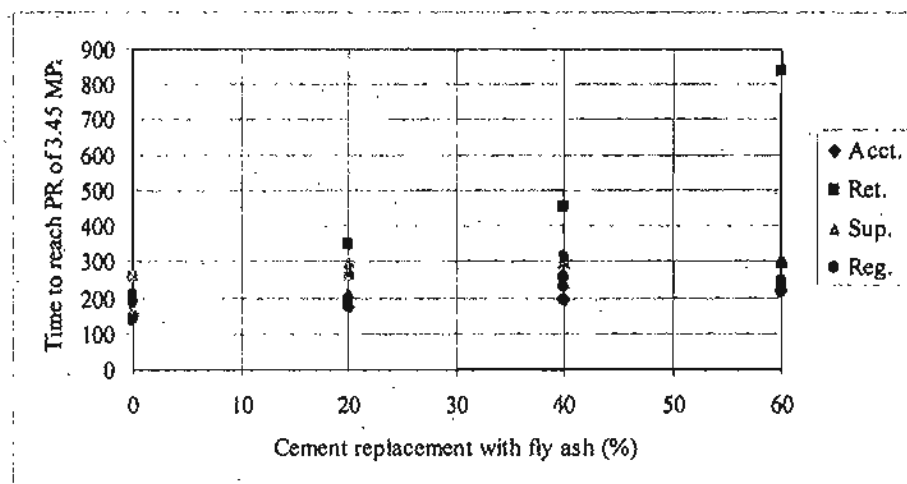


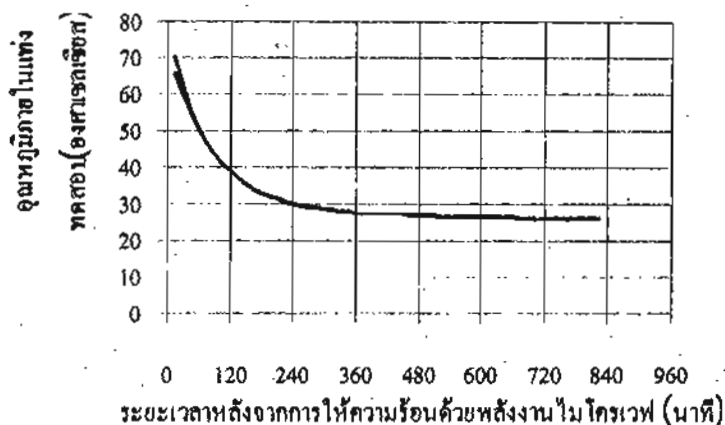
ตารางที่ 4.2 ตัวแปรของกระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด
สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีสารเคมีผสมเพิ่ม

ตัวแปร	การทดลองนี้
1. ส่วนผสมของคอนกรีต	$S/CA = 0.6; S/(CA+S)=0.375;$ $W/B=0.51; F/(C+F)=0.60$
	$S/CA = 0.6; S/(CA+S)=0.375; W/B=0.34;$ $F/(C+F)=0.60; 2\% \text{superplasticizer}$
2. ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟและระยะเวลาในการให้ความร้อน	P40 และ P30 เป็นเวลา 30 และ 15 นาที
3. ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ	ใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่ 3.45 MPa เป็นตัวกำหนด
4. เวลาทดสอบที่ระยะแรก	?
5. เวลาทดสอบที่ระยะยาว	28 วัน
6. จำนวนและขนาดของแท่งทดสอบที่ให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ	แท่งทดสอบรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 76.2 มม. สูง 152.4 มม. จำนวน 4 แท่ง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลของสารเคมีผสมเพิ่มต่อระยะเวลาหลังจากผสมคอนกรีตและทดสอบมอร์ตาร์แล้วได้ค่าการต้านทานการจมของเข็มเท่ากับ 3.45 MPa เทียบกับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย (Acct. = สารเร่งการก่อตัว; Ret. = สารหน่วงการก่อตัว; Sup. = สารลดน้ำปริมาณสูง; Reg. = ไม่มีการเติมสารเคมีผสมเพิ่ม)

ผลการทดสอบหาเวลาทดสอบที่ระยะแรกสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.8 พบว่า ระยะเวลาที่เลือกในการทดสอบหาค่ากำลังอัดที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 360 นาทีหลังจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ซึ่งอุณหภูมิภายในแท่งทดสอบ ณ เวลาดังกล่าวมีค่าต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ทว่าการพัฒนากำลังอัดในระยะเวลาดังกล่าวนี้เหมาะสมที่จะทดสอบและใช้ค่าดังกล่าวในการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาวต่อไป



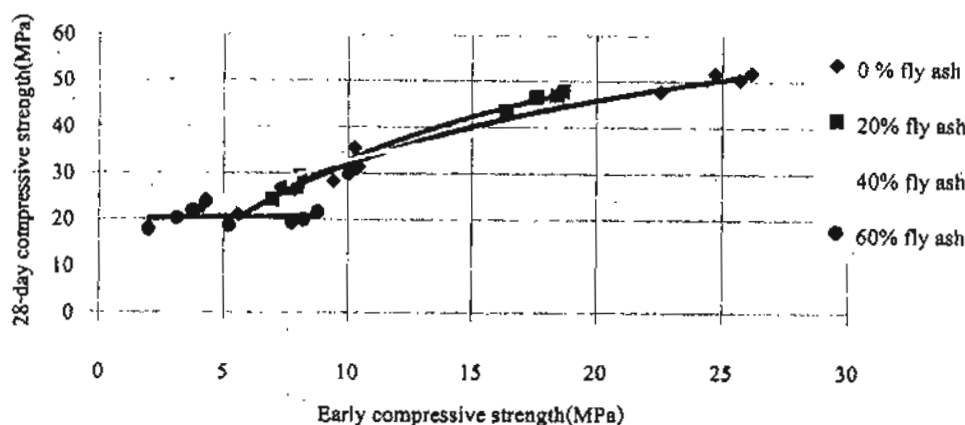
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบหลังจากผ่านการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.1.2.2 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 และ 91 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ

หลังจากที่ทราบค่าตัวแปรของกระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว กระบวนการการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้จะถูกนำมาใช้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีส่วนผสมใดๆ เพื่อหาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากบ่มปกติที่ 28 และ 91 วัน เพื่อที่จะหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 และ 91 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ

รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน โดยแสดงให้เห็นถึงผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยที่สัดส่วน 0% 20% 40% และ

60% ที่มีต่อความสัมพันธ์ที่ได้ ซึ่งจากรูปจะเห็นว่ากราฟแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในสัดส่วน 60% นั้นความสัมพันธ์ที่ได้ค่อนข้างไม่ชัดเจน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-60%

ดังนั้นจึงควรสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกและค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน เฉพาะเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-40% เท่านั้น (ดูรูปที่ 4.10) ซึ่งผลของการสร้างความสัมพันธ์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$S_{28d-NCC} = -0.0339 \cdot (S_{early-MCC})^2 + 2.4839 \cdot (S_{early-MCC}) + 10.325 \quad (4.2)$$

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

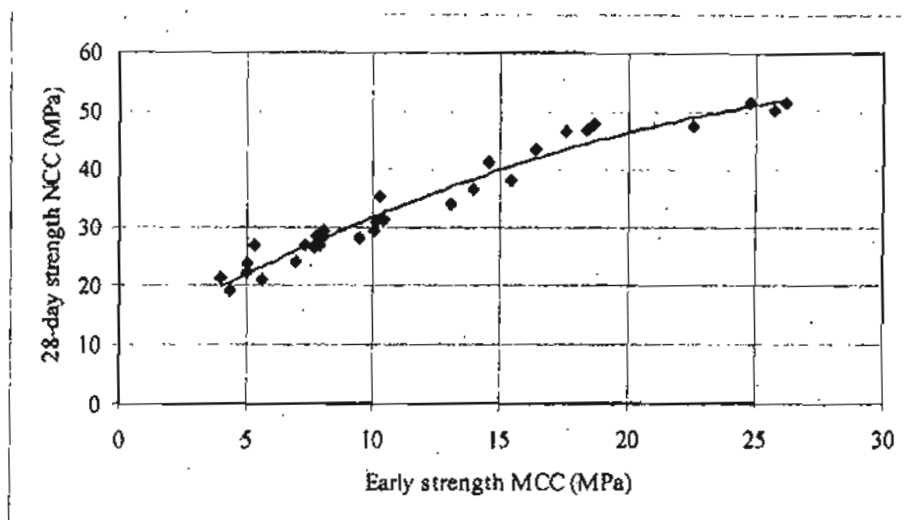
$S_{28d-NCC}$ = ค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ได้จากการบ่มปกติ (MPa)

สำหรับค่ากำลังอัดที่ 91 วันนั้น สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกและค่ากำลังด้านทานแรงอัดจริงของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 91 วันสำหรับเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-60% (ดูรูปที่ 4.11) ซึ่งผลของการสร้างความสัมพันธ์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการอย่างง่ายได้ดังนี้

$$S_{91d-NCC} = -0.031*(S_{early-MCC})^2 + 2.2289*(S_{early-MCC}) + 16.585 \quad (4.3)$$

