รหัสบทความ SEITS 13

การพัฒนากำลังอัดคอนกรีตโดยการให้ความร้อนชนิดควบคุมอุณหภูมิด้วยอินฟราเรดในระยะช่วงต้น

Development of Concrete Compressive Strength by Temperature-Controlled Heating with Early Infrared

อำพล พิชัยเชิด[1], สุรศักดิ์ ศรีปาน[2*]

[1] สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
aumpol.p@mail.rmutk.ac.th

[2*] สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
surasak.s@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตในระยะช่วงต้นโดยการให้ความร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยศึกษาตัวแปรที่สำคัญคือ อุณหภูมิคอนกรีต ระยะเวลาในการให้ความร้อนและค่ากำลังอัดของคอนกรีต การพัฒนากำลังอัดคอนกรีตในระยะช่วงต้นมีความสำคัญกับงานซ่อมแซมคอนกรีตให้มีค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นในระยะเวลาที่สั้นลง โดยเฉพาะการซ่อมแซมพื้นผิวถนนคอนกรีตที่ต้องการกำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาที่สั้น เพื่อเปิดใช้งานและลดความแออัดของการจราจร ในทดลองวิจัยนี้ได้ใช้พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟในการให้ความร้อนคอนกรีตโดยใช้คาวิตี้รูปทรงฮอร์นด้วยขนาดกำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ระดับความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ทำการให้ความร้อนจะทำหลังผสมคอนกรีตเสร็จ 30 นาทีโดยควบคุมอุณหภูมิคอนกรีตด้วยระบบอินฟราเรดที่ 50 และ 70 องศาเซลเซียส ควบคุมอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6, 12, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบคอนกรีตและห่อตัวอย่างคอนกรีตด้วยพลาสติกเพื่อบ่มด้วยอากาศต่อจนครบ 48 ชั่วโมง

จากผลการทดลองการให้ความร้อนคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟพบว่า ระยะเวลาการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตใช้ระยะเวลาที่สั้นกว่าวิธีแบบดั้งเดิม และมีการพัฒนากำลังอัดในช่วงเริ่มต้นดีกว่าการบ่มด้วยน้ำและอากาศ ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 6, 12, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง มีค่าการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตอย่างต่อเนื่องและสูงกว่าค่ามาตรฐานตลอดช่วงระยะเวลาเดียวกัน การให้ความร้อนคอนกรีตที่ระยะเวลา 36 ชั่วโมงที่ระดับอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ได้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 251.98 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรและ 70 องศาเซลเซียส ได้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 257.42 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร จะเห็นได้ว่าค่ากำลังอัดคอนกรีตของการควบคุมอุณหภูมิทั้ง 2 ระดับอุณหภูมิสามารถเพิ่มค่ากำลังอัดคอนกรีตได้เร็วและมีกำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าค่ามาตรฐานตลอดช่วงระยะเวลาเดียวกันและสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีตได้

คำสำคัญ : พลังงานไมโครเวฟ, การให้ความร้อน, กำลังอัดคอนกรีต

Abstract

This research is the development of concrete compressive strength at an early stage by temperature-controlled heating with microwave energy. By studying the important variables are concrete temperature heating time and compressive strength of concrete. Early concrete strength development is important for concrete repair work to increase its compressive strength in a shorter period of time. Especially when repairing concrete road surfaces that require increased compressive strength of concrete in a short period of time. To enable and reduce traffic congestion in this research experiment, microwave energy was used to heat concrete by using a horn-shaped cavity with a microwave power of 800 watts at a frequency of 2.45 GHz. The heating was done 30 minutes after the concrete was mixed. The concrete temperature was controlled by an infrared system at 50 and 70 °C. The temperature was continuously controlled for 6, 12, 18, 24, 30, and 36 hrs. Then the concrete was removed and the concrete sample was wrapped in plastic for further curing with air for 48 hours.

The results of the experiment of heating concrete with microwave energy found that the concrete strength development period is shorter than traditional methods. and developed early compression better than water and air curing. At the microwave at heating time of 6, 12, 18, 24, 30, and 36 hrs., concrete strength improvements were sustained and higher than the standard values during the same period. At 36 hours heating of concrete at 50 °C yielded concrete compressive strength at 251.98 kg/cm2 centimeter and 70 °C, concrete compressive strength was 257.42 kg/cm2. It can be seen that the concrete compressive strength of both temperature control temperature levels can increase the concrete compressive strength faster and has higher concrete compressive strength than the standard value during the same period and can also be applied for concrete repair work.

