กำลังรับแรงอัดของโฟมจีโอโพลีเมอร์ทำจากเถ้าลอยและผงอลูมิเนียม
Compressive strength of foam geopolymer made from fly ash and aluminum powder

คำภี จิตชัยภูมิ[1,*] ณัฐพล ฐาตุจิรางค์กุล[2] และ นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา[3]

[1,2,3] สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
**Corresponding author; E-mail address: khampheej@yahoo.com*

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการศึกษากำลังรับแรงอัดของโฟมจีโอโพลีเมอร์ทำจากเถ้าลอยและผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0, 0.4, 0.8, และ 1.0 % ของน้ำหนักเถ้าลอย ใช้ด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5 โมล ในการกระตุ้นจีโอโพลีเมอร์ ใช้อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย 0.5 โฟมจีโอโพลีเมอร์ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C 65 °C, 70 °C, และ 75 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โฟมจีโอโพลีเมอร์ที่ใส่ผงอลูมิเนียม 0.4 – 1.0 % ให้หน่วยน้ำหนักแห้งประมาณ 1,700 – 1,800 kg/m^3 ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดอยู่ระหว่าง 2.01 MPa ถึง 6.6 MPa ซึ่งมีกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอบแห้งที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 55 °C ถึง 60 °C การดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 10 % ถึง 21% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นตามหน่วยน้ำหนักแห้งที่ลดลง

คำสำคัญ: โฟมจีโอโพลีเมอร์, เถ้าลอย, ผงอลูมิเนียม

Abstract

This paper examines the compressive strength of foam geopolymer made from fly ash and aluminum powder at 0, 0.4 %, 0.8 % and 1.0 % by mass of the fly ash. The 5 mole of sodium hydroxide alkali was used to stimulate the geopolymers. A liquid-to-fly ash mass ratio (L/FA) of 0.5 was used for all mixes. Foam geopolymer were oven drying at 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, and 75 °C for 24 h. The foam geopolymer with a dry unitweight of approximately 1,700 – 1,800 kg/ m^3 was mixed with the aluminum powder of 0.4 - 1.0 % w/w. The testing results found that the compressive strengths were between 2.01 MPa and 6.6 MPa, which the compressive strength increased as drying temperature increased from 55 °C to 60 °C. The water absorptions were between 10 % and 21 % by weight, which the water absorption rate increased as the dry unitweight decreased.

