

Output ที่ได้จากโครงการ

ผลงานบางส่วนได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการที่มีผู้ทรงคุณวุฒิร่วมกลั่นกรอง (Peer Review)

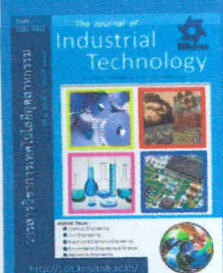
1. เรื่อง “การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบอะลูมิเนียมต่อการเกิดเอททริงไคต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยกระบวนการเผาถ่านหินแบบฟลูอิดไดซ์เบด” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 8 (2555) ฉบับที่ 3, หน้า 1-8.

2. เรื่อง “Microstructure of alkali-activated FBC fly ash composites with $\text{Al}(\text{OH})_3$ and silica fume” World Academy of Science, Engineering and technology 79, 2013, 1467-1470.



- หน้าปก
- บทความวิชาการ
- บทความวิชาการ
- สารบัญวิชาการ
- คำแนะนำในการส่งต้นฉบับและค่าตอบแทน
- ติดต่อ
- ค้นพบบทความ

Impact Factor
0.148 in 2013
ISSN: 1686-9869



Volume 1 (since 18 August 2011)

www.hirtot.com

www.hirtot.com

www.hirtot.com

www.hirtot.com

www.hirtot.com

วารสารวิศวกรรมเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปีที่ 8 (2555) ฉบับที่ 3

บทความวิจัย

การศึกษาผลของอุณหภูมิของสารละลายไฮดรอกไซด์และสารประกอบอะมิโนที่มีต่อการเกิดเอเทริงไคด์ในวัสดุอีพอกซีโตนีออร์จากค่าลดอุณหภูมิการพ่นขึ้นบนแบบไดอิเล็กตริก

ศิวานันท์ ไทยวิญญูเจริญ และอุบลรัตน์ รัตนศักดิ์

การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาที่คิดค้นขึ้นเพื่อทำอากาศร้อนในการอบแห้งข้าวสุก ข้าวสุก รังสีอินฟราเรด เกณฑ์ของเสถียรภาพ ความชื้น และ ปริมาณข้าวสุก

การออกแบบและพัฒนาระบบค้นหาข้อมูลจราจรทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธี Map Reduce บนกรอบการทำงานของ Hadoop

ชูพันธุ์ รัตนโกศล

Effect of the sludge recirculation rate on the performances of a two-stage anoxic-submerged membrane bioreactor (A-SMBR) for the treatment of seafood wastewater

Pornpip Choksuechart Sridang Jorge Lobos and Chansongglod Kaiman

การสร้างภาพเห็นผิวสัมผัสด้วยเทคนิคการสะท้อนของแสงเลเซอร์

สราวุธ แจ่มดี ปราโมทย์ วาดเขียน และ ชีรสุภา โกนิยากรณ์

ผลของระยะเวลาต่อการรับแรงอัดของซีเมนต์โพทซีเมอร์นำคาร์บอนจากของเสียรีไซเคิล

เพชรพร เขาวงกตเจริญ และ ชลิตา วิสมหมาย

Determination Model of Phase-Change Correction for High Precision Gauge Block Calibration

Pawat Phuaknoi Samana Phiangbangyang Jariya Buajarem and Anusorn Tonmuanwai

สมบัติทางกลและกลไกของพลาสติก PLA ผสมผงอนุภาคนาโนเคลย์

อโพรพรณ รัตนพันธ์

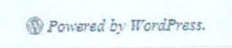
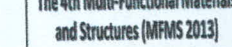
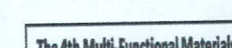
บทความวิชาการ

From Optically Pumped Molecular Lasers to Multi-Frequency Beam Splitters

Amarin Ratanavis

แนวทางสำหรับการปรับปรุงคุณภาพหินแกรนิตด้วยเทคนิค "NP & P Separation"

ศิริวัฒน์ ศิริลักษณ์



การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารประกอบ อะลูมิเนียมต่อการเกิดเอททรีนไกต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยกระบวนการเผาถ่านหิน แบบฟลูอิดไคซ์เบด

ศิวานันท์ ไทยวิญญูเจริญ และอุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์*

บทคัดย่อ

เถ้าลอยจากกระบวนการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (FBC) มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) สูง เนื่องจากในขั้นตอนการเผามีการพ่นหินปูนเข้าไปเพื่อจับก๊าซ SO_x ได้เป็นสารประกอบแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับอะลูมินาในเถ้าลอย FBC ในสภาวะเบสเกิดเป็นสารประกอบแคลเซียมซัลโฟอะลูมิเนต (หรือเอททรีนไกต์) ได้ งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการเกิดเอททรีนไกต์ในวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC นอกจากนี้ ยังปรับปรุงสมบัติของจีโอโพลิเมอร์โดยการเพิ่มสารประกอบอะลูมิเนียม โดยการผสมเถ้าลอย FBC กับสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเปลี่ยนสารประกอบแคลเซียมในเถ้าลอยเป็นสารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรตและอะลูมิโนซิลิเกต ซึ่งให้กำลังแก่วัสดุจีโอโพลิเมอร์ ซึ่งพบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 15 โมลาร์ ไม่พบการเกิดเอททรีนไกต์ และการใช้สารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ไม่เกินร้อยละ 2.5 ของปริมาณเถ้าลอยในการผลิตจีโอโพลิเมอร์สามารถให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันเท่ากับ 35 เมกกะปาสกาล ในขณะที่การเพิ่มสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เป็นร้อยละ 5 ทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนตซึ่งมีผลต่อการค่ากำลังอัดที่ลดลง

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์, เถ้าลอยฟลูอิดไคซ์เบด, เอททรีนไกต์, อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

