

การศึกษาการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุปอซโซลาน เพื่อต้านทานการกัดกร่อน จากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและกรดซัลฟูริก

A Study of Rice Husk-Bark Ash as a Pozzolan Material to Resist Magnesium Sulfate and Sulfuric Acid Attacks

ณัฐพงศ์ มกระชัช วีระชาติ ตั้งจิรภัทร จิรพงษ์ เอกพานิช และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล
Nattapong Makaratat Weerachart Tangchirapat Chirapong Eakpanich and Chai Jaturapitakkul
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140
โทร.02-4709131 โทรสาร 02-4279063 E-mail: chai.jat@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล เป็นวัสดุปอซโซลานในการต้านทานการขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต และการกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายกรดซัลฟูริก โดยนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้จากโรงงานโดยตรง (OR) มาปรับปรุงคุณภาพด้วยการบดให้มีขนาดอนุภาคเท่ากับ 27.4 และ 10.8 ไมครอน (G1R และ G2R) ตามลำดับ จากนั้นนำไปแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อทดสอบการขยายตัวของมอร์ตาร์ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.02 (pH เท่ากับ 2.5) ผลการวิจัยพบว่าการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์ไม่เกินร้อยละ 30 แม้จะสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้ แต่ให้กำลังอัดต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ส่วนการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด G1R และ G2R เป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์ พบว่าการขยายตัวที่อายุ 360 วันมีค่าต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน และการขยายตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความละเอียดมากขึ้น สำหรับการต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริก พบว่ามอร์ตาร์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียด G1R และ G2R ทุกส่วนผสมสามารถลดการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ โดยอนุภาคเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีขนาดเล็กส่งผลให้มีการกัดกร่อนน้อยกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่

Abstract

This research studies the utilization of rice husk-bark ash (RHBA) as a pozzolan material to resist magnesium sulfate and sulfuric acid attacks. RHBA is a by-product obtained from biomass electric power plant and was improved the quality by grinding until the median particle sizes are 27.4 and 10.9 microns (G1R and G2R),

respectively. RHBA with all finenesses were used to replace Portland cement type I at the ratios of 10, 20, 30 and 40% by weight of binder to cast mortars. The length change of mortar in 5% of magnesium sulfate solution and the weight loss of mortar due to 0.02% sulfuric acid solution (pH of 2.5) were investigated. The results revealed that original RHBA was not suitable to be used as a pozzolan material. Although original RHBA could reduce the expansion of mortar bars, the compressive strength of mortars containing original RHBA were too low. For G1R and G2R, the expansions of mortar bars were lower than those of Portland cement type I and type V mortar bars at 360 days and tended to decrease with an increase of RHBA fineness. The weight loss of mortar due to sulfuric acid attack showed that the mortars mixed with G1R and G2R exhibited lower weight loss than that of Portland cement type I mortar. The finer particle of RHBA raised sulfuric acid resistance higher than the coarser one.

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้งานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตให้ดีขึ้นทั้งในด้านกำลังอัดและความคงทนของคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากสารเคมี เช่น สารประกอบซัลเฟต และสารประกอบของกรดต่างๆ ซึ่งสารประกอบเคมีเหล่านี้มีผลกระทบต่อความคงทนและอายุการใช้งานของคอนกรีตโดยตรง และมีกระบวนการกัดกร่อนที่แตกต่างกันไป เช่น ซัลเฟตทำให้คอนกรีตเกิดการขยายตัวและแตกร้าว มักพบมากกับโครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับน้ำทะเลและน้ำใต้ดิน ส่วนสารประกอบทางเคมีของกรดจะทำลายเฟสที่ผิวของคอนกรีต ทำให้มวลรวมเกิดการหลุดร่อน จะเห็นได้ว่ากระบวนการกัดกร่อนของสารเคมีทั้งสองต่างส่งผลทำให้คอนกรีตเสื่อมคุณภาพและสูญเสียกำลังรับแรงอัดในเวลาต่อมา

การพัฒนาคอนกรีตเพื่อป้องกันหรือลดการกัดกร่อนจากสารเคมีดังกล่าวสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การเพิ่มกำลังอัดของคอนกรีต

โดยการลดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ การเลือกใช้ปูนซีเมนต์ชนิดที่ทนต่อซัลเฟต และการใช้วัสดุปอซโซลานเป็นส่วนผสมในคอนกรีต เช่น เถ้าถ่านหิน ซิลิกาฟูม และเถ้าแกลบ ซึ่งจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าวัสดุเหล่านี้สามารถเพิ่มกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตได้ [1-3]

