สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยและเถ้าแกลบ: อิทธิพลของอัตราส่วนของเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ อัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

บุรฉัตร ฉัตรวีระ[1*]
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121
และ ณัฏฐ์ มากุล[2]
มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร เลขที่ 9 แจ้งวัฒนะ แขวงอนุสาวรีย์ เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ อัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ โดยกำหนดสัดส่วนผสมของเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบโดยน้ำหนักเท่ากับ 100:0, 80:20 และ 60:40 สมบัติที่ศึกษา คือ ความต้องการน้ำ ระยะเวลาการก่อตัว และการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น นอกจากนั้นยังทำการเปรียบเทียบกำลังอัดที่ได้จากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟกับการบ่มด้วยในเตาอบ จากผลการทดสอบพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง นอกจากนั้นจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ซึ่งประกอบด้วยเถ้าลอยล้วนมีกำลังอัดสูงสุดทั้งกรณีการบ่มในเตาอบและพลังงานไมโครเวฟ แต่อย่างไรก็ตามกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสม โดยกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่บ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 5 และ 10 นาที

คำสำคัญ : จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ / เถ้าลอย / เถ้าแกลบ / ไมโครเวฟ

* *Corresponding author: E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th*
1 *รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*
2 *อาจารย์ สาขาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*

Properties of Geopolymer Mortar Produced from Fly Ash and Rice Husk Ash: Influences of Fly Ash-Rice Husk Ash Ratio and Na_2SiO_3-NaOH Ratio under Curing by Microwave Energy

Burachat Chatveera[1*]

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong 1, Khlong Luang, Pathum Thani 12121

and Natt Makul[2]

Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Bangkhen, Bangkok 10220

Abstract

This paper is to present the studied results of the influences of fly ash (FA)-rice husk ash (RHA) ratio, Na_2SiO_3/NaOH ratio under curing by microwave energy on the properties of geopolymer mortar. The FA/RHA ratios by weight at 100:0, 80:20 and 60:40 were taken into account. The parametric tests were water requirement, setting time, and compressive strength at early-age period. Further the compressive strengths of microwave-cured geopolymer-mortar specimens were compared to the conventional-cured ones. From the test results, it was indicated that geopolymer mortar has an increase in water requirement as increased FA/RHA ratio, while the setting times are decreased. Besides, geopolymer mortar specimens that consisted only of FA have the highest compressive strength under curing by conventional and microwave energy methods. However geopolymer mortar specimens are decreased when increased amount of RHA in the mix. Further geopolymer mortar specimens mixed with FA and RHA cured in oven at a temperature level of 85 °C for 24 and 48 hours are higher than the specimens cured by microwave energy at a power of 800 watt for 5 and 10 minutes.

Keywords : Geopolymer mortar / Fly ash / Rice husk ash / Microwave

* *Corresponding author: E-mail: cburacha@engr.tu.ac.th*

1 *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

2 *Lecturer, Department of Construction Technology, Faculty of Industrial Technology.*

1. บทนำ

ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมที่สำคัญของคอนกรีต โดยได้จากกระบวนการเผาสารประกอบซิลิกา (SiO_2) อะลูมินา (Al_2O_3) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่อุณหภูมิ ประมาณ 1450 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบดให้มีความละเอียดตามต้องการ ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงมากและยังมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบดังกล่าวจึงมีการนำวัสดุปอซโซลานมาใช้ทดแทนเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และยังสามารถปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตให้ดียิ่งขึ้นอีกด้วย นอกจากนั้นในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ยังได้ค้นคว้าพัฒนานวัตกรรมใหม่ๆ เพื่อหาวัสดุทดแทนที่จะนำมาใช้แทนปูนซีเมนต์ให้มากที่สุด โดยจะต้องมีสมบัติที่ไม่แตกต่างไปจากเดิมด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่มาของการค้นพบ จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)

