

## ผลของซิลิกาฟุ้งต่อสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยกระบวนการเผา แบบฟลูอิดไดซ์เบด

พัฒนพงศ์ ไพลฐศรีสวัสดิ์ และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ \*

### บทคัดย่อ

เถ้าลอยที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีรูพรุน และความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาถ่านหินไม่สูง (ประมาณ 900°C) นอกจากนี้ยังมีแคลเซียมเป็นส่วนผสมปริมาณมากจึงไม่นิยมนำเถ้าลอย FBC เป็นสารปอซโซลาน ผสมกับปูนซีเมนต์ผลิตคอนกรีต งานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางใช้เถ้าลอย FBC ในการผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์และเพิ่มความเป็นอสัณฐานและความว่องไวของเถ้าลอย FBC โดยผสมซิลิกาฟุ้งในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อเปลี่ยนปริมาณแคลเซียมที่มากเกินไปในเถ้าลอย FBC เป็นสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่ให้กำลังอัดแก่จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมระหว่างเถ้าลอย FBC กับซิลิกาฟุ้ง (SF) คือ การแทนที่เถ้าลอย FBC ด้วยซิลิกาฟุ้งร้อยละ 3.75 โดยน้ำหนัก ทำให้ได้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีกำลังอัดเพิ่มขึ้น โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 21.4 เมกกะปาสกาล

คำสำคัญ : เถ้าลอยฟลูอิดไดซ์เบด, จีโอโพลิเมอร์, แคลเซียมซิลิเกต, ซิลิกาฟุ้ง

## Effect of Silica Fume on the Properties of Fluidized Bed Combustion (FBC) Fly Ash Geopolymer

Pattanapong Paisitsrisawat and Ubolluk Rattanasak \*

### Abstract

Fluidized bed combustion (FBC) fly ash has the irregular shape, high porosity and crystalline owing to low combustion temperature ( $\sim 900^{\circ}\text{C}$ ). In addition, it contains high amount of calcium compound resulted in low use as pozzolan for concrete production. Therefore, this research proposed the utilization of FBC fly ash in geopolymer. Increase in morphological property and reactivity of FBC fly ash was performed by blending with silica fume and grinding. Silica fume reacted with excess calcium in FBC fly ash resulted in calcium silicate compound which enhanced the strength of geopolymer. It was found that the replacement of FBC fly ash with silica fume at 3.75% by weight increased the strength of geopolymer to 21.4 MPa at 90-day curing age.

**Keywords** : Fluidized bed combustion fly ash, Geopolymer, Calcium silicate, Silica fume

## 1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมที่มีผลมาจากการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ และปัญหาการกำจัดของเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรม ทำให้เกิดแรงกระตุ้นในการวิจัยและพัฒนาที่จะลดปัญหาดังกล่าวที่เพิ่มมากขึ้น ในปัจจุบันมีงานวิจัยที่แนะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลิตเป็นวัสดุใหม่มากขึ้น โดยผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ให้น้อยลง แต่ยังคงสมบัติการเป็นวัสดุประสานที่ดี โดยสารที่ใช้ผสมดังกล่าวเป็นสารประกอบซิลิกอน ที่ไม่มีสมบัติเชื่อมประสานในตัวเอง แต่เมื่อผสมกับสารประกอบแคลเซียมออกไซด์และน้ำสามารถก่อตัวและแข็งตัวได้ สารประกอบซิลิกอนที่ใช้งานมากที่สุดได้แก่ เถ้าถ่านหินหรือเถ้าลอย [1, 2]

ในปัจจุบัน โรงงานไฟฟ้าขนาดเล็ก มีการนำกระบวนการเผาถ่านหินในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่เป็นการลดมลพิษทางอากาศ ได้แก่ กระบวนการเผาแบบความร้อนต่ำ (อุณหภูมิต่ำกว่า 900°C) หรือการเผาในเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) เนื่องจากในกระบวนการเผามีการพ่นหินปูนเพื่อดักจับก๊าซกำมะถันหรือซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>x</sub>) ที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา กระบวนการนี้สามารถลดปริมาณก๊าซกำมะถันที่จะถูกปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ได้ถึงร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังสามารถลดปริมาณมลพิษที่เกิดจากก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO<sub>x</sub>) ในถ่านหินได้อีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เผาไม่สูง [1] อย่างไรก็ตาม เถ้าลอย FBC ไม่เหมาะสำหรับนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีต เนื่องจากมีสารประกอบซัลเฟอร์ปริมาณสูง อย่างไรก็ตาม ได้มีการศึกษาการนำเถ้าลอย FBC มาใช้ประโยชน์ โดยการผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [2,3]

