

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบ อะลูมิเนียมต่อการเกิดเอททริงไคต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยกระบวนการเผาถ่านหิน แบบฟลูอิดไคซ์เบด

ศิวานันท์ ไทยวิษณุเจริญ และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์*

บทคัดย่อ

เถ้าลอยจากกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBC) มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) สูง เนื่องจากในขั้นตอนการเผามีการพ่นหินปูนเข้าไปเพื่อจับก๊าซ SO_x ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมินาในเถ้าลอย FBC ในสภาวะเบสเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (หรือเอททริงไคต์) ได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดเอททริงไคต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC นอกจากนี้ยังปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์โดยการเพิ่มสารประกอบอะลูมิเนียม โดยการผสมเถ้าลอย FBC กับสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมในเถ้าลอยเป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตและอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งให้กำลังแก่วัสดุจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ไม่พบการเกิดเอททริงไคต์ และการใช้สารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไม่เกินร้อยละ 2.5 ของปริมาณเถ้าลอยในการผลิตจีโอโพลิเมอร์สามารถให้กำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 35 เมกกะปาสกาล ในขณะที่การเพิ่มสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นร้อยละ 5 ทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนตซึ่งมีผลต่อการค่ากำลังอัดที่ลดลง

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์, เถ้าลอยฟลูอิดไคซ์เบด, เอททริงไคต์, อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

* ผู้ติดต่อ, อีเมล : ubolluk@buu.ac.th รับเมื่อ 14 พฤศจิกายน 2554 ตอบรับเมื่อ 26 ธันวาคม 2554

Study of the NaOH concentration and aluminium compound on the ettringite formation in fluidized bed combustion (FBC) fly ash geopolymer

Siwanant Thaiwitaroen and Ubolluk Rattanasak *

Abstract

Fluidized bed combustion (FBC) fly ash contains high amount of calcium sulfate (CaSO_4) due to feeding of lime into the combustion process to capture the SO_x gases. The CaSO_4 can be formed and react with alumina in the FBC fly ash under base condition resulted in calcium sulfoaluminate (ettringite). Therefore, effect of sodium hydroxide (NaOH) concentration on ettringite formation in FBC fly ash geopolymer was studied. In addition, the properties of geopolymer was improved by the addition of aluminium compound. The geopolymer was prepared from FBC fly ash mixed with aluminum hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$), sodium silicate and sodium hydroxide solution which $\text{Al}(\text{OH})_3$ could convert the calcium compound in FBC fly ash to calcium aluminate hydrate and aluminosilicate. It exhibited the strength gain of geopolymer. It was found that there is no sign of ettringite formation when 15 M NaOH was used. Use of $\text{Al}(\text{OH})_3$ not exceed 2.5% by weight of FBC fly ash in geopolymer preparation gave the compressive strength of 35 MPa at 90 days, while that of $\text{Al}(\text{OH})_3$ at 5% by weight resulted in sodium aluminate formation and strength reduction.

Keywords : Geopolymer, Fluidized bed combustion fly ash, Ettringite, Aluminium hydroxide

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันได้มีการวิจัยที่นำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมมาผลิตวัสดุซีเมนต์ชนิดใหม่มากขึ้น เพื่อทดแทนการกำจัดโดยการฝังกลบ และลดการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ให้น้อยลง วัสดุอิโพลีเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีสมบัติการยึดประสานหรือสมบัติคล้ายสารซีเมนต์ที่สามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ เช่น ถ่านหินดินขาวเผา เป็นต้น โดยผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ที่ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติเป็นวัสดุประสานโดยไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม ทำให้วัสดุอิโพลีเมอร์มีสมบัติคล้ายคอนกรีต หรือที่เรียกว่า “สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต” [1, 2]