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

Siwanant Thaiwitcharoen 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 วัสดุอิโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุใหม่ที่มีสมบัติการยึดประสานหรือสมบัติคล้ายสารซีเมนต์ ที่สามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งที่มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบ เช่น เถ้าถ่านหินดินขาวเผา เป็นต้น โดยผสมกับสารละลายอัลคาไลน์ที่ทำให้ได้สารประกอบที่มีสมบัติเป็นวัสดุประสานโดยที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม ทำให้วัสดุอิโอโพลิเมอร์มีสมบัติคล้ายคอนกรีต หรือที่เรียกว่า “สารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต” [1, 2]

เถ้าลอยจากการเผาถ่านหินแบบใช้ถ่านหินบด (Pulverized coal combustion, PCC) ใช้กันมากในการผสมกับปูนซีเมนต์ หรือผลิตวัสดุอิโอโพลิเมอร์ เนื่องจากเถ้าลอยชนิดนี้มีสมบัติเป็นสารปอซโซลาน ที่ปริมาณร้อยละ 70 – 90 ซึ่งมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากกว่าเถ้าลอยจากการเผาแบบอื่นๆ เช่น เถ้าลอยที่ได้จากการเผาแบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed combustion, FBC) เนื่องจากการเผาแบบ PCC จะเผาที่ความร้อนปานกลาง อยู่ในช่วง 1100 – 1400 °C ทำให้ได้เถ้าลอยที่มีสมบัติที่ดีต่อการทำปฏิกิริยา คือมีความเป็นอสัณฐานสูง ในขณะที่การเผาแบบ FBC เป็นการเผาแบบความร้อนต่ำ คือช่วงอุณหภูมิการเผาต่ำกว่า 900 °C เถ้าลอยที่ได้จึงมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน และมีความเป็นผลึกค่อนข้างสูง เนื่องจากอุณหภูมิในการเผาถ่านหินไม่สูงพอ จึงไม่นิยมนำเถ้าลอย FBC มาใช้เป็นสารปอซโซลาน [1] แต่วิธีการเผาแบบ FBC นี้เริ่มมีการใช้มากขึ้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าขนาดเล็กในโรงงานต่างๆ และเป็นเทคโนโลยีสะอาดในการเผาถ่านหินเมื่อเทียบกับการเผาประเภทอื่นๆ เนื่องจากมีการพ่นปูนขาวเข้าไปจับกับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_x) ทำให้ปริมาณกำมะถันที่ปล่อยออกมาลดลงได้ถึงร้อยละ 90 ทำให้เถ้าลอย FBC นี้มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ หรือหินปูนสูง ไม่เหมาะในการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์เพื่อผลิตคอนกรีต ซึ่งในแต่ละปีจะมีเถ้าลอย FBC ที่ต้องกำจัดเป็นจำนวนมาก [3, 4]

เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์เถ้าลอย FBC ให้มากขึ้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาสมบัติของวัสดุอิโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ใดๆก็ตาม เถ้าลอย FBC มีปริมาณแคลเซียมซัลเฟต (CaSO₄) หรือ ยิบซัมปริมาณมาก ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างหินปูนกับก๊าซซัลเฟอร์ออกไซด์ จึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับอะลูมินาในเถ้าลอย FBC เกิดเป็นเอทิงไกต์ได้ ซึ่งทำให้วัสดุอิโอโพลิเมอร์ไม่มีความเสถียรเชิงปริมาตร ดังนั้นต้องหาแนวทางควบคุมการเกิดเอทิงไกต์

นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังศึกษาหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพวัสดุอิโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ซึ่งเถ้าลอย FBC มีปริมาณอะลูมินาเป็นส่วนประกอบในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงทำการเพิ่มปริมาณอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ในส่วนผสม โดยวิธีนำเถ้าลอย FBC ผสมสารประกอบอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Al(OH)₃) เพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบแคลเซียมได้ สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (CAH) และอะลูมิโนซิลิเกต โดยควบคุมการเกิดเอทิงไกต์ เพื่อให้อิโอโพลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกับคอนกรีต อีกทั้งยังเพิ่มศักยภาพการใช้ประโยชน์จากของเสียในเชิงพาณิชย์อีกด้วย

2. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่มีผลต่อการเกิดเอทิงไกต์ในอิโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC และปริมาณ Al(OH)₃ ที่เหมาะสมที่ลดการเกิดเอทิงไกต์

3. การทดลอง

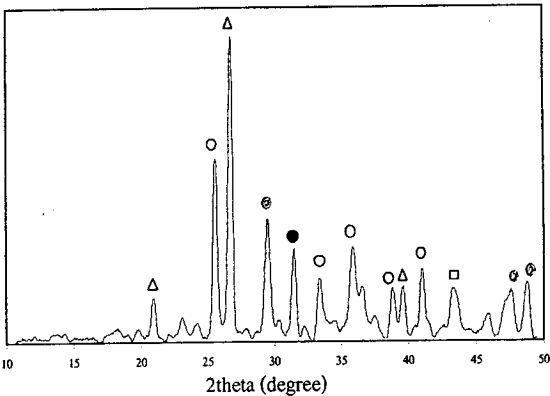
3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตอิโอโพลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอย FBC ที่ได้จากการเผาในเตาเผาฟลูอิดไคซ์เบด ที่อุณหภูมิประมาณ 900 °C มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 28.0 ไมครอน ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Malvern Mastersizer S วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าลอยคือ ซิลิกา (SiO₂) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และสารประกอบพวกซัลเฟต เนื่องจากในกระบวนการเผาแบบ FBC มีการพ่นปูน

