

อิทธิพลของสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอย

สายสุนีย์ จำรัส¹ และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ²*

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมและมอร์ตาร์ของจีโอโพลีเมอร์เถ้าลอยที่สัดส่วนผสมต่างๆ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการบ่มจีโอโพลีเมอร์ ซึ่งจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์เตรียมโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) เป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยา อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH) เท่ากับ 0.5-2.0 และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) เท่ากับ 2.0-3.0 จากการทดสอบพบว่าเถ้าลอยสามารถใช้เป็นวัสดุอะลูมิโนซิลิเกตสำหรับการผลิตจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ได้ โดยจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ทุกสัดส่วนผสมต้องมีการเติมน้ำเพิ่มจึงจะได้ร้อยละการไหลแผ่ตามมาตรฐาน ASTM C 109 กำหนด และพบว่าระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลีเมอร์เฟสดีน้อยกว่าซีเมนต์เฟสดี ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวลดลงเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของ FA/AS และ NS/NH เพิ่มขึ้นสำหรับการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกซึ่งอยู่ในรูปค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r') ไดอิเล็กตริกกลอสแฟคเตอร์สัมพัทธ์ (ϵ_r'') และสัมประสิทธิ์ทอสแทนเจนต์ ($\tan \delta$) พบว่าวัสดุส่วนผสมที่เป็นน้ำและวัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ (สารละลาย NaOH และ Na_2SiO_3) มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่าวัสดุของแข็ง (เถ้าลอยและทราย) ส่วนสมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ทุกสัดส่วนผสม พบว่ามีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาหลังผสมเพิ่มขึ้น โดยสมบัติไดอิเล็กตริกมีค่าสูงที่สุดหลังจากผสมเสร็จทันที ซึ่งจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่มีของเหลว (น้ำผสมเพิ่ม สารละลาย NaOH และ Na_2SiO_3) เป็นส่วนผสมในปริมาณสูงกว่าจะมีสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่า และเมื่อพิจารณาสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนผสมและมอร์ตาร์ของจีโอโพลีเมอร์ พบว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้สามารถนำไปบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟได้

คำสำคัญ : สมบัติไดอิเล็กตริก / จีโอโพลีเมอร์ / พลังงานไมโครเวฟ

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

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Influence of Mix Proportions on Physical and Dielectric Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar

Saysunee Jumrat¹ and Burachat Chatveera^{2*}

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

In this paper, physical and dielectric properties of mixture materials and various mixes of fly ash-based geopolymer mortars were investigated to determine the feasibility of application microwave energy in curing geopolymer. Sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3) were used as an activator. The mass ratios of Na_2SiO_3 -to-NaOH (NS/NH) of 0.5 to 2.0 and the fly ash-to-activator (FA/AS) of 2.0 to 3.0 were used. The test results revealed that fly ash could be used as aluminosilicate material for production of geopolymer mortars. The flow values of the samples without an additional amount of water were not in accordance with the ASTM C 109 standard, therefore water was added to the geopolymer mortar. For setting time of geopolymer paste, it was found that the initial and final setting time was lower than that of cement paste, and these values decreased when the ratios of FA/AS and NS/NH increased. In the case of dielectric properties, the relative dielectric constant (ϵ_r'), relative dielectric loss factor (ϵ_r'') and loss tangent coefficient ($\tan \delta$) were studied, and it was found that the dielectric properties of liquid portions (water, Na_2SiO_3 and NaOH) eg. ϵ_r' , ϵ_r'' and $\tan \delta$ were higher than that of the solid portions (fly ash and sand). For geopolymer mortars, it was found that the dielectric properties decreased with increasing the time after mixing, and had the highest value at the end of mixing. In addition, the geopolymer mortars with more liquid (additional water, NaOH and Na_2SiO_3) contents had high dielectric properties values as well. The dielectric properties results indicated that geopolymer could be cured with microwave energy.

Keywords : Dielectric Properties / Geopolymer / Microwave Energy

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

¹ Graduate Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

² Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.

1. บทนำ

ปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุหลักที่นิยมนำมาใช้ในงานก่อสร้างอย่างแพร่หลาย โดยวัสดุยึดประสานที่ใช้มากเป็นอันดับหนึ่งในการผลิตคอนกรีต คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement) กระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต้องใช้ปริมาณเชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก และยังก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีส่วนสำคัญ ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (Global warming) การผลิตปูนซีเมนต์ทำให้เกิดการปล่อยก๊าซที่มีผลต่อการเกิดภาวะเรือนกระจกถึงปีละ 13,500 ล้านตัน หรือประมาณร้อยละ 7 ของก๊าซที่ปล่อยออกมาในบรรยากาศทั้งหมด [1-2] จากผลกระทบดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ โดยการหาวัสดุชนิดอื่นมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพื่อผลิตปูนซีเมนต์ผสม (Blend cement) วัสดุดังกล่าว ได้แก่ วัสดุปอซโซลาน (Pozzolan materials) แต่วัสดุปอซโซลานไม่สามารถแทนที่ปูนซีเมนต์ได้ทั้งหมด เนื่องจากซิลิกา (SiO_2) และอะลูมินา (Al_2O_3) ที่มีอยู่ในวัสดุดังกล่าว ต้องการแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เพื่อทำปฏิกิริยาปอซโซลานต่อให้ได้สารประกอบแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (C-A-H) ที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน ดังนั้นจึงได้มีความพยายามในการพัฒนาสารซีเมนต์ชนิดใหม่ซึ่งใช้วัสดุปอซโซลานที่มี SiO_2 และ Al_2O_3 เป็นองค์ประกอบหลักผลิตวัสดุยึดประสานที่เรียกว่า “จีโอโพลิเมอร์”

จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่ไมใช้ปูนซีเมนต์ สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของ SiO_2 และ Al_2O_3 ซึ่งอยู่ในรูปอสัณฐาน โดยการกระตุ้นด้วยด่างและบ่มด้วยความร้อน พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น กำลังอัดสูงในช่วงอายุต้น ความสามารถในการซึมผ่านน้ำต่ำ การหดตัวต่ำ ทนไฟ ทนทานต่อสารละลายซัลเฟตและการกัดกร่อนของกรด เป็นต้น [3] เนื่องจากจีโอโพลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างซิลิกอน (Si) และอะลูมิเนียม (Al) ซึ่งถูกชะออกมาจากวัสดุโดยสารละลายด่างความเข้มข้น

สูง และใช้ความร้อนกระตุ้นปฏิกิริยาทำให้ Si และ Al เกิดปฏิกิริยาการรวมตัวแบบควบแน่นหรือโพลิคอนเดนเซชัน (Polycondensation) เป็นโมเลกุลลูกโซ่ในลักษณะของโพลิเมอร์ (Polymer) ซึ่งโครงสร้างเคมีคล้ายกับการเชื่อมกันของโมเลกุลหินจึงทำให้จีโอโพลิเมอร์มีคุณสมบัติเด่นสามารถนำไปใช้ในเป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานคอนกรีตได้ [4]

