

<http://journal.rmutp.ac.th/>

กำลังอัดและการดูดซึมน้ำจีโอพอลิเมอร์จากเถาปาล์มน้ำมันผสม ผงอะลูมินา

อาปีเต็ง ฮาวา^{1*} ปรีชา สะแลแม¹ และ วรพจน์ ประชาเสรี²

¹ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

² ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹ ตำบลโคกเคียน อำเภอเมือง จังหวัดนราธิวาส 96000

² ตำบลคอหงส์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

รับบทความ 13 สิงหาคม 2564 แก้ไขบทความ 10 เมษายน 2565 ตอรับบทความ 28 มิถุนายน 2565

บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษากำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาปาล์มน้ำมัน ซึ่งจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ถูกเตรียมจากเถาปาล์มน้ำมันและผงอะลูมินา ใช้สารอัลคาไลน์จากโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์ จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ผสมระหว่างเถาปาล์มน้ำมันและผงอะลูมินาในอัตราส่วน 100:0, 95:5, 90:10 และ 85:15 โดยน้ำหนัก และมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนวัสดุประสาน (เถาปาล์มน้ำมัน+ผงอะลูมินา) ต่อสารอัลคาไลน์ และอัตราส่วนวัสดุประสานต่อมวลรวมละเอียด ก่อนตัวอย่างใช้การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และบ่มต่อที่อุณหภูมิห้อง 1, 7 และ 28 วัน เพื่อทดสอบกำลังอัด ซึ่งผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถาปาล์มน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ผงอะลูมินาเข้ามาทดแทน ค่ากำลังอัดที่เด่นชัดในการศึกษาครั้งนี้เป็นจีโอพอลิเมอร์ที่ผสมผงอะลูมินาร้อยละ 10 ใช้มวลรวม 3.00 และสารอัลคาไลน์ 1.44 สามารถให้กำลังอัดที่ดีที่สุดและยังสามารถให้ความหนาแน่นน้อยที่สุด

คำสำคัญ : เถาปาล์มน้ำมัน; จีโอพอลิเมอร์; ผงอะลูมินา; วัสดุประสาน; อุณหภูมิห้อง

<http://journal.rmutp.ac.th/>

Compressive Strength and Water Absorption of Geopolymer from Palm Oil Fuel Ash Containing Alumina Powder

Abideng Hawa^{1*} Preecha Salaemae¹ and Woraphot Prachasaree²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Princess of Naradhiwas University

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

¹ Khok Kian, Amphur Muang, Narathiwat 96000

² Khohong, Hat Yai, Songkhla 90112

Received 13 August 2021; Revised 10 April 2022; Accepted 28 June 2022

Abstract

In this study, the compressive strength of palm oil fuel ash (POFA) based geopolymer mortars was studied. The geopolymer mortars were prepared using mixtures of POFA and alumina powder (AP). The alkaline activator was prepared from sodium silicate (Na_2SiO_3) and sodium hydroxide (NaOH). The geopolymer mortar mixtures were prepared with POFA to AP ratios 100:0, 95:5, 90:10, and 85:15 by weight, and varied different binder (POFA+AP) to the alkaline activator and binder to fine aggregate. The samples were cured at a temperature of 80°C for 24 hours, and compressive strength test were conducted at ambient temperature at 1, 7, and 28 days. The test results showed that the compressive strength of POFA based geopolymer mortar improved significantly when the source materials was substituted with AP. The evidence of compressive strength in this study that the geopolymer with 10% AP, 3.00 of fine aggregate, and 1.44 of alkaline activator gave the highest compressive strength, and the lowest bulk density.

Keywords : Palm oil Fuel Ash; Geopolymer; Alumina Powder; Binder; Ambient Temperature

1. บทนำ

ในประเทศไทยมีวัสดุเหลือทิ้งที่สามารถนำมาใช้เป็นส่วนผสมของคอนกรีต โดยที่ทำให้คอนกรีตมีสมบัติบางอย่างดีขึ้น เช่น กำลังอัด ความทนน้ำ วัสดุที่ได้รับความนิยมนำมาอย่างเถ้าลอย เถ้าแกลบ เนื่องจากมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมและมีปริมาณมาก อย่างไรก็ตามประเทศไทยนั้นยังมีวัสดุเหลือทิ้งอีกมากมายหลายชนิดเนื่องจากเป็นประเทศอุตสาหกรรมเกษตรหลากหลายอย่างเช่น เถ้าปาล์มน้ำมัน เถ้าขานอ้อย และปัจจุบันยังมีเถ้าไม้ยางพารา ซึ่งทั้งหมดเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรที่เป็นของเหลือทิ้งจากเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าชีวมวล ทำให้ได้เถ้าเหล่านั้น โดยเถ้าเหล่านั้นจัดอยู่ในวัสดุปอซโซลาน ยกเว้นเถ้าไม้ยางพาราเนื่องจากเป็นวัสดุที่มี CaO สูงจัดว่าเป็นคาบอร์แรต [1] วัสดุปอซโซลานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกของการผลิตคอนกรีตปกติเนื่องจากซิลิกา SiO_2 และ/หรืออะลูมินา Al_2O_3 ซึ่งจะส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้มากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นวัสดุปอซโซลานยังสามารถใช้เป็นวัสดุในการผลิตซีโพลิเมอร์คอนกรีต จากการผสมด้วยสารอัลคาไลน์เข้ากับวัสดุปอซโซลาน

ด้วยจำนวนและปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งที่มีอยู่อย่างมากมายในประเทศไทย ความสามารถในการนำมาใช้ประโยชน์โดยเฉพาะในงานก่อสร้างนับว่ามีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพื่อช่วยลดปริมาณที่ต้องเป็นขยะการผสมเข้าเป็นส่วนหนึ่งในปูนซีเมนต์มีข้อจำกัดของปริมาณที่ผสม เถ้าลอยสามารถผสมได้สูงสุดร้อยละ 20 [2] เถ้าแกลบร้อยละ 20 [2], [3] เถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 10 [4] หรือร้อยละ 20 เมื่อบดละเอียดในการผสมในคอนกรีตกำลังสูง [5] แต่ในกรณีของซีโพลิเมอร์สามารถใช้เถ้าอย่างเดียวโดยไม่ผสมปูนซีเมนต์ เช่น การผลิตซีโพลิเมอร์จากเถ้าลอย [6]-[8] ซึ่งไม่จำเป็นต้องผสมกับวัสดุอื่น อย่างไรก็ตามในการผลิตซีโพลิเมอร์ต้องใช้วัสดุปอซโซลานที่มีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3

