สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยภายใต้การบ่มด้วยพลังงานโครเวฟ: อิทธิพลของแหล่งเถ้าลอยและอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอย (Fly Ash-based Geopolymer Mortar (FGM)) โดยใช้เถ้าลอย 2 แหล่งคือ เถ้าลอยแม่เมาะจากจังหวัดลำปาง และเถ้าลอยจากจังหวัดระยอง และกำหนดอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ศึกษาในสภาวะสดได้แก่ ค่าการไหลแผ่ ระยะเวลาการก่อตัว และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายใต้ 3 วิธีการบ่มคือ (ก) บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง (ข) บ่มในเตาอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 °C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง และ (ค) บ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับความถี่เท่ากับ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต และกำลังแมกนีตรอนเท่ากับ 100, 300 และ 450 วัตต์ เป็นระยะเวลา 5, 15 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ สำหรับสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ภายหลังการบ่มได้แก่ การพัฒนากำลังอัดในช่วงต้น โครงสร้างระดับจุลภาค ค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิที่วัสดุที่เปลี่ยนแปลงไป หมู่ฟังก์ชัน และความพรุนของตัวอย่าง

ผลการทดสอบพบว่า ค่าความต้องการน้ำของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH เพิ่มขึ้น ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวมีค่าลดลง เมื่อทำการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยองที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 2.5 ด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C มีกำลังอัดสูงสุด ส่วนจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 1.5 บ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องมีกำลังอัดสูงสุด ขณะที่การบ่มด้วยไมโครเวฟให้กำลังอัดสูงสุดคือ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะที่มีอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 2.5 ที่กำลัง 450 วัตต์ นอกจากนั้นการทดสอบโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่า มีการสร้างพันธะในทุกตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์จากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นของหมู่ฟังก์ชัน Si-O-Si ทำให้เกิดโครงสร้างที่สามารถรับกำลังอัดได้ ในขณะที่โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและพลังงานในระดับต่ำ และจากการวิเคราะห์ความพรุนพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะที่ผ่านการบ่มในเตาอบมีการกระจายโพรงอากาศอย่างสม่ำเสมอและมีขนาดโพรงเล็กกว่าเถ้าลอยระยอง รวมถึงมีปริมาณของโพรงอากาศน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการบ่มด้วยวิธีอื่น

คำสำคัญ : เถ้าลอย / จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ / พลังงานไมโครเวฟ / การบ่ม

---

* *Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th*

1 *สาขาเทคโนโลยีการก่อสร้าง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม*

2 *ผู้วิจัยหลัก, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์*

Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar: Influence of Fly Ash Sources and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) / Sodium Hydroxide (NaOH) Ratios

Natt Makul[1] and

Phranakhon Rajabhat University, 9 Changwattana Road, Bangkhen Bangkok 10220

Burachat Chatveera[2*]

Thammasat University (Rangsit campus), Khlong Luang, Prathum Thani, 12120

Abstract

This paper presents the properties of fly ash-based geopolymer mortar (FGM). Two sources of fly ash obtaining from Mae-moh fly ash in Lampang province and Rayong fly ash in Rayong province were used. In addition, the activate alkali solution ratios of sodium silicate (Na_2SiO_3) / sodium hydroxide (NaOH) were studied. The fresh state properties of FGM included flowability, setting times and temperature rise during subjecting to three curing methods--(a) water at room temperature, (b) continuous curing in electric oven at temperature levels of 40°C, 60°C and 80°C for 24 hours, and (c) microwave energy at an operating frequency of 2.45 ± 0.05 GHz with magnetron powers of 100, 300 and 450 watt for 5, 15 and 30 minutes, respectively. The properties to be studied after curing were compressive strength, microstructural characteristics, change in heating energy and temperature, group function and porosity.

The test results indicated that the water requirement of FGM was increased as increased of Na_2SiO_3/NaOH ratio, while setting times were conversely decreased. When curing the FGM prepared by Rayong fly ash with a Na_2SiO_3/NaOH ratio of 2.5 using electric oven at 60°C, the highest compressive strength of mortar was obtained. Further FGM prepared by Mae-moh fly ash with a Na_2SiO_3/NaOH ratio equal to 1.5 by water curing gained the highest one. Curing by microwave energy at 450 watt gained the highest compressive strength of FGM containing Mae-moh fly ash with a Na_2SiO_3/NaOH ratio of 2.5. From microstructural test, it was found that the Si-O-Si functional groups were formed in all FGM samples from geopolymerization process resulting in forming structure that developed compressive strength. Whereas FGM structures have low weight change and low energy level. Finally, from the pore size analysis, it indicated that FGM containing Mae-moh fly ash curing by oven has higher uniformity in pore size than that of FGM containing Rayong fly ash, and has the smallest pore volume when compared to FGM under other curing methods.

Keywords : Curing / Fly ash / Geopolymer mortar / Microwave energy

* *Corresponding author : cburacha@engr.tu.ac.th*

1 *Department of Construction Technology, Faculty of Industrial Technology.*

2 *Corresponding author, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

ในปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุหลักซึ่งทำหน้าที่ยึดประสานในคอนกรีตคือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ซึ่งได้มาจากกระบวนการเผาแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่อุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส แต่เป็นทราบกันอยู่แล้วว่าในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีส่วนสำคัญก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน จากผลกระทบดังกล่าวทำให้เกิดแนวคิดที่จะลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ประเภทดังกล่าวด้วยการนำวัสดุอื่นมาผสมทดแทน อาทิเช่น วัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมต่างๆ แต่วัสดุปอซโซลานไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด เนื่องมาจากปริมาณซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในวัสดุดังกล่าวต้องทำปฏิกิริยาร่วมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชั่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนาวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ใช้วัสดุปอซโซลานที่มีซิลิคอนไดออกไซด์และอะลูมินาออกไซด์ที่เรียกว่า “จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer)” [1-3]

จีโอโพลิเมอร์เป็นวัตถุดิบชนิดโพลิเมอร์อนินทรีย์ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ ราคาถูก มีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ และมีคุณสมบัติดีเยี่ยมที่อุณหภูมิสูง สารประกอบจีโอโพลิเมอร์อนินทรีย์ค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ.1950 โดย Glukhovsky ชาวโซเวียต หลังจากนั้นในปี 1970 มีการนิยามความหมายของจีโอโพลิเมอร์เป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ผู้เชี่ยวชาญด้านวัสดุ ชาวฝรั่งเศส ชื่อ Joseph Davidovits [4,5] ซึ่งอธิบายไว้ว่า “จีโอโพลิเมอร์” เป็นวัสดุยึดประสานแร่ธาตุ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีคล้ายกับซีโอไลท์ (Zeolite) แต่มีโครงสร้างอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) และโครงสร้างเคมีอยู่ในรูปโพลีไซอะเลท (Polysialate) ต่อมาได้มีการอธิบายความหมาย จีโอโพลิเมอร์ว่าเป็นสารเชื่อมประสานที่สามารถใช้แทนปูนซีเมนต์ได้ โดยหลักของการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิคอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) เกิดเป็นโมเลกุลลูกโซ่เชิงซ้อนในลักษณะของโพลิเมอร์ ซึ่งการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ของ Si และ Al ดังกล่าวต้องใช้สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงร่วมกับการให้ความร้อนเป็นตัวกระตุ้น [6]

จีโอโพลิเมอร์มีความแตกต่างจากวัสดุยึดประสานของปูนซีเมนต์ผสมวัสดุปอซโซลานตรงที่จีโอโพลิเมอร์ไม่เกิดผลิตภัณฑ์เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) ที่มีความสามารถในการรับกำลังได้ แต่จีโอโพลิเมอร์เกิดจากการรวมตัวแบบควบแน่น (Polycondensation) ของ SiO_2 และ Al_2O_3 ในสารตั้งต้น (Precursors) ที่สภาวะความเป็นด่างสูงทำให้ได้โครงสร้างมีความแข็งแรงจึงเรียกจีโอโพลิเมอร์ว่า “วัสดุเชื่อมประสานอัลคาไล แอคติเวตเตดอะลูมิโนซิลิเกต” (Alkali-activated Aluminosilicate Binder) โดยในกระบวนการจะได้ซิลิเกตและอะลูมิเนตอิสระ โดยก่อตัวเป็นโครงสร้างที่มี 3 แขน ซึ่งโครงสร้างนี้จะเชื่อมโยงกันระหว่าง SiO_4 และ AlO_4^- จะกลายเป็นโครงสร้าง 4 แขนที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งกันละกัน [7]

ในปัจจุบันของเสียทิ้งจากกระบวนการผลิตของภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมมีมาก หนึ่งในนั้นได้มาจากกระบวนการผลิตไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการเผาถ่านหินลิกไนต์ในประเทศไทย โดยจะได้ของเสียเป็น เถ้าลอยหรือเถ้าถ่านหิน (Pulverized Fuel Ash) ซึ่งนิยมนำไปเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์วัสดุประเภทจีโอโพลิเมอร์ [8-10] แต่จะเห็นได้ว่ามูลค่าของเถ้าลอยได้ขยับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตนิยมนำเถ้าลอยไปทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพื่อลดต้นทุน แต่กระนั้นในการผลิตคอนกรีตก็ยังคงต้องมีปูนซีเมนต์ ดังนี้เพื่อเพิ่มทางเลือกของการผลิตวัสดุเชื่อมประสารจำพวกจีโอโพลิเมอร์ ประกอบกับเงื่อนไขสำคัญของการผลิตวัสดุประเภทต้องมีความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการบ่มด้วยวิธีต่างๆ ต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอย โดยศึกษาร่วมกับความแตกต่างของแหล่งที่มาของเถ้าลอยและสัดส่วนผสมของสารละลายด่างโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยในสภาวะสดและแข็งตัวแล้ว โดยมีแนวทางการ

เลือกสัดส่วนผสมจากงานวิจัยของ Rattanasak and Chindaprasirt [11] ที่สรุปผลในประเด็นของค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยขึ้นกับอัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH ต้องอยู่ในช่วง 1.0 และ 1.5 นอกจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลกระทบของการบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง การบ่มด้วยเตาอบ และการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่สภาวะต่างๆ ซึ่งเป็นการพัฒนาต่อเนื่องจากผลการวิจัยของ Chatveera and Makul [12] และ Jumrat and Chatveera [13] ที่ได้ทำการศึกษาจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จากเถ้าลอยและเถ้าแกลบ สมบัติทางกายภาพ และสมบัติไดอิเล็คทริคที่เกี่ยวข้องภายใช้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟตามลำดับ นอกจากนั้นจากผลงานการวิจัยที่ผ่านมาของ Muniz-villarreal และคณะ [14] ได้อธิบายผลกระทบที่มีต่อกระบวนการจีโอโพลีเมอร์ไลเซชั่นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิการบ่ม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สรุปว่า การบ่มที่อุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมกับกระบวนการเกิดจีโอโพลีเมอร์ไลเซชั่นที่สุด และกำลังอัดของจีโอโพลีเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้ยังขึ้นอยู่กับกำลังของจีโอโพลิเมอร์และมวลรวม โดยการเพิ่มสัดส่วนมวลรวมในมอร์ต้าร์จะลดการเกิดกระบวนการจีโอโพลีเมอร์ไรเซชั่น [15] อีกทั้งจากผลการวิจัยของ Daniel และคณะ [16,17] สรุปว่า เถ้าลอยซึ่งกระตุ้นโดยโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุด

2. ระเบียบวิธีการวิจัย

2.1 วัสดุ

2.1.1 เถ้าลอย ในงานวิจัยนี้ใช้เถ้าลอย 2 แหล่ง คือ เถ้าลอยแม่เมาะจากจังหวัดลำปาง และเถ้าลอยจากจังหวัดระยอง เมื่อพิจารณาองค์ประกอบเคมีดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า เถ้าลอยมีปริมาณซิลิคอนออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลัก และเมื่อเปรียบเทียบเถ้าลอยทั้งสองชนิดพบว่า เถ้าลอยระยองมีองค์ประกอบหลักมากกว่าเถ้าลอยแม่เมาะ และจากข้อกำหนดของการจัดประเภทสารปอซโซลานตามมาตรฐาน ASTM C618 [18] ได้ข้อสรุปว่า เถ้าทั้งสองแหล่งไม่สามารถจัดอยู่ในประเภท C และ F ได้ เนื่องจากอัลคาไลในรูปของโซเดียมไดออกไซด์เทียบเท่า ($(Na_2O)_{eq}$) มากกว่าที่มาตรฐานกำหนดดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 1 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง

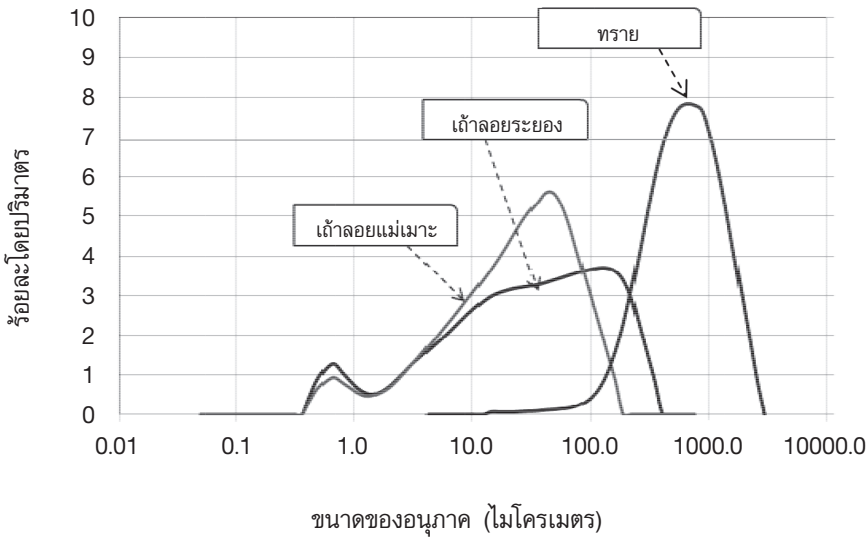
สารประกอบออกไซด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	SO_3	K_2O	CaO	MnO_2	Fe_2O_3
เถ้าลอยแม่เมาะ (Mae-moh fly ash)	1.86	2.53	16.03	35.01	0.31	5.69	3.51	19.45	0.13	0.07
เถ้าลอยระยอง (Rayong fly ash)	0.56	1.27	17.88	39.94	0.35	5.28	1.61	18.20	14.48	7.45

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบองค์ประกอบเคมีและสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยองตามมาตรฐาน ASTM C618 [18]

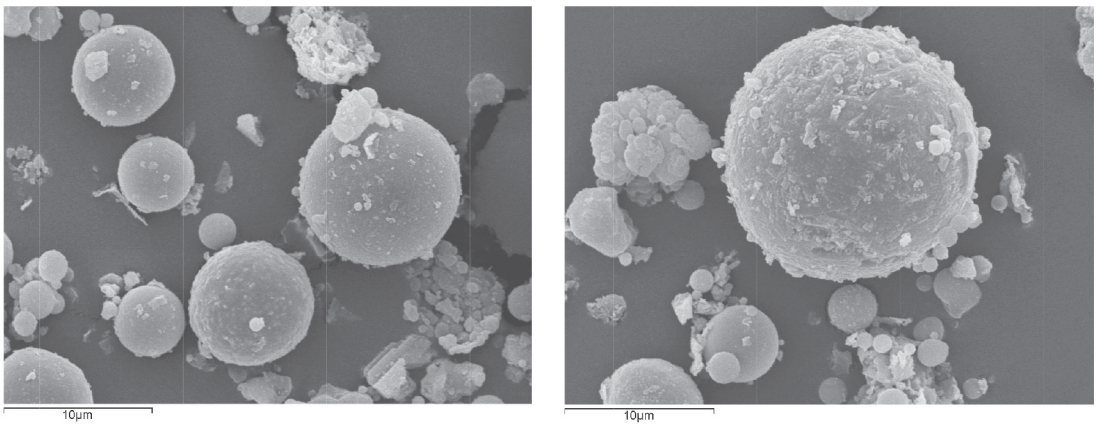
องค์ประกอบเคมีและกายภาพ	เถ้าลอย แม่เมาะ	เถ้าลอย ระยอง	ประเภทของเถ้าลอย	
			F	C
ผลรวมของปริมาณซิลิกาออกไซด์ อะลูมินาออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3) ร้อยละต่ำสุด	65.22	65.27	70.0	50.0
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3) ร้อยละสูงสุด	5.69	5.28	5.0	5.0
ปริมาณความชื้น ร้อยละสูงสุด	-	-	3.0	3.0
น้ำหนักที่สูญเสียเนื่องจากการเผา (LOI) ร้อยละสูงสุด	-	-	6.0	6.0
อัลคาไลในรูปของโซเดียมไดออกไซด์ เทียบเท่า $(Na_2O)_{eq}$ ร้อยละสูงสุด	4.20	1.62	1.50	1.50

สำหรับสมบัติทางกายภาพเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง พบว่าขนาดอนุภาคของเถ้าลอยแม่เมาะมีขนาดโดยเฉลี่ย (d_{50}) อยู่ที่ 37.2 ไมโครเมตร (μm) ส่วนเถ้าลอยระยองอยู่ที่ 71 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งเถ้าลอยแม่เมาะมีอนุภาคขนาดเล็กกว่าเถ้าลอยระยอง

จากภาพถ่ายขยายของเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยองที่กำลังขยาย 3500 เท่า ดังรูปที่ 2 จะเห็นว่าอนุภาคของตัวอย่างเถ้าลอยมีลักษณะรูปทรงกลมคล้ายกัน มีลักษณะทรงกลมผิวเรียบกว่าเถ้าลอยระยองที่มีลักษณะรูปทรงกลมบิดเบี้ยวบ้างและมีผิวขรุขระ



รูปที่ 1 การกระจายขนาดคละของอนุภาคเถ้าลอยแม่เมาะ เถ้าลอยระยอง และทรายแม่น้ำ



(ก) เถ้าลอยแม่เมาะ (ข) เถ้าลอยระยอง

รูปที่ 2 ลักษณะของอนุภาค (ก) เถ้าลอยแม่เมาะ และ (ข) เถ้าลอยระยองที่กำลังขยาย 3,500 เท่า

2.1.2 มวลรวมละเอียด ใช้ทรายแม่น้ำคละขนาด (Graded Standard Sand) ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง ดังระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C778 [19]

2.1.3 สารละลาย

2.1.3.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีลักษณะเป็นเกล็ด มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 98

2.1.3.2 โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ประกอบด้วยโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และน้ำ (H_2O) เท่ากับร้อยละ 9.58, 28.75 และ 61.67 โดยมวล ตามลำดับ

2.1.4 น้ำ ใช้น้ำประปาที่มีค่า pH เท่ากับ 7.0

2.2 การเตรียมตัวอย่าง

2.2.1 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) อัตราส่วนเถ้าลอยต่อสารละลายด่าง (Fly ash/Alkaline Hydroxide, FA/AS) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 3.0

2) อัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Na_2SiO_3/NaOH) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 0.5, 1.5 และ 2.5

3) ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เท่ากับ 1.10 โมล่าร์ (M)

4) อัตราส่วนของทรายต่อเถ้าลอยโดยน้ำหนัก เท่ากับ 2.5

2.2.2 ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผสมเถ้าลอยและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ให้เข้ากันในหม้อผสมด้วยความเร็วของใบพายเท่ากับ 285 ± 10 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที

2) เททรายลงไปในหม้อ แล้วผสมต่ออีก 1 นาที

3) เทสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ลงไปในหม้อผสม แล้วปั่นกวนต่ออีก 2 นาที

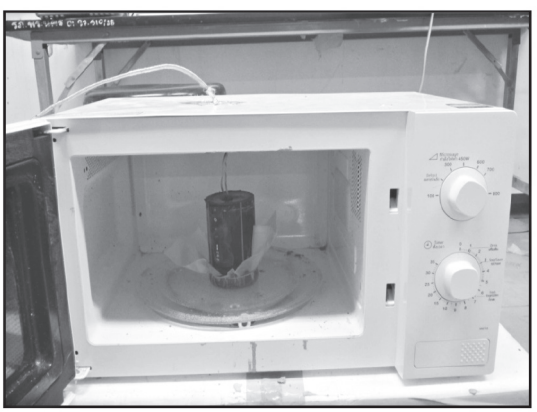
2.2.3 เงื่อนไขการบ่ม

การบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สภาวะการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอย

วิธีการบ่ม	สภาวะการบ่ม
1) บ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง	บ่มน้ำทันที เมื่อตัวอย่างอายุครบ 24 ชั่วโมง
2) บ่มในเตาอบ (รูปที่ 3 (ก))	บ่มทันทีหลังจากผสมเสร็จ (นำเข้าเตาอบทั้งแบบหล่อ) 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
3) บ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ (รูปที่ 3 (ข))	บ่มทั้งแบบหล่อที่ระดับกำลังไมโครเวฟเท่ากับ 100, 300 และ 450 วัตต์ โดยทำการ - บ่มทันทีหลังจากผสมเสร็จ - ทิ้งตัวอย่างไว้เป็นเวลา 30 นาที จึงทำการบ่ม - ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่ม - ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่ม มีเงื่อนไขสำหรับช่วงระยะเวลาในบ่มซึ่งอาศัยผลการทดลองเบื้องต้นมีดังนี้ 1. ใช้ระยะเวลาจนครบ 30 นาที ในกรณีที่อุณหภูมิภายในตัวอย่างขึ้นสูงไม่เกินกว่า 90 องศาเซลเซียส 2. ในกรณีที่อุณหภูมิภายในตัวอย่างขึ้นสูงเกินกว่า 90 องศาเซลเซียส ให้คงการบ่มไว้เป็นระยะเวลา 1 นาที

(ก) เตาอบ



(ข) เตาไมโครเวฟ

รูปที่ 3 การบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอย

2.3 การทดสอบสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

สมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ในสภาวะสดประกอบด้วย ค่าการไหลแผ่ และระยะเวลาการก่อตัว มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เนื่องจากร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐานบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะที่สามารถขึ้นรูปได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยวิธีโต๊ะเขย่า (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ศึกษาความข้นเหลว (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม) ของซีเมนต์มอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C1437 [20] สำหรับสัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ใช้ในการทดสอบการไหลแผ่แสดงในตารางที่ 4 และหากค่าร้อยละการไหลแผ่ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ของตัวอย่างแต่ละชุดไม่อยู่ในมาตรฐาน ASTM C1437 [20] (ร้อยละ110 ± 5) ให้เติมน้ำพิเศษลงไปส่วนผสมจนค่าร้อยละการไหลแผ่ของตัวอย่างอยู่ในมาตรฐานกำหนด โดยปริมาณน้ำพิเศษคิดเป็นอัตราส่วนน้ำต่อเถ้าลอย เมื่อทดสอบการไหลแผ่ผ่านแล้วจึงทำการทดสอบหาค่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C191 [21]

ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่สอดคล้องกับสภาวะที่สามารถขึ้นรูปได้ของแต่ละสัดส่วนผสมจะบ่มด้วย 3 วิธีได้แก่ (ก) บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมงต่อเนื่อง โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. ความสูง 10 ซม. จำนวน 3 ตัวอย่าง ในแต่ละสัดส่วนผสม (ข) บ่มในเตาอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ต่อเนื่อง โดยใช้ตัวอย่างขนาดเดียวกับการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จำนวน 3 ตัวอย่าง ในแต่ละสัดส่วนผสมและอุณหภูมิการบ่ม และ (ค) บ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับความถี่เท่ากับ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต และกำลังของแมกนีตรอนเท่ากับ 100, 300 และ 450 วัตต์ จนกระทั่งอุณหภูมิของตัวอย่างเพิ่มขึ้นจนถึง 90 องศาเซลเซียส โดยใช้ตัวอย่างขนาดเดียวกับการบ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง จำนวน 3 ตัวอย่าง ในแต่ละสัดส่วนผสมและกำลังวัตต์ของไมโครเวฟ โดยทำการบันทึกอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในตัวอย่างตลอดช่วงเวลาที่ทำการบ่ม

ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงอายุทดสอบ (1, 3, 7 และ 28 วัน) จึงนำมาทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 [22] โดยใช้ตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม ความสูง 10 ซม. จำนวน 288 ตัวอย่าง และสมบัติของการสลายตัวและการคงสภาพของตัวอย่าง จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยการวิเคราะห์ทางความร้อน (Thermogravimetric Analysis) โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) การกระจายขนาดโพรงด้วยเทคนิค Mercury intrusion porosimetry (MIP) และหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)

ตารางที่ 4 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สำหรับการทดสอบหาค่าการไหล่แผ่และระยะเวลาการก่อตัว

ชุดตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก			น้ำหนัก (กรัม)					Flow (ร้อยละ)
	FA/AS	Na_2SiO_3/NaOH	Sand/FA	ทราย	เถ้าลอย	Na_2SiO_3	NaOH	น้ำ*	
Maemoh-A0.5	3.0	0.5	2.5	1125	450	50	100	247	115
Maemoh-A1.5	3.0	1.5	2.5	1125	450	90	60	243	113
Maemoh-A2.5	3.0	2.5	2.5	1125	450	107	43	225	115
Rayong-A0.5	3.0	0.5	2.5	1125	450	50	100	189	105
Rayong-A1.5	3.0	1.5	2.5	1125	450	90	60	198	107
Rayong-A2.5	3.0	2.5	2.5	1125	450	107	43	207	106

