อิทธิพลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อการนำความร้อนและกำลังอัดของคอนกรีต

บุรฉัตร ฉัตรวีระ [1] และ วินัย หอมศรีประเสริฐ [2]
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อการนำความร้อนและกำลังของคอนกรีตและศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22, 0.38, 0.45, 0.55 และ 0.70 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ

จากผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์เพสต์ พบว่าระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น โดยระยะเวลาการก่อตัวระยะต้นและระยะปลายของซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.38, 0.45 และ 0.55 อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐาน ASTM C 191 [1] ส่วนซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.22 และ 0.70 ไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สำหรับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในเนื้อซีเมนต์เพสต์ พบว่าอุณหภูมิมีค่าสูงสุดประมาณ 60 องศาเซลเซียส และกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์มีค่าลดลงตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น

สำหรับการวิเคราะห์สภาวะการบ่ม พบว่าสภาวะการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ทำให้คอนกรีตมีอุณหภูมิภายในไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส (ถ้าอุณหภูมิสูงกว่านี้คอนกรีตจะเกิดการแยกชั้น) ได้แก่ การใช้กำลังไมโครเวฟ เท่ากับ 100 วัตต์ และ ระยะเวลาในการบ่ม 15 นาที โดยระยะเวลาก่อนการบ่ม (หลังจากผสมเสร็จ) เท่ากับ 30 นาที โดยคอนกรีตที่บ่มไมโครเวฟในสภาวะนี้ทำให้คอนกรีตที่ได้มีกำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน สูงกว่า แต่มีการนำความร้อนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการบ่มน้ำปกติ เนื่องจากน้ำซึ่งเป็นสสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนมีปริมาณที่ลดลง

[1] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

[2] ผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

Influence of Microwave Energy on Thermal Conductivity and Compressive Strength of Concrete

Burachat Chatveera [1] and Winai Homsriprasert [2]

Thammasat University, Rangsit Campus, Khlong Luang, Pathum Thani 12120

Abstract

The objective of this research was to study the influence of microwave energy on thermal conductivity and compressive strength of concrete. The tested properties of cement paste include setting time, temperature from hydration reaction and compressive strength at the ages of 1, 3, and 5 days with the water-to-binder ratios were 0.22, 0.38, 0.45, 0.55 and 0.70. The tested results were used to analyze the curing conditions of concrete with microwave energy.

From the tested results of cement paste properties, it was observed that setting time increased with the increase of water-to-binder ratios. The initial and final setting time of the cement pastes with 0.38, 0.45 and 0.55 water-to-binder ratios were in accordance to ASTM C 191 but the initial and final setting time of the cement pastes with 0.22 and 0.70 water-to-binder ratios were not in accordance to ASTM. For the tested results of the hydration reaction in cement paste, it was found that the highest temperature was 60˚ C. And the compressive strength of cement paste decreased with increasing the water-to-binder ratios.

For the analysis of curing conditions, it was found that the optimum condition for curing concrete with microwave energy is that the temperature in concrete matrix should not be over 60˚ C. If temperature is over than 60˚ C, it will led to segregation of proportions in concrete. The optimal conditions were 100 watts of microwave power, 15 minutes for curing time and 30 minutes for delay time. Additionally, the concrete curing with microwave energy had high compressive strength but thermal conductivity were low when compared with concrete curing with water, due to water in concrete were decreased.

[1] *Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

[2] *Research Assistant, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering.*

1. บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างมานาน และเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่หาง่ายและราคาถูกเมื่อเทียบกับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่นๆ ในปริมาณเดียวกัน นอกจากนี้คอนกรีตยังสามารถขึ้นรูปได้ง่ายและหลากหลายรูปแบบ ดังนั้นความแข็งแรงของคอนกรีตจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลถึงความแข็งแรงของโครงสร้างโดยตรง

แต่ในปัจจุบันโลกมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงขึ้นทุกปี จึงทำให้เกิดปัญหาตามมามากมาย รวมไปถึงงานก่อสร้างโดยเฉพาะปัญหาที่เกิดขึ้นในงานคอนกรีต เช่น การแตกร้าว และคุณภาพในการทำงานลดลง เป็นต้น ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาคุณภาพของคอนกรีตให้ทนต่อสภาวะอุณหภูมิสูงซึ่งในอดีตและปัจจุบันวิธีการหนึ่งที่ยังคงใช้กันอยู่ในการบ่มเพื่อเร่งกำลังของคอนกรีตในช่วงต้นได้แก่วิธี ออโตเคล์ฟ แต่อย่างไรก็ตามวิธีออโตเคล์ฟ ยังมีข้อบกพร่องในด้านการกระจายความร้อนภายในเนื้อคอนกรีตที่ยังไม่ค่อยมีความสม่ำเสมอทำให้เกิดความผันแปรในด้านคุณสมบัติ ในขณะที่วิธีการใช้สารผสมเพิ่มประเภทต่างๆเพื่อเพิ่มกำลังให้กับคอนกรีตก็จะส่งผลต่อความทนทานของคอนกรีตในระยะยาว [1] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับเทคนิคและวิธีการบ่มคอนกรีตประเภทใหม่ขึ้นมาเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการซึ่งการใช้พลังงานไมโครเวฟ จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาค้นคว้าวิจัย

