

การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

Development of Compressive Strength of Concrete Using Microwave Energy with Continuous Belt System

ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ¹ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^{1*} วัชร เกาะแก้ว¹ ณรงค์ศักดิ์ มากุล² และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ²
¹ หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในทางวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ.คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

โทร 02-564-3001-9 โทรสาร 02-564-3010 *อีเมล ratphadu@engr.tu.ac.th

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ.คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120
โทร 02-564-3001-9 โทรสาร 02-564-3010

Nattawut Suwannapum¹, Phadungsak Rattanadecho^{1*}, Watchara Kohkeaw¹, Narongsak Makul² and Burachat Chatveera²
¹ Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus), Pathumthani
12120, Thailand, Tel: 0-2564-3001-9, Fax: 0-2564-3010, *E-mail: ratphadu@engr.tu.ac.th

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus), Pathumthani 12120,
Thailand, Tel: 0-2564-3001-9, Fax: 0-2564-3010

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง (โครงสร้างภายในระบบ ประกอบด้วย แมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ (ต่อ 1 ตัว) จำนวน 8 ตัว ติดตั้งกระจายภายในอุโมงค์ของระบบไมโครเวฟซึ่งมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 45 X 90 เซนติเมตร และมีความยาวอุโมงค์ประมาณ 3 เมตร สำหรับระบบสายพานลำเลียงทำการลำเลียงชิ้นงานจากบริเวณที่ใส่ชิ้นงานเข้าสู่อุโมงค์ด้วยอัตราเร็ว 0 - 0.4 เมตรต่อวินาที สำหรับบริเวณ รอยต่อระหว่างอุโมงค์และบริเวณที่ใส่ชิ้นงานและเก็บชิ้นงานจะมีการป้องกันการรั่วไหลของไมโครเวฟ ไม่ให้เกินมาตรฐานที่ 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร) โดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งผ่านการบ่มในน้ำ โดยตัวแปรที่ใช้คือ จำนวนแมกนีตรอน (กำลังวัตต์) ระยะเวลาในการบ่ม และสัดส่วนผสมของคอนกรีตซึ่งเกิดจากองค์ประกอบระหว่างซีเมนต์ น้ำ ทราย และหิน นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลของปริมาณอากาศ และสารผสมเพิ่มชนิดสารหน่วงการก่อตัว สำหรับสมบัติที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ปริมาณ

ความชื้น และการพัฒนากำลังอัด จากผลการศึกษาพบว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้นโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน

คำสำคัญ: กำลังอัด คอนกรีต พลังงานไมโครเวฟ ระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

Abstract

This paper presents the innovative curing of concrete using microwave energy with continuous belt system. (Its internal structure included 8 magnetrons, microwave generating sources at the frequency level of 2.45 Gigahertz (GHz) and power of 800 watts, built at the cavity wall inside the system. The microwave cavity was Rectangular shape with dimension of 0.45X0.9X3 m³ Continuous belt system could be adjusted speed between 0 – 0.4 m/min. The microwave leakage was controlled below the DHHS (US Department of Health and Human Services) standard of 5 mW/cm².) This study included the heat transfer analysis taking place during the curing of concrete with microwave energy and

the compressive strength development of concrete. The tested results were compared with those of the normal concrete that were cured in water and air. Internal structures of concrete were investigated for determining the relationship with mechanical properties after curing. The variables emphasized on the thermal influences from using microwave energy, properties of concrete, and time of curing. The tested results concluded that microwave energy can be accelerated the early compressive strength of concrete and did not affect strength at the age of 28 days.

Keywords: Compressive Strength, Concrete, Microwave Energy Continuous Belt System

1. บทนำ

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีตัวอย่างของการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการทางความร้อนหลายประเภท อาทิ เช่น การทำความร้อนและอบแห้งอาหาร (heating and drying) การเผา (firing) และอบแห้งเซรามิค การบ่ม (curing) คอนกรีต และกระบวนการคงรูป (vulcanization) ยางธรรมชาติ เป็นต้น พฤติกรรมทางความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟจะเกิดขึ้นในวัสดุที่อยู่ภายใต้ คลื่นไมโครเวฟเอง ซึ่งความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ (penetration depth) ในวัสดุจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการผลิตความร้อน การกระจายความร้อนของวัสดุจากพลังงานไมโครเวฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด อาทิเช่น โครงสร้างและรูปทรงของวัสดุ กำลังและการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟ (power level and microwave field distribution) รวมทั้งสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุ (dielectric properties) ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิง [1-17] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอกสารอ้างอิงของ Mujumdar [1] Metaxas [2] และ Schubert and Rogier [3] ซึ่งเป็นต้นแบบของงานวิจัยเทคนิคกระบวนการสร้างความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ

เทคนิคทางความร้อนในงานคอนกรีตเริ่มต้นขึ้นเมื่อ 20 ปีที่ผ่านมา และในปัจจุบันการใช้ความร้อนบ่มคอนกรีตเพื่อเร่งการพัฒนา กำลังรับแรงอัดพื้นฐานการนำความร้อนจากผิวหน้าวัสดุซึ่งรับความร้อนจากไอน้ำ เช่น การบ่มด้วยวิธีโอโตเคลฟ (autoclaves curing) โดยสาเหตุสำคัญซึ่งนำไปสู่การพัฒนากรรมวิธีการบ่มเร่งพัฒนากำลังของคอนกรีต คือ การเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์และเพิ่มศักยภาพทางด้านอุตสาหกรรมให้ทันกับความต้องการทางธุรกิจ สำหรับการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟในการบ่มเร่งพัฒนากำลังของคอนกรีตมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับงานวิจัยต้นแบบ [12-17] ซึ่งหลักการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟตั้งอยู่บนพื้นฐานของการกระจายพลังงานภายในที่เกิดจากการสั่นตัวของขั้ว (dipole) และประจุโมเลกุลวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric materials) ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า การใช้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยไมโครเวฟในการบ่มคอนกรีตนั้นครอบคลุมในช่วงของ

