



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 และนาย ไกรวุฒิ เกียรติโกมล ทำการวิจัยภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนาประจำปี 2545 ตาม สัญญาเลขที่ BRG4680001 เพื่อวิจัยเรื่องการศึกษาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต ขณะนี้ได้ ดำเนินการวิจัยเสร็จสิ้นแล้ว ผลการดำเนินงานวิจัยตลอดระยะเวลา 3 ปีที่ผ่านมา ได้มีบทความวิจัยที่เผยแพร่หรือได้รับการ ยอมรับให้ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติจำนวน 4 เรื่อง, ในวารสารวิชาการระดับประเทศจำนวน 3 เรื่อง, ในการประชุม วิชาการระดับนานาชาติจำนวน 1 เรื่อง และในการประชุมวิชาการระดับประเทศจำนวน 1 เรื่อง หรือรวมทั้งสิ้นจำนวน 9 เรื่อง และยังมีบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการพิจารณาในระดับนานาชาติและระดับชาติอีกอย่างละ 1 เรื่อง มีนักศึกษาที่จบ การศึกษาระดับปริญญาโทจากโครงการนี้จำนวน 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 พบว่ามีระยะเวลานานกว่าซีเมนต์ เพสต์อย่างมาก แต่หลังจากเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน พบว่าสามารถลด ระยะเวลาการก่อตัวจนใกล้เคียงกับซีเมนต์เพสต์ โดยมีการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายอยู่ระหว่าง 124 ถึง 137 และ 195 ถึง 225 นาที ตามลำดับ ในขณะที่ซีเมนต์เพสต์มีเวลาการก่อตัวระยะต้นเท่ากับ 114 นาที และระยะปลาย เท่ากับ 180 นาที
- มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดแทนที่ปูนซีเมนต์ทุกอัตราทดแทนที่มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐานอย่าง มาก แต่หลังปรับปรุงคุณภาพโดยการบดสามารถทำให้มอร์ตาร์มีกำลังอัดสูงขึ้นและมีค่าสูงเทียบเท่ากับมอร์ตาร์ มาตรฐานที่อายุ 90 วันขึ้นไป เมื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ไม่เกินร้อยละ 10 และ 20 สำหรับเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียด และบดละเอียดมาก ตามลำดับ ดังนั้นเถ้าปาล์มน้ำมันหลังปรับปรุงคุณภาพจึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดี คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนบดมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะปลายนาน กว่าคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 ของมอร์ตาร์ดมาตรฐาน และที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 15, 20, 25 และ 29 ของมอร์ตาร์ดมาตรฐาน ตามลำดับ ส่วนกำลังอัดที่เกิดจากปฏิกิริยาปอซโซลานของเจ้าปาล์มน้ำมันที่มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 5 ± 2 แทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ที่อายุ 7 วันมีค่าเป็นร้อยละ 6, 8, 6 และ 9 ของมอร์ตาร์ดมาตรฐาน และที่อายุ 28 วันมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8, 18, 22 และ 28 ของมอร์ตาร์ดมาตรฐาน 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 คอนกรีตที่ผสมเจ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมีค่าการซึมผ่านน้ำที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเจ้าแกลบ-

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, วัสดุปอชโซลานชนิดใหม่จากเถ้าปาล์มน้ำมัน, 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. วีระชาติ ตั้งจิรภัทร, ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และ ไกรวุฒิ เกียรติโกมล, 2547, การศึกษากำลังอัดและการยตัวของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน, 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, การพัฒนาเถ้าปาล์มน้ำมันเพื่อใช้เป็นวัสดุปอชโซลานในงานคอนกรีต, 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 พบว่าแท่งคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากทุกอัตราส่วนผสมมีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เมื่อแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 เป็นเวลา 1 ปี นอกจากนี้ทุกอัตราส่วนผสมของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดมากและการแทนที่ร้อยละ 40 ของเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมาก มีการขยายตัวต่ำกว่าแท่งคอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 อีกด้วย

การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันบดละเอียดมากในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ทำให้อัตราการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการแทนที่มากขึ้นทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีตสูงขึ้น คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีค่าการซึมผ่านน้ำที่ต่ำกว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทุกอายุการทดสอบ

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

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

ผลการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุปอชโซลานที่ดีและมีศักยภาพสูงในการนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนเพื่อใช้ในงานคอนกรีต อย่างไรก็ตามเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันต้องมีความละเอียดสูงจึงจะมีการทำปฏิกิริยาปอชโซลานได้ดี

คำสำคัญ : เถ้าแกลบ-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 ปฏิกริยาพอลิโซลัน	4
2.3 แก๊สกลบ-เปลือกไม้และแก๊สปลั่มน้ำมัน	5
2.4 การนำแก๊สกลบ-เปลือกไม้และแก๊สปลั่มน้ำมันมาใช้ประโยชน์	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