จีโอโพลิเมอร์ [1-2] เป็นวัสดุเชื่อมประสานซึ่งเป็นโพลิเมอร์ประหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ได้จาก ซิลิกา (Silica, SiO_2) และอะลูมินา (Alumina, Al_2O_3) [3] และวัสดุปอซโซลานที่นิยมนำมาใช้เป็นวัสดุ ตั้งต้น ได้แก่ เถ้าลอย [4] เถ้าแกลบ [5] โดยจากงานวิจัยที่ผ่านมาได้สรุปความเห็นตรงกันว่าทั้งเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์ได้ดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาสมบัติในสภาวะสดและแข็งตัวแล้ว โดยกำหนดตัวแปรเป็น อัตราส่วนเถ้าลอยผสมเถ้าแกลบที่แตกต่างกันในสภาวะการบ่มด้วยเตาอบและไมโครเวฟซึ่งกำหนดเป็นรูปแบบใหม่ของการทำความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงในวัสดุก่อสร้าง [6] โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตจีโอโพลิเมอร์ซึ่งต้องบ่มที่อุณหภูมิ สูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา [7]

การให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟมีหลักการที่แตกต่างจากการให้ความร้อนด้วย วิธีธรรมดาทั่วไป (Conventional Process) กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นเองภายในวัสดุ แทนที่จะเกิดจากการได้รับความร้อนที่ถ่ายเทมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอก เช่น จากลวดความร้อน (Heat Coil) จากแท่งความร้อน (Heating Element) หรือจากลำแสงเลเซอร์ (Laser Beam) เป็นต้น โดยการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุ โดยวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภท “วัสดุไดอิเล็กตริก” (Dielectric Materials) หมายถึงวัสดุกึ่งฉนวนที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Dipoles) ซึ่งอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างขั้วและ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลให้เกิดความร้อนภายในขึ้น (Inter Heat Generation) ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นโดยคลื่นไมโครเวฟนี้จึงเรียกโดยทั่วไปว่าเป็น “ความร้อนแบบภายในที่เกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นวัสดุ” (Internal and Volumetric Heating) [7] นอกจากนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในชิ้นวัสดุและการถ่ายเท ความร้อนที่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ได้รับความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟนั้นยังมีลักษณะตรงข้ามกับวัสดุที่ได้รับความร้อนด้วยวิธีอื่น นั่นคือความร้อนภายในชิ้นวัสดุจะสูงกว่าที่ผิวภายนอก ดังนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากภายในออกสู่ผิวภายนอก เนื่องจากลักษณะการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวจะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอจึงสามารถลดการร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ได้ [8-11]

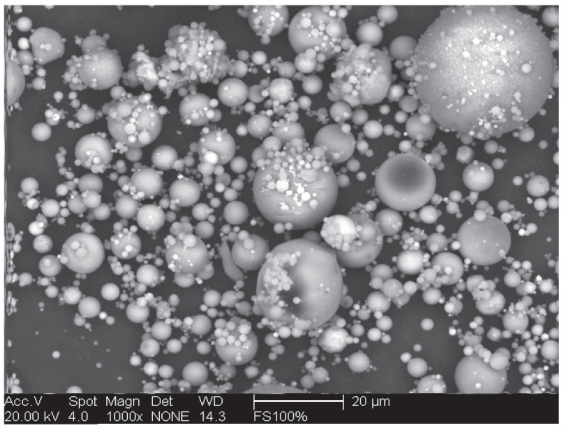
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบและอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อประโยชน์ในการหาเงื่อนไขการบ่มของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยพลังงานไมโครเวฟต่อไปนี้

2. ระเบียบวิธีวิจัย

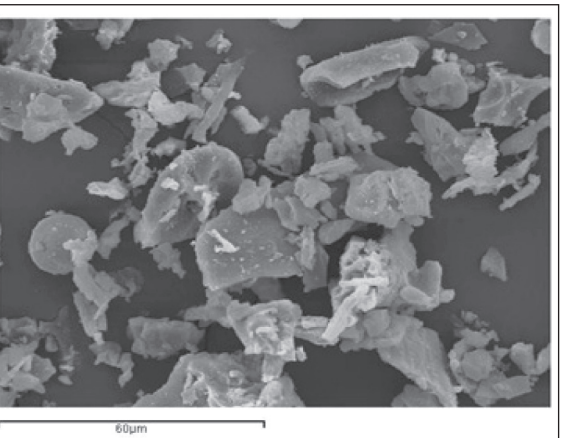
2.1 วัสดุ

วัสดุผงที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ประกอบด้วย เถ้าลอย เถ้าแกลบซึ่งผ่านการบดและทราย โดยเถ้าลอยที่นำมาใช้เป็นแหล่งซิลิกาและอะลูมินาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ จ.ลำปาง เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิง จาก จ.ปทุมธานี แล้วนำไปบดเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จนมีค่าความละเอียดแบบเบลนเท่ากับ 4220 ซม.^{2}/ก. จากภาพถ่ายขยายของเถ้าลอย และ