ในสัดส่วนที่เหมาะสมถึงสามารถให้สมบัติได้ดี นอกจากเถ้าลอยแล้ว ยังสามารถใช้ดินขาวเผาในการผลิตซีโพลิเมอร์ด้วยการบดละเอียด เนื่องจากดินขาวเผามีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในปริมาณสูง [9] Liu และคณะ [10] ศึกษาซีโพลิเมอร์เถ้าลอยผสมเถ้าปาล์มน้ำมัน ซึ่งผลการทดสอบพบว่าซีโพลิเมอร์สามารถให้กำลังอัดได้ดี แต่เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียว พบว่ากำลังอัด 8-10 เมกะพาสคัล ที่อายุ 28 วัน มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้เถ้าลอยผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน Olivia และคณะ [11] ศึกษาการผลิตซีโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันปรับปรุงกำลังอัดด้วยปูนซีเมนต์ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าต้องใช้ปูนซีเมนต์ร้อยละ 35 ถึงสามารถให้กำลังอัดได้ดี ในขณะที่ส่วนผสมที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียวกำลังอัดที่ 28 วัน มีค่า 11.73 เมกะพาสคัล ทั้งที่เถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มี Al_2O_3 อยู่ร้อยละ 15.90 ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ การใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุหลักในการผลิตซีโพลิเมอร์ครั้งนี้ มีความจำเป็นต้องปรับปรุงด้วยวัสดุอื่นเข้ามาช่วย ในที่นี้ใช้ผงอะลูมินาเข้ามาผสม เนื่องจากเถ้าปาล์มน้ำมันจาก อำเภอบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส มี SiO_2 เป็นหลักในขณะที่ Al_2O_3 มีเพียงเล็กน้อย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 วัสดุ

2.1.1 เถ้าปาล์มน้ำมัน

เถ้าปาล์มน้ำมัน (POFA) จากนิคมอุตสาหกรรมบาเจาะ จังหวัดนราธิวาส เป็นผลพลอยได้จากกากผลปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เศษกะลา เส้นใย และทลายผลปาล์มเผาเป็นเชื้อเพลิงให้กับหม้อกำเนิดไอน้ำเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า มีอุณหภูมิในการเผาไหม้ประมาณ 800-900 องศาเซลเซียส นำเถ้าปาล์มน้ำมันที่ได้จากการบวนการข้างต้นมาแยกโดยการร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 50 เพื่อนำไปบดละเอียดด้วยเครื่องลอสแอนเจลิส (Los Angeles Abrasion) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง แล้วนำไป

วิเคราะห์ขนาดอนุภาคดังรูปที่ 1 และเมื่อนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเชิงลึกด้วยการส่องขยายด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยายสูงดังรูปที่ 2 พบว่าลักษณะเถ้าปาล์มน้ำมันเป็นเหลี่ยมและมีหลากหลายขนาดปะปนกันอยู่ ด้านองค์ประกอบทางเคมีนั้นเถ้าปาล์มน้ำมันมีซิลิกา (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 56.84 ในขณะที่อะลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) มีปริมาณน้อยดังตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการนำมาใช้เป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอพอลิเมอร์ ที่ต้องการทั้งซิลิกาและอะลูมินาพร้อมกัน อย่างไรก็ตามผลรวมของ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ เท่ากับร้อยละ 60.36 ซึ่งสามารถจัดอยู่ใน Class C ตามมาตรฐาน ASTM C618 [12]

2.1.2 ผงอะลูมินา

ผงอะลูมินาที่ใช้ในการทดสอบครั้งนี้เป็นอะลูมินาที่ขายในท้องตลาด ซึ่งมีการกระจายขนาดอนุภาคดังรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าขนาดอนุภาคมีขนาดเล็กกว่า 45 ไมครอนทั้งหมด ลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 4 ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการกระจายขนาดมีความสม่ำเสมอและมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับภาพขยายของเถ้าปาล์มน้ำมันดังรูปที่ 2 และเป็นที่น่าสังเกตว่าอนุภาคของผงอะลูมินามีลักษณะทรงมนไม่เป็นเหลี่ยม ในขณะที่องค์ประกอบทางเคมีจะมีอะลูมินามากถึงร้อยละ

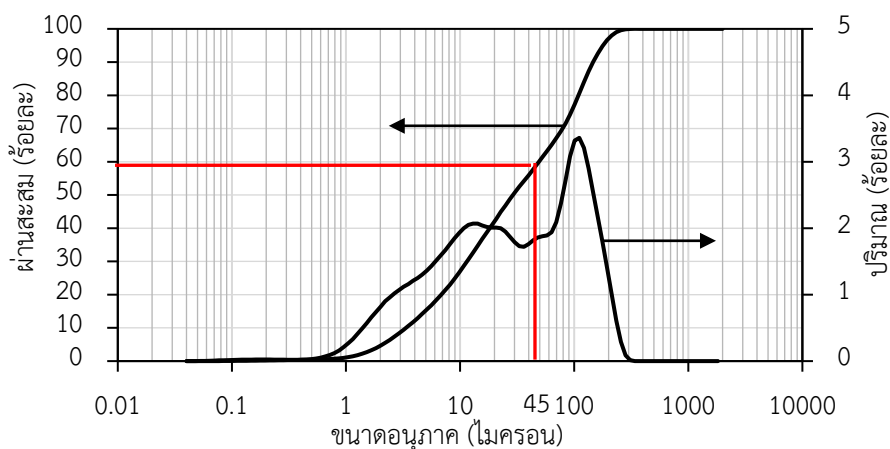
99.66 ดังตารางที่ 1 ด้วยเหตุนี้จึงนำมาใช้เป็นส่วนผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมันที่มีเพียงซิลิกา ซึ่งทำปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ไม่ดี