หมายเหตุ : สัญลักษณ์ (*) หมายถึง ปริมาณน้ำน้อยที่สุดที่ทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C109 [22]

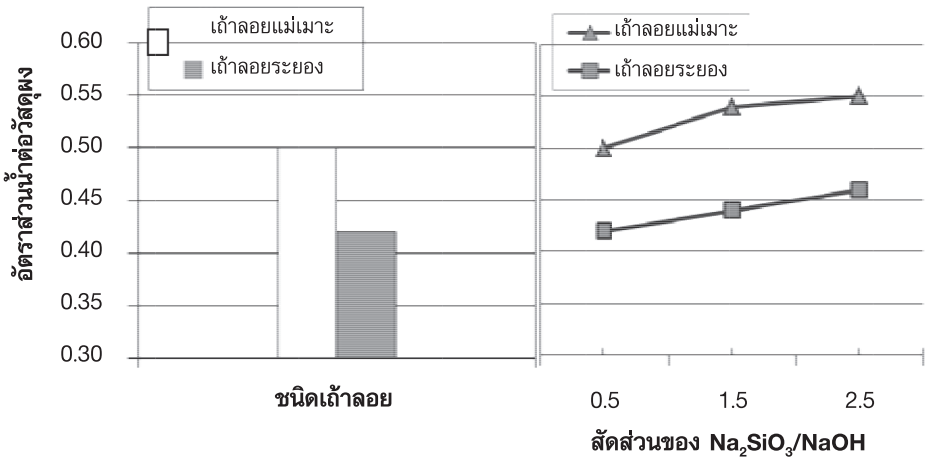
3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ในสภาวะสด

3.1.1 ค่าการไหลแผ่

จากผลการทดสอบพบว่า ร้อยละการไหลแผ่ของตัวอย่างทุกชุดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ไม่ได้เติมน้ำพิเศษไม่อยู่ในข้อกำหนด (ร้อยละ 110 ± 5) โดยชุดตัวอย่างไม่สามารถหาค่าการไหลแผ่ได้เนื่องจากมีความข้นเหนียวของเนื้อมอร์ต้าร์สูงมาก โดยบางชุดตัวอย่างเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็วจึงมีการปรับปรุงค่าการไหลโดยการเติมน้ำพิเศษเพื่อให้มอร์ต้าร์มีค่าการไหลแผ่มากขึ้นและต้องอยู่ในช่วงการไหลดังกล่าวพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะต้องเติมน้ำพิเศษมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยองดังแสดงในรูปที่ 4

จากผลกระทบของอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ต่อปริมาณน้ำจะเห็นได้ว่า ผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Duxson และคณะ [23] ซึ่งพบว่าการพัฒนาโครงสร้างภายในของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องเมื่อปริมาณซิลิคอน (Si) เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการเติม Na_2SiO_3 ที่มากขึ้นจะเป็นการเติม SiO_2 มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นเพื่อปรับอัตราส่วน Si/Al ให้เหมาะสมต่อเกิดเป็นจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นเมื่อเติมสารละลาย Na_2SiO_3 ในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยาและจับตัวกันได้อย่างรวดเร็ว ทั้งนี้จะต้องคำนึงถึงการเติมน้ำในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อปรับให้ตัวอย่างมีความข้นเหลวมีค่าร้อยละการแผ่ไหลตามที่มาตรฐานกำหนดด้วย โดยพบว่าเถ้าลอยแม่เมาะมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4 ปริมาณน้ำที่ต้องการเพื่อผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ให้ได้ค่าการไหลแผ่เท่ากับ ร้อยละ 110 ± 5

3.1.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ดังแสดงในตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH โดยที่อัตราส่วน FA/AS เท่ากัน พบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายลดลงเมื่ออัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเติมสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีส่วนช่วย ในการเติมซิลิคอนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นเกิดขึ้นได้อย่างดี [8] ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แข็งตัวได้เร็วขึ้นทำให้ระยะเวลาในการก่อตัวลดลง

ตารางที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

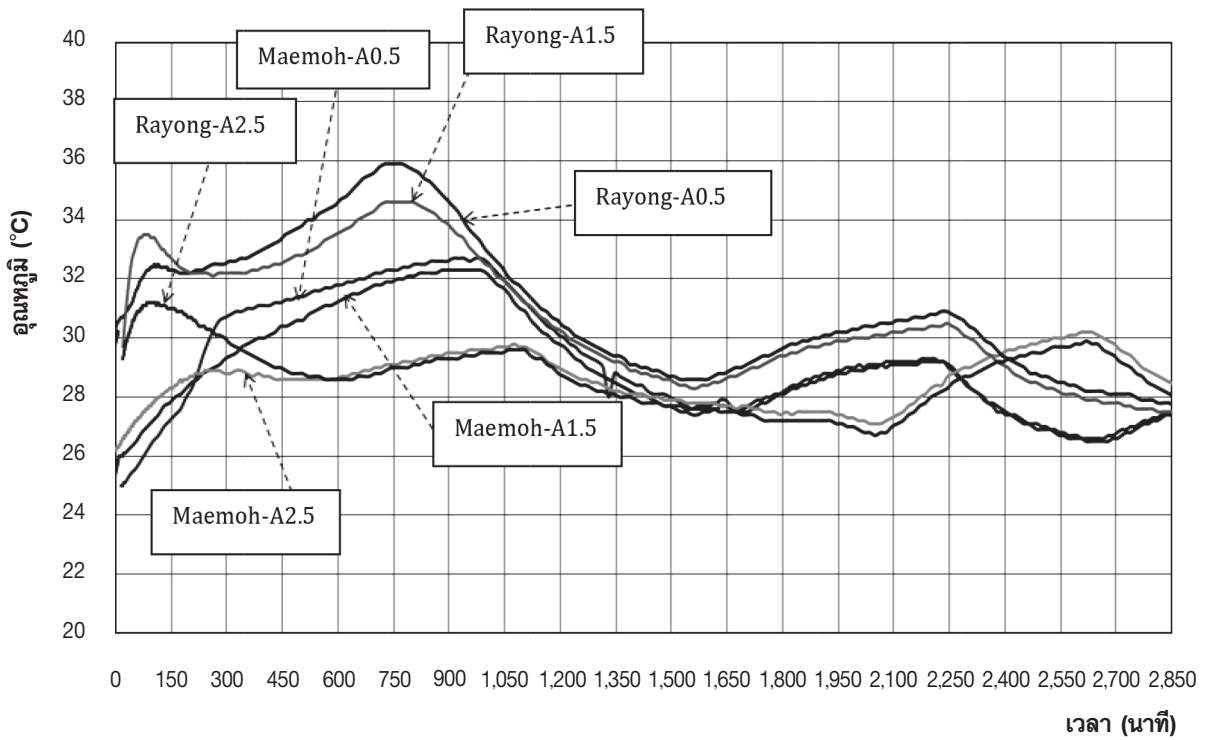
ชุดตัวอย่าง	เวลาก่อตัว (นาที)	
	เริ่มต้น	สุดท้าย
Maemoh-A0.5	375	420
Maemoh-A1.5	325	370
Maemoh-A2.5	20	55
Rayong-A0.5	110	180
Rayong-A1.5	85	135
Rayong-A2.5	15	40

3.2 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ขณะทำการบ่มด้วยวิธีต่างๆ

3.2.1 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

3.2.1.1 บ่มที่อุณหภูมิห้อง

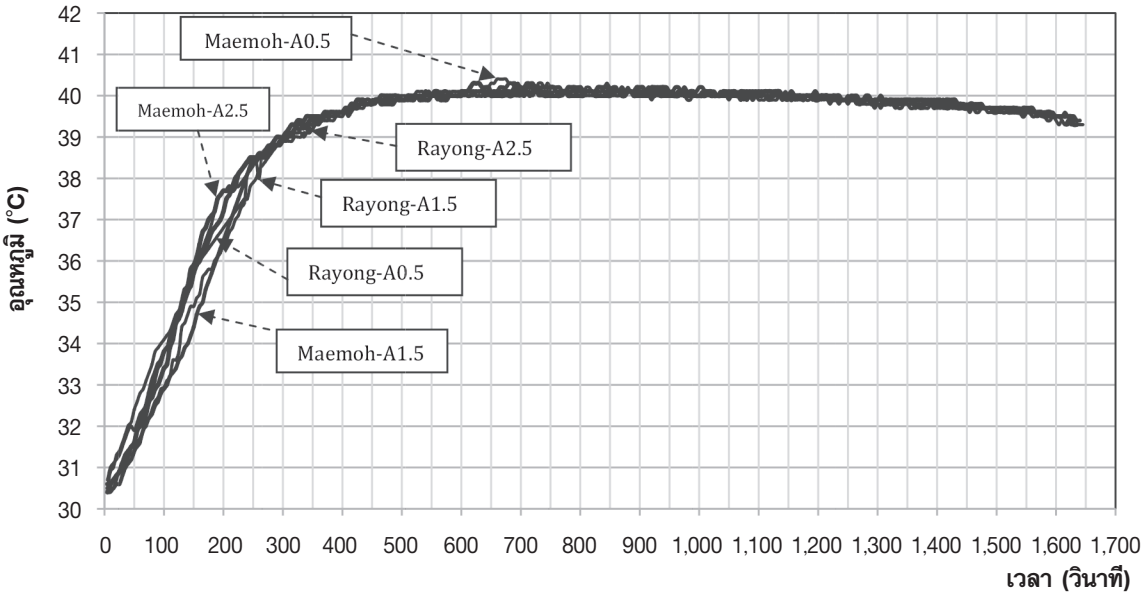
ทำการวัดอุณหภูมิในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เป็นระยะเวลา 3 วัน ต่อเนื่อง ซึ่งตัวอย่างทุกชุดจะถูกหุ้มด้วยพลาสติกใสจำนวน 10 ชั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนสู่ภายนอกโดยทำการวัดอุณหภูมิทุกๆ 15 วินาที ได้ผลตามรูปที่ 5 พบว่า หลังจากผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์จะเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นอย่างรวดเร็ว โดยสังเกตได้จากอุณหภูมิภายในตัวอย่างเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากนั้นมีค่าลดลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง



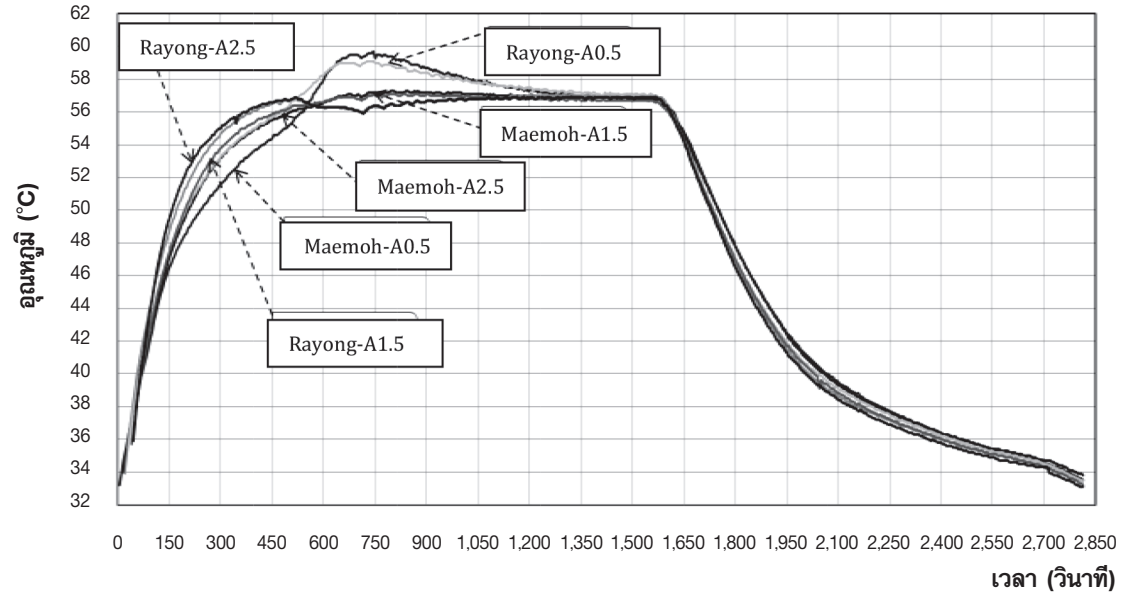
รูปที่ 6 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ขณะบ่มที่อุณหภูมิห้อง

3.2.1.2 บ่มในเตาอบ

การบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ในเตาอบต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งตัวอย่างไว้ในเตาอบจนกระทั่งอุณหภูมิในตัวอย่างลดต่ำลงจนถึงอุณหภูมิห้อง ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้น เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นถูกกระตุ้นด้วยความร้อน จากนั้นในช่วงที่สอง อุณหภูมิของตัวอย่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ต่อจากนั้นเมื่อทำการปิดสวิทช์เตาอบ อุณหภูมิของตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่สาม