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

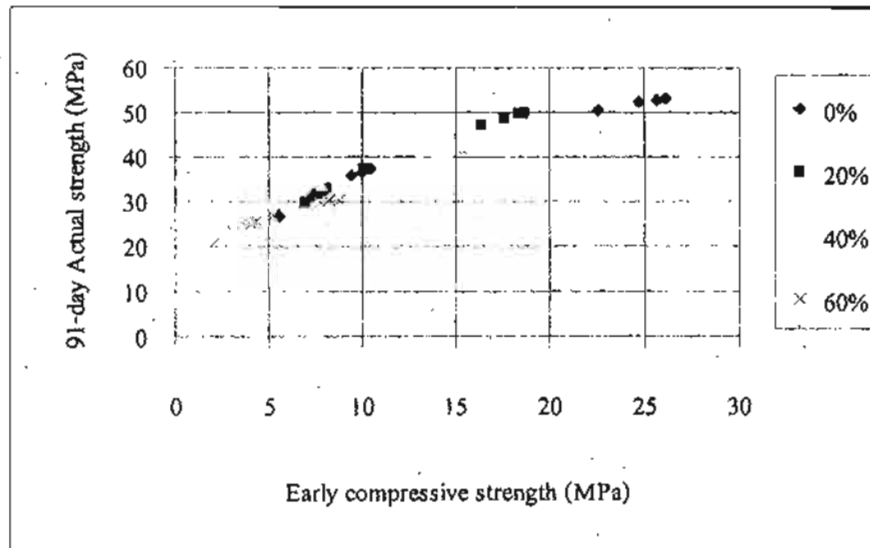
$S_{91d-NCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 91 วันของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ได้
จากการบ่มปกติ (MPa)



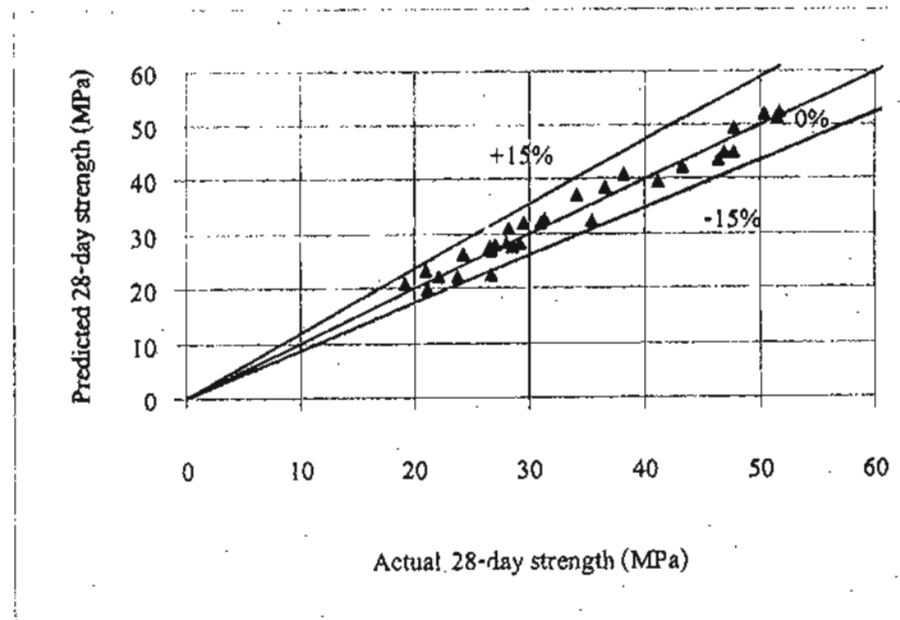
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว
ที่ระยะแรกและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วันของคอนกรีต
ผสมเถ้าลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-40%

4.1.2.3 ผลการทำนายค่ากำลังอัดที่ระยะยาว

จากสมการ 4.2 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันได้ เมื่อทราบ
ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ
โดยไม่จำเป็นต้องทราบเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในช่วง 0-40% ผลการทำนายค่า
แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 พบว่าให้ร้อยละผิดพลาดไม่เกินประมาณ ± 16 โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัด
จริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 18-52 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม.

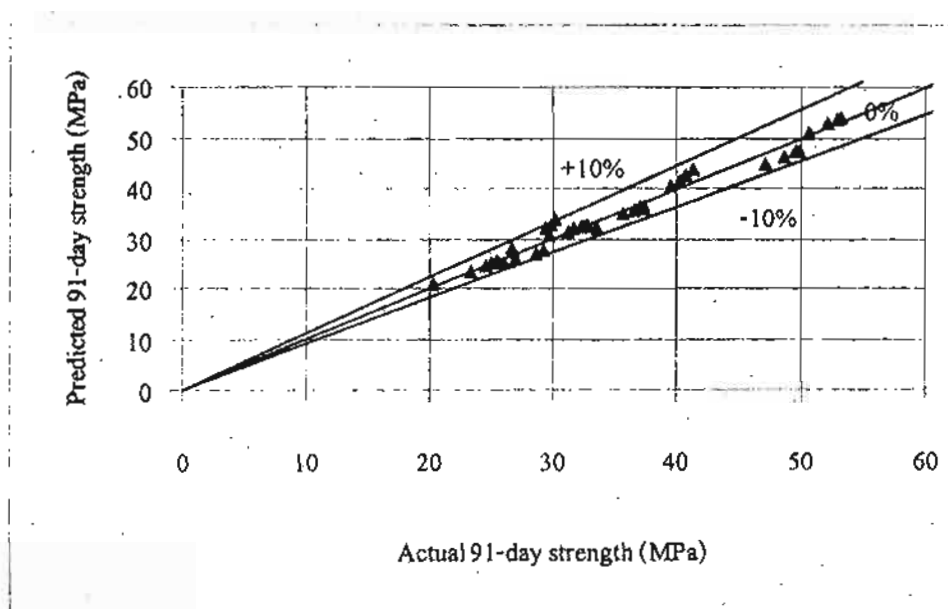


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 91 วันของคอนกรีตผสมถั่วลอยที่มีเปอร์เซ็นต์การแทนที่ 0-60%



รูปที่ 4.12 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า

จากสมการ 4.3 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 91 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ โดยไม่จำเป็นต้องทราบเปอร์เซ็นต์การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในช่วง 0-60% ผลการทำนายค่าแสดงไว้ในรูปที่ 4.13 พบว่าให้ร้อยละผิดพลาดไม่เกิน ± 12 โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 91 วันมีค่าอยู่ในช่วง 20-53 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม.



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 91 วันของคอนกรีตกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 91 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า

4.2 ผลการพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่มให้สามารถใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ

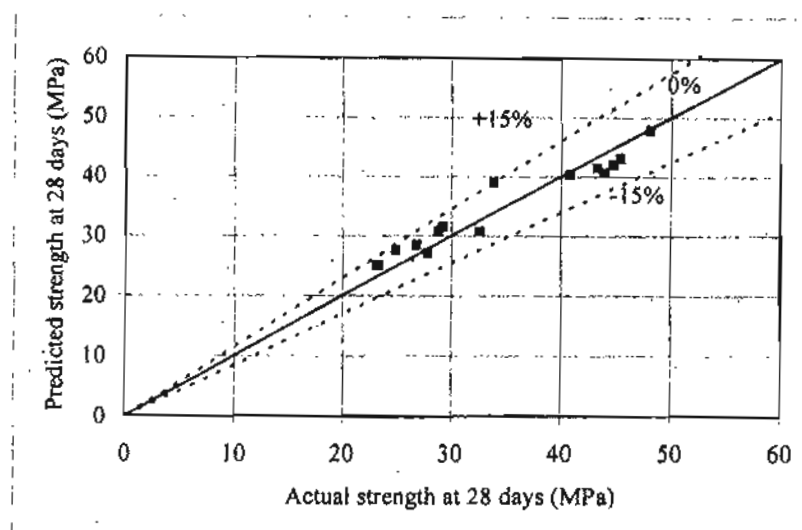
4.2.1 ผลการตรวจสอบสูตรที่ใช้ในการทำนายค่า ในที่นี้แบ่งออกเป็นการตรวจสอบโดยใช้คอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ และคอนกรีตผสมเสร็จที่ขายในท้องตลาด โดยสูตรที่ใช้ในการทำนายค่าคือ