Keywords: foam geopolymer, fly ash, aluminum powder

1. คำนำ

จีโอโพลีเมอร์ (geopolymer) คือ วัสดุอนินทรีย์ที่มีโครงสร้าง 3 มิติแบบอสัณฐาน (amorphous) ระหว่างอะลูมิโนและซิลิเกต เรียกว่า จีโอโพลีเมอร์ริกอนินทรีย์ ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1950 โดย Dr. Glukhovsky ชาวสหภาพโซเวียต ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 นักเคมีชาวฝรั่งเศสชื่อ Prof. Joseph Davidovits ได้ให้นิยามของจีโอโพลิเมอร์ว่าเป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีแร่ธาตุเป็นองค์ประกอบเกิดจากปฏิกิริยาเคมี โดยส่วนประกอบทางเคมีของแร่ธาตุนั้นอยู่ในรูปอสัณฐานซึ่งมีองค์ประกอบหลักของซิลิก้า (SiO_2) และอลูมิน่า (Al_2O_3) เช่น เถ้าลอย (fly ash) ซีโอไลต์ธรรมชาติและเถ้าก้นเตา ถูกทำให้ชะละลายด้วยอัลคาไลน์หรือสารที่มีความเป็นด่างสูง เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือใช้สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จากนั้นใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวจนสามารถรับกำลังได้ [1] จีโอโพลีเมอร์โดยทั่วไปมีองค์ประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วย อะลูมิเนียม (Al) ซิลิกอน (Si) และธาตุในกลุ่มอัลคาไลน์ เช่น โซเดียม (Na) โปแตสเซียม (K) และแคลเซียม (Ca) ที่ให้คุณสมบัติทางกลที่ดีคล้ายกับเซรามิก โดยทั่วไปเซรามิก (ดินเหนียวเผาเป็นวัสดุเซรามิกอย่างหนึ่ง) ต้องผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 °C แต่วัสดุจีโอโพลีเมอร์สามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100°C เท่านั้น วัสดุจีโอโพลีเมอร์สามารถเชื่อมประสานด้วยตัวเองได้คล้ายกับวัสดุซีเมนต์ (cementitous materials) ชนิดปูนซีเมนต์ ไลม์ และปูนปาสเตอร์ สามารถใช้เชื่อมเป็นวัสดุแทรกประสาน (filler) อื่น ๆ ได้ คล้ายกับการทำคอนกรีตทั่วไป การเชื่อมประสานของวัสดุจีโอโพลีเมอร์ใช้โครงสร้างที่เป็นสายโซ่ (chain molecular structure) คล้ายกับวัสดุโพลีเมอร์ (polymer) หากแต่เป็นสายโซ่ที่มีการเชื่อมต่อกันระหว่าง ซิลิกอนกับออกซิเจนที่มีโครงสร้างเป็นแบบเททระฮีดรา (tetrahedral; SiO_4) และอลูมิเนียม (aluminum) กับออกซิเจนที่มีโครงสร้างเป็นแบบเททระฮีดรา (tetrahedral; AlO_4) เช่นกัน ที่เรียกว่า Sialate (–Si–O–Al–O–) ซึ่งถือว่าเป็นโครงสร้างหลัก (core structure) ของโครงสร้างวัสดุจีโอโพลีเมอร์ หากการจัดเรียงตัวของซิลิก้าต่ออลูมิน่าที่เป็นแบบ 1 ต่อ 1 มีการเชื่อมกันหลายโมเลกุลมากขึ้นหรือมีการเชื่อมกันเป็นซ้ำ ๆ ของหน่วยนี้จะเรียกโครงสร้างนี้ว่า Poly (sialate) แต่ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวของซิลิก้าต่ออลูมิน่าเป็น 2 : 1 เรียกโครงสร้างว่าเป็น Poly (sialate–siloxo) การจัดเรียงกันของโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่นี้จะเกิดขึ้นจนเป็นลักษณะแบบโครงข่าย 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 1 และหลังจากนั้นจะตาร บบห ะ

รูปที่ 1 โครงสร้างแบบสามเหลี่ยมของจีโอโพลีเมอร์ (Davidovits, 1988)

เถ้าลอย (FA) คือ วัสดุที่เป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อน ซึ่งควันไฟหรือขี้เถ้าที่ปลิวหรือลอย (fly) ออกมาได้ถูกเครื่องดักจับเอาไว้ ในอดีตเถ้าลอยจัดว่าเป็นวัสดุเหลือทิ้งหรือกากของเสีย จึงมักเรียกว่า ขี้เถ้าลอย แต่ปัจจุบันนิยมนำเถ้าลอยมาผสมคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย เพราะสามารถนำมาใช้แทนที่ปริมาณปูนซีเมนต์บางส่วนได้ เนื่องจากเถ้าลอยมีซิลิก้าและอลูมิน่าอยู่ในรูปอสัณฐาน สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิคกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C–S–H) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (C–A–H) ซึ่งส่งผลทำให้การพัฒนากำลังคอนกรีตสูงขึ้นในช่วงอายุปลาย แต่การใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุยึดประสานสำหรับวัสดุจีโอโพลีเมอร์นั้น สามารถใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้เต็ม 100 เปอร์เซ็นต์