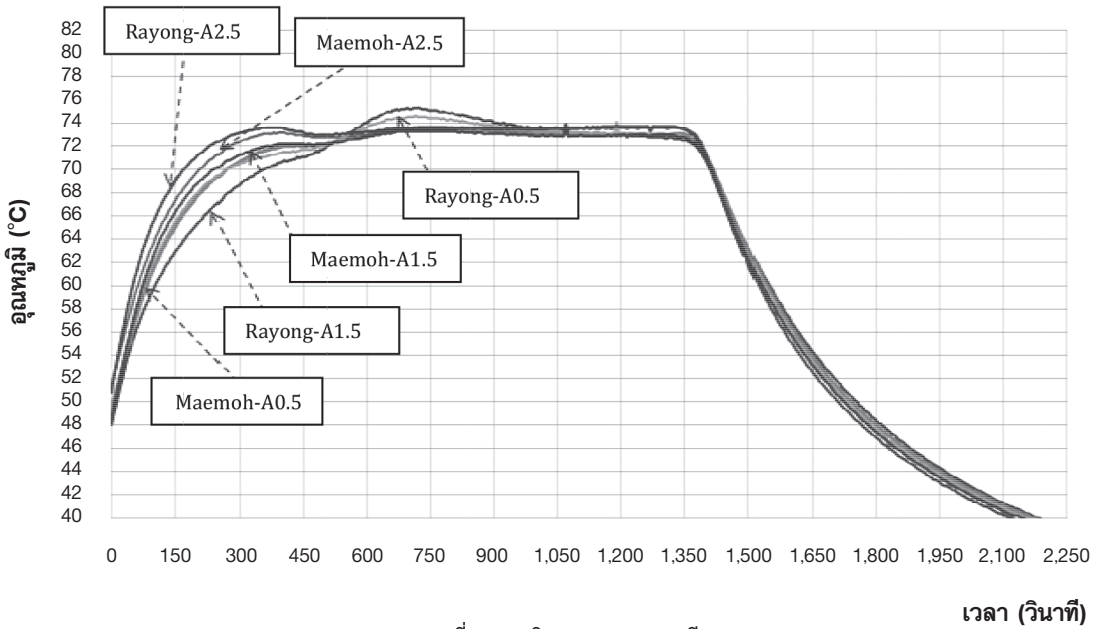


(ก) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



(ข) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

รูปที่ 7 อุณหภูมิภายในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สำหรับการบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ

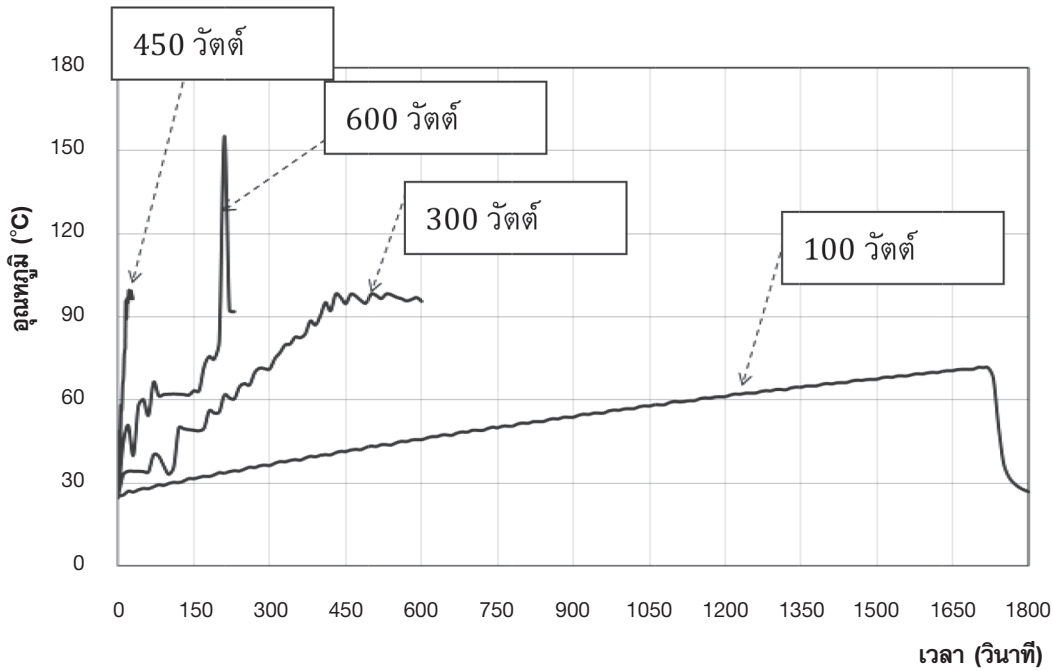


(ค) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

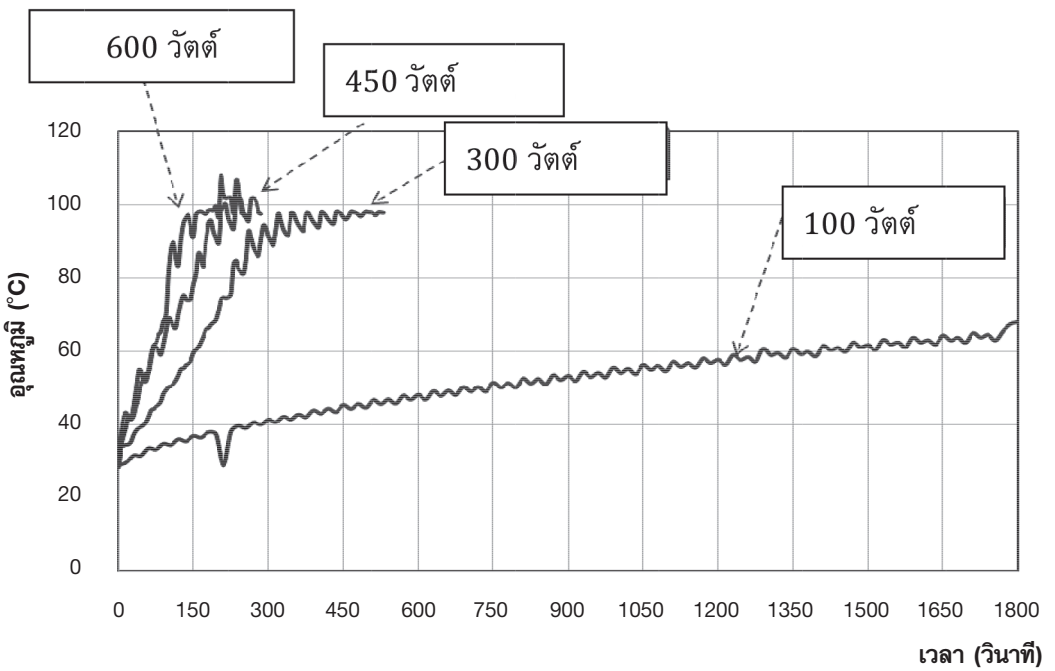
รูปที่ 7 (ต่อ) อุณหภูมิภายในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สำหรับการบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิต่างๆ

3.2.1.3 บ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ทำการวัดอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นภายในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ ตั้งแต่เริ่มให้พลังงานไมโครเวฟจนครบระยะเวลา ในที่นี้กำหนดชุดตัวอย่างได้แก่ จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะ (Maemoh-A1.5) และ จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยอง (Rayong-A0.5) และกำหนดกำลังวัตต์ที่ใช้ในการบ่มคือ 100, 300, 450 และ 600 วัตต์ จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า การบ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลังวัตต์สูงช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ได้สูงภายในระยะเวลาที่สั้นลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากในระหว่างการฟอร์มตัวของจีโอโพลิเมอร์ต้องการความคงที่อุณหภูมิในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยามีการนำความร้อนที่ต่ำมาก ดังนั้นปัญหาเรื่องของถ่ายเทความร้อนจึงเป็นตัวกำหนดความสมบูรณ์ของลักษณะโครงสร้างภายใน แต่จากผลการบันทึกค่า พบข้อดีของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในอันเนื่องมาจากปริมาณน้ำภายในที่ก่อให้เกิดความร้อนสูง แต่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่โครงสร้างภายในฟอร์มตัวแล้วมีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอยู่ในระดับคงที่



(ก) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ Maemoh-A1.5



(ข) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ Rayong-A0.5

รูปที่ 8 อุณหภูมิภายในตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ระหว่างทำการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

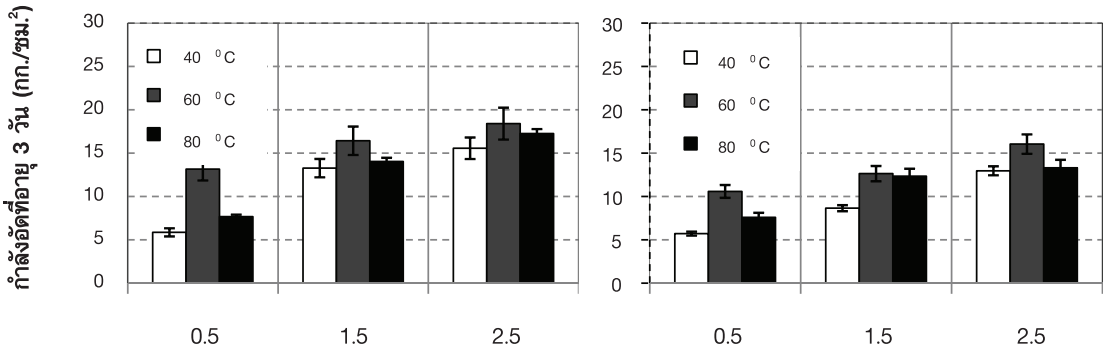
3.3 สมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ภายหลังทำการบ่มด้วยวิธีต่างๆ

3.3.1 อิทธิพลของสภาวะการบ่มต่อการพัฒนากำลังอัด

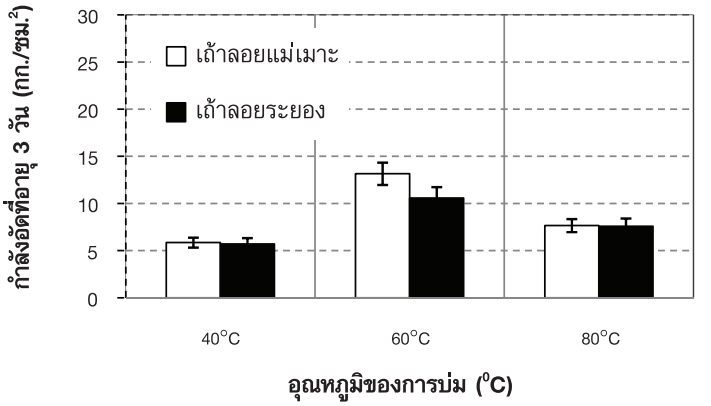
ผลการทดสอบการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ภายหลังทำการบ่มด้วยวิธีต่างๆ แสดงในรูปที่ 9 พบว่า สภาวะการบ่มมีอิทธิพลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยอง โดยในกรณีการบ่มด้วยเตาอบ กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะมีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่ออัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH เพิ่มขึ้นจาก 0.5 ถึง 2.5 ซึ่งแสดงในเห็นว่า ที่อัตราส่วนเพิ่มขึ้นดังกล่าวมีความสัมพันธ์อย่างต่อเนื่องของกระบวนการชะล้าง (Leaching) ของซิลิกาและอะลูมิเนตจากอนุภาคเถ้าลอยและปริมาณผลผลิตจากการฟอร์มตัวในกระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่นมีมากขึ้นตามความเข้มข้นของ Na_2SiO_3 ที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของอุณหภูมิในการบ่มของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ พบว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้งสองแหล่งปรากฏผลในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ที่อุณหภูมิเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่ากำลังอัดสูงที่สุด ซึ่งโดยปกติการบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มมากขึ้น [9] เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในอัตราที่สูงขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่คล้ายคลึงกับการบ่มเพื่อพัฒนากำลังอัดของปูนซีเมนต์ [7] อย่างไรก็ตามมีข้อน่าสังเกตจากผลการทดลองสองประการ คือ เมื่ออุณหภูมิในการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 60 องศาเซลเซียส กำลังอัดกลับมีค่าลดลง เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูงมีความเป็นไปได้ที่โครงสร้างการจัดเรียงตัวจะมีความไม่เป็นระเบียบสูงและเกิดการแตกร้าวภายในขึ้นได้มากกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ในประการสองที่การอบที่อุณหภูมิสูงมีผลโดยตรงต่อการชะล้างของซิลิกาและอะลูมิเนตจนอาจจะมีปริมาณมากเกินกว่าอัตราการฟอร์มตัวของโครงสร้างทำให้ในระบบมีปริมาณซิลิกาและอะลูมิเนตอิสระเหลืออยู่แทรกตัวอยู่ภายในโครงสร้างไม่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมประสานกัน อันอาจจะมีผลทำให้โครงสร้างเกาะกันแบบหลวมๆ เนื่องจากมีซิลิกาและอะลูมิเนตอิสระกั้นขวางอยู่

