



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

**โครงการ การพัฒนานวัตกรรมทำนอยก้ำก้ำดัชดัชของคอนกรีต
โดยวิธีการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ**

โดย นาวาอากาศตรี ผศ.ดร. ธนากร พิระพันธุ์ และคณะ

ธันวาคม 2547

สัญญาเลขที่ TRG4580074

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีต
โดยวิธีการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | | |
|---|--------------------------------------|---------------------------|
| 1 | นาวาอากาศตรี ผศ.ดร. ธนากร พิระพันธุ์ | โรงเรียนนายเรืออากาศ |
| 2 | รองศาสตราจารย์ ดร. พิชัย นิมิตรขสกุล | สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย |

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: TRG450074

ชื่อโครงการ: การพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ชื่อนักวิจัย: น.ต.พศ.ดร.ธนากร พิระพันธุ์ โรงเรียนนายเรืออากาศ

E-mail Address: petevmi@alum.mit.edu

ระยะเวลาโครงการ: ก.ค. 2545-ธ.ค. 2547

พลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดที่รวดเร็วในช่วงระยะเวลาเริ่มแรก และสามารถนำค่ากำลังอัดนี้ในการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาวได้ งานวิจัยนี้พัฒนาวิธีการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตเพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับคอนกรีตที่ผสมเถ้าลอย คอนกรีตผสมเสร็จทั่วไป ใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟรุ่นใดๆ และให้สามารถทำนายค่ากำลังอัดได้ในระยะเวลาที่รวดเร็วขึ้น วิธีทดลองเริ่มด้วยการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยทั้งที่มีสารเคมีผสมเพิ่มและไม่มี เพื่อนำไปใช้พัฒนาสมการที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัด จากนั้นทดสอบความแม่นยำของสมการเดิมที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้ได้กับคอนกรีตทั่วไป โดยใช้ทดสอบกับคอนกรีตผสมเสร็จ จากนั้นพัฒนาแนวทางเพื่อใช้ในการประยุกต์วิธีการทำนายค่าให้ใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ และสุดท้ายพัฒนาแนวคิดในการลดระยะเวลาการทำนายค่ากำลังอัดโดยลดระยะเวลาที่ใช้ก่อนการเร่งการแข็งตัวที่ทดสอบโดยใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ ผลการทดลองที่ได้พบว่า (1) เทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 และ 91 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยได้ (2) สมการเดิมที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดเดิมใช้ได้กับคอนกรีตผสมเสร็จ (3) เทคนิคนี้สามารถใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ และ (4) สามารถลดระยะเวลาการทำนายค่ากำลังอัดได้ โดยลดระยะเวลาที่ใช้ก่อนการเร่งการแข็งตัว โดยใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์เป็นตัวทดสอบ

คำหลัก: กระบวนการไมโครเวฟ การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Abstract

Project Code: TRG450074

Project Title: Development of concrete compressive strength prediction technique using the accelerated curing with microwave energy

Investigator: Sqn.Ldr. Thanakorn Pheeraphan, Ph.D. ; Royal Thai Air Force Academy

E-mail Address: petevmi@alum.mit.edu

Project Period: July 2002-December 2004

Microwave energy can accelerate the hydration of cement, resulting in rapid strength development of concrete in an early period. The accelerated strength can be used to predict the long term strength. This work focused on the verification of the formula used to predict the long-term strength using ready-mixed concrete, the development of the prediction technique to use with any microwave oven and with any fly ash concrete, and the reduction of prediction time. The work began with determining the optimal microwave curing process for fly ash concrete to use in prediction. Then using the ready-mixed concrete to verify the prediction formula. For developing the technique to use with any microwave oven, guidelines were developed and verified. To reduce the prediction time, reduction of penetration resistance level of mortar was proposed and verified. The results showed that (1) the technique could be used to predict 28-day and 91-day of fly ash concrete, (2) the developed formula could be used to predict the strength of ready-mixed concrete, (3) the technique could be applied to any microwave oven, and (4) reduction in prediction time by reducing the penetration resistance level of sample before accelerated curing was possible.

Keywords: Microwave Processing, Strength Prediction, Portland Cement

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ทุกวันนี้เทคโนโลยีการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตสมัยใหม่ที่ก้าวหน้าขึ้น ทำให้การก่อสร้างมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตเหลวในระยะเวลาที่เร็วที่สุดหลังจากการเท เพื่อที่จะทำให้สามารถพิจารณาหาหนทางแก้ไขปัญหาที่เกิดจากคอนกรีตมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้แล้ว ในปัจจุบันแก๊สลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหิน นิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต ทั้งนี้เนื่องจากเป็นการช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต และเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางด้านการรับกำลังอัดและความคงทนให้กับคอนกรีต

แม้ว่าในปัจจุบัน ผู้วิจัยได้ริเริ่มเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อให้สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ โดยใช้เวลารายในประมาณ 7.5 ถึง 20.5 ชั่วโมง และให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 15\%$ เทคนิคการทำนายดังกล่าวยังมีข้อจำกัดอยู่ที่ (1) คอนกรีตที่ใช้ไม่มีสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (2) เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ต้องเป็นไปตามที่ระบุไว้ แต่เนื่องจากว่า เตาอบไมโครเวฟดังกล่าว ไม่สามารถหาได้แพร่หลาย เนื่องจากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีทำให้ บริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายได้เลิกผลิตรุ่นดังกล่าวไปแล้ว ทำให้ไม่สามารถนำเทคนิคการทำนายค่านี้ไปใช้ได้ และ (3) เวลาที่ใช้ในการทำนายค่ายังคงมีค่ามากอยู่ การพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตนี้ เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับคอนกรีตผสมแก๊สลอย ให้สามารถทำนายค่าได้เร็วขึ้น โดยที่ยังคงความแม่นยำในการทำนายค่าไว้ และให้สามารถใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟทั่วไป จะช่วยทำให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและแพร่หลายมากขึ้น

2. วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับคอนกรีตผสมแก๊สลอย ให้สามารถทำนายค่าได้ในระยะเวลาที่เร็วขึ้น และเพื่อเสนอแนวทางอย่างง่าย ในการนำเทคนิคนี้ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ ในการทำนายค่ากำลังอัด

3. ระเบียบวิธีวิจัย

ขั้นตอนการทดลองแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ขั้นตอนใหญ่ตามวัตถุประสงค์ของโครงการคือ

ขั้นตอนที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้สามารถใช้ได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ทั่วไป รายละเอียดทั้งหมดของขั้นตอนที่ 1 มีดังนี้คือ

1.1 การหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสม โดยที่ตัวแปรสำคัญของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่จำเป็นจะต้องศึกษาประกอบด้วย 4 ตัวแปร ดังนี้คือ

(1) เวลาที่ใช้ในการผสมและบรรจุลงแบบหล่อภายหลังจากน้ำทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ ก่อนที่จะใช้พลังงานไมโครเวฟเร่งการแข็งตัว ซึ่งในที่นี้ใช้ ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์เป็นตัวกำหนดว่าเมื่อไรถึงจะเริ่มให้พลังงานไมโครเวฟแก่ตัวอย่างคอนกรีต

(2) เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ ในที่นี้กำหนดให้ใช้ที่เวลารวมทั้งหมดที่ 45 นาที เนื่องจากเป็นเวลาที่เหมาะสมแล้ว จากผลงานวิจัยเดิมของผู้วิจัยที่ผ่านมา

(3) ระดับกำลังของตู้อบไมโครเวฟที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะเป็นระดับกำลังที่คงที่ตลอดเวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ หรือเป็นระดับกำลังที่คงที่ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟก็ได้

(4) เวลาที่ใช้ในการป้อนคอนกรีตแบบปกติภายหลังจากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ก่อนการทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรก

1.2 การสร้างความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้และไม่ใช้สารผสมเพิ่ม

เมื่อได้ กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว จึงนำมาใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่ประมาณ 10-30% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ที่ค่ากำลังอัดในช่วง 150-600 กก./ตร.ซม. และเก็บข้อมูลค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และ ค่ากำลังอัดที่ 28 วันที่ได้จากการป้อนปกติ เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 28 วันต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้สามารถใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ

ตัวแปรที่จะทำการศึกษานี้มีดังนี้คือ

(1) ระดับพลังงานที่ให้ของเตาอบไมโครเวฟแต่ละเครื่อง ในการทดลองนี้คาดว่าจะใช้เตาอบไมโครเวฟจำนวน 2 เครื่องที่แตกต่างกันเดิมที่เคยใช้

(2) จำนวนของแท่งทดสอบ ในกรณีปกติจะใช้ 4 แท่งทดสอบ แต่ถ้าหากว่าขนาดของเตาอบไมโครเวฟใหม่มีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลต่อ จำนวนของแท่งทดสอบที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวมีจำนวนลดลง อาจจะใช้จำนวนแท่งทดสอบเพียง 3 แท่งทดสอบ

(3) ค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยจะศึกษาคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอย ในช่วงค่ากำลังอัดปกติ ตั้งแต่ประมาณ 150-600 กก./ตร.ซม.

รายละเอียดทั้งหมดของขั้นตอนที่ 2 มีดังนี้คือ

2.1 ศึกษาถึงเตาอบไมโครเวฟที่มีอยู่ตลาดปัจจุบัน ทั้งในเรื่องของ ยี่ห้อ ขนาดภายใน ราคา ระดับกำลัง ความสามารถในการรับน้ำหนัก รวมถึงการออกแบบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการเลือกใช้ เตาอบไมโครเวฟโดยจะพิจารณาถึง ขนาดภายในที่เหมาะสม ระดับกำลังที่ให้ และ ความสามารถในการรับน้ำหนัก เป็นสำคัญ

2.2 เทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ถูกเลือกใช้ในการทดลองนี้ตามวิธีการของ International Electrotechnical Commission 705

2.3 ศึกษาการให้พลังงานไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟเดิมที่เหมาะสม ตามขนาด และจำนวนของแท่งทดสอบคอนกรีตที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวและแนะนำระดับการให้ พลังงาน ไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟ เพื่อการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม

2.4 ทดลองนำระดับการให้พลังงานไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟที่แนะนำไว้ มาใช้ ทดลองกับเตาอบไมโครเวฟที่ถูกเลือกใช้ในการทดลองนี้ เพื่อศึกษาว่ามีการเร่งการแข็งตัว ที่เหมาะสมหรือไม่ อย่างไร

2.5 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ และให้ข้อเสนอแนะ อื่นๆ ต่อไป (2 เดือน)

ขั้นตอนที่ 3 มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของ คอนกรีต โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้ สามารถทำนายค่าได้ในระยะเวลาที่เร็วขึ้น

ตัวแปรที่จะทำการศึกษาในขั้นตอนนี้มีดังนี้คือ

(1) ระดับพลังงานไมโครเวฟ ระดับพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมในการเร่งการแข็งตัวของ คอนกรีต สามารถใช้ในระดับพลังงานที่สูงขึ้นกว่าระดับพลังงานที่เหมาะสมเดิม โดยยอมให้ค่า กำลังอัดที่ระยะยาว ของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว มีค่าน้อยกว่า ค่ากำลังอัดที่ระยะ ยาว ของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ ไม่เกิน 25%

(2) ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ ซึ่งมีประโยชน์ในการกำหนดเวลาที่ เริ่มเร่งขบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ สามารถใช้ในระดับค่าที่ น้อยกว่าเดิม คือในช่วง 0 - 100 ปอนด์/ตร.นิ้ว ซึ่งเดิมกำหนดใช้ในช่วง 400-500 ปอนด์/ตร.นิ้ว

(3) ระยะเวลาในการพักแท่งทดสอบคอนกรีตภายหลังการให้ความร้อน สามารถใช้ในระดับ ค่าที่น้อยกว่าเดิม ซึ่งเดิมใช้ค่าอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของแท่งทดสอบในช่วง 30-40 องศา เซลเซียส เป็นตัวบอกถึงระยะเวลาพักที่เหมาะสม ในการทดลองนี้เลือก ใช้ระยะเวลาในช่วง อุณหภูมิ 40-50 องศาเซลเซียส

(4) ค่ากำลังอัดของคอนกรีต โดยจะศึกษาคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยในช่วงค่ากำลังอัดปกติ ตั้งแต่ประมาณ 150-600 กก./ตร.ซม.

ส่วนรายละเอียดทั้งหมดของขั้นตอนที่ 3 มีดังนี้คือ

3.1 ศึกษาถึงผลของโดยใช้ระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้นที่มีต่อวิธีการทำนายค่ากำลังอัด

3.2 ศึกษาถึงผลของการใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ที่น้อยลง ที่มีต่อวิธีการทำนายค่ากำลังอัด

3.3 ศึกษาถึงผลของการใช้ระยะเวลาในการพักแท่งทดสอบคอนกรีตภายหลังการให้ความร้อนที่น้อยลง ที่มีต่อวิธีการทำนายค่ากำลังอัด

3.4 ศึกษาถึงผลรวมของการใช้ระดับพลังงานไมโครเวฟที่สูงขึ้น การใช้ค่าแรงต้านทาน การจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ที่น้อยลง และการใช้ระยะเวลาในการพักแท่งทดสอบ คอนกรีต ภายหลังการให้ความร้อนที่น้อยลงที่มีต่อวิธีการทำนายค่ากำลังอัด

3.5 สรุปผลการทดสอบสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้ และให้ข้อเสนอแนะ อื่นๆ ต่อไป

4. แผนการดำเนินงานวิจัยตลอดโครงการในแต่ละช่วง 6 เดือน

โครงการนี้ใช้เวลาในการดำเนินการทั้งสิ้น 2 ปีโดยสามารถระบุเวลาที่ต้องใช้ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่	เดือนที่							
	0-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18	19-21	22-24
ขั้นตอนที่ 1								
1.1								
1.2								
ขั้นตอนที่ 2								
2.1								
2.2								
2.3								
2.4								
2.5								
ขั้นตอนที่ 3								
3.1								
3.2								
3.3								
3.4								
3.5								

5. ผลงานที่คาดว่าจะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติในแต่ละปี

ปีที่ 1: ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์

- (1) Prediction of 28-day compressive strength of fly ash concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy

ปีที่ 2: ชื่อเรื่องที่คาดว่าจะตีพิมพ์

- (1) Prediction of 28-day compressive strength of concrete containing chemical admixtures within 12 hours based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy
- (2) Effect of microwave oven capability on strength prediction technique using the accelerated strength

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์

- (1) Cement and Concrete Research
- (2) Journal of Materials in Civil Engineering
- (3) ACI Materials Journal
- (4) Construction and Building Materials

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย หลังปริญญาเอกในการดำเนินงานโครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณผู้ที่มีรายชื่อดังต่อไปนี้

รศ.ดร.พิชัย นิมิตรยงสกุล คณะวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ได้ให้ คำปรึกษาแนะนำและข้อคิดเห็นในการดำเนินงานวิจัย

Tanabodee Harithaithaworn, Jirapong Wachirathainroj และ Kongdej Cheawchan นักศึกษาระดับปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่มีส่วนร่วมในการทำงานวิจัย

ดร.ธรรมศักดิ์ สยามภักดี คณะวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ได้ให้การ ช่วยเหลือในการเตรียม อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

นักเรียนนายเรืออากาศ วิรัชศักดิ์ แก้วเทศ และนักเรียนนายเรืออากาศพิภพ ตะเกาพงษ์ ที่มี ส่วนร่วมในการทำงานวิจัย

ภาควิชาเคมี กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ ในการให้ความ อนุเคราะห์สารเคมีและอุปกรณ์ทางเคมี

นายทองสุข ไพรัชขวน้อย นายเลือน แก้วขวน้อย และ นายสุทิน บุญศรี ในการให้ความ ช่วยเหลือในการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็น

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ ในการสนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์และบุคลากร ในการร่วมดำเนินการวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัยทุกคนที่มีส่วนช่วยเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 การทดลอง	26
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	26
3.2 วัสดุและการเตรียมวัสดุ	29
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	30
3.4 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	37
4.1 ผลการพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต ให้สามารถใช้ได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม	37
4.2 ผลการพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม ให้สามารถใช้ได้กับเดอบไมโครเวฟใดๆ	49

	หน้า
4.3 ผลการพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดให้สามารถทำนายค่าได้ใน ระยะเวลาที่เร็วขึ้น	56
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุป	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	62
บรรณานุกรม	63
ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ	66
ภาคผนวก	68
บทความที่ 1 การพัฒนากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงาน ไมโครเวฟเพื่อใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสม เพิ่มที่อายุ 28 วัน	69
บทความที่ 2 Development of an optimal microwave curing process for concrete containing admixtures to predict 28-day compressive strength	77
บทความที่ 3 Development of an optimal microwave curing process for concrete containing admixtures to predict 28-day compressive strength	87