รายนามนักศึกษาในระดับปริญญาโทที่สำเร็จการศึกษาภายใต้โครงการนี้	103
รายนามนักศึกษาในระดับปริญญาเอกที่ทำวิจัยบางส่วนในโครงการนี้	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 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน	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 เครื่องมีวัดการขยายตัวของมอร์ต้าร์และคอนกรีต	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 “การศึกษาถ้ำเกลือ-เกลือไม้และถ้ำปล้ำน้ำมันในงานคอนกรีต” คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้สนับสนุนทุนเพื่อใช้ในการวิจัยดังกล่าว รวมระยะเวลาในการทำวิจัย 3 ปี คือ ตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ. 2545 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 ภายใต้งานโครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิमेธีวิจัย สกว. ปี 2545) มีสัญญาเลขที่ BRG4680001

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยเพาเวอร์ โอเพอร์เรชัน จำกัด, บริษัท ยูนิวานิชน้ำมันปล้ำ จำกัด, บริษัท ชุมพร อุตสาหกรรมน้ำมันปล้ำ จำกัด, บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งได้สนับสนุนตัวอย่างถ้ำเกลือ-เกลือไม้, ถ้ำปล้ำน้ำมัน และสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการวิจัย

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คุณวันชัย สะตะ, คุณสหภาพ หอมวุฒิวงศ์, คุณจุฑาพล ตั้งปกาศิต, คุณวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, คุณณัฐพงศ์ มกระธัช, คุณธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง และคุณแสวง ทรงหนู ที่ได้ทำการเตรียมตัวอย่างตลอดจนทดสอบ และเก็บข้อมูลต่างๆ อย่างอุสาหะ ซึ่งทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายผู้วิจัยหวังว่ารายงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาถ้ำเกลือ-เกลือไม้และถ้ำปล้ำน้ำมันตลอดจนถ้ำชีวมวลอื่นๆ เพื่อใช้ในการงานคอนกรีต และทำให้ปัญหาของการกำจัดถ้ำเหล่านี้ค่อยลงหรือหมดสิ้นไป

กิตติกรรมประกาศ

รายงานวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยเรื่อง “การศึกษาถ้ำเกลือ-เกลือไม้และถ้ำปล้ำน้ำมันในงานคอนกรีต” คณะผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ได้สนับสนุนทุนเพื่อใช้ในการวิจัยดังกล่าว รวมระยะเวลาในการทำวิจัย 3 ปี คือ ตั้งแต่ ตุลาคม พ.ศ. 2545 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2548 ภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา (วุฒิमेธีวิจัย สกว. ปี 2545) มีสัญญาเลขที่ BRG4680001

ขอขอบคุณ บริษัท ไทยเพาเวอร์ โอเพอร์เรชัน จำกัด, บริษัท ยูนิวานิชน้ำมันปล้ำ จำกัด, บริษัท ชุมพร อุตสาหกรรมน้ำมันปล้ำ จำกัด, บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งได้สนับสนุนตัวอย่างถ้ำเกลือ-เกลือไม้, ถ้ำปล้ำน้ำมัน และสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ใช้ในการวิจัย

คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ คุณวันชัย สะตะ, คุณสหภาพ หอมวุฒิวงศ์, คุณจุฑาพล ตั้งปกาศิต, คุณวีรชาติ ตั้งจิรภัทร, คุณณัฐพงศ์ มกระธัช, คุณธีรสิทธิ์ แซ่ตั้ง และคุณแสวง ทรงหนู ที่ได้ทำการเตรียมตัวอย่างตลอดจนทดสอบ และเก็บข้อมูลต่างๆ อย่างอุสาหะ ซึ่งทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายผู้วิจัยหวังว่ารายงานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาถ้ำเกลือ-เกลือไม้และถ้ำปล้ำน้ำมันตลอดจนถ้ำชีวมวลอื่นๆ เพื่อใช้ในการงานคอนกรีต และทำให้ปัญหาของการกำจัดถ้ำเหล่านี้ค่อยลงหรือหมดสิ้นไป

