

คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุซีเมนต์ที่แข็งตัวแล้วภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

Physical Properties of Hardened Cement-based Materials under Curing with Microwave Energy Cooperating with Continuous Belt Thermal Processor

ณรงค์ศักดิ์ มากุล^[1,2], ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ^[2], รศ.ดร.บุรฉัตร ฉัตรวิระ^[1], รศ.ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^[2] และวัชร เกาะแก้ว

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

โทรศัพท์ : (+662) 564-3001-9 ต่อ 3105 โทรสาร : (+662) 564-3010, E-mail : cburacha@engr.tu.ac.th

^[2] หน่วยวิจัยเพื่อการใช้ประโยชน์จากไมโครเวฟในงานวิศวกรรม (Research Center of Microwave Utilization in Engineering)

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

โทรศัพท์ : (+662) 564-3001-9 ต่อ 3153 โทรสาร : (+662) 564-3010, E-mail : ratphadu@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

เทคนิคหนึ่งของการบ่มวัสดุซีเมนต์โดยอาศัยหลักการการสร้างความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) ของพลังงานไมโครเวฟแทนวิธีดั้งเดิมที่ใช้ความร้อนจากบริเวณผิวภายนอกกำลังได้รับความนิยมในปัจจุบัน เนื่องจากประสิทธิภาพและศักยภาพที่สูง บทความนี้จะได้นำเสนอผลการศึกษาเชิงการทดลองของคุณสมบัติทางกายภาพของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงซึ่งมีโครงสร้างภายในประกอบด้วยแมกนีตรอนจำนวน 8 ตัว ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ ต่อ 1 แมกนีตรอน โดยศึกษาผลกระทบของตัวแปรซึ่งประกอบด้วย กำลังวัตต์ ระยะเวลาในการให้พลังงาน อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) อิทธิพลของปริมาณอากาศและสารผสมเพิ่มชนิดสารหน่วงการก่อตัวในคอนกรีตที่มีต่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้น และกำลังอัด และทำการเปรียบเทียบกำลังอัดซึ่งผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ ในน้ำและอากาศ จากผลการทดสอบ พบว่ากำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้นของพลังงานไมโครเวฟส่งผลให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ อุณหภูมิสูงสุดและอัตราการลดลงของความชื้นภายในซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ และคอนกรีตเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ที่ลดลงมีผลต่ออุณหภูมิเช่นเดียวกัน ในขณะที่มอร์ตาร์ทั้งไม่ผสมและผสมสารหน่วงการก่อตัวและปริมาณอากาศไม่ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและความชื้นภายในโครงสร้าง นอกจากนั้นการพัฒนาำลังอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงในระยะปลายเมื่อเพิ่มกำลังของคลื่นไมโครเวฟและการเติมสารหน่วงมีผลทำให้กำลังอัดเพิ่มขึ้น

ABSTRACT

At present, a cement-based materials curing technique by means of the principle of volumetric heat generating within processed material by using microwave energy has admired and instead of the conventional method in which heat transfers from outside surface inward on account of high performance and potential. This paper presents the results in experimentally of physical properties of cement paste, mortar, and concrete under microwave energy cooperating with continuous belt thermal processor. Its internal structure consists of 8 magnetrons, at which generate microwave at operating frequency in the range of 2.45 ± 0.05 Gigahertz (GHz) and power per 1 magnetron equal to 800 watts). The effective variables studied were power of microwave, application time, water-to-cement ratios (W/C), sand-to-cement ratios (S/C) and the influence of air content and chemical admixture in kind of set-retarded agent in concrete upon temperature rise, moisture content and compressive strength and comparison the strength among microwave-, water-, and air-cured concrete. From the test results, it was found that an increasing of microwave power owing to increase the rate of temperature rise, maximum temperature and the decreasing rate of moisture content of cement paste, mortar and concrete. As well as, the effect occurred on temperature when water-to-cement ratios of cement paste decreased, whereas the mortars containing with and without set-retarded agent and air content did not affected directly on the rate of temperature rise and moisture content within internal structure. Besides, the later age compressive strength of concrete decreased when the power of microwave increased and increment of compressive strength affected by adding the retarder agent.

1. บทนำ

ในปัจจุบันนวัตกรรมการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟ (คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงย่านความถี่ 300 เมกะเฮิร์ต, MHz ถึง 300 กิกะเฮิร์ต, GHz) สร้างความร้อนกำลังได้รับความนิยมในกระบวนการทางอุตสาหกรรมหลายประเภท อาทิเช่น การทำความร้อนและอบแห้ง (Heating and drying) อาหาร การเผา (Firing) และอบแห้งเซรามิกหรือ Sintering และกระบวนการ คงรูป (Vulcanization) ยางธรรมชาติ เป็นต้น โดยอันตรกิริยาของคลื่นไมโครเวฟกับวัสดุไดอิเล็กตริกมีกลไกเกิดจากการสั่นตัวของขั้ว (Dipole) และประจุในโมเลกุลวัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric materials) ภายใต้การกระทำของสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของคลื่นไมโครเวฟที่ทะลุทะลวงเข้าไปในวัสดุ โดยความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ (Penetration depth) ในวัสดุแต่ละประเภทจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการผลิตความร้อน นอกจากนั้นการกระจายความร้อนของวัสดุยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด อาทิเช่น โครงสร้างและรูปร่างของวัสดุ กำลังและการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟในวัสดุ รวมทั้งคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric properties) ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิง [1-17] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอกสารอ้างอิงของ Mujumdar [1] Metaxas [2] และ Schubert and Rogier [3] ซึ่งเป็นต้นแบบของงานวิจัยเทคนิคกระบวนการสร้างความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ

สำหรับการสร้างความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟเป็นกรรมวิธีการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (Volumetric heating) และหากขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าความสามารถในการทะลุทะลวงหรือความลึกทะลุทะลวงจะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (Resonance) [13] ภายในวัสดุทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) (พลังงานไมโครเวฟจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential decay) [2]) การสะท้อนในวัสดุที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความเข้มของสนามไมโครเวฟในวัสดุสูงขึ้น โดยทฤษฎีการทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริกจะใช้ค่ากำลังสองของความเข้มสนามแม่เหล็กในการประมาณค่าการดูดซับพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าการดูดซับหรือความร้อนเชิงปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q (W/m³)) ดังสมการที่ (1) [10]

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

เมื่อ σ คือ สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า (S/m)

f คือ ความถี่ (เฮิร์ต (Hz))

ϵ_0 คือ สมบัติการซึมผ่านในที่ว่าง (8.854(10⁻¹²) F/m)

$\tan \delta$ คือ สัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนท์ (ϵ''/ϵ')

ϵ'', ϵ' คือ ส่วนจินตภาพของค่าไดอิเล็กตริกและ

ส่วนจริงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ตามลำดับ

$\vec{E}$ คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ส่งผลต่อการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามคลื่นไมโครเวฟ อีกสิ่งหนึ่งคือ ค่าความลึกของการทะลุทะลวง (D_p) ซึ่งบ่งชี้ถึงรูปแบบการกระจายของสนามไฟฟ้าในวัสดุ โดยค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะที่ความเข้มของพลังงานเมื่อแทรกตัวเข้าไปสู่ภายในวัสดุมีค่าเหลือร้อยละ 37 (1/e) จากพลังงานที่ผิวซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2) [11]

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

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง

ν คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

จากค่าความลึกทะลุทะลวงสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนาแน่นค่าความลึกทะลุทะลวง วัสดุจะมีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงที่บริเวณผิวน้ำวัสดุที่ได้รับคลื่นและอุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล แต่หากวัสดุมีความหนาแน่นน้อยกว่าค่าความลึกทะลุทะลวงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะไม่เป็นลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียลดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้น

สำหรับการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในงานคอนกรีตเกิดขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 60 โดยในช่วงแรกเป็นเพียงการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของคอนกรีต เช่น Figg, J. [18] พบความสัมพันธ์ของคลื่นไมโครเวฟที่ลดลงกับปริมาณน้ำดูดซับเข้าสู่ภายในเนื้อคอนกรีตที่เป็นต้น ต่อมา Xuequan, W. et al. [19] ได้พัฒนาวิธีการบ่มคอนกรีตได้ใช้ไมโครเวฟเพื่อทำให้คอนกรีตมีการสูญเสีย น้ำ พบว่าเวลาที่เหมาะสมของการให้พลังงานไมโครเวฟกับคอนกรีตควรอยู่ในช่วง 15 – 30 นาที ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pheeraphan, T. et al. [20] ได้ศึกษาพบเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการบ่มคอนกรีตปกติด้วยพลังงานไมโครเวฟประกอบด้วย ระยะเวลาก่อนให้พลังงานไมโครเวฟ และระยะเวลาการให้พลังงาน มีค่า 30 และ 45 นาที ตามลำดับ นอกจากนั้นการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟในการบ่มเพื่อพัฒนากำลังของคอนกรีตมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับงานวิจัยต้นแบบ [12-17] ซึ่งการใช้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยไมโครเวฟในการบ่มคอนกรีตนั้นครอบคลุมในช่วงของการให้ความร้อนวัสดุในช่วงต้นหลังทำการผสมโดยในช่วงพัฒนาโครงสร้าง เนื่องจากพลังงาน

ไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ในปูนซีเมนต์ได้ทำให้เกิดการพัฒนากำลังรับแรงของคอนกรีตอย่างรวดเร็ว และการบ่มหลังจากคอนกรีตพัฒนาโครงสร้างแล้วเพื่อให้เกิดความดันขึ้นภายในและกระเทาะส่วนของผิวคอนกรีตที่ป็นเปื้อนออก

แม้จะมีการศึกษากระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ แต่งานส่วนใหญ่ใช้เตาอบไมโครเวฟสำหรับครัวเรือน (Domestic microwave) เป็นแหล่งพลังงาน และวัสดุที่อยู่ในเตาไม่มีการเคลื่อนตัว ซึ่งผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการศึกษาเหล่านี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างกรรมวิธีการบ่มด้วยไมโครเวฟกับการพัฒนากำลังของคอนกรีตที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการบ่มคอนกรีตโดยใช้เตาไมโครเวฟ ชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องออกมาอย่างเป็นระบบทั้งในส่วนของการทดลองและงานเชิงทฤษฎีหรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือ การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟบ่มเร่งเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต (ศึกษาต่อเนื่องจาก [10]) เพื่อลดระยะเวลา ประหยัดพลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการผลิต ในการศึกษาครั้งนี้จะบ่มคอนกรีตโดยใช้พลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องที่พัฒนาขึ้นใน Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E.) ซึ่งประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ (ต่อ 1 ตัว) จำนวน 8 ตัว หรือให้กำลังสูงสุด คือ 6.4 กิโลวัตต์) นอกจากนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จะนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขความบกพร่องของระบบ และพัฒนาไปสู่การออกแบบระบบให้เหมาะสมกับงานคอนกรีต