ด้วยข้อดีของพลังงานไมโครเวฟคือสามารถที่จะกระจายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตให้มีความสม่ำเสมอและที่สำคัญสามารถใช้เวลาในการบ่มที่น้อยกว่า 1 วันโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังรับแรงทั้งช่วงต้นและช่วงปลาย [1]

คลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบ Non-Ionizing Radiation ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยการโยกย้ายอิออน และ Dipole Rotation แต่ไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างโมเลกุล พลังงานไมโครเวฟมีคลื่นความถี่จาก 300 – 300,000 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งคลื่นความถี่ที่นิยมใช้ในตู้ไมโครเวฟตามบ้านเรือนมากที่สุด คือ 2,450 เมกะเฮิรตซ์ และมีพลังงาน 600 – 700 วัตต์ [2] อย่างไรก็ตาม หัวใจสำคัญของเตาไมโครเวฟก็คือตัวแม็กนิตรอนที่จะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เพราะคลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นความถี่สูงที่ไม่ใช่รังสี จึงไม่เกิดการกระจายและไม่สะสมอยู่ในร่างกายมนุษย์ สำหรับกรรมวิธีการบ่มเพื่อเร่งกำลังของคอนกรีตที่ใช้หลักการทำความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้น ได้ตั้งอยู่บนหลักการพื้นฐานของการกระจายพลังงานภายในที่เกิดจากการสั่นตัวของขั้ว และประจุในโมเลกุลวัสดุไดอิเล็กตริกภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการใช้กรรมวิธีทางความร้อนด้วยไมโครเวฟในการบ่มคอนกรีตนั้นครอบคลุมในช่วงของการให้ความร้อนวัสดุในช่วงต้นหลังจากทำการผสมคอนกรีตเสร็จ การบ่มในช่วงพัฒนาโครงสร้างเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันในปูนซีเมนต์ได้ทำให้เกิดการพัฒนากำลังรับแรงของคอนกรีตอย่างรวดเร็วและการบ่มหลังจากคอนกรีตพัฒนาโครงสร้างแล้ว [3] อย่างไรก็ตามความรู้อีกประเด็นหนึ่งที่ว่าวัสดุที่อยู่ภายในสนามไมโครเวฟจะมีผลต่อการดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้แล้วการกระจายตัวของสนามไมโครเวฟยังขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุซึ่งความไม่สม่ำเสมอของสนามไมโครเวฟนั้นจะส่งผลต่อการกระจายตัวทางความร้อนของวัสดุ [3]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงอิทธิพลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อการนำความร้อนและกำลังอัดของคอนกรีต

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาอิทธิพลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อการนำความร้อนและกำลังอัดของคอนกรีต

3. การทดสอบ

3.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

วัสดุที่ใช้ในการศึกษาประกอบไปด้วย

1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1
2) น้ำ ใช้น้ำประปาที่รองใส่ภาชนะทิ้งไว้ 1 วัน ที่อุณหภูมิห้องก่อนทดลอง
3) มวลรวมหยาบ ได้แก่ หิน ใช้หินปูนขนาด 19 มม. (3/4 นิ้ว) ซึ่งนำหินมาล้างก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง แล้วจึงนำไปอบเป็นเวลา 1 วัน จนน้ำหนักคงที่ และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 2 วัน จึงนำหินมาใช้ใน

การทดลอง และทำการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 127 [4]

4) มวลรวมละเอียด ได้แก่ ทราย ใช้ทรายละเอียด ซึ่งก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลองจะนำทรายมาล้างแล้วนำไปอบเป็นเวลา 1 วัน จนน้ำหนักคงที่ และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาอย่างน้อย 1 วัน จึงนำทรายมาใช้ในการทดลอง และทำการหาค่าโมดูลัสความละเอียด และความถ่วงจำเพาะตามมาตรฐาน ASTM C 125 [5] และ ASTM C 128 [6] ตามลำดับ