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RHBA) เป็นผลพลอยได้จากโรงไฟฟ้าชีวมวล ซึ่งใช้แกลบและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเป็นเชื้อเพลิงในการเผาสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้า ในแต่ละปีมีปริมาณมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยข้อมูลจากโรงงานไฟฟ้าที่ผลิตเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เพียงแห่งเดียว พบว่ามีปริมาณเถ้าแกลบ-เปลือกไม้สูงถึง 300 ตันต่อวัน แต่มีการนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์น้อยมาก จึงส่งผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัดและสูญเสียพื้นที่ทิ้งโดยสูญเปล่า จากการศึกษามาก่อนของชัยและคณะ [4] พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีเมื่อมีความละเอียดสูง ดังนั้นในการศึกษารังนี้จึงใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดต่างกันเป็นวัสดุปอซโซลานแทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อศึกษาการต้านทานการขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกในมอร์ตาร์

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและศึกษาการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริก โดยใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดและอัตราทดแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณต่างกัน

3. การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

ปูนซีเมนต์	: ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5
ทราย	: ใช้ทรายแม่น้ำล้างสะอาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และล้างเบอร์ 100
แมกนีเซียมซัลเฟต	: ใช้สารแมกนีเซียมซัลเฟต ชนิด Commercial Grade
กรดซัลฟูริก	: ใช้สารละลายกรดซัลฟูริกที่มีความเข้มข้นร้อยละ 96 ชนิด Commercial Grade

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ : นำมาจากโรงไฟฟ้าชีวมวลที่ใช้แกลบและเปลือกไม้ยูคาลิปตัสเผาที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยมีอัตราส่วนการเผาของแกลบต่อเปลือกไม้ เท่ากับร้อยละ 65:35 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ได้จากโรงงานโดยตรงมาบดให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น 2 ขนาด โดยใช้สัญลักษณ์ดังนี้ OR คือ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบด, GIR และ G2R คือ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ผ่านการบดให้มีอนุภาคค้ำบนตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 15-20 และ 0-5 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3.2 วิธีการทดสอบ

ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, ประเภทที่ 5 และเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ ได้แก่ ภาพถ่ายขยายอนุภาค ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และองค์ประกอบทางเคมี

การทดสอบการขยายตัว ใช้แท่งตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 2.5x2.5x28.5 ซม. โดยนำเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทั้ง 3 ขนาดความละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้) ต่อทรายเท่ากับ 1:2.75 โดยน้ำหนัก ทำการควบคุมปริมาณน้ำในส่วนผสมของมอร์ตาร์ให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงระหว่าง 105 ถึง 115 ถอดแบบแท่งมอร์ตาร์ที่อายุ 1 วัน และวัดค่าเริ่มต้นโดยใช้เครื่องมือวัดการขยายตัว (Comparator, ASTM C 490) จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO₄) ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และวัดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ทุก 14 วัน จนถึง 360 วัน ทำการเปรียบเทียบกับแท่งมอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน

ส่วนการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการกัดกร่อนของสารละลายกรดซัลฟูริก ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. มีอัตราส่วนผสมและปริมาณน้ำเช่นเดียวกับตัวอย่างมอร์ตาร์ที่ใช้ทดสอบการขยายตัว ทำการถอดแบบที่อายุ 1 วัน แล้วบ่มในน้ำประปาเป็นเวลา 27 วัน จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 0.02 โดยน้ำหนัก (เทียบเท่า pH 2.5) เพื่อหาอัตราการสูญเสียน้ำหนักเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกเป็นเวลา 1, 3, 7, 14, 28, 42, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ

สำหรับสัญลักษณ์ที่ใช้ในการศึกษารังนี้ประกอบด้วย CT1 และ CT5 หมายถึงมอร์ตาร์ควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 เป็นวัสดุประสาน (ไม่มีการใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้) ตามลำดับ ส่วน OR, GIR และ G2R หมายถึงความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ใช้เป็นส่วนผสมในมอร์ตาร์ และตัวเลข 10, 20, 30 และ 40 หมายถึงร้อยละอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

รูปที่ 1 ถึง 3 แสดงภาพถ่ายขยายอนุภาคของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ก่อนและหลังบด โดยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีลักษณะหยาบ รูปร่างไม่แน่นอน และมีความพรุนสูง ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ GIR และ G2R มีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม รูปร่างไม่แน่นอน เนื่องจากการบด