2.1.3 สารอัลคาไลน์

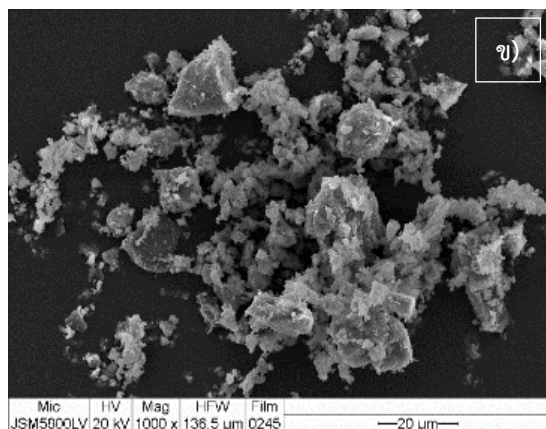
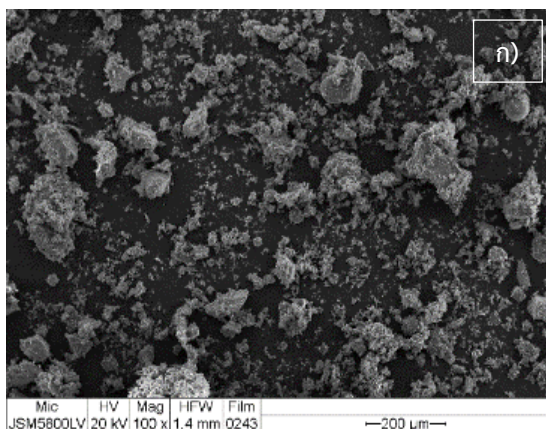
สารละลายอัลคาไลน์ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แบบเกล็ดมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ผสมกับโซเดียมซิลิเกต และน้ำ โดยใช้อัตราส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมซิลิเกต 1:2.5 อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.1 เป็นอัตราส่วนผสมที่สามารถให้กำลังที่ดีและเนื้อจีโอพอลิเมอร์ไม่เหลวหรือเหนียวแห้งจนทำให้เทเข้าแบบหล่อได้ยาก [13] โดยที่โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) มีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ร้อยละ 14.85 ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) ร้อยละ 29.45 และน้ำร้อยละ 55.70 โดยน้ำหนัก

2.1.4 มวลรวมละเอียด

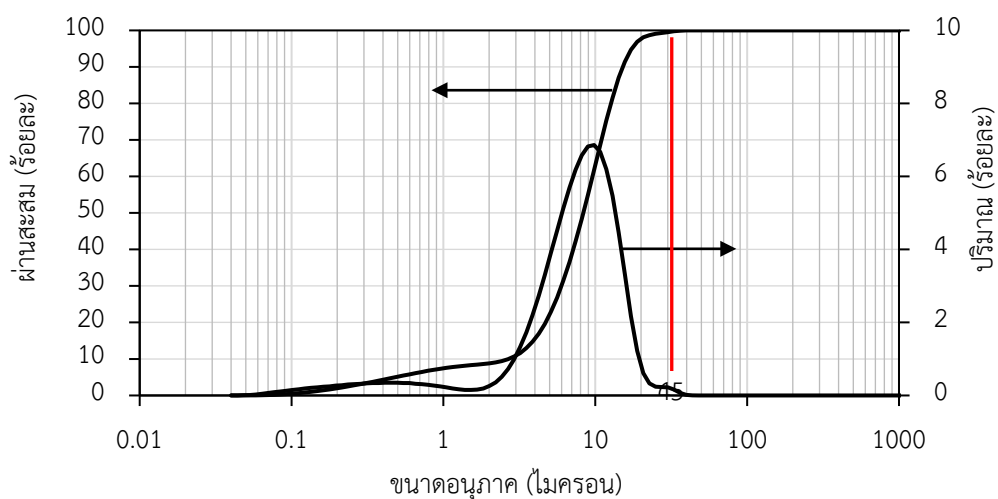
มวลรวมละเอียดที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นทรายแม่น้ำที่มีขนาดคละดังรูปที่ 5 โมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.59 อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM C33/C33M [14] ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.49 และการดูดซึมน้ำเท่ากับ 1.66 อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128 [15]



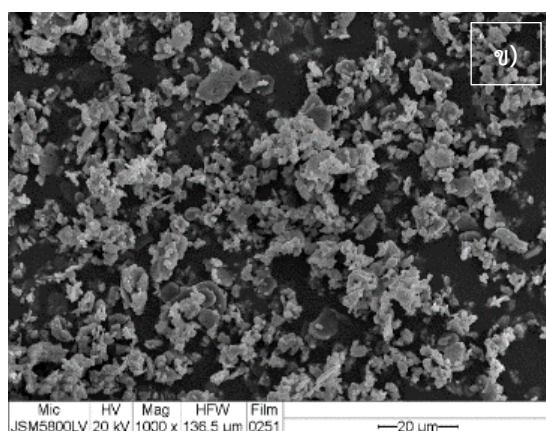
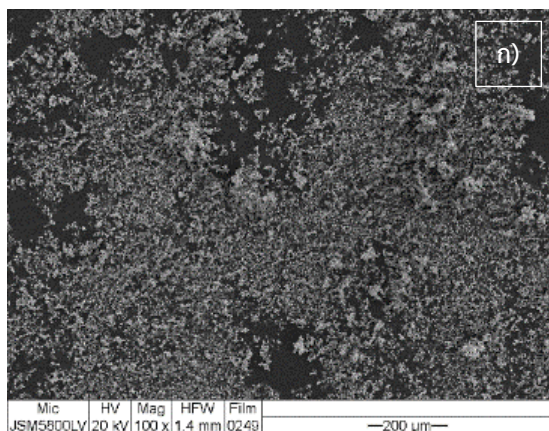
รูปที่ 1 การกระจายขนาดอนุภาคเถ้าปาล์มน้ำมัน



รูปที่ 2 รูปถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคเข้าปาล์มน้ำมัน ก) $\times 100$ ข) $\times 1,000$



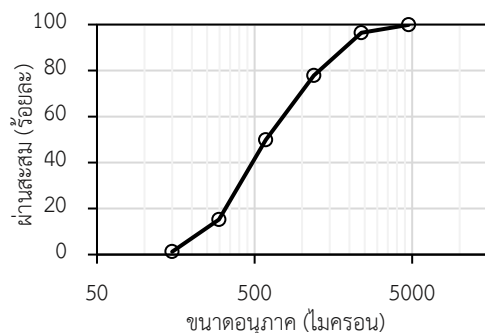
รูปที่ 3 การกระจายขนาดอนุภาคผงอะลูมินา



รูปที่ 4 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคผงอะลูมินา ก) $\times 100$ ข) $\times 1,000$