3.2 วิธีการเตรียมวัสดุ การผสม และการทำตัวอย่างทดสอบ

จัดเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของวัสดุผสมคอนกรีต ซึ่งประกอบไปด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำ ทราย และหิน เพื่อนำค่าคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ ที่ได้ไปใช้ในการคำนวณออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีตโดยใช้วิธีการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตตามมาตรฐานสถาบันคอนกรีตอเมริกาและศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของซีเมนต์เพสต์ ได้แก่ ระยะเวลาการก่อตัว อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน และกำลังอัดที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบ่มคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อประเมินคุณสมบัติกำลังอัดและการนำความร้อนของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟเปรียบเทียบกับการบ่มน้ำแบบปกติ

อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

1. อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์) (w/c) เท่ากับ 0.38, 0.45, 0.55 และ 0.70
2. อัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A) เท่ากับ 0.405

3.3 วิธีการทดสอบ

3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตก่อนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ระยะเวลาการก่อตัวสามารถวัดได้โดยการทดสอบแบบไวแคตตามมาตรฐาน ASTM C191 [7] ส่วนอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์วัดโดยใช้เครื่อง Data Logger และกำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109 [8]

3.3.2 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตขณะบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

สภาวะที่ใช้ในการบ่มพลังงานไมโครเวฟคือระยะเวลาตั้งแต่น้ำสัมผัสปูนซีเมนต์จนถึงเริ่มให้พลังงานไมโครเวฟเท่ากับ 15 นาที กำลังไมโครเวฟที่ใช้ 100 วัตต์ ระยะเวลาในการบ่ม เท่ากับ 30 นาที อ้างอิงตาม Leung and Pheeraphan [9] และ Dumangas Jr. [10] ส่วนอุณหภูมิที่เกิดขึ้นขณะบ่มพลังงานไมโครเวฟวัดโดยใช้เครื่อง Data Logger

3.3.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตหลังบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

กำลังอัดของคอนกรีตทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C39 [11] ส่วนการนำความร้อนของคอนกรีตวัดโดยใช้เครื่อง Thermal Conductivity

4. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 คุณสมบัติของวัสดุ

4.1.1 มวลรวม

4.1.1.1 มวลรวมละเอียด

ใช้ทรายแม่น้ำที่สามารถผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เมื่อนำทรายไปทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.9 ค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ที่อิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มีค่าเท่ากับ 2.36 และค่าร้อยละการดูดซึมความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.81

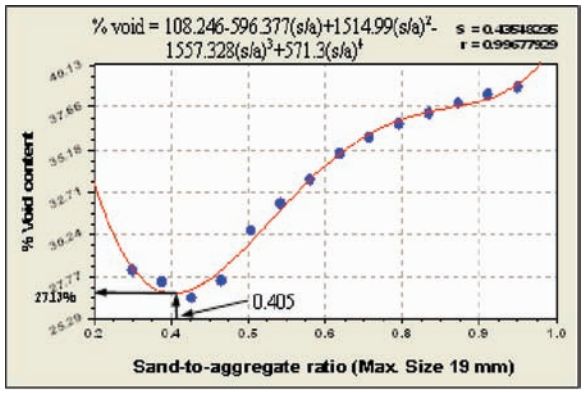
4.1.1.2 มวลรวมหยาบ

ใช้หินปูนมีขนาดใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม. เมื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติเบื้องต้น มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 7.2 ค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของที่อิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) มีค่าเท่ากับ 2.73 และค่าร้อยละการดูดซึมความชื้นมีค่าเท่ากับ 0.6

4.1.2 ร้อยละช่องว่างของอากาศในมวลรวม

การออกแบบส่วนผสมของคอนกรีต จะต้องนำค่าร้อยละช่องว่างของอากาศในมวลรวม (% Void) และค่าอัตราส่วนทรายต่อมวลรวม (S/A) เป็นปัจจัยในการออกแบบด้วย ซึ่งค่าร้อยละช่องว่างของอากาศในมวลรวม

(% Void) มีค่าเท่ากับ 27.13 และค่าอัตราส่วนทราย ต่อมวลรวม (S/A) มีค่าเท่ากับ 0.405 ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ผลการทดสอบการหาค่าร้อยละของช่องว่างของอากาศในมวลรวมอัดแห้ง

4.1.3 ปูนซีเมนต์

4.1.3.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

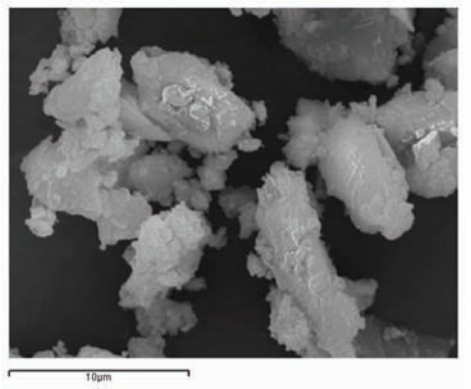
จากผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่า มีองค์ประกอบและสัญลักษณ์ของออกไซด์หลัก (Major Oxides) ได้แก่ แคลเซียมไดออกไซด์ (CaO) มีค่าร้อยละเท่ากับ 64.07 ซิลิกาไดออกไซด์ (SiO_2) มีค่าร้อยละเท่ากับ 20.53 อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) มีค่าร้อยละเท่ากับ 5.30 และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) มีค่าร้อยละเท่ากับ 3.83