ขาวเพื่อไปจับกับก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) ทำให้ละลาย FBC มีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์และสารประกอบซัลเฟตปริมาณมาก แต่มีปริมาณของอะลูมินา (Al₂O₃) ต่ำ และมีสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งพบฟิสิกส์ของผลึกเป็นจำนวนมาก แสดงถึงความว่องไวต่อปฏิกิริยาที่ต่ำของถ่านล้อย FBC งานวิจัยนี้ได้ผสมผง Al(OH)₃ เพื่อเพิ่มปริมาณของอะลูมิเนียมในถ่านล้อย ส่วนสารละลายประกอบด้วย สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) ที่มีปริมาณ SiO₂ ร้อยละ 31 และ Na₂O ร้อยละ 9 โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มปริมาณซิลิกาที่ละลายได้ (Dissolved silica) และช่วยในการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์ นอกจากนี้ใช้สารละลาย NaOH ความเข้มข้น 10,12,15 และ 18 โมลาร์ (M) เพื่อทำหน้าที่ชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนจากถ่านล้อย และใช้ทรายแม่น้ำคัดขนาด ร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 (รูเปิด 36 mm) เพื่อผสมเป็นจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของถ่านล้อย

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
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	0.8
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂)	15.0
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	1.0
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (ไมครอน)	28.0



รูปที่ 1 XRD ของถ่านล้อย FBC
Δ = SiO₂, O = CaSO₄, ● = CaO, □ = Fe₂O₃, ⊙ = CaCO₃

3.2 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์

การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสม NaOH ในความเข้มข้นต่างๆ

จีโอโพลิเมอร์เพสต์ทำโดยผสมถ่านล้อย 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 ทำการแทนที่ถ่านล้อย FBC ด้วยผง Al(OH)₃ ที่ร้อยละ 2.5 และ 5 โดยน้ำหนักของถ่านล้อย เพื่อเพิ่มปริมาณสารประกอบอะลูมิเนียมแก่ส่วนผสม โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของ NaOH จากชุดข้อมูลแรกที่ไม่เกิดเอททริงไคต์ 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

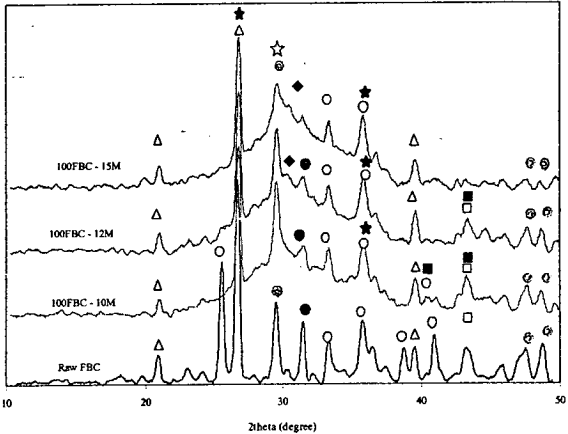
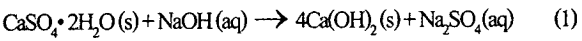
นำจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เตรียมไว้ทดสอบกำลั้งอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยค่ากำลั้งอัดจะเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ 3 ตัวอย่าง

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 สันฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

สันฐานวิทยาของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่เตรียมจากสารละลาย NaOH ความเข้มข้นต่างกัน ด้วยเทคนิค XRD แสดงในรูปที่ 2 โดยพบพื้นฐานกว้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ 25-35° 2θ แสดงความเป็นอสัณฐานของจีโอโพลิเมอร์ที่มากกว่าเถ้าลอย FBC และยังมีส่วนที่เป็นผลึกอยู่ จีโอโพลิเมอร์จึงเป็นสารประกอบกึ่งผลึก (Semicrystalline) โดยปฏิกิริยาระหว่างเบสกับเถ้าลอย FBC ในจีโอโพลิเมอร์ทำให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นสารประกอบใหม่ที่มีสมบัติเปลี่ยนไป และการเกิดพื้นฐานกว้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในจีโอโพลิเมอร์ 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]

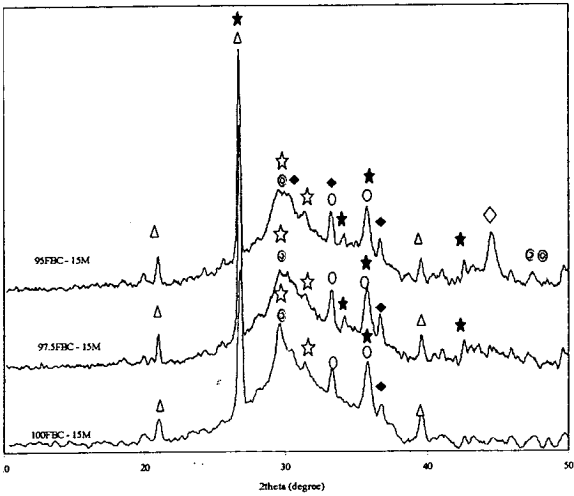


รูปที่ 2 XRD ของเถ้าลอย FBC และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก NaOH ความเข้มข้นต่างๆ