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีเถ้าปาล์มน้ำมันและผงอะลูมินา

สารประกอบ	เถ้าปาล์มน้ำมัน (ร้อยละ)	ผงอะลูมินา (ร้อยละ)
MgO	6.54	-
Al ₂ O ₃	1.06	99.66
SiO ₂	56.84	0.11
Fe ₂ O ₃	2.46	-
P ₂ O ₅	6.96	-
SO ₃	1.92	-
K ₂ O	8.60	-
CaO	7.74	-
TiO ₃	-	0.10



รูปที่ 5 การกระจายขนาดอนุภาคทราย

2.2 อัตราส่วนผสมและการเตรียมตัวอย่าง

อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดังตารางที่ 2 ในอัตราส่วนผสมของชุด A แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงวัสดุประสาน (เถ้าปาล์มน้ำมัน+ผงอะลูมินา) ต่อสารอัลคาไลน์ (โซเดียมซิลิเกต+โซเดียมไฮดรอกไซด์) เท่ากับ 0.96, 1.06, 1.20 และ 1.44 โดยน้ำหนัก ชุด B เปลี่ยนการใช้ทรายจาก 2.75 เป็น 3.00 และ 3.25 โดยน้ำหนัก ชุด C เป็นการใชผงอะลูมินาร้อยละ 10 และทราย 2.25, 2.50 2.75 และ 3.00 โดยน้ำหนัก และชุด D ใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 15 และทราย 2.50, 2.75 และ 3.00 โดยน้ำหนัก ทุกอัตราส่วนผสมใช้ทรายสภาพแห้ง ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นอัตราส่วนน้ำที่ทำให้เนื้อจีโอพอลิเมอร์ไม่เหลวหรือ

เหนียวแห้งจนทำให้เทเข้าแบบหล่อได้ยาก [13] ที่ก้อนตัวอย่างบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 24 ชม.

รูปที่ 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ เริ่มจากการผสมเถ้าปาล์มน้ำมันกับผงอะลูมินาให้เข้ากัน แล้วนำไปคลุกเคล้ากับทรายให้ทั่วถึงตั้งทิ้งไว้แล้วทำการผสมโซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำโดยการคนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สังเกตจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ละลายเป็นของเหลวทั้งหมด จากนั้นนำสารละลายไปผสมกับเถ้าปาล์มน้ำมัน ผงอะลูมินาและทรายที่เตรียมไว้ เมื่อส่วนผสมทั้งหมดเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันนำไปเทในแบบหล่อมอร์ตาร์ที่ทำจากอะคริลิกชุดละ 3 ก้อน กระทั่งตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [16] ท่อแบบหล่อด้วยฟิล์มพลาสติกก่อนนำเข้าตู้อบ บ่มร้อนตามระยะเวลาที่กล่าวมาข้างต้น

2.3 วิธีการทดสอบ

หลังจากบ่มร้อนก้อนตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์แล้วตัวอย่างจะถูกบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุ 1, 7 และ 28 วัน เมื่อครบอายุบ่มนำไปทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [16] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาด 5x5x5 ซม. ตัวอย่างที่อายุ 28 วัน เริ่มจากการนำตัวอย่างไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำไปแช่น้ำ 1 ซม. จากนั้นยกก้อนตัวอย่างขึ้นมาเช็ดผิวให้แห้งแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก แล้วนำตัวอย่างแช่น้ำต่ออีก 5 ซม. รวมเป็น 6 ซม. ทำต่อที่อายุ 12 และ 24 ชม. โดยรวมระยะเวลาแช่ก่อนหน้า แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณเปรียบเทียบกับการดูดซึมน้ำดังสมการ (1)

$$\frac{(W_f - W_i)}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

โดย

W_i = น้ำหนักก่อนแช่น้ำ

W_f = น้ำหนักหลังแช่น้ำที่แต่ละอายุ

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

สัญลักษณ์	เถ้า ปาล์ม น้ำมัน (ร้อยละ)	ผงอะลูมินา (ร้อยละ)	วัสดุ ประสาน: ทราย	วัสดุ ประสาน/ สารอัล คาไลน์
CT	100	0	2.75	0.96
A1	95	5	2.75	0.96
A2	95	5	2.75	1.06
A3	95	5	2.75	1.20
A4	95	5	2.75	1.44
B1	95	5	3.00	1.44
B2	95	5	3.25	1.44
C1	90	10	2.75	1.20
C2	90	10	2.25	1.44
C3	90	10	2.50	1.44
C4	90	10	2.75	1.44
C5	90	10	3.00	1.44
D1	85	15	2.50	1.44
D2	85	15	2.75	1.44
D3	85	15	3.00	1.44



รูปที่ 6 การเตรียมตัวอย่าง

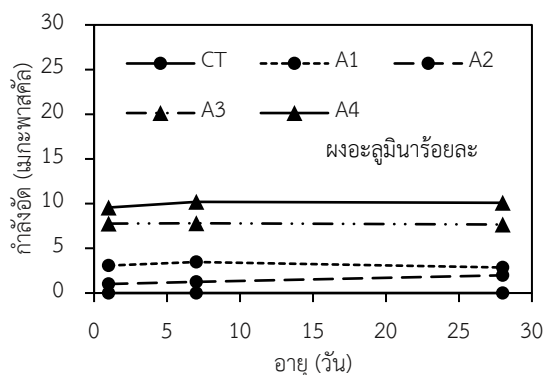
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