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าแทนองค์การสูญเสียของวัสดุชนิดต่างๆที่วัดค่าที่ความถี่ 3 GHz	19
2.2 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัด	23
2.3 ผลของขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 ที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากแท่งทดสอบมาตรฐาน	24
2.4 ผลของขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากแท่งทดสอบมาตรฐาน	25
3.1 สมบัติทางกายภาพของถั่วลอ่ยเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง	30
3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของถั่วลอ่ยเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง	30
4.1 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตผสมถั่วลอ่ยที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม	37
4.2 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตผสมถั่วลอ่ยที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม	44
4.3 คุณสมบัติของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้	53
4.4 ระดับกำลังที่ใช้ จำนวนแท่งตัวอย่างและพลังงานต่อแท่งตัวอย่างที่ให้ของเตาอบไมโครเวฟแต่ละรุ่นที่ใช้	54
4.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการใช้ความร้อนแบบใกล้เคียงกับอัตราเดิม(P1)	55
4.6 การเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการใช้ความร้อนแบบสูงกว่าอัตราเดิม(P2)	56

ตารางที่	หน้า
4.7 การเปรียบเทียบค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ต้าร์ของ คอนกรีตเทียบกับระยะเวลาถึงผลมคอนกรีต	58
4.8 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ที่เวลาพัก 6 , 7 , 8 และ 9 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน	59

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การตอบสนองจากวัสดุเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ	18
3.1 แบบหล่อโพลีเอธิลีนหนาแน่นสูง รูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) และฐานแบบหล่อโพลีเอธิลีน	26
3.2 แบบหล่อโพลีเอธิลีนรูปทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดภายใน 150 มม. x 150 มม. x 150 มม. ทำจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน และฐานแบบหล่อโพลีเอธิลีนเปรียบเทียบกับแบบหล่อโลหะ	26
3.3 เตาอบไมโครเวฟ	27
3.4 เครื่องถอดแบบแท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ออกจากแบบหล่อ	28
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้หล่อหัวแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม.	28
4.1 ผลของระดับกำลังต่างๆที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (C:S:A=1:2.54:3.32 และ W/B = 0.54)	38
4.2 ผลของระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (C:S:A=1:2.54:3.32 และ W/B = 0.54; F/(C+F)=0.30; P40(30)+P30(15))	39
4.3 ผลของระดับกำลังที่ P40(30)+P30(15) ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกต่างๆ (C:S:A=1:4.34:4.85 ; W/B = 0.79; F/(C+F) = 0.30; delay time = 30 นาที)	40
4.4 ผลของการใช้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ต่างๆ (C:S:A=1:2.54:3.32 ; W/B = 0.54) (ก) ที่อายุ 28 วัน และ (ข) ที่อายุ 91 วัน	42
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 6.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน	43

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่าจากค่า กำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 6.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ด้วยพลังงานไมโครเวฟ	43
4.7 กราฟแสดงผลของสารเคมีผสมเพิ่มต่อระยะเวลาหลังจากผสมคอนกรีตและ ทดสอบมอร์ตาร์แล้วได้ค่าการต้านทานการจมของเข็มเท่ากับ 3.45 MPa เทียบกับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย	44
4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบหลังจากผ่านการให้ ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	45
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่ง การแข็งตัวที่ ระยะแรกและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-60%	46
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่ง การแข็งตัวที่ ระยะแรกและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติ ที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-40%	47
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่ง การแข็งตัวที่ ระยะแรกและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติ ที่ 91 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-60%	48
4.12 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติ กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า	48
4.13 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 91 วันของคอนกรีตบ่มปกติ กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 91 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า	49
4.14 ผลการทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ	50
4.15 ผลการทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเสร็จ	51
4.16 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 (w/c = 0.485; ปูนซีเมนต์ต่อทรายคัดขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 778 = 1:2.75) (ก) ที่ระยะแรก และ (ข) ที่ระยะหลัง	52

รูปที่	หน้า
4.17 การทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเมื่อใช้ เตาไมโครเวฟและจำนวนแห่งทดสอบที่ต่างกัน	57
4.18 ค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัด ที่ 28 วันของคอนกรีตปกติที่มีระยะพักก่อนการเร่งการแข็งตัวที่ต่างกัน	60

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ทุกวันนี้เทคโนโลยีการก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตสมัยใหม่ที่ก้าวหน้าขึ้น ทำให้การก่อสร้างมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตเหลวในระยะเวลาที่เร็วที่สุดหลังจากการเท เพื่อที่จะทำให้สามารถพิจารณาหาหนทางแก้ไขปัญหาที่เกิดจากคอนกรีตมีค่ากำลังอัดต่ำกว่าค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้

การตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตเพื่อดูว่าคอนกรีตที่ผ่านการเทแล้วจะสามารถรับกำลังอัดได้เต็มที่อายุ 28 วันได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ โดยปกตินิยมกระทำโดยการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุ 7 วัน [1] ในขณะที่ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จนิยมใช้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 1 วันที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (Grant และ Warren, Dhir, Dhir และ Gillespie อ้างถึงใน [1]) ซึ่งจะเห็นได้ว่าใช้เวลาที่มากกว่า 24 ชั่วโมง

เทคนิคการหานายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะยาวมีอยู่หลายวิธี อาทิเช่น การทดสอบหาปริมาณของปูนซีเมนต์ต่อหนึ่งหน่วย หรือปริมาณของน้ำต่อหนึ่งหน่วย หรืออัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งท้ายที่สุดจะนำอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่คำนวณได้ไปใช้ในการหานายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน หรือ การใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ และนำค่ากำลังที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสูตรที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังที่ 28 วัน และค่ากำลังที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่เหมือนกัน ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้ ใช้การเร่งการแข็งตัวด้วยการบ่มในน้ำร้อน น้ำเดือด น้ำมันร้อน หรือเตาอบไฟฟ้า เป็นต้น [2] นอกจากนี้ยังมีวิธีใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากลักษณะพิเศษอื่นๆ ในการหานายค่ากำลังอัด เช่น การหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลาที่ต้องการกับส่วนประกอบทางเคมี หรือความละเอียดของปูนซีเมนต์ หรือรูโพรงที่ประมาณได้จากปริมาณฟองอากาศของส่วนผสมเหลว และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ หรือความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือความเร็วที่วัดได้จากโซนิกพัลส์ (sonic pulse) ที่ระยะแรก [3]

เทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่รวดเร็ว เกี่ยวข้องกับการนำของอิออน และการจัดเรียงตัวของสารประกอบที่มีสองขั้ว เมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ การให้ความร้อนนี้เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตและให้ความร้อนที่ค่อนข้างทั่วถึง สามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตได้ ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนา

กำลังต้านทานแรงอัดที่รวดเร็วในช่วงระยะเวลาอันสั้น และสามารถใช้ประโยชน์จากกำลังต้านทานแรงอัดที่สูงในระยะแรกนี้ ในการทำนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตได้ ซึ่งธนาคารและคณะ[4-5] ได้ริเริ่มเทคนิคการทำนาค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อให้สามารถใช้ทำนาค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตทั่วไปที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ โดยใช้เวลากายในประมาณ 7.5 ถึง 20.5 ชั่วโมง และให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 15\%$

เทคนิคการทำนาค่ากำลังอัดดังกล่าวยังมีข้อจำกัดอยู่ที่ เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ต้องมีขีดความสามารถและคุณลักษณะตามที่ระบุไว้ แต่เนื่องจากว่า เตาอบไมโครเวฟดังกล่าว ไม่สามารถหาได้แพร่หลาย บางรุ่นได้มีการเลิกผลิตแล้ว ทำให้ไม่สามารถนำเทคนิคการทำนาค่านี้นี้ไปใช้ได้ นอกจากนี้ เวลาที่ใช้ในการทำนาค่ายังคงมีค่ามากอยู่ การพัฒนาเทคนิคการทำนาค่ากำลังอัดของคอนกรีตนี้ เพื่อให้สามารถทำนาค่าได้เร็วขึ้น โดยที่ยังคงความแม่นยำในการทำนาค่าไว้ และให้สามารถใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟทั่วไป จะช่วยทำให้เกิดประโยชน์ในการนำไปใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและแพร่หลายมากขึ้น อีกทั้งยังไม่สามารถใช้ทำนาค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเด็กลอยซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากอุตสาหกรรมการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเผาถ่านหิน ที่ในปัจจุบันนิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ในการผลิตคอนกรีต เพื่อช่วยลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ช่วยลดต้นทุนการผลิตคอนกรีต และเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางด้านการรับกำลังอัดและความคงทนให้กับคอนกรีต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำนาค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับคอนกรีตผสมเด็กลอย เพื่อเสนอแนวทางอย่างง่าย ในการนำเทคนิคนี้ให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ ในการทำนาค่ากำลังอัด และเพื่อให้สามารถทำนาค่าได้ในระยะเวลาที่เร็วขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นประเภทธรรมดา

1.3.2 ศึกษาเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีตกำลังอัดปกติ

1.3.3 สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ประกอบด้วย สารลดน้ำพิเศษ สารเร่งการก่อตัว และ สารหน่วงการก่อตัว

1.3.4 ขนาดโตสุดของหินปูนที่ใช้ไม่เกิน 50 มม.

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 สามารถใช้วิธีการทำนาคำกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันโดยอาศัยคำกำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ ไม่จำกัดเฉพาะที่เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองนี้เท่านั้น

1.4.2 สามารถทำนาคำกำลังอัดได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว ทำให้สามารถแก้ไขคอนกรีตที่มีคำกำลังต่ำกว่าที่ระบุไว้ได้เร็วมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม

1.4.3 สามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของการผลิตคอนกรีต ในงานอุตสาหกรรมคอนกรีตได้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น คอนกรีตผสมเถ้าลอย ผลการทดลองการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ และวิธีการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาว และ รวมถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ปฏิริยาไฮเดรชัน และปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาของงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกัน ประกอบด้วย คอนกรีตผสมเถ้าลอย ผลการทดลองการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ และวิธีการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาว

2.1.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตผสมเถ้าลอย

Mehra [6] ได้ศึกษาผลของคุณสมบัติของเถ้าลอยที่มีต่อค่ากำลังต้านทานของส่วนผสมที่มีทั้งเถ้าลอยและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนเถ้าลอยต่อน้ำหนักของวัสดุประสานที่คงที่ ปริมาณของแคลเซียมและการจัดขนาดอนุภาคของเถ้าลอยเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สุดในการพัฒนากำลังต้านทานของส่วนผสมที่มีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าลอยที่บ่มปกติ

Gopalan และ Haque [7] ได้เสนอวิธีการออกแบบคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพื่อให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 และ 28 วัน วิธีที่ใช้อาศัยพื้นฐานมาจากกฎของ Abrams เพื่อพัฒนาตารางที่ใช้ในการออกแบบเนื่องจากการทดลองนี้ใช้เถ้าลอยเพียงชนิดเดียวและที่ความละเอียดค่าเดียว ผลการทดลองที่ได้พบว่าค่ากำลังต้านทานของคอนกรีตผสมเถ้าลอยขึ้นอยู่กับตัวแปรหลักดังนี้คือ (1) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (2) อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ โดยปริมาตร และ (3) ระยะเวลาที่ทดสอบ

Maltais และ Marchand [8] ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่มีต่อปฏิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และการพัฒนากำลังต้านทานของมอร์ต้าผสมเถ้าลอย ในการทดลองนี้ใช้เถ้าลอย class F จาก 2 แหล่งและใช้ปริมาณเถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ 10, 20 และ 30% โดยมวล โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเท่ากับ 20 และ 40°C ผลการทดสอบค่ากำลังอัดพบว่า อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อส่วนผสมเถ้าลอยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการบ่มระยะแรก นั่นคือค่ากำลังอัดที่ได้

จะมีค่าสูง เช่นค่ากำลังอัดที่อายุ 10 ชั่วโมงของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่บ่มที่ 40°C มีค่าสูงมากถึง 6 เท่าของมอร์ต้าผสมเถ้าลอยที่บ่มที่ 20°C นอกจากการเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มจะมีผลทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของเถ้าลอยเพิ่มขึ้นแล้ว จากการอ้างถึง Berry และ Malhotra ใน Maltais และ Marchand พบว่า เมื่อปฏิกิริยาปอซโซลานิกถูกเริ่มต้นด้วยความร้อนแล้ว ปฏิกิริยาดังกล่าวจะยังคงดำเนินต่อไป แม้ว่าอุณหภูมิจะลดลงก็ตาม ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อพื้นผิวของอนุภาคเถ้าลอยถูกละลายแล้วนั้น ปฏิกิริยาไฮเดรชันจะเกิดง่ายขึ้นมาก

Kostogloudis และคณะ [9] ได้เสนอแบบจำลองถดถอยพหุเชิงเส้นตรง (multiple linear regression) เพื่อทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน ตัวแปรอิสระของแบบจำลองนี้ประกอบด้วย (1) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 2 วัน (2) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดหลังจากแรงการแข็งตัวแบบให้ทั้งความชื้นและความดันที่ 214°C และ 2.07 N/mm^2 เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (3) อัตราส่วนของ $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$ ของปูนเม็ด (4) ส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ของปูนซีเมนต์ (5) ปฏิกิริยาที่แสดงถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก และ (6) ปริมาณของ C_3A ของปูนเม็ด จากการทดสอบทางสถิติพบว่า ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 2 วันเป็นตัวแปรอิสระที่มีความสำคัญมากที่สุด รองลงมาคือค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการแรงการแข็งตัว 3 ชั่วโมง ในขณะที่ตัวแปรอื่นๆมีความสำคัญน้อยกว่ามาก

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยในประเทศไทย มีดังนี้ คือ

Nimityongskul และ Sayamipuk [10] ได้ระบุว่าแหล่งถ่านหินที่สำรวจได้ในประเทศไทยมีอยู่ 5 แหล่งได้แก่ (1) แหล่งลิกไนต์แม่เมาะ อ.แม่เมาะ จ.ลำปาง (2) แหล่งลิกไนต์แม่ติบ อ.จาว จ.ลำปาง (3) แหล่งบ้านป่าคา อ.ลี้ จ.ลำพูน (4) แหล่งบ้านปู อ.ลี้ จ.ลำพูน และ (5) เหมืองกระบี่ บ้านบางปูตา จ.กระบี่ อีกทั้งในปัจจุบัน ยังได้มีการนำถ่านหินจากต่างประเทศมาใช้ในการประเทศไทยอีกด้วย

เศกสรรค์และคณะ [11] ได้ทำการศึกษาถึงคุณสมบัติต่างๆของถ่านหินจำนวน 5 แหล่งผลิตในประเทศไทยดังนี้ (1) ถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง (2) ถ่านหินซับบิทูมินัส จ.ระยอง (3) ถ่านหินซับบิทูมินัส จ.สมุทรสาคร (4) ถ่านหินแอนทราไซด์ จ.กาญจนบุรี และ (5) ถ่านหินที่ไม่ทราบแหล่งผลิต จากการหาลักษณะประกอบทางเคมีพบว่าถ่านหินทั้ง 5 แหล่งผลิตเป็นถ่านหิน Class F และจากการใช้ถ่านหินร้อยละ 20 โดยน้ำหนักพบว่า ผลของความละเอียดของถ่านหินที่เปรียบเทียบกับทั้ง 5 แหล่ง มีผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดมากกว่าองค์ประกอบทางเคมี นอกจากนี้ยังพบว่าดัชนีกำลังที่อายุ 28 วันของมอร์ต้าผสมถ่านหินมีค่าอยู่ในช่วง 76-90% ของมอร์ต้าที่ไม่มีเถ้าลอย

Nimityongskul และ Tahir [12] เสนอแบบจำลองที่ใช้ทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบทางเคมีและความละเอียดต่างๆที่อายุ 28 วัน แต่จะพิจารณา

ตัวแปรหลักซึ่งได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของปูนซีเมนต์และเถ้าลอยรวมถึงการจัดส่วนขนาดละเอียดของวัสดุผสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังและอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานและกำลังของสารปอซโซลานและความละเอียดของเถ้าลอยหาได้จากการทดลองและนำไปใช้ในแบบจำลอง แบบจำลองนี้อาศัยกฎของ Feret ซึ่งสมมติว่าค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยหาได้จากสัดส่วนของปริมาตรของ CSH gel ที่แข็งตัวแล้วต่อปริมาตรของเฟสเถ้าลอยในสภาพเหลว โดยที่ปริมาตรของ CSH gel ที่แข็งตัวแล้วขึ้นอยู่กับ 4 กลไกหลักอันได้แก่

1. ปฏิกริยาไฮเดรชันของไตรแคลเซียมซิลิเกตและไดแคลเซียมซิลิเกต
2. ปฏิกริยาปอซโซลานิกระหว่างซิลิกาและแคลเซียมไฮดรอกไซด์
3. ปฏิกิริยาการคายน้ำของทั้งอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสานและเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์

