

คุณสมบัติทางกลและความทนทานของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

Mechanical Properties and Durability of Rice Husk Ash Cement

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พีรชล สุภัทธรรม

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)

คลองหนึ่ง คลองหลวง ปทุมธานี 12121

โทร. 564-6304-12 ต่อ 3105 โทรสาร. 564-6304-12 ต่อ 3039, 564-6303

บทคัดย่อ

บทความนี้แสดงผลการศึกษาคุณสมบัติด้านความทนทานของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบที่ได้จากโรงงานทำอิฐ ซึ่งใช้เถ้าแกลบเป็นเชื้อเพลิงในการเผา โดยคุณสมบัติที่ทำการศึกษาได้แก่ องค์ประกอบทางเคมี คุณสมบัติทางกายภาพ กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความสามารถด้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชัน และความสามารถเก็บกักคลอไรด์ ตัวแปรหลัก คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (0.4, 0.5 และ 0.6) และร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์ (ร้อยละ 10, 20, 30, 40 และ 50) จากผลการทดสอบ พบว่าการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมสามารถให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้น โดยปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 ให้ค่าสูงสุด และเมื่อปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบเพิ่มมากขึ้นความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชันและความสามารถด้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรดเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังได้เสนอความสัมพันธ์ในการหาค่าอัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกของเถ้าแกลบ

ABSTRACT

This paper presented the study of mechanical properties and durability of rice husk ash collected from brick industry that used rice husk ash in burning process. The properties investigated were chemical composition, physical properties, compressive strength, tensile strength, acid resistance, carbonation depth and chloride binding capacity. Parameters varied in the test were water to cementitious material ratio (0.4, 0.5 and 0.6) and percentage of rice husk ash replacement (10%, 20%, 30%, 40% and 50%). The test results showed that the compressive strength, tensile strength and chloride binding capacity of rice husk ash cement containing 20% rice husk ash replacement was the highest. Moreover, when percentage of rice husk ash replacement was increased, the acid resistance, depth of carbonation of rice husk ash cement mortar

were also increased. This paper also proposed a relationship to predict the rate of rice husk ash pozzolanic reaction.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การพัฒนาวัสดุก่อสร้างชนิดใหม่นับว่าเป็นสิ่งจำเป็น โดยวัสดุที่นำมาใช้ควรเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายภายในประเทศ เพราะจะเป็นการช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างลง

เถ้าแกลบเป็นผลพลอยได้จากการผลิตข้าว ประเทศไทยผลิตข้าวได้ประมาณ 17 ล้านตันต่อปี จะได้เถ้าแกลบประมาณ 4 ล้านตัน [1] เถ้าแกลบส่วนหนึ่งใช้เป็นเชื้อเพลิงในงานอุตสาหกรรม เช่น โรงสีข้าว โรงเผาอิฐ หลังจากใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วจะได้เถ้าแกลบ ซึ่งผลการวิเคราะห์ทางเคมีของเถ้าแกลบพบว่ามีซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบประมาณร้อยละ 90 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักชนิดหนึ่งในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าแกลบมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน [2]

การนำเถ้าแกลบมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำคอนกรีตเป็นการช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างเพราะเถ้าแกลบสามารถหาได้ง่ายและราคาถูก และยังเป็นการลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ใหม่ การใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมนอกจากเป็นการลดราคาก่อสร้างให้ถูกลงแล้ว ยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างของคอนกรีตให้ดีขึ้นด้วย ในการศึกษาที่ผ่านมา การนำเถ้าแกลบมาใช้ต้องผ่านขบวนการซึ่งมีการควบคุมคุณภาพเป็นอย่างดีทุกขั้นตอน ซึ่งทำให้ไม่สอดคล้องและไม่สะดวกกับการนำมาใช้ในโครงการก่อสร้างจริง ดังนั้นบทความนี้จะเสนอการนำเถ้าแกลบที่ได้จากท้องถิ่นมาเป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์

2. การทดสอบ

2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1, เถ้าแกลบจากโรงเผาอิฐมอญรูปะเดมิย์ จ.อยุธยา นำมาบดเป็นเวลา 75 นาที, ทรายร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 มีขนาดผลตามมาตรฐาน ASTM C33, สารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) มีความเข้มข้นร้อยละ 99, คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 99 และสารละลายฟีนอล์ฟทาเลิน

