การเปรียบเทียบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน

อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ [1]
มหาวิทยาลัยบูรพา อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131
และ ปริญญา จินดาประเสริฐ [2]
มหาวิทยาลัยขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา ซึ่งได้มาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับเถ้าลอย และเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้จากการผสมเถ้าถ่านหินกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH ที่ศึกษาคือ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้คือ 10 โมลาร์ วิธีการผสมเพื่อทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์มี 2 วิธี คือ ผสมแบบแยกและผสมแบบธรรมดา บ่มเพสต์ที่ได้ที่อุณหภูมิ 65 ˚C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบซิลิกา Si-O-Si (stretching) โดยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) ที่ช่วงความถี่ 1,200-950 ซม.$^{-1}$ นอกจากนี้ยังศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างทางจุลภาคและความร้อนของเพสต์ด้วยเทคนิค Differential Scanning Calorimeter (DSC) และทดสอบกำลังอัดของมอร์ต้าร์ ผลการทดลองได้แสดงว่าปริมาณของสารประกอบซิลิกาและค่ากำลังอัดขึ้นกับอัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH และวิธีการผสม สำหรับค่าที่เหมาะสมที่สุดของอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH คือช่วง 1.0 และ 1.5 ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่สูงสุดที่ได้จากจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยคือ 350 กก./ซม.^{2}

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์ / เถ้าลอย / เถ้าก้นเตา

---

[1] *อาจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์*

[2] *ศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

A Comparative Study on Properties of Geopolymeric Material from Coal Ash

Ubolluk Rattanasak
Burapha University, Muang, Chonburi 20131
and Prinya Chindaprasirt
Khon Kaen University, Muang, Khon Kaen 40002

Abstract

This project was studied on the properties of geopolymeric material from fly ash and bottom ash obtained from Mae Moh power plant in Lumpang. Bottom ash was ground to have as small as fly ash particle. Geopolymer paste was made by mixing the ash with NaOH solution and Na_2SiO_3 solution. The mass ratio of Na_2SiO_3/NaOH was varied at 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 by weight using 10 M NaOH. Two mixing methods were investigated; separated mixing (S) and normal mixing (N). Pastes were then cured at 65 ^{o}C for 48 hours in order to study the quantities of silica compound, Si-O-Si (stretching), by Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) at frequency of 1200-950 cm^{-1}. Microstructure and thermal properties of paste by Differential Scanning Calorimeter (DSC) were additionally carried out. Geopolymer mortar was performed for the compressive strength. The results showed that quantities of reacted silicon compound (Si-O-Si) depended on the Na_2SiO_3/NaOH ratio and mixing method. Na_2SiO_3/NaOH of 1.0 and 1.5 gave a good performance and the highest compressive strength obtaining from fly ash-based geopolymer was up to 350 ksc.

Keywords : Geopolymer / Fly Ash / Bottom Ash

[1] *Lecturer, Department of Chemistry, Faculty of Science*

[2] *Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering*

1. บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางวัสดุเพื่อผลิตวัสดุใหม่ที่มีคุณสมบัติทดแทนวัสดุเดิมที่มีการใช้งาน ถือเป็นสิ่งจำเป็นในสภาวะปัจจุบัน อาจเป็นผลเนื่องมาจาก วัสดุเดิมที่ใช้อยู่มีข้อจำกัดทางด้านวัตถุดิบที่ใช้ผลิต ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระหว่างกระบวนการผลิต ตลอดจนโครงสร้างที่มีลักษณะพิเศษอาจจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษมากขึ้น ในเทคโนโลยีด้านก่อสร้างที่ผ่านมาหรือแม้แต่ปัจจุบันต้องยอมรับว่าคอนกรีตเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมเป็นอันดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากความเหมาะสมทางด้านราคา การผลิตที่ไม่ยุ่งยากและสามารถควบคุมคุณสมบัติได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุคอนกรีตอาจมีข้อจำกัดที่ตามมา ทั้งทางด้านคุณสมบัติพิเศษที่ต้องการมากขึ้น หรือกระบวนการผลิตปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ที่ส่งผลเสียต่อสภาวะแวดล้อม ดังนั้นเทคโนโลยีด้านวัสดุที่ผ่านมาจึงได้มีการคิดค้นวัสดุทดแทนเพื่อลดการใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ให้น้อยลง โดยการใช้วัสดุเหลือใช้ หรือกากจากโรงงานอุตสาหกรรมมาแทนที่บางส่วนในปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ซึ่งได้ผลดีทั้งทางด้านการเพิ่มคุณสมบัติบางอย่างให้คอนกรีตดีขึ้น และลดมลภาวะจากการทิ้งกากเหลือใช้ดังกล่าว แต่ยังมีความจำเป็นที่ต้องใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมด้วยบางส่วน ซึ่งไม่สามารถปฏิเสธได้เลยว่ายังจำเป็นต้องใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์อยู่

