

การใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายบางส่วนในคอนกรีตมวลเบา USE OF RICE HUSK ASH AS PARTIAL SAND REPLACEMENT IN LIGHTWEIGHT CONCRETE

พัชร อ่อนพรม

สาขาวิชาเทคโนโลยีก่อสร้าง วิทยาลัยเทคนิคหนองคาย สถาบันการอาชีวศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 1 หนองคาย 43000

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายบางส่วน โดยประยุกต์จากกระบวนการผลิตแบบโฟมคอนกรีตกับแบบมวลรวมเบา โดยใช้อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ต่อทรายในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ใช้ปริมาณโฟมในอัตราส่วนร้อยละ 50 โดยปริมาตร ใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30 และ 40 โดยปริมาตรของทราย ทำการควบคุมค่าการไหลให้อยู่ระหว่างร้อยละ $45 \pm 5\%$ ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำ ที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน แล้วนำผลการทดสอบไปสร้างแบบจำลองโดยใช้สมการถดถอยแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น และตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยคำนวณผ่านค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย (R^2) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMS) และร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสมบูรณ์ (MAPE) นอกจากนี้ ทำการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคของคอนกรีตมวลเบาโดยการถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS จากผลการทดลองพบว่า การใช้เถ้าแกลบเป็นมวลรวมละเอียดทำให้คอนกรีตมวลเบามีน้ำหนักน้อยลง โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมในการใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายคือปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตร ซึ่งให้กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำ ที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 22 กก./ซม.² 954 กก./ม.³ และร้อยละ 28 ตามลำดับ นอกจากนี้ อนุภาคและองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลเบาที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายไม่มีผลกระทบต่อฟองอากาศและไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีสามารถสรุปได้ว่า เถ้าแกลบสามารถใช้แทนที่ทรายในปริมาณที่เหมาะสมในคอนกรีตมวลเบาได้

แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้น ให้ความเที่ยงตรงและแม่นยำมากกว่าการถดถอยพหุคูณแบบเชิงเส้น ซึ่งให้ค่า R^2 ของกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ เท่ากับ 0.978, 0.966 และ 0.987 ตามลำดับ อีกทั้งมีค่าความแปรปรวนระหว่างข้อมูลแต่ละชุดต่ำกว่า คือ RMS และ MAPE ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบเชิงเส้น

คำสำคัญ : คอนกรีตมวลเบา เถ้าแกลบ และกำลังรับแรงอัด

Abstract

This paper presents a study of lightweight concrete using rice husk ash as partial sand replacement which applies from foam concrete and lightweight aggregate. Lightweight concrete made from Portland cement and sand at a 1:1 ratio by weight and 50% by volume of foam. Rice husk ash was used to replace sand at 0, 10, 20, 30 and 40 by volume of sand. Flows of all mixtures were controlled between $45 \pm 5\%$. Compressive strength density and water absorption of lightweight concrete were determined at 7, 14, and 28 days. After that, the result were gathered for a mathematical model by using linear and nonlinear multiple regression techniques. Coefficient of determination (R^2), root mean square (RMS) and mean absolute percentage error (MAPE) were analyzed to verify the accuracy of models. Furthermore, the scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive x-ray

spectrometry EDS were analyzed the particle characteristics of lightweight concrete. The results revealed that the use of rice husk ash as a fine aggregate in lightweight concrete caused to the decreasing of the weight. The optimum mixed ratio of rice husk ash as sand was 20% by volume which gave compressive strength density and water absorption at 28 days of 22 kg/cm², 954 kg/m³, and 28% respectively. In addition, the morphology particles and the chemical compositions of lightweight concrete shows that the used rice husk ash to replace sand did not have effect on artificial air pores and it does not have change the chemical composition of lightweight concrete. It can be concluded that the rice husk ash could be used as sand with optimum content for lightweight concrete.

The non-linear regression models had more accurate and precise prediction than linear technique. The coefficient of determination (R^2) of compressive strength, water absorption and density of lightweight concrete containing rice husk ash were provided at 0.978, 0.966 และ 0.987 respectively. In addition, the variation between database sets, the root mean square (RMS) and mean absolute percentage error (MAPE) were lower as compared to linear regression technique.

Keywords: Lightweight concrete, Rice husk ash, Compressive strength.

1. คำนำ

คอนกรีตมวลเบาคือ ซีเมนต์เพสต์หรือมอร์ตาร์ชนิดหนึ่งประกอบไปด้วยฟองอากาศขนาดเล็ก (Air bubble) ที่ไม่ต่อเนื่องกัน (Disconnection) ผสมอยู่ในอัตราส่วนผสมเพื่อให้มีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติเป็นฉนวนต้านทานความร้อนที่ดี

ประเทศไทยเป็นประเทศที่ส่งออกข้าวมากที่สุดในโลกโดยมีกำลังการผลิตข้าวปีละประมาณ 25 ล้านตันและได้กลบจากกระบวนการสีข้าวประมาณ 5 ล้านตัน ในแต่ละตันของข้าวเปลือกเมื่อสีแล้วจะมีกลบอยู่ประมาณ 200

กิโลกรัม และเมื่อนำกลบไปเผาจะได้เถ้ากลบ (Rice husk ash) ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักกลบ เถ้ากลบในประเทศไทยมีปริมาณซิลิกาสูง และมีค่าสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on Ignition หรือ LOI) ซึ่งปกติมี LOI อยู่ร้อยละ 2-5 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการเผากลบ เพราะการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เถ้ากลบมี LOI สูงขึ้น LOI ที่อยู่ในเถ้ากลบส่วนใหญ่จะเป็นธาตุถ่านติดน้ำสูง และถ้ามีจำนวนมากจะทำให้กำลังของคอนกรีตลดลงได้ [1] ที่ผ่านมามีการศึกษาการนำเถ้ากลบมาใช้เป็นวัสดุผสมในงานคอนกรีต อาทิเช่น Saraswathy และ Ha-Won Song [2] ทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบ โดยใช้เถ้ากลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, และ 30 ผลการวิจัยพบว่า การใช้ปริมาณเถ้ากลบร้อยละ 30 ช่วยลดการแทรกซึมของคลอไรด์และลดความสามารถในการซึมผ่าน อีกทั้งยังพัฒนาคุณสมบัติด้านการกำลังรับแรงอัดและการต้านทานการกัดกร่อนของคอนกรีต โดยจากผลการวิจัยดังกล่าวคณะผู้วิจัยได้แนะนำให้ใช้ปริมาณเถ้ากลบร้อยละ 20 สำหรับการใช้แทนที่ปูนซีเมนต์

