

การวิเคราะห์กระบวนการถ่ายเทความร้อนในการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยไมโครเวฟ
ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ตในช่วงการก่อตัวเริ่มต้นและช่วงการก่อตัวสุดท้าย
ในควิตี้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10

Analysis of Heat Transfer in Microwave Curing at an Operating Frequency of
2.45 GHz of Portland Cement Paste Between Early-stage and Final Setting Time
Stage Using TE₁₀ Mode Rectangular Wave Guide Cavity

ณัฐวุฒิสวรรณภูมิ¹*นายนิธิไพโรชมภู²และโสภิตา สังข์สุนทร¹

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (ศาลายา)
96 หมู่ 3 ถนนพหลโยธินสาย 5 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ศูนย์รังสิต)
99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธินอำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: E-mail : nattawut.suw@rmu.ac.th, fitvan@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์ : 02-889-4585-7 ต่อ 2675

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์แบบคลื่นระนาบภายใต้ควิตี้ท่อนำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10 ท่อนำคลื่นมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้าตัด 55 X 110 มิลลิเมตร² ส่งผลให้คลื่นไมโครเวฟมีพฤติกรรมเป็นคลื่นระนาบแบบโหมดเดี่ยวง่ายต่อการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนตัวระบบมีการป้องกันการรั่วไหลของไมโครเวฟไม่เกินมาตรฐานที่ 5 มิลลิวัตต์/เซนติเมตร²) โดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกรณีบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟในช่วงการก่อตัวเริ่มต้นและกรณีบ่มซีเมนต์เพสต์ในช่วงการก่อตัวสุดท้ายผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์สมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์เพสต์ที่ช่วงเวลาต่างๆหลังการผสมโดยตัวแปรที่ใช้คือช่วงเวลาหลังการผสมซีเมนต์เพสต์ในการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (2, 6, 12, 18 และ 24 ชั่วโมง) ความหนาของซีเมนต์เพสต์และสัดส่วนการผสม (อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ 0.38 และ 0.45) สำหรับสมบัติที่ศึกษาได้แก่พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจากผลการศึกษาพบว่าช่วงเวลาหลังการผสมซีเมนต์เพสต์มีผลต่อการกระจายตัวทางความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยไมโครเวฟ

คำหลัก: ไมโครเวฟ, การถ่ายเทความร้อน, ซีเมนต์เพสต์, ช่วงเวลาก่อตัวเริ่มต้น, ช่วงเวลาก่อตัวสุดท้าย.

Abstract

The presented paper investigated heat transfer in microwave curing process of Portland cement paste at an operating frequency of 2.45 GHz and Power of 800 Watt using TE₁₀ mode rectangular waveguide cavity. Because the cross section area of waveguide was 55x110 mm², therefore electro-magnetic behavior was a single mode plane wave which is easy to study of thermal behavior. The microwave leakage was controlled below the standard of 5 mW/cm². Heat transfer of cement paste was discussed between early-stage and final setting time stage. The results were compared with dielectric properties of cement paste. The parameters of this study were cement paste mixed time (2, 6, 12, 18 and 24 hours), thick of cement paste and water cement ratio of cement paste. The results showed that the effect of cement paste mixed time was important roles on thermal distribution in microwave heating using a rectangular waveguide.

Keywords: Microwave, Heating, Cement Paste, Early-stage, Final Setting Time.

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา มีงานวิจัยและการประยุกต์ใช้พลังงานทางเลือกอย่างไมโครเวฟเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนหลากหลายประเภทเช่นการทำอาหาร การอบแห้งและการบ่ม (curing) คอนกรีตเป็นต้น พฤติกรรมทางความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟจะเกิดขึ้นในวัสดุที่อยู่ภายใต้คลื่นไมโครเวฟเองซึ่งความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นไมโครเวฟ (penetration depth) ในวัสดุจะเป็นตัวบ่งบอกถึงความสามารถในการผลิตความร้อนสำหรับการกระจายความร้อนของวัสดุจากพลังงานไมโครเวฟขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด อาทิเช่น โครงสร้างและรูปร่างของวัสดุกำลังและการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟ (power level and microwave field distribution) รวมทั้งสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (dielectric properties) ซึ่งรายละเอียดที่กล่าวมาข้างต้นปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิง [1-20] โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอกสารอ้างอิงของ Mujumdar [1] Metaxas [2] และ Schubert and Rogier [3] ซึ่งเป็นต้นแบบของงานวิจัยเทคนิคกระบวนการสร้างความร้อนจากพลังงานไมโครเวฟ

เทคนิคทางความร้อนในงานคอนกรีตเริ่มต้นขึ้นเมื่อ 40-50 ปีที่ผ่านมาเนื่องจากความร้อนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตทำให้คอนกรีตแข็งตัวและรับกำลังอัดได้รวดเร็วขึ้นและในปัจจุบันการใช้ความร้อนบ่มคอนกรีตเพื่อเร่งการพัฒนา กำลังรับแรงอัดขึ้นพื้นฐานการนำความร้อนจากผิวหน้าวัสดุซึ่งรับความร้อนจากไอน้ำเช่นการบ่มด้วยวิธีออโตคลีฟ (autoclaves curing) สาเหตุสำคัญซึ่งนำไปสู่การพัฒนากรรมวิธีการบ่มเร่งพัฒนากำลังของคอนกรีตคือการเพิ่มประสิทธิภาพในด้านการรับกำลังอัดอย่างรวดเร็วของผลิตภัณฑ์ส่งผลเพิ่มศักยภาพในด้านการก่อสร้างให้รวดเร็วทันกับความต้องการทางธุรกิจสำหรับการใช้เทคโนโลยีไมโครเวฟในการบ่มเร่งพัฒนากำลังของคอนกรีตมีศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากนักวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับงานวิจัยต้นแบบ [11-20]

