



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัย
ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

โดย นาวาอากาศตรี ดร. ธนากร พิระพันธุ์ และคณะ

มิถุนายน 2544



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัย
ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

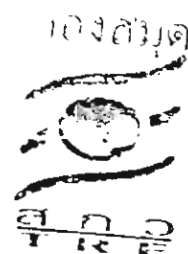
โดย นาวาอากาศตรี ดร. ธนากร พิระพันธุ์ และคณะ

วันที่	1-3 ส.ย. 2546
เลขทะเบียน	00014
เลขเรียกเก็บเงิน	42

๐๐๑๖

มิถุนายน 2544

สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
ชั้น 14 อาคาร เอส เอ็ม ทาวเวอร์
เลขที่ 979 17-21 ถนนพหลโยธิน แขวงสามยุคไทย
เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10300
โทร. 298-0455 โทรสาร 298-0476
Home page : <http://www.trf.or.th>
E-mail : trfinfo@trf.or.th



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัย
ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

คณะผู้วิจัย

สังกัด

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

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: PDF/36/2542

ชื่อโครงการ: การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการ
แข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ชื่อนักวิจัย: น.ต.ดร.ธนากร พิระพันธุ์ โรงเรียนนายเรืออากาศ

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

ระยะเวลาโครงการ: ก.ค. 2542-มิ.ย. 2544

พลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนา กำลังอัดที่รวดเร็วในช่วงระยะเวลาเริ่มแรก งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตกำลังอัดปกติ ที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และประเภทธรรมดา โดยพัฒนาเทคนิคการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะแรกในการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาว แท่งทดสอบที่ใช้เป็นแท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. และแท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. วิธีทดลองเริ่มต้นด้วยการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมก่อน จากนั้นนำกระบวนการเร่งการแข็งตัวที่ได้ไปใช้เร่งการแข็งตัวให้กับคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดที่ระยะแรก และสร้างสมการที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังอัดที่ระยะยาวที่ได้จากการบ่มปกติ ผลการทดลองที่ได้พบว่า เทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาและใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ โดยใช้เวลากายใน 7.5-20.5 ชั่วโมงหลังจากเริ่มผสม และระยะเวลาที่เร็วที่สุดที่สามารถทำนายค่ากำลังอัดที่ 7 วันและ 28 วันของคอนกรีตที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็วและธรรมดาตามลำดับ คือที่ 3.5 และ 5.5 ชั่วโมง ผลการทำนายค่ากำลังอัดด้วยวิธีนี้ให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 15\%$ จากผลการทดสอบจริง

คำหลัก: กระบวนการไมโครเวฟ การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

Abstract

Project Code: PDF/36/2542

Project Title: Estimation of concrete compressive strength based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy

Investigator: Major Dr.Thanakorn Pheeraphan Royal Thai Air Force Academy

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

Project Period: July 1999-June 2001

Microwave energy can accelerate the hydration of cement, resulting in rapid strength development of concrete in an early period. In this study, prediction of later-age compressive strength of normal strength concrete, with and without chemical admixtures, made with rapid hardening and ordinary Portland cement, based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy was investigated. Test specimens consisted of 76.2-mm. by 152.4-mm. cylinders and 15x15x15 cm. cubic specimens. To accelerate curing properly, the optimal microwave curing process for concrete was first determined and then was applied to concrete. For each cement type, a formula for the strength prediction was derived from the relationship between accelerated early-age strength of concrete cured with microwave energy and later-age strength of normally cured concrete. The results showed that the 28-day strength prediction of concrete with chemical admixture could be done within 7.5-20.5 hours after mixing. The possible early ages for the strength prediction were found to be at 3.5 and 5.5 hours for concrete, without admixture, made with rapid hardening and ordinary Portland cement, respectively. Predictions of strength at 7 days for concrete made with rapid hardening Portland cement and 28 days of concrete made with ordinary Portland cement were within 15% agreement with actual test results.

Keywords: Microwave Processing, Strength Prediction, Portland Cement

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนวิจัย หลังปริญญาเอกในการดำเนินงาน โครงการวิจัยนี้

ขอขอบคุณผู้ที่มีรายชื่อดังต่อไปนี้

รศ.ดร.พิชัย นิมิตรยงสกุล คณะวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ได้ให้ คำปรึกษาแนะนำและข้อคิดเห็นในการดำเนินงานวิจัย

Mario Ibay Dumangas Jr., Lilik Cayliani และ เรืออากาศโท ทนงศักดิ์ เอนกทรัพย์ นักศึกษาระดับปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่มีส่วนร่วมในการทำงานวิจัย

ดร.สรศักดิ์ สยามภักดิ์ คณะวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ที่ได้ให้การช่วยเหลือในการเตรียม อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เรืออากาศตรี ประนม พึ่งแพง เรืออากาศตรี วีรวัฒน์ อำนาจเรืองไกร เรืออากาศตรี เมฆินทร์ เพชรวรา เรืออากาศตรี ชรินทร์ จินะเมืองใจ เรืออากาศตรี สหพันธ์ นาคประชา และ เรืออากาศตรี นพดล แก้วบริสุทธิ์ ที่มีส่วนร่วมในการทำงานวิจัย

นักเรียนนายเรืออากาศอำนาจ เกาทอง นักเรียนนายเรืออากาศจรงค์ นารณณิ นักเรียนนายเรืออากาศธีรรัตน์ ธรรมณี ที่มีส่วนร่วมในการทำงานวิจัย

นาวาอากาศตรี อุทัย แสงพิทักษ์ ภาควิชาฟิสิกส์ กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ ในการให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดและบันทึก อุณหภูมิ

นาวาอากาศเอก หญิง เรวดี นาคพิพัฒน์ ภาควิชาเคมี กองวิชาวิทยาศาสตร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศ ในการให้ความอนุเคราะห์สารเคมีและอุปกรณ์ทางเคมี

พันจ่าอากาศตรี ประเสริฐ พลอยสระศรี นายเลื่อน แก้วขวาน้อย และ นายสุทิน บุญศรี ในการให้ความช่วยเหลือในการเตรียมวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็น

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	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 การทดลอง	25
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	25
3.2 วัสดุและการเตรียมวัสดุ	28
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	29
3.4 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม	40
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	44
4.1 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการ แข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทให้กำลังอัด เร็ว และประเภทธรรมดา ที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีต ที่บ่มปกติที่ระยะยาว	44
4.2 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการ แข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่มี สารเคมีผสมเพิ่มกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน	55

	หน้า
4.3 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่มีและไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	66
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	73
5.1 สรุป	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ	78
ภาคผนวก	80
บทความที่ 1 The use of microwave curing technique to estimate the long-term strength of normal concrete	81
บทความที่ 2 การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ	87
บทความที่ 3 Estimation of 28-day strength of concrete in 5.5 hours based on very high accelerated strength after curing with microwave energy	99
บทความที่ 4 Prediction of long-term compressive strength of normal concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างค่าแทนเจนต์การสูญเสียของวัสดุชนิดต่างๆที่วัดค่าที่ความถี่ 3 GHz	18
2.2 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัด	22
2.3 ผลของขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากแท่งทดสอบมาตรฐาน	23
2.4 ผลของขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากแท่งทดสอบมาตรฐาน	24
3.1 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด	33
3.2 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม	35
3.3 ตัวแปรในการหาค่าระดับกำลังของเดาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม	36
3.4 ตัวแปรในการหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม	37
3.5 ตัวแปรในการหาเวลาทดสอบที่ระยะแรกในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว	38
4.1 ผลการหาค่าระดับกำลังของเดาอบไมโครเวฟที่ให้ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าระดับกำลังของเดาอบไมโครเวฟที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย	45
4.2 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I ให้กำลังอัดเร็ว	46
4.3 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา	49
4.4 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีตขนาด 76.2 มม.x 152.4 มม.(3"x6") และ 152.4 มม.x 304.8 มม.(6"x12")	55

ตารางที่	หน้า
4.5 ผลของระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม (C:S:A=1:2.07:2.50 และ W/C = 0.54)	57
4.6 ผลการเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ ที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ	59
4.7 ผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว	63
4.8 เวลาที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ	65
4.9 ตัวแปรในการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	67
4.10 ตัวแปรในการหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	68
4.11 เวลาที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	72

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การตอบสนองจากวัสดุเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ	17
3.1 แบบหล่อโพลีเอธิลีนหนาแน่นสูง รูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) และฐานแบบหล่อโพลีเอธิลีน	25
3.2 แบบหล่อโพลีเอธิลีนรูปทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดภายใน 150 มม.x150 มม.x150 มม. ทำจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน และฐานแบบหล่อโพลีเอธิลีนเปรียบเทียบกับแบบหล่อโลหะ	25
3.3 เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025	26
3.4 เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อเวิร์ลพูล รุ่น VIP 347	26
3.5 เครื่องถอดแบบแท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ออกจากแบบหล่อ	27
3.6 อุปกรณ์ที่ใช้หล่อหัวแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม.	27
3.7 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลอง	30
4.1 กราฟแสดงผลการทดลองหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ซึ่งระบุหน่วยไว้เป็นเปอร์เซ็นต์ให้อยู่ในหน่วยวัตต์เปรียบเทียบกับผลการทำการวิเคราะห์แบบถดถอย	46
4.2 ผลของระดับกำลังต่างๆที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50)	47
4.3 ผลของระดับกำลังที่ P40(30)+P30(15) ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว ที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกต่างๆ (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50)	48
4.4 ผลของระดับกำลังต่างๆที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50)	50
4.5 ผลของระดับกำลังที่ P40(30)+P30(15) ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกต่างๆ (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50)	50

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของ 3.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 7 วัน	51
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของ 5.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน	52
4.8 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 7 วันของคอนกรีตบ่มปกติ กับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของคอนกรีต ที่ได้จากการทำนายค่าจากค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 3.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ	53
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่าจากค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 5.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ	54
4.10 กราฟแสดงผลของระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม (C:S:A=1:2.07:2.50 และ W/C = 0.54)	57
4.11 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ ที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ	60
4.12 กราฟแสดงอุณหภูมิของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว	62
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน	64
4.14 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า	65

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงผลของระดับกำลังของเดอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม (C:S:A=1:2.68:3.68 และ W/C = 0.55) เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	68
4.16 กราฟแสดงอุณหภูมิของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	69
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	70
4.18 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนาค่า เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.	71

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในอุตสาหกรรมก่อสร้าง คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตคือมีความสามารถในการรับกำลังอัดสูง ดังนั้นการทราบกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตในระยะเวลาที่เร็วที่สุด เช่นภายใน 6 ชั่วโมงหลังจากการเท จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้สามารถพิจารณาหาหนทางแก้ไขปัญหาที่เกิดจากคอนกรีตมีคุณภาพต่ำกว่าที่ระบุไว้ได้

การตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตเพื่อดูว่า คอนกรีตที่ผ่านการเทแล้วจะสามารถรับกำลังอัดได้เต็มที่ที่ระยะยาว เช่นที่อายุ 28 วันได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ โดยปกติผู้ดำเนินการก่อสร้างนิยมกระทำโดยการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่มีอายุอย่างน้อย 7 วัน [1] ในขณะที่ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จนิยมใช้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 1 วันที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (Grant และ Warren, Dhir, Dhir และ Gilhespie อ้างถึงใน [1]) ซึ่งจะเห็นได้ว่าใช้เวลาที่มากกว่า 24 ชั่วโมงในการทำค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว ซึ่งสามารถส่งผลเสียต่อการก่อสร้างได้ ถ้าหากพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ และไม่สามารถยอมรับได้ นอกจากนี้ยังมีวิธีการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาวอื่นๆอีก ซึ่งจะได้อธิบายต่อไปในบทที่ 2 แต่ไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย เนื่องจากยังคงใช้เวลาที่มากกว่า 24 ชั่วโมงเพื่อความแม่นยำในการทำนายค่า อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาสูง และวิธีการที่ใช้ค่อนข้างยุ่งยาก

เนื่องจากเทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่รวดเร็ว เกี่ยวข้องกับการหน่วงนำของอ็อน และการจัดเรียงตัวของสารประกอบที่มีสองขั้วเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ การให้ความร้อนนี้เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตและให้ความร้อนที่ค่อนข้างทั่วถึง สามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตได้ ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดที่รวดเร็วในช่วงระยะเวลาอันสั้น เช่นสามารถวัดค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ให้กำลังอัดเร็วที่อายุ 4.5 ชั่วโมงได้เท่ากับ 36.1 MPa โดยที่ไม่ทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยวิธีการเดียวกันนี้ที่อายุ 7 วันลดลงแต่อย่างใด [2] จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะใช้ประโยชน์จากค่ากำลังต้าน

ทานแรงอัดที่สูงในระยะแรกนี้ ในการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่บ่มปกติและหล่อด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็วและธรรมดา

โครงการนี้ศึกษาการประมาณค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตใดๆ ในระยะเวลานั้น โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อให้สามารถประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวตามปกติได้อย่างใกล้เคียงภายในระยะเวลานั้น โดยใช้อุปกรณ์ราคาถูกและง่ายในการดำเนินการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการประมาณค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตใดๆ ในระยะเวลานั้น โดยอาศัยสมการที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟและค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้เป็นประเภทให้กำลังอัดเร็วตราสามเพชร และ ประเภทธรรมดาช้าง
- 1.3.2 เตาอบไมโครเวฟที่ใช้เป็นเตาอบไมโครเวฟยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025M และ ยี่ห้อเวิร์ลพูล รุ่น VIP 347
- 1.3.3 ศึกษาเฉพาะคุณสมบัติการรับแรงอัดของคอนกรีต
- 1.3.4 ศึกษาเฉพาะส่วนผสมคอนกรีตที่มีค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน สำหรับแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน อยู่ในช่วงประมาณ 10-55 MPa
- 1.3.5 สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ประกอบด้วย สารลดน้ำพิเศษ สารเร่งการก่อตัว และ สารหน่วงการก่อตัว
- 1.3.6 ขนาดโตสุดของหินปูนที่ใช้ไม่เกิน 50 มม.

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาวได้ในระยะเวลานั้น ทำให้สามารถพิจารณาหาหนทางแก้ไขปัญหาที่เกิดจากคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดต่ำกว่าค่าที่ระบุไว้ โดยไม่ต้องรอผลการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดที่ ระยะยาว เช่นที่ 7 วัน

สำหรับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และที่ 28 วัน
สำหรับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา

- 1.4.2 สามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของการผลิตคอนกรีต ในงานอุตสาหกรรม
คอนกรีตได้
- 1.4.3 สามารถนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตที่หน้าสถานที่ก่อสร้าง ในงานก่อสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างคอนกรีตใดๆได้
- 1.4.4 สามารถนำไปใช้เป็นแนวทาง ในการพัฒนาวิธีการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของ
คอนกรีตที่มีส่วนผสมใดๆได้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ผลการทดลองการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ และวิธีการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาว รวมถึงทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ กระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ปฏิริยาไฮเดรชัน และปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาของงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกัน ประกอบด้วยผลการทดลองการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ และวิธีการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาว

2.1.1 ผลการทดลองการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ

Wu และคณะ [3] ได้ทำการศึกษาผลของการเร่งการแข็งตัวของมอร์ตาร์ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อกำลังต้านทานแรงอัด แรงดึง และความทนต่อการซึมผ่านของน้ำ ระดับกำลังที่ใช้มี 9 ระดับ และให้ค่ากำลังในช่วง 150 – 650 วัตต์ โดยกำหนดเวลาที่ใช้เร่งตั้งแต่ 0 – 120 นาที ขนาดของแท่งทดสอบเป็นแท่งมอร์ตาร์ขนาด 4x4x16 ซม. ที่มีส่วนผสมของน้ำต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อทราย เท่ากับ 0.44 : 1 : 2.5

จากการทดลองหากระบวนการที่เหมาะสม พบว่าค่าระดับกำลังและเวลาที่ใช้ที่เหมาะสม ควรอยู่ในช่วงระดับกำลังที่ 1 และ 2 โดยใช้เวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ และจากการใช้ค่าระดับกำลังดังกล่าวตามเวลาที่กำหนด พบว่าการพัฒนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดมีค่าสูงกว่าค่ากำลังต้านทานแรงดึง และมีการพัฒนาค่ากำลังต้านทานในช่วงระยะเริ่มต้นสูงกว่าในระยะหลัง นั่นคืออัตราการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัด ที่อายุ 3, 7 และ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 39–47%, 5–14% และ 3–7% ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการพัฒนากำลังต้านทานแรงดึงที่อายุดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 12–15%, 9–10% และ 2–5%ตามลำดับ อุณหภูมิของแท่งมอร์ตาร์ในระหว่างกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับกำลังที่ 1 – 30 นาที และระดับกำลังที่ 2 – 15 นาที อยู่ที่ 54–56°C และ 57–58°C ตามลำดับ การทดสอบความทนต่อการซึมผ่านของน้ำของแท่งมอร์ตาร์รูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 ซม. สูง 1 ซม. ภายใต้อุณหภูมิและความดันค่า พบว่าความทนต่อการซึมผ่านน้ำของแท่งมอร์ตาร์ที่ถูกเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ มีค่าต่ำกว่าค่าความทนต่อการซึมผ่านของน้ำของแท่งมอร์ตาร์ปกติมาก ทั้งนี้เนื่องจากมีโครงสร้างระดับจุลภาคที่หนาแน่นกว่า ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าน้ำ

อิสระสามารถถูกกำจัดออกไปในช่วงก่อนการก่อตัวในระหว่างกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เป็นผลให้เกิดการหดตัวแบบพลาสติก (plastic shrinkage) ของแท่งมอร์ตาร์ทำให้สามารถลดรูปทรงลงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าเริ่มกระบวนการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟช้าออกไป จะส่งผลให้การเร่งการแข็งตัวลดลง เช่น ถ้าเริ่มให้ความร้อนที่ 45 และ 120 นาทีหลังจากผสม ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 3 วัน จะมีค่าลดลง 90 และ 83% เมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบที่ถูกให้ความร้อนทันทีทันใดหลังจากผสมเสร็จ

ยังมีการทดลองเปรียบเทียบปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ที่มีสารประกอบหลัก ไตรแคลเซียมซิลิเกต (3 CaO SiO_2 หรือ C_3S) และไดแคลเซียมซิลิเกต (2 CaO SiO_2 หรือ C_2S) ที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว และไม่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้การตรวจสอบสารโดยใช้รังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) พบว่าระดับของ C_3S และ C_2S ที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 3 วันมีค่าต่ำกว่า นั่นคืออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าสูงกว่านั่นเอง ส่วนผลการเปรียบเทียบลักษณะของตัวอย่างที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและไม่ผ่านการเร่งการแข็งตัวโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบ Scanning Electron Microscope พบว่ารูปแบบและโครงสร้างไม่มีความแตกต่างที่ชัดเจน

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

การทดลองประกอบด้วย (1) การทดสอบระดับของปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยการวัดการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) ตามมาตรฐาน ASTM C114 ที่ 1, 3, 9 ชั่วโมง และ 1, 7 และ 42 วัน (2) การวัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบหลังจากให้ความร้อนเสร็จเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (3) การวัดกำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบเหลี่ยมที่มีสัดส่วน 2:1 ที่อายุ 1, 7 และ 28 วัน

จากการทดลองพบว่า พลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันในช่วง 24 ชั่วโมงแรกได้ แต่หลังจากนั้นไม่แตกต่างกันมาก และระดับกำลังที่ใช้ น้ำ 1000 มิลลิลิตร เปรอร์เซนดีไฮเดรชันเกิดมากที่สุด นอกจากนี้จากการวัดอุณหภูมิพบว่าช่วงอินดักชัน (induction period) หรือช่วง

งดอร์แมนท์ (dormant period) ของปฏิกิริยาไฮเดรชันของแท่งทดสอบที่เร่งการแข็งตัวจะเกิดขึ้นลงอย่างเห็นได้ชัด ในกรณีที่ระดับกำลังที่ใช้ น้ำ 1000 มิลลิลิตร พบว่าไม่มีช่วงอินดักชันเกิดขึ้น อีกทั้งระดับอุณหภูมิในช่วงที่เกิดการคายความร้อนจุดที่สอง เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าระดับกำลังที่ดูดซับไว้โดยแท่งทดสอบ นอกจากนี้การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ไม่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 1, 7 และ 28 วัน

Pera และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาถึงผลของการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อคุณสมบัติทางกล และโครงสร้างระดับจุลภาคของวัสดุผสมเสริมแรงด้วยไฟเบอร์ (fiber reinforced cement composite หรือ FRCC) ที่มีดินเหนียวสีขาว (metakaolin) และไฟเบอร์ใยแก้วประเภท E หรือ A.R. อย่างใดอย่างหนึ่งเป็นส่วนประกอบ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดาสีขาวใช้ผสมกับดินเหนียวสีขาวเพื่อเป็นวัสดุประสานทรายซิลิกาและผงฝุ่นหินปูน ในสัดส่วน 60:30:10 เพื่อทำแท่งทดสอบมอร์ดาร์ในรูปแบบหล่อไม้ขนาด 3x5x16 ซม. ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ในช่วง 0.50-0.55 และมีไฟเบอร์ใยแก้วประเภท E และ A.R. ที่มีขนาดยาว 25 มม. ผสมอยู่ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก

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

จากการทดลองพบว่า ระดับกำลังและระยะเวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟของแท่งทดสอบที่มีวัสดุประสาน ประกอบด้วยดินเหนียวสีขาว 20, 30 และ 40% ให้กำลังต้านทานแรงอัดที่ดีที่สุดที่อายุ 24 ชั่วโมง คือ 120 วัตต์-120 นาที, 160 วัตต์-90 นาที และ 200 วัตต์-90 นาทีตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุระหว่าง 1 และ 28 วัน โดยใช้ระดับกำลังและเวลาดังกล่าวเปรียบเทียบกับค่าการบ่มปกติที่ 20°C พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 1 วันของแท่งทดสอบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และที่แข็งตัวตามปกติมีค่าเท่ากับ 90% และ 25-30% ของกำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันตามลำดับ

เมื่อใส่โพลีเมอร์เข้าไปในสัดส่วน 2-15% พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลงอย่างมาก เมื่อใส่ปริมาณโพลีเมอร์มากกว่า 5%

เมื่อทำการวัดอุณหภูมิภายในแท่งทดสอบที่ประกอบด้วยดินเหนียวสีขาว 30% ในระหว่างที่ให้พลังงานไมโครเวฟที่ระดับ 160 วัตต์ เป็นเวลา 90 นาที พบว่าหลังจากให้ความร้อน 60 นาที อุณหภูมิอยู่ในระดับ 80-90°C

Li และ Wu [6] ได้ทำการศึกษานำเอาวิธีลดน้ำออกจากคอนกรีตด้วยสุญญากาศ (vacuum) ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นในประเทศจีน และใช้อย่างกว้างขวางในงานถนน สนามบิน และ

งานวิศวกรรมอื่น ๆ มาใช้กับเทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยที่วิธีการลดน้ำนี้มีลักษณะพิเศษคือ ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะแรกเพิ่มขึ้น 50-60% ในขณะที่เวลาบ่มลดลง 1/3 ความคงทนดีขึ้น ในขณะที่ความทนต่อการกระแทกและขัดสี ความทนต่อการซึมผ่านของน้ำ เพิ่มขึ้น 50 และ 30% ตามลำดับ และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์สุดท้ายหลังจากการรีดน้ำแล้ว จะต้องมีย่าน้อยกว่า 0.45

เตาไมโครเวฟที่ใช้ให้พลังงานมากที่สุดที่ 650 วัตต์ และสามารถตั้งระดับกำลังได้ 9 ระดับ แต่ในที่นี้จะใช้กำลังที่ระดับ 1 ที่เวลาต่าง ๆ กัน แบบหล่อที่ใช้เป็นแบบหล่อโพลีเอธิลีน (Polyethylene) ขนาดภายใน 4x4x16 ซม. ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (เกรด 425) ทรายซิลิกา และหินโดโลไมท์ (Dolomite) ขนาด 8-10 มม. ในอัตราส่วน 1:1.5:3.0 และใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.60 หลังจากผสมและเข้าแบบ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์จะถูกลดลงมาที่ 0.45 โดยเทคนิคการรีดน้ำด้วยสูญญากาศ และนำเข้าไมโครเวฟเพื่อเร่งการแข็งตัวทันที การทดลองนี้ทดสอบค่ากำลังด้านทานแรงอัดและแรงดัดที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน

จากการทดลองพบว่า ทั้งค่ากำลังด้านทานแรงอัดและแรงดัดที่อายุต่าง ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากบ่มด้วยพลังงานไมโครเวฟ และค่ากำลังเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการบ่มมากขึ้น จนกระทั่งถึงจุดสูงสุดและจะลดลงเมื่อเวลามากขึ้นอีก เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการบ่มเท่ากับ 45 นาที ในการเปรียบเทียบกับค่ากำลังด้านทานของคอนกรีตที่บ่มปกติ พบว่าการเพิ่มของค่ากำลังด้านทานในช่วงแรกสูงกว่าการเพิ่มของค่ากำลังด้านทานในช่วงระยะหลัง โดยที่อัตราการเพิ่มของค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่อายุ 1, 3, 7, 28 และ 90 วัน เท่ากับ 60.2, 43.0, 36.5, 17.9 และ 6.1% ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการเพิ่มของค่ากำลังด้านทานแรงดัด เท่ากับ 59.9, 33.2, 34.1, 13.6 และ 3.4%

จากการทดสอบหารูโพรงในแท่งทดสอบคอนกรีตที่อายุ 7 วัน ที่ระยะเวลาในการเร่งการแข็งตัวที่ต่างกัน พบว่าปริมาตรรูโพรงทั้งหมดในช่วง 3.5 mm – 7000 mm มีค่าน้อยที่สุด ที่เวลา 45 นาทีในการให้พลังงานไมโครเวฟ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบค่ากำลังด้านทาน นอกจากนี้ยังพบว่ารูโพรงของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นเวลา 45 นาที มีค่าน้อยกว่ารูโพรงในแท่งทดสอบที่บ่มปกติ และจากผลการวัดสภาพนำทางไฟฟ้า (electrical conductivity) พบว่าสภาพนำทางไฟฟ้าของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ 45 นาที มีค่าน้อยกว่าสภาพนำทางไฟฟ้าของแท่งทดสอบปกติ ทำให้สามารถกล่าวได้ว่า พลังงานไมโครเวฟทำให้แท่งทดสอบมีโครงสร้างในระดับจุลภาคหนาแน่นกว่าแท่งทดสอบปกติ และยังพบว่าอุณหภูมิภายในของแท่งทดสอบคอนกรีตหลังจากบ่มด้วยไมโครเวฟที่ 45 นาที มีค่าเท่ากับ 60°C

Li และ Wu ได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่า กระบวนการทำให้แห้งควรเสร็จสิ้นก่อนที่ปูนซีเมนต์จะก่อตัว ซึ่งจะทำได้คอนกรีตสามารถหดตัวแบบพลาสติกได้ ทำให้คอนกรีตมีเนื้อแน่นขึ้น

เป็นผลให้มีค่ากำลังต้านทานที่ระยะยาวสูงขึ้นด้วย และเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งการแข็งตัวขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของแท่งทดสอบ รวมทั้งระดับกำลังของเตาไมโครเวฟด้วย

Leung และ Pheeraphan [7] ได้ศึกษาถึงการพัฒนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงในช่วงระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ แท่งทดสอบที่ใช้มีรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I กำลังอัดเร็ว เพื่อให้มีการพัฒนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงในช่วงระยะแรก สัดส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทรายที่ใช้ทำมอร์ตาร์เท่ากับ 1:2 ในขณะที่สัดส่วนของปูนซีเมนต์ : ทราย : หินเท่ากับ 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 ก่อนการทดสอบเพื่อทำการหล่อหัวและทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรก เช่นที่ 3 หรือ 4.5 ชั่วโมง เป็นต้น ส่วนอีก 3 แท่งจะทำการถอดแบบพร้อมกับแท่งทดสอบที่บ่มปกติหลังจากผสมเสร็จ 24 ชั่วโมง เพื่อทำการบ่มน้ำต่อไป และจะถูกหล่อหัวและทดสอบเมื่อมีอายุครบ 7 วัน

ตัวแปรที่จะศึกษาสำหรับแท่งทดสอบมอร์ตาร์ประกอบด้วย อัตราการให้ความร้อน ระดับกำลัง ระยะเวลาก่อนการให้พลังงานไมโครเวฟ ส่วนแท่งทดสอบคอนกรีตจะศึกษาผลของระดับกำลังที่มีต่อแท่งทดสอบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่างกัน

ผลการทดสอบแท่งทดสอบมอร์ตาร์พบว่า อัตราการให้ความร้อนมีผลต่อการพัฒนาค่ากำลังต้านทานแรงอัด โดยค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 3 ชั่วโมงจะมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการให้ความร้อนที่สูง ในขณะที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 วัน จะมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อกำหนดเวลาในการให้ความร้อน 45 นาที ผลของระดับกำลังตั้งแต่ 300-600 วัตต์ ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วัน มีดังนี้คือ ถ้าใช้ระดับกำลังที่สูงกว่า 400 วัตต์ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วัน จะลดลงอย่างมาก นั่นคือระดับกำลังที่ 400 วัตต์ จะเป็นระดับกำลังที่ดีที่สุดที่ให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูง เท่ากับ 15.3 MPa ในเวลา 4.5 ชั่วโมง ในขณะที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วัน มีค่าเท่ากับ 30 MPa ซึ่งเท่ากับประมาณ 70% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่ 7 วัน

ส่วนผลการทดลองเพื่อหาระยะเวลาก่อนให้พลังงานไมโครเวฟ พบว่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับแท่งทดสอบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.50 ภายใต้การใช้ระดับกำลังที่ 400 วัตต์ เป็นเวลา 45 นาที มีค่าเท่ากับ 30 นาที และจากการใช้ระดับกำลังที่ 400 วัตต์ เป็นเวลา 45 นาที ระยะเวลา

ก่อนการให้พลังงานไมโครเวฟเท่ากับ 30 นาที พบว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ในช่วง 0.45-0.55 จะให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 4.5 ชั่วโมงใกล้เคียงกัน ในขณะที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วัน เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่สูงขึ้นทำให้เกิดความร้อนน้อยลง ทั้งจากผลของพลังงานที่ให้ และความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน จึงส่งผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันลดลงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับกรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับ 0.60 ซึ่งพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของคอนกรีตบ่มปกติ ในขณะที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง มีค่าน้อยกว่ากรณีที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์มีค่า 0.45-0.55

ผลการทดลองสำหรับแท่งทดสอบคอนกรีต พบว่าเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากแท่งทดสอบมอร์ตาร์ เมื่อพิจารณาผลของระดับกำลัง พบว่าแท่งทดสอบคอนกรีตที่ถูกให้ความร้อนที่ระดับกำลัง 400 และ 450 วัตต์ จะมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วัน ลดลงน้อยกว่ามาก และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าด้วยเช่นกัน นอกจากนี้แล้วเมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วัน พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมงมีค่าสูงถึง 27.2 MPa ในขณะที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วัน มีค่า 34.1 MPa และถ้าหากเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบแท่งทดสอบมอร์ตาร์ จะพบว่าแท่งทดสอบคอนกรีตให้ค่ากำลังที่สูงกว่าแท่งทดสอบมอร์ตาร์ทั้งในระยะแรกและระยะหลัง

ดังนั้น เพื่อตรวจสอบผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อแท่งทดสอบมอร์ตาร์และคอนกรีต แท่งทดสอบจะถูกตัดและเปรียบเทียบด้วยการทาสีดำ และใช้ผงสังกะสีออกไซด์สีขาวทาบนผิว เพื่อตรวจสอบรูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้น จากการเปรียบเทียบแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวกับแท่งทดสอบปกติ พบว่าการให้พลังงานไมโครเวฟจะทำให้เกิดรูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ ในแท่งทดสอบที่เป็นมอร์ตาร์มากเป็นพิเศษ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในระหว่างการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟนั้น ผลของการขยายตัวของมอร์ตาร์เพสต์ และฟองอากาศสามารถทำให้เกิดรูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ ในขณะที่ในแท่งทดสอบคอนกรีตซึ่งมีหินอยู่ จะช่วยยับยั้งการขยายตัวของมอร์ตาร์เพสต์ ซึ่งจะทำให้ปริมาณของรอยร้าวเล็ก ๆ และรูโพรงเกิดน้อยลงและเป็นเหตุให้กำลังต้านทานเพิ่มขึ้น

Leung และ Pheeraphan [8] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด โดยการใช้การควบคุมระดับกำลังของเตาไมโครเวฟโดยอาศัยการป้อนอุณหภูมิย้อนกลับ (feedback temperature control) ซึ่งวิธีนี้ต่างจากงานของ Leung และ Pheeraphan [7] ที่ใช้การระดับกำลังคงที่ ซึ่งเป็นผลให้เกิดการให้ความร้อนที่มากเกินไป ทำให้รูโพรงและรอยร้าวเล็ก ๆ เกิดขึ้นได้ในแท่งทดสอบ ในที่นี้กระบวนการการเร่งการแข็งตัวที่

เหมาะสมหมายถึง กระบวนการที่ทำให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงในช่วงระยะแรกและระยะหลังโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด งานนี้เริ่มโดยศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากแท่งทดสอบมอร์ตาร์ที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.5 และหากระบวนการที่ดีที่สุดก่อนที่จะใช้กับแท่งทดสอบคอนกรีต เพื่อที่จะหาระดับกำลังที่ดีที่สุด จากนั้นจะนำเอาระดับกำลังที่ดีที่สุดมาแบ่งย่อยให้เป็นขั้นๆ ที่ใช้กำลังคงที่ เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเดาอบไมโครเวฟที่มีราคาถูกลงซึ่งสามารถให้กำลังในรูปแบบนี้ได้

ในการทำแท่งทดสอบมอร์ตาร์และคอนกรีต ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และทรายที่ใช้มาจากแหล่งที่ต่างกัน สำหรับมอร์ตาร์ อัตราส่วนของปูนต่อทราย เท่ากับ 1:2 โดยใช้ทรายที่มีค่าโมดูลัสของความละเอียดเท่ากับ 2.28 สำหรับคอนกรีต อัตราส่วนของปูนต่อทรายต่อกรวด เท่ากับ 1:1:1.5 ทรายที่ใช้มีค่าโมดูลัสของความละเอียดเท่ากับ 2.82 กรวดจะถูกนำไปล้าง ก่อนอบให้แห้งและจะร่อนให้เหลือเฉพาะขนาด 2.36-9.4 มม. ก่อนใช้ สำหรับแท่งทดสอบที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ต่ำกว่า 0.35 จะใช้สารลดน้ำพิเศษ

ในการผสมแต่ละครั้ง จะใช้แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 9 แท่ง โดยจำนวน 6 แท่งจะถูกให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ส่วนอีก 3 แท่งจะบ่มปกติ โดยส่วนใหญ่แล้วแท่งทดสอบจะถูกให้พลังงานไมโครเวฟ ในเวลาประมาณ 30 นาทีหลังจากน้ำผสมกับปูนซีเมนต์ ในการควบคุมอุณหภูมิภายในของแท่งทดสอบระหว่างการให้ความร้อน 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

เดาอบไมโครเวฟที่ใช้ให้กำลัง 0-1200 วัตต์ มีทั้งใบพัดกวนคลื่นด้านบนและจานหมุนด้านล่าง เพื่อทำให้เกิดการให้ความร้อนที่ทั่วถึงและเท่ากัน และยังสามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้อุณหภูมิที่วัดได้จากแท่งทดสอบในระหว่างการให้ความร้อน เป็นตัวควบคุมระดับกำลังที่จะให้แก่แท่งทดสอบ เพื่อป้องกันการให้ความร้อนที่มากเกินไปแก่แท่งทดสอบ

จากการทดลองเปลี่ยนระดับกำลัง การกำหนดอุณหภูมิสูงสุด และระยะเวลาในการให้ความร้อนต่อแท่งทดสอบมอร์ตาร์ ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ 0.50 พบว่าการใช้การควบคุมระดับกำลังด้วยการป้อนอุณหภูมิย้อนกลับ ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 80°C ใช้เวลาให้ความร้อน 45 นาที และกำหนดระดับกำลังสูงสุด 1200 วัตต์ เป็นวิธีการทำให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วัน เท่ากับ 12.8 และ 33.2 MPa หรือประมาณ 27.3 และ 70.7% ของค่า

กำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วัน ของแท่งทดสอบควบคุม (46.9 MPa) ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการศึกษาผลของพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบมอร์ตาร์

การศึกษาผลของการควบคุมระดับกำลังด้วยการป้อนอุณหภูมิย้อนกลับ สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.40 พบว่าการใช้การควบคุมระดับกำลังของเตาไมโครเวฟด้วยการป้อนอุณหภูมิย้อนกลับ ซึ่งกำหนดค่าอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 80°C ใช้เวลา 45 นาที และกำหนดระดับกำลังสูงสุด 750 วัตต์ เป็นวิธีที่ดีที่สุดที่ทำให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมง และ 7 วัน มีค่าสูง เท่ากับ 28.2 และ 45.2 MPa หรือเท่ากับ 59.1 และ 94.9% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งทดสอบควบคุม (47.7 MPa)

นอกจากนี้แล้วยังได้นำเอาระดับกำลังที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตซึ่งเป็นระดับกำลังแบบต่อเนื่องมาแบ่งให้เป็นขั้นย่อย ๆ ที่ใช้กำลังคงที่ เพื่อสามารถนำผลที่ได้ไปใช้กับเตาอบไมโครเวฟราคาถูกได้ ซึ่งพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากระดับกำลังแบบต่อเนื่อง

จากผลที่ได้ดังกล่าว จึงนำเอาระดับกำลังแบบแบ่งย่อยที่ดีที่สุดมาใช้กับแท่งทดสอบที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 และ 0.325 และใช้สารลดน้ำพิเศษ ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.35 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมงมีค่า 32.4 MPa (61.4%) และที่ 7 วันมีค่า 55.4 MPa (104.8%) ในขณะที่กำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งควบคุมเท่ากับ 52.8 MPa (100%) และที่อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.325 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 4.5 ชั่วโมงมีค่า 35.4 MPa (61.6%) และที่ 7 วัน มีค่า 57.0 MPa (99.2%) ในขณะที่กำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งควบคุมเท่ากับ 57.4 MPa (100%) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งทดสอบที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสม จะไม่สูญเสียกำลังเมื่อเทียบกับกำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของแท่งทดสอบที่บ่มปกติ

Sohn และ Johnson [9] ได้ศึกษาถึงผลการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของวัสดุที่มีปูนซีเมนต์เป็นส่วนประกอบ โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษา คืออุณหภูมิในการบ่มคงที่ที่ 40, 60 และ 80°C และเวลาที่ใช้ในการบ่มที่ทดสอบจากการทดสอบความต้านทานการจมที่ 1.5 และ 13 MPa

ในการทดลองนี้ใช้เตาอบไมโครเวฟรูปทรงกระบอก ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 750 มม. และยาว 1200 มม. ให้กำลังในช่วง 0-6000 วัตต์ โดยใช้อุณหภูมิเป็นตัวควบคุมกำลังความร้อนที่ให้กับแท่งทดสอบ และมีการวัดอุณหภูมิภายในแท่งทดสอบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มม. และยาว 100 มม. จำนวน 3 จุด เพื่อทดสอบดูความสม่ำเสมอของอุณหภูมิในระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งใช้อัตราการให้ความร้อนที่ $7^{\circ}\text{C} / 1$ นาที ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ทราบเป็นทรายซิลิกาคัดขนาด และมีการใช้ขี้ตะกรันจากเตาถลุงโลหะบดละเอียด 50% โดยน้ำหนักหรือซิลิกาฟูม 10% หรือเถ้าลอยประเภท F 20% แทนที่ปูนซีเมนต์ สัดส่วนของน้ำต่อวัสดุประสานต่อ

ทรายเท่ากับ 0.4:1:2 แท่งทดสอบถูกผสมใช้เวลา 10 นาที และเริ่มเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เวลา 30 นาทีหลังจากน้ำเริ่มผสม แท่งทดสอบที่ใช้ในการทดสอบกำลังถูกตัดหัวและท้ายที่ระยะ 25 มม. จนมีขนาด 50 มม. x 50 มม.