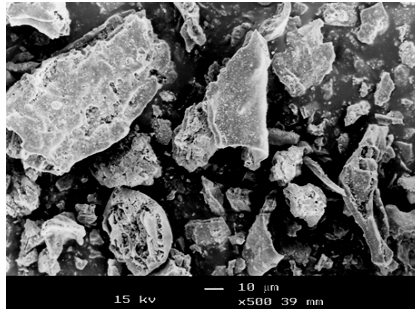
เมื่อพิจารณาความถ่วงจำเพาะและความละเอียดของวัสดุคงแสดงในตารางที่ 1 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 3.14 และ 3.17 ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ โดยมีค่าเท่ากับ 2.03 และมีค่า

เพิ่มขึ้นเป็น 2.10 และ 2.15 เมื่อลดให้มีขนาดเล็กลง (G1R และ G2R ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากอนุภาคขนาดใหญ่มีโพรงอากาศมากถูกบดให้แตกออกเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้ความพรุนลดลง ความถ่วงจำเพาะจึงมีค่าสูงขึ้น [5] นอกจากนี้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้หลังบดไม่เพียงมีขนาดอนุภาคเล็กลง แต่ยังทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยเถ้าแกลบ-

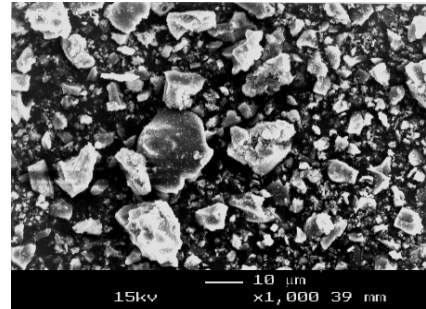
เปลือกไม้ G1R และ G2R มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 27.45 และ 10.89 ไมครอน มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 7,180 และ 11,800 ซม²/ก ตามลำดับ สำหรับพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เนื่องจากอนุภาคมีขนาดใหญ่ และมีโพรงอากาศมาก ทำให้อากาศไหลผ่านช่องว่างระหว่างอนุภาคอย่างรวดเร็ว จึงไม่เหมาะสำหรับการหาพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีนี้



รูปที่ 1 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR



รูปที่ 2 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R



รูปที่ 3 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Physical Properties	Portland Cement Type I	Portland Cement Type V	OR	G1R	G2R
Specific Gravity	3.14	3.17	2.03	2.10	2.15
Retained On a Sieve #325 (%)	N/A	N/A	68.70	16.86	1.92
Blaine Fineness (cm ² /g)	3,630	4,440	N/A	7,180	11,800
Median Particle Size, d ₅₀ (micron)	14.65	7.50	75.26	27.45	10.89

N/A = Not Applied

4.2 องค์ประกอบทางเคมี

ตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 มี CaO เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 65.41 และ 62.43 ตามลำดับ มีร้อยละของ MgO, SO₃ และค่า LOI อยู่ในเกณฑ์ตามที่มาตรฐาน ASTM C 150 [6] กำหนดไว้ คือ MgO ไม่เกินร้อยละ 6, SO₃ ไม่เกินร้อยละ 3.0 และ 2.3 ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ตามลำดับ นอกจากนี้มีค่า LOI ไม่เกินร้อยละ 3 เมื่อพิจารณาสารประกอบเคมีหลักของปูนซีเมนต์ ซึ่งคำนวณตามสมการของ Bogue [6] พบว่า C₃A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณเท่ากับร้อยละ 6.84 ในขณะที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่มีเลย ส่วน C₂S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 62.86 ซึ่งสูงกว่าประเภทที่ 5 ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 51.11 แต่ C₂S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ถึง 1 เท่าตัว คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 12.50 และ 24.94 สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ 5 ตามลำดับ ส่วนองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ พบว่ามีปริมาณ SiO₂ เป็นองค์ประกอบหลักสูงถึงร้อยละ 78.84 และเมื่อพิจารณาผลรวมของ SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ มี

ปริมาณเท่ากับร้อยละ 75.88 นอกจากนี้มีปริมาณ SO₃ เท่ากับร้อยละ 0.47 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 4 อยู่มาก ในขณะที่มีค่า LOI สูงถึงร้อยละ 11.21 ซึ่งสูงกว่ามาตรฐาน ASTM C 618 [7] กำหนดไว้เท่ากับร้อยละ 10

4.3 ความต้องการน้ำของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 แสดงความต้องการน้ำของมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยควบคุมปริมาณน้ำให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 105 ถึง 115 พบว่ามอร์ตาร์ที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เป็นส่วนผสมมีความต้องการน้ำสูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CT1 อย่างมาก โดยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 115 ถึง 167 ที่การแทนที่ร้อยละ 10 ถึง 40 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีความพรุนสูง ทำให้ดูดซึมน้ำได้มาก แต่หลังการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มีขนาดเล็กลง พบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R มีความต้องการน้ำเท่ากับร้อยละ 100, 105, 110 และ 113 และเมื่อบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มีขนาดละเอียดมากขึ้น (G2R) พบว่ามอร์ตาร์มีความต้องการน้ำลดลงอีก โดยมีค่าเท่ากับ 99, 100, 100 และ 103 ที่อัตราการแทนที่ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการบดเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ให้มีขนาดอนุภาคละเอียดมากขึ้น ทำให้ความต้องการน้ำมีค่าลดลงอย่างเห็น