4.1.3.2 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ค่าความละเอียด (พื้นที่ผิวจำเพาะ) มีค่าเท่ากับ 3,450 ตร.ซม./ก. ค่าร้อยละความต้องการน้ำมีค่าเท่ากับ 100 ค่าดัชนีการพัฒนากำลังที่ 7 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 100 และค่าดัชนีการพัฒนากำลังที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับร้อยละ 100

4.1.3.3 ลักษณะของอนุภาค โดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

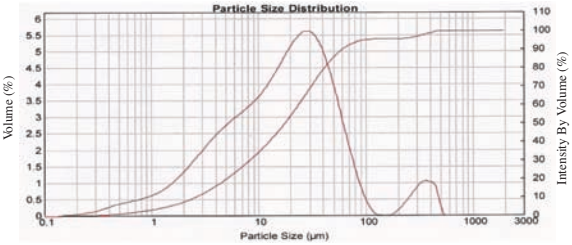
เมื่อนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ไปขยายลักษณะอนุภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะหยาบเป็นเหลี่ยมมุม ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (กำลังขยาย 5,000 เท่า)

4.1.3.4 ลักษณะการกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้เทคนิค Laser Particle Size Distribution

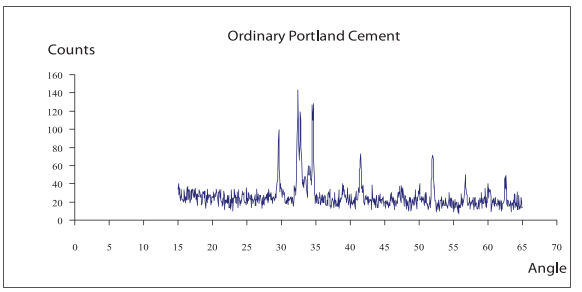
จากผลการทดสอบการกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่าอนุภาคโดยส่วนใหญ่กระจายอยู่ในช่วงขนาด 0.1 ถึง 1,000 ไมโครเมตร และขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 25 ไมโครเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การกระจายขนาดคละของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4.1.3.5 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้เทคนิค X – Ray Diffraction (XRD)

จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 พบว่ามีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) อยู่ร้อยละ 64.07 โดยน้ำหนัก และมีค่าสูงสุด (Peak) ของ Count เท่ากับ 122 ที่มุมเท่ากับ 32.45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4



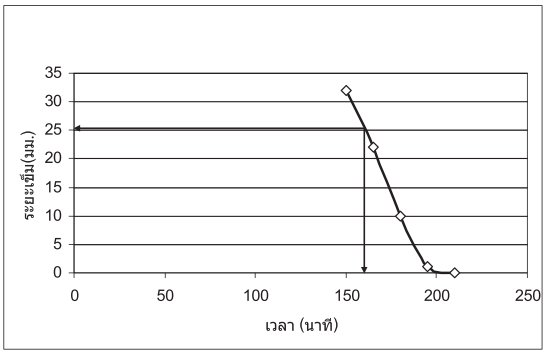
รูปที่ 4 ความเป็นผลึกของอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 โดยใช้เทคนิค X – Ray Diffraction

4.2 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์

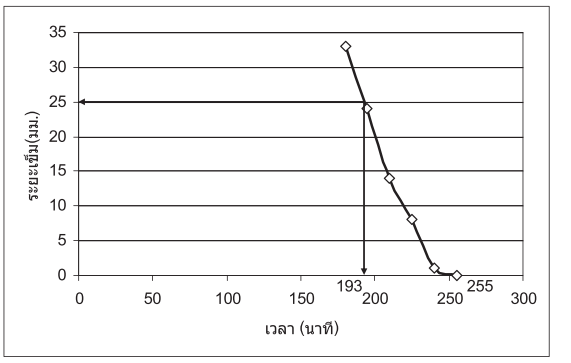
เนื่องจากระยะเวลาการก่อตัวของคอนกรีตเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ดังนั้น จึงได้ทำการวิเคราะห์จากเวลาก่อตัว เพื่อจะนำข้อมูลจากรูปที่ 5 ถึง 8 ไปประยุกต์ใช้ในการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟต่อไป