Keywords : microwave power, heating, concrete compressive

1. บทนำ

ปัจจุบันการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและระบบการขนส่งของประเทศไทยมีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นในทุกๆปี ระบบขนส่งในทางบกนั้นมีความสะดวกมากกว่าระบบขนส่งแบบอื่นๆ การซ่อมแซมพื้นถนนคอนกรีตแบบดั้งเดิมนั้นซึ่งใช้เครื่องจักร แรงงาน และระยะเวลาในการบ่มคอนกรีตและต้องมีการปิดการจราจรซึ่งเป็นปัญหาต่อผู้ใช้ถนน ซึ่งในปัจจุบันมีการนำพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการบ่มเร่งคอนกรีตโดยใช้พลังงานไมโครเวฟ Rattanadecho [1] ซึ่งในงานวิจัยนี้นำเสนอการซ่อมแซมพื้นผิวคอนกรีตโดยการให้ความร้อนคอนกรีตเพื่อเร่งกำลังอัดช่วงต้น ซึ่งในปัจจุบันการซ่อมแซมพพื้นผิวคอนกรีตนั้นมีหลายวิธีเช่น การใช้กาวคอนกรีตเข้ามาช่วยหรือการใช้คอนกรีตชนิดแห้งเร็วซึ่งมีราคาแพงและการนำคอนกรีตใหม่มาเททับบริเวณที่ชำรุดแล้วปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวตามธรรมชาติ Ong และคณะ [2] ศึกษาการนำคลื่นไมโครเวฟมาใช้ในการบ่มเร่งแผ่นพื้นหลังคาสำเร็จรูปโดยการ on-off Microwave ขณะทำการบ่มเร่ง พบว่าความแข็งแรงช่วงอายุเริ่มต้นมีการพัฒนาโครงสร้างอย่างต่อเนื่องและหลีกเลี่ยงการเกิด Over heating กับแผ่นหลังคาสำเร็จรูป Lee และคณะ [3] ศึกษาผลกระทบจากการบ่มคอนกรีตด้วยไอน้ำและการบ่มด้วยไมโครเวฟหลังจากนั้นทดสอบหาค่าความแข็งแรงซึ่งในการทดลองจะใช้ตู้ไมโครเวฟในครัวเรือนสำหรับการทดลองและกำลังที่ใช้ 700 วัตต์ โดยใช้เวลา 0, 20, 40, 60 นาทีตามลำดับ จากผล

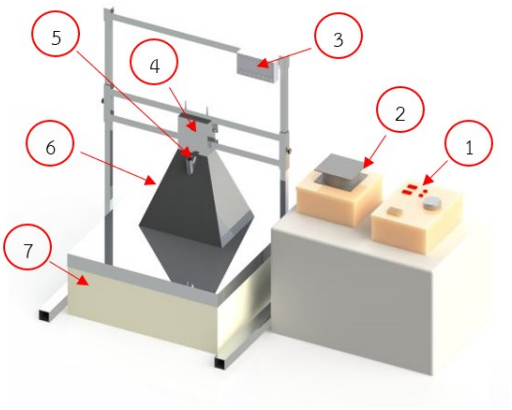
การทดลองเมื่อให้เวลาการบ่ม 40 นาที จะพัฒนาความแข็งแรงและเวลาที่ใช้เหมาะสมสำหรับการบ่มคอนกรีตและประหยัดพลังงาน David R. Hall [4] มีการนำพลังงานไมโครเวฟร่วมกับการนำไอเสียจากเครื่องยนต์มาให้ความร้อนที่ผิวคอนกรีต Makul และคณะ [5] ศึกษาการบ่มคอนกรีตด้วยไมโครเวฟโดยใช้แมกนีตรอนอุตสาหกรรมซึ่งมีกำลัง 6.0 กิโลวัตต์ ความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ใช้คาวิตี้เป็นแบบตู้ไมโครเวฟ โดยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งใช้โปรแกรม COMSOLTM Multiphysics ในการวิเคราะห์และจากผลการทดลองพบว่าการบ่มคอนกรีตด้วยไมโครเวฟนั้นทำให้โครงสร้างภายในมีการพัฒนาความแข็งช่วงอายุเริ่มต้นได้ดีในขณะที่อุณหภูมิคอนกรีตของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีอุณหภูมิสูงกว่าข้อมูลการทดลองมาก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาทดลองโดยใช้คาวิตี้รูปทรงฮอร์นสำหรับการให้ความร้อนคอนกรีต ใช้กำลังไมโครเวฟขนาด 800 วัตต์ ที่ระดับความถี่ 2.45 กิกะเฮิรตซ์ เพื่อศึกษาผลที่มีต่อคุณสมบัติของคอนกรีตได้แก่ อุณหภูมิคอนกรีต ระยะเวลาการให้ความร้อนคอนกรีต และการพัฒนากำลังอัดคอนกรีต จากนั้นนำผลที่ได้ไปทำการเปรียบเทียบการบ่มด้วยน้ำและการบ่มด้วยอากาศจากค่ามาตรฐานในภาพที่ 6 ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การปรับปรุงแก้ไขและพัฒนาไปสู่การออกแบบให้เหมาะสมสำหรับการพัฒนากำลังอัดคอนกรีตของพื้นผิวจราจรโดยใช้พลังงานไมโครเวฟในการใช้งานจริง

2. วิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมค่ากำลังอัดคอนกรีตหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่กำลังไมโครเวฟ 800 วัตต์ ความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ (แมกนีตรอน 1 ตัว) ถูกติดตั้งที่บริเวณท่อนำคลื่นซึ่งต่อกับทางเข้าฮอร์นคาวิตี้ ลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นภายในคาวิตี้รูปทรงฮอร์นเป็นคลื่นผสม ในขั้นการทดลองจะทำการให้ความร้อนหลังคอนกรีตผสมเสร็จ 30 นาที โดยควบคุมอุณหภูมิคอนกรีตที่ 50 และ 70 องศาเซลเซียส อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 6, 12, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบตัวอย่างคอนกรีตและห่อด้วยพลาสติกเพื่อบ่มด้วยอากาศจนครบ 48 ชั่วโมงโดยศึกษาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ รวมทั้งการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดลองทรงลูกบาศก์ ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และใช้น้ำประปามีค่าความกรดด่าง (PH) 7.0 ใช้อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) เท่ากับ 0.48 โดยน้ำหนัก ซึ่งข้อมูลแสดงตามตารางที่ 1 ในการผสมส่วนประกอบทั้งหมดของคอนกรีตทำตามมาตรฐาน ASTM C305 [6] และหล่อในแบบหล่อตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 เซนติเมตรตามมาตรฐานอังกฤษ BS 1881:PART 3 [7] ในภาพที่ 2 ใช้แบบหล่อตัวอย่างเป็นอะคริลิกใสหนา 10 เซนติเมตร เพื่อไม่ให้เกิดการสะท้อนของคลื่นไมโครเวฟ

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง (ต่อขนาดคอนกรีต 1 m^3)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (kg)	น้ำ (kg)	ทราย (kg)	หิน (kg)	อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก
350	170	830	1135	0.48



ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์ทดลองการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ

รายการชุดอุปกรณ์การทดลองในภาพที่ 1 ประกอบด้วย 1.ชุดควบคุมอุณหภูมิ 2.ชุดหม้อแปลงไฟฟ้า 3.Datalogger 4. แมกนีตรอน 5.ตำแหน่งวัดอุณหภูมิด้วยอินฟราเรด 6.คาวิตี้รูปทรงฮอร์น 7.กล่องน้ำอะคริลิก

ภาพที่ 2 ตัวอย่างคอนกรีตทดลองขนาด 15x15x15 เซนติเมตรก่อนและหลังการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

3. ผลการวิจัย

3.1 ปริมาณความร้อนเชิงปริมาตร

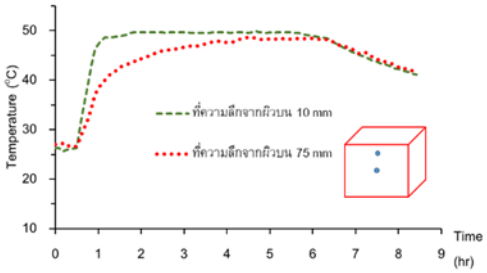
ความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อประมาณค่าการดูดซับพลังงานไมโครเวฟของวัสดุไดอิเล็กตริก เมื่อสมมติให้ไม่มีการสูญเสียสนามแม่เหล็กค่าการผลิตปริมาณความร้อนเชิงปริมาตรสามารถแสดงได้ในรูปสมการต่อไปนี้ Ratanadecho และคณะ [8]

$$Q = \omega\varepsilon_0\varepsilon_r^{"}E^2 = 2\pi.f.\varepsilon_0.\varepsilon_r(tan\delta)E^2 \quad (1)$$

