคมีเนื้อแน่นกว่า ค่าพื้นที่ผิวที่เกิดขึ้นจึงเป็นพื้นที่ผิวโดยรอบของอนุภาคมากกว่าเป็นพื้นที่ผิวที่เกิดจากโพรงอากาศภายในอนุภาค ด้วยสาเหตุนี้จึงทำให้เจ้าทั้งสองมีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่สูงเมื่อเทียบกับปูนซีเมนต์

4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 65.41 และ 62.43 ตามลำดับ สำหรับร้อยละของ MgO, SO_3 และค่า LOI ตามที่มาตรฐาน ASTM C 150 [36] กำหนดไว้ต้องไม่เกินร้อยละ 6, SO_3 ต้องไม่เกินร้อยละ 3.5 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และไม่เกินร้อยละ 2.3 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 และค่า LOI ต้องไม่เกินร้อยละ 3 เห็นได้ว่าปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ทั้งหมด และเมื่อพิจารณาสารประกอบเคมีหลักของปูนซีเมนต์ ซึ่งคำนวณตามสมการของ Bogue [36] พบว่าปริมาณ C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 6.84 ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่มีเลย ส่วนปริมาณ C_3S และ C_2S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 62.86 และ 12.50 และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีค่าเท่ากับร้อยละ 51.22 และ 24.87 ตามลำดับ เห็นได้ว่าปริมาณ C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าสูงกว่าประเภทที่ 5 อยู่มาก แต่มีปริมาณ C_2S ต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ถึง 1 เท่าตัว

สำหรับเจ้าเกลบ-เปลือกไม้ พบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 74.84 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับองค์ประกอบทางเคมีของเจ้าเกลบที่มีปริมาณ SiO_2 เท่ากับร้อยละ 78.22 [33] และเมื่อ

พิจารณาตามมาตรฐาน ASTM C 618 [2] พบว่าผลรวมของปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 75.88 มีปริมาณ SO_3 เท่ากับร้อยละ 0.47 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 4 อยู่มาก และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูงกว่าร้อยละ 10 เพียงเล็กน้อย คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 11.21 ซึ่งอาจอนุญาตให้สามารถจัดเป็นวัสดุพอลิโซลัน Class N

ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่ามีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 65.30 มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 2.56 และ 1.98 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าแตกต่างจากงานศึกษาที่ผ่านมาของ Tay [8] ที่พบว่ามีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 34.3, 24.6 และ 14.9 ตามลำดับ และยังแตกต่างจากงานศึกษาของ Hussin และคณะ [10] ที่มีปริมาณ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 43.6, 11.4 และ 4.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าเถ้าปาล์มน้ำมันแต่ละแหล่งมีความเปลี่ยนแปลงทางเคมีสูง ทั้งนี้อาจเนื่องจากอุณหภูมิและวิธีการที่ใช้ในการเผต่างกัน และเมื่อพิจารณาเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่ามีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 69.84 มีปริมาณ SO_3 เพียงร้อยละ 0.47 และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss On Ignition, LOI) เท่ากับร้อยละ 10.05 ซึ่งเมื่อพิจารณาด้านองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมันแล้วตามมาตรฐาน ASTM C 618 [2] สามารถจัดเป็นวัสดุพอลิโซลัน Class N ได้เช่นเดียวกับเถ้ากลบ-เปลือกไม้

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าปาล์มน้ำมัน, เถ้ากลบ-เปลือกไม้ และเถ้าถ่านหินแม่เมาะ (FM) ที่ได้จากการศึกษาของรัฐพล [37] พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้ากลบ-เปลือกไม้ ซึ่งเป็นเถ้าที่เกิดจากการเผาชีวมวลทางการเกษตรส่วนใหญ่มีปริมาณ SiO_2 สูง แต่มีปริมาณ CaO ต่ำกว่าเถ้าถ่านหินแม่เมาะอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาของเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้ากลบ-เปลือกไม้ต่างมีปริมาณที่สูงมาก ซึ่งแตกต่างจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะที่มีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาเพียงร้อยละ 1.24 เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าถ่านหินแม่เมาะมีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงประมาณ 1200°C ทำให้มีการเผาไหม้ที่สมบูรณ์กว่าเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้ากลบ-เปลือกไม้ที่มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเผต่ำประมาณ $800-900^\circ\text{C}$

สำหรับสาเหตุที่วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเฉพาะเถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดบดละเอียดมาก (G2P และ G2R) เท่านั้น แต่ไม่วิเคราะห์เถ้ากลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดอื่น เพราะการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเปลี่ยนแปลงมากนัก [34, 38]

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	Cement Type I	Cement Type V	POFA (G2P)	RHBA (G2R)	FM [36] (C2F)
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.90	22.15	65.30	74.84	40.51
Aluminium Trioxide (Al_2O_3)	4.76	3.51	2.56	0.23	21.60
Iron Oxide (Fe_2O_3)	3.41	5.57	1.98	0.81	12.27
Calcium Oxide (CaO)	65.41	62.43	6.42	5.91	14.80
Magnesium Oxide (MgO)	1.25	0.99	3.08	0.57	3.02
Sodium Oxide (Na_2O)	0.24	0.06	0.36	0.17	0.94
Potassium Oxide (K_2O)	0.35	0.17	5.72	2.00	2.99
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.71	1.07	0.47	0.47	1.75
Loss On Ignition (LOI)	0.99	1.69	10.05	11.21	1.24
Tricalcium Silicates (C_3S)	62.86	51.22	-	-	-
Dicalcium Silicates (C_2S)	12.50	24.87	-	-	-
Tricalcium Aluminate (C_3A)	6.84	0.00	-	-	-
Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF)	10.38	16.95	-	-	-

หมายเหตุ : LOI ที่ระบุใน ASTM C 618 [10] ให้มีไม่เกินร้อยละ 10 ซึ่งพบว่าเจ้าปาล์มน้ำมัน และเจ้าแกลบ-เปลือกไม้มี LOI เกินไปเล็กน้อย

4.3 คุณสมบัติของเพสต์

4.3.1 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.3 แสดงปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีความละเอียดและร้อยละการแทนที่ต่างกัน พบว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติเท่ากับร้อยละ 25.9 ซึ่งน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ CT5 ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 27.1 เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้ต้องการปริมาณน้ำมากกว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 เล็กน้อย

ส่วนเพสต์ที่มีเจ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังบดเป็นส่วนผสมให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติมากกว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น โดยเพสต์ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน OP มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติอยู่ในช่วงร้อยละ 29.9 ถึง 39.8 เมื่อแทนที่เจ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 ถึง 40 ตามลำดับ ขณะที่เพสต์ผสมเจ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติอยู่ในช่วงร้อยละ 27.3 ถึง 31.9 และ 26.6 ถึง 30.9 ตามลำดับ เห็นได้ว่าเพสต์ผสม

เถาปลัมน้ำมันที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเถาปลัมน้ำมันที่ผ่านการบดสามารถลดโพรงและรูพรุนที่ดูดซึมน้ำให้น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตรา การแทนที่เดียวกัน เมื่อเพิ่มความละเอียดเถาปลัมน้ำมันจาก OP ให้เป็น G1P ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลว ปกติของเพสต์ผสมเถาปลัมน้ำมันมีค่าลดลงสูงกว่าเมื่อเพิ่มความละเอียดเถาปลัมน้ำมันจาก G1P เป็น G2P อย่างเห็นได้ชัด ตัวอย่างเช่นเพสต์ OP40, G1P40, และ G2P40 มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ เท่ากับร้อยละ 39.8, 31.9, และ 30.9 ตามลำดับ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถาปลัมน้ำมันก่อนบดมีความ พรุนและโพรงอากาศสูง เมื่อทำการบดให้ละเอียดขึ้น (G1P) ทำให้ความพรุนลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติลดลงตาม แต่เมื่อบดเถาปลัมน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นอีกเป็น G2P แม้ความพรุนจะลดลงแต่พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำมากขึ้น ส่งผล ให้ความต้องการปริมาณน้ำของเพสต์ผสมเถาปลัมน้ำมัน G2P น้อยกว่า G1P ไม่มากนัก อีกสาเหตุหนึ่ง ที่ทำให้เพสต์ที่ผสมเถาปลัมน้ำมันต้องการปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ และมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่อการแทนที่สูงขึ้น เนื่องมาจากมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่สูงถึงร้อยละ 10.0 จึงทำให้มีการดูดน้ำสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [39, 40]

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมเถาปลัมน้ำมัน

Type of Paste	Normal Consistency (%)	Initial Setting Time (minute)	Final Setting Time (minute)
CT1	25.9	114	180
CT5	27.1	120	210
OP10	29.9	128	210
OP20	32.1	132	225
OP30	34.5	139	225
OP40	39.8	147	240
G1P10	27.3	124	195
G1P20	28.7	127	195
G1P30	30.1	131	210
G1P40	31.9	137	225
G2P10	26.6	120	180
G2P20	28.1	124	195
G2P30	29.2	130	210
G2P40	30.9	133	210

4.3.2 การก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

สำหรับเวลาการก่อดั้วทั้งระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าซีเมนต์เพสต์ CT5 มีการก่อดั้วนานกว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 ทั้งการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลาย แม้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ก็ตาม แต่เพราะปริมาณ C_3S และ C_3A ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เพสต์เกิดการก่อดั้วเร็วมีปริมาณน้อยกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 อย่างมาก การก่อดั้วจึงนานกว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [41] โดยซีเมนต์เพสต์ CT1 และ CT5 มีเวลาการก่อดั้วระยะต้นเท่ากับ 114 และ 120 นาที และมีการก่อดั้วระยะปลายเท่ากับ 180 และ 210 นาที ตามลำดับ

ส่วนเพสต์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังบดเป็นส่วนผสมทุกอัตราการแทนที่มีการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายนานกว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่มากขึ้น โดยเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีการก่อดั้วระยะต้นเท่ากับ 128, 132, 139 และ 147 นาที เมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ ซึ่งนานกว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 เท่ากับ 14 ถึง 33 นาที ส่วนเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีการก่อดั้วระยะต้นเท่ากับ 124, 127, 131, 137 และ 120, 124, 130, 133 นาที ตามลำดับ เห็นได้ว่าเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้การก่อดั้วระยะต้นเร็วขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันที่ผ่านการบดสามารถลดโพรงและรูพรุนที่ดูดซึมน้ำให้น้อยลง และขนาดอนุภาคที่เล็กลง ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นมาก ส่งผลให้สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการแทนที่มากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดั้วนานขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ยังไม่สามารถลดเวลาการก่อดั้วระยะต้นให้มีระดับเดียวกับกรณีของซีเมนต์เพสต์ CT1 ได้

สำหรับการก่อดั้วระยะปลายพบว่าเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีการก่อดั้วเร็วที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 180 ถึง 210 นาที ในขณะที่เพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีการก่อดั้วระยะปลายนานที่สุด คือ มีค่าเท่ากับ 210 ถึง 240 นาที เมื่อแทนที่ในปูนซีเมนต์ร้อยละ 10 ถึง 40 ตามลำดับ สำหรับเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ทุกอัตราการแทนที่มีการก่อดั้วระยะปลายไม่แตกต่างจากเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P มากนัก คือ มีค่าเท่ากับ 195 ถึง 225 นาที ที่การแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกขนาดความละเอียดมีการก่อดั้วระยะปลายที่นานขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกส่วนผสมยังมีการก่อดั้วทั้งระยะต้นและระยะปลายอยู่ในค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C 150 [36] คือ ไม่น้อยกว่า 45 นาที สำหรับการก่อดั้วระยะต้น และไม่เกิน 375 นาที สำหรับการก่อดั้วระยะปลาย

4.4 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4.4 แสดงอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของมอร์ตาร์มาตรฐานที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งทำการควบคุมปริมาณน้ำให้มีค่าการไหลเผื่ออยู่ในช่วงระหว่าง 105 ถึง 115 ส่วนตัวเลขที่เป็นตัวหนาสีดำเข้มขึ้นและเอียงแสดงค่าร้อยละความต้องการน้ำของมอร์ตาร์เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของมอร์ตาร์

Samples	Mortars	Water-Binder Ratio – <i>Water Requirement (%)</i>				
		Percent Replacement by Weight of Binder				
		0	10	20	30	40
Cement Type I	CT1	0.67– 100	-	-	-	-
Cement Type V	CT5	0.67– 100	-	-	-	-
RHBA	OR	0.67– 100	0.77– 115	0.88– 131	1.00– 149	1.12– 167
	G1R	0.67– 100	0.67– 100	0.70– 105	0.74– 110	0.76– 113
	G2R	0.67– 100	0.66– 99	0.67– 100	0.67– 100	0.69– 103
POFA	OP	0.67– 100	0.68– 101	0.70– 104	0.72– 107	0.73– 109
	G1P	0.67– 100	0.66– 99	0.67– 100	0.68– 101	0.69– 103
	G2P	0.67– 100	0.66– 99	0.67– 100	0.67– 100	0.68– 101

มอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 และ CT5 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากันคือ 0.67 ในขณะที่มอร์ตาร์ OR10, OR20, OR30 และ OR40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.77, 0.88, 1.00 และ 1.12 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 แล้วมีความต้องการน้ำสูงมากโดยเฉพาะมอร์ตาร์ OR40 ที่มีความต้องการน้ำสูงถึงร้อยละ 167 ทั้งนี้เพราะเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีลักษณะรูปร่างอนุภาคที่ความหยาบสูง และผิวขรุขระมาก การขัดกันระหว่างอนุภาคจึงมีมาก ดังนั้นเพื่อให้มีการไหลที่เท่ากันจึงต้องใช้ปริมาณน้ำที่มากขึ้น นอกจากนี้อนุภาคที่มีความพรุนสูง ยังส่งผลต่อการดูดซึมน้ำมากขึ้นด้วย แต่หลังการบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นความต้องการน้ำมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยมีความต้องการน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 100 ถึง 113 และ 99 ถึง 103 สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียด G1R และ G2R ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้น พบว่ามีแนวโน้มความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามการแทนที่สูงขึ้น

สำหรับความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม พบว่ามอร์ตาร์ OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 โดยมีค่าเท่ากับ 0.68, 0.70, 0.72 และ 0.73 หรือคิดเป็นความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 101, 104, 107 และ 109 ตามลำดับ และมีแนวโน้มความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการแทนที่ในปูนซีเมนต์มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีโพรงอากาศจำนวนมากและความพรุนสูง ทำให้เกิดการดูดซึมน้ำมากขึ้น เมื่อนำเถ้าปาล์มน้ำมันมาบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น (G1P) พบว่ามอร์ตาร์ G1P10, G1P20, GP30 และ G1P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงและมีค่าเท่ากับ 0.66, 0.67, 0.68 และ 0.69 หรือคิดเป็นความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 99, 100, 101 และ 103 ตามลำดับ ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ซึ่งมีค่าความต้องการน้ำน้อยกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมัน OP เป็นส่วนผสมแต่มากกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 อยู่เล็กน้อย ในขณะที่เมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันขึ้นอีกเป็นเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มอร์ตาร์ G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานลดลงใกล้เคียงมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 โดยมีค่าเท่ากับ 0.66, 0.67, 0.68 และ 0.68 ซึ่งมีความต้องการน้ำสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 เพียงร้อยละ 101 เท่านั้นที่การแทนที่เท่ากับร้อยละ 40 จากผลดังกล่าวแสดงว่ายังคงเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น ยังลดรูพรุนและโพรงอากาศได้มากยิ่งขึ้นเป็นผลให้ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ต่ำกว่ากรณีที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดน้อยกว่า

4.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งประกอบด้วยมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1, CT5, และมอร์ตาร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยนำหน้าวัสดุประสาน โดยควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 105 ถึง 115

4.5.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของมอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เมื่อบ่มในน้ำประปาแสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าที่อายุ 7, 28, 60 และ 90 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 มีค่าเท่ากับ 333, 436, 499 และ 538 กก/ซม² หลังจากนั้นที่อายุ 180, 270 และ 360 วัน กำลังอัดเริ่มคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คือ มีค่าเท่ากับ 534, 539 และ 545 กก/ซม² ตามลำดับ สำหรับมอร์ตาร์มาตรฐาน CT5 มีกำลังที่อายุ 7 วัน เท่ากับ 286 กก/ซม² ซึ่งมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 และที่อายุ 28 วันขึ้นไป กำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 โดยที่อายุ 28, 60, 90, 180, 270 และ 360 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 441, 504, 542, 554, 558 และ 571 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 101 ถึง 105 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 สังเกตว่าที่อายุ 7 วันกำลังอัดของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT5 มีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT1 อย่างมาก คือ มีค่าเพียงร้อยละ 86 ของมอร์ตาร์ CT1 เท่านั้น

แม้ว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีความละเอียดมากกว่าประเภทที่ 1 ก็ตาม เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C_3S น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึงร้อยละ 11.4 ทำให้กำลังอัดในช่วงอายุต้นมีค่าต่ำ แต่ปริมาณ C_2S ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ที่มีปริมาณสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ถึง 2 เท่า จึงส่งผลให้กำลังอัดที่อายุตั้งแต่ 28 วันขึ้นไปสามารถพัฒนาให้มีค่าสูงกว่ามาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมา [41]

ตารางที่ 4.5 กำลังอัดของมอร์ตาร์

Mixes	Compressive Strength (ksc) – <i>Normalized Compressive Strength (%)</i>						
	7 days	28 days	60 days	90 days	180 days	270 days	360 days
CT1	333–100	436–100	499–100	538–100	534–100	539–100	545–100
CT5	286–86	441–101	504–101	542–101	554–104	558–104	571–105
OP10	276–83	381–87	455–91	494–92	507–95	513–95	514–94
OP20	248–74	319–73	372–75	406–76	415–78	416–77	420–77
OP30	179–54	289–66	331–66	342–64	362–68	363–67	373–68
OP40	133–40	193–44	250–50	264–49	263–49	268–50	269–49
G1P10	318–96	411–94	486–97	535–100	543–102	552–102	568–104
G1P20	298–90	389–89	473–95	510–95	527–99	535–99	544–100
G1P30	249–75	352–81	443–89	473–88	487–91	494–92	501–92
G1P40	217–65	309–71	366–73	392–73	398–74	407–76	411–75
G2P10	325–98	402–92	510–102	546–102	563–105	577–107	598–110
G2P20	301–90	414–95	484–97	532–99	540–101	554–103	557–102
G2P30	283–85	394–90	456–91	501–93	516–97	527–98	531–97
G2P40	260–78	344–79	409–82	437–81	453–85	457–85	459–84

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงมอร์ตาร์ที่มีกำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1

4.5.2 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมัน

รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าปล้มน้ำมัน OP เป็นส่วนผสมในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าที่อายุ 7 วันมอร์ตาร์ OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีกำลังอัดเท่ากับ 276, 248, 179 และ

133 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 83, 74, 54 และ 40 ตามลำดับ เมื่อมอร์ตาร์มีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 28 วัน มอร์ตาร์ดังกล่าวมีกำลังอัดเท่ากับ 381, 319, 289 และ 193 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 87, 73, 66 และ 44 ตามลำดับ และที่อายุ 60 และ 90 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 455, 372, 331, 250 และ 494, 406, 342, 264 กก/ชม² หรือเท่ากับร้อยละ 91, 75, 66, 50 และ 92, 76, 64, 49 ตามลำดับ สังเกตว่าที่อายุ 7 ถึง 90 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ร้อยละ 10 มีค่าสูงกว่าที่อัตราการแทนที่อื่นๆ แต่ยังคงน้อยกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 และกำลังอัดมีค่าลดลงอย่างมากเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะการแทนที่ร้อยละ 40 กำลังที่อายุ 60 วันมีค่าลดลงเหลือเพียงร้อยละ 50 ของมอร์ตาร์ CT1 เท่านั้น และมีแนวโน้มเช่นนี้ตลอดอายุการทดสอบ เมื่ออายุ 180 ถึง 360 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกส่วนผสมมีค่าเกือบคงที่หรือเพิ่มขึ้นด้วยค่าที่น้อยมาก โดยที่อายุ 180 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีค่าเท่ากับ 507, 415, 362, และ 263 กก/ชม² และที่อายุ 270 และ 360 วัน กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 513, 416, 363, 268 และ 514, 420, 373, 269 กก/ชม² ตามลำดับ เห็นได้ว่าแม้ที่อายุ 360 วัน ยังไม่มีมอร์ตาร์ส่วนผสมใดที่พัฒนากำลังอัดให้มีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ได้ นอกจากนี้ การแทนที่มากขึ้นส่งผลให้กำลังอัดลดลงด้วย เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดอนุภาคมีความพรุนสูง และขนาดใหญ่ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์ จึงทำให้กำลังอัดลดลง เพราะกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ นอกจากนี้การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นอย่างมากด้วย โดยมีความต้องการน้ำอยู่ในช่วงร้อยละ 101 ถึง 109 ที่การแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40 ตามลำดับ ซึ่งการที่มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงตามกฎของ Abrams [42] และเมื่อพิจารณาค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ OP20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีค่าร้อยละ 74 และ 73 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าร้อยละ 75 ตามที่มาตรฐาน ASTM C 618 [2] กำหนดไว้ ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน OP เป็นวัสดุปอซโซลานในคอนกรีต

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ซึ่งเป็นเถ้าปาล์มน้ำมันที่บดให้มีความละเอียดมากกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่ากำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วันของมอร์ตาร์ G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 มีค่าเท่ากับ 318, 298, 249, 217 และ 411, 389, 352, 309 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 96, 90, 75, 65 และ 94, 89, 81, 71 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP อย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่เท่ากัน แต่ยังคงมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 อย่างไรก็ตามกำลังอัดของมอร์ตาร์ G1P20 ที่อายุ 7 และ 28 วัน ยังมีค่าสูงกว่าร้อยละ 75 ตามที่มาตรฐาน ASTM C 618 [2] กำหนดไว้อยู่มาก เมื่ออายุการทดสอบเพิ่มขึ้นเป็น 60 และ 90 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 486, 473, 443, 366 และ 535, 510, 473, 392 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 97, 95, 89, 73 และ 100, 95, 88, 73 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ที่การ

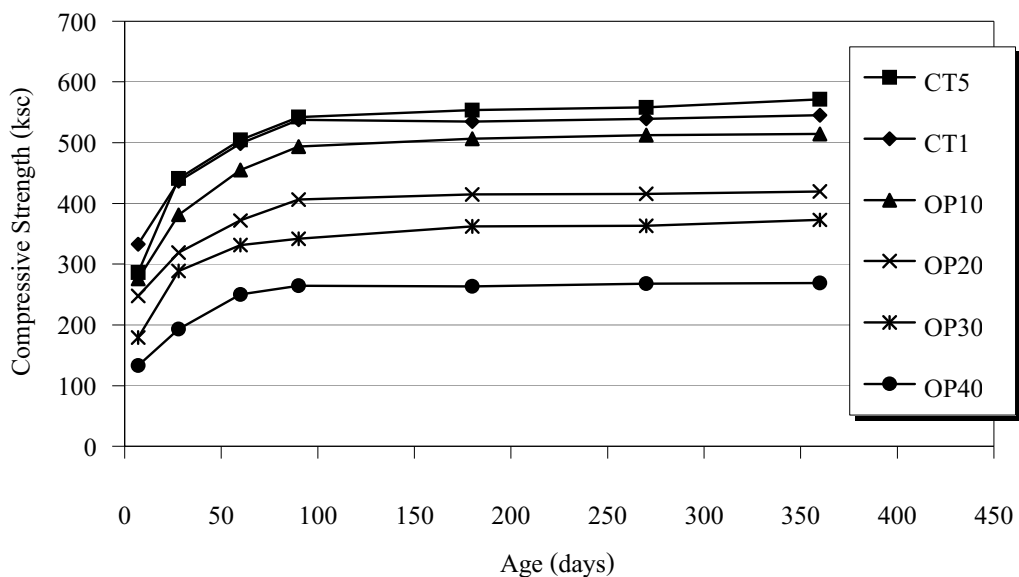
แทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นส่วนผสมเดียวที่มีค่ากำลังอัดอยู่ในระดับเดียวกับมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 นอกจากนี้เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 20 กำลังอัดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 เพียงเล็กน้อย คือร้อยละ 5 เท่านั้นที่อายุ 60 วันและกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออายุมากขึ้น และเมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดมีค่าเท่ากับร้อยละ 89 ที่อายุเดียวกัน ซึ่งถือว่าเป็นค่ากำลังอัดที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี เมื่อพิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมที่อายุ 180 วัน พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเป็น 543, 527, 487 และ 398 กก/ซม² และมีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อายุ 270 และ 360 วัน มีค่าเท่ากับ 552, 535, 494, 407 และ 568, 544, 501, 411 กก/ซม² ตามลำดับ เห็นได้ว่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดมีการพัฒนาที่ดีกว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ซึ่งมีขนาดหยาบกว่าทั้งอายุต้นและอายุปลาย เนื่องจากสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วและดีกว่า แต่อย่างไรก็ตามการแทนที่ในปริมาณที่สูงถึงร้อยละ 40 ส่งผลให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันอย่างมาก เนื่องจากอัตราการแทนที่สูงดังกล่าวทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมาก ปริมาณ Ca(OH)_2 จึงน้อยลงตาม ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปูนซีเมนต์ได้

สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก G2P ซึ่งเป็นเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงที่สุดในการศึกษาครั้งนี้ ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบในรูปที่ 4.14 พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีค่าสูงสุดที่การแทนที่ร้อยละ 10 เช่นเดียวกับเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P โดยที่อายุ 7 และ 28 วัน มอร์ตาร์ G2P10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 325 และ 402 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 98 และ 92 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ตามลำดับ และเพิ่มเป็น 510 และ 546 กก/ซม² ที่อายุ 60 และ 90 วัน ซึ่งมีค่าสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 อยู่ร้อยละ 102 ส่วนมอร์ตาร์ที่การแทนที่ร้อยละ 20, 30 และ 40 มีกำลังอัดที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับ 301, 283, 260 และ 414, 394, 344 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 90, 85, 78 และ 95, 90, 79 ตามลำดับ และกำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากที่อายุ 60 และ 90 วัน คือ มีค่าเท่ากับ 484, 456, 409 และ 532, 501, 437 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 97, 91, 82 และ 99, 93, 81 ตามลำดับ สังเกตว่าที่การแทนที่ร้อยละ 20 กำลังอัดมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนสามารถมีค่ากำลังอัดระดับเดียวกับมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ได้ที่อายุ 90 วัน และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสูงกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 เมื่ออายุเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อพิจารณาที่อายุการทดสอบ 180 วัน กำลังอัดของมอร์ตาร์ทุกส่วนผสมยังมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยมอร์ตาร์ G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีค่าเท่ากับ 563, 540, 516 และ 453 กก/ซม² และเพิ่มขึ้นเป็น 577, 554, 527, 457 และ 598, 557, 531, 459 กก/ซม² ที่อายุ 270 และ 360 วัน ตามลำดับ

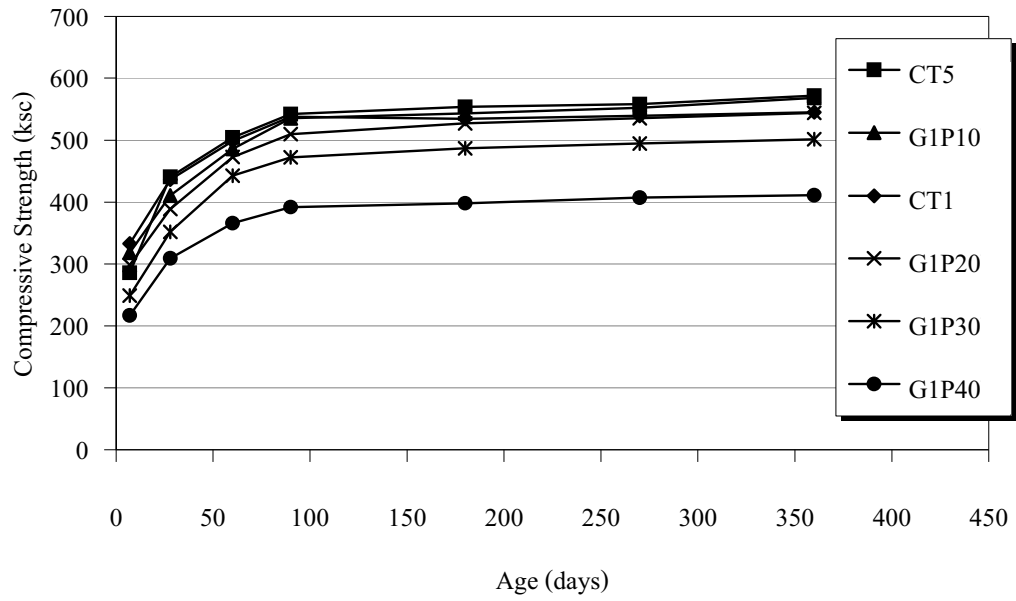
สังเกตว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีค่าเพิ่มขึ้นจากมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP อย่างมากทั้งอายุต้นและอายุปลาย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ที่ปริมาณการแทนที่เท่ากัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงอายุต้นและการแทนที่ต่ำ

ตัวอย่างเช่นที่อายุ 7 วัน มอร์ตาร์ OP10 และ G1P10 มีค่ากำลังอัดต่างกันร้อยละ 13 และมอร์ตาร์ G1P10 และ G2P10 มีค่ากำลังอัดต่างกันเพียงร้อยละ 2 ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ต่ำ ทำให้กำลังที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และผลของปฏิกิริยาปอซโซลานมีน้อย กำลังอัดจึงมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก นอกจากนี้จากการศึกษาของ Ukita และคณะ [43] ยังพบว่าการลดขนาดอนุภาคของเถ้าถ่านหินในช่วง 10 ถึง 20 ไมครอนมีผลต่อการเพิ่มกำลังอัดเพียงเล็กน้อย ซึ่งในการศึกษานี้เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 19.91 และ 10.18 ไมครอน ตามลำดับ ซึ่งต่างกันเท่ากับ 9.73 ไมครอน

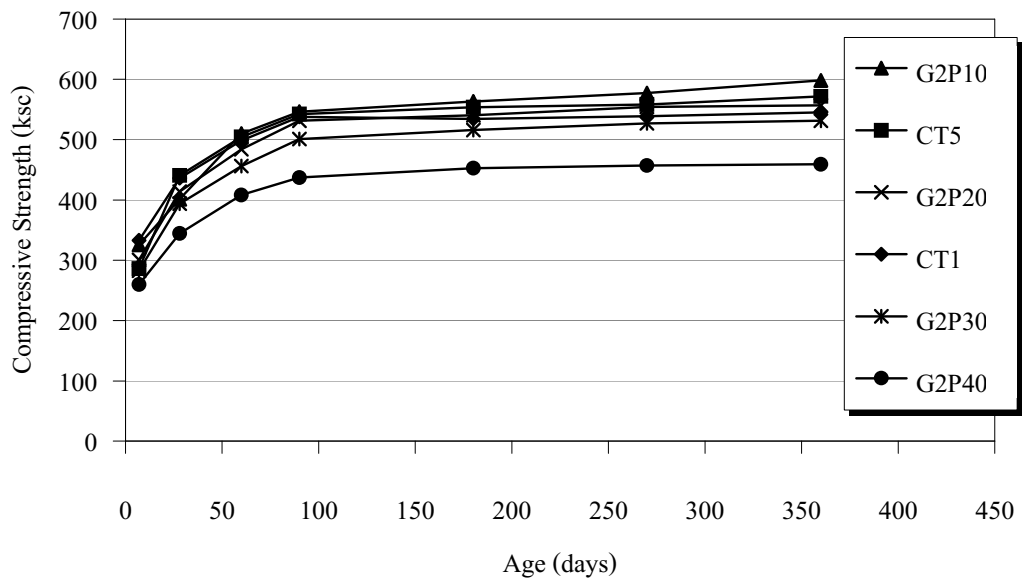
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่กับกำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียด พบว่าแม้ค่าดัชนีกำลังของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีค่าต่ำกว่าที่มาตรฐาน ASTM C 618 [2] กำหนดไว้ แต่หากพิจารณาที่การแทนที่ร้อยละ 10 พบว่ากำลังอัดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไม่มากนัก คือมีค่าประมาณร้อยละ 90 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ที่อายุ 60 วันขึ้นไป ซึ่งค่ากำลังอัดนี้สามารถนำไปใช้งานในระดับหนึ่งสำหรับโครงสร้างที่ไม่ต้องการรับกำลังอัดมากนัก ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันหลังปรับปรุงคุณภาพ (G1P และ G2P) พบว่าไม่เพียงนอกจากเพิ่มกำลังอัดของมอร์ตาร์ให้ดีขึ้นแล้ว ยังเพิ่มอัตราการแทนที่ในปูนซีเมนต์ให้สูงขึ้นด้วย โดยให้ค่ากำลังอัดที่ไม่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่นที่อายุ 90 วันมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 535 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 100 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 และมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 532 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 99 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ซึ่งกำลังอัดของมอร์ตาร์ทั้งสองมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก และยังมีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 ด้วย



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปลาล้มน้ำมัน G2P

4.6 ดัชนีความเป็นปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.6.1 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์

กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 พบว่ามอร์ต้าร์ควบคุมมีกำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 370, 460, 519, 565, 587 และ 591 กก/ซม² ตามลำดับ โดยที่กำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานที่ละเอียดกว่าจะให้กำลังอัดที่สูงกว่า โดยกำลังอัดของมอร์ต้าร์ FRHB มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 343, 437, 516, 575, 613 และ 638 กก/ซม² หรือมีค่าดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 93, 95, 100, 102, 104 และ 107 ตามลำดับ สำหรับมอร์ต้าร์ FPOF มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 322, 414, 480, 564, 612 และ 626 กก/ซม² หรือมีค่าดัชนีกำลังเท่ากับ ร้อยละ 87, 90, 93, 100, 104 และ 105 ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ด้วยทรายบด พบว่ามีอัตรากำลังอัดลดลงตามขนาด ของทรายบดที่หยาบขึ้นและมีค่าร้อยละของดัชนีกำลังของทรายบดแต่ละขนาดค่อนข้างคงที่ตลอดอายุการบ่ม โดยมอร์ต้าร์ FGS มีค่ากำลังอัดที่อายุ 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน เท่ากับ 303, 380, 417, 470, 483 และ 494 กก/ซม² หรือมีค่าดัชนีกำลังเท่ากับร้อยละ 82, 83, 80, 83, 82 และ 84 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.6 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์

Symbol	Compressive Strength (ksc) – <i>Strength Activity Index (%)</i>					
	3 days	7 days	14 days	28 days	60 days	90 days
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 ค่ากำลังอัดของมอร์ต้าร์ที่มีค่าเท่ากับหรือมากกว่ามอร์ต้าร์ควบคุม

4.6.2 ค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน

ค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสามารถหาค่าร้อยละของดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายบดที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับปูนซีเมนต์ (MGS) ซึ่งมีปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 80 สำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ผลการทดลองที่ได้จากตารางที่ 4.6 ค่าร้อยละของดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ MGS ที่อายุ 3 วัน จนถึง 90 วัน มีค่าระหว่างร้อยละ 79 ถึง 81 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 80 ค่าที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ เรืองรุชดี และคณะ [44] ที่พบว่าดัชนีกำลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชันมีค่าเท่ากับร้อยละ 80.5 สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสำหรับการทดลองครั้งนี้มีค่าเท่ากับร้อยละ 80

4.6.3 ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาค

ความแตกต่างของค่าร้อยละของดัชนีกำลังระหว่างมอร์ตาร์ที่มีทรายบดละเอียดกว่า (หรือขนาดหยาบกว่า) ของปูนซีเมนต์กับมอร์ตาร์ที่มีทรายบดละเอียดเท่ากับปูนซีเมนต์ คือค่าการอัดตัวของอนุภาค ในที่นี้จะถือว่าค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของทรายบดที่มีความละเอียดเท่ากับปูนซีเมนต์ไม่มีผลของการอัดตัวของอนุภาค ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากตารางที่ 4.6 พบว่าดัชนีกำลังเฉลี่ยที่อายุ 3 ถึง 90 วัน ของมอร์ตาร์ FGS, MGS และ LGS มีค่าเท่ากับ 82, 80 และ 77 ตามลำดับ และสามารถคำนวณหาค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคจากการแทนที่ด้วยทรายบดที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ (FGS) โดยมีค่าเท่ากับ $82 - 80 = 2$ ซึ่งเป็นค่าบวกแสดงว่าการอัดตัวของอนุภาคทำให้กำลังเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 2 แต่ในทางกลับกันการแทนที่ด้วยทรายบดที่ขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ (LGS) ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากการอัดตัวของอนุภาคเนื่องจากการแทนที่ด้วยวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์มีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 3 ($77 - 80 = -3$)

4.6.4 ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

ค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานสามารถหาได้จากค่าดัชนีกำลังที่แตกต่างกันระหว่างมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของวัสดุปอซโซลานและทรายบดที่มีความละเอียด การแทนที่ และอายุการบ่มที่เท่ากัน ซึ่งค่าดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเจ้าแกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันแสดงไว้ดังตารางที่ 4.7 เช่น ค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่อายุ 3 วัน ของ FRHB หาได้จากค่าดัชนีกำลังที่อายุ 3 วัน ของตัวอย่าง FRHB ในตารางที่ 4.6 ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 93 ลบด้วยค่าดัชนีกำลังจากตัวอย่าง FGS ที่อายุ 3 วัน ซึ่งมีค่าร้อยละ 82 ดังนั้นค่าดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่าง FRHB มีค่าเท่ากับร้อยละ $93 - 82 = 11$ หรือ ค่าดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานของตัวอย่าง MPOF ที่อายุ 3 วัน เท่ากับ $82 - 80 = 2$ เป็นต้น

ตารางที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาปอชโซลานเกิดขึ้นในปริมาณที่น้อยมากหากวัสดุปอชโซลานที่ใช้มีขนาดหยาบ แต่ถ้าใช้วัสดุปอชโซลานที่มีความละเอียดมากขึ้น ทำให้การเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานมากขึ้นตามไปด้วย โดยกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานของมอร์ตาร์ FRHB มีค่ามากที่สุด และลดลงตามขนาดของเส้นแกลบ-เปลือกไม้ที่ใหญ่ขึ้น มีข้อสังเกตว่ามอร์ตาร์ LRHB และ LPOF มีค่าดัชนีกำลังเนื่องจากปฏิกิริยาปอชโซลานติดลบในช่วง 3 ถึง 28 วัน ซึ่งการติดลบนี้มาจากวิธีคำนวณที่ต้องอาศัยมอร์ตาร์ MGS เป็นตัวเปรียบเทียบ เพราะมอร์ตาร์ MGS มีค่า W/B คงที่ แต่มอร์ตาร์ LRHB และ LPOF มีค่า W/B สูงกว่ามาก ดังนั้นค่าติดลบเป็นผลกระทบจากค่า W/B ที่สูงขึ้นของมอร์ตาร์ LRHB และ LPOF ดังนั้นจึงไม่พิจารณาเป็นค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานในช่วงอายุดังกล่าว แต่มอร์ตาร์ LRHB และ LPOF สามารถทำปฏิกิริยาปอชโซลานขึ้นมาชดเชยผลกระทบนี้ได้หลังจากอายุ 28 วัน

ส่วนเส้นปาล์มน้ำมัน พบว่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานของมอร์ตาร์ มีทิศทางเหมือนเส้นแกลบ-เปลือกไม้ คือมอร์ตาร์ FPOF มีค่ามากที่สุด และลดลงตามขนาดของเส้นปาล์มน้ำมันที่ใหญ่ขึ้นแต่มีค่าน้อยกว่าเส้นแกลบ-เปลือกไม้ทุกอายุการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอชโซลานของการทดลองนี้กับผลของเรอริงูร์ดี และคณะ [44] พบว่าค่ากำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอชโซลานในช่วงอายุ 3 ถึง 7 วัน ของเส้นถ่านหินขนาดเล็กที่สุดมีค่าน้อยกว่าเส้นแกลบ-เปลือกไม้และเส้นปาล์มน้ำมันแต่มีค่ามากกว่าที่อายุ 28 ถึง 90 วัน

ค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน การอัดตัวของอนุภาค ปฏิกิริยาปอชโซลาน และผลรวมของดัชนีกำลังทั้งหมด แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นถึงการพัฒนากำลังจากปฏิกิริยาปอชโซลาน โดยในช่วงอายุ 3 ถึง 7 วัน มีการพัฒนากำลังช้าแต่เมื่อมีอายุมากขึ้นจะมีการพัฒนากำลังที่มากขึ้น และยังขึ้นอยู่กับขนาดของวัสดุปอชโซลานด้วย คือวัสดุละเอียดจะเกิดปฏิกิริยาปอชโซลานได้มากกว่าวัสดุที่หยาบกว่า

ตารางที่ 4.7 กำลังอัดและดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

Symbol	Compressive Strength (ksc) - <i>Strength Activity Index due to Pozzolanic Reaction (%)</i>			
	3 days	7 days	28 days	90 days
FRHB	40- 11	57- 13	105- 20	144- 25
MRHB	11- 3	20- 5	58- 11	95- 16
LRHB	(-6)-(-2)	(-5)-(-2)	12- 2	44- 7
FPOF	19- 5	34- 8	94- 18	132- 23
MPOF	8- 2	13- 3	29- 5	66- 11
LPOF	(-2)-(-2)	(-6)-(-2)	(-18)-(-2)	7- 1

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึง ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันระหว่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันกับมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยทรายบดขนาดหยาบ ซึ่งไม่นำมาพิจารณาเป็นค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

ตารางที่ 4.8 ดัชนีกำลังของมอร์ต้าร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน, การอัดตัวของอนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลาน

Symbol	Strength Activity Index (%)				Hydration Reaction (%)	Packing Effect (%)	Pozzolanic Reaction (%)			
	3-d	7-d	28-d	90-d			3-d	7-d	28-d	90-d
FRHB	93	95	102	107	80	2	11	13	20	25
MRHB	83	85	91	96	80	0	3	5	11	16
LRHB	75	75	79	84	80	(-3)	(-2)	(-2)	2	7
FPOF	87	90	100	105	80	2	5	8	18	23
MPOF	82	83	85	91	80	0	2	3	5	11
LPOF	75	75	75	78	80	(-3)	(-2)	(-2)	(-2)	1

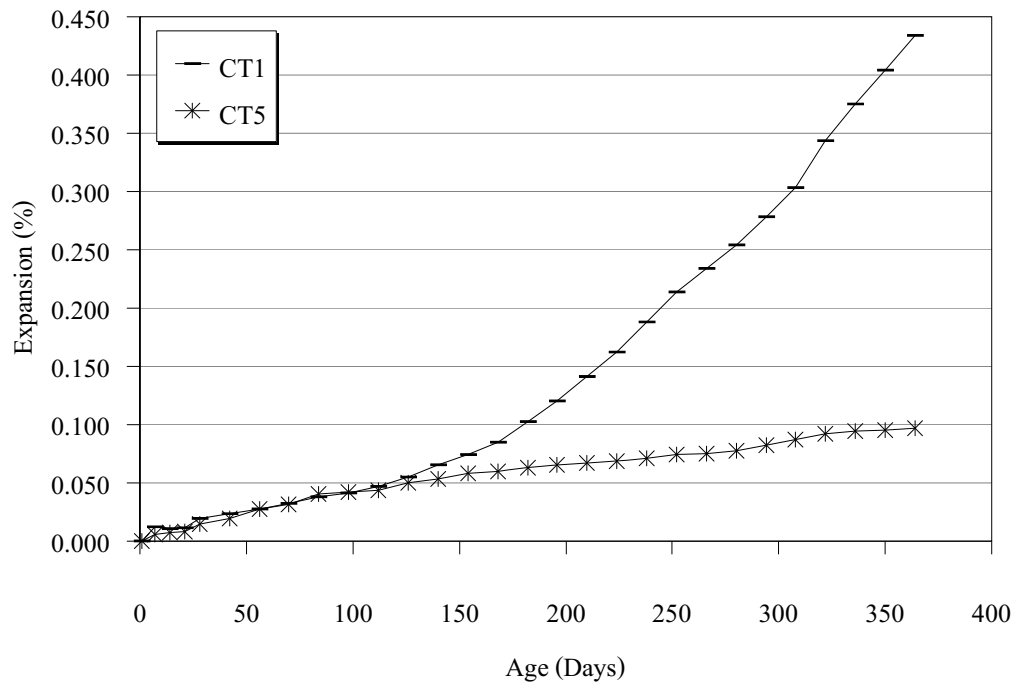
หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึง ผลกระทบจากอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันระหว่างมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันกับมอร์ต้าร์ที่แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยทรายบดขนาดหยาบ ซึ่งไม่นำมาพิจารณาเป็นค่าดัชนีกำลังที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลาน

4.7 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์

ผลการทดสอบการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยทำการวัดค่าการขยายตัวทุกอายุ 14 วันจนถึงอายุ 364 วัน

4.7.1 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐานที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว พบว่าที่อายุ 7 ถึง 98 วัน การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 และ CT5 มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก คือ มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0490 และ 0.0417 ตามลำดับ จากนั้นเมื่ออายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็น 150 วัน จึงเริ่มเห็นความแตกต่างของการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐานทั้งสอง โดยแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 มีการขยายตัวมากกว่าแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT5 และมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอายุที่มากขึ้น ส่วนแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT5 มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 364 วัน (หรือ 1 ปี) การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 มีค่าสูงถึงร้อยละ 0.4338 ในขณะที่แท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT5 มีค่าการขยายตัวเพียงร้อยละ 0.0971 ซึ่งแตกต่างกันถึง 4.5 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณ C_3A มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จึงส่งผลให้เกิดการขยายตัวที่สูง ซึ่งผลการทดสอบสอดคล้องกับการศึกษาที่ผ่านมาของประกาศ [41] นอกจากนี้ยังพบอีกว่าแม้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่มีปริมาณ C_3A เลย แต่ยังเกิดการขยายตัวอยู่ประมาณร้อยละ 0.1 ที่อายุ 1 ปี แสดงให้เห็นได้ว่า C_3A อาจไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการขยายตัวเพียงอย่างเดียว [45, 46] ซึ่งจากการศึกษาของ Gonzalez และ Irassar [47] ที่ทำการศึกษากการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ต้านทานซัลเฟตจำนวน 4 ชนิด (3 ชนิดมีปริมาณ C_3A เท่ากับร้อยละ 0 และอีก 1 ชนิดมีปริมาณ C_3A เท่ากับร้อยละ 1) ที่มีปริมาณ C_3S แตกต่างกันในช่วงร้อยละ 40 ถึง 74 ผลการศึกษาพบว่าปูนซีเมนต์ที่มีปริมาณ C_3S สูง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวสูงตาม โดยที่อายุ 180 วัน แท่งมอร์ต้าร์ที่มีปริมาณ C_3S เท่ากับร้อยละ 74 มีการขยายตัวสูงถึงร้อยละ 0.112 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.35 ที่อายุ 1 ปี ส่วนมอร์ต้าร์ที่มีปริมาณ C_3S เท่ากับร้อยละ 40 มีการขยายตัวที่อายุ 1 ปี เท่ากับร้อยละ 0.035 ซึ่งแตกต่างกันถึง 10 เท่า และเมื่อพิจารณาความเสียหายของแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐานทั้งสองชนิดที่ได้จากการศึกษากครั้งนี้ในรูปที่ 4.16 พบว่าแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 เริ่มเกิดการโก่งงออย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่แท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT5 ยังคงสภาพอยู่แต่มีรอยร้าวตามขอบบ้างเล็กน้อย