4. ผลของอัลคาไลน์ในวัสดุประสานต่อการเติมช่องว่าง

แบบจำลองนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ถึง 14 ค่าที่ต้องใช้ในการคำนวณหาปริมาตรของ CSH gel ที่แข็งตัวแล้ว ในที่นี้หาได้แล้วจากข้อมูลที่มีอยู่ 150 ข้อมูล แต่สิ่งที่ควรทราบในการทำนายกำลังอัดคือ (1) องค์ประกอบทางเคมีและความละเอียดของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย (2) ความหนาแน่นของปูนซีเมนต์และเถ้าลอย (3) อัตราส่วนระหว่างน้ำต่อวัสดุประสาน (4) อัตราส่วนระหว่างเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์ และ (5) ผลรวมของอัลคาไลน์ในปูนซีเมนต์และเถ้าลอยในรูปของ Na_2O เทียบเท่า

Tangtermsirikul และ Nipatsat [13] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีส่วนประกอบทางเคมีที่ต่างกัน โดยมีตัวแปรหลักที่พิจารณา คือ ปริมาณแคลเซียมออกไซด์รวมในคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน อัตราส่วนของปริมาตรเฟสต่อปริมาตรช่องว่างในวัสดุผสมที่อัดแน่น นอกจากนี้แล้วยังได้เสนอ แนวทางในการทำนายค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลา 3 ถึง 365 วันโดยการใช้แนวคิดจากอัตราการพัฒนากำลังในคอนกรีตที่เป็นผลมาจากปฏิกริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของคอนกรีตผสมเถ้าลอย แบบจำลองนี้ไม่ได้พิจารณาถึงความละเอียดของอนุภาคเถ้าลอยที่ใช้ซึ่งมีผลต่อค่ากำลังอัด

Boorapa และคณะ [14] ได้ศึกษาการนำเถ้าถ่านหินหยาบจากแม่เมาะมาบดรวมกับปูนเม็ดเพื่อใช้ทำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปอซโซลาน โดยใช้เถ้าถ่านหินหยาบในอัตราส่วนร้อยละ 0, 15, 35 และ 50 โดยน้ำหนักและควบคุมให้มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเบตนาเท่ากับ 3250, 3850, 4450 และ 5050 $\text{cm}^2/\text{กรัม}$ และทดสอบกำลังของมอร์ต้าที่ 1, 3, 7, 14, 28, 60 และ 90 วัน โดยควบคุมให้มีการไหลแผ่ระหว่าง 105 ถึง 115 จากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่า เป็นเถ้าถ่านหิน class F และผลการทดสอบกำลังด้านทานแรงอัดที่อายุต่างๆกันแสดงให้เห็นว่า ทั้งสัดส่วนเถ้าถ่านหินที่ใช้และค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ

ของเบลนเป็นตัวแปรที่สำคัญซึ่งต่อการพัฒนาค่ากำลังด้านทานแรงอัดของมอร์ต้าที่มีเถาถ่านหินเป็นส่วนประกอบ

2.1.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ การเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

Wu และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาผลของการเร่งการแข็งตัวของมอร์ต้าด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อกำลังด้านทานแรงอัด แรงดึง และความทนต่อการซึมผ่านของน้ำ ระดับกำลังที่ใช้มี 9 ระดับ และให้ค่ากำลังในช่วง 150–650 วัตต์ โดยกำหนดเวลาที่ใช้เร่งตั้งแต่ 0 – 120 นาที ขนาดของแท่งทดสอบเป็นแท่งมอร์ต้าขนาด 4x4x16 ซม. ที่มีส่วนผสมของน้ำคอปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทราย เท่ากับ 0.44 : 1 : 2.5

จากการทดลองหากระบวนการที่เหมาะสม พบว่า ค่าระดับกำลังและเวลาที่ใช้ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงระดับกำลังที่ 1 และ 2 โดยใช้เวลา 30 และ 15 นาที ตามลำดับ และจากการใช้ค่าระดับกำลังดังกล่าวตามเวลาที่กำหนด พบว่า การพัฒนาค่ากำลังด้านทานแรงอัดมีค่าสูงกว่าค่ากำลังด้านทานแรงดึง และมีการพัฒนาที่สูงในช่วงระยะเริ่มต้นของค่ากำลังด้านทานมากกว่าที่ระยะหลัง นั่นคือ อัตราการพัฒนาค่ากำลังด้านทานแรงอัด ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 39–47%, 5–14% และ 3–7% ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการพัฒนาค่ากำลังด้านทานแรงดึงที่อายุดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 12–15%, 9–10% และ 2–5% ตามลำดับ อุณหภูมิของแท่งมอร์ต้าในระหว่างกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับกำลังที่ 1 – 30 นาที และระดับกำลังที่ 2 - 15 นาที อยู่ที่ 54–56°C และ 57–58°C ตามลำดับ การทดสอบความทนต่อการซึมผ่านของน้ำของแท่งมอร์ต้ารูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 ซม. สูง 1 ซม. ภายใต้อุณหภูมิและความดันต่ำ พบว่า ความทนต่อการซึมผ่านของน้ำของแท่งมอร์ต้าที่ถูกเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟมีค่าต่ำกว่าค่าความทนต่อการซึมผ่านของน้ำของแท่งมอร์ต้าปกติมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างระดับจุลภาคที่หนาแน่นกว่านั่นเอง ที่เป็นผลมาจากคำอธิบายที่ว่าน้ำอิสระสามารถถูกกำจัดออกไปในช่วงก่อนการก่อตัวในระหว่างกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เป็นผลให้เกิดการหดตัวแบบพลาสติกของมอร์ต้า ทำให้สามารถลดรูพรองลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าเริ่มกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟช้าออกไป จะส่งผลให้ผลของการเร่งการแข็งตัวลดลง เช่น ถ้าเริ่มให้ความร้อนที่ 45 และ 120 นาที หลังจากผสม ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 3 วัน จะมีค่าลดลง 90 และ 83% เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบที่ถูกให้ความร้อนทันทีทันใดหลังจากผสมเสร็จ

ยังมีการทดลองเปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบหลัก C_3S และ C_2S ที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว และไม่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ X-Ray Diffraction พบว่า ระดับของ C_3S และ C_2S ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแท่งทดสอบที่

ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 3 วัน มีค่าต่ำกว่า นั่นคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าสูงกว่านั่นเอง ส่วนผลการเปรียบเทียบลักษณะของตัวอย่างที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและไม่ผ่านการเร่งการแข็งตัว โดยให้ Scanning Electron Microscope พบว่ารูปแบบและโครงสร้างไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจน

Hutchison และคณะ [16] ได้ศึกษาถึงผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อระดับของปฏิกิริยาและกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลาต่าง ๆ ของมอร์ต้า ที่มีส่วนผสมของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา และทรายซิลิกา มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.44 ขนาดของแท่งทดสอบเท่ากับ $4 \times 4 \times 16$ ซม. ระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้อยู่ที่ระดับ 1 หรือที่ 50 วัตต์ กำหนดใช้ค่าระดับกำลัง 3 ระดับ โดยใช้ปริมาณน้ำหนึ่ง ๆ คือที่ 600, 800 และ 1000 มิลลิลิตร ใส่เข้าไปพร้อมกับการให้ความร้อน และใช้เวลาในการให้ความร้อนที่ 15, 22 และ 40 นาทีตามลำดับ แท่งทดสอบจำนวน 2 แท่งถูกนำเข้าเตาอบไมโครเวฟพร้อม ๆ กับภาชนะบรรจุน้ำตามปริมาณที่กำหนดทันที หลังจากทำการหล่อเสร็จ

การทดลองประกอบด้วย (1) การทดสอบระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการวัดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาตามมาตรฐาน ASTM C114 ที่ 1, 3, 9 ชั่วโมง และ 1, 7 และ 42 วัน (2) การวัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบหลังจากให้ความร้อนเสร็จเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (3) การวัดค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบเหลี่ยมที่มีสัดส่วน 2:1 ที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

จากการทดลองพบว่า พลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วง 24 ชั่วโมงแรกได้ แต่หลังจากนั้นพบว่าไม่แตกต่างกันมาก และที่ระดับกำลังที่ใช้ 1000 มิลลิลิตร เปอร์เซนต์ไฮเดรชันเกิดมากที่สุด นอกจากนี้จากการวัดอุณหภูมิพบว่าช่วง induction period ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของแท่งทดสอบที่เร่งการแข็งตัวจะเกิดขึ้นลงอย่างชัดเจน ในกรณีที่ใช้ระดับกำลังที่ใช้ 1000 มิลลิลิตร พบว่าไม่เกิดช่วง induction period อีกทั้งยังพบว่าระดับอุณหภูมิในช่วงที่เกิดการคายความร้อนจุดที่สองเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าระดับกำลังที่ดูดซับไว้โดยแท่งทดสอบ นอกจากนี้ยังพบว่าการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 1, 7 และ 28 วัน

Pera และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อคุณสมบัติทางกล และโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (fiber reinforced cement composite หรือ FRCC) ที่มี metakaolin และไฟเบอร์ใยแก้วประเภท E หรือ A.R. อย่างใดอย่างหนึ่งเป็นส่วนประกอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาใช้ผสมกับ metakaolin เพื่อเป็นวัสดุประสานทรายซิลิกาและผงฝุ่นหินปูน ในสัดส่วน 60:30:10 เพื่อทำแท่งทดสอบมอร์ต้าในแบบหล่อไม้ขนาด $3 \times 5 \times 16$

ชม. ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.50-0.55 ไฟเบอร์ใยแก้ว ยาว 25 มม. ประเภท E และ A.R. ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนักจะถูกใช้ในการผสม

ระดับกำลังไมโครเวฟที่สูงสุดเท่ากับ 800 วัตต์ โดยระดับกำลังที่ใช้เท่ากับ 120-200 วัตต์ ใช้เวลา 45-240 นาที ในบางตัวอย่างใช้ระดับกำลังสูงที่ 280-640 วัตต์ ในการทดลองทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงคดหลังจากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อายุ 24 ชั่วโมง 3, 7 และ 28 วัน นอกจากนี้ยังวัดอุณหภูมิภายในระหว่างการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

จากการทดลองพบว่า ระดับกำลังและระยะเวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟของแท่งทดสอบที่มีวัสดุประสานที่ประกอบด้วย metakaolin 20, 30 และ 40% ที่ให้กำลังต้านทานแรงคดที่ดีที่สุดที่อายุ 24 ชั่วโมง คือที่ 120 วัตต์-120 นาที, 160 วัตต์-90 นาที และ 200 วัตต์-90 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงคดที่อายุระหว่าง 1 และ 28 วัน โดยใช้ระดับกำลังและเวลาดังกล่าว เปรียบเทียบกับการบ่มปกติที่ 20°C พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงคดที่ 1 วัน ของแท่งทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟและที่แข็งตัวตามปกติ มีค่าเท่ากับ 90% และ 25-30% ของกำลังต้านทานแรงคดที่ 28 วัน ตามลำดับ เมื่อใส่โพลิเมอร์เข้าไปในสัดส่วน 2-15% พบว่า กำลังต้านทานแรงคดลดลงอย่างมาก เมื่อใส่ปริมาณโพลิเมอร์มากกว่า 5% เมื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในได้แท่งทดสอบที่ประกอบด้วย 30% ของ metakaolin ในระหว่างที่ให้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 160 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที พบว่า หลังจากให้ความร้อน 60 นาที อุณหภูมิอยู่ในระดับ 80-90°C

Li และ Wu [18] ได้ทำการศึกษาวิธีการนำเอาวัสดุคาน้ำออกจากคอนกรีตด้วย vacuum ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นในประเทศจีน และใช้อย่างกว้างขวางในงานถนน สนามบิน และงานวิศวกรรมอื่น ๆ มาใช้กับเทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยที่วิธีการคาน้ำนี้มีลักษณะพิเศษคือ ค่ากำลังต้านทานแรงคดที่ระยะแรกเพิ่มขึ้น 50-60% ในขณะที่เวลาบ่มลดลง 1/3 ความคงทนคืบขึ้น ในขณะที่ความทนต่อการกระแทกและขีดสี ความทนต่อการซึมผ่านของน้ำเพิ่มขึ้น 50 และ 30% ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สุดท้ายหลังจากการรีดน้ำแล้วจะต้องมีค่าน้อยกว่า 0.45

เตาไมโครเวฟที่ใช้ให้พลังงานมากที่สุดที่ 650 วัตต์ และสามารถตั้งระดับค่ากำลังได้ 9 ระดับ แต่ในที่นี้จะใช้กำลังที่ระดับ 1 ที่เวลาต่าง ๆ กัน แบบหล่อที่ใช้เป็นแบบหล่อ Polyethylene ขนาดภายใน 4x4x16 ซม. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เกรด 425) หยาบซิลิกา และหิน Dolomite ขนาด 8-10 มม. ในอัตราส่วน 1:1.5:3.0 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.60 หลังจากผสมและเข้าแบบ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะถูกลดลงมาที่ 0.45 โดยเทคนิคการรีดน้ำด้วย vacuum และนำเข้าไมโครเวฟเพื่อเร่งการแข็งตัวทันทีทันใด การทดลองนี้ทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงคดและแรงคดที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน

จากการทดลองพบว่า ทั้งค่ากำลังต้านทานแรงอัดและแรงคืบที่อายุต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ และค่ากำลังเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการบ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดและจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้นอีก เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการบ่มเท่ากับ 45 นาที ในการเปรียบเทียบกับค่ากำลังต้านทานของคอนกรีตที่บ่มปกติ พบว่า การเพิ่มของค่ากำลังต้านทานในช่วงแรกสูงกว่าการเพิ่มของค่ากำลังต้านทานในช่วงระยะหลัง โดยที่อัตราการเพิ่มของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 60.2, 43.0, 36.5, 17.9 และ 6.1% ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการเพิ่มของค่ากำลังต้านทานแรงคืบ เท่ากับ 59.9, 33.2, 34.1, 13.6 และ 3.4%

จากการทดสอบหารูโพรงในแท่งทดสอบคอนกรีตที่อายุ 7 วัน ที่ระยะเวลาในการเร่งการแข็งตัวที่ต่างกัน พบว่า ปริมาตรรูโพรงทั้งหมดในช่วง 3.5 mm – 7000 mm มีค่าน้อยที่สุดที่เวลา 45 นาทีที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่ากำลังต้านทาน นอกจากนี้ยังพบว่ารูโพรงของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 45 นาที มีค่าน้อยกว่ารูโพรงในแท่งทดสอบที่บ่มปกติ และจากผลการวัดค่า electrical conductivity พบว่า ค่า electrical conductivity ของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 45 นาที มีค่าน้อยกว่าค่า electrical conductivity ของแท่งทดสอบปกติ เป็นผลให้กล่าวได้ว่า พลังงานไมโครเวฟทำให้แท่งทดสอบมีโครงสร้างในระดับจุลภาคหนาแน่นกว่าแท่งทดสอบปกติ อุณหภูมิภายในของแท่งทดสอบคอนกรีตหลังจากบ่มด้วยไมโครเวฟที่ 45 นาที มีค่าเท่ากับ 60°C

Li และ Wu ได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่า กระบวนการทำให้แห้งควรเสร็จสิ้นก่อนที่ปูนซีเมนต์จะก่อตัว ซึ่งจะช่วยให้คอนกรีตสามารถหดตัวแบบพลาสติกได้ ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น เป็นผลให้มีค่ากำลังต้านทานที่ระยะยาวสูงขึ้นด้วย และเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งการแข็งตัว ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ รวมทั้งระดับกำลังของเตาไมโครเวฟด้วย

Leung และ Pheeraphan [19] ได้ศึกษาถึงการพัฒนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงในช่วงระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ แท่งทดสอบที่ใช้มีรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม เพื่อให้มีการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงในช่วงระยะแรก สัดส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทรายที่ใช้ทำมอร์ต้าเท่ากับ 1:2 ในขณะที่สัดส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1:1:1.5

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ให้กำลัง 0-1200 วัตต์ ในการผสมแต่ละครั้งใช้แท่งทดสอบ 9 แท่ง โดย 6 แท่งจะถูกให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ส่วนอีก 3 แท่งจะถูกบ่มปกติเพื่อเปรียบเทียบ หลังจากทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่ง เช่น 30 นาที ในกรณีที่ไม่ระบุไว้ แท่งทดสอบ 6 แท่งจะถูกนำเข้าเตาอบไมโครเวฟเพื่อเร่งการแข็งตัว หลังจากให้ความร้อนเสร็จ จะถูกคลุมด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น โดยที่ 3 แท่งจะถูกถอดออกจากแบบหล่อ 1 ชั่วโมง ก่อนการทดสอบเพื่อทำการหล่อหัว และทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรก เช่นที่ 3 หรือ 4.5 ชั่วโมง เป็นต้น