4.2.1 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

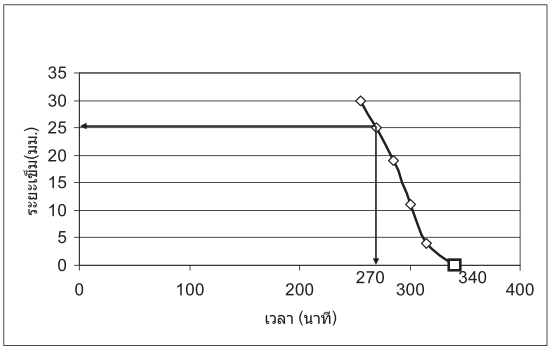
พบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นระยะเวลาการก่อตัวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นกับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังเช่นที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.38 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 150 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 210 นาที และที่อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 193 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 250 นาที และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 270 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 255 นาที และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.7 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 270 นาที และระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 340 นาที ดังนั้นพบว่าเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นกับระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5 ถึง 8 ทั้งนี้โดยปกติแล้วระยะเวลาก่อตัวจะเร็วขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะว่าอุณหภูมิจะเป็นตัวไปเร่งปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นหากอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้การเกิดอุณหภูมิสูงสุดช้าตามไปด้วย เมื่อเป็นเช่นนี้ระยะเวลาก่อตัวของซีเมนต์เพสต์จึงใช้เวลานานตามไปด้วย



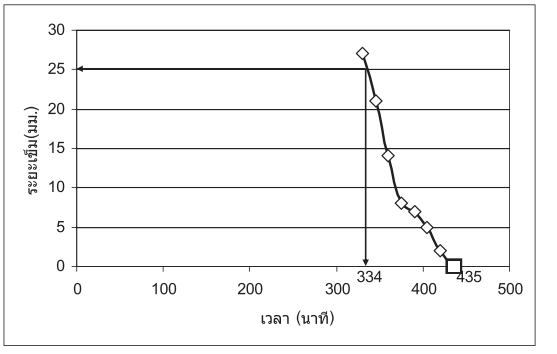
รูปที่ 5 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.38



รูปที่ 6 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45



รูปที่ 7 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55



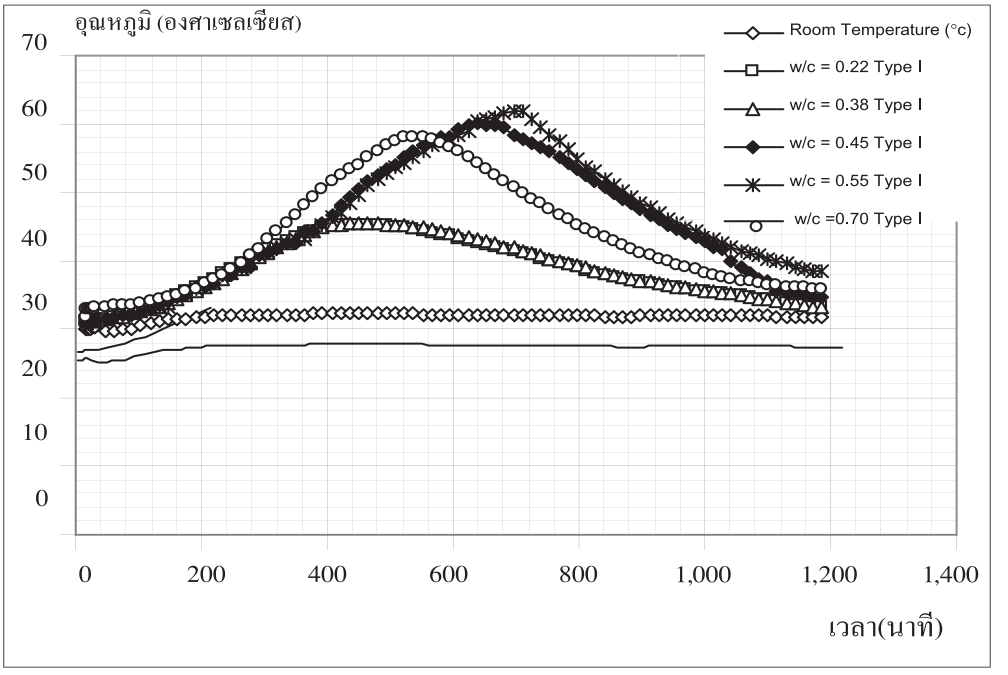
รูปที่ 8 ระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.70