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) และอะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) เป็นองค์ประกอบกับสารละลายซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง และใช้ความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาพอลิคอนเดนเซชัน ได้สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตที่มีสมบัติคล้ายซีเมนต์ โดยใช้หลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) ออกซิเจน (O) และอะลูมิเนียม (Al) คู่กันเป็นโมเลกุล

ลูกโซ่ [4,5] โดยวัสดุที่นิยมนำมาผลิตจีโอโพลิเมอร์คือเถ้าลอยจากกระบวนการเผาถ่านหินความร้อนปานกลางหรือความร้อนสูง (อุณหภูมิการเผาสูงกว่า 1200°C)

ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) หรือไมโครซิลิกา (Microsilica) หรือซิลิกาฟุ้งควบแน่น (Condensed silica fume) เป็นชื่อเรียกวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง เป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตโลหะซิลิกอน (Silicon metal) เป็นสารประกอบซิลิกอนชนิดหนึ่งที่ใช้ผสมปูนซีเมนต์และให้กำลังอัดแก่คอนกรีต ซิลิกาฟุ้งมีอนุภาคขนาดเล็กมาก มีพื้นที่ผิวมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอลิไซคลอนได้อย่างรวดเร็ว ปัญหาของการใช้ซิลิกาฟุ้งในงานคอนกรีตคือส่วนผสมคอนกรีตต้องการปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคที่เล็กมากของซิลิกาฟุ้งทำให้มีพื้นที่ผิวมากจึงต้องการปริมาณน้ำในการหล่อลื่นพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงขึ้นด้วย [1,6]

เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์เถ้าลอย FBC ให้มากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ได้จากการเผาแบบ FBC ที่ผสมกับซิลิกาฟุ้งในอัตราส่วนต่างกัน จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ เพื่อเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอย FBC และเป็นแนวทางในการศึกษาการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอย FBC ต่อไป

## 2. ขอบเขตการวิจัย

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะและปริมาณซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) บดในปริมาณร้อยละ 3.75 และ 5 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย FBC ที่มีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC เปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุม (จากเถ้าลอย FBC ล้วนที่ไม่บดและบด)

## 3. การทดลอง

### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

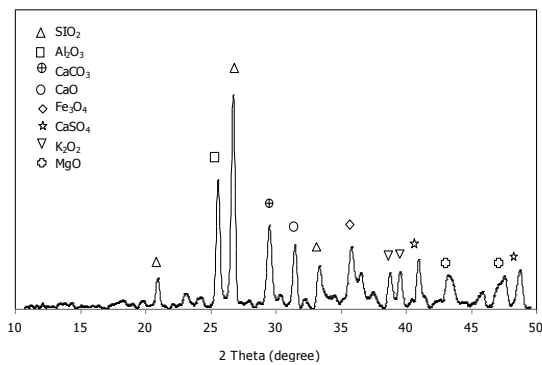
วัสดุที่ใช้ผลิตจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอย FBC ที่ใช้ถ่านหินลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค

X-ray Fluorescence (XRF) แสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคของเถ้าลอย

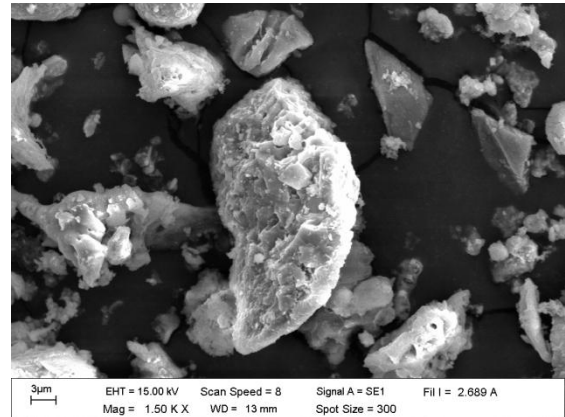
องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
ซิลิกอนออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	21.0
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8.0
เหล็กออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	6.9
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	42.2
โซเดียมออกไซด์ (Na <sub>2</sub> O)	2.9
ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO)	2.2
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.8
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO <sub>3</sub> )	15.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOD)	1.0
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	28.0