โฟมจีโอโพลีเมอร์ (foam geopolymer) คือ จีโอโพลีเมอร์ที่เนื้อภายในประกอบด้วยโพรงอากาศที่ได้จากการผสมผสานกันระหว่างจีโอโพลีเมอร์และฟองโฟม หรือระหว่างจีโอโพลีเมอร์และผงอลูมิเนียมเพื่อให้เกิดแก๊ส สำหรับวิธีการใส่ฟองโฟมทำได้โดยใส่ฟองโฟมก่อนผสมลงไปในจีโอโพลีเมอร์สดเช่นเดียวกับการผลิตโฟมคอนกรีต ที่เรียกว่า PRE–FORMED FOAM METHOD โดยใช้เครื่องผสมกวนให้เข้ากัน จากนั้นโฟมจะแทรกอยู่ในเนื้อจีโอโพลีเมอร์ เมื่อจีโอโพลีเมอร์แข็งตัวก็จะทำให้เกิดช่องว่างอากาศ (air voids) หรือ โพรงอากาศ (air pores) ขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.1 – 1 mm) กระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยผนังของโพรงหรือเซลล์อากาศไม่เชื่อมต่อกัน (disconnected pores) ซึ่งจะทำให้โฟมจีโอโพลีเมอร์มีหน่วยน้ำหนักเบาและมีความเป็นฉนวนกันความร้อนดีกว่าจีโอโพลีเมอร์ปกติ ส่วนวิธีการผสมผงอลูมิเนียมเข้าไปในจีโอโพลีเมอร์ทำได้โดยการใช้ด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการชะละลายจีโอโพลีเมอร์ เมื่อโซเดียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับผงอลูมิเนียมซึ่งเป็นสารผสมเพิ่มขยายตัว (expansive admixture) ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างผงอลูมิเนียม (aluminum powder) และ NaOH ในขณะที่จีโอโพลีเมอร์ยังสดอยู่ จึงเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจน (สมการที่ 1) พร้อมกับส่วนผสมเกิดการขยายตัวมีปริมาตรที่โตขึ้น (Zhang et al.2014) [2] ส่วนผสมทั้งหมดขยายตัวคล้ายกับขั้นตอนหนึ่งของการทำขนมเค้ก (cake baking)

$$Al\,(s) + 3H_2O\,(l) + NaOH^-\,(aq) \rightarrow Al$$

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีในรูปออกไซด์ของ FA

Chemical compositions (% by mass)	FA
SiO_2	42.94
Al_2O_3	24.46
Fe_2O_3	12.34
CaO	15.27
MgO	1.65
K_2O	1.33
SO_3	2.01
LOI	1.48

Remark : LOI = Loss on ignition

3.2 ปฏิภาคส่วนผสมและการทดสอบ

ทุกส่วนผสมใช้อัตราส่วนของเหลวต่อเถ้าลอย (liquid-to-fly ash ratio, L/FA) เท่ากับ 0.5 ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ชะละลายความเข้มข้น 5 โมล (mole) ใช้สัญลักษณ์ 5M_NaOH นำไปทดสอบหาผลกระทบของปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่นแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์ในเบื้องต้น ทำได้โดยการเทส่วนผสมโฟมจีโอโพลีเมอร์สด (FA + 5M_NaOH + Al) ลงไปในโมลด์ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร จำนวน 3 ก้อน จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 ± 2 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก *(M)* มีหน่วยเป็นกิโลกรัมหารด้วยปริมาตร *(V)* มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังสมการที่ 2

$$\text{Drydensity}\,(\text{kg/m}^3) = \frac{M}{V} \qquad (2)$$

พบว่าจีโอโพลีเมอร์ปกติมีความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 1,750 kg/m^3 แต่เมื่อใส่ผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0.1 % - 1.0 % โดยน้ำหนักของเถ้าลอย ทำให้ความหนาแน่นแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์อยู่ระหว่าง 1,770 kg/m^3 – 1,800 kg/m^3 โดยประมาณ ซึ่งสูงขึ้นตามปริมาณผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าตามทฤษฎีปฏิกิริยาเคมีระหว่างผงอลูมิเนียมและ NaOH ทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นภายในเนื้อจีโอโพลีเมอร์ตามสมการที่ 1 แต่ไม่ได้ส่งผลทำให้ปริมาตรจีโอโพลีเมอร์ขยายตัวขึ้นตามที่คาดการณ์ไว้แต่อย่างใด แต่กลับทำให้ความหนาแน่นของจีโอโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังตารางที่ 3

อย่างไรก็ตามในบทความนี้ได้กล่าวถึงเฉพาะผลการทดสอบโฟมจีโอโพลีเมอร์ที่ใส่ผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0.4 %, 0.8 %, และ 1.0 % ของน้ำหนักเถ้าลอยเท่านั้น เนื่องจากให้ความหนาแน่นแห้งที่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 3 ปริมาณผงอลูมิเนียมต่อความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของจีโอโพลีเมอร์

Sample No.	Aluminum powder by mass, %	Dry density of foam geopolymer, kg/m^3
1	0.0	1,750
2	0.1	1,770
3	0.2	1,770
4	0.4	1,780
5	0.8	1,800
6	1.0	1,810