จากผลการทดลอง พบว่าจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 40, 60 และ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง อุณหภูมิภายในที่ 3 จุด มีค่าไม่แตกต่างกันมาก จึงสามารถให้ความร้อนที่ทำให้เกิดอุณหภูมิเท่ากันอย่างทั่วถึงทั้งแท่งทดสอบได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบมอร์ตาร์ปกติ และแท่งทดสอบมอร์ตาร์ที่มีซีตะกรันจากเตาถลุงโลหะบดละเอียด 50% ทดแทนปูนซีเมนต์ พบว่าเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเพื่อรักษาอุณหภูมิที่ 40, 60 และ 80°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เป็นเวลานานเกินไป ถึงแม้ว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิ 40°C จะมีค่าใกล้เคียงกับแท่งทดสอบมอร์ตาร์ที่บ่มปกติ ส่วนแท่งทดสอบที่อุณหภูมิ 60 และ 80°C ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจะลดลงไป 20% และ 50% ของกำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบที่บ่มปกติ

ดังนั้นจึงนำเอาค่าความต้านทานการจมที่ 1.5 และ 13 MPa มาใช้เพื่อกำหนดระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 40, 60 และ 80°C ผลการทดลองเพื่อหาอุณหภูมิและความต้านทานการจมที่ดีที่สุด เพื่อให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน ใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของมอร์ตาร์ที่บ่มปกติ พบว่าที่อุณหภูมิ 40°C ค่าความต้านทานการจมที่ดีที่สุดคือ 1.5 และ 13 MPa และที่อุณหภูมิ 60°C ค่าความต้านทานการจมที่ดีที่สุดคือที่ 1 MPa ส่วนอุณหภูมิที่สูงกว่า 80°C ไม่เหมาะที่จะใช้ในการให้ความร้อน

นอกจากนี้ยังพบว่าระยะเวลาที่ก่อตัวขึ้นปลายของแท่งทดสอบมอร์ตาร์ที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่อุณหภูมิและค่าความต้านทานการจมที่เหมาะสม มีค่าเพียง 2 ¼ - 3 ½ ชั่วโมง ในขณะที่เวลาในการก่อตัวครั้งสุดท้ายของแท่งทดสอบมอร์ตาร์ที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 6 ชั่วโมง นั่นคือ เวลาในการก่อตัวครั้งสุดท้ายสามารถลดลงได้ 35-54%

นอกจากนี้ยังศึกษาถึงผลของการใช้วัสดุปอซโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์ ซึ่งพบว่าจากการใช้ซีตะกรันจากเตาถลุงโลหะบดละเอียด 50% ซิลิกาฟูม 10% หรือเถ้าแกลบ 20% แทนที่ปูนซีเมนต์ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการให้ความร้อนเท่ากับ 40°C ที่ค่าความต้านทานการจมเท่ากับ 1.5 และ 13 MPa และที่ 60°C ที่ค่าความต้านทานการจมเท่ากับ 1 MPa ก็ยังสามารถให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน เทียบเคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของมอร์ตาร์ที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลการทดลองที่เหมือนกับการทดลองที่ไม่มีการใช้วัสดุปอซโซลาน

2.1.2 วิธีการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาว

Kasai [10] ได้รวบรวมวิธีทดสอบที่ระยะแรกที่พัฒนาขึ้นในประเทศญี่ปุ่นในช่วงตั้งแต่ปี ค.ศ.1975 เพื่อประมาณค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน และเพื่อประมาณสัดส่วนผสมของ

คอนกรีตสด วิธีทดสอบมีด้วยกันทั้งสิ้น 33 วิธี โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ คือ วิธีทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันทางอ้อมซึ่งมี 23 วิธี และวิธีทดสอบโดยตรงซึ่งมี 10 วิธี วิธีทดสอบทั้งหมดจะถูกเปรียบเทียบกันในเรื่องของความยากง่ายในการปฏิบัติ ความแม่นยำ เวลาที่ใช้ และค่าใช้จ่ายในการจัดหาเครื่องมือและอุปกรณ์

(1) วิธีทดสอบทางอ้อม เป็นวิธีทดสอบหาปริมาณของปูนซีเมนต์ต่อหนึ่งหน่วย หรือปริมาณของน้ำต่อหนึ่งหน่วย หรืออัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์ ซึ่งท้ายที่สุดจะนำอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่คำนวณได้ไปใช้ในการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน โดยใช้ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และกำลังที่ 28 วัน แบ่งได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

(1.1) วิธีทดสอบหาปริมาณของปูนซีเมนต์ สามารถใช้คำนวณหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ได้ เมื่อสมมติว่าใช้ปริมาณน้ำต่อหนึ่งหน่วยที่ใช้คงที่ในการผลิตคอนกรีต แต่ผลการทำนายด้วยวิธีนี้คลาดเคลื่อนมากเนื่องจากข้อสมมตินี้ วิธีทดสอบนี้ประกอบด้วย

(1.1.1) Hydrochloric acid dissolution method

(1.1.2) Chemical method

(1.1.3) Simple chemical method

(1.1.4) Sodium gluconate dissolution method

(1.1.5) Specific gravity hydrometer method

(1.1.6) Color difference method

(1.1.7) Heating and breaking method

(1.1.8) Mix analysis machine method

(1.2) วิธีทดสอบหาปริมาณของน้ำ สามารถใช้คำนวณหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ได้เช่นเดียวกัน เมื่อสมมติว่าใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์ต่อหนึ่งหน่วยคงที่ในการผลิตคอนกรีต ผลการทำนายด้วยวิธีนี้คลาดเคลื่อนมาก เช่นเดียวกันกับวิธีใน (1.1) เนื่องจากข้อสมมติดังกล่าวนี้ วิธีทดสอบนี้ประกอบด้วย

(1.2.1) Drying method

(1.2.2) Microwave heating method

(1.2.3) Weight difference method

(1.2.4) Volume difference method

(1.2.5) Alcohol-hydrometric method

(1.2.6) Centrifugal dehydrator method

(1.2.7) Salt concentration method

(1.3) วิธีทดสอบหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ เนื่องจากกำลังของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ของคอนกรีตสดเป็นหลัก ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยตรง หรือจากการคำนวณจากการวัดปริมาณของปูนซีเมนต์ และปริมาณของน้ำโดยวิธีใน (1.1) และ (1.2) ตามลำดับ การทำนายด้วยวิธีนี้ให้ผลค่อนข้างดี วิธีทดสอบประกอบด้วย

- (1.3.1) Hydrochloric acid dissolution method
- (1.3.2) Hydrometric and volume difference method
- (1.3.3) Hydrometric and centrifugal method
- (1.3.4) Centrifugal and washing method
- (1.3.5) Mix analysis equipment method
- (1.3.6) Hydrometric and salt concentration method
- (1.3.7) Microwave heating and breaking method
- (1.3.8) Elastic attenuation method

(2) วิธีทดสอบทางตรง เป็นวิธีทดสอบค่ากำลังที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตหรือมอร์ตาร์ และนำค่ากำลังที่ได้ไปเปรียบเทียบกับสูตรที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังที่ 28 วัน และค่ากำลังที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่เหมือนกัน ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความถูกต้องของวิธีทดสอบนี้ คือความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นที่อาจมีผลมาจากประเภทของวัสดุผสมและปูนซีเมนต์ วิธีนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

(2.1) วิธีทดสอบกำลังที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต ประกอบด้วย

- (2.1.1) Heat of hydration method (24 hours)
- (2.1.2) Heat of hydration method (48 hours)
- (2.1.3) Slightly hot water method (35°C)
- (2.1.4) Hot water method (55°C)
- (2.1.5) Hot water method (70°C)
- (2.1.6) Boiling method (1 day)
- (2.1.7) Boiling method (28.5 hours)
- (2.1.8) Electric oven method
- (2.1.9) Hot oil method

(2.2) วิธีทดสอบกำลังที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของมอร์ตาร์ ประกอบด้วย

- (2.2.1) Rapid hardening method

จากการเปรียบเทียบวิธีทดสอบทั้งหมด พบว่า วิธีทดสอบกำลังที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของมอร์ตาร์และคอนกรีต ใช้เวลานานกว่าวิธีทดสอบอื่น ๆ ในกรณีที่ใช้วิธีบ่มที่อุณหภูมิสูง

ในแบบหล่อที่ปิดแน่นจะใช้เวลา 2-3 ชั่วโมง ในกรณีที่บ่มในน้ำร้อนที่ 55°C และ 70°C จะใช้เวลา 24 และ 48 ชั่วโมงตามลำดับ และเมื่อทราบสูตรที่ใช้ทำนายกำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน วิธีทดสอบกำลังที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวให้ความแม่นยำมากกว่าวิธีอื่นๆ และวิธีทดสอบหาอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ให้ความแม่นยำมากกว่าวิธีทดสอบหาปริมาณของปูนซีเมนต์และน้ำ

Tango [11] ได้จำแนกวิธีทดสอบที่ใช้ทำนายกำลังของซีเมนต์เพสต์ มอร์ตาร์ หรือคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จากการทดสอบที่ช่วงระยะแรกออกเป็น 3 วิธีใหญ่ ดังนี้

(1) วิธีเร่งการแข็งตัวโดยอาศัยการเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ โดยการให้ความร้อนแก่แท่งทดสอบภายใต้ความดันปกติหรือความดันสูง หรือใช้สารเร่งการก่อตัว วิธีนี้จำเป็นต้องใช้สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของกำลังของแท่งทดสอบที่ถูกพัฒนาขึ้นมาก่อน

(2) วิธีใช้ความสัมพันธ์กับค่ากำลังที่ระยะแรกภายใต้สภาวะการบ่มปกติ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากแท่งทดสอบที่ระยะแรก เช่นที่ 3 หรือ 7 วัน จะถูกใช้หาความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลาที่ต้องการ เช่นที่ 28 วัน โดยการวิเคราะห์แบบถดถอย สมการที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการทำนาย

(3) วิธีใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากลักษณะพิเศษอื่นๆ วิธีนี้ประกอบด้วยการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะเวลาที่ต้องการกับส่วนประกอบทางเคมี หรือมวลละเอียดยของปูนซีเมนต์ หรือรูปร่างที่ประมาณได้จากปริมาณฟองอากาศของส่วนผสมเหลว และอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ หรือความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือความเร็วที่วัดได้จากโซนิกพัลส์ (sonic pulse) ที่ระยะแรก นอกจากนี้ยังรวมถึง การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวที่อาศัยค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่วัดได้ที่ระยะแรก ค่ามาทัวริตี (maturity) ที่ระยะแรก และสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังและ ค่ามาทัวริตี ที่ถูกหาขึ้นมาก่อนหน้านี้แล้ว รายละเอียดดูได้จาก ASTM C918[12] ซึ่งวิธีนี้ต้องใช้การบ่มแบบปกติทั่วไป และต้องทดสอบที่อายุมากกว่า 24 ชั่วโมง

ทั้ง 3 วิธี ที่ Tango ได้จำแนกนี้ ต้องอาศัยความสัมพันธ์จากการทดลองก่อนหน้านี้ภายใต้สภาวะเดียวกันกับที่สภาวะควบคุม และต้องทำมาจากวัสดุเดียวกัน ดังนั้น Tango จึงได้เสนอวิธีใหม่ ที่จัดอยู่ในวิธีประเภทที่ 2 แต่มีความต่างตรงที่ว่าวิธีนี้จะไม่ใช่ความสัมพันธ์กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรก แต่จะคำนวณค่ากำลังที่อายุที่ต้องการหลังจากทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรก 2 ค่า และทราบความสัมพันธ์ของกำลังอัดและเวลา ยกตัวอย่างเช่น สมการที่ใช้ทำนายกำลังอัดที่ระยะยาว เช่นที่ 28 วัน ต้องอาศัยค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 2 และ 7 วัน เป็นต้น สมการดังกล่าวนี้มีข้อดีคือไม่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของวัสดุที่ใช้ รวมถึงยี่ห้อของปูนซีเมนต์ เพียงแต่สิ่งที่ควรทราบคือประเภทของปูนซีเมนต์ แม้จะไม่มีผลทดสอบล่วงหน้าที่เป็นเช่นในวิธีอื่นๆ ผลการทดลองพบว่าการทำนายด้วยวิธีนี้ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

นอกจากนี้แล้ว ASTM C1074[13] ยังได้อธิบายถึงวิธีปฏิบัติมาตรฐานในการทำนาค้ำของคอนกรีต โดยวิธีมาทัวริตี ซึ่งวิธีนี้จำเป็นที่จะต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลัง และค่ามาทัวริตีของส่วนผสมคอนกรีตในห้องทดลองก่อน และจะต้องบันทึกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของคอนกรีตที่ต้องการทำนาค้ำกำลัง วิธีปฏิบัติมาตรฐานนี้สามารถใช้ได้ในการทำนาค้ำกำลังของคอนกรีตที่หล่อในที่เพื่อทำให้สามารถเริ่มงานก่อสร้างที่เร่งด่วนต่อไปได้ เช่น การถอดแบบหรือถอดค้ำยัน การอัดแรงแบบดึงทีหลัง (post-tension) วิธีนี้สามารถใช้ในการทำนาค้ำกำลังด้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบในห้องทดลองที่บ่มภายใต้สภาวะอุณหภูมิไม่มาตรฐานได้ ข้อจำกัดของวิธีนี้มีดังนี้คือ

1. คอนกรีตต้องอยู่ในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้
2. วิธีนี้ไม่ได้พิจารณาถึงผลของอุณหภูมิของคอนกรีตที่ระยะแรก ที่มีต่อกำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาว
3. วิธีนี้จำเป็นต้องอาศัยวิธีอื่นเพิ่มเติมในการระบุกำลังด้านทานแรงอัดที่เป็นไปได้ของคอนกรีต
4. ความแม่นยำของกำลังที่ทำนาค้ำขึ้นอยู่กับ การคำนวณหาค่ามาทัวริตี

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

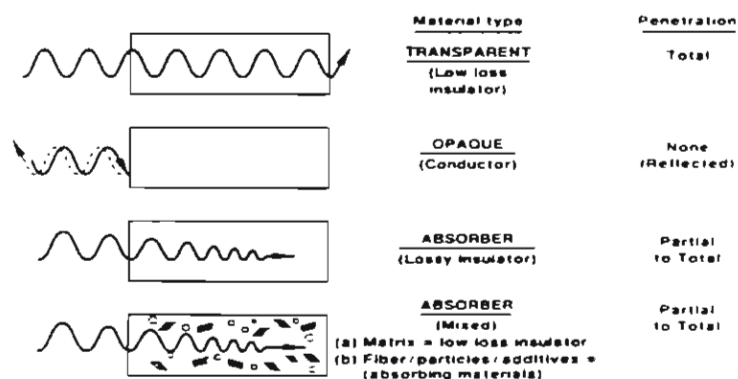
ทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ กระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ ปฏิกิริยาไฮเดรชัน และปัจจัยที่มีผลต่อกำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีต

2.2.1 กระบวนการให้ความร้อนแก่วัสดุด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 1 มิลลิเมตร-1 เมตร และอยู่ในช่วงความถี่ 300 MHz – 300 GHz ในทางอุตสาหกรรม ทางวิทยาศาสตร์และการแพทย์ ความถี่ที่ถูกจัดสรรไว้ให้ใช้โดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal Communications Commission) คือความถี่ที่ 915, 2450, 5800, และ 22125 MHz [14] ซึ่งความถี่ที่ 2450 MHz เป็นความถี่ที่ใ้้ช้มากในตู้อบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือน

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) พวกที่คลื่นไมโครเวฟทะลุผ่านได้เพียงบางส่วน และบางส่วนถูกดูดซับไว้ เช่น น้ำ คอนกรีตเหลว สารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย เป็นต้น (ดูรูปที่

2.1) ดังนั้นผนังของเตาอบไมโครเวฟจึงทำมาจากโลหะเพื่อให้คลื่นไมโครเวฟไม่สามารถเล็ดลอดออกมาได้ ในขณะที่ภาชนะที่ใช้ในการทำอาหารในเตาอบไมโครเวฟ มักจะทำมาจากแก้วซึ่งมีคุณสมบัติที่ทำให้ไมโครเวฟทะลุผ่านได้



รูปที่ 2.1 การตอบสนองจากวัสดุเนื่องจากคลื่นไมโครเวฟ [15]

ไมโครเวฟสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อให้ความร้อนแก่วัสดุได้ 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 [14])

วัสดุ	อุณหภูมิ (°C)	แทนเจนต์การสูญเสีย
น้ำ	25	1570×10^{-4}
แก้วโบโลซิลิกเกต	25	10.6×10^{-4}
แก้วเพลิกซ์ (Plexiglass)	27	57×10^{-4}
โพลีเอธิลีน	25	3.1×10^{-4}
โพลีสไตรีน	25	3.3×10^{-4}
เทฟลอน PFA	25	1.5×10^{-4}

โดยทั่วไปวัสดุสามารถดูดซับพลังงานไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นภายในปริมาตรของวัสดุได้โดย การหน่วงนำของไอออน (ionic conduction) และ/หรือ การหมุนของสารประกอบที่มีสองขั้ว (dipole rotation) [14] การหน่วงนำของไอออนเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ ทำให้มีการต่อต้านการเคลื่อนที่ดังกล่าวอันเนื่องมาจากแรงเสียดทานก่อให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุ ปัจจัยที่มีผลต่อขบวนการนี้คือความเข้มข้นของไอออน ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน และอุณหภูมิของสารละลาย เป็นต้น ส่วนการหมุนของสารประกอบที่มีสองขั้วเป็นการจัดเรียงตัวของโมเลกุลในวัสดุที่มีไดโพลโมเมนต์ (dipole moment) ที่เกิดขึ้นถาวรหรือที่เกิดขึ้นจากการหน่วงนำเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากระทำ การต่อต้านการจัดเรียงตัวหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลดังกล่าว จะก่อให้เกิดความร้อนขึ้นภายในวัสดุเช่นเดียวกัน

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

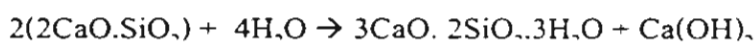
2.2.2 ปฏิริยาไฮเดรชัน [16-18]

ระดับของปฏิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ และผลของโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิริยาไฮเดรชันจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตโดยตรง ปฏิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นเมื่อปูนซีเมนต์ผสมกับน้ำ ปฏิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ สามารถแบ่งได้เป็น 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) การเกิดปฏิริยาไฮเดรชันอย่างรวดเร็วของไตรแคลเซียมอะลูมิเนต ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ หรือ C_3A) ที่ก่อให้เกิดเอ็ดทริงไท์ (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) หลังจากเกิดปฏิริยาแรกเริ่ม อัตราการเกิดความร้อนของปฏิริยาไฮเดรชันเริ่มลดลงจนดูเหมือนว่าคงที่ เนื่องจากความสามารถในการละลายของอะลูมิเนตใน C_3A ลดลง เพราะว่าซิลิเกตที่ได้จากการเติมยิปซัมลงไปจะไปหน่วงปฏิริยา ในช่วงนี้ CSH และ เอ็ดทริงไท์ ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์จะเป็นตัวหน่วงการเกิดปฏิริยาไฮเดรชันซึ่งเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอินดักชัน ถึงกระนั้นก็ตาม การละลายของอิออนจากแคลเซียมซิลิเกตยังคงดำเนินต่อไป และความเข้มข้นของแคลเซียมอิออนจะเพิ่มสูงขึ้น

(3) ในช่วงสุดท้ายของช่วงอินดักชัน ความเข้มข้นของแคลเซียมอิออนในสารละลายเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว เมื่อสิ้นสุดช่วงนี้ก็จะเข้าสู่การเริ่มก่อตัว (initial set) CSH ที่เคลือบอยู่บนเม็ดซีเมนต์จะแตกตัวออกและเกิดปฏิริยาไฮเดรชันต่อไป

(4) ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันนี้จะเข้าไปอุดช่องว่างระหว่างเม็ดซีเมนต์ ก่อให้เกิดการก่อตัวของซีเมนต์เพสต์ และเป็นผลให้ซีเมนต์เพสต์กลายเป็นของแข็ง หรือเข้าสู่การก่อตัวครั้งสุดท้าย (final set) นั้นเอง

(5) หลังจาก 24 ชั่วโมงผ่านไปแล้ว ซัลเฟตออลอนจะถูกใช้หมดไป และเอ็ดทริงไจท์ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นโมโนซัลเฟต (Monosulphate) ถ้ายังคงมี C_3A เหลืออยู่ ส่วนอัลเซียมซิลิเกตก็ยังคงทำปฏิกิริยาไฮเดรชันต่อไป เป็นผลให้คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดได้

2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต [16-17.19]

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีอยู่ 3 ปัจจัยที่สำคัญคือ คุณสมบัติ และสัดส่วนของส่วนผสม วิธีการทำแท่งทดสอบ และการทดสอบ ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.2.3.1. คุณสมบัติและสัดส่วนของส่วนผสม

ในการผลิตคอนกรีตให้สามารถรับกำลังต้านทานแรงอัดได้ตามที่ต้องการ ขั้นตอนที่หนึ่งที่ต้องกระทำคือ การเลือกใช้ส่วนผสมที่เหมาะสมและในสัดส่วนที่ถูกต้อง

ก. อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า อัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์มีผลกระทบโดยตรงต่อการรับแรงอัดของคอนกรีต โดยยิ่งมีค่าต่ำเท่าใด คอนกรีตยิ่งสามารถรับแรงอัดได้มากขึ้นเท่านั้น

ข. ประเภทของซีเมนต์ ปูนซีเมนต์จัดว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก โดยปูนซีเมนต์แต่ละประเภทจะให้กำลังต้านทานแรงอัดที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน และความละเอียดที่ต่างกันอีกด้วย

ค. มวลรวม คุณสมบัติที่สำคัญของมวลรวมที่มีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดคือ ความแข็งแรง ขนาด รูปร่าง ผิว ขนาดช่อง และส่วนประกอบแร่ธาตุ นอกจากนี้ความสะอาดของมวลรวมก็อาจมีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเช่นกัน

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

จ. สารผสมเพิ่ม สารผสมเพิ่มบางอย่างอาจช่วยลดปริมาณน้ำที่ต้องใช้ในการผสม ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันในอัตราที่เหมาะสม ซึ่งก่อให้เกิดการพัฒนาการรับแรงได้ในเวลาอันรวดเร็ว ในขณะที่สารผสมเพิ่มบางตัวเช่นที่มีส่วนผสมของสารปอซโซลานิก (Pozzolanic) มักจะมีผลทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตต่ำในระยะแรกแต่จะสูงขึ้นในระยะยาว

2.2.3.2 วิธีการทำแท่งทดสอบ

ก. การชั่งตวงส่วนผสม การชั่งตวงส่วนผสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการชั่งตวงโดยปริมาตร จะทำให้มีโอกาสผิดพลาดมากกว่าการชั่งตวงโดยน้ำหนัก สัดส่วนผสมที่มีผลโดยตรงและสำคัญที่สุดคือ อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์

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

ค. การเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อและการทำให้แน่น มีผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตโดยตรง ทั้งนี้เนื่องจากว่าในระหว่างการลำเลียงและการเทคอนกรีตเข้าแบบหล่อ ถ้าหากเกิดการแยกตัวจะทำให้ได้คอนกรีตที่มีเนื้อไม่สม่ำเสมอ เป็นผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดลดลง และในการทำให้แน่นหากทำไม่ดี จะทำให้เกิดรูโพรงในเนื้อคอนกรีตหรือทำให้เกิดการแยกตัวได้ ทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้ลดลง

ง. การบ่มคอนกรีต คือวิธีการที่ช่วยให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ประกอบด้วยการควบคุมเวลา อุณหภูมิ และสภาวะความชื้นทันทีหลังจากการเทคอนกรีตในแบบหล่อ ซึ่งจะส่งผลให้การพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเป็นไปอย่างต่อเนื่อง สิ่งที่เกี่ยวข้องกับการบ่มและมีผลต่อการรับกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต คือเวลา ความชื้น และ อุณหภูมิ

เวลาในการบ่มมีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดโดยตรง โดยเวลาที่ใช้ในการบ่มขึ้นยืนนานมากเท่าไร กำลังต้านทานแรงอัดจะยิ่งพัฒนาสูงขึ้น ความชื้นมีผลต่อกำลังต้านทานแรงอัดเป็นอย่างสูงโดยคอนกรีตที่บ่มในอากาศธรรมดาจะพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดได้ช้ากว่าคอนกรีตที่บ่มขึ้นตลอดเวลา และอุณหภูมิมีผลในการเร่งหรือชะลอปฏิกิริยาไฮเดรชันโดยอุณหภูมิยิ่งสูงจะทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เกิดเร็วขึ้น เป็นผลให้การรับแรงอัดพัฒนาขึ้น แต่ถ้าเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันมากเกินไป จะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตในระยะยาวลดลง

2.2.3.3 การทดสอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัด ประกอบด้วยขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ ความชื้นในแท่งทดสอบ และ อัตราการกด ดังมีรายละเอียดดังนี้

ก. ขนาดและลักษณะของแท่งทดสอบ แท่งตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบันมี 2 รูปทรงคือ รูปทรงลูกบาศก์มาตรฐานมีขนาดเท่ากับ 15x15x15 ซม. และรูปทรงกระบอกมาตรฐานมีขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. ซึ่งกำลังต้านทานแรงอัดของรูปทรงทั้งสองนี้

จะมีค่าแตกต่างกัน แม้ว่าจะมีส่วนผสมเดียวกัน โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์มีค่าสูงกว่ารูปทรงกระบอก ทั้งนี้เนื่องจากผลของแรงต้านทานที่เกิดขึ้นที่ส่วนปลายทั้งสองข้างของผิวของแท่งทดสอบกับพื้นเครื่องทดสอบที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดแรงอัดทางด้านข้างที่ส่วนปลายของแท่งทดสอบ แรงอัดทางด้านข้างที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่ามากที่สุดที่ส่วนปลาย และลดลงเมื่อเข้าใกล้จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบ ผลก็คือรูปทรงที่มีความชะรูปมากกว่าจะมีผลของแรงอัดทางด้านข้างน้อยกว่ารูปทรงที่สั้นกว่า ทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของรูปทรงที่สั้นกว่ามีค่าสูงขึ้น ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือการที่เปลี่ยนรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐานที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2.0 ไปเป็น 1.0 จะพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 20% ตารางที่ 2.2 แสดงผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัด ซึ่งโดยทั่วไปแล้วถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าน้อยกว่า 2 จะต้องปรับแก้ด้วยตัวคูณดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัด [19]

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

โดยปกติแล้วแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่ใช้จะมีขนาดมาตรฐานเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 15 ซม. สูง 30 ซม. เมื่อขนาดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกเปลี่ยนไปในขณะที่ค่าอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางยังคงเท่ากับ 2 ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทดสอบได้ก็จะมีค่าไม่เท่ากันเมื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน ขนาดแท่งทดสอบที่ใหญ่ขึ้นจะได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ลดลงเนื่องจากผลของความชะรูปดังเช่นที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ผลที่ได้เหมือนกันสำหรับแท่งทดสอบรูปทรงลูกบาศก์ขนาดต่างๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ข. ความชื้นในแห้งทดสอบ แห้งทดสอบที่ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศจะให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงกว่าแห้งทดสอบที่มีส่วนผสมเดียวกันที่มีความชื้นถึง 20-40%

ค. อัตราการกด ในการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต อัตราการกดที่ต่างกันย่อมส่งผลกระทบต่อค่ากำลังของคอนกรีตที่ได้ อัตราการกดที่สูงจะทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตสูงกว่าจริง ดังนั้นควรใช้อัตราการกดตามที่มาตรฐานกำหนดไว้

ตารางที่ 2.3 ผลของขนาดของแห้งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 2 ที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากแห้งทดสอบมาตรฐาน [19]

ขนาดของแห้งทดสอบ รูปทรงกระบอก (ซม.)	ค่าเปอร์เซ็นต์กำลังต้านทานแรงอัด เทียบกับค่าที่ได้จากแห้งทดสอบ รูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐาน
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 [19]

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

บทที่ 3

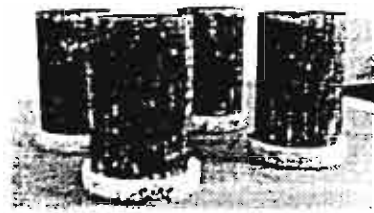
การทดลอง

ในบทนี้เนื้อหาจะเกี่ยวข้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ วัสดุและการเตรียมวัสดุ ขั้นตอนการทดลอง และการเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

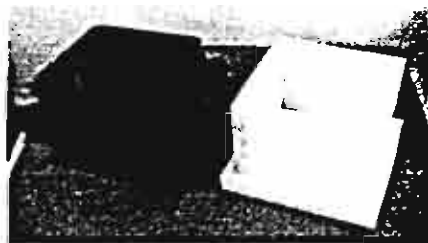
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

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



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

(2) แบบหล่อ เป็นแบบหล่อรูปร่างลูกบาศก์ที่มีขนาดภายใน 150 มม.x150 มม.x150 มม. และฐานแบบหล่อ ทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน ซึ่งไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้ดี จำนวน 5 แบบ (ดูรูปที่ 3.2) และ ทำมาจากโลหะ จำนวน 3 แบบ สำหรับใช้ผลิตคอนกรีตเพื่อเปรียบเทียบ



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

(3) เตาอบไมโครเวฟ จำนวน 1 เครื่อง เป็นเตาอบ ยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025 มีขนาดภายใน กว้าง 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 (ดูรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025

(4) เตาอบไมโครเวฟ จำนวน 4 เครื่อง เป็นเตาอบ ยี่ห้อเวิร์ลพูล รุ่น VIP 347 มีขนาดภายใน กว้าง 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 (IEC) (ดูรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.4 เตาอบไมโครเวฟ ยี่ห้อเวิร์ลพูล รุ่น VIP 347

(5) เครื่องทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัด

(6) เครื่องแยกขนาดมวลรวมหยาบและละเอียด

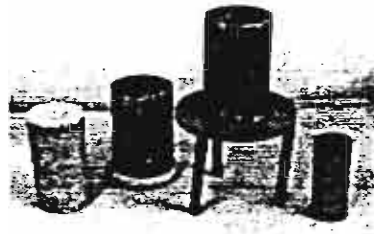
(7) เครื่องอบมวลรวมหยาบและละเอียด

(8) เครื่องผสมคอนกรีต

(9) ภาชนะแก้วโพลีโพรพิลีน รูปทรงกระบอก หนา 3 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 190 มม. และสูง 100 มม.

(10) หม้ออบกัมมะถัน

(11) เครื่องถอดแบบ แท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ออกจากแบบหล่อ (ดูรูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 เครื่องถอดแบบแท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ออกจากแบบหล่อ

(12) อุปกรณ์ที่ใช้หล่อหัว สำหรับแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. (ดูรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้หล่อหัวแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม.

(13) แผ่นพลาสติก เพื่อใช้ในการป้องกันการสูญเสียความชื้นระหว่างการบ่มปกติ

(14) เหล็กกระทุ้ง

(15) โด๊สตัน เพื่อใช้ในการทำคอนกรีตให้แน่น

(16) เครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอล พร้อม เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)

(17) เครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (Data acquisition system)

(18) เครื่องคอมพิวเตอร์

- (19) เครื่องชั่งน้ำหนัก
- (20) เครื่องวัดค่าการต้านทานการจมของเข็ม (Penetrometer)
- (21) นาฬิกาจับเวลา
- (22) อุปกรณ์อื่นๆ เช่น เกรียงเหล็ก ภาชนะตวง และ ภาชนะบรรจุคอนกรีต

3.2 วัสดุและการเตรียมวัสดุ

วัสดุที่ใช้และการเตรียมวัสดุประกอบด้วย

(1) ปูนซีเมนต์ เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสามคือประเภทให้กำลังอัดเร็ว ตราสามเพชร และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งคือประเภทธรรมดา ตราช้าง

(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 โดยก่อนใช้ให้น้ำที่ได้ใส่ในภาชนะและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 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 ขั้นตอน ที่ 4.3

(5.3) สารหน่วงการก่อตัว เป็นผลิตภัณฑ์ Plasticment R2 จาก บริษัท Sika (ประเทศไทย) จำกัด ใช้ในปริมาณที่กำหนด ที่เท่ากับ 0.2-0.5% ของปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้ โดยน้ำหนัก และใช้ผลิตภัณฑ์ Pozzolith 400 R จากบริษัท ไทยมาสเตอร์ บิวเดอร์ จำกัด ใน ขั้นตอน ที่ 4.3

(6) ผงกำมะถัน เพื่อใช้ในการหล่อหัวแท่งทดสอบ

(7) น้ำมันหล่อแบบ

(8) หลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. สูง 7.5 ซม.