เถ้าลอย FBC ปริมาณแคลเซียมออกไซด์และสารประกอบซัลเฟตปริมาณสูง มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 28.0 ไมครอน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Malvern Mastersizer เถ้าลอย FBC มีสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 1



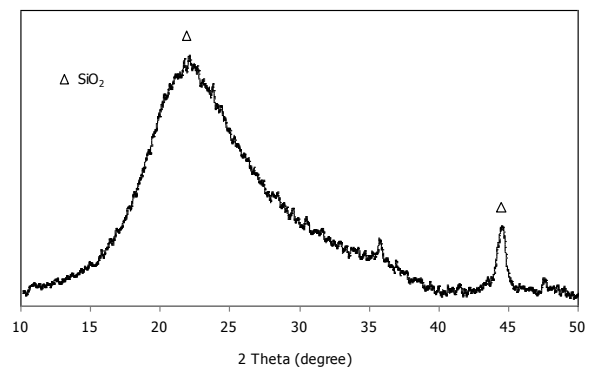
**รูปที่ 1** XRD ของเถ้าลอย FBC

จากสมบัติทางสัณฐานวิทยาของเถ้าลอย FBC พบพิกแหลมของผลึกเป็นจำนวนมาก แสดงถึงความว่องไวของเถ้าลอย FBC ต่อปฏิกิริยาดำ มีความเป็นผลึกสูง และจากการศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย FBC แสดงในรูปที่ 2 เถ้าลอย FBC มีรูปร่างไม่แน่นอนและผิวขรุขระ มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจากการเผาแบบความร้อนต่ำ คือช่วงอุณหภูมิการเผาต่ำกว่า 900°C



**รูปที่ 2** โครงสร้างทางจุลภาคของเถ้าลอย FBC

งานวิจัยนี้ได้เติมซิลิกาฟุ้งเพื่อเพิ่มศักยภาพของเถ้าลอย FBC โดยซิลิกาฟุ้งที่ใช้มีสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งพบพิกฐานกว้างในตัวอย่างซิลิกาฟุ้งแสดงถึงความเป็นอสัณฐานที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนี้ สารละลายที่ใช้เตรียมจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ (15 M NaOH) เนื่องจากที่ความเข้มข้นดังกล่าวไม่ทำให้เกิดเอทพริงไคต์ [7] และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ที่มีปริมาณ SiO<sub>2</sub> ร้อยละ 31 และ Na<sub>2</sub>O ร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก และใช้ทรายแม่น้ำคัดขนาดร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (รูเปิด 36 มม.) เพื่อผสมเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์



**รูปที่ 3** XRD ของซิลิกาฟุ้ง

### 3.2 วิธีการทดลอง

#### การเตรียมตัวอย่างแก้วผสม

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการใช้ปริมาณซิลิกาฟลูมในส่วนผสมมากกว่าร้อยละ 5 จะให้ค่ากำลังอัดที่ลดลงเนื่องจากซิลิกาฟลูมที่มากเกินไปทำปฏิกิริยาสารละลายเบสได้สารประกอบโซเดียมซิลิเกตและบางส่วนทำหน้าที่เป็นซิลิกาเจลที่สามารถดูดความชื้น เกิดความไม่เสถียรเชิงปริมาตร และส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลง [8] ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณซิลิกาฟลูมร้อยละ 3.75 และ 5 โดยน้ำหนักแก้วลอย FBC เป็นส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์

การเตรียมตัวอย่างแก้วผสมทำโดยผสมแก้วลอย (FBC) กับซิลิกาฟลูม (SF) โดยผสมกันในอัตราส่วน FBC: SF ดังนี้ คือ 100:0, 96.25:3.75 และ 95:5 โดยน้ำหนัก บดแก้วผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าแก้วผสมมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 7.61  $\mu\text{m}$  และมีร้อยละการค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (รูเปิด 45  $\mu\text{m}$ ) เท่ากับร้อยละ 4.84

#### การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ทำการเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อนำไปทำการวิเคราะห์โดยเทคนิค SEM, XRD และค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยา (Degree of reaction, DOR) โดยเตรียมส่วนผสมต่างๆ แสดงในตารางที่ 2 (โดยใช้  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 2.0$  โดยน้ำหนัก) [9,10] ส่วนจีโอโพลิเมอร์ควบคุมเตรียมจากแก้วลอย FBC ที่ไม่บด และบด

ตารางที่ 2 ส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ตัวอย่าง	แก้วผสม (g)		15 M NaOH (g)	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (g)
	FBC	SF		
ควบคุม (ไม่บด)	100	0	40	82
ควบคุม (บด)	100	0	33	67
3.75SF	96.25	3.75	33	67
5SF	95	5	33	67

ผสมแก้วผสมกับ 15 M NaOH และสารละลาย  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ในเครื่องผสม เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นนำส่วนผสมเพสต์ที่ได้หล่อลงแบบหล่อพลาสติก และใส่ฟองอากาศด้วยเครื่องสั่นเป็นเวลา 1 นาที หุ้มแบบหล่อด้วยฟิล์มใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วจนขณะบ่มร้อน บ่มตัวอย่าง

ที่อุณหภูมิ  $65 \pm 3^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดนำตัวอย่างที่ได้บ่มต่อในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่  $25 \pm 3^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 7, 28 และ 90 วัน

นำตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วันวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาคโดยเทคนิค SEM และสมบัติทางสัณฐานวิทยาของเพสต์บดด้วยเทคนิค XRD นอกจากนี้วิเคราะห์หาค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาโดยชั่งจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่บดให้เป็นผงละเอียดประมาณ 5 กรัม (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) เติมสารละลาย 2 M HCl ปริมาตร 30 มล. นำไปให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศทำการล้างตะกอน 3 ครั้ง ด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตน นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากทำการอบแล้วนำตะกอนที่ได้มาใส่บีกเกอร์ เติม 5% wt  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ปริมาตร 30 มล. นำมาให้ความร้อนด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที กรองด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ทำการล้างตะกอน 3 ครั้ง ด้วยน้ำกลั่นและอะซิโตน นำตะกอนที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการชั่งตะกอนที่เหลือแล้วทำการคำนวณดังสมการต่อไปนี้ [2,11,12]

$$\text{DOR} = \frac{M_{\text{sample}} \times [M_{\text{residue}} \times (1 + \text{LOI})]}{M_{\text{sample}}} \times 100$$

$M_{\text{sample}}$  คือ น้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์เริ่มต้น (g)

$M_{\text{residue}}$  คือ น้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์ที่เหลือ (g)

LOI คือร้อยละการสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้

นำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของแก้วลอยที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา

#### การเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

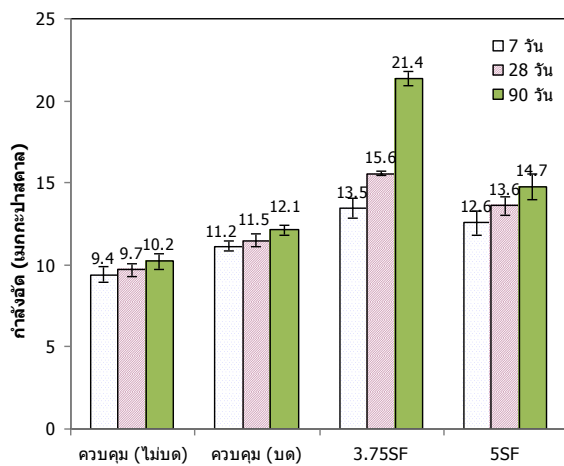
ทำการเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เพื่อนำไปทดสอบกำลังอัด โดยทำการเตรียมในอัตราส่วนเดียวกับการเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ และเติมทรายลงในเพสต์ในปริมาณ 2 เท่าโดยน้ำหนักของแก้วผสม [2,3] เกลบแบบเพสต์พลาสติกขนาด 5x5x5 ลบ.ซม. ทำการบ่มเช่นเดียวกับเพสต์และทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยผลการทดสอบค่ากำลังอัดเป็นค่าเฉลี่ยของมอร์ตาร์ 5 ก้อน