Ganesan และคณะ[3] ทำการศึกษาเถ้ากลบผสมรวมกับซีเมนต์เพื่อประเมินค่าระดับการแทนที่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคุณสมบัติด้านกำลังและด้านการซึมผ่านของคอนกรีตโดยใช้เถ้ากลบดาดละเอียดผสมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5, 10, 15, 20, 25, 30, และ 35 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณเถ้ากลบสูงถึงร้อยละ 30 สามารถผสมกลมกลืนกับซีเมนต์ได้ดีโดยไม่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านกำลังและคุณสมบัติด้านการซึมผ่านของคอนกรีต ในขณะที่ Chatveera และ Lertwattanaruk [4] ได้ศึกษาความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้ากลบดำ โดยใช้เถ้ากลบดาดละเอียดแทนที่ปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 20, และ 40 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้ากลบดำเพิ่มขึ้นทำให้ความลึกของคาร์บอนชั่นและการหดตัวแห้งของคอนกรีตเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามคอนกรีตที่ผสมเถ้ากลบดำส่งผลต่อการหดตัวด้วยตัวเองและการต้านทานกรดซัลฟูริก จากผลการวิจัยดังกล่าวสามารถนำเถ้ากลบดำมาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุปอซโซลานได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า เถ้ากลบนิยมนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลาน ซึ่งจำเป็นต้องมีการบดละเอียดก่อนที่จะนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจทำการศึกษาผลกระทบเนื่องจากการแทนที่ทรายด้วยเถ้า

แลกเปลี่ยนกระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบา เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบสำหรับการพัฒนากระบวนการผลิตคอนกรีตมวลเบาต่อไป

2. การเตรียมวัสดุ และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

2.1 ปูนซีเมนต์

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (Portland Cement Type I) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย มอก. 15-2547 โดยเป็นปูนซีเมนต์ที่ใหม่บรรจุไว้ในถุงพลาสติก และชั่งน้ำหนักเตรียมไว้ก่อนการผสมคอนกรีตมวลเบา

2.2 ทราย

ใช้ทรายแม่น้ำลำเอาส่วนที่เป็นดินตะกอน และสิ่งเจือปนอื่น ๆ จนสะอาด นำมาผึ่งแดดเพื่อลดความชื้น และร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 และค้ำเบอร์ 100 โดยมีค่าโมดูลัสความละเอียด (F.M.) ตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials C 33 (2002 B : 5-16) [5] ใช้เป็นมวลรวมละเอียดในการผสมคอนกรีตมวลเบา

2.3 น้ำประปาสำหรับผสมคอนกรีตมวลเบา

2.4 แก้วแลกเปลี่ยน

ใช้แก้วแลกเปลี่ยนจากโรงไฟฟ้าร้อยเอ็ดกรีน จังหวัดร้อยเอ็ด ดังแสดงในรูปที่ 1 นำมาผึ่งแดดเพื่อลดความชื้น จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 และค้ำเบอร์ 100



รูปที่ 1 โรงไฟฟ้าชีวมวลร้อยเอ็ดกรีน จังหวัดร้อยเอ็ด

2.5 สารทำให้เกิดฟอง (Foaming agent)

ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:30 โดยปริมาตร (ตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิต)

2.6 เครื่องผลิตโฟม (Foam generator)

ประกอบด้วยปั๊มลม และถังแรงดันผลิตโฟม โดยควบคุมแรงดันของถังที่ 0.65 MPa ดังแสดงในรูปที่ 2

2.7 ชุดโต๊ะทดสอบการไหลแม่ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 เครื่องผลิตโฟม (Foam generator)



รูปที่ 3 ชุดโต๊ะทดสอบการไหลแม่

3. ขั้นตอนการทดสอบ

3.1 การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของวัสดุ

3.1.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

โดยใช้ขวดมาตรฐานเลอชาเตลิเอร์ (Le Chatelier Flask) ตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials C 188 (1997 F : 149-150) โดยหลักการแทนที่ในของเหลวซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ เช่น น้ำมันก๊าด (Kerosene) ซึ่งความหนาแน่นหาได้จากน้ำหนักของตัวอย่างหารด้วยปริมาตรของน้ำมันก๊าดที่เปลี่ยนแปลงไป โดยการถูกแทนที่ และนำความหนาแน่นของตัวอย่างหารด้วยความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ 4 °C จะได้ความถ่วงจำเพาะของตัวอย่าง

3.1.2 การกระจายขนาดผลของมวลรวมละเอียด

โดยการวิเคราะห์หาขนาดผลของมวลรวมโดยใช้ตะแกรง ตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials C 136 (1997 E : 84-87) [6] และหาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M.) คือ ตัวเลขดัชนีที่เป็นปฏิกิริยาโดยประมาณกับขนาดเฉลี่ยของ

ก่อนวัสดุในมวลรวม เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย โดยค่าที่ได้แบ่งบอกว่าลักษณะของมวลรวมนั้นหยาบหรือละเอียด

3.1.3 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของมวลรวมละเอียด

โดยการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง (Bulk Specific Gravity-Oven Dry) ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity-Saturated Surface Dry) ความถ่วงจำเพาะแท้จริง (Apparent Specific Gravity) และร้อยละการดูดซึมน้ำ (Percentage of Absorption) ของมวลรวมละเอียด ตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials C 128 (1997 D : 68-73) [7]

3.1.4 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างของมวลรวมละเอียด

หน่วยน้ำหนัก เป็นค่าน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยรวมช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids) ใช้สำหรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักเป็นค่าปริมาตร หรือค่าปริมาตรเป็นน้ำหนัก เมื่อใช้วิธีการออกแบบอัตราส่วนผสมโดยปริมาตร ใช้การทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials C 29 (1997 A : 1-4) [8]

3.1.5 ความละเอียดของอนุภาคปูนซีเมนต์

โดยการทดสอบตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials C 430 (1997 J : 249-250) โดยชั่งตัวอย่างปริมาณ 50 กรัม ใส่ลงบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ที่มีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร ร่อนผ่านน้ำจนกระทั่งน้ำที่ผ่านตะแกรงดูใสสะอาด จึงนำส่วนที่ค้างบนตะแกรงไปอบให้แห้งและชั่งน้ำหนัก โดยค่าร้อยละน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงหาได้จากอัตราส่วนของน้ำหนักที่ค้างบนตะแกรงต่อน้ำหนักทั้งหมด

3.1.6 ภาพขยายกำลังสูงของเถ้าแกลบ

เพื่อศึกษาลักษณะรูปร่างของเถ้าแกลบ ทำการถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

3.2.1 อัตราส่วนผสม

คอนกรีตมวลเบาที่ทำการศึกษานี้ในงานวิจัยนี้ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1 : 1 โดยน้ำหนัก และทุกอัตราส่วนผสมทำการควบคุมอัตราการไหลเพื่อให้อยู่ระหว่างร้อยละ 45±5 โดยใช้เถ้าแกลบแทนที่ทราย ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 10, 20, 30, และ 40 โดยปริมาตรทราย ใช้ปริมาณโฟมร้อยละ 50 โดยปริมาตรของอัตรา

ส่วนผสม โดยอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

Mixture No	Mix proportion (volume)				
	OPC	S	RA	W	V
(CC)	0.127	0.155	0	0.218	0.5
10RA	0.123	0.139	0.016	0.222	0.5
20RA	0.119	0.124	0.031	0.226	0.5
30RA	0.116	0.108	0.047	0.229	0.5
40RA	0.112	0.093	0.062	0.233	0.5