(9) พาราฟินเหลว

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองสามารถแบ่งออกเป็นทั้งหมด 3 ขั้นตอนใหญ่ คือ

- (1) การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และประเภทธรรมดา ที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่ระยะยาว
- (2) การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่มีสารเคมีผสมเพิ่มกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน
- (3) การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่มีและไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

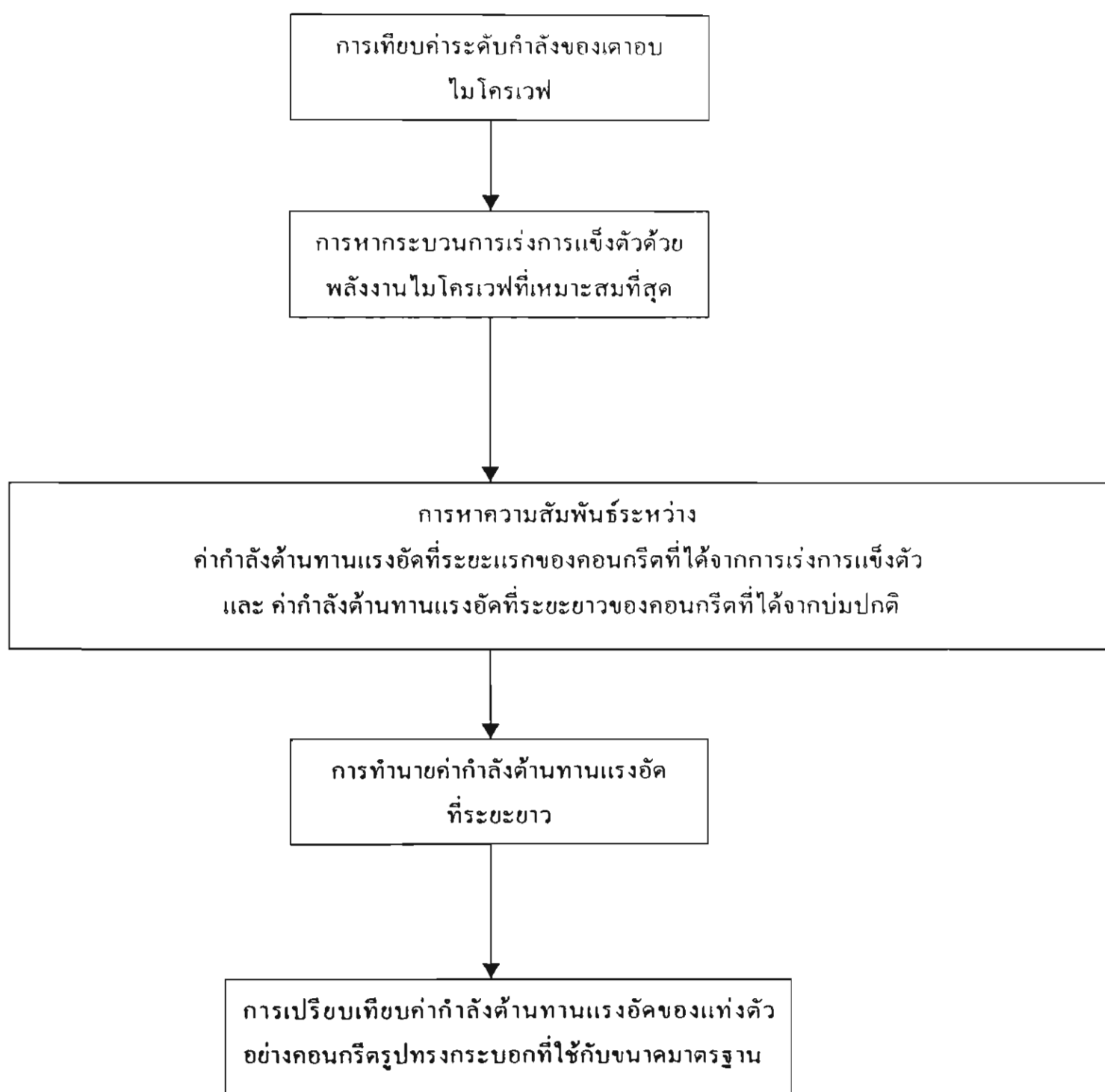
3.3.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และประเภทธรรมดา ที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่ระยะยาว

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในขั้นตอนนี้เป็นเตาอบยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025 ขั้นตอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ขั้นตอนย่อย ซึ่งสามารถแสดงไว้ในรูปที่ 3.7 ได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

3.3.1.1 การเทียบค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ

ขั้นตอนนี้เป็น การหาระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ ซึ่งระบุหน่วยไว้เป็นเปอร์เซ็นต์ตั้งแต่ 10-100 ของระดับกำลังที่ให้สูงสุด ให้อยู่ในหน่วยวัตต์ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถอ้างอิงถึงงานที่ผ่านมาของ Leung และ Pheeraphan [7.8] ที่ระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ระบุหน่วยไว้เป็นวัตต์ แต่ในการทดลองดังกล่าว เตาอบไมโครเวฟที่ใช้มีราคาสูงและผ่านกระบวนการเทียบค่ามาแล้ว ในขณะที่เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ใน

ครัวเรือน มีราคาถูก และยังไม่ผ่านกระบวนการเทียบค่ามาก่อน การเทียบค่าทำได้โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการเทียบค่าของคณะกรรมการนานาชาติทางเทคนิคไฟฟ้า [20] ดังมีรายละเอียดดังนี้คือ



รูปที่ 3.7 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการทดลอง

(1) ใส่ น้ำที่ต้มได้จำนวน 1000 ± 5 กรัมที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ $8-12^{\circ}\text{C}$ ลงไปในภาชนะแก้วโบลิลิกเกิด 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 ให้ นำแท่งแก้วลงไปคนให้ทั่วภาชนะเสียก่อน 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)

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

3.3.1.2 การหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟ เพื่อให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงในช่วงแรก โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน และใช้พลังงานน้อยที่สุด

โดยทั่วไปแล้ว ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ประกอบด้วย

- (1) ส่วนผสมของคอนกรีต
- (2) ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ หมายถึงค่าระดับกำลังที่เหมาะสมซึ่งอาจจะเป็นค่าระดับกำลังที่คงที่ตลอดเวลาที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟ หรือเป็นค่าระดับกำลังที่คงที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการให้พลังงานไมโครเวฟก็ได้
- (3) ระยะเวลาในการให้ความร้อน
- (4) ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ
- (5) เวลาทดสอบที่ระยะแรก หมายถึง เวลาที่เร็วที่สุดที่ตัวอย่างคอนกรีตสามารถถูกนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดได้
- (6) เวลาทดสอบที่ระยะยาว
- (7) จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

สำหรับการทดลองนี้ จะเลือกศึกษาตัวแปรดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 จากตารางจะพบว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนและระยะเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ ถูกกำหนดให้ใช้ค่า 45 และ 30 นาทีตามลำดับ เนื่องจากผลการทดลองของ Leung และ Pheeraphan [7.8] พบว่าเหมาะสมที่สุด

ในการทดลองหาค่าระดับกำลังและเวลาทดสอบที่ระยะแรก จะกำหนดให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์คงที่เท่ากับ 0.50 และใช้อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหินเท่ากับ 1:1:1.5 โดยน้ำหนัก และในขั้นตอนนี้ จะมีการบันทึกอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในตัวอย่างคอนกรีตในช่วงภายหลังจากการให้พลังงานไมโครเวฟ เพื่อช่วยให้สามารถหาตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้นได้โดยง่ายและรวดเร็ว

3.3.1.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากบ่มปกติ

หลังจากได้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ นำกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่

ได้ไปใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนของปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติที่ระยะยาว

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และอัตราส่วน $C:S:A = 1:1:1.5$, $W/C = 0.50$
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	?
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	30 นาที
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	?
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	7 และ 28 วันสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็วและอัตราส่วน ตามลำดับ
7. จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 4 แท่ง

3.3.1.4 การทำนายค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

ความสัมพันธ์ที่ได้จากหัวข้อ 3.3.1.3 จะถูกนำไปใช้ในการทำนายค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่บ่มปกติ เมื่อทราบค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และจะได้คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่อไป

3.3.1.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังด้านทานแรงอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้กับขนาดมาตรฐาน

ขั้นตอนสุดท้าย คือทำการเปรียบเทียบค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ที่ใช้ใน

การทดลองนี้และแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152.4 มม. (6 นิ้ว) สูง 304.8 มม. (12 นิ้ว) ที่เป็นขนาดมาตรฐานของอเมริกา เนื่องจากว่าในทางปฏิบัติจะนิยมใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152.4 มม. สูง 304.8 มม. ในการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัด

3.3.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน

เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในขั้นตอนนี้เป็นเตาอบยี่ห้อโกลด์สตาร์ รุ่น MS-4025 ขนาดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ยังคงเป็นรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ดังนั้น ผลจากขั้นตอน 3.3.1.5 สามารถนำมาใช้ได้กับขั้นตอนนี้ ขั้นตอนย่อยในขั้นตอนนี้คล้ายกับขั้นตอนย่อยใน ข้อ 3.3.1 ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังมีรายละเอียดดังนี้

3.3.2.1 การหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการหาวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟ ซึ่งเหมือนกันกับขั้นตอนที่ 3.3.1.2 ต่างกันตรงที่มีการกำหนด ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดใหม่ เพื่อให้สามารถใช้ได้กับคอนกรีตที่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ตารางที่ 3.2 เปรียบเทียบ ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่มจากขั้นตอนที่ 3.3.1.2 กับ คอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม

ในขั้นตอนนี้ จากตารางที่ 3.2 จะศึกษาหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมจำนวน 3 ค่า คือ (1) ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (2) เวลาทดสอบที่ระยะแรก ในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว และ (3) ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ โดยใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์เป็นตัวกำหนด เมื่อส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการหามีอัตราส่วนต่างๆกันออกไปขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ต้องการหาค่า

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวของพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม

ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวของพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม	ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวของพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม
1. ส่วนผสมของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และธรรมดาที่ C:S:A = 1:1:1.5, W/C = 0.50)	1. ส่วนผสมของคอนกรีต (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่ อัตราส่วนต่างๆ)
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (?)	2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (?)
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน (45 นาที)	3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน (45 นาที)
4. ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์ จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ (30 นาที)	4. ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ (ใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็ม ในมอร์ตาร์เป็นตัวกำหนด (?))
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก (?)	5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก (ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ + ระยะเวลาในการให้ความร้อน + ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว (?))
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว (7 และ 28 วันสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็วและธรรมดา ตามลำดับ)	6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว (28 วันสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา)
7. จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ (แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. 4 แท่ง)	7. จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ (แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. 4 แท่ง)

เริ่มแรก ในการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 30 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. เวลาทดสอบที่ระยะแรกใช้ที่ 5.5 ชั่วโมง และระยะเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ เท่ากับ 30 นาที (ผลจากงานที่ผ่านมาพบว่า เหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่ม) ซึ่งค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ยังคงมีค่าเท่ากับ 0 ในขั้นนี้จะเปลี่ยนค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟต่างๆ และ ทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกคือที่ 5.5 ชั่วโมง (ผลจากงานที่ผ่านมาพบว่า สามารถวัดค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มได้) และที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ (ดูตารางที่ 3.3) ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมคือค่าที่ทำให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงในช่วงแรก โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน และใช้พลังงานน้อยที่สุด

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรในการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม

ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	ส่วนผสมของคอนกรีตที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 30 MPa และมีค่าการยุบตัว 8-10 ซม.
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	?
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ระยะเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	30 นาที
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	5.5 ชั่วโมง
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	28 วัน

หลังจากได้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ ทดสอบหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ โดยใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่า

เท่ากับ 15 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 15-18 ซม. ในขั้นนี้จะเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ต่างๆ และทดสอบค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ (ดูตารางที่ 3.4) ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม คือค่าที่ทำให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน ในขั้นนี้ทดสอบค่ากำลังอัดที่ 14 วัน แทน 28 วัน เนื่องจากเพื่อต้องการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะยาวเท่านั้น และการพัฒนาค่ากำลังอัดจนถึงอายุที่ 14 วัน นับว่านานเพียงพอแล้ว ตามปกติแล้ว ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วันมีค่าประมาณ 80% หรือมากกว่าของค่ากำลังอัดที่ 28 วัน

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรในการหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม

ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	ส่วนผสมของคอนกรีตที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 15 Mpa และมีค่าการยุบตัว 15-18 ซม.
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์	?
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	-
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	14 วัน

หลังจากนั้น ในการหาเวลาทดสอบที่ระยะแรกในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟและค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต โดยทำการวัดอุณหภูมิหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัว ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม ควรเป็นระยะเวลาที่อยู่ที่ อุณหภูมิของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า 40°C เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการพัฒนาค่ากำลังอัดที่ไม่สูงเกินไป ที่จะทำให้ค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากเกินไปในการทำซ้ำ กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตต่างๆ กันที่ (1) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 15 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 15-18 ซม. (2) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารลดน้ำพิเศษ 2% ของปริมาณปูนซีเมนต์ (3) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ

20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารเร่งการก่อตัว 1.25% ของปริมาณปูนซีเมนต์ และ (4) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารหน่วงการก่อตัว 0.4% ของปริมาณปูนซีเมนต์ (ดูตารางที่ 3.5)

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการหาเวลาทดสอบที่ระยะแรกในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	1. 15 MPa ที่ 28 วัน และค่ายุบตัว 15-18 ซม. 2. 20 MPa ที่ 28 วัน และค่ายุบตัว 8-10 ซม. + สารลดน้ำพิเศษ 2% 3. 20 MPa ที่ 28 วัน และค่ายุบตัว 8-10 ซม. + สารเร่งการก่อตัว 1.25% 4. 20 MPa ที่ 28 วัน และค่ายุบตัว 8-10 ซม. + สารหน่วงการก่อตัว 0.4%
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มโนมอร์ดาร์	ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มโนมอร์ดาร์ที่เหมาะสม
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรกในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว	?
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	14 วัน

3.3.2.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว กับ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากบ่มปกติ

หลังจากได้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ นำกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่

ได้ไปใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนของปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน รวมถึงการใช้สารเคมีผสมเพิ่มต่างๆในปริมาณต่างๆที่กำหนดโดยผู้ผลิต จากนั้น สร้างความสัมพันธ์หรือสมการระหว่างค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก กับค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ระยะยาว

3.3.2.3 การทำนายค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

ความสัมพันธ์ที่ได้จากหัวข้อ 3.3.2.2 จะถูกนำไปใช้ในการทำนายค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่บ่มปกติ เมื่อทราบค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และจะได้คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดต่อไป

3.3.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่มีและไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

ในขั้นตอนที่ 3.3.1 และ 3.3.2 ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้น ขนาดของตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้คือ รูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) เนื่องจากดื่อบไมโครเวฟทั่วไปมีขนาดภายในเล็ก จึงทำให้ไม่สามารถบรรจุตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดข้างต้นนี้ได้ นอกจากนี้การใช้ตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดนี้ทำให้สามารถบรรจุตัวอย่างคอนกรีตได้มากกว่า 1 ตัวอย่างในดื่อบไมโครเวฟ เป็นผลให้สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่อายุต่างกันได้ ทำให้สามารถหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ตามที่ได้กล่าวไปแล้วนั้นได้ต่อไป

หลังจากที่ได้ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำเอาวิธีการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดจากตัวอย่างคอนกรีตที่มีขนาดรูปทรงกระบอก 76.2 มม. x 152.4 มม. ไปแล้วนั้น ในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนขนาดของตัวอย่างคอนกรีตให้เหมือนกับขนาดที่ใช้ปกติในการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเหลวและทดสอบหาค่ากำลังอัดคือ รูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดจึงจำเป็นต้องมีการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดและหาความสัมพันธ์ใหม่โดยสามารถยึดถือแนวทางปฏิบัติตามขั้นตอนเดิมที่ 3.3.2.1-3.3.2.4 แต่ในขั้นตอนนี้ต้องใช้เตาอบไมโครเวฟชนิดเดียวกันจำนวน 4 เครื่อง ในที่นี้ใช้เตาอบไมโครเวฟยี่ห้อเวิร์ลพูล รุ่น VIP 347 เพื่อใส่ตัวอย่างคอนกรีต

ขนาด 15x15x15 ซม. ครึ่งละ 1 ตัวอย่างต่อ 1 เคาบ ทำให้สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่อายุต่างกันได้ โดยสมมติว่าเคาบไมโครเวฟแต่ละเครื่องให้ค่าระดับกำลังที่เท่ากัน

3.4 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม

ในขั้นตอนนี้ สามารถเขียนอธิบายขั้นตอนการเตรียมแท่งทดสอบและการบ่มได้ ตามขั้นตอน 3.3 คือ

3.4.1 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม สำหรับขั้นตอนที่ 3.3.1

สำหรับขั้นตอนที่ 3.3.1 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม แบ่งออกเป็นทั้งหมด 7 ขั้นตอนดังนี้คือ

(1) ทาน้ำมันด้านในของแบบหล่อที่มีขนาดรูปทรงกระบอก 76.2 มม.x152.4 มม. เพื่อความสะดวกในการถอดแท่งทดสอบคอนกรีตออกจากแบบหล่อ และประกอบแบบหล่อเข้ากับฐานแบบหล่อ จำนวน 7 แบบ

(2) ผสมปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในเครื่องผสมปูนให้เข้ากัน แล้วเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มผสมกับปูนซีเมนต์ เรียกเวลานี้ว่า เวลารวม โดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที

(3) นำคอนกรีตเหลวที่ได้มาบรรจุใส่แบบหล่อทอทั้ง 7 ที่เตรียมไว้แล้ว โดยเติมคอนกรีตเหลวที่ได้ลงในแบบหล่อซึ่งวางอยู่บนโต๊ะสั่นที่เปิดอยู่ เพื่อช่วยทำให้คอนกรีตแน่นมากขึ้น โดยแบ่งใส่เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาตรของแบบหล่อ กระทั่งคอนกรีตเหลวแต่ละชั้นๆละ 25 ครั้งโดยใช้ปลายมนของเหล็กกระทุ้ง ควรจะกระทุ้งให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตเหลวและให้ทะลุตลอดความลึกของคอนกรีตเหลวแต่ละชั้น หลังจากทำให้แน่นเสร็จก็ทำการปาดผิวหน้าด้วยเกรียงเหล็กให้เรียบจนครบทั้ง 7 แบบหล่อ ใช้เวลาภายในเวลา 15-20 นาที

(4) แบ่งแท่งทดสอบคอนกรีตที่ได้บรรจุไว้แล้วในแบบหล่อ ออกเป็น 2 ชุดดังนี้คือแท่งทดสอบคอนกรีตจำนวน 4 แท่ง จะถูกนำไปเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ส่วนที่เหลืออีก 3 แท่งจะถูกนำไปบ่มปกติที่อุณหภูมิห้อง โดยนำแผ่นพลาสติกมาคลุมแท่งทดสอบไว้ 2 ชั้นแล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

(5) หลังจากเวลาครบ 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาดังแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเคาบไมโครเวฟ นำแท่งทดสอบคอนกรีตจำนวน 4 แท่งไปบ่มในเคาบ

ไมโครเวฟเป็นเวลา 45 นาที โดยกำหนดระดับพลังงานของเตาอบไมโครเวฟและเวลาที่ใช้เร่งการแข็งตัวตามต้องการ

(6) นำแท่งทดสอบคอนกรีตที่ได้จากการบ่มในเตาอบไมโครเวฟออกจากเตา แล้วนำแผ่นพลาสติกมาคลุมแท่งทดสอบไว้ 2 ชั้น แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบที่ระยะแรก โดยจะใช้เวลา 30 นาทีก่อนเวลาทดสอบในการนำแท่งทดสอบทั้ง 4 แท่งออกจากแบบหล่อและหล่อหัวด้วยกัมมะถันก่อนที่จะนำไปทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด ในบางกรณีจะใช้แท่งทดสอบ 2 แท่งในการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรก ส่วนที่เหลืออีก 2 แท่งจะถูกถอดแบบที่อายุ 1 วัน และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

(7) เมื่อครบ 1 วัน นำแท่งทดสอบคอนกรีตที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้องจำนวน 3 แท่งถอดออกจากแบบหล่อ และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

3.4.2 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม สำหรับขั้นตอนที่ 3.3.2

การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม สำหรับขั้นตอนที่ 3.3.2 แบ่งออกเป็นทั้งหมด 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 มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในเครื่องผสมปูนให้เข้ากัน แล้วเริ่มจับเวลาตั้งแต่เริ่มผสมน้ำที่มีสารเคมีผสมเพิ่มอยู่กับปูนซีเมนต์ เรียกเวลานี้ว่า เวลารวม โดยใช้เวลาในการผสม 3-5 นาที

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

(4) วิธีการบรรจุคอนกรีตเหลวหรือมอร์ตาร์ลงในแบบหล่อ ทำได้โดยเดิมคอนกรีตเหลวหรือมอร์ตาร์ที่ได้ลงในแบบหล่อซึ่งวางอยู่บนโต๊ะสั่นที่เปิดอยู่ เพื่อช่วยทำให้คอนกรีตแน่นมากขึ้น โดยแบ่งใส่เป็น 3 ชั้น แต่ละชั้นมีปริมาตรประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาตรของแบบหล่อ

กระทั่งคอนกรีตเหลวแต่ละชั้นๆละ 25 ครั้งโดยใช้ปลายมนของเหล็กกระทั่ง ควรจะกระทั่งให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของคอนกรีตเหลวและให้ทะลุตลอดความลึกของคอนกรีตเหลวแต่ละชั้น หลังจากทำให้แน่นเสร็จก็ทำการปาดผิวหน้าด้วยเกรียงเหล็กให้เรียบจนครบทุกแบบหล่อ ใช้เวลาภายในเวลา 15-20 นาที

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

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

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

(8) นำแท่งทดสอบคอนกรีตที่ได้จากการบ่มในเตาอบไมโครเวฟออกจากเตา แล้วนำแผ่นพลาสติกมาคลุมแท่งทดสอบไว้ 2 ชั้น แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบที่ระยะแรก โดยจะใช้เวลา 30 นาทีก่อนเวลาทดสอบในการนำแท่งทดสอบทั้ง 4 แท่งออกจากแบบหล่อและหล่อหัวด้วยกัมมะถันก่อนที่จะนำไปทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด ในบางกรณีจะใช้แท่งทดสอบ 2 แท่งในการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรก ส่วนที่เหลืออีก 2 แท่งจะถูกถอดแบบที่อายุ 1 วัน และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

(9) เมื่อครบ 1 วัน นำแท่งทดสอบคอนกรีตที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้องจำนวน 4 แท่งถอดออกจากแบบหล่อ และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

(10) ในกรณีที่ต้องมีการวัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบคอนกรีตภายหลังจากให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ สามารถกระทำได้ในการเตรียมแบบหล่อเพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิ ให้ทำการขีดแผ่นโพลีเอธิลีนเพื่อปิดจับหลอดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. สูง 7.5 ซม. ที่บรรจุสารนำความร้อนที่ดี เช่นพาราฟินเหลว ให้เข้ากับแบบหล่อ จากนั้นบรรจุคอนกรีตเหลวเช่น

เดียวกับวิธีการปกติและเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ หลังจากให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแล้ว ใช้เทอร์โมคัปเปิลสอดเข้าไปในหลอดแก้วเพื่อวัดอุณหภูมิตามระยะเวลาที่ต้องการ

3.4.3 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม สำหรับขั้นตอนที่ 3.3.3

สำหรับขั้นตอนที่ 3.3.3 วิธีการเตรียมแท่งทดสอบและการบ่มเหมือนกันกับ วิธีการเตรียมแท่งทดสอบและการบ่มในขั้นตอนที่ 3.3.2 ต่างกันตรงที่ แบบหล่อที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. และทำมาจากวัสดุประเภทโพลีเอธิลีน มีจำนวน 4 แบบหล่อ ส่วนแบบหล่อที่ใช้ในการเปรียบเทียบเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. เช่นกันแต่ทำมาจากโลหะ มีจำนวน 3 แบบหล่อ ส่วนการวัดค่าแรงด้านการจมของเข็มในมอร์ตาร์ ยังคงใช้แบบหล่อโลหะรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. จำนวน 1 แบบ นอกจากนี้ยังใช้เตาอบไมโครเวฟ จำนวน 4 เครื่อง เพื่อใส่ตัวอย่างคอนกรีตขนาด 15x15x15 ซม. ครึ่งละ 1 ตัวอย่างต่อเตาอบ 1 เครื่อง ทำให้สามารถเปรียบเทียบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่อายุต่างกันได้ โดยสมมติว่าเตาอบไมโครเวฟแต่ละตัวให้ค่าระดับกำลังที่เท่ากัน

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทำการทดลองตามขั้นตอนที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3 สามารถที่จะจำแนกผลการทดลองออกเป็นลำดับขั้นตอน ได้ดังนี้

4.1 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทให้กำลังอัดเร็ว และประเภทธรรมดา ที่ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่ระยะยาว

4.1.1 ผลการเทียบค่าระดับกำลังของเดอบไมโครเวฟ

เมื่อนำผลของการเทียบค่าระดับกำลังที่ต้องการ ตั้งแต่ 10-100% ของเดอบไมโครเวฟ มาทำการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression analysis) จะได้ความสัมพันธ์ของระดับกำลังของเดอบไมโครเวฟ ที่ใช้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ กับระดับกำลังที่ให้ในหน่วยวัตต์ ดังนี้

$$P_u = 8.2 * P_p \quad (4.1)$$

โดยที่ P_u = ค่าระดับกำลังของเดอบไมโครเวฟที่ให้ในหน่วยวัตต์

P_p = ค่าระดับกำลังของเดอบไมโครเวฟที่ใช้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

นำความสัมพันธ์ที่ได้จากสมการที่ 4.1 ไปแสดงผลพร้อมกับค่าระดับกำลังของเดอบไมโครเวฟที่วัดได้จริง ดังที่แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 จากผลที่ได้พบว่าค่าระดับกำลังสูงสุดของเดอบไมโครเวฟที่ให้ จากการเทียบค่ามีค่าเท่ากับ 790 วัตต์ และจากการทำการวิเคราะห์แบบถดถอยมีค่าเท่ากับ 820 วัตต์ ซึ่งให้ค่าที่แตกต่างจากค่าที่ระบุไว้ที่ 850 วัตต์ จากผู้ผลิตเดอบไมโครเวฟประมาณ 7 และ 4% ตามลำดับ

จากการทดลองของ Leung และ Pheeraphan [8] พบว่า ในการให้พลังงานไมโครเวฟแก่แท่งทดสอบคอนกรีต ค่าระดับกำลังของเดอบไมโครเวฟที่ใช้ในเวลา 45 นาที สำหรับแท่งทดสอบ

รูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 6 แท่งไม่ควรมีค่าเกิน 412 วัดต์ ในการทดลองนี้จำนวนแท่งทดสอบที่ใช้มีจำนวนน้อยกว่าคือ 4 แท่งเท่านั้น ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ค่าระดับกำลังของไมโครเวฟไม่ควรเกิน 412 วัดต์เช่นกันในเวลาที่ให้ความร้อนคงที่ 45 นาที ในที่นี้คือที่ระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่น้อยกว่า 50% ของระดับกำลังสูงสุดของเตาอบไมโครเวฟ

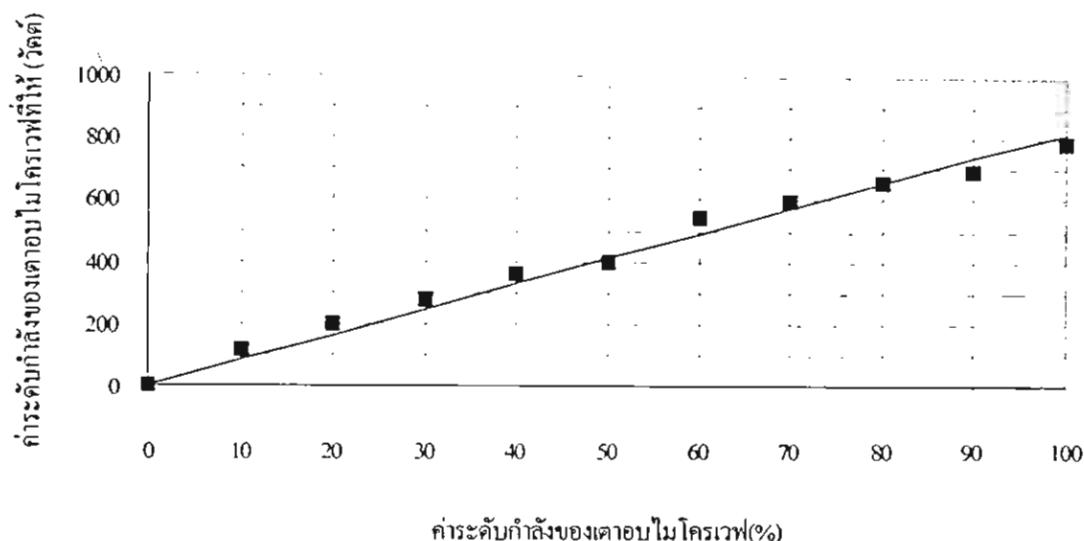
ตารางที่ 4.1 ผลการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ให้ที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย

ค่าระดับกำลังของเตาอบ ไมโครเวฟที่ใช้ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าระดับกำลังของเตาอบ ไมโครเวฟที่วัดได้ (วัดต์)	ค่าระดับกำลังของเตาอบ ไมโครเวฟที่ได้จากการ วิเคราะห์แบบถดถอย(วัดต์)
10	116	82
20	198	164
30	275	246
40	362	328
50	396	410
60	543	492
70	592	574
80	654	656
90	696	738
100	790	820

4.1.2 ผลการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ในการรายงานผล จะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีคือสำหรับคอนกรีตที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม ให้กำลังอัดเร็ว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง แบบธรรมดา

4.1.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม สำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทนี้ ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่เกี่ยวข้อง และ จะทำการศึกษา แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จากตารางจะพบว่า ตัวแปรที่ต้องทำการหาค่าคือ ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ และเวลาทดสอบที่ระยะแรก กำหนดให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) มีค่าคงที่ ที่ 0.50 และ ให้อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์:มวลรวมละเอียด: มวลรวมหยาบ (C:S:A) เป็น 1:1:1.5 โดยน้ำหนัก



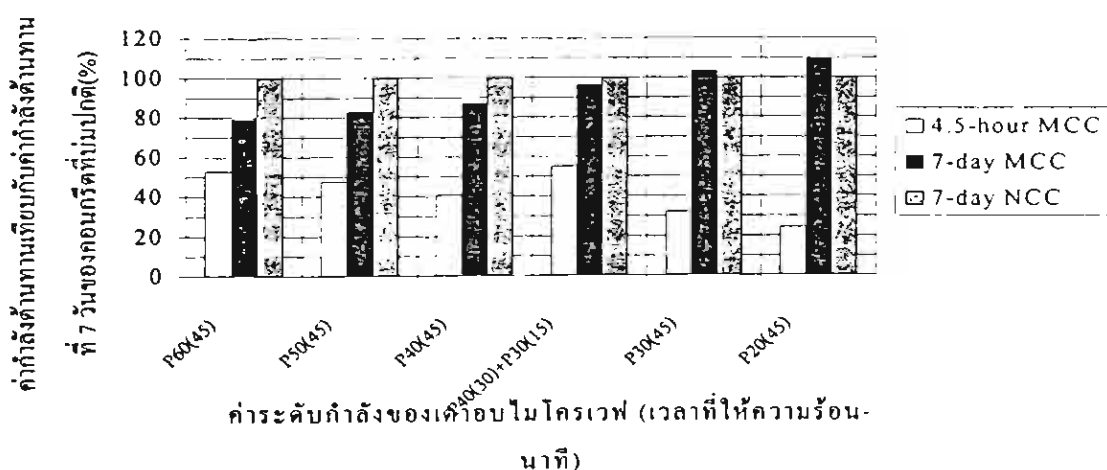
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดลองหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ซึ่งระบุหน่วยไว้เป็นเปอร์เซ็นต์ให้อยู่ในหน่วยวัตต์เปรียบเทียบกับผลการทำการวิเคราะห์แบบถดถอย

ตารางที่ 4.2 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว

ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว C:S:A=1:1:1.5, W/C=0.50
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	?
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	30 นาที
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	?
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	7 วัน
7. จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 4 แท่ง

เมื่อกำหนดเวลาทดสอบที่ระยะแรกเท่ากับ 4.5 ชั่วโมง (เนื่องจาก ผลการทดลองที่ผ่าน มาของ Leung และ Pheeraphan [8] สามารถวัดค่ากำลังอัดได้สูงที่ 4.5 ชั่วโมง) และใช้ค่าระดับกำลัง

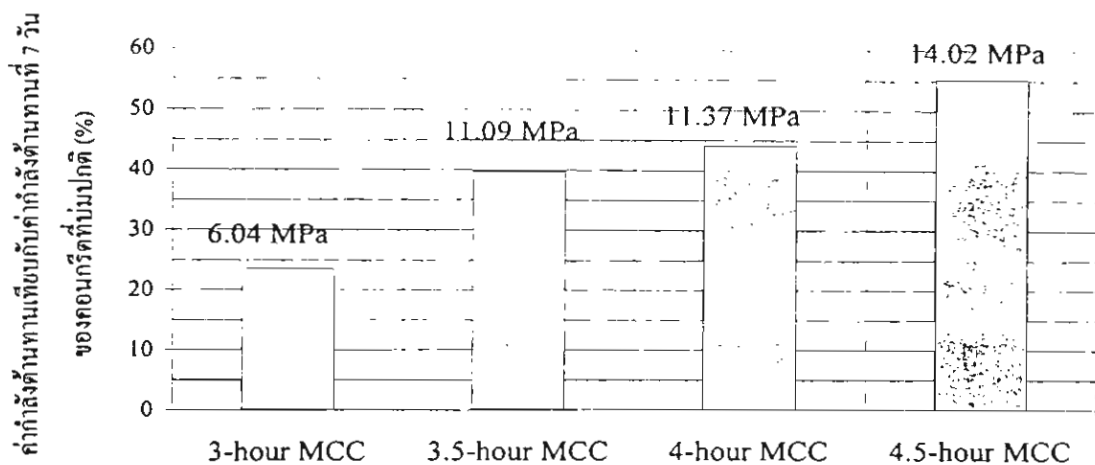
ที่ P20(164วัตต์), P30(246 วัตต์), P40(328 วัตต์), P50(410 วัตต์) และ P60(492 วัตต์) เป็นระยะเวลา 45 นาที เพื่อทดสอบหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ผลการทดลองพบว่าค่าระดับกำลังที่ใช้ที่สูงกว่า P40 มีค่าสูงเกินไป เป็นผลให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อายุ 7 วัน มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 7 วันถึง 12-20% (ดูรูปที่ 4.2) และพบว่าค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ควรอยู่ระหว่าง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 45 นาที ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าระดับกำลังของทั้ง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ (หรือ P40(30)+P30(15)) เนื่องจากว่าจากการทดลองของ Leung และ Pheeraphan [8] พบว่าในการให้พลังงานไมโครเวฟแก่แท่งทดสอบ ควรใช้ระดับกำลังที่สูงก่อนและตามด้วยระดับกำลังต่ำเพื่อให้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาวถูกรบกวนน้อยที่สุด จากรูปที่ 4.2 พบว่าในการใช้ค่าระดับกำลังของทั้ง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 4.5 ชั่วโมงมีค่าสูง ในขณะที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 7 วัน มีค่าเทียบเท่ากับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 7 วันของคอนกรีตบ่มปกติ ดังนั้นการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับกำลัง P40 และ P30 เป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ จึงเป็นระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.2 ผลของระดับกำลังต่างๆที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50) (กำหนดให้ MCC = คอนกรีตที่บ่มด้วย พลังงานไมโครเวฟ และ NCC = คอนกรีตที่บ่มปกติ)

เมื่อทราบระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ค่อยไปจึงหาค่าเวลาทดสอบที่ระยะแรกที่เร็วที่สุด โดยใช้ค่าระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ในการให้ความร้อน ผลจากรูปที่ 4.3 พบว่าค่ากำลัง

อัตราที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของ 3, 3.5, 4 และ 4.5 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 24, 40, 44 และ 55% ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่ 7 วัน ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราการพัฒนาค่ากำลังมีค่าสูงสุดในช่วง 3-3.5 ชั่วโมง และน้อยลงหลังจาก 3.5 ชั่วโมง เนื่องจากค่ากำลังที่ระยะแรกค่อนข้างจะไหวต่อการเปลี่ยนแปลงเวลาเพียงเล็กน้อยในช่วงระหว่าง 2-3 ชั่วโมงแรก ดังนั้นจึงควรเลือกเวลาที่เร็วที่สุด ณ จุดที่มีอัตราการพัฒนาค่ากำลังไม่สูงเกินไป ดังนั้นเวลาทดสอบที่ระยะแรกที่เร็วที่สุดในการศึกษานี้ จึงเลือกใช้ที่ค่าเท่ากับ 3.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 ผลของระดับกำลังที่ P40(30)+P30(15) ที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทให้กำลังอัดเร็ว ที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกต่างๆ (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50)

