

การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ

โดยใช้เตาชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง

Development of Compressive Strength of Cement Paste with Microwave Energy

by Using A Continuous Belt Furnace

บุรฉัตร นัตถวีระ^[1], ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช^[2], ดวงเดือน อางองศ์^[3], ณรงค์ศักดิ์ มากุล^[4] และ ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ^[5]^{[1],[4]} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12121^{[2],[5]} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คลองหลวง ปทุมธานี 12121^[3] ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย คลองหลวง ปทุมธานี 12121

Email: cburacha@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอนวัตกรรมใหม่ของการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟโดยใช้เตาไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง (โครงสร้างภายในตัวเครื่องประกอบด้วยแมกนีตรอนซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ระดับความถี่ 2.45 กิโลเฮิร์ต (GHz) ขนาด 800 วัตต์ จำนวน 14 ตัว ติดตั้งไว้บริเวณโดยรอบผนังอุโมงค์) โดยทำการศึกษาทั้งในส่วนของการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อผ่านการบ่มในช่วงต้นด้วยพลังงานไมโครเวฟ ผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ซึ่งผ่านการบ่มด้วยน้ำและอากาศ และตรวจสอบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์เพื่อหาความสัมพันธ์กับคุณสมบัติเชิงกลหลังจากผ่านการบ่ม ตัวแปรสำหรับการศึกษานี้จะเน้นถึงอิทธิพลทางความร้อนจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และเวลาที่ใช้ในการบ่ม จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าพลังงานไมโครเวฟสามารถช่วยเร่งกำลังอัดในช่วงต้นของซีเมนต์เพสต์ได้บ้าง

Abstract

This paper presents the innovative curing of cement paste with microwave energy by using continuous belt furnace. Its internal structure included 14 magnetrons, microwave generating sources at the frequency level of 2.45 Gigahertz (GHz) and power of 800 watts, built at the wall of furnace. This study included the heat transfer analysis taking place during the curing of cement paste with microwave energy and the compressive strength development of cement paste. The tested results were compared with those of the normal cement paste that were cured in water and air. Internal structures of cement paste were investigated for determining the relationship with mechanical properties

after curing. The variables were emphasized on the thermal influences from using microwave energy, properties of cement paste, and time of curing. The test results concluded that microwave energy could not only accelerate the early compressive strength of cement paste without affecting strength at the age of 28 days.

1. บทนำ

ภายใต้สภาวะที่อัตราการแข่งขันของตลาดการผลิตคอนกรีตสูงในปัจจุบันทำให้ต้องมีการพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ทางด้านเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตเพื่อให้ผลิตภัณฑ์คอนกรีตออกสู่ท้องตลาดได้อย่างรวดเร็วและมีคุณภาพตามมาตรฐาน โดยเฉพาะวิธีการพัฒนากำลังรับแรงของคอนกรีตซึ่งโดยปกติการใช้งานคอนกรีตจะต้องใช้เวลามากกว่า 1 วันเป็นอย่างน้อย เพื่อให้คอนกรีตมีความสามารถรับแรงที่เพียงพอและต้องบ่มในน้ำอย่างต่อเนื่อง [1] แต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถกระทำโดยใช้เวลาการบ่มที่เวลานานมากได้ เนื่องจากเหตุผลหลายประการ ดังนั้นการพัฒนากำลังรับแรงโดยใช้เวลาน้อยลงจะทำให้เกิดผลประโยชน์มากที่สุด แต่เนื่องจากการบ่มด้วยการเร่งกำลังในหลายวิธีมีข้อเสีย อาทิเช่น การเร่งกำลังด้วยวิธีโอโตเคลฟมีข้อเสียตรงที่การกระจายความร้อนภายในคอนกรีตไม่สม่ำเสมอทำให้ความผันแปรของคุณสมบัติมีมากและต้องใช้เวลาบ่มนานกว่า 1 วัน [2] จึงจะทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังได้ตามกำหนด ในขณะที่การใช้สารเร่งการพัฒนากำลังมีผลต่อความทนทานของคอนกรีตในระยะยาว [3]

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการนำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่คลื่นของไมโครเวฟ (ความถี่ในช่วง 0.3 - 300 กิโลเฮิร์ต (GHz) หรือ ในช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 30 ซม. - 0.3 มม.) มาใช้เป็นแหล่งพลังงานให้ความร้อนเพื่อใช้แปรรูปวัตถุต่างๆ ทางอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น การวัลคาไนซ์ยางธรรมชาติ (Natural Rubber Vulcanization) การละลายเนื้อแข็งเป็นต้น โดยลักษณะเฉพาะของการให้ความร้อนต่อวัตถุด้วยไมโครเวฟเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ และ

ไม่เหมือนวิธีการให้ความร้อนแบบเก่าที่ให้ความร้อนจากภายนอกผ่านผิววัตถุในระหว่างที่รังสีไมโครเวฟผ่านเข้าไปในวัตถุพลังงานของไมโครเวฟจะลดลงโดยจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนภายในวัตถุ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟดีกว่าการให้ความร้อนแบบการนำความร้อนและพาความร้อน ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์เนื่องจากความไม่สม่ำเสมอของการกระจายอุณหภูมิและความชื้นภายในผลิตภัณฑ์นั้น [4] รวมถึงถึงผลงานวิจัยของกลุ่มผู้วิจัยเองที่ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ไมโครเวฟกับกระบวนการทำความร้อนอบแห้ง การทำลายในวัสดุไดอิเล็กตริกดังได้แสดงในเอกสารอ้างอิง [5-7]