กระบวนการบ่มจีโอโพลิเมอร์ในงานวิจัยที่ผ่านมากระทำที่อุณหภูมิห้อง แล้วบ่มแห้งด้วยความร้อนภายในเตาอบไฟฟ้า (Electric oven) หรือบ่มด้วยไอน้ำอุณหภูมิสูง อุณหภูมิบ่มอยู่ในช่วง 25 ถึง 95 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 6 ชม. ถึง 4 วัน [5] การบ่มดังกล่าวเป็นการให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น [6] และเมื่อมองในแง่ของการพัฒนาในรูปแบบอุตสาหกรรมถือว่าใช้เวลามากพอสมควร ปัจจุบันได้มีการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ทางด้านเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่พร้อมใช้งานได้อย่างรวดเร็ว และมีคุณภาพตามมาตรฐาน เทคโนโลยีดังกล่าวคือ การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตคอนกรีตได้ [7] การให้ความร้อนต่อวัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุ นั่นคือระหว่างที่คลื่นไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัตถุ พลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยการเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัตถุ ทำให้อุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์กระจายอย่างสม่ำเสมอ

จากหลักการเกิดความร้อนดังกล่าวข้างต้น จึงความเป็นไปได้ที่จะนำพลังงานไมโครเวฟมาประยุกต์ใช้กับการบ่มจีโอโพลิเมอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของทั้งวัสดุส่วนผสม และมอร์ตาร์ของจีโอโพลิเมอร์แต่ละอย เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการบ่มจีโอโพลิเมอร์

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและสมบัติไดอิเล็กตริกของทั้งวัสดุส่วนผสมและมอร์ตาร์ของจีโอโพลิเมอร์ถั่วลลียง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการบ่มจีโอโพลิเมอร์

3. ทฤษฎีการให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟ

การให้ความร้อนของคลื่นไมโครเวฟแตกต่างจากการให้ความร้อนด้วยวิธีธรรมดา (Conventional process) กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุที่ได้รับคลื่นไมโครเวฟเป็นความร้อนที่เกิดขึ้นเองภายในวัสดุแทนที่จะเกิดจากการได้รับความร้อนที่ถ่ายเทมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายนอก การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยคุณสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในวัสดุ ซึ่งวัสดุที่ผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภท “วัสดุไดอิเล็กตริก” (Dielectric materials) หมายถึง วัสดุที่มียุทโธรมที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Dipoles) โดยอันตรกิริยา (Interaction) ของขั้วและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายใน (Inter Heat Generation) ดังนั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นโดยคลื่นไมโครเวฟจึงเรียกว่า “ความร้อนแบบภายในที่เกิดขึ้นทั่วทั้งชิ้นวัสดุ” (Internal and Volumetric Heating)

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร [6] ปริมาณความร้อนที่กำเนิดขึ้นภายในต่อหน่วยปริมาตรแสดงดังสมการที่ (1)

$$Q = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (1)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนที่กำเนิดขึ้นภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

ω คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ (เรเดียนต่อวินาที, Rad/s)

ϵ_0 คือ คุณสมบัติการซึมผ่านในที่ว่าง (8.854×10^{-12} ฟาร์ฮาร์ดต่อเมตร, F/m)

ϵ_r' คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) หรือ ปริมาณพลังงานไมโครเวฟที่ถูกกัก

เก็บไว้ในวัสดุไดอิเล็กตริก

ϵ_r'' คือ ไดอิเล็กตริกลอสมแพคเตอร์สัมพัทธ์ (Relative Dielectric Loss Factor) หรือปริมาณของการสูญเสียพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

$\tan \delta$ คือ สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (Loss Tangent Coefficient) หรือ ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงานดูดซับเป็นพลังงานความร้อน ($\epsilon_r'' / \epsilon_r'$)

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อเมตร, V/m) และ f คือ ความถี่ (เฮิร์ตซ, Hz)

4. ระเบียบวิธีวิจัย

4.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ วัสดุส่วนผสมที่ใช้สำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ถั่วลลียง และวัสดุส่วนผสมที่ใช้ผลิตมอร์ตาร์ของปูนซีเมนต์ ซึ่งรายละเอียดของวัสดุส่วนผสมที่ใช้แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 วัสดุผง

วัสดุผงที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสองชนิด คือ ถั่วลลียงสำหรับการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ และปูนซีเมนต์สำหรับการผลิตซีเมนต์มอร์ตาร์

4.1.1.1 ถั่วลลียง

ถั่วลลียงที่นำมาใช้เป็นวัสดุผงแหล่ง SiO_2 และ Al_2O_3 ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์นำมาจากโรงไฟฟ้าถ่านหินลิกไนต์ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง

4.1.1.2 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุผงสำหรับการเตรียมซีเมนต์มอร์ตาร์

4.1.2 ทราย

ใช้ทรายแม่น้ำละเอียดขนาด (Graded Standard Sand) ที่อยู่ในสถานะอิ่มตัวผิวแห้ง (Saturated Surface-dry, S.S.D) ดังระบุไว้ในมาตรฐาน ASTM C 778 โดยร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 16 และค้างตะแกรงเบอร์ 100

4.1.3 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

เตรียมโดยใช้ NaOH ของแข็งที่มีลักษณะเป็นเกล็ด ชนิดเกรดการค้า ความบริสุทธิ์ร้อยละ 98 ละลายกับน้ำเพื่อปรับความเข้มข้นของสารละลายให้มีค่า 10 โมลาร์

4.1.4 สารละลายโซเดียมซิลิเกต

ประกอบด้วยร้อยละโดยมวลของโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) และน้ำ (H_2O) เท่ากับ 9.58, 28.75 และ 61.67 ตามลำดับ

4.1.5 น้ำ

ใช้น้ำประปาที่มีค่าความเป็นกรดต่าง เท่ากับ 7.0

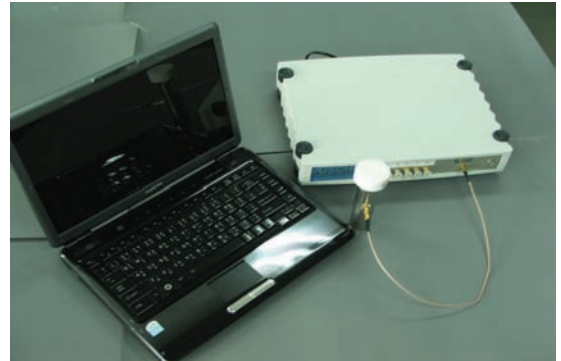
4.2 วิธีการศึกษา

4.2.1 การศึกษาคุณสมบัติของแก้วลอย

เนื่องจากองค์ประกอบเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุของแข็งที่ใช้เป็นวัสดุผงมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์ [8] งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของแก้วลอยที่ใช้เป็นวัสดุในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ โดยการศึกษาคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และโครงสร้างจุลภาคของแก้วลอย เพื่อวิเคราะห์และประเมินศักยภาพของการใช้เป็นวัสดุดิบแหล่ง SiO_2 และ Al_2O_3 โดยองค์ประกอบทางเคมีศึกษาโดยใช้เทคนิค X-Ray Fluorescence (XRF) สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความต้องการน้ำ พื้นที่ผิวจำเพาะ ความถ่วงจำเพาะ ความละเอียด และดัชนีกำลัง ส่วนโครงสร้างจุลภาคของแก้วลอยศึกษาด้วยภาพถ่ายขยายโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