- การให้ความร้อนวัสดุในช่วงต้นหลังทำการผสม
- การบ่มในช่วงพัฒนาโครงสร้าง เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) ใน

ปูนซีเมนต์ได้ทำให้เกิดการพัฒนา กำลังรับแรงของคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

■ การบ่มหลังจากคอนกรีตพัฒนาโครงสร้างแล้ว

จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้นทำให้ทราบได้ว่าวัสดุที่อยู่ในสนามไมโครเวฟมีผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ยิ่งไปกว่านั้นการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟยังขึ้นอยู่กับขนาดเตา รูปทรงของวัสดุ และคุณสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุซึ่งความไม่สม่ำเสมอของสนามดังกล่าวส่งผลต่อการกระจายตัวทางความร้อนของวัสดุ เพื่อเป็นการป้องกันปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการทำให้สนามไมโครเวฟเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทำให้วัสดุที่อยู่ในสนามไมโครเวฟเกิดการเคลื่อนตัว (โดยใช้สายพานลำเลียงหรือถาดหมุน) [11]

สำหรับแนวทางการใช้ระบบสายพานลำเลียงร่วมกับพลังงานไมโครเวฟมีความเป็นไปได้สำหรับอุตสาหกรรมในอนาคตอันใกล้ (ทั้งในอุตสาหกรรมเซรามิค ยาง ไม้ อาหาร รวมทั้งคอนกรีต) เนื่องจากระบบดังกล่าวสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์มากในระยะเวลาที่รวดเร็ว ส่งผลให้ประหยัดพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายทางด้านแรงงานและระยะเวลา นอกจากนั้นยังอาจเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการอีกด้วย จากแนวคิดดังกล่าวนำไปสู่การออกแบบและพัฒนาระบบไมโครเวฟที่ใช้ร่วมกับระบบสายพานลำเลียงขึ้นใน R.C.M.E. เพื่อตอบปัญหาตรงจุดนี้

แม้ว่าจะมีการศึกษากระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ แต่งานส่วนใหญ่ใช้เตาอบไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน (domestic microwave) เป็นแหล่งพลังงาน และวัสดุที่อยู่ในเตาไม่มีการเคลื่อนตัว ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษาเหล่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกรรมวิธีการบ่มด้วยไมโครเวฟกับการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการบ่มคอนกรีตโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องออกมาอย่างเป็นระบบทั้งในส่วนของการทดลองและงานเชิงทฤษฎีหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟบ่มเร่งเพื่อพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต (ศึกษาต่อเนื่องจาก [10]) เพื่อลดระยะเวลา ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตในการศึกษาครั้งนี้จะบ่มคอนกรีตโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นใน R.C.M.E. (ประกอบด้วย แมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ (ต่อ 1 ตัว) จำนวน 8 ตัว หรือให้กำลังสูงสุด คือ 6.4 กิโลวัตต์) ผลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้จะนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขความบกพร่องของระบบ และพัฒนาไปสู่การออกแบบระบบให้เหมาะสมกับงานคอนกรีต รวมทั้งการใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กทริกด้วยระบบสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องต่อไปในอนาคต

2. พฤติกรรมระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กทริก

สำหรับกรรมวิธีการอบแห้ง (หรือการบ่มคอนกรีต) ในปัจจุบันจะอาศัยหลักการที่ผลต่างของอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการไล่ความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย กล่าวคือ

ใช้ระยะเวลาสั้น ประสิทธิภาพทางความร้อนจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไป มีปัญหาเรื่องคุณภาพของวัสดุเนื่องจากใช้ระยะเวลาสั้น (เช่น เรื่องสี คุณค่าทางโภชนาการในอุตสาหกรรมอาหาร) และความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิในวัสดุที่มีความหนาต่างๆ (ในงานคอนกรีต และยาง) ในทางตรงข้ามกับกรรมวิธีไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) และหาขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการทะลุทะลวงหรือความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (resonance) [13] ภายในวัสดุทำให้การกระจายของสนามไม่เป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) (พลังงานไมโครเวฟจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential decay) [2]) การสะท้อนในวัสดุที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความเข้มของสนามไมโครเวฟในวัสดุสูงขึ้น

ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้ระบบสายพานเพื่อความสะดวกและสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ทันตามความต้องการ ดังนั้นการใช้ไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองกับความต้องการทางอุตสาหกรรม นอกจากนั้นระบบไมโครเวฟถูกแบ่งออกมาเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ ระบบที่ใช้แมกนีตรอนกำลังสูง 1 ตัว และระบบที่ใช้แมกนีตรอนกำลังต่ำหลายตัว (ใช้ในงานวิจัยนี้) ซึ่งทั้ง 2 ระบบก็มีข้อได้เปรียบแตกต่างกันคือ แมกนีตรอนกำลังสูงมีอายุการใช้งานนาน ในขณะที่แมกนีตรอน กำลังต่ำมีราคาถูกกว่าและสามารถหาได้ง่ายกว่าเนื่องจากผลิตมาใช้ในครัวเรือนด้วย [3]

ในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้ค่ากำลังสองของความเข้มสนามแม่เหล็กในการประมาณค่าการดูดซับพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าการดูดซับหรือความร้อนเชิงปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q (W/m^3)) สามารถอธิบายเป็นสมการที่ (1) [10]

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

เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า
 f คือ ความถี่ (เฮิร์ต (GHz))
 ϵ_0 คือ สมบัติการซึมผ่านในที่ว่าง (8.86×10^{12} F/m)
 $\tan \delta$ คือ สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (ϵ_r''/ϵ_r')
 $\epsilon_r', \epsilon_r''$ คือ สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (ส่วนจริงกับจินตภาพ)
 E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุโดยปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟอีกสิ่งหนึ่งคือค่าความลึกทะลุทะลวงซึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุ รวมไปถึงสนามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะที่ความเข้มของพลังงานในวัสดุมีค่าเหลือร้อยละ 37 จากพลังงานที่ผิวหน้าวัสดุ [11]