ในส่วนของการเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยพบว่า จีโอโพลิเมอร์-มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีกำลังอัดสูงกว่าเถ้าลอยระยอง เนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็กกว่าของเถ้าลอยแม่เมาะและการกระจายขนาดคละที่ดีกว่าทำให้การชะล้างซิลิกาและอะลูมิเนตเป็นเป็นได้ดียิ่งขึ้น ถึงแม้ว่าปริมาณของซิลิคอนไดออกไซด์และอะลูมิน่าออกไซด์ในเถ้าลอยแม่เมาะมีค่าต่ำกว่าเถ้าลอยระยองเล็กน้อย นอกจากนั้นผลการทดสอบหมู่ฟังก์ชันของจีโอโพลิเมอร์ดังแสดงในรูปที่ 12 ได้ข้อสรุปที่สอดคล้องกันคือ จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยระยองมีการยืดแบบไม่สมมาตรในตำแหน่งสูงสุดของ Si-O-Si เมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยแม่เมาะทำให้โครงสร้างภายในมีความแข็งแรงที่ต่ำลง



ก) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะ ข) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยอง



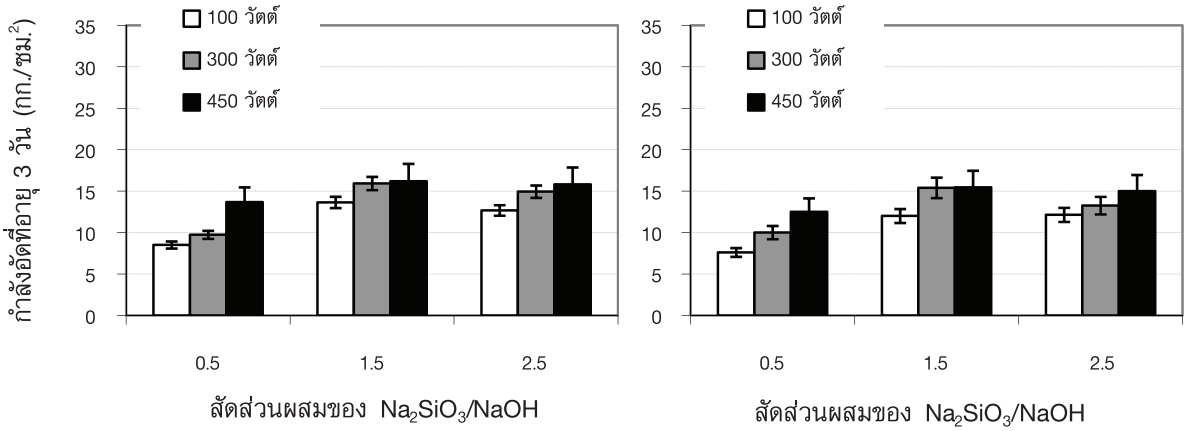
ค) เปรียบเทียบกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยทั้ง 2 ชนิด ที่อัตราส่วน $Na_2SiO_3/NaOH$ เท่ากับ 0.5

รูปที่ 9 กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 3 วัน ภายใต้การบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

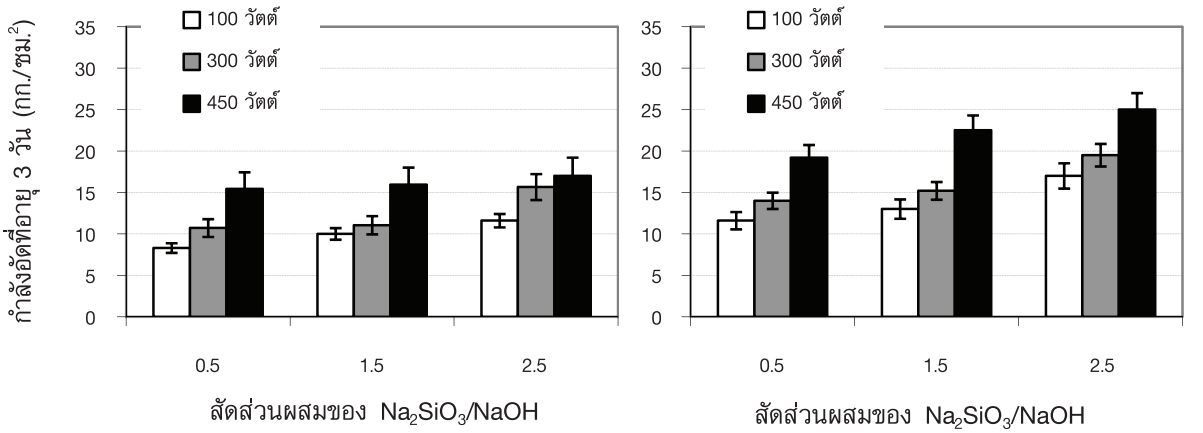
3.3.2 อิทธิพลของระยะเวลาก่อนทำการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ผลการทดสอบอิทธิพลของระยะเวลาก่อนทำการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟแสดงในรูปที่ 10 โดยการศึกษาได้กำหนดระยะเวลาของการทิ้งตัวอย่างไว้ก่อนที่จะให้พลังงานไมโครเวฟไว้ 4 ช่วงเวลาคือ ก) บ่มทันทีหลังจากผสมเสร็จ ข) ทิ้งตัวอย่างไว้เป็นเวลา 30 นาที ค) ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น และ ง) ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายพบว่า ระยะเวลาก่อนทำการบ่มมีผลต่อกำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยทั้งสองแหล่ง โดยการทิ้งตัวอย่างนานขึ้นมีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น กล่าวคือ การทิ้งตัวอย่างในช่วงเวลา ง) ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 3 วัน สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นการทำความร้อนจากภายในในลักษณะเชิงปริมาตร (Volumetric Heating) ดังนั้นคลื่นที่แทรกตัวเข้าสู่ภายในชิ้นตัวอย่างช่วยทำให้ภายในตัวอย่างร้อนขึ้นซึ่งเป็นการเร่งปฏิกิริยาการชะล้างซิลิกาและอะลูมิน่า รวมทั้งเร่งการก่อตัวของโพลีไซอะเลทให้มีปริมาณมากขึ้นส่งผลต่อกำลังอัดที่สูงขึ้นตามไปด้วย

สำหรับผลของกำลังวัตต์ไมโครเวฟกับการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ พบว่าการบ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟที่กำลังสูงขึ้นมีแนวโน้มทำให้กำลังอัดสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เพราะโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้นโดยเฉพาะพลังงานระดับสูง (ในที่นี้คือที่กำลัง 450 วัตต์) ความร้อนภายในตัวอย่างสูงขึ้นอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลาอันสั้น (ดูได้จากรูปที่ 8 ซึ่งมีผลต่ออัตราการชะล้างและการฟอร์ตัวของโพลีไซอะเลทในช่วงต้น)



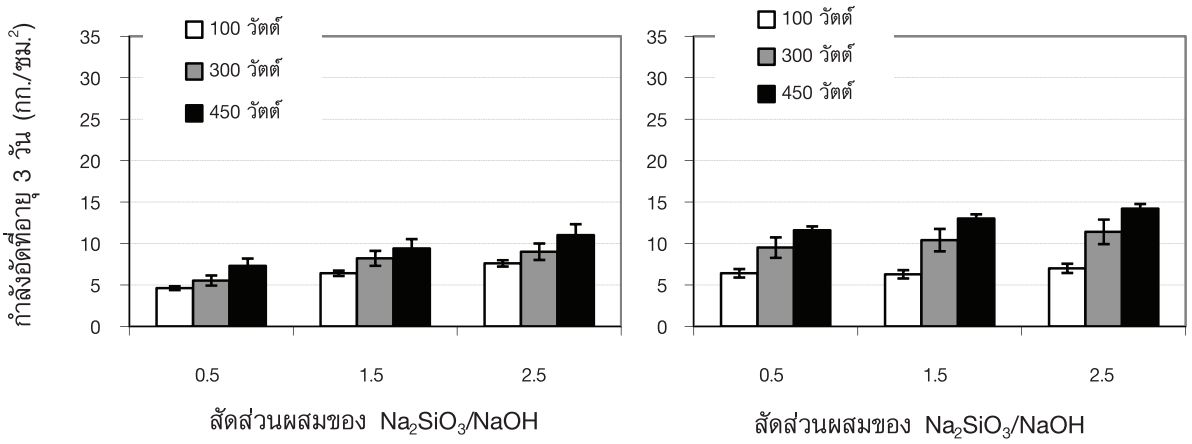
(ก.1) บ่มทันทีหลังจากผสมเสร็จ (ก.2) ทิ้งตัวอย่างไว้เป็นเวลา 30 นาที จึงทำการบ่ม



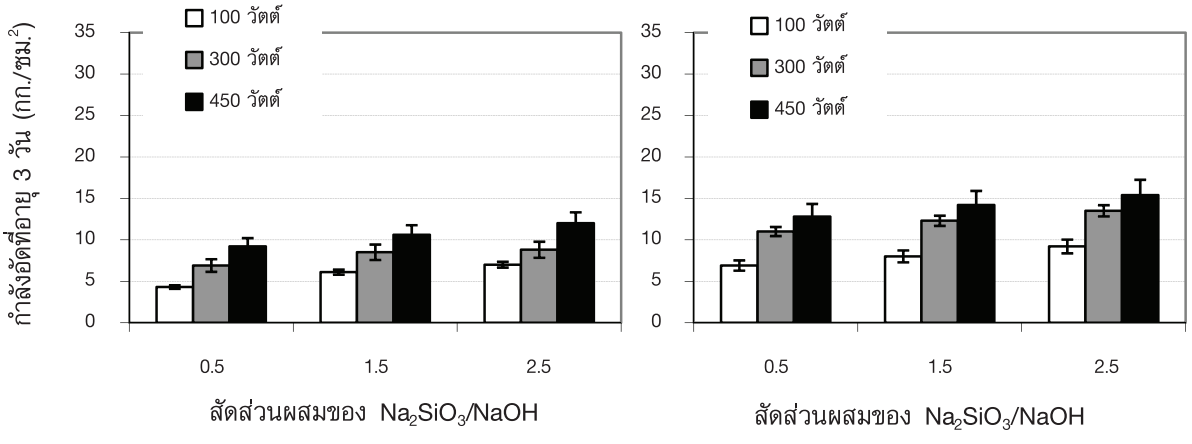
(ก.3) ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่ม (ก.4) ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่ม

(ก) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะ

รูปที่ 10 กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 3 วัน ภายใต้การบ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาในการทิ้งตัวอย่างต่างๆ



(ข.1) บ่มทันทีหลังจากผสมเสร็จ (ข.2) ทิ้งตัวอย่างไว้เป็นเวลา 30 นาที จึงทำการบ่ม



(ข.3) ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่ม (ข.4) ทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่ม

(ข) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยอง

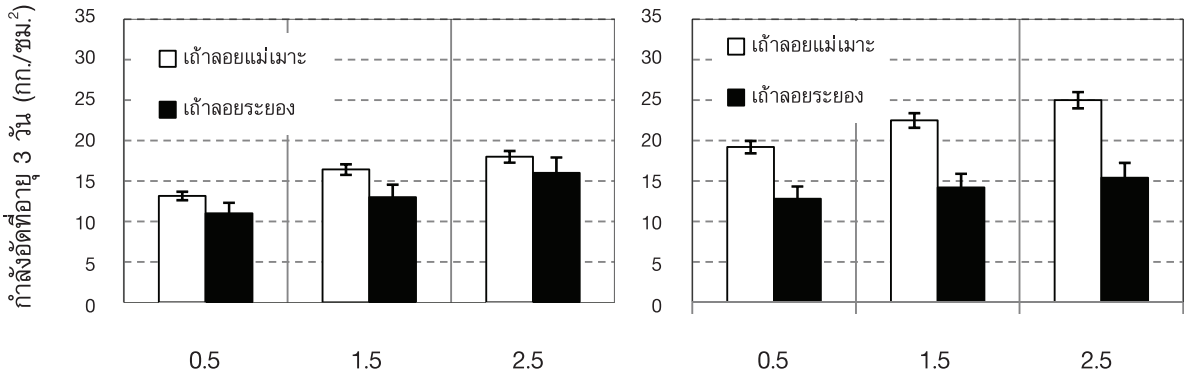
รูปที่ 10 (ต่อ) กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 3 วัน ภายใต้การบ่มด้วยไมโครเวฟที่ระยะเวลาในการทิ้งตัวอย่างต่างๆ