3.1 กำลังอัด

3.1.1 อิทธิพลสารอัลคาไลน์

กำลังอัดตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันผสมผงอะลูมินาเป็นวัสดุประสาน ที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 0.96, 1.06, 1.20 และ 1.44 โดยน้ำหนัก ดังรูปที่ 7 ซึ่งใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 5 แทนที่บางส่วนในเถ้าปาล์มน้ำมัน ส่วนตัวอย่าง CT ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันอย่างเดียว จากผลการทดสอบเป็นที่น่าสังเกตว่าตัวอย่าง CT จีโอพอลิเมอร์ไม่มีการแข็งตัวถึงแม้จะผ่านการบ่มร้อน 24 ชม. แล้วก็ตาม เนื่องจากว่าเถ้าปาล์มน้ำมันที่ใช้มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักแต่มี Al_2O_3 ในปริมาณน้อยมาก (ตารางที่ 1) ในการผลิตจีโอพอลิเมอร์ต้องใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในอัตราส่วนที่เหมาะสมถึงสามารถทำปฏิกิริyajีโอพอลิเมอร์ไรเซชันได้ดี ดังเช่นจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยและดินขาวเผา เนื่องจากวัสดุทั้งสองมีทั้ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในปริมาณมาก (อภิปรายเพิ่มเติมในหัวข้ออิทธิพลของอะลูมินา) ผลการทดสอบกำลังอัดดังรูปที่ 7 ที่แสดงถึงอิทธิพลของอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ จากผลการทดสอบพบว่าที่อัตราส่วน 1.44 (สารอัลคาไลน์ต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.69) สามารถให้กำลังอัดได้ดีที่สุด มีความเป็นไปได้ว่าการใช้สารอัลคาไลน์ในปริมาณมากทำให้จีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีความเหลวมากเกินไป ส่งผลให้ค่ากำลังอัดมีค่าน้อย เนื่องจากโซเดียมซิลิเกตที่ใช้เป็นแบบเหลวที่มีน้ำร้อยละ 55.70 ซึ่งการศึกษาของ สำเร็จ และคณะ [17] แสดงให้เห็นว่าการผลิตจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน โดยการใช้อัตราส่วนผสมของสารอัลคาไลน์ต่อเถ้าปาล์มน้ำมันเท่ากับ 0.65 โดยน้ำหนัก สามารถทำให้กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์บางส่วนผสมมีค่าประมาณ 20 เมกะพาสคัล และเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาบ่มจนถึง 28 วัน พบว่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าใกล้เคียงกับที่อายุ 1 วัน

แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาบ่มในอากาศไม่มีผลกับกำลังอัด การบ่มอากาศต่อจากการบ่มร้อนในตู้อบไม่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่จะทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วนผสม ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเป็นหลักในขณะที่ทำการบ่มร้อน



รูปที่ 7 กำลังอัดเมื่อเปลี่ยนแปลงสารอัลคาไลน์

3.1.2 อิทธิพลอัตราส่วนผสมมวลรวม

ซีโอพอลิเมอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลรวม (ทราย) ดังรูปที่ 8 โดยรูปที่ 8 ก) มีการแทนที่ผงอะลูมินาร้อยละ 5 และรูปที่ 8 ข) อะลูมินาร้อยละ 10 ในการแทนที่ผงอะลูมินาร้อยละ 5 ที่ใช้ทราย 2.75, 3.00 และ 3.25 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 5 ไม่ได้ส่งผลต่อกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณมวลรวม แต่ในขณะเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณผงอะลูมินาเป็นร้อยละ 10 ผลการทดสอบกำลังอัดแสดงออกอย่างชัดเจนว่า อัตราส่วนผสมมวลรวม 3.00 ให้กำลังอัดได้ดีที่สุดในทุกอายุบ่มสูงถึงประมาณ 20 เมกะพาสคัล มีความเป็นไปได้ว่าการใช้อัตราส่วนผสมมวลรวม 3.00 มีความเหมาะสมต่อการเคลือบมวลรวม กล่าวคือ การที่เถ้าปาล์มน้ำมันมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 2.2 จะมีปริมาตรมากเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ที่น้ำหนักเท่ากัน ปริมาตรมากกว่าทำให้ต้องใช้ทรายมากขึ้นเพื่อให้เกิดการเคลือบมวลรวมมีความเหมาะสม พร้อมกันนั้นความเหมาะสมของปริมาณทรายส่งผลให้เกิดการอัดตัวของ

อนุภาคได้ดียิ่งขึ้นมีส่วนให้กำลังอัดซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ดีขึ้น ในส่วนของระยะเวลาบ่มอากาศเป็นไปในลักษณะเดียวกันที่ระยะเวลาบ่มไม่มีผลต่อกำลังอัดก่อตัวอย่าง

3.1.3 อิทธิพลผงอะลูมินา

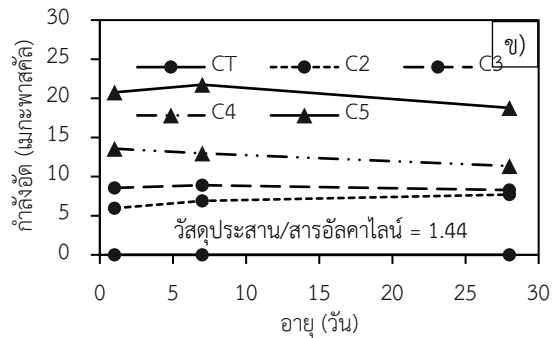
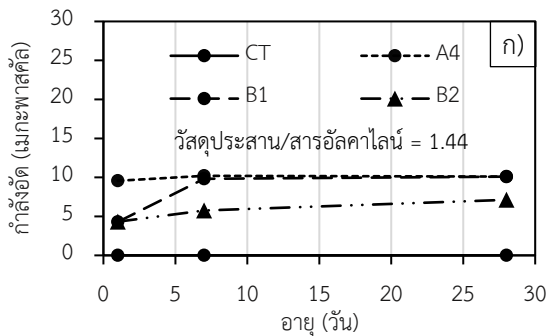
เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของผงอะลูมินาที่มีต่อกำลังอัดซีโอพอลิเมอร์ดังรูปที่ 9 ซึ่งเป็นการแทนที่บางส่วนในเถ้าปาล์มน้ำมันร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนัก พบว่าการใช้ผงอะลูมินาสามารถทำให้ตัวอย่างซีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์มีการแข็งตัวสามารถรับแรงกดได้พัฒนาจากก่อนตัวอย่างไม่สามารถรับแรงกดได้เลยเมื่อใช้เถ้าปาล์มน้ำมันอย่างเดียว แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเพิ่มผงอะลูมินาสามารถพัฒนากำลังอัดของซีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์ม โดยปกติทั่วไปการวิจัยส่วนใหญ่ที่ผ่านมาจะใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเป็นเถ้าในการแทนที่ในเถ้าลอย [18], [19] และดินขาวเผา [20], [21] การแทนที่ผงอะลูมินาร้อยละ 5 ส่งผลให้ตัวอย่างสามารถรับแรงอัดได้ประมาณ 10 เมกะพาสคัล ทั้งอัตราส่วนผสมมวลรวม 2.75 และ 3.00 และเมื่อเพิ่มผง