ดังนั้นการพัฒนาวัสดุจีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตวัสดุใหม่ให้สามารถใช้งานแทนโครงสร้างคอนกรีตโดยไม่ต้องใช้ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ โดยการนำสารละลายอัลคาไลที่เข้มข้นเร่งปฏิกิริยาวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสานโดยที่ไม่ต้องใช้ปูนซีเมนต์เป็นส่วนผสม สารผสมดังกล่าวได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบ กับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายเบสความเข้มข้นสูง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาโพลิคอนเดเซชั่น ได้สารประกอบอลูมิโนซิลิเกตที่มีคุณสมบัติคล้ายซีเมนต์ ซึ่งมีชื่อเรียกว่าจีโอโพลิเมอร์

2. ความสำคัญของงานวิจัย

การทดลองนี้ได้ศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน และศึกษาคุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบซิลิกา การทดสอบทางความร้อน การศึกษาโครงสร้างทางจุลภาค จากเถ้าถ่านหิน 2 ชนิด คือเถ้าลอยกับเถ้าก้นเตา นำเถ้ามาผสมเป็นจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (Geopolymer paste) ด้วยสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในสภาวะและอัตราส่วนต่างๆ กัน และเปรียบเทียบกำลังอัดโดยการทำจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เพื่อทำให้ทราบสภาวะที่เหมาะสม และนำมาศึกษาเกี่ยวกับวัสดุจีโอโพลิเมอร์ต่อไป

3. การทดลอง

3.1 วัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ประกอบด้วยเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาจากโรงผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักทางเคมีในรูปออกไซด์ที่ทดสอบด้วยเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) ดังตารางที่ 1 และทำการบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอย

สารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วย : สารละลายโซเดียมซิลิเกต ($Na_2O.SiO_2$) ซึ่งมี Na_2O 9% และ SiO_2 30% โดยน้ำหนัก ความถ่วงจำเพาะ 1.36 ที่ 30 ˚C ส่วนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เตรียมที่ความเข้มข้น 10 โมล่าร์

3.2 การเตรียมวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน

ในการเตรียมจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน นำเถ้ามาผสมกับ 10 M NaOH และ $Na_2O.SiO_2$ ทำการผสมที่หลายอัตราส่วนของ $Na_2O.SiO_2$/NaOH (G/N) โดยน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 2 โดยมีสองขั้นตอนการผสมคือ

1. การผสมแบบธรรมดา (Normal mixing-N) คือผสมเถ้าถ่านหิน, 10 M NaOH และ $Na_2O.SiO_2$ ในเวลาเดียวกัน

2. การผสมแบบแยก (Separated mixing-S) คือผสมเถ้าถ่านหินกับ 10 M NaOH ก่อนและกวนเป็นเวลา 10 นาที เพื่อก่อรูปเป็นสารริเริ่ม (precursor) จากนั้นเติม $Na_2O.SiO_2$ ผสมกับของผสมเหลวข้นระหว่างเถ้าถ่านหินและ 10 M NaOH เพื่อช่วยในการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่น

ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์

ทำการบ่มของเหลวข้นที่ได้ในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 ˚C เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยา เป็นเวลา 48 ชั่วโมง [1] แกะแบบจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติทางเคมีต่อไป

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา

องค์ประกอบทางเคมี (%)	เถ้าลอย	เถ้าก้นเตา
SiO_2	38.7	38.8
Al_2O_3	20.8	12.8
Fe_2O_3	15.3	5.1
CaO	16.6	18.9
ค้างบนตะแกรงเบอร์ 325 (% โดยน้ำหนัก)	32	29

ตารางที่ 2 สัดส่วนการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าถ่านหิน (โดยน้ำหนัก)

ตัวอย่าง	เถ้า	10M NaOH (N)	$Na_2O.SiO_2$ (G)	อัตราส่วน G/N
1	60	13.4	26.6	2.0
2	60	16.0	24.0	1.5
3	60	20.0	20.0	1.0
4	60	26.6	13.4	0.5

3.3 การทดสอบวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าถ่านหิน

การทดลองทางด้านเคมี ใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อลดตัวแปรที่อาจรบกวนการวิเคราะห์ให้น้อยลง แต่ในการทดสอบค่ากำลังอัดได้ใช้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ขนาดมาตรฐานตาม ASTM C109

ทดสอบจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบซิลิกา (Si-O-Si) โดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) โดยศึกษาพันธะ Si-O-Si (Stretching) ในช่วงสเปกตรัม 1,200-950 ซม.$^{-1}$ เป็นพีคที่เด่น (very strong) [2, 3] ผลแต่ละค่าเปรียบเทียบกับเถ้าถ่านหินดั้งเดิม (ที่ไม่ได้ผสมเป็นสารจีโอโพลิเมอร์) และเปรียบเทียบกับอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อศึกษาว่าที่อัตราส่วนผสมใดที่เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ได้ดี จากนั้นทดสอบโครงสร้างทางจุลภาคด้วยเทคนิค SEM และคุณสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ทำการหล่อแบบจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ขนาดมาตราฐาน 5x5x5 ซม. สำหรับการทดสอบกำลังอัด โดยใช้อัตราส่วนทรายต่อเถ้าถ่านหินเท่ากับ 2 : 1 โดยน้ำหนัก