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งมอร์ตาร์ด้ามาตรฐาน CT1 และ CT5

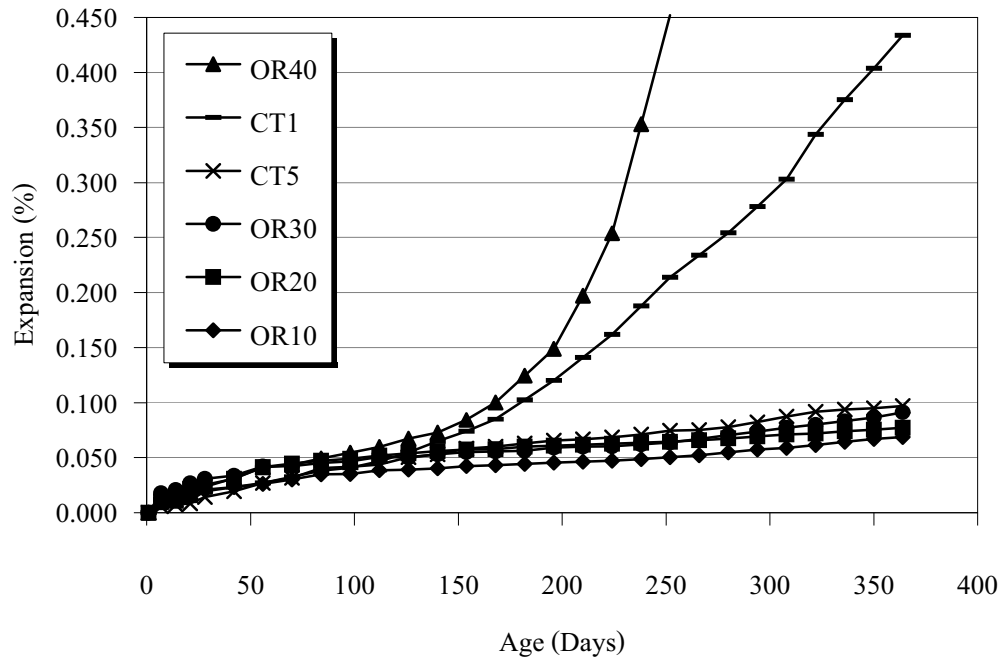


รูปที่ 4.16 ความเสียหายของแท่งมอร์ตาร์ด้ามาตรฐาน CT1 และ CT5 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 364 วัน

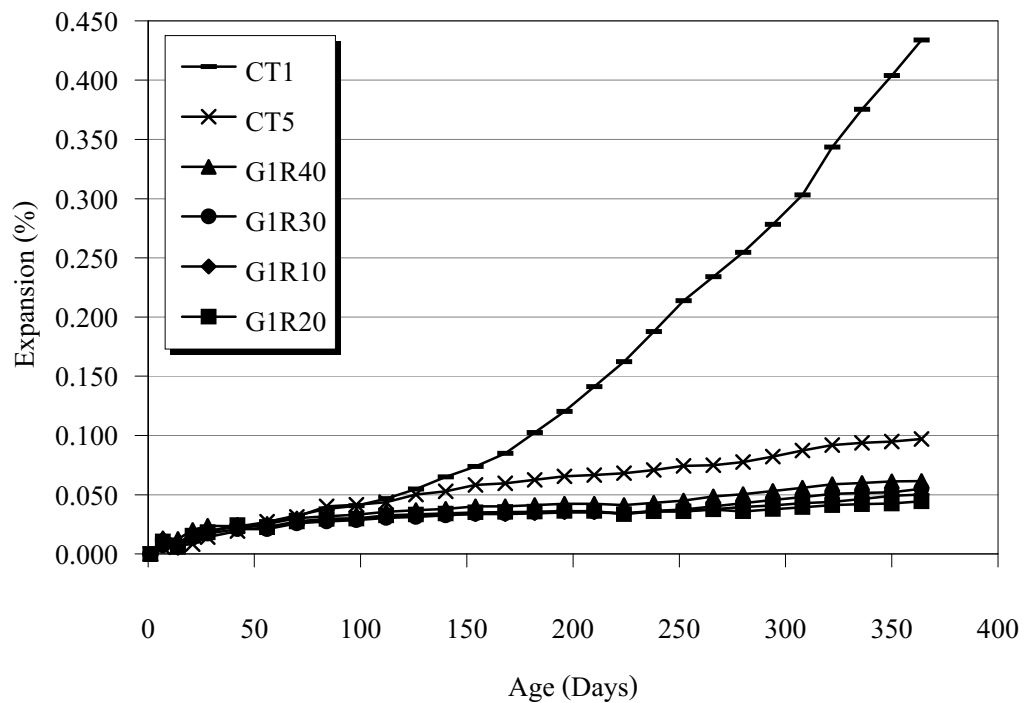
4.7.2 การขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งมอร์ตาร์ที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เป็นส่วนผสม พบว่าในระยะเวลา 100 วันแรก การขยายตัวเกิดน้อยมาก แต่หลังจากนั้นที่อายุ 150 วันแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบเปลือกไม้ OR ร้อยละ 40 เริ่มมีการขยายตัวที่เด่นชัดขึ้น คือ มีการขยายตัวสูงกว่าที่อัตราการแทนที่อื่นๆ และมีค่าสูงกว่าแท่งมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 อย่างเห็นได้ชัด ส่วนที่การแทนที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามอายุที่เพิ่มขึ้น จนถึงที่อายุ 364 วันมีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0686, 0.0772 และ 0.0914 ตามลำดับ ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 40 การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วมากจากที่อายุ 154 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0844 เป็นร้อยละ 0.4520 ที่อายุ 252 วัน และตัวอย่างเสียหายในเวลาต่อมา เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูง ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่ และทำปฏิกิริยาได้น้อย ทำให้ C-S-H ที่เป็นวัสดุยึดประสานหลักที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงเกิดน้อย ประกอบกับ C-S-H จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ในมอร์ตาร์ก็ลดลงด้วย การยึดเกาะระหว่างเนื้อของมอร์ตาร์จึงลดลงตาม เมื่อเกิดการขยายตัวขึ้นจึงทำให้เกิดรอยร้าวได้ง่าย และเสียหายมาก (ดูรูปที่ 4.20) นอกจากนี้จากการศึกษาของจิระพงษ์ [48] ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ตัวอย่างเดียวกัน พบว่าเมื่อแทนที่ในอัตราร้อยละ 40 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน มีค่าต่ำมากโดยมีค่าเพียง 85 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 20 ของมอร์ตาร์มาตรฐานเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แท่งมอร์ตาร์มีความต้านทานการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้ต่ำ

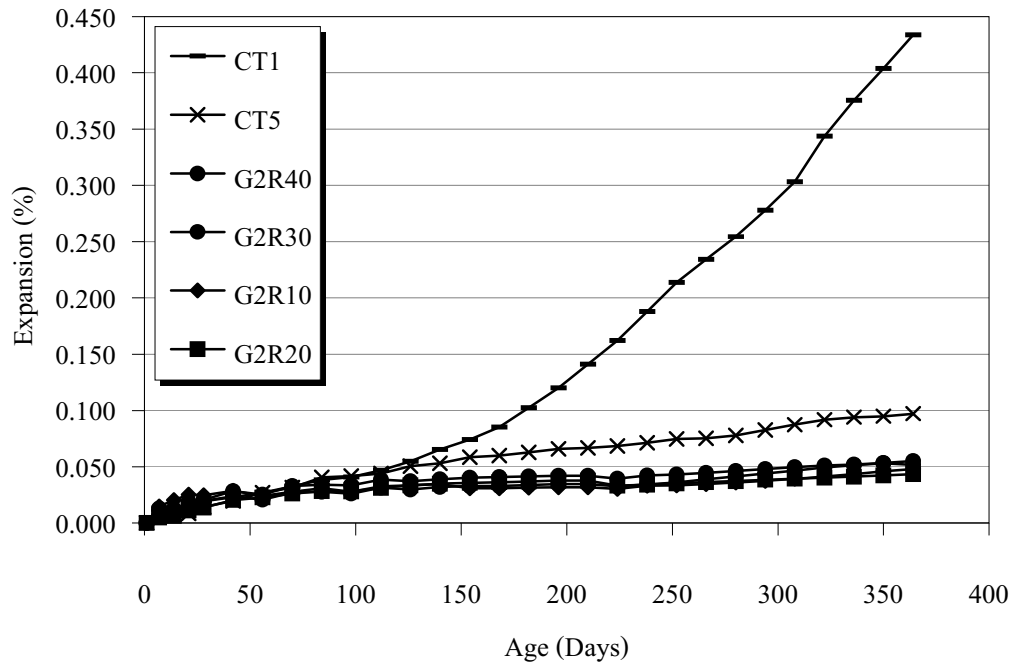
สำหรับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพโดยการบดละเอียดปานกลาง G1R และบดละเอียดมาก G2R ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 ตามลำดับ พบว่าการขยายตัวมีค่าลดลงต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR อย่างเห็นได้ชัด โดยสังเกตเห็นได้ตั้งแต่ที่อายุ 120 ขึ้นไป และหลังจากนั้นการขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ามากจนถึงที่อายุ 364 วัน มอร์ตาร์ G1R10, G1R20, G1R30 และ G1R40 มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0503, 0.0445, 0.0551 และ 0.0617 และมีค่าลดลงเมื่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น โดยมีมอร์ตาร์ G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีค่าการขยายตัวที่อายุเดียวกันเท่ากับ 0.0480, 0.0432, 0.0516 และ 0.0551 ตามลำดับ แสดงให้เห็นได้ว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นสามารถเพิ่มความต้านทานการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่าการแทนที่ร้อยละ 10 การขยายตัวมีค่าสูงกว่าการแทนที่ร้อยละ 20 ซึ่งเป็นร้อยละการแทนที่ที่มีค่าการขยายตัวต่ำสุด และเมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 30 และ 40 การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าที่การแทนที่ร้อยละ 10 เล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีค่าต่ำกว่าแท่งมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 และ CT5 ทั้งนี้เนื่องจากความพรุนที่เพิ่มขึ้น ทำให้มีความต้องการน้ำที่มากขึ้น



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ GIR



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุแซในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าเคลบ-เปลือกไม้ G2R



รูปที่ 4.20 ความเสียหายของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียม
ซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 364 วัน

4.7.3 การขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

เมื่อพิจารณาการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งมอร์ต้าร์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมัน OP เป็นส่วนผสมในอัตราร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ดังแสดงในรูปที่ 4.21 พบว่าที่อายุก่อน 100 วันการขยายตัวมีค่าน้อยเช่นเดียวกับมอร์ต้าร์มาตรฐาน และไม่สามารถเห็นผลของการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันต่อการต้านทานขยายตัวเนื่องจากมีค่าใกล้เคียงกันมาก สังเกตได้จากกราฟที่มีลักษณะเกาะกันเป็นกลุ่ม หลังจากนั้นที่อายุ 120 ถึง 250 วัน จึงเริ่มเห็นชัดเจนว่าแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราการแทนที่มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 และ CT5 และมีแนวโน้มเช่นนี้ไปตลอดอายุการทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามที่ช่วงอายุดังกล่าวยังไม่สามารถบอกถึงอัตราแทนที่มีผลต่อการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ได้เช่นเดียวกันกับที่ช่วงอายุต้น และเมื่ออายุการแช่เพิ่มขึ้นเป็น 364 วัน พบว่ามอร์ต้าร์ OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.0800, 0.0669, 0.0647 และ 0.0830 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 ถึงประมาณ 5-7 เท่า

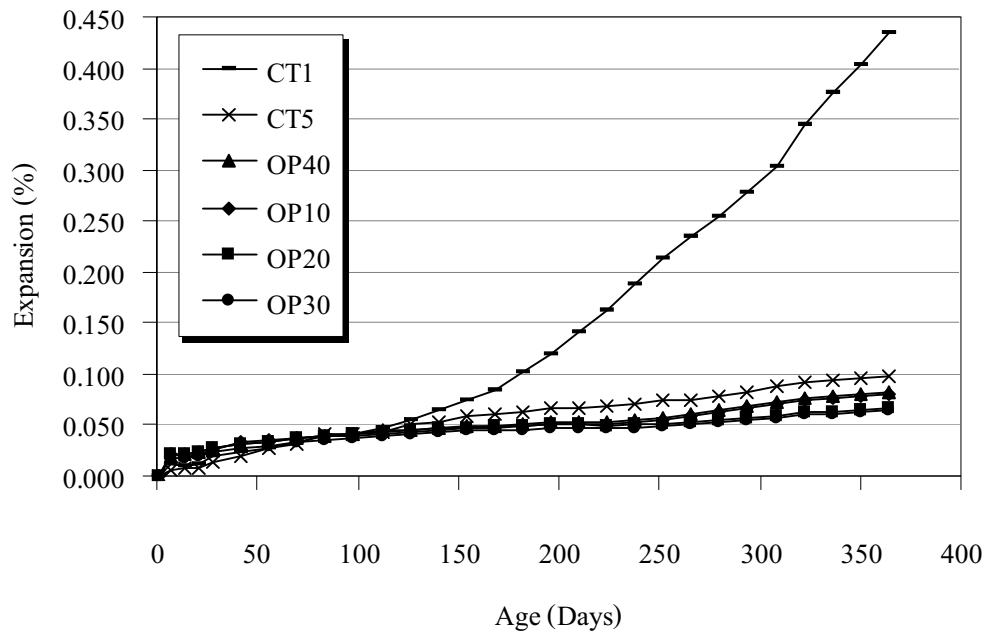
สังเกตว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ร้อยละ 10 การขยายตัวมีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่มีความพรุนสูงและอนุภาคขนาดใหญ่ (เห็นได้จากภาพขยายอนุภาคในรูปที่ 4.4) ไม่เพียงแต่ทำให้ลดปริมาณ C_3A และยิบซั่มที่ทำให้เกิดการขยายตัวแล้วยังทำให้เนื้อมอร์ต้าร์ที่แข็งตัวแล้วมีความพรุนและช่องว่างมากขึ้น ซึ่ง Irassar และ Batic [49] พบว่า Ettringite ที่เกิดขึ้นนี้จะขยายตัวอย่างช้าๆ ภายในช่องว่างดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การขยายตัวโดยรวมของแท่งมอร์ต้าร์เกิดน้อย

รูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P พบว่าแม้ความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้นมาก แต่การขยายตัวที่ช่วงอายุต้นยังมีค่าไม่แตกต่างจากแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และมีค่าใกล้เคียงกับแท่งมอร์ต้าร์มาตรฐาน CT1 และ CT5 จนไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นเป็น 364 วันพบว่าเมื่อความละเอียดยังเพิ่มขึ้นการขยายตัวของมอร์ต้าร์ยังมีค่าลดลง โดยแท่งมอร์ต้าร์ G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0788, 0.0647, 0.0623 และ 0.0690 ตามลำดับ ส่วนแท่งมอร์ต้าร์ G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีการขยายตัวเท่ากับ 0.0758, 0.0606, 0.0587 และ 0.0673 ตามลำดับ ซึ่งลดลงแท่งจากมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP อย่างเห็นได้ชัด เมื่อเปรียบเทียบที่อัตราการแทนที่เดียวกัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าผลของอัตราการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันต่อการขยายตัวของแท่งมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ให้ผลในทิศทางเดียวกับมอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP กล่าวคือการแทนที่ร้อยละ 10 มีการขยายตัวมากที่สุดและลดลงเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้นจนถึงที่ร้อยละ 30 ซึ่งเป็นอัตราการแทนที่ที่มีการขยายตัวมีค่าต่ำสุด หลังจากนั้นเมื่อเพิ่ม

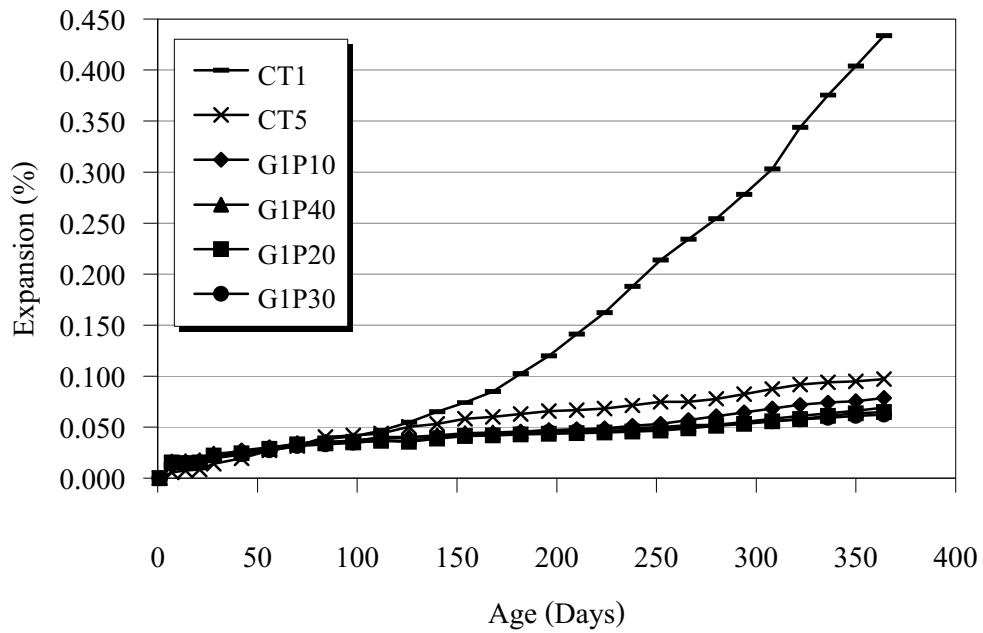
การแทนที่เป็นร้อยละ 40 การขยายตัวกลับมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับการศึกษาของ Torii และ Kawamura [50] ที่พบว่า การแทนที่เถาผ่านหินร้อยละ 30 มีการขยายตัวน้อยกว่าการแทนที่ร้อยละ 10 และเมื่อเพิ่มการแทนที่ที่เป็นร้อยละ 50 และ 70 การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้น และมีการขยายตัวมากที่สุดที่การแทนที่ร้อยละ 70

รูปที่ 4.24 แสดงความเสียหายของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่ความละเอียดและอัตราทดแทนที่ต่างกัน พบว่าแม้ว่าภาพโดยรวมอาจยังมีความเสียหายไม่มากนัก แต่สังเกตได้ว่าการแทนที่มากขึ้นทำให้แท่งมอร์ตาร์เกิดรอยร้าวได้มากกว่าที่การแทนที่ต่ำ เช่นเดียวกับตัวอย่างมอร์ตาร์ทดสอบกำลังอัดเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดกว่ามีรอยร้าวน้อยกว่าด้วย ตัวอย่างเช่นแท่งมอร์ตาร์ OP40 มีรอยร้าวเกิดขึ้นมากอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่แท่งมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมอื่นๆ มีรอยร้าวเกิดขึ้นแต่ยังเห็นได้ไม่ชัดเจน

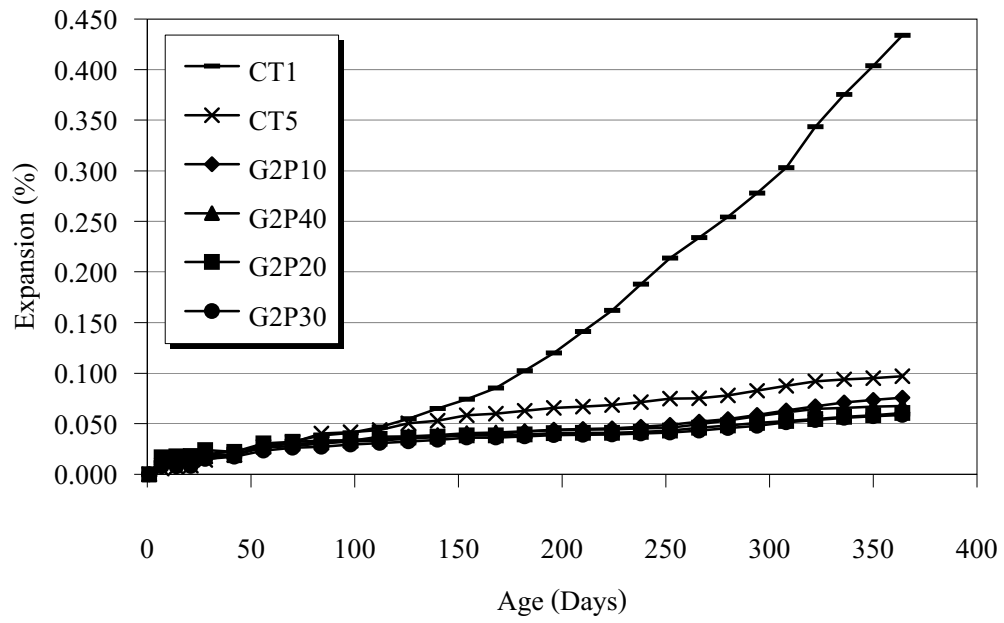
ผลการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียด และมีอัตราทดแทนที่ต่างกัน คือ ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยนำหั่นวัสดุประสาน เห็นได้ว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกส่วนผสมมีค่าการขยายตัวต่ำกว่าแท่งมอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 อย่างเห็นได้ชัด แม้ว่าที่การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันบางส่วนผสมจะทำให้มอร์ตาร์มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานก็ตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในปริมาณที่สูง แสดงให้เห็นว่าผลของกำลังอัดอาจไม่ใช่ปัจจัยหลักเพียงอย่างเดียวที่มีผลต่อการลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน แต่ผลของการลดปริมาณปูนซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานอาจส่งผลต่อการลดการขยายตัวได้ด้วย ซึ่งยังต้องมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมต่อไปว่าปัจจัยทางด้านใดส่งผลมากกว่า อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้เป็นอย่างดี และที่การแทนที่ร้อยละ 30 ของทุกความละเอียดมีการขยายตัวต่ำสุด แต่หากพิจารณากำลังอัดของมอร์ตาร์ การแทนที่สูงดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมเนื่องจากให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำ ดังนั้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ในอัตราไม่เกินร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ น่าจะเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมกว่า เพราะสามารถให้กำลังอัดที่ไม่น้อยกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน นอกจากนี้หากต้องนำเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์เพื่อดำเนินงานซัลเฟตแล้วอาจต้องคำนึงถึงการสูญเสียกำลังอัดประกอบด้วย ซึ่งการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ในอัตราไม่เกินร้อยละ 20 ถือเป็นมอร์ตาร์ที่เหมาะสม เนื่องจากให้กำลังอัดระดับเดียวกับมอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และประเภทที่ 5 ทั้งที่บ่มในน้ำและที่แช่ในซัลเฟตแล้วยังสามารถลดการขยายตัวได้ดีกว่าแท่งมอร์ตาร์มาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ด้วย



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P



รูปที่ 4.24 ความเสียหายของแท่งมอร์ตาร์ดที่ผสมเถ้าปล้นน้ำมันเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียม
ซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 364 วัน

4.8 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีต

4.8.1 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

ตารางที่ 4.9 แสดงระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวมีเวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน เนื่องจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มีปริมาณ C_3A และ C_3S น้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้เกิดการก่อตัวและพัฒนากำลังได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตที่ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 นานกว่า

ส่วนคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นส่วนผสม พบว่ามีเวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว และเมื่อเพิ่มอัตราในการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้สูงขึ้นทำให้เวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายยิ่งนานขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ได้ทำการบด OR แทนที่ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีเวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนานที่สุดเท่ากับ 6 ชั่วโมง 30 นาที และ 13 ชั่วโมง 50 นาที ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่และพรุนสูงทำให้คอนกรีตใช้น้ำในการผสมที่มาก นอกจากนี้ยังเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำให้เกิดการก่อตัวได้เร็วในช่วงต้นอย่างมากจึงส่งผลให้เวลาการก่อตัวยาวนานขึ้น

