

การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้เตาชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง

Development of Compressive Strength of Cement Mortar under Curing with Microwave Energy by Using A Continuous Belt Furnace

บุรฉัตร ฉัตรวิระ^[1], ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^[2], ณรงค์ศักดิ์ มากกุล^[2], ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ^[2] และ ดวงเดือน อาจองศ์^[3]

^[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต) อ. คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

^[2] หน่วยงานวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12120

^[3] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย คลองหลวง ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์: 0-2564-3001-9 ต่อ 3105 โทรสาร: 0-2564-3010 E-mail: ^[1]cburacha@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นงานนำเสนอการบ่มมอร์ตาร์ซีเมนต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง (Continuous Belt Furnace) ซึ่งมีโครงสร้างภายในตัวเครื่องประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ ต่อแมกนีตรอน 1 ตัว ติดตั้งจำนวน 8 ตัว กระจายไว้ที่ผนังด้านในของเตาระหว่างปลายทั้งสองข้างซึ่งเป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีพื้นที่หน้าตัดขนาด 45×90 เซนติเมตร และมีความยาวเท่ากับ 270 เซนติเมตร โดยมีอัตราเร็วของสายพานลำเลียงสามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 40 เซนติเมตรต่อนาที โดยเน้นการวิเคราะห์ผ่านการทดลองและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการบ่มและความสอดคล้องกับการพัฒนากำลังอัดในช่วงต้นของมอร์ตาร์เมื่อผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟและเปรียบเทียบกับกำลังอัดของมอร์ตาร์ซึ่งทำการบ่มในน้ำ โดยตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาคือ สัดส่วนของมวลรวมละเอียด (ทรายแม่น้ำ) ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (S/C) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 2.0 และ 2.75 และมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ที่ค่าการไหลแก่เท่ากับร้อยละ 110 ± 5 และปริมาณอากาศที่ร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร และสารผสมเพิ่มประเภทหน่วงการก่อตัว (Retarder) สำหรับตัวแปรด้านไมโครเวฟได้แก่ จำนวนแมกนีตรอน (กำลังวัตต์) และระยะเวลาในการบ่มมอร์ตาร์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ นอกจากนั้นคุณสมบัติที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้น และการพัฒนากำลังอัด จากผลการศึกษาพบว่า การใช้พลังงานไมโครเวฟที่ กำลังขนาด 800 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที สามารถช่วยเร่งกำลังอัดในช่วงต้นของคอนกรีตโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ในขณะที่การใช้กำลัง 2400 วัตต์ มีผลทำให้กำลังอัดทั้งช่วงต้นและปลายลดลง เนื่องจากการให้ความร้อนที่สูงจนเกินไป (Over heating) จนทำให้เกิดการแตกร้าวระดับจุลภาค (Micro-cracking) ในเนื้อมอร์ตาร์

Abstract

This paper presents a curing method of cement mortar with microwave energy by using a continuous belt furnace, which consists of magnetron to generate microwave in the frequency range of 2.45 ± 0.05 GHz and power limit of one magnetron equals 800 watts. There are 8 magnetrons distributive installed distributively both ends and inner wall of furnace. The oven was rectangular in shape with a size of 45×90 cm. and 270 cm. long. The velocity of belt can be adjusted from 0 to 0.40 m/s. The analyses emphasized on the heat and mass transfer in mortar during curing with microwave energy including early aged compressive strength of mortar comparing between mortars cured with microwave energy and water cured. The parametric variables were the ratios of fine aggregate (river sand)-to-Portland cement Type I (S/C) (2.0 and 2.75), water-to-cement ratio (W/C) based on water requirement for a constant flow of 110 ± 5 %, air content of 1 % by volume, and chemical admixture as a retarder. For microwave parameters, number of magnetron (as power transmitted) and time of microwave application were studied. The test properties were temperature rise, moisture content, and compressive strength development. From the test results, it was found that the application of microwave at power of 800 watts for 30 minutes can accelerate the early compressive strength of mortar without affecting the compressive strength of mortar at the age of 28 days, whereas the microwave at power of 2400 watts leads to a decrease in the early and long-term compressive strength due to over heating until micro-cracking in mortar took place.

1. บทนำ

ในหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้มีตัวอย่างของการประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการทางความร้อนหลายประเภท อาทิเช่น การทำความร้อนและอบแห้งอาหาร (Heating and drying) การเผา (Firing) และอบแห้งเซรามิก การบ่ม (Curing) คอนกรีต และกระบวนการคงรูป (Vulcanization) ยางธรรมชาติ เป็นต้น พฤติกรรมทางด้านความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟจะเกิดขึ้นในวัสดุไดอิเล็กตริกที่ภายใต้คลื่นไมโครเวฟจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ (Penetration depth, D_p) ในวัสดุจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการผลิตความร้อน การกระจายความร้อนของวัสดุจากพลังงานไมโครเวฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด อาทิเช่น โครงสร้างและรูปทรงของวัสดุ กำลังและการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟ (Power level and microwave field distribution) รวมทั้งสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (dielectric properties) ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิง [1-17] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอกสารอ้างอิงของ Mujumdar [1] Metaxas [2] และ Schubert and Rogier [3] ซึ่งเป็นต้นแบบของงานวิจัยเทคนิคกระบวนการสร้างความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ

เทคนิคทางความร้อนในงานคอนกรีตเริ่มต้นขึ้นเมื่อ 20 ปี (ค.ศ. 1968) ที่ผ่านมามีความแตกต่างจากในปัจจุบันที่ใช้ความร้อนบ่มคอนกรีตเพื่อเร่งการพัฒนาที่กำลังรับแรงในช่วงต้นอาศัยพื้นฐานการนำความร้อนจากผิวหน้าคอนกรีตซึ่งรับความร้อนจากไอน้ำและ/หรือความดัน เช่น การบ่มด้วยวิธีออโตคลีฟ (Autoclave curing) เพื่อเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันและเปลี่ยนการจัดเรียงโครงสร้างบางส่วนในส่วนที่ความร้อนสามารถถ่ายเทเข้าไปได้ แต่กระนั้น จะพบว่าคอนกรีตมีการนำความร้อนที่ต่ำมากจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบ่มลดลง ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการพัฒนากรรมวิธีการบ่มเร่งพัฒนาที่กำลังของที่มีเพิ่มประสิทธิภาพสูงและเพิ่มศักยภาพทางด้านอุตสาหกรรมให้เท่าทันกับความต้องการทางธุรกิจซึ่งอาศัยหลักการของการเกิดความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) หรือการเกิดความร้อนจากภายในและร้อนทั่วถึงทั้งเนื้อของวัสดุ

สำหรับการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟในการบ่มเร่งพัฒนาที่กำลังของคอนกรีตมีศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับงานวิจัยต้นแบบ [12-17] ซึ่งหลักการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟตั้งอยู่บนพื้นฐานของการกระจายพลังงานภายในที่เกิดจากการสั่นตัวของขั้วและประจุในโมเลกุลภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การใช้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยไมโครเวฟในการบ่มคอนกรีตนั้นครอบคลุมในช่วงของ

- การให้ความร้อนวัสดุในช่วงต้นหลังทำการผสมเพื่อกำจัดน้ำส่วนเกิน (Excessive water)
- การบ่มในช่วงพัฒนาโครงสร้าง เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ใน

ปูนซีเมนต์ได้ทำให้เกิดการพัฒนาที่กำลังรับแรงของคอนกรีตอย่างรวดเร็ว

- การบ่มหลังจากคอนกรีตพัฒนาโครงสร้างแล้วในงานการกระเทาะสารปนเปื้อนที่ผิวคอนกรีต

จากงานวิจัยที่กล่าวข้างต้น [9-11] ทำให้ทราบว่าวัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่ภายในสนามไฟฟ้าที่มาพร้อมกับคลื่นไมโครเวฟมีการดูดซับพลังงานไมโครเวฟ ยิ่งไปกว่านั้นการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟยังขึ้นอยู่กับขนาดเตา รูปทรงของวัสดุ และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุซึ่งความไม่สม่ำเสมอของสนามดังกล่าวส่งผลต่อการกระจายตัวของความร้อนของวัสดุ การป้องกันปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการทำให้สนามไมโครเวฟเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทำให้วัสดุที่อยู่ในสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนตัว (โดยใช้สายพานลำเลียงหรือถาดหมุน) [11]

สำหรับเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องมีความเป็นไปได้สำหรับอุตสาหกรรมการผลิตคอนกรีตในอนาคตอันใกล้ เนื่องจากเตาชนิดดังกล่าว สามารถประหยัดพลังงาน ลดค่าใช้จ่ายทางด้านแรงงานและระยะเวลา พร้อมทั้งเพิ่มคุณภาพผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมเซรามิกและยาง และกรรมวิธีการบ่มเร่งพัฒนาที่กำลังของคอนกรีตด้วยความร้อนใช้พลังงานและเวลาอย่างมาก ซึ่งเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นโดยหน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (R.C.M.E.) สามารถตอบปัญหาดังกล่าวนี้ได้

แม้ว่าจะมีการศึกษากระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ แต่งานส่วนใหญ่ใช้เตาอบไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน (Domestic microwave) เป็นแหล่งพลังงาน และวัสดุที่อยู่ในเตาไม่มีการเคลื่อนตัว ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษาเหล่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกรรมวิธีการบ่มด้วยไมโครเวฟกับการพัฒนาที่กำลังของมอร์ตาร์ที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการบ่มมอร์ตาร์โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องออกมาอย่างเป็นทางการเป็นระบบทั้งในส่วนของงานทดลองและงานเชิงทฤษฎีหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟบ่มเร่งเพื่อพัฒนาที่กำลังอัดของมอร์ตาร์ (ศึกษาต่อเนื่องจาก [10]) เพื่อลดระยะเวลา ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการผลิตในการศึกษารังนี้จะมีมอร์ตาร์โดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นใน R.C.M.E. (ประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิรต์ (GHz) ขนาด 800 วัตต์ (ต่อ 1 ตัว) จำนวน 8 ตัว หรือให้กำลังสูงสุด คือ 6400 วัตต์) ผลที่ได้จากงานวิจัยชิ้นนี้จะนำไปปรับปรุงแก้ไขระบบและพัฒนาไปสู่การออกแบบให้เหมาะสมกับงานมอร์ตาร์รวมทั้งการใช้พลังงานไมโครเวฟในกระบวนการทำความร้อนวัสดุไดอิเล็กตริกด้วยระบบสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องในอนาคต