ถ่านลอยจากการเผาถ่านหินแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) ใช้กันมากในการผสมกับปูนซีเมนต์หรือผลิตวัสดุอิโพลีเมอร์ เนื่องจากถ่านลอยชนิดนี้มีสมบัติเป็นสารปอซโซลานที่ปริมาณร้อยละ 70 – 90 ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าถ่านลอยจากการเผาแบบอื่นๆ เช่น ถ่านลอยที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) เนื่องจากการเผาแบบ PCC จะเผาที่ความร้อนปานกลาง อยู่ในช่วง 1100 – 1400 °C ทำให้ได้ถ่านลอยที่มีสมบัติที่ดีต่อการทำปฏิกิริยา คือมีความเป็นอสัณฐานสูง ในขณะที่การเผาแบบ FBC เป็นการเผาแบบความร้อนต่ำ คือช่วงอุณหภูมิการเผาต่ำกว่า 900 °C ถ่านลอยที่ได้จึงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาถ่านหินไม่สูงพอ จึงไม่นิยมนำถ่านลอย FBC มาใช้เป็นสารปอซโซลาน [1] แต่วิธีการเผาแบบ FBC นี้เริ่มมีการใช้มากขึ้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่างๆ และเป็นเทคโนโลยีสะอาดในการเผาถ่านหินเมื่อเทียบกับการเผาประเภทอื่นๆ เนื่องจากมีการพ่นปูนขาวเข้าไปจับกับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ทำให้ปริมาณกำมะถันที่ปล่อยออกมาลดลงได้ถึงร้อยละ 90 ทำให้ถ่านลอย FBC นี้มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ หรือหินปูนสูง ไม่เหมาะในการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีต ซึ่งในแต่ละปีจะมีถ่านลอย FBC ที่ต้องกำจัดเป็นจำนวนมาก [3, 4]

เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์ถ่านลอย FBC ให้มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติของวัสดุอิโพลีเมอร์จากถ่านลอย FBC ใดๆก็ตาม ถ่านลอย FBC มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) หรือ อธิปซิมปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหินปูนกับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับอะลูมินาในถ่านลอย FBC เกิดเป็นเอทิงไคต์ได้ ซึ่งทำให้วัสดุอิโพลีเมอร์ไม่มีความเสถียรเชิงปริมาตร ดังนั้นต้องหาแนวทางควบคุมการเกิดเอทิงไคต์

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังศึกษาหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุอิโพลีเมอร์จากถ่านลอย FBC ซึ่งถ่านลอย FBC มีปริมาณอะลูมินาเป็นส่วนประกอบในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงทำการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสม โดยวิธีนำถ่านลอย FBC ผสมสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) เพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมได้ สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (CAH) และอะลูมิโนซิลิเกต โดยควบคุมการเกิดเอทิงไคต์ เพื่อให้อิโพลีเมอร์ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีต อีกทั้งยังเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์อีกด้วย

2. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีผลต่อการเกิดเอทิงไคต์ในอิโพลีเมอร์จากถ่านลอย FBC และปริมาณ Al(OH)₃ ที่เหมาะสมที่ลดการเกิดเอทิงไคต์

3. การทดลอง

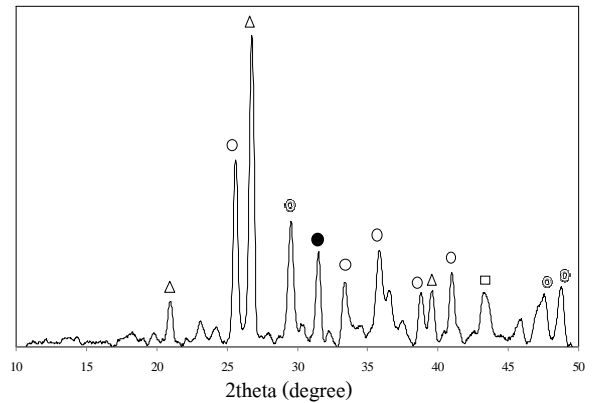
3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตอิโพลีเมอร์ ได้แก่ ถ่านลอย FBC ที่ได้จากการเผาในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิประมาณ 900 °C มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 28.0 ไมครอน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Malvern Mastersizer S วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของถ่านลอยด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าองค์ประกอบหลักของถ่านลอยคือ ซิลิกา (SiO₂) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และสารประกอบพวกซัลเฟต เนื่องจากในกระบวนการเผาแบบ FBC มีการพ่นปูน