การให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟจะอาศัยคุณสมบัติของการดูดกลืนพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟภายในผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาผ่านกระบวนการนี้ต้องเป็นวัสดุประเภทวัสดุไดอิเล็กตริก หมายถึงวัสดุทั้งมวลที่มีโครงสร้างพื้นฐานทางจุลภาคมีลักษณะเป็นขั้วทางไฟฟ้า (Dipoles) ซึ่งอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างขั้ว (Dipoles) และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดความร้อนภายในขึ้น (Internal Heat Generation) ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะกระจายความร้อนจากภายในออกสู่ผิวหน้า ซึ่งหลักการนี้จะทำให้ผิวของผลิตภัณฑ์ไม่เสียหายหรือต่างไปจากเดิมมากนัก เนื่องจากวิธีการดังกล่าวระบบนี้จะทำให้เกิดการระเหยของความชื้นภายในผลิตภัณฑ์เป็นไปอย่างรวดเร็วและมีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอสามารถลดการเกิดรอยร้าวและรอยไหม้ในผลิตภัณฑ์ซึ่งการใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมได้หลายประเภท [4]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตคอนกรีตได้ แต่ในประเทศไทยยังมีการศึกษาในประเด็นนี้น้อยมาก อันเนื่องมาจากความซับซ้อนของกระบวนการและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการให้ความร้อนกับคอนกรีตด้วยวัตถุประสงค์แตกต่างกันออกไป เช่น การใช้พลังงานไมโครเวฟเพื่อกระแทกชั้นของคอนกรีตซึ่งปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตภาพรังสี [8] การพัฒนากระบวนการกระแทกชั้นคอนกรีตซึ่งปนเปื้อนโดยอาศัยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ [9] รวมไปถึงการพัฒนาการเร่งการบ่มคอนกรีตโดยใช้ระบบไมโครเวฟบ้าน [10]

โดยหลักการทำงานของคลื่นไมโครเวฟที่มีต่อคอนกรีตคือการถ่ายเทพลังงานจากสนามไฟฟ้า (Electric Field, E) ไปยังพันธะระหว่างโมเลกุลของวัสดุเป็นผลให้พันธะเกิดการสั่นและเกิดความร้อนกระจายและตามมาด้วยการเคลื่อนที่ของสสารภายในวัตถุ หลังจากนั้นการแผ่กระจายของพลังงานไมโครเวฟจะทำให้การกระจายของอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอและเป็นสาเหตุให้เกิดอุณหภูมิสูงสุดได้ผิวของคอนกรีตซึ่งปกติจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำภายในคอนกรีต (น้ำในคอนกรีตจะประกอบด้วย 3 ส่วน [11] คือ น้ำที่ประกอบอยู่ภายในโครงสร้างของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (C-S-H) น้ำระหว่างชั้นของแคลเซียมซิลิเกต

ไฮดรอกไซด์และผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮดรอกไซด์และน้ำในโพรงคาวลาร์หรือน้ำส่วนเกิน (Residual Water)) ไปเป็นไอน้ำไคความดันสูงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การใช้พลังงานไมโครเวฟยังทำให้พันธะการยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างโมเลกุลของคอนกรีตเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทำให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้น

งานวิจัยหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกล (กำลังอัด) ของซีเมนต์เพสต์ซึ่งเป็นรูปแบบพื้นฐานของคอนกรีต ซึ่งจะทำการศึกษาทั้งในส่วนของการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ การพัฒนากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่อง ผลที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับกรรมวิธีบ่มด้วยน้ำและอากาศ และการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ (SEM) เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติเชิงกลหลังจากผ่านกระบวนการ สำหรับการศึกษารังสีนี้จะเน้นถึงอิทธิพลทางความร้อนจากการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ คุณสมบัติของซีเมนต์เพสต์และเวลาที่ใช้ในการบ่มที่มีผลต่อกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

2. ทฤษฎีพื้นฐานของการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

2.1 การกระจายความร้อนและการกระจายตัวของคลื่น

เมื่อวัสดุไดอิเล็กตริกเช่น ไม้ กระดาษ พลาสติก อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าโมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกจะหมุนและเคลื่อนที่หลายล้านครั้งต่อวินาทีตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าซึ่งพลังงานไมโครเวฟหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อผ่านเข้าไปยังวัสดุไดอิเล็กตริกพลังงานบางส่วนจะสะท้อนกลับที่บริเวณผิวหน้าวัสดุ บางส่วนจะทะลุผ่านวัสดุและบางส่วนจะถูกดูดกลืนไว้ภายในวัสดุไดอิเล็กตริกซึ่งพลังงานในส่วนที่ดูดกลืนนี้เป็นพลังงานที่ใช้ในการทำให้โมเลกุลของวัสดุไดอิเล็กตริกเคลื่อนตัวและก่อเกิดเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งมีผลมาต่อกระบวนการทำความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