4.3 การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์

4.3.1 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

จะพบว่าอุณหภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาในช่วงขั้นที่ 1 ของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่อยู่ในช่วง 15 นาทีแรก อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 9 และขั้นที่ 2 ของการทำปฏิกิริยาไฮเดรชัน ที่ไม่ค่อยมีปฏิกิริยาเรียกว่าดอร์แมนต์ (Dormant Period) หรือระยะสงบพบว่าอุณหภูมิที่เกิดในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าที่ใกล้เคียงกันเหมือนเดิมเช่นเดียวกับขั้นที่ 1 และหลังจากนั้นเวลาผ่านไปประมาณ 2 ถึง 3 ชม. จะเข้าขั้นที่ 3 มีการทำปฏิกิริยาเกิดขึ้นอีกครั้ง จะพบว่าอุณหภูมิของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22 และ 0.38 ถึงอุณหภูมิสูงสุดก่อนอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์อื่นๆ และแนวโน้มของการเกิดของอุณหภูมิของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22 และ 0.38 มีค่าใกล้เคียงกันมาก ส่วนแนวโน้มของการเกิดของอุณหภูมิของอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 และ 0.55 คล้ายกับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22 และ 0.38 แต่การเกิดขึ้นของอุณหภูมิที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 และ 0.55 ยังคงเพิ่มขึ้นต่อไปประมาณ 10 ชม. ค่าอุณหภูมิที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.45 จะมีค่าลดลงเร็วกว่าค่าอุณหภูมิที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 แต่อัตราการ

เกิดของอุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยแล้วจึงมีค่าลดลง ทำให้ค่าอุณหภูมิที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.55 มีค่าสูงสุด สำหรับที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.70 หลังจากเข้าขั้นที่ 3 ของการเกิดปฏิกิริยาอัตราการเกิดของอุณหภูมิจะสูงกว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22, 0.38, 0.45 และ 0.55 โดยสังเกตจากความชันของเส้นกราฟอุณหภูมิโดยเฉพาะในช่วงแรกมีค่ามากกว่า แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจะพบว่ามีค่าต่ำกว่าเมื่อเทียบกับซีเมนต์เพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.45 และ 0.55 ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์สามารถอธิบายได้ว่าการที่ซีเมนต์เพสต์มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าปริมาณปูนซีเมนต์ที่อยู่ในเนื้อซีเมนต์เพสต์นั้นจะถูกเจือจางเพิ่มมากขึ้นจากปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้อุณหภูมิจากการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันถึงจุดสูงสุดช้ากว่าในกรณีของซีเมนต์เพสต์ที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า

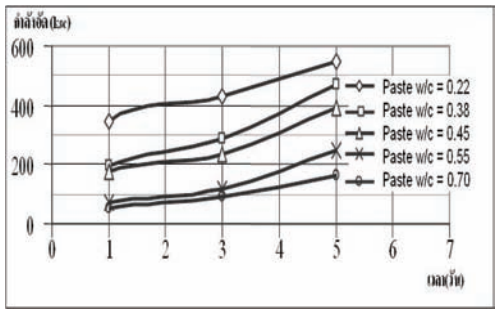


รูปที่ 9 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

4.4 การวัดค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีต (บ่มปกติและบ่มไมโครเวฟ) ที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน

4.4.1 การวัดค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

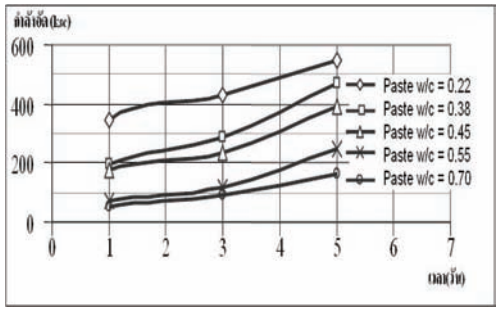
อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ยิ่งมากกำลังอัดจะลดลง กล่าวคือในซีเมนต์เพสต์ปัจจัยที่มีผลก่อกำลังคือ ปริมาณของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานในเนื้อซีเมนต์เพสต์ หมายความว่า ถ้าในเนื้อซีเมนต์เพสต์มีปริมาณของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานอยู่มากกำลังของซีเมนต์เพสต์จะเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22 ซึ่งมีค่าอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยที่สุด หมายความว่ามี ปริมาณปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานในเนื้อซีเมนต์เพสต์มากที่สุด จึงมีกำลังอัดมากที่สุด จากนั้นจะเห็นว่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์จะลดลงตามอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ค่ากำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน

4.5 การวัดค่ากำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1

พบว่าถ้าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ยิ่งมากกำลังอัดจะลดลง กล่าวคือในคอนกรีตปัจจัยที่มีผลก่อกำลังที่สำคัญคือ ปริมาณของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานในเนื้อซีเมนต์เพสต์ หมายความว่า ถ้าในเนื้อซีเมนต์เพสต์มีปริมาณของปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานอยู่มาก กำลังของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตาม แต่ต้องจำกัดปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องต่อกำลังอัดของคอนกรีตให้น้อยที่สุด เช่น การกระทุ้งหรือการอัดคอนกรีตแบบอื่นๆ การเข้าแบบ และลดการเกิดโพรงอากาศหรือฟองอากาศในคอนกรีต เป็นต้น ซึ่งจะพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.38 มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยที่สุด หมายความว่ามีปริมาณปูนซีเมนต์หรือวัสดุประสานในเนื้อซีเมนต์เพสต์มากที่สุด จึงมีกำลังอัดมากที่สุด จากนั้นจะเห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะลดลงตามอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 11