ขาวเพื่อไปจับกับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ทำให้ถ้ำลอย FBC มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์และสารประกอบซัลเฟตปริมาณมาก แต่มีปริมาณของอะลูมินา (Al₂O₃) ต่ำ และมีสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบพิกเซลของผลึกเป็นจำนวนมาก แสดงถึงความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่ต่ำของถ้ำลอย FBC งานวิจัยนี้ได้ผสมผง Al(OH)₃ เพื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมในถ้ำลอย ส่วนสารละลายประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ที่มีปริมาณ SiO₂ ร้อยละ 31 และ Na₂O ร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ละลายได้ (Dissolved silica) และช่วยในการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนี้ ใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10, 12, 15 และ 18 โมลาร์ (M) เพื่อทำหน้าที่ชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนจากถ้ำลอย และใช้ทรายแม่น้ำคัดขนาด ร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (รูเปิด 36 mm) เพื่อผสมเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ้ำลอย

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



รูปที่ 1 XRD ของถ้ำลอย FBC

Δ = SiO₂, ○ = CaSO₄, ● = CaO, □ = Fe₃O₄, ⊙ = CaCO₃

3.2 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์

การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสม NaOH ในความเข้มข้นต่างๆ

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ทำโดยผสมถ้ำลอย FBC กับสารละลาย Na₂SiO₃ และ NaOH เข้มข้น 10 12 15 และ 18 M ที่อัตราส่วนของแข็งต่อสารทั้งหมด (S/T) เท่ากับ 0.4 ให้เข้ากัน เติลงแบบเพสต์พลาสติก ขนาด 2x2x2 ลบ.นิ้ว หุ้มด้วยพลาสติกใส เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าอย่างรวดเร็วก่อนนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นแกะตัวอย่าง และเก็บในถุงพลาสติกก่อนนำไปบ่มในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25±3 °C จนครบอายุทดสอบ

นอกจากนี้ ทำการแทนที่ถ้ำลอย FBC ด้วยผง Al(OH)₃ ที่ร้อยละ 2.5 และ 5 โดยน้ำหนักของถ้ำลอย เพื่อเพิ่มปริมาณสารประกอบอะลูมิเนียมแก่ส่วนผสม โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของ NaOH จากชุดข้อมูลแรกที่ไม่เกิดเอททริงไกต์ ทำการบ่มจีโอโพลิเมอร์ที่ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และที่ 25±3 °C ต่อจนครบอายุทดสอบ ก่อนนำไปทดสอบสมบัติต่างๆ ตารางที่ 2 แสดงส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์

ส่วนการเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เตรียมเหมือนจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่เติมทรายในขั้นตอนสุดท้ายของการผสม ในอัตราส่วนทรายต่ออนุภาคของแข็ง เท่ากับ 2.0 และทำการบ่มเช่นเดียวกับวิธีที่กล่าวข้างต้น และทำการทดสอบค่ากำลังอัดทุกอายุการบ่ม

ตารางที่ 2 ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC (S/T = 0.4)

ส่วนผสม (กรัม)	100FBC	97.5FBC	95FBC
เถ้าลอย FBC	40	39	38
Al(OH) ₃	-	1	2
Na ₂ SiO ₃	40	40	40
NaOH	20	20	20
สภาวะ	0% Al(OH) ₃ และ 10 12 15 และ 18 M NaOH	2.5% Al(OH) ₃ และ 15 M NaOH	5% Al(OH) ₃ และ 15 M NaOH

3.4 การศึกษากำลั้งอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

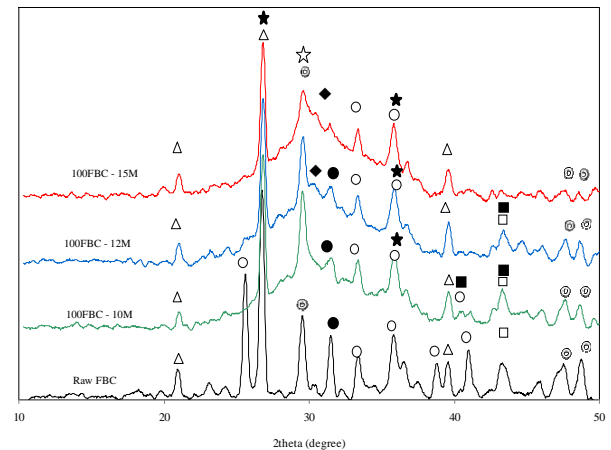
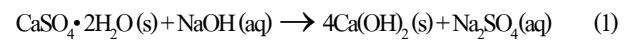
นำจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมไว้ทดสอบกำลั้งอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยค่ากำลั้งอัดจะเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 3 ตัวอย่าง