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ศึกษาโดยใช้คลื่นไมโครเวฟในลักษณะมัลติโหมด (เช่นเตาไมโครเวฟบ้าน) ส่งผลให้การกระจายตัวของคลื่นมีทิศทางและ

ลักษณะไม่แน่นอนเนื่องจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมาภายในภาชนะทำความร้อน ส่งผลให้ไม่สามารถทำนายพฤติกรรมแท้จริงได้

สำหรับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยชิ้นนี้คือการศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในการบ่มซีเมนต์เพสต์ (ปูนซีเมนต์ผสมน้ำ) ด้วยไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ตซ์ในช่วงการก่อตัวเริ่มต้นและช่วงการก่อตัวสุดท้ายในภาชนะที่ทนทานคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมดทีอี 10 เพื่อศึกษา ลักษณะทางความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุซีเมนต์เพสต์ในแต่ละช่วงเวลาหลังการผสมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบพัฒนากระบวนการทำความร้อนในวัสดุคอนกรีตในทางปฏิบัติต่อไปในอนาคต

2. พฤติกรรมระหว่างไมโครเวฟและวัสดุไดอิเล็กตริก

กรรมวิธีไมโครเวฟเป็นการให้ความร้อนเชิงปริมาตร (volumetric heating) และหากขนาดของวัสดุมีค่าน้อยกว่าค่าความลึกทะลุทะลวง (penetration depth) จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนของคลื่น (resonance) [4] ภายในวัสดุทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าไม่เป็นไปตามกฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) (พลังงานไมโครเวฟจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential decay) [2]) ซึ่งการสะท้อนในวัสดุที่เกิดขึ้นส่งผลให้ความเข้มของสนามไมโครเวฟในวัสดุสูงขึ้น

ในการศึกษาความร้อนจากกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟความรู้เกี่ยวกับสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีความจำเป็นเพราะสมบัตินี้ส่งผลต่อการเกิดความร้อนและการกระจายตัวของความร้อนภายในวัสดุที่ผ่านกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟซึ่งความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ [4]

$$\epsilon = \epsilon' + j\epsilon'' = \epsilon_0(\epsilon_r' + j\epsilon_r'') \quad (1)$$

เมื่อ $j = \sqrt{-1}$, ϵ คือ สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุ (complex dielectric permittivity) ซึ่งเป็นสมบัติที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานที่เป็นสนามไฟฟ้าของวัสดุ โดย ϵ_0 คือสมบัติไดอิเล็กตริกของที่ว่าง (free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.86×10^{-12} F/m ϵ_r' เป็นจำนวนจริงของสมบัติไดอิเล็กตริก ใช้อธิบายความสามารถในการส่งผ่าน และ

สะท้อนกลับของคลื่นไมโครเวฟในวัสดุ ϵ_r'' เป็นจำนวนจินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริกใช้อธิบายการสูญเสียพลังงานของคลื่นไมโครเวฟเมื่อผ่านวัสดุ

สำหรับค่าประสิทธิภาพลอสมแทนเจนท์ (loss tangent coefficient ($\tan \delta$)) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่ใช้อธิบายความสามารถในการผลิตความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อถูกคลื่นพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_r' \epsilon_0} \quad (2)$$

นอกจากสมบัติไดอิเล็กตริกจะใช้ในการทำนายพฤติกรรมทางความร้อนแล้วยังมีประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีก อาทิเช่น มีงานวิจัยทางด้านคอนกรีตชั้นหนึ่งที่ใช้สมบัติไดอิเล็กตริกในการหาสัดส่วนน้ำต่อนูนซีเมนต์ในคอนกรีตเหลว (ช่วงเวลาก่อนตัวหลังผสม) [21]

และในการวิเคราะห์การทำความร้อนในวัสดุไดอิเล็กตริก โดยปกติจะใช้ค่ากำลังสองของความเข้มสนามแม่เหล็กในการประมาณค่าการดูดซับพลังงานในวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งค่าการดูดซับหรือความร้อนเชิงปริมาตร (density of microwave power absorbed, Q (W/m^3)) สามารถอธิบายเป็นสมการที่ (1) [11]

$$Q = \sigma |E|^2 = 2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r' (\tan \delta) E^2 \quad (3)$$

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')

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้า ความถี่ไมโครเวฟ และสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่ส่งผลต่อค่าการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในวัสดุ

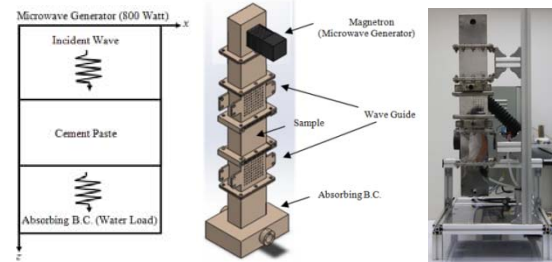
ปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบของสนามไมโครเวฟอีกสิ่งหนึ่งคือค่าความลึกทะลุทะลวง ซึ่งบ่งบอกถึงรูปแบบการกระจายสนามไฟฟ้าในวัสดุ รวมไปถึงสนามอุณหภูมิ ซึ่งค่าความลึกทะลุทะลวงนี้เป็นระยะที่ความเข้มของพลังงานในวัสดุมีค่าเหลือร้อยละ 37 จากพลังงานที่ผิวหน้าวัสดุ [9]ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถหาได้ดังนี้

$$D_p = \frac{1}{\frac{2\pi f}{v} \sqrt{\epsilon_r' \left(\sqrt{1 + (\tan \delta)^2} - 1 \right)}} \quad (4)$$