เถ้าแกลบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าอนุภาคของตัวอย่างเถ้าลอยมีลักษณะรูปทรงกลมและมีขนาดคละกัน ในขณะที่เถ้าแกลบดังแสดงในรูปที่ 2 มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ขนาดอนุภาคเล็กใหญ่คละกัน พื้นผิวขรุขระมีลักษณะเป็นโพรง



รูปที่ 1 อนุภาคของเถ้าลอย



รูปที่ 2 อนุภาคของเถ้าแกลบ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) โดยมวลเท่ากับ ร้อยละ 36.44 ซึ่งถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และไอรอนออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่าเท่ากับ ร้อยละ 20.48, 16.35 และ 15.76 โดยมวล ตามลำดับ ส่วนเถ้าแกลบนั้นมีปริมาณ SiO_2 โดยมวล เท่ากับร้อยละ 92.51 ซึ่งถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักรองลงมาได้แก่ Al_2O_3, CaO และ Fe_2O_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 0.66, 0.62 และ 1.67 โดยมวล ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าในเถ้าลอยมี SiO_2 และ Al_2O_3 ปริมาณสูง เหมาะสำหรับใช้เป็นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตเพื่อผลิตจีโอโพลิเมอร์ ส่วนเถ้าแกลบนั้นมีปริมาณ SiO_2 สูงแต่มีปริมาณ Al_2O_3 น้อยมากเมื่อเทียบกับเถ้าลอย

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

องค์ประกอบเคมี	เถ้าลอย	เถ้าแกลบ
	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
Silicon Dioxide (SiO_2)	36.44	92.51
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	20.48	0.66
Iron Oxide (Fe_2O_3)	15.76	1.67
Cacium Oxide (CaO)	16.35	0.62
Magnesium Oxide (MgO)	3.55	0.38
Potassium Oxide (K_2O)	2.25	1.71
Sodium Oxide (Na_2O)	0.98	0.08
Sulfur Trioxide (SO_3)	3.35	0.03
Free CaO	1.24	0.11
Loss on Ignition (LOI)	0.59	0.29

จากผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและเถ้าแกลบดังแสดงในตารางที่ 2 จะเห็นว่าเถ้าลอยมีค่าความต้องการน้ำและพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่าเถ้าแกลบ ในขณะที่มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่า

ตารางที่ 2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและเถ้าแกลบ

สมบัติทางกายภาพ	เถ้าลอย	เถ้าแกลบ
ความต้องการน้ำ (ร้อยละ)	96	124
พื้นที่ผิวจำเพาะ โดยวิธีเบลน (ตร.ซม./ก.)	2130	4220
ความถ่วงจำเพาะ	2.25	2.18
ความละเอียดของอนุภาค (ร้อยละผ่าน)		
75 ไมโครเมตร	24.4	5.7
45 ไมโครเมตร	38.6	18.7
36 ไมโครเมตร	44.6	28.9
ดัชนีกำลัง (ร้อยละเทียบกับตัวอย่างควบคุม)		
7 วัน	66.4	76.3
28 วัน	69.8	88.1

ทรายแม่น้ำคละขนาด (Graded Standard Sand) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface-dry) ตามที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ASTM C778 [12] โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 (1.18 มม.) และค้างตะแกรงเบอร์ 100 (0.15 มม.)

สารละลายด่างที่ใช้มี 2 ชนิด คือ สารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ (Alkaline Hydroxide) ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และสารละลายอัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkali-metal Silicate) ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)

2.2 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ตัวแปรที่ใช้ประกอบด้วย 1) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ แปรค่า 100:0, 80:20, 60:40, 2) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH แปรค่า 0.5, 1.0 และ 2.0, 3) ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH เท่ากับ 10 โมลาร์ และ 4) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทรายต่อเถ้าลอยและเถ้าแกลบเท่ากับ 2.0 ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้แสดงในตารางที่ 3