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\frac{\epsilon_r' (\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1)}{2}}} \quad (2)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง

v คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความลึกทะลุทะลวงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นค่าความลึกทะลุทะลวงวัสดุจะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ได้รับคลื่นและอุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล แต่หาวัสดุมีความหนาแน่นค่าความลึกทะลุทะลวงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะไม่เป็นลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น

3. เปรียบวิธีทดลอง

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟใช้ร่วมกับสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องที่ทาง (R.C.M.E.) พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ซึ่งบริเวณรอบอุโมงค์จะติดตั้งแมกนีตรอนกำลังต่ำ (low power magnetron) ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) รั่วจำนวน 8 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) เพื่อกำเนิดคลื่นและป้อนคลื่นเพื่อกำเนิดความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ (รูปที่ 1) ซึ่งขนาดของเครื่องโดยประมาณคือ สูง 1.5 เมตร กว้าง 1 เมตร และยาว 5 เมตร มีความยาวอุโมงค์ประมาณ 3 เมตร อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้โดยประมาณคือ 230 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ) คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งรอบๆ บริเวณทำความร้อน การทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณปากทางเข้าระบบ (สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วสายพานได้ตามต้องการ) จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อน การปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกนีตรอนตามตำแหน่งที่ต้องการ บริเวณปากทางเข้าและออกกระบบไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถวัดได้ที่ตำแหน่ง ปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง ± 0.5 องศาเซลเซียส) วัสดุทดสอบเป็นคอนกรีตขนาด $5 \times 5 \times 10$ ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำประปา (ค่าความกรดต่าง (pH) เท่ากับ 7.0) หิน (หินกรวดล้างน้ำและอบแห้งเป็นเวลา 1 วัน) และทราย (ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วล้างน้ำและอบแห้งเป็นเวลา 1 วัน) จากนั้นทำการผสมตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM C 305 [18] สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ทำการทดสอบสามารถดูรายละเอียดได้ดังตารางที่ 1 หลังจากผสมจึงนำคอนกรีตใส่แบบหล่อและหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและปล่อยให้วัสดุ

แข็งตัวแล้วถอดแบบที่อายุ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง จากนั้นนำคอนกรีตไปแยกบ่มตามกรรมวิธีต่างๆ กัน คือ บ่มด้วยน้ำ อากาศ และไมโครเวฟ สำหรับการบ่มด้วยน้ำและอากาศจะควบคุมอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, และ 28 วันตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM C 39 [18] ส่วนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟทำโดยนำคอนกรีตที่ถอดแบบมาผ่านพลังงานไมโครเวฟในระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องตามระยะเวลาที่กำหนด (15 และ 30 นาที) โดยใช้แมกนีตรอนจำนวน 1 - 3 ตัว (กำลัง 800 -2400 วัตต์) เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไมโครเวฟ และหลังผ่านกระบวนการบ่มจึงนำไปบ่มต่อโดยบรรจุในถุงพลาสติกชนิดปิดผนึก และนำวัสดุไปทดสอบกำลังอัดเช่นเดียวกับการบ่มน้ำ และอากาศ

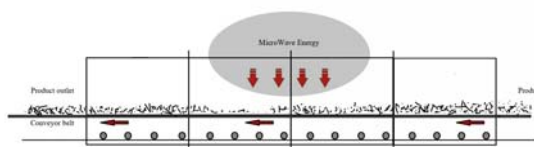
ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของคอนกรีต

สูตร	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	น้ำ (กก./ม. ³)	ทราย (กก./ม. ³)	สารหน่วงปฏิกิริยา (ซีซี)	หิน (กก./ม. ³)	ปริมาณอากาศร้อยละ
1	1620	486	0	0	0	1
2	1394	558	0	0	0	1
3	1223	612	0	0	0	1
4	540	265	1485	0	0	1
5	540	265	1485	1080	0	1
6	637	312	1274	0	0	1
7	611	300	1223	0	0	5
8	500	250	0	0	1575	1
9	500	250	693	0	866	1

หมายเหตุ สูตร 1, 2, 3 คือ ซีเมนต์โพสต์

สูตร 4, 5, 6, 7 คือ มอร์ตาร์

สูตร 8, 9 คือ คอนกรีต



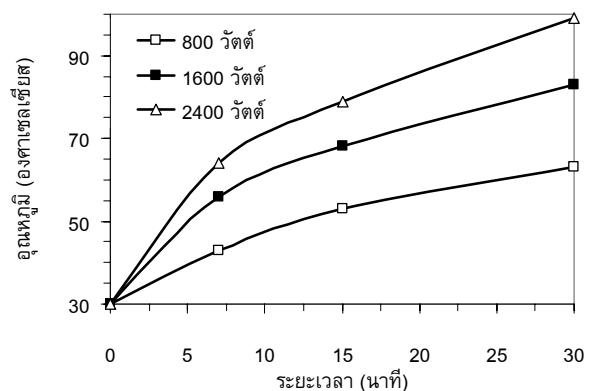
รูปที่ 1 ระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

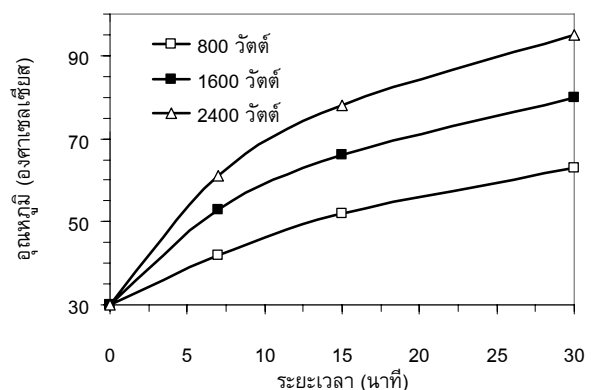
เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เวลาเปลี่ยนไปในสภาวะต่างๆ เมื่อนำคอนกรีตมาผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องพบว่า มีจุดที่น่าสนใจหลายประเด็นดังต่อไปนี้