4.1.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง ตัวแปรของกระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่เกี่ยวข้องและจะทำการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ และเวลาทดสอบที่ระยะแรก เป็นตัวแปรที่ต้องทำการหาค่าเช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.1.2.1 กำหนดให้ใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ 0.50 และอัตราส่วนของปูนซีเมนต์:มวลรวมละเอียด: มวลรวมหยาบเท่ากับ 1:1:1.5 โดยน้ำหนัก

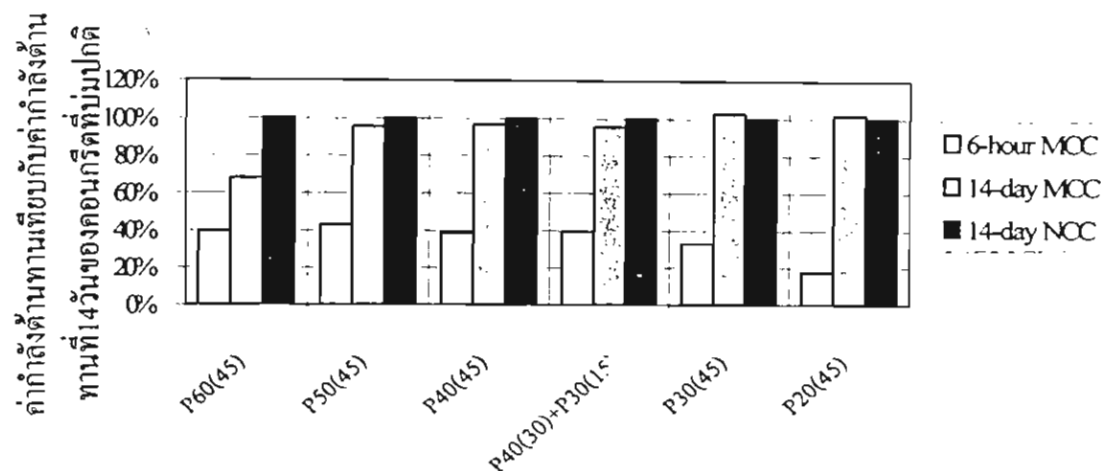
เมื่อกำหนดเวลาในการทดสอบที่ระยะแรกเท่ากับ 6 ชั่วโมง (เนื่องจากสามารถวัดค่ากำลังอัดได้แล้วที่ 6 ชั่วโมง) เพื่อทดสอบหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ค่าระดับกำลังที่ P20, P30, P40, P50 และ P60 เป็นระยะเวลา 45 นาที และ P40(30 นาที)+P30(15 นาที) พบว่าค่าระดับกำลังของทั้ง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับยังคงเป็นระดับกำลังที่ดีที่สุด รูปที่ 4.4 แสดงผลของค่ากำลังของเตาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 6 ชั่วโมงและ 14 วัน

เปรียบเทียบกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 14 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติ เหตุที่ใช้ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 14 วันเป็นตัวเปรียบเทียบ เนื่องจากการทดลองเปรียบเทียบ และโดยปกติค่ากำลังอัดที่ 14 วันมีค่าประมาณ 80% หรือมากกว่าค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องรอให้ถึง 28 วัน

ตารางที่ 4.3 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา

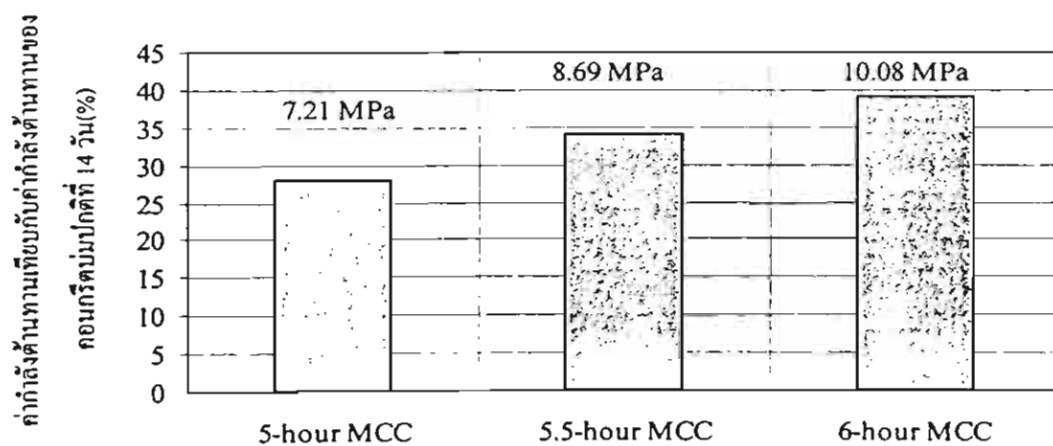
ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา $C:S:A=1:1:1.5$, $W/C=0.50$
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	?
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแห้งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	30 นาที
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	?
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	14 และ 28 วัน
7. จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 4 แท่ง

เมื่อใช้ระดับกำลังที่เหมาะสมที่ P40(30 นาที)~P30(15 นาที) ในการหาค่าเวลาทดสอบที่ระยะแรกที่เร็วที่สุด โดยพิจารณาจากเวลาที่ 5, 5.5 และ 6 ชั่วโมง (ดูรูปที่ 4.5) พบว่าค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 5, 5.5 และ 6 ชั่วโมงมีค่าเท่ากับ 28, 34 และ 39% ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่ 14 วัน ตามลำดับ เป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราการพัฒนาค่ากำลังมีค่าสูงสุดในช่วง 5-5.5 ชั่วโมง และน้อยลงหลังจาก 5.5 ชั่วโมง ดังนั้นเวลาทดสอบที่ระยะแรกที่เร็วที่สุดในการศึกษานี้ จึงเลือกใช้ที่ค่าเท่ากับ 5.5 ชั่วโมง



ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ(เวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน-นาฬิกา)

รูปที่ 4.4 ผลของระดับกำลังต่างๆที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50)



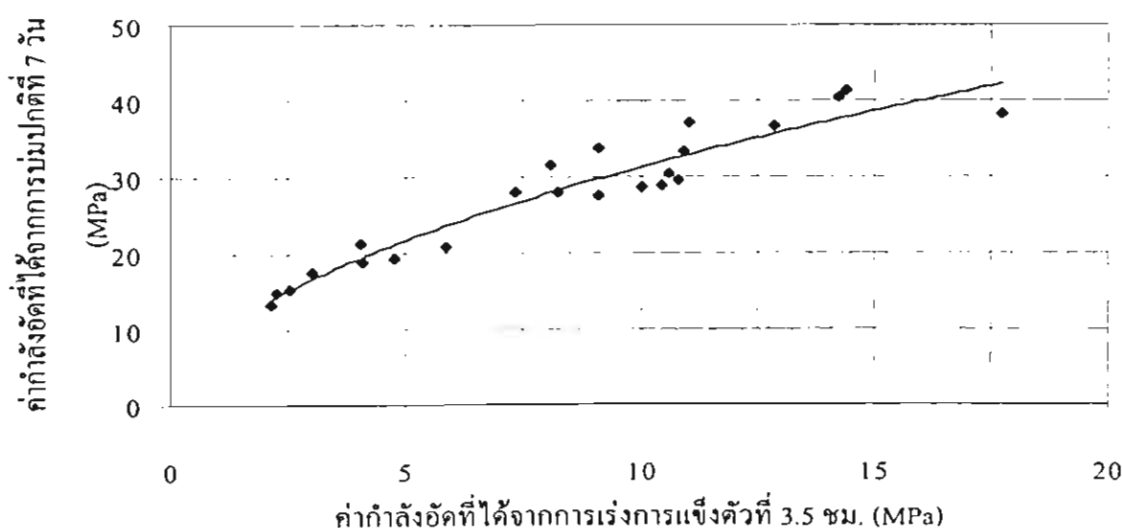
รูปที่ 4.5 ผลของระดับกำลังที่ P40(30)+P30(15) ที่มีต่อค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกต่างๆ (C:S:A=1:1:1.5 และ W/C = 0.50)

4.1.3 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ

เช่นเดียวกัน ในที่นี้จะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีคือสำหรับคอนกรีตที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม ให้กำลังอัดเร็ว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง แบบธรรมดา

4.1.3.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม หลังจากที่เราทราบค่าตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้จะถูกนำมาใช้กับคอนกรีตที่มีส่วนผสมใดๆ เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมง และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการบ่มปกติที่ 7 วัน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 3.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 7 วัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 7 วัน

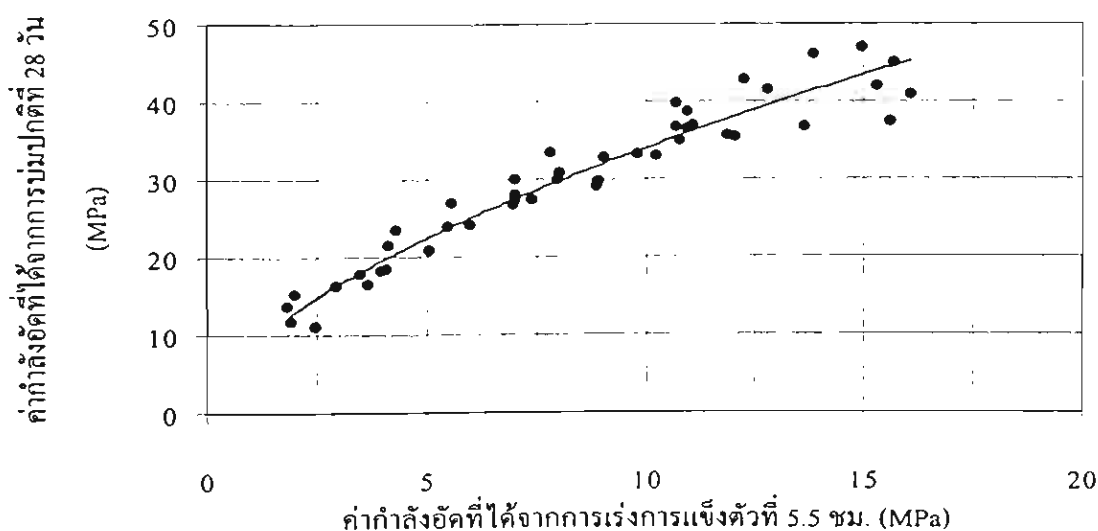
$$S_{7d-NCC} = (9.3912) * (S_{3.5h-MCC})^{0.5220} \quad (4.2)$$

เมื่อ $S_{3.5h-MCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 3.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (MPa)

S_{7d-NCC} = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ (MPa)

จากสมการ 4.2 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 3.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.1.3.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง เช่นเดียวกันหลังจากที่ทราบค่าตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ จะถูกนำมาใช้กับคอนกรีตที่มีส่วนผสมใดๆ เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 5.5 ชั่วโมง และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 5.5 ชั่วโมง และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 5.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 5.5 ชั่วโมงและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน

$$S_{28d-NCC} = (8.5459) * (S_{5.5h-MCC})^{0.6003} \quad (4.3)$$

เมื่อ $S_{5.5h-MCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 5.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (MPa)

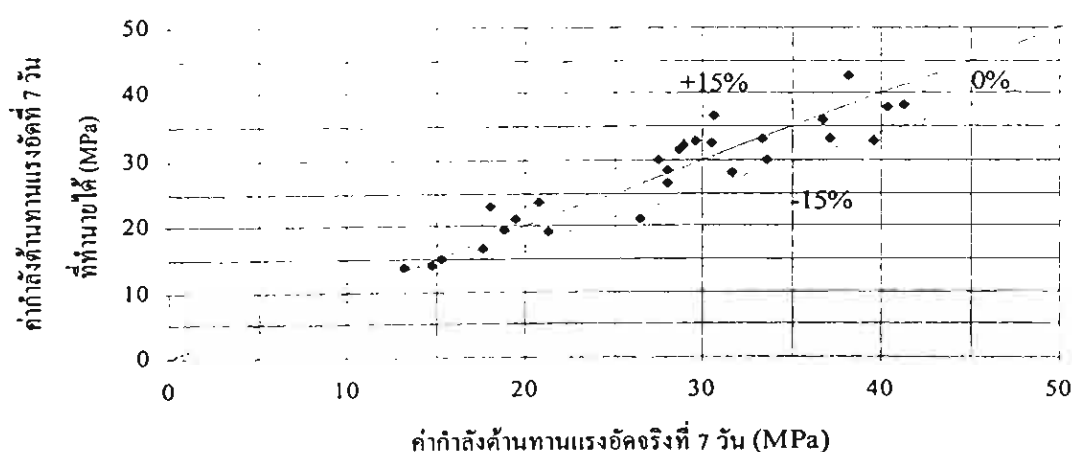
$S_{28d-NCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ (MPa)

จากสมการ 4.3 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 5.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.1.4 ผลการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

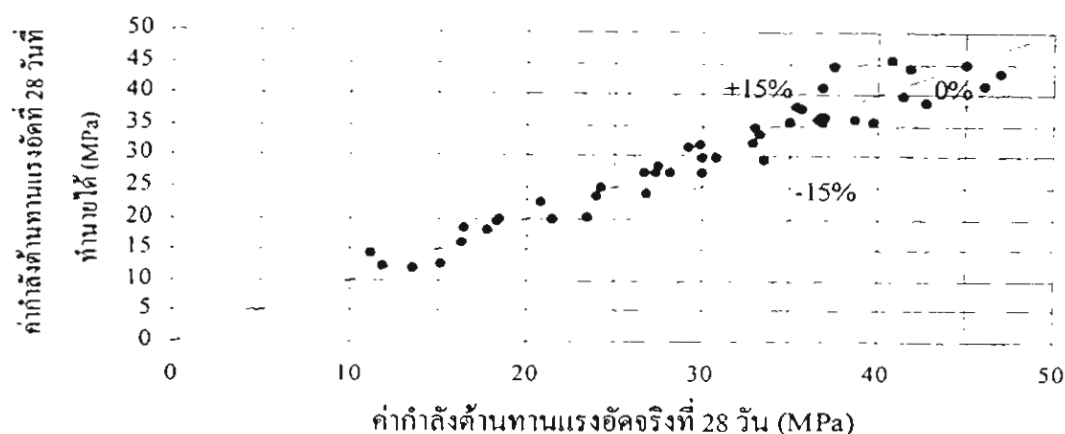
ในที่นี้จะแยกพิจารณาเป็น 2 กรณีคือสำหรับคอนกรีตที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม ให้กำลังอัดเร็ว และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง แบบธรรมดา

4.1.4.1 การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสาม จากสมการที่ 4.2 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 3.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ผลการทำนายค่าแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 พบว่าให้เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดไม่เกินประมาณ $\pm 15\%$ โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 7 วันมีค่าอยู่ในช่วง 13-42 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม.



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 7 วันของคอนกรีตบ่มปกติ กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 7 วันของคอนกรีต ที่ได้จากการทำนายค่าจากค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 3.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.1.4.2 การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง จากสมการที่ 4.3 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 5.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ผลการทำนายค่าดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 พบว่าให้เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดไม่เกิน $\pm 15\%$ โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 11-47 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม.



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่าจากค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 5.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.1.5 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่ใช้กับขนาดมาตรฐาน

จากการเปรียบเทียบ ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ที่ใช้ในการทดลองนี้ และแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 152.4 มม. สูง 304.8 มม. ที่เป็นขนาดมาตรฐาน ดังแสดงผลไว้ในตารางที่ 4.4 พบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2 มม.x152.4 มม. มีค่าสูงกว่าเฉลี่ยประมาณ 7% ซึ่งสอดคล้องกับผลที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ดังนั้น เพื่อเป็นการเทียบค่าที่ได้จากการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัด ให้เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่เป็นขนาดมาตรฐาน จึงต้องมีการคูณด้วยตัวคูณ ที่มีค่าเท่ากับ 0.9374

ในการทดลองสำหรับขั้นตอน 4.1 นี้ หินที่ใช้มีขนาดโตสุดเท่ากับ 20 มม. อันเนื่องมาจากข้อจำกัดของขนาดของแบบหล่อที่ใช้ ในทางปฏิบัติหินที่ใช้ทั่วไปมีขนาดใหญ่กว่านี้ ดังนั้นเพื่อให้การทำนายค่ามีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จึงควรหาตัวคูณเพิ่มเติมในกรณีที่ต้องการหาค่าที่

ขนาดใหญ่กว่า 20 มม.ออกก่อนเริ่มเทคนิคการเร่งการแข็งตัว เพื่อให้สามารถใช้วิธีการทำนาค้ำวิธีนี้ได้

ตารางที่ 4.4 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีต ขนาด 76.2 มม.x 152.4 มม.(3"x6") และ 152.4 มม.x 304.8 มม.(6"x12")

อัตราส่วน ของ น้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์	อัตราส่วน ของ ปูนซีเมนต์ ต่อทราย ต่อหิน	ปริมาณ สารลดน้ำพิเศษ โดยน้ำหนักของ ปูนซีเมนต์ (%)	ขนาด ของ แท่ง ตัวอย่าง	กำลังอัด ที่ อายุ 28 วัน (MPa)	เปอร์เซ็นต์ค่ากำลังอัด ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับ ค่ากำลังอัดของ แท่งตัวอย่างขนาด 152.4 มม.x 304.8 มม. (%)
0.69	1:2.86:3.11	0	3"x6"	19.3	105
			6"x12"	18.4	100
0.42	1:1.43:1.89	0	3"x6"	38.4	109
			6"x12"	35.3	100
0.30	1:1:1.5	1.5	3"x6"	48.4	106
			6"x12"	45.5	100

4.2 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่มีสารเคมีผสมเพิ่มกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน

4.2.1. ผลการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ในที่นี้ กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ยังคงหมายถึงกระบวนการที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟเพื่อให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงในช่วงแรก โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน และใช้พลังงานน้อยที่สุด

ตารางที่ 3.2 ได้กำหนดว่า ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ที่จะต้องทำการหาค่าที่เหมาะสม มีจำนวนทั้งสิ้น 3 ตัวแปรคือ (1) ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (2) ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำ

แท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ โดยใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์เป็นตัวกำหนด และ (3) เวลาทดสอบที่ระยะแรก ในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

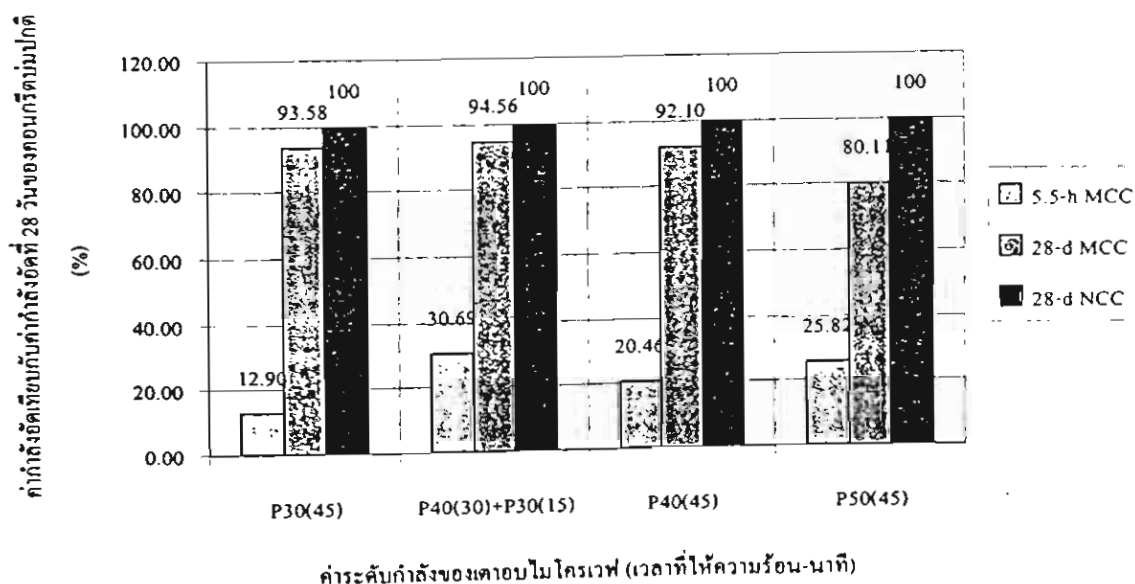
4.2.1.1 ผลการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ

ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม คือค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่น้อยที่สุดที่ทำให้ คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงในช่วงแรก และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน การทดลองนี้อาศัยผลการทดลองที่ได้จาก 4.1 ที่แสดงให้เห็นว่า ระดับกำลังที่เหมาะสมอยู่ที่ P40(30 นาที)+P30(15 นาที) ตารางที่ 3.3 แสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องในการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมไว้ ผลการเปลี่ยนค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ P30(45), P40(45), P40(30)+P30(15) และ P50(45) ที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ระยะแรกคือที่ 5.5 ชั่วโมง และที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 เมื่อใช้คอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และ สัดส่วนของ ปูนซีเมนต์ ต่อ ทราย ต่อ หิน มีค่าเท่ากับ 0.54 และ 1:2.07:2.50 ตามลำดับ ซึ่งเป็นส่วนผสมของคอนกรีตที่ได้จากการออกแบบสำหรับคอนกรีตที่ให้ค่ากำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 30 MPa และค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม.

จากตารางพบว่า ผลของค่ากำลังอัดที่ 5.5 ชม. ถูกแยกออกจากค่ากำลังอัดที่ 28 วัน สำหรับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เนื่องจากทำการทดลองที่ละครั้ง ผลค่ากำลังอัดที่ 5.5 ชม. และ 28 วัน แสดงให้เห็นว่า ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมง สำหรับ การใช้ค่าระดับกำลังที่ P30(45), P40(30)+P30(15), P40(45) และ P50(45) มีค่าเท่ากับ 12.90, 30.69, 20.46 และ 25.82% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตบ่มปกติ ตามลำดับ ในขณะที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 28 วัน สำหรับ การใช้ค่าระดับกำลังที่ P30(45), P40(30)+P30(15), P40(45) และ P50(45) มีค่าเท่ากับ 93.58, 94.56, 92.10 และ 80.11% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติ ดังนั้น การให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับกำลัง P40 และ P30 เป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ จึงเป็นระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทดลองนี้ เนื่องจาก ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงมีค่าสูงถึง 30.69% และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 94.56% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติ (ดูรูปที่ 4.10) ซึ่งเหมือนกันกับผลการทดลองที่ได้ใน 4.1.2

ตารางที่ 4.5 ผลของระดับกำลังของเดาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม (C:S:A=1:2.07:2.50 และ W/C = 0.54)

ค่าระดับ กำลังของเดาอบ ไมโครเวฟ (เวลาที่ ให้ความร้อน- นาที่)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด					
	ที่ 5.5 ชม. ของ คอนกรีตที่ผ่าน การเร่งการแข็งตัว		ที่ 28 วัน ของ คอนกรีตที่ผ่าน การเร่งการแข็งตัว		ที่ 28 วัน ของ คอนกรีตที่ผ่าน การบ่มปกติ	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%
P30(45)	2.83	12.90	-	-	21.98	100
P40(30)+P30(15)	6.42	30.69	-	-	20.93	100
P40(45)	3.86	20.46	-	-	18.84	100
P50(45)	5.14	25.82	-	-	19.89	100
P30/45	-	-	20.93	93.58	22.36	100
P40(30)+P30(15)	-	-	18.22	94.56	19.27	100
P40(45)	-	-	18.14	92.10	19.69	100
P50(45)	-	-	18.17	80.11	22.68	100



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลของระดับกำลังของเดาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม (C:S:A=1:2.07:2.50 และ W/C = 0.54)

4.2.1.2 ผลการหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์

ในขั้นตอนที่ 4.1 ได้กำหนดให้ใช้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่ 30 นาที สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม แต่ในการทดลองนี้เพื่อให้สามารถทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่มได้ เนื่องจากสารเคมีผสมเพิ่มสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต จึงใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาดังแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ โดยใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม ที่ระดับกำลัง P40 และ P30 เป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ และใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 15 MPa และมีการยุบตัวเท่ากับ 15-18 ซม. นั่นคือคอนกรีตที่มี อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และ สัดส่วนของ ปูนซีเมนต์ ต่อ ทราย ต่อ หิน มีค่าเท่ากับ 0.79 และ 1:3.09:3.47 ตามลำดับ ตารางที่ 3.4 แสดงตัวแปรในการหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม

ผลการเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ตั้งแต่ 0, 100, 200, 300, 400, 500, 700, และ 1000 psi ที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และ รูปที่ 4.11 ซึ่งสามารถอธิบายผลแยกได้เป็น 3 ช่วงคือ ก่อนช่วงคอร์แมนท์ ระหว่างช่วงคอร์แมนท์ และหลังจากช่วงคอร์แมนท์

ในช่วงระยะเวลาก่อนช่วงคอร์แมนท์ เมื่อค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 0 หรือ เมื่อระยะเวลาดังแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟมีค่า 30 นาที ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่า 106 และ 110% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาในขั้นตอนที่ 4.1 และสามารถอธิบายได้ว่าการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะเวลานี้ น้ำอิสระส่วนหนึ่งสามารถถูกกำจัดก่อนการก่อตัว ทำให้ช่วยลดรูพรองและทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้น

ในช่วงระยะเวลาระหว่างช่วงคอร์แมนท์ เมื่อค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์อยู่ในช่วง 100-400 psi ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าอยู่ในช่วง 88-97% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ง่าย แต่เชื่อได้ว่าสิ่งที่เกิดขึ้นคือ ในช่วงคอร์แมนท์นี้ ปฏิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากมีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคของผลปูนซีเมนต์อันเนื่องมาจากการทำปฏิริยาระหว่าง คัลเซียมซิลิเกต คัลเซียมอลูมิเนตและน้ำ ที่ผิวของอนุภาคของผลปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟในการเร่งการแข็งตัวแก่คอนกรีตในช่วงเวลานี้จะช่วงเร่งปฏิริยาไฮเดรชัน

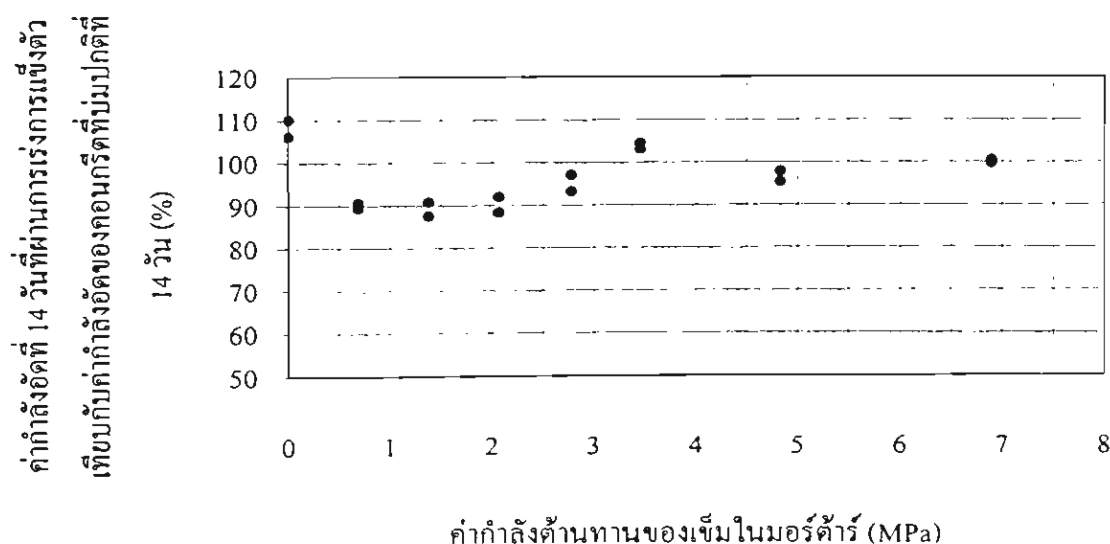
ให้เกิดเร็วขึ้น และทำให้สิ่งกีดขวางที่ผิวของผงปูนซีเมนต์เกิดแข็งตัวขึ้น และขัดขวางไม่ให้อนุภาคของผงปูนซีเมนต์ที่อยู่ภายในทำปฏิกิริยาต่อไปได้ ส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.6 ผลการเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ ที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ

แรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ MPa (psi)	เวลาที่ใช้หลังจากเริ่มผสม (นาทีก)	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด			
		14 days-MCC		14 days-NCC	
		MPa	%	MPa	%
0 (0)	30	13.74	106.07	12.96	100
0 (0)	30	14.32	110.07	13.01	100
0.69 (100)	184	13.04	89.36	14.59	100
0.69 (100)	146	11.32	90.56	12.50	100
1.38 (200)	201	11.61	87.53	13.26	100
1.38 (200)	155	13.98	90.79	15.40	100
2.07 (300)	206	13.73	88.29	15.56	100
2.07 (300)	169	11.75	91.94	12.78	100
2.78 (400)	215	11.89	93.11	12.77	100
2.78 (400)	232	13.72	96.98	14.15	100
3.45 (500)	218	16.01	103.06	15.53	100
3.45 (500)	235	12.42	104.40	11.89	100
4.83 (700)	245	13.64	95.33	14.31	100
4.83 (700)	320	14.15	97.77	14.47	100
6.90 (1000)	290	14.10	100.41	14.05	100
6.90 (1000)	300	13.53	99.58	13.58	100

ในช่วงระยะเวลาหลังจากช่วงคอร์แมนท์ เมื่อค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์อยู่ในช่วง 500-1000 psi ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการ

แข็งตัวมีค่าอยู่ในช่วง 95-104% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ซึ่งสามารถอธิบายว่า สิ่งที่เกิดขึ้นในช่วงระยะเวลานี้คือ สิ่งกีดขวางเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคของผลปูนซีเมนต์ได้ถูกทำให้แตกออก ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้เร็วมากขึ้น และ การให้พลังงานไมโครเวฟในการเร่งการแข็งตัวแก่คอนกรีตในช่วงเวลานี้ จะช่วงเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดเร็วขึ้น ทำให้การพัฒนาการกำลังอัดเร็วขึ้น น้ำที่ถูกกำจัดออกในช่วงนี้เป็นน้ำที่อยู่ภายในช่องว่างของเนื้อคอนกรีตที่เริ่มแข็งตัวขึ้นแล้ว ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวจึงมีค่าเทียบเท่าหรือลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 500 psi ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตมีค่าเทียบเท่ากับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ เนื่องจาก การให้ความร้อนในช่วงนี้จะเหมาะแก่การเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชัน และการกำจัดน้ำไม่ทำให้ค่ากำลังอัดลดลง เหมือนกับกรณีที่ทิ้งไว้นานขึ้น ที่ 700 และ 1000 psi ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตมีค่าเทียบเท่าหรือลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ ที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ

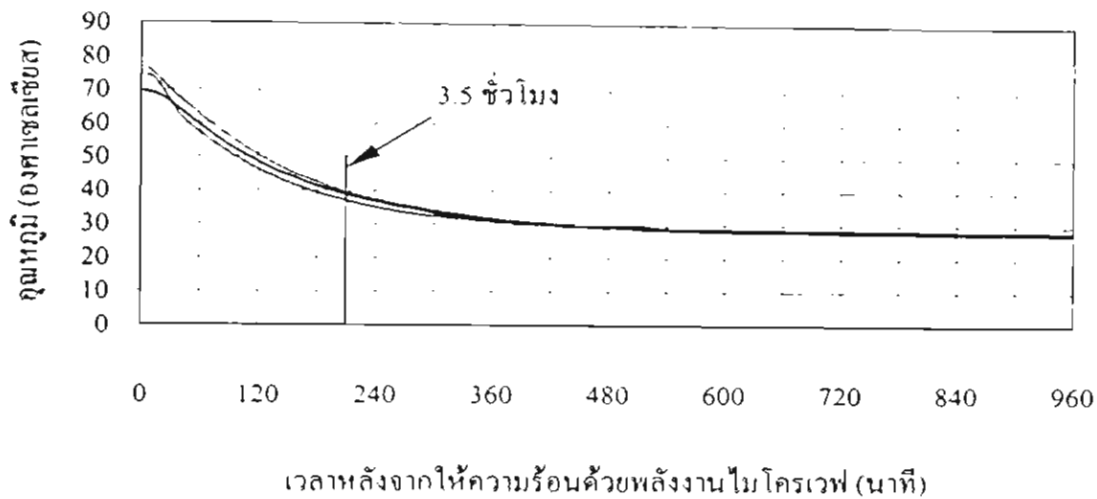
จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาดังแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ คือที่ช่วงก่อนหรือหลังช่วงคอร์แมนท์ นั่นคือควรเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่ช่วงก่อนและหลังคอร์แมนท์ สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช่และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม

ตามลำดับ เนื่องจากการใช้สารเคมีผสมเพิ่มจะส่งผลต่อการก่อตัวและแข็งตัว จึงควรรอให้ผลดังกล่าวหมดไปก่อนการใช้พลังงานไมโครเวฟ ในการเร่งการแข็งตัว ดังนั้นในขั้นตอนนี้ที่มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มนี้ ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสมที่ควรใช้มีค่าเท่ากับ 500 psi (3.45 MPa) เนื่องจาก เป็นระยะเวลาที่เร็วที่สุดที่กำหนดขึ้นเพื่อให้พลังงานไมโครเวฟแก่คอนกรีตเมื่อเทียบกับที่ 700 หรือ 1000 psi

4.2.1.3 ผลการหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว หมายถึงระยะเวลาที่ยอมให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวแล้วพัก เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไปจนกว่าจะทำการทดสอบกำลังอัดที่ระยะแรก ในการหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวนี้ ใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่ระดับกำลัง P40 และ P30 เป็นเวลา 30 และ 15 นาที ตามลำดับในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต และใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสม ที่ 500 psi เป็นตัวกำหนดเวลาเริ่มให้พลังงานไมโครเวฟ และกำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตต่างๆ กันที่ (1) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 15 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 15-18 ซม. (2) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารลดน้ำพิเศษ 2% ของปริมาณปูนซีเมนต์ (3) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารเร่งการก่อตัว 1.25% ของปริมาณปูนซีเมนต์ และ (4) ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารหน่วงการก่อตัว 0.4% ของปริมาณปูนซีเมนต์ ตารางที่ 3.5 แสดงตัวแปรในการหาเวลาทดสอบที่ระยะแรกในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

ในการทดลองนี้ จะทำการวัดอุณหภูมิหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัว สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม ถูกกำหนดอย่างจงใจในที่นี้ว่า ควรเป็นระยะเวลาที่อยู่ที่ อุณหภูมิของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า 40°C เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการพัฒนาค่ากำลังอัดที่ไม่สูงเกินไป ผลจากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของคอนกรีตสำหรับส่วนผสมที่ใช้ ไม่ปรากฏว่ามีจุดสูงสุดที่สองของอุณหภูมิเกิดขึ้น ภายหลังจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และที่เวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมงหลังจากเสร็จสิ้นการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ อุณหภูมิของคอนกรีตสำหรับส่วนผสมที่ใช้มีค่าต่ำกว่า 40°C ดังนั้น ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม สำหรับการทดลองนี้ จึงถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3.5 ชั่วโมง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงอุณหภูมิของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เมื่อใช้ค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมง จากตารางพบว่า เป็นที่ชัดเจนว่าค่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมที่ใช้ที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะแรกให้ค่าที่มากกว่า 16% ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่ 28 วัน นั่นหมายถึง ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมงดังกล่าวให้ค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างเหมาะสม สูงถึง 16% จากตัวอย่างส่วนผสมดังกล่าวข้างต้น และยังสามารถวัดค่าได้ ดังนั้นจึงกำหนดใช้ค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวแล้วที่ระยะเวลา 3.5 ชั่วโมง ในการเร่งการแข็งตัวต่อไป

4.2.2 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากบ่มปกติ

หลังจากได้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดแล้วในขั้นตอนที่ 4.2.1 ขั้นตอนต่อไปคือ นำกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าว ไปใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนของปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน รวมถึงการใช้สารเคมีผสมเพิ่มต่างๆในปริมาณต่างๆที่กำหนดโดยผู้ผลิต