2.3 การผสมและการหล่อ

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติในสภาวะสดมีรายละเอียดเริ่มจากการผสมเถ้าลอยและสารละลาย NaOH ให้เข้ากันเป็นเนื้อเดียวในหม้อผสมด้วยความเร็วของ ใบพาย 285 ± 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เททรายลงไปในหม้อผสม แล้วปั่นกวนต่ออีกประมาณ 3 นาที เทสารละลาย Na_2SiO_3 ลงไปในหม้อ แล้วปั่นกวนต่ออีก 2 นาที เทจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 5 5 5 เซนติเมตร [13] โดยแบ่งเป็นสองชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งตามมาตรฐาน ASTM C109 [13] ในการวิจัยนี้ใช้น้ำเพื่อทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้ามีค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109 [13] นำไปทำการอัดแน่นด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นปิดผิวหน้าตัวอย่างโดยการหุ้มแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำออก

2.4 วิธีการบ่ม

2.4.1 การบ่มในเตาอบไฟฟ้า

หลังจากทำการบ่มตัวอย่างโดยการหุ้มด้วยแผ่นพลาสติกเป็นระยะเวลา 24 ± ½ ชั่วโมง จึงทำการแกะแบบออก จากนั้นนำไปทำการบ่มในเตาอบไฟฟ้า โดยแบ่งสภาวะการบ่มออกเป็น 2 กรณี คือ ได้แก่ บ่มที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3

รูปที่ 3 เตาอบไฟฟ้า

2.4.2 การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

หลังจากทำการแกะตัวอย่างที่เวลา 24 ± ½ ชั่วโมง จึงบ่มต่อด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยกำหนดเงื่อนไขของการบ่มออกเป็นการใช้กำลังของไมโครเวฟที่ระดับ 800 วัตต์ เป็นระยะเวลา 5 และ 10 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4

รูปที่ 4 เตาไมโครเวฟบ้าน

2.5 การทดสอบ

ค่าร้อยละการไหลแผ่เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะเหลวสามารถขึ้นรูปได้ โดยในงานวิจัยนี้ทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยการใช้โต๊ะทดสอบการไหล (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ศึกษาความข้นเหลวของมอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C230 [14] และ ASTM C1437 [15] สำหรับสัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบการไหลแผ่ ดังตารางที่ 3 จากนั้นนำมาทำการทดสอบได้ผลการทดสอบจนกระทั่งได้ร้อยละการไหลแผ่เท่ากับร้อยละ 105 ถึง 115

หลังจากทำการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แล้ว ตัวอย่างจะถูกบ่มต่อโดยการตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงที่อายุ 3, 5 และ 9 วัน ตัวอย่างที่ครบกำหนดจะถูกนำมาทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [13] ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine

3. ผลการทดสอบและวิจารณ์ผล

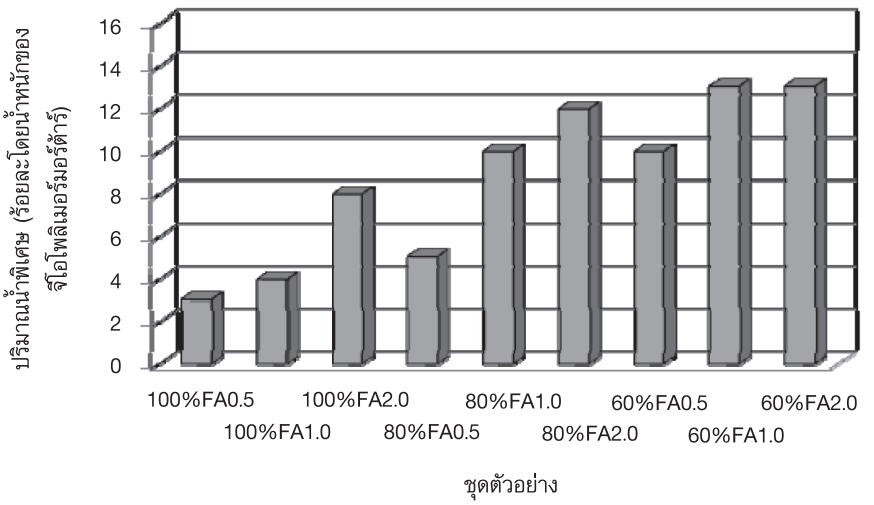
3.1 ค่าการไหลแผ่

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH) พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ซึ่งมีอัตราส่วนเถ้าลอยและเถ้าแกลบต่อสารละลายด่างโดยน้ำหนัก (FA/AS) เท่ากัน ค่าร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐานกำหนดมีค่าเพิ่มขึ้นตามตามปริมาณน้ำที่ใช้ผสมเพิ่มขึ้นและอัตราส่วนสารละลาย NS/NH เพิ่มขึ้น ตัวอย่างเช่น ชุดตัวอย่าง 80%FA0.5, 80%FA1.0 และ 80%FA2.0 ปริมาณน้ำที่เติมลงไปจนได้ค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐานเท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 12 ของปริมาณจีโอโพลิเมอร์เพสต์ โดยน้ำหนักตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 และปริมาณน้ำพิเศษในรูปที่ 5 นอกจากนั้นเมื่อนำร้อยละการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ไปคำนวณให้อยู่ในรูปน้ำหนักเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบระยะเวลาก่อตัว โดยสัดส่วนผสมของจีโอโพลิมอร์ต้าร์สำหรับการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สัดส่วนผสมและร้อยละการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ชุดตัวอย่าง	เถ้าลอย (ร้อยละ)	สัดส่วนโดยน้ำหนักของ Na_2SiO_3 / NaOH	น้ำหนัก (กรัม)						น้ำพิเศษ (ร้อยละโดยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์เพสต์)								
			ทราย	เถ้าลอย	เถ้าแกลบ	Na_2SiO_3	NaOH	น้ำ*	3%	4%	5%	8%	10%	12%	13%	15%	18%
100%FA0.5	100	0.5	600	300	0	50	100	13.5	108								
100%FA1.0	100	1.0	600	300	0	75	75	18.0	95	106	119						
100%FA2.0	100	2.0	600	300	0	100	50	36.0			50	109					
80%FA0.5	80	0.5	600	240	60	50	100	22.5	77		107	122	137				
80%FA1.0	80	1.0	600	240	60	75	75	45.0			65	90	106			135	
80%FA2.0	80	2.0	600	240	60	100	50	54.0					87	107		121	
60%FA0.5	60	0.5	600	180	120	50	100	45.0				85	108		138		
60%FA1.0	60	1.0	600	180	120	75	75	58.5						105	110	112	126
60%FA2.0	60	2.0	600	180	120	100	50	58.5						100	108	115	

หมายเหตุ : * หมายถึง ปริมาณน้ำพิเศษ (Extra Water) ที่น้อยที่สุดที่ทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109 [13] โดยสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวเป็นสัดส่วนผสมที่ใช้ในการทดสอบในขั้นตอนการวิจัยอื่นต่อไป



รูปที่ 5 ปริมาณน้ำพิเศษของชุดตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

3.2 ระยะเวลาการก่อตัว

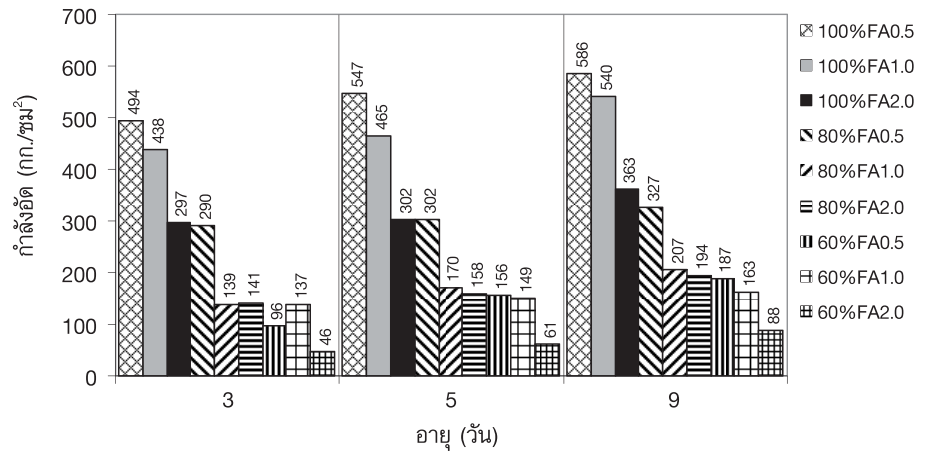
ดังแสดงในตารางที่ 4 พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีอัตราส่วนเถ้าลอยต่อเถ้าแกลบ FA/RHA เท่ากันมีเวลาการก่อตัวทั้งระยะต้นและระยะสุดท้ายลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH) ลดลง ดังเช่น ชุดตัวอย่าง 80%FA0.5, 80%FA1.0 และ 80%FA2.0 (อัตราส่วน FA/RHA เท่ากัน มีอัตราส่วน NS/NH ต่างกัน คือ 0.5, 1.0 และ 2.0 ตามลำดับ) มีเวลาการก่อตัวระยะต้น เท่ากับ 75, 52 และ 42 นาที ตามลำดับ และเวลาการก่อตัวระยะสุดท้าย เท่ากับ 110, 78 และ 69 นาที ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วนเถ้าลอยและเถ้าแกลบต่อสารละลายด่างมีผลต่อปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรซ์เซชั่น (Geopolymerisation) ทั้งนี้เพราะปฏิกิริยาดังกล่าวต้องการซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยและเถ้าแกลบ [16-17] โดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การสร้างโครงซิลิเกตที่ได้จากการละลาย (Dissolve) ของซิลิกา (SiO_2) และ อะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในเถ้าลอยและเถ้าแกลบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และก่อตัวเป็นโมโนเมอร์ (Monomer) ใน 2 มิติของโพลิซิลาเลต (- Si – O – Al – O- (poly[silalate]) มีมากขึ้น ทำให้โครงสร้างภายในแข็งแรงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลให้ระยะเวลาการก่อตัวเร็วขึ้น