กำลังไมโครเวฟที่สูงกว่าส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของคอนกรีตมากกว่าในทุกกรณี ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีในสมการที่ (1) ที่อธิบายว่าปริมาณค่าการดูดซับ (Q) แปรผันตามความเข้มสนามไฟฟ้ากำลังสอง ดังรูปที่ 2 และ 3 ซึ่งเป็นตัวอย่างในกรณีของซีเมนต์โพสต์ (คอนกรีตที่เกิดจากการผสมระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำ) และมอร์ตาร์ (คอนกรีตที่เกิดจากการผสมระหว่างปูนซีเมนต์ น้ำ และทราย) ตามลำดับ

รูปที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกรณีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ในกรณีศึกษาในสูตรที่ 1-3 พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อปูนซีเมนต์สูง (w/c = 0.5 ในสูตรที่ 3) จะมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่ำกว่าในกรณีที่อัตราส่วนต่ำ (w/c = 0.3 และ 0.4 ในสูตรที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) ซึ่งหากพิจารณาจากองค์ประกอบระหว่างผงปูนซีเมนต์ และน้ำ เมื่อผ่านกระบวนการไมโครเวฟ พบว่าปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ต่ำ (low lossy materials) ในขณะที่น้ำเป็นสิ่งที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเป็นวัสดุที่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี (high lossy materials) หากวิเคราะห์ในแง่มุมพื้นฐานโดยไม่สนใจปฏิกิริยาทางเคมี อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิควรจะมีความมากขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำในการผสมมากขึ้น (w/c= 0.5 ควรจะมีอุณหภูมิสูงกว่า w/c= 0.3 ที่เวลาเดียวกัน) แต่ในความเป็นจริง เมื่อผงปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีส่งผลให้สมบัติในการดูดซับของคอนกรีตเปลี่ยนไป และเป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกันพอดีมีค่าประมาณ 0.27 ดังนั้นปริมาณน้ำในการผสมที่เหลือจะเป็นปริมาณน้ำส่วนเกินจากปฏิกิริยา (ในทางปฏิบัติปริมาณน้ำส่วนเกินใช้เพื่อให้คอนกรีตสามารถไหลได้) และจากข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้น ทำให้คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับคลื่นและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสูงมาก และหากมีปริมาณน้ำส่วนเกินในโครงสร้างคอนกรีตมากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคลื่นและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนมีค่าต่ำลง

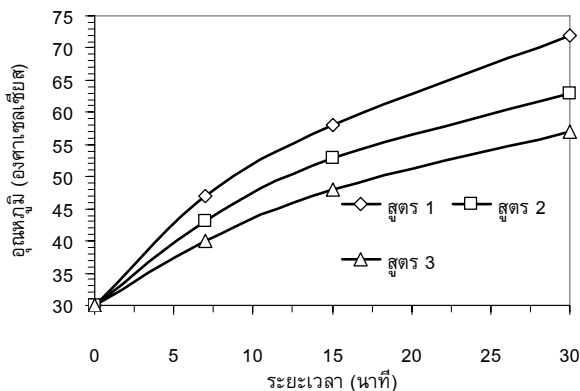


รูปที่ 2 อุณหภูมิซีเมนต์โพสต์ที่พลังงานไมโครเวฟต่างกัน (สูตร 2)

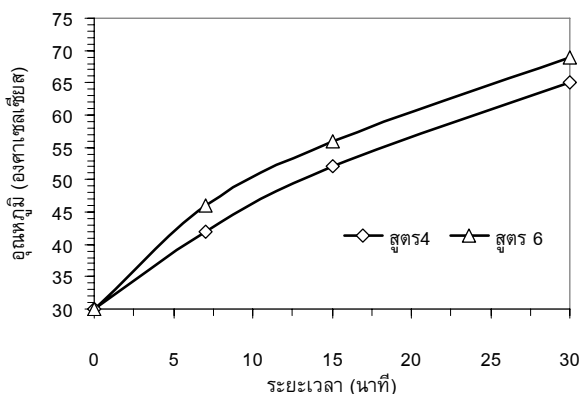


รูปที่ 3 อุณหภูมิมอร์ตาร์ที่พลังงานไมโครเวฟต่างกัน (สูตร 4)

ในกรณีที่เพิ่มทรายและหินลงในวัสดุคอนกรีตที่ทำการผสมก็ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเช่นกัน กล่าวคือ โดยปกติการเพิ่มทรายและหินในคอนกรีตนั้นใช้เพื่อเพิ่มปริมาณของคอนกรีต (เป็นการลดปริมาณผงปูนซีเมนต์ลง เนื่องจากปริมาณทรายและหินมีราคาถูก) และช่วยในการไหลตัวของคอนกรีต ซึ่งปริมาณของทรายและหินจะไม่เกิดปฏิกิริยากับน้ำและปูนซีเมนต์ ดังนั้นในเนื้อคอนกรีตจะมีวัสดุเหล่านี้แทรกอยู่ และส่งผลทางความร้อนต่อคอนกรีตดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 อุณหภูมิซีเมนต์เพสต์ที่ค่า w/c ต่างกัน (สูตร 1-3)
(กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

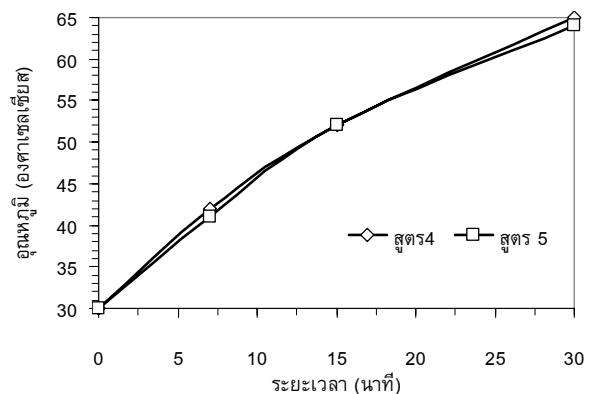


รูปที่ 5 อุณหภูมิ mortars ที่ค่า s/c ต่างกัน (สูตร 4, 6)
(กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