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

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

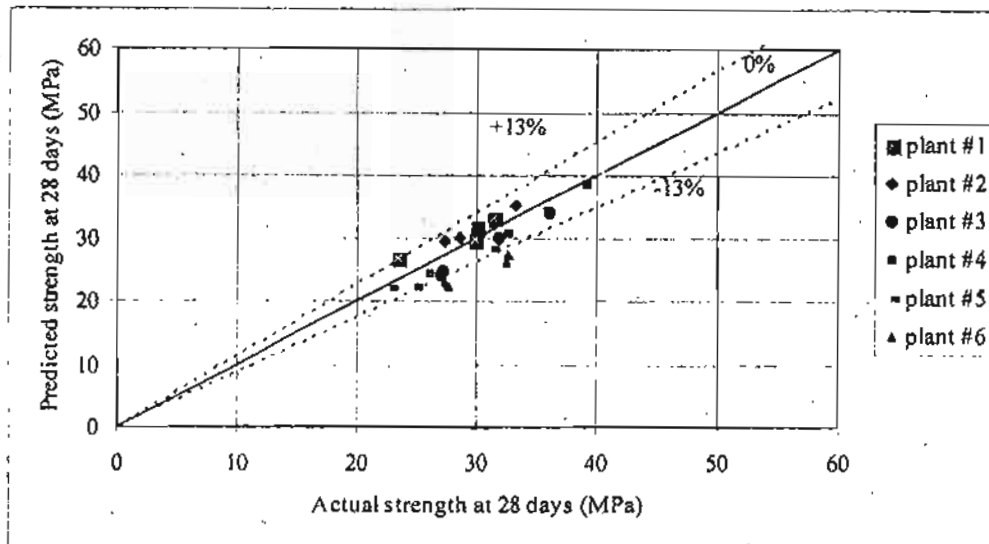
$S_{28d-NCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ (MPa)

4.2.1.1 คอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ ผลการทดสอบสูตรโดยใช้คอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ จำนวน 15 ตัวอย่าง แสดงไว้ในรูปที่ 4.14 ซึ่งพบว่าร้อยละผิดพลาดไม่เกินประมาณ ± 15 โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 23-48 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม.



รูปที่ 4.14 ผลการทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ผสมในห้องปฏิบัติการ

4.2.1.2 คอนกรีตผสมเสร็จที่ขายในท้องตลาด ผลการทดสอบสูตรโดยใช้คอนกรีตผสมเสร็จจำนวน 24 ตัวอย่างจากโรงงานผลิตคอนกรีตผสมเสร็จจำนวน 6 แห่งซึ่งครอบคลุมการใช้งานในประเทศไทย โดยได้ตัวอย่างจำนวน 4 ตัวอย่างจากโรงผลิตแต่ละแห่ง แสดงไว้ในรูปที่ 4.15 ซึ่งพบว่าร้อยละผิดพลาดไม่เกิน ± 20 แต่มีอยู่ 1 โรงผลิตที่ให้ค่าร้อยละผิดพลาดมากที่สุดในช่วง 17-20 โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 23-39 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2x152.4 มม.

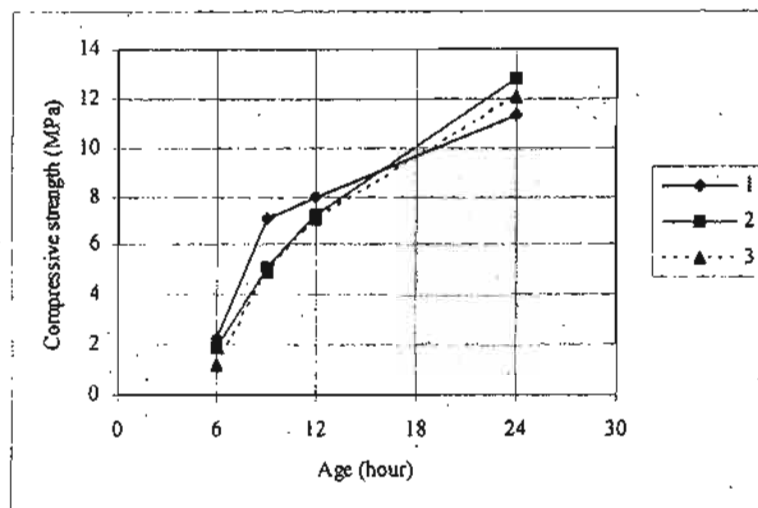


รูปที่ 4.15 ผลการทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตผสมเสร็จ

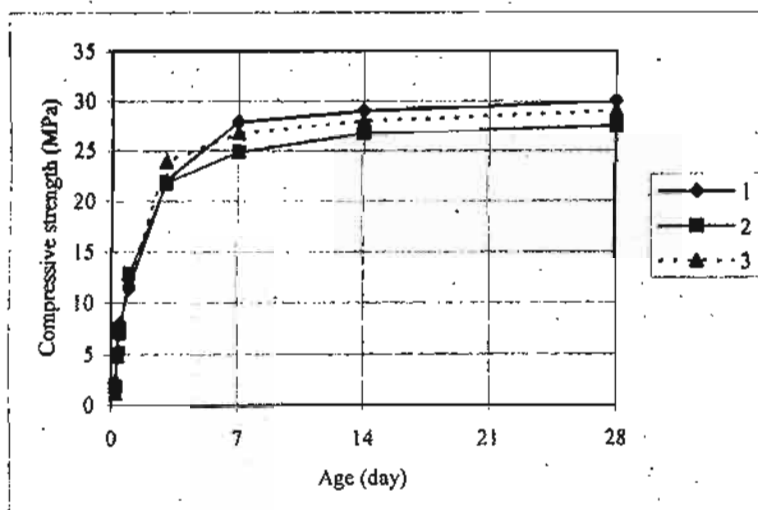
จากการตรวจสอบพบว่าสาเหตุที่โรงผลิตเบอร์ 6 ให้ค่าร้อยละผิดพลาดน้อยกว่าค่าจริงมากนั้นเป็นผลเนื่องมาจากการพัฒนากำลังอัดในช่วงระยะแรกของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้(ปูนซีเมนต์เบอร์ 3) มีค่าน้อยกว่าการพัฒนากำลังอัดในช่วงระยะแรกของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในโรงผลิตอื่นๆ(ปูนซีเมนต์เบอร์ 1 และ 2) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.16 (ก) และ (ข) โดยสูตรที่ใช้ในการทำนาค่านั้นพัฒนาขึ้นมาจากคอนกรีตที่ผลิตขึ้นจากปูนซีเมนต์เบอร์ 1

4.2.2 ผลการศึกษาคุณลักษณะของเตาอบไมโครเวฟที่นำมาใช้ จากการเปรียบเทียบเตาอบไมโครเวฟภายในท้องตลาดและต้องการนำมาใช้ เทียบกับเตาอบไมโครเวฟที่ใช้เดิมนั้นคือ GS ทั้งในเรื่องของ ขนาดภายใน ระดับกำลัง (ตามวิธีการเทียบค่าระดับกำลังของ International Electrotechnical Commission 705) และจำนวนแท่งตัวอย่างขนาด 76.2x152.4 มม.ที่สามารถนำเข้าในเตาอบไมโครเวฟได้ สามารถสรุปได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ผลการเปรียบเทียบจากตารางที่ 4.3 พบว่า สิ่งที่มีผลต่อการเลือกใช้เตาอบไมโครเวฟรุ่นที่แตกต่างออกไปจากรุ่นเดิมที่ใช้สร้างความสัมพันธ์คือระดับกำลัง และ จำนวนแท่งทดสอบที่สามารถนำเข้าเตาอบไมโครเวฟได้



(ก) ที่ระยะแรก



(ข) ที่ระยะหลัง

รูปที่ 4.16 การพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 ($w/c = 0.485$; ปูนซีเมนต์ต่อทรายกึ่งขนาดตามมาตรฐาน ASTM C 778 = 1:2.75)

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้

	เตาอบไมโครเวฟ			
ตัวย่อที่ใช้	GS	WP	HI	SH
ขนาดภายใน กว้างxสูงxลึก (หน่วย มม.)	390x268x400	312x225x390	349x220x355	374.5x231.5x391.1
ความจุ(ลิตร)	42	27	27	32
จำนวนแท่ง ตัวอย่างขนาด 76.2x152.4 มม. ที่สามารถ นำเข้าในเตาอบ ไมโครเวฟได้	4	4	3	3
ระดับกำลังตาม คู่มือเทคนิค (หน่วย วัตต์)	ทุกๆ 10% ของ ระดับกำลังที่มาก ที่สุด (850 watts)	90/160/350/ 500/650/750/ 850/1000	90/180/270/360/ 450/540/630/ 720/810/900	10%/30%/50%/ 70%/100% ของ ระดับกำลังที่มาก ที่สุด(900 watts)
ระดับกำลัง ที่วัดได้ (หน่วย วัตต์)	67/129/187/ 262/318/394/ 461/506/579/ 680	79/136/314/ 429/523/621/ 677/779	81/148/223/302/ 366/439/488/ 593/654/759	83/258/419/ 564/829

4.2.3 ผลการเสนอแนะทางในการให้พลังงานไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟแต่ละรุ่น เนื่องจากระดับกำลังและจำนวนแท่งทดสอบ ที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวของเตาไมโครเวฟแต่ละรุ่นที่ใช้แตกต่างกันออกไปนั้น เพื่อให้สามารถเลือกใช้ระดับกำลังได้อย่างเหมาะสม จึงเสนอแนวทาง 3 ข้อ ดังนี้คือ (1) พลังงานไมโครเวฟต่อแท่งตัวอย่างควรมีค่าเท่าเดิม (2) ระยะเวลาที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวเท่ากับ 45 นาที และ (3) ระดับกำลังที่เลือกใช้ควรเหมือนกันหรือใกล้เคียงกับเดิม อย่างไรก็ตาม ยังได้ศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อความแม่นยำในการทำนายค่าด้วย ซึ่งแบ่ง