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาการเปรียบเทียบปริมาณสารประกอบซิลิกา (Si-O-Si) โดยใช้เทคนิค FT-IR

ทำการทดสอบหาพื้นที่ใต้พีคของวัสดุจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยด้วยเทคนิค FT-IR เพื่อศึกษาพันธะ Si-O-Si (Stretching) ที่ช่วงสเปกตรัม 1,200-950 ซม.$^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคที่เด่น โดยศึกษาอัตราส่วน G/N ต่างๆ ที่ 10 M NaOH ดังแสดงผลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เถ้าลอยให้พื้นที่ของพีค Si-O-Si (Stretching) ที่ตำแหน่ง 1,200-950 ซม.$^{-1}$ น้อยสุดเนื่องจากเถ้าลอยยังไม่เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่น ตัวอย่าง FT-IR ของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้แสดงดังรูป 1 จะเห็นว่า

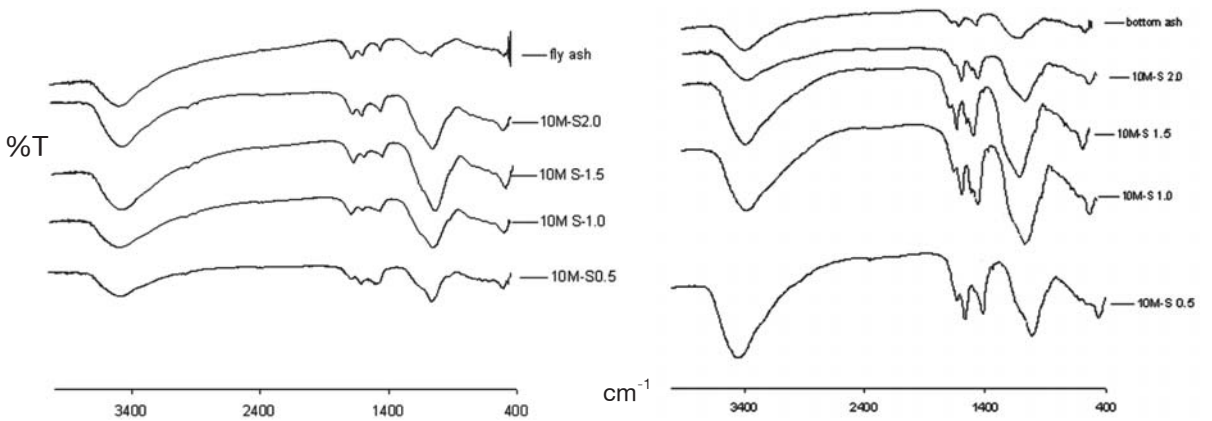
ตำแหน่งของ Si-O-Si เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และเลื่อนไปทางด้านขวามือหรือทางช่วงความถี่ต่ำลง

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน G/N และอัตราส่วนพื้นที่พีค (peak ratio) ของพีคจีโอโพลิเมอร์เพสต์กับพีคเถ้าถ่านหินดั้งเดิม ที่ช่วงสเปกตรัม 1,200-950 ซม.$^{-1}$ ได้แสดงในรูปที่ 2 และพบว่าเถ้าก้นเตาให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่พีคสูงกว่ากรณีของเถ้าลอยในช่วง G/N ระหว่าง 0.5-1.5 และให้ค่าสูงสุดที่ G/N = 1 สำหรับการผสมแบบแยก (S) ในขณะที่เถ้าลอยให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่พีคสูงสุดที่ G/N = 1.5 และการผสมแบบแยกให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่พีคลดลงเมื่อค่า G/N มากขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับการผสมแบบธรรมดา (N) ที่ให้ค่าอัตราส่วนพื้นที่สูงขึ้นตามอัตราส่วน G/N ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3 พื้นที่พีคของซิลิกาที่ทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR ของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมด้วยเถ้าลอย