เมื่อ D_p คือ ค่าความลึกทะลุทะลวง

v คือ ค่าความเร็วคลื่นไมโครเวฟ

3. ระเบียบวิธีทดลอง



(ก) (ข)

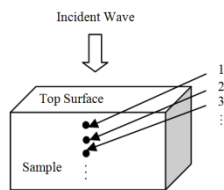
รูปที่ 1 ระบบไมโครเวฟควาร์ตที่นำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10

(ก) โดเมนทางกายภาพที่พิจารณา

(ข) อุปกรณ์สำหรับทดสอบตามเงื่อนไขโดเมน

ระบบไมโครเวฟที่ใช้สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้เป็นระบบไมโครเวฟระบบไมโครเวฟควาร์ตที่นำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมโหมด ทีอี 10 ที่ทางผู้วิจัยพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการเบื้องต้นคือ วัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการจะถูกใส่ไว้ในบริเวณตำแหน่งวางชิ้นงานภายในควาร์ตแบบสี่เหลี่ยม (rectangular cavity) ที่มีขนาดหน้าตัดตลอดท่อเท่ากับ 55×110 มิลลิเมตร² ซึ่งด้านบนของท่อนำคลื่นจะติดตั้งแมกนีตรอน (magnetron) ความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) กำลัง 800 วัตต์ไว้จำนวน 1 ตัว เพื่อกำเนิดคลื่นและป้อนคลื่นระนาบ (โหมดทีอี 10) เพื่อกำเนิดความร้อนภายในวัสดุที่นำมาผ่านกระบวนการ (รูปที่ 1) ระบบไมโครเวฟมีระบบการดักคลื่นไมโครเวฟที่อาจรั่วไหลออกมาเพื่อไม่ให้เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งค่าการรั่วไหลมีมาตรฐานอยู่ไม่เกิน 5 มิลลิวัตต์/ตารางเซนติเมตร (mW/cm^2) สำหรับการวัดอุณหภูมิวัสดุทดสอบนั้นทางผู้วิจัยมีข้อจำกัดในด้านอุปกรณ์การวัด ที่ไม่สามารถใช้วัดในขณะที่เกิดคลื่นไมโครเวฟได้ (เทอร์โมคัปเปิลเป็นโลหะซึ่งเป็นตัวนำยิ่งยวดจะส่งผลโดยตรงต่อพฤติกรรมของการกระจายตัวของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า) ส่งผลให้ไม่สามารถวัดได้โดยตรงในขณะที่ทำการทดลอง ดังนั้นการวัดอุณหภูมิ จึงใช้วิธีการนำชิ้นงานทดสอบออกมาวัดอุณหภูมิในจุด

กึ่งกลางภายในวัสดุ ณ ตำแหน่งต่างๆ (รูปที่ 2) ในเวลา
การทำความร้อนที่กำหนดไว้ ตั้งแต่ 10, 20, 30, 40, 50
และ 60 วินาที (ชิ้นงานหลังนำออกมาวัดอุณหภูมิตาม
เวลาทำความร้อนที่กำหนดจะถูกทิ้งทันทีและใช้ชิ้นงาน
ทดสอบใหม่ในเวลาทำความร้อนถัดไป) โดยอุปกรณ์เก็บ
บันทึกอุณหภูมิร่วมกับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการ
วัดอุณหภูมิชิ้นงาน และตรวจสอบเพิ่มเติมโดยใช้
อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ (ความแม่นยำในช่วง ± 0.5
องศาเซลเซียส) วัดอุณหภูมิที่ผิววัสดุเปรียบเทียบกับขณะทำ
การวัด (รูปที่ 3)



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิด้วยอินฟราเรด
เทอร์โมมิเตอร์

(ตำแหน่งแรกวัดจากผิวด้านบนของวัสดุลงมา 0.5 ซม.
จากนั้นวัดทุกระยะอีก 1 ซม. ตลอดความหนาชิ้นงาน)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 อุปกรณ์เก็บค่าอุณหภูมิ

(ก) อินฟราเรดเทอร์โมมิเตอร์ ของ EXTECH
โมเดล 42515

(ข) อุปกรณ์เก็บบันทึกอุณหภูมิของ DATATAKER
รุ่น DT80M พร้อมสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K



(ก)

(ข)

รูปที่ 4 กล้องถ่ายภาพความร้อน ของ FLIRโมเดล T640

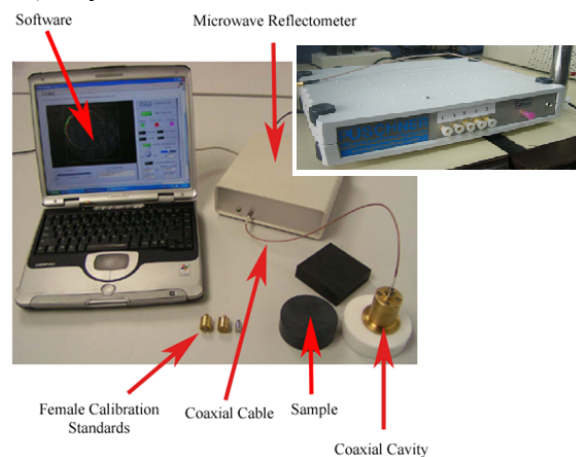
(ก) ตัวกล้องถ่ายภาพความร้อน

(ข) ภาพถ่ายและรายละเอียดที่ได้จากกล้อง

นอกจากนั้นได้ทำการวัดลักษณะการกระจายตัว
อุณหภูมิเพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมอุณหภูมิในวัสดุ

ซีเมนต์เพสต์อีกครั้งด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนของ
FLIRโมเดล T640 (รูปที่ 4)

สำหรับวัสดุทดสอบเป็นซีเมนต์เพสต์ขนาด
30x55x110, 50x55x110 และ 80x55x110 ลูกบาศก์
มิลลิเมตร (mm^3) ตามลำดับ โดยทำการผสมปูนซีเมนต์
ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำประปา (ค่าความกรด
ต่าง (pH) เท่ากับ 7.0) ตามขั้นตอนในมาตรฐาน ASTM C
305 [22] สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ที่ทำการทดสอบ
สามารถดูรายละเอียดได้ดังตารางที่ 1 หลังจากผสมจึงนำ
ซีเมนต์เพสต์ใส่แบบหล่อและหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อป้องกันการ
สูญเสียความชื้นและปล่อยให้วัสดุแข็งตัวตามปฏิกิริยา
เคมีแล้วถอดแบบตามช่วงระยะเวลาทดลองที่กำหนด
ได้แก่ ที่อายุ $2\frac{1}{2}\pm\frac{1}{2}$ ชั่วโมง, $6\frac{1}{2}\pm\frac{1}{2}$ ชั่วโมง, $12\frac{1}{2}\pm\frac{1}{2}$
ชั่วโมง, $18\frac{1}{2}\pm\frac{1}{2}$ ชั่วโมง และ $24\frac{1}{2}\pm\frac{1}{2}$ ชั่วโมง. ในส่วน
การทำความร้อนซีเมนต์เพสต์ด้วยไมโครเวฟนั้นทำโดยนำ
ซีเมนต์เพสต์ที่ถอดแบบมาใส่ในภาชนะที่ทนความร้อนแบบ
สแตนเลสและให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์เป็นเวลา 60 วินาที และทดสอบหา
ค่าอุณหภูมิตามลำดับ

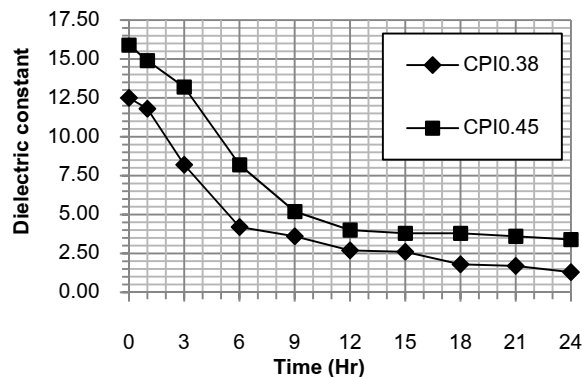
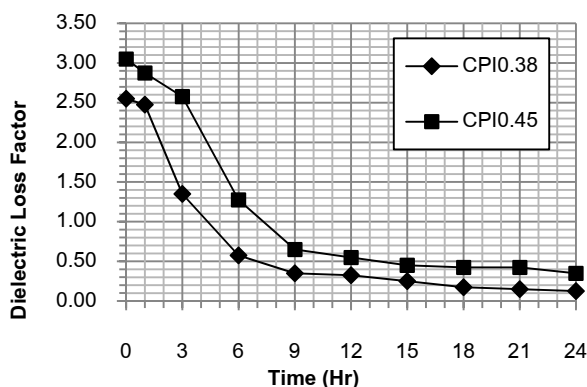


รูปที่ 5 เครื่องเน็ตเวิร์คโคนาไลเซอร์ ของ Puschner

ในส่วนของการวัดค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของซีเมนต์
เพสต์หลังผสมนั้น ทำโดยการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของ
วัสดุหลังการผสมตั้งแต่เริ่มต้นไปจนครบ 24 ชั่วโมง (0, 1,
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ) ด้วย
เครื่องเน็ตเวิร์คโคนาไลเซอร์ ของ Puschner (รูปที่ 5) ซึ่ง
ได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ CEEE จาก
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ตารางที่ 1 สัดส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

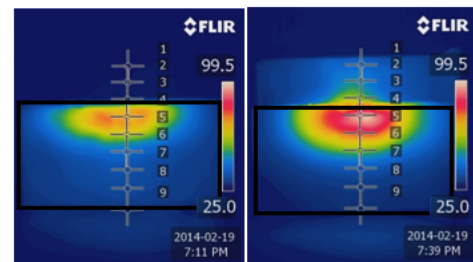
สูตร	ปูนซีเมนต์ (กก.)	น้ำ (กก.)
1 w/c =0.38 (CPI0.38)	1	0.38
2 w/c =0.45 (CPI0.45)	1	0.45

รูปที่ 6 จำนวนจริงของสมบัติไดอิเล็กตริก
(ไดอิเล็กตริกคอนสแตนท์)รูปที่ 7 จำนวนจินตภาพของสมบัติไดอิเล็กตริก
(ไดอิเล็กตริกทอสแฟกเตอร์)