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

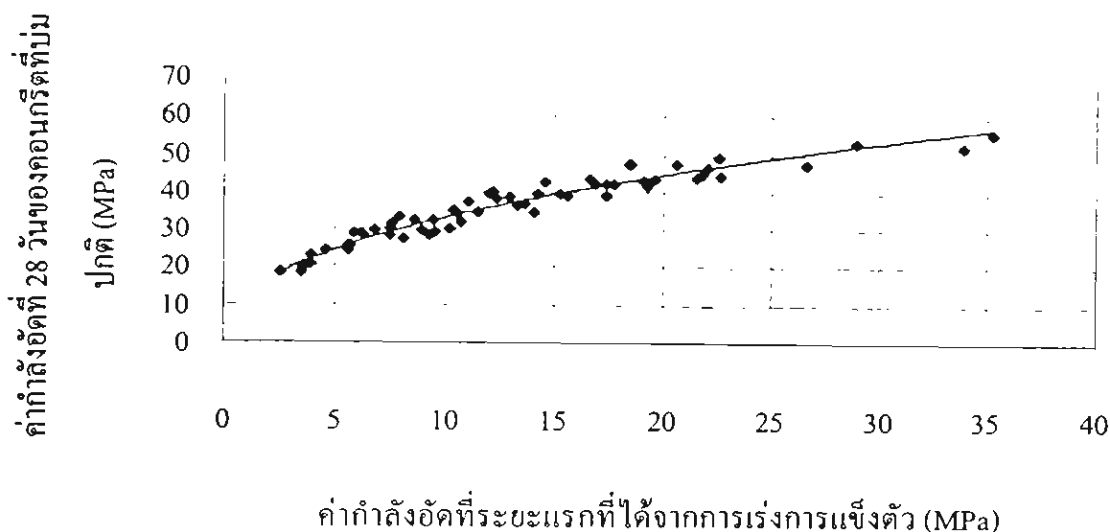
ส่วนผสม ที่	อัตราส่วน(น้ำ- สารผสมเพิ่ม) ต่อปูนซีเมนต์	C:S:A	% สารเคมีผสม เพิ่ม	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด			
				คอนกรีตบ่มไมโครเวฟ ที่ระยะแรก		คอนกรีตบ่มปกติ ที่ 28 วัน	
				(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
31	0.79	1:3.09:3.47	-	2.94	16.12	18.26	100
55	0.572	1:2.87:3.19	2% สารลดน้ำพิเศษ	8.07	29.25	27.57	100
73	0.703	1:2.87:3.20	1.25% สารเร่งการก่อตัว	5.66	22.21	25.476	100
85	0.695	1:2.87:3.21	0.45% สารหน่วงการก่อ ตัว	3.94	17.07	23.05	100

เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วันแล้ว สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน ได้ (รูปที่ 4.13) และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S_{28d-NCC} = (12.078) * (S_{early-MCC})^{0.437} \quad (4.4)$$

เมื่อ $S_{early-MCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (MPa)

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



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน

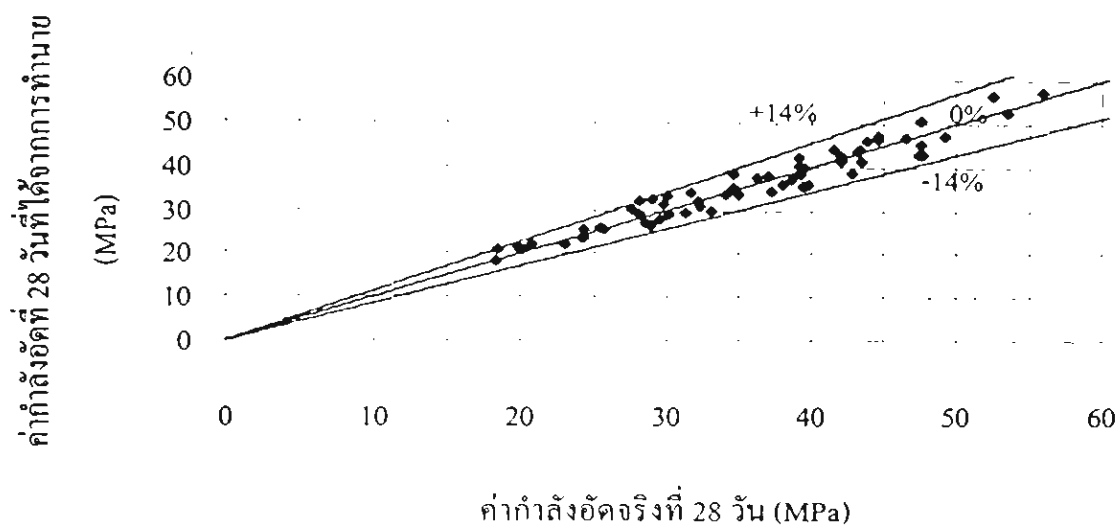
จากสมการ 4.4 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.2.3 ผลการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติที่ 28 วันจากสมการที่ 4.4 ที่ได้ สามารถทำได้เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยกระบวนการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสมที่สุด ที่หาได้จาก 4.2.1

ผลการทำนายค่าแสดงไว้ในรูปที่ 4.14 พบว่าให้เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดไม่เกิน ± 14 โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 18.3-56.0 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม. เมื่อคอนกรีตที่ใช้มีสารเคมีผสมเพิ่มและไม่มี

ตารางที่ 4.8 แสดงเวลารวมที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว โดยแยกออกตามชนิดของสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ จากตารางพบว่าคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวใช้เวลามากที่สุดถึง 11-20.5 ชั่วโมง ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ สารเร่งการก่อตัว และไม่ใช้สารผสมเพิ่มเลย ใช้เวลาตั้งแต่ 7.5-9.5 ชั่วโมง เนื่องจากว่าคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวจะใช้เวลาามากที่สุด ในการรอให้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 500 psi (3.45 MPa) ก่อนนำเข้าเตาอบไมโครเวฟเพื่อเร่งการแข็งตัว



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า

ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ

ชนิดของคอนกรีต	ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ (นาทีก)	ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว (ชั่วโมง)	รวมเวลาทั้งหมดที่ใช้ (ชั่วโมง)
คอนกรีตที่ไม่มีสารผสมเพิ่ม	3-4	45	3.5	7.5-8.5
คอนกรีตที่มีสารลดน้ำพิเศษ	3-5	45	3.5	7.5-9.5
คอนกรีตที่มีสารเร่งการก่อตัว	3-4	45	3.5	7.5-8.5
คอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัว	7-16	45	3.5	11-20.5

4.3 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่มีและไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม กับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

4.3.1 ผลการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ในที่นี้ กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ยังคงมีความหมายเดิมเหมือนใน 4.2.1 ตามที่ได้กล่าวถึง ตัวแปรของกระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่เกี่ยวข้องและจะทำการศึกษาและหาค่าคือ ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ และเวลาทดสอบที่ระยะแรก

เริ่มแรก ในการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 30 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. นั่นคือใช้อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (W/C) ที่ 0.55 และอัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์:มวลรวมละเอียด: มวลรวมหยาบ (C:S:A) เท่ากับ 1:2.68:3.68 โดยน้ำหนัก เวลาทดสอบที่ระยะแรกใช้ที่ 7.5 ชั่วโมง (เนื่องจากจากการทดสอบในเบื้องต้นพบว่า สามารถวัดค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มได้) และระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ เท่ากับ 30 นาที (ดูตัวแปรที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 4.9) ในขั้นนี้จะเปลี่ยนค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟต่างๆ และทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกคือที่ 7.5 ชั่วโมง และที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติ ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมคือค่าที่ทำให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังด้านทานแรงอัดสูงในช่วงแรก โดยที่ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน และใช้พลังงานน้อยที่สุด

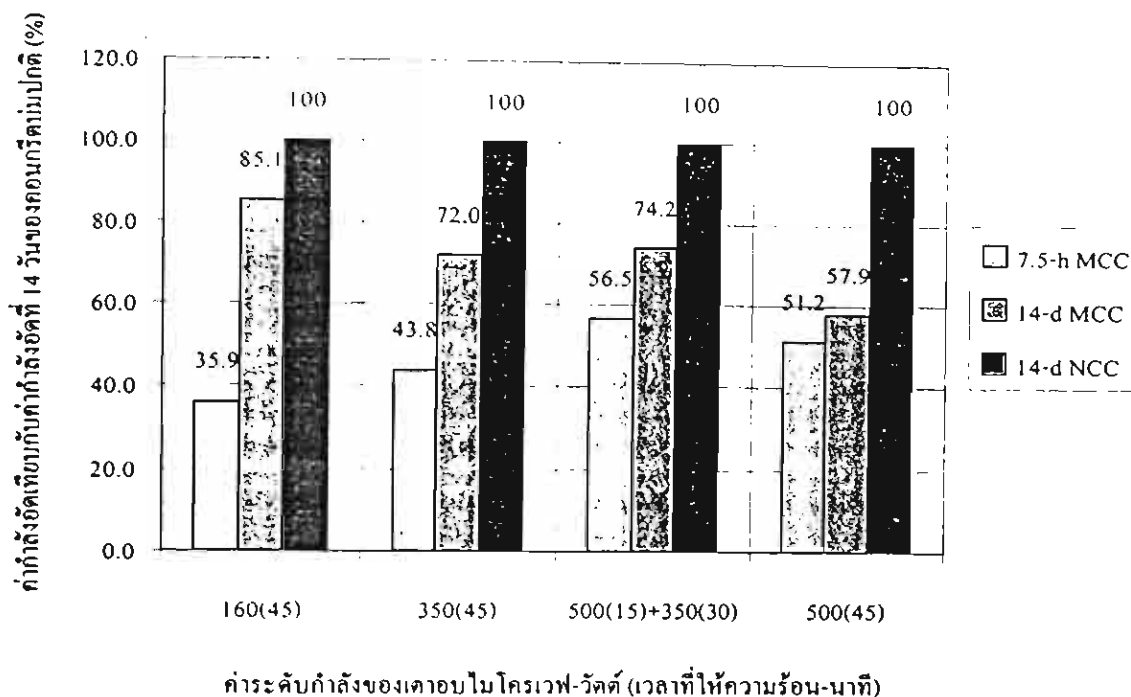
ผลการทดลองในรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมอยู่ที่ค่า 160 วัตต์ที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวเป็นเวลา 45 นาที ซึ่งให้ค่ากำลังอัดที่ 7.5 ชั่วโมง และที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าเท่ากับ 35.9 และ 85.1% ของค่ากำลังอัดที่ 14 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติ ซึ่งค่ากำลังอัดที่ 7.5 ชั่วโมงนี้มีค่าสูง และค่ากำลังอัดที่ 14 วันของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าน้อยกว่าค่ากำลังอัดที่ 14 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติประมาณ 15% ซึ่งถือว่ายอมรับได้สำหรับการทดลองนี้

หลังจากนั้น ในการหาเวลาทดสอบที่ระยะแรกในรูปของ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่ 160 วัตต์ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 45 นาที และค่าแรงด้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสมที่ ช่วง 400-

500 psi ที่ได้จากผลการทดลองใน 4.2.1.2 (ในที่นี้ ที่ 400 psi ให้ถือว่าสามารถใช้ได้เนื่องจากเป็นช่วงที่ใกล้เคียงกันกับที่ 500 psi) ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต (คู่มือแปรที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 4.10) โดยทำการวัดอุณหภูมิหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัว ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม ควรเป็นระยะเวลาที่อยู่ที่ อุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า 40°C (ตามที่ได้อธิบายไว้ใน 4.2.1.3) กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีต ที่ให้ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 30 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ผลการทดลองที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิของคอนกรีตสำหรับส่วนผสมที่ใช้ ไม่ปรากฏว่ามีจุดสูงสุดที่สองของอุณหภูมิเกิดขึ้น ภายหลังจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และที่เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ อุณหภูมิของคอนกรีตสำหรับส่วนผสมที่ใช้มีค่าต่ำกว่า 40°C ดังนั้น ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม สำหรับการทดลองนี้ จึงถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3 ชั่วโมง 15 นาที (เพิ่มอีก 15 นาทีเพื่อให้มีเวลาพอที่จะถอดแบบเพื่อทดสอบค่ากำลังอัด) เป็นที่น่าสังเกตว่าในการทดสอบคอนกรีตที่มีรูปร่างทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม. ไม่จำเป็นต้องทำการหล่อหัวคอนกรีตแต่อย่างใด ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม จึงมีค่าน้อยกว่า ค่าที่ใช้สำหรับคอนกรีตที่มีรูปร่างทรงกระบอก ใน 4.2.1.3 เล็กน้อย

ตารางที่ 4.9 ตัวแปรในการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม ของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม.

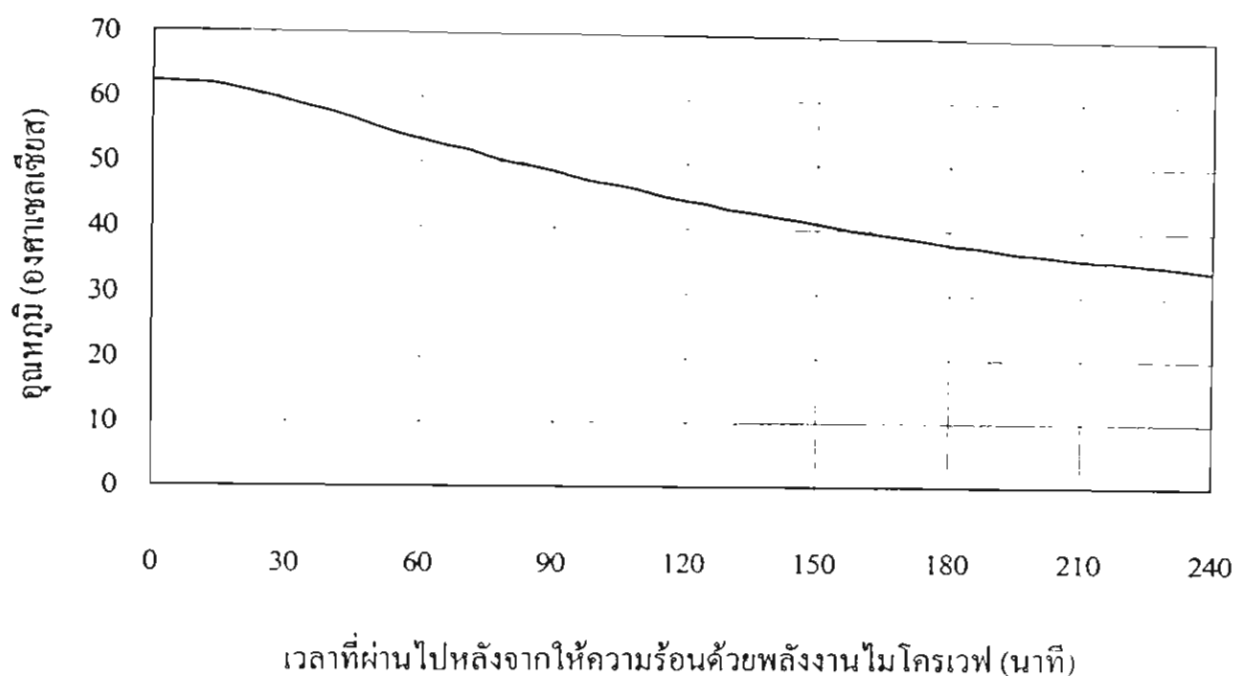
ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา $C:S:A=1:2.68:3.68$, $W/C=0.55$
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	?
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	30 นาที
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	7.5 ชั่วโมง
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	14 วัน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลของระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ทำมาจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดาที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม(C:S:A=1:2.68:3.68 และ W/C = 0.55) เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

ตารางที่ 4.10 ตัวแปรในการหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา C:S:A=1:2.68:3.68, W/C=0.55
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ	160 วัตต์
3. ระยะเวลาในการให้ความร้อน	45 นาที
4. ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	ใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็ม ในมอร์ตาร์ที่ 400-500 psi เป็นตัวกำหนด
5. เวลาทดสอบที่ระยะแรก(ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาไมโครเวฟ + ระยะเวลาในการให้ความร้อน + ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว)	?
6. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	-



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงอุณหภูมิของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

4.3.2 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ

หลังจากได้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดแล้วจากขั้นตอนที่ 4.3.1 ขั้นตอนต่อไปคือ นำกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าว ไปใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนของปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน รวมถึงการใช้สารเคมีผสมเพิ่มต่างๆในปริมาณต่างๆที่กำหนดโดยผู้ผลิต และทดสอบค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน

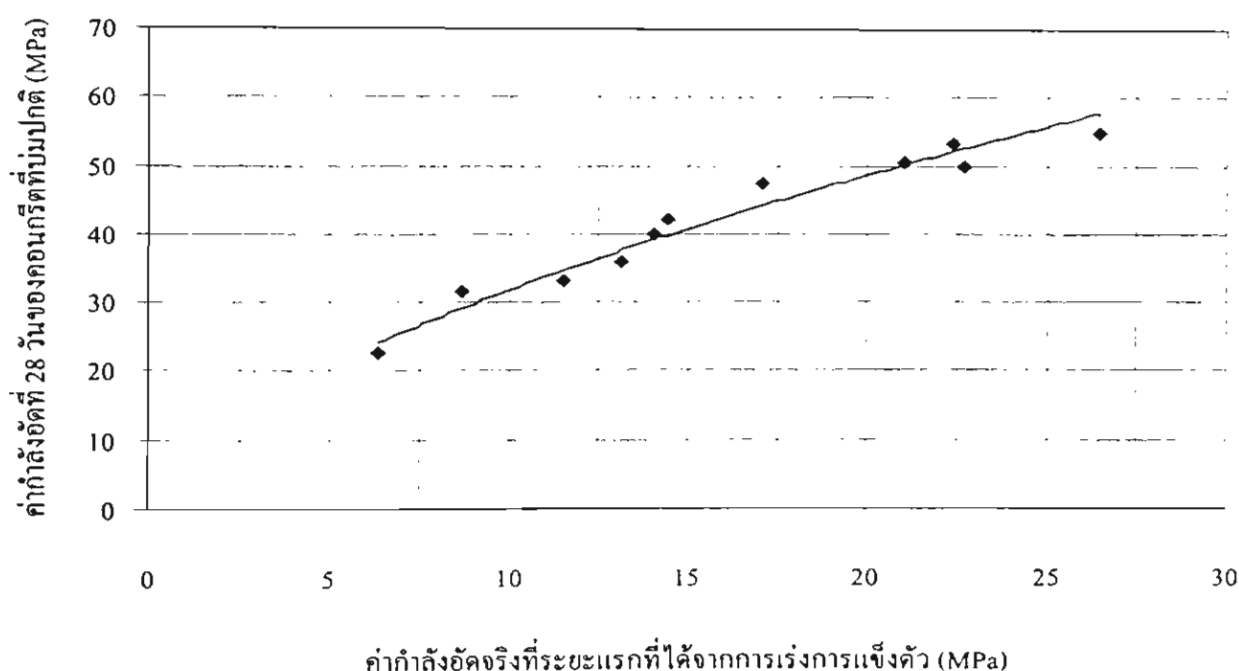
เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วันแล้ว สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก กับค่า

กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน ได้ (ดูรูปที่ 4.17) และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$S_{28d-NCC} = (7.7726) * (S_{early-MCC})^{0.6121} \quad (4.5)$$

เมื่อ $S_{early-MCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (MPa)

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



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

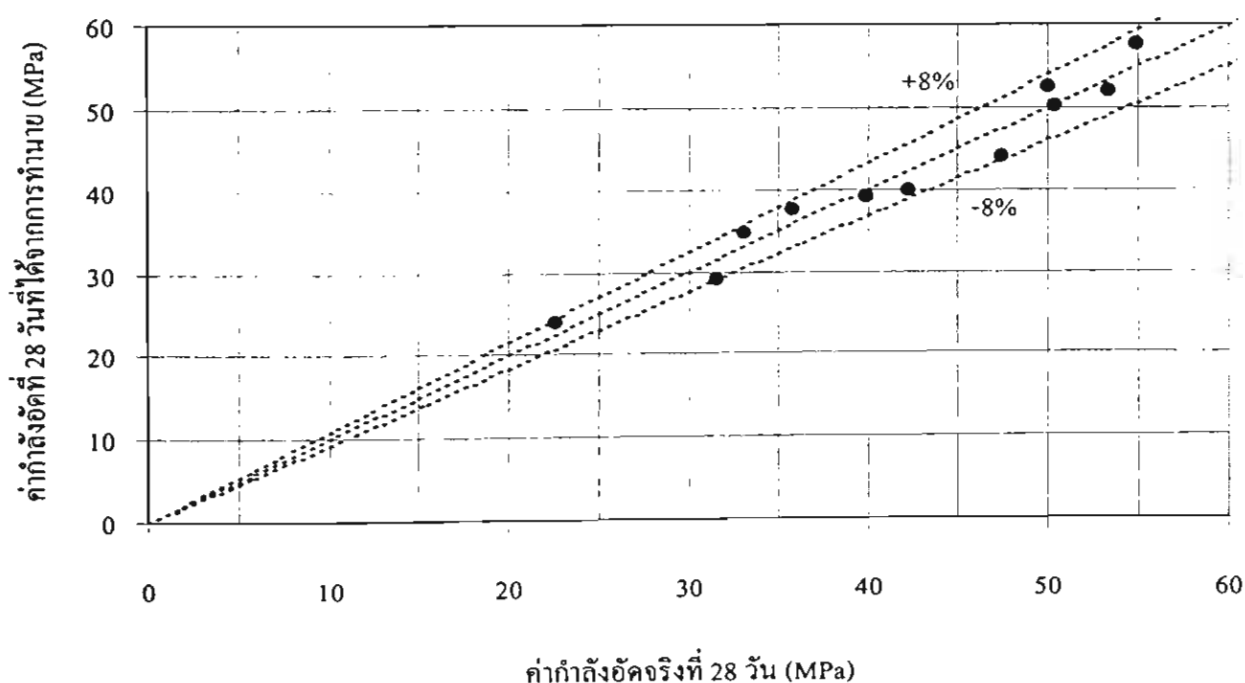
จากสมการ 4.5 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.3.3 ผลการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติที่ 28 วันจากสมการที่ 4.5 ที่ได้ สามารถทำได้เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

ด้วยกระบวนการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสมที่สุด ที่หาได้จาก 4.3.1 ผลการทำนายค่าแสดงไว้ในรูปที่ 4.18 พบว่าให้เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดไม่เกิน ± 8 โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 23-55 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. เมื่อคอนกรีตที่ใช้มีสารเคมีผสมเพิ่มและไม่มี

ตารางที่ 4.11 แสดงเวลารวมที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ ซึ่งประกอบด้วย ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว โดยแยกออกตามชนิดของสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ จากตารางพบว่าคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวยังคงใช้เวลานานที่สุดถึง 7-9 ชั่วโมง ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ สารเร่งการก่อตัว และไม่ใช้สารผสมเพิ่มเลย ใช้เวลาตั้งแต่ 6-8 ชั่วโมง เนื่องจากว่าคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวจะใช้เวลานานที่สุด ในการรอให้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์มีค่าอยู่ในช่วง 400-500 psi (2.78-3.45 MPa) ก่อนนำเข้าเตาอบไมโครเวฟเพื่อเร่งการแข็งตัว



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

ตารางที่ 4.11 เวลาที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม.

ชนิดของคอนกรีต	ระยะเวลาดังแต่ เริ่มผสมจนถึง เวลาที่นำแท่ง ทดสอบเข้าเตา อบไมโครเวฟ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาในการ ให้ความร้อนด้วย พลังงาน ไมโครเวฟ (นาที)	ระยะเวลาการพัก คอนกรีตที่ผ่าน การเร่งการแข็ง ตัว (ชั่วโมง)	รวมเวลาทั้งหมด ที่ใช้ (ชั่วโมง)
คอนกรีตที่ไม่มีสาร ผสมเพิ่ม	2-3	45	3.25	6-7
คอนกรีตที่มีสาร ลดน้ำพิเศษ	3-4	45	3.25	7-8
คอนกรีตที่มีสาร เร่งการก่อตัว	2-3	45	3.25	6-7
คอนกรีตที่มีสาร หน่วงการก่อตัว	3-5	45	3.25	7-9

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

- (1) เทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากบ่มปกติ และผลการทดลองพบว่าให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 15\%$ จากผลการทดสอบจริง
- (2) สมการที่ใช้เพื่อทำนายค่ากำลังอัดจำนวน 4 สมการถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่บ่มปกติได้ สมการทั้ง 4 ใช้สำหรับ
 - (2.1) การทำนายค่ากำลังอัดที่ 7 วันของคอนกรีตปกติ (ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม) ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท I ให้กำลังอัดเร็ว ที่ผ่านการบ่มปกติ ใช้เวลา 3.5 ชั่วโมง
 - (2.2) การทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตปกติ (ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม) ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่ผ่านการบ่มปกติ ใช้เวลา 5.5 ชั่วโมง
 - (2.3) การทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่มีและไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่ผ่านการบ่มปกติ ใช้เวลา 7.5-20.5 ชั่วโมง
 - (2.4) การทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตปกติ ไม่มีสารเคมีผสมเพิ่ม ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา ที่ผ่านการบ่มปกติ เมื่อขนาดของตัวอย่างคอนกรีตเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม. ใช้เวลา 6-9 ชั่วโมง

(3) เทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ถูกพัฒนาขึ้น เหมาะสำหรับ คอนกรีตที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน เพื่อความรวดเร็วและแม่นยำ ในการทำนายค่ากำลัง ด้านทานแรงอัด ดังนี้คือ

(3.1) สำหรับ คอนกรีตปกติที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ให้กำหนดระยะเวลาหลังจาก เริ่มผสมและก่อนเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ไว้ที่ เวลาคงที่ ที่ 30 นาที และทดสอบกำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาที่กำหนดไว้ เช่น ที่ 3.5 และ 5.5 ชั่วโมงสำหรับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทให้กำลังอัดเร็วและธรรมดาตามลำดับ

(3.2) สำหรับ คอนกรีตที่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ให้ใช้ค่าแรงด้านทานการจมของเข็มที่ 2.78-3.45 MPa เป็นตัวกำหนดระยะเวลาเพื่อทำการเร่งการแข็งตัวของ คอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา และให้ใช้ระยะ พักที่กำหนดไว้คงที่ ที่ 3.5 ชั่วโมง ในการพักคอนกรีตหลังจากเร่งการแข็งตัว ด้วยพลังงานไมโครเวฟ ก่อนทดสอบค่ากำลังด้านทานแรงอัด

(4) เทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ถูกพัฒนาขึ้น เหมาะสำหรับ แท่ง ทดสอบคอนกรีตที่มีขนาดและรูปทรงแตกต่างกัน เพื่อความรวดเร็ว ความง่าย และ ความแม่นยำ ในการทำนายค่ากำลังด้านทานแรงอัด ดังนี้คือ

(4.1) การใช้แท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ช่วยทำให้ง่ายในการเตรียมแท่งทดสอบ และเตาอบ ไมโครเวฟ แต่จำเป็นต้องใช้ตัวคูณต่างๆ เพื่อแปลงค่าที่ได้ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เช่น ตัวคูณอันเนื่องมาจาก ขนาดโคสของหินที่ใช้จริง และ ตัวคูณอันเนื่องมาจาก ขนาดของแท่งทรงกระบอกที่ใช้เพื่อเปลี่ยนให้เป็นค่าสำหรับขนาดของแท่งทดสอบมาตรฐาน เป็นต้น

(4.2) การใช้แท่งทดสอบคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม. ช่วย เพิ่มความแม่นยำและความง่ายในการทำนายค่ากำลังอัด และเตรียมแท่ง ทดสอบ แต่จำเป็นต้องใช้เตาอบไมโครเวฟจำนวน 2 เครื่องขึ้นไปเพื่อหา ค่าเฉลี่ย

5.2 ข้อเสนอแนะ

- (1) ควรศึกษาหาตัวคูณอันเนื่องมาจากผลของการใช้ขนาดโดสของหินที่ใหญ่กว่า 20 มม. เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายค่ากำลังอัดด้วยวิธีนี้ ในกรณีที่ต้องมีการร่อนหินที่มีขนาดใหญ่กว่า 20 มม.ออก ก่อนเริ่มเทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สำหรับการใส่แบบหล่อรูปทรงกระบอกตามขนาดที่ใช้ในการทดลองนี้
- (2) เนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในประเทศไทยมาจากหลายแหล่งผลิต จึงควรศึกษาหาผลของการใช้ปูนซีเมนต์จากต่างแหล่งผลิต ที่มีต่อการพัฒนาค่ากำลังอัด และ ที่มีผลต่อการทำนายค่ากำลังอัดด้วยวิธีนี้
- (3) เนื่องจากในปัจจุบัน การใช้เถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ในคอนกรีตเป็นที่นิยมมากขึ้นในประเทศไทย จึงควรทำการประยุกต์ใช้วิธีการทำนายค่ากำลังอัดนี้สำหรับ คอนกรีตผสมเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์

บรรณานุกรม

1. Dewar, J.D. and Anderson, R., *Manual of ready-mixed concrete*, 2nd edition, Chapman & Hall, 1992.
2. Pheeraphan, Thanakorn. "Accelerated curing of concrete with microwave energy", *Ph.D. Thesis*, Dept. of Civil and Environmental Engineering, M.I.T., 1997.
3. Wu, X., Dong, J., and Tang, M., "Microwave curing technique in concrete manufacture", *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, No. 2, pp. 205-210, 1987.
4. Hutchison, R.G., Chang, J.T., Jennings, H.M. and Broadwin, M.E., "Thermal acceleration of Portland cement mortars with microwave energy", Vol. 21, No. 5, pp. 795-799, 1991.
5. Pera, J., Ambroise, J., and Farha, M., "Microwave processing of fibre reinforced cement composites", *Fibre Reinforced Cement and Concrete: Proceeding of the Fourth RILEM International Symposium*, edited by Swamy, R.N., pp. 61-69, 1992.
6. Li, D. and Wu, X., "A study on the application of vacuum microwave composite dewatering technique in concrete engineering", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 1, pp. 159-164, 1994.
7. Leung, C.K.Y. and T. Pheeraphan, "Very high early strength of microwave cured concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 136-146, 1995.
8. Leung, C.K.Y. and T. Pheeraphan, "Determination of optimal process for microwave curing of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 463-472, 1997.
9. Sohn, D. and Johnson, D.L., "Microwave curing effects on the 28-day strength of cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 7, 1998.
10. Kasai, Y., "Testing methods of cement and water content in fresh concretes and estimation of 28 day strength at early age - state of the art in Japan", *Testing during concrete construction: Proceedings of an International RILEM workshop*, edited by H.W. Reinhardt, pp. 58-81, March 1990.

11. Tango, C.E. de Siqueira, "An extrapolation method for compressive strength prediction of hydraulic cement products", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 7, pp. 969-983, 1998.
12. American Society for Testing and Materials, "Standard test method for developing early-age compression test values and projecting later-age strengths", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, C 918-88, Philadelphia USA, 1991.
13. American Society for Testing and Materials, "Practice for estimating concrete strength by the maturity method", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, C 1074-87, Philadelphia USA, 1991.
14. Neas, E.D. and Collins, M.J., "Microwave heating: Theoretical concepts and equipment design", *Introduction to microwave sample preparation: Theory and practice*, edited by H.M. Kingston, and L.B. Jassie, ACS Professional reference book, American Chemical Society, Washington, D.C., pp. 7-32, 1988.
15. Sutton, Willard H., "Microwave processing of ceramic materials", *Ceramic Bulletin*, Vol. 68, No. 2, pp. 376-386, 1989.
16. Mehta, P.K., *Concrete: Structure, Properties, and Materials*, Prentice-Hall Inc., 1986.
17. Young, J.F., Mindess, S., Gray, R.J., and Bentur, A., *The science and technology of civil engineering materials*, Prentice-Hall, Inc., 1998.
18. Mindess, S. and Young, J.F., *Concrete*, Prentice-Hall Inc., 1981.
19. ชัชวาลย์ เศรษฐบุตร, *คอนกรีตเทคโนโลยี*, พิมพ์ครั้งที่ 3, บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด, 2537.
20. Voss, W.A.G. and T. Greenwood-Madsen, "Brief communication: A simple instrument for measuring microwave oven power," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol. 22, No. 4, pp. 209-211, 1987.

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ

ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการ การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ มีดังนี้

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1.1 ได้ส่งบทความ 1 เรื่อง ไปตีพิมพ์ที่วารสาร Cement and Concrete Research แล้วเมื่อเดือน พ.ย. 43 ซึ่งอยู่ระหว่างการแก้ไขบทความ และได้ส่งกลับไปอีกครั้งเพื่อพิจารณา เมื่อวันที่ 22 เดือน มิ.ย. 44 ในชื่อเรื่อง

“Prediction of long-term Compressive strength of normal concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy” โดย T. Pheeraphan, L. Cayliani, M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul

1.2 คาดว่าจะสามารถส่งบทความไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติได้อีกอย่างน้อย 1 เรื่อง ภายหลังจากผ่านกระบวนการขอจดสิทธิบัตร ซึ่งคาดว่าจะใช้เวลาประมาณมากกว่า 1 ปีหลังจากยื่นคำขอจดสิทธิบัตร ในชื่อเรื่อง

“Prediction of 28-day compressive strength of concrete containing chemical admixtures” โดย T. Pheeraphan, T. Aneksup, and P. Nimityongskul

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เกิดความสนใจ และมีเครือข่ายความร่วมมือเกิดขึ้นระหว่างบุคลากรของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ และ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ ในการทำวิจัย เรื่องการนำเทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟไปใช้ในการทำนายค่าของคอนกรีตที่มีส่วนผสมอื่นๆ ต่อไป เพื่อประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของการผลิตคอนกรีต
- เกิดการสร้างนักวิจัยใหม่ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินงานวิจัยนี้ เป็นจำนวนทั้งสิ้น 13 คน คิดเป็น นักศึกษาในระดับปริญญาโทจำนวน 3 คน และ ปริญญาตรีจำนวน 9 คน

3. การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการในประเทศ ต่างประเทศ และบทความเผยแพร่ในวารสาร

ได้มีการเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการในประเทศ และต่างประเทศ อย่างละ 1 ครั้ง และได้เผยแพร่บทความในวารสาร 1 เรื่อง ดังนี้คือ

3.1 Pheeraphan, T., M.I. Dumangas Jr., P. Nimityongskul, The use of microwave curing technique to estimate the long-term strength of normal concrete. *Proceeding of the Sixth National Convention on Civil Engineering, Petchburi, Thailand, May 2000.*

3.2 Pheeraphan, T., L. Cayliani, M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul, "Estimation of 28-day strength of concrete in 5.5 hours based on very high accelerated strength after curing with microwave energy", *Proceeding of International Symposium on High Performance Concrete, Hong Kong and Shenzhen, China, Dec. 2000.*

3.3 ธนากร พิระพันธุ์, L. Cayliani และ พิชัย นิमितยงสกุล, "การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ" *เอกสารประกอบการงานเรืออากาศวิชาการ '43 โรงเรียนนายเรืออากาศ กรุงเทพฯ. 20-21 กันยายน 2543. 66-68.*

4. การจดสิทธิบัตร

กำลังอยู่ในระหว่างการขออนุมัติจดสิทธิบัตรจาก สกว. เพื่อรักษาทรัพย์สินทางปัญญาที่เกิดขึ้นจากผลงานวิจัย โดยใช้ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์คือ วิธีการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีต ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตในระยะเวลาสั้น โดยใช้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแก่คอนกรีต ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการอุตสาหกรรมคอนกรีต ที่การทราบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่เวลาเร็วขึ้น จะช่วยในการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตได้ ในระยะเวลาอันสั้น

ภาคผนวก

ภาคผนวกนี้ประกอบด้วย บทความทางวิชาการจำนวน 4 เรื่องดังนี้คือ

1. Pheeraphan, T., M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul, "The use of microwave curing technique to estimate the long-term strength of normal concrete." *Proceeding of the Sixth National Convention on Civil Engineering, Petchburi, Thailand*, Vol. 1, pp. MAT 101-106, May 2000.
2. ธนากร พิระพันธุ์, L. Cayliani และ พิชัย นimityongskul. "การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ" เอกสารประกอบงานเรืออากาศวิชาการ'43 โรงเรียนนายเรืออากาศ กรุงเทพฯ. 20-21 กันยายน 2543, 66-68.
3. Pheeraphan, T., L. Cayliani, M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul, "Estimation of 28-day strength of concrete in 5.5 hours based on very high accelerated strength after curing with microwave energy," *Proceeding of International Symposium on High Performance Concrete, Hong Kong and Shenzhen, China*, Dec. 2000.
4. Pheeraphan, T., L. Cayliani, M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul "Prediction of long-term Compressive strength of normal concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy" submitted to *Cement and Concrete Research*

การใช้เทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในการประมาณค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตปกติ

THE USE OF MICROWAVE CURING TECHNIQUE TO ESTIMATE THE LONG-TERM STRENGTH OF NORMAL CONCRETE

ธนากร พิระพันธุ์¹, Mario Ibay Dumangas Jr.², พิชัย นิมิตรยงสกุล³

¹อาจารย์

โรงเรียนนายเรืออากาศ กรุงเทพฯ

²นักศึกษาปริญญาโท, ³รองศาสตราจารย์

สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ปทุมธานี

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการประมาณค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตโดยใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ เริ่มโดยการหาค่าระดับพลังงานที่เหมาะสมสำหรับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งและสาม ซึ่งถูกหล่อขึ้นเพื่อทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเพื่อเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่แข็งตัวปกติ ผลที่ได้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดที่ระยะยาวและค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวเมื่อคอนกรีตมีส่วนผสมต่างกันได้ สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทสาม ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมงมีค่าประมาณ 40% ของค่ากำลังอัดที่ 7 วันของคอนกรีตที่แข็งตัวปกติ ส่วนปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่ง ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 5.5 ชั่วโมงมีค่าประมาณ 35% และ 29% ของค่ากำลังอัดที่ 14 และ 28 วันของคอนกรีตที่แข็งตัวปกติตามลำดับ จากการทดสอบความสัมพันธ์ที่ได้เพื่อประมาณค่ากำลังอัดพบว่าให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่า $\pm 5\%$ สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทสามที่อายุ 7 วันและน้อยกว่า $\pm 7\%$ และ $\pm 12\%$ สำหรับปูนซีเมนต์ประเภทหนึ่งที่อายุ 14 และ 28 วันตามลำดับ ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำวิธีการประมาณค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตด้วยวิธีนี้มาใช้

ABSTRACT: The method to estimate the long-term strength of a concrete mixture using the accelerated strength obtained from microwave curing is investigated. The determination of the optimum microwave power for concrete with type I and III Portland cement is first carried out. Then concrete specimens are cast, cured with microwave energy, and tested for compressive strength at early age to compare to later-age strength of normally cured concrete. Correlations between the later-age strength and the accelerated strength are therefore established for different mix proportion. For Type III cement, about 40% is the 3.5-hour early strength with reference to the 7-day normal strength. For Type I cement, with respect to 14-day strength, about 35% is the 5.5-hour early strength and 29% with respect to 28-day strength. Using the obtained correlations to predict the long-term strength, the estimated percentage of errors for Type III cement at 7 days is $\pm 5\%$ and those for Type I cement at 14 and 28 days are $\pm 7\%$ and $\pm 12\%$, respectively. The outcome of this study affirms that there are possibilities in the estimation of the long-term strength using the accelerated strength obtained from the microwave curing.