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 ถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมัน มาใช้ประโยชน์ได้ก็สามารถลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดทิ้งได้ เหมือนกับโรงไฟฟ้าถ่านหินของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่ แม่เมาะ จังหวัดลำปาง ซึ่งใช้ถ่านหินเป็นเชื้อเพลิง มีปริมาณถ่านหินออกมาเป็นจำนวนมากประมาณ 3 ล้านตันต่อปี ทำให้เป็นปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมบริเวณโดยรอบโรงงานเนื่องจากมีลักษณะเป็นผงฝุ่น ไม่เหมาะที่จะใช้ทำการเกษตรและอยู่อาศัย ทางโรงไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จึงได้ส่งเสริมให้มีการวิจัยและพัฒนาจนสามารถนำเอาถ่านหินไปใช้ในงานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมัน มีคุณสมบัติเบื้องต้นที่สามารถจะพัฒนาเพื่อใช้ในงานคอนกรีตได้ ซึ่งหากทำได้จะเป็นวัสดุชนิดใหม่ขึ้นมาใช้ในงานคอนกรีต เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนาประเทศและยังเป็นการจัดการปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอีกด้วย อีกทั้งเป็นการประหยัดพลังงานเพราะในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ต้องใช้พลังงานและความร้อนในการเผาวัตถุดิบและก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ออกมาสู่อากาศ หากสามารถนำถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ หรือ ถ้ำปลาล้างน้ำมันมาแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วน ทำให้ปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์โดยรวมลดลงซึ่งเป็นการประหยัดพลังงาน และลดการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ยังคงได้ปริมาณคอนกรีตจำนวนเท่าเดิม และเป็นคอนกรีตที่มีคุณสมบัติไม่ด้อยไปกว่าเดิม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมัน นำมาใช้ประโยชน์ในงานคอนกรีต
2. เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมจากวัสดุเหลือใช้ที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ซึ่งได้มาจากกระบวนการผลิตทางเกษตรและอุตสาหกรรมของ ถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมัน
3. เพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพ และมูลค่าของถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้ให้สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ทำให้มีมูลค่าในเชิงพาณิชย์ได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยเพื่อนำถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมันไปใช้ในงานคอนกรีต และ งานทำอิฐคอนกรีต เริ่มจากการศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆ ของถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมัน ซึ่งได้แก่ การศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของถ้ำ ศึกษาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ศึกษาโครงสร้างระดับอนุภาคโดยการถ่ายภาพขยายกำลังสูง เพื่อพิจารณาคุณสมบัติที่เหมาะสมในการนำถ้ำเกลือ-เปลือกไม้ และ ถ้ำปลาล้างน้ำมัน ไปใช้งาน พร้อมทำการปรับปรุงคุณสมบัติของถ้ำทั้งสองให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานตามมาตรฐาน 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, กระบวนการกักกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตต่อมอร์ตาร์หรือคอนกรีตและแนวทางการป้องกัน บทที่ 3 กล่าวถึงอุปกรณ์ วัสดุ และการทดสอบต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษา เช่น การเตรียมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมัน การบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน การทดสอบหาค่าประกอบทางเคมีและคุณลักษณะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ เถ้าปาล์มน้ำมัน และปูนซีเมนต์ การทดสอบการก่อตัวของเพสต์และคอนกรีต การหลอมมอร์ตาร์และคอนกรีต การทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และคอนกรีต การกักกร่อนของสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีต่อมอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน การศึกษาเพื่อพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ไปใช้ในคอนกรีตกำลังสูง การศึกษาเพื่อหาค่าการอัดตัวและค่ากำลังอัดจากปฏิกริยาปอซโซลานของวัสดุทั้ง 2 ชนิด บทที่ 4 เป็นผลการทดสอบและวิเคราะห์ผลของการศึกษาที่ได้ศึกษาในแต่ละหัวข้อ และบทที่ 5 เป็นบทสรุปผลของการศึกษาและข้อเสนอแนะที่น่าสนใจในการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมัน จากนั้นตามด้วยเอกสารอ้างอิงต่างๆ ที่ใช้ประกอบในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายเป็นภาคผนวกที่แสดงรายชื่อนักศึกษาปริญญาโทและปริญญาเอกที่ได้รับการสนับสนุนจากโครงการและรายละเอียดของบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์หรืออยู่ในระหว่างพิจารณาเพื่อตีพิมพ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่ผ่านมา

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงความหมายของวัสดุปอซโซลาน 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 ให้กำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราทดแทนที่อื่นๆ และกำลังอัดในช่วงอายุก่อน 28 วันมีค่าต่ำ แต่หลังจากนั้นกำลังอัดมีการพัฒนาสูงกว่าคอนกรีตที่ไม่มีเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมได้ นอกจากนี้คอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติด้านการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดไฮดรอกซิดริกได้ดีกว่าคอนกรีตที่มีปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว [11] ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Awal และ Hussin [12] ยังได้ศึกษาคอนกรีตที่แช่ในน้ำทะเลโดยใช้เถ้าปาล์มน้ำมันแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราร้อยละ 30 พบว่าคอนกรีตที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันมีการพัฒนา กำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียว แม้ว่าแช่ในน้ำทะเลเป็นเวลา 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 แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาถึงผลกระทบของความละเอียดและปริมาณการแทนที่ของเถ้าปาล์มน้ำมันต่อคุณสมบัติในการรับกำลังอัด รวมถึงการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตยังไม่มีการศึกษาหรือมีน้อยมากโดยเฉพาะในประเทศไทย จึงเป็นแนวคิดของการทำวิจัยครั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการใช้เถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีตให้เป็นที่รู้จักมากขึ้น