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

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

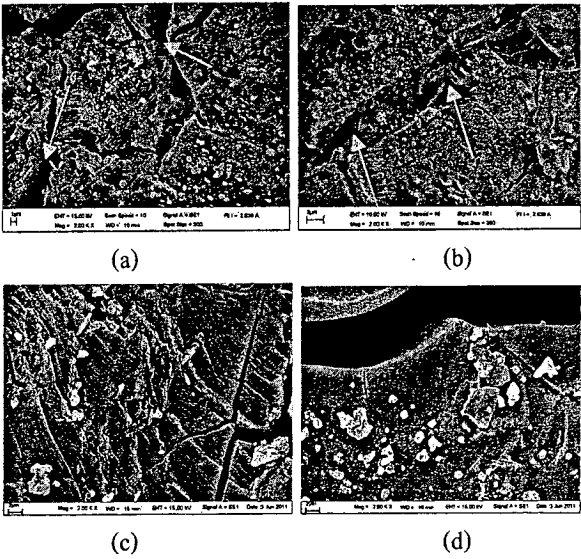
จากรูปที่ 3 ไม่พบการเกิดเอทริงไต์ในจีโอโพลิเมอร์ที่ผสม Al(OH)₃ แต่พบสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตและแคลเซียมอะลูมิเนต ซึ่งเป็นสารที่ทำให้กำลั้งอัดจีโอโพลิเมอร์ตามอายุการบ่ม อย่างไรก็ตาม การผสม Al(OH)₃ ร้อยละ 5 ทำให้เกิดสารประกอบโซเดียมอะลูมิเนต ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง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



รูปที่ 3 XRD ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย FBC ที่ผสม Al(OH)_3 ที่เตรียมจาก 15M NaOH
 Δ = SiO_2 , $\circ$ = CaSO_4 , $\bullet$ = CaO , $\odot$ = CaCO_3 ,
 $\blacksquare$ = Ettringite, $\star$ = Calcium silicate, $\star$ = Alumino silicate, $\blacklozenge$ = Calcium aluminate, $\diamond$ = Sodium aluminate

2. โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์

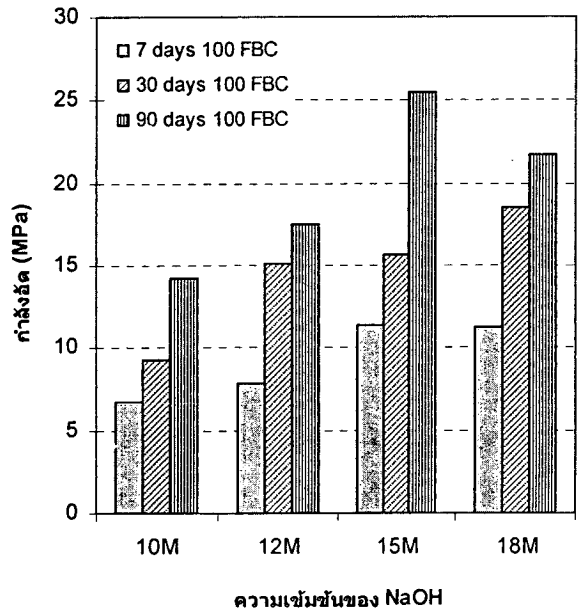
รูปที่ 4 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์และพบนุภาคของเถ้าลอย FBC ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเนื้อจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer matrix) และรอยแตก โดยพบเอทริงไต์รูปร่างเข็มตามรอยแตกหรือช่องว่างของพื้นผิวของโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 10M และ 12M NaOH ดังแสดงภาพในรูปที่ 4 a และ b ซึ่งสอดคล้องกับผลของ XRD ที่พบค่าของเอทริงไต์แต่จีโอโพลิเมอร์ที่เตรียมจาก 15 M NaOH ไม่พบเอทริงไต์ตามรอยแตกเนื่องจากสารละลายซิลิก้าไฮดรอกไซด์มีความเข้มข้นมากขึ้นจะทำปฏิกิริยากับซิลิก้าไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิกา และอะลูมินาจากเถ้าลอยเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮดรต (CAH) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาออสโซลาน จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม Al(OH)_3 ร้อยละ 2.5 และ 5 ที่เตรียมจาก 15 M NaOH ไม่พบเอทริงไต์ตามรอยแตกหรือช่องว่างของโครงสร้างเช่นกัน



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

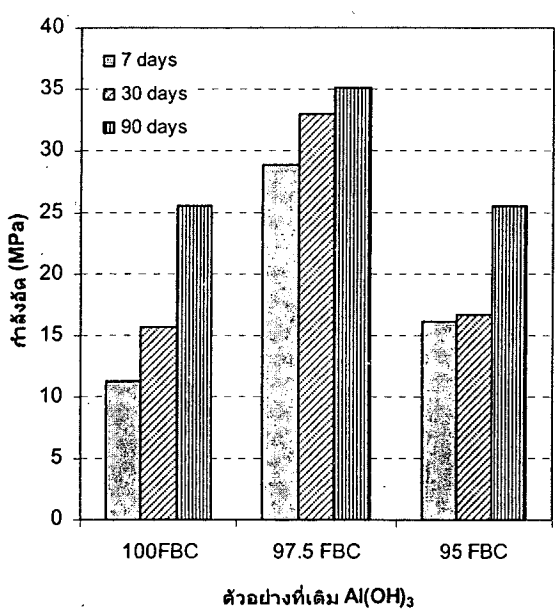
4.3 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย FBC ล้วนแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์จากเถ้าลอย FBC ที่อายุ 7 30 และ 90 วัน

จีโอโพลิเมอร์ที่อายุ 90 วันให้ค่ากำลังอัดที่สูงที่สุด เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์ต้องการระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาให้สมบูรณ์ เนื่องจากถ้ำลอม FBC มีปริมาณแคลเซียมในถ้ำลอมอยู่ในปริมาณมาก เมื่อทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถเกิดเป็นสารประกอบ CSH ซึ่งสารนี้จะให้กำลังอัดแก่จีโอโพลิเมอร์ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการบ่ม และความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นด้วยเช่นกัน เมื่อความเป็นเบสมากขึ้น หรือความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เพิ่มขึ้นนั้น จะส่งผลให้การเกิดปฏิกิริยาได้เป็น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ปริมาณมากขึ้น ซึ่งสารดังกล่าวสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิกาในถ้ำลอม FBC เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้