ตารางที่ 4 แสดงปฏิภาคส่วนผสมของโฟมจีโอโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบ เมื่อโฟมจีโอโพลีเมอร์แข็งตัวแล้วจะให้ความหนาแน่นแห้งอยู่ระหว่าง 1,780 - 1,810 kg/m^3 โดยประมาณ ซึ่งใกล้เคียงกับหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบา (lightweight concrete)

ตารางที่ 4 ส่วนผสมโฟมจีโอโพลีเมอร์ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

Mix No.	Symbol	Al		FA (kg)	5M_NaOH Liquid (L), kg	L/FA
		%	kg			
1	CON	-	-	1,600	800	0.5
2	0.4Al	0.4	6.30	1,600	800	0.5
3	0.8Al	0.8	12.60	1,600	800	0.5
4	1.0Al	1.0	15.75	1,600	800	0.5

Remark : CON = control mix, Al = aluminum powder, 5M = 5 mole, FA = fly ash

การผสมเริ่มจากการเตรียมสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 5 โมล ซึ่งในปริมาตร 1 ลิตรที่อุณหภูมิ 23 ± 2° C ประกอบด้วยน้ำเปล่าเท่ากับ 971 กรัม NaOH เกล็ด (ความบริสุทธิ์ 98 % w/w) เท่ากับ 204 กรัม ได้ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.17 การเตรียมวัสดุผสมทำได้โดยชั่งน้ำหนักเถ้าลอย สารละลาย NaOH น้ำ และ ผงอลูมิเนียม เดินเครื่องผสมคอนกรีต จากนั้นเท FA ที่เตรียมไว้ลงไป จากนั้นเทสารละลาย 5M_NaOH ลงไปในเครื่องผสม และผสมต่อไปอีกจนเป็นเนื้อเดียวกัน ขั้นตอนนี้เป็นการชะละลายใช้เวลาประมาณ 10 นาที จากนั้นเท Al ลงไปในและผสมต่อไปอีกจนเป็นเนื้อเดียวกันจึงเทโฟมจีโอโพลีเมอร์ลงในแบบหล่อทรงลูกบาศก์มาตรฐานอังกฤษ (British Standard, BS 1881) ขนาด 10 × 10 × 10 เซนติเมตร พร้อมทั้งกระทุ้งเล็กน้อยเพื่อให้จีโอโพลีเมอร์ไหลเข้าตามซอกมุมของโมลด์อย่างทั่วถึงกัน จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, และ 75 °C เป็นเวลา 24 วัน จึงทำการแกะแบบหล่อออก นำไปทดสอบหน่วยน้ำหนักหรือความหนาแน่น กำลังรับแรงอัด และการดูดซึมน้ำ

3.3 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดของโฟมจีโอโพลีเมอร์ทำตามมาตรฐาน BS 1881–116 [4] ทำได้โดยนำแท่งทดสอบไปกดเพื่อหาค่าของแรงที่กดหรืออัดลง โดยมีอัตราการให้หน่วยแรงกดบนแท่งทดสอบอยู่ระหว่าง 0.11 ถึง 0.27 MPa/วินาที กำลังรับแรงอัด คือ แรงกดสูงสุด (ประลัย) หารด้วยพื้นที่หน้าตัดขวางในสมการที่ 3

$$\text{Compressive strength}\,(MPa) = \frac{P}{A} \qquad (3)$$

เมื่อ P คือ แรงกดสูงสุด (N), และ A คือ พื้นที่หน้าตัดขวาง (m^2)

3.4 การทดสอบการดูดซึมน้ำ

การทดสอบการดูดซึมน้ำ (water absorption) ของโฟมจีโอโพลีเมอร์ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างขนาด 10 × 10 × 10 เซ็นติเมตร ที่มีอายุ 1 วัน จำนวน 3 ก้อน แช่ไว้ในน้ำเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำออกจากน้ำแล้วใช้ผ้าซับน้ำส่วนเกินที่ผิว พร้อมทั้งชั่งน้ำหนักภายในเวลา 30 วินาที ซึ่งค่าที่ได้คือน้ำหนักของโฟมจีโอโพลีเมอร์และน้ำหนักของน้ำที่ซึมเข้าไป จากนั้นนำก้อนตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 110 ±5° C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดจึงนำก้อนตัวอย่างออกจากเตาอบ ปล่อยให้เย็นที่