KEYWORDS: Microwave Curing, Accelerated Curing, Strength Estimation

For further details, contact Dr. Thanakorn Pheeraphan, Department of Civil Engineering, Royal Thai Air Force Academy, Bangkok, Thailand

1. INTRODUCTION

The rapid growth of the construction has been recognized in the last decade and the demand for predicting the long-term strength at an early age is increasing in conjunction with the noticeable increase in recent construction works. Thus, a new attitude has developed with recognition of the benefits of knowing the potential strength of concrete at the earliest possible time after concrete has been placed, while there is still room for adjustment or remedy.

Previous work [1] on long-term strength estimation has shown several techniques developed in Japan to predict the 28-day strength of concrete but they have not yet been used widely because they are not easy to operate, they yield large percentage of errors and they require long time, i.e. more than a day, to estimate. However, long-term strength estimation of concrete cast with type III Portland cement based on accelerated strength of concrete cured with microwave energy has shown its potential in recent work by Pheeraphan et al.[2]. Their percentage of error is reported to be within $\pm 5\%$.

Hence, this work is a continuation of the preliminary work in [2] but efforts have focused on concrete made with type I Portland cement instead as well as on shortening the estimation time of concrete made with type III from 4.5 hours to 3.5 hours to speed up the estimation process.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 Specimen preparation and curing process

In this study, type I and III Portland cement are used. Limestone with a maximum size of 10 mm, and local construction sand, which are used as coarse and fine aggregates, respectively, are washed and dried in a conventional oven for 24 hours and then left in the air for one day before use. For specimens with the water/cement ratio below 0.40, high-range water reducer, Rheobuild 1000 H, is used with 0.7-1.0% by weight of cement.

In each concrete mixing batch, six cylinders of 76.2 mm diameter and 152.4 mm height are cast in polyethylene moulds. Four of them are cured with microwave energy after 30 minutes of mixing while the rests are cured normally. The specimens are arranged in a ring pattern on the turntable in the microwave cavity to obtain uniform heating. After microwave curing, the specimens are removed from the oven and covered with plastic sheets to continue normal curing process.

To perform microwave curing, a microwave oven model Goldstar MS-4025 with internal cavity dimensions of 390 x 268 x 400 mm, is used. It can generate output power as high as 850 watts based on the International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 705 rating standard.

To obtain early-age compressive strength of concrete cast with type I and III cements, two microwave-cured specimens are demoulded and capped with sulfur mortar at thirty minutes before testing for compressive strength. The rest of the microwave-cured specimens as well as the normal-cured specimens, are demoulded after 24 hours and cured in water until testing at later ages.

2.2 Experimental procedures

The experimental procedures in this work are still similar to those of previous works in [2]. In the first step, the optimal process of microwave curing for different types of cement which provides high early-age and later-age strengths with a minimum amount of applied microwave energy is determined. The factors affecting the

Optimal process include (1) delayed time which is the total time between the cement contacts water and the time before application of microwave energy, (2) total heating time, (3) early testing time and (4) optimal microwave power. Among them, the most important one is the optimal power which is then used to accelerate the curing process of concrete with different mix proportions.

As stated in [2], the delayed time and the total heating time are fixed at 30 and 45 minutes, respectively. For the early testing time, it is 4.5 hours for type III cement and is not known for type I cement.

To determine the optimal power, the cement:sand:aggregate proportion and water/cement ratio are arbitrarily fixed at 1:1:1.5 and 0.50, respectively. Then the correlations between the later-age strength and the accelerated strength are established for different mix proportions. In the final step, use the computed correlation to predict the long-term compressive strength and finally calculate the percentage of errors.

RESULTS

3.1 Concrete with type III cement without admixture

As stated before, the optimal process is determined first. Here, the delayed time and the total heating time are fixed at 30 and 45 minutes, respectively. The early testing time and the optimal power are therefore needed. By varying power to determine optimal power while the cement:sand:aggregate proportion and water/cement ratio are fixed constant at 1:1:1.5 and 0.50, respectively, it is found that at an early testing time of 4.5 hours, the optimal power is at 362 watts for 30-minute heating and 275 watts for 15-minute heating.

To shorten the estimation time, several tests with similar mixing proportions and optimal power obtained earlier have done to determine the earliest testing time between 3.0 to 4.5 hours. Results show that the earliest possible testing time is at 3.5 hours since its early strength is high enough to measure which is about 40% based on the 7-day strength of normally cured concrete (see details in [3]).

With use of determined optimal process, mixing proportions are varied to obtain the accelerated strength at 3.5 hours and the later-age strength at 7 days. The results in Table 1 show that the 3.5-hour accelerated strengths range from 38.5 to 42.2% with its average of 40.3% based on the 7-day normal-cured strength. Therefore, it is able to formulate a simple equation for the accelerated strength with respect to the normal-cured strength for type III cement without admixtures as follows:

$$S_{7d-NCC} = 2.481 \cdot S_{3.5h-MCC} \quad (1)$$

where S_{7d-NCC} is the normally cured strength at 7 days (MPa), and

$S_{3.5h-MCC}$ is the accelerated strength at 3.5 hours (MPa).

With the above equation, the 7-day strength of concrete cured normally can be estimated once the 3.5-hour accelerated strength is provided. Therefore, to show the validity of equation (1) for concrete with type III cement without admixtures, the previous results of 3.5-hour accelerated strength are substituted into equation (1) and the estimated 7-day strengths of concrete cured normally are obtained (see Table 1). From Table 1, it is clear that the range of the estimated values is from 16.2 to 30.7 MPa while the percentages of errors go from -4.8 to +4.5 %. From this, the percentage of errors is about $\pm 5\%$.

3.2 Concrete with type I cement without admixture

Again, the optimal process is determined first. The delayed time and the total heating time are still fixed at 0 and 45 minutes, respectively while the early testing time and the optimal power are needed to determine. Here, the results show that the optimal power for type I is similar to that for type III which is at 362 watts for 30-minute heating and 275 watts for 15-minute heating. By varying the early strength testing time of type I cement from 5 to 6 hours and compare their early strengths, it is found that the earliest strength testing time is at 5.5 hours while the strength at 5.5-hours is about 34% based on the 14-day strength of normally cured concrete (see details in [3]).

Table 1 Comparative result of True 7-day compressive strength and Estimated 7-day compressive strength of concrete cast with Type III cement with different proportions

W/C ratio By Weight	C:S:A By Weight	① True 3.5-hour Str. of Microwave-cured concrete (MPa)	② True 7-day Str. of Normal-cured concrete (MPa)	True 3.5-hour Str./ True 7-day Str. = [① / ② *100] (%)	Estimated 7-day Str. (MPa)	Error (%)
0.40	1:1:1.5	12.37	29.30	42.21	30.69	-4.7
0.45	1:1:1.5	11.61	27.58	42.09	28.80	-4.4
0.50	1:1:1.5	10.09	25.38	39.75	25.03	+1.4
0.55	1:1:1.5	8.61	20.91	41.17	21.36	-2.2
0.60	1:1:1.5	6.53	15.97	40.86	16.20	-1.5
0.50	1:1.5:2	9.77	24.98	39.10	24.24	+3.0
0.55	1:1.5:2	8.41	20.27	41.48	20.87	-2.9
0.60	1:1.5:2	6.52	16.09	40.55	16.18	-0.5
0.40	1:1:2	10.37	26.96	38.46	25.73	+4.6
0.50	1:1:2	9.61	24.37	39.42	23.84	+2.2
0.60	1:1:2	6.36	15.79	40.31	15.78	+0.1
0.40	1:1:1	11.89	30.01	39.61	29.50	+1.7
0.50	1:1:1	10.72	27.42	39.08	26.60	+3.0

Using the obtained optimal process, mixing proportions are varied to obtain the accelerated strength at 5.5 hours and the later-age strength at 14 or 28 days. Tables 2 and 3 show the 5.5-hour accelerated strengths compared with 14-day and 28 day normal-cured strengths, respectively. The average 5.5-hour strengths compared to 14-day and 28-day strengths are 34.6% and 29.1%. Thus, the simple equation for the accelerated strength with reference to the normal-cured strength at 14 days for Type I cement without admixtures can be formulated as follows:

$$S_{14d-NCC} = 2.894 * S_{5.5h-MCC} \quad (2)$$

where $S_{14d-NCC}$ is the normally cured strength at 14 days (MPa), and
 $S_{5.5h-MCC}$ is the accelerated strength at 5.5 hours (MPa).

Similarly, the linear relation of the accelerated strength at 5.5 hours and the normal-cured strength at 28 days for type I cement without admixtures can be formed as follows:

$$S_{28d-NCC} = 3.437 * S_{5.5h-MCC} \quad (3)$$

where $S_{28d-NCC}$ is the normally cured strength at 28 days (MPa), and

$S_{5.5h-MCC}$ is the accelerated strength at 5.5 hours (MPa).

After substituting the accelerated strength into equations (2) and (3) to estimate the strengths at 14 and 28 days, it is found that their percentages of errors are $\pm 7\%$ and $\pm 12\%$, respectively.

Table 2 Comparative result of True 14-day compressive strength and Estimated 14-day compressive strength of concrete cast with Type I cement with different proportions

W/C ratio By Weight	C:S:A By Weight	① True 5.5-hour Str. of Microwave-cured concrete (MPa)	② True 14-day Str. of Normal-cured concrete (MPa)	True 5.5-hour Str./ True 14-day Str. = [① / ② * 100] (%)	Estimated 14-day Str. (MPa)	Error (%)
0.40	1:1:1.5	11.97	33.72	35.49	34.64	-2.7
0.45	1:1:1.5	10.93	30.50	35.83	31.63	-3.7
0.50	1:1:1.5	8.69	25.54	34.01	25.15	+1.5
0.55	1:1:1.5	7.41	23.04	32.14	21.44	+6.9
0.60	1:1:1.5	6.40	19.85	32.26	18.52	+6.7
0.50	1:1.5:2	8.89	25.18	35.29	25.73	-2.2
0.55	1:1.5:2	7.93	23.08	34.33	22.95	+0.6
0.60	1:1.5:2	6.56	19.77	33.20	18.98	+4.0
0.40	1:1:2	10.70	30.65	34.92	30.97	-1.0
0.50	1:1:2	8.55	24.25	35.27	24.74	-2.0
0.60	1:1:2	6.44	18.04	35.72	18.64	-3.3
0.40	1:1:1	13.21	37.27	35.44	38.23	-2.3
0.50	1:1:1	11.33	32.05	35.34	32.79	-2.6

Table 3 Comparative result of True 28-day compressive strength and Estimated 28-day compressive strength of concrete cast with Type I cement with different proportions

W/C ratio By Weight	C:S:A By Weight	① True 5.5-hour Str. of Microwave-cured concrete (MPa)	② True 28-day Str. of Normal-cured Concrete (MPa)	True 5.5-hour Str./ True 28-day Str. = [① / ② * 100] (%)	Estimated 28-day Str. (MPa)	Error (%)
0.60	1:1:1.5	7.01	27.42	25.58	24.11	+12.1
0.50	1:1.5:2	8.90	29.82	29.85	30.59	-2.7
0.60	1:1.5:2	6.97	26.76	26.05	23.96	+10.5
0.40	1:1:2	10.22	33.04	30.92	35.11	-6.3
0.50	1:1:2	8.84	29.21	30.26	30.38	-4.0
0.40	1:1:1	12.81	41.45	30.90	44.02	-6.2
0.50	1:1:1	11.05	36.69	30.11	37.97	-3.5

4. DISCUSSIONS

From equations (1), (2), and (3), it is obvious that the constants obtained experimentally to multiply with the accelerated strength are different. This is due to the effects of type of cement and the day (after mixing) to obtain the estimated strength while the optimal process remains unchanged for all cases of Type I and III cements and thus has no effects.

However, even though the results shown here clearly indicate possibilities of using this estimation method providing low percentage of errors (see Figure 1), current work has shown that use of smaller amount of cement can also affect the rate of early strength development based on the later-age strength which therefore can directly affect the equation to estimate. Hence, it is essential to continue investigating on this effect closely. Some results cannot be included here since the work is under examination.

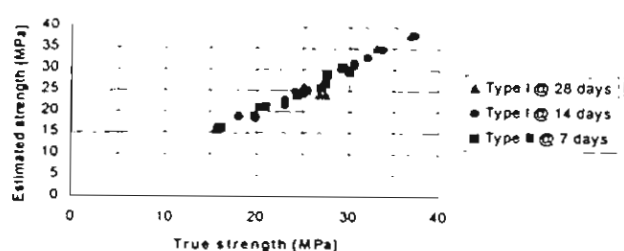


Figure 1 Comparison of the estimated value and the true value of normal concrete

For regular concrete added with high range water-reducer admixture, the mixture becomes much more complicated to predict the strength since the admixture can significantly affect the setting and hardening time of concrete. Work on this topic is still in progress and its result will be available soon.

5. CONCLUSION

In conclusion, the method to estimate the long-term strength of a concrete mixture using the accelerated strength obtained from microwave curing is possible. Several factors which can affect the equation to estimate include type and amount of cement, optimal process, and the day to obtain the estimated strength.

ACKNOWLEDGMENT

Part of this work is supported by a postdoctoral fund from the Thailand Research Fund. The second author's study and research at Asian Institute of Technology is supported by the government of Japan.

REFERENCES

1. Y. Kasai, Testing methods of cement and water content in fresh concretes and estimation of 28 day strength at early age - state of the art in Japan, Testing during concrete construction: Proceedings of an International RILEM workshop, edited by H.W. Reinhardt, pp. 58-81, March 1990.
2. T. Pheeraphan, P. Puengpang, and V. Amnajrungkri, Compressive strength estimation of Type III Portland cement concrete based on accelerated strength of concrete under microwave curing, Proceeding of the Fifth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Vol. 1, pp. MAT-35-MAT-40, 1999 (in Thai).
3. M.I. Dumangas Jr., The use of microwave curing technique to estimate the long-term strength of normal concrete, M.Eng. Thesis No. ST-99-34, School of Civil Engineering, A.I.T., Bangkok, April 1999.

การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

ชนากร พิระพันธุ์¹, Lilik Cayliani², พิชัย นิมิตรมงคล³

¹อาจารย์

โรงเรียนนายเรืออากาศ กรุงเทพฯ

² นักศึกษาปริญญาโท, ³ รองศาสตราจารย์ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย ปทุมธานี

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการประมาณค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตโดยใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะแรก เริ่มจากการหาค่าระดับพลังงานที่เหมาะสม ที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวโดยทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวและเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่แข็งตัวปกติ ผลการใช้ค่าระดับพลังงานดังกล่าวกับคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆกันที่ได้จากวิธีการคำนวณออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตด้วยวิธีของอเมริกา ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว เมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วันกับเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์หรือเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุผสมได้ และจากการทดสอบความสัมพันธ์ที่ได้เพื่อประมาณค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันพบว่าให้ค่าผิดพลาดเฉลี่ย 6% ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำวิธีการประมาณค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตด้วยวิธีนี้ไปใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการควบคุมคุณภาพการผลิตคอนกรีต นอกจากนี้แล้ว จากการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) ที่ใช้ในการทดสอบนี้ และแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มม. (6 นิ้ว) สูง 304.8 มม. (12 นิ้ว) ที่เป็นขนาดมาตรฐานพบว่าค่ากำลังอัดของแท่งคอนกรีตขนาด 76.2 มม.x152.4 มม.มีค่าสูงกว่าเฉลี่ยประมาณ 7%

บทนำ

เทคโนโลยีการก่อสร้างสมัยใหม่ที่ก้าวหน้าขึ้นในปัจจุบัน ทำให้การก่อสร้างมีความรวดเร็วมากยิ่งขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทราบค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตเหลวในระยะเวลาที่เร็วที่สุดหลังจากการเท เพื่อที่จะทำให้สามารถพิจารณาหาหนทางแก้ไขปัญหาที่เกิดจากคอนกรีตมีคุณภาพต่ำกว่าที่ระบุไว้

ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะยาวใดๆ ที่เป็นที่ยอมรับในทางปฏิบัติการตรวจสอบเพื่อดูว่าคอนกรีตที่ผ่านการเทแล้วจะสามารถรับแรงอัดได้ตามที่ออกแบบไว้ มักจะกระทำเมื่อคอนกรีตมีอายุอย่างน้อย 3 วัน ซึ่งถ้าหากพบว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้และไม่สามารถยอมรับได้ จะก่อให้เกิดความล่าช้าต่องานก่อสร้างและส่งผลให้เกิดความเสียหายอย่างมากในการแก้ไขที่ล่าช้าออกไป นอกจากนี้แล้วการทราบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะยาวยังมีประโยชน์ในการนำไปใช้ในการควบคุมคุณภาพการผลิตคอนกรีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ

วิธีการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตเหลวในระยะแรกมีอยู่น้อย ไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย ใช้เวลาที่ยาวนานกว่า 1 วันและให้ค่าความถูกต้องน้อย ในขณะที่วิธีการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีอยู่มากมาย และนิยมใช้ในทางปฏิบัติ อาทิเช่นวิธี Ultrasonic pulse velocity test, Schmidt hammer test, Surface hardness test, Penetration resistance test, Pull-out test, Pull-off test เป็นต้น[1]

Dewar และ Anderson [2] รายงานว่าผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จมักจะประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันโดยการทดสอบกำลังอัดปกติที่ 7 วัน หรือโดยการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 1-3 วัน อัตราส่วนระหว่างกำลังอัดที่ 7 วันต่อ 28 วันคำนวณได้จากคอนกรีตมาตรฐาน มักจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.50-0.85 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของปูนซีเมนต์ แหล่งและสภาพการผลิต

Kasai [3] ได้รวบรวมและรายงานวิธีการประมาณค่ากำลังอัดที่ 28 วันในระยะแรกไว้ ซึ่งเป็นงานที่ดำเนินการวิจัยในประเทศญี่ปุ่นทั้งสิ้นตั้งแต่ปีค.ศ.1975 เป็นต้นมาและสามารถแบ่งวิธีการประมาณค่าออกได้เป็น 4 วิธี คือ การประมาณค่าจากการทดสอบหาปริมาณค่อหนึ่งหน่วยของปูนซีเมนต์ จากการทดสอบหาปริมาณค่อหนึ่งหน่วยของน้ำ จากการทดสอบหาอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และจากการใช้วิธีเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต จากทั้ง 4 วิธีพบว่าวิธีการประมาณค่ากำลังอัดที่ 28 วันจากการใช้วิธีเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตมีความถูกต้องมากที่สุด และใช้เวลามากที่สุดด้วยเช่นกัน และพบว่าการบ่มในน้ำร้อนที่ 55°C เป็นเวลา 20.5 ชั่วโมงหลังจากถอดออกจากแบบหล่อและหล่อหัวให้ผลที่ใกล้เคียงมากที่สุด

แม้ว่าวิธีการประมาณค่าทั้งหมดที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะให้ผลถูกต้องในระดับหนึ่ง ข้อเสียของวิธีดังกล่าวก็ยังคงมีอยู่ อาทิเช่น ความยุ่งยากในการดำเนินการ และระยะเวลาที่ใช้ในการประมาณค่า จากตัวอย่างข้างต้นพบว่า วิธีการประมาณค่ามักใช้เวลานานกว่า 1 วันทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากการประมาณค่าได้อย่างเต็มที่ จึงทำให้เกิดความคิดที่จะพัฒนาวิธีการประมาณค่ากำลังอัดให้ใช้เวลาเร็วกว่า 1 วัน ให้ผลที่ถูกต้องและง่ายในการดำเนินการ

แนวความคิดของการพัฒนาวิธีการประมาณค่ากำลังอัดนี้เกิดจากงานวิจัยของ Pheeraphan [4] ซึ่งได้ศึกษาการบ่มคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสามด้วยคลื่นไมโครเวฟ พบว่าคลื่นไมโครเวฟซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตได้โดยคอนกรีตที่ได้จากการบ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟมีกำลังอัดที่อายุ 7 วันเทียบเท่ากับกำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มธรรมชาติที่อายุเท่ากันและคอนกรีตที่บ่มด้วยคลื่นไมโครเวฟที่อายุ 4.5 ชั่วโมง มีการพัฒนาการรับแรงอัดที่ใกล้เคียงกันในขณะที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่ต่างกัน ทำให้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ 4.5 ชั่วโมงของคอนกรีตที่บ่มไมโครเวฟกับค่ากำลังอัดที่ 7 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติได้ ส่งผลให้เกิดแนวความคิดว่าการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟน่าจะสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตได้ในระยะเวลาอันสั้นโดยใช้อุปกรณ์ราคาถูกลงได้ง่าย และง่ายในการดำเนินการ

จากแนวความคิดดังกล่าว ทำให้เกิดงานวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาการประมาณค่ากำลังอัดด้วยวิธีการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสามที่แข็งตัวเร็วโดย ประพนม และวิวัฒน์

[5] ที่สามารถประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 7 วันในระยะเวลาเพียง 4.5 ชั่วโมงโดยให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่า $\pm 4\%$ ต่อมา Dumangas Jr. [6] ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสามและหนึ่งซึ่งเป็นประเภทธรรมดาที่ใช้ทั่วไป ซึ่งผลที่ได้คือสามารถประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสามที่ 7 วันได้ในระยะเวลาเพียง 3.5 ชั่วโมงโดยให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่า $\pm 5\%$ และสำหรับค่ากำลังอัดที่ประมาณได้ที่อายุ 14 และ 28 วันของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งในระยะเวลา 5.5 ชั่วโมงให้ค่าผิดพลาดน้อยกว่า $\pm 7\%$ และ $\pm 12\%$ ตามลำดับ แต่เนื่องจาก การคำนวณส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยทั้งสองไม่ได้ใช้วิธีการคำนวณออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกาหรือวิธีของ American Concrete Institute (ACI) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ทำให้ราคาของคอนกรีตที่ได้มีราคาสูง เนื่องจากมีปริมาณของปูนซีเมนต์ที่สูงเกินไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเพิ่มเติมในการประมาณค่ากำลังอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งที่อายุ 28 วัน โดยจะใช้คอนกรีตที่มีส่วนผสมตามวิธีการคำนวณออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา

การทดลอง

วัสดุและการเตรียมแท่งตัวอย่างคอนกรีต

ในการทดลองนี้ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งตราช้าง หินที่ใช้เป็นหินปูนที่มีขนาดโคสดูไม่เกิน 9.5 มม. ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.66 หน่วยน้ำหนักเท่ากับ 1541 กก./ลบ.ม. และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมของน้ำเท่ากับ 0.97% ทรายที่ใช้มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.1 ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.55 และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมของน้ำเท่ากับ 0.96% ทั้งหินและทรายที่ใส่จะถูกล้างทำความสะอาด ก่อนนำไปอบให้แห้งในตู้อบปกติที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วันก่อนนำมาใช้ น้ำที่ใช้ได้มาจากก๊อกน้ำที่ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วันก่อนใช้ ในการทดลองนี้ไม่มีการใช้สารลดปริมาณน้ำจำนวนมาก (Superplasticizers) เว้นแต่จะระบุไว้

แบบหล่อที่ใช้ทำมาจากวัสดุ Polyethylene ซึ่งคลื่นไมโครเวฟสามารถทะลุผ่านได้เป็นอย่างดี มีรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) ตู้อบไมโครเวฟเป็นตู้อบยี่ห้อ Goldstar รุ่น MS-4025 มีขนาดภายใน 390x268x400 มม. ใช้คลื่นความถี่ที่ 2.45 GHz และให้ Output power เต็มที่ ที่ 850 วัตต์ จากมาตรฐานการเทียบค่าจากวิธีที่ระบุไว้ใน The International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 705 [7]

หลังจากผสมปูนซีเมนต์ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียดในเครื่องผสมปูนให้เข้ากันแล้ว เริ่มจับเวลาตั้งแต่ผสมกับปูนซีเมนต์ โดยใช้เวลาในการผสม 7 นาที นำคอนกรีตเหลวที่ได้มาบรรจุใส่แบบหล่อทั้ง 7 ที่เตรียมไว้แล้วโดยใช้เวลาในการบรรจุ 7 นาที จากนั้นแบ่งขึ้นตัวอย่างคอนกรีตออกเป็น 2 ชุด คือชุดแรกจำนวน 4 ชิ้นจะถูกนำไปบ่มในตู้อบไมโครเวฟ ซึ่ง 1 ใน 4 ชิ้นตัวอย่างนี้จะมีอุปกรณ์พิเศษเพื่อวัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของ

ขึ้นตัวอย่างภายหลังจากการบ่มไมโครเวฟ (ผลการวัดอุณหภูมิที่ [8]) ส่วนชุดที่สองจำนวน 3 ชิ้นจะถูกนำไปบ่มปกติที่อุณหภูมิห้อง

เวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับผงปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำขึ้นตัวอย่างเข้าตู้อบไมโครเวฟ เรียกว่า delay time เมื่อ delay time ครบตามค่าที่กำหนดไว้ นำขึ้นตัวอย่างชุดแรกจำนวน 4 ชิ้นไปบ่มในตู้อบไมโครเวฟตามระยะเวลาและระดับค่า Power ของตู้อบไมโครเวฟตามที่กำหนดไว้ หลังการบ่มในตู้อบไมโครเวฟนำขึ้นตัวอย่างทั้ง 4 ออกจากตู้อบไมโครเวฟและนำแผ่นพลาสติกมาคลุมขึ้นตัวอย่าง 3 ชิ้นไว้ 2 ชั้น ส่วนขึ้นตัวอย่างอีก 1 ชิ้นจะนำไปวัดอุณหภูมิ ขึ้นตัวอย่างทั้งหมดจะถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบ โดยจะใช้เวลา 30 นาทีก่อนเวลาทดสอบในการนำขึ้นตัวอย่าง 3 ชิ้นออกจากแบบหล่อและหล่อหัวด้วยก้ามฉั่งก่อนที่จะนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัด

ส่วนขึ้นตัวอย่างชุดที่สองจำนวน 3 ชิ้นที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้องจะถูกคลุมด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้นและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนครบ 1 วันจึงแกะออกจากแบบหล่อ แล้วนำไปบ่มน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 27 วัน ก่อนนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ขั้นตอนการทดลอง

ในขั้นแรกของการทดลอง หลังจากที่เราทราบคุณสมบัติของแต่ละส่วนผสมของคอนกรีต ในที่นี้เลือกใช้วิธีการคำนวณออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกาหรือวิธีของ American Concrete Institute (ACI) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ทั่วไปในโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ ทำให้สามารถคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ต้องการได้ เมื่อกำหนดค่ากำลังอัดและค่าการยุบตัว

ขั้นตอนต่อมาคือการหา Optimal process ก่อน ซึ่ง Optimal process ในที่นี้หมายถึงวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟ เพื่อให้ตัวอย่างคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังอัดที่ช่วงแรกสูง โดยที่ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกันและใช้พลังงานน้อยที่สุด

ส่วนประกอบที่สำคัญของ Optimal process ประกอบด้วย (1) ค่าระดับพลังงาน หรือ Optimal power (2) ระยะเวลาในการให้ความร้อน หรือ heating duration (3) delay time (4) เวลาทดสอบที่ระยะแรก หรือ early-age test time และ (5) เวลาทดสอบที่ระยะยาว หรือ later-age test time

หลังจากได้ Optimal process แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำ Optimal process ที่ได้ไปใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่ระยะยาว เมื่อทราบสัดส่วนของส่วนผสม เพื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่บ่มปกติต่อไป

นอกจากนี้แล้ว ขั้นตอนสุดท้ายคือทำการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) ที่ใช้ในการทดลองนี้และแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มม. (6 นิ้ว) สูง 304.8 มม. (12 นิ้ว) ที่เป็นขนาดมาตรฐาน เนื่องจากว่าในทางปฏิบัติจะนิยมใช้แท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มม. (6 นิ้ว) สูง 304.8 มม. (12 นิ้ว) ในการเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำไปทดสอบค่ากำลังอัด

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าคุณสมบัติของแต่ละส่วนผสมของคอนกรีตแล้วนั้น (รายละเอียดตามที่ได้กล่าวมา) เมื่อกำหนดค่าการยุบตัวที่ 100 มม. ทำให้สามารถคำนวณสัดส่วนผสมของคอนกรีตได้โดยใช้วิธีการคำนวณออกแบบสัดส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกา ผลของสัดส่วนผสมแสดงไว้ในตารางที่ 1

ในการทดลองนี้ ค่าของส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมดของ Optimal process ได้มาจากการวิจัยของ Dumangas Jr.[6] ซึ่งพบว่า ค่าระดับพลังงานและระยะเวลาในการบ่มไมโครเวฟที่เหมาะสมคือที่ 260 วัตต์ เป็นเวลา 30 นาทีและ 202 วัตต์ เป็นเวลา 15 นาที โดยมี delay time เท่ากับ 30 นาที ส่วนเวลาทดสอบที่ระยะแรกและระยะยาวเท่ากับ 5.5 ชั่วโมง และ 28 วันตามลำดับ

หลังจากที่ได้ Optimal process แล้ว ผลที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ได้จากการนำ Optimal process ไปใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และอัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ 28 วัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 นำข้อมูลสัดส่วนของส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ อาทิเช่น ปริมาณของน้ำ ปูนซีเมนต์ ทราย และหิน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไปหาความสัมพันธ์กับเปอร์เซ็นต์ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน เพื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวไปใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติ โดยสามารถแสดงผลของความสัมพันธ์ดังกล่าวไว้ใน รูปที่ 1, 2, 3, และ 4 ตามลำดับ

จากรูปที่ 1, 2, 3, และ 4 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของปูนซีเมนต์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเปอร์เซ็นต์ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน(รูปที่ 2) มีความเหมาะสมเท่ากับความสัมพันธ์เดียวกันที่ได้จากปริมาณของทรายเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (รูปที่ 3) ในการนำไปใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน

แต่ทั้งนี้เนื่องจากทรายและหินจัดเป็นวัสดุเฉื่อยในคอนกรีต และปริมาณของหินที่ใช้อยู่ในช่วงแคบที่ 40-41% เท่านั้น จึงควรคิดถึงผลของปริมาณวัสดุผสมโดยรวมมากกว่าแยกพิจารณา เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของวัสดุผสมคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักและเปอร์เซ็นต์ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการ

แข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน (รูปที่ 5) ความสัมพันธ์ที่ได้จึงให้ผลที่ไม่แตกต่างจากกรณีที่ใช้ปริมาณของทรายเพียงอย่างเดียว

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากปริมาณของน้ำที่ใช้เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักจะอยู่ในช่วงแคบที่ 8.9-9.1% เท่านั้นเอง ดังนั้นปริมาณของปูนซีเมนต์หรือปริมาณของวัสดุผสมที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน จึงทำให้ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการนำค่าทั้งสองไปใช้ในการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วันมีค่าใกล้เคียงกัน ดังจะได้แสดงผลต่อไป

จากผลการทดลองในรูปที่ 2 พบว่าเปอร์เซ็นต์ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วันมีค่าแปรผันตามปริมาณของปูนซีเมนต์ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากปริมาณของปูนซีเมนต์ที่เพิ่มมากขึ้นในส่วนผสมควรส่งผลให้มีการพัฒนากำลังอัดในระยะแรกสูง

ตารางที่ 1 ผลการทดลองของการบ่มคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมใดๆ
ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับ Power ที่ 260 วัตต์ และ 202 วัตต์
ที่ใช้ในการบ่มเป็นเวลา 30 และ 15 นาที ตามลำดับ ที่มีผลต่อค่ากำลังอัด

อัตราส่วน ของ น้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์	อัตราส่วน ของ ปูน ซีเมนต์ ต่อทราย ต่อหิน	ปริมาณของ น้ำ โดยน้ำหนัก (%)	ปริมาณของ ปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนัก (%)	ปริมาณของ ทราย โดยน้ำหนัก (%)	ปริมาณของ หิน โดยน้ำหนัก (%)	กำลังอัดจริงที่ อายุ 5.5 ชม. ของคอนกรีต ที่บ่ม ไมโครเวฟ (MPa)	กำลังอัดจริง ที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต ที่บ่ม ปกติ (MPa)
0.79	1:3.46:3.63	8.9	11.3	39.0	40.9	3.49	17.72
0.75	1:3.18:3.38	9.0	12.0	38.3	40.7	4.11	21.42
0.69	1:2.87:3.11	9.0	13.0	37.4	40.5	4.28	23.40
0.69	1:2.86:3.11	9.0	13.1	37.3	40.6	3.95	18.35
0.61	1:2.43:2.75	9.0	14.7	35.8	40.5	6.99	28.10
0.59	1:2.33:2.66	9.0	15.2	35.4	40.4	7.01	30.00
0.55	1:2.12:2.48	8.9	16.3	34.5	40.3	7.8	33.52
0.54	1:2.07:2.43	8.9	16.6	34.3	40.2	8.00	30.77
0.52	1:1.96:2.35	8.9	17.2	33.6	40.3	10.77	35.02
0.49	1:1.8:2.21	8.9	18.2	32.7	40.2	10.95	38.65
0.47	1:1.69:2.12	8.9	18.9	32.0	40.2	11.85	35.66
0.45	1:1.58:2.03	8.9	19.8	31.2	40.1	12.23	42.76
0.42	1:1.43:1.89	8.9	21.1	30.2	39.9	14.96	47.03
0.42	1:1.42:1.89	8.9	21.1	30.0	40.0	15.68	45.20

ในที่นี้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของปูนซีเมนต์(%) และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน(%) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$ES = (1.5323 * CC) + 0.9737 \quad (1)$$

เมื่อ ES = ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน(%) และ

CC = ปริมาณของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (%)

ทำให้เมื่อทราบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงและค่า ES จากสมการที่ 1 ที่หาได้เมื่อทราบค่า CC จะทำให้สามารถหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วันได้จาก

$$S_{28d}^{CC} = (S_{5.5h}^{MC} * 100) / ES \quad (2)$$

เมื่อ S_{28d}^{CC} = ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน (MPa) และ

$S_{5.5h}^{MC}$ = ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมง (MPa)

ผลที่ได้จากสมการข้างต้นในการประมาณค่าแสดงไว้ในตารางที่ 2 พบว่าให้ค่าผิดพลาดเฉลี่ย 6% โดยให้ค่าผิดพลาดมากที่สุดที่ 13%

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมใดๆ ที่บ่มปกติกับค่ากำลังอัดที่ประมาณค่าได้ โดยใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก (%)