2. ระเบียบวิธีทดลอง

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟใช้ร่วมกับสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องที่ทางศูนย์ฯ ได้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกลำเลียงโดยสายพานผ่านเข้าไปในอุโมงค์ที่มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular cavity) ซึ่งบริเวณรอบอุโมงค์จะติดตั้งแมกนีตรอนกำลังต่ำ (Low power magnetron) ความถี่ 2.45 ± 0.05 กิกะเฮิร์ต (GHz) ไว้จำนวน 8 ตัว (กำลัง 800 วัตต์/ตัว) เพื่อกำเนิดคลื่นและป้อนคลื่นเพื่อกำเนิดความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ (รูปที่ 1) ซึ่งขนาดของเครื่องโดยประมาณคือ กว้าง 0.45 เมตร สูง 0.90 เมตร และมีความยาวอุโมงค์ประมาณ 3.00 เมตร อุณหภูมิสูงสุดที่ทำได้โดยประมาณคือ 230 องศาเซลเซียส (ขึ้นอยู่กับสมบัติวัสดุ) คลื่นไมโครเวฟถูกยิงจากแมกนีตรอน ซึ่งติดอยู่รอบๆ บริเวณทำความร้อน การทำความร้อนสามารถทำได้โดยลำเลียงวัสดุใส่สายพานที่บริเวณปากทางเข้าระบบ (สามารถปรับเปลี่ยนความเร็วสายพานได้ตามต้องการ) จากนั้นสายพานจะลำเลียงวัสดุเข้าไปยังบริเวณทำความร้อน การปรับแต่งกำลังสามารถทำได้โดยการเปิดและปิด

แมกนีตรอนตามตำแหน่งที่ต้องการ บริเวณปากทางเข้าและออกระบบ ไมโครเวฟมีระบบการคัดคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบสามารถวัดได้ที่ตำแหน่ง ปากทางเข้าและออกเตาไมโครเวฟ โดยใช้อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง ± 0.5 องศาเซลเซียส)

วัสดุซีเมนต์ประกอบด้วย ซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์และคอนกรีตมีขนาด $0.05 \times 0.05 \times 0.10$ ลูกบาศก์เมตร โดยทำการผสมปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 น้ำประปา (ค่าความกรดต่าง (pH) เท่ากับ 7.0) หิน (หินมีขนาดใหญ่สุด 10.0 มม. โดยทำการล้างน้ำและอบแห้งเป็นเวลา 1 วัน) และทราย (ใช้ทรายแม่น้ำร้อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 แล้วล้างน้ำและอบแห้งเป็นเวลา 1 วัน) จากนั้นทำการผสมตามสัดส่วนผสมของคอนกรีตสามารถดูรายละเอียดได้ดังตารางที่ 1 หลังจากผสมจึงนำคอนกรีตใส่แบบหล่อและหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและปล่อยให้วัสดุซีเมนต์แข็งตัวแล้วถอดแบบที่อายุ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง จากนั้นนำคอนกรีตไปแยกบ่มตามกรรมวิธีต่างๆ กัน คือ บ่มด้วยน้ำ อากาศ และไมโครเวฟ สำหรับการบ่มด้วยน้ำและอากาศจะควบคุมอุณหภูมิอากาศอยู่ที่ 25 ± 2 องศาเซลเซียส และทดสอบกำลังอัดที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ตามมาตรฐาน ASTM C 39 [21] ส่วนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟทำโดยนำวัสดุซีเมนต์ที่ถอดแบบมาผ่านพลังงานไมโครเวฟในระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องตามระยะเวลาที่กำหนด (15 และ 30 นาที) โดยใช้แมกนีตรอนจำนวน 1 - 3 ตัว (กำลัง 800 - 2400 วัตต์) เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไมโครเวฟ และหลังจากกระบวนการบ่มจึงนำไปบ่มต่อโดยบรรจุในถุงพลาสติกชนิดปิดผนึก และนำวัสดุไปทดสอบกำลังอัดเช่นเดียวกับการบ่มน้ำ และอากาศ

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของวัสดุซีเมนต์ที่ใช้ (หน่วยเป็น กก./ม.³)

สูตร ที่	ปูน ซีเมนต์	น้ำ	ทราย	สาร หน่วง (ซีซี)	หิน	ปริมาณ อากาศ (ร้อยละ)
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 ซีเมนต์เพสต์

สูตร 4, 5, 6, 7 คือ มอร์ตาร์ และ สูตร 8, 9 คือ คอนกรีต

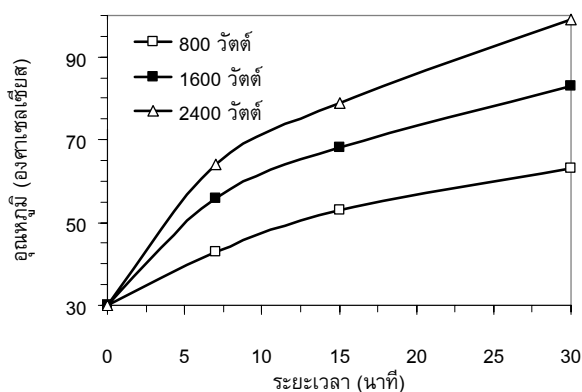


รูปที่ 1 ระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

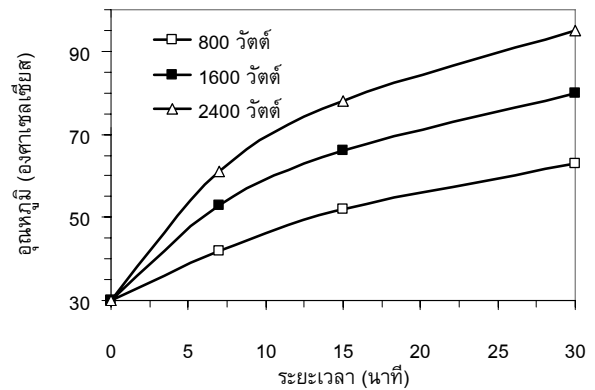
3. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