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

นอกจากนี้สารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมจากถ้ำลอม FBC มีมากขึ้น เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์เร็วขึ้นได้ขึ้น ทำให้มีซิลิกอนไอออนและอะลูมิเนียมไอออนรวมเป็นสายโซ่จีโอโพลิเมอร์ส่งผลให้ความสามารถในการรับกำลังอัดดีขึ้นด้วย [7] อย่างไรก็ตาม การใช้สารละลาย 18 M NaOH ให้ค่า

กำลังอัดลดลง ซึ่งอาจเกิดจากความหนืดของสารละลายที่มากขึ้น ทำให้สารละลาย NaOH เกิดการตกผลึกได้ และเกิดเจลที่ขัดขวางการชะของซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนได้ [7]

เมื่อผสม $\text{Al}(\text{OH})_3$ ในส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอม FBC ส่งผลด้านกำลังอัด ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่า $\text{Al}(\text{OH})_3$ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านกำลังแก่จีโอโพลิเมอร์ ทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ไม่ได้เติม $\text{Al}(\text{OH})_3$ จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $\text{Al}(\text{OH})_3$ ร้อยละ 2.5 ที่อายุ 90 วัน ให้ค่ากำลังอัดสูงที่สุด 35 เมกะปาสกาล ซึ่งอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับซิลิกาภายใต้สภาวะเบส ได้เป็นสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต และทำปฏิกิริยากับแคลเซียมได้สารประกอบแคลเซียมอะลูมิเนต ซึ่งสารทั้งสองสามารถเสริมแรงให้แก่จีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์ที่ผสม $\text{Al}(\text{OH})_3$ ร้อยละ 5 จะให้ค่ากำลังอัดที่ลดลง เนื่องจากเกิดสารประกอบซิลิโกลต์ พวกริโซมอะลูมิเนต ดังแสดงโดยผล XRD

5. สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยพบว่า ความเข้มข้นของ NaOH มีผลต่อการเกิดเอททริงไคต์ในจีโอโพลิเมอร์จากถ้ำลอม FBC โดยการใช้ 15 M NaOH ไม่พบการเกิดเอททริงไคต์ เนื่องจากสารประกอบแคลเซียมซิลิเกตถูกเปลี่ยนเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาปอซโซลาน ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังอัดได้ดีขึ้น ส่วนการผสมสารประกอบ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ที่ร้อยละ 2.5 ให้ค่ากำลังอัดที่สูงขึ้นกว่า เนื่องจากการเกิดสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตและแคลเซียมอะลูมิเนต โดยค่ากำลังอัดที่อายุ 90 วันมีค่าเท่ากับ 35 เมกะปาสกาล

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ และเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) มหาวิทยาลัยบูรพา ประจำปีงบประมาณ 2556

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] BE. 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.

Microstructure of Alkali-Activated FBC Fly Ash Composites with $\text{Al}(\text{OH})_3$ and Silica Fume

Ubolluk Rattanasak, Supranee Kaewpirom, Siwanant Thaiwittcharoen and Pattanapong Paisitsrisawat

Abstract—This research aimed to improve the microstructure of alkali-activated FBC fly ash composites, or geopolymer, by blending it with aluminium hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$) and silica fume (SF). Blended powder was mixed with sodium silicate (Na_2SiO_3) and 15M sodium hydroxide (NaOH) with Na_2SiO_3 -to-NaOH ratio of 2. Microstructure of composites was studied by Scanning electron microscope (SEM). X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) analyses were also performed. The results showed that aluminosilicate (Al_2SiO_5) and calciumsilicate (CaSiO_4) were detected on XRD patterns owing to the copolymerization reaction in composites. $\text{Al}(\text{OH})_3$ and SF helped to improve the microstructure of composites showing dense and homogeneous matrix. A shift in Si-O stretching vibration replied the reaction in the composites.

Keywords—Alkali-activated FBC fly ash, Aluminium hydroxide, microstructure, Silica fume.

I. INTRODUCTION

Fly ash is an industrial waste normally used to replace Portland cement for concrete production. Pulverized coal combustion (PCC) fly ash can be used owing to high burning temperature ($>1200^\circ\text{C}$) and its high glassy phases. However, it can only partially replace Portland cement since SiO_2 and Al_2O_3 in fly ash still need $\text{Ca}(\text{OH})_2$ from Portland cement hydration reaction for its pozzolanic reaction to produce calcium silicate hydrate and calcium aluminate hydrate. Recently, fluidized bed combustion (FBC) fly ash is increasing since FBC is an environmentally-friendly technique for coal combustion process. With low burning temperature of $800\text{--}1000^\circ\text{C}$, FBC fly ash has low glassy phase and possess very low pozzolanic property with high content of sulfur and calcium compound [1, 2]. Therefore, FBC fly ash is less preferable in concrete mixture. This sulfur can react with aluminium compound (in FBC fly ash) leading to the ettringite formation. The growth of ettringite in hardened geopolymer can lead to a deleterious effect on mechanical properties of the material [3]. Alkali-activated fly ash, or geopolymer, are focused with increasing research efforts as the need to reduce global CO_2 emissions. Due to excellent mechanical strength and resistance attack by aggressive environments, these materials represent

an opportunity to simultaneously improve both environmental and engineering performance. PCC fly ash and metakaolin are the effective resource for geopolymer synthesis owing to its high reactivity than FBC fly ash.

Researchers reported that the FBC fly ash can be used as a source material for producing the alkali-activated FBC fly ash composites [4]–[6]. This composite is an aluminosilicate compound prepared by incorporating high alkaline and sodium silicate solutions under low heat curing. The composite can be used as cementitious binders and products with no high strength requirement, in addition to an effective method to recycle FBC fly ash [7]–[8].