2.2 วิธีการทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึง ตัวอย่างมอร์ตาร์ใช้แบบหล่อทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร มีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 ตัวอย่างถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปต้มในน้ำ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C39 การทดสอบกำลังรับแรงดึงใช้วิธีการทดสอบแบบ Splitting Tensile Test ทำการทดสอบที่อายุ 3, 7, 28 และ 90 วัน

การทดสอบความทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร มีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 ตัวอย่างถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปต้มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน แล้วนำมาแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้นร้อยละ 5 มีค่า pH เท่ากับ 0.35 ทำการทดสอบหาค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก ที่ระยะเวลา 7, 28, 60 และ 90 วัน ที่แช่ในสารละลายกรด

การทดสอบความทนทานต่อปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น ใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 เซนติเมตร มีอัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 1 ตัวอย่างถอดแบบที่อายุ 1 วัน จากนั้นนำไปต้มในน้ำเป็นเวลา 28 วัน หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาเก็บไว้ในห้องซึ่งมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 การทดสอบหาระยะความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น โดยการนำตัวอย่างที่อายุครบ 90 วันมาผ่าซีก จากนั้นทำการพ่นสารละลายฟีนอล์ฟทาליน เข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนักในเอทานอลลงในเนื้อตัวอย่างที่ผ่าซีก การตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาสังเกตดูจากการเปลี่ยนสีของสารเคมีที่ติดพื้น ส่วนที่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะไม่มีสีเปลี่ยนสี ส่วนที่ไม่เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะเปลี่ยนเป็นสีม่วง ทำการวัดความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่น

การทดสอบความสามารถเก็บกักคลอไรด์ โดยหล่อตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร โดยผสมโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนักของน้ำผสมตัวอย่าง ใช้ปริมาณแฉะแทนที่ร้อยละ 20 และ 40 เมื่อตัวอย่างอายุครบ 90 วัน ทำการทดสอบโดยการกดตัวอย่างด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ทำตามมาตรฐาน JCI โดยการรีดสารละลายภายในช่องว่าง (Pore Solution) แล้วนำมาวิเคราะห์หาปริมาณคลอไรด์อิสระด้วยวิธีการไตเตรทด้วยซิลเวอร์ไนเตรท ($AgNO_3$) แล้วนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดและอัตราส่วนระหว่างคลอไรด์ที่ถูกเก็บกักต่อคลอไรด์ทั้งหมด

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของปูนซีเมนต์และแฉะแกลบที่ใช้ในงานวิจัย พบว่าแฉะแกลบเมื่อจำแนกตามมาตรฐาน ASTM C618 สามารถจัดให้แฉะแกลบอยู่ในวัสดุปอซโซลานประเภท N เพราะมีร้อยละของ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ เท่ากับ 99 ซึ่งมากกว่าร้อยละ 70 โดยมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก คือ ร้อยละ 96.84 โดยน้ำหนัก

ผลการทดสอบการไหลแผ่ของมอร์ตาร์แสดงดังรูปที่ 1 พบว่าค่าการไหลแผ่จะแปรผกผันกับปริมาณแฉะแกลบ กล่าวคือ เมื่อส่วนผสมมีปริมาณร้อยละการแทนที่แฉะแกลบมากขึ้นค่าการไหลแผ่มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นผลทางกายภาพของแฉะแกลบ คือ รูปร่างของแฉะแกลบมีลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม มีรูพรุน อนุภาคน้ำสูง และมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบแสดงในรูปที่ 4 จากผลการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบระหว่างอายุ 3 – 7 วัน มีค่าต่ำกว่าการพัฒนาของมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์อย่างเดียว แต่ที่อายุมากกว่า 28 วัน กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบระหว่างร้อยละ 10 – 30 มีค่าใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน โดยมอร์ตาร์ที่ผสมแฉะแกลบร้อยละ 20 ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงที่สุด อย่างไรก็ตาม มอร์ตาร์ที่ผสมแฉะแกลบมากกว่าร้อยละ 30 ให้กำลังรับแรงอัดต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วน สาเหตุที่การพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบต่ำกว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วนเพราะว่าปฏิกิริยาปอซโซลานิกยังเกิดน้อย และการแทนที่แฉะแกลบในปริมาณมากทำให้ส่วนผสมมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มากเกินไปทำให้กำลังรับแรงอัดต่ำลง

ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบแสดงในรูปที่ 5 จากผลการทดสอบพบว่าการพัฒนากำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบมีลักษณะเช่นเดียวกับการพัฒนาการรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบ ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบเป็นดังสมการ $f'_t = 1.9722f'_c^{0.701}$ โดยที่หน่วยของกำลังรับแรงอัด และกำลังรับแรงดึง เป็นเมกะปาสกาล (MPa) หรือกำลังรับแรงดึงมีค่าร้อยละ 15 ของกำลังรับแรงอัด

ผลการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักของมอร์ตาร์ผสมแฉะแกลบเมื่อแช่ในสารละลายกรดซัลฟูริกที่ส่วนผสมและอายุต่างๆ แสดงในรูปที่ 6 จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมแฉะแกลบมีส่วนช่วยในการต้านทานการกัดกร่อนของกรดซัลฟูริกอย่างมาก เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีของแต่ละส่วนผสมจะเห็นว่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมีค่าแปรผกผันตามอัตราส่วนของผลรวมซิลิกอนไดออกไซด์ ไอออนออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์ เมื่ออัตราส่วนระหว่างผลรวมซิลิกอนไดออกไซด์ ไอออนออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อ

แคลเซียมออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักมีค่าลดลงสาเหตุที่มอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีกว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วนเพราะปูนซีเมนต์เมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งถูกกรดกัดกร่อนได้ง่าย แต่มอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบเมื่อเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก แคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกอนไดออกไซด์ ไอออนออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์จากเถ้ากลบทำให้สามารถลดการกัดกร่อนของกรดลงได้

ผลการทดสอบความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบที่เวลา 90 วัน แสดงในรูปที่ 7 จากผลการทดสอบพบว่าความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นของมอร์ตาร์ผสมเถ้ากลบมีค่ามากกว่ามอร์ตาร์ที่ทำจากปูนซีเมนต์ล้วนและการแทนที่เถ้ากลบมากขึ้นทำให้ความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นเพิ่มมากขึ้นสาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าการแทนที่เถ้ากลบจะทำให้ความพรุน (Porosity) ของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้น ทำให้การแพร่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อซีเมนต์เพสต์ได้ง่ายกว่า และที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมสูงความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นจะเพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจากที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมสูงทำให้มอร์ตาร์เมื่อแข็งตัวแล้วมีโพรงมากกว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสมต่ำ เป็นสาเหตุให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถแพร่เข้าไปได้ง่ายเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 3 แสดงความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของซีเมนต์ผสมเถ้ากลบ จากผลการทดสอบพบว่า การแทนที่เถ้ากลบในปริมาณที่เหมาะสมทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ (Chloride Binding Capacity) ของซีเมนต์ผสมเถ้ากลบเพิ่มขึ้น การแทนที่เถ้ากลบในปริมาณที่มากเกินไปทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ลดลง จากตารางที่ 3 จะเห็นว่าที่อัตราการแทนที่เถ้ากลบในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 จะให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ดีที่สุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะคลอไรด์ที่แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ คลอไรด์ที่เกิดจากเกลือฟริเดิล (Friedel's Salt) และคลอไรด์ที่ถูกเก็บกักโดยอนุภาคของแคลเซียมซิลิ

