พฤติกรรมด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอยที่ผ่านการให้ความร้อนเบื้องต้นด้วยคลื่นไมโครเวฟ

สมภพ แต้บ้วนฮวด[1] อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์[1,*] และสุภิชาติ เจนจิระปัญญา[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของพลังงานไมโครเวฟต่อคุณสมบัติด้านกำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เปรียบเทียบกับการบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียว วัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้จากปฏิกิริยาระหว่างสารปอซโซลานกับสารละลายเบสและสารละลายโซเดียมซิลิเกตแล้วบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 65°C โดยใช้พลังงานไมโครเวฟให้ความร้อนเบื้องต้นก่อนการบ่มร้อน พลังงานไมโครเวฟช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ เกิดการชะของซิลิกาและอะลูมินาที่ผิวเถ้าลอยได้ผลิตภัณฑ์ที่มีผลต่อการพัฒนาด้านกำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ โดยระบบที่ใช้พลังงานไมโครเวฟ 90 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนการบ่มร้อนต่อเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้ได้ค่ากำลังอัด 34 เมกกะปาสคาล ซึ่งมีค่ามากกว่าระบบที่บ่มร้อนอย่างเดียวที่อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (31 เมกกะปาสคาล) ดังนั้นพลังงานไมโครเวฟสามารถลดระยะเวลาและพลังงานที่ใช้การบ่มร้อนและทำให้ได้จีโอโพลิเมอร์ที่รับแรงอัดสูงขึ้น

คำสำคัญ : ไมโครเวฟ, เถ้าลอย, จีโอโพลิเมอร์, กำลังอัด

---

[1] ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[2] สาขาวิชาเทคโนโลยีโยธา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

[*] ผู้ติดต่อ, อีเมล์ : ubolluk@buu.ac.th รับเมื่อ 31 ตุลาคม 2554 ตอบรับเมื่อ 1 ธันวาคม 2554

Strength behavior of fly ash geopolymer with microwave pre-radiation curing

Sompop Taebuanhuad[1], Ubolluk Rattanasak[1*] and Supichart Jenjirapanya[2]

Abstract

This research studied on the effect of microwave energy on the compressive strength of geopolymer and compared with that of geopolymer curing with the conventional heat system. Geopolymer was produced by the reaction between a pozzolan and the highly concentrated alkali and sodium silicate solutions, and then cured at the temperature of 65^{o}C. Pre–radiation of microwave energy was applied before heat curing. Microwave energy helped the geopolymerization reaction resulting in the increase in leaching of silica and alumina on the fly ash surfaces and development of compressive strength. System with 90 watt microwave pre – radiation for 5 min plus 6 h heat curing gave a compressive strength of 34 MPa, which was higher than that of system with 65^{o}C heat curing for 24 h (31 MPa). Therefore, the microwave energy could reduce the curing time and save energy obtaining the higher strength of geopolymer.

Keywords : Microwave, Fly ash, Geopolymer, Compressive strength

[1] Department of Chemistry and Center of Excellence for Innovation in Chemistry, Faculty of Science, Burapha University

[2] Applied Science Department, Faculty of Sciences, Chandrakasem Rajabhat University

[*] Corresponding author, E-mail: ubolluk@buu.ac.th Received 31 October 2011; Accepted 1 December 2011