Since the calcium compounds in FBC fly ash can react with aluminium and silicon compounds in FBC forming aluminosilicate and calcium-silicate in composite, therefore, this research added the external $\text{Al}(\text{OH})_3$ and silica fume (high amorphous SiO_2) into the mixture in order to increase the product and improve the chemical properties of the composites. Due to $\text{Al}(\text{OH})_3$ used, the ettringite formation in composites was controlled by using high concentration NaOH of 15 molar [9]. $\text{Al}(\text{OH})_3$ and silica fume should increase the reactivity of raw materials and react with calcium, aluminium and silicon compounds in FBC fly ash obtaining the additional products. This would result the composites in good microstructure and chemical properties.

Therefore, this research studied on the use of $\text{Al}(\text{OH})_3$ and silica fume in alkali-activated FBC fly ash. Microstructure and chemical reaction were focused.

II. EXPERIMENTAL PROCEDURE

A. Materials

Sub-bituminous FBC-fly ash was obtained from small power plant and used as a source material for composite synthesis. Chemical composition of this FBC fly ash determined by X-Ray fluorescence (XRF) is shown in Table I. FBC fly ash had quartz (SiO_2), alumina (Al_2O_3) as can be the starting material for the synthesis. High CaO content of 42.2 % was detected due to the addition of lime to absorb sulfur. This fly ash had the particle size (D50) of $28\text{ }\mu\text{m}$. It had high glassy phase owing to the low burning temperature of 900°C . Morphology of FBC fly ash was analyzed by X-ray diffraction (XRD) as shown in Fig. 1. $\text{Al}(\text{OH})_3$ and silica fume (SF) were also used as the additional source of aluminium and silicone compounds for composite synthesis. Sodium hydroxide (NaOH) pellet was dissolved with distilled water to provide 15

U. Rattanasak and S. Kaewpirom are with the Department of Chemistry, Center for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 20131, Thailand (phone: +66-38-103-066; fax: +66-38-103-494; e-mail: ubolluk@buu.ac.th).

S. Thaiwittcharoen and P. Paisitsrisawat were a graduate student of the Department of Chemistry, Faculty of Science, Burapha University, Chonburi 31, Thailand.

M NaOH solution. In addition, Na₂SiO₃ solution (30%wt SiO₂ and 9%wt Na₂O) was used as alkali activator.

TABLE I
CHEMICAL COMPOSITION OF FBC FLY ASH

Compositions	%wt
SiO ₂	21.5
Al ₂ O ₃	8.0
Fe ₃ O ₄	6.9
CaO	42.2
Na ₂ O	2.9
TiO ₂	2.4
MgO	0.8
SO ₃	1.8

TABLE II
MIX PROPORTIONS OF COMPOSITES (GRAMS)

Samples	FBC fly ash	Al(OH) ₃	SF	Na ₂ SiO ₃	15 M NaOH
Control	40	-	-	40	20
2.5Al	39	1	-	40	20
3.75SF	38.5	-	1.5	40	20
2.5Al_3.75SF	37.5	1	1.5	40	40

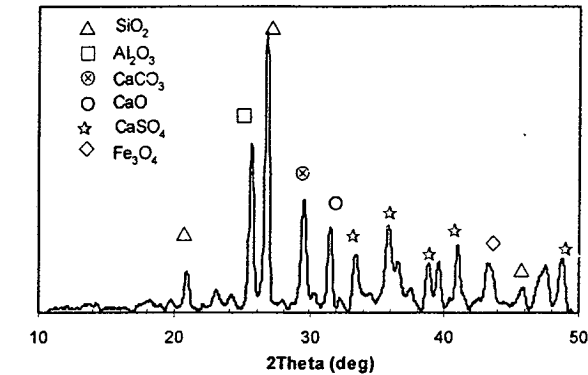


Fig. 1 XRD pattern of FBC fly ash

B. Composite Preparation

Al(OH)₃ and SF were used to replace FBC fly ash in mixture as shown in Table II. For preliminary study, percent replacements of 2.5%wt Al(OH)₃ and 3.75%wt SF were chosen owing to high strength gain of composites. All powdery materials were ground with ceramic ball mills (500 rpm) for 2 r resulting in the particles with average sizes in range of 5-7 μm. 100% FBC fly ash composite was used as the control. Blend powders were thoroughly mixed with 15 M NaOH and Na₂SiO₃ (Na₂SiO₃-to-NaOH mass ratio of 2) for 3 min before casting in plastic mold. Specimens were then removed the air bubble using vibrating machine for 10 sec and cured in 65°C-oven for 24 hr. Hardened specimens were kept in 25°C-hamber and tested the properties at the age of 30 days. SEM, XRD and FT-IR analyses were performed on the ground composites.