ออกเป็นอัตราการใช้ความร้อนแบบเดิม(P1)และแบบสูงกว่าเดิม (P2)ตารางที่ 4.4 แสดงถึงระดับกำลังที่ใช้ จำนวนแท่งตัวอย่างและพลังงานต่อแท่งตัวอย่างที่ให้ ของเตาอบไมโครเวฟแต่ละรุ่นที่ใช้ตามแนวทาง 3 ข้อที่เสนอ รวมถึงอัตราการใช้ความร้อนที่สูงกว่าอัตราเดิม

ตารางที่ 4.4 ระดับกำลังที่ใช้ จำนวนแท่งตัวอย่างและพลังงานต่อแท่งตัวอย่างที่ให้ของเตาอบไมโครเวฟแต่ละรุ่นที่ใช้

ไมโครเวฟ- อัตราการใช้ ความร้อน- จำนวนแท่ง ทดสอบ	จำนวน แท่ง ทดสอบ	ระดับกำลัง และ เวลาที่ใช้ในการเร่งแข็งตัว (หน่วยที่ใช้เป็นวัตต์และนาที)	พลังงาน ทั้งหมดที่ ให้ (kJ)	พลังงานที่ ให้ต่อแท่ง ตัวอย่าง (kJ)	ร้อยละ ผิดพลาด
GS-P1-S4*	4	262W(30M)+187W(15M)	639.9	160.0	0
GS-P1-S3	3	262W(26M)+ 67W(19M)	485.1	161.7	1.1
WP-P1-S4	4	314W(25M)+136W(20M)	634.2	158.6	-0.9
WP-P1-S3	3	314W(15M)+136W(15M) +79W(15M)	476.1	158.7	-0.8
HI-P1-S3	3	223W(31M)+81W(14M)	482.8	160.9	0.6
SH-P1-S3	3	258W(24M)+83W(21M)	476.1	158.7	-0.8
GS-P2-S3	3	506W(11.5M)+67.5W(33.5M)	484.8	161.6	1.0
WP-P2-S4	4	523W(16M)+79W(29M)	639.5	159.9	-0.1
HI-P2-S3	3	439W(12M)+81W(33M)	476.5	158.8	-0.7

* ได้จากระดับพลังงานที่เหมาะสมจากงานวิจัยที่ผ่านมา [5]

4.2.4 ผลการทดลองใช้ระดับการให้พลังงานไมโครเวฟของเตาอบไมโครเวฟที่กำหนด

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการใช้ความร้อนแบบใกล้เคียงกับอัตราเดิม(P1) ในขณะที่ ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการใช้ความร้อนแบบสูงกว่าอัตราเดิม(P2)

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วย
พลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการให้
ความร้อนแบบใกล้เคียงกับอัตราเดิม(P1)

ค่ากำลังอัดที่ ออกแบบ (MPa)	ไมโครเวฟ-อัตรา การให้ความร้อน- จำนวนแท่ง ทดสอบ	ค่ากำลังอัดที่ ระยะแรก (MPa)	ไมโครเวฟ-อัตรา การให้ความร้อน- จำนวนแท่ง ทดสอบ	ค่ากำลังอัด ที่ระยะแรก (MPa)	ร้อยละ ผิดพลาด
15	GS-P1-S4	5.31	WP-P1-S4	5.46	2.9
15	GS-P1-S4	5.31	HI-P1-S3	5.12	-3.5
15	GS-P1-S4	5.31	GS-P1-S3	5.55	4.5
30	GS-P1-S4	8.00	WP-P1-S4	7.60	-5.0
30	GS-P1-S4	8.00	HI-P1-S3	7.53	-5.9
30	GS-P1-S4	8.00	GS-P1-S3	8.11	1.4
45	GS-P1-S4	19.21	WP-P1-S4	19.11	-0.5
45	GS-P1-S4	19.21	HI-P1-S3	20.39	6.2
45	GS-P1-S4	19.21	GS-P1-S3	18.77	-2.3

ผลการเปรียบเทียบศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนที่มีต่อความแม่นยำในการทำนาค่าจากตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าความแม่นยำในการทำนาค่าของค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการให้ความร้อนแบบใกล้เคียงกับอัตราเดิม(P1) มีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการให้ความร้อนแบบสูงกว่าอัตราเดิม(P2) ดังนั้นจึงเลือกใช้อัตราการให้ความร้อนแบบใกล้เคียงกับอัตราเดิม ทั้งนี้จากสมการที่ 4.4 จะพบว่าค่ากำลังอัดที่ 28 วันขึ้นอยู่กับค่ากำลังอัดที่ระยะแรก ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่ากำลังอัดที่ระยะแรกบอกความแม่นยำในการทำนาค่ากำลังอัดที่ 28 วันได้

4.2.5 ผลการทำนาค่ากำลังอัดที่ 28 วัน

หลังจากนั้นจึงนำแนวทางที่เสนอเพื่อกำหนดระดับกำลังและระยะเวลาสำหรับเตาอบไมโครเวฟแต่ละยี่ห้อ ไปใช้เร่งการแข็งตัวตามกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสม และนำค่ากำลังอัดระยะแรกที่ได้ไปใช้ในการทำนาค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ในที่นี้ใช้เตาอบ

ไมโครเวฟ GS ที่มีจำนวนแท่งทดสอบที่ใช้เท่ากับ 4 แท่ง HI ที่มีจำนวนแท่งทดสอบที่ใช้เท่ากับ 3 แท่ง WP ที่มีจำนวนแท่งทดสอบที่ใช้เท่ากับ 3 และ 4 แท่ง SH ที่มีจำนวนแท่งทดสอบที่ใช้เท่ากับ 3 แท่ง รูปที่ 4.17 แสดงการทำนายค่ากำลังอัดเมื่อใช้เตาไมโครเวฟและจำนวนแท่งทดสอบที่ต่างกัน ซึ่งพบว่าให้ค่าร้อยละผิดพลาดไม่เกิน ± 14

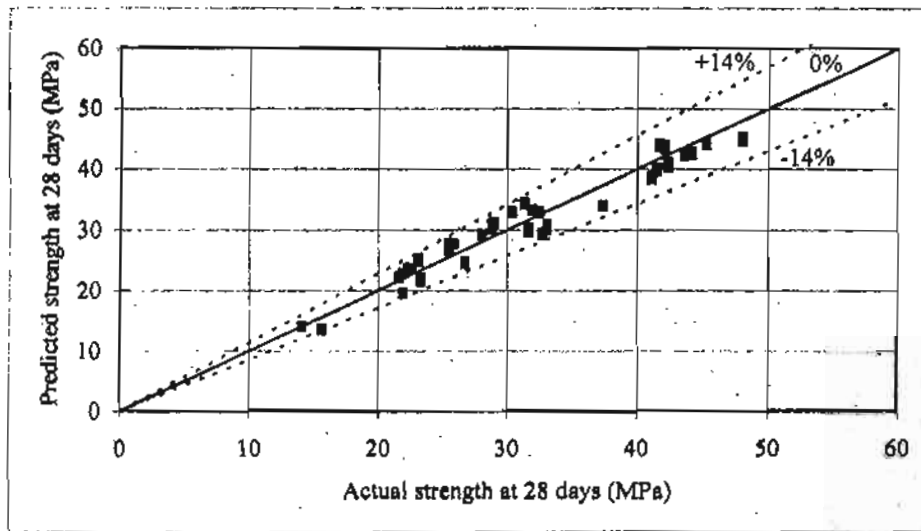
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมกับคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยอัตราการใช้ความร้อนแบบสูงกว่าอัตราเดิม(P2)

ค่ากำลังอัดที่ ออกแบบ (MPa)	ไมโครเวฟ-อัตรา การให้ความร้อน- จำนวนแท่ง ทดสอบ	ค่ากำลังอัดที่ ระยะแรก (MPa)	ไมโครเวฟ-อัตรา การให้ความร้อน- จำนวนแท่ง ทดสอบ	ค่ากำลังอัด ที่ระยะแรก (MPa)	ร้อยละ ผิดพลาด
15	GS-P1-S4	4.39	WP-P2-S4	5.50	25.3
15	GS-P1-S4	4.39	HI-P2-S3	5.54	26.2
15	GS-P1-S4	4.39	GS-P2-S3	5.16	17.5
30	GS-P1-S4	7.07	WP-P2-S4	10.18	44.0
30	GS-P1-S4	7.07	HI-P2-S3	9.12	29.0
30	GS-P1-S4	7.07	GS-P2-S3	8.65	22.4
45	GS-P1-S4	18.42	WP-P2-S4	21.06	14.3
45	GS-P1-S4	18.42	HI-P2-S3	21.54	17.0
45	GS-P1-S4	18.42	GS-P2-S3	14.28	-22.5

4.3 ผลการพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดให้สามารถทำนายค่าได้ในระยะเวลาที่เร็วขึ้น