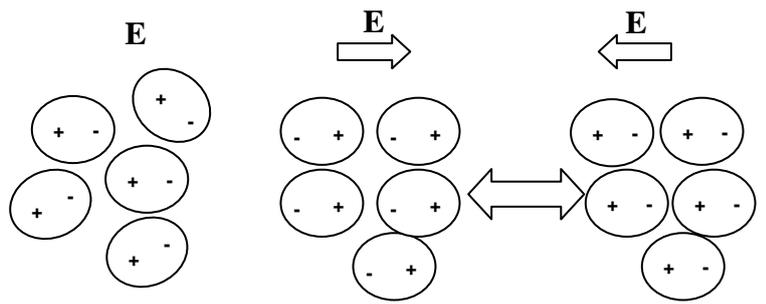
2. พฤติกรรมระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริก

การใช้ความร้อนในปัจจุบันจะอาศัยหลักการที่ผลต่างของอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการไล่ความชื้นที่ผิวหน้าของวัสดุ แต่วิธีการดังกล่าวมีข้อเสีย กล่าวคือใช้ระยะเวลาในการประสิทธิภาพทางความร้อนจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะเวลาเปลี่ยนไป มีปัญหาเรื่องคุณภาพของวัสดุเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการ (เช่น เรื่องสี คุณค่าทางโภชนาการในอุตสาหกรรมอาหาร) และความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิในวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก (ในงานคอนกรีต และยาง) ในทางตรงข้ามกับกรรมวิธีไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) และหากขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความสามารถในการทะลุทะลวงหรือความลึกทะลุทะลวง (Penetration depth) จะเกิดปรากฏการณ์การสั่นพ้องของคลื่น (Resonance) [13] ภายในวัสดุทำให้การกระจายของสนามไมโครเวฟเป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) (พลังงานไมโครเวฟจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential decay) [2] การสั่นพ้องในวัสดุที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าในวัสดุสูงขึ้น

ในงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จำเป็นต้องใช้ระบบสายพานเพื่อความสะดวกและสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ทันตามความต้องการ ดังนั้นเตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองกับความต้องการทางอุตสาหกรรม นอกจากนี้ระบบไมโครเวฟถูกแบ่งออกมาเป็น 2 ระบบใหญ่ๆ คือ ระบบที่ใช้แมกนีตรอนกำลังสูง 1 ตัว และระบบที่ใช้แมกนีตรอนกำลังต่ำหลายตัว (ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้) ซึ่งทั้ง 2 ระบบก็มีข้อเด่น-ข้อด้อยแตกต่างกันคือ แมกนีตรอนกำลังสูงมีอายุการใช้งานนาน ในขณะที่แมกนีตรอนกำลังต่ำมีราคาถูกกว่าและสามารถหาได้ง่ายกว่า เนื่องจากผลัดมาใช้ในครัวเรือนด้วย [3]

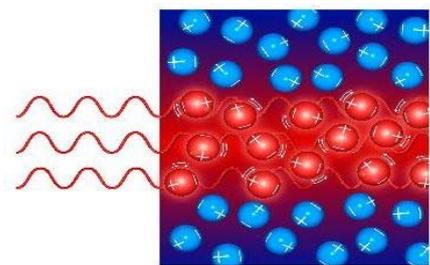
กลไกการทำความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟเกิดขึ้นเมื่อวัสดุที่มีความสมบัติเป็นไดอิเล็กตริก (มีความเป็นฉนวนทางไฟฟ้า) ยกตัวอย่างเช่น ไม้ กระดาษ เส้นใย ยาง และพลาสติก อยู่ภายใต้สภาวะการกระทำเนื่องจากแรงสนามไฟฟ้า (E) ทำให้โมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกมีการหมุนและเคลื่อนที่ทางด้านข้างของนิวเคลียสตามจำนวนความถี่ของคลื่นแม่เหล็กที่กระทำนั้นล้านครั้งต่อวินาทีเพื่อที่เปลี่ยนแปลงการหักเหของขั้วตามสนามที่กระทำทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ กล่าวคือ เมื่อมีสนามไฟฟ้ามากระทำที่ขั้วดังแสดงในรูปที่ 1 จะทำให้เกิดการหมุนหรือการบิดตามแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำ ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งโดยปกติภายในวัสดุที่มีความสมบัติเป็นไดอิเล็กตริกจะมีความเป็นกลางทางไฟฟ้าอันเนื่องมาจากจำนวนประจุบวกและลบมีปริมาณเท่ากัน นอกจากนั้นแรงยึดเหนี่ยวประจุยังมีมากกว่าจนไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron) เคลื่อนที่ได้ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้ามากระทำเป็นผลให้ด้านหนึ่งของโมเลกุลมีประจุบวกมารวมกันและขณะที่อีกด้านมีประจุลบมารวมกันอย่างหนาแน่นจึงเสมือนมีการแยกขั้วกันภายในโมเลกุลวัสดุ การหมุนของขั้วทำให้เกิดแรงเสียดทานนั่นหมายถึงอิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นดังนั้นเพื่อเป็นลด

สภาวะกระตุ้นดังกล่าวซึ่งมีความไม่เสถียรเชิงโมเลกุลจึงทำให้เกิดการปล่อยพลังงานในรูปความร้อน นอกจากนั้นการหมุนของขั้วจะทำให้เกิดความร้อนเชิงจลน์ศาสตร์เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3 อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามไฟฟ้าตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงจะพบว่ากลไกการส่งถ่ายพลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ พลังงานจากสนามไฟฟ้าที่ถูกดูดซับต่อรอบการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กแสดงให้เห็นพฤติกรรมสั่นพ้อง (Resonance) กับความถี่ด้วยจุดสูงสุดเมื่อความถี่ของสนามพลังที่ใส่เข้าไปเท่ากับความถี่ Relaxation