3.2 กำลังอัดของคอนกรีต

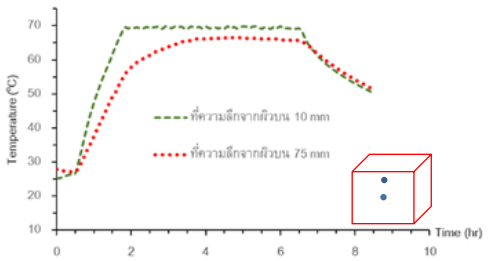
การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์ค่าความสามารถสูงสุดในการรับแรงที่มากระทำจึงกำหนดกำลังของคอนกรีตเป็นเกณฑ์ โดยเฉพาะงานคอนกรีตสำหรับพื้นผิวถนน ซึ่งทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักของยานพาหนะ ขั้นตอนการทดสอบหาค่ากำลังอัดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟทดสอบตามมาตรฐาน BS 1881:PART 4 [9]

กำลังอัดประลัยของคอนกรีต = น้ำหนักกดประลัย / พื้นที่หน้าตัดของก้อนตัวอย่าง (2)



ภาพที่ 3 อุณหภูมิภายในคอนกรีตจากการเทลงในแบบ 30 นาทีและบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ควบคุมอุณหภูมิที่ผิวบน 50 องศาเซลเซียส)

จากภาพที่ 3 แสดงการให้ความร้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยควบคุมอุณหภูมิคอนกรีตที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าค่าอุณหภูมิที่คอนกรีตที่ช่วงผิวด้านบนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่อุณหภูมิที่บริเวณตรงกลางจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเนื่องจากช่วงแรกที่ผิวด้านบนจะมีน้ำส่วนเกินที่ผิวด้านบนและเกิดการเยิ้มของน้ำที่ผิวหน้า หลังจากทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีเพื่อให้คอนกรีตมีการพัฒนาโครงสร้างช่วงระยะการก่อตัว เมื่อทำการให้พลังงานไมโครเวฟคลื่นไมโครเวฟจะทะลุทะล่วงเข้าไปด้านในและเกิดการดูดซับคลื่นไมโครเวฟของตัวอย่างคอนกรีตแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน ในช่วงของการเพิ่มอุณหภูมิในระยะแรกจะใช้เวลาประมาณ 30 นาทีจนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการที่ 50 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่า ณ เวลาเดียวกันอุณหภูมิที่ระดับความลึก 10 มิลลิเมตร ถึงอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ที่ระดับความลึก 75 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส จะสังเกตได้ว่าความต่างของอุณหภูมิที่ระดับความลึกที่ 10 มิลลิเมตรและ ที่ 75 มิลลิเมตร อยู่ที่ 13 องศาเซลเซียส จากจุดที่เริ่มทำการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อุณหภูมิเฉลี่ยเท่าๆ กัน และใช้เวลา 30 นาที ในการเพิ่มอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่วัดและควบคุมที่ผิวบนจากอินฟราเรดมีค่าใกล้เคียงกับที่ระดับความลึกตัวอย่างคอนกรีตที่ 10 มิลลิเมตรตลอดช่วงของการควบคุมอุณหภูมิ ความแตกต่างของระดับอุณหภูมิที่ระดับความลึก 10 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร มีแนวโน้มลู่เข้าหากันจนถึงการให้ความร้อนจนครบ 6 ชั่วโมง

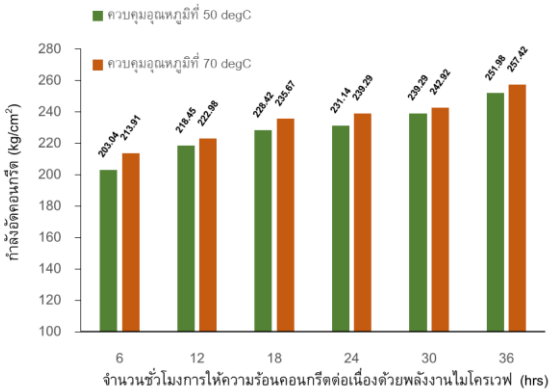


ภาพที่ 4 อุณหภูมิภายในคอนกรีตจากการเทลงในแบบ 30 นาทีและบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ 800 วัตต์ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ควบคุมอุณหภูมิที่ผิวบน 70 องศาเซลเซียส)