4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

เมื่อพิจารณารูปที่ 6 และ 7 ซึ่งแสดงพฤติกรรมสมบัติไดอิเล็กตริก ที่เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมหลังจากเริ่มผสมจนครบ 24 ชั่วโมงพบว่า ซีเมนต์เพสต์ทั้งสองส่วนผสมมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสมบัติไดอิเล็กตริกในส่วนในส่วนค่าไดอิเล็กตริกคอนสแตนท์ และไดอิเล็กตริกทอสแฟกเตอร์ (ดังสมการที่ (1)) ซึ่งค่าทั้งสองส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในตัววัสดุซึ่ง ส่งผลโดยตรงต่อลักษณะการกำเนิดความร้อน (ดังสมการที่ 3) ซึ่งค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่มากโดย

ธรรมชาติจะมีความสามารถในการทะลุทะลวงต่ำกว่าค่าสมบัติไดอิเล็กตริกที่มีค่าน้อย ดังนั้นการที่สมบัติไดอิเล็กตริกที่ลดลงของซีเมนต์เพสต์ทั้งสองสูตรหลังการผสมจึงส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่ได้รับความร้อนจากไมโครเวฟดีขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งสามารถสังเกตเพิ่มเติมได้ดังรูปที่ 8

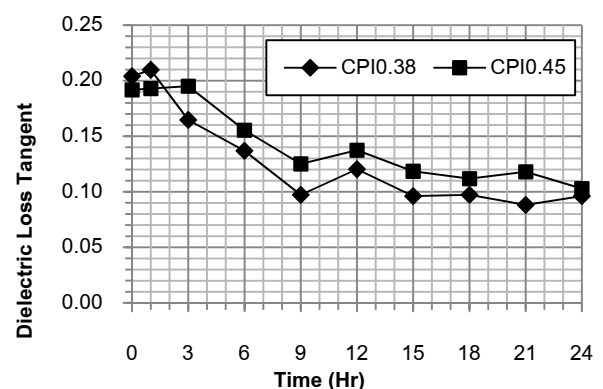


(ก)

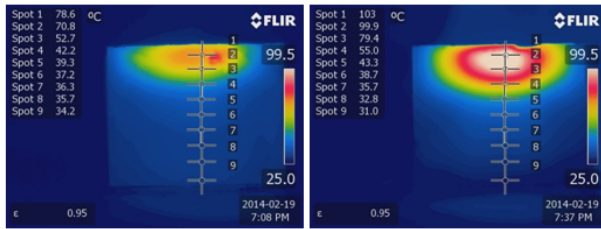
(ข)

รูปที่ 8 การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์
(W/C 0.38) ขนาดความหนา 50 มม. เมื่อผ่าน
กระบวนการไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 60 วินาที(ก) หลังผสม $2\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง(ข) หลังผสม $24\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง

นอกจากนั้นในรูปที่ 9 เมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์ลอสมแทนเจนต์ ของสมบัติไดอิเล็กตริก (รายละเอียดดังสมการที่ (2)) ที่เป็นปัจจัยโดยตรงต่อการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตรในกระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (รายละเอียดดังสมการที่ (3)) พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสูตรและมีความแตกต่างกันของค่าในแต่ละช่วงเวลาไม่มากนัก แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบช่วงเวลาหลังการผสมพบว่า ความร้อนในช่วงเวลาเริ่มผสมหรือช่วงการก่อตัวเริ่มต้น จะมีค่าสูงสุดและจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาจนกระทั่งเข้าสู่ช่วงการก่อตัวสุดท้ายที่พิจารณา (24 ชั่วโมง)



รูปที่ 9 สัมประสิทธิ์ลออสแทนเจนท์ ($\varepsilon''/\varepsilon'$) ของสมบัติ
ไดอิเล็กทริกที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา



(ก)

(ข)

รูปที่ 10 การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์
(W/C 0.38) ขนาดความหนา 80 มม. เมื่อผ่าน
กระบวนการไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 60 วินาที

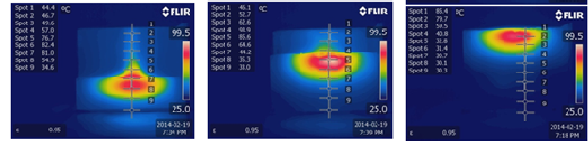
(ก) หลังผสม $2\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง

(ข) หลังผสม $24\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง

อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าความร้อน Q ที่เกิดขึ้นในช่วง
ต้นจากการตั้งเงื่อนไขที่พิจารณาจากค่าลออสแทนเจนท์ที่
เปลี่ยนแปลงไป (ค่ากำลังงานจากสนามไฟฟ้า E คงที่)
จากข้อมูลในรูปที่ 9 ซึ่งควรจะให้ผลอุณหภูมิที่ระยะเวลา
การทำความร้อนด้วยไมโครเวฟหลังจากผสมซีเมนต์เพสต์
ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง มากกว่าการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ
หลังจากผสมซีเมนต์เพสต์ทิ้งไว้ 2 ชั่วโมง แต่ผลลัพธ์ที่ได้
จากการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิพบว่าผลการ
กระจายตัวของอุณหภูมิเป็นไปในทิศทางตรงกันข้ามดังรูป
ที่ 10 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลที่นั่นจะเป็นไปได้ อาจเกิดจาก
ในช่วงต้นของการผสมมีปริมาณน้ำจำนวนมากที่ยังเป็นน้ำ
อิสระ ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเมื่อ
เปรียบเทียบค่าความจุความร้อนของน้ำ ($4.184 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)
และคอนกรีต ($0.880 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) จากเอกสารอ้างอิง[23]
พบว่ามีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นในปริมาณความร้อนที่
เท่ากัน ซีเมนต์เพสต์เหลว (ช่วงการก่อตัวเริ่มต้น) จึงควรมี
อุณหภูมิต่ำกว่า ซีเมนต์เพสต์แข็ง (ช่วงการก่อตัวสุดท้าย)
ดังรูปที่ 10 ที่ปรากฏขึ้น