1. ความเป็นมาและความสำคัญ

กระบวนการเผาถ่านหินเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้ามีของเสียอยู่ 2 ชนิด คือ เถ้าลอยและเถ้าก้นเตา ซึ่งมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน เถ้าลอยเป็นวัสดุที่สามารถนำมาผลิตเป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารปอซโซลาน [1,2] ที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินา เมื่อนำมาผสมกับสารละลายเบสและสารละลายโซเดียมซิลิเกต ภายใต้สภาวะการให้ความร้อนทำให้เกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่นได้เป็นวัสดุจีโอโพลิเมอร์ [1-3] การบ่มร้อนช่วยให้ปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่นเกิดได้ดีขึ้น โดยทั่วไป จะทำการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 – 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง การผลิตวัสดุจีโอโพลิเมอร์ต้องใช้ความร้อนในการบ่มเพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดในอายุอันสั้น อย่างไรก็ตาม สามารถบ่มวัสดุจีโอโพลิเมอร์ได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่การพัฒนากำลังเหมือนกับคอนกรีต คือเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม [4] วัสดุที่ต้องการกำลังสูงในระยะเวลาการบ่มอันสั้นยังคงเป็นที่ต้องการในงานก่อสร้าง หรือในงานซ่อมแซมอาคาร บ้านเรือน ซึ่งเห็นได้ว่ามีการเร่งการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีต่างๆ เช่นบ่มในตู้อบ หรือการใช้พลังงานไมโครเวฟเข้าช่วย [5-7] จากการศึกษาของ Leung [5, 6] ได้ใช้พลังงานไมโครเวฟในการบ่มคอนกรีตที่ 400 วัตต์ เป็นเวลา 45 นาที ทำให้คอนกรีตมีกำลังอัดที่สูงประมาณ 19.2 เมกกะปาสคาล ที่อายุการบ่ม 4.5 ชั่วโมง ซึ่งพลังงานไมโครเวฟทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะเวลาอันสั้น

ดังนั้น หากประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟเข้าช่วยในการบ่มวัสดุจีโอโพลิเมอร์จะสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดให้แก่จีโอโพลิเมอร์ได้เช่นกัน และลดระยะการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 65°C จากระยะเวลาการบ่ม 24 ชั่วโมง ให้สั้นลงได้โดยให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกัน งานวิจัยนี้จึงเน้นการใช้พลังงานไมโครเวฟที่ช่วงกำลังวัตต์ต่ำ (ต่ำกว่า 400 วัตต์) และระยะเวลาให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟที่สั้น (ไม่เกิน 10 นาที) และลดระยะการบ่มร้อนให้น้อยกว่า 24 ชั่วโมง โดยคงคุณสมบัติด้านกำลังอัดที่เท่ากับหรือดีกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มด้วยวิธีปกติ (บ่มที่ 65 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) เพื่อลดพลังงาน และเป็นตัวเลือกหนึ่งที่น่าสนใจแก่อุตสาหกรรมก่อสร้างในการใช้จีโอโพลิเมอร์เป็นวัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ได้ในอนาคต

2. ขอบเขตการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของพลังงานไมโครเวฟและกระบวนการให้ความร้อนแก่จีโอโพลิเมอร์ด้วยพลังงานไมโครเวฟต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าลอย

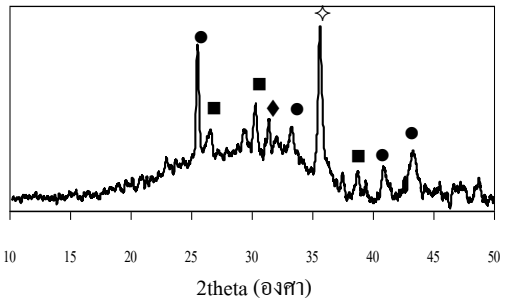
3. การทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