2.2 สมการพื้นฐาน

คลื่นไมโครเวฟเมื่อทะลุผ่านวัสดุไดอิเล็กตริกจะถูกดูดซับและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เรียกว่าการก่อกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (Density of Microwave Power Absorbed, Q (W/m^3)) ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กภายในวัสดุไดอิเล็กตริก [4] อย่างไรก็ตามวัสดุไดอิเล็กตริกไม่มีผลต่อสภาพเชิงขั้วแม่เหล็กเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงไม่มีสนามแม่เหล็กสูญเสียในระหว่างการแผ่รังสีไมโครเวฟ การเปลี่ยนแปลงเฟสของสนามไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยเวลาจะเร็วมาก ดังนั้นค่าเฉลี่ยรากที่สองของความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกใช้ในการประมาณค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับโดยวัสดุไดอิเล็กตริกเมื่อสมมติให้มีการสูญเสียสนาม

แม่เหล็ก ค่าของการกำเนิดปริมาณความร้อนภายในต่อหนึ่งหน่วย ปริมาตรสามารถแสดงได้ในรูปสมการที่ (1) ต่อไปนี้ [6]

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

เมื่อ E คือ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง f (Hz) คือค่าความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ ω (rad/s) คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นไมโครเวฟ ϵ (F/m) คือ คุณสมบัติของวัสดุใดๆที่อธิบายถึงความสามารถในการดูดซับ ส่งผ่าน และสะท้อนพลังงานจากส่วนที่เป็นสนามไฟฟ้าของคลื่นไมโครเวฟ (Dielectric Constant) โดย ϵ_0 คือ ความสามารถของที่ว่าง (free space) และ $\tan \delta$ คือความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานที่วัสดุดูดซับ เป็น พลังงาน ความ ร้อน (Dielectric Loss Tangent Coefficient)

จากสมการที่ (1) ค่าพลังงานไมโครเวฟที่ถูกดูดซับจะแปรผันตรงกับค่าความถี่ของสนามไฟฟ้า, Dielectric Loss Tangent Coefficient และค่ากำลังสองของสนามไฟฟ้า แต่ถ้าค่า Dielectric Constant และค่า Dielectric Loss Tangent Coefficient ของชิ้นทดสอบมีค่ามากจะส่งผลให้การดูดซับพลังงานจากไมโครเวฟและปริมาณความร้อนเกิดขึ้นมากขึ้นตาม แต่ถ้ามีค่าน้อย คลื่นไมโครเวฟจะทะลุผ่านชิ้นทดสอบโดยไม่เกิดความร้อนขึ้น อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นอาจจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอื่น เช่น ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat) คุณสมบัติของชิ้นทดสอบและขนาดของชิ้นทดสอบ

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ซีเมนต์เพสต์ที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และน้ำประปา (ค่าความกรดค่า (pH) เท่ากับ 7.0) โดยกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังแสดงอัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์ในตารางที่ 1 โดยมาหล่อตัวอย่างลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. นอกจากนั้นการผสมซีเมนต์เพสต์ทำตามมาตรฐาน ASTM C 305 [12]

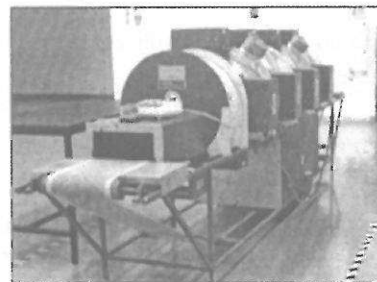
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

การบ่มซีเมนต์เพสต์ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้ระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงต่อเนื่องรุ่น MDBT ขนาด 11.2 kW ดังแสดงในรูปที่ 1 ระบบไมโครเวฟนี้มีประสิทธิภาพเท่ากับ 2.45 กิกะเฮิร์ต (GHz) เช่นเดียวกับเตาไมโครเวฟทั่วไป แต่มีจำนวนแมกนีตรอนทั้งสิ้น 14 ตัว (ตำแหน่งแสดงในรูปที่ 1 (ข)) ทำให้มีกำลังสูงสุดคือ 14 x 800 วัตต์ ขนาดของระบบ 5300 x 1200 x 1600 mm มีวัสดุป้องกันรังสีไมโครเวฟรั่วตามมาตรฐานซึ่งมีค่าไม่เกิน 5 mW/cm² ที่