รูปที่ 1 การกระจายของประจุไดอิเล็กตริก

รูปที่ 2 การหมุนในวัสดุหรือการบิดตามแรงของสนามไฟฟ้าที่กระทำ



รูปที่ 3 การกระจายความร้อน

ในการวิเคราะห์ความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้ค่ากำลังสองของความเข้มสนามแม่เหล็กในการประมาณค่าการดูดซับพลังงาน (Density of microwave power absorbed, Q (W/m^3)) ในวัสดุไดอิเล็กตริกสามารถอธิบายตามสมการที่ (1) [10]

$$Q = s |E|^2 = 2p f e_0 e_r (\tan \delta) E^2 \tag{1}$$

- เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า (S/m)
- f คือ ความถี่ (เฮิร์ต (Hz))
- ϵ_0 คือ ค่าคุณสมบัติการซึมผ่านในที่ว่าง ($8.854(10^{-12})$ F/m)
- $\tan \delta$ คือ สัมประสิทธิ์ทังเจนแทนเจนท์ (ϵ''/ϵ')
- ϵ', ϵ'' คือ คุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (ส่วนจริงกับจินตภาพ)
- E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อค่าการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุ โดยปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟอีกสิ่งหนึ่งคือ ค่าความลึกทะลุทะลวง ซึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะที่ความเข้มของพลังงานในวัสดุมีค่าเหลือร้อยละ 37 จากพลังงานที่ตกกระทบผิวหน้าวัสดุ [11]

$$D_p = \frac{1}{\frac{2_p f}{u} \sqrt{\frac{e'_r \sqrt{1 + (\tan d)^2} - 1}{2}}} \quad (2)$$

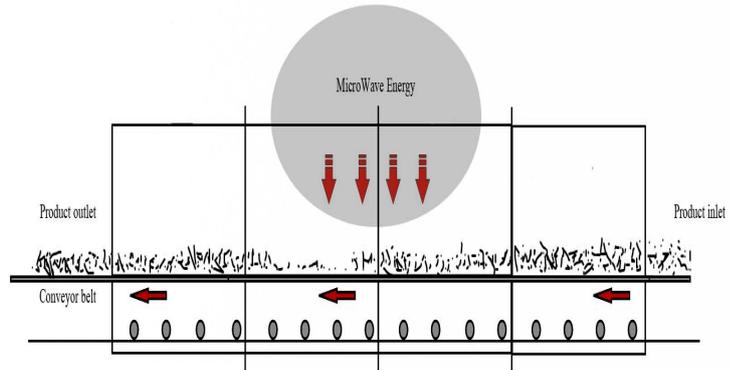
เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง
 u คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

ค่าความลึกทะลุทะลวงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นค่าความลึกทะลุทะลวง วัสดุจะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณผิวหน้าวัสดุที่ได้รับคลื่นและอุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล แต่หากวัสดุมีความหนาน้อยกว่าค่าความลึกทะลุทะลวงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะไม่เป็นลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น

3. ระเบียบวิธีวิจัย

สำหรับระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟใช้ร่วมกับสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องที่ทาง R.C.M.E. พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular cavity) ซึ่งบริเวณรอบอุโมงค์จะทำการติดตั้งแมกนีตรอนกำลังต่ำ (Low power magnetron ความถี่ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต (GHz) ไว้จำนวน 8 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) เพื่อกำเนิดคลื่นและป้อนคลื่นเพื่อกำเนิดความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ (รูปที่ 4) ซึ่งขนาดของเครื่องโดยประมาณคือ สูง 0.45 เมตร กว้าง 0.90 เมตร และยาว 2.7 เมตร อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้โดยประมาณคือ 230 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ) คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดตั้งรอบๆ บริเวณทำความร้อน การทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณปากทางเข้าระบบ (สายพานสามารถปรับเปลี่ยนความเร็วได้ตามต้องการ) จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อน การปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิดแมกนีตรอนตามตำแหน่งที่ต้องการบริเวณปากทางเข้าและออกกระบวนไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้

เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร (mW/cm²) สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถวัดได้ที่ตำแหน่ง ปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟโดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง ±0.5 องศาเซลเซียส) วัสดุทดสอบเป็นมอร์ตาร์ขนาด 0.05 x 0.05 x 0.10 ลูกบาศก์เมตร โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำประปา (ค่าความกรดค่า (pH) เท่ากับ 7.0) และทราย (ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วล้างน้ำและอบแห้งเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้ได้ทรายที่เป็นไปตามข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM C 33 [18] และอยู่ในสภาวะแห้ง (Dry basis)) จากนั้นทำการผสมตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM C 305 [19] สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ทำการทดสอบสามารถดูรายละเอียดได้ดังตารางที่ 1 โดยสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ใช้ตามมาตรฐานค่าการไหลแม่ (Flow value) [20] สัดส่วนของมวลรวมละเอียด (ทราย) ต่อปูนซีเมนต์ (S/C) โดยน้ำหนัก เท่ากับ 2.0 และ 2.75 และปริมาณอากาศเท่ากับร้อยละ 1.0 โดยปริมาตร อีกทั้งศึกษาผลกระทบจากการใช้สารผสมเพิ่มชนิดสารหน่วงการก่อตัว (Retarder) ในสัดส่วน 200 ซีซี ต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม หลังจากผสมจึงนำมอร์ตาร์ใส่แบบหล่อและหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและปล่อยให้วัสดุแข็งตัวแล้วถอดแบบที่อายุ 23½ ± ½ ชั่วโมง จากนั้นนำมอร์ตาร์ไปแยกบ่มตามกรรมวิธีต่างๆ กัน คือ บ่มด้วยน้ำและบ่มด้วยไมโครเวฟ สำหรับการบ่มด้วยน้ำจะควบคุมอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14, และ 28 วัน ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM C 39 [21] ส่วนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟทำโดยนำมอร์ตาร์ที่ถอดแบบมาผ่านเตาไมโครเวฟสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องตามระยะเวลาที่กำหนด (15 และ 30 นาที) โดยใช้แมกนีตรอนจำนวน 1 และ 3 ตัว (กำลังใช้งานคือ 800 และ 2400 วัตต์) เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไมโครเวฟ และหลังผ่านกระบวนการบ่มจึงนำไปบ่มต่อโดยบรรจุในถุงพลาสติกชนิดปิดผนึกและนำวัสดุไปทดสอบกำลังอัดเช่นเดียวกับการบ่มน้ำ นอกจากนั้นการวัดค่าความชื้น (Moisture content) ทำโดยการอบแห้งตัวอย่างที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และคำนวณค่าความชื้นบนพื้นฐานของสภาวะแห้ง (Dry basis) จากนั้นน้ำหนักน้ำที่ระเหยออกต่อน้ำหนักตัวอย่างในสภาวะแห้ง



รูปที่ 4 ระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

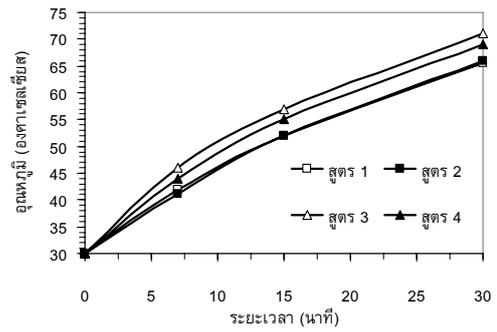
ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของมอร์ตาร์ที่ใช้ในการทดสอบ

| สูตร | ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³) | น้ำ (กก./ม. ³) | ทราย (กก./ม. ³) | สารหน่วง ปฏิกิริยา (ซีซี) |
|------|--------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 540 | 265 | 1485 | 0 |
| 2 | 540 | 265 | 1485 | 1080 |
| 3 | 637 | 312 | 1274 | 0 |
| 4 | 637 | 312 | 1274 | 1274 |

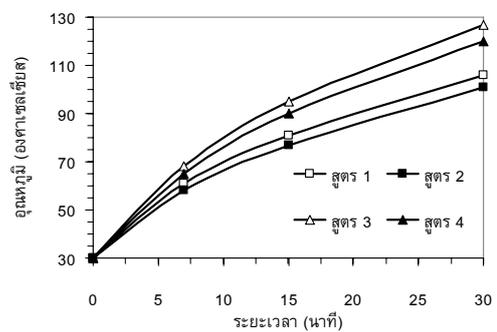
4. ผลการทดสอบและการวิจารณ์ผล

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5, 6 และ 7 พบว่าเมื่อนำมอร์ตาร์มาผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องทำให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีการเปลี่ยนแปลง โดยการใช้กำลังของไมโครเวฟที่ 2400 วัตต์ บ่มมอร์ตาร์ทำให้อุณหภูมิของมอร์ตาร์เพิ่มขึ้นในอัตราเร็วกว่ากำลังที่ 800 วัตต์ ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีในสมการที่ (1) ที่อธิบายว่าปริมาณค่าการดูดซับ (Q) แปรผันตามความเข้มข้นสนามไฟฟ้ากำลังสอง นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบวิเคราะห์ร่วมกับความชื้นสามารถอธิบายได้ว่าไมโครเวฟที่ กำลัง 2400 วัตต์ มีผลต่อเนื่องให้เกิดปรากฏการณ์สั่นพ้องของคลื่น (Resonance) เนื่องจากความชื้นภายในมอร์ตาร์ลดลงมากกว่าการใช้กำลังที่ 800 วัตต์ และส่งผลต่อค่าไดอิเล็กตริก (โดยปกติคุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกจะแปรผันกับอุณหภูมิและระดับความชื้น (Degree of saturation)) โดยรวมจึงทำให้ความถี่ทะลุทะลวงเปลี่ยนแปลงดังแสดงในสมการที่ (2) และส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ([4] และ [7])