ตารางที่ 4 ระยะเวลาก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

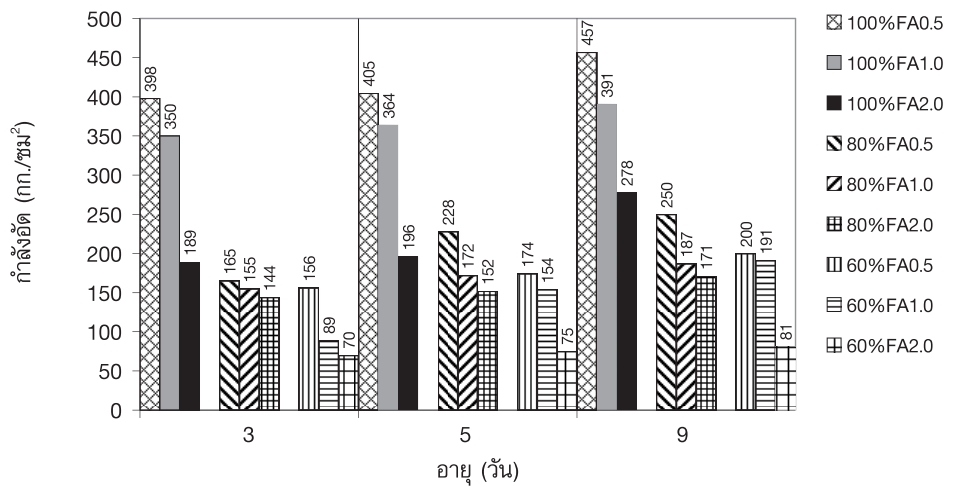
ชุดตัวอย่าง	ระยะเวลาก่อตัว (นาที)	
	ระยะต้น	ระยะสุดท้าย
100%FA0.5	72	106
100%FA1.0	29	37
100%FA2.0	19	32
80%FA0.5	75	110
80%FA1.0	52	78
80%FA2.0	42	69
60%FA0.5	57	86
60%FA1.0	16	35
60%FA2.0	11	23