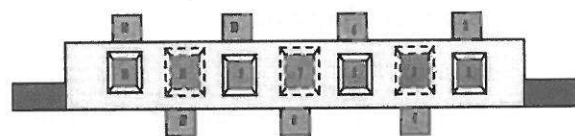
บริเวณปากทางเข้าและออก ระบบชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้ในการผลิตชิ้นงานในปริมาณมาก สามารถอบชิ้นงานได้อย่างต่อเนื่อง ชิ้นงานจะได้รับคลื่นไมโครเวฟอย่างทั่วถึง และมีช่วงเวลารับคลื่นมากหรือน้อยได้ตามความต้องการ โดยการปรับความเร็วของสายพานซึ่งมีความเร็วสูงสุดไม่เกิน 2 เมตรต่อนาที รวมทั้งสามารถควบคุมทิศทางของการจ่ายคลื่นลงบนชิ้นงานทดสอบได้โดยการควบคุมตำแหน่งการเปิดปิดแมกนีตรอน เมื่อชิ้นงานทดสอบผ่านเข้ามาในระบบบนสายพานลำเลียง ความชื้นที่ระเหยออกจากชิ้นงานจะถูกดูดออกจากกระบอกโดยพัดลมดูดอากาศและชิ้นงานจะถูกส่งออกไปอีกด้านหนึ่งของระบบเพื่อทำการวัดอุณหภูมิของชิ้นงานโดยกล้องอินฟราเรดและหาปริมาณความชื้นที่สูญเสียไป

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของซีเมนต์เพสต์

อัตราส่วนน้ำต่อน้ำปูนซีเมนต์ (w/c)	ปูนซีเมนต์ (กก./ม. ³)	น้ำ (กก./ม. ³)
0.30	1620	486
0.35	1498	524
0.40	1394	558
0.45	1303	586
0.50	1223	612



(ก) ระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงต่อเนื่อง



(ข) ด้านข้างเตาแสดงถึงตำแหน่งติดตั้งของแมกนีตรอน (1-14)
รูปที่ 1 ระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงต่อเนื่อง

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ขั้นตอนการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟ เริ่มจากหลังจากทำการหล่อตัวอย่างเสร็จจะทำการถอดแบบที่อายุ 23½ ± ½

ชั่วโมง จึงนำซีเมนต์เพสต์มาทำการบ่มต่อด้วยระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นทำการบ่มต่อด้วยอากาศโดยบรรจุในถุงพลาสติกชนิดปิดผนึกและเก็บไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิ 25.0 ± 2.0 องศาเซลเซียส จนถึงอายุที่ทำการทดสอบกำลังอัด

3.3.2 การบ่มซีเมนต์เพสต์ในน้ำและอากาศ

ในทำนองเดียวกัน การบ่มซีเมนต์ซีเมนต์เพสต์ในน้ำและอากาศจะทำการถอดแบบที่อายุ $23\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}$ ชั่วโมง โดยทำการบ่มในน้ำจนถึงอายุที่ทำการทดสอบกำลังอัด ในขณะที่การบ่มในอากาศจะบ่มโดยบรรจุซีเมนต์เพสต์ลงในถุงพลาสติกชนิดปิดผนึกและเก็บไว้ในห้องควบคุมอุณหภูมิที่ 25.0 ± 2.0 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์เท่ากับ ร้อยละ 60.0 ± 5.0 และบ่มจนถึงอายุที่ทำการทดสอบกำลังอัดเช่นเดียวกัน

3.3.3 การวัดปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้นเปียก (Wet Bulb) ในซีเมนต์เพสต์ขณะบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟสามารถวัดและคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$A = \left(\frac{W_a - W_b}{W_a} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ A ปริมาณความชื้นเปียก (Wet Bulb), ร้อยละ
 W_a น้ำหนักซีเมนต์เพสต์ก่อนการบ่ม, กก.
 W_b น้ำหนักซีเมนต์เพสต์หลังการบ่ม, กก.

3.3.4 การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

การทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่ได้จากการบ่มไมโครเวฟบ่มอากาศและการบ่มน้ำตามมาตรฐาน ASTM C 39 [12] โดยทดสอบที่อายุ 1, 3, 7, 14 และ 28 วัน ตามลำดับ

4. ผลการทดลองและการวิจารณ์ผล

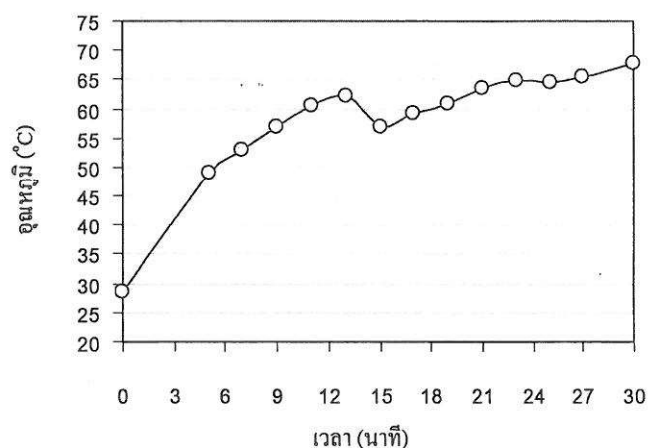
4.1 การกระจายความร้อน

เมื่อศึกษาพฤติกรรมทางด้านความร้อนที่เกิดขึ้นกับการบ่มซีเมนต์เพสต์ภายใต้ระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงแบบต่อเนื่องโดยวัดอุณหภูมิที่ผิว และวัดปริมาณความชื้นคงเหลือเมื่อผ่านการบ่ม ซึ่งมีปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางความร้อนที่พิจารณา คือ ปัจจัยทางด้านเวลา กำลังวัตต์ของไมโครเวฟ และอัตราส่วนผสม โดยน้ำหนักของซีเมนต์เพสต์ สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 พฤติกรรมความร้อนซีเมนต์เพสต์ภายใต้ไมโครเวฟ