3.1 กำลังวัตต์ของไมโครเวฟกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

เมื่อพิจารณาลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องในช่วงเวลา 30 นาที พบว่ากำลังของไมโครเวฟที่สูงขึ้นจาก 800 วัตต์ เป็น 1600 และ 2400 วัตต์ (จากนิยามกำลังของไมโครเวฟจำนวน 1 กิโลวัตต์ คือกำลังที่ใช้ในการระเหยน้ำที่มีน้ำหนัก 1.14 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิห้องและความดัน 1 บรรยากาศ ในเวลา 1 ชั่วโมง [22]) ส่งผลให้อัตราการเพิ่มอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์มากกว่าในทุกกรณี ซึ่งหากพิจารณาตามทฤษฎีในสมการที่ (1) ที่อธิบายปริมาณค่าการดูดซับ (Q) แปรผันตามความเข้มสนามไฟฟ้ากำลังสองซึ่งแปรผันตามกำลังวัตต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงตัวอย่างในกรณีของซีเมนต์เพสต์และมอร์ตาร์ตามรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิยังส่งผลต่ออัตราการทำปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นของแคลเซียมซิลิเกต (C_2S , C_3S) ทำให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันยิ่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย [23]



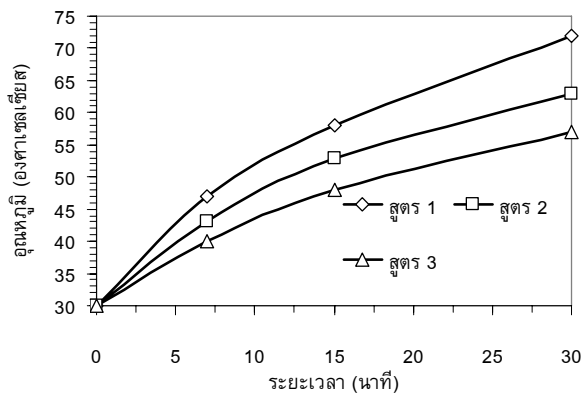
รูปที่ 2 อุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่พลังงานไมโครเวฟต่างกัน (สูตรที่ 2)



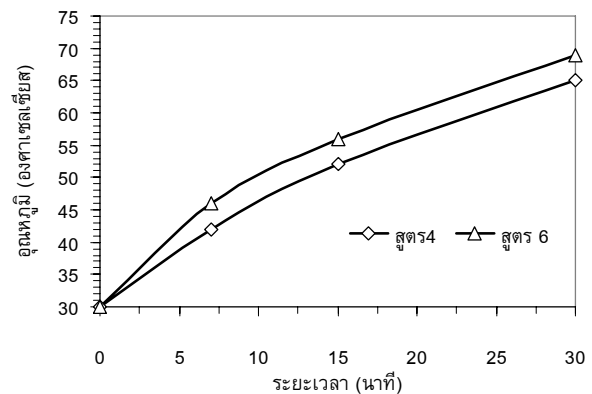
รูปที่ 3 อุณหภูมิของมอร์ตาร์ที่พลังงานไมโครเวฟต่างกัน (สูตรที่ 4)

3.2 อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ (W/C) กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 4 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบผลของอัตราส่วนระหว่างน้ำตอปูนซีเมนต์ (W/C) ในซีเมนต์เพสต์ (สูตรที่ 1-3) พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างน้ำตอปูนซีเมนต์สูง ($W/C = 0.5$ ในสูตรที่ 3) มีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่ำกว่าในกรณีที่อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ต่ำ ($W/C = 0.3$ และ 0.4 ในสูตรที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) ซึ่งหากพิจารณาจากองค์ประกอบระหว่างปูนซีเมนต์ และน้ำ เมื่อผ่านกระบวนการไมโครเวฟ จะเห็นว่าปูนซีเมนต์เป็นวัสดุที่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟที่ต่ำ (Low lossy materials) ในขณะที่น้ำเป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าเป็นวัสดุที่ดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดี (High lossy materials) [22] ดังนั้นเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีส่งผลให้คุณสมบัติในการดูดซับของคอนกรีตเปลี่ยนไป และเป็นที่ทราบกันดีว่าอัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ต้องมีค่าประมาณ 0.23 [24] ทำให้ปริมาณน้ำในการผสมที่เหลือจะเป็นปริมาณน้ำส่วนเกิน (Excessive Water) จากปฏิกิริยา และจากข้อมูลข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่าปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำที่เกิดขึ้นทำให้คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับคลื่นและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนสูงมาก และหากมีปริมาณน้ำส่วนเกินในโครงสร้างคอนกรีตมากขึ้นจะส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับคลื่นไมโครเวฟและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้สูงขึ้น



รูปที่ 4 อุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่ค่า W/C ต่างกัน
(กำลังคลื่นไมโครเวฟ เท่ากับ 800 วัตต์)
(สูตรที่ 1, 2 และ 3)