4.2.2 การทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

เนื่องจากค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ') ของวัสดุผสมจะมีค่าอยู่ระหว่างค่า ϵ' ของแต่ละองค์ประกอบ [9] ดังนั้นการศึกษามิติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งเป็นวัสดุผสม จึงต้องศึกษามิติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนผสมที่ใช้ในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วย วัสดุส่วนผสมดังกล่าว ได้แก่ แก้วลอย สารละลาย NaOH สารละลาย Na_2SiO_3 ทราบ และน้ำ โดยวัสดุส่วนผสมแต่ละชนิดบรรจุในแบบหล่ออะคลิลิก ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. และวัสดุสมบัติไดอิเล็กตริกในรูปของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพันธ์ (ϵ_r') และไดอิเล็กตริกอสแฟคเตอร์สัมพันธ์ (ϵ_r'') โดยใช้เทคนิคโคเอกเซียลโพรบ (Coaxial Probe) และ



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์โคเอกเซียลโพรบ และเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์

ประมวลผลผ่านเครื่องเน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (Network Analyzer) (รูปที่ 1) ที่อุณหภูมิห้อง

เนื่องจากค่า ϵ_r' และ ϵ_r'' สามารถยุบรวมเป็นตัวแปรใหม่เพื่อความสะดวกในการอธิบายการเกิดความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ ตัวแปรดังกล่าว เรียกว่า “สัมประสิทธิ์ลอสแทนเจนท์” โดย $\tan \delta$ แสดงถึงความสามารถในการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ [9] ดังนั้นเมื่อวัด ϵ_r' และ ϵ_r'' แล้วจึงคำนวณค่า $\tan \delta$ ของวัสดุส่วนผสมแต่ละชนิด ซึ่งค่า $\tan \delta$ สามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (2)

$$\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r' \quad (2)$$

4.2.3 การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่อยู่ในสภาวะสด

คุณสมบัติทางกายภาพในสภาวะสดของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ การไหลแผ่และระยะเวลาการก่อตัว

สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงรายละเอียด ดังต่อไปนี้

1) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแก้วลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS) แปรค่า 2.0, 2.5 และ 3.0

2) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH) แปรค่า 0.5, 1.0 และ 2.0

3) ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH มีค่าเท่ากับ 10 โมลาร์

4) อัตราส่วนโดยน้ำหนักของทรายต่อเถ้าลอย เท่ากับ 2.0

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ผสมเถ้าลอยและสารละลาย NaOH ให้เข้ากันในหม้อผสมด้วยความเร็วของใบพาย 285 ± 10 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที

2) เททรายลงไปในหม้อ แล้วผสมต่ออีก 3 นาที

3) เทสารละลาย Na_2SiO_3 แล้วผสมต่ออีก 2 นาที

4) นำจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมเสร็จซึ่งอยู่ในสถานะสดไปทดสอบคุณสมบัติต่อไป

สำหรับตัวอย่างซีเมนต์มอร์ตาร์เตรียมโดยวิธีการผสมตามมาตรฐาน ASTM C 305 โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 และใช้อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 2.75

4.2.3.1 การไหลแผ่

เนื่องจากค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐานบ่งบอกถึงปริมาณน้ำที่ทำให้ส่วนผสมอยู่ในสภาวะปั้นได้ งานวิจัยนี้จึงทดสอบการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ด้วยวิธีโต๊ะการไหล (Flow Table) ซึ่งเป็นวิธีศึกษาความชื้นเหลว (ปริมาณน้ำที่เหมาะสม) ของซีเมนต์มอร์ตาร์ ตามมาตรฐาน ASTM C 109 โดยจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ศึกษามีสัดส่วนผสมแตกต่างกัน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ สำหรับการทดสอบการไหลแผ่

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		น้ำหนักรวม (ก.)			
	Fly Ash/ Activators (FA/AS)	Na_2SiO_3 / NaOH (NS/NH)	ทราย	เถ้าลอย	Na_2SiO_3	NaOH
1) 2.0FA0.5	2.0	0.5	600	300	50	100
2) 2.0FA1.0	2.0	1.0	600	300	75	75
3) 2.0FA2.0	2.0	2.0	600	300	100	50
4) 2.5FA0.5	2.5	0.5	600	300	40	80
5) 2.5FA1.0	2.5	1.0	600	300	60	60
6) 2.5FA2.0	2.5	2.0	600	300	80	40
7) 3.0FA0.5	3.0	0.5	600	300	33	67
8) 3.0FA1.0	3.0	1.0	600	300	50	50
9) 3.0FA2.0	3.0	2.0	600	300	67	33

หมายเหตุ: สัญลักษณ์ของชุดตัวอย่างอธิบายได้ดังนี้

- FA หมายถึง จีโอโพลิเมอร์เถ้าลอย

- ตัวเลข xx หน้า FA หมายถึง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเถ้าลอยต่อสารละลายต่าง (FA/AS)

- ตัวเลข xx หลัง FA หมายถึง อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย Na_2SiO_3 ต่อ NaOH (NS/NH)

- เช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5 หมายถึง จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก FA/AS เท่ากับ 2.0 และอัตราส่วนโดยน้ำหนัก NS/NH มีค่า 0.5

และถ้าทดสอบด้วยวิธีโตะการไหลแล้วค่าร้อยละการไหลแผ่นของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ของชุดตัวอย่างใดไม่อยู่ในมาตรฐานกำหนด (ร้อยละ 110 ± 5) ให้ค่อยๆ เติมน้ำ (Additional water) ลงไปผสมเพิ่มจนค่าการไหลแผ่นอยู่ในมาตรฐาน โดยปริมาณน้ำที่เพิ่มลงไปคิดเป็นร้อยละโดยน้ำหนักของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ (เถ้าลอย + สารละลาย Na_2SiO_3 + สารละลาย NaOH)

4.2.3.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีการเติมน้ำเพิ่มจนได้ค่าร้อยละการไหลแผ่นตามมาตรฐานกำหนด โดยประยุกต์วิธีการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวสำหรับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเป็นวิธีทดสอบด้วยเข็มไวแคต (Vicat Needle Apparatus) ตามมาตรฐาน ASTM C 191 สำหรับการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวกระทำเช่นเดียวกับการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เพียงแต่ข้ามขั้นตอนการใส่ทราย

4.2.4 การทดสอบคุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ

โดยการศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์ซึ่งบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 1 °C) ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ (0-24 ชม.) เพื่อศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการบ่มจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ไว้ที่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะนำไปบ่มด้วยความร้อน ที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ขั้นตอนการผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ กระทำเช่น

เดียวกับการทดสอบคุณสมบัติในสภาวะสด แล้วจึงเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จลงในแบบหล่ออะคลิลิก ขนาด $5 \times 5 \times 5$ ซม. โดยแบ่งเป็นสองชั้น แต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กกระทุ้งตามมาตรฐาน ASTM C 109 จากนั้นนำไปสั่นด้วยเครื่องสั่นเป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดฟองอากาศหรือรูพรุนที่อยู่ในเนื้อมอร์ตาร์ ปิดผิวหน้าตัวอย่างด้วยการหุ้มแบบหล่อด้วยแผ่นพลาสติกใสเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำระหว่างการเกิดปฏิกิริยา แล้วจึงวัดสมบัติไดอิเล็กตริก และคุณสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาหลังผสม เท่ากับ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 และ 24 ชม. ตามลำดับ