3.2.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

OPC (Ordinary Portland cement) หมายถึง ปูนซีเมนต์

S (Natural Sand) หมายถึง ทรายแม่น้ำ

RA (Rice husk Ash) หมายถึง เถ้าแกลบ

W (Water) หมายถึง น้ำ

V (Foaming Agent) หมายถึง สารเพิ่มฟอง

สำหรับตัวเลขก่อนสัญลักษณ์ หมายถึง ร้อยละการแทนที่ทรายด้วยเถ้าแกลบ

ตัวอย่างการอ่านสัญลักษณ์

20RA หมายถึง คอนกรีตมวลเบาที่แทนที่ทรายด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยปริมาตรทราย

3.2.3 การหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา

เริ่มต้นจากการผสมปูนซีเมนต์ ทรายและน้ำสะอาด โดยใช้เครื่องผสมแบบกะทะ จากนั้นนำสารเพิ่มฟอง (Foaming Agent) เติบโตกับน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1 : 30 เทลงในเครื่องกำเนิดโฟมเหลวคงรูป (Foam Generator) ที่ต่อเข้ากับปั๊มลมโดยปรับให้มีความดัน 6 กก./ cm^2 ซึ่งโฟมมีความหนาแน่น 50 กก./ m^3 ตามมาตรฐาน ASTM C 796-97 ก่อนนำไปผสมลงในมอร์ตาร์สด และทำการผสมต่อไปจนส่วนผสมทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทคอนกรีตมวลเบาที่ได้ลงในแบบหล่อ

3.2.4 การบ่มคอนกรีตมวลเบา

หลังจากถอดแบบคอนกรีตมวลเบาที่มีอายุ 1 วัน ตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาจะถูกเก็บรักษาไว้ในสภาพแวดล้อมปกติจนครบอายุตามการทดสอบจึงนำมาทำการทดสอบ ยกเว้นตัวอย่างที่จะนำไปทดสอบอัตราการดูด

ซีเมนต์ และการถ่ายภาพขยายกำลังสูง ซึ่งต้องมีการเตรียมการกับตัวอย่างก่อนที่จะนำมาทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบที่จะกล่าวต่อไป

3.3 การทดสอบคอนกรีตมวลเบา

3.3.1 การทดสอบค่าการไหลแผ่น

การทดสอบค่าการไหลแผ่นจะประยุกต์ใช้จากชุดทดสอบโต๊ะการไหลแผ่น (Flow table) ตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials C 230 (1997 G : 182-186) [9] โดยใช้คอนกรีตมวลเบาลงในแบบหล่อที่วางอยู่ตรงกลางของโต๊ะการไหลแผ่น ซึ่งแบบหล่อเป็นรูปกรวยคว่ำตัดขนาดความสูง 50.8 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางบน 69.8 มม. และมีเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐาน 102 มม. โดยปราศจากการยกขึ้นและตกลงของแท่นโต๊ะการทดสอบเพื่อป้องกันการพังทลายของฟองโฟม ค่าการไหลแผ่นคิดเป็นร้อยละของรัศมีการไหลแผ่นออกของคอนกรีตมวลเบาบนโต๊ะทดสอบ โดยค่าการไหลแผ่นที่ต้องการจะอยู่ระหว่างร้อยละ 45±5

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา ที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน โดยใช้ตัวอย่างขนาด 5×5×5 ซม.³ สามารถหาลำดับรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาได้จากสมการที่ (1)

$$F = \frac{P}{A} \quad (1)$$

เมื่อ F คือ กำลังรับแรงอัด (ก.ก./ตร.ซม.)
 P คือ แรงกระทำสูงสุดบนตัวอย่าง (ก.ก.)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดรับแรงอัด (ตร.ซม.)

3.3.3 การหาค่าความหนาแน่น

คำนวณหาค่าความหนาแน่นจากมวลต่อปริมาตรของตัวอย่างคอนกรีตมวลเบา จำนวน 3 ตัวอย่าง จากสมการที่ (2)

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น (ก.ก./ลบ.ม.)
 M คือ มวลของตัวอย่างทดสอบ (ก.ก.)
 V คือ ปริมาตรของตัวอย่างทดสอบ (ลบ.ม.)

3.3.4 การทดสอบอัตราการดูดซีเมนต์

การหาปริมาณการดูดซีเมนต์ เป็นการทดลองโดยเปรียบเทียบน้ำหนักของน้ำที่คอนกรีตมวลเบาที่ดูดซีเมนต์ภายหลังจากแช่ในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กับน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาอบแห้งตามมาตรฐาน มอก.1505-2541 สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$W = \frac{(W_w - W_d) \times 100}{W_d} \quad (3)$$

เมื่อ W คือ อัตราการดูดซีเมนต์ (ร้อยละ)
 W_w คือ น้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัว (ก.ก.)
 W_d คือ น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (ก.ก.)

3.3.5 การศึกษาผลกระทบของแก้วเคลือบที่ใช้แทนทรายต่อความเสถียรของฟองอากาศ โดยวิธีวิเคราะห์ภาพถ่าย (Image Analyzer)

3.3.5.1 การเตรียมตัวอย่างก่อนทำการถ่ายภาพขยายกำลังสูง (SEM)

โดยนำตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาขนาด 1×1×1 ซม.³ ที่บ่มในน้ำจนถึงอายุการทดสอบ แช่ในเอทานอลเพื่อหยุดปฏิกิริยาไฮเดรชัน ใช้ไอพอกซีชนิดแห้งทางผิวตัวอย่างก่อนนำไปทำให้แห้งภายใต้สุญญากาศ จากนั้นนำกระดาษทรายเบอร์ 120, 240, 400, 800, และ 1200 มาขัดผิวตัวอย่าง จากนั้นทำความสะอาดด้วยเอทานอลแล้วขัดด้วยกากเพชรความละเอียด 1 และ 6 ไมคอน ตามลำดับ และนำก้อนตัวอย่างไปเคลือบด้วยทอง แล้วนำไปถ่ายภาพขยายกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM 6400 JEOL ผลิตโดยบริษัท JEOL ประเทศญี่ปุ่น โดยใช้เทคนิค Back-scattered กำลังขยาย 500 เท่า 20 kV

3.3.5.2 การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (EDX)

โดยใช้ตัวอย่างเดียวกันกับการถ่ายภาพขยายกำลังสูงทำการทดสอบหลังจากถ่ายภาพขยายกำลังสูงแล้วเสร็จ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้ทำการวิเคราะห์ธาตุเฉพาะจุดโดยใช้รังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrophotometry, EDS) ซึ่งเป็นระบบที่นิยมใช้กันมากในกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)

3.3.6 แบบจำลองโดยใช้สมการถดถอย (Regression Equation Model)