ส่วนอีก 3 แห่งจะทำการถอดแบบพร้อมกับแท่งทดสอบที่บ่มปกติ หลังจากผสมเสร็จ 24 ชั่วโมง เพื่อทำการบ่มน้ำต่อไป และจะถูกหล่อหัวและทดสอบเมื่อมีอายุครบ 7 วัน

ตัวแปรที่จะศึกษาสำหรับแท่งทดสอบมอร์ต้าประกอบด้วย อัตราการให้ความร้อน ระดับกำลัง ระยะเวลาก่อนการให้พลังงานไมโครเวฟ ส่วนแท่งทดสอบคอนกรีต จะศึกษาผลของระดับกำลังที่มีต่อแท่งทดสอบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างๆกัน

ผลการทดสอบแท่งทดสอบมอร์ต้าพบว่า อัตราการให้ความร้อนมีผลต่อการพัฒนาค่ากำลังด้านทานแรงอัด โดยค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่อายุ 3 ชั่วโมงจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการให้ความร้อนที่สูง ในขณะที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่อายุ 7 วัน จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อกำหนดเวลาในการให้ความร้อน 45 นาที ผลของระดับกำลังตั้งแต่ 300-600 วัตต์ ที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วันคือ ถ้าใช้ระดับกำลังที่สูงกว่า 400 วัตต์ ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วัน จะลดลงอย่างมาก นั่นคือ ระดับกำลังที่ 400 วัตต์ จะเป็นระดับกำลังที่ดีที่สุดที่ให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดสูง เท่ากับ 15.3 MPa ในเวลา 4.5 ชั่วโมง ในขณะที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วัน เท่ากับ 30 MPa ซึ่งเท่ากับประมาณ 70% ของค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่ 7 วัน

ส่วนผลการทดลองเพื่อหาระยะเวลาก่อนให้พลังงานไมโครเวฟ พบว่า เวลาที่เหมาะสมสำหรับแท่งทดสอบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.50 ภายใต้การใช้ระดับกำลังที่ 400 วัตต์ เป็นเวลา 45 นาที มีค่าเท่ากับ 30 นาที และจากการใช้ระดับกำลังที่ 400 วัตต์ เป็นเวลา 45 นาที ระยะเวลาก่อนการให้พลังงานไมโครเวฟเท่ากับ 30 นาที พบว่า การใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.45-0.55 จะให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่อายุ 4.5 ชั่วโมงใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วัน เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนน้อยลง ทั้งจากผลของพลังงานที่ให้ และความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงส่งผลให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันลดลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับกรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.60 ซึ่งพบว่าค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันของคอนกรีตบ่มปกติ ในขณะที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง มีค่าน้อยกว่า กรณีที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่า 0.45-0.55

ผลการทดลองสำหรับแท่งทดสอบคอนกรีต พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากแท่งทดสอบมอร์ต้า เมื่อพิจารณาผลของระดับกำลังพบว่า แท่งทดสอบคอนกรีตที่ถูกให้ความร้อนที่ระดับกำลัง 400 และ 450 วัตต์ จะมีค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วัน ลดลงน้อยกว่ามาก และค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าด้วยเช่นกัน นอกจากนี้แล้ว เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วัน พบว่า ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมงมีค่าสูงถึง 27.2 MPa

ในขณะที่กำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วัน มีค่า 34.1 MPa และถ้าหากเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบแท่งทดสอบมอร์ต้าจะพบว่าแท่งทดสอบคอนกรีตให้ค่ากำลังที่สูงกว่าแท่งทดสอบมอร์ต้าทั้งในระยะแรกและระยะหลัง

ดังนั้น เพื่อตรวจสอบผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อแท่งทดสอบมอร์ต้าและคอนกรีตแท่งทดสอบจะถูกตัดและเปรียบเทียบกับวิธีการทดสอบที่ใช้ผงสังกะสีออกไซด์สีขาวทาบนผิวเพื่อตรวจสอบรูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้น จากการเปรียบเทียบแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวกับแท่งทดสอบปกติ พบว่า การให้พลังงานไมโครเวฟจะทำให้เกิดรูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ ในแท่งทดสอบที่เป็นมอร์ต้ามากเป็นพิเศษ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ในระหว่างการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟนั้น ผลของการขยายตัวของมอร์ต้าเพสต์ และฟองอากาศสามารถทำให้เกิดรูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ ในขณะที่ในแท่งทดสอบคอนกรีตซึ่งมีหินอยู่ จะช่วยยับยั้งการขยายตัวของมอร์ต้าเพสต์ ซึ่งจะทำให้ปริมาณของรอยร้าวเล็ก ๆ และรูโพรงเกิดน้อยลงและเป็นเหตุให้กำลังด้านทานเพิ่มขึ้น

Leung และ Pheeraphan [20] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้การควบคุมระดับกำลังของเตาไมโครเวฟโดยอาศัยการป้อนอุณหภูมิย้อนกลับ ซึ่งวิธีนี้ต่างจากงานของ Leung และ Pheeraphan [19] ที่ใช้ค่าระดับกำลังคงที่ ซึ่งเป็นผลให้เกิดการให้ความร้อนที่มากเกินไป ทำให้รูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ เกิดขึ้นได้ในแท่งทดสอบ ในที่นี้กระบวนการการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสมหมายถึง กระบวนการที่จะทำให้ได้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดสูงในช่วงระยะแรกและระยะหลัง โดยที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด งานนี้เริ่มโดยศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากแท่งทดสอบมอร์ต้าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.5 และหากระบวนการที่ดีที่สุดก่อนที่จะใช้กับแท่งทดสอบคอนกรีต เพื่อที่จะหาระดับกำลังที่ดีที่สุด จากนั้นจะนำเอาระดับกำลังที่ดีที่สุดมาแบ่งย่อยให้เป็นขั้นๆ ที่ใช้กำลังคงที่ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเตาอบไมโครเวฟที่มีราคาถูกซึ่งสามารถให้กำลังในรูปแบบนี้ได้

ในการทำแท่งทดสอบมอร์ต้า และคอนกรีตใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และใช้ทรายจากแหล่งต่างกัน สำหรับมอร์ต้า อัตราส่วนของปูนต่อทราย เท่ากับ 1:2 โดยใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสของความละเอียดเท่ากับ 2.28 สำหรับคอนกรีต อัตราส่วนของปูนต่อทรายต่อกรวด เท่ากับ 1:1:1.5 ทรายที่ใช้มีค่าโมดูลัสของความละเอียดเท่ากับ 2.82 กรวดจะถูกนำไปล้างก่อนอบให้แห้ง และจะร่อนให้เหลือเฉพาะขนาด 2.36-9.4 มม. ก่อนใช้ สำหรับแท่งทดสอบที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า 0.35 จะใช้สารลดน้ำพิเศษ

ในการผสมแต่ละครั้ง จะใช้แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 9 แท่ง โดยจำนวน 6 แท่งจะถูกให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ส่วนอีก 3 แท่งจะบ่มปกติ โดยส่วนใหญ่แล้วแท่งทดสอบจะถูกให้พลังงานไมโครเวฟ ในเวลา

ประมาณ 30 นาที หลังจากน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ ในการควบคุมอุณหภูมิภายในช่องแท่งทดสอบ ระหว่างการให้ความร้อน จะใช้แท่งวัดอุณหภูมิสอดไว้ที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบ หลังจากให้ความร้อนเสร็จ แท่งทดสอบที่เหลือจะถูกนำไปคลุมด้วยแผ่นพลาสติก และถูกถอดออกจากแบบหล่อจำนวน 3 แท่งที่เวลา 3.5 ชั่วโมงหลังจากผสม เพื่อหล่อหัวและทดสอบที่ 4.5 ชั่วโมง ส่วนแท่งทดสอบที่เหลือ 2 แท่ง และ 3 แท่งจากการบ่มปกติจะถูกถอดแบบที่ 1 วัน และบ่มในน้ำเป็นเวลาจนครบ 7 วัน เพื่อทดสอบ

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ให้กำลัง 0-1200 วัตต์ มีทั้งใบพัดกลั่นด้านบนและจานหมุนด้านล่าง เพื่อทำให้เกิดการให้ความร้อนที่ทั่วถึงและเท่ากัน และยังสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้อุณหภูมิที่วัดได้จากแท่งทดสอบในระหว่างการให้ความร้อนเป็นตัวควบคุมระดับกำลังที่จะให้แก่แท่งทดสอบ เพื่อป้องกันการให้ความร้อนที่มากเกินไปแก่แท่งทดสอบ

จากการทดลองเปลี่ยนระดับกำลัง การกำหนดอุณหภูมิสูงสุด และระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อแท่งทดสอบมอร์ต้า ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.50 พบว่า การใช้การควบคุมระดับกำลังด้วยการป้อนอุณหภูมีย้อนกลับ ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 80°C ใช้เวลาให้ความร้อน 45 นาที และกำหนดระดับกำลังสูงสุด 1200 วัตต์ เป็นวิธีการทำให้ได้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วัน เท่ากับ 12.8 และ 33.2 MPa หรือประมาณ 27.3 และ 70.7% ของค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วัน ของแท่งทดสอบควบคุม (46.9 MPa) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการศึกษาผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบมอร์ต้า

การศึกษาผลของการควบคุมระดับกำลังด้วยการป้อนอุณหภูมีย้อนกลับ สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีต ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 พบว่า การใช้การควบคุมระดับกำลังของเตาไมโครเวฟด้วยการให้อุณหภูมีย้อนกลับ ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 80°C ใช้เวลา 45 นาที และกำหนดระดับกำลังสูงสุด 750 วัตต์ เป็นวิธีที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วัน มีค่าสูง เท่ากับ 28.2 และ 45.2 MPa หรือเท่ากับ 59.1 และ 94.9% ของค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งทดสอบควบคุม (47.7 MPa)

นอกจากนี้แล้วยังได้นำเอาระดับกำลังที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตซึ่งเป็นระดับกำลังแบบต่อเนื่องมาแบ่งให้เป็นขั้นย่อย ๆ ที่ใช้กำลังคงที่ เพื่อสามารถนำผลที่ได้ไปใช้กับเตาอบไมโครเวฟราคาถูกได้ ซึ่งพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากระดับกำลังแบบต่อเนื่อง

จากผลที่ได้ดังกล่าว จึงนำเอาระดับกำลังแบบแบ่งย่อยที่ดีที่สุดมาใช้กับแท่งทดสอบที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 และ 0.325 และใช้สารลดน้ำพิเศษ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมงมีค่า 32.4 MPa (61.4%) และที่ 7 วันมีค่า 55.4 MPa (104.8%) ในขณะที่กำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งควบคุมเท่ากับ 52.8 MPa (100%) และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.325 ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมงมี

ค่า 35.4 MPa (61.6%) และที่ 7 วัน มีค่า 57.0 MPa (99.2%) ในขณะที่กำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วัน ของแท่งควบคุมเท่ากับ 57.4 MPa(100%) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสม จะไม่สูญเสียกำลังเมื่อเทียบกับ กำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งทดสอบที่บ่มปกติ

Sohn และ Johnson [21] ได้ศึกษาถึงผลการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่า กำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วันของวัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ โดยมีตัวแปรที่ต้องการ ศึกษา คือ อุณหภูมิในการบ่มที่ 40, 60 และ 80°C และเวลาที่ใช้ในการบ่มที่ทดสอบจากการ ทดสอบความต้านทานการจมที่ 1, 5 และ 13 MPa

ในการทดลองนี้ใช้เตาอบไมโครเวฟรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 750 มม. และยาว 1200 มม. ให้กำลังในช่วง 0-6000 วัตต์ โดยใช้อุณหภูมิเป็นตัวควบคุมกำลังความร้อนที่ ให้กับแท่งทดสอบ และมีการวัดอุณหภูมิภายในแท่งทดสอบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. และยาว 100 มม. จำนวน 3 จุด เพื่อทดสอบดูความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งใช้ อัตราการให้ความร้อนที่ 7°C / 1 นาที ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ทราบ เป็นทรายซิลิกาคัดขนาด และมีการใช้ขี้ตะกรันจากเตาถลุงโลหะบดละเอียด 50% โดยน้ำหนักหรือซิลิกาฟูม 10% หรือเถ้าลอยประเภท F 20% แทนที่ปูนซีเมนต์ สัดส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานต่อ ทรายเท่ากับ 0.4:1:2 แท่งทดสอบถูกผสมใช้เวลา 10 นาที และเริ่มเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงาน ไมโครเวฟที่เวลา 30 นาที หลังจากน้ำเริ่มผสม แท่งทดสอบที่ใช้ในการทดสอบกำลังถูกตัดหัวและ ท้ายที่ระยะ 25 มม. จนมีขนาด 50 มม. x 50 มม.

จากผลการทดลองพบว่าจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 40, 60 และ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในที่ 3 จุด มีค่าไม่แตกต่างกันมาก จึงสามารถให้ ความร้อนที่ทำให้เกิดอุณหภูมิเท่ากันอย่างทั่วถึงทั้งแท่งทดสอบได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับกำลัง ด้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบมอร์ต้าปกติ และแท่งทดสอบมอร์ต้าที่มีขี้ตะกรันจากเตาถลุงโลหะ บดละเอียด 50% ทดแทนปูนซีเมนต์ พบว่า เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 40, 60 และ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นเวลาที่สั้นเกินไป ถึงแม้ว่าค่ากำลังด้านทานแรงอัดของแท่ง ทดสอบทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 40°C จะมีค่าใกล้เคียงกับแท่งทดสอบมอร์ต้าที่บ่มปกติ ส่วนแท่ง ทดสอบที่อุณหภูมิ 60 และ 80°C ค่ากำลังด้านทานแรงอัดจะลดลงไป 20% และ 50% ของกำลัง ด้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบที่บ่มปกติ

ดังนั้นจึงนำเอาค่าความต้านทานการจมที่ 1, 5 และ 13 MPa มาใช้เพื่อกำหนดระยะเวลาใน การบ่มที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80°C ผลการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิและความต้านทานการจมที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วัน ใกล้เคียงกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดของมอร์ต้าที่บ่ม ปกติ พบว่า ที่อุณหภูมิ 40°C ค่าความต้านทานการจมที่ดีที่สุดคือ 1, 5 และ 13 MPa และที่อุณหภูมิ

60°C ค่าความต้านทานการจมที่ดีที่สุดคือที่ 1 MPa ส่วนอุณหภูมิที่สูงกว่า 80°C ไม่เหมาะที่จะใช้ในการให้ความร้อน

นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาที่ตัวขึ้นปลายของแท่งทดสอบบอร์ดำที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิและค่าความต้านทานการจมที่เหมาะสม มีค่าเพียง 2 ¼ - 3 ½ ชั่วโมง ในขณะที่ระยะเวลาที่ตัวขึ้นปลายของแท่งทดสอบบอร์ดำที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 6 ชั่วโมง นั่นคือ ระยะเวลาที่ตัวขึ้นปลายสามารถลดลงได้ 35-54%

นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งพบว่าจากการใช้ซีตกรันจากเตาถลุงโลหะบดละเอียด 50% ซิลิกาฟูม 10% หรือเถ้าแกลบ 20% แทนที่ปูนซีเมนต์ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการให้ความร้อนเท่ากับ 40°C ที่ค่าความต้านทานการจมเท่ากับ 1, 5 และ 13 MPa และที่ 60°C ที่ค่าความต้านทานการจมเท่ากับ 1 MPa ก็ยังคงสามารถให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน เทียบเคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของบอร์ดำที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลการทดลองที่เหมือนกับการทดลองที่ไม่มีการใช้วัสดุปอซโซลาน

2.1.3 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ วิธีการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาว

ในขณะที่วิธีการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีอยู่มากมาย และนิยมใช้ในทางปฏิบัติ อาทิเช่นวิธี Ultrasonic pulse velocity, Schmidt hammer, Surface hardness, Penetration, Pullout, Breakoff เป็นต้น[22] และวิธีที่พัฒนาโดย Zoughi และคณะ [23] คือการส่งคลื่นไมโครเวฟไปยังผิวของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว และสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง magnitude of reflection coefficient กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ และเนื่องจากค่ากำลังอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์โดยตรง ทำให้เมื่อสามารถประมาณค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ ได้จาก magnitude of reflection coefficient แล้ว ทำให้สามารถทราบค่ากำลังอัดได้ต่อไป ส่วนวิธีการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตเหลวในระยะแรกมีอยู่น้อย ไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย ใช้เวลาในการประมาณค่าที่มากกว่า 1 วัน ให้ค่าความถูกต้องน้อยและมีข้อจำกัด