#### 4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์เถ้าลอย FBC โดยนำมาผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพื่อทดแทนวัสดุก่อสร้าง และศึกษาสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมกับซิลิกาฟูน จากนั้นศึกษาสมบัติทางเคมีและทางกายภาพ เพื่อให้ได้วัสดุใหม่ที่สามารถทดแทนวัสดุก่อสร้าง ดังนั้นจึงเน้นการศึกษาด้านกำลังของจีโอโพลิเมอร์เป็นหลัก

##### 4.1 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

เมื่อผสมซิลิกาฟูนกับเถ้าลอย FBC แล้วทำการบดเถ้าผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อผสมเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ได้ผลกำลังอัดที่อายุ 7, 28 และ 90 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

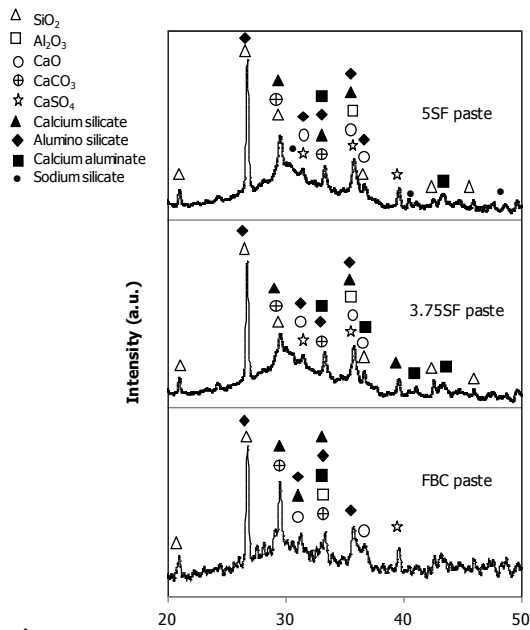
จากค่ากำลังอัดพบว่าที่อายุการบ่ม 7 วันจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุมจากเถ้าลอยล้วนไม่บดและบด ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 9.4 และ 11.2 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่ออายุการบ่มมากขึ้น พบว่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการบดเป็นการลดขนาด ลดความพรุน และเพิ่มพื้นที่ผิวการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าลอย FBC [8] อย่างไรก็ตามการบดเถ้าลอย FBC มีผลต่อค่ากำลังอัดอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งเถ้าลอย FBC มีความเป็นผลึกสูง และไม่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายเบส เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาเถ้าที่ไม่สูงพอที่จะเปลี่ยนเฟสเถ้าลอย FBC เป็นเฟสแก้ว (Glassy phase) หรืออสัณฐาน (Amorphous phase) ได้

เมื่อผสม 3.75SF และ 5SF แล้วบดร่วมกับเถ้าลอย FBC ผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์ ให้ค่ากำลังอัดเท่ากับ 13.5 และ 12.6 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ควบคุม นอกจากการบดเป็นการลดขนาด และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ยังเป็นการทำให้ซิลิกาฟูนและเถ้าลอยผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น ที่อายุการบ่ม 90 วันของส่วนผสม 3.75SF ให้ค่ากำลังอัดสูงสุดเท่ากับ 21.4 เมกกะปาสคาล มีค่าสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่มีค่ากำลังอัด 10.2 เมกกะปาสคาล ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาปอซโซลานเหมือนในปูนซีเมนต์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซิลิกาและซิลิกาฟูนในเถ้าผสม ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต [1,13-15] ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่จีโอโพลิเมอร์ตามอายุการบ่ม [3,13-15] จึงทำให้ค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 90 วันให้ค่ากำลังอัดสูง ในขณะที่ส่วนผสม 5SF มีค่ากำลังอัดที่ไม่ต่างกันที่อายุการบ่มต่างๆ อาจเนื่องมาจากปริมาณซิลิกาฟูนที่มากเกินไปทำปฏิกิริยากับ 15 NaOH ได้สารประกอบโซเดียมซิลิเกตที่มีผลต่อการพัฒนากำลังของจีโอโพลิเมอร์ [8]