อุณหภูมิห้อง และจึงชั่งน้ำหนัก ค่าที่ได้คือน้ำหนักแห้ง จากนั้นนำค่าที่ได้คำนวณหาอัตราการดูดซึมน้ำแต่ละก้อนมาเฉลี่ยกัน จากจำนวน 3 ก้อนตัวอย่าง ตามมาตรฐาน ASTM C 642 [5] คำนวณหาอัตราการดูดกลืนน้ำของแท่งทดสอบในสมการที่ 4

$$\text{Water absorption (\%)} = \frac{(W_{sat} - W_{dry})}{W_{dry}} 100 \quad (4)$$

เมื่อ W_{sat} คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างที่อิ่มน้ำชั่งในอากาศ (กรัม) และ W_{dry} คือ น้ำหนักก้อนตัวอย่างที่อบแห้งชั่งในอากาศ (กรัม)

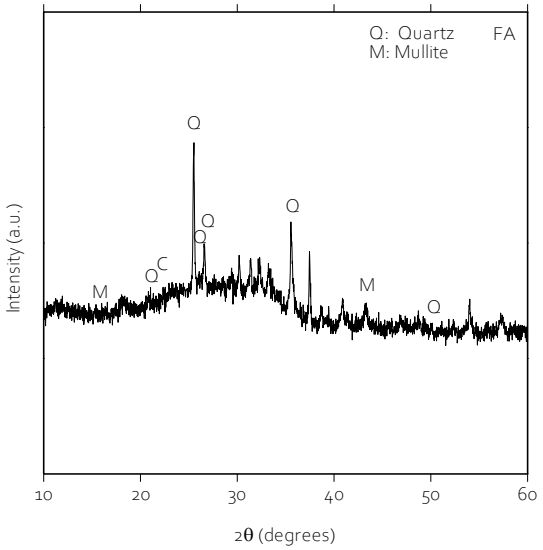
3.5 การทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง

การทดสอบหน่วยน้ำหนักแห้ง (dry unitweight) หรือความหนาแน่นแห้ง (dry density) ทำได้โดยนำก้อนตัวอย่างขนาด 0.10 × 0.10 × 0.10 เมตร ที่ผ่านการอบแห้งแล้วเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มาชั่งน้ำหนักมีหน่วยเป็นกิโลกรัมหารด้วยปริมาตรมีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร หน่วยน้ำหนักแห้งมีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังสมการที่ 2

4. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติของวัสดุ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย (FA) โดย X-ray Fluorescence หรือ XRF แสดงในตารางที่ 2 พบว่า FA มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอลูมิเนียมไตรออกไซด์ เท่ากับ 42.94 % และ 24.46 % ตามลำดับ ซึ่งผลรวมปริมาณของ SiO_2, Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มากกว่า 70 % โดยน้ำหนัก ซึ่งเถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหินแม่เมาะจัดเป็นวัสดุปอซโซลานชนิดสังเคราะห์ชั้น F (Class F) และยังมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) สูงเกินกว่า 10 % โดยน้ำหนัก อาจเรียกว่าเป็นเถ้าลอยแคลเซียมสูง (high-calcium fly ash) ตามมาตรฐาน ASTM C 618-2003 [6] นอกจากนี้ ยังพบว่า FA มีค่าการสูญเสียน้ำหนักจากการเผา (LOI) เท่ากับ 1.48 % ซึ่งต่ำกว่ามาตรฐานกำหนด (มาตรฐาน ASTM C 618 กำหนดให้ค่า LOI ไม่เกิน 6 % w/w) และจากการวิเคราะห์โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer) หรือ XRD พบว่า FA มีความเป็นอสัณฐานสูงถึง 80.5 % หรือมีความเป็นผลึกต่ำ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 XRD Patterns ของเถ้าลอย