อะลูมินาเป็นร้อยละ 15 (D2) ของตัวอย่างอัตราส่วนผสมมวลรวม 2.75 ให้กำลังอัดได้ถึงประมาณ 18 เมกะพาสคัล ซึ่งมีค่าสูงสุด อย่างไรก็ตามที่อัตราส่วนผสมมวลรวม 3.00 การใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 10 (C5) มีค่ากำลังอัดสูงสุดประมาณ 19 เมกะพาสคัล เนื่องจากมีความเป็นไปได้ว่าการใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 15 จะทำให้วัสดุประสานมีปริมาณน้อยลงเนื่องจากการที่ผงอะลูมินามีค่าความถ่วงจำเพาะสูง 3.4-4.0 ส่งผลให้มีปริมาตรน้อยไม่สามารถเคลือบมวลรวมได้ทั่วถึงทำให้มวลรวมไม่สามารถจับตัวเป็นก้อนอย่างเหนียวแน่นได้ ก่อนตัวอย่างจึงมีความร่วน

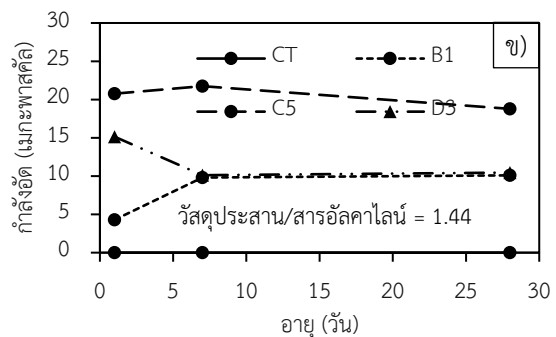
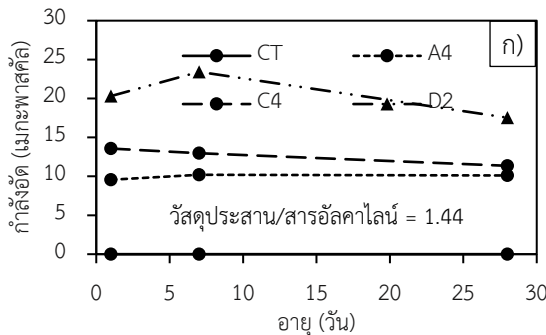
จากการผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดส่วนใหญ่มีแนวโน้มไม่มีการเปลี่ยนแปลง หรือมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่ออายุบ่มมากขึ้น อาจจะเป็นไปได้ว่าในการศึกษาครั้งนี้เป็นการผสมสารละลายในทันที กล่าวคือ ในขั้นตอน

การผสมโซเดียมซิลิเกตกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้น เกิดปฏิกิริยากันเกิดความร้อน 74 ± 2 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาผสมเข้ากับวัสดุประสานและทราย ยังมีความร้อนเกิดขึ้น 48 ± 2 องศาเซลเซียส [9], [21], [22] ทำให้เป็นไปได้ว่ามีการเกิดปฏิกิริยาใน

ระหว่างการผสมวัสดุ ส่งผลให้เมื่อนำก้อนตัวอย่างบ่มร้อนในตู้อบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. เพิ่มเดิมและเมื่อนำตัวอย่างมาทดสอบกำลังอัดมีค่าสูงในทันที (1 วัน) ทำให้เมื่ออายุบ่มเพิ่มมากขึ้นค่ากำลังอัดที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

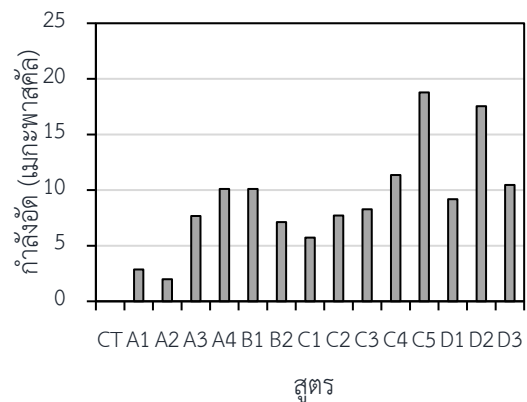


รูปที่ 8 ผลของปริมาณมวลรวมต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ก) อะลูมินาร้อยละ 5 ข) อะลูมินาร้อยละ 10



รูปที่ 9 ผลของปริมาณผงอะลูมินาต่อกำลังอัดของจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ ก) มวลรวม 2.75 ข) มวลรวม 3.00

เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมที่อายุ 28 วัน ดังรูปที่ 10 สามารถที่จะสรุปได้ว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าปาล์มน้ำมันครั้งนี้ที่มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลังเพียงอย่างเดียวนั้น ไม่สามารถทำให้เกิดการแข็งตัวรับกำลังได้ ถ้าไม่มีผงอะลูมินาเข้ามาช่วยซึ่งมีความเหมาะสมที่การใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 การใช้มวลรวมละเอียด (ทราย) ที่ 2.75 ถึง 3.00 และใช้ผงอะลูมินาเข้าไปแทนที่บางส่วนร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก ถึงมีแนวโน้มให้กำลังอัดได้ดี