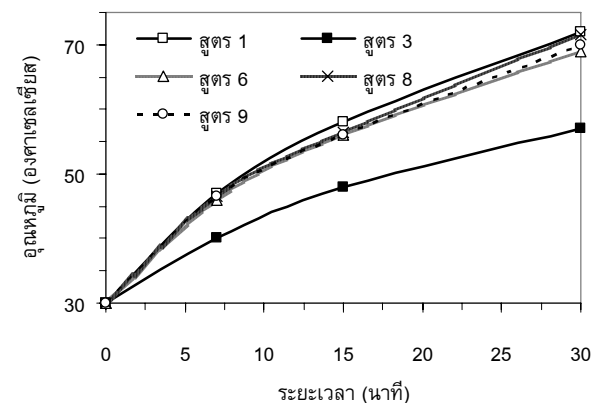
รูปที่ 5 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในกรณีของ mortars ที่อัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์ (s/c) มีปริมาณต่างกัน (s/c = 2.75 และ 2.0) พบว่าปริมาณทรายส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการ กล่าวคือ สูตร mortars ที่มีอัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์น้อยกว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงกว่าสูตร mortars ที่มีอัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก สารที่ทำปฏิกิริยาในกระบวนการคือปูนซีเมนต์และน้ำเท่านั้น และจากข้อมูลในกรณีซีเมนต์เพสต์พบว่ายังมีปริมาณซีเมนต์ในองค์ประกอบรวมมากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะยิ่งสูง ซึ่งสูตรที่ 6 มีปริมาณเนื้อซีเมนต์สูงกว่าสูตรที่ 4 นอกจากเหตุผลข้างต้นแล้วยังสามารถอธิบายได้อีกแง่มุมหนึ่ง นั่นคือสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุใน

วัสดุ mortars ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก คือ ส่วนที่ทำปฏิกิริยา (น้ำกับปูนซีเมนต์) และส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา (ทราย) โดยส่วนที่ทำปฏิกิริยา (ซีเมนต์เพสต์) จะมีส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาแทรกอยู่ ซึ่งทรายนั้นมีสมบัติไดอิเล็กทริกในการทำความร้อนในระดับหนึ่งแต่เมื่อเทียบกับน้ำและซีเมนต์เพสต์ยังมีสมบัติต่ำกว่า (จะศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต) ดังนั้นหากยังมีปริมาณทรายในองค์ประกอบมากสมบัติไดอิเล็กทริกโดยรวมของวัสดุที่มีผลต่อการเกิดความร้อนก็จะมีค่าลดลง

รูปที่ 6 เมื่อศึกษาถึงผลของการเติมสารหน่วงการก่อตัวของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ mortars พบว่า ผลที่ได้มีความแตกต่างกันน้อยมาก หรืออาจจะไม่แตกต่างเลยในบางกรณี ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณสารหน่วงการก่อตัวมีปริมาณสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับเนื้อ mortars



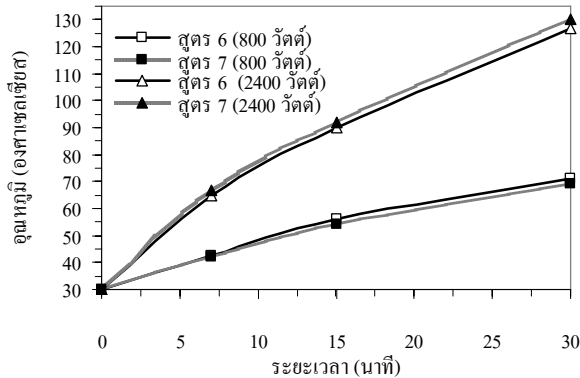
รูปที่ 6 อุณหภูมิ mortars ที่ค่า s/c เท่ากัน (สูตร 4, 5)
สูตร 5 เติมน้ำหน่วงการก่อตัว (retarder) (กำลัง 800 วัตต์)



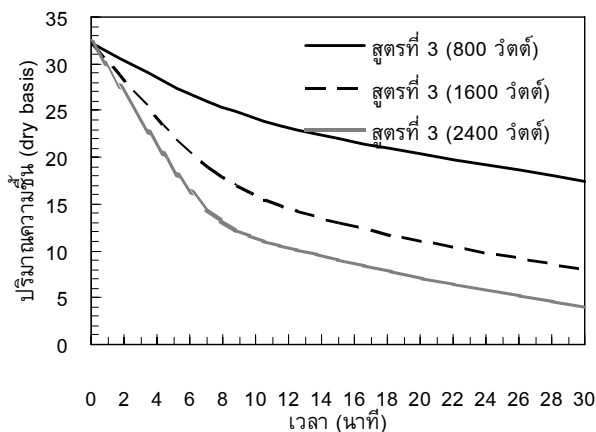
รูปที่ 7 อุณหภูมิคอนกรีต (สูตร 8, 9) เทียบกับ mortars (สูตร 6) และซีเมนต์เพสต์ (สูตร 1, 3) (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

และเมื่อศึกษาเพิ่มเติมในกรณีคอนกรีต (มีการผสมหินในโครงสร้างซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาเช่นเดียวกับทราย) พบว่าผลทางอุณหภูมิมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณี mortars นอกจากนั้นผลการทดสอบทางอุณหภูมิก่อนที่คอนกรีตผสมหินอย่างเดียวและผสมทรายและหินพบว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าสมบัติไดอิเล็กทริกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทรายและหินน่าจะมีค่าใกล้เคียงกัน (สำหรับสมบัติไดอิเล็กทริกจะศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต)

เมื่อศึกษาถึงปริมาณอากาศเทียบเท่าร้อยละในโครงสร้างต่อลักษณะอุณหภูมิในรูปที่ 8 พบว่ามีอิทธิพลน้อยมาก ซึ่งเป็นไปได้ว่าปริมาณอากาศเทียบเท่าร้อยละของอากาศในเนื้อโครงสร้างยังมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวโครงสร้างหลัก