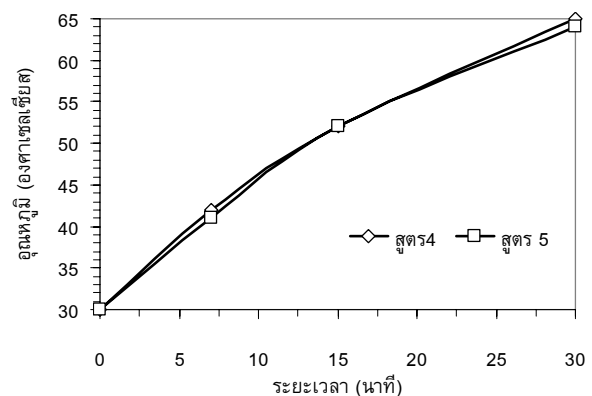
รูปที่ 5 อุณหภูมิของมอร์ตาร์ที่ค่า S/C ต่างกัน
(กำลังไมโครเวฟที่ 800 วัตต์)
(สูตรที่ 4 และ 6)

3.3 อัตราส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

ในการพิจารณาการเพิ่มขึ้นของปริมาณทรายและหินในคอนกรีตมีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการพิจารณาของมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) มีปริมาณต่างกัน (S/C = 2.75 และ 2.0) พบว่าปริมาณทรายส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ กล่าวคือมอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์น้อยกว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงกว่ามอร์ตาร์ที่มีอัตราส่วนระหว่างทรายต่อปูนซีเมนต์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากสารที่ทำปฏิกิริยาในกระบวนการคือ ปูนซีเมนต์และน้ำเท่านั้น และจากข้อมูลในการพิจารณาซีเมนต์เพสต์พบว่ายังมีปริมาณปูนซีเมนต์ในองค์ประกอบรวมมากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะยิ่งสูง ซึ่งส่วนผสมที่มีปริมาณเนื้อปูนซีเมนต์สูงกว่า นอกจากเหตุผลข้างต้นแล้วยังสามารถอธิบายได้อีกมุมหนึ่ง นั่นคือสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุในวัสดุมอร์ตาร์ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลัก คือ ส่วนที่ทำปฏิกิริยา (น้ำกับปูนซีเมนต์) และส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา (ทราย) โดยส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา (ซีเมนต์เพสต์) มีส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาแทรกอยู่ซึ่งทรายมีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกในการทำความร้อนในระดับหนึ่งแต่เมื่อเทียบกับน้ำและซีเมนต์เพสต์ยังมีคุณสมบัติต่ำกว่า ดังนั้นหากยังมีปริมาณทรายในองค์ประกอบมากมีผลทำให้คุณสมบัติไดอิเล็กตริกโดยรวมของวัสดุที่มีผลต่อความร้อนที่เกิดขึ้นลดลง

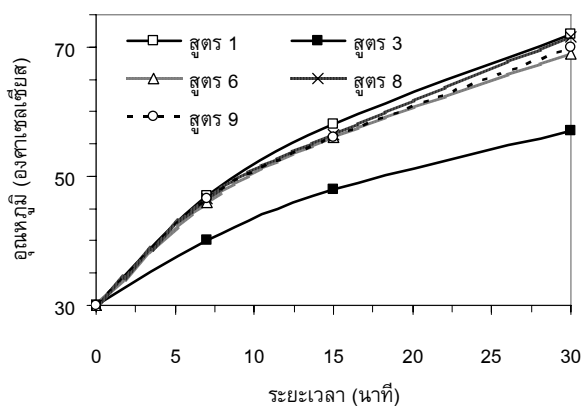
3.4 สารเคมีผสมเพิ่มประเภทหน่วงการก่อตัวและปริมาณอากาศกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

รูปที่ 6 แสดงผลของการเติมสารหน่วงการก่อตัวต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของมอร์ตาร์ พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันเล็กน้อยหรืออาจจะไม่แตกต่างกันเลยในบางกรณี ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณสารหน่วงการก่อตัวมีปริมาณสัดส่วนที่น้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อมอร์ตาร์



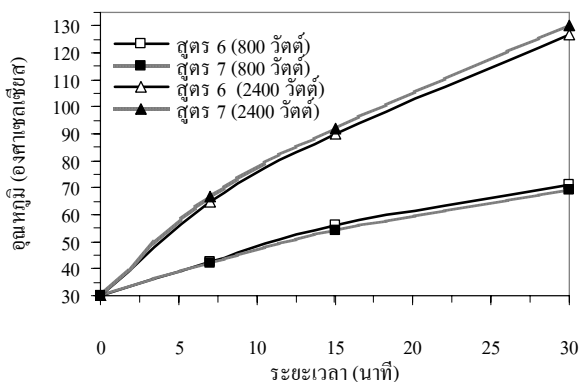
รูปที่ 6 อุณหภูมิของมอร์ตาร์ที่ค่า S/C เท่ากัน (สูตรที่ 4 และ 5) สูตร 5
เติมสารหน่วงการก่อตัว (Retarder) (ที่กำลัง 800 วัตต์)

เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมในการพิจารณาผสมหินในรูปที่ 7 พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะใกล้เคียงกับมอร์ตาร์ นอกจากนั้นผลการทดสอบอุณหภูมิกรณีที่ยังคงผสมหินอย่างเดียวก่อนและผสมทรายและหินพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันมาก อันแสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของทรายและหินนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 7 อุณหภูมิของคอนกรีต (สูตรที่ 8 และ 9) เทียบกับ มอร์ตาร์ (สูตรที่ 6) และซีเมนต์เพสต์ (สูตรที่ 1 และ 3) (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