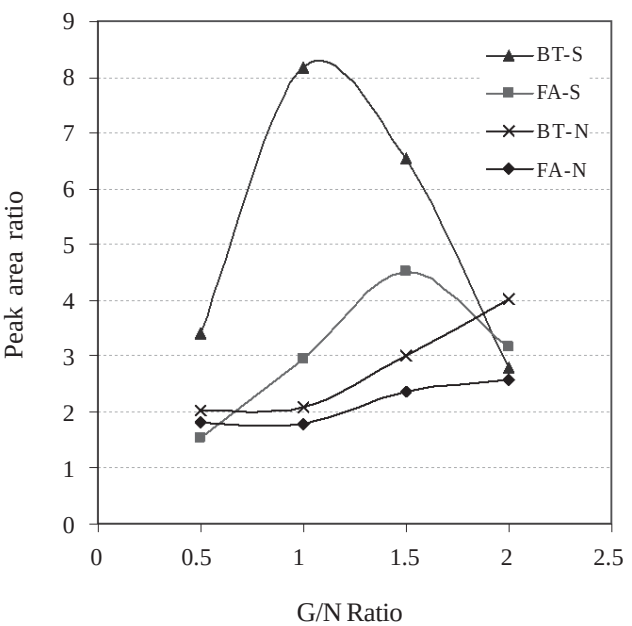
		อัตราส่วน G/N	Corrected area	อัตราส่วนพื้นที่พีค	พื้นที่ของพีค Si-O-Si (ซม.$^{-1}$)
เถ้าลอย (FA)		-	7.15	1	1,016
ผสมแบบแยก (S)	1	2.0	22.64	3.17	1,012
	2	1.5	32.41	4.53	1,001
	3	1.0	21.14	2.96	1,008
	4	0.5	11.06	1.55	1,005
ผสมแบบธรรมดา (N)	1	2.0	18.38	2.57	1,012
	2	1.5	16.95	2.37	1,016
	3	1.0	12.79	1.79	1,009
	4	0.5	12.96	1.81	1,005
เถ้าก้นเตา (BT)		-	14.90	1	1,023
ผสมแบบแยก (S)	1	2.0	41.77	2.80	1,023
	2	1.5	97.71	6.56	1,016
	3	1.0	121.67	8.17	1,016
	4	0.5	50.76	3.41	1,027
ผสมแบบธรรมดา (N)	1	2.0	59.77	4.01	1,023
	2	1.5	44.71	3.00	1,016
	3	1.0	31.04	2.08	1,012
	4	0.5	30.04	2.02	1,012

เมื่อ Peak area ratio คือ อัตราส่วนของพื้นที่พีคจีโอโพลิเมอร์เพสต์ต่อพื้นที่พีคเถ้าลอย
Corrected area คือ พื้นที่พีค Si-O-Si (Stretching)

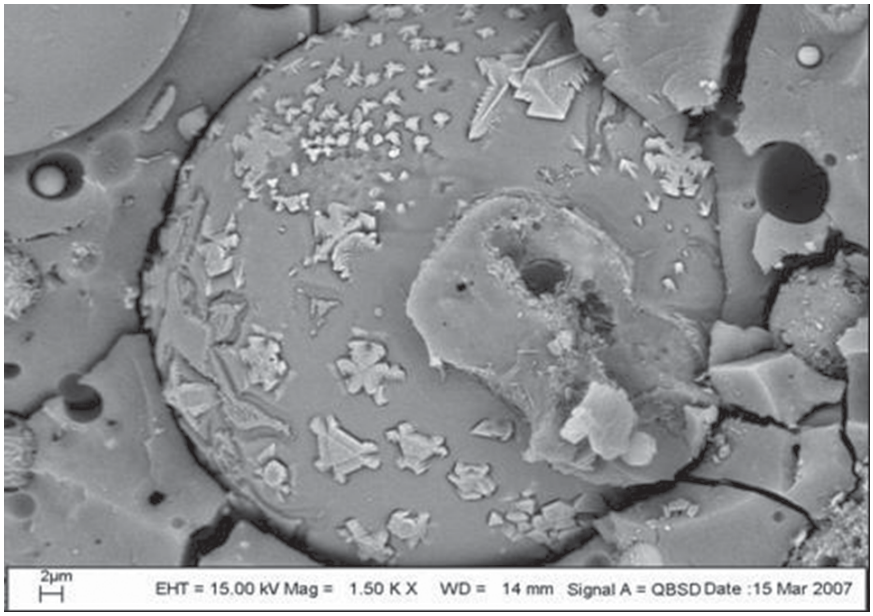


รูปที่ 1 FT-IR spectra ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาที่ผสมแบบแยก