เป็นวิธีทางสถิติที่ใช้การประมาณค่า และการพยากรณ์ค่าของตัวแปรหนึ่ง โดยใช้ค่าของข้อมูลอีกตัวหนึ่งเป็นตัวพยากรณ์ ตัวแปรที่ใช้ในการพยากรณ์เรียกว่า ตัวพยากรณ์ (Predictor) หรือตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ส่วนตัวแปรที่ถูกพยากรณ์เรียกว่า ผลที่วัดได้ (Outcome) หรือตัวแปรตาม (Dependent Variable) ในการวิเคราะห์การถดถอยมีหลายรูปแบบที่ใช้พยากรณ์ แต่สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้รูปแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบอยู่ในรูปเชิงเส้น (Multiple Linear Regression) และรูปแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่อยู่ในรูปเชิงเส้น (Multiple Non-linear Regression) ในโปรแกรม SPSS Version 15.0 โดยสมการที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ดังแสดงในสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ

$$Y = a + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + a_3 * X_3 + a_4 * X_4 + a_5 * X_5 + a_6 * X_6 \quad (4)$$

$$Y = a + a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + a_3 * X_3 + a_4 * X_4 + a_5 * X_5 + a_6 * X_6 + a_7 * X_1^2 + a_8 * X_2^2 + a_9 * X_3^2 + a_{10} * X_4^2 + a_{11} * X_5^2 + a_{12} * X_6^2 + a_{13} * X_1 * X_2 + a_{14} * X_1 * X_3 + a_{15} * X_1 * X_4 + a_{16} * X_1 * X_5 + a_{17} * X_1 * X_6 + a_{18} * X_2 * X_3 + a_{19} * X_2 * X_4 + a_{20} * X_2 * X_5 + a_{21} * X_2 * X_6 + a_{22} * X_3 * X_4 + a_{23} * X_3 * X_5 + a_{24} * X_3 * X_6 + a_{25} * X_4 * X_5 + a_{26} * X_4 * X_6 + a_{27} * X_5 * X_6 \quad (5)$$

เมื่อ a_{0-27} คือ ค่าคงที่

เมื่อ Y คือ กำลังรับแรงอัด (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และอัตราการดูดซึมน้ำ (ร้อยละ)

X_1 คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ (โดยปริมาตร)

X_2 คือ ปริมาณทราย (โดยปริมาตร)

X_3 คือ ปริมาณน้ำ (โดยปริมาตร)

X_4 คือ ปริมาณฟองโฟม (โดยปริมาตร)

X_5 คือ แก้วกลบ (โดยปริมาตร)

X_6 คือ อายุตัวอย่างทดสอบ (วัน)

3.3.7 การตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง

การตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง สามารถอธิบายได้โดยการหาความแม่นยำของแบบจำลองด้วยสมการทางสถิติดังนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root-Mean-Squared; RMS) ค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย (Coefficient of Determination; R^2) และค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Mean Absolute Percent Error; MAPE) ซึ่งเป็นสมการทางสถิติที่ใช้สำหรับตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง โดยแสดงไว้ในสมการ (6), (7) และ (8) ตามลำดับดังนี้

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |EP_i - EM_i|^2} \quad (6)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (EP_i - \overline{EP_i})(EM_i - \overline{EM_i})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (EP_i - \overline{EP_i})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (EM_i - \overline{EM_i})^2 \right]}} \quad (7)$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|EP - EM|}{EP} \times 100 \quad (8)$$

เมื่อ EP_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการทำนาย
 $\overline{EP_i}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทำนาย
 EM_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
 $\overline{EM_i}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลการทดลอง
 N คือ จำนวนชุดของข้อมูล

4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ 2 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของทรายมีค่าเท่ากับ 2.56 ในขณะที่แก้วกลบมีค่าเท่ากับ 1.94 สำหรับการดูดซึมน้ำของแก้วกลบมีค่าเท่ากับร้อยละ 83.5 ซึ่งมากกว่าทรายที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 34.6 ดังแสดงในตารางที่ 2

4.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ทราาย และเถ้าแกลบ ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณ CaO เป็นองค์ประกอบหลักถึงร้อยละ 65.00 และมีผลรวมของออกไซด์หลักอื่นได้แก่ CaO, SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ รวมกันเท่ากับร้อยละ 93.93

สำหรับเถ้าแกลบมีผลรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ เกินกว่าร้อยละ 70 ขององค์ประกอบทั้งหมด และมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) น้อยกว่าร้อยละ 6 ตามมาตรฐาน ASTM C 618 สามารถจัดเถ้าแกลบอยู่ในกลุ่มเถ้าถ่านหินชนิด F ส่วนทรายมีองค์ประกอบหลักคือออกไซด์ของ SiO₂ ซึ่งมีประมาณร้อยละ 92 ขององค์ประกอบทั้งหมด เนื่องจากทรายแม่น้ำมีความเป็นผลึกสูงในรูปของควอตซ์ นั่นคือทรายแม่น้ำจึงเป็นวัสดุเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยาใดๆ [10]

4.3 คุณสมบัติคอนกรีตสด

จากอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา ในตารางที่ 1 พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่ทรายด้วยเถ้าแกลบเพิ่มขึ้น ความต้องการน้ำในอัตราส่วนผสมมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบมีขนาดใหญ่และมีรูพรุนสูงทำให้มีความต้องการน้ำมากขึ้น [11] เพื่อรักษาความสามารถในการทำงาน

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ

Sample	OPC	S	RA
Specific gravity	3.14	2.56	1.94
Absorption (%)	-	1.21	5.30
Moisture content (%)	-	0.47	-
Voids (%)	-	34.6	83.5
Fineness modulus	-	2.76	1.52

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

Chemical compositions (%)	OPC	S	RA
SiO ₂	20.62	92.86	90.20
Al ₂ O ₃	5.22	3.17	0.67
Fe ₂ O ₃	3.10	0.27	0.95
CaO	65.00	0.55	0.94
MgO	0.91	0.49	0.49

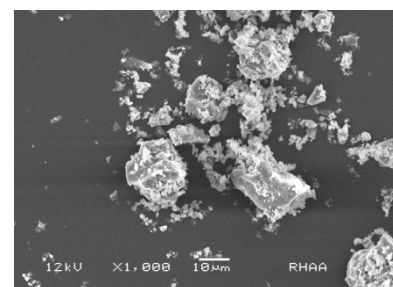
Chemical compositions (%)	OPC	S	RA
K ₂ O	0.07	0.32	3.75
Na ₂ O	0.50	0.42	0.12
SO ₃	2.70	0.55	0.21
LOI	1.13	0.67	3.41

4.4 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงของวัสดุ

ทำการถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าลักษณะทางกายภาพเถ้าแกลบมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม ไม่แน่นอนผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง ดังแสดงในรูปที่ 4



(a)



(b)

รูปที่ 4 ภาพถ่ายขยายอนุภาคเถ้าแกลบ (a) กำลังขยาย 500 เท่า และ (b) กำลังขยาย 1,000 เท่า

4.5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ ที่อายุ 7, 14, และ 28 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สรุปผลการทดสอบคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล

Mix	Strength-days (MPa)			Absorption-days (%)			Density -days (kg/m ³)		
	7	14	28	7	14	28	7	14	28
0RA	2.5	2.6	2.8	23	23	23	1064	1034	1000
10RA	2.3	2.3	2.4	24	25	25	1021	998	987
20RA	2.1	2.2	2.2	27	27	28	997	967	954
30RA	1.8	1.8	1.9	34	35	37	958	934	925
40RA	1.1	1.2	1.3	39	40	42	920	907	887

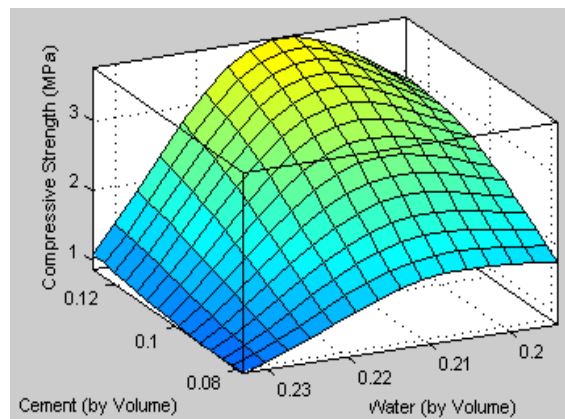
และสามารถวิเคราะห์และอภิปรายผลการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