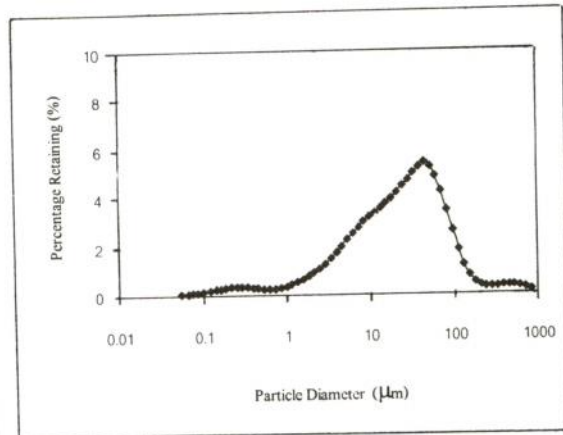
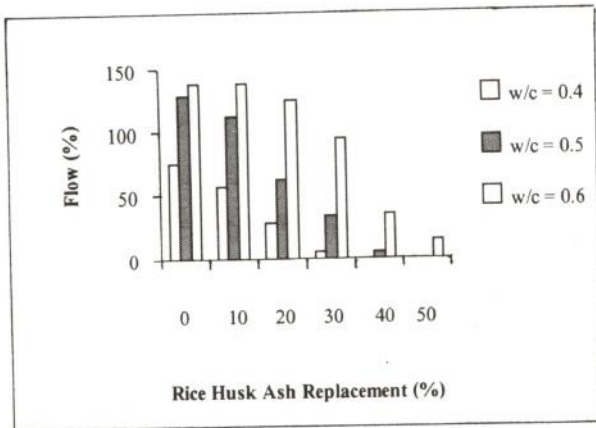
เกตไฮดรต ดังนั้นการแทนที่เถ้ากลบทำให้ส่วนผสมมีปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์เพิ่มขึ้น แต่การแทนที่เถ้ากลบที่ร้อยละ 40 จะทำให้ส่วนผสมมีปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์มากเกินไป ทำให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ลดลง

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์และเถ้ากลบ

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์	เถ้ากลบ
ซิลิกอนไดออกไซด์ (%)	21.85	96.84
อะลูมิเนียมออกไซด์ (%)	5.39	1.63
ไอออนออกไซด์ (%)	2.10	0.53
แคลเซียมออกไซด์ (%)	65.91	0.57
แมกนีเซียมออกไซด์ (%)	1.16	0.49
โพแทสเซียมออกไซด์ (%)	0.31	2.21
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (%)	2.51	0.14
ไททานเนียมออกไซด์ (%)	0.06	0.01
คุณสมบัติทางกายภาพ		
LOI (%)	1.33	4.81
ปริมาณความชื้น (%)	0.61	1.74
ความละเอียด (cm ² /gm)	3234	6635
ความถ่วงจำเพาะ	3.07	2.13
Bulk Density (kg/l)	1.03	0.51

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ (ร้อยละ)	เถ้ากลบ (ร้อยละ)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผสม	อัตราส่วนวัสดุผสมต่อทราย
100	0	0.4,0.5,0.6	1:2.75
90	10	0.4,0.5,0.6	1:2.75
80	20	0.4,0.5,0.6	1:2.75
70	30	0.4,0.5,0.6	1:2.75
60	40	0.5,0.6	1:2.75
50	50	0.5,0.6	1:2.75

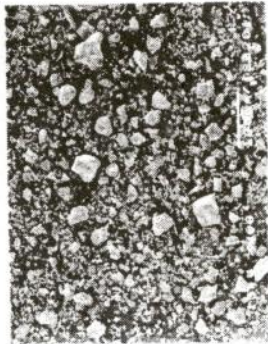


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลและกับ ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์

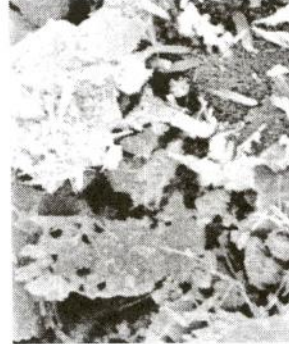
รูปที่ 2 การกระจายขนาดอนุภาคของเถ้าแกลบ 75 นาที



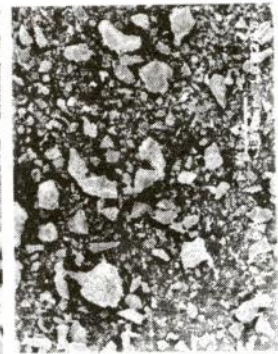
(ก)



(ข)