วัตถุดิบสำหรับผลิตจีโอโพลิเมอร์ ได้แก่ เถ้าลอยจากโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นเถ้าลอยจากการเผาถ่านหินที่อุณหภูมิประมาณ 1100 - 1400°C องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X–ray Fluorescence (XRF) ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าลอย คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2), อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3), แมกนีไทต์ (Fe_3O_4) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นต้น และมีคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X–ray Diffraction (XRD) ดังแสดงตามรูปที่ 1 โดยเถ้าลอยชนิดนี้เหมาะสำหรับทำวัสดุจีโอโพลิเมอร์ เนื่องจากมีส่วนที่เป็นอสัณฐานแสดงโดยพีคฐานกว้าง ในส่วนของสารละลายประกอบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 โมล่าร์ (10 M NaOH) และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ที่ประกอบด้วย Na_2O 9%, SiO_3 31%, H_2O 60% โดยน้ำหนัก โดยความหนืดของ 10 M NaOH และสารละลายโซเดียมซิลิเกต มีค่า 0.0093 และ 0.0606 ปาสคาล-วินาที ตามลำดับ ใช้ทรายแม่น้ำคัดขนาดร่อนผ่าน ตะแกรงเบอร์ 8 (ช่องเปิด 36 mm) ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ นอกจากนี้ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยเตาไมโครเวฟกำลังวัตต์ 90 – 800 วัตต์ (ความถี่ 2.45 GHz) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟาเรด (Infrared Thermometer) แม่แบบหล่อชิ้นงานมอร์ต้าร์ที่ทำจากอะคริลิกขนาด 5x5x5 ซม.[3]

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ (%)
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	39.5
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	21.2
เหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4)	15.6
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	19.7
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	1.3
ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2)	0.5
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.3
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	2.7
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI)	0.8



รูปที่ 1 XRD ของเถ้าลอยแม่เมาะ: ■ = ควอรตซ์, ● = แคลเซียมซัลเฟต, ♦ = แคลเซียมออกไซด์, ✧ = แมกนีไทต์

3.2 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์

การเตรียมจีโอโพลิเพสต์ทำได้โดยผสมเถ้าลอยร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก และสารละลายร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) ต่อ 10 M NaOH เท่ากับ 1.5 ดังแสดงในตารางที่ 2 ทำการผสมด้วยเครื่องผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นเทตัวอย่างลงในแบบพลาสติกขนาด 5x5x5 ซม.^{3} แล้วหุ้มด้วยฟิล์มหุ้มอาหารเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่ผิวหน้าแล้วเร่งปฏิกิริยาด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ต่างๆ เป็นเวลา 1, 2 และ 3 นาที วัดอุณหภูมิด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ได้ข้อมูลเชิงอุณหภูมิ (Temperature profile) ของชุดข้อมูล

ตารางที่ 2 ส่วนผสมโดยน้ำหนักของการทำชิ้นงานตัวอย่างเพสต์

ส่วนผสม	ปริมาณ (%)
เถ้าลอย	65
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (10 M NaOH)	14
สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3)	21

3.3 การเตรียมจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

การเตรียมวัสดุจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์คล้ายกับการเตรียมจีโอโพลิเมอร์เพสต์แต่เติมทรายในตอนสุดท้ายของการผสม โดยใช้ทรายเป็น 1.5 เท่า ของน้ำหนักเถ้าลอย หลังจากที่ผสมทรายเป็นเนื้อเดียวกันแล้วเทส่วนผสมมอร์ต้าร์ลงแบบพลาสติกขนาด 5x5x5 ซม.^{3} ที่ทาผิวด้วยน้ำมัน ป้องกันการเกาะชิ้นงานกับตัวแบบ ทำการหุ้มด้วยฟิล์มแล้วนำไปให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 90 และ 180 วัตต์ เป็นเวลา 3, 5 และ 10 นาที ซึ่งกำลังวัตต์นี้ให้อุณหภูมิตัวอย่างที่ใกล้เคียง 65^{o}C และเป็นอุณหภูมิควบคุม หลังจากกระบวนการบ่มร้อนแล้วเก็บตัวอย่างในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25^{o}C จนครบอายุทดสอบกำลังอัด

จากข้อมูลเบื้องต้น ได้เลือกใช้พลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ 90 วัตต์ในการให้ความร้อนแก่จีโอโพลิเมอร์ เป็นเวลา 3, 5 และ 10 นาที ตามระบบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ต่อในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25^{o}C จนครบอายุ 7 วัน แล้วนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 ส่วนจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ควบคุมนั้น เตรียมเช่นเดียวกันโดยไม่มีการให้ด้วยพลังงานไมโครเวฟและความร้อน แต่บ่มที่อุณหภูมิ 25^{o}C เวลา 28 วัน