3.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH ต่อกำลังอัด

ผลการทดสอบอิทธิพลของอัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH ต่อกำลังอัดแสดงในรูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่า กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผ่านการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และตัวอย่างที่บ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยองที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 2.5 มีกำลังอัดสูงสุด ในขณะที่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ เถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วน Na_2SiO_3/NaOH เท่ากับ 2.5 มีการพัฒนากำลังอัดสูงสุดเช่นเดียวกัน เนื่องจากว่าการเพิ่มขึ้นของ Na_2SiO_3 เป็นการเพิ่มปริมาณ Si ให้กับเถ้าลอยเพื่อโครงสร้างที่มีความแข็งแรงในการรับแรงอัด โดยสังเกตได้จาก

จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะที่อัตราส่วนของ Na_2SiO_3/NaOH เพิ่มขึ้นทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น [7-10]

เมื่อทำการเปรียบเทียบกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์พบว่า การบ่มด้วยไมโครเวฟให้กำลังอัดที่สูงกว่าการบ่มด้วยเตาอบ ซึ่งสอดคล้องกับผลการกระจายของโพรง (รูปที่ 14) ที่การบ่มด้วยเตาอบทำให้โครงสร้างภายในความพรุนหรือรูโพรงมีขนาดใหญ่กว่าการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งสามารถตีความได้ว่าการอบที่ระยะเวลานานขึ้นที่อุณหภูมิคงที่อาจจะก่อให้เกิดการขยายตัวของโพรงภายในได้มากกว่าการเร่งอุณหภูมิในอัตราที่สูงจากพลังงานไมโครเวฟ



(ก) บ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

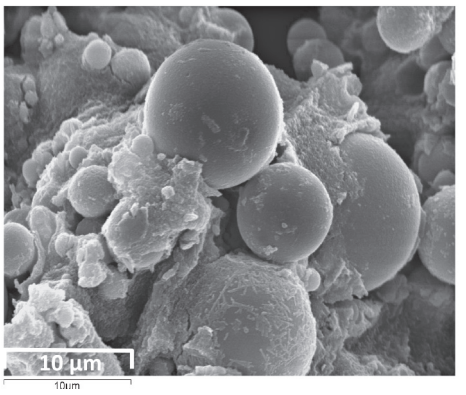
(ข) บ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์ และทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่ม

รูปที่ 11 กำลังอัดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ซึ่งบ่มด้วยเตาอบและพลังงานไมโครเวฟ หลังจากตั้งตัวอย่างทิ้งเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายจึงทำการบ่ม

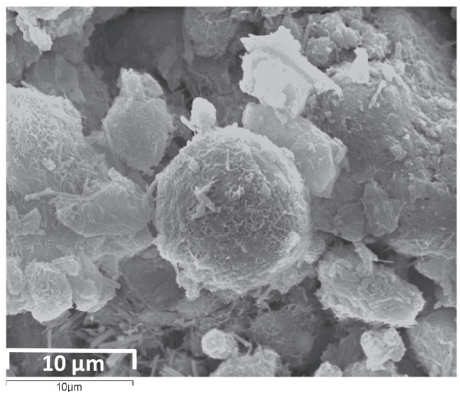
3.4 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาค

3.4.1 ลักษณะทางกายภาพ

ผลการทดสอบลักษณะกายภาพของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ตามรูปที่ 12 พบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แม่เมาะ (Maemoh-A1.5) ผิวอนุภาคทรงกลมเกิดการผสานตัวกันเนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น และที่ผิวของอนุภาคยังคงเป็นผิวเรียบ ต่างจากตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยอง (Rayong-A1.5) ที่บริเวณผิวอนุภาคมีความขรุขระมากเกิดเป็นพันธะที่เชื่อมระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคมีการอัดตัวกันแน่นซึ่งมีผลต่อกำลังอัด โดยตัวอย่างที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการอัดแน่นของอนุภาคมากที่สุด รองมาคือการบ่มด้วยเตาไมโครเวฟ และการบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องตามลำดับแสดงให้เห็นว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงเป็นการเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น [1,5-6] นอกจากนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายพบว่า โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ผสมเถ้าลอยแม่เมาะมีการอัดแน่นที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับเถ้าลอยระยองทั้งภายหลังทำการบ่มในเตาอบและเตาไมโครเวฟซึ่งส่งผลให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าที่สูงกว่าตามไปด้วย

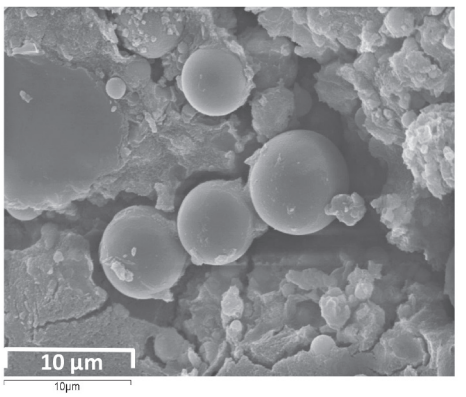


(ก.1) เถ้าลอยแม่เมาะ (Maemoh-A1.5)

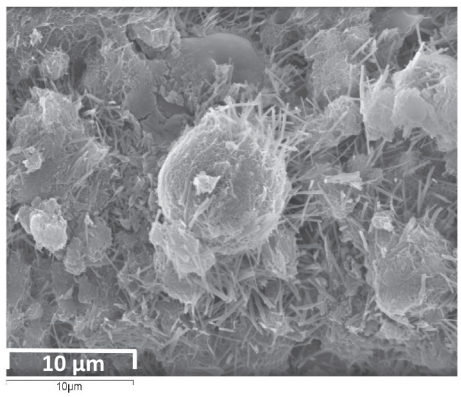


(ก.2) เถ้าลอยระยอง (Rayong-A1.5)

(ก) บ่มน้ำที่อุณหภูมิห้อง

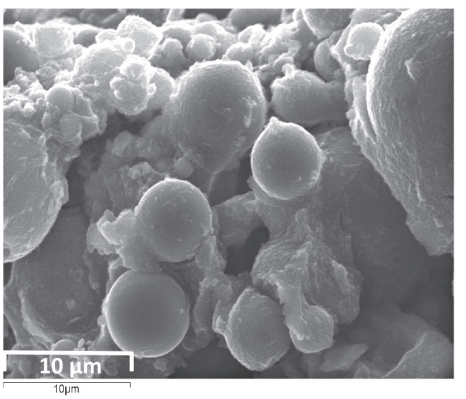


(ข.1) เถ้าลอยแม่เมาะ (Maemoh-A1.5)

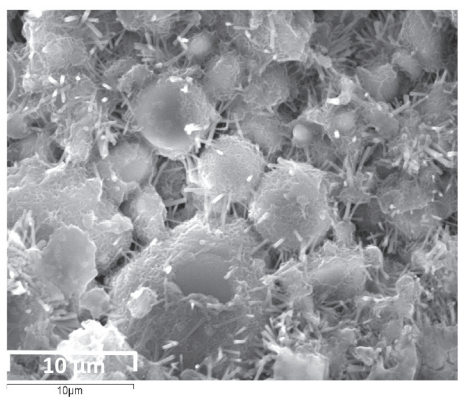


(ข.2) เถ้าลอยระยอง (Rayong-A1.5)

(ข) บ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 °C



(ค.1) เถ้าลอยแม่เมาะ (Maemoh-A1.5)



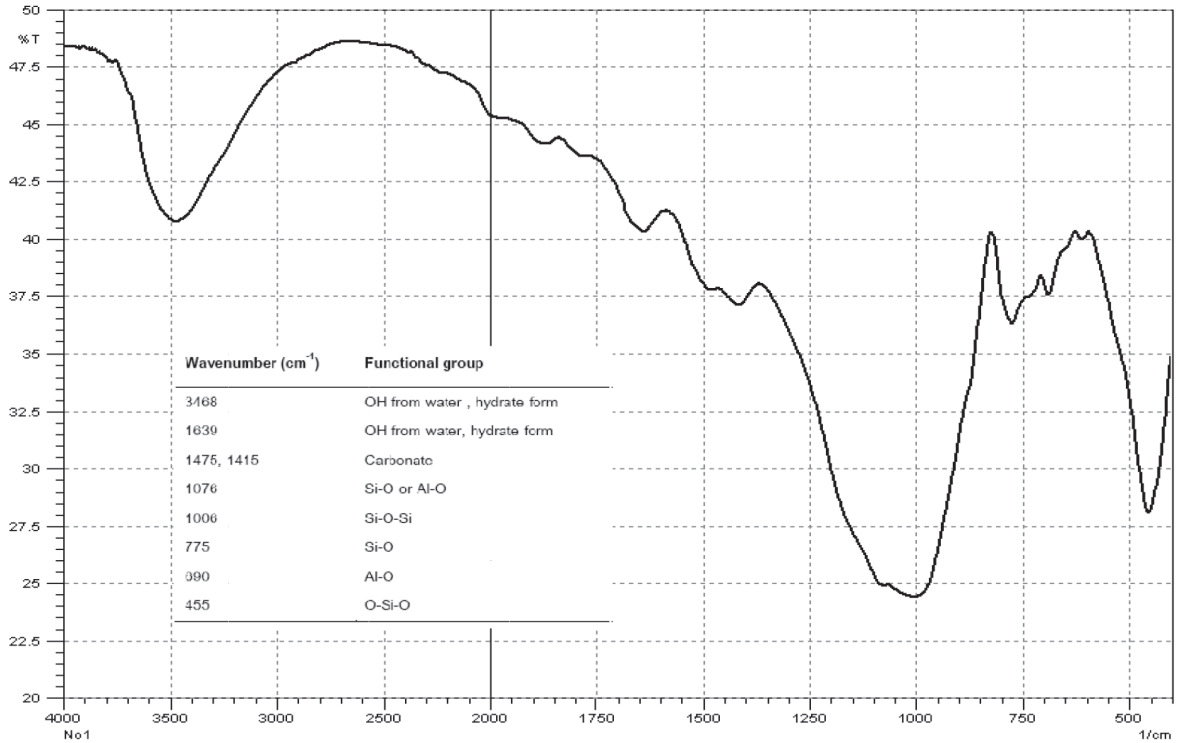
(ค.2) เถ้าลอยระยอง (Rayong-A1.5)

(ค) บ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 100 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที

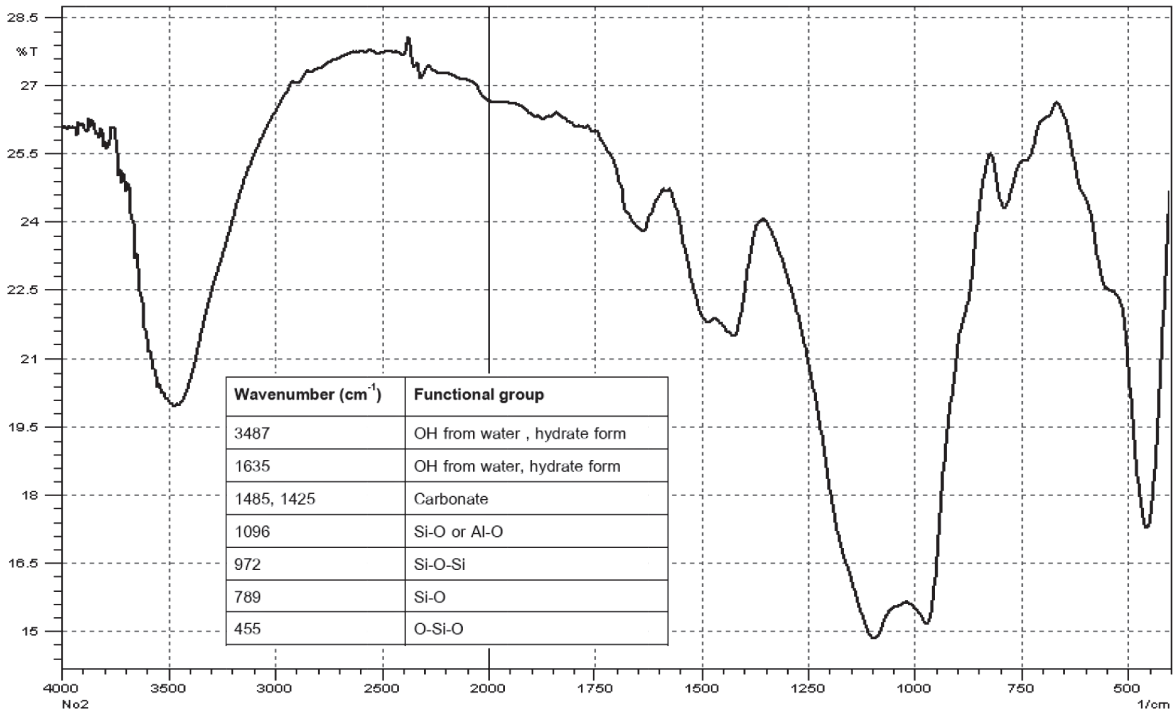
รูปที่ 12 ลักษณะของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งผ่านการบ่มด้วยวิธีต่างๆ ที่กำลังขยาย 3500 เท่า