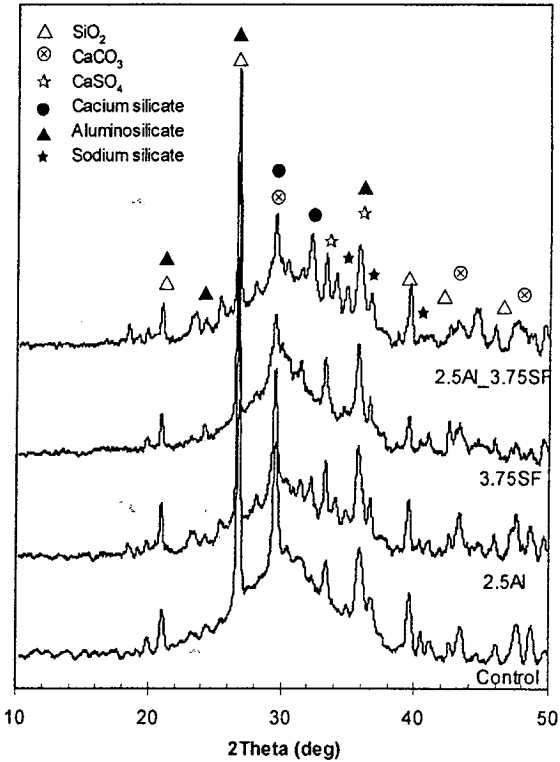


Fig. 2 XRD patterns of composites

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. XRD pattern

XRD pattern of composites are shown in Fig. 2. Numerous sharp peaks of crystalline phases were detected in the control and composites. Height of sharp peaks decrease with addition of Al(OH)₃ and SF, e.g. at 29° 2θ owing to the conversion of CaCO₃ to calcium silicate compound. In addition, calcium silicate can be found at 32° 2θ. Comparing with original FBC fly ash, the composites had broad peak from 24-38° 2θ with sharps peaks replying the conversion to semi-crystalline material during the geopolymerization process [6, 10]. Amorphous phases of composites resulted in the disorder of chemical structure. In addition to calcium silicate, aluminosilicate and sodium silicate compounds were found in the composites. Sodium silicate was occurred in the presence of high alkali concentration and amorphous silica (e.g. silica fume). It was highly detected in composite with both Al(OH)₃ and SF (2.5Al_3.75SF sample).

B. FT-IR spectra

FT-IR spectra of FBC fly ash and composites were recorded in wavenumber range of 3000-400 cm⁻¹ as shown in Fig. 3. In general, the absorption band was related to the vibration at a specific configuration of chemical bonding. The oxide

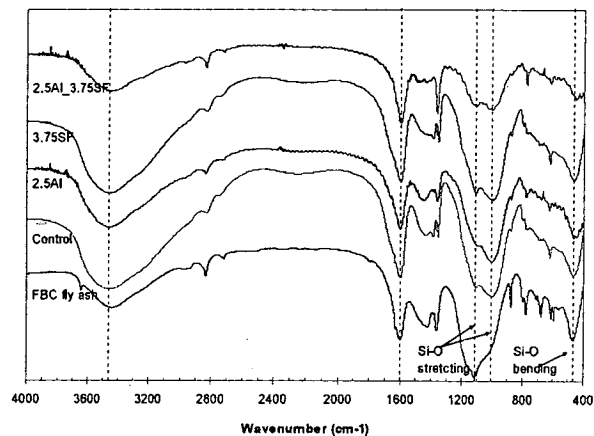


Fig. 3 FT-IR spectra of composites

compounds of Si and Al, which were the product of the reaction, were focused on the composites.

For Fig. 3, fly ash showed the distinct band near 460 cm^{-1} ascribing to the O-Si-O bending mode [11]. The Si-O-Si and Si-O-Al stretching vibration was detected at the wave number range of 1200-950 cm^{-1} . The Si-O-Si stretching vibration was more prominent than the O-Si-O bending mode. The vibrations assigned to bending (H-O-H) and stretching of (-OH) groups were observed in 1600 and 3450 cm^{-1} regions, respectively.

In composites, Si-OH stretching mode was found at 850 cm^{-1} . The stretching modes were sensitive to the Si-Al composition of the framework and could shift to a lower frequency with increasing number of tetrahedral aluminum atoms [12]. In addition, Si-O vibration at 1100 cm^{-1} in fly ash shifted to lower wavenumber of 1000 cm^{-1} replying the chemical bonding change in composites. This can be due to the change of heat of formation (ΔH_f) from Si-O bond in SiO_2 form to new Si-O bond in composites.

C. Microstructure

Fig 4 shows the microstructure of composites. For control with only FBC fly ash, non-homogeneous and loose matrix was found. Owing to low reactive FBC fly ash with crystalline, unreacted FBC fly ash particles was also seen with fluffy-like surface. Reaction with alkali solution occurred on fly ash surface. Fly ash composes of crystalline phases in the interior and a glassy phase of silica and alumina at the surface layer [13]. This glassy phase plays an important role in gel formation due to the high solubility in the alkaline solution [14].

Use of 2.5% $\text{Al}(\text{OH})_3$ provided more dense and homogeneous matrix than control and that of 3.75% SF (3.75SF sample). $\text{Al}(\text{OH})_3$ could result in the aluminosilicate formation leading to dense composite. $\text{Al}(\text{OH})_3$ dissolved in strong alkali solution forming aluminate ion. This ion can react with silica and calcium compounds in FBC fly ash to form aluminosilicate and calcium aluminate hydrate (CAH), respectively [3].