3.4 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

นำจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่เตรียมไว้ทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C 109 ด้วยเครื่อง Universal testing machine โดยค่ากำลังอัดจะเป็นค่าเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ 3 ก้อน

ตารางที่ 3 ระบบของการบ่มตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

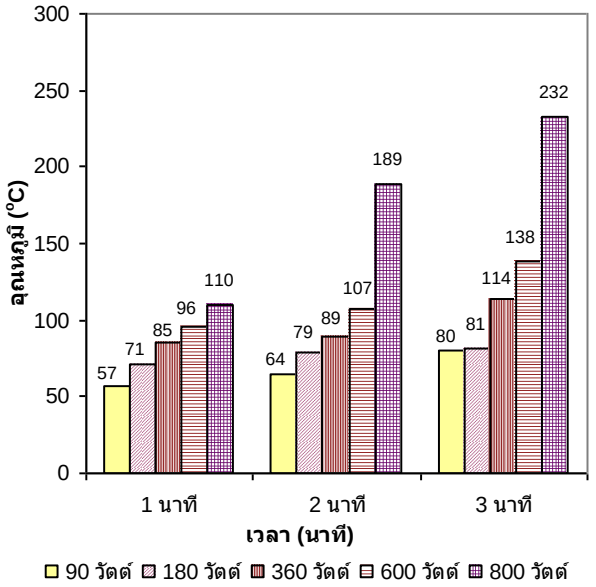
ระบบ	วิธีการบ่ม	หมายเหตุ
1	บ่ม 25°C เป็นเวลา 7 และ 28 วัน	ระบบ 1 เป็นระบบควบคุมใช้เปรียบเทียบกับ ระบบ 2-6
2	บ่มร้อน 65°C	ระบบ 2 เป็นระบบบ่มร้อนที่ อุณหภูมิ 65°C อย่างเดียว
3	บ่มร้อน ก่อนบ่มไมโครเวฟ 90 วัตต์ 3 นาที	ระบบ 3 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 65°C ก่อนบ่มไมโครเวฟ
4	ไมโครเวฟ 90 วัตต์ 3 นาที และบ่มร้อน 65°C เวลา 1, 3, 6, 12 และ 24 ชม.	
5	ไมโครเวฟ 90 วัตต์ 5 นาที และบ่มร้อน 65°C เวลา 1, 3, 6 และ 12 ชม.	ระบบ 4-6 บ่ม MW ก่อนบ่มที่อุณหภูมิ 65°C
6	ไมโครเวฟ 90 วัตต์ 10 นาที และบ่มร้อน 65°C เวลา 1, 3, 6 และ 12 ชม.	

*ทุกระบบต้องบ่มต่อที่อุณหภูมิ 25°C จนครบอายุ 7 วัน

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

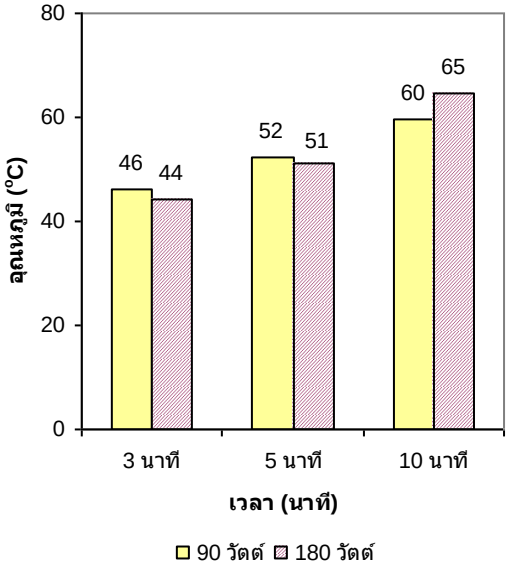
4.1 การศึกษาอุณหภูมิจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟ

ข้อมูลเชิงอุณหภูมิของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ 90, 180, 360, 600 และ 800 วัตต์ เป็นเวลา 1, 2 และ 3 นาที แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ข้อมูลเชิงอุณหภูมิของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟที่ช่วงกำลังวัตต์ต่างๆ

เมื่อเพิ่มพลังงานไมโครเวฟ หรือกำลังวัตต์มากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างสูงขึ้น และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ให้พลังงาน และการให้พลังงานจนอุณหภูมิสูงกว่า 100°C ส่งผลให้ผิวหน้าของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เกิดรอยแตก เนื่องจากการสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วของชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์ อย่างไรก็ตาม การให้พลังงานไมโครเวฟในระยะเวลาที่สั้น คือน้อยกว่า 2 นาที อาจทำให้ปฏิกิริยาเกิดไม่สมบูรณ์ในชิ้นงานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ดังนั้นจึงเลือกพลังงานไมโครเวฟที่ 90 และ 180 วัตต์ เป็นเวลาอย่างน้อย 3 นาที สำหรับนำไปศึกษาต่อไป ซึ่งให้อุณหภูมิใกล้เคียงกับการบ่มจีโอโพลิเมอร์ด้วยความร้อนที่ประมาณ 60-80°C [1, 2, 8-11]



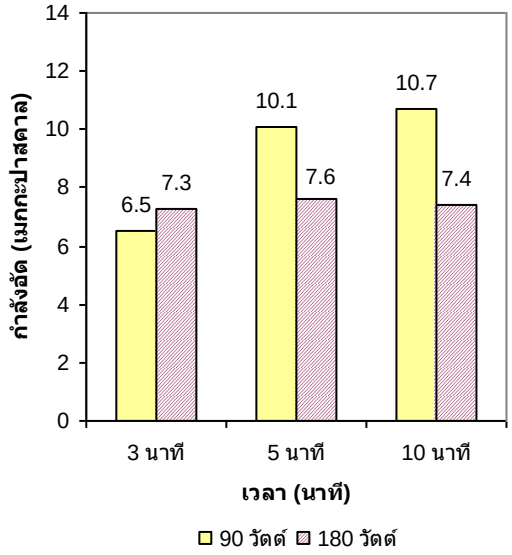
รูปที่ 3 อุณหภูมิของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟ 90 และ 180 วัตต์ เป็นเวลา 3, 5 และ 10 นาที

4.2 การศึกษาระยะเวลาการให้พลังงานไมโครเวฟแก่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์

ข้อมูลเชิงอุณหภูมิของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟที่ 90 และ 180 วัตต์แสดงในรูปที่ 3 เมื่อเพิ่ม

ระยะเวลาการให้พลังงานไมโครเวฟแก่ชิ้นงานมอร์ต้าร์ทำให้อุณหภูมิชิ้นงานสูงขึ้น แต่ต่ำกว่ากรณีของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ เนื่องจากอนุภาคทรายในจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ดูดกลืนพลังงานความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟบางส่วน อย่างไรก็ตาม พลังงานไมโครเวฟที่ 90 และ 180 วัตต์ ให้ผลของอุณหภูมิที่ไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเฉพาะที่เวลา 3 นาที และ 5 นาที ส่วนการใช้พลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์ที่ 90 และ 180 วัตต์ เป็นเวลา 10 นาที ทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์มีอุณหภูมิในช่วง 60 – 65°C ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มในจีโอโพลิเมอร์ [8-11]

4.3 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟ 90 และ 180 วัตต์



รูปที่ 4 กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟที่ 90 และ 180 วัตต์ เป็นเวลา 3, 5 และ 10 นาที