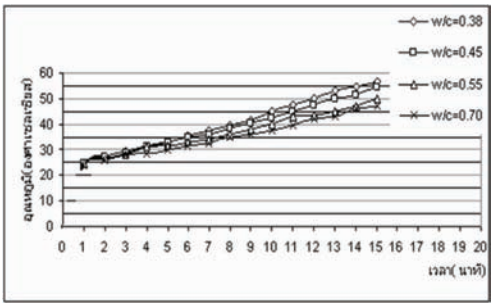
รูปที่ 11 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน

4.6 การทดสอบหาค่ากำลังที่เหมาะสมของเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในการให้พลังงานแก่คอนกรีต

การทดลองหาค่ากำลังที่เหมาะสมของเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในกระบวนการให้พลังงานที่เหมาะสมแก่คอนกรีต เป็นการทดลองเพื่อหาพลังงานที่เหมาะสมที่ใช้ให้พลังงานแก่คอนกรีตโดยการวิเคราะห์จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในซีเมนต์เพสต์ประเภทที่ 1 ในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ไม่มีค่าใดเลยที่เกิน 60 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 12 จากนั้นทำการวิเคราะห์และทดสอบพบว่ากำลังที่เหมาะสมของเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในกระบวนการให้พลังงานที่เหมาะสมแก่คอนกรีตอยู่ที่ประมาณ 100 วัตต์ และ Microwave Heating Time อยู่ที่ 15 นาที และระยะ Delay Time ที่เหมาะสมได้วิเคราะห์จากการหาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์พบว่าระยะ Delay Time ที่เหมาะสมอยู่ที่ 30 นาที

4.6.1 การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะให้พลังงานไมโครเวฟ

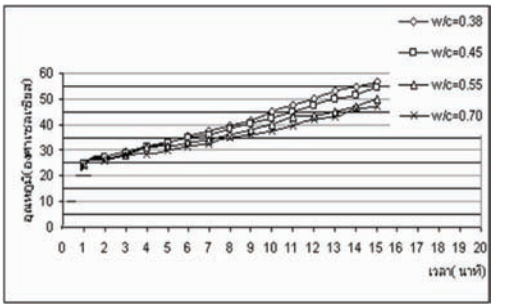
พบว่าพลังงานไมโครเวฟที่ให้คอนกรีตในแต่ละอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน ถ้าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อย อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะให้พลังงานไมโครเวฟก็จะสูงขึ้น เนื่องจากน้ำเป็นอนุภาคที่ถูกพลังงานไมโครเวฟกระตุ้นโดยตรง กล่าวคือถ้าน้ำในเนื้อคอนกรีตมีปริมาณน้อยโอกาสที่น้ำจะถูกพลังงานไมโครเวฟกระตุ้นมากกว่าและทั่วถึงกว่าคอนกรีตที่ปริมาณน้ำมาก ดังนั้นคอนกรีตที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์น้อยจึงเกิดอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 12



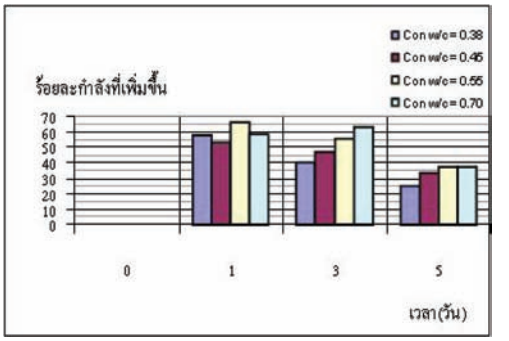
รูปที่ 12 การวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในคอนกรีตขณะให้พลังงานไมโครเวฟของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1

4.6.2 การหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน ที่ผ่านการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ

พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่าเพิ่มขึ้นจากการบ่มแบบปกติ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะช่วยกระตุ้นให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดสูงขึ้นและลดน้ำที่ไม่จำเป็นที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตจึงทำให้กำลังมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 13 และรูปที่ 14



รูปที่ 13 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนต์ประเภทที่ 1



รูปที่ 14 ร้อยละกำลังของคอนกรีตที่เพิ่มขึ้นเมื่อบ่มด้วยไมโครเวฟเทียบกับการบ่มแบบปกติ