สำหรับเวลาในการก่อตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงทำให้เวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตเร็วขึ้นกว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ไม่บด โดยเฉพาะคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R แทนที่ร้อยละ 10 มีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเท่ากับ 4 ชั่วโมง 10 นาที และ 6 ชั่วโมง 30 นาที ตามลำดับ ซึ่งเท่ากับคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 นอกจากนี้เมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้สูงขึ้นส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของคอนกรีตเร็วขึ้นตามไปด้วย อาจเป็นเพราะอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ได้ไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างต่างๆ ระหว่างเม็ดปูนซีเมนต์ ส่งผลให้เกิดการพัฒนาแรงยึดเหนี่ยวที่จุดสัมผัสกันระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ [51] ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุประสานกับน้ำให้สูงขึ้น ส่งผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วงแรกเร็วขึ้น [52] ทำให้เวลาในการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเร็วขึ้นตามไปด้วย โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R แทนที่ร้อยละ 40 มีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายเท่ากับ 4 ชั่วโมง 40 นาที และ 7 ชั่วโมง 20 นาที ตามลำดับ

4.8.2 ระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ขนาดความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงในตารางที่ 4.9 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังบดทุกอัตราส่วนผสมมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายนานกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 และมีแนวโน้มนานขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่มากขึ้น โดยคอนกรีต OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 4 ชั่วโมง 40 นาที, 5 ชั่วโมง, 5 ชั่วโมง 50 นาที และ 6 ชั่วโมง 50 นาที ตามลำดับ และมีเวลาการก่อตัวระยะปลายเท่ากับ 7 ชั่วโมง 30 นาที, 8 ชั่วโมง 30 นาที, 10 ชั่วโมง 30 นาที และ 12 ชั่วโมง 20 นาที ตามลำดับ เห็นได้ว่าการเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้เวลาการก่อตัวของคอนกรีตนานมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์สูงขึ้น ทำให้ C_3S และ C_3A ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดการก่อตัวมีปริมาณลดลง นอกจากนี้อุณหภูมิของเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอุณหภูมิสูง จึงเกิดการดูดซึมน้ำมาก ทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เวลาการก่อตัวของคอนกรีตนานขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Tay [8] ที่พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้เวลาการก่อตัวมีค่าเพิ่มขึ้น และยังเพิ่มมากขึ้นหากใช้แทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น

คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันหลังบดทั้ง G1P และ G2P ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน มีเวลาการก่อตัวระยะต้นอยู่ในช่วง 4 ชั่วโมง 35 นาที ถึง 5 ชั่วโมง 10 นาที และ 4 ชั่วโมง 25 นาที ถึง 5 ชั่วโมง 10 นาที ตามลำดับ และมีเวลาการก่อตัวระยะปลายอยู่ในช่วง 6 ชั่วโมง 40 นาที ถึง 7 ชั่วโมง 45 นาที และ 6 ชั่วโมง 35 นาที ถึง 7 ชั่วโมง 40 นาที ตามลำดับ ซึ่งมีค่าลดลงจากคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มาก แสดงว่าการปรับปรุงคุณภาพของเถ้าปาล์มน้ำมันโดยการบดให้มีความละเอียดมากขึ้น ทำให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและเวลาการก่อตัวระยะปลายของคอนกรีตเร็วขึ้น เนื่องจากการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้นสามารถลดอุณหภูมิที่ดูดซึมน้ำให้น้อยลง และขนาดอนุภาคที่เล็กลงทำให้มีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มมากขึ้น ทำให้สามารถทำปฏิกิริยาได้เร็วและดีกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตามการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากขึ้น ยังคงทำให้คอนกรีตมีเวลาการก่อตัวนานขึ้นทั้งระยะต้นและระยะปลายหากใช้แทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้น เนื่องจากปริมาณ C_3S และ C_3A ที่ลดลงและแม้ว่าจะทำการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดสูงขึ้น แต่เถ้าปาล์มน้ำมันยังคงมีความพรุนหลงเหลืออยู่ในอนุภาค จึงทำให้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นตามการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีเวลาการก่อตัวนานขึ้น ส่วนการบดเถ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ยังไม่สามารถลดเวลาการก่อตัวให้อยู่ในระดับเดียวกับคอนกรีตควบคุม CT1 นอกจากนี้ยังพบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจาก G1P เป็น G2P ในอัตราส่วนผสมเดียวกัน ยังคงมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 4.9 เวลาการก่อตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกเบล-เปลือกไม้ (R) และเถ้าปล้มน้ำมัน (P)

Mixes		W / B		Slump (cm)		Setting Time (hr:min)			
						Initial		Final	
R	P	R	P	R	P	R	P	R	P
CT1		0.70		6.5		4:10		6:30	
CT5		0.70		6.5		6:00		8:45	
OR10	OP10	0.75	0.72	6.0	6.5	4:35	4:40	7:30	7:30
OR20	OP20	0.81	0.77	8.0	6.0	4:40	5:00	8:50	8:30
OR30	OP30	0.94	0.87	8.5	8.0	5:25	5:50	11:30	10:30
OR40	OP40	1.09	0.95	7.5	8.0	6:30	6:50	13:50	12:20
G1R10	G1P10	0.74	0.72	8.0	8.0	4:20	4:35	6:35	6:40
G1R20	G1P20	0.74	0.73	7.0	7.5	4:25	4:40	6:40	7:05
G1R30	G1P30	0.75	0.73	6.0	7.0	4:30	4:55	6:55	7:25
G1R40	G1P40	0.77	0.74	5.5	7.0	4:40	5:10	7:20	7:45
G2R10	G2P10	0.69	0.68	5.5	5.5	4:10	4:25	6:30	6:35
G2R20	G2P20	0.71	0.70	5.5	6.0	4:15	4:35	6:35	7:00
G2R30	G2P30	0.71	0.71	5.5	6.0	4:25	4:50	6:50	7:25
G2R40	G2P40	0.72	0.72	6.0	6.0	4:35	5:10	7:00	7:40

4.8 กำลังอัดของคอนกรีต

4.8.1 กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทุกส่วนผสมได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 โดยทำการควบคุมค่าการยุบตัวให้มีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10 ซม. เพื่อศึกษาปริมาณความต้องการน้ำในส่วนผสมของคอนกรีต

ตารางที่ 4.10 กำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

Samples	Compressive Strength (ksc) – <i>Normalized Compressive Strength (%)</i>					
	7 days	14 days	28 days	60 days	90 days	180 days
CT1	235 – 100	280 – 100	319 – 100	362 – 100	371 – 100	385 – 100
CT5	180 – 77	252 – 90	316 – 99	673 – 103	394 – 106	415 – 108
OR10	176 – 75	224 – 80	257 – 81	301 – 83	321 – 87	333 – 86
OR20	146 – 62	173 – 62	211 – 66	257 – 71	271 – 73	272 – 70
OR30	101 – 43	135 – 48	161 – 50	170 – 47	177 – 48	177 – 46
OR40	62 – 27	81 – 29	104 – 33	121 – 34	133 – 36	133 – 35
G1R10	230 – 98	275 – 98	315 – 99	360 – 99	383 – 103	417 – 108
G1R20	217 – 92	259 – 93	284 – 89	322 – 89	333 – 90	334 – 87
G1R30	165 – 70	200 – 71	228 – 71	261 – 72	267 – 72	268 – 70
G1R40	141 – 60	176 – 63	209 – 66	229 – 63	235 – 63	236 – 61
G2R10	254 – 108	301 – 108	345 – 108	409 – 113	451 – 122	468 – 122
G2R20	259 – 110	307 – 109	348 – 109	390 – 108	403 – 109	425 – 110
G2R30	220 – 94	262 – 94	296 – 93	339 – 94	348 – 94	350 – 91
G2R40	191 – 81	233 – 83	274 – 86	303 – 84	315 – 85	320 – 83

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีกำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตควบคุม (CT1)

รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR พบว่าคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ได้ทำการบด OR เป็นส่วนผสมทุกอัตราการแทนที่ให้กำลังอัดต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมมาก โดยเฉพาะการแทนที่ร้อยละ 20 ขึ้นไป คือคอนกรีต OR20, OR30, และ OR40 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 211, 161 และ 104 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 66, 50 และ 33 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ เมื่อคอนกรีตมีอายุเพิ่มขึ้นเป็น 180 วัน พบว่าแนวโน้มการพัฒนา

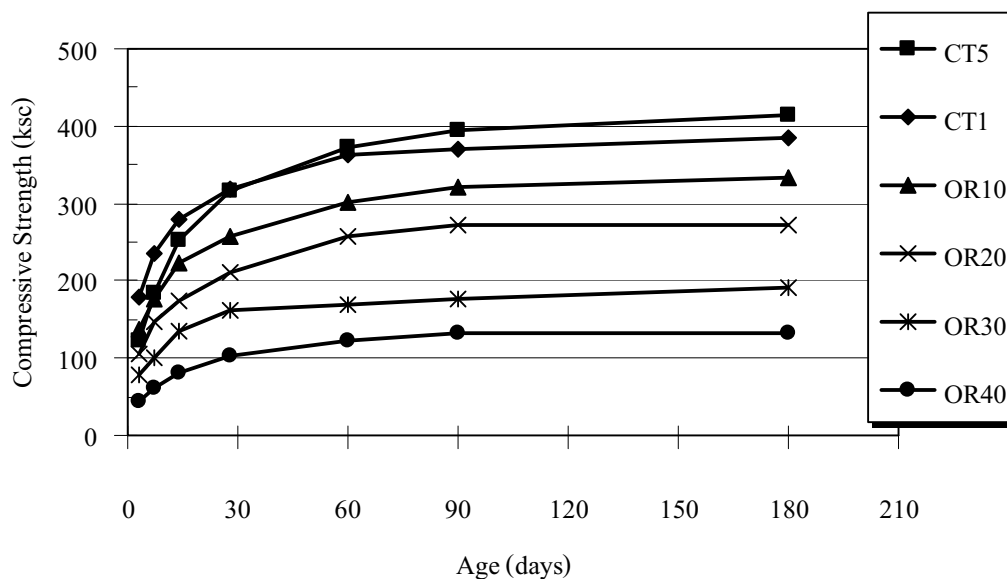
กำลังอัดยังเหมือนเดิม คือยังให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำและไม่มีอัตราการแทนที่ใดๆ ให้กำลังอัดเท่ากับคอนกรีตควบคุม โดยคอนกรีต OR10, OR20, OR30 และ OR40 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 333, 272, 191 และ 133 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 86, 70, 50 และ 35 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ให้สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงมากขึ้น ซึ่งคล้ายกับค่ากำลังอัดที่ลดลงกับการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบในคอนกรีต [4] ทั้งนี้ เนื่องจากขนาดอนุภาคที่ใหญ่และความพรุนสูงของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ทำให้คอนกรีตต้องการปริมาณน้ำในส่วนผสมสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่ในปูนซีเมนต์เป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานส่งผลให้กำลังอัดจึงต่ำลง [42]

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ได้แสดงในรูปที่ 4.26 พบว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดให้มีขนาดความละเอียดปานกลาง G1R มีการพัฒนากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ทำการบด (OR) มากเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่เท่ากัน เห็นได้จากที่อายุ 28 วัน การแทนที่ร้อยละ 40 ของคอนกรีต G1R40 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต OR40 ถึง 2 เท่า นอกจากนี้คอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 โดยน้ำหนักวัสดุประสานให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม CT1 โดยที่อายุ 28 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 315 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 99 ของคอนกรีตควบคุม และเมื่อมีอายุการทดสอบมากขึ้นกำลังอัดมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยที่อายุ 90 วัน คอนกรีต G1R10 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 383 กก/ซม² ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 หรือคิดเป็นร้อยละกำลังอัดเท่ากับ 103 ของคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดให้มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดขึ้นมีการพัฒนากำลังอัดเนื่องจากปฏิกิริยาปอซโซลานและปฏิกิริยาปอซโซลานที่สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีตได้

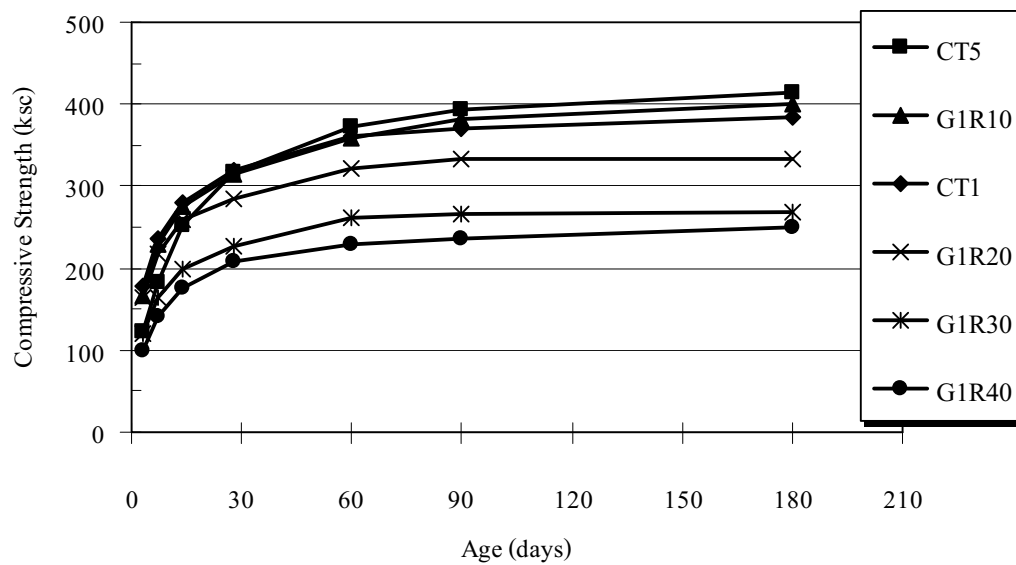
อย่างไรก็ตามพบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ให้สูงขึ้นทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงมากขึ้น อาจเป็นเพราะการบดวัสดุไม่ได้หมายความว่าความพรุนจะหมดไปแต่ยังมีความพรุนเหลืออยู่ในเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R จึงทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ให้สูงขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นตาม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail และ Waliuddin [53] ที่พบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบให้สูงขึ้นทำให้ความต้องการน้ำของคอนกรีตสดที่ผสมเถ้าแกลบสูงขึ้นด้วย

จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R พบว่าการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ตลอดอายุการทดสอบ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดอนุภาคที่ละเอียดสูงมากของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

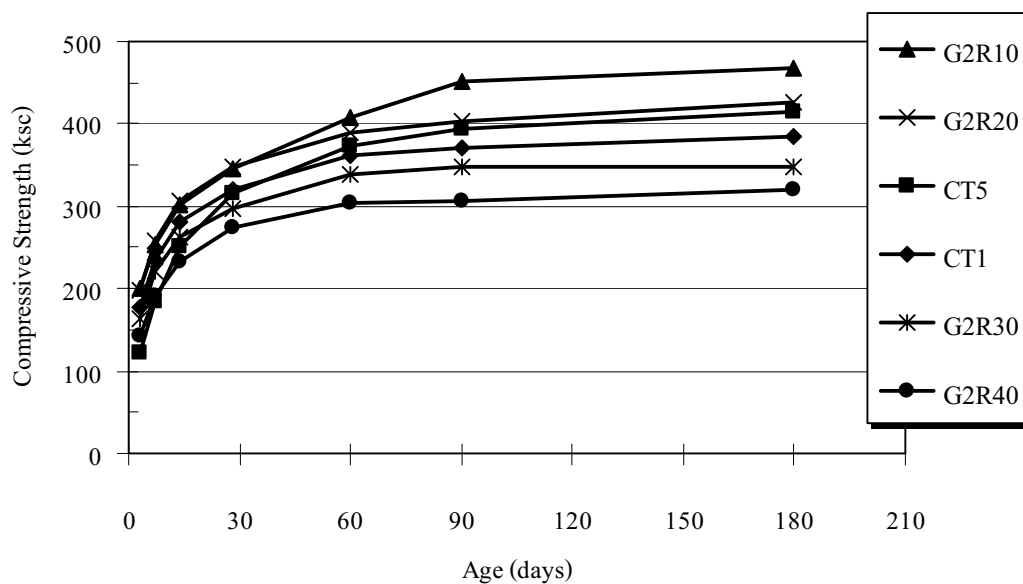
G2R ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ไปแทรกตามช่องว่างต่างๆ ของคอนกรีตส่งผลให้เกิดการอัดแน่นในคอนกรีตได้ด้วย ซึ่ง Isaia และ คณะ [7] ได้กล่าวไว้ว่าการบดละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มากขึ้นทำให้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความเป็นวัสดุปอซโซลานสูงขึ้นเช่นเดียวกับวัสดุปอซโซลานชนิดอื่นๆ เช่น เถ้าถ่านหิน [54] อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R ให้สูงขึ้นเป็นร้อยละ 30 และ 40 กำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคล้ายกับการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR และ G1R ทั้งนี้เป็นเพราะความพรุนที่ยังหลงเหลืออยู่ในเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R ทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าคอนกรีต G2R40 มีกำลังอัดที่อายุ 180 วัน เท่ากับ 320 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 83 ของคอนกรีตควบคุม แสดงให้เห็นว่าการแทนที่ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดให้มีความละเอียดมาก G2R สามารถนำไปใช้ในงานคอนกรีตได้ โดยสามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึงประมาณร้อยละ 30-40 ของน้ำหนักวัสดุประสาน



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R

4.8.2 กำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน โดยปรับปริมาณน้ำในส่วนผสมให้มีค่าการยุบตัวระหว่าง 5 ถึง 10 ซม.

ตารางที่ 4.11 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล้างน้ำมัน

Samples	W/B	Slump (cm.)	Compressive Strength (ksc)– <i>Normalized Compressive Strength (%)</i>					
			7 days	14 days	28 days	60 days	90 days	180 days
CT1	0.70	6.5	235 – 100	280 – 100	319 – 100	362 – 100	371 – 100	385 – 100
CT5	0.70	6.5	183 – 78	252 – 90	316 – 99	373 – 103	394 – 106	415 – 108
OP10	0.72	6.5	175 – 74	214 – 76	245 – 77	281 – 78	292 – 79	308 – 80
OP20	0.77	6.0	150 – 64	185 – 66	212 – 66	247 – 68	255 – 69	266 – 69
OP30	0.87	8.0	108 – 46	127 – 45	150 – 47	174 – 48	188 – 51	193 – 50
OP40	0.95	8.0	54 – 23	76 – 27	99 – 31	108 – 30	115 – 31	118 – 31
G1P10	0.72	8.0	224 – 95	264 – 94	301 – 94	350 – 97	376 – 101	390 – 101
G1P20	0.73	7.5	191 – 81	226 – 81	269 – 84	316 – 87	334 – 90	347 – 90
G1P30	0.73	7.0	172 – 73	209 – 74	238 – 75	285 – 79	295 – 80	302 – 78
G1P40	0.74	7.0	155 – 66	187 – 67	226 – 71	267 – 74	270 – 73	277 – 72
G2P10	0.68	5.5	239 – 102	285 – 102	319 – 100	374 – 103	390 – 105	400 – 104
G2P20	0.70	6.0	230 – 98	275 – 98	316 – 99	370 – 102	386 – 104	395 – 103
G2P30	0.71	6.0	209 – 89	248 – 88	301 – 94	356 – 98	368 – 99	376 – 98
G2P40	0.72	6.0	182 – 77	237 – 85	275 – 86	317 – 88	322 – 87	330 – 86

หมายเหตุ : ส่วนที่แรเงาหมายถึงคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล้างน้ำมันมีกำลังอัดเท่ากับหรือมากกว่าคอนกรีตควบคุม (CT1)

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปลาล้างน้ำมันก่อนบด (OP) ผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แสดงดังในรูปที่ 4.28 พบว่าที่อายุ 7 วัน คอนกรีต OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 175, 150, 108 และ 54 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 74, 64, 46 และ 23 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มเป็น 214, 185, 127 และ 76 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 76, 66, 45 และ 27 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ เมื่อมีอายุเพิ่มเป็น 14 วัน ที่อายุ 28 วัน กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 245, 212, 150 และ 99 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 77, 66, 47 และ 31 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ และที่อายุ 60 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มเป็น 281, 247, 174 และ 108 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 78, 68, 48 และ 30 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ หลังจากนั้นในช่วงอายุปลายกำลังอัดของคอนกรีตมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นน้อยมาก โดยที่อายุ 90 วัน คอนกรีต OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 292, 255,

188 และ 115 กก/ชม² หรือเท่ากับร้อยละ 79, 69, 51 และ 31 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 308, 266, 193 และ 118 กก/ชม² หรือเท่ากับร้อยละ 80, 69, 50 และ 31 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ ที่อายุ 180 วัน

เห็นได้ว่าตลอดอายุการทดสอบนี้ ยังไม่มีคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนผสมใด ที่มีการพัฒนากำลังอัดให้มีความสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ได้ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าปาล์มน้ำมัน OP มีขนาดอนุภาคใหญ่ จึงทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย เมื่อนำมาแทนที่ในปูนซีเมนต์กำลังอัดที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานจึงไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปริมาณปูนซีเมนต์ และเนื่องจากการดูดซึมน้ำของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่อนุภาคมีความพรุนสูง เมื่อนำมาผสมในคอนกรีตจึงทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานของคอนกรีตสูงขึ้น จากอนุภาคที่ใหญ่และมีความพรุนสูงของเถ้าปาล์มน้ำมัน OP นี้ การใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงจึงทำให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำลงอย่างมาก ดังนั้นเถ้าปาล์มน้ำมัน OP จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีต

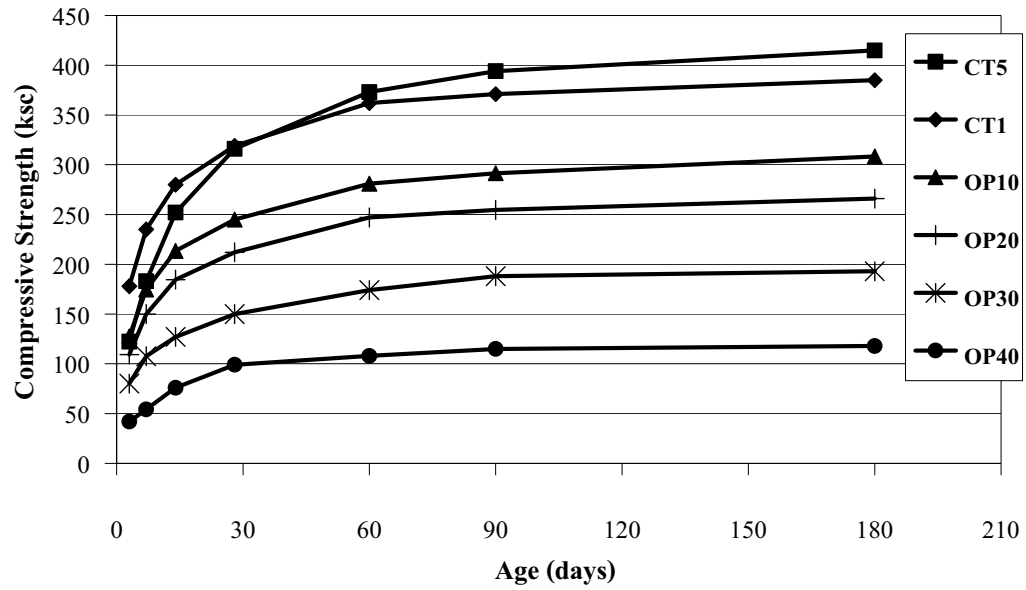
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการบ่มในน้ำประปาของคอนกรีตที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P เป็นส่วนผสม พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ที่อัตราการแทนที่เดียวกัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P มีกำลังอัดสูงกว่ามากในทุกอายุการทดสอบ โดยเฉพาะที่อัตราการแทนที่สูง โดยคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 ที่อายุ 7 วัน มีกำลังอัดเท่ากับ 224, 191, 172, 155 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 95, 81, 73, 66 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ เห็นได้ว่าค่ากำลังอัดยังคงมีค่าลดลงเมื่อแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นจากร้อยละ 10 เป็นร้อยละ 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน แต่มีอัตราการลดลงของกำลังอัดน้อยกว่าของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP และเมื่อพิจารณาที่อายุ 28 และ 60 วัน กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 301, 269, 238, 226 และ 350, 316, 285, 267 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 94, 84, 75, 71 และ 97, 87, 79, 74 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตยังคงมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อายุ 90 วัน กำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 376, 334, 295 และ 270 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 101, 90, 80 และ 73 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ เห็นได้ว่าอัตราการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นอัตราส่วนผสมเดียวที่สามารถพัฒนากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ได้ และที่อายุ 180 วัน คอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 มีกำลังอัดเท่ากับ 390, 374, 302 และ 277 กก/ชม² หรือคิดเป็นร้อยละ 101, 90, 78 และ 72 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ

สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ซึ่งบดละเอียดมากจนมีอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เพียงร้อยละ 1 ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุการทดสอบในรูปที่ 4.30 พบว่าที่อัตราส่วนการแทนที่เดียวกัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P มีกำลังอัดสูงขึ้นกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

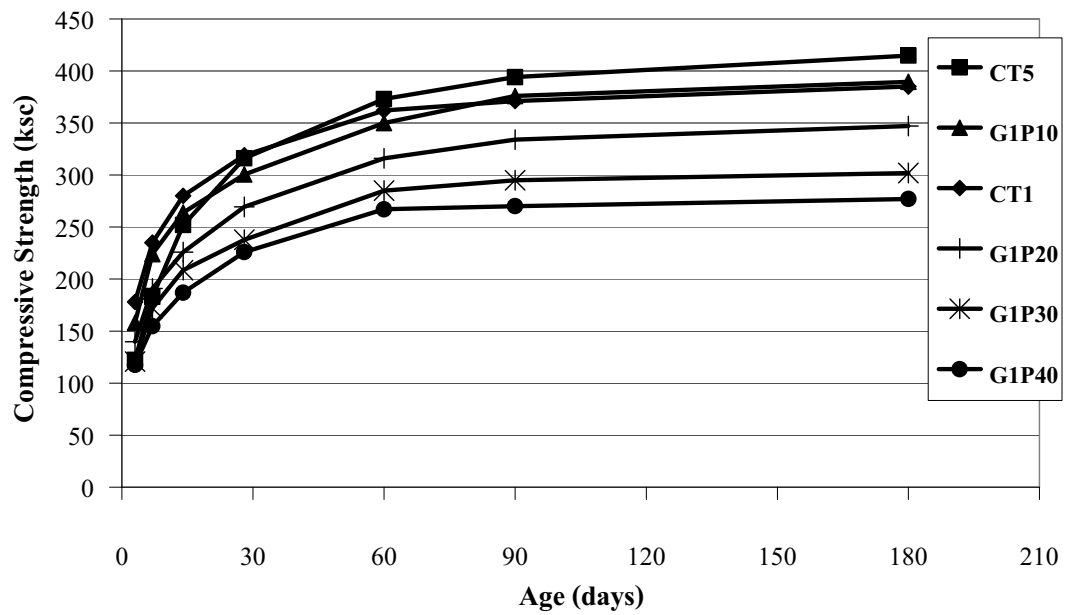
G1P โดยที่อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 7 และ 60 วัน ตามลำดับ ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 กำลังอัดมีค่าสูงกว่าร้อยละ 90 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 28 วัน โดยคอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 ที่อายุ 7 วัน มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 239, 230, 209 และ 182 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 102, 98, 89 และ 77 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ สันเกตว่าอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 ยังคงเป็นอัตราส่วนผสมเดียวที่สามารถพัฒนากำลังอัดได้สูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ส่วนที่อายุ 14 และ 28 วัน กำลังอัดมีค่าเท่ากับ 285, 275, 248, 237 และ 319, 316, 301, 275 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 102, 98, 88, 85 และ 100, 99, 94, 86 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาที่อายุ 60 และ 90 วัน คอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีกำลังอัดเท่ากับ 374, 370, 356, 317 และ 390, 386, 368, 322 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 103, 102, 98, 88 และ 105, 104, 99, 87 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคอนกรีตยังมีการพัฒนากำลังอัดสูงขึ้น โดยคอนกรีต G2P20 สามารถพัฒนากำลังอัดจนมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 ได้ที่อายุ 60 วัน จากนั้นในช่วงอายุปลายกำลังอัดของคอนกรีตยังมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยที่อายุ 180 วัน คอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 มีกำลังอัดเท่ากับ 400, 395, 376 และ 330 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 104, 103, 98 และ 86 ของคอนกรีตควบคุม CT1 ตามลำดับ

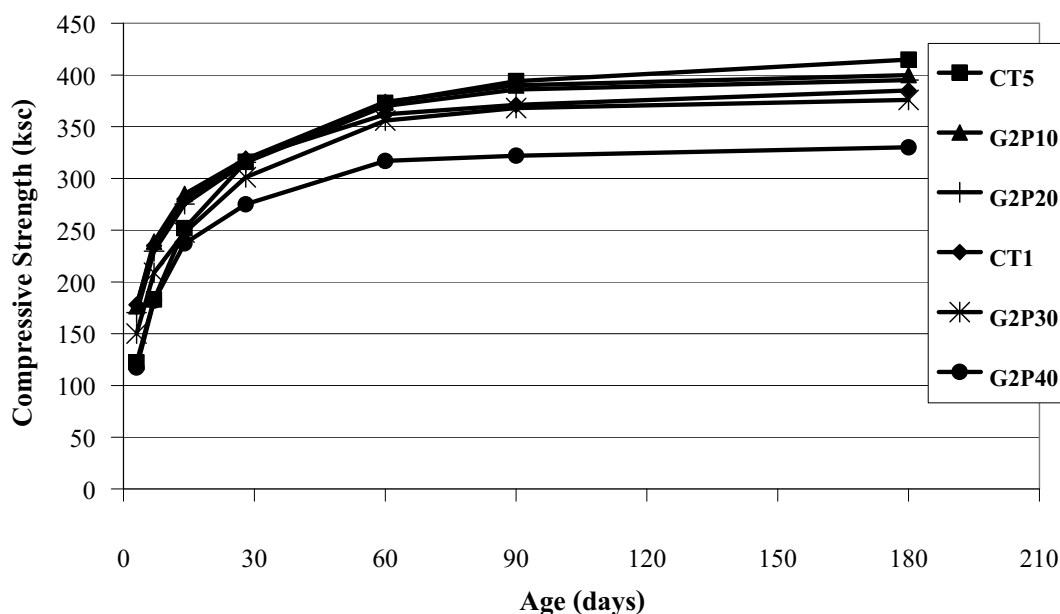
จากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าความละเอียดของเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตให้ดีขึ้น เนื่องจากความละเอียดที่เพิ่มขึ้นทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้เร็วและดีขึ้น นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กของเถ้าปาล์มน้ำมันยังสามารถเข้าไปแทรกในช่องว่างต่างๆ ของคอนกรีตได้ดีขึ้น ทำให้คอนกรีตเกิดการอัดแน่น จึงทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้น ซึ่งการอัดแน่นของคอนกรีตยังส่งผลให้ความต้านทานการซึมผ่านจากสารละลายต่างๆ ได้ดีขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการแทนที่ในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดต่ำลง เนื่องจากการดูดน้ำของเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น และอัตราการแทนที่ที่สูงถึงร้อยละ 40 ทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงมาก ปริมาณ Ca(OH)_2 จึงเกิดขึ้นน้อย ทำให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานไม่สามารถชดเชยกำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากการลดปริมาณของปูนซีเมนต์ได้



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P

4.9 การขยายตัวของคอนกรีต

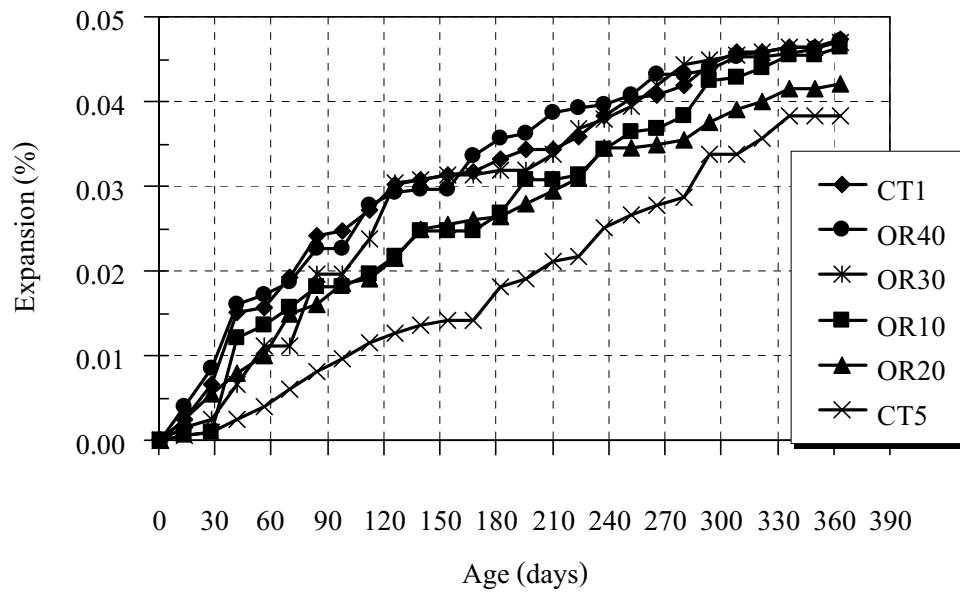
4.9.1 การขยายตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบ-เปลือกไม้

จากรูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้ OR ผลการทดสอบพบว่า คอนกรีตควบคุม CT1 มีการขยายตัวสูงกว่าคอนกรีตควบคุม CT5 ตลอดอายุการทดสอบอย่างเห็นได้ชัด โดยที่อายุ 364 วัน คอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 มีการขยายตัวเท่ากับ 0.0474 และ 0.0382 ตามลำดับ ส่วนการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้ OR พบว่าที่อายุการแช่ 364 วัน คอนกรีต OR10, OR20, OR30 และ OR40 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0464, 0.0420, 0.0469 และ 0.0472 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้ OR ทุกอัตราการแทนที่มีอัตราการขยายตัวที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT1 โดยเฉพาะการแทนที่ร้อยละ 20 มีการขยายตัวต่ำมากที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะความถ่วงจำเพาะที่ต่ำของเถ้ากลบ-เปลือกไม้ OR ทำให้การแทนที่ปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็นการลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่สูงมาก ซึ่งมี C_3A ที่ก่อให้เกิด Ettringite และลดการเกิด $Ca(OH)_2$ เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตก่อให้เกิด Gypsum สารประกอบทั้งสองประเภทนี้ทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและส่งผลให้เกิดการแตกร้าวได้ [55] อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ-เปลือกไม้ OR ยังมีการขยายตัวสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสานทุกปริมาณการแทนที่

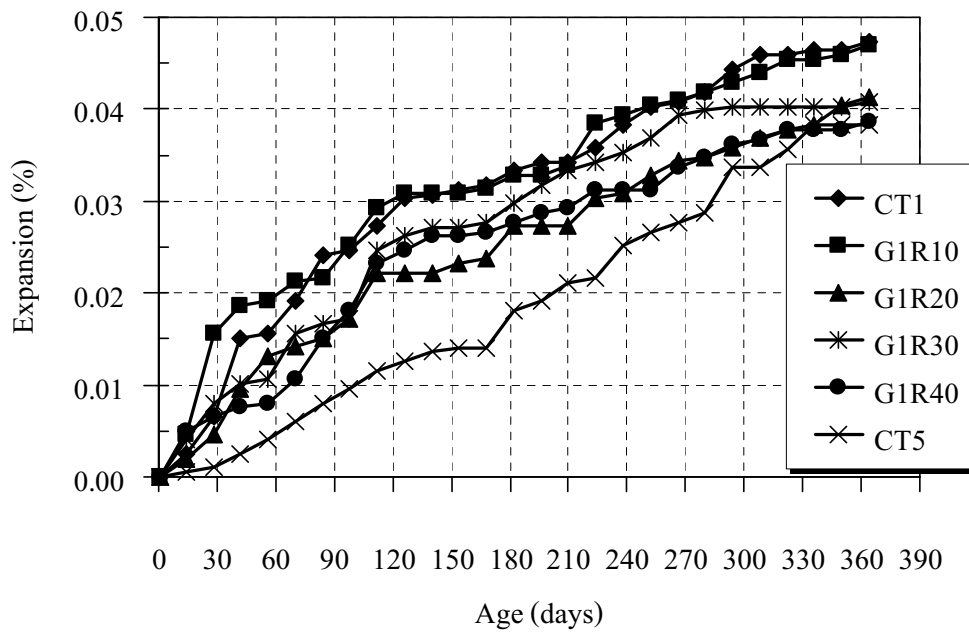
ส่วนคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของมอร์ตาร์แสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ พบว่าที่อายุ 364 วันทุกอัตราการแทนที่มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยแท่งคอนกรีต G1R10, G1R20, G1R30 และ G1R40 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0469, 0.0413, 0.0408 และ 0.0387 ตามลำดับ ส่วนแท่งคอนกรีต G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0333, 0.0323, 0.0321 และ 0.0301 ตามลำดับ ผลการทดสอบยังชี้ให้เห็นว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R ทุกอัตราการแทนที่มีอัตราการขยายตัวต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และยังพบว่าการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ให้สูงขึ้นทำให้การขยายตัวในคอนกรีตลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดสูงขึ้นทำให้เกิด C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานมากขึ้น คอนกรีตจึงมีที่บ้น้ำสูงขึ้น นอกจากนี้การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ยังเป็นการลดปริมาณ C_3A และ $Ca(OH)_2$ ที่ทำให้เกิด Ettringite และ Gypsum ที่ส่งผลให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าวได้

เป็นที่น่าสังเกตว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R มีอัตราการขยายตัวที่สูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 ตลอดอายุการทดสอบ ส่วนแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R พบว่าช่วงอายุ 196 ถึง 280 วันมีการขยายตัวไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 มากนัก ซึ่งหลังจากนั้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R ทุกอัตราการแทนที่มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 จนถึงอายุ 364 วัน

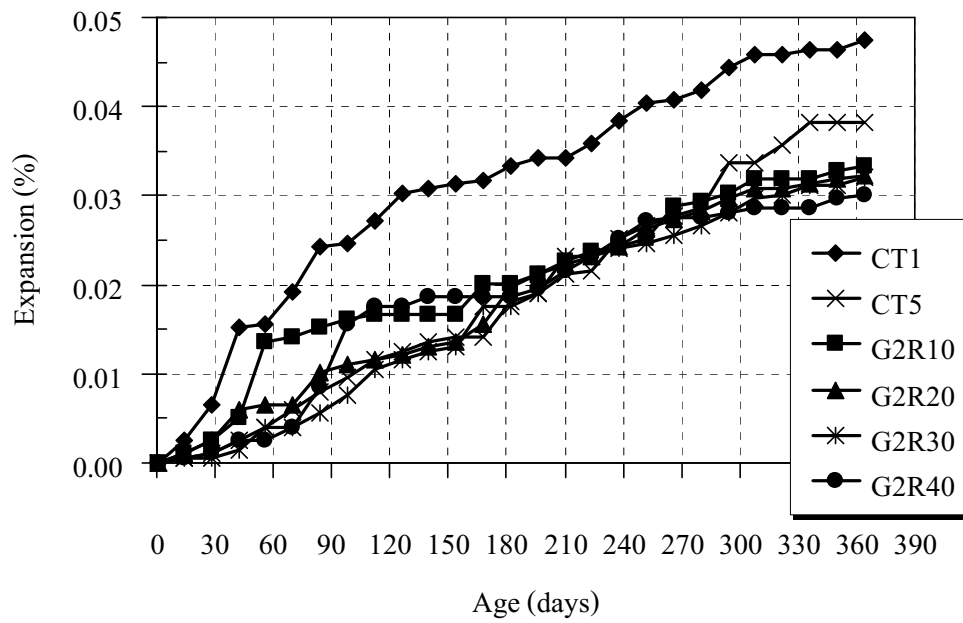
เมื่อพิจารณาความเสียหายของแท่งคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.34 เห็นได้ชัดว่าแท่งตัวอย่างคอนกรีตทั้งสองมีคราบสีขาวของ Brucite เคลือบที่ผิวเป็นจำนวนมากและพบว่าไม่มีรอยแตกร้าวใดๆ เกิดขึ้น ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตยังไม่สามารถทำลายคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ทั้งสองประเภทได้มากนัก ส่วนความเสียหายของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR, G1R และ G2R ที่อัตราการแทนที่ต่างๆ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4.35, 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ พบว่าความเสียหายของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทุกขนาดความละเอียดที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 เกิดรื้อร้าวและเกิดการหลุดร่อนที่ขอบและมุมของแท่งตัวอย่างคอนกรีตเพียงเล็กน้อย ส่วนที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการหลุดร่อนที่เนื้อของคอนกรีตอย่างมาก ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้สูงขึ้นส่งผลให้แท่งคอนกรีตเกิดการหลุดร่อนมากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะการเพิ่มปริมาณการแทนที่เป็นการเพิ่มค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานให้สูงขึ้น ทำให้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตซึมเข้าไปทำลาย C-S-H ให้กลายเป็น M-S-H ได้มาก ซึ่ง M-S-H นี้ไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานจึงส่งผลให้เนื้อของคอนกรีตหลุดร่อนได้ง่าย



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR



รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเส้นใยกลบ-เปลือกไม้ G2R



รูปที่ 4.34 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 และ CT5 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน



รูปที่ 4.35 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน



รูปที่ 4.36 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน



รูปที่ 4.37 ความเสียหายของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน

เป็นที่น่าสังเกตว่าที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 40 ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทุกขนาดความละเอียดเกิดการหลุดร่อนที่ผิวคอนกรีตสูงมากกว่าอัตราการแทนที่อื่นๆ โดยเฉพาะที่ขอบและมุมสามารถสังเกตเห็นเม็ดทรายและหินอย่างชัดเจน อาจเป็นเพราะการขาดชั้นที่เคลือบผิวของ $Mg(OH)_2$ หรือ Brucite ประกอบกับการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณต่างของ K_2O ที่มีอยู่ในเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สูงถึงร้อยละ 2 จึงส่งผลให้เกิดความเสียหายเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R ซึ่งมีความละเอียดมากที่สุดเกิดการหลุดร่อนที่ผิวของคอนกรีตมากกว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ชนิดอื่น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการเพิ่มขึ้นของปริมาณ C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาปอซโซลานก่อให้เกิด M-S-H ซึ่งไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสานได้มากขึ้นตาม นอกจากนี้ Collepardi และ คณะ [56] กล่าวว่าไว้ว่าการใช้วัสดุปอซโซลานที่มีปริมาณอลูมินาสูงส่งผลให้เกิดการทำลายเนื่องจากซัลเฟตได้รุนแรงมากขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของแคลเซียมอลูมินไฮดรต ที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายและสูญเสียกำลังอัดมากขึ้น

4.9.2 การขยายตัวของคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน พบว่าแท่งคอนกรีตมีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องในอัตราคงที่ สังเกต

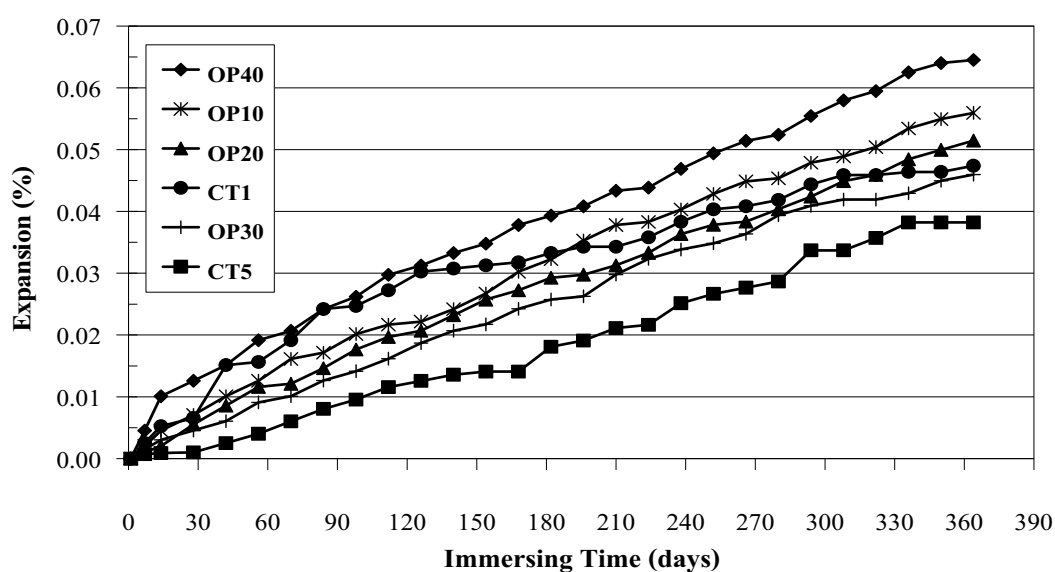
ได้จากความชันของเส้นกราฟที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในทุกอัตราส่วนผสม มีค่าการขยายตัวสูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 ตลอดอายุการทดสอบ ซึ่งในช่วงแรกการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง 30 มีค่าการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 แต่หลังจากนั้นการแทนที่ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ที่อายุ 364 วัน ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 ยังคงมีค่าการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ตลอดอายุการทดสอบ และที่การแทนที่ร้อยละ 40 เป็นอัตราส่วนผสมที่มีการขยายตัวสูงสุด โดยมีค่าการขยายตัวสูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ในทุกอายุการทดสอบ ซึ่งที่อายุ 364 วัน แท่งคอนกรีต OP10, OP20, OP30 และ OP40 มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0549, 0.0515, 0.0460 และ 0.0645 ตามลำดับ

เห็นได้ว่าการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนร้อยละ 30 มีค่าการขยายตัวต่ำสุดและมีค่าน้อยกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากการแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมัน OP ในอัตราส่วนที่สูงดังกล่าวสามารถลดปริมาณปูนซีเมนต์ลงได้มาก ทำให้มีปริมาณ C_3A น้อยลง จึงลดการทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ทำให้ Ettringite ที่เป็นสาเหตุของการขยายตัว [57, 58] เกิดขึ้นน้อยลง ดังนั้นการขยายตัวจึงลดลง แต่การแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงถึงร้อยละ 40 แม้จะสามารถลดปริมาณ C_3A ลงได้ แต่ทำให้คอนกรีตมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้นอย่างมาก แท่งคอนกรีตจึงมีความพรุนสูงส่งผลให้เกิดการซึมผ่านของน้ำสูง สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตจึงสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่าย ซึ่งสอดคล้องกับการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ซึ่งที่การแทนที่ร้อยละ 30 มีการขยายตัวต่ำสุด เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 40 การขยายตัวกลับมีค่าเพิ่มขึ้น