รูปที่ 4 แสดงค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวที่ 90 และ 180 วัตต์ เป็นเวลา 3, 5 และ 10 นาที แล้วนำตัวอย่างเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 25°C จนอายุครบ 7 วัน ก่อนทำการทดสอบค่ากำลังอัด พบว่าค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้พลังงานไมโครเวฟ โดยที่พลังงาน 90 วัตต์ ให้ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์สูงกว่าที่พลังงาน 180 วัตต์ และการเพิ่มเวลาการให้พลังงานไมโครเวฟจาก 5 เป็น 10 นาที ให้ค่ากำลังอัดไม่แตกต่างกันมากนัก พลังงานไมโครเวฟที่กำลังวัตต์สูง (180 วัตต์) ทำให้เกิดการระเหยน้ำที่ผิวหน้าตัวอย่างอย่างรวดเร็วจากความร้อนภายในตัวชิ้นงานและที่ผิวหน้า และชิ้นตัวอย่างเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์อาจเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ระหว่างการก่อตัวที่รวดเร็ว กำลังอัดที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟที่ 90 วัตต์ อย่างไรก็ตาม การให้พลังงานไมโครเวฟแก่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอ ทำให้ค่ากำลังอัดต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาการนำความร้อนจากเตาอบมาบ่มร่วมกับพลังงานไมโครเวฟ โดยเลือกพลังงานไมโครเวฟที่ 90 วัตต์มาศึกษาผลของวิธีการบ่มร้อนร่วมต่อกำลังอัดจีโอโพลิเมอร์ โดยสภาวะการบ่มแสดงไว้ในตารางที่ 3

4.4 การศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟในระบบต่าง ๆ

จากตารางที่ 4 พบว่าค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ควบคุมที่บ่มอุณหภูมิห้อง (ระบบ 1 ไม่มีการบ่มร้อน) เพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม คือที่อายุ 7 และ 28 วัน สามารถให้ค่ากำลังอัดที่ 17 และ 34 เมกกะปาสคาล ตามลำดับ เมื่อให้ความร้อนแก่จีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ (ระบบ 2) พบว่าค่ากำลังอัดของวัสดุจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะการบ่มที่ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัด 31 เมกกะปาสคาล ใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน ดังนั้น การบ่มร้อนช่วยเร่งปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับแรงอัดได้สูงในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอไรเซชั่นเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน ซึ่งการให้ความร้อนแก่ระบบช่วยทำให้ปฏิกิริยาเกิดมากขึ้น ส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ได้

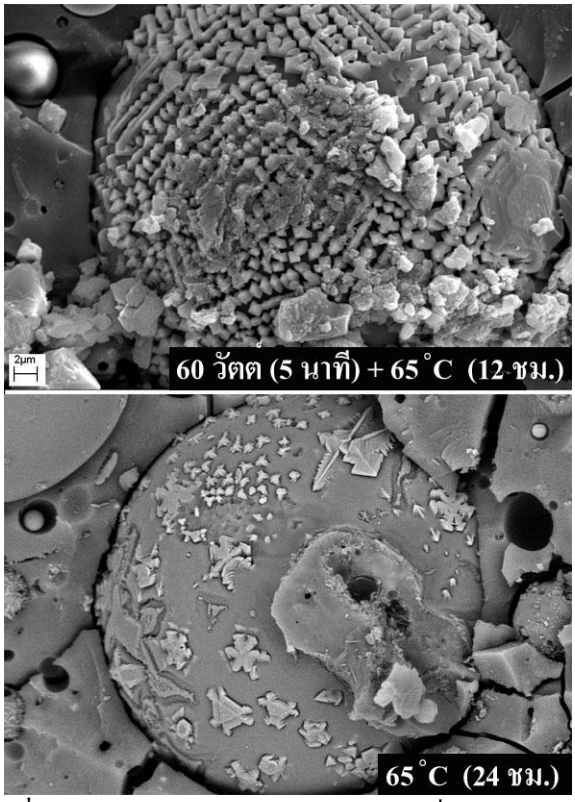
โดยทั่วไป การบ่มร้อนวัสดุจีโอโพลิเมอร์เลือกใช้อุณหภูมิ 65°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [1, 2, 8-11] การบ่มร้อนที่ระยะเวลานานเกินไป เช่น เพิ่มจาก 24 เป็น 48 ชั่วโมง มีผลต่อค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ไม่มากนัก [1, 2] เมื่อพิจารณาระบบ 3 พบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟหลังการบ่มร้อนไม่มีผลต่อค่ากำลังอัด คือให้ค่ากำลังอัดที่ 31เมกกะปาสคาล ที่ 24 ชั่วโมง ดังนั้นพลังงานไมโครเวฟมีผลในช่วงที่วัสดุเริ่มก่อตัว