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 สันฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

สันฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เตรียมจากสารละลาย NaOH ความเข้มข้นต่างกัน ด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 2 โดยพบพีคฐานกว้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ 25-35° 2θ แสดงความเป็นอสัณฐานของจีโอโพลิเมอร์ที่มากกว่าเถ้าลอย FBC และยังมีส่วนที่เป็นผลึกอยู่ จีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบกึ่งผลึก (Semicrystalline) โดยปฏิกิริยาระหว่างเบสกับเถ้าลอย FBC ในจีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบใหม่ที่มีสมบัติเปลี่ยนไป และการเกิดพีคฐานกว้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ โดยสารที่พบในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ประกอบด้วยสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) แคลเซียมซิลิเกต แคลเซียมอะลูมิเนต อะลูมิโนซิลิเกต และเอทริงไต์ แต่ไม่พบสารดังกล่าวในเถ้าลอย FBC แสดงถึงการเกิดสารใหม่เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันและปฏิกิริยาปอซโซลาน นอกจากนี้ จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 15 M NaOH จะไม่พบเอทริงไต์ (ที่ประมาณ 43° 2θ) เนื่องจากสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น

สูงจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) แทนการทำปฏิกิริยากับสารประกอบอะลูมิเนียมที่ทำให้เกิดเอทริงไต์ ดังสมการที่ 1 ซึ่งเถ้าลอยมีสารประกอบซัลเฟตปริมาณมาก สามารถทำให้เกิดเอทริงไต์ได้ และมีผลต่อการขยายตัวของจีโอโพลิเมอร์ที่แข็งตัวแล้วได้ [5]

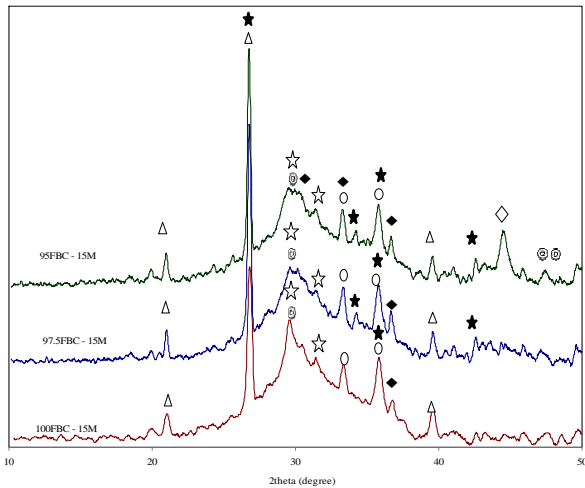


รูปที่ 2 XRD ของเถ้าลอย FBC และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก NaOH ความเข้มข้นต่างๆ

△ = SiO₂, ○ = CaSO₄, ● = CaO, □ = Fe₃O₄, ⊙ = CaCO₃, ■ = Ettringite, ☆ = Calcium silicate, ★ = Aluminosilicate, ◆ = Calcium aluminate

ดังนั้นจึงเลือก 15 M NaOH มาผสมกับ Al(OH)₃ เพื่อผลิตเป็นจีโอโพลิเมอร์ โดยสันฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสม Al(OH)₃ ร้อยละ 2.5 และ 5 ของปริมาณเถ้าลอย FBC แสดงในรูปที่ 3

จากรูปที่ 3 ไม่พบการเกิดเอทริงไต์ในจีโอโพลิเมอร์ที่ผสม Al(OH)₃ แต่พบสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมอะลูมิเนต ซึ่งเป็นสารที่ทำให้กำลั้งอัดจีโอโพลิเมอร์ตามอายุการบ่ม อย่างไรก็ตาม การผสม Al(OH)₃ ร้อยละ 5 ทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนต ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง 15 M NaOH และ Al(OH)₃ ที่มากเกินไป ซึ่งสารประกอบดังกล่าวเป็นสารซีโอไลท์ [6] ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับแรงได้น้อยลง