จากรูปที่ 2 เมื่อบ่มซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็น 0.5 โดยใช้ระยะเวลา 30 นาที ด้วยระบบไมโครเวฟชนิด

สายพานลำเลียงที่กำลังวัตต์ 800 วัตต์ (1 แมกนีตรอน) พบว่าอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์เพิ่มขึ้นเนื่องจากซีเมนต์เพสต์ดูดซับพลังงานไมโครเวฟบางส่วนและแปรเปลี่ยนพลังงานดังกล่าวเป็นพลังงานความร้อนแต่จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานไมโครเวฟและความสามารถในการแปรเปลี่ยนพลังงานเป็นพลังงานความร้อนของซีเมนต์เพสต์จะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ รวมไปถึงองค์ประกอบของซีเมนต์เพสต์ประกอบไปด้วยโครงสร้างซึ่งเป็นของแข็งและช่องว่างซึ่งภายในมีของไหลเช่นน้ำและอากาศโดยที่น้ำจะมีค่าการดูดซับและแปลงพลังงานความร้อนอีกค่าหนึ่งซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่ดูดกลืนพลังงานได้ดีชนิดหนึ่งเมื่อซีเมนต์เพสต์รับพลังงานไมโครเวฟจะสร้างพลังงานความร้อนจากซีเมนต์เพสต์เอง และน้ำที่อยู่ในโครงสร้างส่งผลให้อุณหภูมิซีเมนต์เพสต์สูงขึ้นและเกิดการระเหยของน้ำภายในโครงสร้างออกสู่ภายนอกส่งผลให้ปริมาณน้ำภายในลดลงการดูดกลืนและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนจากน้ำจึงลดลง รวมไปถึงการถ่ายเทความร้อนของวัสดุให้สิ่งแวดล้อมเองด้วยเช่นการแผ่รังสีและการพาความร้อน

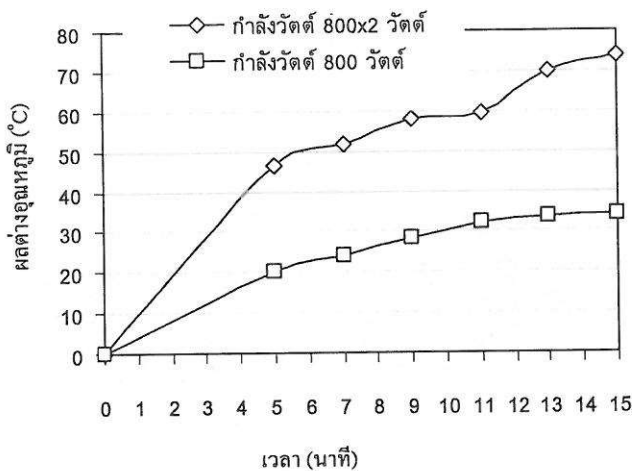


รูปที่ 2 อุณหภูมิผิวเฉลี่ยซีเมนต์เพสต์ขณะผ่านการบ่มด้วยไมโครเวฟที่กำลัง 800 วัตต์ (อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5)

4.1.2 อิทธิพลกำลังวัตต์ต่ออุณหภูมิภายใต้ไมโครเวฟ

จากรูปที่ 3 ทำการบ่มซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็น 0.5 ใช้ระยะเวลา 15 นาที อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งเริ่มต้น (อุณหภูมิห้อง) คือ 30 องศาเซลเซียส พบว่าการบ่มด้วยพลังงาน 800x2 วัตต์ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเนื่องจากเมื่อกำลังวัตต์เพิ่มขึ้นจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณความเข้มสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญหนึ่งในการกำเนิดปริมาณความร้อนของวัสดุไดอิเล็กตริก ซึ่งระยะเวลาการบ่มเพียง 9 นาที ส่งผลให้อุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์สูงถึง 90 องศาเซลเซียส (ผลต่างอุณหภูมิคือ 60 องศาเซลเซียส) และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 100 องศาเซลเซียส ในนาทีที่ 15 ของการบ่ม ในกรณี

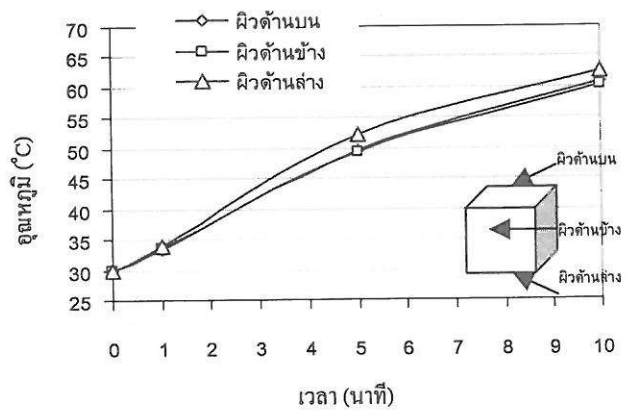
ที่ทำการบ่มด้วยพลังงาน 800 วัตต์ อุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์จะต่ำกว่าอย่างมาก (ประมาณ 60 องศาเซลเซียส) เมื่อเปรียบเทียบกับบ่มด้วยพลังงาน 800x2 วัตต์ แสดงว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากกำลังวัตต์ของระบบไมโครเวฟมีอิทธิพลทางความร้อนสูงมาก (ดังสมการที่ (1)) โดยปกติการบ่มเร่งกำลังอัดไม่นิยมให้มีอุณหภูมิวัสดุเกินกว่า 90 องศาเซลเซียส เนื่องจากวัสดุจะเกิดรอยร้าวเล็กๆ (Micro-cracking) ซึ่งส่งผลเสียต่อกำลังอัดของวัสดุทำให้กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ลดลง [13] ดังนั้นจากการทดลองดังกล่าวนี้แสดงให้เห็นว่าการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงไม่ควรใช้กำลังวัตต์มากกว่า 800 วัตต์ หรือใช้จำนวนแมกนีตรอนมากกว่า 1 ตัว