แนวทางที่ใช้ในการลดระยะเวลาทำนายค่ากำลังอัดโดยใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟคือการลดค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ โดยค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ มีประโยชน์ในการกำหนดเวลาที่เริ่มขบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในที่นี้เสนอใช้ค่าที่น้อยกว่าเดิม คือในช่วง 0-2.78 MPa (0 - 400 ปอนด์/ตร.นิ้ว) ซึ่งเดิมกำหนดใช้ในช่วง 2.78-3.45 MPa (400-500 ปอนด์/ตร.นิ้ว) ส่วนระดับกำลังของไมโครเวฟ กำหนดให้ใช้ค่าเท่าเดิมคือที่ ระดับกำลัง 262 วัตต์เป็นระยะเวลา 30 นาที และ 187 วัตต์ เป็นระยะเวลา 15 นาที ส่วนระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

กำหนดให้ใช้ค่าเท่าเดิมคือที่ 3.5 ชั่วโมง สำหรับแท่งทดสอบขนาด 76.2x152.4 มม. จำนวน 4 แท่ง ดังนั้นจึงจะทำการศึกษาถึงผลของการใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ที่น้อยลง ที่มีต่อความแม่นยำในการทำนาค่ากำลังอัด



รูปที่ 4.17 การทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ผ่านการเรียงการแข็งตัวเมื่อใช้เดาไมโครเวฟ และจำนวนแท่งทดสอบที่ต่างกัน

เดิมระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการทำนาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่มต่างๆ ใช้เวลาประมาณ 11-20.5 ชั่วโมง โดยระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟมีค่ามากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวคือใช้เวลาประมาณ 7-16 ชั่วโมง ดังนั้นการลดระยะเวลาทำนายค่ากำลังอัดจึงเน้นที่การลดระยะเวลาในขั้นตอนนี้ ซึ่งวิธีที่ง่ายที่สุดก็จะใช้ระยะเวลาที่รอก่อนนำเข้าเตาอบไมโครเวฟที่เวลา 6, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง สำหรับแท่งทดสอบทรงกระบอกคอนกรีตที่ใช้แบบที่ทำจากโพลีเอธิลีนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. และมีความสูง 152.4 มม. และจะทำการทดสอบค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีตด้วยเช่นกันในแบบหล่อโลหะขนาด 15x15x15 ซม. ที่แยกไว้ต่างหาก

หลังจากนำแท่งทดสอบเข้าเตาอบเป็นระยะเวลาที่กำหนดไว้แล้ว จึงหักคอนกรีตเป็นระยะเวลาหนึ่งตามที่กำหนด เพื่อทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรก ส่วน แท่งคอนกรีตปกติจะถูกหักไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงทำการแกะแบบ และบ่มในน้ำจนมีอายุครบ 28 วัน จึงทดสอบค่ากำลังอัดเพื่อ

เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ระยะแรก เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการลดระยะเวลาการทำนาค่ากำลังอัด

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีต

ผลการเปรียบเทียบค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีตที่ออกแบบค่ากำลังอัดต่างกัน ไว้ที่เวลา 6, 7, 8 และ 9 ชั่วโมงหลังการผสม แสดงไว้ในตารางที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่าสามารถแบ่งช่วงเวลาดังกล่าวตามระดับของค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วง 0-100 psi และ ช่วง 300-400 psi

นอกจากนี้จากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า ที่เวลาพักหลังการผสม 6, 7 และ 8 ชั่วโมงค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นไม่มากนัก แต่ในช่วง 8-9 ชั่วโมงนั้น ค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีตจะเพิ่มสูงขึ้นมาก ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจาก ณ ช่วงเวลา 8-9 ชั่วโมงนั้นสารหน่วงการก่อตัวเริ่มหมดความสามารถในการหน่วงการก่อตัว ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไป และคอนกรีตสามารถพัฒนาค่ากำลังอัดเพิ่มมากขึ้นต่อไป ซึ่งสอดคล้องกับค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีตที่ได้ซึ่งจะมีค่าที่สูงขึ้นมาก และเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นมากกว่าช่วง 6-8 ชั่วโมง

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีตเทียบกับระยะเวลาหลังผสมคอนกรีต

เวลาที่พัก คอนกรีต ก่อนเร่งการ แข็งตัว (ชม.)	ค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ของคอนกรีต (psi.)			
	คอนกรีตที่ ออกแบบค่ากำลัง อัดที่ 200 ksc.	คอนกรีตที่ ออกแบบค่ากำลัง อัดที่ 250 ksc.	คอนกรีตที่ ออกแบบค่ากำลัง อัดที่ 300 ksc.	คอนกรีตที่ ออกแบบค่ากำลัง อัดที่ 450 ksc.
6	0	0	8	56
7	8	32	16	92
8	56	78	96	96
9	280	360	340	320

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังอัดที่ 28 วัน

ผลการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบแท่งคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ที่เวลา 6, 7, 8 และ 9 ชั่วโมงก่อนนำเข้าสู่เตาอบไมโครเวฟ กับค่ากำลังอัดของแท่งคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน แสดงไว้ในตารางที่ 4.8 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มเวลาพักคอนกรีตมากขึ้นจาก 6, 7, 8, และ 9 ชั่วโมง ค่ากำลังอัดที่ได้จากการทดสอบก็จะเพิ่มมากขึ้นไปด้วย

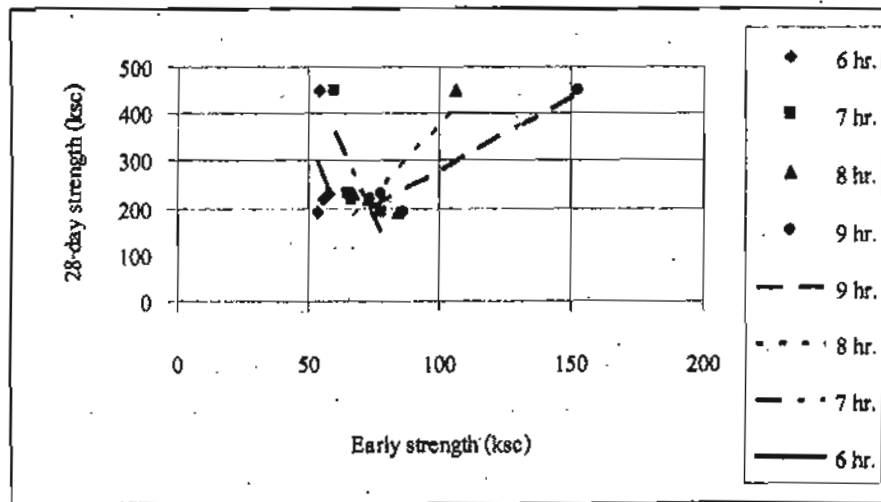
นอกจากนี้แล้ว เป็นที่น่าสังเกตว่า ค่ากำลังอัดที่เวลา 7, 8 และ 9 ชั่วโมงของคอนกรีตที่ออกแบบค่ากำลังอัดไว้ที่ 200 ksc. จะให้ค่ากำลังอัดที่สูงกว่าคอนกรีตที่ออกแบบค่ากำลังอัดไว้ที่ 250 และ 300 ksc.

ตารางที่ 4.8 ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ที่เวลาพัก 6, 7, 8 และ 9 ชั่วโมง
เปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน

ค่ากำลังอัดที่ออกแบบไว้	ค่ากำลังอัดที่ได้มาจากการกดแท่งทดสอบ (ksc.)			
	200 ksc.	250 ksc.	300 ksc.	450 ksc.
พักคอนกรีตก่อนนำเข้าสู่เตาอบ 6 ชั่วโมง	53.3	55.7	57.7	54.1
พักคอนกรีตก่อนนำเข้าสู่เตาอบ 7 ชั่วโมง	78.1	66.4	65.3	59.8
พักคอนกรีตก่อนนำเข้าสู่เตาอบ 8 ชั่วโมง	84.5	73.2	66.9	106.7
พักคอนกรีตก่อนนำเข้าสู่เตาอบ 9 ชั่วโมง	86.3	73.5	78	152.7
บ่มปกติที่อายุ 28 วัน	190	220	231	448

จากการที่แบ่งช่วงเวลาตามระดับของค่าการต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วง 0-100 psi (หรือ 6-8 ชั่วโมง) และ ช่วง 300-400 psi (หรือ 9 ชั่วโมง) นั้น เมื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกและ ที่ 28 วัน (ดูรูปที่ 4.18) จะพบว่าความสัมพันธ์ที่สูงสุดคือที่ช่วง 300-400 psi (หรือ 9 ชั่วโมง) ซึ่งสอดคล้องกับความจริงที่ว่าเมื่อเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสมแล้วคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่ต่ำกว่าย่อมพัฒนาค่ากำลังอัดได้ช้ากว่าคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดสูงกว่า ซึ่งมีข้อมูลที่เกิดไปจากนี้คือข้อมูลของคอนกรีตที่ออกแบบค่ากำลังอัดไว้ที่ 200 ksc. แต่