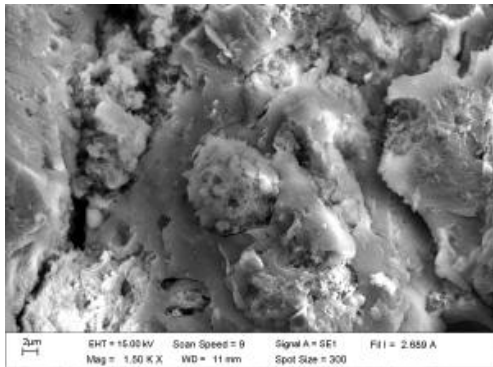
##### 4.2 สัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เฟส

สัณฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอย FBC ล้วนไม่บด และเถ้าผสมบด ด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 5

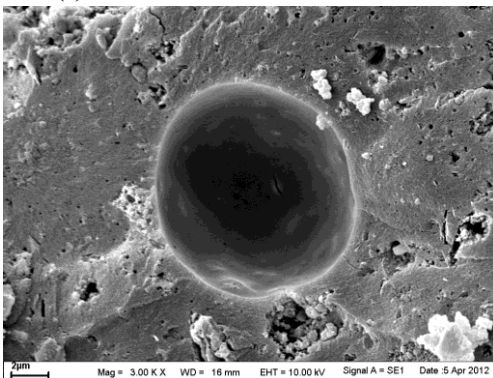
ผลึกภัณฑ์จากปฏิกิริยาในจีโอโพลิเมอร์ได้แก่ อะลูมิโนซิลิเกต แคลเซียมซิลิเกต และแคลเซียมอะลูมิเนต ซึ่งเป็นสารที่ให้กำลังแก่จีโอโพลิเมอร์ได้ นอกจากนี้ยังพบฟิสิกฐานกว้างที่ 28-38° 2theta ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต่างจากสารตั้งต้น (ซิลิกาฟูนพบที่ 15-30 ° 2theta) การเลื่อนตำแหน่งของฟิสิกฐานกว้าง และพบสารประกอบใหม่ในจีโอโพลิเมอร์แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น การบดช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของเถ้าลอยผสมและความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารละลายเบส ส่วนจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ล้วนไม่บดพบฟิสิกฐานจำนวนมาก แสดงถึงปริมาณผลึกในจีโอโพลิเมอร์เฟส



รูปที่ 5 XRD ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์



(a) จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอย FBC



(b) จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำผสมบด 3.75 SF

รูปที่ 6 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

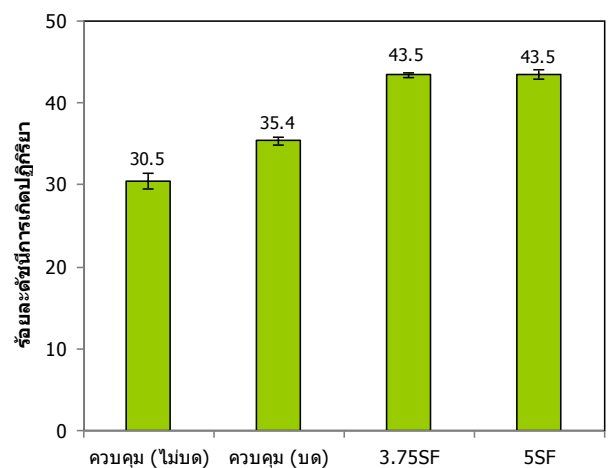
### 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำลอย FBC ส่วนไม่บดและถ้ำผสม 3.75SF บด แสดงในรูปที่ 6

จีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอย FBC ส่วนไม่บดมีโครงสร้างทางจุลภาคลักษณะมีความพรุน เนื้อไม่สม่ำเสมอ มีรอยแตกเนื่องจากถ้ำลอย FBC เกิดปฏิกิริยาได้ไม่ดี ซึ่งต่างจากจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากถ้ำผสมบด 3.75 SF ที่มีเนื้อจีโอโพลิเมอร์แน่น เนื่องจากการบดเป็นการลดปริมาณรูพรุนในถ้ำลอย FBC และเพิ่มพื้นที่ผิว นอกจากนี้ซิลิกาฟุ้งยังช่วยให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดี เนื้อจีโอโพลิเมอร์ที่แน่นส่งผลให้กำลังของจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูง