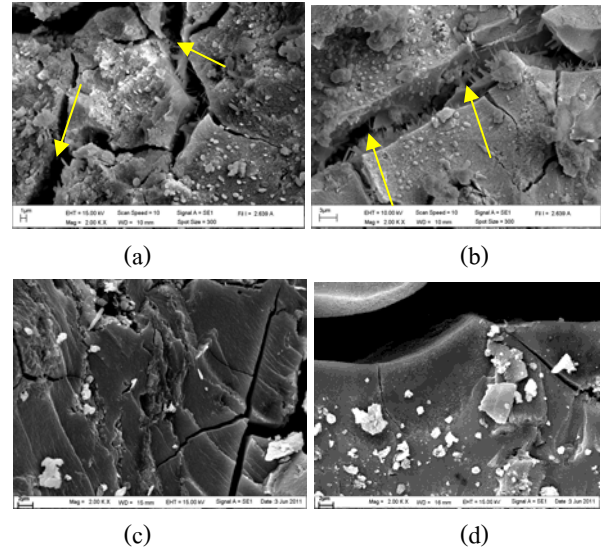
รูปที่ 3 XRD ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $Al(OH)_3$ ที่เตรียมจาก 15M NaOH

Δ = SiO_2 , \circ = $CaSO_4$, \bullet = CaO , \otimes = $CaCO_3$,

\blacksquare = Ettringite, \star = Calcium silicate, \blackstar = Aluminosilicate, \blacklozenge = Calcium aluminate, \blacklozenge = Sodium aluminate

4.2 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

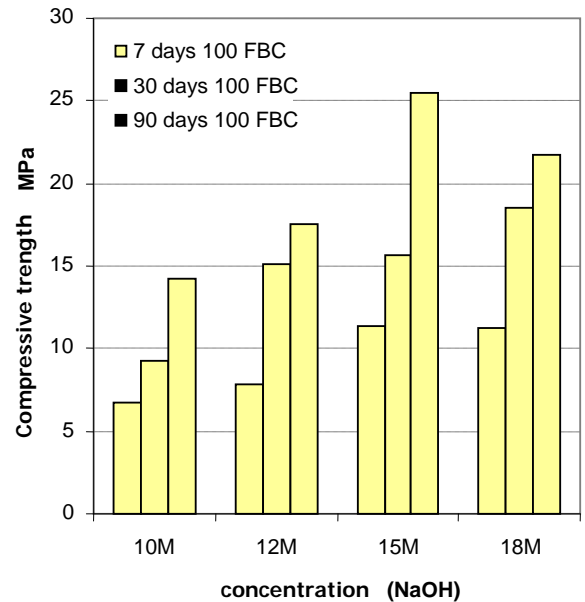
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์และพบนุภาคของเถ้าลอย FBC ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเนื้อจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer matrix) และรอยแตก โดยพบเอทริงไทด์รูปร่างเข็มตามรอยแตกหรือช่องว่างของพื้นผิวของจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 10M และ 12M NaOH ดังแสดงลูกศรชี้ในรูปที่ 4 a และ b ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ที่พบฟิสิกของเอทริงไทด์ แต่จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 15 M NaOH ไม่พบเอทริงไทด์ตามรอยแตก เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลเฟต ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $Al(OH)_3$ ร้อยละ 2.5 และ 5 ที่เตรียมจาก 15 M NaOH ไม่พบเอทริงไทด์ตามรอยแตกหรือช่องว่างของโครงสร้างเช่นกัน



รูปที่ 4 โครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอย FBC เมื่อแปรผันความเข้มข้นของ NaOH (a) 100FBC-10 M NaOH, (b) 100FBC-12 M NaOH, and (c) 100FBC-15 M NaOH, (d) 97.5FBC – 15 M NaOH