2.5 การกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟต

เกลือซัลเฟตที่อยู่ในรูปของแข็งโดยทั่วไปจะไม่ทำอันตรายต่อคอนกรีต แต่ถ้าอยู่ในรูปของสารละลายจะทำอันตรายต่อคอนกรีตได้มาก เนื่องจากสารละลายซัลเฟตค่อยๆ ซึมผ่านเข้าไปในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตและทำปฏิกิริยากับสารประกอบเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ทำให้เกิดการขยายตัวและแตกร้าวจนไม่สามารถรับกำลังได้ ซัลเฟตที่พบในธรรมชาติและเป็นอันตรายต่อโครงสร้างคอนกรีต ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) และเนื่องจากแมกนีเซียมซัลเฟตมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี จึงสามารถทำอันตรายต่อคอนกรีตได้รุนแรงมากกว่าสารละลายซัลเฟตชนิดอื่นๆ [15-17] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักเพื่อต้องการให้บรรลุผลในเวลาประมาณ 1 ปี

แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) และแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ เป็นสารประกอบที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) และได้สารประกอบใหม่ที่ส่งผลทำลายเนื้อคอนกรีต โดยมีกระบวนการกัดกร่อนดังนี้ สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ได้สารประกอบ 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, แมกนีเซียมไฮดรอกไซด์ ($3\text{Mg}(\text{OH})_2$) หรือ Brucite และอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($2\text{Al}(\text{OH})_3$) [18]

แมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO_4) จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดเป็นแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) หรือยิบซัม (Gypsum) และแคลเซียมซัลเฟต (Gypsum) ที่ได้จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมอลูมินไฮเดรต (C-A-H) ได้เป็น แคลเซียมซัลโฟลูมินิต (Ettringite)

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

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

จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นข้างต้น แคลเซียมซัลโฟลูมินेटหรือ 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-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันทั้งก่อนและหลังบดในอัตราร้อยละ 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 จากนั้นนำค่าแรงกดต่อพื้นที่และระยะเวลาหลังผสมมาเขียนกราฟ 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 การทดสอบคุณสมบัติทางด้านความทนของมอร์ต้าร์และคอนกรีตในสารละลายซัลเฟต

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

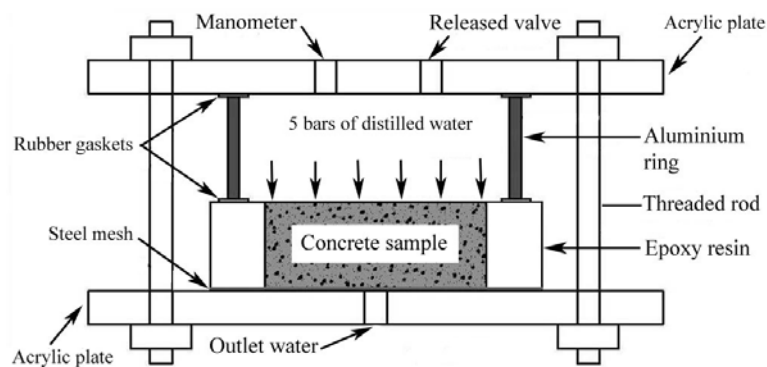
3.3.8 การทดสอบการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต

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 แล้วจึงนำไปประกอบกับเครื่องมือทดสอบหาการซึมผ่านน้ำ (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) จากนั้นทำการอัดน้ำที่ความดัน 0.5 MPa ให้ไหลผ่านคอนกรีต วัดปริมาณน้ำที่ไหลผ่านกับเวลา เพื่อนำไปคำนวณหาสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการใช้สมการของความต่อเนื่องและทฤษฎีการไหลของดาร์ซี ซึ่งแสดงในสมการที่ 3.2

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

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 และการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต	
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