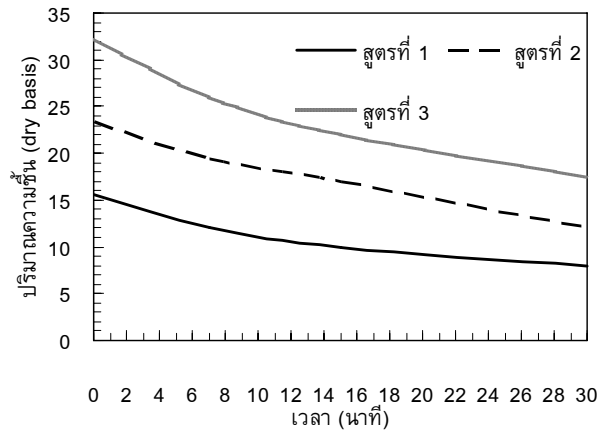
รูปที่ 8 อุณหภูมิมีอิทธิพลที่ปริมาณอากาศเทียบเท่าร้อยละเท่ากับ 1 (สูตร 6) และ 5 (สูตร 7) (กำลัง 800 และ 2400 วัตต์)



รูปที่ 9 ปริมาณความชื้นที่เวลาต่างๆ กัน ของคอนกรีตสูตรที่ 3 ที่พลังงานไมโครเวฟต่างกัน

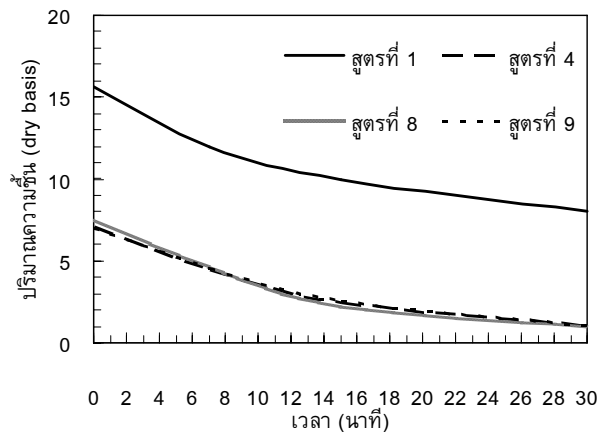
จากรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นในวัสดุ เมื่อนำคอนกรีตมาผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องพบว่ากำลังไมโครเวฟมีผลโดยตรงต่อปริมาณการไล่ความชื้นออกจากวัสดุ เนื่องจากเมื่อกำลังไมโครเวฟสูงจะส่งผลให้วัสดุได้อิเล็กตริกที่อยู่ภายใต้สภาวะไมโครเวฟผลิตความร้อนได้มากซึ่งเป็นไปตามกลไกในสมการที่ (1) นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นแบบเชิงปริมาตรซึ่งลักษณะการกระจายความร้อนขึ้นกับความลึกทะลุของของวัสดุในสมการที่ (2) โดยส่วนใหญ่วัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า หรือใกล้เคียงค่าความลึกทะลุทะลวง จะมีอุณหภูมิสูงสุดภายในวัสดุ) ส่งผลให้เกิดกลไกการเคลื่อนตัวของของไหลภายในโครงสร้างทั้งในส่วนของเหลว และก๊าซ ด้วยความดันคาพิลลารี และความดันก๊าซ ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ปั๊ม (pumping effect) (เป็นปรากฏการณ์ที่ของเหลวออกสู่ผิวหน้าวัสดุโดยไม่เปลี่ยนสถานะ)

และจากปรากฏการณ์ทั้งหมดส่งผลให้ปริมาณความชื้นในคอนกรีตลดลงอย่างรวดเร็ว และมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟสูงขึ้น



รูปที่ 10 ปริมาณความชื้นที่เวลาต่างๆ ของคอนกรีตที่มีสัดส่วน w/c ต่างกัน (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

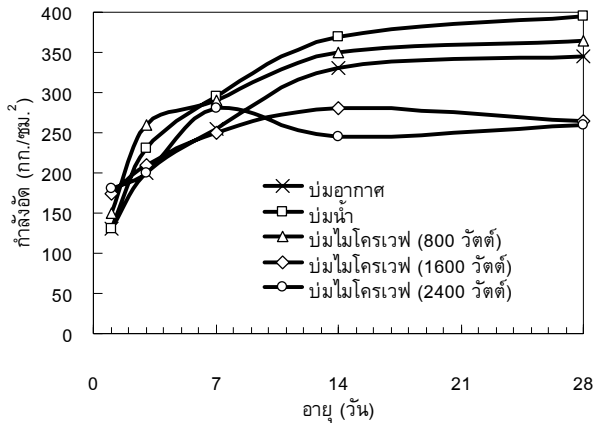
จากรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วน w/c ของคอนกรีต พบว่าค่า w/c สูงจะมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นสูงสุดเนื่องจากตอนผสมเริ่มต้นมีปริมาณสัดส่วนน้ำสูง และเมื่อนำมาผ่านกระบวนการไมโครเวฟพบว่าอัตราการไล่ความชื้นจะสูงเมื่อค่าสัดส่วน w/c ของคอนกรีตมีค่ามาก และในทุกกรณีปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น และอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นจะน้อยลงเมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น ซึ่งมีกลไกที่คล้ายคลึงกับกลไกการอบแห้งด้วยกรรมวิธีปกติ แต่ใช้เวลารวดเร็วกว่ามาก



รูปที่ 11 ปริมาณความชื้นของคอนกรีตชนิดต่างๆ (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

จากรูปที่ 11 แสดงถึงลักษณะปริมาณความชื้นของคอนกรีต กรณีต่างๆ (ซีเมนต์เพสต์ (สูตรที่ 1) มอร์ตาร์ (สูตรที่ 6) และคอนกรีต ((สูตรที่ 8 ผสมหินอย่างเตี้ย) (สูตรที่ 9 ผสมหินและทราย)) พบว่าลักษณะแนวโน้มมีความคล้ายคลึงสอดคล้องกันทุกกรณี นอกจากนั้นปริมาณความชื้นเริ่มต้นเกือบทุกกรณีมีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณีที่เป็น