4.6.3 การวัดค่าการเหนี่ยวนำความร้อนของคอนกรีตแบบบ่มด้วยไมโครเวฟและการบ่มแบบปกติที่อายุ 1 วัน

พบว่าคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟจะมีค่าการเหนี่ยวนำความร้อน (Thermal Conductivity) ลดลงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่บ่มแบบปกติ เนื่องจากพลังงานไมโครเวฟจะไปลดโพรงคาปิลารีที่เป็นช่องว่างของน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและลดปริมาณน้ำในเจลโพรง จึงมีผลทำให้กำลังเพิ่มขึ้นและการนำความร้อนที่ลดลงเพราะน้ำในเนื้อวัสดุซีเมนต์เป็นตัวช่วยในการนำความร้อนของวัสดุซีเมนต์ ซึ่งค่าการเหนี่ยวนำความร้อนของคอนกรีตแบบบ่มไมโครเวฟและการบ่มแบบปกติที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าการนำความร้อนของคอนกรีตที่บ่มปกติและบ่มโดยพลังงานไมโครเวฟ

ค่าการนำความร้อนที่ไม่ผ่านการบ่มโดยเตาอบไมโครเวฟ (W/mK)	ค่าการนำความร้อนที่ผ่านการบ่มโดยเตาอบไมโครเวฟ (W/mK)
W/C = 0.38	**W/C = 0.38**
Average = 0.346	Average = 0.309
W/C = 0.45	**W/C = 0.45**
Average = 0.357	Average = 0.309
W/C = 0.55	**W/C = 0.55**
Average = 0.359	Average = 0.307
W/C = 0.70	**W/C = 0.70**
Average = 0.345	Average = 0.303

5. บทสรุป

จากการศึกษาคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของคอนกรีตด้านระยะเวลาการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันในซีเมนต์เพสต์ กำลังอัดของซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 1, 3 และ 5 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.22, 0.38, 0.45, 0.55 และ 0.70 จะพบว่ากำลังที่เหมาะสมของเครื่องไมโครเวฟที่ใช้ในกระบวนการให้พลังงานที่เหมาะสมแก่คอนกรีตอยู่ที่ 100 วัตต์ ค่า Microwave Heating Time อยู่ที่ 15 นาที และระยะ Delay Time ที่เหมาะสมได้วิเคราะห์จากการหาการก่อตัวเริ่มต้นของซีเมนต์เพสต์พบว่าระยะ Delay Time ที่เหมาะสมอยู่ที่ 30 นาที และเมื่อคอนกรีตที่ผ่านกระบวนการบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟพบว่ากำลังรับแรงอัดในช่วงแรกของคอนกรีตที่บ่มโดยพลังงานไมโครเวฟ มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่บ่มโดยน้ำ แต่ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตที่บ่มโดยพลังงานไมโครเวฟจะมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตที่บ่มโดยน้ำ

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชัยพงษ์ ไชยธงรัตน์ และคุณวรพงษ์ ลีแสนวัฒน ที่ช่วยดำเนินการทดสอบในห้องปฏิบัติการ บริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุเคราะห์ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้อนุเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนและการกระจายขนาดคละของอนุภาคของปูนซีเมนต์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ได้อนุเคราะห์ทดสอบความเป็นผลึกโดยใช้เทคนิค XRD ของปูนซีเมนต์

7. เอกสารอ้างอิง

1. บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ดวงเดือน อาจองค์, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, ณรงค์ศักดิ์ มากุล และ ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ, 2550, “การประยุกต์ใช้พลังงานไมโครเวฟเพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต” เอกสารเผยแพร่, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

2. Sutton, W.H., 1989 “Microwave Processing of Ceramic Materials”, *Ceramic Bulletin*, Vol. 68, No. 2, pp. 376-386.

3. ณัฐวุฒิ สุวรรณภูมิ, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช, วัชระ เกาะแก้ว, ณรงค์ศักดิ์ มากุล, และ บุรฉัตร ฉัตรวีระ, 2550, “การ

พัฒนากำลังอัดของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟร่วมกับระบบสายพานลำเลียงต่อเนื่อง", *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21*.

4. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 127 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.

5. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 125 : Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates", Annual Book of ASTM Standard, Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.

6. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 128 : Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.

7. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 191 : Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.

8. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 109 : Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.

9. Leung, C.K.Y., and Pheeraphan, T., 1994, "Microwave Curing of Portland Cement Concrete: Experimental Result and Feasibility of Practical Applications", *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 2, pp. 67 – 73.

10. Dumangas Jr., M.I., 1999, "The Use of Microwave Curing Technique to Estimate the Long – term Strength of Normal Concrete", *M.Eng*. Thesis, School of Civil Engineering, AIT.

11. American Society for Testing Materials, 2003, "ASTM C 39 : Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard,* Vol. 4.02, Philadelphia, PA, USA.