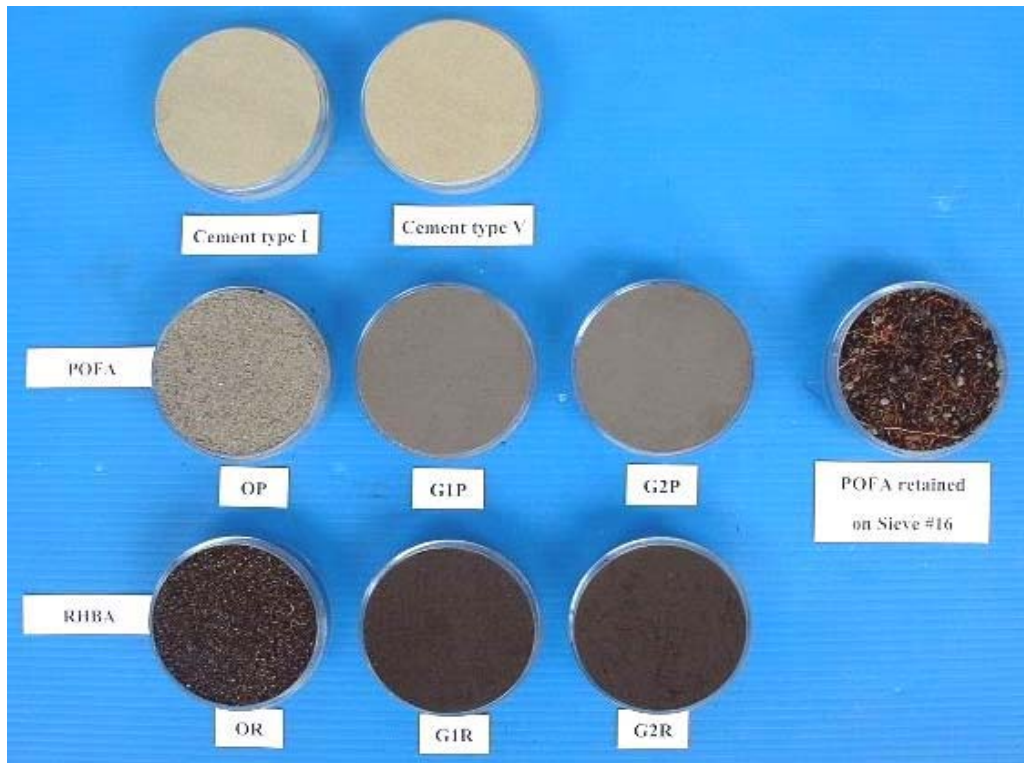
4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของถั่วแกลบ-เปลือกไม้และถั่วปาล์มน้ำมัน

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

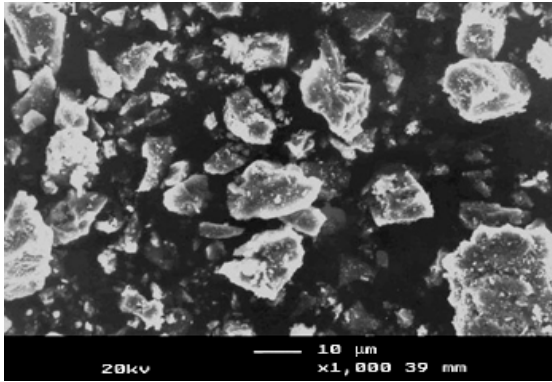


รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบสีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5, ถ้ำปาล์มน้ำมัน และถ้ำเกลบ-เปลือกไม้

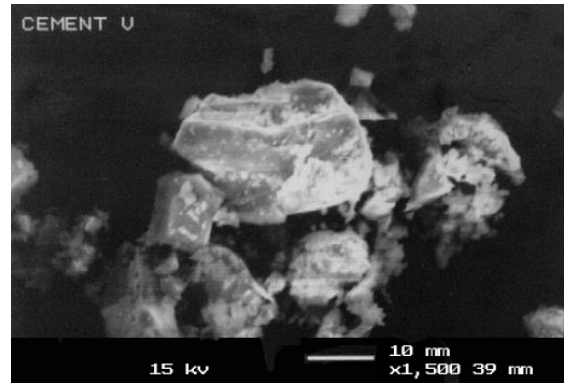
4.1.2 ลักษณะรูปร่างของอนุภาค

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



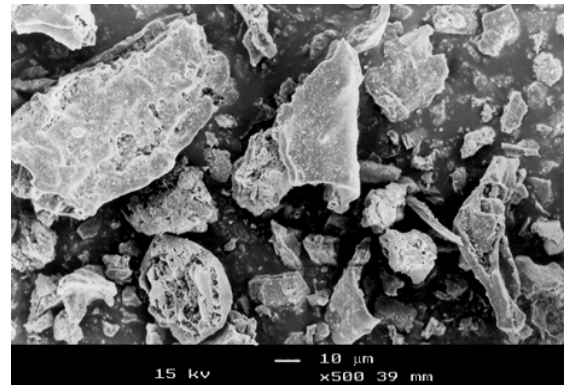
รูปที่ 4.2 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์
พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1



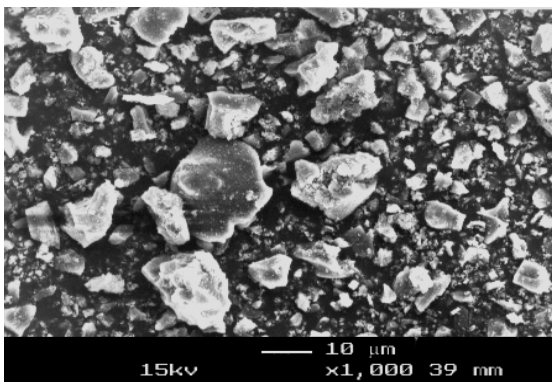
รูปที่ 4.3 ภาพขยายอนุภาคปูนซีเมนต์
พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5