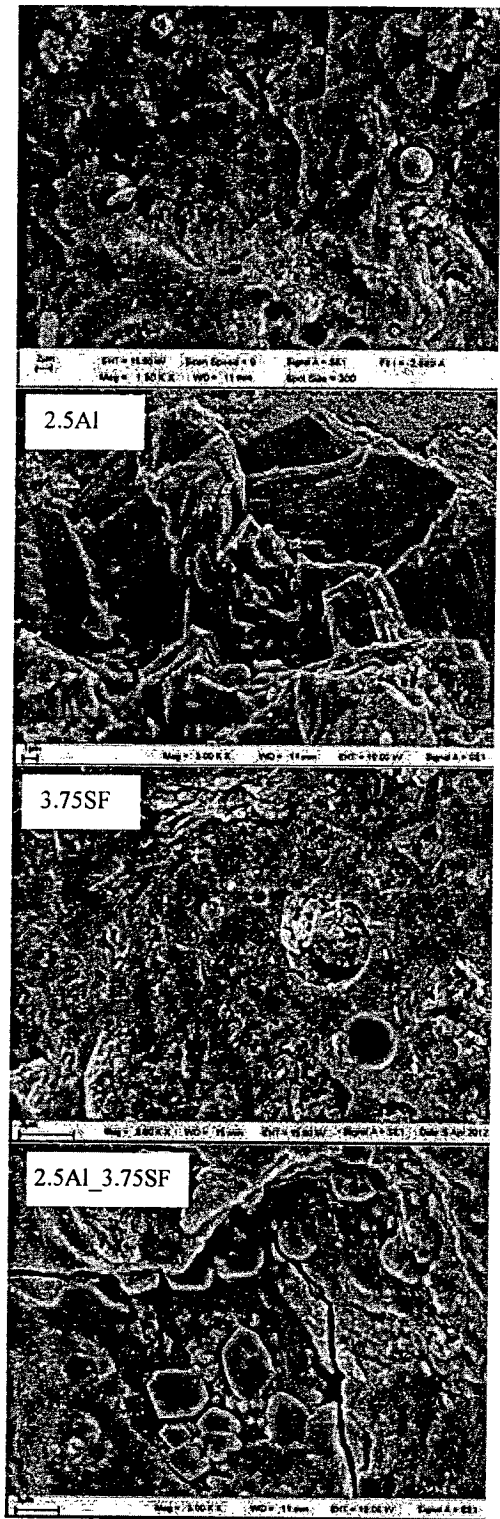


Fig. 4 SEM micrographs of composites

With 3.75% SF in composite, silica fume (SiO_2) can react with 15 M NaOH and calcium oxide forming calcium silicate hydrate. In addition to product compounds, the unreacted fly ash particles were also found. Reaction occurred at the surface of fly ash and silica fume and resulted in the binding property

of the material. Several microcracks and pores were seen. Owing to high reactivity of silica fume, many types of product can be formed, e.g. plate-like products in the composite matrix and fly ash holes. Denser matrix was detected comparing with the control.

Addition of both $\text{Al}(\text{OH})_3$ and SF in the mixture 2.5Al_3.75SF sample) also resulted in denser matrix comparing with the control. However, cracks and more crystalline compounds occurred. It could be due to high content of active reactants ($\text{Al}(\text{OH})_3$ and SF) in mixture leading to higher formation of zeolite (crystalline compounds). Both cracks and zeolite formation were unpleasant requirement for composites that caused the low physical properties, e.g. low compressive strength [15].

IV. CONCLUSIONS

Microstructure of alkali-activated FBC fly ash composites can be improved by using of $\text{Al}(\text{OH})_3$ and SF. Homogeneous and denser matrix was obtained. A shift of Si-O vibration was found replying the chemical bonding change in composites. Alumino-silicate, calcium silicate and sodium silicate were product from the reaction. In addition, cracks and zeolite were formed that could hinder the physical properties of composites.

ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to thank Faculty of Science, Burapha University, Thailand for financial support.

REFERENCES

- [1] P. Basu, "Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review," *Chem Eng Sci*, vol. 54, no. 22, pp. 5547-5557, 1999.
- [2] F. D. Botha, (2004). "Overview of the fluidized bed combustion process and material," in *Proc. State Regulation of Coal Combustion By-Product Placement at Mine Sites: A Technical Interactive Forum*, Harrisburg, 2004, pp. 1-4.
- [3] S. Mindess, J. F. Young, D. Darwin, *Concrete*, 2nd edition Prentice Hall, New Jersey, 2003, pp. 75-81.
- [4] M. A. Glinicki, M. Zieliński, "The effluence of CFBC-fly ash addition on the phase composition of air-entrained concrete," *B Pol Acad Sci*, vol. 56, no. 1, pp. 45-52, 2008.
- [5] J. Havlica, J. Brandstetr, I. Odler, "Possibilities of utilizing solid residues from pressured fluidized bed coal combustion (PSBC) for the production of blended cements," *Cem Concr Res*, vol. 28, no. 2, pp. 299-307, 1998.
- [6] P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, "Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer," *Waste Manage*, vol. 30, no. 4, pp. 667-672, 2010.
- [7] H. Xu, H. Li, L. Shen, M. Zhang, J. Zhai, "Low-reactive circulating fluidized bed combustion (CFBC) fly ashes as source material for geopolymer synthesis," *Waste Manage*, vol. 30, no. 1, pp. 57-62, 2010.
- [8] J. Davidovits, "Geopolymers Inorganic polymeric new materials," *J Therm Anal Calorim*, vol. 37, pp. 1633-1656, 1991.
- [9] B. E. Sheetz, S. P. I. Kwan, Control of ettringite swelling, *Ashlines*, vol. 4, no. 1, pp. 1-10, 2003.
- [10] P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, C. Jaturapitakkul, "Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials," *Cem Concr Comp*, vol. 33, pp. 55-60, 2011.
- [11] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers" *Waste Manage*, vol. 29, no. 2, pp. 539-543, 2009.
- [12] W. K. W. Lee, J. S. J. Van Deventer, "Structural reorganization of class F fly ash in alkaline silicate solutions," *Colloids Surf. A*, vol. 211, pp. 49-66, 2002.
- [13] M. Inada, H. Tsujimoto, Y. Eguchi, N. Enomoto, J. Hojo "Microwave-assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process," *Fuel*, vol. 84 no. 12-13, pp. 1482-1486, 2005.
- [14] P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, S. Taebuanhuad, "Resistance to acid and sulfate solutions of microwave-assisted high calcium fly ash geopolymer," *Mater Struct*, vol. 46, no. 3, pp. 375-381, 2013.
- [15] U. Rattanasak, P. Chindaprasirt, P. Suwanvitaya, 2010, Development of high volume rice husk ash alumino-silicate composite, *Int J Miner Metall Mater*, vol. 17, no. 5, pp. 654-659, 2010.