4.2 กำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของโฟมจีโอโพลีเมอร์ อัตราส่วน L/FA = 0.5 และใช้ NaOH ความเข้มข้น 5M ในการชะละลาย พบว่ากำลังรับแรงอัดของส่วนผสมควบคุม (CON) ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, และ 75°C เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 2.35, 2.39, 2.20, 2.08, และ 2.01 MPa ตามลำดับ ซึ่งการอบที่อุณหภูมิ 60 °C ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด เมื่อใส่ผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0.4 % ของน้ำหนักเถ้าลอย (ส่วนผสม 0.4Al) พบว่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C และ 75 °C เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 3.41, 3.66, 3.34, 3.15, และ 3.00 MPa ตามลำดับ ซึ่งการอบที่อุณหภูมิ 60 °C ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด เมื่อใส่ผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0.8 % ของน้ำหนักเถ้าลอย (ส่วนผสม 0.8Al) พบว่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, และ 75 °C เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 5.12, 5.46, 5.00, 4.80, และ 4.40 MPa ตามลำดับ ซึ่งการอบที่อุณหภูมิ 60 °C ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด และเมื่อใส่ผงอลูมิเนียมในปริมาณ 1.0 % ของน้ำหนักเถ้าลอย (ส่วนผสม 1.0Al) พบว่ากำลังรับแรงอัดที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C และ 75 °C เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 6.40, 6.60, 6.23, 6.20, และ 6.11 MPa ตามลำดับ ซึ่งการอบที่อุณหภูมิ 60 °C ให้กำลังรับแรงอัดสูงสุด

เมื่อเปรียบเทียบกำลังรับแรงอัดทั้ง 4 ส่วนผสม พบว่าการใส่ผงอลูมิเนียมมากขึ้น (0.4 % w/w – 1.0 % w/w) ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลีเมอร์สูงขึ้น ส่วนอุณหภูมิสำหรับใช้ในการอบแห้งที่เหมาะสมทำให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดคือ 60 °C

ตารางที่ 5 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของโฟมจีโอโพลีเมอร์อบที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Mix No.	Symbol	Compressive strength, MPa				
		55 °C	60 °C	65 °C	70 °C	75 °C
1	CON	2.35	2.39	2.20	2.08	2.01
2	0.4Al	3.41	3.66	3.34	3.15	3.00
3	0.8Al	5.12	5.46	5.00	4.80	4.40
4	1.0Al	6.40	6.60	6.23	6.20	6.11

การอบแห้งได้ทำให้พันธะเคมีของซิลิเกตและอลูมิโนเซื่อมต่อกันกลายเป็นโพลีเมอร์แบบลูกโซ่ อย่างไรก็ตามอุณหภูมิในการอบแห้งตั้งแต่ 65 °C ถึง 75 °C ให้กำลังอัดลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น นั้นเป็นเพราะว่าอุณหภูมิดังกล่าวไม่เหมาะสม เนื่องจากจีโอโพลีเมอร์ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนสูง ส่งผลกระทบต่ออัตราการระเหยน้ำออกที่มากเกินไป [7]

4.3 การดูดซึมน้ำและหน่วยน้ำหนัก

ตารางที่ 6 แสดงอัตราการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของโฟมจีโอโพลีเมอร์ อัตราส่วน L/FA = 0.5 และใช้ NaOH ความเข้มข้น 5M ในการชะละลาย พบว่าการดูดซึมน้ำของจีโอโพลีเมอร์ส่วนผสม CON ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, และ 75 °C เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 21 %, 17 %, 17 %, 18 %, และ 20 % ตามลำดับ ซึ่งจีโอโพลีเมอร์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 °C มีการดูดซึมน้ำต่ำสุด โฟมจีโอโพลีเมอร์ส่วนผสม 0.4Al ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, และ 75°C เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 16 %, 13 %, 14 %, 15 %, และ 15 % ตามลำดับ ซึ่งจีโอโพลีเมอร์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 °C มีการดูดซึมน้ำต่ำสุด โฟมจีโอโพลีเมอร์ส่วนผสม 0.8Al ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, และ 75 °C เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 15 %, 11 %, 12 %, 13