ได้ชัด อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดในปริมาณที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำสูงขึ้นเล็กน้อย อาจเป็นเพราะการบดให้วัสดุมีความละเอียดมากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุกับน้ำ จึงส่งผลให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้น

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical Composition (%)	Portland Cement Type I	Portland Cement Type V	RHBA
Silicon Dioxide (SiO_2)	20.90	22.15	74.84
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	4.76	3.51	0.23
Iron Oxide (Fe_2O_3)	3.41	5.57	0.81
Calcium Oxide (CaO)	65.41	62.43	5.91
Magnesium Oxide (MgO)	1.25	0.99	0.57
Sodium Oxide (Na_2O)	0.24	0.06	0.17
Potassium Oxide (K_2O)	0.35	0.17	2.00
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.71	1.07	0.47
Loss On Ignition (LOI)	0.96	1.69	11.21
Tricalcium Silicates (C_3S)	62.86	51.11	-
Dicalcium Silicates (C_2S)	12.50	24.94	-
Tricalcium Aluminate (C_3A)	6.84	0.00	-
Tetracalcium Aluminoferrite (C_4AF)	10.38	16.85	-

4.4 กำลังอัดของมอร์ตาร์

ตารางที่ 3 แสดงกำลังอัดและร้อยละกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน พบว่ามอร์ตาร์ควบคุม CT1 และ CT5 มีกำลังอัดเท่ากับ 436 และ 430 กก/ซม² ตามลำดับ ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR มีกำลังอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT1 มาก และลดลงมากขึ้นเมื่อการแทนที่เพิ่มขึ้น โดยการแทนที่ร้อยละ 10 มีกำลังอัดเท่ากับ 291 กก/ซม² และลดลงเหลือเพียง 85 กก/ซม² ที่การแทนที่ร้อยละ 40 แสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบดไม่เหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุปอชโซลาน เนื่องจากให้กำลังอัดที่ต่ำ

แต่เมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น พบว่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นในทุกอัตราส่วนการแทนที่เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR โดยมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R ในอัตราร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีกำลังอัดเท่ากับ 391, 378, 308 และ 273 กก/ซม² ตามลำดับ เมื่อใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้น พบว่ามอร์ตาร์ G2R มีกำลังอัดสูงกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R โดยมีกำลังอัดเท่ากับ 415, 430, 416, และ 392 กก/ซม² ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอนุภาคที่มีความละเอียดมาก

ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอชโซลานได้มากและเร็ว นอกจากนี้ขนาดอนุภาคเล็กๆ เหล่านี้ยังสามารถอุดช่องว่างในเฟสค้ำทำให้เนื้อมอร์ตาร์มีความแน่นขึ้น กำลังอัดจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 ความต้องการน้ำและกำลังอัดที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์

Sample Mixes	W/B	Water Requirement (%)	Flow	Compressive Strength at 28 Days (ksc-%)
CT1	0.67	100	111	436- 100
CT5	0.67	100	108	430- 98
OR10	0.77	115	109	291- 67
OR20	0.88	131	110	217- 50
OR30	1.00	149	109	155- 36
OR40	1.12	167	113	85- 19
G1R10	0.67	100	110	391- 90
G1R20	0.70	105	108	378- 87
G1R30	0.74	110	107	308- 71
G1R40	0.76	113	106	273- 63
G2R10	0.66	99	110	415- 95
G2R20	0.67	100	112	430- 99
G2R30	0.67	100	108	416- 95
G2R40	0.69	103	111	392- 90

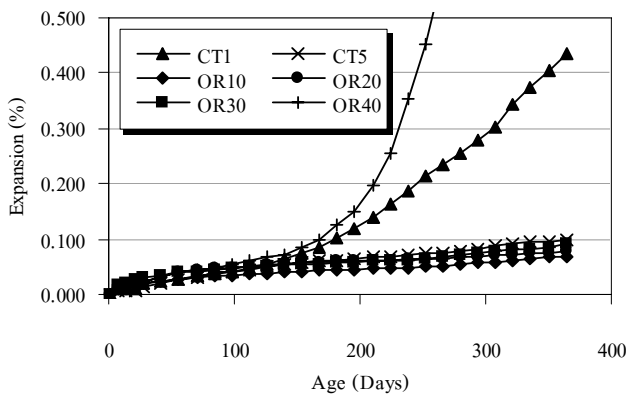
4.5 การขยายตัวของมอร์ตาร์เนื่องจากสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟต

รูปที่ 4 แสดงการขยายตัวของมอร์ตาร์ควบคุม CT1, CT5 และมอร์ตาร์ที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เป็นส่วนผสม พบว่าที่อายุ 360 วัน มอร์ตาร์ควบคุม CT1 มีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.434 สูงกว่ามอร์ตาร์ควบคุม CT5 ถึง 4 เท่า ซึ่งมีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.097 ทั้งนี้เนื่องจาก C_3A ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณมากกว่าในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 จึงทำให้เกิดการขยายตัวมากกว่า นอกจากนี้สังเกตได้ว่าแม้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 ไม่มีปริมาณ C_3A เลย แต่ยังคงเกิดการขยายตัวอยู่ประมาณร้อยละ 0.1 ที่อายุ 1 ปี ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า C_3A ไม่ใช่ปัจจัยที่ทำให้เกิดการขยายตัวเพียงอย่างเดียว [8, 9] แต่อาจเป็นเพราะปริมาณ C_3S ที่สูงในปูนซีเมนต์ส่งผลให้เกิดการขยายตัวได้มากขึ้น [10]

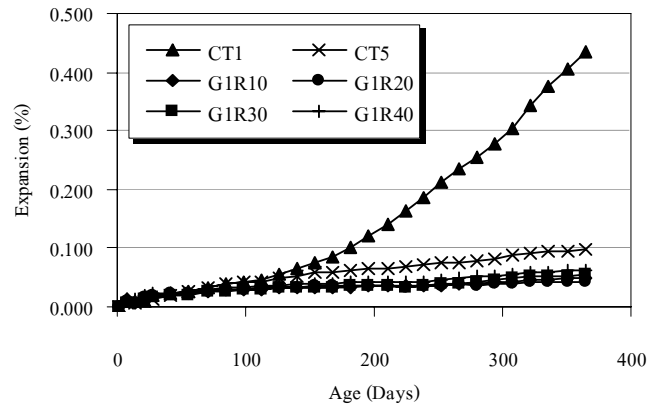
ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR พบว่าในช่วงอายุ 100 วันแรก การขยายตัวเกิดขึ้นน้อยและมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่หลังจากอายุ 150 วันแท่งมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ร้อยละ 40 เริ่มมีการขยายตัวเด่นชัดขึ้น โดยมีการขยายตัวสูงกว่าอัตรา

แทนที่อื่นๆ และสูงกว่าแท่งมอร์ตาร์ CT1 ส่วนการแทนที่ร้อยละ 10, 20 และ 30 การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ตามอายุการบ่มที่เพิ่มขึ้น จนที่อายุ 360 วันมีการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.069, 0.077 และ 0.095 ตามลำดับ ในขณะที่การแทนที่ร้อยละ 40 การขยายตัวมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่อายุ 150 วันมีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.084 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.452 ที่อายุ 252 วัน และตัวอย่างเสียหายในเวลาต่อมา ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ในปริมาณที่สูง ซึ่งมีอนุภาคขนาดใหญ่ ทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้น้อย จึงเกิด C-S-H ที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดประสานได้น้อยตามไปด้วย นอกจากนี้ C-S-H ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ก็ลดลงอย่างมากเมื่อมีการแทนที่ในปริมาณสูง ดังนั้นคุณสมบัติการยึดเกาะของเพสต์ในเนื้อมอร์ตาร์จึงลดลง เมื่อเกิดการขยายตัวขึ้นรอยร้าวจึงเกิดขึ้นได้ง่าย และเสียหายมาก (ดูรูปที่ 7) นอกจากนี้กำลังอัดที่อายุ 28 วันของมอร์ตาร์ OR40 มีค่าต่ำมากเพียง 85 กก/ซม² หรือคิดเป็นร้อยละ 19 ของมอร์ตาร์ CT1 เท่านั้น จึงส่งผลให้มีความต้านทานต่อซัลเฟตต่ำ [11]