4.2.4.1 การทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริก

เมื่อเทจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ลงในแบบหล่อแล้ว ทำการวัดสมบัติไดอิเล็กตริก (ϵ_r' และ ϵ_r'') ของตัวอย่างทันที (ระยะเวลาหลังผสมเท่ากับ 0) โดยใช้เทคนิคโคเอกเซียลโพรบและประมวลผลด้วยอุปกรณ์เน็ตเวิร์กอนาไลเซอร์ (รูปที่ 1) จากนั้นจึงปิดผิวหน้าตัวอย่างด้วยไว้ด้วยแผ่นพลาสติกใส แล้วจึงบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 1 °C) แล้วจึงกลับมาวัดสมบัติไดอิเล็กตริกอีก เมื่อระยะเวลาหลังผสม เท่ากับ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 และ 24 ชม. ตามลำดับ

เมื่อวัด ϵ_r' และ ϵ_r'' ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ แล้ว จึงทำการคำนวณหาค่า $\tan \delta$ ดังสมการที่ (2)

4.2.4.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติทางกายภาพของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ซึ่งบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความหนาแน่น เนื่องจากความหนาแน่นมีอิทธิพลต่อสมบัติไดอิเล็กตริก ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการเกิดความร้อนจากการให้พลังงานไมโครเวฟ [9]

เมื่อผสมจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์เสร็จจนเทลงในแบบหล่อแล้ว (ระยะเวลาหลังผสมเท่ากับ 0) ทำการชั่งน้ำหนักวัดขนาดของตัวอย่าง (ความกว้าง ยาว และสูง) เพื่อคำนวณปริมาตร จากนั้นปิดผิวหน้าตัวอย่างด้วยแผ่นพลาสติกใส แล้วจึงบ่มตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 1 °C) แล้วจึงกลับมาชั่งน้ำหนัก วัดขนาดของตัวอย่างอีกที่ระยะ

เวลาหลังผสม 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 และ 24 ชม. ตามลำดับ ความหนาแน่นของตัวอย่างที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$D = M/V \quad (3)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นเนื้อวัสดุ, ก./ลบ.ซม.

M คือ น้ำหนักของก้อนตัวอย่าง, ก.

V คือ ปริมาตรของก้อนตัวอย่าง, ลบ.ซม.

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1 คุณสมบัติของเถ้าลอย

ผลการทดสอบองค์ประกอบเคมีของวัสดุผงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ (ตารางที่ 2) พบว่าเถ้าลอยมีปริมาณโดย

มวลของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) สูงสุด รองลงมา ได้แก่ อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยกับข้อกำหนดของสารปอซโซลาน ตามมาตรฐาน ASTM C 618 พบว่าเถ้าลอยที่นำมาใช้จัดอยู่ในประเภท F ซึ่งเมื่อพิจารณาปริมาณ SiO_2 ของเถ้าลอยที่นำมาใช้เทียบกับลักษณะของเถ้าลอยที่เหมาะสมซึ่งจะนำมากะตุ้นด้วยสารละลายต่างจากผลการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา [8] ถือได้ว่า เถ้าลอยที่นำมาใช้นี้มีปริมาณ SiO_2 (ร้อยละ 37) ต่ำกว่าเล็กน้อย (เถ้าลอยที่เหมาะสมมีปริมาณ SiO_2 ร้อยละ 40-50) สำหรับปูนซีเมนต์ พบว่ามีปริมาณ CaO สูงที่สุด ซึ่งเท่ากับร้อยละ 65.20 รองลงมา ได้แก่ SiO_2 และ Al_2O_3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 20.66 และ 5.38 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 องค์ประกอบเคมีของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC)

องค์ประกอบเคมี	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	เถ้าลอย	OPC
Silicon Dioxide (SiO_2)	36.44	20.66
Aluminium Oxide (Al_2O_3)	20.48	5.38
Iron Oxide (Fe_2O_3)	15.76	3.32
Calcium Oxide (CaO)	16.35	65.20
Magnesium Oxide (MgO)	3.55	1.39
Potassium Oxide (K_2O)	2.25	0.38
Sodium Oxide (Na_2O)	0.98	0.07
Sulfur Trioxide (SO_3)	3.35	2.24
Titanium Dioxide (TiO_2)	-	0.25
Free CaO	1.24	0.50
Loss on Ignition (LOI)	0.59	1.50

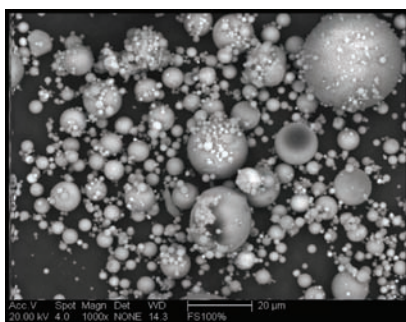
ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ (ตารางที่ 3) จะเห็นได้ว่าเถ้าลอยมีความต้องการน้ำ และความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าปูนซีเมนต์ ซึ่งจากพื้นที่ผิวจำเพาะจะเห็นว่าปูนซีเมนต์มีความละเอียดมากกว่าเถ้าลอย

สำหรับการศึกษากายภาพถ่ายขยายของเถ้าลอยและ

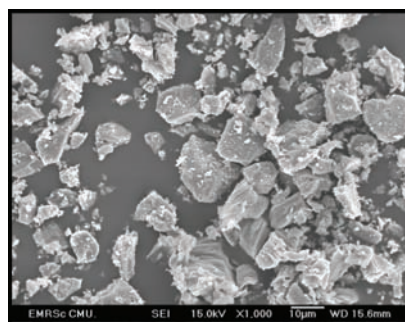
ปูนซีเมนต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า (รูปที่ 2) จะเห็นได้ว่าอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะรูปทรงกลม และมีขนาดเล็กใหญ่คละกัน ส่วนอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 มีรูปร่างลักษณะเป็นเหลี่ยมมุม

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 (OPC)

คุณสมบัติทางกายภาพ	เถ้าลอย	OPC
ความต้องการน้ำ (ร้อยละ)	95.9	100
พื้นที่ผิวจำเพาะโดยวิธีเบลม (ตร.ซม./ ก.)	2133	3376
ความถ่วงจำเพาะ	2.25	3.15
ความละเอียดของอนุภาค (ร้อยละผ่าน)		
- 75 ไมโครเมตร	24.4	5.3
- 45 ไมโครเมตร	38.6	3.6
- 36 ไมโครเมตร	44.6	90.6
ดัชนีกำลัง (ร้อยละเทียบกับตัวอย่างควบคุม)		
- 7 วัน	66.4	100
- 28 วัน	69.8	100



ก)



ข)

รูปที่ 2 ภาพถ่ายกำลังขยาย 1,000 เท่า ของ ก) เถ้าลอย และ ข) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