%, และ 14 % ตามลำดับ ซึ่งจีโอโพลีเมอร์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 ℃ มีการดูดซึมน้ำต่ำสุด และโฟมจีโอโพลีเมอร์ส่วนผสม 1.0Al ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 ℃, 60 ℃, 65 ℃, 70 ℃, และ 75 ℃ เป็นเวลา 1 วัน เท่ากับ 14 %, 10 %, 12 %, 12 %, และ 13 % ตามลำดับ ซึ่งจีโอโพลีเมอร์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 60 ℃ มีการดูดซึมน้ำต่ำสุดเช่นเดียวกับส่วนผสม CON, 0.4Al, และ 0.8Al ซึ่งอัตราการดูดซึมน้ำลดลงตามปริมาณการใส่ผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6 การดูดซึมน้ำเฉลี่ยของโฟมจีโอโพลีเมอร์

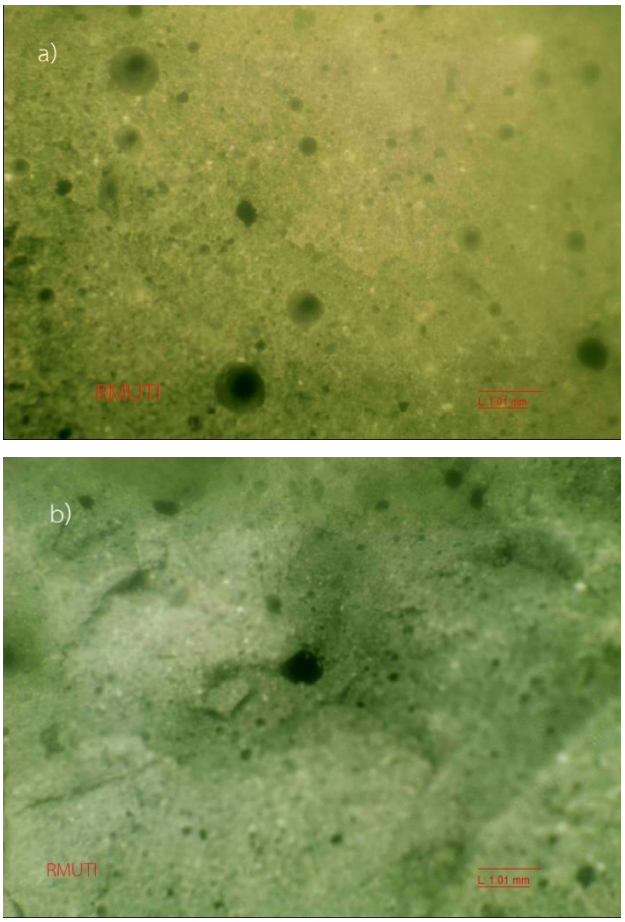
Mix No.	Symbol	Water absorption, %				
		55 ℃	60 ℃	65 ℃	70 ℃	75 ℃
1	CON	21	17	17	18	20
2	0.4Al	16	13	14	15	15
3	0.8Al	15	11	12	13	14
4	1.0Al	14	10	12	12	13

ตารางที่ 7 แสดงหน่วยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของโฟมจีโอโพลีเมอร์ อัตราส่วน L/FA = 0.5 และใช้ 5M_NaOH ในการชะละลาย พบว่าหน่วยน้ำหนักแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์ปกติ (CON) ที่ไม่ผสมผงอลูมิเนียมอยู่ระหว่าง 1,701 – 1,767 kg/m^3 เมื่อมีการผสมผงอลูมิเนียมเข้าไปในปริมาณ 0.4 % w/w ให้หน่วยน้ำหนักแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์ 1,730 – 1,777 kg/m^3 เมื่อมีการผสมผงอลูมิเนียมเข้าไปในปริมาณ 0.8 % w/w ให้หน่วยน้ำหนักแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์ 1,780 – 1,802 kg/m^3 และเมื่อมีการผสมผงอลูมิเนียมเข้าไปในปริมาณ 1.0 % w/w ให้หน่วยน้ำหนักแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์ 1,780 – 1,808 kg/m^3 ซึ่งหน่วยน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระดับการใส่ผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น คล้ายผลงานวิจัยที่พบโดย Kioupis et al. (2021) [8]

ตารางที่ 7 หน่วยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของโฟมจีโอโพลีเมอร์

Mix No.	Symbol	Dry unitweight, kg/m^3				
		55 ℃	60 ℃	65 ℃	70 ℃	75 ℃
1	CON	1,745	1,767	1,711	1,726	1,701
2	0.4Al	1,758	1,777	1,756	1,730	1,760
3	0.8Al	1,793	1,802	1,800	1,797	1,780
4	1.0Al	1,801	1,794	1,808	1,789	1,780