รูปที่ 3 ผลต่างอุณหภูมิซีเมนต์เพสต์ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์ และ 800x2 วัตต์ (อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.5)

4.1.3 การกระจายของอุณหภูมิที่ผิวซีเมนต์เพสต์

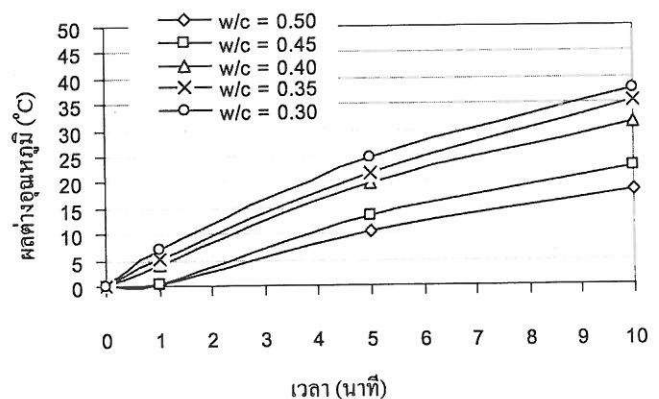
รูปที่ 4 แสดงการกระจายอุณหภูมิที่ผิวหน้าของซีเมนต์เพสต์ซึ่งมีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 โดยผ่านการบ่มด้วยระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงที่กำลังวัตต์ 800 วัตต์ (1 แมกนีตรอน) เป็นระยะเวลา 10 นาที พบว่าอุณหภูมิในแต่ละผิวหน้ามีค่าใกล้เคียงกัน และนอกเหนือจากซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเป็น 0.4 ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อื่นๆ ก็ให้ผลในแนวทางเดียวกัน แต่แตกต่างกันในเรื่องของอุณหภูมิซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในส่วนของการอภิปรายอัตราส่วนผสมที่มีผลต่อพลังงานความร้อน ทั้งนี้เนื่องจากคลื่นไมโครเวฟสามารถที่จะส่งผ่านพลังงานเข้าไปได้ในผิวหน้าวัสดุทุกด้าน และแปรเปลี่ยนพลังงานออกมาในรูปแบบความร้อนจากผิวภายในวัสดุสู่ผิวภายนอกซึ่งผลดังกล่าวแสดงว่าพลังงานไมโครเวฟทำให้การกระจายอุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์มีความสม่ำเสมอเท่ากันมากขึ้น



รูปที่ 4 อุณหภูมิของซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.4 ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์ บริเวณผิวหน้า

4.1.4 อิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่ออุณหภูมิ

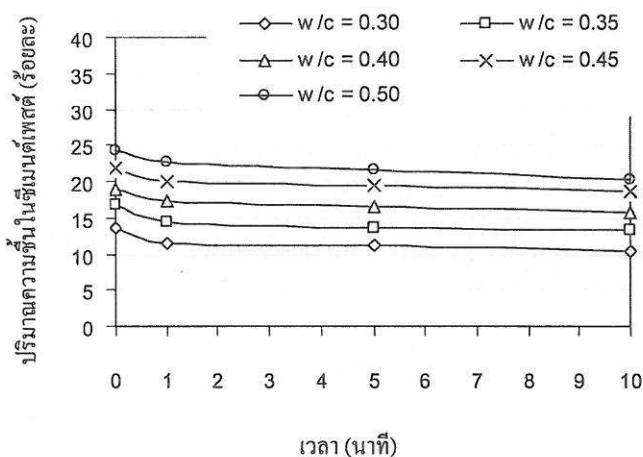
รูปที่ 5 จากการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยระบบไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงซึ่งใช้กำลัง 800 วัตต์ เป็นระยะเวลา 10 นาที โดยที่อุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่ประมาณ 30 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราส่วนผสมมีผลต่ออุณหภูมิมาก กล่าวคือที่ปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าน้อย (ปริมาณน้ำในการผสมปูนซีเมนต์น้อย) จะมีอุณหภูมิการบ่มภายใต้พลังงานไมโครเวฟมากกว่าปริมาณอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของซีเมนต์เพสต์ที่มีค่ามาก (ปริมาณน้ำในการผสมปูนซีเมนต์มาก) ณ เวลาเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติการดูดกลืนและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนของซีเมนต์เพสต์นอกจากจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแล้วยังเปลี่ยนแปลงเมื่อสัดส่วนผสมเปลี่ยนอีกด้วย ซึ่งแปรผกผันกับปริมาณน้ำที่ผสมอยู่ในโครงสร้าง