จากการพิจารณาปริมาณอากาศในโครงสร้างต่อลักษณะอุณหภูมิในรูปที่ 8 พบว่าปริมาณอากาศมีอิทธิพลน้อยมากซึ่งเป็นไปได้ว่าปริมาตรอากาศของอากาศในเนื้อโครงสร้างมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาตรโดยรวมของมอร์ตาร์



รูปที่ 8 อุณหภูมิของมอร์ตาร์ที่ปริมาณอากาศเทียบเท่าร้อยละเท่ากับ 1 (สูตรที่ 6) และ 5 (สูตรที่ 7) (กำลัง 800 และ 2400 วัตต์)

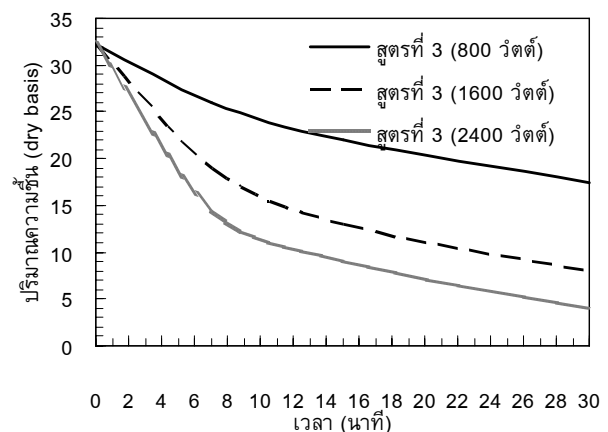
3.5 กำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้น

จากรูปที่ 9 พบว่าปริมาณความชื้นในวัสดุเมื่อนำคอนกรีตมาผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่องจะเห็นว่ากำลังไมโครเวฟมีผลโดยตรงต่อปริมาณการไล่ความชื้นออกจากวัสดุ เนื่องจากกำลังไมโครเวฟที่สูงส่งผลให้วัสดุได้อิเล็กตริกที่อยู่ภายใต้สภาวะไมโครเวฟผลิตความร้อนได้มากซึ่งเป็นไปตามกลไกในสมการที่ (1) นอกจากนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นแบบเชิงปริมาตรซึ่งลักษณะการกระจายความร้อนขึ้นกับความลึกทะลุทะลวงของวัสดุในสมการที่ (2) (โดยส่วนใหญ่วัสดุที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า หรือใกล้เคียงค่าความลึกทะลุทะลวงมีผลทำให้เกิดอุณหภูมิสูงสุดภายในวัสดุ) ส่งผลให้เกิดกลไก

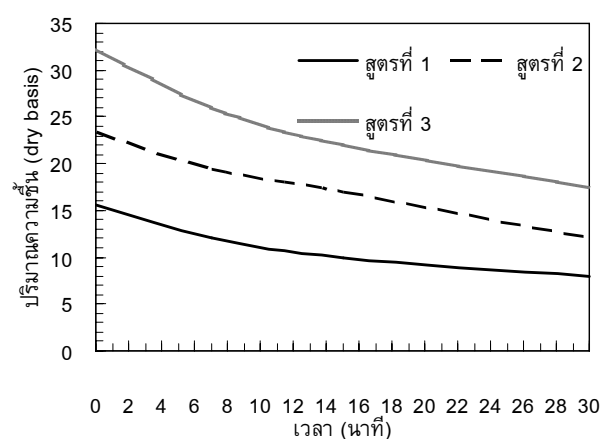
การเคลื่อนตัวของของไหลภายในโครงสร้างทั้งในส่วนของเหลว และก๊าซ ด้วยความดันคาพิลลารี และความดันก๊าซ ซึ่งอิทธิพลดังกล่าวอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ Pumping (ปรากฏการณ์ที่ของเหลวเคลื่อนที่ออกสู่ผิวหน้าวัสดุโดยไม่เปลี่ยนสถานะ) และส่งผลให้ปริมาณความชื้นในคอนกรีตลดลง โดยมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้กำลังไมโครเวฟที่สูงขึ้น

ในส่วนของอิทธิพลของสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ของคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 10 พบว่าค่า W/C ที่สูงหมายถึงปริมาณความชื้นเริ่มต้นที่สูงตามไปด้วย และเมื่อนำมาผ่านคลื่นไมโครเวฟ พบว่าอัตราการขับความชื้นออกจะสูงเมื่อค่าสัดส่วน W/C ของคอนกรีตมีค่ามาก โดยในทุกกรณีปริมาณความชื้นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาเริ่มต้น และอัตราการลดลงของปริมาณความชื้นจะลดลงเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น

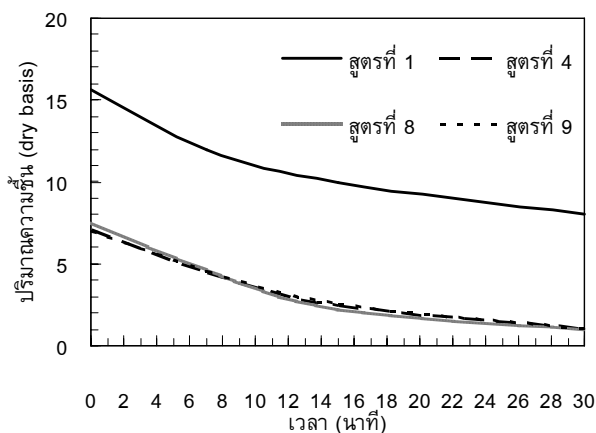
จากรูปที่ 11 แสดงถึงลักษณะปริมาณความชื้นในซีเมนต์เพสต์ (สูตรที่ 1) มอร์ตาร์ (สูตรที่ 4) และคอนกรีต (สูตรที่ 8 ผสมหินอย่างเดียว และสูตรที่ 9 ผสมหินและทราย) พบว่าลักษณะแนวโน้มมีความคล้ายคลึงกัน โดยปริมาณความชื้นเริ่มต้นเกือบทุกกรณีมีความใกล้เคียงกัน ยกเว้นกรณีซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากปริมาณน้ำต่อมวลรวมมีมาก