Dewar และ Anderson [1] รายงานว่า ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมักจะประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยการทดสอบกำลังอัดปกติที่ 7 วัน หรือโดยการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 1-3 วัน อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดที่ 7 วันต่อ 28 วัน คำนวณได้จากคอนกรีตมาตรฐาน มักจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.50-0.85 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์และแหล่งและสภาพการผลิต โดยปกติค่าที่ใช้เท่ากับ 0.67 ส่วนคอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าลอย จะมีอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดที่ 7 วันต่อ 28 วันที่สูงออกไป

Kasai [2] ได้รวบรวมวิธีทดสอบที่ระยะแรกๆ ที่พัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่นในช่วงตั้งแต่ปี ค.ศ.1975 เพื่อประมาณค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน และเพื่อประมาณสัดส่วนผสมของ คอนกรีตสด สามารถแบ่งวิธีการประมาณค่าออกได้เป็น 4 วิธีดังนี้

1. การประมาณค่าจากการทดสอบหาปริมาณค่อหนึ่งหน่วยของปูนซีเมนต์
2. การประมาณค่าจากการทดสอบหาปริมาณค่อหนึ่งหน่วยของน้ำ
3. การประมาณค่าจากการทดสอบหาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์
4. การประมาณค่าจากการใช้วิธีเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต

ในการเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าทั้ง 4 วิธีพบว่า การประมาณค่ากำลังอัดที่ 28 วันจากการใช้วิธีเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตมีความถูกต้องมากที่สุดและใช้เวลามากที่สุดด้วยเช่นกัน การประมาณค่าด้วยวิธีนี้ประกอบด้วยการเร่งการแข็งตัวด้วยการบ่มที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง การบ่มในน้ำร้อนที่ 35°C ทันทีหลังจากบรรจุเป็นเวลา 23.5 ชั่วโมง การบ่มในน้ำร้อนที่ 55°C เป็นเวลา 20.5 ชั่วโมงหลังจากถอดออกจากแบบหล่อและหล่อหัว การบ่มในน้ำร้อนที่ 70°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมงหลังจาก 18+/-6 ชั่วโมงภายหลังการบรรจุ การบ่มในน้ำเดือดเป็นเวลา 28.5 ชั่วโมง การบ่มในตู้อบไฟฟ้าเป็นเวลา 2-3 ชั่วโมง การบ่มในน้ำมันร้อนที่ 150-180°C เป็นเวลา 1.5-3 ชั่วโมง และการใช้สารเร่งการแข็งตัว พร้อมกับบ่มที่อุณหภูมิ 65-80°C เป็นเวลา 50 นาที ผลการเปรียบเทียบวิธีทั้งหมดนี้พบว่า วิธีการบ่มในน้ำร้อนที่ 55°C ซึ่งใช้เวลามากกว่า 1 วันให้ผลที่ใกล้เคียงมากที่สุด

Tango [3] ได้จำแนกวิธีทดสอบที่ใช้ทำนายกำลังของซีเมนต์เพสต์ มอร์ต้า หรือคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จากการทดสอบในช่วงระยะแรกออกเป็น 3 วิธีใหญ่ ดังนี้

1. วิธีเร่งการแข็งตัว โดยอาศัยการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์โดยการให้ความร้อนแก่แท่งทดสอบภายใต้ความดันปกติหรือความดันสูง หรือใช้สารเร่งการก่อตัว วิธีนี้จำเป็นต้องใช้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของกำลังของแท่งทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นมาก่อน

2. วิธีใช้ความสัมพันธ์กับกำลังที่ระยะแรกภายใต้สภาวะการบ่มปกติ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากแท่งทดสอบที่ระยะแรก เช่นที่ 3 หรือ 7 วัน จะถูกใช้หาความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลาที่ต้องการ เช่นที่ 28 วัน โดยการวิเคราะห์แบบถดถอย สมการที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการทำนาย

3. วิธีใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากลักษณะพิเศษอื่น ๆ วิธีนี้ประกอบด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลาที่ต้องการกับส่วนประกอบทางเคมี หรือความละเอียดของปูนซีเมนต์ หรือรูปร่างที่ประมาณได้จากปริมาณฟองอากาศของส่วนผสมเหลว และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ หรือความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือความเร็วที่วัดได้จาก sonic pulse ที่ระยะแรก นอกจากนี้ยังรวมถึง การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวที่อาศัยค่ากำลัง

ด้านทานแรงอัดที่วัดได้ที่ระยะแรก ค่า Maturity ที่ระยะแรก และสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และ maturity ที่ถูกหาขึ้นมาก่อนหน้านี้แล้ว รายละเอียดดูได้จาก ASTM C918 [24] ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้ การบ่มแบบปกติทั่วไป และต้องทดสอบที่อายุมากกว่า 24 ชั่วโมง

ทั้ง 3 วิธี ที่ Tango ได้จำแนกนี้ต้องอาศัยความสัมพันธ์จากการทดลองก่อนหน้านี้ภายใต้ สภาพเดียวกันกับที่สภาวะควบคุม และต้องทำมาจากวัสดุเดียวกัน ดังนั้น Tango จึงได้เสนอวิธีใหม่ ที่จัดอยู่ในวิธีประเภทที่ 2 แต่มีความต่างตรงที่ว่าวิธีนี้จะไม่ใช่ความสัมพันธ์กับค่ากำลังด้านทาน แรงอัดที่ระยะแรก แต่จะคำนวณค่ากำลังที่อายุที่ต้องการหลังจากทราบค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ ระยะแรก 2 ค่า และทราบความสัมพันธ์ของกำลังและเวลา ยกตัวอย่างเช่น สมการที่ใช้ทำนายกำลัง ที่ระยะยาว เช่นที่ 28 วัน ต้องอาศัยค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่อายุ 2 และ 7 วัน เป็นต้น สมการ ดังกล่าวนี้มีข้อดีคือไม่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของวัสดุที่ใช้ รวมถึงยี่ห้อของปูนซีเมนต์ เพียงแต่สิ่งที่ ควรทราบคือประเภทของปูนซีเมนต์ แม้จะไม่มีผลทดสอบล่วงหน้าก็จำเป็นเช่นในวิธีอื่น ๆ ผลการ ทดลองพบว่าการทำนายด้วยวิธีนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

นอกจากนี้แล้ว ASTM C1074 [25] ยังได้อธิบายถึงวิธีปฏิบัติมาตรฐานในการทำนายกำลัง ของคอนกรีต โดยวิธี maturity ซึ่งวิธีนี้จำเป็นที่จะต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลัง และค่า maturity ของส่วนผสมคอนกรีตในห้องทดลองก่อน และจะต้องบันทึกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของ คอนกรีตที่ต้องการทำนายกำลัง วิธีปฏิบัติมาตรฐานนี้สามารถใช้ได้ในการทำนายกำลังของ คอนกรีตที่หล่อในที่เพื่อทำให้สามารถเริ่มงานก่อสร้างที่เร่งด่วนต่อไปได้ เช่น การถอดแบบหรือ ถอดค้ำยัน การทำ post-tension หรือการส่งหยุดการป้องกันอากาศเย็น วิธีนี้สามารถใช้ในการทำนาย ค่ากำลังด้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบในห้องทดลองที่บ่มภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่มาตรฐานได้ ข้อจำกัดของวิธีนี้มีดังนี้คือ

1. คอนกรีตต้องอยู่ในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้
2. วิธีนี้ไม่ได้พิจารณาถึงผลของอุณหภูมิของคอนกรีตที่ระยะแรกที่มีต่อกำลังด้านทาน แรงอัดที่ระยะยาว
3. วิธีนี้จำเป็นต้องอาศัยวิธีอื่นเพิ่มเติมในการระบุกำลังด้านทานแรงอัดที่เป็นไปได้ของ คอนกรีต
4. ความแม่นยำของกำลังที่ทำนายขึ้นอยู่กับค่าการคำนวณหาค่า maturity

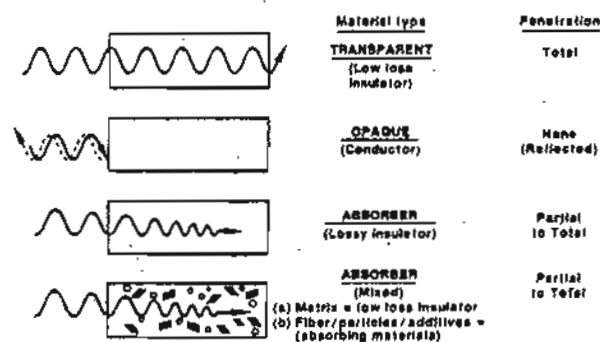
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ กระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปัจจัยที่มีผลต่อกำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีต

2.2.1 กระบวนการให้ความร้อนแก่วัตถุด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 1 มิลลิเมตร-1 เมตร และอยู่ในช่วงความถี่ 300 MHz – 300 GHz ในทางอุตสาหกรรม ทางวิทยาศาสตร์และการแพทย์ ความถี่ที่ถูกจัดสรรไว้ให้ใช้โดยคณะกรรมการการสงฆ์กำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal Communications Commission) คือความถี่ที่ 915, 2450, 5800, และ 22125 MHz [26] ซึ่งความถี่ที่ 2450 MHz เป็นความถี่ที่ใช่มากในตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน

ไมโครเวฟสามารถสะท้อน ทะลุผ่าน ทะลุผ่านบางส่วน หรือถูกดูดซับได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเอง วัสดุที่ใช้ในงานให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟจึงสามารถแบ่งได้เป็น 3 พวกคือ (1) พวกที่คลื่นไมโครเวฟสะท้อนกลับ เช่นพวกโลหะ เป็นต้น (2) พวกที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านได้ เช่นวัสดุที่ทำมาจาก โพลีเอทิลีน, โพลีสไตรีน (Polystyrene), เทฟลอน (Teflon), แก้วโบโรซิลิเกต (Borosilicate glass) เป็นต้น และ (3) พวกที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านได้เพียงบางส่วนและบางส่วนถูกดูดซับไว้ เช่น น้ำ คอนกรีตเหลว สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น (ดูรูปที่ 2.1) ดังนั้นผนังของเตาอบไมโครเวฟจึงทำมาจากโลหะเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถเล็ดลอดออกมาได้ ในขณะที่ภาชนะที่ใช้ในการทำอาหารในเตาอบไมโครเวฟ มักจะทำมาจากแก้วซึ่งมีคุณสมบัติที่ทำให้ไมโครเวฟทะลุผ่านได้



รูปที่ 2.1 การตอบสนองจากวัสดุเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ [27]

ไมโครเวฟสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ความร้อนแก่วัตถุได้ เมื่อไมโครเวฟทะลุผ่านเข้าไปในวัสดุไดอิเล็กตริก (dielectric material) ความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุแต่ละชนิด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่เรียกว่าแทนเจนต์การสูญเสีย (loss tangent) ซึ่งค่านี้คำนวณได้จากอัตราส่วนของค่าตัวประกอบการสูญเสีย (loss factor) ต่อค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (dielectric constant) ของวัสดุนั้นๆ ซึ่งค่านี้เป็นส่วนจินตภาพและส่วนจริงของค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์

(relative complex permittivity) ตามลำดับ ที่เป็นค่าที่บ่งบอกคุณลักษณะเฉพาะของวัสดุที่มีต่อสนามแม่เหล็กที่มากระทำ

ค่าสภาพยอมเชิงซ้อนสัมพัทธ์ ของวัสดุ (ϵ_r) ประกอบด้วยค่าส่วนจริงที่เรียกว่า ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (ϵ'_r) และค่าส่วนจินตภาพที่เรียกว่า ค่าตัวประกอบการสูญเสีย (ϵ''_r) ดังแสดงไว้ดังนี้คือ

$$\epsilon_r = \epsilon'_r + i \epsilon''_r$$

และค่าแทนเจนต์การสูญเสีย หรือ $\tan \delta$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tan \delta = \epsilon''_r / \epsilon'_r$$

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่าแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุชนิดต่างๆ ที่วัดค่าที่ความถี่ 3 GHz ซึ่งจากตาราง พบว่าค่าแทนเจนต์การสูญเสียของน้ำมีค่ามากที่สุด นั่นหมายความว่า น้ำสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีกว่าวัสดุอื่นๆ ที่แสดงในตาราง

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างค่าแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุชนิดต่างๆ ที่วัดค่าที่ความถี่ 3 GHz (ข้อมูลจาก Von Hippel อ้างถึงใน [26])

วัสดุ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	แทนเจนต์การสูญเสีย
น้ำ	25	$1570 \times 1\text{E-}04$
แก้วโบโรซิลิเกต	25	$10.6 \times 1\text{E-}04$
แก้วเพลิกซ์ (Plexiglass)	27	$57 \times 1\text{E-}04$
โพลีเอทิลีน	25	$3.1 \times 1\text{E-}04$
โพลีไคโกลีน	25	$3.3 \times 1\text{E-}04$
เทฟลอน PFA	25	$1.5 \times 1\text{E-}04$

โดยทั่วไปวัสดุสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในปริมาตรของวัสดุได้โดย การหน่วงนำของไอออน (ionic conduction) และ/หรือ การหมุนของสารประกอบที่มีสองขั้ว (dipole rotation) [26] การหน่วงนำของไอออนเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ ทำให้มีการต่อต้านการเคลื่อนที่ดังกล่าวอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ ปัจจัยที่มีผลต่อขบวนการนี้คือความเข้มข้นของไอออน

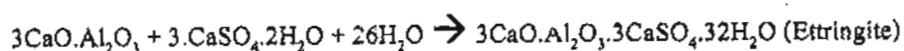
ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน และอุณหภูมิของสารละลาย เป็นต้น ส่วนการหมุนของสารประกอบที่มีสองขั้วเป็นการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในวัสดุที่มีไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ที่เกิดขึ้นถาวรหรือที่เกิดขึ้นจากการหน่วงนำเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำ การต่อต้านการจัดเรียงตัวหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลดังกล่าว จะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า เมื่อมีการให้พลังงานไมโครเวฟแก่คอนกรีตเหลวแล้ว จะมีความร้อนเกิดขึ้นภายในคอนกรีต ทั้งนี้ก็เนื่องจากว่านอกเหนือจาก หิน หินและปูนซีเมนต์แล้ว น้ำซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในคอนกรีตประมาณ 7-10% โดยปริมาตร จัดเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟได้ดีที่สุด จึงทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในคอนกรีต เมื่อมีคลื่นไมโครเวฟเข้ามากระทำ

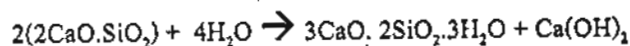
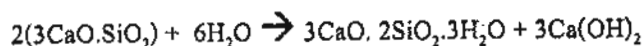
2.2.2 ปฏิริยาไฮเดรชัน [28-30]

ระดับของปฏิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และผลของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิริยาไฮเดรชันจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยตรง ปฏิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ปฏิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) การเกิดปฏิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ หรือ C_3A) ที่ก่อให้เกิดเอตทริงไท์ (ettringite) บนผิวของอนุภาค C_3A ดังสมการต่อไปนี้



และการเกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium Silicate Hydrate หรือ $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หรือ CSH) จากไตรแคลเซียมซิลิเกต ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ หรือ C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ หรือ C_2S) ก่อให้เกิดความร้อนสูงในช่วง 15 นาทีแรกดังสมการต่อไปนี้



แคลเซียมซิลิเกตเป็นสารประกอบหลักที่สำคัญของปูนซีเมนต์ เนื่องจากในปูนซีเมนต์จะประกอบด้วยแคลเซียมซิลิเกตประมาณ 75% โดยน้ำหนักและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิริยาไฮเดรชันของแคลเซียมซิลิเกตคือ CSH ซึ่งเป็นตัวที่ทำให้คอนกรีตสามารถรับกำลังอัดได้ดี

(2) หลังจากเกิดปฏิกิริยาแรกเริ่ม อัตราการเกิดความร้อนของปฏิกิริยาไฮเดรชันเริ่มลดลงจนดูเหมือนว่าคงที่ เนื่องจากความสามารถในการละลายของอลูมิเนียมใน C_3A ลดลง เพราะว่าซัลเฟตที่ได้จากการเติมยับยั้งลงไปจะไปหน่วงปฏิกิริยา ในช่วงนี้ CSH และ เอ็ดทริงไท์ ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์จะเป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอินดักชัน ถึงกระนั้นก็ตามการละลายของอิออนจากกลีเซียมซิลิเกตยังคงดำเนินต่อไป และความเข้มข้นของกลีเซียมอิออนจะเพิ่มสูงขึ้น

(3) ในช่วงสุดท้ายของช่วงอินดักชัน ความเข้มข้นของกลีเซียมอิออนในสารละลายเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว เมื่อสิ้นสุดช่วงนี้ก็จะเข้าสู่การเริ่มก่อตัว (initial set) CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์จะแตกตัวออกและเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป

(4) ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และเป็นผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง หรือเข้าสู่การก่อตัวครั้งสุดท้าย (final set) นั่นเอง

(5) หลังจาก 24 ชั่วโมงผ่านไปแล้ว ซัลเฟตอิออนจะถูกใช้หมดไป และเอ็ดทริงไท์ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate) ถ้ายังคงมี C_3A เหลืออยู่ ส่วนกลีเซียมซิลิเกตก็ยังคงทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป เป็นผลให้คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดได้

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต [28,29,31]

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีอยู่ 3 ปัจจัยที่สำคัญคือ คุณสมบัติและสัดส่วนของส่วนผสม วิธีการทำแท่งทดสอบ และการทดสอบ ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2.3.1. คุณสมบัติและสัดส่วนของส่วนผสม

ในการผลิตคอนกรีตให้สามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ตามที่ต้องการ ขั้นตอนแรกที่ต้องกระทำคือ การเลือกใช้ส่วนผสมที่เหมาะสมและในสัดส่วนที่ถูกต้อง

ก. อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีผลกระทบโดยตรงต่อการรับแรงอัดของคอนกรีต โดยยิ่งมีค่าต่ำเท่าใด คอนกรีตก็จะสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นเท่านั้น

ข. ประเภทของซีเมนต์ ปูนซีเมนต์จัดว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก โดยปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะให้กำลังต้านทานแรงอัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน และความละเอียดที่ต่างกันอีกด้วย

ค. มวลรวม คุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดคือ ความแข็งแรง ขนาด รูปร่าง ผิว ขนาดกละ และส่วนประกอบแร่ธาตุ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็อาจมีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเช่นกัน

ง. น้ำที่ใช้ผสม คุณภาพของน้ำที่ใช้ในการผสมคอนกรีตมีความสำคัญมาก เนื่องจาก สิ่งเจือปนต่างๆ ปริมาณของสารเคมี หรือเกลือแร่ที่ผสมอยู่ อาจจะมีผลต่อคุณสมบัติของคอนกรีต เช่นเวลาการแข็งตัว กำลังด้านทานแรงอัด เป็นต้น

จ. สารผสมเพิ่ม สารผสมเพิ่มบางอย่างอาจช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสม ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในอัตราที่เหมาะสม ซึ่งก่อให้เกิดการพัฒนาการรับแรงได้ในเวลาอันรวดเร็ว ในขณะที่สารผสมเพิ่มบางตัวเช่นที่มีส่วนผสมของสารปอซโซลานิก (Pozzolanic) มักจะมีผลทำให้กำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรกแต่จะสูงขึ้นในระยะยาว

2.2.3.2 วิธีการทำแท่งทดสอบ

ก. การชั่งตวงส่วนผสม การชั่งตวงส่วนผสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการชั่งตวงโดยปริมาตร จะทำให้มีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งตวงโดยน้ำหนัก สัดส่วนผสมที่มีผลโดยตรงและสำคัญที่สุดคือ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์

ข. การผสมคอนกรีต มีวัตถุประสงค์เพื่อให้คอนกรีตที่ได้มีเนื้อเดียวกันมากที่สุด เพื่อให้ปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำเกิดขึ้นอย่างทั่วถึง และเพื่อให้ซีเมนต์เพสต์ที่ได้กระจายอยู่อย่างทั่วถึงในวัสดุผสม ทำให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ นั่นคือประมาณ 15-25% สำหรับงานทั่วไป

ค. การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการทำให้แน่น มีผลต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากว่าในระหว่างการสั่นและการเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ ถ้าหากเกิดการแยกตัวจะทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดลดลง และในการทำให้แน่นหากทำไม่ดี จะทำให้เกิดรูโพรงในเนื้อคอนกรีตหรือทำให้เกิดการแยกตัวได้ ทำให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้ลดลง

ง. การบ่มคอนกรีต คือวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วยการควบคุมเวลา อุณหภูมิ และสภาวะความชื้นทันทีหลังจากการเทคอนกรีตในแบบหล่อ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการบ่มและมีผลต่อการรับกำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีต คือเวลา ความชื้น และ อุณหภูมิ

เวลาในการบ่มมีผลต่อกำลังด้านทานแรงอัดโดยตรง โดยเวลาที่ใช้ในการบ่มขึ้นยิ่งนานมากเท่าไร กำลังด้านทานแรงอัดจะยิ่งพัฒนาสูงขึ้น ความชื้นมีผลต่อกำลังด้านทานแรงอัดเป็นอย่างมากโดยคอนกรีตที่บ่มในอากาศธรรมดาจะพัฒนากำลังด้านทานแรงอัดได้ช้ากว่าคอนกรีตที่บ่มขึ้นตลอดเวลา และอุณหภูมิมีผลในการเร่งหรือชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยอุณหภูมิยิ่งสูงจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดเร็วขึ้น เป็นผลให้การรับแรงอัดพัฒนาขึ้น แต่ถ้าเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันมากเกินไป จะส่งผลให้กำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตในระยะยาวลดลง

2.2.3.3 การทดสอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ กำลังต้านทานแรงอัด ประกอบด้วยขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ ความชื้นในแท่งทดสอบ และ อัตราการกด ดังนั้นรายละเอียดดังนี้

ก. ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ แท่งตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 รูปทรงคือ รูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานมีขนาดเท่ากับ 15x15x15 ซม. และรูปทรงกระบอกมาตรฐานมีขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ซึ่งกำลังต้านทานแรงอัดของรูปทรงทั้งสองนี้จะมีค่าแตกต่างกัน แม้ว่าจะมีส่วนผสมเดียวกัน โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์มีค่าสูงกว่ารูปทรงกระบอก ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงต้านทานที่เกิดขึ้นที่ส่วนปลายทั้งสองข้างของผิวของแท่งทดสอบกับพื้นเครื่องทดสอบที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดแรงอัดทางด้านข้างที่ส่วนปลายของแท่งทดสอบ แรงอัดทางด้านข้างที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากที่สุดที่ส่วนปลายและลดลงเมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบ ผลก็คือรูปทรงที่มีความขรุขระมากกว่าจะมีผลของแรงอัดทางด้านข้างน้อยกว่ารูปทรงที่สั้นกว่า ทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของรูปทรงที่สั้นกว่ามีค่าสูงขึ้น ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือการที่เปลี่ยนรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐานที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.0 ไปเป็น 1.0 จะพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 20% ตารางที่ 2.2 แสดงผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่า 2 จะต้องปรับแก้ด้วยตัวคูณดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัด [31]

อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลาง ของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอก	ค่าตัวคูณปรับแก้ ของกำลังอัด
2.00	1.00
1.75	0.98
1.50	0.97
1.25	0.94
1.00	0.91

โดยปกติแล้วแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่ใช้จะมีขนาดมาตรฐาน เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. สูง 30 ซม. เมื่อขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกเปลี่ยนไปในขณะที่ค่าอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางยังคงเท่ากับ 2 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทดสอบได้ก็จะมีค่าไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน ขนาดแท่งทดสอบที่ใหญ่ขึ้นจะได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ลดลงเนื่องจากผลของความชะลุด ดังเช่นที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ผลที่ได้เหมือนกันสำหรับแท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาดต่างๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ข. ความชื้นในแท่งทดสอบ แท่งทดสอบที่ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศจะให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงกว่าแท่งทดสอบที่มีส่วนผสมเดียวกันที่มีความชื้นถึง 20-40%

ก. อัตราการกด ในการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต อัตราการกดที่ต่างกันย่อมส่งผลกระทบต่อค่ากำลังของคอนกรีตที่ได้ อัตราการกดที่สูงจะทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสูงกว่าจริง ดังนั้นควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

ตารางที่ 2.3 ผลของขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนความสูงต่อ

เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากแท่งทดสอบมาตรฐาน [31]

ขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอก (ซม.)	ค่าเปอร์เซ็นต์กำลังต้านทานแรงอัดเทียบกับค่าที่ได้จากแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน
5 x 10	109
7.5 x 15	106
15 x 30	100
20 x 40	97
30 x 60	91
45 x 90	87
60 x 120	84
90 x 180	82

ตารางที่ 2.4 ผลของขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากแท่งทดสอบมาตรฐาน [31]

ขนาดของแท่งทดสอบ รูปทรงลูกบาศก์ (ซม.)	ค่าเปอร์เซ็นต์กำลังต้านทาน แรงอัดเทียบกับค่าที่ได้จาก แท่งทดสอบขนาดมาตรฐาน
7.5x7.5x7.5	106
10x10x10	104
15x15x15	100
20x20x20	95
25x25x25	92

บทที่ 3

การทดลอง

ในบทนี้เนื้อหาจะเกี่ยวข้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ วัสดุและการเตรียมวัสดุ ขั้นตอนการทดลอง และการเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

(1) แบบหล่อ เป็นแบบหล่อรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) ทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีนที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้เป็นอย่างดี และฐานแบบหล่อทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน (ดูรูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แบบหล่อโพลีเอธิลีนหนาแน่นสูง รูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) และฐานแบบหล่อโพลีเอธิลีน

(2) แบบหล่อ เป็นแบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดภายใน 150 มม.x150 มม.x150 มม. และฐานแบบหล่อ ทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน จำนวน 1 แบบ (ดูรูปที่ 3.2) หรือทำมาจากโลหะ จำนวน 1 แบบ เพื่อใช้ทดสอบค่าการต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าร์



รูปที่ 3.2 แบบหล่อโพลีเอธิลีนรูปทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดภายใน 150 มม.x150 มม.x150 มม. ทำจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน และฐานแบบหล่อโพลีเอธิลีน เปรียบเทียบกับแบบหล่อโลหะ

(3) เตาอบไมโครเวฟ จำนวน 4 เครื่อง (ดูรูปที่ 3.3) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025 มีขนาดภายในกว้าง 390 มม. x สูง 268 มม. x ลึก 400 มม. ความถี่ 2.45 GHz ให้กำลังสูงสุด 850 วัตต์ตามมาตรฐานการเทียบค่าของคณะกรรมการนานาชาติทางเทคนิคไฟฟ้า (International Electrotechnical Commission) สามารถปรับค่ากำลังได้ที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, และ 100% ของค่ากำลังสูงสุด

3.2 เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อเวิร์ลพูล รุ่น VIP 347 มีขนาดภายในกว้าง 312 มม. x สูง 225 มม. x ลึก 390 มม. ความถี่ 2.45 GHz สามารถปรับค่ากำลังได้ตั้งแต่ 90, 160, 350, 500, 650, 750, 850, และ 1000 วัตต์ ตามมาตรฐานการเทียบค่าของคณะกรรมการนานาชาติทางเทคนิคไฟฟ้า

3.3 เตาอบไมโครเวฟยี่ห้ออิตาซี มีขนาดภายใน กว้าง 349 มม. x สูง 220 มม. x ลึก 355 มม. ความถี่ 2.45 GHz สามารถปรับค่ากำลังได้ตั้งแต่ 90, 180, 270, 360, 450, 540, 630, 720, 810, และ 900 วัตต์ ตามมาตรฐานการเทียบค่าของคณะกรรมการนานาชาติทางเทคนิคไฟฟ้า

3.4 เตาอบไมโครเวฟยี่ห้อชาร์ป มีขนาดภายใน กว้าง 374.5 มม. x สูง 231.5 มม. x ลึก 391.1 มม. ความถี่ 2.45 GHz ให้กำลังสูงสุด 900 วัตต์ตามมาตรฐานการเทียบค่าของคณะกรรมการนานาชาติทางเทคนิคไฟฟ้า สามารถปรับค่ากำลังได้ที่ 10, 30, 50, 70, และ 100% ของค่ากำลังสูงสุด



ยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025



ยี่ห้อเวิร์ลพูล รุ่น VIP 347



ยี่ห้ออิตาซี

รูปที่ 3.3 เตาอบไมโครเวฟ

- (4) เครื่องทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัด
- (5) เครื่องแยกขนาดมวลรวมหยาบและละเอียด
- (6) เครื่องอบมวลรวมหยาบและละเอียด
- (7) เครื่องผสมคอนกรีต
- (8) ภาชนะแก้วโบลิลิกเกต รูปทรงกระบอก หนา 3 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 190 มม. และสูง 100 มม.
- (9) หม้ออบกำมะถัน
- (10) เครื่องถอดแบบ แท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ออกจากแบบหล่อ (ดูรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 เครื่องถอดแบบแท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ออกจากแบบหล่อ

- (11) อุปกรณ์ที่ใช้หล่อหัว สำหรับแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. (ดูรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้หล่อหัวแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม.

- (12) แผ่นพลาสติก เพื่อใช้ในการป้องกันการสูญเสียความชื้นระหว่างการบ่มปกติ
- (13) เหล็กกระทุ้ง

- (14) ไม้เส้น เพื่อใช้ในการทำคอนกรีตให้แน่น
- (15) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล พร้อม เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)
- (16) เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data acquisition system)
- (17) เครื่องคอมพิวเตอร์
- (18) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- (19) เครื่องวัดค่าการต้านทานการจมของเข็ม (Penetrometer)
- (20) นาฬิกาจับเวลา
- (21) อุปกรณ์อื่นๆ เช่น เครื่องเหล็ก ภาชนะตวง และ ภาชนะบรรจุคอนกรีต

3.2 วัสดุและการเตรียมวัสดุ

วัสดุที่ใช้และการเตรียมวัสดุประกอบด้วย

- (1) ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา
- (2) มวลรวมหยาบ เป็นหินปูนที่มีขนาดโคสดูไม่เกิน 20-50 มม. โดยจะถูกล้างทำความสะอาด ก่อนนำไปอบให้แห้งในเตาอบปกติที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วันก่อนนำมาใช้
- (3) มวลรวมละเอียด เป็นทรายก่อสร้างทั่วไป โดยจะถูกล้างทำความสะอาด ก่อนนำไปอบให้แห้งในเตาอบปกติที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วัน ก่อนนำมาใช้
- (4) น้ำ เป็นน้ำประปา โดยก่อนใช้ให้น้ำที่ได้นำใส่ในภาชนะและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาอย่างน้อย 1 วันก่อนผสม
- (5) สารเคมีผสมเพิ่ม ประกอบด้วย
 - (5.1) สารลดน้ำพิเศษ เป็นผลิตภัณฑ์ Sikament FF จาก บริษัท Sika (ประเทศไทย) จำกัด ใช้ในปริมาณที่กำหนด ที่เท่ากับ 0.6-3.0% ของปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยน้ำหนัก
 - (5.2) สารเร่งการก่อตัว เป็นผลิตภัณฑ์ SikaRapid-1 จาก บริษัท Sika (ประเทศไทย) จำกัด ใช้ในปริมาณที่กำหนด ที่เท่ากับ 0.5-1.5% ของปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยน้ำหนัก และ ใช้ ผลิตภัณฑ์สารเร่งการก่อตัว จากบริษัท ไทยมาสเตอร์ บิวเดอร์ จำกัด ใน ขั้นตอนี่ 4.3
 - (5.3) สารหน่วงการก่อตัว เป็นผลิตภัณฑ์ Plasticment R2 จาก บริษัท Sika (ประเทศไทย) จำกัด ใช้ในปริมาณที่กำหนด ที่เท่ากับ 0.2-0.5% ของปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยน้ำหนัก และผลิตภัณฑ์ Pozzolith 400 R จากบริษัท ไทยมาสเตอร์ บิวเดอร์ จำกัด

(6) เถ้าลอยจาก แม่เมาะ จ.ลำปาง โดยมีสมบัติทางกายภาพและส่วนประกอบทางเคมีดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง

สมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง	เถ้าลอยที่ผ่านการบด
Specific gravity	3.15	2.11
Blaine fineness (cm^2/g)	3200	2150
Loss of ignition	0.60	0.29

ตารางที่ 3.2 ส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยเปรียบเทียบกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง

ส่วนประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง	เถ้าลอยที่ผ่านการบด
Silica (SiO_2)	21.45	45.98
Alumina (Al_2O_3)	5.35	26.56
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	3.01	9.17
Calcium Oxide (CaO)	67.33	9.37
Sodium Oxide (Na_2O)	0.11	0.90
Potassium Oxide (K_2O)	0.33	2.73
Sulfur Trioxide (SO_3)	2.31	4.70

- (7) ผงกำมะถัน เพื่อใช้ในการหล่อหัวแท่งทดสอบ
- (8) น้ำมันหล่อแบบ
- (9) หลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. สูง 7.5 ซม.
- (10) พาราฟินเหลว

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ขั้นตอนใหญ่ตามวัตถุประสงค์ของโครงการคือ

ขั้นตอนที่ 1 มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการหาค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต

โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้สามารถใช้ได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มและใช้สารเคมีผสมเพิ่ม