ตารางที่ 4 ค่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มอร์ต้าร์ที่อายุ 7 วัน

ระบบ	วิธีการบ่ม	ค่ากำลังอัด (เมกกะปาสคาล)						
		ระยะเวลาบ่มร้อน 65°C					ระยะเวลาที่บ่มอุณหภูมิห้อง	
		1 ชม.	3 ชม.	6 ชม.	12 ชม.	24 ชม.	7 วัน	28 วัน
1	บ่มที่อุณหภูมิห้อง 25°C	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	19	**34**
2	บ่มร้อน 65°C	12	15	21	20	**31**	N/A	N/A
3	บ่มร้อน แล้วบ่ม MW 90 วัตต์ 3 นาที	9	16	24	23	**31**	N/A	N/A
4	MW 90 วัตต์ 3 นาที แล้วบ่มร้อน 65°C	12	17	20	28	**32**	N/A	N/A
5	MW 90 วัตต์ 5 นาที แล้วบ่มร้อน 65°C	21	28	**34**	**41**	N/A	N/A	N/A
6	MW 90 วัตต์ 10 นาที แล้วบ่มร้อน 65°C	19	26	**33**	**40**	N/A	N/A	N/A

เมื่อนำพลังงานไมโครเวฟมาบ่มก่อนการบ่มร้อน ดังแสดงในระบบ 4-6 พบว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟ (90 วัตต์) เป็นเวลา 5 และ 10 นาที ต้องการการบ่มร้อนร่วม 6 ชั่วโมง เพื่อให้ค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุม โดยมีค่ากำลังอัดที่ 34 และ 33 เมกกะปาสคาล เมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟ 5 และ 10 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าพลังงานไมโครเวฟช่วยลดระยะเวลาในการบ่มร้อน (จาก 24 ชั่วโมง เหลือ 6 ชั่วโมง) โดยกำลังอัดมีค่าใกล้เคียงกับจีโอโพลิเมอร์ควบคุม

พลังงานไมโครเวฟอยู่ในรูปของพลังงานสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถสั่นโมเลกุลของน้ำที่เป็นโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ โดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของไมโครเวฟเกิดการสั่นเป็นจำนวนหลายครั้งใน 1 วินาที โมเลกุลของน้ำเกิดการสั่นพร้อมกับการเปลี่ยนตำแหน่งของโมเลกุล [12] การสั่นของโมเลกุลน้ำจำนวนมากทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว ความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัตถุ ทำให้อุณหภูมิวัตถุสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่สั้นกว่าการให้ความร้อนด้วยวิธีอื่นๆ แต่การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต้องทำการบ่มร้อนร่วมจึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังอัดที่สูง อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระยะเวลาการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่นานขึ้นอาจทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นในวัสดุจีโอโพลิเมอร์หรือเกิดความร้อนสูงได้



รูปที่ 5 โครงสร้างจุลภาคของจีโอโพลิเมอร์ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟและที่บ่มร้อน