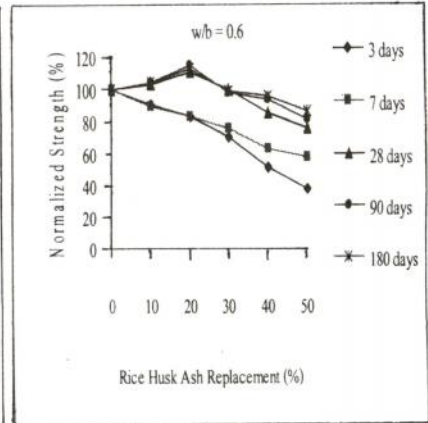
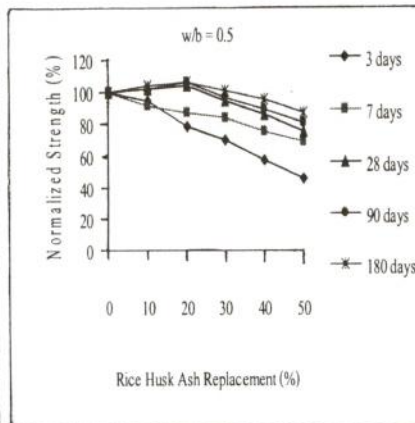
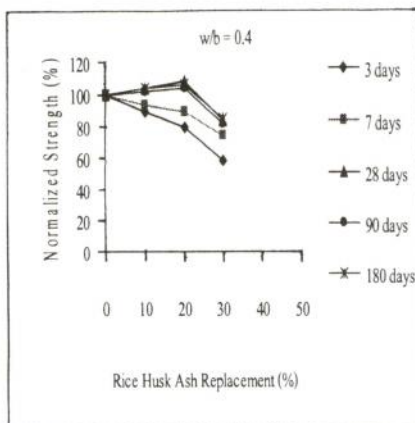


(ค)

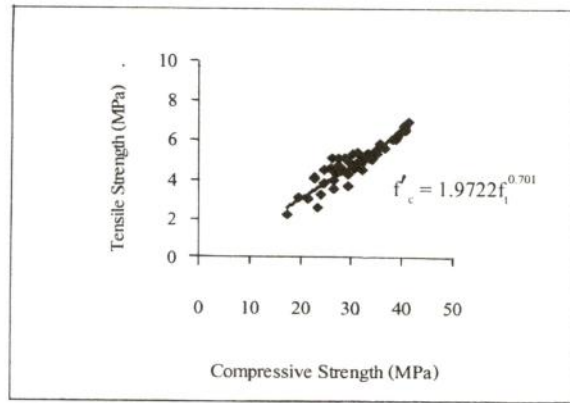


(ง)

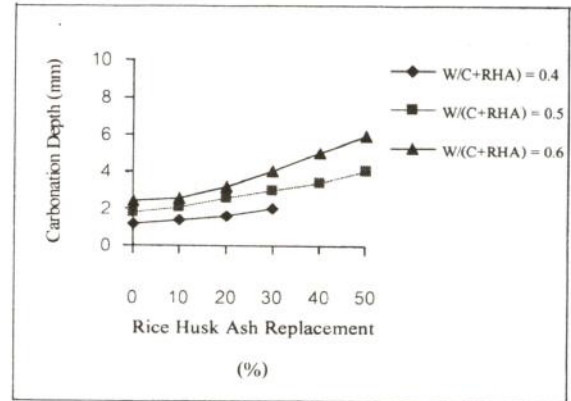
รูปที่ 3 (ก) ลักษณะผิวอนุภาคปูนซีเมนต์ กำลังขยาย 7500 เท่า (ข) ลักษณะขนาดอนุภาคปูนซีเมนต์ กำลังขยาย 200 เท่า (ค) ลักษณะผิวอนุภาคเถ้าแกลบ กำลังขยาย 7500 เท่า (ง) ลักษณะขนาดอนุภาคเถ้าแกลบ กำลังขยาย 200 เท่า



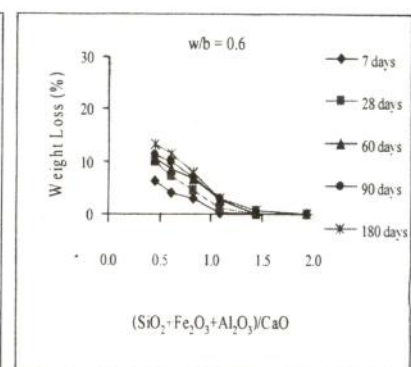
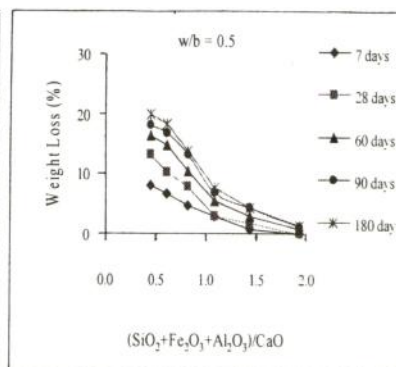
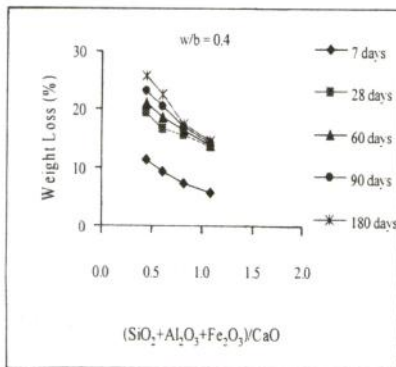
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าแกลบ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของปฏิกิริยาคาร์บอนเนชั่นและร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบในปูนซีเมนต์