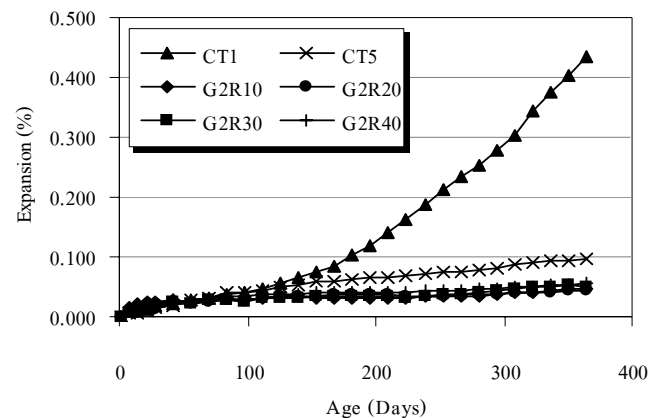
สำหรับมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุบ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ พบว่าการขยายตัวมีค่าน้อยกว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR อย่างเห็นได้ชัด โดยที่อายุ 360 วัน มอร์ตาร์ G1R10, G1R20, G1R30 และ G1R40 มีค่าการขยายตัวเท่ากับร้อยละ 0.050, 0.045, 0.055 และ 0.062 และมีค่าลดลงอีกเมื่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความละเอียดมากขึ้น โดยมอร์ตาร์ G2R10, G2R20, G2R30 และ G2R40 มีค่าการขยายตัวที่อายุเดียวกันเท่ากับร้อยละ 0.048, 0.043, 0.052 และ 0.055 ตามลำดับ เห็นได้ว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีความละเอียดมากขึ้นสามารถลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้ดี เป็นที่น่าสังเกตว่าการแทนที่ร้อยละ 20 มีการขยายตัวต่ำที่สุดและเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อแทนที่ร้อยละ 30 และ 40 ทั้งนี้เป็นเพราะการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำมากขึ้น [12] สารละลายซัลเฟตจึงซึมผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มาก อย่างไรก็ตามการขยายตัวยังคงมีค่าต่ำกว่าแท่งมอร์ตาร์ CT5



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวกับอายุของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R

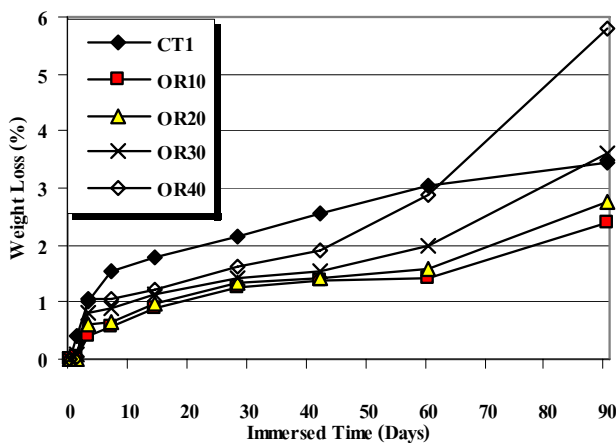


รูปที่ 7 ความเสียหายของมอร์ตาร์ที่แช่ในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตที่อายุ 360 วัน

4.6 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ในสารละลายกรด

รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการสูญเสียน้ำหนักกับระยะเวลาการแช่ในกรดซัลฟูริก pH 2.5 ของมอร์ตาร์ควบคุมและมอร์ตาร์

ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR พบว่ามอร์ตาร์ CT1 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่อายุ 90 วันเท่ากับร้อยละ 3.45 ส่วนมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ในอัตราร้อยละ 10 และ 20 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT1 คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.25 และ 2.76 ตามลำดับ และเมื่อการแทนที่เพิ่มเป็นร้อยละ 30 ค่าการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 3.59 ซึ่งสูงกว่ามอร์ตาร์ CT1 เล็กน้อย และเพิ่มขึ้นมากเมื่อแทนที่สูงถึงร้อยละ 40 คือ มีค่าเท่ากับร้อยละ 5.80 แสดงให้เห็นว่าการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR ในปริมาณที่สูงขึ้นทำให้เกิดการกัดกร่อนจากสารละลายกรดได้มากขึ้น

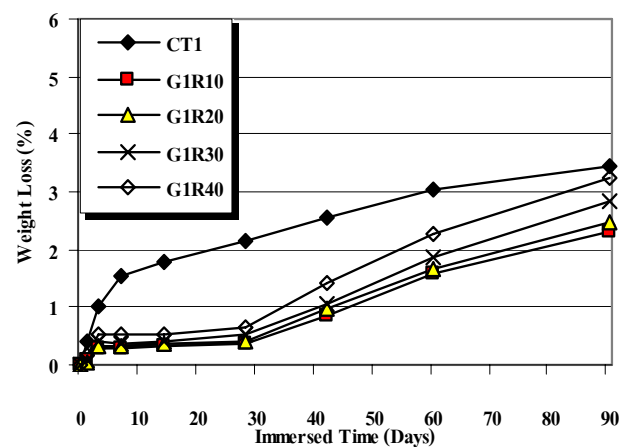


รูปที่ 8 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ OR เป็นส่วนผสมเมื่อแช่สารละลายกรดซัลฟิวริก