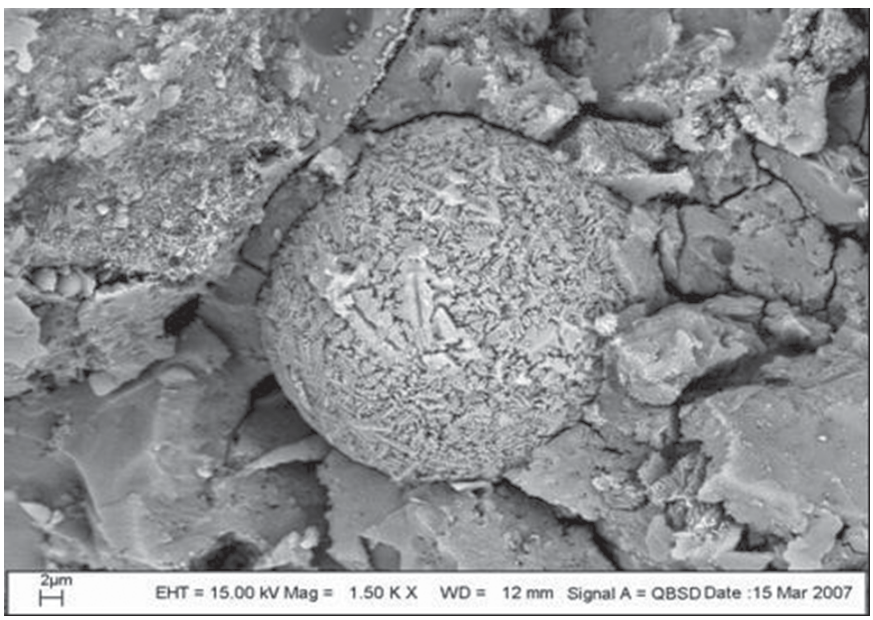
การผสมแบบแยกทำให้เถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าการผสมสารทุกอย่างรวมกัน เนื่องจากซิลิกาและอลูมินามีเวลาพอเพียงที่จะถูกชะออกมาจากผิวด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในรูปของเจลเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่มของปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่น ก่อนที่จะทำปฏิกิริยาต่อไปกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ช่วยในการก่อตัวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [4]



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่กับ G/N



รูปที่ 3 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยที่ผสมแบบแยกที่อัตราส่วน G/N เท่ากับ 1.5 ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า



รูปที่ 4 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าก้นเตาที่ผสมแบบแยกอัตราส่วน G/N เท่ากับ 1.0 ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

4.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

จีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าลอยที่ผสมแบบแยกที่อัตราส่วน G/N เท่ากับ 1.5 และจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากเถ้าก้นเตาที่ผสมแบบแยก อัตราส่วน G/N เท่ากับ 1.0 ได้นำมาศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคเนื่องจากผลของ FT-IR ให้ค่าพื้นที่พีคสูง

จากรูปที่ 3 โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ของเถ้าลอย แสดงให้เห็นความขรุขระและเกิดเม็ดเจลโดยรอบ เนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารจีโอโพลิเมอร์ โดยซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ในเถ้าถ่านหินถูกชะออกมาโดยโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดเป็นโครงสร้างสามมิติ แล้วทำปฏิกิริยากับโซเดียมซิลิเกตเกิดเป็นเจลขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นที่ผิวบางส่วนของเถ้าลอยเท่านั้น อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่สมบูรณ์เพราะยังพบพื้นที่ผิวบางส่วนของเถ้าลอยที่ยังคงเรียบและไม่มีเจลเกาะ

หากพิจารณาพื้นที่ผิวของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา พบว่าเถ้าลอยมีผิวที่เรียบ ซึ่งอาจทำปฏิกิริยากับสารละลายเบสได้น้อยกว่าผิวที่ขรุขระของเถ้าก้นเตา แต่ทั้งนี้ความสามารถในการทำปฏิกิริยายังขึ้นอยู่กับปริมาณเฟสอสัญฐาน (glassy phase) และความเป็นผลึกของเถ้าถ่านหิน ซึ่งโดยทั่วไปพบว่าเถ้าก้นเตาจะมีเฟสอสัญฐานที่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาน้อยกว่าเถ้าลอย [5]

อย่างไรก็ตาม การบดเถ้าก้นเตาจะทำให้เกิดการแตกอนุภาคของเถ้าผิวของเถ้าก้นเตา (รูปที่ 4) มีความขรุขระและเกิดเจลโดยรอบ เนื่องจากโซเดียมไฮดรอกไซด์สัมผัสกับผิวของเถ้าก้นเตาได้มากขึ้น แต่การเกิดปฏิกิริยายังคงไม่สมบูรณ์ จากรูปยังพบพื้นที่ผิวบางส่วนไม่มีเจลเกาะอยู่

เมื่อพิจารณาถึงความแน่น (dense) ของเนื้อจีโอโพลิเมอร์เพสต์บริเวณโดยรอบเถ้าลอยที่เกิดปฏิกิริยาในรูปที่ 3 พบว่ามีลักษณะแน่นและเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะที่เนื้อจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาไม่เป็นเนื้อเดียวกันสังเกตเห็นการรวมตัวกันเป็นชั้นๆ และรอยเชื่อมต่ออย่างชัดเจน โครงสร้างนี้อาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่มีส่วนทำให้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตารับแรงอัดได้น้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