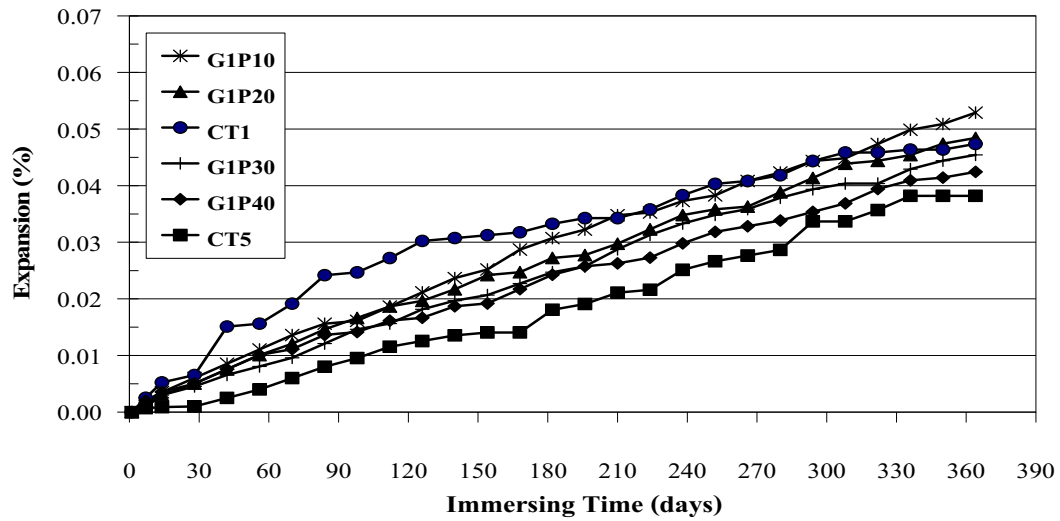
เมื่อพิจารณาการขยายตัวกับอายุการแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ดังแสดงในรูปที่ 4.39 พบว่าในช่วง 240 วันแรก แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P มีค่าการขยายตัวใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 แต่สูงกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 และเมื่อแท่งคอนกรีตแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 มีการขยายตัวมากขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 การขยายตัวยังคงมีค่าน้อยกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 โดยแท่งคอนกรีต G1P10, G1P20, G1P30 และ G1P40 ที่อายุ 364 วัน มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0529, 0.0485, 0.0454 และ 0.0425 ตามลำดับ ส่วนการขยายตัวของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P แสดงในรูปที่ 4.40 พบว่าทุกอัตราส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT1 ซึ่งการแทนที่ร้อยละ 40 มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุม CT5 โดยแท่งคอนกรีต G2P10, G2P20, G2P30 และ G2P40 ที่อายุ 364 วัน มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.0464, 0.0429, 0.0399 และ 0.0363 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP, G1P และ G2P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน ในรูปที่ 4.41 ถึง 4.43 พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP ทุกอัตราส่วนผสมยังไม่เกิดความเสียหาย มีเพียงคราบสีขาวเกาะอยู่ที่ผิวไม่แตกต่างกัน ส่วนแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P และ G2P ที่การแทนที่สูงมีคราบสีขาวน้อยกว่าแท่งคอนกรีตที่มีการแทนที่ต่ำกว่า ส่วนความเสียหายของแท่งคอนกรีตเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยที่บริเวณขอบและมุมของแท่งคอนกรีตที่มีการแทนที่สูงเท่านั้น โดยสภาพของแท่งคอนกรีตโดยรวมยังคงอยู่ในสภาพที่ดี เนื่องจากร้อยละการขยายตัวของแท่งคอนกรีตมีค่าเพียงเล็กน้อย

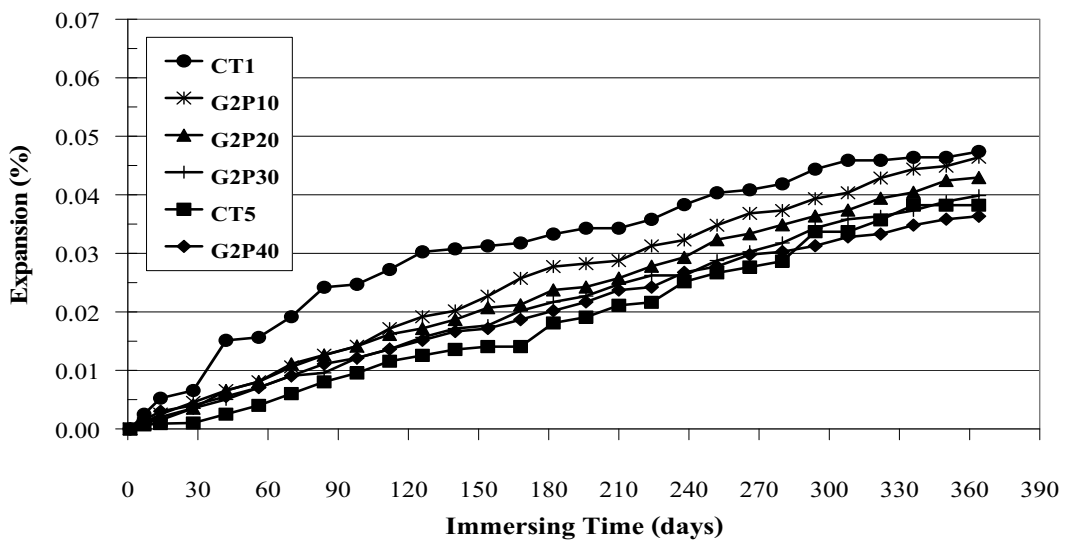
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลของความละเอียดและอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อการขยายตัวของแท่งคอนกรีตเมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน พบว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวต่ำกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ และการแทนที่ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นพบว่ามีการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (OP) มีเพียงการแทนที่ร้อยละ 30 เท่านั้นที่มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (CT1) ส่วนแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลาง (G1P) ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สำหรับแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) ทุกอัตราส่วนผสม มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวใกล้เคียงและต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 (CT5) ตามลำดับ



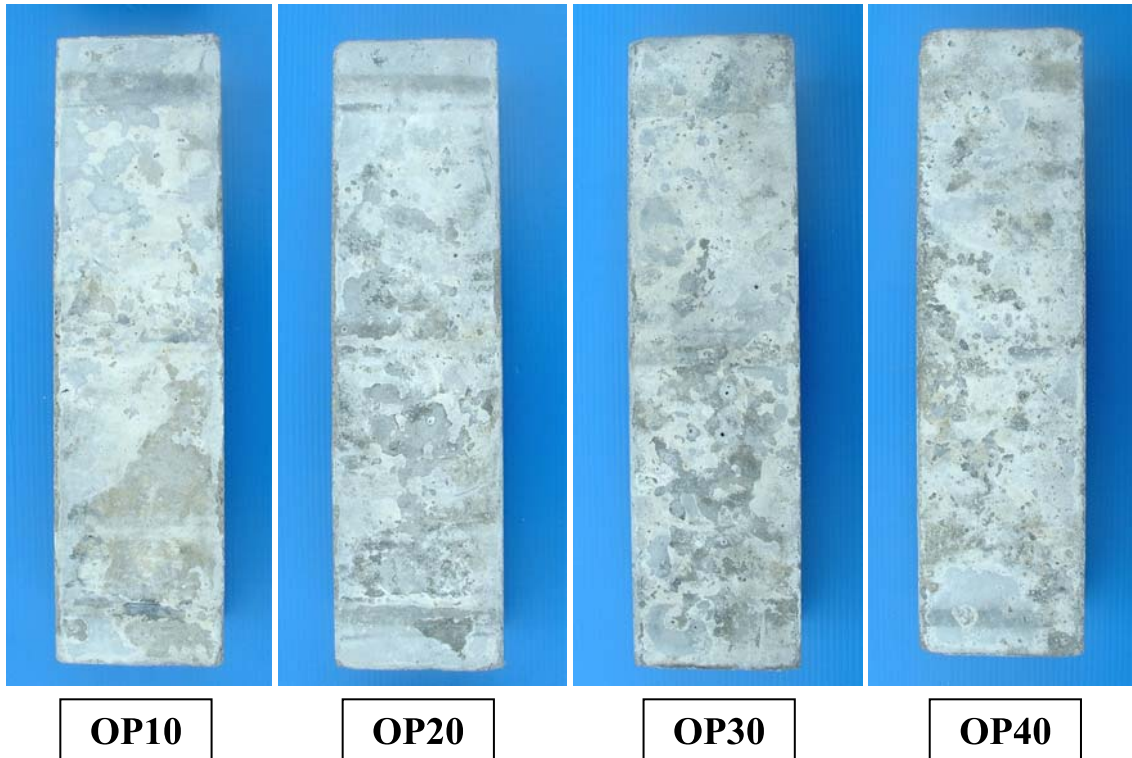
รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน OP



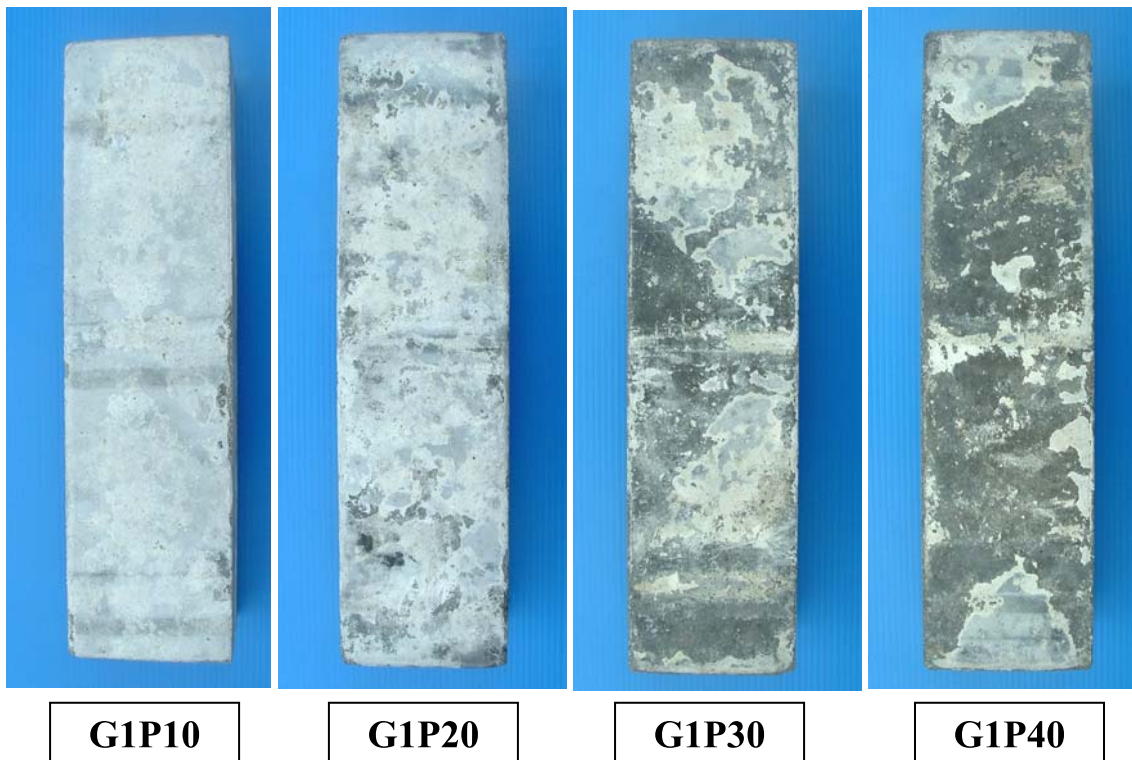
รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายเมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน G1P



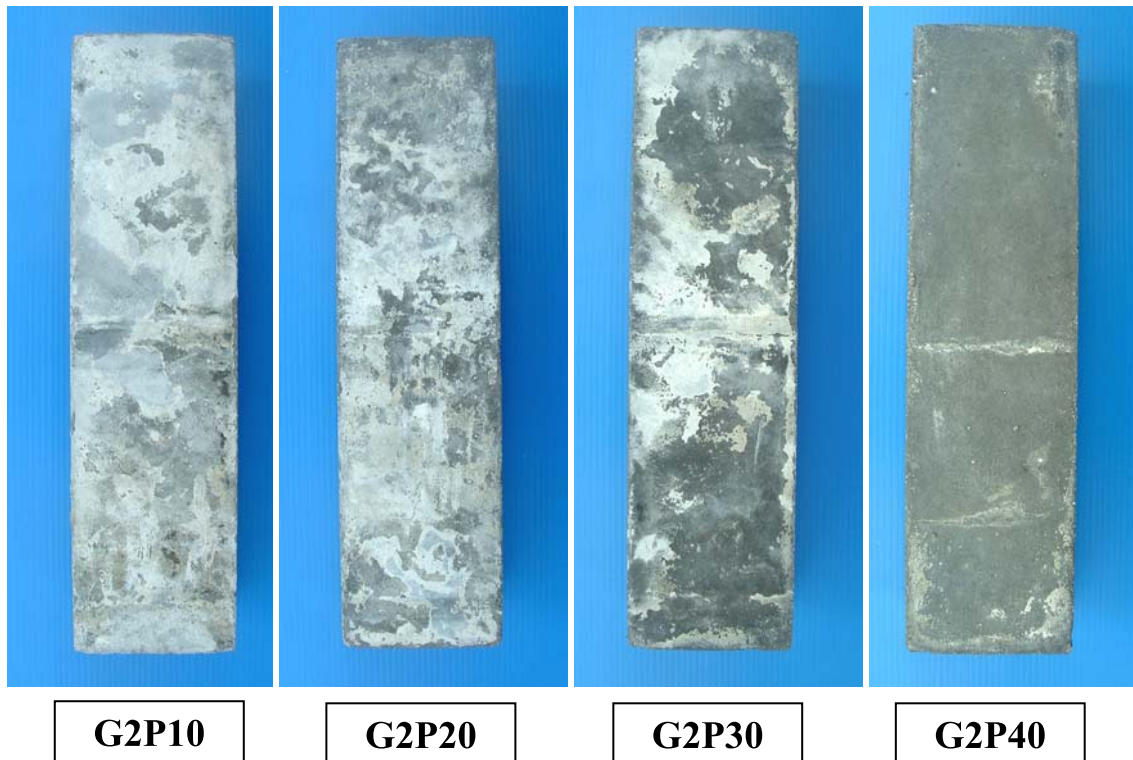
รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับเวลาที่แช่ในสารละลายเมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 ของแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน G2P



รูปที่ 4.41 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน OP ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน



รูปที่ 4.42 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปลาล์มน้ำมัน G1P ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน



รูปที่ 4.43 แท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G2P ที่ใช้ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต
ความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน

4.10 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตและร้อยละของค่าดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 และ 90 วัน เท่ากับ 2.89×10^{-12} และ 2.05×10^{-12} เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลของงานวิจัยที่ผ่านมาของ Li และ Chau [59]

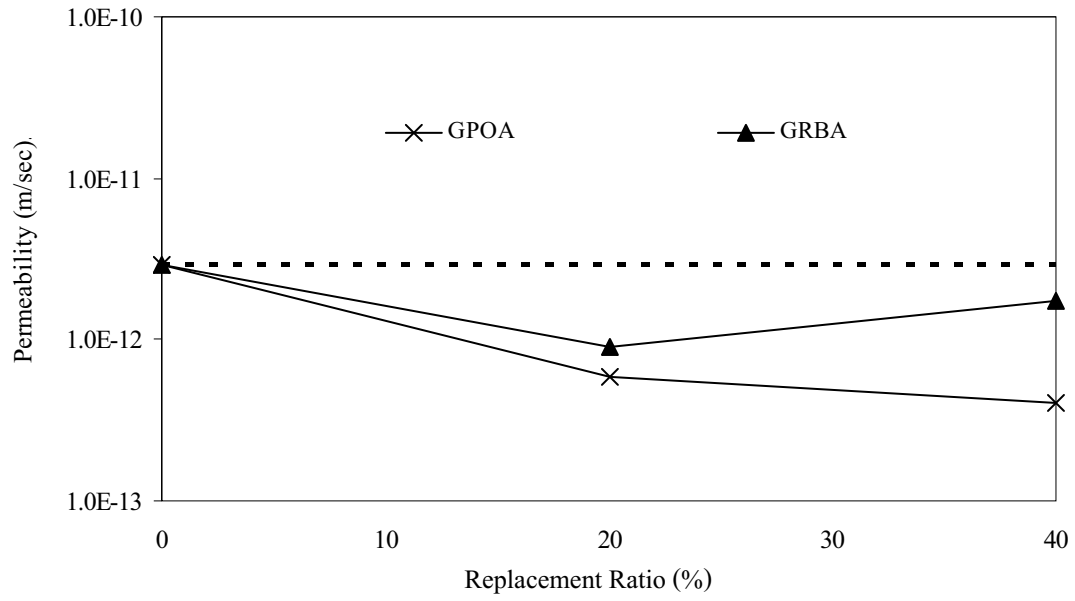
ตารางที่ 4.12 ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

Mixed	Permeability $\times 10^{-12}$, $k_{(m/sec)} - k / c_{control}$	
	28 days	90 days
OPC	2.89 – 1.00	2.05 – 1.00
G2P20	0.59 – 0.20	0.25 – 0.12
G2P40	0.41 – 0.14	0.26 – 0.13
G2R20	0.90 – 0.31	0.42 – 0.21
G2R40	1.74 – 0.60	1.33 – 0.65

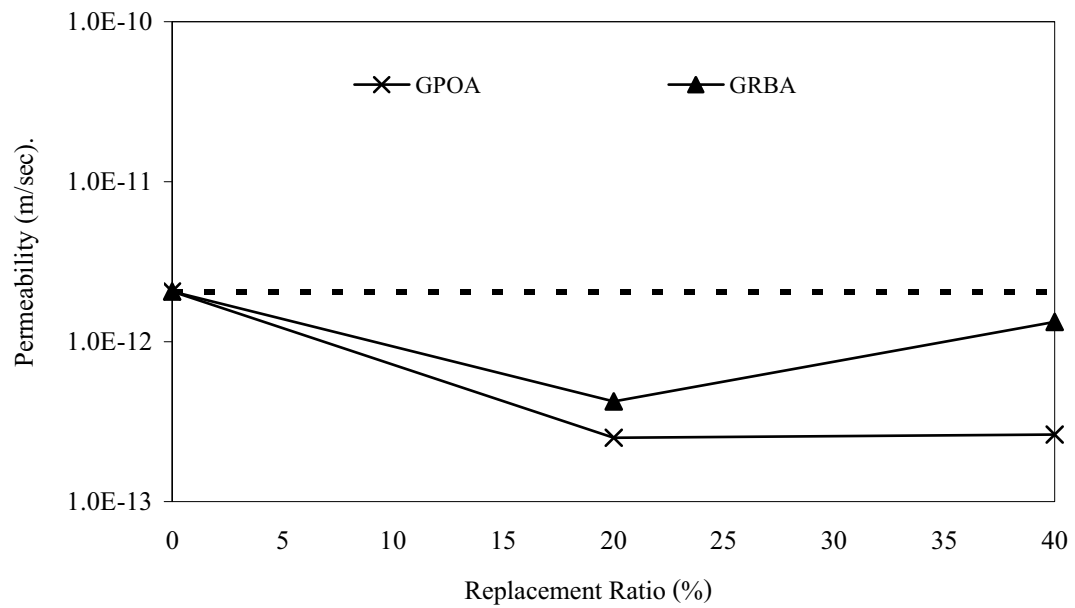
สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดที่อายุ 28 วันมีค่าการซึมผ่าน 0.59×10^{-12} และ 0.41×10^{-12} เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 0.20 และ 0.14 ของคอนกรีตควบคุม และเมื่ออายุ 90 วัน ค่าการซึมผ่าน น้ำลดลงมีค่าเท่ากับ 0.25×10^{-12} และ 0.26×10^{-12} เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 0.12 และ 0.13 ของ คอนกรีตควบคุม เป็นที่น่าสังเกตว่า G2P20 และ G2P40 มีค่าการซึมผ่านน้ำที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งๆ ที่มีความต้องการน้ำในส่วนผสมสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากปฏิกิริยาปอซโซลานที่ทำให้เนื้อของคอนกรีตแน่นขึ้น

ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก็ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 โดยที่อายุ 28 วัน ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เท่ากับ 0.90×10^{-12} และ 1.74×10^{-12} เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 0.31 และ 0.60 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ และเมื่ออายุ 90 วัน ค่าการซึมผ่านน้ำเท่ากับ 0.42×10^{-12} และ 1.33×10^{-12} เมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 0.21 และ 0.65 ของคอนกรีตควบคุม ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่าร้อยละของการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต G2R40 ที่อายุ 90 วันสูงกว่าที่อายุ 28 วัน ซึ่งหมายความว่า การพัฒนาของการที่บ่มน้ำของคอนกรีตดังกล่าว น้อยกว่าคอนกรีตควบคุม อย่างไรก็ตามคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก็ยังมีค่าการซึมผ่านที่ต่ำกว่า คอนกรีตควบคุม

รูปที่ 4.44 และ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการซึมผ่านน้ำกับอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ที่ อายุ 28 และ 90 วัน ตามลำดับ เมื่อพิจารณาพบว่า ที่อายุ 28 วัน คอนกรีตโดยส่วนใหญ่มีค่าการซึมผ่านน้ำ ที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตที่มีค่าการซึมผ่านที่ต่ำที่สุดคือ G2P40 ยิ่งไปกว่านั้น ค่าการซึม ผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อมีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วย อัตราส่วนร้อยละ 40 แต่ในขณะเดียวกัน คอนกรีตที่ผสมเถ้าถ่านหินและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ มีแนวโน้ม ของค่าการซึมผ่านน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มการแทนที่มากกว่าร้อยละ 20 และเมื่อพิจารณาที่ 90 วัน ก็พบว่า คอนกรีตโดยส่วนใหญ่มีค่าการซึมผ่านน้ำที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับที่อายุ 28 วัน จากผลการทดลองนี้ เป็นแน่ชัดว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยวัสดุปอซโซลานในอัตราส่วนร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ทำให้ คอนกรีตมีความทึบน้ำมากขึ้นและค่าการซึมผ่านน้ำมีแนวโน้มสูงขึ้นตามปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าการซึมผ่านน้ำ
ของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์กับค่าการซึมผ่านน้ำ
ของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน

4.11 คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.13 แสดงกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10 ถึง 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ที่อายุการบ่มต่างๆ

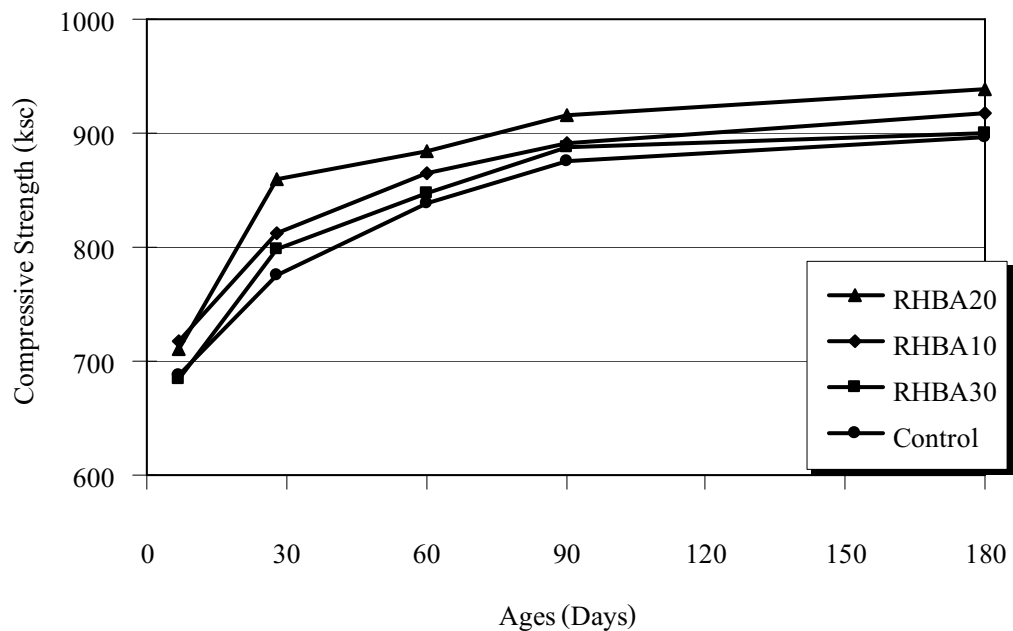
4.11.1 กำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ได้แสดงในรูปที่ 4.46 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทุกอัตราส่วนผสมมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยที่อายุ 28 วันกำลังอัดของคอนกรีต RHBA10, RHBA20 และ RHBA30 มีค่าเท่ากับ 863, 875 และ 847 กก/ซม² ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 9-13 กำลังอัดที่เพิ่มขึ้นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เนื่องจากความละเอียดที่สูง ทำให้ปฏิกิริยาปอซโซลานเกิดได้เร็วและอนุภาคที่มีขนาดเล็กสามารถเข้าไปแทรกภายในช่องว่างระหว่างมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ismail และ Waliuddin [53] จากผลการทดสอบเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้แทนที่ซีเมนต์สามารถใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงได้