5.2 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สถานะสด

5.2.1 การไหลแผ่

ผลการทดสอบ (ตารางที่ 4) พบว่าค่าการไหลแผ่ของทุกสัดส่วนผสม (ที่ไม่ได้เติมน้ำเพิ่ม) ไม่อยู่ในมาตรฐาน (ร้อยละ 110 ± 5) เนื่องจากมีความเหนียวข้นสูง (บางตัวอย่างแข็งตัวทันทีหลังผสม) โดยงานวิจัยผ่านมาพบว่าสามารถปรับปรุงการไหลของจีโอโพลิเมอร์ได้โดยการเติมน้ำหรือสารลดน้ำพิเศษ (Superplastizer) แต่การใช้สารลดน้ำพิเศษจะส่งผลเสียต่อกำลังอัด [10] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการเติมน้ำเพิ่มลงไปในทุกชุดตัวอย่างเพื่อให้มีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด และเพื่อไม่ให้ค่าร้อยละของการไหลแผ่เกินมาตรฐาน จึงค่อยๆ ปรับปริมาณน้ำเพิ่ม เมื่อ

พิจารณาอิทธิพลของสัดส่วนผสม พบว่าเมื่ออัตราส่วนของสารละลาย FA/AS และ NS/NH เพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่เติมลงไป (จนตัวอย่างมีค่าไหลแผ่ตามมาตรฐาน) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5, 2.0FA1.0 และ 2.0FA2.0 ปริมาณน้ำที่เติมลงไปเท่ากับ 30, 50 และ 100 กรัมต่อจีโอโพลิเมอร์เพสต์ 1 กก. ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Duxson และคณะ [11] ที่พบว่าการพัฒนาโครงสร้างภายในของจีโอโพลิเมอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องเมื่อปริมาณ Si เพิ่มขึ้น เนื่องจาก Na_2SiO_3 ช่วยเติมปริมาณ SiO_2 ที่่วงไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเพื่อปรับอัตราส่วน Si/Al ให้มีค่าเหมาะสมต่อการเกิดจีโอโพลิเมอร์ [12]

ตารางที่ 4 ร้อยละการไหลแผ่ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

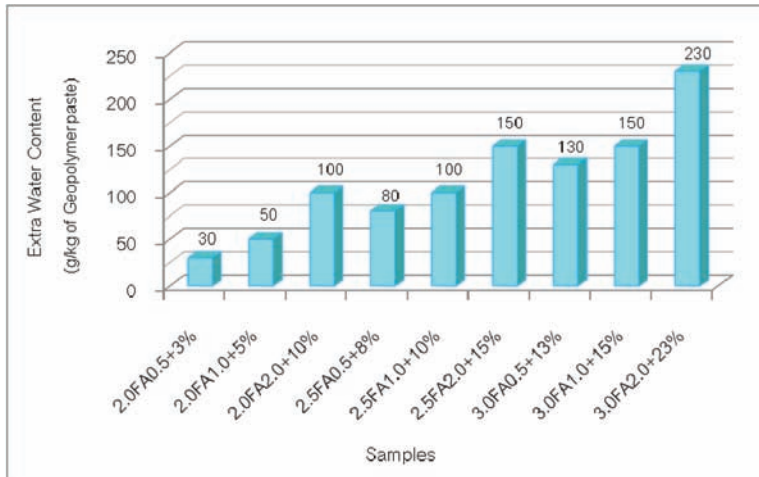
ตัวอย่าง	ร้อยละการไหล									
	Extra Water (% of Geopolymer Paste)									
	0	3	5	8	10	13	15	18	20	23
1) 2.0FA0.5	42	112*	152	NA	-	-	-	-	-	-
2) 2.0FA1.0	27	61	110*	245	NA	-	-	-	-	-
3) 2.0FA2.0	NA	15	32	81	107*	139	NA	-	-	-
4) 2.5FA0.5	NA	23	67	113*	152	NA	-	-	-	-
5) 2.5FA1.0	NA	18	42	86	105*	151	NA	-	-	-
6) 2.5FA2.0	NA	NA	NA	19	34	75	105*	148	NA	
7) 3.0FA0.5	NA	16	28	62	95	115*	152	NA	-	-
8) 3.0FA1.0	NA	NA	5	18	27	63	106*	NA	-	-
9) 3.0FA2.0	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	85	95	106*

หมายเหตุ: 1) สัญลักษณ์ (*) หมายถึง ค่าร้อยละของการไหลแผ่ที่อยู่ในมาตรฐาน ASTM C 109 กำหนด

2) สัญลักษณ์ (NA) หมายถึง ไม่สามารถหาค่าได้เนื่องจากตัวอย่างมีความชื้นเหลวมาก หรือน้อยเกินไป

สำหรับซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ศึกษามีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5 พบว่ามีค่าการไหลแผ่ เท่ากับ

ร้อยละ 105 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 3 ปริมาณน้ำที่เติมจนทำให้จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ มีค่าการไหลผ่าน ตามมาตรฐาน ASTM C 109

5.2.2 ระยะเวลาการก่อตัว

เนื่องจากการทดสอบการไหลผ่านของจีโอโพลิเมอร์ในกรณีที่ไม่เติมน้ำเพิ่ม พบว่าค่าการไหลผ่านไม่อยู่ในมาตรฐาน ASTM C 109 กำหนด นั่นคือความสามารถทำงานได้ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเฉพาะชุดตัวอย่างที่เติมน้ำเพิ่มจนทำให้ได้ร้อยละการไหลผ่านอยู่ในมาตรฐานกำหนด รายละเอียดของสัดส่วนผสมของชุดตัวอย่างดังกล่าวแสดงในตารางที่ 5

จากผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัว (รูปที่ 4) พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารละลาย NS/NH เท่ากัน เวลาการก่อตัวมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วน FA/AS เพิ่มขึ้น (ยกเว้นกรณีชุดตัวอย่าง 3.0FA2.0) ดังตัวอย่างเช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3%, 2.5FA0.5+8% และ 3.0FA0.5+13% มีเวลาการก่อตัวระยะต้น เท่ากับ 82, 52 และ 42 นาที ตามลำดับ และ

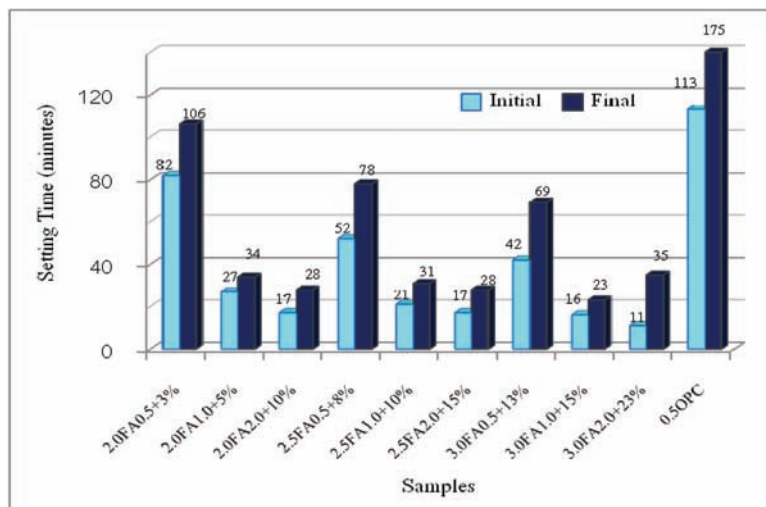
เวลาการก่อตัวระยะสุดท้ายเท่ากับ 106, 78 และ 69 นาที ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราส่วน FA/AS มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรซ์เซชัน (Geopolymerisation) เพราะปฏิกิริยานี้ต้องการ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่อยู่ในแก้วลอย [13] ดังนั้นเมื่อส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มีปริมาณแก้วลอยมากกว่าจึงมีปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 มากกว่า ทำให้ปฏิกิริยาเกิดสูง ส่งผลให้โครงสร้างภายในแข็งแรงอย่างรวดเร็ว ระยะเวลาการก่อตัวจึงน้อยกว่า สอดคล้องกับผลที่ได้ในงานวิจัยของ Provis และ van Deventer [14] ซึ่งพบว่าปฏิกิริยาของจีโอโพลิเมอร์สามารถเกิดได้มากกว่าในกรณีที่ตัวอย่างมีอัตราส่วนของแข็งต่อสารละลายมากกว่า นั่นคือตัวอย่างที่มีปริมาณแก้วลอยหรือสารละลาย Na_2SiO_3 สูงกว่า จะทำให้จีโอโพลิเมอร์เกิดปฏิกิริยาและสามารถแข็งตัวอย่างรวดเร็วกว่า ดังนั้นระยะเวลาการก่อตัวจึงน้อยกว่า