รูปที่ 9 ปริมาณความชื้นที่เวลาต่างๆ กัน ของคอนกรีต สูตรที่ 3 ที่พลังงานไมโครเวฟต่างกัน



รูปที่ 10 ปริมาณความชื้นที่เวลาต่างๆ กัน ของคอนกรีตที่มีสัดส่วน W/C ต่างกัน (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)



รูปที่ 11 ปริมาณความชื้นของคอนกรีตชนิดต่างๆ (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

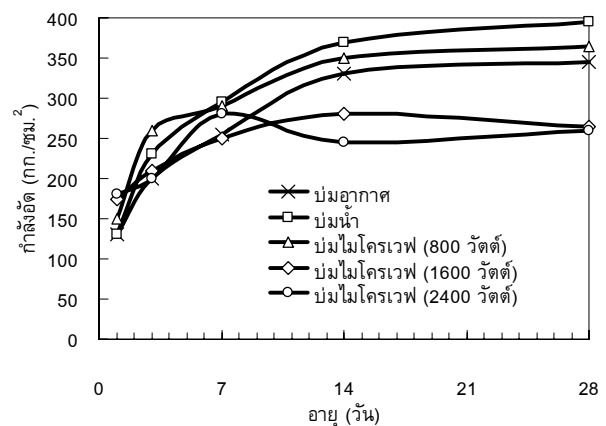
3.6 ผลการเปรียบเทียบวิธีการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟต่อการพัฒนากำลังอัด

เมื่อพิจารณากำลังอัดของคอนกรีตหลังจากผ่านกระบวนการบ่มด้วยกรรมวิธีต่างๆ ในรูปที่ 12 พบว่าการบ่มด้วยน้ำสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีที่สุดที่ทุกการทดสอบ ในขณะที่การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟสำหรับกรณีใช้กำลังที่ 800 วัตต์ สามารถทำให้การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงต้น (7 วันแรก) ได้ดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กำลังวัตต์ที่ 1600 และ 2400 วัตต์ และมีกำลังอัดสูงกว่าการบ่มในอากาศทั้งที่อายุ 14 และ 28 วัน ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถนำมาใช้ในการช่วยพัฒนากำลังคอนกรีตในช่วงระยะต้นได้ ซึ่งเหมาะกับงานคอนกรีตที่ต้องการให้คอนกรีตสามารถรับแรงได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อพิจารณาในประเด็นของการเพิ่มกำลังวัตต์ของคลื่นไมโครเวฟ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีอัตราการพัฒนาดำเนินการตลอดช่วงอายุ 28 วัน อันเนื่องมาจากปัจจัย 2 ส่วน คือ ปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในเนื้อคอนกรีตหลังผ่านกระบวนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟน้อยจนไม่เพียงพอต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันในระยะต่อเนื่อง โดยเฉพาะบริเวณผิวหน้าของคอนกรีตที่ความชื้นหรือปริมาณน้ำถูกขับออกเป็นปริมาณมากทำให้บางส่วนของผิวหน้าแห้งซึ่งหมายถึงปริมาณน้ำอาจมีปริมาณไม่พอต่อการเกิดปฏิกิริยา นอกจากนั้นผลที่เกิดจากชั้นความชื้นออกมากอาจเกิดความไม่สม่ำเสมอของระดับความชื้นจากผิวหน้าจนเป็นเหตุให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อีกส่วนหนึ่งคือ อุณหภูมิในการบ่มไมโครเวฟที่สูงเกินไปส่งผลให้วัสดุเกิดความเสียหายระดับจุลภาคหรือเกิดรอยร้าวเล็กๆ ภายในโครงสร้างหรือ Micro cracking [14,15,16] อันส่งผลต่อกำลังอัดที่ลดลง [10]

เมื่อพิจารณาสัดส่วนผสมที่มีปริมาณทรายต่อปูนซีเมนต์ (S/C) ต่างกัน พบว่ายังมีปริมาณทรายเพิ่มขึ้นทำให้กำลังของมอร์ตาร์ลดลงดังเช่นกรณีมอร์ตาร์ที่มีสัดส่วน S/C เท่ากับ 2.75 (สูตรที่ 4) และ 2.0 (สูตรที่ 6)