3.3 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

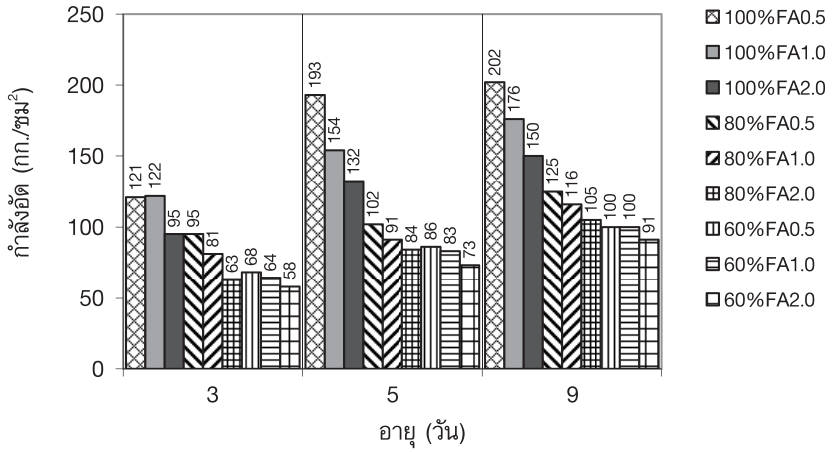
การบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบด้วยความร้อนเป็นแบบการบ่มแห้ง สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี ได้แก่ การบ่มด้วยวิธีธรรมดาในเตาอบไฟฟ้า (Electric Oven) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และบ่มด้วยเตาไมโครเวฟบ้าน (Domestic Microwave) ที่กำลัง 800 วัตต์ โดยผลการทดสอบค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์หลังการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้า และพลังงานไมโครเวฟแสดงได้ดังรูปที่ 6-9 โดยจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของความสามารถในการรับแรงอัดแปรผันตามปริมาณของเถ้าลอย [17] และปริมาณของ NaOH ซึ่งระยะเวลาการบ่มที่มากขึ้นไม่มีผลต่อกำลังอัดที่มากขึ้นตามระยะเวลา โดยในที่นี้ระยะเวลาการบ่มที่ 24 ชั่วโมงทำให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าการบ่มเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ซึ่งจะตรงกันข้ามกับการบ่มที่อุณหภูมิห้องที่บ่มในระยะเวลาที่นานขึ้นมีผลต่อกำลังอัดที่มากขึ้น ในขณะที่การบ่มด้วยเตาอบทำให้กำลังอัดสูงกว่าการบ่มด้วยเตาไมโครเวฟ กล่าวคือ ที่อายุของตัวอย่างเพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้น นอกจากนั้นค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของเถ้าลอยที่ลดลงอาทิเช่น กำลังอัดของตัวอย่าง 100%FA0.5, 80%FA0.5 และ 60%FA0.5 ที่อายุ 3 วัน บ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 494, 290 และ 96 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ เป็นต้น



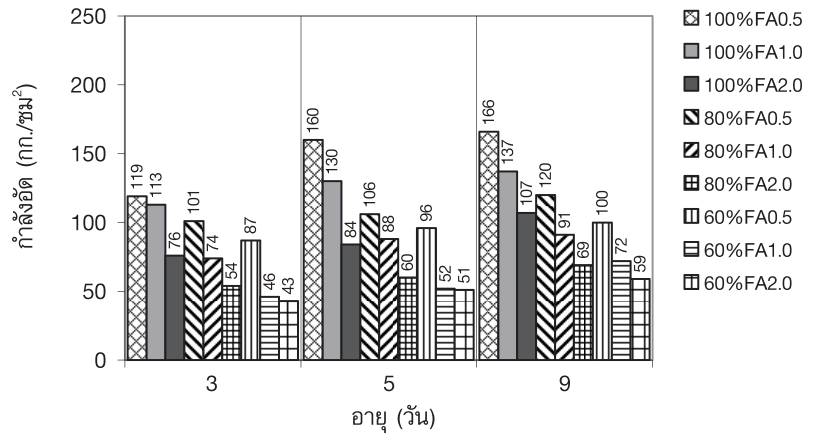
รูปที่ 6 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ สำหรับการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



รูปที่ 7 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ สำหรับการบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 8 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ สำหรับการบ่มด้วยเตาไมโครเวฟบ้าน ที่กำลังงาน 800 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที



รูปที่ 9 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ สำหรับการบ่มด้วยเตาไมโครเวฟบ้าน ที่กำลังงาน 800 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Na_2SiO_3/NaOH พบว่า สัดส่วนในการผสมสารละลายด่างมีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบ กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Na_2SiO_3/NaOH เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดลดลง เช่น กำลังอัดของตัวอย่าง 100%FA0.5, 100%FA1.0 และ 100%FA2.0 อายุ 3 วัน ซึ่งบ่มด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่า 494, 438 และ 297 กก./ซม.^{2} ตามลำดับ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการทดสอบสมบัติของวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าลอยและเถ้าแกลบเป็นส่วนประกอบ และภายใต้การบ่มในเตาอบไฟฟ้าและพลังงานไมโครเวฟสามารถสรุปผลได้ดังนี้

4.1 การเพิ่มปริมาณน้ำสามารถทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่เพิ่มขึ้น โดยปริมาณน้ำที่เติมเพิ่มขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH

4.2 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน Na_2SiO_3 ต่อ NaOH เพิ่มขึ้น

4.3 จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่มีเถ้าลอยล้วนเป็นส่วนประกอบมีกำลังอัดสูงสุดทั้งภายใต้การบ่มด้วยเตาอบและพลังงานไมโครเวฟ โดยกำลังอัดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเถ้าแกลบในส่วนผสม นอกจากนั้นกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยและเถ้าแกลบซึ่งบ่มในเตาอบไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบพระคุณ บริษัท ปทุมไรซ์มิล แอนด์ แกรนารี จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์เถ้าแกลบเพื่อใช้ในการวิจัย โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ที่ได้อนุเคราะห์เถ้าลอยเพื่อใช้ในการวิจัย คุณณัฐวุฒิ กองม่วง ผู้จัดการส่วนควบคุมคุณภาพ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ในการทดสอบเถ้าแกลบ รวมทั้ง ศาสตราจารย์ ดร. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้ห้องปฏิบัติการ หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) และคุณปรัชญา วงศ์เพชรขาว และ คุณพิมล์วดี บุญบูรพงศ์ ที่ได้ช่วยเหลือในรวบรวมข้อมูลผลการวิจัยจนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Davitdovits, J., 1994, “Properties of Geopolymer Cements”, In Kiev (Eds.), *Proceedings of The First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials*, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, pp.131-149.

2. Rattanasak, U. and Chindaprasirt, P., 2008, “A Comparative Study on Properties of Geopolymeric Material from Coal Ash”, *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 31, pp. 371-381. (In Thai)

3. Fernandez-Jimenez, A., Palomo, A. and Criado, M., 2005, “Microstructure Development of Alkali-activated Fly Ash Cement: A Descriptive Model”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 1204-1209.

4. Van, Jaarsveld J.G.S, van, Deventer J.S.J. and Lukey, G.C., 2003, “The Characterization of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers”, *Materials Letters*, Vol. 57, pp. 1272-1280.

5. Detphan, S., Chindaprasirt, P. 2009, “Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer”, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Volume 16, pp. 720-726.

6. Makul, N., Rattanadecho, P., Chatveera, B., and Dinesh ,D. K., 2010, “Microwave curing at An Operating Frequency of 2.45 GHz of Portland Cement Paste at Early-stage using A Multi-Modes Cavity”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, pp.1487-1495.

7. Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2001, “A Numerical and Experimental Investigation of the Modeling of Microwave Drying Using a Rectangular Wave Guide”, *Drying Technology An International J.*, Vol. 19(9), pp. 2209-2234.

8. Wessapan, T, Srisawatdhisukul, S., and Rattanadecho, P., 2011, “The effects of dielectric Shield on specific Absorption Rate and Heat Transfer in The Human Body Exposed to Leakage Microwave energy”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38, pp. 255-262.

9. Jumrat, S. and Chatveera, B., 2010, “Influence of Mix Proportions on Physical and Dielectric Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar”, *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 33, pp. 145-162. (In Thai)

10. Makul, N., Keangin, P., Rattanadecho, P. and Agrawal, D.K., 2010, “Microwave-assisted Heating of Cementious Materials: Relative Dielectric Properties, Mechanical Property, and Experimental and Numerical Heat Transfer

Characteristics", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, pp. 1096-1105.

11. Vongpradubchai, S. and Rattanadecho, P., 2011, "Microwave and Hot Air Drying of Wood Using a Rectangular Waveguide", *Drying Technology An International J.*, Vol. 29, pp. 451-460.

12. American Society for Testing and Material, 2006, "ASTM C778-06 Standard Specification for Standard Sand", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

13. American Society for Testing and Material, 2011, "ASTM C109/C109M-11a Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

14. American Society for Testing and Material, 2008, "ASTM C230/C230M-08 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

15. American Society for Testing and Material, 2007, "ASTM C1437-07 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02*, Philadelphia, PA, USA.

16. Hardjito, D. and Rangan, B. V., 2005, "Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", *Research Report GC1*, Perth, Australia: Faculty of Engineering, Curtin University of Technology.

17. Palomo, A., Grutzeck, M.W. and Blanco, M.T., 1999, "Alkali-activated Fly Ashes: A Cement for The Future", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, No. 8, pp. 1323-1329.