3.4.2 หมู่ฟังก์ชันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เกิดขึ้น

จากผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าในช่วง 1641-3606 cm^{-1} พฤติกรรมของสเปกตรัมมีการยืดตัวและเปลี่ยนรูปของ กลุ่ม OH และ กลุ่ม H-O-H จากกำลังยืดเหนี่ยวของพันธะระดับต่ำของโมเลกุลน้ำซึ่งมีการดูดซับบนผิวหรือมีการติดอยู่บริเวณโพรงขนาดใหญ่ของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ [24] และพบความสัมพันธ์ระหว่าง Al-O, Si-O, Si-O-Si, O-Si-O และ Si-O หรือ Al-O มีการยืดแบบไม่สมมาตรในตำแหน่งสูงสุด

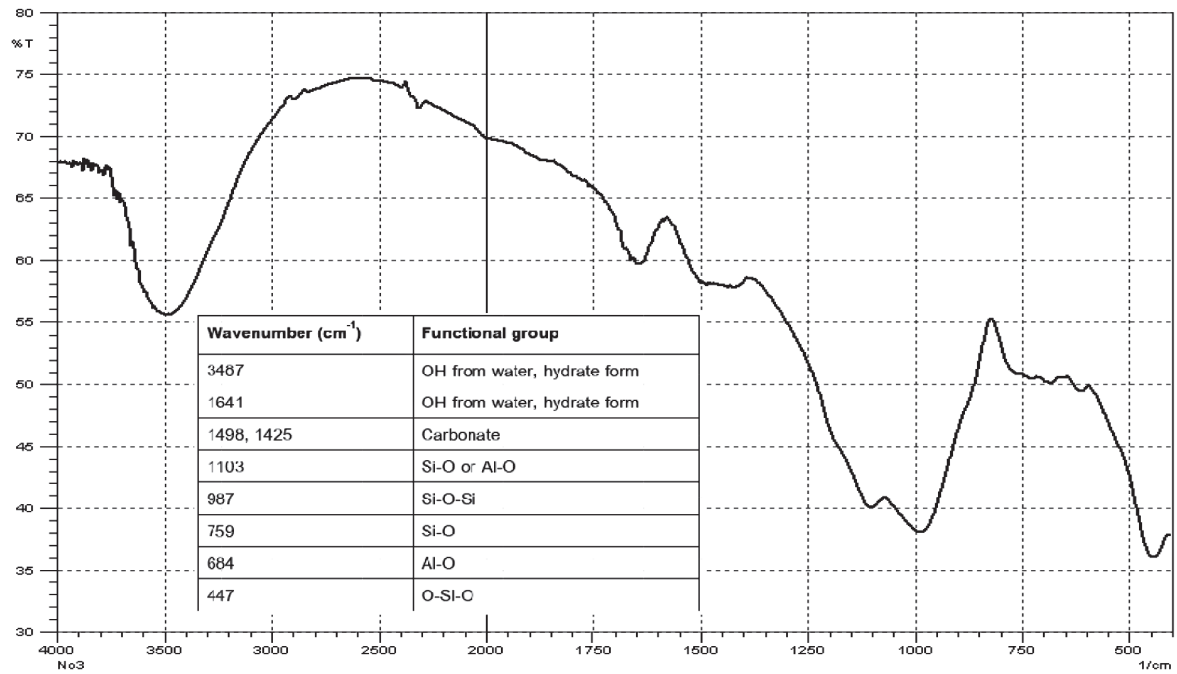


(ก) สูตร Maemoh-A1.5 ที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



Wavenumber (cm^{-1})	Functional group
3487	OH from water , hydrate form
1635	OH from water, hydrate form
1485, 1425	Carbonate
1096	Si-O or Al-O
972	Si-O-Si
789	Si-O
455	O-Si-O

(ก) สูตร Rayong-A1.5 ที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



Wavenumber (cm^{-1})	Functional group
3487	OH from water, hydrate form
1641	OH from water, hydrate form
1498, 1425	Carbonate
1103	Si-O or Al-O
987	Si-O-Si
759	Si-O
684	Al-O
447	O-Si-O

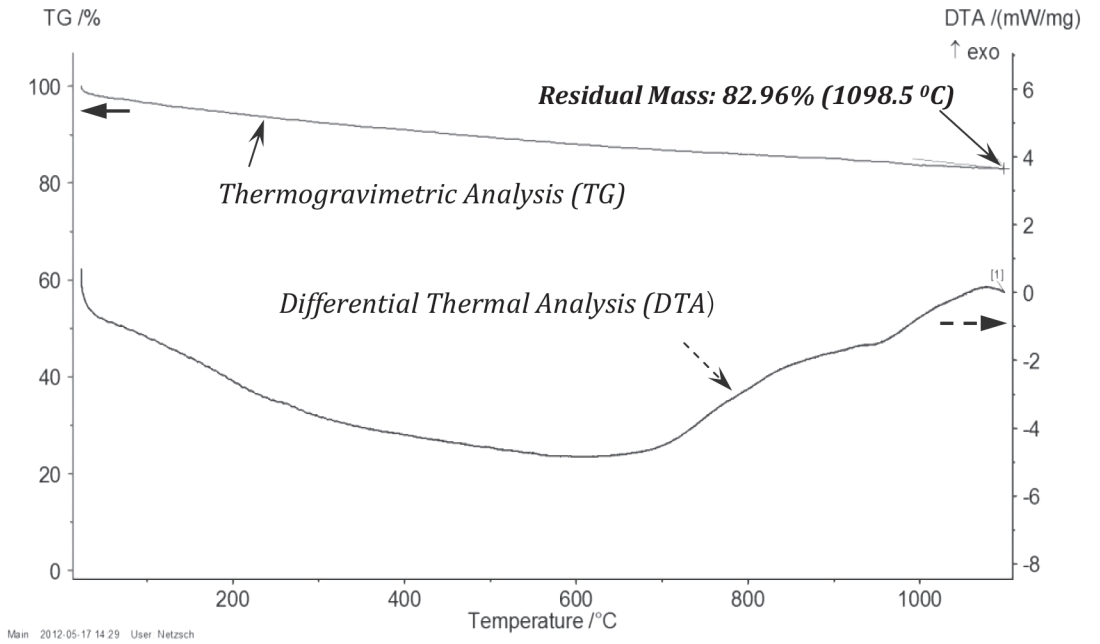
(ค) สูตร Maemoh-A1.5 ที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์ เป็นเวลา 1 นาที

รูปที่ 12 หมู่ฟังก์ชันของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผ่านการบ่มด้วยวิธีต่างๆ

3.4.3 การวิเคราะห์ทางด้านความร้อน

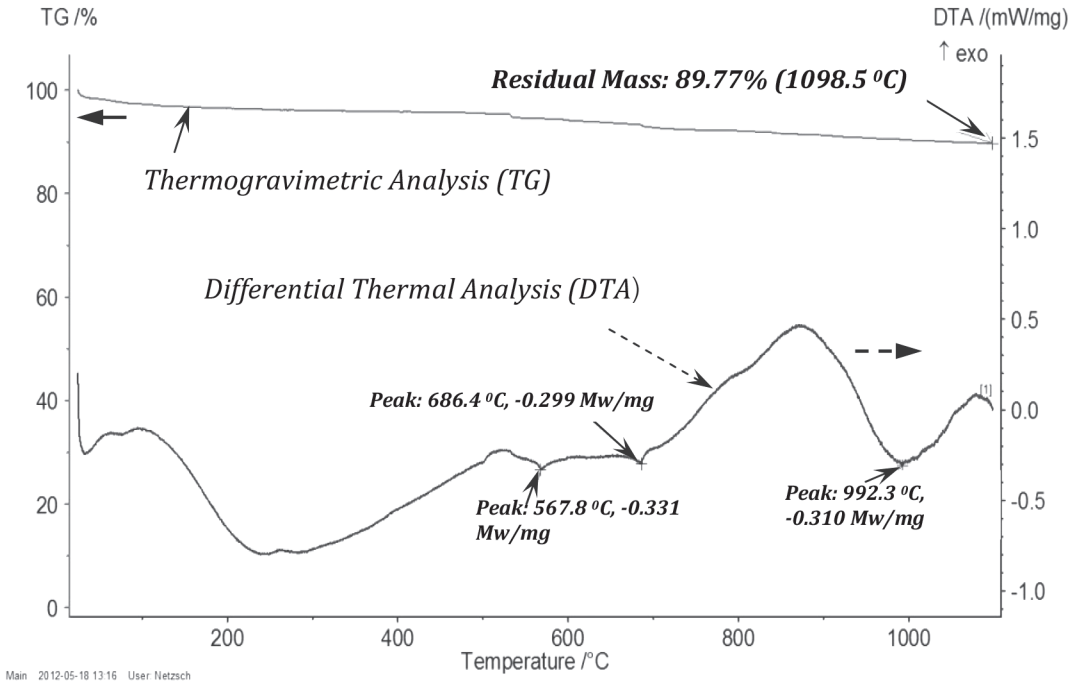
รูปที่ 13 (ก) ถึง (ง) แสดงผลการวิเคราะห์ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ด้วยเทคนิคทางความร้อน 2 รูปแบบ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 13(ก) ซึ่งประกอบด้วยเส้นกราฟ Thermogravimetric Analysis (TG) ซึ่งเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุเมื่อได้รับความร้อนภายใต้สภาวะที่กำหนดเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นซึ่งเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเฟสของวัสดุ (แสดงด้วยแกนตั้งซ้ายมือของรูปที่ 13) และเส้นกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Differential Thermal Analysis (DTA) (แสดงด้วยแกนตั้งขวามือของรูปที่ 13) ซึ่งการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังความร้อนของวัสดุอย่างเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่มีการเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่วิธีนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนระหว่างการเกิดปฏิริยา ซึ่งมีทั้งแบบคายความร้อน (Exothermic Reaction, สัญลักษณ์ในกราฟคือ exo) และแบบดูดความร้อน (Endothermic Reaction สัญลักษณ์ในกราฟคือ edo)

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าน้ำหนักของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเข้าสู่ช่วงอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดการสูญเสียน้ำจากภายใน จากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลมีขึ้นอย่างรวดเร็ว (คล้ายกับการสูญเสียน้ำ) เกิดขึ้นในช่วง 800-1100 องศาเซลเซียส และตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เถ้าลอยแม่เมาะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากกว่าซึ่งหมายถึง มีการสูญเสียน้ำมากกว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยองดังแสดงในรูปที่ 13(ง) นอกจากนั้นจากผลการทดสอบด้วยเทคนิค DTA พบว่า ค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ไม่ได้มีการดูดหรือคายพลังงานร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์ยกเว้น ตัวอย่างจีโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยองที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบมีการดูดพลังงานความร้อนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก

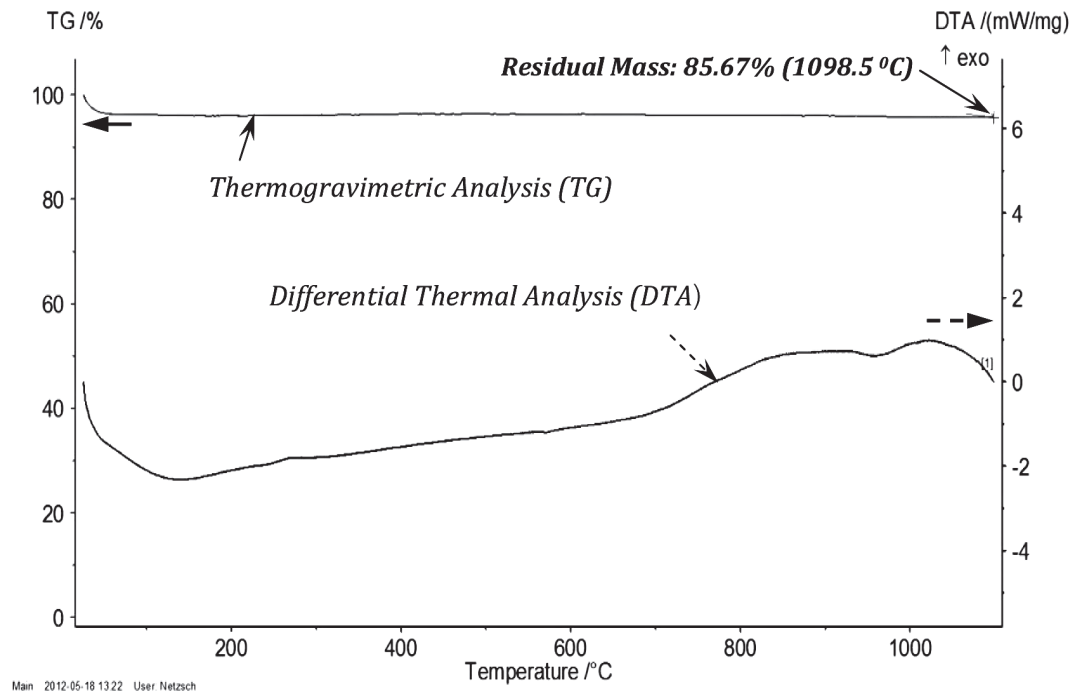


(ก) ตัวอย่าง Maemoh-A1.5 ที่ผ่านการบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