ซีเมนต์เฟสท์ เนื่องจากปริมาณน้ำต่อมวลรวมเมื่อผสมมีค่ามาก ในขณะที่กรณีอื่นๆ มีค่าปริมาณน้ำต่อมวลรวมน้อยกว่ามากและมีค่าตอนผสมใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของคอนกรีตชนิดต่างๆ มีผลต่อลักษณะความชื้นค่อนข้างน้อยหากมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นใกล้เคียงกัน

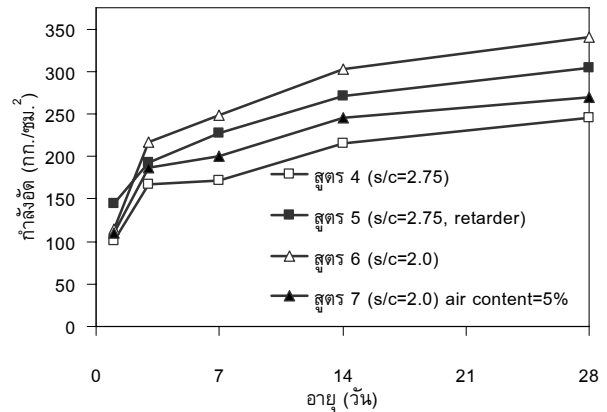


รูปที่ 12 กำลังอัดของคอนกรีตสูตรที่ 2 เมื่อผ่านการบ่มด้วยกรรมวิธีต่างๆ

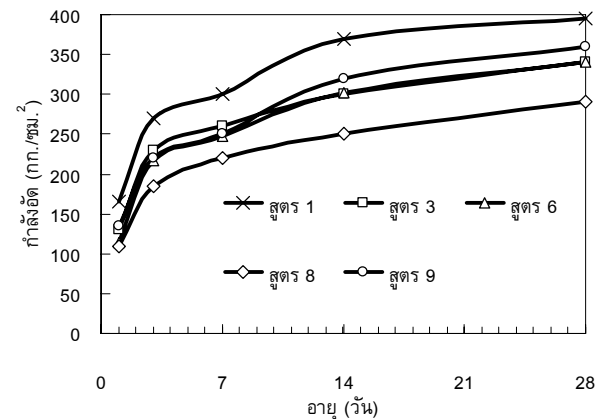
รูปที่ 12 เมื่อพิจารณากำลังวัสดุหลังจากผ่านกระบวนการบ่มด้วยกรรมวิธีต่างๆ พบว่าการบ่มน้ำสามารถพัฒนากำลังวัสดุได้ดีที่สุดที่ระยะเวลา 14 และ 28 วัน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีคอนกรีต สำหรับการบ่มด้วยไมโครเวฟพบว่าในกรณีกำลัง 800 วัตต์สามารถบ่มเร่งกำลังอัดคอนกรีตในช่วงต้นได้ดีที่สุด (1-7 วัน) และมีกำลังอัดสูงกว่าการบ่มด้วยอากาศที่เวลา 14 และ 28 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาใช้ในการช่วยพัฒนากำลังคอนกรีตได้ ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่ต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อพิจารณาถึงการเพิ่มกำลังไมโครเวฟพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้มีค่าไม่เสถียรและมีการพัฒนากำลังต่ำมากเมื่อผ่านไป 28 วัน ซึ่งไม่เหมาะกับการนำไปใช้งานจริงในทางวิศวกรรม ซึ่งเหตุผลในการวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วยปัจจัย 2 ส่วน คือ ปริมาณความชื้นในวัสดุน้อยจนไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันของวัสดุ (โดยปกติปริมาณความชื้นที่คงค้างในวัสดุหลังจากคอนกรีตพัฒนาโครงสร้างบางส่วนจะใช้ในการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันเพื่อพัฒนากำลังของคอนกรีตเอง) อีกส่วนหนึ่งคือ อุณหภูมิในการบ่มไมโครเวฟที่สูงเกินไปส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายระดับจุลภาคเสียหาย (เกิดรอยร้าวเล็กๆ ภายในโครงสร้าง[14]) หรือ Micro cracking อันเกิดจากการมีความร้อนสูงที่สูง (Over heating) ส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลง [10]

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่มีสัดส่วนผสมวัสดุอื่นๆ (ทราย และหิน) ต่างกันพบว่ายิ่งมีวัสดุผสมเพิ่มกำลังของคอนกรีตจะมีค่าต่ำลงดังตัวอย่างในรูปที่ 13 กรณีเปรียบเทียบมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วนผสม s/c=0.275 และ 0.20 ในสูตรที่ 4 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี (การพัฒนากำลังของวัสดุได้จากการทำปฏิกิริยาของน้ำและ

ปูนซีเมนต์) นอกจากนั้นเมื่อทำการใสสารหน่วงการก่อตัว พบว่าพลังงานไมโครเวฟไม่ส่งผลเสียต่อการพัฒนากำลัง (สารหน่วงการก่อตัวทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดช้าลงทำให้ปฏิกิริยามีความสมบูรณ์มากขึ้นส่งผลให้การพัฒนากำลังสูงขึ้นดังรูปที่ 13 กรณีเปรียบเทียบกับสูตรที่ 4 และ 5) และเมื่อวิเคราะห์ผลของปริมาณอากาศในโครงสร้างคอนกรีตพบว่าปริมาณอากาศมากกำลังคอนกรีตจะตกลง ซึ่งสอดคล้องกับการบ่มปกติ นั้นแสดงให้เห็นว่าการบ่มด้วยไมโครเวฟยังคงให้พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตสอดคล้องกับกรรมวิธีทั่วไป



รูปที่ 13 กำลังอัดของคอนกรีตสูตรที่ 4-7 เมื่อผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)



รูปที่ 14 กำลังอัดของคอนกรีตสูตรต่างๆ (ซีเมนต์เฟสท์ มอร์ตาร์ และคอนกรีต) เมื่อผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

รูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของซีเมนต์เฟสท์ (สูตรที่ 1) มีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี ในขณะที่ คอนกรีตสูตรที่ 8 (ผสมหินอย่างเดียว) มีกำลังต่ำสุดเนื่องจากการยึดเกาะทางโครงสร้างซีเมนต์ ไม่นิดนัก ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเช่นกัน ในขณะที่กรณีอื่นๆ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 2 กรณีข้างต้นซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต และจากผลดังกล่าวเป็นการยืนยันว่าผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มไมโครเวฟมีพฤติกรรมสอดคล้องกับการบ่มคอนกรีตด้วยกรรมวิธีปกติ

5. สรุปผลการศึกษา

พลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องสามารถนำมาประยุกต์ใช้บ่มคอนกรีตเพื่อเร่งกำลังอัดได้โดยสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

5.1 พลังงานไมโครเวฟจากระบบไมโครเวฟสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำคอนกรีตสามารถเร่งพัฒนากำลังอัดในช่วงระยะเวลาเริ่มต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพในกรณีที่ใช้พลังงานไมโครเวฟเหมาะสม นอกจากนั้นยังไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดในช่วงระยะเวลา 28 วัน

5.2 กำลังไมโครเวฟส่งผลโดยตรงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของคอนกรีต เนื่องจากกำลังไมโครเวฟส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการกำเนิดความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นเมื่อกำลังไมโครเวฟสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการดูดซับพลังงานและกำเนิดความร้อนของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้น และส่งผลโดยตรงที่ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว แต่พลังงานไมโครเวฟที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวอาจส่งผลลัพท์ที่ไม่ต้องการได้เช่น โครงสร้างเกิดรอยแตกร้าวจนทำให้กำลังอัดที่ได้น้อยลง หรือการเคลื่อนที่ออกของความชื้นที่มากเกินไปจนส่งผลให้ไม่มีปริมาณความชื้นมากพอต่อการพัฒนากำลังคอนกรีตในช่วงระยะเวลา 28 วัน

5.3 การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของคอนกรีต ทั้งปริมาณปูนซีเมนต์ ปริมาณน้ำ ปริมาณทราย และปริมาณหิน รวมไปถึงการเติมสารหน่วงปฏิกิริยาและปริมาณอากาศในคอนกรีตส่งผลโดยตรงต่อสมบัติไดอิเล็กตริก (จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) และสมบัติทางกลของคอนกรีต นอกจากนั้นยังส่งผลต่อโครงสร้างความพรุนและปริมาณความชื้นเริ่มต้นของคอนกรีตอีกด้วย

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตามสัญญาเลขที่ 106/2547

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mujumdar, A.S., 1995, "Handbook of Industrial Drying, 2nd Edition," Marcel Dekker, New York.
- [2] Metaxas, A.C., and Meridith, R.J., 1983, "Industrial Microwave Heating," Peter Peregrinus, Ltd., London.
- [3] Schubert, H., and Regier, M., 2005, "The Microwave Processing of Foods," Woodhead Publishing Limited and CRC Press, Cambridge.
- [4] Ratanadecho, P., Aoki, K., and Akahori, M., 2001(a), "Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material," Int. Commun. Heat Mass Trans, Vol. 28, pp. 605-616.
- [5] Wei, C.K., Davis, H.T., Davis, E.A., and Gordon, J., 1985, "Heat and Mass Transfer in Water-Laden Sand Stone," Microwave Heating, AIChE J., Vol. 31 (5), pp. 842-848.
- [6] Atong, D., and Clark, D.E., 2003, "The Effect of Reaction Parameters on Microwave Induced Combustion Synthesis of Al₂O₃TiC Composite Powders," Microwave and Radio Frequency Applications: American Ceramics Society, Westerville, Ohio, pp. 207-220.
- [7] Kriegsmann, G.A., 1992, "Thermal Runaway in Microwave Heated Ceramics: A One-Dimensional Model," J. Appl. Phys. Vol. 71(4), pp. 1960-1966.
- [8] Wang, J., and Schmutge, T., 1980, "An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soil as a Function of Water Content," IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. GE-18 (4), pp. 288-295.
- [9] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2002, "Influence of Irradiation Time, Particle Sizes and Initial Moisture Content During Microwave Drying of Multi-Layered Capillary Porous Materials," ASME J. Heat Transfer, Vol. 124 (1), pp. 151-161.
- [10] Ratanadecho, P., Suwannapum, N., Chatveera, B., Atong, D., and Makul, N., 2007 "Development of Compressive Strength of Cement Paste under Accelerated Curing by Using A Continuous Microwave Thermal Processor", Materials Science & Engineering (In Press)
- [11] Ratanadecho, P., Watanasungsit, A., and Atong, D., 2007, "Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace," ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering, Volume 129 (1).
- [12] Watson, A., 1968, "Curing of Concrete," in Microwave Power Engineering. Edited by E.C. Okress. Academic Press, New York.
- [13] Hutchison, J.T., Chang, H.M., Jennings, H.M. and Brodwin, M.E., 1991, "Thermal Acceleration of Portland Cement Mortars With Microwave Energy," Cement & Concrete Research, 21, 795-799.
- [14] Mak, S.L., Shapiro, O. and Son, T., 1998, "Accelerated Heating of Concrete With Microwave Curing," Proc. 4th CANMET/ACI/JCI Int. Conf. on Recent Advances in Concrete Technology, Tokoshima, Japan, pp. 531-42.
- [15] Leung, C.K. and Peeraphan, T., 1995, "Very High Early Strength of Microwave Cured Concrete," Cement & Concrete Research, 25[1], pp. 136-46.
- [16] Leung, C.K. and Peeraphan, T., 1995, "Microwave Curing of Portland Cement Concrete: Experimental Results and Feasibility for Practical Applications," Construction & Building Materials, 9[2], pp. 67-73.
- [17] Mak, S.L., Banks, R.W., Ritchie, D.J. & Shapiro, G., 2002, "Advances in microwave curing of concrete", presented to 4th World Congress on Microwave & Radio Frequency

Applications, Sydney, Australia, 22-26 September.

[18] American Society for Testing and Materials, 2006, Annual Book of ASTM Standard Vol. 4, No. 02, Philadelphia, PA, USA.

[19] Neville, A.M., 1996, "Properties of Concrete. Fourth Edition", London: Pitman Books Limited.