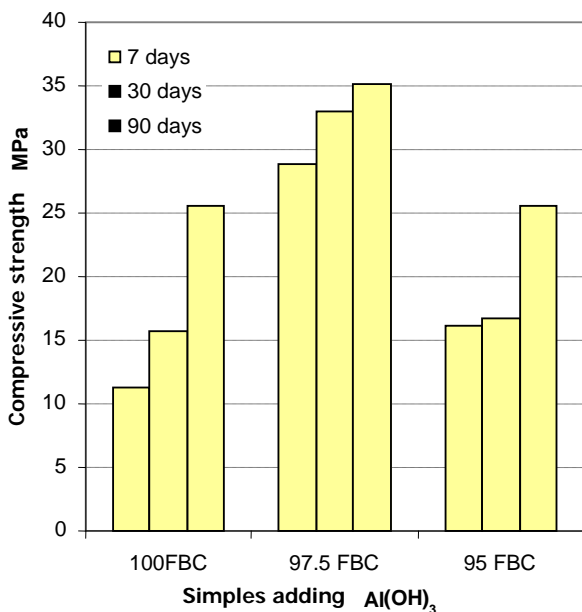
4.3 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย FBC ล้วนแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย FBC ที่อายุ 7 30 และ 90 วัน

จีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 90 วันให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์ต้องการระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ เนื่องจากเถ้าลอย FBC มีปริมาณแคลเซียมในเถ้าอยู่ในปริมาณมาก เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซilikเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถเกิดเป็นสารประกอบ CSH ซึ่งสารนี้จะให้กำลังอัดแก่จีโอโพลิเมอร์ ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อความเป็นเบสมากขึ้น หรือความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาได้เป็น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาในเถ้าลอย FBC เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้



รูปที่ 6 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่อายุ 7 30 และ 90 วัน

นอกจากนี้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากเถ้าลอย FBC มีมากขึ้น เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นได้ดียิ่งขึ้น ทำให้มีซิลิกอนไอออนและอะลูมิเนียมไอออนรวมเป็นสายโซ่จี

โอโพลิเมอร์ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดดีขึ้นด้วย [7] อย่างไรก็ตาม การใช้สารละลาย 18 M NaOH ให้ค่ากำลังอัดลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความหนืดของสารละลายที่มากขึ้น ทำให้สารละลาย NaOH เกิดการตกผลึกได้ และเกิดเจลที่ขัดขวางการชะของซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนได้ [7]

เมื่อผสม $\text{Al}(\text{OH})_3$ ในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ส่งผลด้านกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า $\text{Al}(\text{OH})_3$ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ได้เติม $\text{Al}(\text{OH})_3$ จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $\text{Al}(\text{OH})_3$ ร้อยละ 2.5 ที่อายุ 90 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงสุด 35 เมกะปาสกาล ซึ่งอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับซิลิกาภายใต้สภาวะเบส ได้เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิกเกต และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมได้สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนต ซึ่งสารทั้งสองสามารถเสริมแรงให้แก่จีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $\text{Al}(\text{OH})_3$ ร้อยละ 5 จะได้ค่ากำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากเกิดสารประกอบซิลิเกต พวกโซเดียมอะลูมิเนต ดังแสดงโดยผล XRD

5. สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH มีผลต่อการเกิดเอททริงไคต์ในจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC โดยการใช้ 15 M NaOH ไม่พบการเกิดเอททริงไคต์ เนื่องจากสารประกอบแคลเซียมซัลเฟตถูกเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังอัดได้ดีขึ้น ส่วนการผสมสารประกอบ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่ร้อยละ 2.5 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นกว่า เนื่องจากการเกิดสารประกอบอะลูมิโนซิลิกเกตและแคลเซียมอะลูมิเนต โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 35 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] U. Rattanasak, "Geopolymeric material", Civil Engineering Magazine 18(5), 2006, pp. 55-60. (in Thai)
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] B.E. Sheet, and S. Kwan, "Control of ettringite swelling". Combustion Byproducts Recycling Consortium Ashlines. 4, 2003. pp. 1-10.
- [6] M. Inada, H. Tsujimoto, Y. Eguchi, N. Enomoto and J. Hojo, "Microwave-assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process" Fuel 84, 2005, pp. 1482-1486.
- [7] U. Rattanasak and P. Chindapasirt, "Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer", Minerals Engineering 22, 2009, pp. 1073-1078.