รูปที่ 5 ผลต่างอุณหภูมิซีเมนต์เพสต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน ภายใต้พลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์

4.1.5 การสูญเสียความชื้น

รูปที่ 6 ทดสอบบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 10 นาที (10 รอบต่อเนื่อง ใช้เวลารอบละ 1 นาที) ใช้กำลังขนาด 800 วัตต์ แสดงให้เห็นว่าในช่วงนาทีแรกมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากซีเมนต์เพสต์นั้นมีความชื้นกระจายตัวอยู่ภายในสม่ำเสมอและทั่วทั้งวัสดุ เมื่อซีเมนต์เพสต์ได้รับพลังงานไมโครเวฟและแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิวัสดุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างซีเมนต์เพสต์ทำให้เกิดการระเหยและกลั่นตัวภายในเกิดความแตกต่างของความดันระหว่างของไหลทั้งสองชนิด (ของเหลวและก๊าซ) เรียกว่าความดันคาพิลลารีซึ่งความดันคาพิลลารีจะส่งผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารออกจากซีเมนต์เพสต์อย่างรวดเร็วในช่วงนาทีแรกจากนั้นความดันคาพิลลารีจะลดลงเนื่องจากของเหลวภายในลดลงเนื่องจากถูกเปลี่ยนสถานะและส่งผลออกไปภายนอกซึ่งจะมีความดันอีกชนิดหนึ่งเกิดขึ้นแทนที่นั่นคือความดันไอ เนื่องจากการลดลงของความชื้นส่งผลชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงทางคุณสมบัติการดูดกลืนและแปรเปลี่ยนพลังงานไมโครเวฟเป็นพลังงานความร้อน ดังนั้นเมื่อปริมาณน้ำลดลงส่งผลให้ปริมาณการผลิตพลังงานความร้อนลดลง

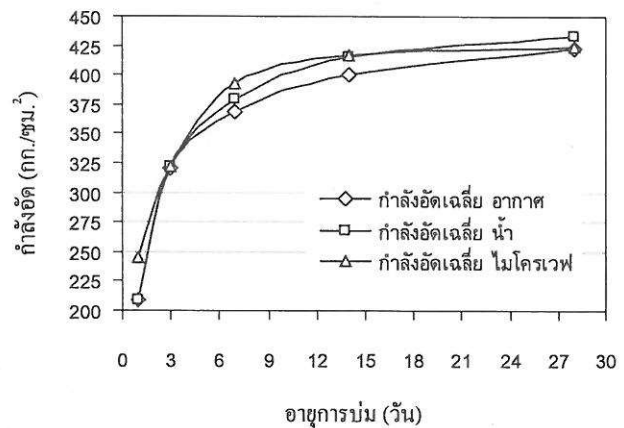


รูปที่ 6 ปริมาณความชื้นเปียก (Wet Bulb) ซีเมนต์เพสต์ภายใต้การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์

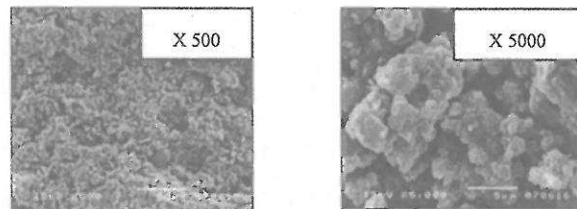
4.2 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์

จากผลการทดสอบกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่มีสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.4 ซึ่งผ่านการบ่มช่วงแรกด้วยไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงเป็นระยะเวลา 10 นาที (10 รอบต่อเนื่อง ใช้เวลา รอบละ 1 นาที) ซึ่งใช้กำลัง 800 วัตต์ หลังจากนั้นจึงบ่มต่อในอากาศ และบ่มซีเมนต์เพสต์ชนิดเดียวกันด้วยกรรมวิธีการบ่มอากาศ และการบ่มน้ำแล้วทดสอบคุณสมบัติทางกลด้านกำลังอัดที่ระยะเวลา 1, 3, 7, 14, 28 วัน ตามลำดับ เปรียบเทียบผลระหว่างกรรมวิธีการบ่มต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 7

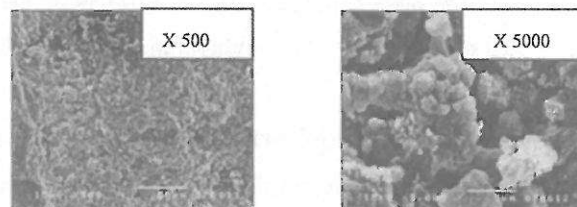
พบว่า การบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟจะให้กำลังอัดในช่วง 14 วันแรกดีกว่าการบ่มน้ำและบ่มอากาศเล็กน้อย และให้กำลังอัดที่ใกล้เคียงกับการบ่มน้ำและบ่มอากาศที่ระยะเวลา 28 วัน