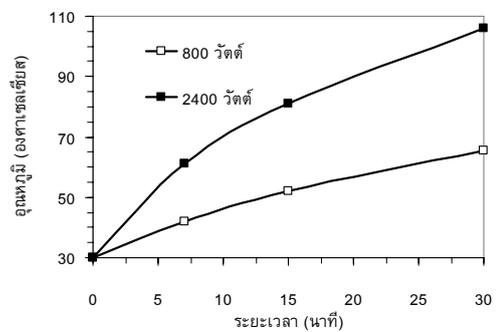
เมื่อพิจารณาปริมาณทรายและสารหน่วงการก่อตัวมีผลต่ออุณหภูมิ กล่าวคือ มอร์ตาร์ปกติที่ไม่ผสมน้ำยาหน่วงการก่อตัวและสัดส่วนผสมของทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) สูงกว่า (โดยการเปรียบเทียบระหว่างสูตร 1 (S/C = 2.75) และ สูตร 3 (S/C = 2.0)) มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในระหว่างการทำการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟต่ำกว่าซึ่งแสดงว่าทรายส่งผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของมอร์ตาร์ อันเนื่องมาจากทรายทำให้คุณสมบัติทางไดอิเล็กตริกลดลง (ตามสมการที่ (1)) เพราะทรายมีความเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกต่ำ และจะเห็นว่าปริมาณน้ำในเนื้อมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่ออุณหภูมิของมอร์ตาร์ที่เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนั้นการใส่สารหน่วงการก่อตัว (เปรียบเทียบระหว่างสูตร 1 (ไม่มีสารหน่วงการก่อตัว) และ สูตร 2 (มีสารหน่วงการก่อตัว)) พบว่าสารหน่วงปฏิกิริยาทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลง โดยเป็นเหตุเนื่องมาจากสารหน่วงการก่อตัวเป็นโพลิเมอร์โมเลกุลสูงซึ่งพิจารณาในองค์ประกอบที่เป็นสายโพลิเมอร์ที่ไม่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟความร้อน แต่กระนั้นผลที่เกิดขึ้นมีไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนผสมทรายทั้งนี้เพราะสัดส่วนในมอร์ตาร์มีปริมาณไม่ต่างกันอย่างชัดเจน (อ้างอิงจากสมการที่ (1))



รูปที่ 5 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่างกัน ภายใต้กำลังของไมโครเวฟที่ 800 วัตต์



รูปที่ 6 อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่างกัน ภายใต้กำลังไมโครเวฟที่ 2400 วัตต์



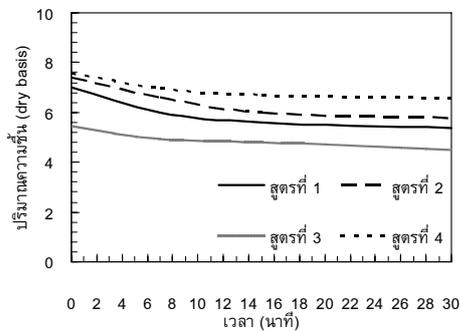
รูปที่ 7 อุณหภูมิของมอร์ตาร์ที่พลังงานไมโครเวฟที่ 800 และ 2400 วัตต์

จากผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่าการใช้พลังงานไมโครเวฟที่ 800 วัตต์ บ่มมอร์ตาร์จะให้ผลกับปริมาณความชื้นที่ลดลงในประเด็นที่การใส่น้ำยาหน่วงการก่อตัวทำให้ความชื้นภายในมีปริมาณมากกว่ามอร์ตาร์ที่ไม่ใส่สารหน่วง เนื่องจากเหตุผลด้านคุณสมบัติของโพลิเมอร์ดังกล่าวข้างต้น ในขณะที่การใช้พลังงานที่ระดับ 2400 วัตต์ (รูปที่ 9) มีผลต่อปริมาณความชื้นที่ลดลงใกล้เคียงกันทั้งมอร์ตาร์ที่ไม่และมีการผสมสารหน่วงการก่อตัว

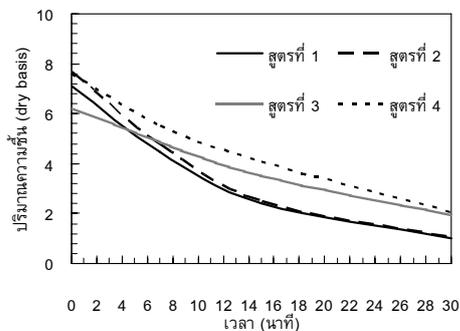
จากปริมาณความชื้นในมอร์ตาร์เมื่อผ่านการบ่มด้วยเตาไมโครเวฟสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง พบว่ากำลังไมโครเวฟที่ 2400 วัตต์ (รูปที่ 9)

สามารถลดความชื้นได้เร็วกว่าที่ 800 วัตต์ (รูปที่ 8) ซึ่งกลไกนี้ต่อเนื่องกับปริมาณค่าการดูดซับ กล่าวคือ ปริมาณการดูดซับมากส่งผลให้อุณหภูมิวัสดุสูงและถ่ายเทความร้อนภายใน ([1], [4] และ [11]) ทำให้ความชื้นรับพลังงานและเปลี่ยนแปลงสถานะอย่างรวดเร็วจนกระทั่งระเหยออกจากเนื้อมอร์ตาร์ สำหรับปริมาณส่วนผสมทรายที่สูงกว่า (สูตรที่ 1 (S/C เท่ากับ 2.75) และสูตรที่ 3 (S/C เท่ากับ 2.00)) ส่งผลให้มอร์ตาร์ที่ไม่ผสมสารหน่วงการก่อตัวมีปริมาณความชื้นสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำสามารถเกาะบริเวณผิวของทรายได้มากขึ้นตามปริมาณทรายที่เพิ่มขึ้น [20] แต่เมื่อผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ พบว่าความชื้นในมอร์ตาร์ที่มีปริมาณส่วนผสมทรายมาก (สูตรที่ 1) ลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่มอร์ตาร์ที่มีปริมาณส่วนผสมทรายน้อย (สูตรที่ 3) ลดลงช้ากว่า เนื่องจากความชื้นที่เกาะบริเวณผิวและจากการดูดซึมของอนุภาคทรายได้ระเหยออกไป ประกอบกับ โครงสร้างของมอร์ตาร์มีความพรุนมากกว่า โดยเฉพาะส่วนรอยต่อระหว่างอนุภาคทรายและแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตหรือที่เรียกว่า Interfacial Transition Zone ซึ่งมีความพรุนสูงทำให้การเคลื่อนตัวของความชื้นง่ายขึ้น [22]