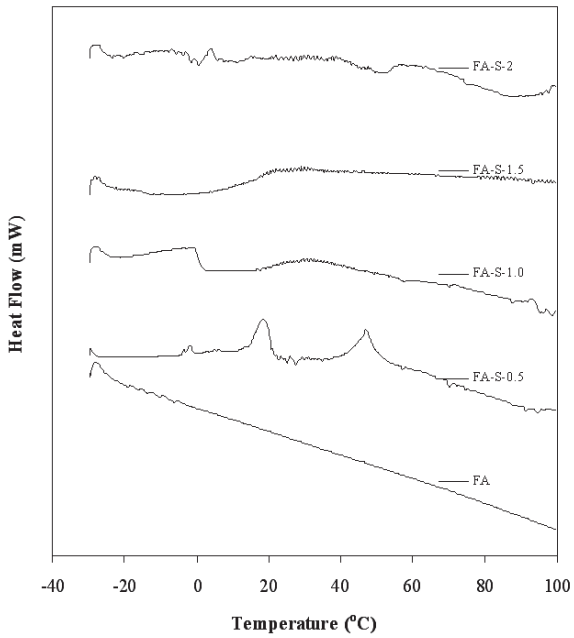
4.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อนโดยเทคนิค DSC

การศึกษาทางความร้อนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์นี้เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวกับการดูดและคายความร้อนที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษาที่ช่วงอุณหภูมิ -30 ถึง 100 ˚C ได้ DSC Thermogram ที่แสดงให้เห็นลักษณะของกราฟที่เกิดขึ้นหลังจากที่ให้อุณหภูมิดังในรูปที่ 5 และ 6

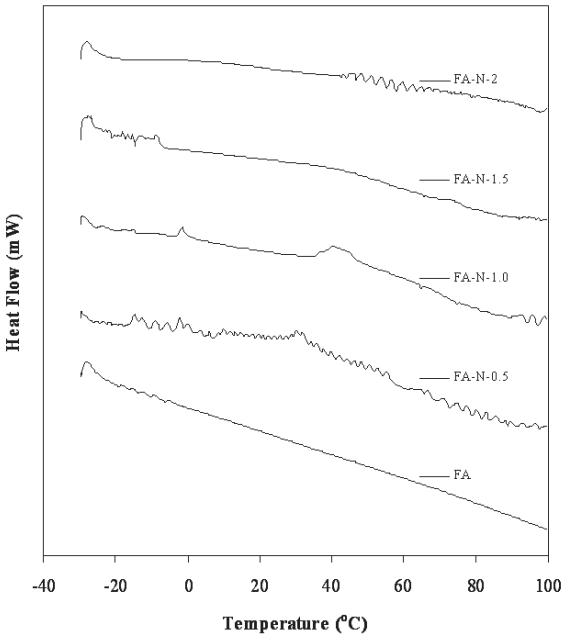
จากรูปที่ 5 พบว่าเถ้าลอยให้เส้นกราฟ Thermogram ที่มีความชันคงที่แสดงถึงการไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในอนุภาค สำหรับจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมแบบแยกจะมีลักษณะของ Thermogram ที่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น มีบางอัตราส่วน G/N ที่เกิดเป็นพีคขึ้น ที่เห็นได้ชัดคือ ที่อัตราส่วน G/N= 0.5 เกิดพีคขึ้นที่อุณหภูมิระหว่าง 20 กับ 50 ˚C พีคมีลักษณะชี้ขึ้นซึ่งเกิดการคายความร้อน (Exothermal) และมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในขึ้นในจีโอโพลิเมอร์เพสต์ซึ่งจะพบในการผสมแบบแยกมากกว่าแบบธรรมดา ส่วนการผสมแบบธรรมดาพบว่า Thermogram มีลักษณะที่คล้ายกับเถ้าลอยก่อนเกิดปฏิกิริยา

พีคที่พบช่วงอุณหภูมิประมาณ 0 ˚C คือพีคของการหลอมเหลวของน้ำ ซึ่งพบในวัสดุจีโอโพลิเมอร์แต่ไม่พบในเถ้าลอย เนื่องจากการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์มีการเติมสารละลายซึ่งมีน้ำเป็นส่วนประกอบ ดังนั้นจึงมีพีคของน้ำที่ 0 ˚C ปรากฏขึ้นในทุกตัวอย่าง [6]

จาก DSC Thermogram ที่แสดงในรูปที่ 6 ของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นมากกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย คือเกิดเป็นพีคที่ชัดขึ้นและพบพีคที่เกิดที่ช่วง 0 ˚C พีคมีลักษณะชี้ลงเกิดการดูดความร้อน (Endothermal) อาจเกิดจากการเปลี่ยนเฟสของน้ำจากของแข็งเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