### 4.4 ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาแสดงถึงปฏิกิริยาปอซโซลานที่ เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ โดยมีหลักการคือ 2M HCl ทำหน้าที่เพื่อละลายสารประกอบของแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา และ 5% wt  $Na_2CO_3$  ทำหน้าที่เพื่อละลายเจลของซิลิกา ( $SiO_2$ ) อะลูมินา ( $Al_2O_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) ส่วนกากคือถ้ำลอยไม่เกิดปฏิกิริยา [8,10,14,15] รูปที่ 6 แสดงค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน



รูปที่ 7 ดัชนีการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

จากรูปที่ 7 จีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่ผลิตจากเถ้าลอย FBC ไม่บดและบดให้ค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยจีโอโพลิเมอร์ควบคุมจากเถ้าลอยบดให้ค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุมจากเถ้าลอยไม่บด ซึ่งแสดงถึงปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของเถ้าลอยบดที่เพิ่มขึ้น ที่ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์ 3.75SF และ 5 SF มีดัชนีการเกิดปฏิกิริยาที่สูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ควบคุม คือมีค่าร้อยละ 43.5 และ 43.5 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าผสมเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ และมีความเป็นอสัณฐานที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่มีปริมาณผลึกมาก ละลายในสารละลายที่ใช้ทดสอบได้น้อย ซึ่งสอดคล้องกับผล XRD ค่าดัชนีการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์

## 5. สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยพบว่า การผสมซิลิกาฟูมในเถ้าลอย FBC และการบดสามารถเพิ่มศักยภาพการนำเถ้าลอย FBC มาใช้ประโยชน์ได้ โดยปริมาณซิลิกาฟูมที่เหมาะสมคือร้อยละ 3.75 โดยน้ำหนักของเถ้าลอย FBC ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต และแคลเซียมซิลิเกตที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 21.4 เมกะปาสกาล

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Chindapasirt, "Fly ash in concrete", revised edition, Thailand Concrete Association, Bangkok, 2005. (in Thai)
- [2] P. Chindapasirt and U. Rattanasak, "Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer", Waste Management 30, 2010, pp. 667-672.
- [3] P. Chindapasirt, U. Rattanasak, and C. Jaturapitakkul, "Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials", Cement and Concrete Composites 33, 2011, pp. 55-61.
- [4] J. Davidovits, "Chemistry of geopolymer system, Terminology in geopolymer'99", International Conference, France, 1999.
- [5] U. Rattanasak, "Geopolymeric material", Civil Engineering Magazine 18(5), 2006, pp. 55-60. (in Thai)
- [6] P. Chindapasirt and C. Jaturapitakkul, "Cement, pozzolan and concrete", 6th edition, Thailand Concrete Association, Bangkok, 2010. (in Thai)
- [7] S. Thaiwitaroen and U. Rattanasak, "Study of the NaOH concentration and aluminium compound on the ettringite formation in fluidized bed combustion (FBC) fly ash geopolymer", The Journal of Industrial Technology 8(3), 2011. (in Thai)
- [8] U. Rattanasak, P. Chindapasirt and P. Suwanvitaya, "Development of high volume Rice husk ash aluminosilicate composites", International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 17, 2010, pp. 654-659.
- [9] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymer", Waste Management 29, 2009, pp. 539-543.
- [10] U. Rattanasak and Chindapasirt, P., 2009, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer", Minerals Engineering 22, 2009, pp. 1073-1078.
- [11] T. Pipat, N. Toyoharu, N. Masashi and S. Toshiki, "Effect of fly ash on autogenous shrinkage", Cement and Concrete Research 35, 2005, pp. 473-482.



- [12] CS. Poon, L. Lam and SC. Kou, “A study on the hydration rate of natural zeolite blend cement pastes,” *Construction and Building Materials* 13, 1999, pp. 427-432.
- [13] S. Mindess, JF. Young and D. Darwin, “Concrete” 2<sup>nd</sup> edition, Prentice Hall, 2002.
- [14] T. Klabprasit, c. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt and S. Songpiriyakij, “Fly ash and bio-mass ash based geopolymer pastes part I: Effect of mix proportion on compressive Strength,” *EIT Research and Development journal* 19(2), 2008, pp. 9-16. (in Thai)
- [15] T. Klabprasit, c. Jaturapitakkul, P. Chindapasirt and S. Songpiriyakij, “Fly ash and bio-mass ash based geopolymer pastes part II: Relationship between rate of reaction and compressive Strength,” *EIT Research and Development journal* 19(2), 2008, pp. 17-24. (in Thai)