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของผลรวมซิลิกอนไดออกไซด์ ไอออนออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์ในส่วนผสมกับร้อยละการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากแช่ในกรดซัลฟูริก

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบปริมาณคลอไรด์อิสระในสารละลายช่องว่างของซีเมนต์เพสต์

ส่วนผสม ปูนซีเมนต์: เถ้าแกลบ	ความเข้มข้นของ สารละลายในช่อง ว่าง (ppm)	ปูนซีเมนต์ (กรัม)	เถ้า แกลบ (กรัม)	น้ำ (กรัม)	คลอไรด์ ทั้งหมด (กรัม)	คลอไรด์ อิสระ (กรัม)	คลอไรด์ คงที่ (กรัม)	คลอไรด์คง ที่ต่อคลอ ไรด์ ทั้งหมด
100:0:2*	10160	3000	0	1500	30	15.24	14.76	0.492
100:0:4*	22920	3000	0	1500	60	34.38	25.62	0.427
100:0:6*	38760	3000	0	1500	90	58.14	31.86	0.354
80:20:2*	9480	2400	600	1500	30	14.22	15.78	0.526
80:20:4*	21280	2400	600	1500	60	31.92	28.08	0.468
80:20:6*	35580	2400	600	1500	90	53.37	36.63	0.407
60:40:2*	10740	1800	1200	1500	30	16.11	13.89	0.463
60:40:4*	23920	1800	1200	1500	60	35.88	16.11	0.402
60:40:6*	40140	1800	1200	1500	90	60.21	29.79	0.331

หมายเหตุ *ร้อยละคลอไรด์โดยน้ำหนักของน้ำผสมตัวอย่าง

4. อัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก

(Rate of Pozzolanic Reaction)

ค่าอัตราการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิก (r) เป็นค่าสัดส่วนระหว่างสัดส่วนคลอไรด์คงที่ (α_{fixed}) ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบต่อสัดส่วนคลอไรด์คงที่ (α_{fixed}) ของปูนซีเมนต์ [3] เป็นฟังก์ชันขององค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมและปริมาณคลอไรด์รวม (C_{tot})

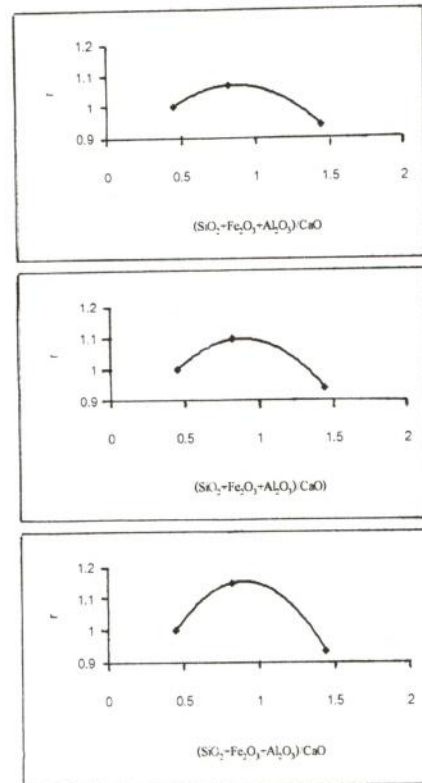
$$r = (\alpha_{\text{fixed}})_{\text{binder}} / (\alpha_{\text{fixed}})_{\text{cement}} \quad (1)$$

ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบมาจากคลอไรด์ที่ถูกเก็บกักจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับไตรแคลเซียมอะลูมิเนตและถูกเก็บกักโดยการดูดซับของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ ดังนั้นในการทดสอบนี้จะสมมติให้ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบเป็น r เท่าของความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของปูนซีเมนต์อย่างเดียว ดังนั้นสามารถคำนวณหาความสามารถเก็บกักคลอไรด์ของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบได้จาก

$$\alpha_{\text{fixed}}_{\text{binder}} = r \times \alpha_{\text{fixed}}_{\text{cement}} \quad (2)$$

ตารางที่ 4 ค่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ

สัดส่วนผสม	$\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO}$	r
100 : 0 : 2	0.4452	1.0000
100 : 0 : 4	0.4452	1.0000
100 : 0 : 6	0.4452	1.0000
80 : 20 : 2	0.8189	1.0691
80 : 20 : 4	0.8189	1.0960
80 : 20 : 6	0.8189	1.1497
60 : 40 : 2	1.4382	0.9410
60 : 40 : 4	1.4382	0.9414
60 : 40 : 6	1.4382	0.9350

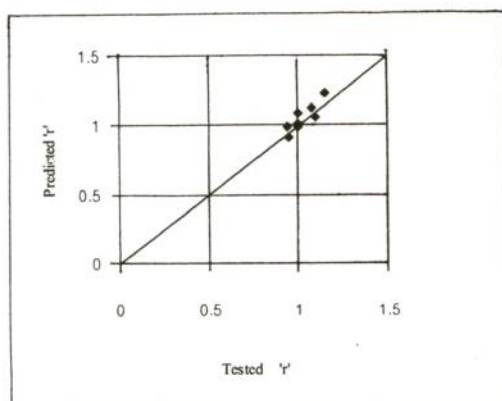


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (r) กับองค์ประกอบทางเคมี ที่ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (C_{tot}) เท่ากับร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักของวัสดุผสม

จากรูปที่ 8 สามารถคำนวณหาค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดังสมการ

$$r = (-0.0634C_{\text{tot}}^2 + 0.0746C_{\text{tot}} - 0.4057)((\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / \text{CaO})^2 + 0.476e^{0.341C_{\text{tot}}}((\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) / \text{CaO}) - 0.1143\ln(C_{\text{tot}}) + 0.7742 \quad (3)$$

จากสมการที่ 3 เห็นว่าค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกแปรผันตามอัตราส่วนของผลรวมระหว่างซิลิคอนไดออกไซด์ ไอออนออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์กำลังสอง ดังนั้นการแทนที่เถ้าแกลบเป็นการเพิ่มอัตราส่วนของผลรวมระหว่างซิลิคอนไดออกไซด์ ไอออนออกไซด์ และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อแคลเซียมออกไซด์ แสดงว่าการแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมทำให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและความสามารถเก็บกักคลอไรด์ดีขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้คือ การแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 แต่การแทนที่เถ้าแกลบในปริมาณที่มากเกินไปทำให้ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกและความสามารถเก็บกักคลอไรด์ต่ำลง จากสมการที่ 3 สามารถนำมาใช้ทำนายค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกินร้อยละ 9 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกที่ได้จากแบบจำลอง (Predicted 'r') เปรียบเทียบกับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกจริง (Tested 'r')

สรุปผล

การแทนที่เถ้าแกลบสามารถช่วยในการพัฒนากำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความสามารถต้านทานต่อสภาพแวดล้อมที่เป็นกรด ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ได้ดี โดยที่ปริมาณการแทนที่เถ้าแกลบร้อยละ 20 ให้กำลังรับแรงอัด กำลังรับแรงดึง ความสามารถเก็บกักคลอไรด์ดีที่สุด และการแทนที่ปริมาณเถ้าแกลบมากขึ้นทำให้ความสามารถต้านทานต่อกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบ ทำให้งานวิจัยสามารถสำเร็จลงได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สถิติการเกษตรแห่งประเทศไทย ปีเพาะปลูก 2538/39, ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์.
- [2] บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ พิชัย นิมิตรขงสกุล, ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เถ้าลอยและสารลดน้ำพิเศษ, วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, 2537
- [3] T. Maruya, S. Tangtermsirikul and Y. Matsuoka, Modeling of Chloride Ion Movement in the Surface Layer of Hardened Concrete, Concrete Library of JSCE, No.32, 1998.