จากข้อมูลที่ได้นี้เพียงพอที่จะสรุปได้ว่าการลดระยะเวลาการทำนายค่านั้นสามารถลดค่าแรงด้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ได้ คือควรใช้ในช่วง 2.07-2.78 MPa(300 – 400 ปอนด์/ตร.นิ้ว) ในที่นี้คือที่เวลา 9 ชั่วโมงหลังจากเริ่มผสมคอนกรีต ซึ่งเดิมกำหนดใช้ในช่วง 2.78-3.45 MPa (400-500 ปอนด์/ตร.นิ้ว)



รูปที่ 4.18 ค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวเปรียบเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตปกติที่มีระยะพักก่อนการเร่งการแข็งตัวที่ต่างกัน

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

5.1.1 เทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ ที่อายุ 28 และ 91 วัน โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากปมปกติ โดยไม่จำเป็นต้องทราบร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย และผลการทดลองพบว่าการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 16\%$ จากผลการทดสอบจริง เมื่อร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยอยู่ในช่วง 0-40 และ ที่อายุ 91 วัน ให้ค่าผิดพลาดที่น้อยกว่าคือไม่เกิน $\pm 12\%$ จากผลการทดสอบจริง เมื่อร้อยละการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยอยู่ในช่วงที่สูงขึ้นคือ 0-60

5.1.2 เทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ ที่อายุ 28 ได้ โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากปมปกติ และผลการทดลองพบว่าการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 20\%$ จากผลการทดสอบจริง โดยไม่คำนึงถึงแหล่งปูนซีเมนต์ที่ใช้

5.1.3 เทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มได้ ที่อายุ 28 ได้ โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังด้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากปมปกติ และผลการทดลองพบว่าการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน ให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 20\%$ จากผลการทดสอบจริง โดยไม่คำนึงถึงแหล่งปูนซีเมนต์ที่ใช้

5.1.4 เทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 ได้ โดยสามารถใช้ได้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆที่มีจำนวนแท่งตัวอย่างทดสอบที่

แตกต่างกัน และใช้สมการทำนายค่ากำลังอัดเดิมที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์ที่ได้จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากบ่มปกติ และผลการทดลองพบว่า การทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 14\%$ จากผลการทดสอบจริง โดยมีแนวทางที่ใช้ในการประยุกต์เทคนิคการเร่งการแข็งตัวนี้เพื่อใช้กับเตาอบไมโครเวฟใดๆ จำนวน 3 ข้อดังนี้คือ (1) พลังงานไมโครเวฟต่อแท่งตัวอย่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. ควรมีค่าเท่ากับ 160 kJ (2) ระยะเวลาที่ใช้ในการเร่งการแข็งตัวเท่ากับ 45 นาที และ (3) ระดับกำลังไมโครเวฟที่เลือกใช้ควรเหมือนกันหรือใกล้เคียงกับเดิม

5.1.5 การลดระยะเวลาทำนายค่ากำลังอัดโดยใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ สามารถทำได้โดยการลดค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์จากเดิมที่ใช้คือ ช่วง 2.78-3.45 MPa (400-500 ปอนด์/ตร.นิ้ว) มาเป็นช่วง 2.07-2.78 MPa (300-400 ปอนด์/ตร.นิ้ว) ซึ่งสามารถลดระยะเวลาลงมาได้ประมาณ 7 ชั่วโมง แต่การเปลี่ยนแปลงค่าแรงต้านทานการจมของเข็มทดสอบในมอร์ตาร์ทำให้ไม่สามารถใช้สมการเดิมที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาหาตัวคูณอันเนื่องมาจากผลของการใช้ปูนซีเมนต์จากต่างแหล่งผลิตเนื่องจากปูนซีเมนต์ที่ใช้ในประเทศไทยมาจากหลายแหล่งผลิต จึงควรศึกษาหาผลของการใช้ ที่มีต่อการพัฒนากำลังอัด และที่มีผลต่อการทำนายค่ากำลังอัดด้วยวิธีนี้ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการทำนายค่ากำลังอัดด้วยวิธีนี้

5.2.2 เนื่องจากในปัจจุบัน มีการใช้เตาอบจากแหล่งอื่นๆ ในประเทศไทยในงานคอนกรีต จึงควรศึกษาความแม่นยำในการประยุกต์ใช้วิธีการทำนายค่ากำลังอัดนี้สำหรับคอนกรีตผสมเตาอบจากแหล่งอื่นๆ

บรรณานุกรม

1. Dewar, J.D. and Anderson, R., Manual of ready-mixed concrete, 2nd edition, Chapman & Hall, 1992.
2. 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.
3. 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.
4. Pheeraphan, T., L. Cayliani, M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul, "Prediction of later-age compressive strength of normal concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy" Cement and Concrete Research, Vol. 32, No. 4, pp. 521-527, April 2002.
5. Pheeraphan, T., T. Aneksrup and P. Nimityongskul, "Development of an optimal microwave curing process for concrete containing admixtures to predict 28-day compressive strength," Proceeding of the First National Concrete Convention, Karnchanaburi, Thailand, pp. 243-250, May 2003 (in Thai).
6. Mehta, P.K., "Influence of fly ash characteristics on the strength of Portland-fly ash mixtures," Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp.669-674, 1985.
7. Gopalan, M.K., and M.N. Haque, "Design of flyash concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 15, pp.694-702, 1985.
8. Maltais, Y. and J.Marchand, "Influence of curing temperature on cement hydration and mechanical strength development of fly ash mortars," Cement and Concrete Research, Vol. 27, No. 7, pp.1009-1020, 1997.
9. Kostogloudis, G.CH., J. Anagnostou, CH. Ftikos, and J. Marinos, "Development of a multiple linear regression model for predicting the 28-day compressive strength of portland pozzolan cement," Materials and Structures, Vol. 32, March 1999, pp.98-102.

10. Nimityongskul, P. and Sun Sayamipuk, "History and background of fly ash," EGAT Journal, Vol. 9, No. 2, April-June 2000, pp. 33-37. (in Thai)
11. เสกสรรค์และคณะ, "Prediction of strength of fly ash-concrete based on chemical composition and fineness of binder materials," Proceeding of the Fifth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Thailand, Vol. 1, pp. MAT 7-14, 1999. (in Thai)
12. Nimityongskul, P. and Tahir, M.A., "Prediction of strength of fly ash-concrete based on chemical composition and fineness of binder materials," Proceeding of the Fifth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Thailand, Vol. 1, pp. MAT 7-14, 1999.
13. Tangtermsirikul, S. and N. Nipatsat, "Compressive strength prediction model for fly ash concrete," Proceeding of the Fifth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Thailand, Vol. 1, pp. MAT 21-26, 1999.
14. Boorapa, W., C. Jaturapitakkul, V. Boonamnuyvitaya, and K. Kiattikimol, "Use of ground coarse fly ash and clinker to make Portland Pozzolan cement." Proceeding of the Fifth National Convention on Civil Engineering, Pattaya, Thailand, Vol. 1, pp. MAT 27-34, 1999. (in Thai)
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.

22. Malhotra, V.M., and N.J. Carino, Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, 1991.
23. Zoughi, R., S.D. Gray and P.S. Nowak, "Microwave nondestructive estimation of cement paste compressive strength," ACI Materials Journal, Vol. 92, No. 1, pp. 64-70, Jan.-Feb. 1995.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Sutton, Willard H., "Microwave processing of ceramic materials", Ceramic Bulletin, Vol. 68, No. 2, pp. 376-386, 1989.
28. Mehta, P.K., Concrete: Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall Inc., 1986.
29. Young, J.F., Mindess, S., Gray, R.J., and Bentur, A., The science and technology of civil engineering materials, Prentice-Hall, Inc., 1998.
30. Mindess, S. and Young, J.F., Concrete, Prentice-Hall Inc., 1981.
31. ชัยวาลย์ เศรษฐบุตร, คอนกรีตเทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 3, บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้าง จำกัด, 2537.
32. 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 การพัฒนาเทคนิคการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตโดยวิธีการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ มีดังนี้

1. ผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1.1 ได้ส่งบทความ 1 เรื่อง ไปตีพิมพ์ที่วารสาร Cement and Concrete Research แล้วเมื่อเดือน ธ.ค. 47 ในชื่อเรื่อง "Development of Concrete Compressive Strength Prediction Technique Using the Accelerated Curing with Microwave Energy" โดย T. Pheeraphan, T. Harithaithaworn, and P. Nimityongskul

1.2 คาดว่าจะสามารถส่งบทความไปตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติได้อีกอย่างน้อย 1 เรื่องในชื่อเรื่อง "Strength Prediction of fly ash concrete using microwave curing process" โดย T. Pheeraphan, K. Cheawchan, J. Wachirathamrojn, and P. Nimityongskul

2. การนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์

- เกิดความสนใจและมีเครือข่ายความร่วมมือเกิดขึ้นระหว่างบุคลากรของสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในการทำวิจัยเรื่องการนำเทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟไปใช้ในการทำนายค่าของคอนกรีตที่มีส่วนผสมอื่นๆ เพื่อประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพของการผลิตคอนกรีต

- เกิดการสร้างนักวิจัยใหม่ที่มีส่วนร่วมในการดำเนินงานวิจัยนี้ เป็นจำนวนทั้งสิ้น 6 คน คิดเป็น นักศึกษาในระดับปริญญาโทจำนวน 2 คนและปริญญาตรีจำนวน 4 คน

3. การเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการในประเทศ ต่างประเทศ และบทความเผยแพร่ในวารสารได้มีการเสนอผลงานในที่ประชุมวิชาการในประเทศ 1 ครั้ง และต่างประเทศ 1 ครั้ง ดังนี้คือ

3.1 Pheeraphan, T., T. Aneksrup and P. Nimityongskul, "Development of an optimal microwave curing process for concrete containing admixtures to predict 28-day compressive strength," Proceeding of the First National Concrete Convention, Karnchanaburi, Thailand, pp. 243-250, May 2003 (in Thai).