รูปที่ 13 ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTA ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

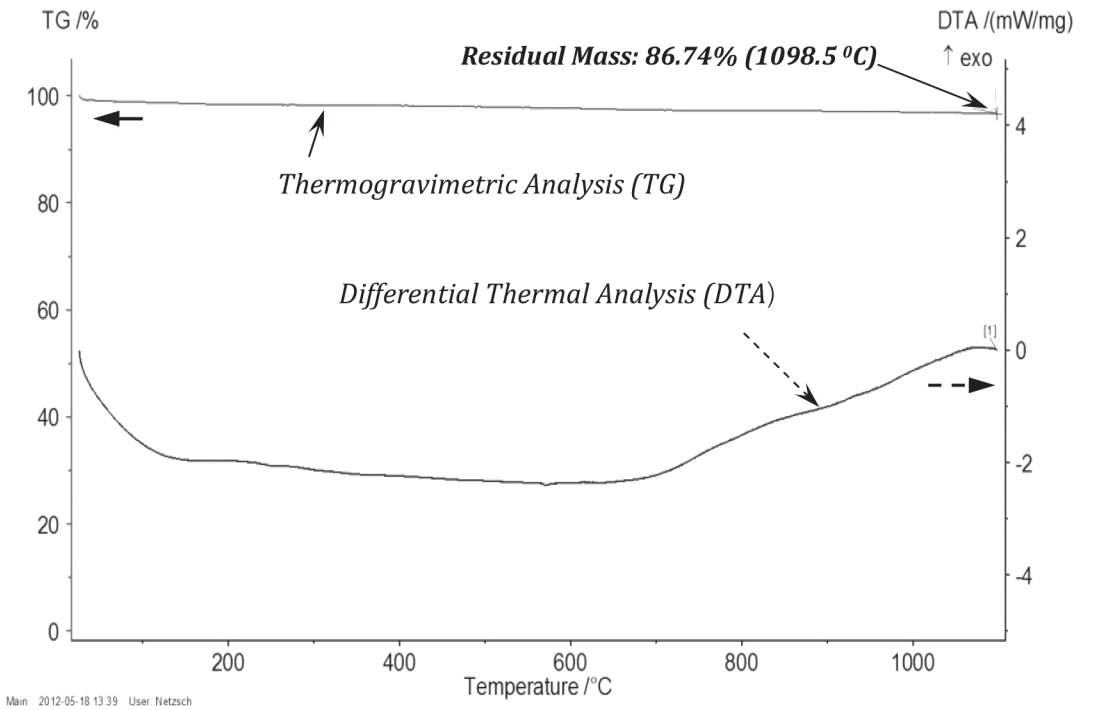


(ข) ตัวอย่าง Rayong-A1.5 ที่อายุ 3 วัน ภายหลังบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



(ค) ตัวอย่าง Maemoh-A1.5 ที่อายุ 3 วัน ภายหลังบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

รูปที่ 13 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTA ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์



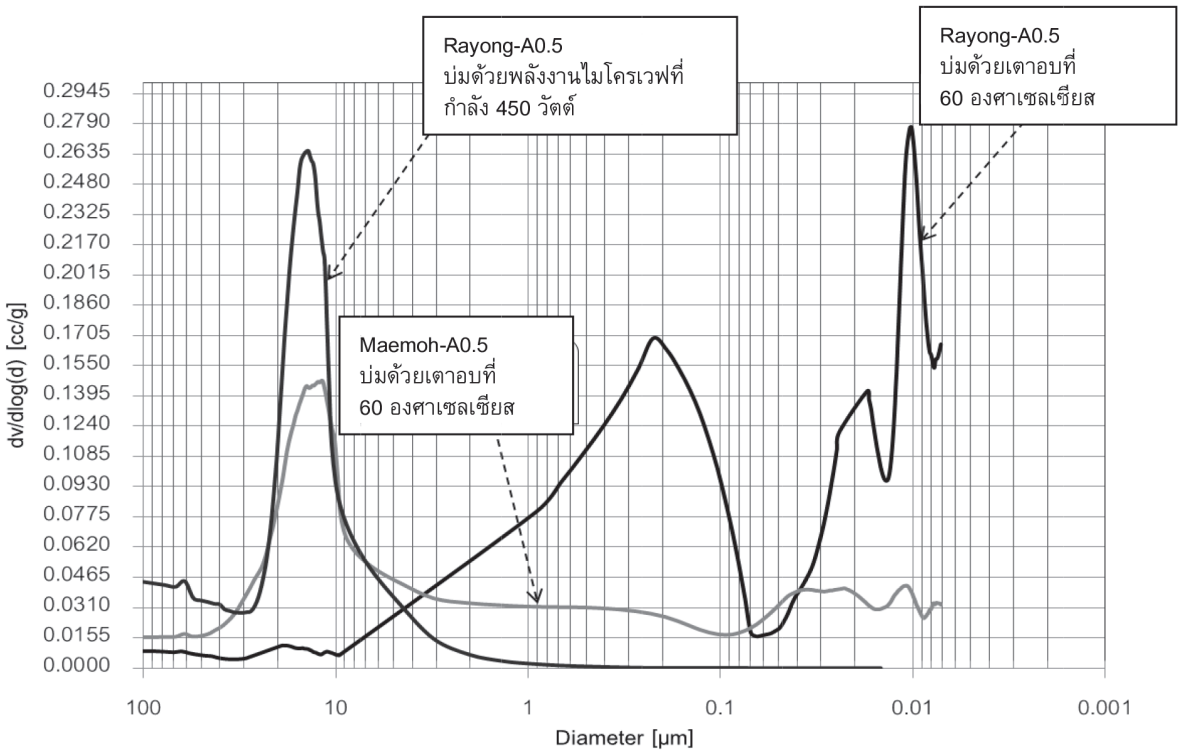
(ง) ตัวอย่าง Rayong-A1.5 ที่อายุ 3 วัน ภายหลังบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที

รูปที่ 13 (ต่อ) ผลการวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA และ DTA ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

3.4.4 การกระจายของโพรง

รูปที่ 14 พบว่า ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์แม่เมาะ Maemoh-A1.5 ซึ่งผ่านการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีการกระจายของขนาดรูพรุนอย่างสม่ำเสมอ และมีปริมาณโพรง รูพรุนน้อยที่สุด ในขณะที่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ระยอง Rayong-A0.5 เตาอบ 60 องศาเซลเซียส มีปริมาณโพรงมากที่สุด อีกทั้งยังมีการกระจายตัวของขนาดโพรงโดยส่วนใหญ่มีขนาดเล็ก ในขณะที่ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ระยอง Rayong-A0.5 ซึ่งบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟมีปริมาณโพรงระหว่างอนุภาคในปริมาณน้อย

เมื่อเปรียบเทียบทั้ง 3 กรณี เห็นว่าตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ระยองที่ผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟมีปริมาณขนาดโพรงระหว่างอนุภาคน้อยที่สุด และมีการกระจายตัวของโพรงแคบกว่าการบ่มด้วยเตาอบ



รูปที่ 14 การกระจายของโพรงของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ภายใต้วิธีการบ่มต่างๆ

4. สรุปผล

จากการใช้เถ้าลอยแม่เมาะและเถ้าลอยระยองสำหรับการผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยที่ทำปฏิกิริยาด้วยสารละลายด่างโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์และกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชั่น (Geo-polymerization) ด้วยการบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส และพลังงานไมโครเวฟสรุปได้ดังต่อไปนี้

(ก) ในสภาวะสด การเติมน้ำเพิ่มเติมลงไปในจีโอ-โพลิเมอร์มอร์ต้าร์ช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลตัวได้ โดยจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยอง สำหรับระยะเวลาการก่อตัวพบว่า จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะมีระยะเวลาก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยอง

(ข) จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยแม่เมาะมีกำลังอัดมากกว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยระยองเมื่อผ่านการบ่มด้วยเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ทุกอัตราส่วนสารละลายด่างโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์

(ค) การบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เถ้าลอยด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 450 วัตต์ มีระยะเวลาการทิ้งตัวอย่างเป็นเวลาเท่ากับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของตัวอย่างนั้น จึงทำการบ่มและมีอัตราส่วนของสารละลายด่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 ให้กำลังอัดสูงสุด และสูงกว่าตัวอย่างที่บ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

(ง) จากการวิเคราะห์โครงสร้างของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์พบพันธะ Si-O-Si เกิดขึ้นภายหลังทำการบ่มด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง และจากการวิเคราะห์ทางความร้อนแสดงความคงตัวของโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ได้อย่างดี ในขณะที่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟมีปริมาณโพรงน้อยกว่าการบ่มด้วยเตาอบ

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการดำเนินงานครั้งนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ คุณพิชญาภา เพ็ชรแก้ว และ คุณปัญญ์ชลี เอกฉัตร ที่ได้ช่วยเหลือในการเก็บรวบรวมข้อมูลในห้องปฏิบัติการจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

1. Palomo A., Macias A., Blanco M.T., Puertas F., 1992, “Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers”, *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement*, New Delhi, India, 5, pp. 505–511.

2. Davidovits J., 1979, “SPE PATEC '79”, Society of Plastic Engineering, Brookfield Center, USA.

3. Jumrat S., Chatveera B., 2006, “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)

4. Davitdovits J., 1994, “Properties of Geopolymer Cements”, *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.

5. Davidovits J., 2002, “Environmental Drivers”, *International Conference Proceedings of Geopolymer, Melbourne, Australia*.

6. 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.

7. Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C., 2000, “Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers”, *International Journal of Inorganic Materials*, Vol. 2, pp. 309-317.

8. Fernandez-Jimenez A., Palomo, A., 2003, “Characterisation of Fly Ashes: Potential Reactivity as Alkaline Cements”, *Fuel*, Vol. 82, pp. 2259-2265.

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

10. Provis J.L., van Deventer, J.S.J., 2007, “Geopolymerisation Kinetics 2: Reaction Kinetic Modelling”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, pp. 2318-2329.

11. 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)

12. Chatveera, B. and Makul, N. and, 2012, “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”, *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 35, pp. 299-310. (In Thai)

13. 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)

14. Muniz-villarreal M.S., Manzano-Ramirez A., Sampieri-Bullbarela S., Ramon Gasca-Tirado J., Reyes-Araiza J.L., Rubio-Avalos J.C., Perez-Bueno J.J., Apatiga L.M., zaldivar-cadena A., Amigo-Borras V., 2010, “The effect of temperature on the geopolymerization process of a metakaolin-based geopolymer”, Centro de Investigaciones y de

studios Avanzados del I.P.N Unidad Queretaro Queretaro, Mexico.

15. Provis J.L., Lukey G.C., van Deventer J.S.J., 2005, "Do Geopolymers Actually Contain Nanocrystalline Zeolites?", A Reexamination of Existing Results, *Chemistry of Materials*, Vol. 17, pp. 3075-3085.

16. Daniel L.Y., Kong J., Sanjayan G., 2008, "Damage behavior of geopolymer composites exposed to elevated temperatures", *Department of Civil Engineering*, Monash University, Australia, 2008.

17. Daniel L.Y., Kong J., Sanjayan G., 2009, "Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete", *Department of Civil Engineering*, Monash University, Australia, *Faculty of Engineering and Industrial Sciences*, Swinburne Universityof Technology, GPO Box 218, Hawthorn, Victoria 3122, Australia, 2009.

18. American Society for Testing and Materials, 2009, ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

19. American Society for Testing and Materials, 2012, ASTM C778 Standard Specification for Standard Sand, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

20. American Society for Testing and Materials, 2012, ASTM C1437 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate.

21. American Society for Testing and Materials, 2008, ASTM C191 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.01 Cement, Lime and Gypsum.

22. American Society for Testing and Materials, 2012, ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), *Annual Book of ASTM Standard*, Section 4 Construction, Vol. 04.02 Concrete and Aggregate.

23. Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A. and van Deventer J.S.J., 2007, "Geopolymer Technology: The Current State of The Art", *Journal of Materials Science*, Vol. 42, pp. 2917-2933.

24. Van Jaarsveld J.G.S, van Deventer J.S.J., Lukey, G.C., 2003, "The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-based Geopolymers", Materials Letters, Vol. 57, pp. 1272-1280.