อัตราส่วนของ น้ำต่อ ปูนซีเมนต์	อัตราส่วนของปูน ซีเมนต์ ต่อทราย ต่อหิน	ปริมาณของ ปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนัก (%)	กำลังอัดจริงที่ อายุ 5.5 ชม. ของคอนกรีต ที่บ่มไม่โครเวฟ (Mpa)	กำลังอัดจริง ที่อายุ 28 วัน ของคอนกรีต ที่บ่มปกติ (MPa)	กำลังอัดที่ ประมาณค่า ที่อายุ 28 วัน ของ คอนกรีตที่บ่มปกติ (MPa)	ค่าผิดพลาด (%)
0.79	1:3.46:3.63	11.3	3.49	17.72	19.73	8.0
0.75	1:3.18:3.38	12.0	4.11	21.42	21.75	1.2
0.69	1:2.87:3.11	13.0	4.28	23.40	20.90	12.8
0.69	1:2.86:3.11	13.1	3.95	18.35	19.27	2.6
0.61	1:2.43:2.75	14.7	6.99	28.10	30.22	5.6
0.59	1:2.33:2.66	15.2	7.01	30.00	29.37	3.7
0.55	1:2.12:2.48	16.3	7.8	33.52	30.67	9.8
0.54	1:2.07:2.43	16.6	8.00	30.77	30.77	1.4
0.52	1:1.96:2.35	17.2	10.77	35.02	40.00	12.8
0.49	1:1.8:2.21	18.2	10.95	38.65	38.36	1.8
0.47	1:1.69:2.12	18.9	11.85	35.66	39.85	10.8
0.45	1:1.58:2.03	19.8	12.23	42.76	39.43	8.5
0.42	1:1.43:1.89	21.1	14.96	47.03	45.08	4.7
0.42	1:1.42:1.89	21.1	15.68	45.20	47.34	4.2

ในการทำงานเดียวกันนี้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของวัสดุผสม(%) และค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน(%) เขียนได้ดังนี้

$$ES = (-1.5494 * TAC) + 141.79 \quad (3)$$

เมื่อ ES = ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงเมื่อเทียบกับค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วัน(%) และ

TAC = ปริมาณของวัสดุผสมโดยน้ำหนัก(%)

ทำให้เมื่อทราบค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงและค่า ES จากสมการที่ 3 ที่หาได้เมื่อทราบค่า TAC จะทำให้สามารถหาค่ากำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วันได้จากสมการที่ 2 เช่นเดียวกัน และผลที่ได้จากการประมาณค่าแสดงไว้ในตารางที่ 3 พบว่าให้ค่าผิดพลาดเฉลี่ย 6% โดยให้ค่าผิดพลาดมากที่สุดที่ 13%

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนผสมใดๆ ที่บ่มปกติกับค่ากำลังอัดที่ประมาณค่าได้ โดยใช้ปริมาณของวัสดุผสม โดยน้ำหนัก (%)

อัตราส่วนของน้ำต่อปูนซีเมนต์	อัตราส่วนของปูนซีเมนต์ต่อทรายต่อหิน	ปริมาณของวัสดุผสมโดยน้ำหนัก (%)	กำลังอัดจริงที่อายุ 5.5 ชม. ของคอนกรีตที่บ่มไมโครเวฟ (MPa)	กำลังอัดจริงที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติ (MPa)	กำลังอัดที่ประมาณค่าที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติ (MPa)	ค่าผิดพลาด (%)
0.79	1:3.46:3.63	79.8	3.49	17.72	19.28	8.8
0.75	1:3.18:3.38	78.9	4.11	21.42	21.08	1.6
0.69	1:2.87:3.11	78.0	4.28	23.40	20.38	12.9
0.69	1:2.86:3.11	77.9	3.95	18.35	18.77	2.3
0.61	1:2.43:2.75	76.3	6.99	28.10	29.62	5.4
0.59	1:2.33:2.66	75.8	7.01	30.00	28.85	3.8
0.55	1:2.12:2.48	74.8	7.8	33.52	30.10	10.2
0.54	1:2.07:2.43	74.5	8.00	30.77	30.34	1.4
0.52	1:1.96:2.35	73.9	10.77	35.02	39.52	12.8
0.49	1:1.8:2.21	72.9	10.95	38.65	37.98	1.7
0.47	1:1.69:2.12	72.2	11.85	35.66	39.51	10.8
0.45	1:1.58:2.03	71.3	12.23	42.76	39.13	8.5
0.42	1:1.43:1.89	70.0	14.96	47.03	44.97	4.4
0.42	1:1.42:1.89	70.0	15.68	45.20	47.00	4.0

เพื่อความชัดเจนมากขึ้น รูปที่ 6 แสดงผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดจริงกับค่ากำลังอัดที่ประมาณค่าได้ที่ได้จากปริมาณของปูนซีเมนต์โดยน้ำหนัก(%) หรือปริมาณของวัสดุผสมโดยน้ำหนัก (%) ซึ่งพบว่าให้ค่าผิดพลาดเฉลี่ยและค่าผิดพลาดมากที่สุดเท่ากันที่ 6 และ 13% ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้น

ดังนั้นในทางปฏิบัติก่อนการประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน จะต้องมีการทำการทดลองเพื่อหาปริมาณของปูนซีเมนต์หรือวัสดุผสมในส่วนผสมคอนกรีตให้ได้ภายในระยะเวลา 5.5 ชั่วโมง ซึ่งวิธีดังกล่าวมีอยู่หลายวิธีดังที่ได้อธิบายไว้ในเอกสารอ้างอิง [3]

นอกจากนี้แล้วในขั้นตอนสุดท้ายพบว่าจากการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) ที่ใช้ในการทดลองนี้และแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.4 มม. (6 นิ้ว) สูง 304.8 มม. (12 นิ้ว) ที่เป็นขนาดมาตรฐาน ดังแสดงผลไว้ในตารางที่ 4 พบว่าค่ากำลังอัดของแท่งคอนกรีตขนาด 76.2 มม.x152.4 มม.มีค่าสูงกว่าเฉลี่ยประมาณ 7%

ดังนั้นเพื่อเป็นการเทียบค่าที่ได้จากการประมาณค่ากำลังอัดให้เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่เป็นขนาดมาตรฐาน จึงต้องมีการคูณด้วยตัวคูณที่มีค่าเท่ากับ 0.9374

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของแท่งตัวอย่างคอนกรีต
ขนาด 76.2 มม.x 152.4 มม.(3"x6") และ 152.4 มม.x 304.8 มม.(6"x12")

อัตราส่วนของ น้ำ ต่อ ปูนซีเมนต์	อัตราส่วนของ ปูนซีเมนต์ ต่อทราย ต่อหิน	ปริมาณ สารลดปริมาณน้ำ จำนวนมาก โดยน้ำหนักของ ปูนซีเมนต์ (%)	ขนาดของ แท่งตัวอย่าง	กำลังอัดที่ อายุ 28 วัน (MPa)	เปอร์เซ็นต์ค่ากำลังอัด ที่อายุ 28 วัน เปรียบเทียบกับ ค่ากำลังอัดของ แท่งตัวอย่างขนาด 152.4 มม.x 304.8 มม. (%)
0.69	1:2.86:3.11	0	3"x6"	19.3	105
			6"x12"	18.4	100
0.42	1:1.43:1.89	0	3"x6"	38.4	109
			6"x12"	35.3	100
0.30	1:1:1.5	1.5	3"x6"	48.4	106
			6"x12"	45.5	100

สรุป

วิธีการประมาณค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่บ่มปกติโดยใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อายุ 5.5 ชั่วโมง เมื่อทราบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์หรือ

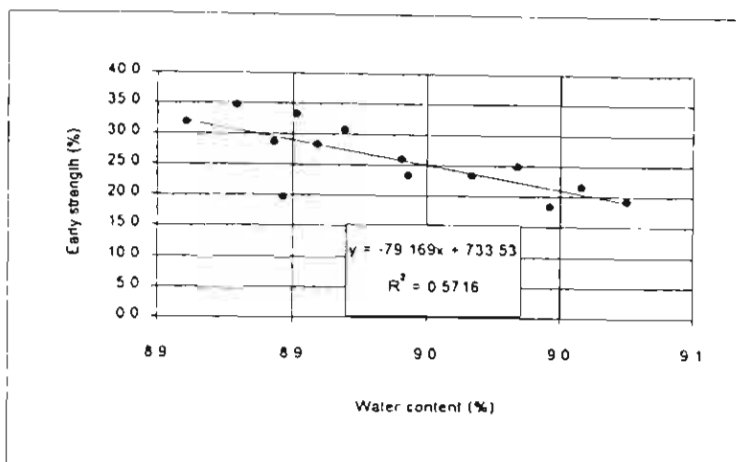
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุผสม สามารถนำมาใช้ได้กับคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่งที่มีอัตราส่วนผสมใดๆ ที่ได้จากวิธีการคำนวณออกแบบส่วนผสมของคอนกรีตตามมาตรฐานอเมริกาโดยให้ค่าผิดพลาดเฉลี่ยและค่าผิดพลาดมากที่สุดเท่ากันที่ 6 และ 13% ตามลำดับ และเพื่อเป็นการเทียบค่าที่ได้จากการประมาณค่ากำลังอัดให้เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบกำลังอัดของแท่งตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่เป็นขนาดมาตรฐาน จึงต้องมีการคูณด้วยตัวคูณที่มีค่าเท่ากับ 0.9374

กิตติกรรมประกาศ

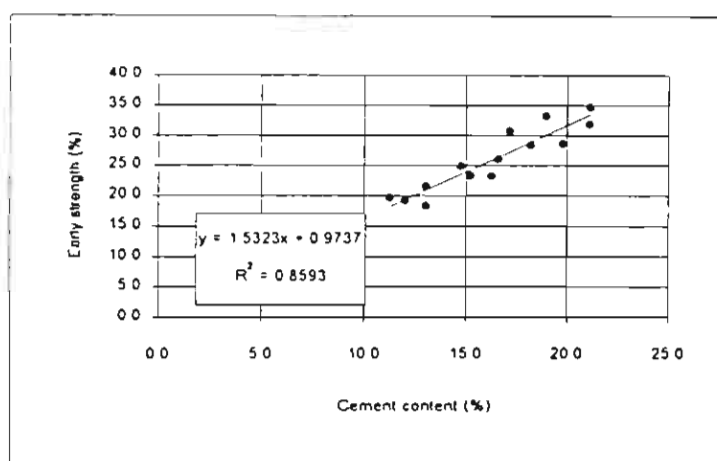
งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) และ ผู้เขียนที่สองได้รับทุนศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียจากธนาคารเพื่อการพัฒนาเอเชียแห่งญี่ปุ่น

เอกสารอ้างอิง

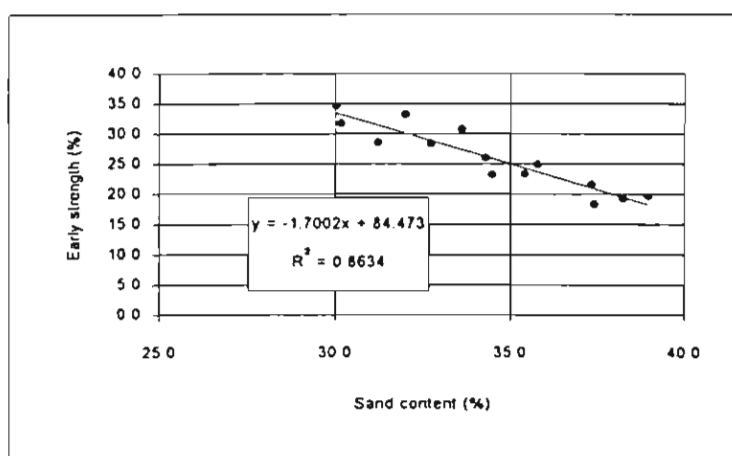
1. V.M. Malhotra and N.J. Carino. Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, 1991.
2. J.D. Dewar and R. Anderson, Manual of ready-mixed concrete, 2nd edition, Chapman & Hall, 1992.
3. Y. Kasai, Testing methods of cement and water content in fresh concretes and estimation of 28 day strength at early age - state of the art in Japan, Testing during concrete construction: Proceedings of an International RILEM workshop, edited by H.W. Reinhardt, pp. 58-81, March 1990.
4. T. Pheeraphan, Accelerated curing of concrete with microwave energy, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, M.I.T., 1997.
5. ประพนธ์ พึ่งแพง และ วีรวัฒน์ อำนางเรืองไกร, การประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทสามโดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ, เอกสารรายงานการวิจัยตามหลักสูตรการศึกษาระดับปริญญาตรี, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิชาวิศวกรรมศาสตร์ กองการศึกษาโรงเรียนนายเรืออากาศ, กรุงเทพฯ, 2541.
6. M.I. Dumangas Jr., The use of microwave curing technique to estimate the long-term strength of normal concrete, M.Eng.Thesis, School of Civil Engineering, A.I.T., Bangkok, April 1999.
7. W.A.G.Voss and T. Greenwood-Madsen., Brief Communication: A simple instrument for measuring microwave oven power, The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, Vol. 22, No.4, 1987.
8. L. Cayliani, Prediction of compressive strength of normal concrete with superplasticizers based on microwave-cured concrete strength, M.Eng.Thesis, School of Civil Engineering, A.I.T., Bangkok, April 2000.



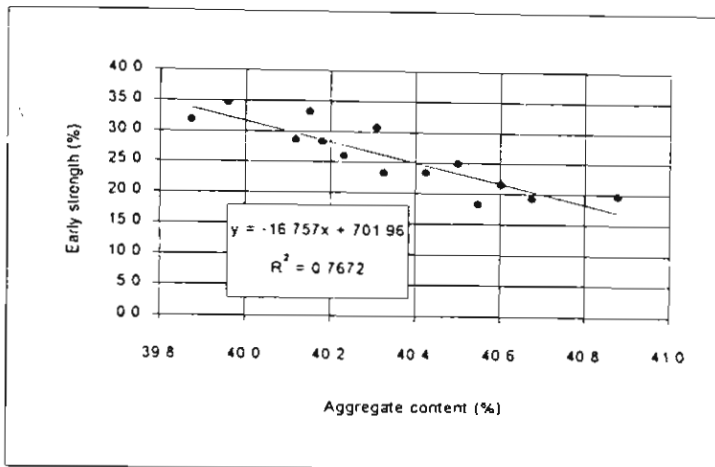
รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของน้ำ (%)
กับ ค่ากำลังอัดที่ 5.5 ชั่วโมงเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน (%)



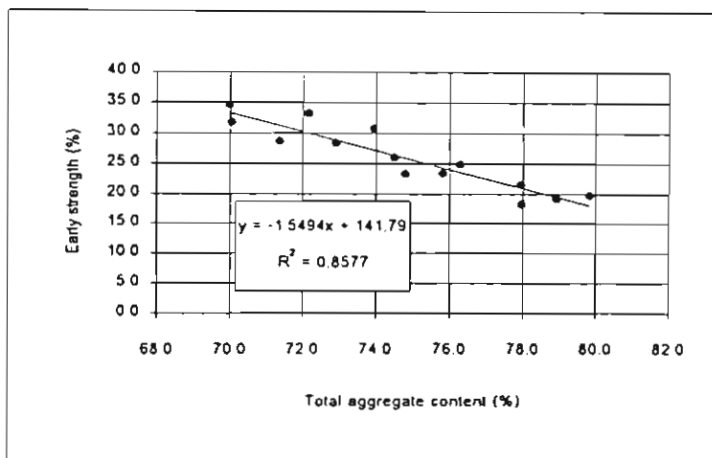
รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของปูนซีเมนต์ (%)
กับ ค่ากำลังอัดที่ 5.5 ชั่วโมงเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน (%)



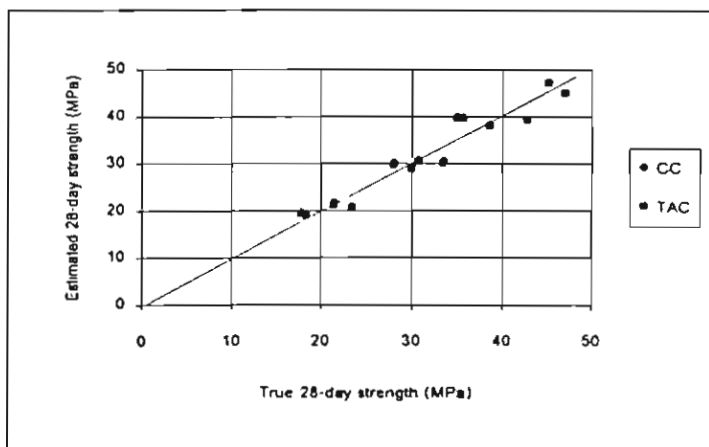
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของทราย (%)
กับ ค่ากำลังอัดที่ 5.5 ชั่วโมงเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน (%)



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของหิน (%)
กับ ค่ากำลังอัดที่ 5.5 ชั่วโมงเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน (%)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของวัสดุผสม(หินและทราย) (%)
กับ ค่ากำลังอัดที่ 5.5 ชั่วโมงเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน (%)



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดจริงที่ 28 วันกับ ค่ากำลังอัดที่ 28 วันที่ประมาณค่าได้
ที่ได้จากการใช้ปริมาณปูนซีเมนต์ (CC) และ ปริมาณวัสดุผสม (TAC)

Estimation of 28-Day Strength of Concrete in 5.5 Hours based on Very High Accelerated Strength after Curing with Microwave Energy

Thanakorn Pheeraphan¹
Lilik Cayliani², Mario I. Dumangas Jr.² and Pichai Nimityongskul²

¹Department of Civil Engineering, Royal Thai Air Force Academy
Saimai, Bangkok 10220, THAILAND

²School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology
Klong Luang, Pathumthani 12120, THAILAND

Abstract

The estimation of compressive strength of ordinary Portland cement concrete at 28 days based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy is investigated. The optimum microwave curing process is first determined. Then the process is applied to concrete. The possible early age for the strength estimation is found to be at 5.5 hours. Two relations are established for 28-day strength estimation. One is the relationship between water/cement ratio and the accelerated strength at early age. The other is the relationship between water/cement ratio and 28-day strength. Using these two established relations, the 28-day strength estimation which require only the accelerated strength at 5.5 hours yield about $\pm 15\%$ errors.

1. Introduction

The rapid growth of the construction has been recognized in the last decade and the demand for estimating the long-term strength at an early age is increasing together with the increase in recent construction works. Thus, a new attitude has been developed with recognition of the benefits of knowing the potential strength of concrete at the earliest possible time after concrete has been placed, while there is still room for adjustment or remedy.

Several methods developed in Japan on 28-day strength estimation have been compared by Kasai (1990). The methods include test methods for unit amount of cement, water, water/cement ratio and accelerated strength test of concrete and mortar including hot water curing, high temperature curing in a sealed, restricted molds and rapid hardening method using set accelerating admixture. These methods have not been used widely yet because of their accuracy, time required to estimate, expense for the equipment, and hardness to perform.

Microwave curing technique has shown to be effective to produce concrete with very high early strength with insignificant reducing in long-term strength (Leung and Pheeraphan, 1997). However, rapid strength development of concrete not only favors construction operations such as pre-casting and repairing but also can be applied in long-term strength estimation. In this paper, the accelerated strength test using microwave curing technique to estimate the 28-day strength normal concrete based on the very high accelerated strength is illustrated. The method is found to be simple, fast, cheap, and accurate.

2. Experimental Program

2.1 Specimen preparation and curing process

In this study, ordinary Portland cement is used. Limestone with a maximum size of 20 mm, and local construction sand, which are used as coarse and fine aggregates, respectively, are washed and dried in a conventional oven for 24 hours and then left in the air for one day before use.

Seven cylinders of 76.2 mm diameter and 152.4 mm height are cast in polyethylene moulds for each mix. Thirty minutes after water contacts cement, four of them are cured with microwave energy while the rests are cured normally. The specimens are arranged in a ring pattern on the turntable in the microwave cavity to obtain uniform heating. After microwave curing, the specimens are removed from the oven and covered with plastic sheets to continue curing process.

To perform microwave curing, a kitchen microwave oven model Goldstar MS-4025 with internal cavity dimensions of 390 x 268 x 400 mm, is used. It can generate output power as high as 850 watts based on the International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 705 rating standard.

To obtain early-age compressive strength of concrete, two microwave-cured specimens are de-moulded and capped with sulphur mortar at thirty minutes before testing for compressive strength. The rest of the microwave-cured specimens as well as the normal-cured specimens, are de-moulded after 24 hours and cured in water until testing at later ages.

2.2 Experimental procedures

The optimal process of microwave curing, which is defined as the process which provides high early-age and later-age strengths for concrete with a minimum amount of applied microwave energy, is determined first. The factors affecting the optimal process include delayed time which is the total time between the cement contacts water and the time before application of microwave energy, total heating time, early testing time and optimal microwave power. The delayed time and the total heating time are previously determined by Leung and Pheeraphan (1997) to be at 30 and 45 minutes, respectively. Therefore, the early testing time and optimal power must be determined first.

Then several mix proportions whose designs are based on the method of American Concrete Institute and some specified proportions have been performed and applied with the microwave energy. The accelerated strength at early age and regular strength at 28 days are therefore measured and compared. The relationship between the mix proportions, the accelerated strength, and the strength at 28 days can then be established. Finally, the estimation of long-term compressive strength can be made based on the established relationship.

3. Results and Discussion

To determine the optimal power, an early testing time is chosen to be at 6 hours and the cement:sand:aggregate proportion and water/cement ratio are fixed at 1:1:1.5 and 0.50, respectively, while several microwave power levels are varied. The results of compressive strength at 6 hours and 14 days of microwave-cured concrete (MCC) are compared with the strength at 14 days of normally cured concrete (NCC) as shown in Fig.1. It is obvious that the optimal power is at P40(or 362 watts) for 30-minute heating and P30(or 275 watts) for 15-minute heating (see Fig.1).

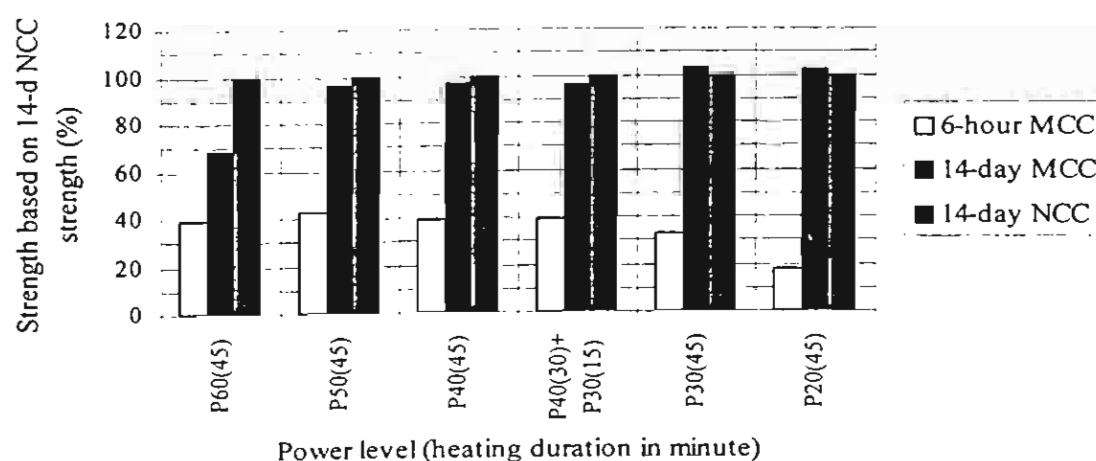


Figure 1. Effect of microwave power application on compressive strength of concrete with C:S:A=1:1:1.5 and w/c = 0.50

It should be noted that P## denotes the percentage power of full microwave output power which can be measured out in watt unit using the method suggested in the IEC Publication 705 (Voss and Greenwood-Madsen, 1987).

To determine the earliest testing time, the testing times are varied from 5 to 6 hours while the optimal power is used. Fig.2 shows the results of compressive strength at 5, 5.5, and 6 hours of microwave-cured concrete based on the strength at 14 days of normally cured concrete. It can be concluded that the earliest strength testing time is chosen to be at 5.5 hours since its strength at 5.5 hours, which is about 8.69 MPa, is considered to be low enough for measurement. For example, if w/c ratio greater than 0.50 is used, such as 0.75, the 5.5-hour strength may be too small to measure.

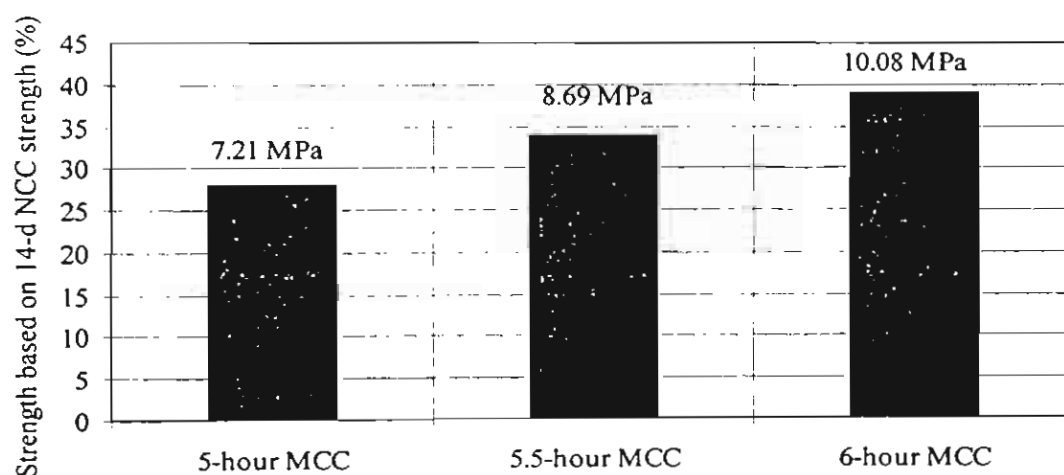


Figure 2. Effect of microwave power at P40(30)+P30(15) on compressive strength of concrete with C:S:A=1:1:1.5 and w/c = 0.50 at different early ages

In addition, temperature measurement in the centre of one of the concrete specimens after microwave curing is carried out. It is found that the temperatures of specimens with the same mix proportion at 6, 5.5, and 5 hours are at 35-37°C, 37-38°C, and 38-42°C, respectively.

After all factors affecting the optimal process are determined, the microwave curing technique based on the optimal process are applied to concrete with several mixing proportions. The accelerated strength at 5.5 hours and the later-age strength at 28 days are then measured and plotted against the parameters from mix proportions to establish the relations that may be needed for strength estimation.

3.1 Relationship between the w/c ratio, the accelerated strength, and the 28-day strength of normally cured concrete

Fig.3 shows the plots of the w/c ratio, the accelerated strength at 5.5 hours of microwave-cured concrete, and the 28-day strength of normally cured concrete. From the plots, two following relations can be derived as

$$w/c = (1/-4.2705) * \ln(S_{5.5h-MCC}/81.7228) \quad (1)$$

$$S_{28d-NCC} = 122.2387 * \exp^{-2.5942(w/c)} \quad (2)$$

Once the $S_{5.5h-MCC}$ is known, the w/c can be computed from eqn.(1) and will then be used in eqn.(2) to compute out the 28-day strength of normally cured concrete.

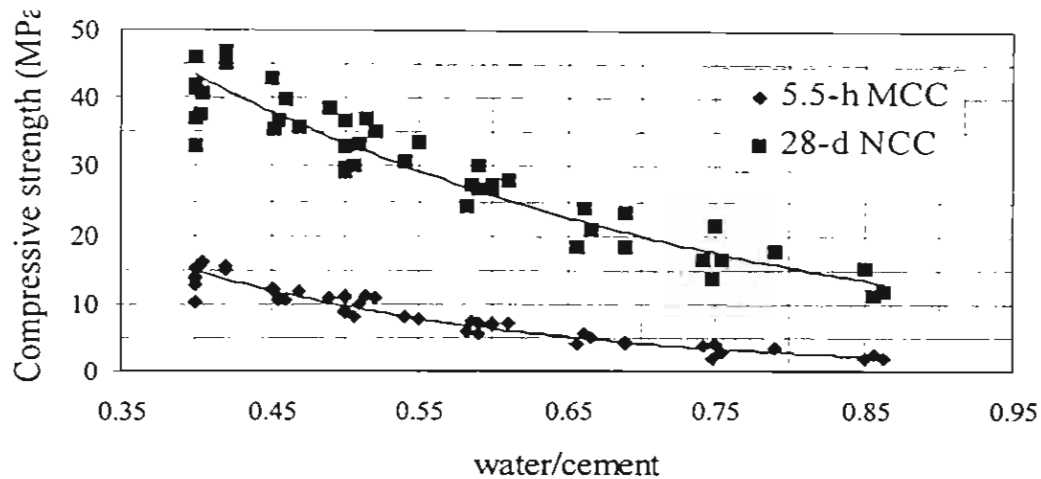


Figure 3. The relationship between water/cement ratio, accelerated strength at 5.5 hours of microwave-cured concrete, and 28-day strength of normally cured concrete.

3.2 Estimation of 28-day strength of concrete in 5.5 hours

From above, two relations to estimate the 28-day strength of normally cured concrete are established. The first relation in eqn.(1) directly takes the value of accelerated strength to compute for w/c which is then used to compute the 28-day strength from the second relation in eqn.(2). Therefore, the accelerated strength at 5.5 hours is only required to estimate the 28-day strength.

Using the established relations in eqns.(1) and (2) to estimate the 28-day strength, it is found that the percentage of error is within about ± 15 . Fig.4 compares the true and estimated compressive strength at 28 days.

In addition, to obtain the strength of the standard size 152.4x304.8 mm specimen at 28 days, it is found that the correction factor of 0.936 must be multiplied to the strength of 76.2x152.4 mm cylindrical specimen.

As a result, it is believed that the very high accelerated strength due to microwave curing can also be useful in long-term strength estimation of high performance concrete except that determination of factors affecting optimal process must be carried out.

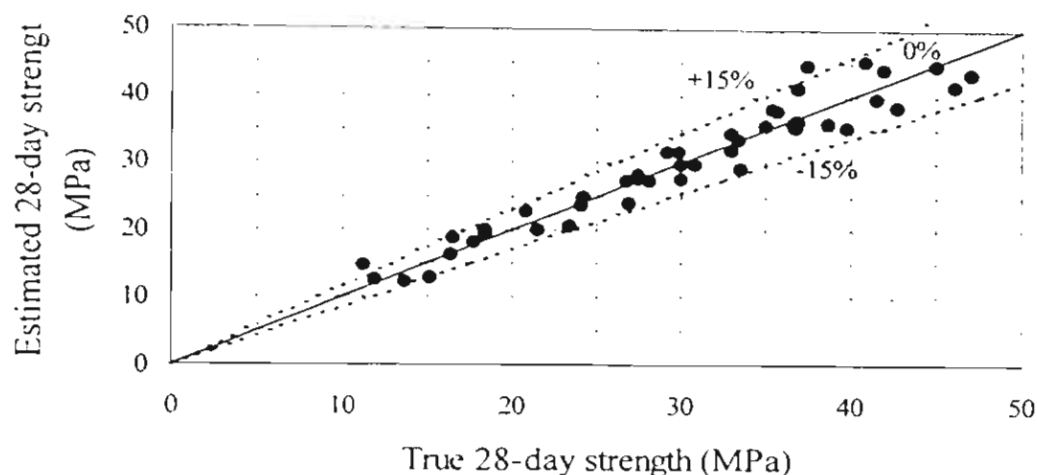


Figure 4. Comparison of 28-day estimated compressive strength obtained from estimation based on eqn.(1) and (2) versus true strength at the same age

4. Conclusion

The method to estimate the 28-day strength of concrete using the very high accelerated strength of concrete cured with microwave energy is possible within only 5.5 hours. Based on the relationship established from w/c ratio, accelerated strength at 5.5 hours, and 28-day strength, the estimation which requires only the accelerated strength from measurement yields ± 15 percentage of error.

5. Acknowledgment

This research work is supported by a postdoctoral fund from the Thailand Research Fund. The second and third author's study and research at Asian Institute of Technology are supported by the government of Japan and Asian Development Bank of Japan, respectively.

6. References

- Kasai, Y. (1990). "Testing methods of cement and water content in fresh concretes and estimation of 28 day strength at early age - state of the art in Japan", *Testing during concrete construction: Proceedings of an International RILEM workshop*, edited by H.W. Reinhardt, 58-81.
- Leung, C.K.Y. and Pheeraphan, T. (1997). "Determination of optimal process for microwave curing of concrete", *Cement and Concrete Research*, **27**(3), 463-472.
- Voss, W.A.G. and Greenwood-Madsen, T. (1987). "Brief communication: a simple instrument for measuring microwave oven power", *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, **22**(4), 209-211.

PREDICTION OF LATER-AGE COMPRESSIVE STRENGTH OF NORMAL CONCRETE BASED ON THE ACCELERATED STRENGTH OF CONCRETE CURED WITH MICROWAVE ENERGY

Thanakorn Pheeraphan^{a*}

Lilik Cayliani^b, Mario I. Dumangas Jr.^b and Pichai Nimityongskul^b

^aRoyal Thai Air Force Academy

Department of Civil Engineering, Bangkok 10220, Thailand

^bAsian Institute of Technology

School of Civil Engineering, Pathumthani 12120, Thailand

ABSTRACT

Microwave energy can accelerate the hydration of cement, resulting in rapid strength development of concrete in an early period. In this paper, prediction of later-age compressive strength of normal concrete, made with rapid hardening and ordinary Portland cement, based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy was investigated. To accelerate curing properly, the optimal microwave curing process for concrete was first determined and then was applied to concrete. The possible early ages for the strength prediction were found to be at 3.5 and 5.5 hours for concrete made with rapid hardening and ordinary Portland cement, respectively. For each cement type, a formula for the strength prediction was derived from the relationship between accelerated early-age strength of concrete cured with microwave energy and later-age strength of normally cured concrete. Predictions of strength at 7 days for concrete made with rapid hardening Portland cement and 28 days of concrete made with ordinary Portland cement were within 15% agreement with actual test results.

KEYWORDS: Microwave Processing (PROCESSING), Compressive Strength (PROPERTIES), Portland Cement (COMPOSITION)

1. INTRODUCTION

Compressive strength of concrete is clearly the most important property for quality control in concrete production and construction. Therefore, knowing potential later-age concrete strength at the earliest possible time after concrete is produced, especially in a few hours, can be beneficial for necessary remedy or adjustment.

Several methods that were developed in Japan on the rapid test method for early age prediction of concrete quality were reviewed and compared by Kasai [1]. The methods to predict 28-day concrete strength consisted of test methods for unit amount of cement, water, water/cement ratio in fresh concrete and the accelerated strength

*For further details, contact Dr. Thanakorn Pheeraphan, Department of Civil Engineering, Royal Thai Air Force Academy, Bangkok, 10220, Thailand or via E-mail at petevmi@alum.mit.edu

tests of fresh concrete and mortar that included hot water curing, high temperature curing in a sealed, restricted mold and the rapid hardening method, using set accelerating admixture. These methods, however, were not used widely because of a number of shortcomings. To accurately predict the later-age strength, a relatively long curing period (more than 24 hours) was still required before the early age test was performed. Also, costly equipment might be required, and the tests were difficult to perform

Tango [2] classified several methods to predict the strength of cementitious material, mostly at 28 days, as (1) accelerated curing methods by heating or using accelerating admixtures, (2) correlations with early age strengths under standard curing conditions, and (3) correlation methods using other characteristics such as chemical composition, cement fineness, heat of hydration, estimated porosity, and early-age sonic pulse velocity. Most of these methods still required over 24 hours before early age tests could be performed. For example, the American standard test method, using the results of early-age compressive values obtained from conventional curing to project potential later-age strength, required an early-age strength test at no less than 24 hours [3].

In this study, the accelerated curing method using the microwave-heating technique for later-age strength prediction is illustrated. With this technique, early-age strength values measured within a few hours can be correlated to later-age strength values. Microwave heating is based on the internal energy dissipation associated with the excitation of molecular dipoles and ions in electromagnetic fields. It was shown to be effective to accelerate hydration and produce concrete with very high early strength with insignificant reduction in later-age strength [4-5]. Rapid early strength development of concrete not only favors construction operations, such as pre-casting and repairing, but can also be useful in later-age strength prediction.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

Ordinary Portland cement and rapid hardening Portland cement were used to produce concrete mixture. Limestone with a maximum size of 20 mm, and local construction sand were washed and dried in a conventional oven for 24 hours before use. No admixture was added to the mix in this study.

Seven 76.2-mm. by 152.4-mm. specimens were cast in polyethylene moulds for each batch. Thirty minutes after water was added, four of them were cured with microwave energy while the others were cured normally. To obtain uniform heating, the moulds in the microwave oven were arranged in a circular pattern on the turntable. After microwave curing, each mould was removed from the cavity and covered with a plastic sheet to continue the curing process. To measure the accelerated early-age strength, the microwave-cured specimens were removed from their moulds with a piston, 30 minutes before the compression test and then capped with sulphur mortar. For later-age strength tests of the microwave-cured specimens and the normal-cured specimens, the specimens were de-moulded after one day and cured in water at room temperature until testing time.