4.5.1 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล

4.5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาที่มีปริมาณน้ำที่เพียงพอสำหรับทำปฏิกิริยาไฮเดรชันกับปูนซีเมนต์ จึงส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณน้ำในอัตราส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งนั่นหมายถึงปริมาณการใช้เถ้าแกบลแทนที่ทรายมากขึ้น ประกอบกับปริมาณปูนซีเมนต์ลดลง ดังนั้น เมื่อลักษณะทางกายภาพของเถ้าแกบลที่มีขนาดใหญ่และรูพรุนสูงบวกกับปริมาณปูนซีเมนต์ที่น้อยลง ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง [13]

ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ เนื่องจากปริมาณการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์จะแปรผันตรงกับการลดลงของปริมาณเถ้าแกบล ดังนั้น กำลังรับแรงอัดจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

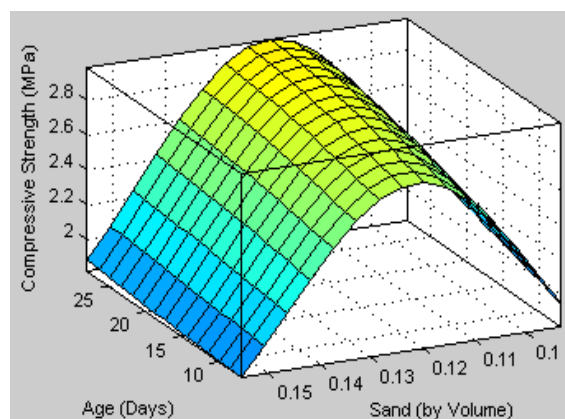


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ปริมาณ

ปูนซีเมนต์และ ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล

4.5.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ปริมาณทรายและอายุทดสอบ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ปริมาณทรายและอายุทดสอบ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของทรายและมีกำลังรับแรงอัดสูงที่สุด ณ ปริมาณทรายระหว่างร้อยละ 0.12 ถึง ร้อยละ 0.13 โดยปริมาตร หรือเทียบเท่ากับปริมาณทรายร้อยละ 80 ถึง ร้อยละ 90 โดยปริมาตรทราย (10-20RA) ในขณะที่อายุของตัวอย่างที่นำมาทำการทดสอบแทบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบา



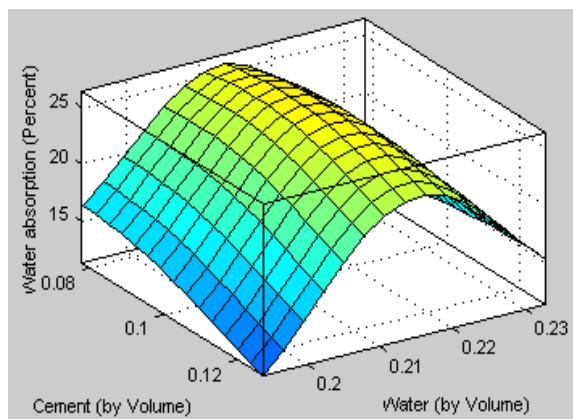
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัด ปริมาณทราย

และ อายุทดสอบของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกบล

4.5.2 อัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ

4.5.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณปูนซีเมนต์ที่ลดลงในอัตราส่วนผสม ทั้งนี้ เนื่องจากการลดลงของปริมาณปูนซีเมนต์ในอัตราส่วนผสม จะแปรผันโดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้ากลบ และเมื่ออัตราส่วนผสมมีปริมาณเถ้ากลบมากเกินไป จึงส่งผลให้เนื้อเมตริกซ์อ่อนแอและทำให้อัตราการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



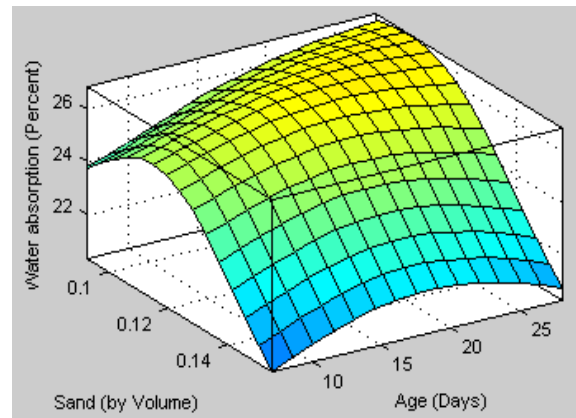
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณ

ปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ

4.5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณทรายและอายุทดสอบ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณทรายและอายุทดสอบ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า อัตราการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อมีปริมาณทรายในอัตราส่วนผสมมากกว่าร้อยละ 0.12 โดยปริมาตร เนื่องจากปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นนั้นหมายความว่าปริมาณเถ้ากลบที่ลดลงในอัตราส่วนผสม ส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มอัตราการดูดซึมน้ำลดลง ในขณะที่อายุ

ทดสอบมีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงอัตราการดูดซึมน้ำเพียงเล็กน้อย



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณ

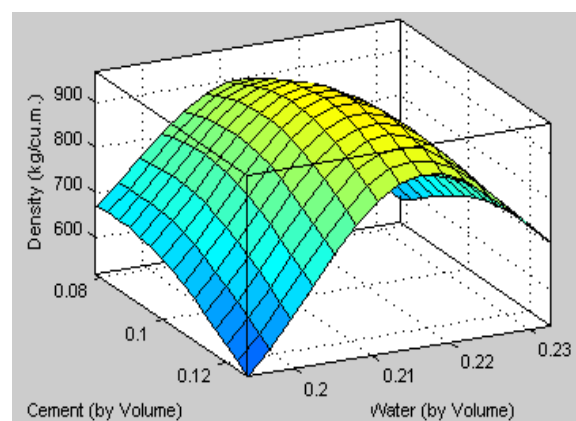
ทรายและอายุทดสอบของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ

4.5.3 ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ

4.5.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น

ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ปริมาณปูนซีเมนต์และปริมาณน้ำ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้ากลบ ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณปูนซีเมนต์มีผลทำให้ปริมาณเถ้ากลบในอัตราส่วนผสมลดลง ส่งผลให้ความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยปริมาณปูนซีเมนต์ร้อยละ 0.11 ถึง ร้อยละ 0.12 โดยปริมาตร ส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มค่าความหนาแน่นสูงที่สุด



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ปริมาณ

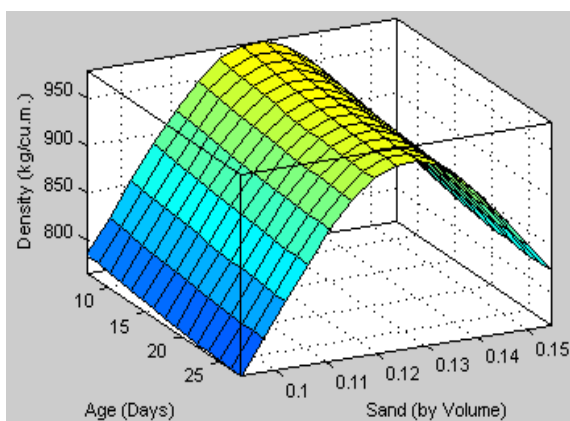
ปูนซีเมนต์และ ปริมาณน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสม
เถ้าแกลบ