ตารางที่ 5 สัดส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่เติมน้ำเพิ่มจนมีค่าการไหลแผ่ ตามมาตรฐานกำหนด

ตัวอย่าง	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		น้ำหนัก (ก.)				Additional Water
	FA/AS	NS/NH	เถ้าลอย	Activators	Na ₂ SiO ₃	NaOH	
1) 2.0FA0.5+3%	2.0	0.5	300	150	50	100	14
2) 2.0FA1.0+5%	2.0	1.0	300	150	75	75	23
3) 2.0FA2.0+10%	2.0	2.0	300	150	100	50	45
4) 2.5FA0.5+8%	2.5	0.5	300	120	40	80	34
5) 2.5FA1.0+10%	2.5	1.0	300	120	60	60	42
6) 2.5FA2.0+15%	2.5	2.0	300	120	80	40	63
7) 3.0FA0.5+13%	3.0	0.5	300	100	33	67	52
8) 3.0FA1.0+15%	3.0	1.0	300	100	50	50	60
9) 3.0FA2.0+23%	3.0	2.0	300	100	67	33	92

หมายเหตุ: 1) น้ำหนักของส่วนผสมที่แสดงในตารางใช้ในการเตรียมตัวอย่าง 1 หม้อผสม

2) สัญลักษณ์ของชุดตัวอย่างอธิบายได้ดังนี้ เช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3% คือ จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ เถ้าลอยที่มีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก FA/AS เท่ากับ 2.0 อัตราส่วนโดยน้ำหนัก NS/NH เท่ากับ 0.5 และมีปริมาณน้ำผสมเพิ่มร้อยละ 3 ของจีโอโพลิเมอร์เฟส



รูปที่ 4 ระยะเวลาการก่อตัวของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับสัดส่วนผสมต่างๆ

5.3 คุณสมบัติของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลา หลังผสมต่างๆ

5.3.1 สมบัติไดอิเล็กตริก

ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการวิเคราะห์กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ เพราะสมบัติไดอิเล็กตริกแสดงถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ และการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนผสมและมอร์ตาร์ของจีโอโพลิเมอร์ที่ผสมแล้ว ทำให้ทราบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (ϵ_r') ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณพลังงานไมโครเวฟที่ถูกกักเก็บไว้

ในวัสดุ และไดอิเล็กตริกอสแฟคเตอร์สัมพัทธ์ (ϵ_r'') ซึ่งบอกรีมาณการสูญเสียพลังงานไมโครเวฟภายในวัสดุไดอิเล็กตริก

5.3.1.1 สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนผสม

ผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า น้ำมีค่า ϵ_r' สูงสุด รองลงมา ได้แก่ สารละลาย NaOH สารละลาย Na_2SiO_3 ถ้ำลอย และทราย ตามลำดับ สำหรับกรณีของค่า ϵ_r'' พบว่าน้ำมีค่าสูงสุดเช่นกัน รองลงมา ได้แก่ สารละลาย Na_2SiO_3 สารละลาย NaOH ถ้ำลอย และทราย ตามลำดับ

ตารางที่ 6 สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนที่ใช้เป็นส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

วัสดุ	Relative Dielectric Constant (ϵ_r')	Relative Dielectric Loss Factor (ϵ_r'')	Loss Tangent Coefficient ($\tan \delta$)
ถ้ำลอย	2.90	0.21	0.07
ทราย (Saturated Surface-dry)	2.78	0.20	0.07
โซเดียม ซิลิเกต (Na_2SiO_3)	8.94	1.70	0.19
โซเดียม ไฮดรอกไซด์ (NaOH, 10 M)	14.32	1.17	0.08
น้ำ (27 °C)	72.18	11.75	0.16

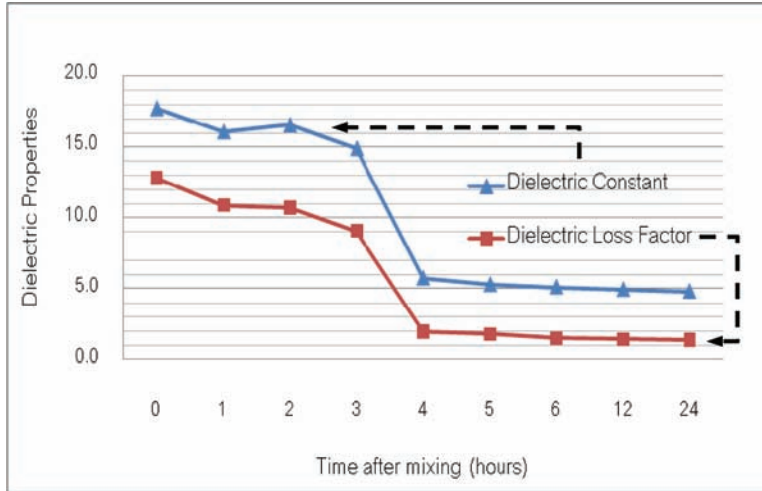
สำหรับค่า $\tan \delta$ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของการผลิตพลังงานความร้อนที่เกิดจากการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้จากค่า ϵ_r'' ทหารด้วย ϵ_r' และจากการคำนวณพบว่าวัสดุส่วนผสมที่มีค่า $\tan \delta$ สูงสุด คือ สารละลาย Na_2SiO_3 รองลงมา ได้แก่ น้ำ สำหรับวัสดุส่วนผสมอีกสามชนิด คือ สารละลาย NaOH ถ้ำลอย และทราย มีค่า $\tan \delta$ ใกล้เคียงกัน โดยเมื่อพิจารณาสถานะของวัสดุส่วนผสม พบว่าวัสดุที่เป็นของเหลว (น้ำ สารละลาย

Na_2SiO_3 และ NaOH) มีค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (ϵ_r' , ϵ_r'' และ $\tan \delta$) สูงกว่าวัสดุของแข็ง (ถ้ำลอย และทราย) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำในสถานะของเหลว (Liquid water) มีลักษณะโครงสร้างเชิงขั้ว ดังนั้นโมเลกุลของน้ำในสถานะของเหลวจึงสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ง่ายกว่า [9] ดังนั้นวัสดุส่วนผสมที่มีสถานะของเหลวซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบจำนวนมากจึงมีค่าสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่า