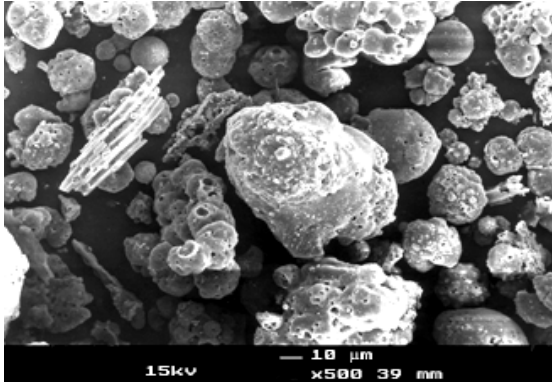
รูปที่ 4.4 ภาพขยายอนุภาคแก้ว-เปลือกไม้ OR



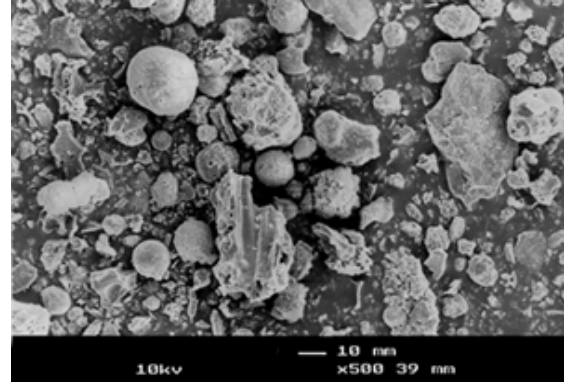
รูปที่ 4.5 ภาพขยายอนุภาคแก้ว-เปลือกไม้ GIR



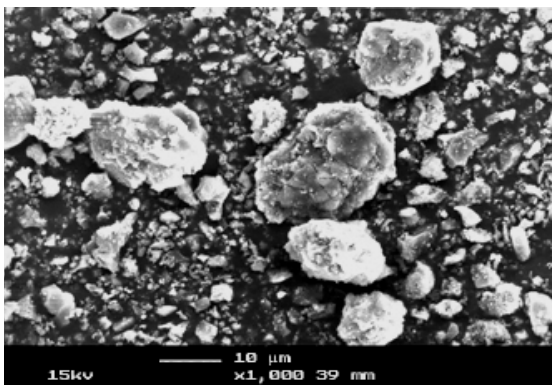
รูปที่ 4.6 ภาพขยายอนุภาคแก้ว-เปลือกไม้ G2R



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] ที่พบว่า การอบไม่เพียงแต่ลดขนาดอนุภาคของวัสดุ 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