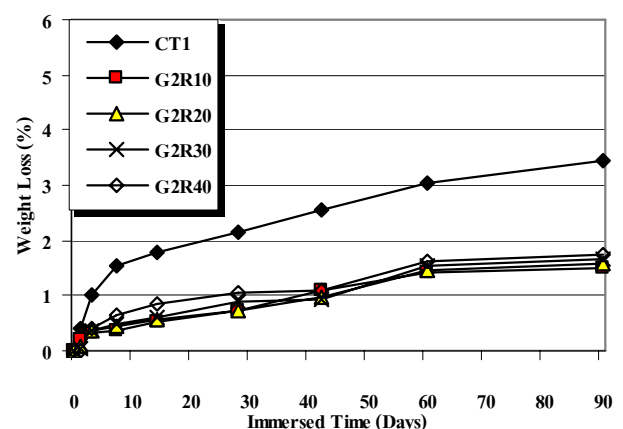
เมื่อเพิ่มความละเอียดของเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ โดยรูปที่ 9 และ 10 แสดงความสัมพันธ์ของการสูญเสียน้ำหนักกับระยะเวลาการแช่กรดซัลฟิวริกของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ GIR และ G2R ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าทุกอัตราการแทนที่มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่ามอร์ตาร์ CT1 โดยที่การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ GIR ร้อยละ 10, 20, 30 และ 40 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเท่ากับร้อยละ 2.32, 2.47, 2.82 และ 3.25 ตามลำดับ เมื่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความละเอียดมากขึ้นเป็น G2R พบว่ามีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักลดลง โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.49, 1.58, 1.66 และ 1.74 ตามลำดับ ซึ่งลดลงถึง 1 เท่าตัวเมื่อเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ CT1

จากผลการทดสอบเห็นได้ว่าค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทุกขนาดความละเอียดให้ผลในทิศทางเดียวกัน คือ ค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณที่สูงขึ้น แม้ว่าการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นการลด Ca(OH)_2 ที่ไปทำปฏิกิริยากับสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ได้มากกว่าการแทนที่ในปริมาณที่ต่ำก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ที่มีความเข้มข้นต่ำสามารถ

แตกตัวเป็น SO_4^{2-} ได้ [13] จึงมีลักษณะการกัดกร่อนเนื่องจากซัลเฟตร่วมด้วย ดังนั้นการเพิ่มปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ทำให้ส่วนผสมมีความต้องการน้ำมากขึ้น ความพรุนของมอร์ตาร์จึงเพิ่มขึ้นตาม [14] ส่งผลให้การซึมผ่านของสารละลายกรดเข้าไปในมอร์ตาร์ได้ง่าย นอกจากนี้เป็นที่น่าสนใจที่มอร์ตาร์ที่ผสมเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R ทุกอัตราการแทนที่ มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักที่แตกต่างกันน้อยมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปฏิกิริยาของ Ca(OH)_2 กับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ทำให้เกิดชั้นของอิพิซัม (CaSO_4) สีขาวเคลือบที่ผิวของมอร์ตาร์ (ดูรูปที่ 11) ซึ่งมีคุณสมบัติละลายน้ำได้น้อยและมีความทึบน้ำสูง สามารถช่วยป้องกันการซึมของสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้าไปในมอร์ตาร์ได้อีกทางหนึ่งด้วย [15]



รูปที่ 9 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ GIR เป็นส่วนผสมเมื่อแช่สารละลายกรดซัลฟิวริก



รูปที่ 10 ร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ที่มีเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G2R เป็นส่วนผสมเมื่อแช่สารละลายกรดซัลฟิวริก



รูปที่ 11 มอร์ตาร์หลังจากแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก
มีผลึกสีขาวเกาะที่ผิวของมอร์ตาร์

5. สรุป

จากการทดสอบและวิเคราะห์ผล การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้เป็นวัสดุปอซโซลานในการต้านทานการขยายตัวเนื่องจากสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟตและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากกรดซัลฟูริกสามารถสรุปได้ดังนี้

1. มอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ไม่ผ่านการบด (OR) แม้ว่าการแทนที่ไม่เกินร้อยละ 30 สามารถลดการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ได้ แต่เนื่องจากมีค่ากำลังอัดที่ต่ำจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน

2. การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่บดละเอียด (G1R และ G2R) แทนที่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทุกอัตราส่วนการแทนที่สามารถลดการขยายตัวเนื่องจากซัลเฟตได้ดี โดยมีค่าการขยายตัวที่อายุ 360 วัน ต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 5 เป็นวัสดุประสาน และมีแนวโน้มลดลงเมื่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ G1R และ G2R ร้อยละ 20 พบว่าการขยายตัวมีค่าต่ำ

3. การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กสามารถต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากกรดซัลฟูริกได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ และการเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในส่วนผสมทำให้มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการแทนที่เถ้าแกลบ-เปลือกไม้บดละเอียดทั้งสองขนาด (G1R และ G2R) ยังมีร้อยละการสูญเสียน้ำหนักต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เป็นวัสดุประสาน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง การใช้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าปาล์มน้ำมันในงานคอนกรีต ซึ่งได้รับทุนสนับสนุน

การวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ภายใต้โครงการทุนวิจัยองค์ความรู้ใหม่ที่เป็นพื้นฐานต่อการพัฒนา ประจำปี 2545 ซึ่งผู้เขียนขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ขอขอบคุณ บริษัท ไทยพาวเวอร์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนวัสดุเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Torii, K. and Kawamura, M., 1994, "Effect of Fly Ash and Silica Fume on the Resistance of Mortar to Sulfuric Acid and Sulfate Attack," Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 2, pp. 361-370.
- [2] Mangat, P.S. and Khatip, J.M., 1995, "Influence of Fly Ash, Silica Fume, and Slag on Sulfate Resistance of Concrete," ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 5, pp. 542-552.
- [3] Metha, P.K. and Folliard, K.J., 1995, "Rice Husk Ash-A Unique Supplementary Cementing Material: Durability Aspects," ACI SP-154, Advances in Concrete Technology, Proceedings of the Second CANMET /ACI International Symposium, pp. 531-542.
- [4] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, จักรพันธ์ วงศ์พา และ สุรพันธ์ สุคันธี, 2545, "การพัฒนาเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เพื่อใช้ในงานคอนกรีต," การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 8, ขอนแก่น, หน้า MAT 163-172
- [5] Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M.V., and Mora, P.E., 1997, "Mechanical Treatments of Fly Ashes Part I: Physico-Chemical Characterization of Ground Fly Ashes," Cement and Concrete Research, Vol. 25, pp. 1365-1377.
- [6] American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C 150: Standard Specification for Portland Cement," in 1997 Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Philadelphia, pp. 132-136.
- [7] American Society for Testing and Materials, 1997, "ASTM C 618: Standard Test Method for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Nature Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete," in 1997 Annual Book of ASTM Standard, Vol. 04.01, Philadelphia, pp. 294-296.
- [8] Tikalsky, P.J., Roy, D., Scheetz, B., and Krize, T., 2002, "Redefining Cement Characteristics for Sulfate-Resistance Portland Cement," Cement and Concrete Research, Vol. 32, pp. 1239-1246.

- [9] Tian, B. and Cohen, M.D., 2000, "Does Gypsum Formation During Sulfate Attack on Concrete Lead to Expansion," *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 117-123.
- [10] Gonzalez, M.A. and Irassar, E.F., 1997, "Ettringite Formation in Low C_3A Portland Cement Exposed to Sodium Sulfates Solution," *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, pp. 1061-1072.
- [11] ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, ไกรวุฒิ เกียรติโกมล และ สมชาย ชูชีพสกุล, 2537, "การศึกษาผลกระทบของซัลเฟตต่อคอนกรีต," เอกสารประกอบการประชุมวิชาการคณะวิศวกรรมศาสตร์ สจ.ธ. ครั้งที่ 2, 7-8 มิถุนายน 2537, หน้า 78-95
- [12] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พีรชล สุภัทธรรม, 2543, "คุณสมบัติทางกลและความทนทานของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ," *วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา*, ปีที่ 11, ฉบับที่ 4, หน้า 36-42
- [13] Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., Belie, N.D., Taerwe, L., Gemert, D.V., and Verstraete, W., 2000, "Chemical, Microbiological, and In Situ Test Methods for Biogenic Sulfuric Acid Corrosion of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol.30, No. 4, pp. 623-634.
- [14] Bessa, A., Bigas, J.P., and Gakkias, J.L., 2001, "Effect of Fine Mineral Admixtures on Durability Parameters of Mortars," *Proceedings of the Third International Conference on Concrete under Severe Conditions*, 18-20 June 2001, Vancouver, Canada, pp. 286-292.
- [15] Fattuhi, N.I. and Hughes, B.P., 1988, "The Performance of Cement Paste and Concrete Subjected to Sulphuric and Attack," *Cement and Concrete Research*, Vol.18, No. 4, pp. 545-553.