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่าง กำลังรับแรงอัด การดูดซึมน้ำและหน่วยน้ำหนัก พบว่าการดูดซึมน้ำของโฟมจีโอโพลีเมอร์ลดลงตามระดับความหนาแน่นของโฟมจีโอโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น นั้นเป็นเพราะว่าโพรงอากาศ (รูปที่ 5) ที่เกิดขึ้นจากการใส่ผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0.4 – 1.0 % w/w ส่งผลให้หน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้นประมาณ 6 % ส่วนอุณหภูมิในการอบแห้งมีผลกระทบต่อกำลังรับแรงอัดและการดูดซึมน้ำ แต่ไม่มีผลกระทบต่อหน่วยน้ำหนักของโฟมจีโอโพลีเมอร์แต่อย่างใด



รูปที่ 5 ภาพถ่ายพื้นผิวกะเทาะออกของโฟมจีโอโพลีเมอร์ a) ไม่ผสมผง Al b) ผสมผง Al ร้อยละ 1.0 w/w

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายพื้นผิวกะเทาะออกของโฟมจีโอโพลีเมอร์อบแห้งที่อุณหภูมิ 60 ℃ พบว่าเนื้อจีโอโพลีเมอร์ปกติมีโพรงอากาศเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากการอัดแน่นขณะเทลงโมลด์ มีลักษณะเนื้อที่ไม่แน่นและเป็นสีน้ำตาลอ่อนเหมือนสีของเถ้าลอย ดังรูปที่ 5 (a) ส่วนเนื้อโฟมจีโอโพลีเมอร์ที่ใส่ผงอลูมิเนียมร้อยละ 1.0 w/w มีลักษณะเนื้อแน่น โพรงอากาศอยู่กระจัดกระจายไม่ต่อเนื่องกันและมีสีเทาคล้ายสีของซีเมนต์เพสต์ ดังรูปที่ 5 (b)

5. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาโฟมจีโอโพลีเมอร์ทำจากเถ้าลอยผสมผงอลูมิเนียมในปริมาณ 0.4 %, 0.8 %, และ 1.0 % ของน้ำหนักเถ้าลอย หน่วยน้ำหนักแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์ประมาณ 1,700 kg/m^3 ถึง 1,800 kg/m^3 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5M ในการชะละลาย ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 55 ℃, 60 ℃, 65 ℃, 70℃, และ 75 ℃ เป็นเวลา 1 วัน สรุปดังนี้

- กำลังรับแรงอัดของโฟมจีโอโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นตามระดับการใส่ผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมในการอบแห้งควรอยู่ระหว่าง 55℃ ถึง 65 ℃

- การดูดซึมน้ำของโฟมจีโอโพลีเมอร์ลดลงตามระดับหน่วยน้ำหนักแห้งของโฟมจีโอโพลีเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์สถานที่วิจัยและเครื่องมือทดสอบจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จังหวัดนครราชสีมา

เอกสารอ้างอิง

[1] Davidovits J., Davidovics M. (1988). Geopolymer room temperature ceramic matrix for composites. *Ceram Eng Sci Proc*. 9: p. 842-53.

[2] Zhang, Z., J. L. Provis, A. Reid and H. Wang (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 56: p. 113-127.

[3] Wu, H. C. and P. Sun (2007). New building materials from fly ash-based lightweight inorganic polymer. *Construction and Building Materials* 21(1): 211-217.

[4] BS 1881-116 (1983). Method of Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes, *British Standards*.

[5] ASTM C 642 (1997). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. *Annual Book of ASTM Standards*. Philadelphia.

[6] ASTM C 618 (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, *Annual book of ASTM Standards*, Vol. 04.02.

[7] Kaplan, G., A. Öz, B. Bayrak, H. Görkem Alcan, O. Çelebi and A. Cüneyt Aydın (2022). Effect of quartz powder on mid-strength fly ash geopolymers at short curing time and low curing temperature. *Construction and Building Materials* 329: 127153.

[8] Kioupis, D., A. Zisimopoulou, S. Tsivilis and G. Kakali (2021). Development of porous geopolymers foamed by aluminum and zinc powders. *Ceramics International* 47(18): 26280-26292.