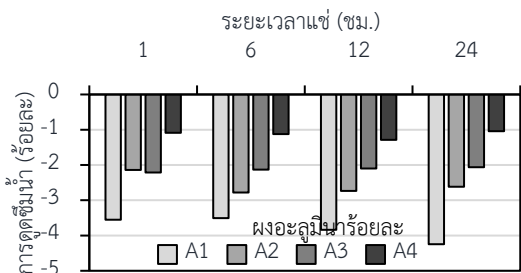


รูปที่ 10 กำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน

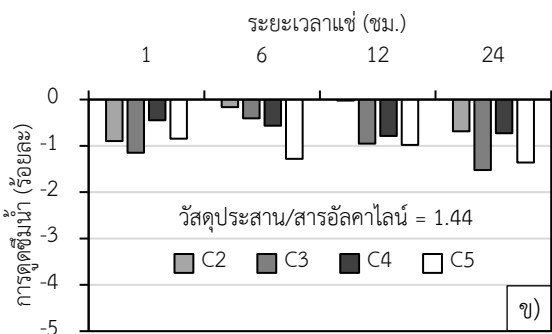
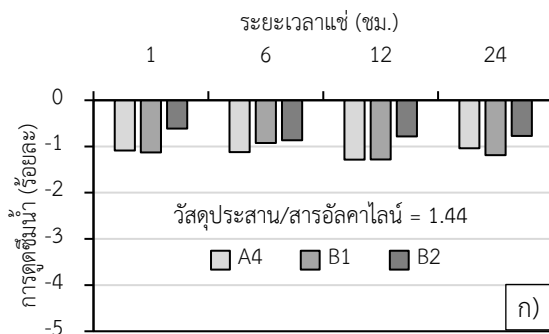
3.2 การดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำใช้ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน จากผลการทดสอบดังรูปที่ 11-13 เป็นที่น่าสังเกตว่าจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ไม่มีการดูดซึมน้ำเนื่องจากเมื่อพิจารณาจากกายภาพของก้อนตัวอย่าง จะพบว่าตัวอย่างมีของเหลวหนืดอยู่ในเนื้อจีโอพอลิเมอร์ดังรูปที่ 14 ทำให้เมื่อนำไปแช่น้ำของเหลวที่อยู่ในเนื้อจีโอพอลิเมอร์เกิดการระบายออกทำให้มีน้ำหนักลดลง เมื่อพิจารณารูปที่ 11 พบว่ามอร์ตาร์มีอัตราการคายของเหลวอยู่ระหว่างร้อยละ 1.09-3.55 และ 1.04-4.25 ที่การแช่น้ำ 1 และ 24 ชม. ตามลำดับ สังเกตได้ว่าถึงแม้มีการแช่นานขึ้นการคายของเหลวก็ไม่ได้เปลี่ยนจากเดิมที่อายุ 1 ชม. มากนัก การคายของเหลวดังกล่าวเกิดขึ้นที่อายุ 1 ชม. การใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์มากขึ้นมีแนวโน้มให้การคายของเหลวลดลง การคายของเหลวที่ลดลงจะสอดคล้องกับกำลังอัดที่ดี อาจเป็นไปได้ว่าเมื่อก่อนตัวอย่างที่มีอัตราส่วนผสมที่

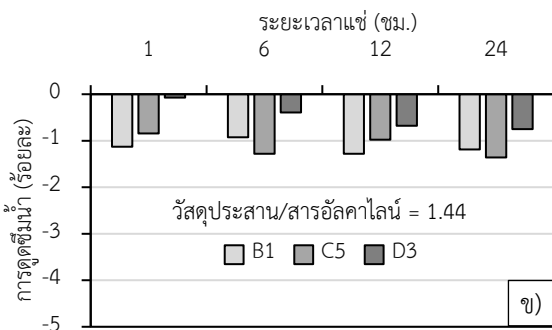
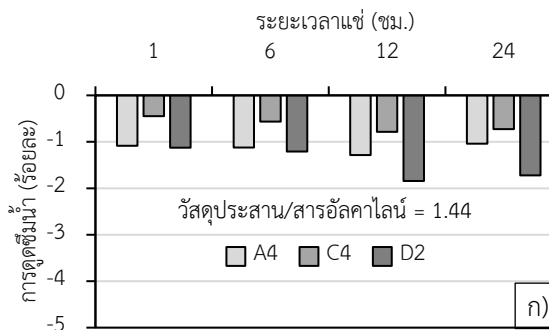
ดีของเหลวที่มีอยู่ในส่วนผสมจะถูกนำไปใช้ในการทำปฏิกิริยาได้เหมาะสม นั้นแสดงให้เห็นว่าจีโอพอลิเมอร์มีกำลังอัดสูง ผลจากการทำปฏิกิริยาของวัสดุประสานกับสารอัลคาไลน์ ทำให้ไม่มีของเหลวออกมาบริเวณผิวก้อนตัวอย่างแล้วเกิดการคายออก จากการทดสอบตัวอย่างที่มีอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ต่ำจะมีของเหลวคล้ายเมือกออกมาที่ผิวตัวอย่างจำนวนมาก เป็นไปได้ว่าของเหลวเหล่านี้เป็นส่วนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา



รูปที่ 11 การดูดซึมน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงสารอัลคาไลน์

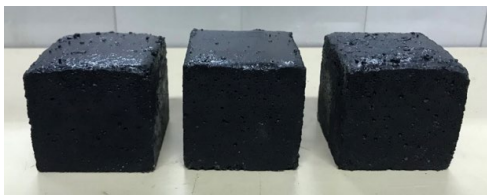


รูปที่ 12 การดูดซึมน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงมวลรวม ก) ผงอะลูมินาร้อยละ 5 ข) ผงอะลูมินาร้อยละ 10



รูปที่ 13 การดูดซึมน้ำเมื่อเปลี่ยนแปลงผงอะลูมินา ก) มวลรวม 2.75 ข) มวลรวม 3.00

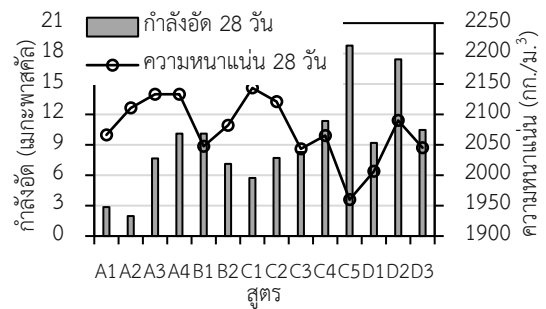
หลังจากการใช้อัตราส่วนผสมที่แตกต่างของวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ และเริ่มมีการใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 นั้น จากผลการทดสอบดังรูปที่ 12 และ 13 เป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราการคายของเหลวของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เท่ากับ 1.44 ให้ค่าการคายของเหลวในช่วงร้อยละ 1 ± 0.5 แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมวลรวมและผงอะลูมินาไม่มีแนวโน้มต่อการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ผลกระทบหลักของการคายของเหลวอยู่ที่อัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์