To perform microwave heating, a commercial kitchen microwave oven with internal cavity dimensions of 390-mm.(width) by 268-mm.(height) by 400-mm.(depth) was used. Its output power could be adjusted from 10 to 100% of full output power, which was specified to be equal to 850 watts based on the International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 705 rating standard [6]. Thus, to refer to the microwave power level in this work, P# was used where # represented the percentage number of the full output power. For instance, P40 represented the power level at 40% of full output power. Although the standard method in the IEC Publication 705 was used to measure microwave output power of the oven at its maximum microwave power setting, in this work for comparison purposes, the same method was adopted to obtain the output powers in unit of watt at various power settings.

To obtain the formula for prediction of later-age compressive strength of normal-cured concrete, a two-step procedure was adopted for each type of cement. Firstly, the optimal microwave curing process was determined and used to accelerate hydration of concrete mixtures with several mix proportions. Then, the relationship between the accelerated early-age strength, and the later-age strength of normal-cured concrete was established to derive a formula for the strength prediction.

3. RESULTS

3.1 Result of optimal microwave curing process

To obtain the optimal process for each cement type, the method of trial and error was used. The cement: sand: aggregate proportion of 1:1:1.5 and water/cement ratio of 0.50 were employed. The optimal process of microwave curing was defined as a microwave curing process that provided high early-age and later-age strength with a minimum amount of applied microwave energy [4]. The processing parameters affecting the optimal process were (1) application time after mixing, (2) duration of application, (3) early-age test time and (4) microwave power.

Leung and Pheeraphan [4-5] found an optimal microwave curing process for concrete, cast with rapid hardening Portland cement, to gain both high early-age and later-age strength, compared to later-age strength of concrete cured normally. The processing parameters included an application time after mixing of 30 minutes, an application duration of 45 minutes, an early-age test time of 4.5 hours, and an average microwave power below 400 watts. However, since the number of specimens heated in the microwave oven and the type of microwave oven used in their works were different from those used in this study, some parameters affecting the optimal process needed to be modified. Here, for both cement types, the application time after mixing for 30 minutes and the application duration of 45 minutes were employed while the microwave power and the early-age test time needed be determined.

To determine both parameters, the method of trial and error was used. Firstly, the early-age test time was arbitrarily fixed, while the microwave power was varied, to determine the optimal power. This was because for each experimental setup, i.e., when different types/brands of microwave ovens or different sizes, shapes and

numbers of heated specimens were used, the appropriate microwave curing power for concrete was more difficult to determine, while the early-age test time could be set approximately based on previous works. Then, using the determined optimal microwave power, the early-age test time was varied and the most appropriate time could be determined.

3.1.1 *Concrete with rapid hardening Portland cement*

To determine the power, the early-age test time was fixed at 4.5 hours as high early strength could be measured at 4.5 hours in previous work (Leung and Pheeraphan [4,5]). Five different microwave power levels were investigated and compared as listed below:

- Case 1: Power at P20 (198 watts)
- Case 2: Power at P30 (275 watts)
- Case 3: Power at P40 (362 watts)
- Case 4: Power at P50 (396 watts)
- Case 5: Power at P60 (543 watts)

For each case, the early-age compressive strength (at 4.5 hours) and the later-age strength (at 7 days) were measured and compared with the 7-day strength of normal-cured specimens. The results for all cases were shown in Fig. 1(a). In the figure, it could be noticed that when the applied power level increased from P20 to P60, the 4.5-hour accelerated strength increased from 25 to 53% of the 7-day strength of normal-cured concrete (NCC), while the 7-day strength of microwave-cured concrete (MCC) decreased from 109 to 79% of the 7-day strength of normal-cured concrete. The explanation could be that, for microwave-cured specimens, high early strength could be obtained owing to the effect of accelerated cement hydration, but the later strength could be reduced enormously due to the effect of the increased porosity and microcracking from overheating.

By the definition of the optimal process mentioned above, it was obvious that the optimal power should be between P40 and P30 for 45-minute heating (see Fig. 1(a)). Therefore, to obtain the optimal power that consumed less power, the combination of power levels between P40 and P30 should be investigated. Pheeraphan [5] reported that, for the microwave curing process, higher power should be applied during the early heating period because an application of relatively high heating power at the early period, especially during the plastic stage, could accelerate hydration advantageously. During the plastic stage, microwave application could remove free water before setting, leading to low permeability [7] and high early-age and later-age strength [4-5]. After this high-power-application period, the network structure of concrete began to form so it was preferable to apply low heating power from this point forward. Hence, it should be advantageous to arbitrarily apply a combination of power levels at P40 and P30 power for 30 minutes and 15 minutes, respectively, to determine the optimal power. The results in Fig. 1(b) showed that its 4.5-hour accelerated strength was as high as 55%, while the 7-day strength of microwave-cured concrete was at 96% of normally cured concrete. It should be noticed that the hybrid heating power caused a higher percentage of early strength based on the 7-day strength

of normally cured concrete, compared to the results of cases of single heating power at P30 and P40, which were at 32 and 40%, respectively. This is probably due to the effect of an application of relatively high heating power at the early period, followed by a lower heating power, as explained above. Therefore, the combination of P40 for 30-minute heating and P30 for 15-minute heating was considered to be optimal among the cases studied here.

The early-age test time was initially set at 4.5 hours. After the optimal power was obtained, the best early-age test time needed to be determined. Using the determined power level at P40, for 30-minute heating, and P30, for 15-minute heating, four different early-age test time values were investigated and compared. Fig. 2 showed that the accelerated strength values at 3, 3.5, 4, and 4.5 hours were about 24, 40, 44, and 55% of the 7-day strength of concrete cured normally. It should be noticed that the rate of strength development was highest during the period of 3 to 3.5 hours and became lower after 3.5 hours. Since the strength at early age was very sensitive to small variations in time during the first few hours, it was therefore advantageous to select the early-age test time to be at the point whose rate of strength development was not too high. Thus, the earliest test time should be at 3.5 hours among the cases studied.

To conclude, the optimal microwave curing process for rapid hardening Portland cement consists of the processing parameters as shown in Table 1.

Table 1. Determined processing parameters affecting the optimal microwave curing process for rapid hardening Portland cement

#	Processing parameters	Determined value
1	Application time after mixing	30 minutes
2	Duration of application	Total 45 minutes
3	Microwave power	P40 (for 30-minute heating) + P30 (for 15-minute heating)
4	Early-age test time	3.5 hours

3.1.2 Concrete with ordinary Portland cement

To determine both microwave power and early-age test time for this cement type, a similar approach as in 3.1.1 was employed. It should be noted that, due to the time limit here, the later age was set at 14 days instead of 28 days for determination of both parameters affecting the optimal process. This is truly valid because, in order to determine these parameters, the accelerated early-age and later-age strength values of microwave-cured concrete are compared to the later-age strength value of normal-cured concrete. Normally, for concrete produced with ordinary Portland cement, its 14-day strength is about 80% or more of the 28-day strength.

Since the preliminary test indicated that the strength of concrete made with ordinary Portland cement could be measured at 6 hours, the early-age test time was fixed at 6

hours. Five different microwave power levels (same as in 3.1.1) were investigated and compared. For each case, the early-age compressive strength (at 6 hours) and the later-age strength (at 14 days) were measured and compared with the 14-day strength of normal-cured specimens. The results were shown in Fig. 3(a). In the figure, it could be noticed that when the applied power level increased from P20 to P60, the 6-hour accelerated strength increased from 18 to 40% of the 14-day strength of normal-cured specimens, while the 14-day strength of microwave-cured specimens decreased from 102 to 68% of the 14-day strength of normal-cured specimens. The explanation was similar to that for rapid hardening Portland cement. Again, it was obvious that the optimal power should be between P40 and P30 for 45-minute heating (see Fig. 3 (a)). A similar combination of power levels at P40 and P30 power, for 30-minute heating and 15-minute heating, respectively, was tested for optimal power. The results in Fig. 3(b) showed that its 6-hour accelerated strength was at 39%, while the 14-day strength of microwave-cured concrete was at 96% of normally cured concrete. Therefore, the combination of P40, for 30-minute heating, and P30, for 15-minute heating, was considered to be optimal among the cases studied here.

Since the early test time was initially set at 6 hours, the possible early test time needed to be determined after the optimal power was obtained. Using the determined power level at P40, for 30-minute heating, and P30, for 15-minute heating, three different early test time values were investigated and compared. Fig. 4 showed that the accelerated strength values at 5, 5.5, and 6 hours were about 28, 34, and 39% of the 14-day strength of concrete cured normally. It should be noticed that the rate of strength development was highest during the 5-5.5 hours among these cases and became lower after 5.5 hours. Thus, the earliest test time was considered to be at 5.5 hours among the cases studied.

To conclude, the optimal microwave curing process for ordinary Portland cement consists of the processing parameters as shown in Table 2.

Table 2. Determined processing parameters affecting the optimal microwave curing process for ordinary Portland cement

#	Processing parameters	Determined value
1	Application time after mixing	30 minutes
2	Duration of application	Total 45 minutes
3	Microwave power	P40 (for 30-minute heating) + P30 (for 15-minute heating)
4	Early-age test time	5.5 hours

3.2 Relationship between the accelerated early-age strength, and the later-age strength of normally cured concrete for later-age strength prediction

After all processing parameters affecting the optimal microwave curing process for each cement type were determined, the optimal process was applied to several concrete mixtures with different mix proportions. The accelerated early-age strength

and the later-age strength of normally cured concrete were then measured and compared to establish a relationship for later-age strength prediction.

An equation for later-age prediction was determined for each cement type. The applicability of the equation to later-age strength prediction was assessed by considering the difference between the predicted and the measured values.

3.2.1 Concrete with rapid hardening Portland cement

The possible early testing age for this cement type was found to be at 3.5 hours while the later age was selected at 7 days. To derive an equation for later-age strength prediction, the accelerated strength at 3.5 hours and the later-age strength at 7 days were plotted and compared.

Fig. 5 shows a plot of the accelerated strength at 3.5 hours of microwave-cured concrete, and the 7-day strength of normally cured concrete. From the plot, the following equation can be obtained as

$$S_{7d-NCC} = 9.3912 * (S_{3.5h-MCC})^{(0.5220)} \quad (\text{Eq. 1})$$

where $S_{3.5h-MCC}$ is accelerated strength at 3.5 hours (MPa), and
 S_{7d-NCC} is strength of normally cured concrete at 7 days (MPa).

Once the accelerated strength at 3.5 hours is measured experimentally, Eq. (1) is used to predict the 7-day strength of normally cured concrete. For the range of 7-day compressive strength between 13–41 MPa, it was found that the maximum percentage of error was within $\pm 13\%$. Fig. 6 showed the measured and predicted compressive strength at 7 days.

3.2.2 Concrete with ordinary Portland cement

For ordinary Portland cement, the possible early testing age was found to be at 5.5 hours while the later age was set at 28 days. To derive an equation for later-age strength prediction, the accelerated strength at 5.5 hours and the later-age strength at 28 days were measured and plotted (Fig. 7). From the figure, the following equation can be derived as

$$S_{28d-NCC} = 8.5459 * (S_{5.5h-MCC})^{(0.6003)} \quad (\text{Eq. 2})$$

where $S_{5.5h-MCC}$ is accelerated strength at 5.5 hours (MPa) and
 $S_{28d-NCC}$ is strength of normally cured concrete at 28 days (MPa).

Eq. (2) can be used to predict the 28-day strength of normally cured concrete once the accelerated strength at 5.5 hours is measured. Similarly, it was found that the maximum percentage of error was within about $\pm 15\%$ for the range of 28-day

compressive strength between 11–47 MPa. Fig. 8 showed the measured and predicted compressive strength at 28 days.

4. DISCUSSION

The concept of using the microwave curing technique in later-age strength prediction is to apply an optimal microwave curing process to concrete mixture to achieve high strength in a short period of time, while minimizing the reduction in later age strength. The formula for later-age strength prediction can be derived from the relationship between the accelerated early-age strength values and the later-age strength values. The accuracy of this prediction method significantly relies on several factors such as source of cement, type of aggregates, and microwave curing process. Therefore, it is necessary to carry out the preliminary test to establish a formula to predict later-age strength for concrete made with known materials before using this prediction method.

It is obvious that the crucial task for this method is to determine the optimal microwave curing process. Four processing parameters affecting the optimal process were investigated for each cement type. It was found that the early-age test time was different for each type of cement, while the rest of the parameters were the same. For rapid hardening Portland cement, the possible early-age test time was only 3.5 hours after mixing while it was 5.5 hours for ordinary Portland cement. This is because concrete with rapid hardening Portland cement can develop higher early strength during early age than concrete with ordinary Portland cement. For both cement types, the optimal power was at P40, for 30-minute heating, and P30, for 15-minute heating, and the application time after mixing was at 30 minutes.

After the determined optimal microwave curing process was applied to several concrete mixtures with different mix proportions, their accelerated strength values could be used to establish a relationship with the later-age strength values of concrete cured normally. The plots in Fig. 5 and 7 showed that a good relationship between the accelerated strength and the later-age strength could be obtained. A simple formula for prediction could then be derived for each cement type.

The results of the comparison of measured and predicted compressive strength in Fig. 6 and 8 showed that, for the range of compressive strength between 11–47 MPa, the prediction yielded a percentage of error within about $\pm 15\%$. It shows that the microwave curing technique has high potential for later-age strength prediction based on strength values measured at an early age.

A similar approach can also be applied to concrete with any chemical admixture, except that determination of processing parameters affecting optimal process must be carried out again. However, a new parameter must be introduced in place of an application time after mixing, since chemical admixture can significantly affect the setting and hardening time of concrete resulting in different rates of strength development of concrete. Current work in developing such a technique is under investigation and the result will be available soon.

According to the American standard, the compressive strength at 28 days of 152.4-mm. by 304.8-mm. cylinder is usually required. It was found here that the average strength value of 76.2-mm. by 152.4-mm. cylinder used throughout this work was about 106.8 percent, compared to that of the standard-sized cylinder. Hence, the correction factor of 0.936 must be multiplied to the strength value obtained from a 76.2-mm. by 152.4-mm. cylinder to compare with the strength value of the standard-sized cylinder.

5. CONCLUSION

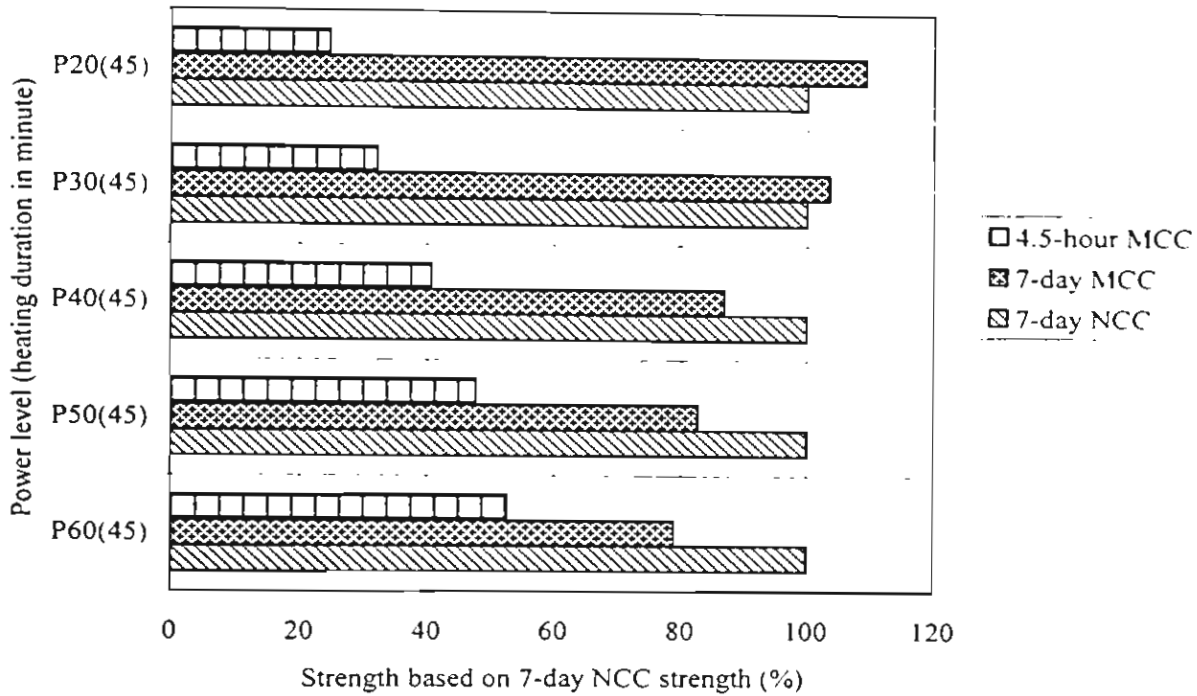
Using the microwave curing method, it is possible to predict the later-age strength of normal concrete from compressive strength test, performed as early as 3.5 and 5.5 hours for rapid hardening and ordinary Portland cement, respectively. For each cement type, the prediction using a formula derived from the relationship between the accelerated early-age strength and the later-age strength of normal-cured concrete is within 15% of experimentally measured values.

6. ACKNOWLEDGMENT

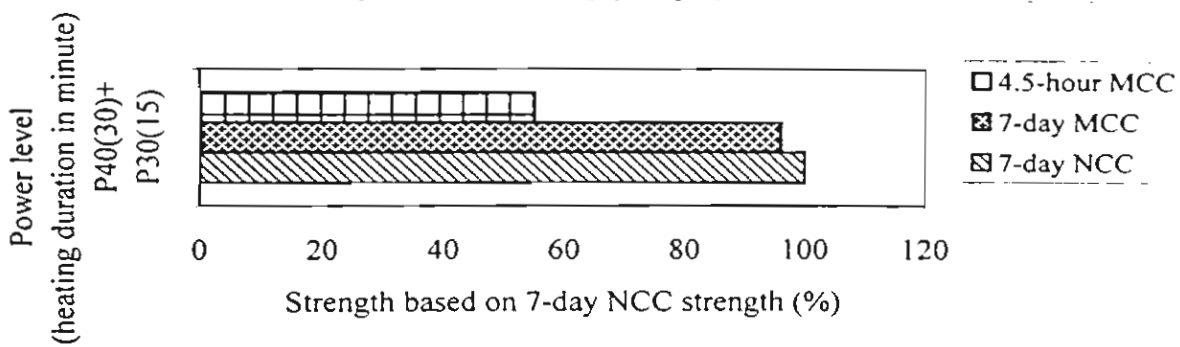
This work was supported by a postdoctoral grant from the Thailand Research Fund. The government of Japan and Asian Development Bank of Japan supported the second and third author's study and research at Asian Institute of Technology, respectively.

7. REFERENCES

1. Y. Kasai, Testing methods of cement and water content in fresh concretes and estimation of 28 day strength at early age - state of the art in Japan, in: H.W. Reinhardt (Eds.), Testing during concrete construction: Proceedings of an International RILEM workshop, March 1990, pp. 58-81.
2. C.E. de Siqueira Tango, An extrapolation method for compressive strength prediction of hydraulic cement products, *Cem Concr Res* 28 (7) (1998) 969-983.
3. Am. Soc. Test. Mat., Standard test method for developing early-age compression test values and projecting later-age strengths, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.02, C 918-88, USA, 1991.
4. C.K.Y. Leung, and T. Pheeraphan, Determination of optimal process for microwave curing of concrete, *Cem Concr Res* 27 (3) (1997) 463-472.
5. T. Pheeraphan, Accelerated curing of concrete with microwave energy, M.I.T., USA, Ph.D. Thesis, 1997.
6. W.A.G. Voss and T. Greenwood-Madsen, Brief communication: a simple instrument for measuring microwave oven power, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 22 (4) (1987) 209-211.
7. X. Wu, J. Dong, and M. Tang, Microwave curing technique in concrete manufacture, *Cem Concr Res* 17 (2) (1987) 205-210.



(a)



(b)

Fig. 1. Effect of microwave power application on compressive strength of concrete with rapid hardening Portland cement, C:S:A=1:1:1.5 and W/C = 0.50

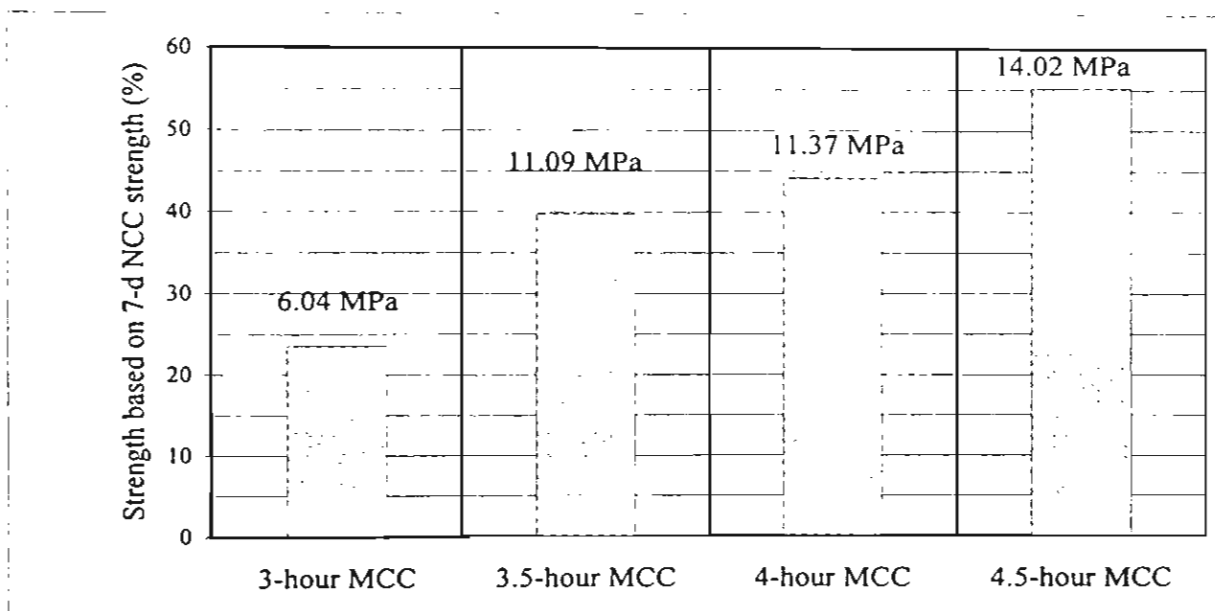
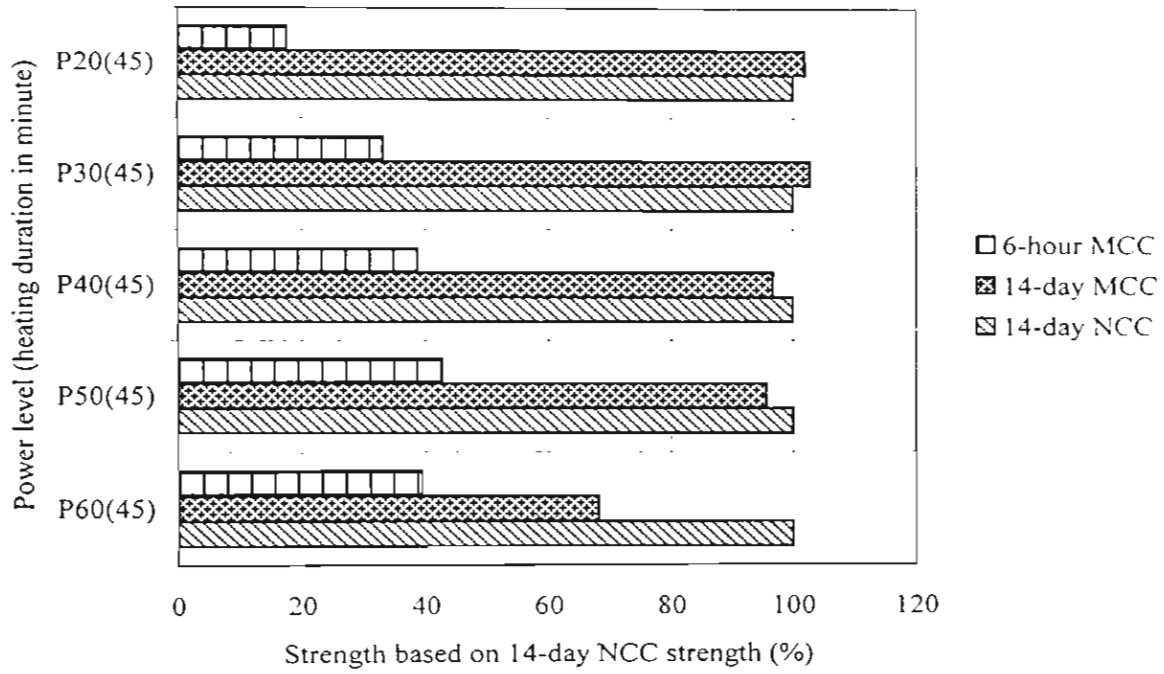
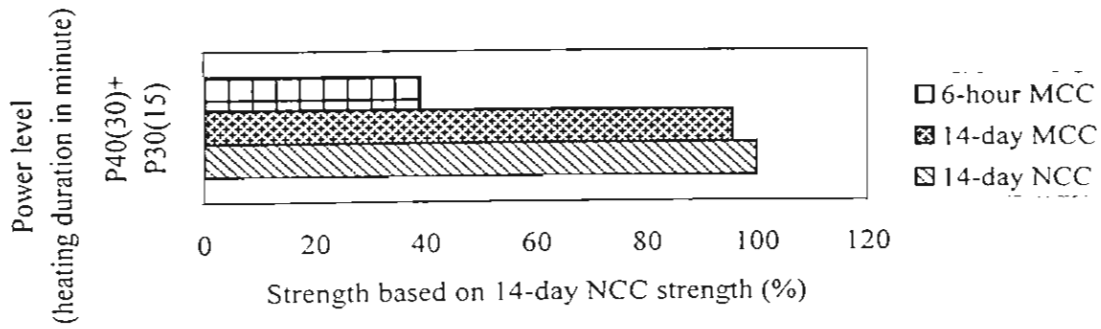


Fig. 2. Effect of microwave power at P40(30)+P30(15) on compressive strength of concrete with rapid hardening Portland cement, C:S:A=1:1:1.5 and W/C = 0.50 at different early ages



(a)



(b)

Fig. 3. Effect of microwave power application on compressive strength of concrete with ordinary Portland cement, C:S:A=1:1:1.5 and W/C = 0.50

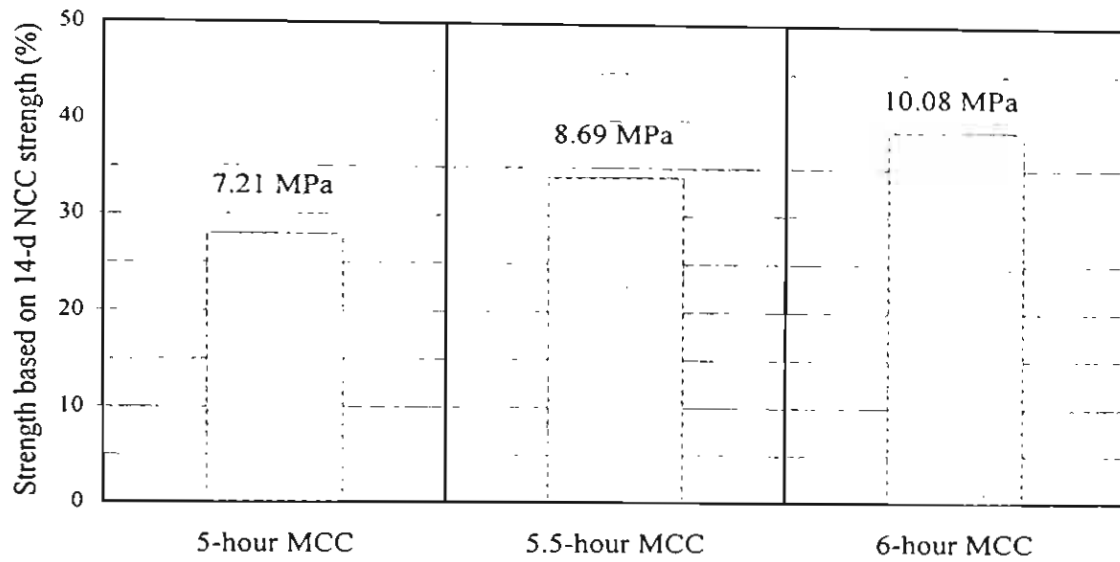


Fig. 4. Effect of microwave power at P40(30)+P30(15) on compressive strength of concrete with ordinary Portland cement, C:S:A=1:1:1.5 and W/C = 0.50 at different early ages

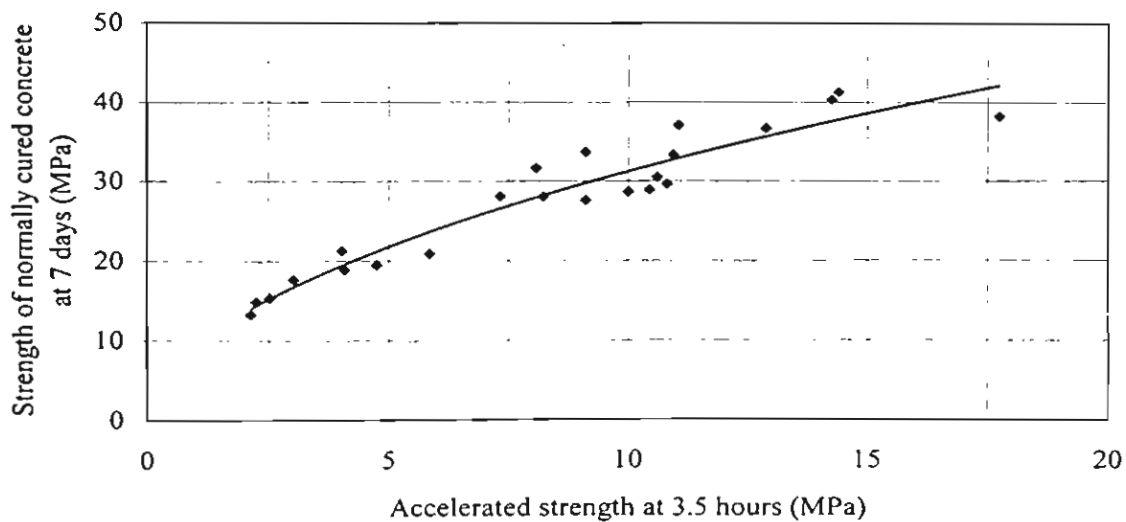


Fig. 5. A relation between strength determined by accelerated curing and 7-day strength of normally cured concrete with rapid hardening Portland cement

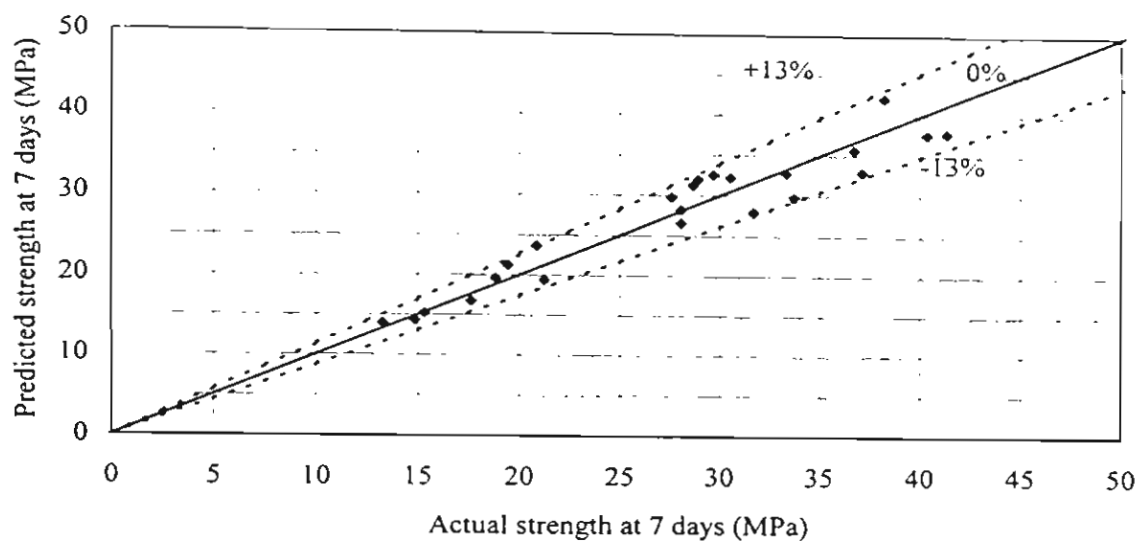


Fig. 6. Comparison of 7-day predicted compressive strength obtained from prediction versus actual strength at the same age

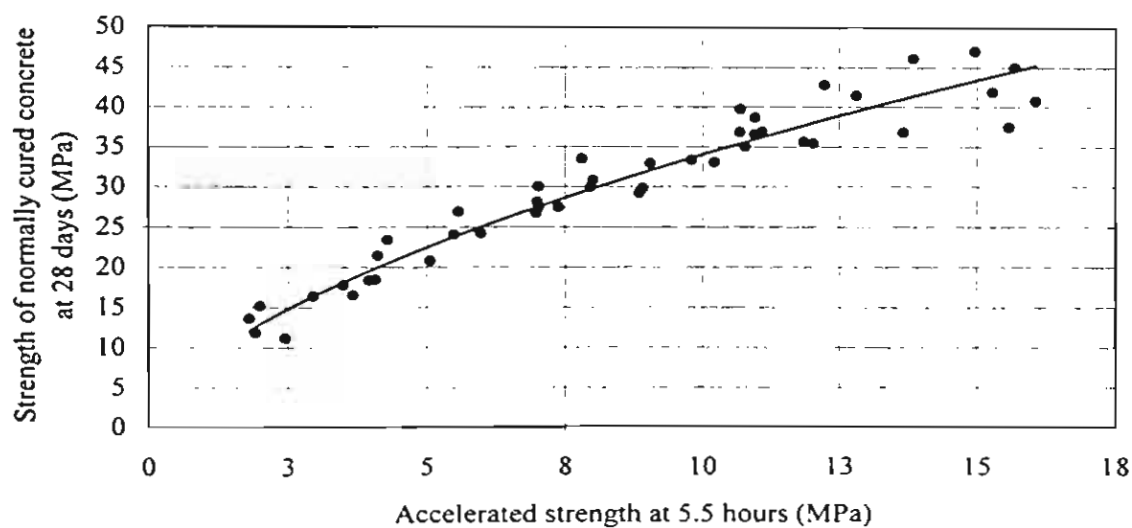


Fig.7. A relation between strength determined by accelerated curing and 28-day strength of normally cured concrete with ordinary Portland cement

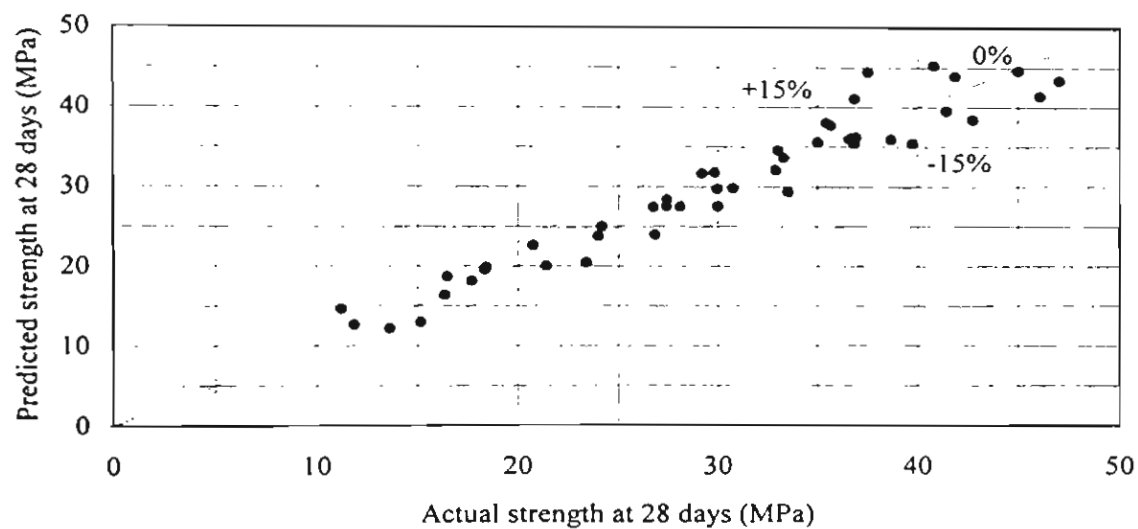


Fig. 8. Comparison of 28-day predicted compressive strength obtained from prediction versus actual strength at the same age