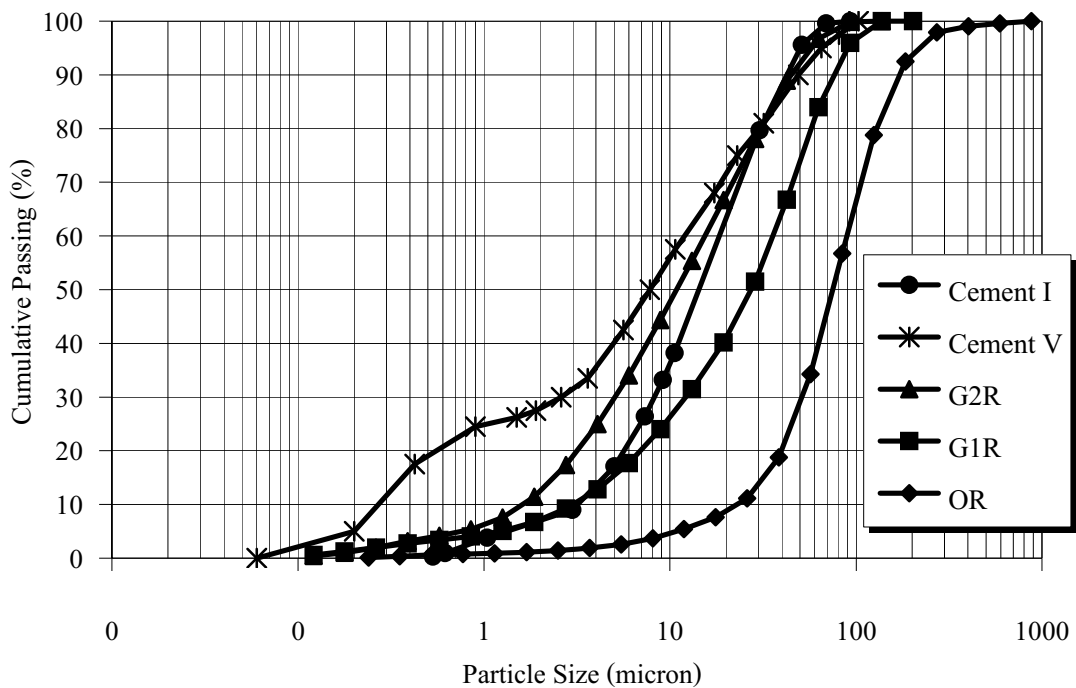
หมายเหตุ : N/A = Not Applied

4.1.4 การกระจายตัวและขนาดเฉลี่ยของอนุภาค

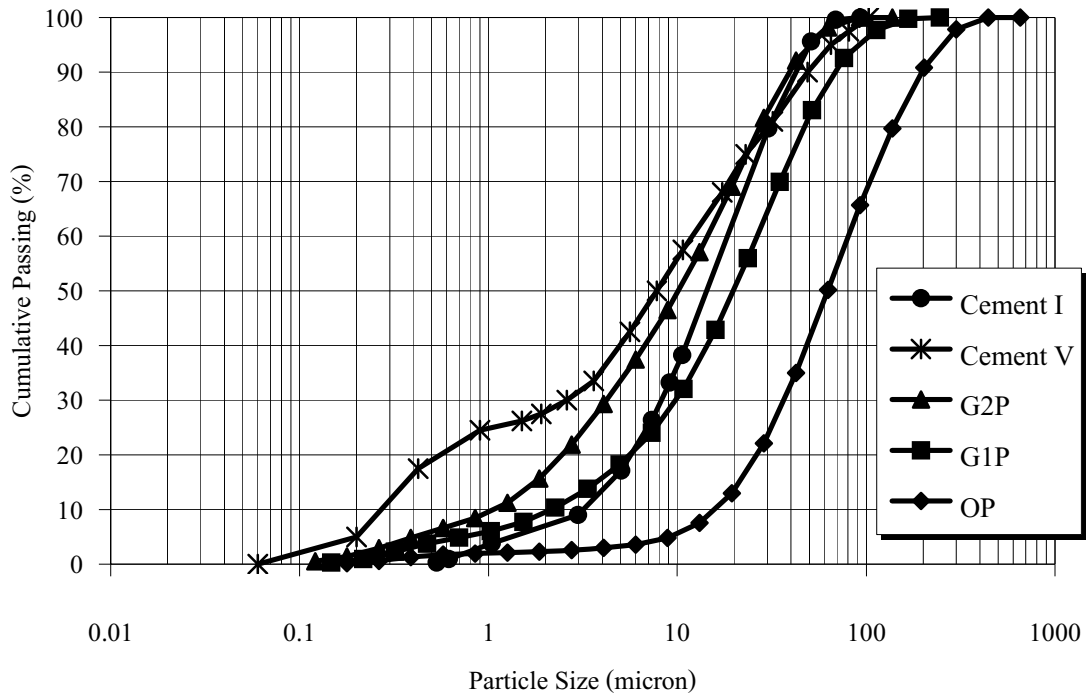
ผลวิเคราะห์การกระจายตัวของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันแสดงดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ และตารางที่ 4.1 แสดงขนาดอนุภาคเฉลี่ยของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีการกระจายตัวของอนุภาคร้อยละ 80 อยู่ในช่วง 3 ถึง 40 ไมครอน และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 14.65 ไมครอน 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 มีปริมาณอนุภาคค้ำบนตะแกรงลดลงจากเถ้าแกลบ-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

เห็นได้ว่าเมื่อทำการบดเจ้าปาล์มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น นอกจากสามารถลดขนาดอนุภาคได้แล้วยังสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของวัสดุด้วย ส่วนเจ้าปาล์มน้ำมัน OP เนื่องจากมีอนุภาคที่ใหญ่และความพรุนสูง จึงไม่สามารถหาพื้นที่ผิวจำเพาะได้เช่นเดียวกับเจ้าเกลบ-เปลือกไม้ และเมื่อพิจารณาความละเอียดของเจ้าเกลบ-เปลือกไม้และเจ้าปาล์มน้ำมันพบว่าให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ ความละเอียดมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดอนุภาคที่เล็กลง นอกจากนี้พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุทั้งสองหลังการบดมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักเช่นเดียวกับขนาดอนุภาคเฉลี่ย

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 ซึ่งอาจอนุโลมให้สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน 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] สามารถจัดเป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ได้เช่นเดียวกับเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

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

สำหรับสาเหตุที่วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเฉพาะเถ้าแกลบ-เปลือกไม้และเถ้าปาล์มน้ำมันที่ขนาดบดละเอียดมาก (G2P และ G2R) เท่านั้น แต่ไม่วิเคราะห์เถ้าแกลบ-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