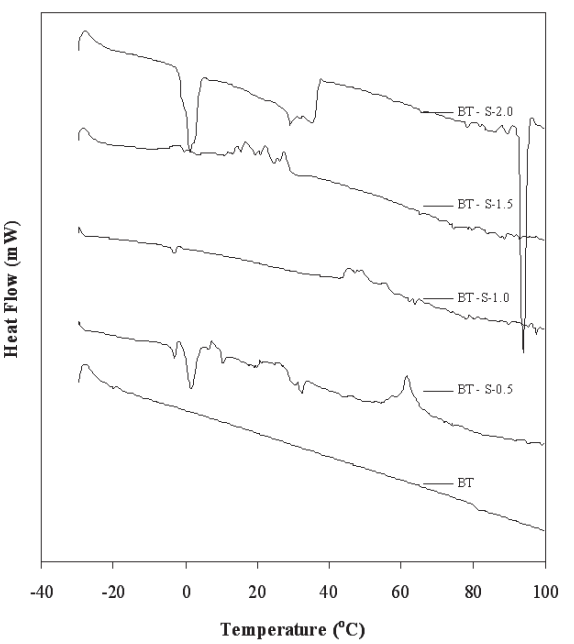


ก. วิธีการผสมแบบแยก (S)

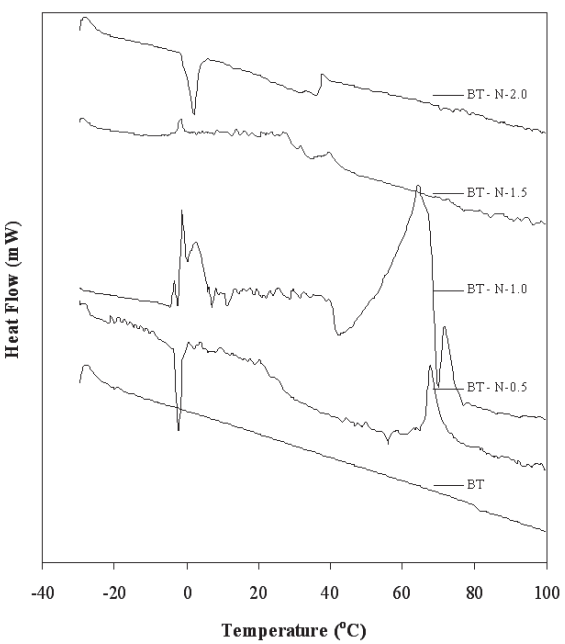


ข. วิธีการผสมแบบธรรมดา (N)

รูปที่ 5 DSC Thermogram ของเถ้าลอยและจีโอโพลิเมอร์เพสต์



ก. วิธีการผสมแบบแยก (S)



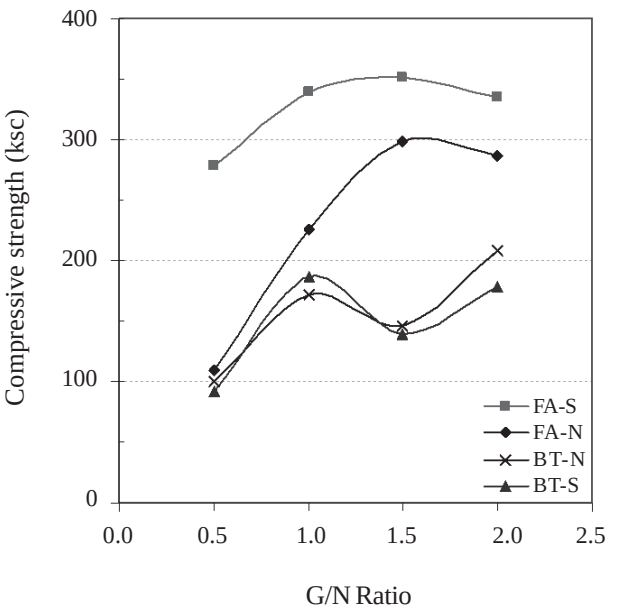
ข. วิธีการผสมแบบธรรมดา (N)

รูปที่ 6 DSC Thermogram ของเถ้าก้นเตาและจีโอโพลิเมอร์เพสต์

บางกราฟที่อุณหภูมิประมาณ 100 ˚C เกิดเป็นพีคที่มีลักษณะชี้ลง เป็นการเปลี่ยนเฟสของน้ำกลายเป็นไอ (boiling) นอกจากนี้ที่อัตราส่วน G/N = 2.0 พบว่าการผสมแบบแยกเกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสภาวะคล้ายแก้ว (Glass Trainsition ; Tg) ที่อุณหภูมิประมาณ 37˚C สำหรับพีคที่เกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 60-70 ˚C เป็นพีคของการคายความร้อน พีคที่เกิดขึ้นนี้คาดว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในของจีโอโพลิเมอร์และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยและเถ้าก้นเตาเห็นได้ชัดว่า จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนมากกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย ในทำนองเดียวกันกับภาพถ่าย SEM ที่แสดงเจลที่เกิดรอบเถ้าก้นเตาได้ชัดเจนกว่าเจลที่เกิดรอบเถ้าถ่านหิน