รายละเอียดทั้งหมดของขั้นตอนที่ 1 มีดังนี้คือ

1.1 การหากระบวนการเร่งการแข็งตัวของพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสม โดยที่ตัวแปรสำคัญของกระบวนการเร่งการแข็งตัวของพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่จำเป็นจะต้องศึกษาประกอบด้วย 4 ตัวแปร ดังนี้คือ

(1) เวลาที่ใช้ในการผสมและบรรจุลงแบบหล่อภายหลังจากนำทำปฏิกิริยากับปูนซีเมนต์ก่อนที่จะใช้พลังงานไมโครเวฟเร่งการแข็งตัว ซึ่งในที่นี้ใช้ ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์เป็นตัวกำหนดว่าเมื่อไรถึงจะเริ่มให้พลังงานไมโครเวฟแก่แท่งตัวอย่างคอนกรีตสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม ถ้าในกรณีที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ให้ทดลองหาเวลาที่เหมาะสมที่สามารถทดสอบหาค่ากำลังอัดที่ระยะแรกได้ ไม่ต้องใช้การทดสอบหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม

(2) เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ ในที่นี้กำหนดให้ใช้ที่เวลารวมทั้งหมดที่ 45 นาที เนื่องจากเป็นเวลาที่เหมาะสมแล้ว จากงานวิจัยเดิมที่ผ่านมา

(3) ระดับกำลังของตู้อบไมโครเวฟที่เหมาะสม ซึ่งอาจจะเป็นระดับกำลังที่คงที่ตลอดเวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ หรือเป็นระดับกำลังที่คงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟก็ได้ ซึ่งอาจจะใช้เป็นระดับกำลังที่เหมาะสม จากงานวิจัยเดิมที่ผ่านมา

(4) เวลาที่ใช้ในการบ่มคอนกรีตแบบปกติภายหลังจากการเร่งการแข็งตัวของพลังงานไมโครเวฟ ก่อนการทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรก

1.2 การสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว(28 หรือ 91 วัน)ของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติเพื่อทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้และไม่ใช้สารผสมเพิ่ม

เมื่อได้ กระบวนการเร่งการแข็งตัวของพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว จึงนำมาใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่ประมาณ 10-60% โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ที่ค่ากำลังอัดในช่วง 150-600 กก./ตร.ซม. และเก็บข้อมูลค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และ ค่ากำลังอัดที่ระยะยาว (28 หรือ 91 วัน)ที่ได้จากการบ่มปกติ เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ระยะยาว (28 หรือ 91 วัน) ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2 มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้สามารถใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ

สิ่งที่แตกต่างกันในการใช้เทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดนี้ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยใช้กับเตาอบไมโครเวฟเครื่องหนึ่งเครื่องใด กับเตาอบไมโครเวฟเครื่องอื่นๆคือ

(1) ระดับพลังงานที่ให้ของเตาอบไมโครเวฟแต่ละเครื่อง ในการทดลองนี้ใช้เตาอบไมโครเวฟจำนวน 3 เครื่องที่แตกต่างจากรุ่นเดิมที่เคยใช้

(2) จำนวนของแท่งทดสอบ ในกรณีปกติจะใช้ 4 แท่งทดสอบ แต่ถ้าหากว่าขนาดของเตาอบไมโครเวฟใหม่มีขนาดเล็ก ซึ่งส่งผลต่อจำนวนของแท่งทดสอบที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวมีจำนวนลดลง อาจจะใช้จำนวนแท่งทดสอบเพียง 3 แท่งทดสอบ

คอนกรีตที่ใช้ศึกษาเป็นคอนกรีตไม่ผสมเถ้าลอยที่มีค่ากำลังอัดในช่วงตั้งแต่ประมาณ 150-600 กก./ตร.ซม.

รายละเอียดทั้งหมดของขั้นตอนที่ 2 มีดังนี้คือ

2.1 ในขั้นตอนนี้จะนำสูตรที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นใน[5] มาทำการตรวจสอบความแม่นยำของสูตร โดยใช้คอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการจำนวน 15 ตัวอย่าง ซึ่งเหมือนกันกับที่เคยใช้สร้างสูตรทำนายค่ากำลังอัด และใช้คอนกรีตผสมเสร็จที่ขายในท้องตลาดจำนวน 24 ตัวอย่าง จากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จจำนวน 6 แห่งซึ่งครอบคลุมการใช้งานในประเทศไทย โดยได้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างจากโรงผลิตแต่ละแห่ง และคอนกรีตดังกล่าวมีค่ากำลังอัดในช่วงใช้งานทั่วไป โดยวิธีหรือเทคนิคที่ใช้ในการทำนายค่าให้คงเดิมตามรายละเอียดใน [5] ซึ่งถือว่าเป็นพื้นฐานที่ใช้พัฒนาเทคนิคการทำนายค่าให้ดีขึ้น

2.2 ศึกษาคุณลักษณะของเตาอบไมโครเวฟ ที่มีอยู่ในตลาดปัจจุบัน ทั้งในเรื่องของ ยี่ห้อ ขนาด ภายใน ราคา ระดับกำลัง และความสามารถในการรับน้ำหนักหรือการบรรจุแท่งทดสอบคอนกรีต เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการเลือกใช้เตาอบไมโครเวฟโดยจะพิจารณาถึง ขนาดภายในที่เหมาะสม ระดับกำลังที่ให้ และ ความสามารถในการรับน้ำหนักหรือการบรรจุแท่งทดสอบ เป็นสำคัญ โดยการเทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ถูกใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งระบุหน่วยไว้เป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 10-100 ของระดับกำลังที่ให้สูงสุด ให้อยู่ในหน่วยวัตต์ ให้เป็นไปตามมาตรฐานการเทียบค่าของคณะกรรมการนานาชาติทางเทคนิคไฟฟ้า (International Electrotechnical Commission 705) [32] ดังมีรายละเอียดดังนี้

(1) ใส่น้ำที่ต้มได้จำนวน 1000 ± 5 กรัมที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ $8-12^{\circ}\text{C}$ ลงไปในภาชนะแก้วไบโอดีลิเทค รูปทรงกระบอกหนา 3 มม. เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 190 มม. และสูง 100 มม. ภาชนะและเตาอบควรอยู่ที่อุณหภูมิห้องก่อนการทดลอง วัดอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำก่อนเทลงในภาชนะ

(2) นำภาชนะเข้าเตาอบไมโครเวฟ โดยตั้งค่าระดับกำลังที่ 100% และจับเวลาตั้งแต่เริ่มให้พลังงานไมโครเวฟจนกระทั่งอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากเดิม $10 \pm 2^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิเริ่มต้นและสุดท้ายควรเป็นอุณหภูมิที่ขอมให้มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิห้องมากที่สุดเท่ากับ 5°C

(3) วัดอุณหภูมิสุดท้าย โดยก่อนวัดอุณหภูมิ ให้นำแท่งแก้วลงไปคนให้ทั่วภาชนะเสียก่อน เพื่อให้พลังงานความร้อนเกิดการถ่ายเทให้ทั่วภาชนะ

(4) นำค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้ ไปคำนวณหาค่ากำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ให้จากสมการข้างล่างนี้

$$P = 4187 \cdot (T_2 - T_1) / t$$

โดย P = ค่ากำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ให้ (วัตต์)

T_1 = ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = ค่าอุณหภูมิสุดท้าย ($^{\circ}\text{C}$)

t = เวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ (วินาที)

เนื่องจากในการทดลองนี้ต้องการหาระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ ซึ่งอาจจะระบุหน่วยไว้เป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 10-100 ของระดับกำลังที่ให้สูงสุดให้อยู่ในหน่วยวัตต์ เพื่อให้สามารถอ้างอิงถึงงานที่ผ่านมาได้ ดังนั้นจึงเปลี่ยนค่าระดับกำลังที่ 100% ไปเป็น 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, และ 90% ในการเทียบค่า

2.3 ศึกษาแนวทางในการให้พลังงานไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟเดิม ตามขนาดและจำนวนของแท่งทดสอบคอนกรีตที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวและแนะนำแนวทางการให้พลังงานไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟแต่ละรุ่นที่เลือกใช้ เพื่อการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม

2.4 ทดลองนำระดับการให้พลังงานไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟที่แนะนำไว้ในขั้นตอน 2.3 มาใช้ทดลองกับเตาอบไมโครเวฟที่ถูกเลือกใช้ในการทดลองนี้ เพื่อศึกษาว่ามีการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสมหรือไม่ อย่างไร โดยสามารถพิจารณาได้จากการเปรียบเทียบระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยไมโครเวฟรุ่นใหม่ที่จะใช้เทียบกับรุ่นเดิม

2.5 ทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วัน หลังจากได้แนวทางที่เสนอเพื่อกำหนดระดับกำลังไมโครเวฟ และระยะเวลาสำหรับเตาอบไมโครเวฟแต่ละยี่ห้อไปใช้เร่งการแข็งตัวของคอนกรีตตามกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสม แล้ว ในขั้นตอนนี้จะทดลองเร่งการแข็งตัวด้วยไมโครเวฟต่างยี่ห้อ ที่อาจมีจำนวนแท่งทดสอบที่ต่างกัน และนำค่ากำลังอัดระยะแรกที่ได้ไปใช้สร้างความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่อายุ 28 วัน เพื่อนำไปใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ให้สามารถทำนายค่าได้ในระยะเวลาที่เร็วขึ้น

เดิมระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่มต่างๆ ใช้เวลาประมาณ 11-20.5 ชั่วโมง โดยระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟมีค่ามากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวคือใช้เวลาประมาณ 7-16 ชั่วโมง ดังนั้นการลดระยะเวลาทำนายค่ากำลังอัดจึงเน้นที่การลดระยะเวลาในขั้นตอนนี้ ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดคือจะใช้ระยะเวลาที่รอก่อนนำเข้าเตาอบไมโครเวฟที่เวลา 6, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง ซึ่งในที่นี้จะทดสอบเปรียบเทียบกับค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ ซึ่งมีประโยชน์ในการกำหนดเวลาที่เริ่มเร่งกระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ในการทดลองนี้จะเลือกใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ในระดับค่าที่น้อยกว่าเดิม คือในช่วง 0 - 400 ปอนด์/ตร.นิ้ว ซึ่งเดิมกำหนดใช้ที่ช่วง 400-500 ปอนด์/ตร.นิ้ว ส่วนค่าระดับกำลังไมโครเวฟและเวลาที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัว จะใช้ค่าเดิมที่ 262 วัตต์เป็นระยะเวลา 30 นาที และ 187 วัตต์ เป็นระยะเวลา 15 นาที ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับระยะเวลาในการพักแท่งทดสอบคอนกรีตภายหลังการให้ความร้อน ซึ่งเดิมเท่ากับ 3.5 ชั่วโมง รายละเอียดเพิ่มเติมได้ในงานวิจัยที่ผ่านมา[5] ในขั้นตอนนี้จะศึกษาเฉพาะคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าลอยในช่วงค่ากำลังอัดปกติ ตั้งแต่ประมาณ 200-450 กก./ตร.ซม.

ส่วนรายละเอียดทั้งหมดของขั้นตอนที่ 3 มีดังนี้คือ

3.1 ศึกษาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีตเทียบกับระยะเวลาที่ใช้ในการพักคอนกรีตก่อนเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้ระยะเวลาที่รอก่อนนำเข้าเตาอบไมโครเวฟที่เวลา 6, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง

3.2 เปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังอัดที่ 28 วัน โดยมีตัวแปรที่ใช้คือระยะเวลาที่รอก่อนนำเข้าเตาอบไมโครเวฟที่เวลา 6, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ว่าสามารถเร่งการทำนายค่ากำลังอัดได้หรือไม่ อย่างไร

3.4 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม

ในขั้นตอนนี้ สามารถเขียนอธิบายขั้นตอนการเตรียมแท่งทดสอบและการบ่มได้ออกเป็นทั้งหมด 10 ขั้นตอนดังนี้คือ

(1) ทาน้ำมันด้านในของแบบหล่อที่มีขนาดรูปทรงกระบอก 76.2 มม.x152.4 มม. เพื่อความสะดวกในการถอดแท่งทดสอบคอนกรีตออกจากแบบหล่อ และประกอบแบบหล่อเข้ากับฐานแบบหล่อ จำนวน 8 แบบ รวมถึงการเตรียมแบบหล่อโลหะรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. จำนวน 1 แบบ เพื่อใช้วัดค่าแรงด้านการจมของเข็มในมอร์ตาร์

(2) ถ้ามีการใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ให้เริ่มผสมสารเคมีผสมเพิ่มกับน้ำที่ใช้ผสม ต่อด้วยการผสมปูนซีเมนต์ (ถ้ามีเกล็ดลอย ให้ผสมกับปูนซีเมนต์ก่อน) มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในเครื่องผสมปูนให้เข้ากัน แล้วเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มผสมน้ำที่มีสารเคมีผสมเพิ่มอยู่กับปูนซีเมนต์ เรียกเวลานี้ว่า เวลารวม โดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที

(3) นำคอนกรีตเหลวที่ได้ส่วนหนึ่งจะนำไปบรรจุใส่แบบหล่อทอทั้ง 8 ที่เตรียมไว้แล้ว อีกส่วนหนึ่งจะนำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อใช้มอร์ตาร์บรรจุลงในแบบหล่อโลหะรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

(4) วิธีการบรรจุคอนกรีตเหลวหรือมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อ ทำได้โดยเดิมคอนกรีตเหลวหรือมอร์ตาร์ที่ได้ลงในแบบหล่อซึ่งวางอยู่บนโต๊ะที่เบียดอยู่ เพื่อช่วยทำให้คอนกรีตแน่นมากขึ้น โดยแบ่งใส่เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาตรของแบบหล่อ กระทั่งคอนกรีตเหลวแต่ละชั้นๆ ละ 25 ครั้งโดยใช้ปลายมนของเหล็กกระทุ้ง ควรจะกระทุ้งให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตเหลวและให้ทะลุตลอดความลึกของคอนกรีตเหลวแต่ละชั้น หลังจากทำให้แน่นเสร็จก็ทำการปาดผิวหน้าด้วยเกรียงเหล็กให้เรียบจนครบทุกแบบหล่อ ใช้เวลาภายในเวลา 15-20 นาที

(5) แบ่งแท่งทดสอบคอนกรีตที่ได้บรรจุไว้แล้วในแบบหล่อรูปทรงกระบอก ออกเป็น 2 ชุดดังนี้คือแท่งทดสอบคอนกรีตจำนวน 4 แท่งจะถูกนำไปเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ส่วนที่เหลืออีก 4 แท่งจะถูกนำไปบ่มปกติที่อุณหภูมิห้อง โดยนำแผ่นพลาสติกมาคลุมแท่งทดสอบไว้ 2 ชั้นแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

(6) ทำการวัดค่าแรงด้านการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่อยู่ในแบบหล่อโลหะรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. ตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 403

(7) หลังจากเวลารวมครบ 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ หรือเมื่อแรงด้านการจมของเข็มในมอร์ตาร์มีค่าถึงระดับที่ต้องการ นำแท่งทดสอบคอนกรีตจำนวน 4 แท่งไปบ่มในเตาอบไมโครเวฟที่กำหนดเป็นเวลา 45 นาที โดยกำหนดระดับพลังงานของเตาอบไมโครเวฟและเวลาที่ใช้เร่งการแข็งตัวตามต้องการ

(8) นำแท่งทดสอบคอนกรีตที่ได้จากการบ่มในเตาอบไมโครเวฟออกจากเตา แล้วนำแผ่นพลาสติกมาคลุมแท่งทดสอบไว้ 2 ชั้น แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบที่ระยะแรก โดยจะใช้เวลา 30 นาทีก่อนเวลาทดสอบในการนำแท่งทดสอบทั้ง 4 แท่งออกจากแบบหล่อและหล่อหัวด้วยก้านะดันก่อนที่จะนำไปทดสอบหาค่ากำลังด้านทานแรงอัด ในบางกรณีจะใช้แท่งทดสอบ 2 แท่งในการทดสอบค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรก ส่วนที่เหลืออีก 2 แท่งจะถูกถอดแบบที่อายุ 1 วัน และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

(9) เมื่อครบ 1 วัน นำแท่งทดสอบคอนกรีตที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้องจำนวน 4 แท่งถอดออกจากแบบหล่อ และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

(10) ในกรณีที่ต้องมีการวัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบคอนกรีตภายหลังจากให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ สามารถกระทำได้ในการเตรียมแบบหล่อเพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิ ให้ทำการยึดแผ่นโพลิเอธิลีนเพื่อยึดจับหลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. สูง 7.5 ซม. ที่บรรจุสารนำความร้อนที่ดี เช่น พาราฟินเหลว ให้เข้ากับแบบหล่อ จากนั้นบรรจุคอนกรีตเหลว เช่นเดียวกับวิธีการปกติและเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ หลังจากให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแล้ว ใช้เทอร์โมคัปเปิลสอดเข้าไปในหลอดแก้วเพื่อวัดอุณหภูมิตามระยะเวลาที่ต้องการ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทำการทดลองตามขั้นตอนที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 สามารถที่จะจำแนกผลการทดลองออกเป็นลำดับขั้นตอน ได้ดังนี้