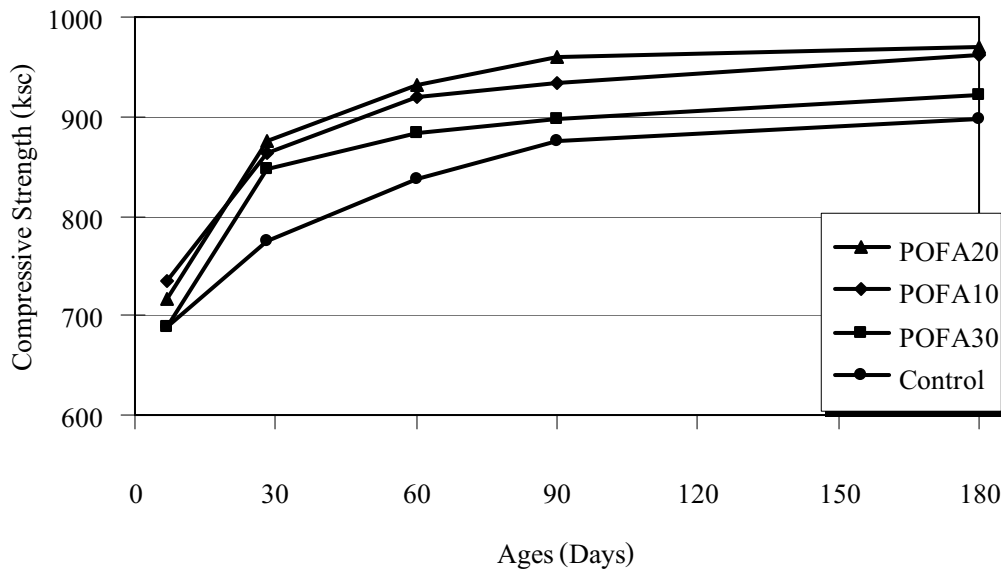
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงในรูปที่ 4.47 พบว่าที่อายุ 7 วัน กำลังอัดของคอนกรีตแทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 มีค่าเท่ากับ 717 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 104 ของคอนกรีตควบคุม ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่การแทนที่ร้อยละ 20 และ 30 ในช่วงอายุต้นชี้ให้เห็นว่าการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในปริมาณที่สูง (ร้อยละ 90) ในคอนกรีต POFA10 ทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สูงกว่าคอนกรีต POFA20 และ POFA30 หลังจากนั้นที่อายุ 7 วัน พบว่าคอนกรีต POFA20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีต POFA10 และ POFA30 โดยที่อายุ 28 วัน กำลังอัดของคอนกรีต POFA20 มีค่าเท่ากับ 859 กก/ซม² หรือเท่ากับร้อยละ 111 ของคอนกรีตควบคุม ส่วนคอนกรีต POFA10 และ POFA30 ที่มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 813 และ 798 กก/ซม² ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณ SiO₂ ที่สูงถึงร้อยละ 65.30 และความละเอียดที่สูงของ POFA สามารถทำปฏิกิริยากับ Ca(OH)₂ ก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ซึ่งเป็นสารประกอบที่ให้กำลังอัดแก่คอนกรีตในช่วงอายุปลาย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussin และ Awal [10] ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมัน ขนาดความละเอียดสูงแทนที่ปูนซีเมนต์ในคอนกรีต โดยพบว่าการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงสามารถแทนที่ได้สูงถึงร้อยละ 30

ตารางที่ 4.13 กำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

Sample	Compressive Strength (ksc) - <i>Normalized Compressive Strength (%)</i>					90-day Modulus of Elasticity ($\times 10^5$ ksc)
	7 days	28 days	60 days	90 days	180 days	
Control	688- 100	775- 100	838- 100	875- 100	897- 100	4.47
RHBA10	734- 107	863- 111	919- 110	933- 107	961- 107	4.49
RHBA20	716- 104	875- 113	932- 111	959- 110	970- 108	4.55
RHBA30	689- 100	847- 109	883- 105	897- 103	922- 103	4.30
POFA10	717- 104	813- 105	865- 103	891- 102	918- 102	4.35
POFA20	711- 103	859- 111	885- 106	915- 105	939- 105	4.40
POFA30	685- 100	798- 103	847- 101	887- 101	900- 100	4.27



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

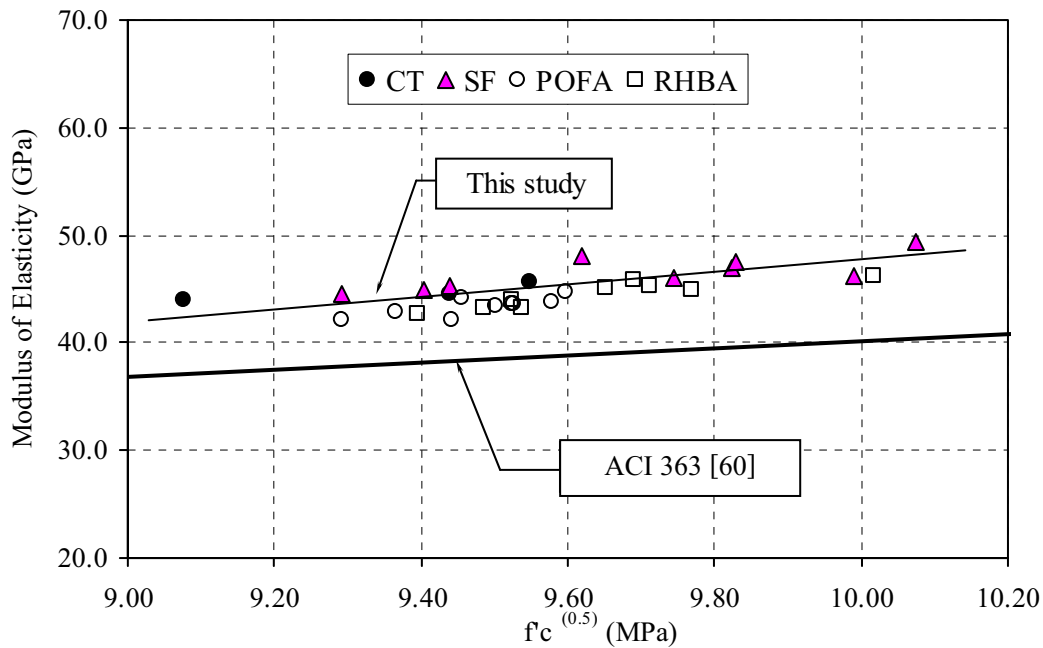


รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอายุบ่มของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปลาลมน้ำมัน

4.11.2 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูง

ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปลาลมน้ำมันแสดงไว้ในตารางที่ 4.14 พบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงอยู่ในช่วง 4.2×10^5 ถึง 4.5×10^5 กก/ชม² ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ 4.4×10^5 กก/ชม² แสดงซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปลาลมน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งให้ผลคล้ายกันกับคอนกรีตกำลังปกติ ตัวอย่างเช่น ที่อายุ 90 วัน คอนกรีต POFA10 และ POFA30 มีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ 4.3×10^5 กก/ชม² และ 4.2×10^5 กก/ชม² โดยมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 918 และ 900 กก/ชม² ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงที่ได้จากการศึกษานี้กับสมการที่ใช้คำนวณหาค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจาก ACI 363 [60] ดังแสดงในรูปที่ 4.48 พบว่าค่าโมดูลัสที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการของ ACI 363 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Rashid [61] ทั้งนี้เนื่องจากค่ากำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูงที่ได้จากการศึกษานี้มีค่าสูงกว่าค่ากำลังอัดที่ใช้ในการคำนวณของสมการ ACI 363 นอกจากนี้อาจเนื่องจากความแตกต่างของแหล่งและชนิดของมวลหยาบที่ใช้ทำคอนกรีตกำลังสูงด้วย [62]



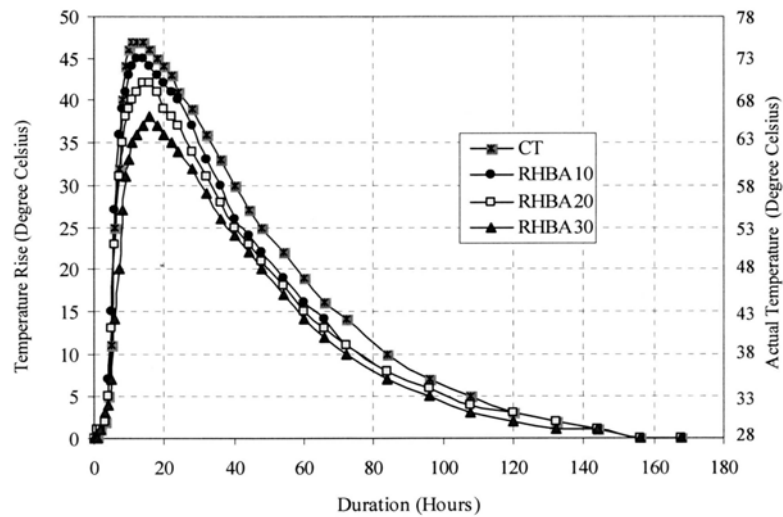
รูปที่ 4.48 ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.11.3 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูง

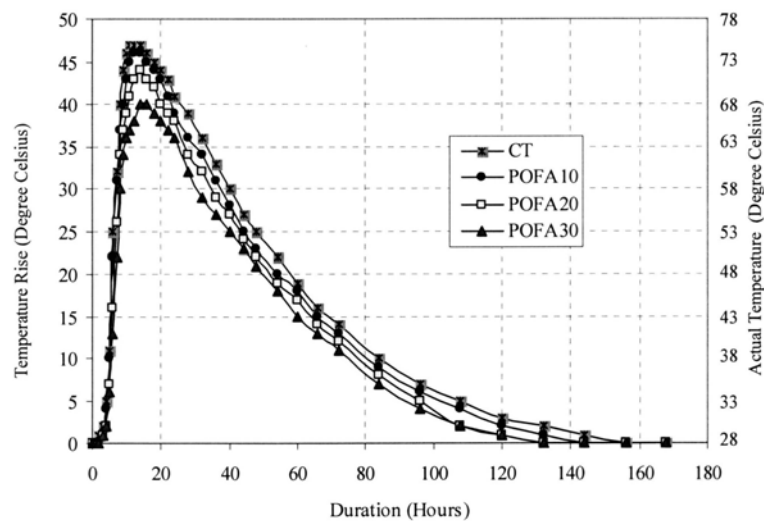
ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูงแสดงในตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.49 และ 4.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนที่เพิ่มขึ้นกับระยะเวลาของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ตามลำดับ พบว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์อย่างเดียวเป็นส่วนผสมมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 47°C ที่ระยะเวลา 12 ชั่วโมงหลังจากการผสม คอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีค่าอุณหภูมิสูงสุดเพิ่มขึ้นเท่ากับ 45, 42 และ 38°C และมีระยะเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 13, 15 และ 16 ชั่วโมง สำหรับคอนกรีต RHBA10, RHBA20 และ RHBA30 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม CT ส่วนคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าให้ผลเช่นเดียวกันกับคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ กล่าวคือมีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยคอนกรีต POFA10, POFA20 และ POFA30 มีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 46, 44 และ 40°C และมีระยะเวลาที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 13, 14 และ 15 ชั่วโมงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันจึงลดลงตาม

ตารางที่ 4.14 ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตกำลังสูง

Sample	Peak Temp Rise (°C)	Reduce from CT (°C)	Reduce Temp (%)	Peak Time after Casting (Hours)
CT	47	-	100	12
RHBA10	45	2	96	13
RHBA20	42	5	89	15
RHBA30	38	9	79	16
POFA10	46	1	98	13
POFA20	44	3	94	14
POFA30	40	7	85	15



รูปที่ 4.49 ความร้อนของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้



รูปที่ 4.50 ความร้อนของคอนกรีตกำลังสูงที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

4.12 อิฐคอนกรีต

4.12.1 อิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

ตารางที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐคอนกรีตซึ่งใช้หินเกร็ด และเพิ่มส่วนละเอียดของมวลรวมด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราส่วนร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของมวลรวมหยาบ ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.60, 0.65, 0.70 และ 0.80 ตามลำดับ และขึ้นรูปอิฐคอนกรีตด้วยแรงดันเท่ากับ 50 กก/ซม² พบว่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณน้ำต่อวัสดุประสานเพิ่มมากขึ้น โดยอิฐคอนกรีต 80GR50 มีค่ากำลังอัดที่สูงที่สุดในกลุ่ม คือมีค่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีตเท่ากับ 408 และ 527 กก/ซม² ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.80 ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุที่มีการดูดซึมน้ำที่สูงจึงต้องการน้ำเพื่อใช้ในการทำปฏิกิริยาสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณามาตรฐานอุตสาหกรรมอิฐบล็อกประสานปูพื้น พบว่าอิฐคอนกรีต 65GR50 และ 70GR50 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 400 และ 429 กก/ซม² สามารถจัดอยู่ในประเภทอุตสาหกรรมอิฐบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานทั่วไปตามมาตรฐาน มอก. 827-2531 [32] ส่วนอิฐคอนกรีต 80GR50 มีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 527 กก/ซม² สามารถจัดอยู่ในประเภทอุตสาหกรรมอิฐบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนักตามมาตรฐาน มอก. 2035-2543 [63] แสดงว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดสามารถนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์ถึงร้อยละ 50 เพื่อขึ้นรูปอิฐคอนกรีตได้

ตารางที่ 4.15 กำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่ใช้แรงดันในการอัดขึ้นรูป 50 กก/ซม²

Symbol	W/B	Pressure (ksc)	Compressive Strength (ksc)	
			7 days	28 days
60GR50	0.60	50	307	366
65GR50	0.65	50	320	400
70GR50	0.70	50	333	429
80GR50	0.80	50	408	527

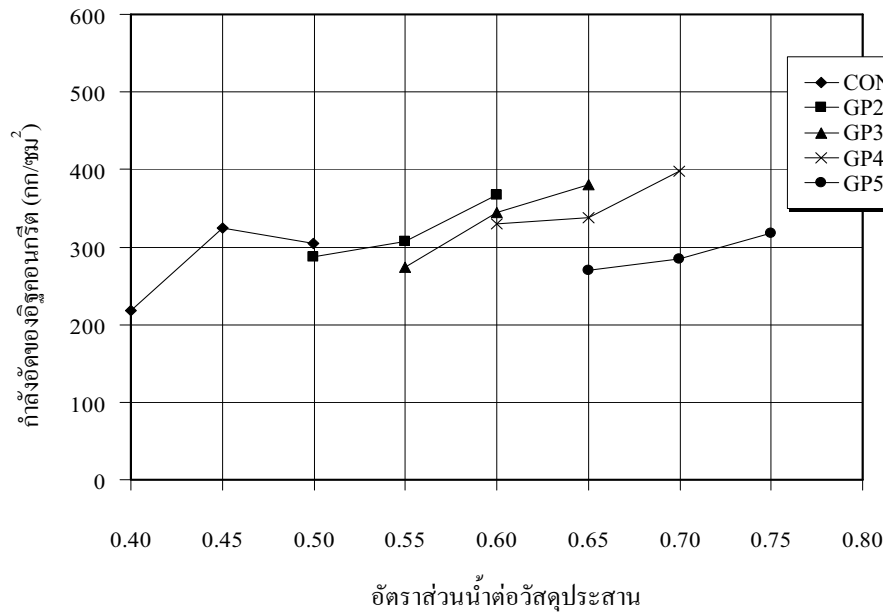
อย่างไรก็ตามในหลักทฤษฎีของคอนกรีตเทคโนโลยี อิฐคอนกรีตที่มี W/B ต่ำ (ใช้ W/B = 0.6) ควรให้กำลังที่สูงกว่าอิฐคอนกรีตที่มี W/B สูง (W/B = 0.80) แต่อิฐคอนกรีตที่ใช้ W/B เท่ากับ 0.80 ให้ค่าสูงสุด เพราะเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ดูดน้ำเข้าสู่ตัวเองบางส่วน นอกจากนี้แรงดันที่ใช้ในการขึ้นรูปครั้งนี้ (50 กก/ซม²) ยังสูงไม่พอที่จะอัดอิฐคอนกรีตที่มี W/B ต่ำกว่า 0.80 ให้แน่นได้อย่างเต็มที่

4.12.2 อิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน

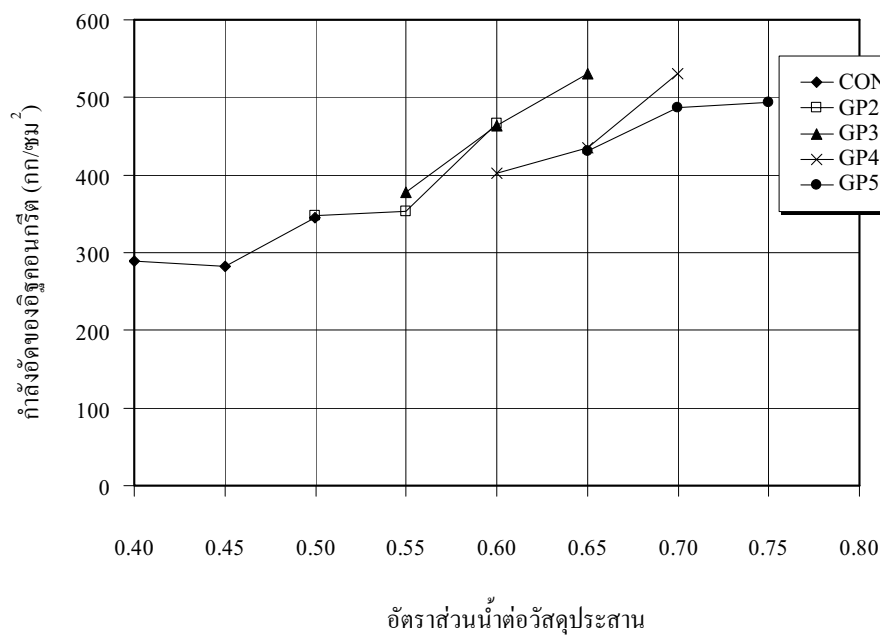
จากตารางที่ 4.16 แสดงค่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนรูปที่ 4.51 และ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของอิฐคอนกรีตกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ พบว่าอิฐคอนกรีตเมื่อเพิ่ม W/B มากขึ้นตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่งผลให้กำลังของอิฐคอนกรีตมีอัตราเพิ่มมากขึ้น สังเกตได้จากเส้นกราฟที่มีความชันเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.52 และพบอีกว่าในแต่ละร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ค่า W/B ที่มากที่สุดให้กำลังอัดของอิฐคอนกรีตมากที่สุดด้วย ตัวอย่าง เช่น อิฐคอนกรีต GP20 มีค่า W/B เท่ากับ 0.50, 0.55 และ 0.60 มีกำลังอัดเท่ากับ 287, 307, และ 367 กก/ซม² ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากอิฐคอนกรีตที่ใช้ค่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงขึ้น อิฐคอนกรีตที่ได้ไม่แห้งมาก ส่งผลให้ส่วนผสมภายในเนื้อก้อนอิฐได้รับการอัดอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ปูนซีเมนต์และน้ำสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าปาล์มน้ำมันได้อย่างทั่วถึง ส่งผลให้กำลังอัดสูงกว่าอิฐคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่มีค่าน้อย นอกจากนี้การใช้แรงดัน 50 กก/ซม² ยังไม่ถือว่าสูงมาก ดังนั้นหากสามารถใช้เครื่องอัดอิฐที่มีแรงอัดสูงกว่า 50 กก/ซม² จะสามารถขึ้นรูปอิฐที่มี W/B ต่ำ และอิฐคอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้สูงกว่านี้

ตารางที่ 4.16 กำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันและใช้แรงดันอัดอิฐ 50 กก/ซม²

Symbol	Replacement by POFA (%)	W/B	Compressive Strength (kg/cm ²)	
			7 days	28 days
CON	0	0.40	219	289
		0.45	325	282
		0.50	305	346
GP20	20	0.50	287	348
		0.55	307	353
		0.60	367	466
GP30	30	0.55	275	378
		0.60	345	464
		0.65	381	530
GP40	40	0.60	329	402
		0.65	338	435
		0.70	398	531
GP50	50	0.65	271	431
		0.70	284	488
		0.75	318	494



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่อายุ 28 วัน

สำหรับกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.52 พบว่าแนวโน้มของการพัฒนา กำลังอัดของอิฐคอนกรีตเหมือนกับกำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่อายุ 7 วัน คือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสานให้มีค่าเพิ่มขึ้นตามร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นผลให้กำลังอัดของอิฐ คอนกรีตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วย โดยกำลังอัดของอิฐคอนกรีต CON, GP20, GP30, GP40, และ GP50 เมื่อมี

W/B เท่ากับ 0.50, 0.60, 0.65, 0.70, และ 0.75 มีกำลังอัดเท่ากับ 346, 466, 530, 531 และ 491 กก/ชม² ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการพัฒนากำลังอัดของอิฐคอนกรีตสูงขึ้น เมื่ออิฐคอนกรีตมีอายุมากขึ้น

จากตารางที่ 4.16 พบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ทำให้อิฐคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีกำลังอัดเป็นไปตามที่ มอก. 827-2531 [2] กำหนด คือมีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 400 กก/ชม² ได้แก่ อิฐคอนกรีต GP20 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.60, อิฐคอนกรีต GP30 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.60 และ 0.65, อิฐคอนกรีต GP40 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.60, 0.65 และ 0.70 และอิฐคอนกรีต GP50 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.65, 0.70 และ 0.75

4.12.1.1 กำลังอัดสูงสุดของอิฐคอนกรีตในแต่ละร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

ตารางที่ 4.17 แสดงค่ากำลังอัดสูงสุดของอิฐคอนกรีตในแต่ละร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันพบว่าอิฐคอนกรีต CON มีกำลังอัดเท่ากับ 325 และ 346 กก/ชม² ที่อายุ 7 และ 28 วัน ตามลำดับ ส่วนอิฐคอนกรีต GP20, GP30, GP40 และ GP50 ทุกอายุการทดสอบมีกำลังอัดสูงกว่าอิฐคอนกรีต CON อิฐคอนกรีต GP20 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.60 มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับ 367 และ 466 กก/ชม² ตามลำดับ อิฐคอนกรีต GP30 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.65 มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับ 381 และ 530 กก/ชม² ตามลำดับ อิฐคอนกรีต GP40 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.70 มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 7, และ 28 วัน เท่ากับ 398 และ 531 กก/ชม² ตามลำดับ และอิฐคอนกรีต GP50 เมื่อค่า W/B เท่ากับ 0.75 มีกำลังอัดสูงสุดที่อายุ 7 และ 28 วัน เท่ากับ 318 และ 494 กก/ชม² ตามลำดับ

ผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐคอนกรีตข้างต้นแสดงให้เห็นว่า การแทนที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงในปูนซีเมนต์ทำให้การพัฒนากำลังอัดของอิฐคอนกรีตดี นอกจากนี้ยังพบว่าที่ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 30 ถึง 40 ให้ผลของกำลังอัดที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับทุกร้อยละการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมัน ในขณะที่การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่ร้อยละ 50 ซึ่งเป็นร้อยละการแทนที่สูงสุด ค่ากำลังอัดที่ได้ยังสูงกว่ากำลังอัดของอิฐคอนกรีตที่ไม่ได้แทนที่ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน ตัวอย่างเช่น ที่อายุการทดสอบ 28 วัน อิฐคอนกรีต GP50 มีกำลังอัดสูงกว่าอิฐคอนกรีต CON เท่ากับ 148 กก/ชม² แม้ว่าอิฐคอนกรีต GP50 จะมี W/B เท่ากับ 0.75 ซึ่งสูงกว่า W/B ของอิฐคอนกรีต CON ที่มี W/B เท่ากับ 0.45

จากตารางที่ 4.17 พบว่าอิฐคอนกรีต GP20, GP30, GP40 และ GP50 มีกำลังที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 466, 530, 531 และ 494 กก/ชม² ตามลำดับซึ่งสามารถจัดเป็น คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้นได้ เนื่องจากมีกำลังที่อายุ 28 วัน สูงกว่า 400 กก/ชม² ตามที่ มอก. 827-2531 [32] กำหนด

ตารางที่ 4.17 กำลังอัดที่สูงสุดของอิฐคอนกรีตในแต่ละร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน

Symbol	Replacement by POFA (%)	7 days		28 days	
		W/B	Compressive Strength (ksc)	W/B	Compressive Strength (ksc)
CON	0	0.45	325	0.50	346
GP20	20	0.60	367	0.60	466
GP30	30	0.65	381	0.65	530
GP40	40	0.70	398	0.70	531
GP50	50	0.75	318	0.75	494

4.12.1.2 การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีต

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบการดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดของแต่ละร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันที่อายุ 7 และ 28 วัน พบว่าอิฐคอนกรีตทุกร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน และทุกอายุการทดสอบมีค่าการดูดซึมน้ำค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 4.5 ถึง 6.9 ที่อายุ 7 วัน และค่าการดูดซึมน้ำมีค่าลดลงเหลือเพียงร้อยละ 3.2 ถึง 4.6 เมื่ออายุ 28 วัน ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

ผลการทดสอบกำลังอัดของอิฐคอนกรีต ร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าปาล์มน้ำมัน และค่าการดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีต หากพิจารณาอิฐคอนกรีตที่ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด พบว่าอิฐคอนกรีต GP30 ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด แต่เมื่อคำนึงถึงเรื่องกำลังอัด (มากกว่า 400 กก/ชม²) ของอิฐคอนกรีต และราคา (ใช้ปูนซีเมนต์น้อย) พบว่าอิฐคอนกรีต GP50 มีกำลังอัดมากกว่า 400 กก/ชม² มีค่าการดูดซึมน้ำไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งตรงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 827-2531 [32] คอนกรีตบล็อกประสานปูพื้น จึงเป็นส่วนผสมที่น่าสนใจที่จะนำไปใช้ในงานจริง

ตารางที่ 4.18 การดูดซึมน้ำของอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีค่ากำลังอัดสูงสุดในแต่ละ W/B

Symbol	Replacement by POFA (%)	7 days		28 days	
		W/B	Water Absorption (%)	W/B	Water Absorption (%)
CON	0	0.45	4.5	0.50	3.7
GP20	20	0.60	5.2	0.60	4.1
GP30	30	0.65	4.8	0.65	3.9
GP40	40	0.70	6.6	0.70	4.6
GP50	50	0.75	6.9	0.75	3.2

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดสอบ

จากผลการศึกษาทดลองงานวิจัยนี้ สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน ขึ้นอยู่กับความละเอียด อัตราส่วนการแทนที่ในปูนซีเมนต์ และอายุของมอร์ตาร์ โดยมอร์ตาร์ที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงกว่าสามารถให้กำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดีกว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำกว่า

กำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมาก (ค่าแรงเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 5) ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 15, 20, 25 และ 29 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ สำหรับกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานจากการแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนด้วยเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 8, 18, 22 และ 28 ของมอร์ตาร์มาตรฐาน ตามลำดับ

5.1.2 การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทำให้เวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายของคอนกรีตนานขึ้น และนานมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่สูงขึ้น ส่วนการผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีระยะเวลาการก่อตัวเร็วว่าการผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ โดยคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปานกลาง (G1) และบดละเอียดมาก (G2) ในอัตราส่วนร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ มีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

5.1.3 คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบด (O) แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกอัตราส่วนผสมและทุกอายุการทดสอบ พบว่ากำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม และกำลังอัดมีค่าต่ำลงมากเมื่อมีการแทนที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดปานกลาง (G1) และบดละเอียดมาก (G2) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 ตามลำดับ พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่อายุ 90 วัน มีค่าใกล้เคียงและมากกว่าเมื่อเทียบกับมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียว

5.1.4 เมื่อแช่คอนกรีตในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 พบว่าการขยายตัวของคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทุกขนาดความละเอียดมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และการขยายตัวมีค่าลดลงตามการเพิ่มปริมาณการแทนที่ของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดปานกลาง (G1R) และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมาก (G2R) ให้สูงขึ้น นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมาก (G2R) มีการขยายตัวที่ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ทุกปริมาณการแทนที่

ส่วนเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดสูงทำให้คอนกรีตมีการขยายตัวต่ำกว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีความละเอียดต่ำ และการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนที่สูงขึ้นพบว่าการขยายตัวมีแนวโน้มลดลง โดยแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดปานกลาง (G1P) ในอัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 364 วัน และแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันขนาดละเอียดมาก (G2P) ทุกอัตราส่วนผสม (แทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40) ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตเป็นเวลา 364 วัน มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 มีการขยายตัวใกล้เคียงและต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ทำด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ตามลำดับ

5.1.5 การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตที่สูงขึ้น โดยค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของการแทนที่ปูนซีเมนต์และอายุของคอนกรีต และค่าการซึมผ่านน้ำลดลงเมื่อกำลังอัดและอายุของคอนกรีตเพิ่มมากขึ้น

5.1.6 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก โดยมีความละเอียดข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ไม่เกินร้อยละ 2 สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ในการทำคอนกรีตกำลังสูงได้ดี และการแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20 และ 30 ให้กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เพียงอย่างเดียว และมีค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน มากกว่า 700 กก/ซม²

การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยลดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันได้ ส่วนค่าโมดูลัสยืดหยุ่นพบว่าไม่แตกต่างจากคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสมเพียงอย่างเดียวมากนัก โดยค่าโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้นตามกำลังอัดของคอนกรีตกำลังสูง

5.1.7 อัตราส่วนที่เหมาะสมในการอัดอิฐคอนกรีต คือ ใช้อัตราส่วนการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในอัตราส่วนไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ได้จากโรงงานโดยตรง และสามารถแทนที่ได้ถึงร้อยละ 35 สำหรับอิฐคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาถึงความทนทานของมอร์ตาร์หรือคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันนอกเหนือเพิ่มเติมจากการกักกรองเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต เช่น การซึมผ่านของคลอไรด์ เป็นต้น

5.2.2 ควรมีการศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน จากจำนวนหลายแหล่งมากขึ้น เพื่อเป็นการยืนยันถึงคุณภาพของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2545, สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2544/45, เล่มที่ 43, 121 หน้า.
- [2] American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C 618 Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete," In Annual Books of ASTM Standards, Vol. 04.01, ASTM, Philadelphia, pp. 294-296.
- [3] Lea, F.M., 1970, The Chemistry of Cement and Concrete, Edward Arnold Publishers, pp. 361, 414-423.
- [4] Davis, R.E., 1950, "Use of Pozzolans in Concrete", Journal of the American Concrete Institute, Vol. 46, pp. 377-384.
- [5] Fraay, A.L.A., Bijen, J.M. and Haan, Y.M.D., 1989, "The Reaction of Fly Ash in Concrete. A Critical Examination", Cement and Concrete Research, Vol. 19, pp. 235-246.
- [6] Hansen, T.C., 1990, "Long-Term Strength of High Fly Ash Concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 193-196.
- [7] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธุ์ วงษ์พา และ สุรพันธ์ สุคันปรีย์, 2545, "การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต", การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, 23-25 ตุลาคม 2545, หน้า (MAT-163)-(MAT-172).
- [8] Tay, J.H., 1990, "Ash from Oil-Palm Waste as Concrete Material", Journal of Material in Civil Engineering, ASCE, Vol. 2, pp. 94-105.
- [9] Tay, J.H. and Show, K.Y., 1995, "Use of Ash Derived from Oil-Palm Waste Incineration as a Cement Replacement Material", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 13, pp. 27-36.
- [10] Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1996, "Palm Oil Fuel Ash-A Potential Pozzolan Material in Concrete Construction", Proceedings of the International Conference on Urban Engineering in Asian Cities in the 21st Century, 20-23 November 1996, Bangkok, Thailand, pp. D361-D366.
- [11] Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1996, "Influence of Palm Oil Fuel Ash on Strength and Durability of Concrete", Proceedings of the Seventh International Conference on Durability of Building Materials and Components, 19-23 May, Stockholm, Sweden, pp. 291-298.
- [12] Awal, A.S.M.A. and Hussin, M.W., 1999, "Concrete in Marine Environment: Influence of Palm Oil Fuel Ash on Strength and Durability", Proceedings of the Sixth Cycle; Civil and Environment Engineering Conference New Frontiers and Challenges, Vol. 3 (Part I), 8-12 November, Bangkok, Thailand, pp. (III~49)-(III~55).

- [13] Ishida, T., Hussin, M.W. and Awal, A.S.M.A., 1999, "A Study on Shrinkage of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash", Proceedings of the Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Vol. 2, 27-29 August 1999, Kochi, Japan, pp. 1378-1383.
- [14] สุรพันธ์ สุคันปรีย์, ชรินทร์ นมรักย์ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2545, "การใช้กากแคลเซียมคาร์ไบด์ และเถ้าปลาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต", การประชุมใหญ่ทางวิศวกรรม ประจำปี 2545, 20-23 มิถุนายน, กรุงเทพฯ, หน้า 191-199.
- [15] Kumar, S. and Rao, C.V.S.K., 1994, "Effect of Sulfates on the Setting Time of Cement and Strength of Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 24, pp. 1237-1244.
- [16] Young-Shik, P., Jin-Kook, S., Jae-Hoon, L. and Young-Shik, S., 1999, "Strength Deterioration of High Strength Concrete in Sulfate Environment", Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1397-1402.
- [17] Bentur, A., Goldman, A. and Bassat, M.B., 1995, "High Performance Concrete in Concentrated Magnesium Sulfates, Magnesium Chlorides and Sodium Sulfate Solution", Concrete Under Severe Conditions: Environment and Loading, Vol. 2, pp. 1237-1246.
- [18] Mather, B., 1996, "Effect of Seawater on Concrete", Highway Research Record, No. 113, pp. 33-42.
- [19] Shashiprakash, S.G. and Thomas, M.D.A., 2001, "Sulfate Resistance of Mortars Containing High-Calcium Fly Ashes and Combination of Highly Reactive Pozzolans and Fly Ash", Proceedings of the Seventh International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete, Chennai, India, pp. 221-237.
- [20] Al-Durairjan, S.U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M.M., Sharif, A.M., Shameem, M. and Ibrahim, M., 2003, "Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed to Varying Concentrations of Sodium Sulfate", Cement and Concrete Composites, Vol. 25, pp. 429-437.
- [21] Rasheeduzzafar, 1992, "Influence of Cement Composition on Concrete Durability", ACI Materials Journal, Vol. 89, pp. 574-586.
- [22] Hewlett, P.C. (Ed.), 1998, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 4th ed., Arnold/Wiley, New York, p. 282, 317, 584.
- [23] American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C 188 : Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement", In 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 160-161.

- [24] American Society for Testing and Materials, 1997, “ASTM C 430 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μ m (No. 325) Sieve”, In 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 217-219.
- [25] American Society for Testing and Materials, 1997, “ASTM C 204 : Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus”, In 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 165-171.
- [26] American Society for Testing and Materials, 1997, “ASTM C 187 : Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement”, In 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 158-159.
- [27] American Society for Testing and Materials, 1997, “ASTM C 305 : Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency”, In 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 196-198.
- [28] American Society for Testing and Materials, 1997, “ASTM C 191 : Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle”, In 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01, Philadelphia, ASTM, pp. 162-164.
- [29] American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 403 : Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance”, in 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 222-227.
- [30] American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 39 : Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”, in 2001 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 18-22.
- [31] American Society for Testing and Materials, 2001, “ASTM C 469 : Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, In Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 248-251.
- [32] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2531, มอก. 827-2531 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมบล็อกละเอียดพื้น, 17 หน้า
- [33] Jaturapitakkul, C. and Roongreung, B., 2003, “Cementing Material from Calcium Carbide Residue-Rice Husk Ash”, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, pp. 470-475.
- [34] Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., and Mora, P.E., 1997, “Mechanical Treatments of Fly Ashes Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 1365-1377.

- [35] Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R., 2003, "Development of Bottom Ash as Pozzolan Material", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 15, pp. 48-54.
- [36] American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C 150 : Standard Specification for Portland Cement", In 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, Philadelphia, ASTM, pp. 132-136.
- [37] รัฐพล สมณา, 2547, การศึกษาผลกระทบของเถ้าถ่านหิน 5 แหล่งต่อกำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 90 หน้า.
- [38] สมิตร์ ส่งพิริยะกิจ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2538, "การศึกษาการบดเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะเพื่อใช้เป็นวัสดุปอซโซลานในการเพิ่มกำลังคอนกรีต", วารสารวิจัยและพัฒนา สจ.ร., ปีที่ 18, ฉบับที่ 2, หน้า 51-76.
- [39] Berg, W.V. and Kukko, H., 1991, "Fresh Mortar and Concrete with Fly Ash. In : Wesche, K. (Ed.)", Fly Ash in Concrete Properties and Performance, RILEM Report, Vol. 7, pp. 39-41.
- [40] เอนก ศิริพานิชกร, 2536, "การพัฒนาคอนกรีตผสมซีเมนต์เถ้าลอยแม่เมาะที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี", เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ เรื่องศักยภาพการนำเถ้าถ่านหินลิกไนต์มาใช้ประโยชน์, สำนักงานวิจัยและพัฒนา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 27-28 เมษายน, หน้า (8-1) - (8-18).
- [41] ประกาศ ทอ.ประไฟ, 2541, ผลกระทบของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อกำลังอัดและการขยายตัวของวัสดุซีเมนต์ซึ่งแทนที่ด้วยเถ้าถ่านหินจากแม่เมาะ, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 103 หน้า.
- [42] Abrams, D.A., 1918, "Design of Concrete Mixtures", Structure Materials Research Laboratory, Bulletin 1, Levis Institute, Chicago, 20 p.
- [43] Ukita, K., Shigematsu, S. and Ishii, M., 1989, "Concrete Utilizing Classified Fly Ash", Proceedings of the Seventh International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolan in Concrete, Trondheim, Norway, pp. 219-240.
- [44] เรืองรุชดี ชีระโรจน์, จตุพล ตั้งปกาศิต, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, "ผลกระทบของขนาดอนุภาคเถ้าถ่านหินต่อดัชนีกำลังของมอร์ตาร์", วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 26, ฉบับที่ 3, หน้า 295-310.

- [45] Tikalsky, P.J., Roy, D., Scheetz, B. and Krize, T., 2002, "Redefining Cement Characteristics for Sulfate-Resistance Portland Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1239-1246.
- [46] Tian, B. and Cohen, M.D., 2000, "Does Gypsum Formation during Sulfate Attack on Concrete Lead to Expansion", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 117-123.
- [47] Gonzalez, M.A. and Irassar, E.F., 1997, "Ettringite Formation in Low C₃A Portland Cement Exposed to Sodium Sulfates Solution", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, pp. 1061-1072.
- [48] จิระพงษ์ เอกพานิช, 2546, การศึกษาการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกของมอร์ตาร์ผสมวัสดุปอซโซลาน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 109 หน้า.
- [49] Irassar, F. and Batic, O., 1989, "Effects of Low Calcium Fly Ash on Sulfate Resistance of OPC Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, pp. 194-202.
- [50] Torii, K. and Kawamura, M., 1994, "Effects of Fly Ash and Silica Fume on Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, pp. 361-370.
- [51] Odler, I., 1998, "Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement", in: Hewlett, P.C. (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 4th Ed., Arnold/Wiley, New York, pp. 271-273.
- [52] Targan, S., Olgun, A., Erdogan, Y., and Sevinc, V., 2003, "Influence of Natural Pozzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash, and Fly Ash on the Properties of Portland Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1175-1182.
- [53] Ismail, M.S. and Waliuddin, A.M., 1996, "Effect of Rice Husk Ash on High Strength Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 10, pp. 521-526.
- [54] Sybertz, F. and Wiens, U. 1991, "Effect of Fly Ash Fineness on Hydration Characteristics and Strength Development", *Proceedings of the International Conference on Blend Cement in Construction*, Sheffield University, United Kingdom, pp 152-165.
- [55] Biricik, H, Akoz, F., Turker, F., and Berkay, I., 2000, "Resistance to Magnesium Sulfate and Sodium Sulfate Attack of Mortars Containing Wheat Straw Ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1189-1197.
- [56] Collepardi, M., Monosi, S., and Piccioli, P., 1995, "The Influence of Pozzolanic Materials on the Mechanical Stability of Aluminous Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, pp. 961-968.
- [57] Cohen, M.D. and Mather, B., 1991, "Sulfate Attack on Concrete Research Needs," *ACI Materials Journal*, Vol. 88, No. 1, pp. 62-69.

- [58] Teoreanu, I. and Dumitrescu, C., 1981, “Mechanisms of Controlled Expansion Cements Hardening,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 12, pp. 141-155.
- [59] Li, Z. and Chau, C.K., 2000, New Water Permeability Test Scheme for Concrete, *ACI Materials Journal*, 97, 84-90.
- [60] ACI Committee 363, 2000, “State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete”, ACI 363R-92, *ACI Manual of Concrete Practice I*, American Concrete Institute, Detroit, 55 p.
- [61] Rashid, M.A., Mansur, M.A. and Paramasivam, P., 2002, “Correlations between Mechanical Properties of High-Strength Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 230-238.
- [62] Huo, X.S., Al-Omaishi, N. and Tadros, M.K., 2001, “Creep, Shrinkage, and Modulus of Elasticity of High-Performance Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 98, No. 6, pp. 440-449.
- [63] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2543, มอก. 2035-2543 : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมบล็อกประสานปูพื้นสำหรับงานหนัก, 11 หน้า

ภาคผนวก ก.

รายชื่อนักศึกษาในระดับปริญญาโทที่สำเร็จการศึกษาภายใต้โครงการนี้

รายชื่อนักศึกษาในระดับปริญญาโทที่สำเร็จการศึกษาภายใต้โครงการนี้มีจำนวน 4 คน และมีหัวข้อวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้

1. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, พ.ศ. 2546, การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและ การศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้
2. ณัฐพงษ์ มกระธัช, 2547, การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือก ไม้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์บางส่วน
3. ชิริสิทธิ์ แซ่ตั้ง, 2547, การศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน
4. แสวง ทรงหมู่, 2547, การศึกษากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน, การอัดตัวของ อนุภาค และปฏิกิริยาปอซโซลานของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน

รายชื่อนักศึกษาในระดับปริญญาเอกที่ทำวิจัยบางส่วนในโครงการนี้

1. นายวันชัย สะตะ นักศึกษาปริญญาเอก ทำงานวิจัยเรื่อง A Development of Pozzolan Material for Using in High Strength Concrete.
2. นายสหหลา หอมวุฒิวงศ์ นักศึกษาปริญญาเอก ทำงานวิจัยเรื่อง A Study of Strength and Water Permeability of Pozzolan Concrete.
3. นายจตุพล ตั้งปกาศิต นักศึกษาปริญญาเอก ทำงานวิจัยเรื่อง A Study of Pozzolan Reaction, Packing Effect, and Hydration Reaction of Pozzolan on Compressive Strength of Mortar.

บทความวิจัยที่เผยแพร่

ผลการดำเนินงานวิจัยตลอดระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา ได้มีบทความวิจัยที่เผยแพร่หรือได้รับการยอมรับเพื่อ ตีพิมพ์จำนวน 9 เรื่อง และมีบทความที่อยู่ระหว่างการพิจารณาเพื่อตีพิมพ์อีกจำนวน 2 เรื่อง ซึ่งมี รายละเอียดดังนี้

บทความในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ผลงานที่ได้รับการตอบรับตีพิมพ์แล้วในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ มีดังนี้

1. Sata, V., Jaturapitakkul, C. and Kiattikomol, K., 2004, Utilization of Palm Oil Fuel Ash in High-Strength Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 16, No. 6, pp. 623-628 (Impact Factor 0.348).

2. Tangchirapat, W., Saeting, T., Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., and Siripanichgorn, A., Use of Waste Ash from Palm Oil Industry in Concrete, Accepted for Publication in Waste Management (Impact Factor 1.151).
3. Sata, V., Jaturapitakkul, C., and Kiattikomol, K., Influence of By-Product Materials on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, Accepted for Publication in Construction and Building Materials (Impact Factor 0.565).
4. Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S., and Jaturapitakkul, C., Strength and Water Permeability of Concrete Containing Palm Oil Fuel Ash and Rice Husk-Bark Ash, Accepted for Publication in Construction and Building Materials (Impact Factor 0.565).

บทความในวารสารวิชาการระดับประเทศ

5. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, จตุพล ตั้งปกาศิต, ศักดิ์สินธุ์ แววคุ้ม และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2546, วัสดุพอลิโพรไพลีนชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร., ปีที่ 26, ฉบับที่ 4 ตุลาคม-ธันวาคม, หน้า 459-474
6. วันชัย สะตะ, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2546, การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในการทำคอนกรีตกำลังสูง, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 14 ฉบับที่ 2, หน้า 27-32.
7. วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547, การศึกษากำลังอัดและการขยายตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน, วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 15 ฉบับที่ 3, หน้า 32-39.

บทความในประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

8. 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, Vol. 2, Chiang Mai, Thailand, pp. 650-659.

บทความในประชุมวิชาการระดับประเทศ

9. ชิริสิทธิ์ แซ่ตั้ง, วีรชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547, การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุพอลิโพรไพลีนในงานคอนกรีต, เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคอนกรีตแห่งชาติ ครั้งที่ 2, 26-27 ตุลาคม 2547, หน้า 17-22.

บทความที่เสนอในวารสารวิชาการระดับนานาชาติและอยู่ในระหว่างการพิจารณา

10. Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., Siripanichgorn, A., and Kiattikomol, K., Utilization of Palm Oil Fuel Ash as a Pozzolan Material ใน Cement and Concrete Research (อยู่ในระหว่างการพิจารณาครั้งที่ 2)

บทความที่เสนอในวารสารวิชาการระดับประเทศและอยู่ในระหว่างการพิจารณา

11. จตุพล ตั้งปกาศิต, แสวง ทรงหมู่, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, การศึกษาดัชนีกำลังของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C 618 ที่ใช้ทรายแม่น้ำบดละเอียดเพื่อแทนวัสดุปอชโซลาน, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.

4. เอกสารแนบที่เกี่ยวข้อง

1. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
2. รายงานการเงินฉบับล่าสุด
3. สำเนาบัญชีเงินฝาก
4. แผ่นบันทึกข้อมูลสรุปรายงานและรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
5. สำเนาบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว
6. จดหมายตอบรับการตีพิมพ์ และบทคัดย่อสำหรับบทความที่อยู่ระหว่างการรอพิมพ์และอยู่ในระหว่างการพิจารณา