4.5.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น

ปริมาณทรายและอายุทดสอบ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้า
แกลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น ปริมาณทรายและ
อายุทดสอบ ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ ดังแสดงใน
รูปที่ 10 พบว่า ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาที่มี
แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสม
เนื่องจากการเพิ่มปริมาณทรายจะแปรผันโดยตรงกับการ
ลดลงของเถ้าแกลบ และการที่ทรายมีค่าความถ่วงจำเพาะ
มากกว่าเถ้าแกลบ จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของ
คอนกรีตมวลเบาเพิ่มขึ้น โดยปริมาณทรายประมาณร้อยละ
0.13 โดยปริมาตร ส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่มีแนวโน้มการ
พัฒนาความหนาแน่นสูงที่สุด ซึ่งปริมาณทรายดังกล่าว
สามารถพบได้ในอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้า
แกลบในปริมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตรทราย (10RA) โดย
มีกำลังรับแรงอัดประมาณร้อยละ 97-99 เมื่อเปรียบเทียบกับ
คอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสม
ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ
20, 30, และ 40 โดยปริมาตรทราย (20-40RA) พบว่า มี
ค่าความหนาแน่นประมาณร้อยละ 95-97, 90-92, และ 88-
89 ตามลำดับ

ในขณะที่คอนกรีตมวลเบาที่มีอายุทดสอบมากขึ้นจะมี
ความหนาแน่นลดลง ซึ่งเป็นลักษณะพฤติกรรมปกติของวัสดุ
ประเภทคอนกรีตโดยทั่วไป

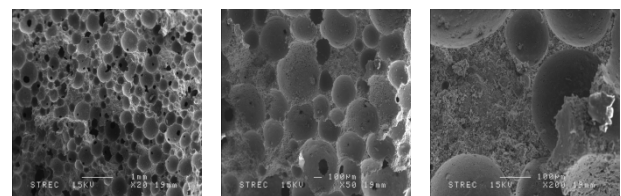


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการดูดซึมน้ำ ปริมาณ

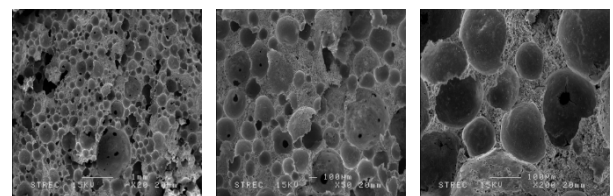
ทรายและ อายุทดสอบของคอนกรีตมวลเบาผสม
เถ้าแกลบ

4.6 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่อง กราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

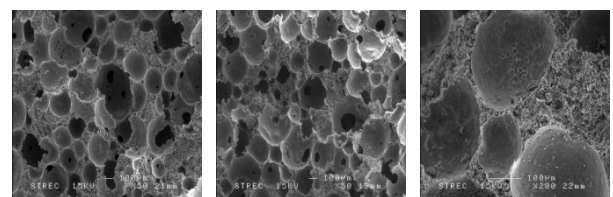
รูปที่ 11 (b)-(d) แสดงคอนกรีตมวลเบาที่แทนที่ทราย
ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 10 ถึง ร้อยละ 30 โดย
ปริมาตรทราย พบว่า มีปริมาณช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้น
เล็กน้อยตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าแกลบ เมื่อ
เปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ ดัง
แสดงในรูปที่ 11 (a) ส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย
เกี่ยวกับคุณสมบัติด้านการรับกำลัง ความหนาแน่น และ
อัตราการดูดซึมน้ำ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบที่ผ่านมา
ของคุณสมบัติดังกล่าว ในขณะที่การแทนที่ทรายด้วยเถ้า
แกลบในอัตราส่วนร้อยละ 40 ดังแสดงดังแสดงในรูปที่ 11
(e) พบว่า มีปริมาณช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นอย่างมาก ซึ่งไม่
ส่งผลดีต่อคุณสมบัติต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบา



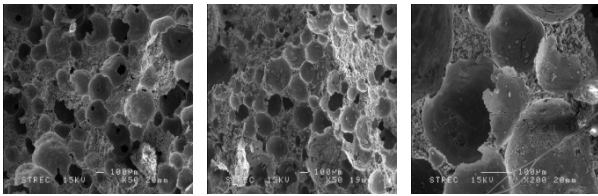
(a) 0RA



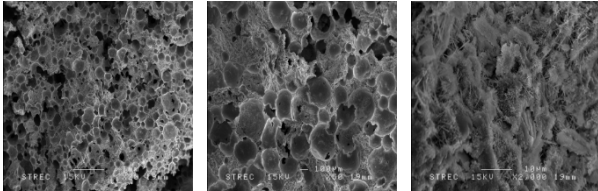
(b) 10RA



(c) 20RA



(d) 30RA

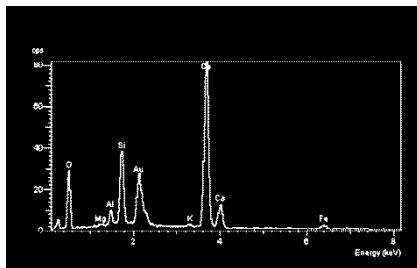


(e) 40RA

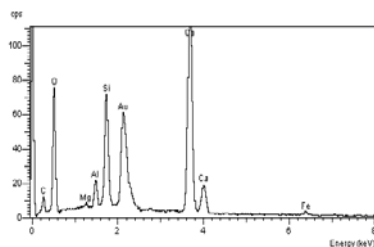
รูปที่ 11 ภาพขยายกำลังสูงคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ

4.7 การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (EDX)

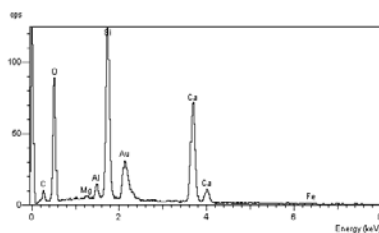
จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ ดังแสดงในรูปที่ 12 (a)-(e) พบว่า ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลเบา



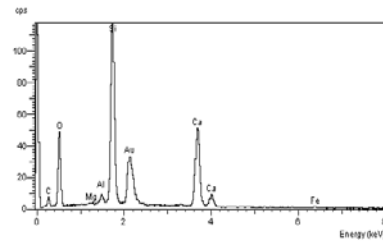
(a) 0RA



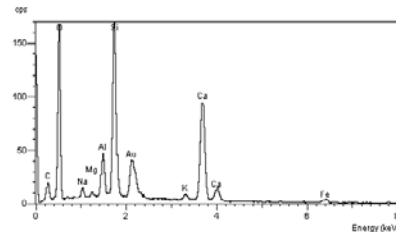
(b) 10RA



(c) 20RA



(d) 30RA



รูปที่ 12 การวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ (EDX)

4.8 แบบจำลองโดยใช้สมการถดถอยของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ

4.8.1 การทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง

สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลอง ดังแสดงในตาราง 5 พบว่า แบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่อยู่ในรูปเชิงเส้นให้ความเที่ยงตรงและแม่นยำมากกว่าสมการถดถอยแบบเชิงเส้น โดยให้ค่า R^2 ของกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำและความหนาแน่น สูงถึง 0.978, 0.966 และ 0.987 ตามลำดับ ซึ่งเป็นเกณฑ์ความสัมพันธ์ระดับดี และมีค่าความแปรปรวนระหว่างชุดข้อมูลต่ำ โดยมีค่า RMS และ MAPE ต่ำสุดเท่ากับ 0.089 และ 0.402 ตามลำดับ จัดได้ว่าประสิทธิภาพการทำนายผลอยู่ในเกณฑ์สูง ในขณะที่แบบจำลองแบบเชิงเส้นให้ค่า R^2 เพียง 0.669, 0.834, และ 0.959 สำหรับ กำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำและความหนาแน่น ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ข้อมูลทางสถิติของแบบจำลองการถดถอยคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ

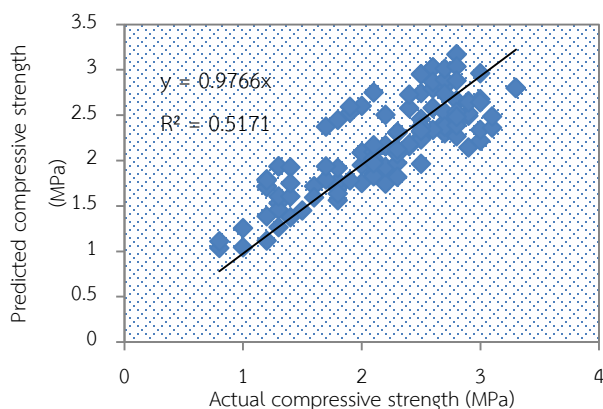
Regression models	R^2	RMS	MAPE
Linear regression of CS	0.66914	0.349597	14.37086
Nonlinear regression of CS	0.97817	0.089796	3.32185

Linear regression of AST	0.83434	1.316836	3.86912
Nonlinear regression of AST	0.96633	0.593656	1.71001
Linear regression of DS	0.95954	8.755197	0.69654
Nonlinear regression of DS	0.98735	4.895606	0.40280

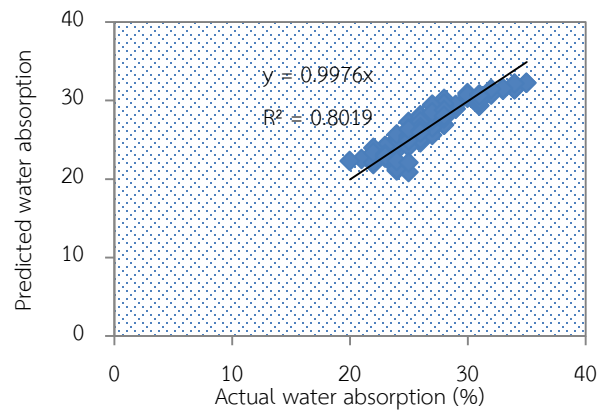
เมื่อได้รูปแบบสมการของแบบจำลองโดยใช้วิธีการ Regressions ในการทดสอบประสิทธิภาพการทำนาย คุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ หลังจากนั้น คำนวณหาผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองของตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยผลการทดลองของสมการถดถอยแบบเชิงเส้นสำหรับการทำนายผลกำลังรับแรงอัด ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่า ผลการทดลองมีการกระจายตัวอย่างมาก โดยมีค่า R^2 เพียง 0.517 ซึ่งเป็นระดับเกณฑ์ความสัมพันธ์ที่ต่ำ

ในขณะที่ผลการทดลองอัตราการดูดซึมน้ำและความหนาแน่น ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการทดลองมีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรง และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยค่า R^2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.801 และ 0.957 ตามลำดับ

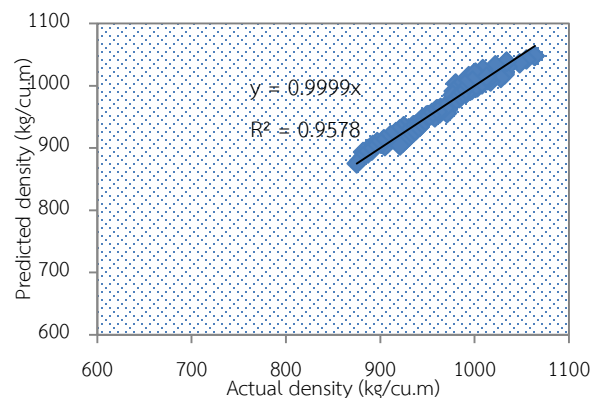
สำหรับผลการทดลองของสมการถดถอยแบบไม่เชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 16 ถึง 18 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้มีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงและมีเที่ยงตรง แม่นยำ มากกว่าผลการทดลองของสมการถดถอยแบบเชิงเส้น โดยมีค่า R^2 สำหรับกำลังรับแรงอัด อัตราการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่น เท่ากับ 0.977, 0.965, และ 0.980 ตามลำดับ ซึ่งถือเป็นเกณฑ์ระดับความสัมพันธ์ที่ดี



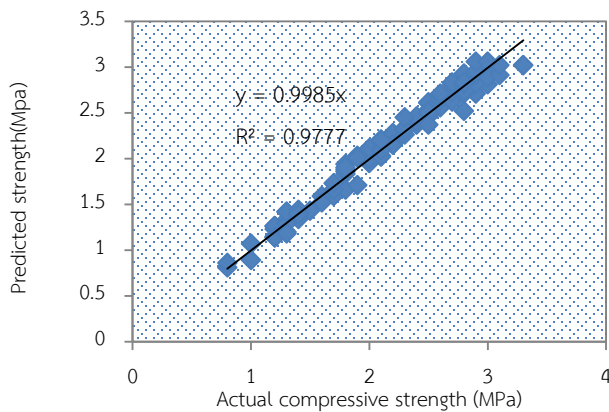
รูปที่ 13 การทำนายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบอยู่ในรูปเชิงเส้น



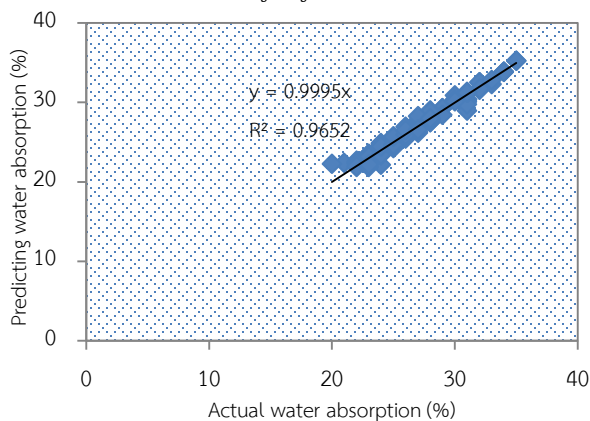
รูปที่ 14 การทำนายอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบอยู่ในรูปเชิงเส้น