4.1 ผลการพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีต ให้สามารถใช้ได้กับคอนกรีตผสมถ้ำลอยที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม

4.1.1 คอนกรีตผสมถ้ำลอยที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม

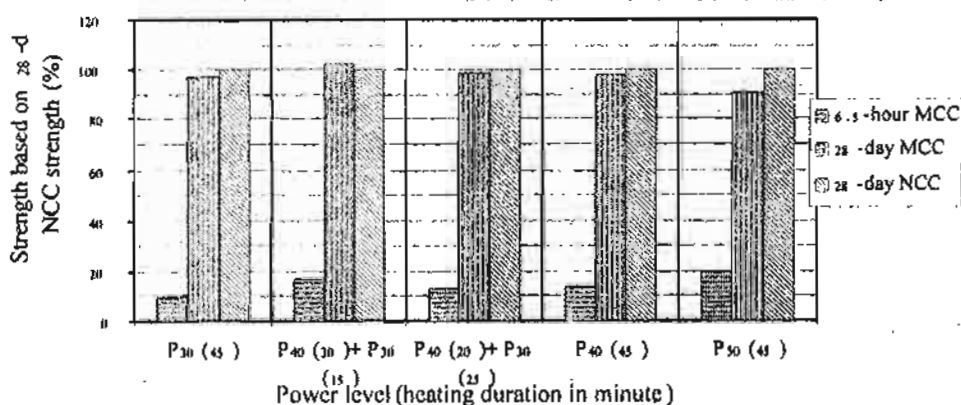
4.1.1.1 ผลการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่เกี่ยวข้อง และจะทำการศึกษา แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 จากตารางจะพบว่า ตัวแปรที่ต้องทำการหาค่าคือ ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ และเวลาทดสอบที่ระยะแรก กำหนดให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อตัวประสาน(W/B) มีค่าคงที่ ที่ 0.54 และ ให้อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์:มวลรวมละเอียด: มวลรวมหยาบ (C:S:A) เป็น 1:2.54:3.32 โดยน้ำหนัก และมีสัดส่วนผสมของถ้ำลอยต่อ ผลรวมของปูนซีเมนต์และถ้ำลอย เท่ากับ 0.30

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตผสมถ้ำลอยที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม

ตัวแปร	รายละเอียด
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	C:S:A=1:2.54:3.32; W/B=0.54; F/(C+F)=0.30
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	?
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแห้งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	30 นาที
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	?
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	28 วัน
7. จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 4 แท่ง

เมื่อกำหนดเวลาทดสอบที่ระยะแรกเท่ากับ 6.5 ชั่วโมง และใช้ค่าระดับกำลังที่ P30(246 วัตต์), P40(328 วัตต์) และ P50(410 วัตต์) เป็นระยะเวลา 45 นาที เพื่อทดสอบหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองพบว่าค่าระดับกำลังคงที่ที่ใช้ที่สูงกว่า P40 มีค่าสูงเกินไป เป็นผลให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อายุ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วันถึง 10% (ดูรูปที่ 4.1) และพบว่าค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ควรอยู่ระหว่าง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 45 นาที ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าระดับกำลังของทั้ง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ (หรือ P40(30)+P30(15)) และ P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 20 และ 25 นาทีตามลำดับ (หรือ P40(20)+P30(25)) จากรูปที่ 4.1 พบว่าในการใช้ค่าระดับกำลังของทั้ง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 6.5 ชั่วโมงมีค่าสูง ในขณะที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 28 วัน มีค่าเทียบเท่ากับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติ ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับกำลัง P40 และ P30 เป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ จึงเป็นระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุด

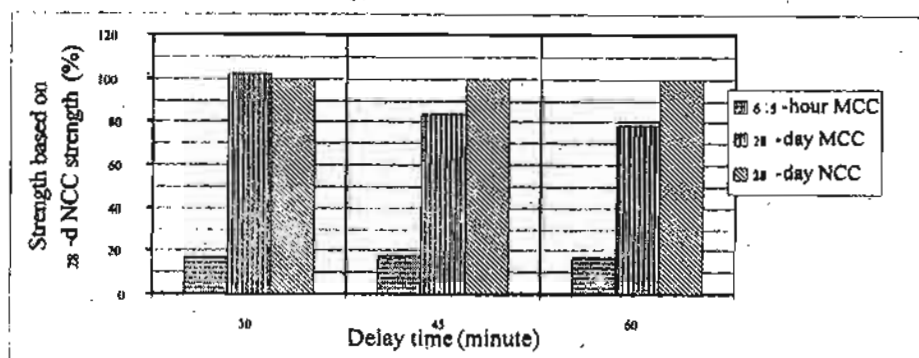


รูปที่ 4.1 ผลของระดับกำลังต่างๆที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

(C:S:A=1:2.54:3.32 และ W/B = 0.54) (กำหนดให้ MCC = คอนกรีตที่บ่มด้วย พลังงานไมโครเวฟ และ NCC = คอนกรีตที่บ่มปกติ)

เมื่อทราบระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ต่อไปจึงหาค่าระยะเวลาดังแต่นี้เริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแห้งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม หรือ delay time โดย

พิจารณาจากระยะเวลา 30 40 และ 50 นาที โดยใช้ค่าระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ในการให้ความร้อน ผลจากรูปที่ 4.2 พบว่าระยะเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 30 นาที เนื่องจากค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 28 วันมีค่าเท่ากับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่ 28 วัน ในขณะที่ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 28 วันของระยะเวลาที่ 40 และ 50 นาที มีค่าเท่ากับ 78-82% ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่ 28 วัน

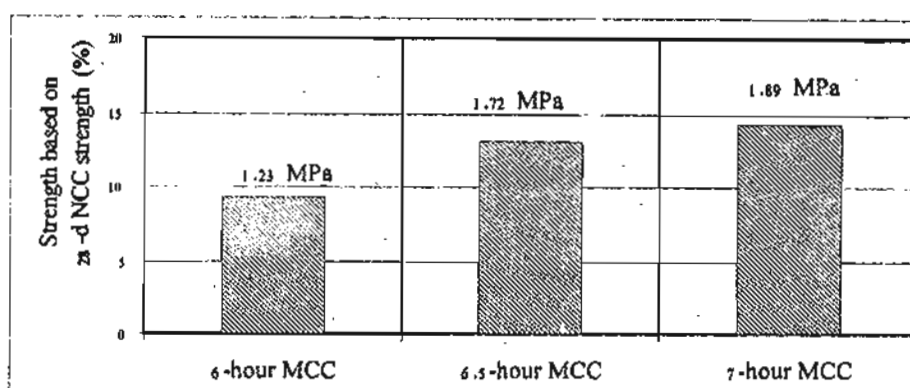


รูปที่ 4.2 ผลของระยะเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย (C:S:A=1:2.54:3.32 และ W/B = 0.54; F/(C+F)=0.30; P40(30)+P30(15))

ต่อมาจึงหาค่าเวลาทดสอบที่ระยะแรกที่เร็วที่สุด โดยใช้ค่าระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ในการให้ความร้อน และ ระยะเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่ 30 นาที ผลจากรูปที่ 4.3 พบว่าค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 6, 6.5, และ 7 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 9, 12, และ 14% ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่ 28 วัน ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกเวลาที่เร็วที่สุด ณ จุดที่มีอัตราการพัฒนากำลังไม่สูงเกินไป ดังนั้นเวลาทดสอบที่ระยะแรกที่เร็วที่สุด จึงเลือกใช้ที่ค่าเท่ากับ 6.5 ชั่วโมง

หลังจากที่ทราบค่าตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ได้นำมาใช้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสัดส่วนแทนที่ปูนซีเมนต์ที่แตกต่างกันออกไป เพื่อหาค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 28 และ 91 วัน รวมถึงค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้จากบ่มปกติที่ 28 และ 91 วัน เพื่อที่จะเปรียบเทียบค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 และ 91 วันของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 และ 91 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ ผลการ

ทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 4.4 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงให้เห็นชัดว่าค่ากำลังอัดที่ 28 และ 91 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่ 30% ที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 และ 91 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติมากกว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่ 0% 10% และ 20% ทั้งนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากการใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสัดส่วนการแทนที่ 30% ในการพัฒนากระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ จึงทำให้ค่ากำลังอัดที่ได้ในการเร่งการแข็งตัวใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดที่ได้จากการบ่มปกติ



รูปที่ 4.3 ผลของระดับกำลังที่ P40(30)+P30(15) ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกต่างๆ (C:S:A=1:4.34:4.85 ; W/B = 0.79; F/(C+F) = 0.30; delay time = 30 นาที)

4.1.1.2 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ 6.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ

หลังจากที่ทราบค่าตัวแปรของกระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว กระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้จะถูกนำมาใช้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีส่วนผสมใดๆ เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 6.5 ชั่วโมง และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 6.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 6.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน โดยแสดงให้เห็นถึงผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่สัดส่วน 0% 10% 20% และ

30% ที่มีต่อความสัมพันธ์ที่ได้อย่างชัดเจน ซึ่งที่จริงแล้วสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้โดยแบ่งตามเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย แต่ในทางปฏิบัติแล้วความสัมพันธ์ดังกล่าวมีประโยชน์ในการใช้ทำนายค่ากำลังอัดน้อยมาก เนื่องจากไม่ทราบเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยได้ ดังนั้นจึงเลือกสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 6.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S_{28d-NCC} = -0.0159*(S_{6.5h-MCC})^2 + 5.6064*(S_{6.5h-MCC}) + 31.526 \quad (4.1)$$

เมื่อ $S_{6.5h-MCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 6.5 ชั่วโมงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (MPa)

$S_{28d-NCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ได้จากการบ่มปกติ (MPa)

4.1.1.3 ผลการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาว

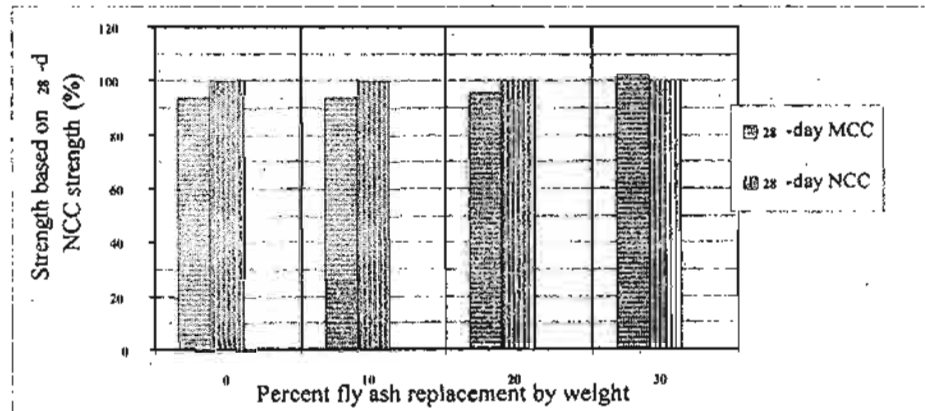
จากสมการ 4.1 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 6.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยไม่จำเป็นต้องทราบเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ผลการทำนายค่าแสดงไว้ในรูปที่ 4.6 พบว่าให้เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดไม่เกินประมาณ $\pm 15\%$ โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 12-58 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม. และจากรูปที่ 4.6 พบว่า ค่ากำลังอัดที่ทำนายได้ในช่วงเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่ 0-10% จะมีค่ามากกว่าค่ากำลังอัดจริง ส่วนที่ 20-30% ค่ากำลังอัดที่ทำนายได้จะมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังอัดจริง

4.1.2 คอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม

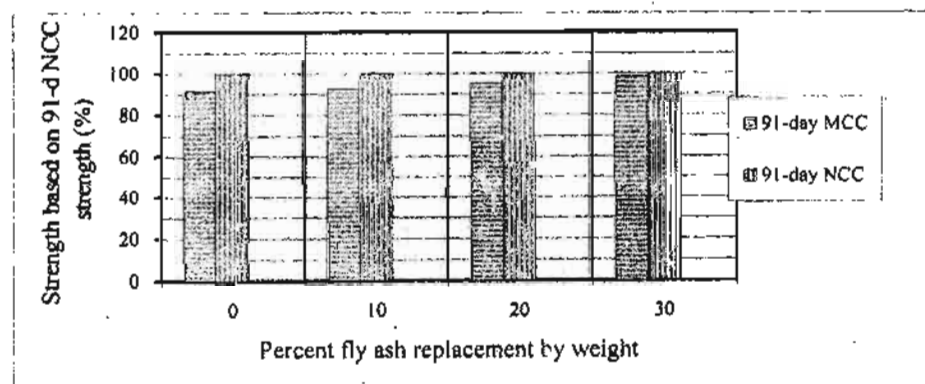
4.1.2.1 ผลการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่าตัวแปรของกระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถนำมาใช้สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสารเคมีผสมเพิ่มคือการทดสอบค่าการต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่ 3.45 MPa ก่อนที่จะนำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ และให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับกำลัง P40 และ P30 เป็นเวลา 30

และ 15 นาทีตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ตัวแปรที่ต้องทดลองหาคือเวลาทดสอบที่
ระยะแรก

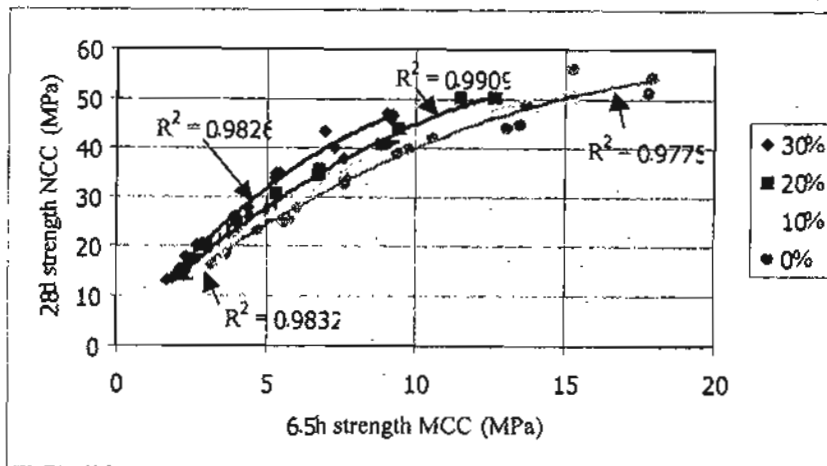


(ก) ที่อายุ 28 วัน

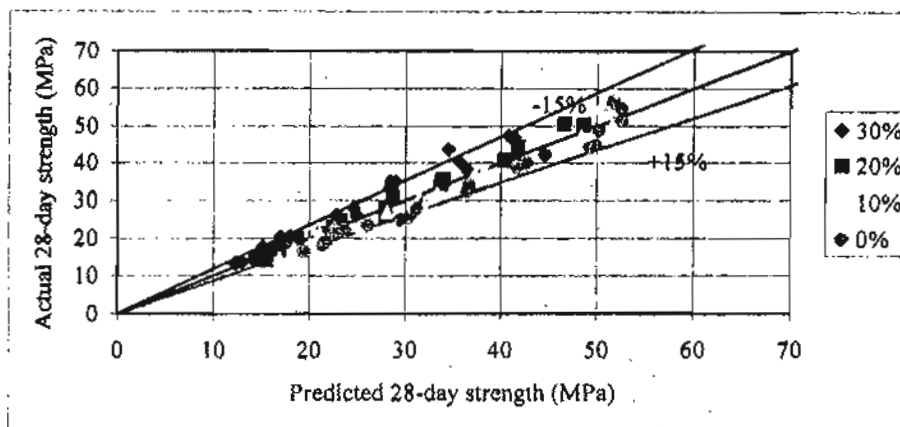


(ข) ที่อายุ 91 วัน

รูปที่ 4.4 ผลของการใช้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่มีต่อค่า
กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ต่างๆ
(C:S:A=1:2.54:3.32 ; W/B = 0.54)



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของ 6.5 ชั่วโมงและค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่าจากค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ 6.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

รูปที่ 4.7 แสดงผลของสารเคมีผสมเพิ่มต่อระยะเวลาหลังจากผสมคอนกรีตและทดสอบมอร์ตาร์แล้วได้ค่าการด้านทานการจมของเข็มเท่ากับ 3.45 MPa เทียบกับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย ซึ่งพบว่าการใช้สารหน่วงทำให้ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้ได้ค่าการด้านทานการจมของเข็มเท่ากับ 3.45 MPa นานขึ้น เช่นเดียวกันกับผลของการใช้เปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณที่สูงขึ้น