5.3.1.2 สมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์

ผลการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สำหรับสัดส่วนผสมต่างๆ (ที่มีการเติมน้ำเพิ่มจนค่าการไหลแผ่ตามมาตรฐาน) พบว่าค่า ϵ_r' และ ϵ_r'' ของทุกสัดส่วนผสมมีค่าสูงที่สุดหลังจากผสมเสร็จทันที (ระยะ

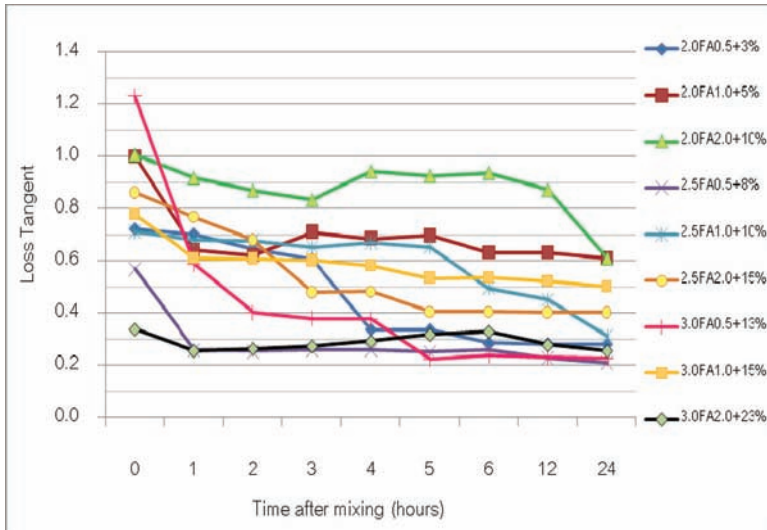
เวลาหลังผสมเท่ากับ 0) โดยค่าทั้งสองลดลงเมื่อทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานขึ้น และมีค่าต่ำสุดที่ระยะเวลาหลังผสม 24 ชม. ดังแสดงตัวอย่างผลการวัดค่า ϵ_r' และ ϵ_r'' ของชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3% ในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Dielectric Constant และ Dielectric Loss Factor กับระยะเวลาหลังผสม สำหรับจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3%

เนื่องจากช่วงแรกๆ (โดยเฉพาะหลังผสมเสร็จทันที) จีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีลักษณะเป็นของผสมเหลวชั้นที่มีน้ำอิสระ (Free water) และโมโนเมอร์ (Monomer) จำนวนมากเป็นองค์ประกอบอยู่ภายใน [16] แต่เมื่อเวลาผ่านไป น้ำอิสระและโมโนเมอร์ดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยน้ำอิสระส่วนหนึ่งถูกตรึงไว้กับโครงสร้าง และโมโนเมอร์เกิดเป็นโพลิเมอร์ (Polymer) และจากข้อสนับสนุนความจริงที่ว่าของเหลว เช่น น้ำและโมโนเมอร์จะเป็นตัวดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าโพลิเมอร์ [10] ด้วยเหตุนี้ช่วงแรกๆ (0-3 ชม. หลังผสม) ซึ่งตัวอย่างมีน้ำอิสระและโมโนเมอร์ในปริมาณสูง จึงพบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่า ϵ_r' และ ϵ_r'' สูงกว่าในช่วงหลังๆ และเมื่อพิจารณาลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_r' และ ϵ_r'' พบว่าอัตราการลดลงของ ϵ_r' และ ϵ_r'' มีค่าสูงในช่วงแรกๆ หลังจากผสมเสร็จ แต่ในช่วงหลัง 3 ชม.

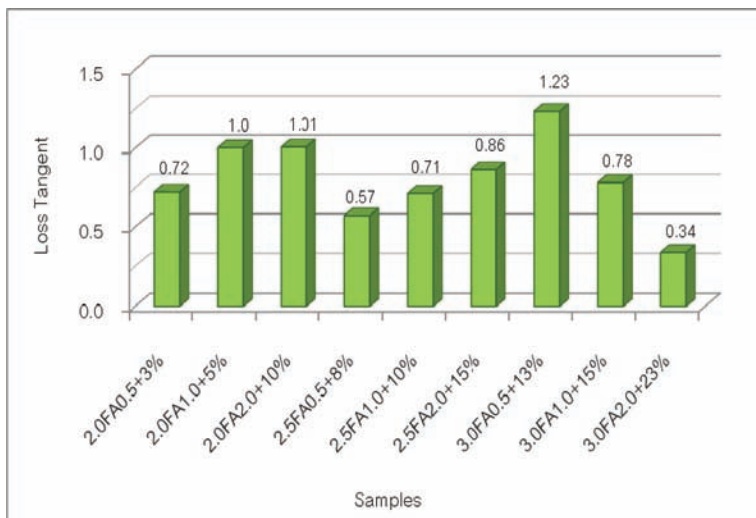
พบว่าอัตราการลดลงของ ϵ_r' และ ϵ_r'' มีค่าต่ำ เนื่องจากในระยะแรกของการกระตุ้นเข้าโดยสสารละลายต่าง จะเกิดเจลละลุมิโนซิลิเกตที่มีปริมาณ Al สูง [8] จึงทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรซ์เซชันเกิดสูงไปด้วย นั่นคือโครงสร้างและองค์ประกอบเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ส่วนในช่วงต่อมาอัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจาก $\tan \delta$ ได้จากค่า ϵ_r'' หารด้วยค่า ϵ_r' จึงพบว่าการเปลี่ยนแปลง $\tan \delta$ ของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ มีลักษณะเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่า ϵ_r' และ ϵ_r'' นั่นคือค่า $\tan \delta$ ของตัวอย่างมีค่าสูงหลังจากผสมเสร็จทันที และมีแนวโน้มลดลงเมื่อทิ้งตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานขึ้น (ยกเว้นชุดตัวอย่าง 2.0FA2.0+5%, 2.0FA2.0+10% และ 3.0FA2.0+23%) โดยทุกชุดตัวอย่างมีค่า $\tan \delta$ ต่ำสุดที่ระยะเวลาหลังผสม 24 ชม. ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\tan \delta$ กับ ระยะเวลาหลังผสมของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์

เนื่องจาก $\tan \delta$ เป็นอีกตัวแปรสำคัญที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก ขณะที่ดูดซับพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ดังนั้นจึงพิจารณาค่า $\tan \delta$ ของตัวอย่างเพื่อใช้ประกอบการศึกษา

สมบัติไดอิเล็กตริกของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์ และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงค่า $\tan \delta$ ที่สัดส่วนผสมต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับสัดส่วนผสมของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์



รูปที่ 7 ค่า $\tan \delta$ ของอีโพลีเมอร์มอร์ตาร์หลังจากผสมเสร็จทันที (ระยะเวลาหลังผสมเท่ากับ 0)

กล่าวคือเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอัตราส่วน NS/NH ที่มีต่อค่า $\tan \delta$ ของตัวอย่างหลังจากผสมเสร็จทันที ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วน FA/AS เท่ากับ 2.0 และ 2.5 มีค่า $\tan \delta$ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วน NS/NH เพิ่มขึ้น เช่น ชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3%, 2.0FA1.0+5% และ 2.0FA2.0+10% มีค่า $\tan \delta$ เท่ากับ 0.72, 1.0 และ 1.01 ตามลำดับ สอดคล้องกับค่า $\tan \delta$ ของสารละลายต่าง (ตารางที่ 8) ซึ่งพบว่า $\tan \delta$ ของสารละลาย Na_2SiO_3 มีค่ามากกว่า NaOH

เมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์ทุกสัดส่วนผสมพบว่ามีความสูงกว่าค่า $\tan \delta$ ของน้ำซึ่งเป็นวัสดุที่มีความเป็นไดอิเล็กตริกสูง ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์ได้ว่าจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์สามารถบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟได้

5.3.2 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีค่าอยู่ในช่วง 1.62-2.32 ก./ลบ.ซม. และเมื่อระยะเวลาหลังผสมเพิ่มขึ้น

พบว่าความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ตารางที่ 7) นั่นคือหลังจากผสมเสร็จ (ระยะเวลาหลังผสมเท่ากับ 0) จีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์มีความหนาแน่นต่ำสุด และมีค่าสูงที่สุดหลังจากทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชม. เช่น ความหนาแน่นของชุดตัวอย่าง 2.0FA0.5+3% ที่ระยะเวลาหลังผสม 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 และ 24 ชม. มีค่าเท่ากับ 1.86, 1.95, 2.08, 2.12, 2.19, 2.21, 2.27, 2.30 และ 2.32 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นระหว่างจีโอโพลีเมอร์มอร์ตาร์และซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ พบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์มีความหนาแน่น (ทุกช่วงเวลา) มากกว่าเล็กน้อย โดยความหนาแน่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาหลังผสม 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 และ 24 ชม. มีค่าเท่ากับ 2.48, 2.49, 2.49, 2.48, 2.48, 2.48, 2.48, 2.45 และ 2.43 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ สำหรับความหนาแน่นของซีเมนต์มอร์ตาร์ที่ระยะเวลาหลังผสมต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 2.43-2.49 ก./ลบ.ซม.

ตารางที่ 7 ความหนาแน่นของจีโอโพลีเมอร์และซีเมนต์มอร์ตาร์

ตัวอย่าง	ความหนาแน่น (ก./ลบ.ซม.)								
	ระยะเวลาหลังจากผสมเสร็จ (ชม.)								
	0	1	2	3	4	5	6	12	24
1) 2.0FA0.5+3%	1.86	1.95	2.08	2.12	2.19	2.21	2.27	2.30	2.32
2) 2.0FA1.0+5%	1.78	2.00	2.12	2.15	2.15	2.12	2.10	2.18	2.21
3) 2.0FA2.0+10%	1.62	1.93	2.02	1.99	1.96	2.01	2.09	2.15	2.19
4) 2.5FA0.5+8%	1.86	1.89	2.08	2.10	2.02	2.12	2.13	2.15	2.19
5) 2.5FA1.0+10%	1.74	1.79	1.98	1.98	1.97	2.00	2.03	2.09	2.14
6) 2.5FA2.0+15%	1.73	1.78	1.99	2.00	2.09	2.04	2.02	2.05	2.09
7) 3.0FA0.5+13%	1.95	2.06	2.16	2.18	2.19	2.22	2.23	2.26	2.29
8) 3.0FA1.0+15%	1.92	2.11	2.10	2.07	2.12	2.15	2.18	2.21	2.23
9) 3.0FA2.0+23%	1.81	2.11	2.09	2.06	2.05	2.04	2.02	2.10	2.15
0.5OPC	2.48	2.49	2.49	2.48	2.48	2.48	2.48	2.45	2.43

6. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบสามารถสรุปประเด็นที่สำคัญได้ดังนี้

6.1 การเติมน้ำเพิ่มลงไปในจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ทำให้ตัวอย่างมีคาร์บอนไฮดรอกไซด์อยู่ในมาตรฐาน ASTM C 109 กำหนด โดยปริมาณน้ำที่เติมมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีอัตราส่วน FA/AS และ NS/NH เพิ่มขึ้น

6.2 จีโอโพลิเมอร์เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวน้อยกว่าซีเมนต์เพสต์ ซึ่งระยะเวลาการก่อตัวลดลงเมื่อตัวอย่างมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ FA/AS และ NS/NH เพิ่มขึ้น

6.3 วัสดุส่วนผสมทุกชนิดในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถหาค่าสมบัติไดอิเล็กตริก (ϵ_r' , ϵ_r'' และ $\tan \delta$) ได้ โดยน้ำและวัสดุที่มีน้ำเป็นส่วนประกอบ (สารละลาย NaOH และ Na_2SiO_3) มีสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่าวัสดุที่เป็นของแข็ง (เถ้าลอยและทราย)

6.4 สมบัติไดอิเล็กตริกของจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์มีค่าลดลงเมื่อระยะเวลาหลังผสมเพิ่มขึ้น โดยสมบัติไดอิเล็กตริกของทุกสัดส่วนผสมมีค่าสูงที่สุดหลังจากผสมเสร็จทันที และจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์ที่มีของเหลว (น้ำเพิ่ม สารละลาย NaOH และ สารละลาย Na_2SiO_3) เป็นส่วนผสมในปริมาณสูงกว่าจะมีสมบัติไดอิเล็กตริกสูงกว่า

6.5 เมื่อพิจารณาสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุส่วนผสมและมอร์ตาร์ของจีโอโพลิเมอร์ทุกสัดส่วนผสม พบว่าจีโอโพลิเมอร์มอร์ตาร์สามารถบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟได้

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือสำหรับการทดสอบสมบัติไดอิเล็กตริก

8. เอกสารอ้างอิง

1. Malhotra, V.M., 2002, "Introduction: Sustainable Development and Concrete Technology", *ACI Concrete International*, Vol. 24, No. 7, p. 22.
2. Mehta, P.K., 2002, "Greening of The Concrete Industry for Sustainable Development", *ACI Concrete International*, Vol. 24, No. 7, pp. 23-28.

3. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., and van Deventer, J.S.J., 2007, "The Role of Inorganic Polymer Technology in The Development of 'Green Concrete'", *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, pp. 1590-1597.

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. Metaxas, A.C. and Meridith, R.J., 1983, "Industrial Microwave Heating", Peter Peregrinus, Ltd., London.

7. Rattanadecho, P., Suwannapum, N., Chatveera, B., Atong, D., and Makul N., 2008, "Development of Compressive Strength of Cement Paste under Accelerated Curing by Using a Continuous Microwave Thermal Processor", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 427, pp. 299-307.

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

9. ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, 2551, "พื้นฐานการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ", ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

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

11. Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., Mallicoat, S.W., Kriven, W.M., and van Deventer, J.S.J., 2005, "Understanding the Relationship between

Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties”, *Colloids and Surfaces*, Vol. 269, pp. 47-58.

12. Ikeda, K., 1998, “Consolidation of Mineral Powders by the Geopolymer Binder Technique for Materials Use”, *Journal of Mining and Materials Processing Institute of Japan*, Vol. 114, pp. 497-500.

13. Davidovits, J., 1991, “Geopolymer: Inorganics Polymeric New Materials”, *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, No. 8, pp. 1633-1656.

14. Provis, J.L. and van Deventer, J.S.J., 2007, “Geopolymerisation Kinetics 2: Reaction Kinetic

Modelling”, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, pp. 2318-2329.

15. Barbosa, V.F.F., MacKenzie, K.J.D., and 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.

16. Provis, J.L., Lukey, G.C., and 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.