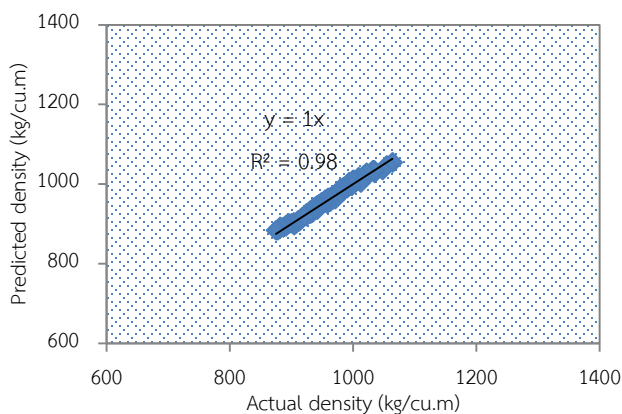
รูปที่ 15 การทำนายความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบอยู่ในรูปเชิงเส้น



รูปที่ 16 การทำนายกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบไม่อยู่ในรูปเชิงเส้น



รูปที่ 17 การทำนายอัตราการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบไม่อยู่ในรูปเชิงเส้น



รูปที่ 18 การทำนายความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบา

ผสมเถ้าแกลบ โดยใช้แบบจำลองการถดถอยแบบไม่อยู่ในรูปเชิงเส้น

5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การนำเถ้าแกลบมาใช้แทนที่ทรายบางส่วน ในการหล่อตัวอย่างคอนกรีตมวลเบาเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น และอัตราการดูดซึมน้ำ จากนั้นนำผลการทดสอบไปสร้างแบบจำลองโดยใช้สมการถดถอยแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น พร้อมทั้งตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์ผลร่วมกับ ภาพถ่ายขยายกำลังสูงด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิค EDS เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเถ้าแกลบมาใช้ในการผลิตคอนกรีตมวลเบา จากผลการวิจัยสามารถกล่าวสรุปผลและข้อเสนอแนะได้ดังต่อไปนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายในคอนกรีตมวลเบา

การใช้เถ้าแกลบแทนที่ทรายบางส่วนในอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาส่งผลให้กำลังรับแรงอัดและความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง ในขณะที่อัตราการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของเถ้าแกลบ แต่ในขณะเดียวกัน หากใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้แก่ การแทนที่ทรายด้วยเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตรทราย จะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดดีกว่าหรือเทียบเท่า ในขณะที่คุณสมบัติด้านอัตราการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตมวลเบาที่ไม่มีเถ้าแกลบในอัตราส่วนผสม นอกจากนี้เถ้าแกลบ ไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของฟองโฟม อีกทั้งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลเบา

5.1.2 แบบจำลองสมการถดถอย

แบบจำลองสมการถดถอยที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลงานวิจัยในครั้งนี้ คือรูปแบบจำลองการถดถอยพหุคูณแบบไม่เชิงเส้น โดยประสิทธิภาพของแบบจำลอง ดังแสดงต่อไปนี้

5.1.2.1 ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายกำลังรับแรงอัด

ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับกำลังรับแรงอัดคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ มีค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย เท่ากับ 0.940

5.1.2.2 ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายอัตราการดูดซึมน้ำ

ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายอัตราการดูดซึมน้ำคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ มีค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย เท่ากับ 0.945

5.1.2.3 ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายความหนาแน่น

ประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับทำนายความหนาแน่นคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ มีค่าสัมประสิทธิ์ของการทำนาย เท่ากับ 0.964

แบบจำลองสมการถดถอยสำหรับการทำนายคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ จัดได้ว่ามีประสิทธิภาพการทำนายผลอยู่ในเกณฑ์สูง

จากสรุปผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น จึงสามารถทำให้เกิดความมั่นใจในระดับหนึ่งได้ว่า เถ้าแกลบ สามารถนำมาใช้แทนที่ทรายบางส่วนในอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา โดยการใช้เถ้าแกลบในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลด้านบวกต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา อีกทั้งไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของฟองโฟม และไม่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลเบา ประเด็นที่สำคัญที่สุดคือ สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ โดยใช้เป็นวัสดุผสมร่วมกับอีกหนึ่งกระบวนการผลิต ทำให้ได้มาซึ่งวัสดุก่อสร้างอีกชนิดหนึ่ง นั่นคือ “คอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ”

5.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะที่คาดว่าจะสามารถพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไปได้อีก และเป็นประโยชน์สำหรับนักวิจัยท่านอื่นที่สนใจในด้านนี้ต่อไป

5.2.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

จากผลงานวิจัยเรื่องคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการลดต้นทุนในการผลิตคอนกรีตมวลเบา และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งของกระบวนการผลิตวัสดุที่สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์

5.2.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยต่อไป

สามารถนำทฤษฎี Optimization มาใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยเลือกใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมกับชุดข้อมูล นอกจากนี้ สามารถศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการลดความต้องการน้ำในอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้า

แกลบ โดยอาจใช้สารผสมเพิ่มในปริมาณที่เหมาะสมที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของฟองโฟมและองค์ประกอบทางเคมีของคอนกรีตมวลเบา

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ ซึ่งให้คำปรึกษาด้วยดีตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- ปริญญา จินดาประเสริฐ และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล, “ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต”, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, พ.ศ.2551, หน้า 317.
- [2] V. Saraswathy, and H. Song. “Corrosion performance of rice husk ash blended concrete”. *Construction and Building Materials*. 21 : 1779–1784, 2007.
- [3] K. Ganesan, K. Rajagopal and K. Thangavel. “Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete”. *Construction and Building Materials*. 22 : 1675–1683, 2008.
- [4] B. Chatveera and P. Lertwattanaruk. “Durability of conventional concretes containing black rice husk ash”. *Journal of Environmental Management*. 92 : 59-66, 2011.
- [5] ———. “ASTM C 33 : Standard Specification for Concrete Aggregates,” *Annual Book of ASTM Standard*. 4(2) : 5-16, 2002 B.
- [6] ———. “ASTM C 136 : Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate,” *Annual Book of ASTM Standard*. 4(2) : 84-87, 1997 E.
- [7] ———. “ASTM C 128 : Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate,” *Annual Book of ASTM Standard*. 4(2) : 74-79, 1997 D.

- [8] ———. “ASTM C 29 : Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate,” Annual Book of ASTM Standard. 4(2) : 1-4, 1997.
- [9] ———. “ASTM C 230 : Standard Test Method for of Flow Table for Use in the Tests Hydraulic Cement,” Annual Book of ASTM Standard. 4(1) : 182-186, 1997 G.
- [10] PE. Regan and AR. Arasteh. “Lightweight aggregate foamed concrete”. *Structural Engineer*. 68(9), 1990.
- [11] K. Ramamurthy, E.K. Kunhanandan Nambiar, and G. Indu Siva Ranjani. “A classification of studies on properties of foam concrete”. *Cement & Concrete Composites*. 31, 2009.
- [12] T. Y. Lo, W. C. Tang, and H. Z. Cui. “The effect of aggregate properties on lightweight concrete”. *Building and Environment*. . 42 : 3025-3029, 2007.
- [13] K. Jitchaiyaphum, T. Sinsiri, C. Jaturapitakkul, and P.chindaprasirt. “Cellular lightweight concrete containing high-calcium fly ash and natural zeolite”. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 20 : 462- 471, 2013.