4.4 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

รูปที่ 7 แสดงกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่บ่มที่อุณหภูมิ 65 ˚C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ได้จากเถ้าก้นเตา สำหรับทั้งวิธีการผสมแบบแยกและแบบธรรมดา โดยวิธีการผสมแบบแยกให้กำลังอัดที่สูงกว่า เนื่องจากสารละลายมีเวลาในการชะซิลิกอนและอะลูมิเนียมออกมาจากอนุภาคเถ้า โดยที่อัตราส่วน G/N ในช่วง 1.0 ถึง 2.0 จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ผสมแบบแยกให้ค่ากำลังอัดที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าระหว่าง 335 ถึง 352 กก./ซม.^{2} ซึ่งสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีผลต่อค่ากำลังอัดน้อยสำหรับการผสมแบบนี้ ในขณะที่การผสมแบบธรรมดาพบว่าปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีผลต่อค่ากำลังอัดมาก การเพิ่มค่า G/N จาก 1.0 เป็น 1.5 ให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 226 เป็น 299 กก./ซม.^{2}



รูปที่ 7 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ส่วนจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา ให้ค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยมาก คืออยู่ในช่วง 100 - 200 กก./ซม.^{2} การเพิ่มปริมาณโซเดียมซิลิเกตจะทำให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาเพิ่มขึ้น โดยวิธีการผสมไม่มีผลต่อค่ากำลังอัดมากนัก ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าก้นเตาจะมีความว่องไวน้อยกว่าเถ้าลอย [5] การบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดใกล้เคียงกับเถ้าลอยช่วยเพิ่มอัตราการปฏิกิริยา จากโครงสร้างจุลภาคทำให้เห็นลักษณะเนื้อจีโอโพลิเมอร์ของเถ้าก้นเตาที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อจีโอโพลิเมอร์ของเถ้าลอย ดังนั้นอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่มีส่วนทำให้จีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตารับแรงอัดได้น้อยกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าเถ้าลอยและเถ้าก้นเตามีศักยภาพในการผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ โดยการบดเถ้าก้นเตาให้มีขนาดเล็กลง และเพื่อแตกอนุภาคทำให้การเกิดปฏิกิริยากับสารละลายเบสได้ดีขึ้น โดยปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์เกิดขึ้นที่ผิวของเถ้าลอยและเถ้าก้นเตา วิธีการผสมก็มีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เช่นกัน การสัมผัสกันระหว่างเถ้าลอยหรือเถ้าก้นเตากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกต เป็นการเพิ่มปฏิกิริยาที่ผิวของเถ้าได้ โดยการผสมแบบแยกให้ช่วงอัตราส่วน G/N ที่เหมาะอยู่ในช่วง 1.0 และ 1.5 ในขณะที่การผสมแบบธรรมดาต้องใช้อัตราส่วน G/N ที่มากขึ้นคือในช่วง 1.5 และ 2.0 เพื่อให้ปฏิกิริยาการก่อตัวเป็นจีโอโพลิเมอร์เกิดได้ดีขึ้น

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของจีโอโพลิเมอร์ได้แสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตาเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนได้ชัดเจนกว่าจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย อย่างไรก็ตาม จากผลของกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์พบว่าเถ้าลอยยังมีศักยภาพทางด้านกำลังดีกว่าเถ้าก้นเตา ซึ่งการผสมแบบแยกให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าการผสมแบบธรรมดา ในขณะที่วิธีการผสมไม่มีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าก้นเตา

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการทุนสนับสนุนนักวิจัยใหม่ วท. ประจำปี 2549 รหัสโครงการ F-31-102-25-01

เอกสารอ้างอิง

1. Chindaprasirt, P., Chareerat, T., and Sirivivananon, V., 2007, “Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer,” *Cement and Concrete Composites,* Vol. 29, pp. 224-229.

2. Barbosa, V., MacKenzie, K. and Thaumaturgo, C., 2000, “Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymer,” *International Journal of Inorganic Materials,* Vol. 2, pp. 309-17.

3. Günzler H. and Gremlich H., 2002, *IR Spectroscopy : An Introduction,* Wiley-VCH Verlag GmbH, Germany.

4. Lee, W.K.W., and Van Deventer, J.S.J., 2002, “Structure Reorganisation of Class F Fly Ash in Alkaline Silicate Solutions,” *Colloids and Surfaces A : Physicochemistry Engineering Aspects,* Vol. 211, pp. 49-66.

5. Bethanis, S., Cheeseman C.R., and Sollars, C.J., 2002, “Properties and Microstructure of Sintered Incinerator Bottom Ash,” *Ceramics International,* Vol. 28, pp. 881-886.

6. Phair, J.W., Smith J.D. and Van Deventer, J. S. J., 2003, “Characteristics of Aluminosilicate Hydrogels Related to Commercial ‘Geopolymer’,” *Materials Letters,* Vol. 57, pp. 4356-4367