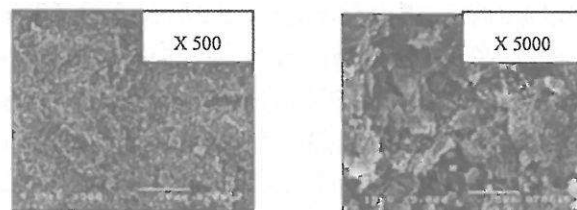
รูปที่ 7 กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อผ่านการบ่มด้วยวิธีต่างๆ



(ก) โครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยอากาศ



(ข) โครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ



(ค) โครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่บ่มด้วยน้ำ

รูปที่ 8 โครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์

เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ทำการบ่มพลังงานไมโครเวฟ น้ำและอากาศ เป็นระยะเวลา 28 วัน ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 5,000

เท่าเพื่อเปรียบเทียบผลทางด้านโครงสร้างวัสดุซึ่งแสดงในรูปที่ 8 โดยเมื่อเปรียบเทียบระดับโครงสร้างที่กำลังขยายดังกล่าว พบว่าโครงสร้างภายในมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลด้านกำลังอัดที่ระยะเวลา 28 วันว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟมีคุณสมบัติในการรับกำลังอัดได้เทียบเท่ากับการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยอากาศ

5. สรุปผลการศึกษา

กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์เมื่อผ่านกรรมวิธีการบ่มด้วยไมโครเวฟจะสามารถเร่งกำลังอัดในช่วงต้นได้เล็กน้อย และมีค่ากำลังอัดที่ 28 วันใกล้เคียงกับการบ่มในน้ำและในอากาศ

เมื่อส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าซีเมนต์เพสต์ที่ผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟมีลักษณะการพัฒนาโครงสร้างดีกว่าซีเมนต์เพสต์ที่บ่มในอากาศ

เมื่อใช้แม่กั้นครอนมากกว่า 1 ตัว ในการบ่มซีเมนต์เพสต์ด้วยพลังงานไมโครเวฟทำให้อุณหภูมิซีเมนต์เพสต์สูงเกิน 90 องศาเซลเซียส ซึ่งปกติหากการบ่มด้วยอุณหภูมิสูงจะทำให้โครงสร้างซีเมนต์เพสต์เกิดรอยร้าวขนาดเล็กอันส่งผลโดยตรงต่อกำลังอัด

ซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มากมีผลต่างอุณหภูมิต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยที่เวลาเดียวกัน เนื่องจากซีเมนต์เพสต์มีคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยตามสัญญาเลขที่ 106/2547 และบริษัท Linn High Therm GmbH ประเทศเยอรมนี ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือไมโครเวฟชนิดสายพานลำเลียงต่อเนื่องในงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] คณะอนุกรรมการคอนกรีตและวัสดุ ภายใต้คณะกรรมการวิชาการวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. ความคงทนของคอนกรีต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์บริษัท จตุทอง จำกัด, 2543.
- [2] C.E. de Siqueira Tango, 1998, "An Extrapolation Method for Compressive Strength Prediction of Hydraulic Cement Products", Cem.Concr. Res., Vol. 28, No. 7, pp. 969-983.
- [3] American Society for Testing and Materials, 1991, "Standard Test Method for Developing Early-age Compression Test Values and Projecting Later-age Strengths Annual". Book ASTM Stand. ,USA, Vol. 04, No. 02, pp. 918-88.

- [4] Metaxas, A.C. and Meredith, R.J., 1983, "Industrial Microwave Heating," Peter Peregrinus, Ltd., London.
- [5] Ratanadecho, P., Aoki, K. and Akahori, M., 2001, "Experimental and Numerical Study of Microwave Drying in Unsaturated Porous Material." Int. Commun. Heat and Mass Transfer, Vol. 28 ,No. 5, pp. 605-616.
- [6] Ratanadecho, P, 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 ,No. 1, 151-161.
- [7] Ratanadecho, P, 2002, "Experimental Validation of a Combined Electromagnetic and Thermal Model for a Microwave Heating of Multi-Layered Materials Using a Rectangular Wave Guide." ASME J. Heat Transfer, Vol. 124 ,No. 1, pp. 992-996 :
- [8] H. Yasunaka, M. Shibamoto and T. Sukagawa, 1987, "Microwave Decontaminator for Concrete Surface Decontamination in JPDR", Proceedings of the Int. Decommissioning Symposium, pp. 109 -115.
- [9] W. Li, M.A. Ebadian, T.L. White and R.G. Grubb, 1992, "Heat and Mass Transfer in a Contaminated Concrete Slab Subject to Microwave Heating". In General Papers in Heat Transfer and Heat Transfer in Hazardous Waster Processing. HTD-Vol. 212, pp. 143-153.
- [10] T. Pheeraphan, K. Y. Christopher, 1995, "Very High Early Strength of Microwave Cured Concrete". Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 1, pp. 136-146.
- [11] Neville, A.M., 1996, "Properties of Concrete. Fourth Edition", London: Pitman Books Limited.
- [12] American Society for Testing and Materials, 2002, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compressive", Annual Book of ASTM Standard Vol. 4, No. 02, Philadelphia, PA, USA.
- [13] S.M. Christo, M.S. Thesis, 1994, Northwestern University, Evanston, IL.