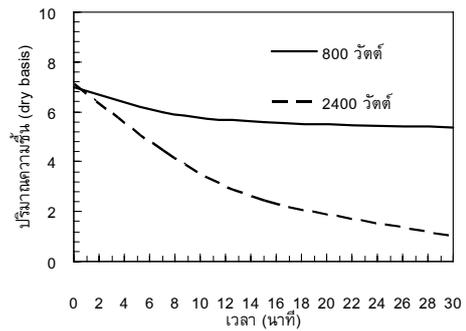
สำหรับกรณีมอร์ตาร์ที่ผสมสารหน่วงการก่อตัว (Retarder) พบว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารหน่วงการก่อตัว (มอร์ตาร์สูตรที่ 2 ใช้ 1080 ซีซี ในขณะที่มอร์ตาร์สูตรที่ 4 ใช้ 1274 ซีซี) มีผลต่อปริมาณความชื้นหลงเหลือที่มากขึ้น เนื่องจากปริมาณน้ำภายในที่เพิ่มขึ้น (สารหน่วงการก่อตัวมีน้ำและโพลีเมอร์เป็นส่วนประกอบ)



รูปที่ 8 ปริมาณความชื้นที่เวลาต่างๆ กัน ของมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่างกัน ภายใต้กำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์



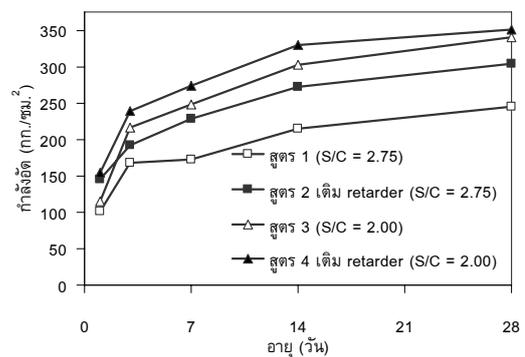
รูปที่ 9 ปริมาณความชื้นที่เวลาต่างๆ กัน ของมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่างกันภายใต้กำลังไมโครเวฟที่ 2400 วัตต์



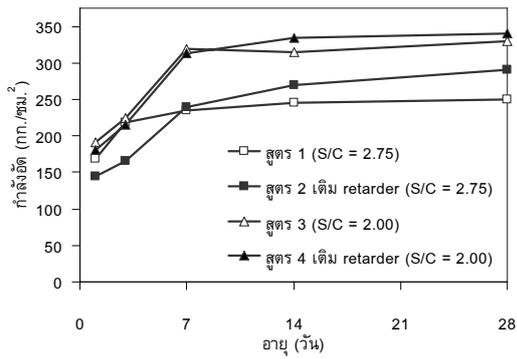
รูปที่ 10 ปริมาณความชื้นของมอร์ตาร์ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้พลังงานไมโครเวฟที่กำลัง 800 และ 2400 วัตต์

เมื่อพิจารณารูปที่ 11-15 ได้แสดงการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ในกรณีต่างๆ พบว่า การบ่มโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องสามารถช่วยเร่งพัฒนากำลังอัดได้และสอดคล้องงานวิจัยเดิม [10] ซึ่งแบ่งรายละเอียดกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

กรณีการบ่มที่ไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ พบว่าสามารถเร่งกำลังอัดมอร์ตาร์ได้ในช่วง 14 วันแรก และไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังอัดที่อายุ 28 วัน ทั้งในกรณีการบ่มไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 15 และ 30 นาที และเมื่อเปรียบเทียบกำลังอัดระหว่างการบ่มไมโครเวฟ 15 และ 30 นาที พบว่าเมื่อใช้เวลานานในการบ่มไมโครเวฟนานขึ้นจะทำให้กำลังอัดในช่วง 7 วัน คีขึ้น แต่เมื่อทำการบ่มมอร์ตาร์คอนกรีตด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 2400 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่ากำลังที่ได้มีค่าไม่แน่นอนและมีค่าต่ำกว่ากรณีอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างการรับแรงของมอร์ตาร์อาจเกิดรอยร้าวเล็กๆ ภายในโครงสร้าง [14] หรือ Micro cracking อันเกิดอุณหภูมิตั้งในโครงสร้างเกินกว่า 90 องศาเซลเซียส หรือมีความร้อนสูง (Over heating) อันส่งผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ลดลง [22]

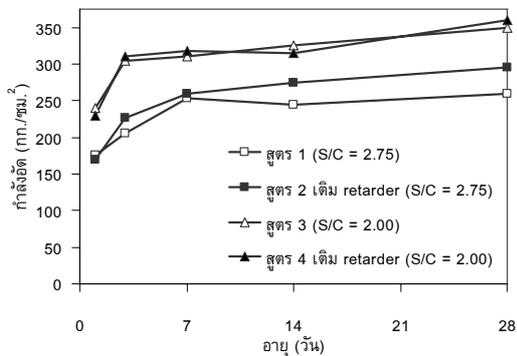


รูปที่ 11 กำลังอัดของมอร์ตาร์ เมื่อผ่านการบ่มด้วยน้ำ

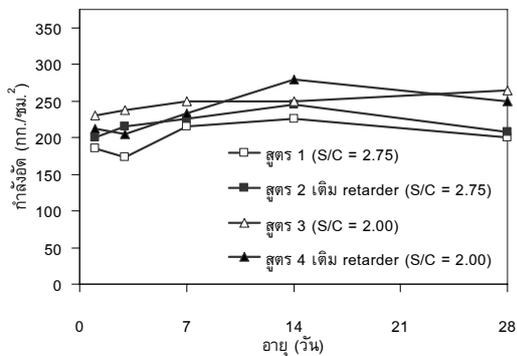


รูปที่ 12 กำลังอัดของมอร์ตาร์ เมื่อผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ ที่กำลัง 800 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที

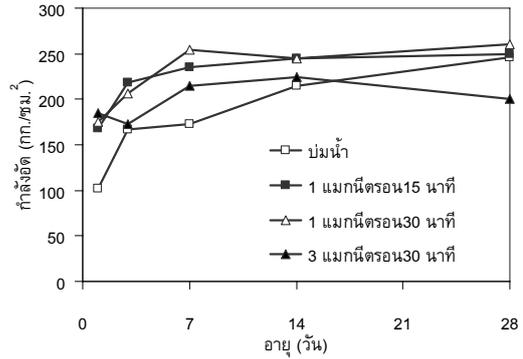
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เพิ่มสารหน่วงการก่อตัวระหว่างการบ่มน้ำและไมโครเวฟ พบว่าการเพิ่มสารหน่วงปฏิกิริยาส่งผลให้กำลังให้กำลังพัฒนาดีขึ้นในการบ่มน้ำ แต่สำหรับไมโครเวฟจะทำให้เกิดการอัตราการพัฒนากำลังอัดต่ำในช่วงอายุ 1-3 วันแรก ดังรูปที่ 12 และ 13 (พิจารณาสูตรที่ 1 และ 2) นอกจากนี้ยังทำให้กำลังอัดที่เวลา 28 วัน สูงขึ้น ในทุกกรณี นอกจากนั้นปริมาณสัดส่วนทรายที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังอัดมีค่าต่ำลงในทุกๆ กรณีทั้งการบ่มน้ำและบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ



รูปที่ 13 กำลังอัดของมอร์ตาร์ ซึ่งบ่มด้วยไมโครเวฟ ที่กำลัง 800 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 14 กำลังอัดของมอร์ตาร์สูตรที่ 1 ถึง 4 เมื่อผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟที่ กำลัง 2400 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 15 กำลังอัดของมอร์ตาร์สูตรที่ 1 เมื่อผ่านการบ่มด้วยน้ำและไมโครเวฟ (ที่ กำลัง ไมโครเวฟ 800 และ 2400 วัตต์)

5. สรุปผลการศึกษา

ไมโครเวฟสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องสามารถนำมาประยุกต์ใช้บ่มมอร์ตาร์เพื่อเร่งกำลังได้โดยสามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

5.1 พลังงานไมโครเวฟจากเตาไมโครเวฟสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันระหว่างปูนซีเมนต์และน้ำทำให้มอร์ตาร์มีการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้น นอกจากนั้นยังไม่มีผลกระทบต่อพัฒนากำลังอัดในช่วง 28 วัน

5.2 กำลังไมโครเวฟส่งผลโดยตรงต่อมอร์ตาร์ โดยยิ่งใช้กำลังสูง อุณหภูมิและความชื้นของมอร์ตาร์จะยิ่งเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดผลลัพท์ที่ไม่ต้องการได้เช่น โครงสร้างเกิดรอยแตกร้าวจนทำให้กำลังอัดที่ไต่ลดลง หรือการเคลื่อนที่ออกสู่ภายนอกของความชื้น

5.3 การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของมอร์ตาร์ ทั้งปริมาณทราย และสารหน่วงปฏิกิริยาส่งผลโดยตรงต่อสมบัติโคอีเล็กทริกของวัสดุ (จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) และส่งผลต่อโครงสร้างความพรุนของมอร์ตาร์ (จากการเปลี่ยนแปลงความชื้น) นอกจากนั้นยังส่งผลต่อการพัฒนากำลังอัดอีกด้วย โดยสารหน่วงปฏิกิริยาทำให้กำลังอัดในช่วงต้นน้อยกว่าปกติ

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยตามสัญญาเลขที่ 106/2547 และคุณวัชร เกาะแก้ว ที่พัฒนาและสนับสนุนเทคนิคสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Mujumdar, A.S., 1995, "Handbook of Industrial Drying, 2nd Edition," Marcel Dekker, New York.

- [2] Metaxas, A.C., and Meredith, 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 Schmugge, 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] Rattanadecho, P., Chatveera, B., Atong, D., Makul, N., and Suwannapum, N. "Development of Compressive Strength of Cement Paste under Accelerated Curing by Using A Continuous Microwave Belt Drier", *Materials Science & Engineering (In Press)*
- [11] Rattanadecho, P, Watanasungsuit, A., and Duangduen, A., 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] ASTM Committee, "ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates", *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate*.
- [19] ASTM Committee, "ASTM C 305 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency", *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.01 Concrete and Aggregate*.
- [20] ASTM Committee, "ASTM C 1437 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate*.
- [21] ASTM Committee, 2004. "ASTM C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, Volume 04.02 Concrete and Aggregate*.
- [22] Neville, A.M., 1996, "Properties of Concrete. Fourth Edition", London: Pitman Books Limited.