พลังงานไมโครเวฟจะเร่งปฏิกิริยาการชะซิลิกา และอะลูมินาออกจากผิวหน้าของเถ้าลอยในสภาวะที่เป็นเบส และทำให้พันธะของ H_2O เกิดการแตกตัว แล้วเข้าไปจับกับซิลิกอนและอะลูมิเนียมไอออนเป็น Si-O หรือ Al-O [12] ทำให้เกิดเป็นเจลอะลูมิโนซิลิเกตมีบริเวณผิวของเถ้าลอยมากขึ้น เกิดเป็นสารเชื่อมประสานดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเห็นได้ว่าผิวเถ้าลอย

ที่ได้รับพลังงานไมโครเวฟเกิดเจลปกคลุมที่ผิวมากกว่าเถ้าลอยที่ได้รับการบ่มร้อนเพียงอย่างเดียว การเกิดเจลของสารเชื่อมประสานสามารถทำให้จีโอโพลิเมอร์มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ลดรูพรุน และทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังอัดได้ดีขึ้น

5. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของพลังงานไมโครเวฟต่อกำลังอัดวัสดุจีโอโพลิเมอร์ พบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยพัฒนากำลังอัดจีโอโพลิเมอร์เมื่อนำมาใช้ร่วมกับการบ่มร้อน เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟช่วยให้การชะละลายของซิลิกาและอะลูมินาบนผิวเถ้าลอยในสภาวะเบสเกิดมากขึ้น เกิดเจลอะลูมิโนซิลิเกตที่ทำให้จีโอโพลิเมอร์รับกำลังอัดได้ดี สำหรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับบ่มจีโอโพลิเมอร์ขนาด 5x5x5 ซม.^{3} คือ การให้พลังงานไมโครเวฟที่ 90 วัตต์ เป็นเวลา 5 นาที ก่อนการบ่มร้อนที่ 65^{o}C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังอัดที่ 34 เมกกะปาสคาล สูงกว่ากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์ควบคุมที่บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 28 วัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม และศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (PERCH-CIC) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] P. Chindaprasirt, “Fly ash in concrete”, revised edition, Thailand Concrete Association, Bangkok, 2005. (in Thai)

[2] P. Chindaprasirt, T. Chareerat and V. Sirivivananon, “Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer”, Cement and Concrete Composites 29, 2007, pp. 224-229.

[3] U. Rattanasak, K. Pankhet and P. Chindaprasirt, “Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer”, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 18, 2011, pp. 364-369.

[4] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul and P. Chindaprasirt, “NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature”, Fuel 90, 2011, pp. 2118-2124.

[5] C.K.Y. Leung and T. Pheeraphan, “Microwave curing of Portland cement concrete: Experimental results and feasibility for practical application”, Construction and Building Material 9, 1994, pp. 61-73.

[6] C.K.Y. Leung and T. Pheeraphan, “Very high early strength of microwave cured concrete”, Cement and Concrete Research 25, 1995, pp. 136-146.

[7] D. Sohn, and D.L. Johnson, “Microwave curing effect on the 28 day strength of cementitious materials”, Cement and Concrete Research 29, 1999, pp. 241- 247.

[8] P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, and U. Rattanasak, “Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers”, Waste Management 29, 2009, pp. 539-543.

[9] P. Chindaprasirt and U. Rattanasak, “Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer”, Waste Management 30, 2010, pp. 667-672.

[10] P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, and C. Jaturapitakkul, “Utilization of fly ash blends from pulverized coal and fluidized bed combustions in geopolymeric materials”, Cement and Concrete Composites 33, 2011, pp. 55-61.

[11] U. Rattanasak and P. Chindaprasirt, “Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer”, Minerals Engineering 22, 2009, pp. 1073-1078.

[12] M. Inada, H. Tsujimoto, Y. Eguchi, N. Enomoto and J. Hojo, “Microwave-assisted zeolite synthesis from coal fly ash in hydrothermal process”, Fuel 84, 2005, pp. 1482-1486.