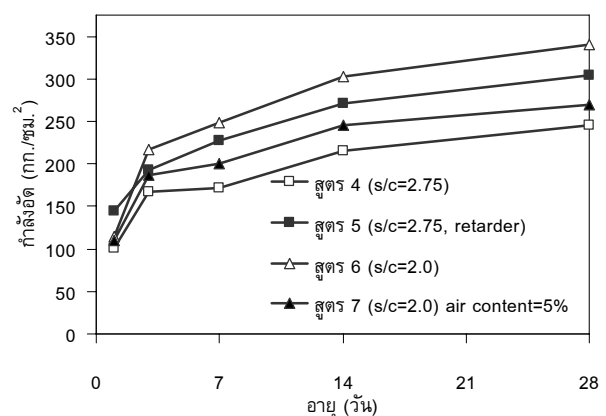
ในรูปที่ 13 นอกจากนั้นเมื่อทำการใส่สารหน่วงการก่อตัว พบว่าพลังงานไมโครเวฟมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุที่สารหน่วงการก่อตัวซึ่งมีโครงสร้างเป็นโพลิเมอร์ผสมกับสารละลายประเภทน้ำ ดังนั้นเมื่อมีพลังงานไมโครเวฟมากระทำกลับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานคือ ทำให้สารหน่วงสามารถมีผลต่อการกระจายโมเลกุลของน้ำภายในได้ดียิ่งขึ้นอันส่งผลต่อปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อาจเกิดช้าลงแต่มีความสมบูรณ์มากขึ้น

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณอากาศ พบว่าปริมาณอากาศที่มากขึ้นมีผลทำให้การพัฒนากำลังอัดเมื่อผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการบ่มด้วยในน้ำและอากาศ

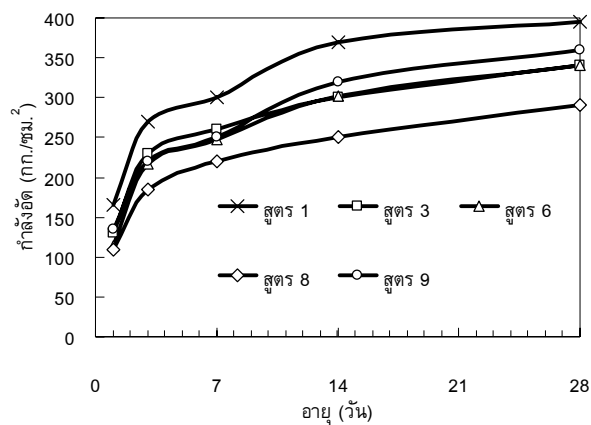


รูปที่ 12 กำลังอัดของคอนกรีตสูตรที่ 2 เมื่อผ่านการบ่มด้วยกรรมวิธีต่างๆ

จากรูปที่ 14 แสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ (สูตรที่ 1) มีค่าสูงสุด ในขณะที่คอนกรีตที่ผสมหินอย่างเดียว (สูตรที่ 8) มีกำลังต่ำสุด เนื่องจากการยึดเกาะและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างลดลง ในขณะที่กรณีอื่นๆ มีการพัฒนาการกำลังอยู่ระหว่าง 2 กรณีข้างต้น ซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ในการผสมคอนกรีต และเป็นการยืนยันว่าผลกำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มไมโครเวฟมีพฤติกรรมสอดคล้องกับการบ่มคอนกรีตด้วยกรรมวิธีปกติ



รูปที่ 13 กำลังอัดของคอนกรีตสูตรที่ 4, 5, 6 และ 7 เมื่อผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบการพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ (สูตรที่ 1 และ 3) มอร์ตาร์ (สูตรที่ 6) และคอนกรีต (สูตรที่ 8 และ 9) เมื่อผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟ (กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์)

4. สรุปผลการศึกษา

พลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องสามารถนำมาประยุกต์ใช้บ่มคอนกรีตเพื่อเร่งกำลังอัดได้โดยสรุปผลการศึกษาดังนี้

4.1 กำลังไมโครเวฟส่งผลโดยตรงต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นของคอนกรีต เนื่องจากกำลังไมโครเวฟส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการกำเนิดความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก ดังนั้นเมื่อกำลังไมโครเวฟสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณการดูดซับพลังงานและกำเนิดความร้อนของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้นทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้นและส่งผลโดยตรงที่ทำให้ปริมาณความชื้นลดลงอย่างรวดเร็ว

4.2 การปรับเปลี่ยนส่วนผสมของคอนกรีต ทั้งปริมาณปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย หิน และปริมาณอากาศ รวมไปถึงการเติมสารหน่วงปฏิกิริยาในคอนกรีตส่งผลโดยตรงต่อสมบัติไดอิเล็กตริก (จากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ) โดยการเติมสารหน่วงการก่อตัวมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่เพิ่มขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

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 Al_2O_3/TiC 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., 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 A (In Press)
- [11] Rattanadecho, P., Watanasungsuit, A., and Atong, D., 2007, Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace, ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering, Volume 129.
- [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, Proceeding. 4th CANMET/ACI/JCI Int. Conf. on Recent Advances in Concrete Technology, Tokoshima, Japan, pp. 531-42.

- [15] Leung, C.K. and Pheeraphan, 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] Figg, J., 1972, Determining the Water Content of Concrete Panels by Using a Microwave Moisture Meter, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 24, pp. 93-96.
- [19] Xuequan, W., Jianbo, D., and Mingshu, T., 1987, Microwave Curing Technique in Concrete Manufacture, *Cement & Concrete Research*, Vol. 21, pp. 205-210.
- [20] Leung, C.K. and Peeraphan, T., 1997, Determination of Optimal Process for Microwave Curing of Concrete, *Cement & Concrete Research*, Vol. 27, pp. 463-472.
- [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] Rattanadecho, P., 2002, Microwave Heating Using a Rectangular Wave guide, *Doctoral Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Japan*.
- [23] Hewlett, P. C., 1998, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons Inc.
- [24] Neville, A.M., 1996, *Properties of Concrete*. Fourth Edition, London: Pitman Books Limited.