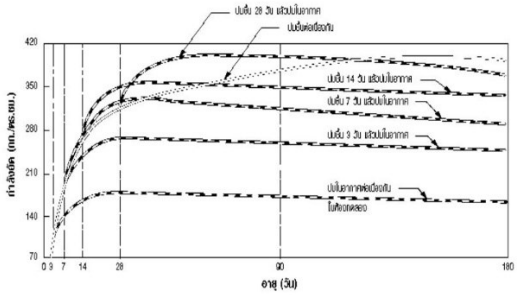
จากภาพที่ 4 แสดงการให้ความร้อนคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยควบคุมอุณหภูมิที่ผิวบน 70 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่ระดับความลึกตัวอย่างคอนกรีตที่ 10 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งที่ผิวบนถึงอุณหภูมิที่ต้องการที่ 70 องศาเซลเซียส เห็นได้ว่า ณ เวลาเดียวกันอุณหภูมิที่ระดับความลึก 10 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส และที่ระดับความลึก 75 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิอยู่ที่ 55 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่วัดและควบคุมที่ผิวบนจากอินฟราเรดมีค่าใกล้เคียงกับที่ระดับความลึกที่ 10 มิลลิเมตร ตลอดช่วงของการควบคุมอุณหภูมิ ค่าความแตกต่างของระดับอุณหภูมิที่ระดับความลึก 10 มิลลิเมตรและ75 มิลลิเมตร เส้นอุณหภูมิแนวโน้มที่จะลู่เข้าหากัน

4. ผลการทดสอบ

จากภาพที่ 5 แสดงค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ควบคุมอุณหภูมิคอนกรีตที่ 50 องศาเซลเซียสและ 70 องศาเซลเซียสที่ระยะเวลาการบ่ม 6, 12, 18, 24, 30 และ 36 ชั่วโมงและบ่มอากาศต่อจนครบอายุคอนกรีต 48 ชั่วโมง พบว่าการให้ความร้อนคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟโดยวิธีควบคุมอุณหภูมิ ให้ค่ากำลังอัดคอนกรีต ที่ระยะเวลาการให้ความร้อนที่ 6 ถึง 36 ชั่วโมง มีค่ากำลังอัดคอนกรีตมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานตลอดช่วงระยะเวลาเดียวกันในภาพที่ 6 ที่ระยะการให้ความร้อนที่ 36 ชั่วโมงให้ค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงสุดที่ระดับอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสมีค่าความแข็งแรงของกำลังอัด 251.98 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรและ70 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ 257.42 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 5 ค่ากำลังอัดคอนกรีตของการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟชนิดควบคุมอุณหภูมิด้วยอินฟราเรด



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและอายุบ่ม [10]

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองการให้ความร้อนตัวอย่างคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟชนิดควบคุมอุณหภูมิที่ระดับ 50 และ 70 องศาเซลเซียส พบว่าตัวอย่างคอนกรีตสามารถพัฒนากำลังอัดตลอดช่วงระยะเวลาช่วงต้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การให้ความร้อนคอนกรีตที่ระยะเวลา 36 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดคอนกรีต 251.98 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตรและ 70 องศาเซลเซียส มีค่ากำลังอัดคอนกรีต 257.42 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร ค่ากำลังอัดคอนกรีตของการควบคุมอุณหภูมิทั้งสองระดับ สามารถเพิ่มค่ากำลังอัดคอนกรีตได้เร็วและมีกำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าค่ามาตรฐานตลอดช่วงระยะเวลาเดียวกันและสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานซ่อมแซมคอนกรีตได้

6. กิติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในการอนุเคราะห์สนับสนุนเครื่องมือและอุปกรณ์การทดลองให้แก่ผู้วิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้สนับสนุนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์แก่ผู้วิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] 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 (472) 299-307.

[2] Ong, K. C. G., Teo, C. P., Shum, C. H., Wong, L. H. J., Tan, S. T., & Tam, C. T. (2004). Temperature Controlled Microwave Accelerated Curing of Precast Ferrocement Secondary Roofing Slabs. Special Publication, 224, 127-144.

[3] Lee, M. G., Huang, Y., & Kan, Y. C. (2007). The Strength and Rapid Chloride Permeability of Microwave Cured Concrete. International Journal of Applied Science and Engineering, 5(1), 53-63.

[4] Hall, D.R., 2008 “Apparatus and Method for Heating a Paved Surface with Microwave” United States Patent 7, 413, 375 B2.

[5] Makul, N., Rattanadecho, P., & 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, 37(10), 1487-1495.

[6] American Society for Testing and Materials, "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, Philadephia, PA, USA., 2002.

[7] British Standards, BS 1881:PART3., "Method of MAKING AND CURING TEST SPECIMENS".

[8] Ratanadecho, P., Aoki, K., & Akahori, M. (2002). A numerical and experimental investigation of the modeling of microwave heating for liquid layers using a rectangular wave guide (effects of natural convection and dielectric properties). Applied Mathematical Modelling, 26(3), 449-472.

[9] British Standards, BS 1881:PART4., "Method of TESTING CONCRETE FOR STRENGTH".

[10] Wood S.L., (1991), Evaluation of the Long-Term Properties of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 26, pp. 630-643.