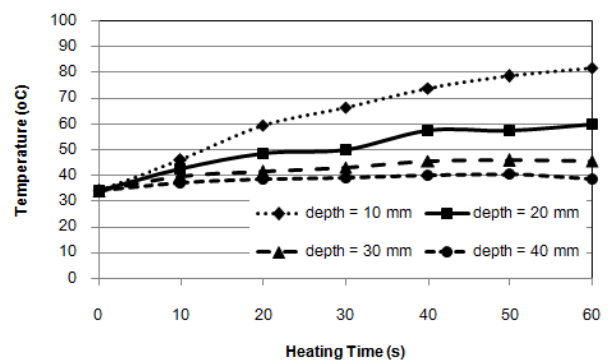
เมื่อพิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์ลออสแทนเจนท์ ของ
สมบัติไดอิเล็กทริก (รายละเอียดดังสมการที่ (2)) ที่เป็น
ปัจจัยโดยตรงต่อการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาณใน
กระบวนการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟ (รายละเอียดดัง
สมการที่ (3)) พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกันทั้งสองสูตรและ
มีความแตกต่างกันของค่าในแต่ละช่วงเวลาไม่มากนัก แต่
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบช่วงเวลาหลังการผสมพบว่า

ความร้อนในช่วงเวลาเริ่มผสมหรือช่วงการก่อตัวเริ่มต้น
จะมีค่าสูงสุดและจะค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาจนกระทั่ง
เข้าสู่ช่วงการก่อตัวสุดท้ายที่พิจารณา (24 ชั่วโมง)



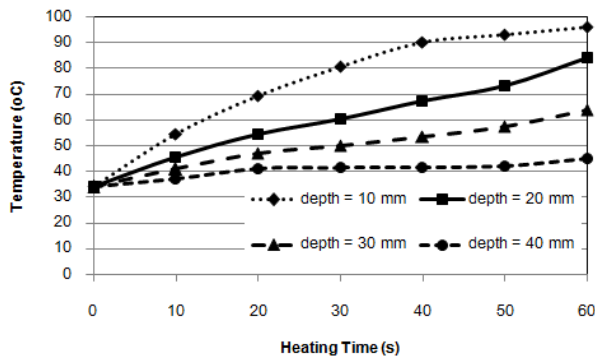
รูปที่ 11 การกระจายตัวของอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์
(W/C 0.38) ขนาดความหนา 30, 50 และ 80 มม. เมื่อ
ผ่านกระบวนการไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 60 วินาที

จากรูปที่ 11 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความหนา
ของวัสดุที่มีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิในซีเมนต์
เพสต์พบว่า ในช่วงความหนาดังกล่าว การกระจายตัว
ตามระยะความลึกมีลักษณะใกล้เคียงกัน คือร้อนบริเวณ
ผิวหน้าด้านบนโดยมีจุดร้อนสูงสุดที่ระยะต่ำกว่าผิวหน้า
ด้านบนประมาณ 10 มม. และอุณหภูมิจะลดต่ำลงที่ระยะ
ที่ลึกขึ้น โดยบริเวณความร้อนที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงความลึก
0 - 25 มม. จากข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟที่
ความถี่ 2.45 GHz สามารถที่สร้างความร้อนในวัสดุ
ซีเมนต์เพสต์ที่มีความหนาไม่สูงมากนัก หากมีความหนา
มากกว่า 30 มม. ความร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำอย่างมาก
ดังนั้นไมโครเวฟที่ความถี่นี้น่าจะเหมาะสมกับซีเมนต์
เพสต์ที่มีความหนาไม่เกิน 30 มม. และจากภาพความร้อน
ดังกล่าวอาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า ในกรณีซีเมนต์เพสต์ที่
มีความหนาเกิน 30 มม. หรือมีความหนาเกินค่าระยะ
ทะลุทะลวง (รายละเอียดดังสมการที่ (4)) สามารถที่จะใช้
กฎของแลมเบิร์ต (อุณหภูมิจะลดลงในลักษณะเอ็กซ์
โปเนนเชียล)



รูปที่ 12 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45ขนาด
หนา 50 มม.ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์

ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง



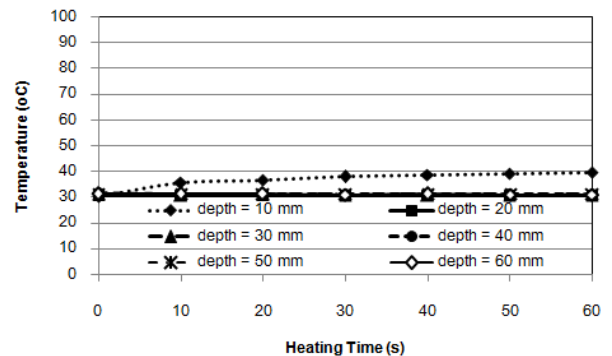
รูปที่ 13 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.38 ขนาด
หนา 50 มม. ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์
ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง

เมื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของการเกิดความร้อนที่
สัดส่วนผสมซีเมนต์เพสต์ต่างกันที่ระยะเวลาเดียวกัน จาก
ข้อมูลค่าลอสมแทนเจนทีในรูปที่ 9 ที่อธิบายไปข้างต้นว่ามี
ค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อวิเคราะห์อุณหภูมิเปรียบเทียบจุด
ตามระยะลึก (รูปที่ 12 และ 13) พบว่า ที่สัดส่วน w/c
0.38 (น้ำน้อย) ให้ผลอุณหภูมิที่สูงกว่า w/c 0.45 (น้ำ
มาก) ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากสมบัติค่าความจุความร้อน
เช่นเดียวกับกรณีก่อนหน้า แต่การวิเคราะห์ใน
รายละเอียดเชิงลึก คงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปใน
อนาคต

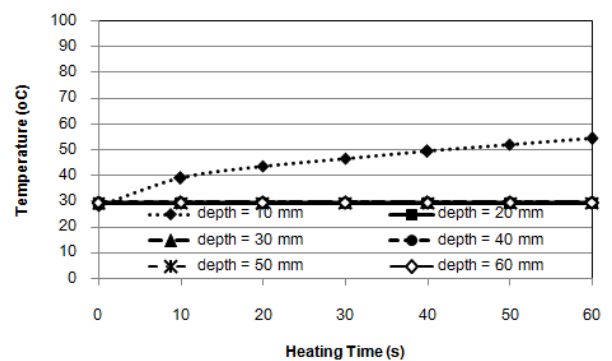
ในส่วนของการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการให้
ความร้อนด้วยไมโครเวฟและการให้ความร้อนด้วยการพา
ความร้อนที่ผิว จากรูปที่ 14 ถึง 17 พบว่า การให้
พลังงานความร้อนด้วยไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์สามารถ
ให้อุณหภูมิที่สูงอย่างรวดเร็วภายในระยะเวลา 60 วินาที
ในขณะที่การพาความร้อนที่ผิวใช้กำลังไฟฟ้าจากอุปกรณ์
ผลิตความร้อน 900 วัตต์ (อุณหภูมิความร้อนตลอดการทดลอง
ประมาณ 80 องศา) มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่
น้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับไมโครเวฟ และการกระจาย
ตัวของอุณหภูมิแยกกว่าอีกด้วย ทั้งในกรณีช่วงเวลาก่อตัว
เริ่มต้น และช่วงเวลาก่อตัวสุดท้าย

อย่างไรก็ตามในงานทดสอบครั้งนี้ ในการวิเคราะห์
การใช้พลังงานไมโครเวฟทำความร้อนในซีเมนต์เพสต์ที่
ช่วงการก่อตัวเริ่มต้น (2 ชั่วโมง) พบว่า ในกรณี w/c
0.45 ชิ้นงานทดสอบส่วนใหญ่เกิดความเสียหายจากการ
กระจายตัวของอุณหภูมิ ในขณะที่กรณี w/c 0.38
ชิ้นงานไม่เกิดความเสียหาย (ดังรูปที่ 18) ทั้งนี้เพราะ

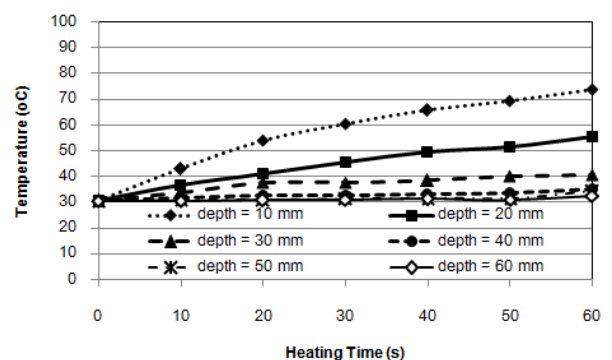
ซีเมนต์เพสต์ที่มีปริมาณน้ำส่วนเกินในการผสมน้อย (w/c
ต่ำ) จะเกิดความแข็งแรงของโครงสร้างจากปฏิกิริยาไฮ
เดรชันได้รวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือไหลเข้าแบบยาก และผล
ที่ได้บ่งบอกได้เป็นนัยว่าการใช้ไมโครเวฟทำความร้อนเร็ว
เกินไปก่อนที่จะมีโครงสร้างที่แข็งแรงในระดับหนึ่ง
แทนที่จะได้ซีเมนต์เพสต์ที่มีสมบัติรับแรงที่ดีขึ้นอย่าง
รวดเร็ว แต่อาจจะทำให้วัสดุเกิดความเสียหายจนไม่
สามารถใช้งานได้เลยก็เป็นได้



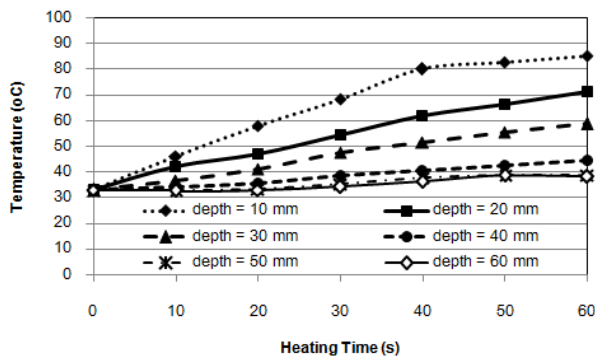
รูปที่ 14 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาด
หนา 80 มม. ด้วยการพาความร้อนที่ผิวด้วยลมร้อน
อุณหภูมิ 80 °C ที่เวลาหลังผสม 2 ชั่วโมง



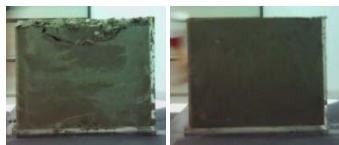
รูปที่ 15 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาด
หนา 80 มม. ด้วยการพาความร้อนที่ผิวด้วยลมร้อน
อุณหภูมิ 80 °C ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง



รูปที่ 16 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาด
หนา 80 มม. ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์
ที่เวลาหลังผสม 2 ชั่วโมง



รูปที่ 17 การให้ความร้อนซีเมนต์เพสต์ w/c 0.45 ขนาด
หนา 80 มม. ด้วยไมโครเวฟ กำลัง 800 วัตต์
ที่เวลาหลังผสม 24 ชั่วโมง



(ก)

(ข)

รูปที่ 18 ชิ้นงานความหนา 80 มม. หลังจากผสมเป็นเวลา
 $2\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง เมื่อนำไปผ่านกระบวนการไมโครเวฟ
ที่ระยะเวลา 1 นาที

(ก) w/c 0.45

(ข) w/c 0.38

5. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาการทำความร้อนซีเมนต์เพสต์ที่ระยะเวลาการก่อดำเนินการและการก่อดำเนินการด้วยพลังงานไมโครเวฟความถี่ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ แบบคลื่นระนาบภายใต้ความถี่ที่นำคลื่นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ 10 สามารถกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

พลังงานไมโครเวฟสามารถทำความร้อนและให้การกระจายตัวของอุณหภูมิในวัสดุได้ดีกว่ากรรมวิธีการพาความร้อนที่กำลังงานป้อนเข้าใกล้เคียงทุกกรณีจากการทดลอง

สมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุมีค่าลดลงตลอดเวลาทั้งค่าไดอิเล็กตริกอสคอนสแตนท์และค่าไดอิเล็กตริกอสสแฟกเตอร์ ซึ่งส่งผลให้การกระจายตัวของอุณหภูมิใน

ซีเมนต์เพสต์ในช่วงระยะเวลาการก่อดำเนินการที่ดีกว่าช่วงระยะเวลาการก่อดำเนินการเล็กน้อย

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ ณ ช่วงเวลาการก่อดำเนินการ มีค่าต่ำกว่าช่วงระยะเวลาการก่อดำเนินการเนื่องจากสมบัติทางความร้อนของซีเมนต์เพสต์ที่เปลี่ยนไป (มีปริมาณน้ำอิสระที่มีค่าความจุความร้อนสูงน้อยลง)

สัดส่วนผสมของน้ำในการผสมซีเมนต์เพสต์มีผลต่อทั้งความสามารถในการรับความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแล้วไม่เกิดความเสียหายในช่วงการก่อดำเนินการ และส่งผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิ กล่าวคือซีเมนต์เพสต์ที่มีสัดส่วนผสมน้ำน้อยลงจะมีความแข็งแรงทางโครงสร้างที่สามารถนำมาผ่านการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟเร็วกว่า และตัววัสดุมีอุณหภูมิเมื่อได้รับพลังงานไมโครเวฟที่เท่ากันสูงกว่าเช่นกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้และ ศูนย์ Center of Excellence in Electromagnetic Energy Utilization in Engineering (CEEE) จากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในการอนุเคราะห์เครื่องมือวัดสมบัติไดอิเล็กตริก

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), 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] Rattanadecho, 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., Watanasungsuit, A., and Atong D., (2007), Drying of Dielectric Materials Using Microwave-Continuous Belt Furnace., *ASME J. Manufacturing Sciences and Engineering*, Volume 129 (1).
- [11] Rattanadecho P., Suwannapum N., Chatveera B., Atong D., and Makul N., (2008), Development of compressive strength of cement paste under accelerated curing by using a continuous microwave thermal processor, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 472, Issues 1-2, , pp. 299-307
- [12] Watson, A., (1968), Curing of Concrete, *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] Leung, C.K. and Peeraphan, T., (1995), Very High Early Strength of Microwave Cured Concrete, *Cement & Concrete Research*, 25[1], pp. 136-46.
- [15] 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.
- [16] Jeevaka S., Deepak R., and Narayanan N., (2010), Response of alkali activated fly ash mortars to microwave curing, *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, Issue 12, pp 1688-1696.
- [17] Benedetto A., and Calvi A., (2013), A pilot study on microwave heating for production and recycling of road pavement materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 44, pp 351-359.
- [18] Holtz E., Ahn L., Rittenauer M., And Rasmuson A., (2010), Influence of dielectric and sorption properties on drying behaviour and energy efficiency during microwave convective drying of selected food and non-food inorganic materials, *Journal of Food Engineering*, Vol. 97, Issue 2, pp. 144-153.
- [19] Makul N., Rattanadecho P., and Agrawal D.K., (2010), Microwave curing at an operating frequency of 2.45 GHz of Portland cement paste at early-stage using a multi-mode cavity: Experimental and numerical analysis on heat transfer characteristics, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, Issue 10, pp. 1487-1495.

- [20] Makul N., Keangin P., Rattanadecho P., Chatveera B., and Agrawal D.K., (2010), Microwave-assisted heating of cementitious materials: Relative dielectric properties, mechanical property, and experimental and numerical heat transfer characteristics, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, Issue 8, pp. 1096–1105.
- [21] Wei C., Peiliang S., and Zhonghe S., (2012), Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement, *Construction and Building Materials*, Vol. 34, , pp, 306–312.
- [22] American Society for Testing and Materials, (2006), *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 4, No. 02, Philadelphia, PA, USA.
- [23] Yunus A. Çengel, (2011), *Heat and Mass Transfer (SI Unit) 4th edition*, McGraw-Hill Education, Europe.