เถ้าปล้มน้ำมันที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าปล้มน้ำมันที่ผ่านการบดสามารถลดโพรงและรูพรุนที่ดูดซึมน้ำให้น้อยลง นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตรา การแทนที่เดียวกัน เมื่อเพิ่มความละเอียดเถ้าปล้มน้ำมันจาก OP ให้เป็น G1P ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลว ปกติของเพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมันมีค่าลดลงสูงกว่าเมื่อเพิ่มความละเอียดเถ้าปล้มน้ำมันจาก G1P เป็น G2P อย่างเห็นได้ชัด ตัวอย่างเช่นเพสต์ OP40, G1P40, และ G2P40 มีปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติ เท่ากับร้อยละ 39.8, 31.9, และ 30.9 ตามลำดับ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าเถ้าปล้มน้ำมันก่อนบดมีความ พรุนและโพรงอากาศสูง เมื่อทำการบดให้ละเอียดขึ้น (G1P) ทำให้ความพรุนลดลงอย่างมาก ส่งผลให้ ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติลดลงตาม แต่เมื่อบดเถ้าปล้มน้ำมันให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นอีกเป็น G2P แม้ความพรุนจะลดลงแต่พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้ำมากขึ้น ส่งผล ให้ความต้องการปริมาณน้ำของเพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมัน G2P น้อยกว่า G1P ไม่มากนัก อีกสาเหตุหนึ่ง ที่ทำให้เพสต์ที่ผสมเถ้าปล้มน้ำมันต้องการปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ และมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่อการแทนที่สูงขึ้น เนื่องมาจากมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) ที่สูงถึงร้อยละ 10.0 จึงทำให้มีการดูดน้ำสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [39, 40]

ตารางที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลวปกติและระยะเวลาก่อตัวของเพสต์ผสมเถ้าปล้มน้ำมัน

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

ส่วนเพสต์ที่มีเถ้าปาล์มน้ำมันก่อนและหลังบดเป็นส่วนผสมทุกอัตราทดแทนที่มีการก่อดั้วระยะต้นและระยะปลายนานกว่าซีเมนต์เพสต์ CT1 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราทดแทนที่มากขึ้น 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 อย่างไรก็ตามการแทนที่ที่มากขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาการก่อดั้วนานขึ้นด้วย 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 ทุกอัตราทดแทนที่มีการก่อดั้วระยะปลายไม่แตกต่างจากเพสต์ผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน G1P มากนัก คือ มีค่าเท่ากับ 195 ถึง 225 นาที ที่การแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าแนวโน้มของเพสต์ที่ผสมเถ้าปาล์มน้ำมันทุกขนาดความละเอียดมีการก่อดั้วระยะปลายที่นานขึ้นเมื่ออัตราทดแทนที่เพิ่มขึ้น 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 วันขึ้นไปสามารถพัฒนาให้มีความสูงกว่ามาตรฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 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 และมีแนวโน้มที่ตลอดอายุการทดสอบ 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

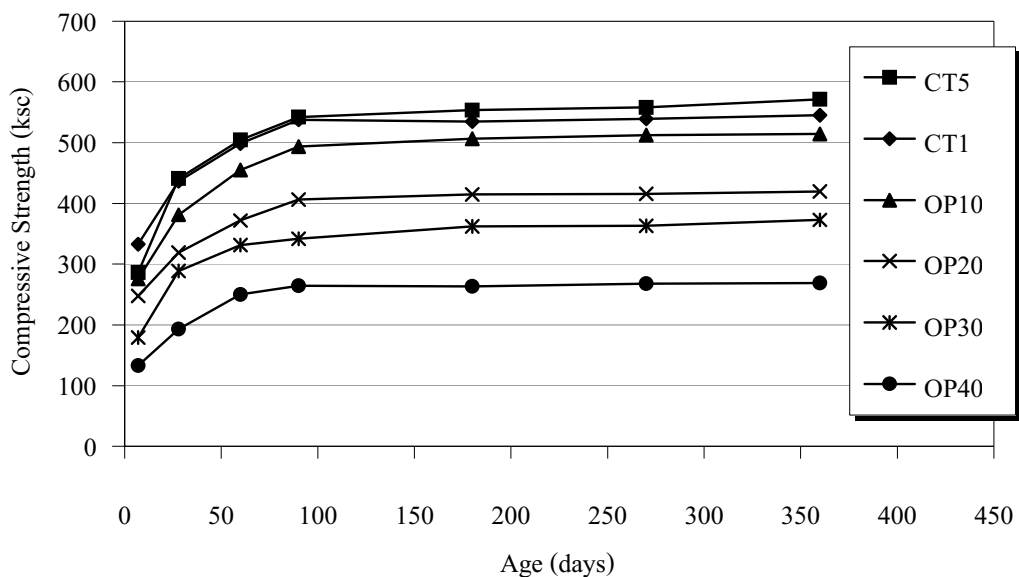
แทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ สังเกตเห็นได้ว่าการแทนที่ร้อยละ 10 เป็นส่วนผสมเดียวที่มีค่ากำลังอัดอยู่ในระดับเดียวกับมอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 นอกจากนี้เมื่อเพิ่มการแทนที่เป็นร้อยละ 20 กำลังอัดมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์มาตรฐาน CT1 เพียงเล็กน้อย คือร้อยละ 5 เท่านั้นที่อายุ 60 วันและกำลังอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออายุมากขึ้น 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