รูปที่ 14 ลักษณะกายภาพก้อนตัวอย่าง

3.3 ความหนาแน่น

รูปที่ 15 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อายุ 28 วัน เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ (A1-A4) พบว่าความหนาแน่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์เพิ่มขึ้น เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับการศึกษาของ Heah และคณะ [23] ที่ศึกษาอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวโดยใช้ดินขาวเป็นวัสดุตั้งต้น ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเพิ่มขึ้นความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นไปด้วย ในขณะที่อัตราส่วนมวลรวมนั้นพบว่าเมื่อใช้มวลรวมมากขึ้น (C2-C5) ความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง และเป็นข้อสังเกตเพิ่มเติมว่าตัวอย่างที่มีค่ากำลังอัดสูงความหนาแน่นมีแนวโน้มลดลง แนวโน้มของความหนาแน่นแปรผกผันกับกำลังอัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเกี่ยวเนื่องจากการทำปฏิกิริยา ตัวอย่างที่มีการทำปฏิกิริยาได้ดีก่อนตัวอย่างมีลักษณะผิวแห้ง



รูปที่ 15 ความหนาแน่นและกำลังอัดจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์

4. สรุปผล

จากผลการทดสอบจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าปาล์มน้ำมันปรับปรุงสมบัติด้วยการแทนที่ด้วยผงอะลูมินาที่ได้ศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การใช้อัตราส่วนของวัสดุประสานต่อสารอัลคาไลน์ที่ 1.44 ให้ค่ากำลังอัดและการคายของเหลวน้อย
2. การใช้ผงอะลูมินาในการปรับปรุงกำลังอัดที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงร้อยละ 10-15 โดยน้ำหนัก
3. การใช้มวลรวมทรายแม่น้ำ 2.75-3.00 ต่อวัสดุประสาน โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมสามารถให้กำลังอัดที่ดี
4. ในการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนผสมต่าง ๆ ของตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์อัตราส่วนผสม C5 และ D2 สามารถให้ค่ากำลังอัดได้ดีที่สุด
5. การใช้ผงอะลูมินาสามารถช่วยให้ตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถรับแรงได้ เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์ที่ใช้เถ้าปาล์มน้ำมันเพียงอย่างเดียวที่ไม่มีการก่อตัวรับแรงไม่ได้ ซึ่งการใช้ผงอะลูมินาร้อยละ 10 สามารถให้กำลังอัดดีที่สุด
6. การเตรียมสารละลายในทันทีจะมีผลให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตั้งแต่อายุน้อย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณหน่วยวิจัยโครงสร้างพื้นฐานและนวัตกรรมวัสดุ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Hawa, "Properties of pumice lightweight concrete containing rubber wood fly ash and rice husk ash" M.S. thesis, Dept. of Civil Eng. Prince of Songkla Univ., Songkhla, Thailand, 2008.
- [2] P. Chindaprasirt, S. Homwuttiwong and C. Jaturapitakul, "Strength and water permeability of concrete containing palm oil fuel ash and rice husk-bark ash," *Construction and Building Materials*, vol. 21, no. 7, pp. 1492-1499, Jul. 2007.
- [3] S. Ruhzon and P. Chindaprasirt, "Use of waste ash from agricultural by-products in concrete work," *RMUTP Research Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 49-56, Mar. 2008.
- [4] W. Tangchirapat and C. Jaturapitakul, "Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, no. 10, pp. 767-774, Nov. 2010.
- [5] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakul and P. Chindaprasirt, "Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2641-2646, Jul. 2009.
- [6] J. Temuujin, W. Rickard and A. van Riessen, "Characterization of various fly ashes for preparation of geopolymers with advanced applications," *Advanced Powder Technology*, vol. 24, no. 2, pp. 495-498, Mar. 2013.
- [7] G. Görhan and G. Kürklü, "The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures," *Composites: Part B*, vol. 58, pp. 371-377, Mar. 2014.
- [8] M. T. Junaid, O. Kayali, A. Khennane and J. Black, "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 301-310, Mar. 2015.
- [9] A. Hawa, D. Tonnayopas, W. Prachasaree and P. Taneerananon, "Development and performance evaluation of very high early strength geopolymer for rapid road repair," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2013, Aug. 2013.
- [10] M. Y. Liu, C. P. Chua, U. J. Alengaram and M. Z. Jumaat, "Utilization of palm oil fuel ash as binder in lightweight oil palm shell geopolymer concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2014, Jan. 2014.
- [11] M. Olivia, L. M. Tambunan and E. Saputra, "Properties of palm oil fuel ash (POFA) geopolymer mortar cured at ambient temperature," in *International Conference on Engineering Technology (ETIC 2016)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2016, pp. 36-42.
- [12] *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM C618-12a, 2012.

- [13] A. Mahama, F. Saleah and F. Soko, "A Study of Geopolymer Mortar from Oil Palm Ash with Alumina Powder," B. Eng project, Dept. Civil Eng., Princess of Naradhiwas Univ., Narathiwat, Thailand, 2017.
- [14] *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM C33/C33M-18, 2018.
- [15] *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, ASTM C128-15, 2015.
- [16] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM C109/C109M-16a, 2016.
- [17] S. Rukzon, T. Tansathit, P. Seesai and P. Chindaprasit, "Physical properties of geopolymer mortar palm oil fuel ash," *Engineering Journal of research and Development*, vol. 32, no. 1, pp. 89-103, Jan.-Mar. 2021.
- [18] N. Ranjbara, M. Mehralib, U. Johnson Alengarama, H. S. C. Metselaar and M. Z. Jumaat, "Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 114-121, Aug. 2014.
- [19] N. Ranjbara, M. Mehralib, U. Johnson Alengarama, H. S. C. Metselaar and M. Z. Jumaat, "Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar," *Materials and Designs*, vol. 59, pp. 532-539, Aug. 2014.
- [20] A. Hawa, D. Tonnayopas and W. Prachasaree, "Performance Evaluation and Microstructure Characterization of Metakaolin-Based Geopolymer Containing Oil Palm Ash," *The Scientific World Journal*, vol. 2013, Oct. 2013.
- [21] A. Hawa, D. Tonnayopas and W. Prachasaree, "Performance evaluation of metakaolin based geopolymer containing parawood ash and oil palm ash blends," *Materials Science*, vol. 20, no. 3, pp. 339-344, Sep. 2014.
- [22] A. Hawa, W. Prachasaree and D. Tonnayopas, "Effect of water-to-powder ratios on the compressive strength and microstructure of metakaolin based geopolymers," *Indian Journal Engineering Materials Science*, vol. 24, no. 6, pp. 499-506, Dec. 2017.
- [23] C. Y. Heah, H. Kamarudin, A. M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. K. Nizar, C. M. Ruzaidi and Y. M. Liew, "Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 912-922, Oct. 2012.