3.2 Pheeraphan, T., T. Harithaithaworn, and P. Nimityongskul, "Development of concrete compressive strength prediction technique using the accelerated curing with microwave energy," Proceedings of the First International Conference of Asian Concrete Federation, Chiang Mai, Thailand, Vol.1, pp.509-517, Oct. 2004.

ภาคผนวก

ภาคผนวกนี้ประกอบด้วย บทความทางวิชาการจำนวน 3 เรื่องดังนี้คือ

1. Pheeraphan, T., T. Anekruap and P. Nimityongskul, "Development of an optimal microwave curing process for concrete containing admixtures to predict 28-day compressive strength," *Proceeding of the First National Concrete Convention*, Kamchanaburi, Thailand, pp. 243-250, May 2003 (in Thai).
2. Pheeraphan, T., T. Harithaithaworn, and P. Nimityongskul, "Development of concrete compressive strength prediction technique using the accelerated curing with microwave energy," *Proceedings of the First International Conference of Asian Concrete Federation*, Chiang Mai, Thailand, Vol.1, pp.509-517, Oct. 2004.
3. Pheeraphan, T., T. Harithaithaworn, and P. Nimityongskul, "Development of Concrete Compressive Strength Prediction Technique Using the Accelerated Curing with Microwave Energy" submitted to *Cement and Concrete Research*.

การพัฒนากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อใช้ทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่มที่อายุ 28 วัน

ธนกร พิระพันธุ์¹ ทนงศักดิ์ เอนกทรัพย์² และ พิชัย นิมิตยสกุล³

¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศ

²นักศึกษานิเทศศาสตร์, ³รองศาสตราจารย์ สำนักวิชาวิศวกรรมโยธา สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย

บทคัดย่อ: พลังงานไมโครเวฟสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ได้ ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังอัดที่รวดเร็วในช่วงระยะเวลาเริ่มแรก งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการทำนายค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วันของคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมก่อน โดยวิธีทดลองเริ่มต้นด้วยการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมก่อน โดยมีตัวแปรที่ต้องศึกษา คือ (1) ระดับพลังงานและระยะเวลาการให้ความร้อน (2) ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ และ (3) ระยะเวลาการพักคอนกรีตก่อนทดสอบ จากนั้นนำกระบวนการเร่งการแข็งตัวที่ได้ไปใช้เร่งการแข็งตัวให้กับคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดที่ระยะแรก และสร้างสมการที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังอัดที่ 28 วันที่ได้จากการบ่มปกติ ผลการทดลองพบว่า ระดับพลังงานและระยะเวลาการให้ความร้อนที่เหมาะสมคือที่ 362 และ 275 วัตต์ ใช้ในระยะเวลา 30 และ 15 นาที ตามลำดับ ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์ที่เหมาะสมคือ ที่ 3.5 MPa และ ระยะเวลาการพักคอนกรีตก่อนทดสอบ ที่เหมาะสมคือ ที่ 3.5 ชั่วโมง ผลการทำนายค่ากำลังอัดด้วยวิธีนี้ให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 14\%$ จากผลการทดสอบจริง ระยะเวลาที่เร็วที่สุดที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันคือ 7.5-9.5 ชั่วโมงหลังจากเริ่มผสม สำหรับคอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำปริมาณมาก หรือ สารเร่งการก่อตัว หรือ ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม และ 11-20.5 ชั่วโมงสำหรับคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัว

ABSTRACT: Microwave curing technique can enhance cement hydration resulting in accelerated strength of concrete in an early period. In this work, prediction of 28-day compressive strength of concrete, containing chemical admixtures, made with ordinary Portland cement based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy was investigated. To accelerate curing properly, the determined optimal microwave curing process for concrete was applied to concrete. The process involved determination of (1) microwave power level and heating duration, (2) the penetration resistance of mortar, and (3) the rest time of concrete. The appropriate microwave power level and heating duration was determined to be at 362 and 275 watts for 30 and 15 minutes. The penetration resistance of the sieved mortar at 3.5 MPa was determined suitable to indicate the starting time of microwave curing. The rest time of 3.5 hours was determined suitable to rest the heated concrete after microwave curing process before compression test for accelerated strength. A formula for the strength prediction was derived from the relationship between accelerated early-age strength of concrete cured with microwave energy and 28-day strength of normally cured concrete containing chemical admixtures. The prediction at 28 days yielded the percentage of error within ± 14 . The possible early ages for the strength prediction were found to be between 7.5-9.5 hours for concrete with superplasticizer or accelerator or without any chemical admixture and 11-20.5 hours for concrete with retarder, respectively.

คำหลัก: กระบวนการไมโครเวฟ การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัด ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1. บทนำ

ในปัจจุบันคอนกรีตเป็นวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง คุณสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตคือมีความสามารถในการรับกำลังอัดสูง ดังนั้นการทราบกำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตในระยะเวลา

ที่เร็วที่สุด เช่นภายใน 6 ชั่วโมงหลังจากการเท จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้สามารถพิจารณาหาหนทางแก้ไข ปัญหาที่เกิดจากคอนกรีตมีคุณภาพต่ำกว่าที่ระบุไว้ได้

การตรวจสอบคุณภาพของคอนกรีตเพื่อดูว่า คอนกรีตที่ผ่านการเทแล้วจะสามารถรับกำลังอัดได้เต็มที่ระยะยาว เช่นที่อายุ 28 วัน ได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ โดยปกติผู้ดำเนินการก่อสร้างนิยมกระทำโดยการทดสอบกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่มีอายุอย่างน้อย 7 วัน [1] ในขณะที่ผู้ผลิตคอนกรีตผสมเสร็จนิยมใช้กำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 1 วันที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว (Grant และ Warren, Dhir, Dhir และ Gillhespie อ้างถึงใน [1]) ซึ่งจะเห็นได้ว่าใช้เวลาที่มากกว่า 24 ชั่วโมงในการทำนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว ซึ่งสามารถส่งผลเสียหยาบต่อการก่อสร้างได้ ถ้าหากพบว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ และ ไม่สามารถยอมรับได้นอกจากนี้ยังมีวิธีการทำนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ระยะยาวอื่นๆอีก เช่น การเร่งการบ่มแข็งตัวของคอนกรีตด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน เช่นด้วยน้ำร้อน น้ำเค็ม หรือ สารเร่งการก่อตัว เป็นต้น [2,3] แต่วิธีดังกล่าวไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย เนื่องจากยังคงใช้เวลาที่มากกว่า 24 ชั่วโมงเพื่อรักษาความแม่นยำในการทำนาค่า อุปกรณ์ที่ใช้มีราคาสูง และวิธีการที่ใช้ค่อนข้างยุ่งยาก

2. ความสำคัญของงานวิจัย

เนื่องจากเทคนิคการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ เป็นการให้ความร้อนแก่วัสดุที่รวดเร็ว เกี่ยวข้องกับการนำของไอออน และการจัดเรียงตัวของสารประกอบที่มีสองขั้วเมื่อมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากระทำ การให้ความร้อนนี้เกิดขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตและให้ความร้อนที่ค่อนข้างทั่วถึงสามารถเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตได้ ทำให้คอนกรีตมีการพัฒนากำลังต้านทานแรงอัดที่รวดเร็วในช่วงระยะเวลาอันสั้น เช่นสามารถวัดค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังอัดเร็วที่อายุ 4.5 ชั่วโมงได้เท่ากับ 36.1 MPa โดยที่ไม่ทำให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยวิธีการเดียวกันนี้ที่อายุ 7 วันลดลงแต่อย่างใด [4,5] จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะใช้ประโยชน์จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่สูงในระยะแรกนี้ ในการทำนาค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่บ่มปกติและหล่อด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา

Pheeraphan et. al. [6] ได้ศึกษาถึงวิธีการทำนาค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตกำลังอัดปกติที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ที่ผลิตจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังอัดเร็ว และประเภทธรรมดา โดยพัฒนาเทคนิคการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ เพื่อใช้ค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะแรกในการทำนาค่ากำลังอัดที่ระยะยาว วิธีทดลองเริ่มต้นด้วยการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมก่อน จากนั้นนำกระบวนการเร่งการแข็งตัวที่ได้ไปใช้เร่งการแข็งตัวให้กับคอนกรีต เพื่อให้ได้ค่ากำลังอัดที่ระยะแรก และสร้างสมการที่เกิดขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังอัดที่ระยะยาวที่ได้จากการบ่มปกติ ผลการทดลองที่ได้พบว่า เทคนิคการเร่ง

การแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้ สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ 7 วันและ 28 วันของคอนกรีตที่ไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ที่ทำจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กำลังอัดเร็วและธรรมดาตามลำดับ ได้ภายในเวลา 3.5 และ 5.5 ชั่วโมง ผลการทำนาค่ากำลังอัดด้วยวิธีนี้ให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 15\%$ จากผลการทดสอบจริง

เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มในคอนกรีตมากขึ้น เช่น สารหน่วงการก่อตัว สารลดน้ำปริมาณมาก และสารเร่งการก่อตัว เป็นต้น เพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตในด้านต่างๆ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องพัฒนาวิธีการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตให้สามารถใช้ได้กับคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่ม งานวิจัยนี้ศึกษาการประมาณค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้สารเคมีผสมเพิ่มในระยะเวลาสั้น โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อให้สามารถประมาณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวตามปกติได้อย่างใกล้เคียงภายในระยะเวลาสั้น โดยใช้อุปกรณ์ราคาถูก และง่ายในการดำเนินการ

3. การทดลอง

3.1 วัสดุและการเตรียมวัสดุ

ปูนซีเมนต์ที่ใช้เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทธรรมดา มวลรวมหยาบ เป็นหินปูนที่มีขนาดโตสุดไม่เกิน 20 มม. มวลรวมละเอียด เป็นทรายก่อสร้างทั่วไป โดยมวลรวมหยาบและละเอียดจะถูกล้างทำความสะอาด ก่อนนำไปบดให้แห้งในเตาอบปกติที่ 100°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องอย่างน้อย 1 วันก่อนนำมาใช้ น้ำที่ใช้เป็นน้ำประปาที่ถูกต้องที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลอย่างน้อย 1 วันก่อนผสม สารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยสารลดน้ำพิเศษ สารเร่งการก่อตัว และสารหน่วงการก่อตัว ที่ใช้ในปริมาณที่กำหนดตามมาตรฐานผู้ผลิต เช่น 0.6-3.0%, 0.5-1.5% และ 0.2-0.5% ของปริมาณของปูนซีเมนต์ที่ใช้โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

3.2 การเตรียมแท่งทดสอบและการบ่ม

หล่อคอนกรีตในแบบหล่อโพลีเอทิลีนรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. (3 นิ้ว) สูง 152.4 มม. (6 นิ้ว) จำนวน 8 แท่งทดสอบ และใช้คอนกรีตเดียวกันนี้ นำไปร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 เพื่อใช้มอร์ต้าที่ได้บรรจุลงในแบบหล่อโลหะรูปทรงลูกบาศก์ขนาด $15 \times 15 \times 15$ ซม. จำนวน 1 แท่งทดสอบเพื่อใช้วัดค่าแรงต้านการจมนของเข็มในมอร์ต้าตามวิธีมาตรฐาน ASTM C 403

หลังจากที่ได้บรรจุคอนกรีตไว้ในแบบหล่อรูปทรงกระบอกแล้ว แบ่งแท่งทดสอบออกเป็น 2 ชุดดังนี้คือแท่งทดสอบคอนกรีตจำนวน 4 แท่ง จะถูกนำไปเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ ส่วนที่เหลืออีก 4 แท่งจะถูกนำไปบ่มปกติที่อุณหภูมิห้อง โดยนำแผ่นพลาสติกมาคลุมแท่งทดสอบไว้ 2 ชั้น แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

หลังจากเวลารวมครบ 30 นาที ซึ่งเป็นเวลาดังแต่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแห่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟหรือเมื่อแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้ามีค่าถึงระดับที่ต้องการ นำแห่งทดสอบคอนกรีตจำนวน 4 แห่งไปบ่มในเตาอบไมโครเวฟเป็นเวลา 45 นาที โดยกำหนดระดับพลังงานของเตาอบไมโครเวฟและเวลาที่ใช้เร่งการแข็งตัวตามต้องการ

นำแห่งทดสอบคอนกรีตที่ได้จากการบ่มในเตาอบไมโครเวฟออกจากเตา แล้วนำแผ่นพลาสติกมาคลุมแห่งทดสอบไว้ 2 ชั้น แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบที่ระยะแรก โดยจะใช้เวลา 30 นาทีก่อนเวลาทดสอบในการนำแห่งทดสอบทั้ง 4 แห่งออกจากแบบหล่อและหล่อหัวด้วยก๊วยแฉกก่อนที่จะนำไปทดสอบหาค่ากำลังต้านทานแรงอัด ในบางกรณีจะใช้แห่งทดสอบ 2 แห่งในการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรก ส่วนที่เหลืออีก 2 แห่งจะถูกถอดแบบที่อายุ 1 วัน และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว เช่นเดียวกัน เมื่อครบ 1 วัน นำแห่งทดสอบคอนกรีตที่บ่มปกติที่อุณหภูมิห้องจำนวน 4 แห่งถอดออกจากแบบหล่อ และนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้องจนถึงเวลาทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

ในกรณีที่ต้องมีการวัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแห่งทดสอบคอนกรีตภายหลังจากให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ สามารถกระทำได้ในการเตรียมแบบหล่อเพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิ ให้ทำการบดชิ้นส่วนพิเศษที่ทำจากโพลีเอธิลีนเพื่ออัดโบลอคแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. สูง 7.5 ซม. ที่บรรจุสารนำความร้อนที่ดี เช่นพาราฟินเหลว ให้เข้ากับแบบหล่อท่อนั้นบรรจุคอนกรีตเหลวเช่นเดียวกับวิธีการปกติและเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ หลังจากให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟแล้ว ใช้เทอร์โมคัปเปิลสอดเข้าไปในหลอดแก้วเพื่อวัดอุณหภูมิตามระยะเวลาที่ต้องการ

ในการให้พลังงานไมโครเวฟ ใช้เตาอบไมโครเวฟที่ใช้ในครัวเรือนทั่วไป มีขนาดภายใน กว้าง 390 มม. สูง 268 มม. 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% ของกำลังสูงสุด ดังนั้นในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ P# แทน ระดับกำลังที่ได้ที่ # ของค่าระดับกำลังสูงสุด เช่น P30 หมายถึงระดับกำลังที่ 30% ของค่ากำลังสูงสุด เป็นต้น

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

ในการสร้างสูตรที่ใช้ในการทำนาค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน จำเป็นต้องอาศัยวิธีการที่สำคัญ ดังนี้คือ เริ่มต้นด้วยการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด หลังจากได้กระบวนการเร่ง

การแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ นำกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดที่ได้ไปใช้ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนของปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน รวมถึงการใช้สารเคมีผสมเพิ่มต่างๆในปริมาณต่างๆที่กำหนดโดยผู้ผลิต จากนั้นสามารถสร้างความสัมพันธ์หรือสมการระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่อายุ 28 วัน ความสัมพันธ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่บ่มปกติ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรกแล้ว สามารถคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ผิดพลาดได้

3.4 การหากระบวนการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

สำหรับการหากระบวนการที่เหมาะสมที่สุดในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยการให้พลังงานไมโครเวฟนี้ ก็เพื่อให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงในช่วงแรก โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน และใช้พลังงานน้อยที่สุด

โดยทั่วไปแล้ว ตัวแปรที่สำคัญของกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ประกอบด้วย

- (1) ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ
- (2) ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแห่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ
- (3) เวลาทดสอบที่ระยะแรก หมายถึง เวลาที่เร็วที่สุดที่ตัวอย่างคอนกรีตสามารถถูกนำไปทดสอบหาค่ากำลังอัดได้
- (4) ระยะเวลาในการให้ความร้อน
- (5) เวลาทดสอบที่ระยะยาว
- (6) จำนวนและขนาดของแห่งทดสอบที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ
- (7) ส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้

สำหรับในการทดลองนี้ จะเลือกศึกษาเฉพาะตัวแปรที่มีผลต่อเทคนิคการทำนาค่ามากที่สุดคือ (1) ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (2) ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่นำแห่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ และ (3) เวลาทดสอบที่ระยะแรก โดยที่ตัวแปรอื่นๆสามารถกำหนดได้เช่นจากผลการทดลองของ Lunge และ Pheeraphan [4,5] พบว่าระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่สุดกำหนดให้ใช้ค่า 45 นาทีเป็นต้น ในขณะที่ยาวเวลาทดสอบที่ระยะยาวสามารถใช้ค่า 14 หรือ 28 วันก็ได้ ส่วนจำนวนและขนาดของแห่งทดสอบที่ใช้ในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ ใช้แห่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง

152.4 มม. จำนวน 4 แท่ง และสำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ ให้เลือกใช้คอนกรีตที่ออกแบบให้มีส่วนผสมที่เหมาะสม

ในการศึกษาหาค่าที่เหมาะสมของ (1) ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ (2) ระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแห้งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ และ (3) เวลาทดสอบที่ระยะแรก ใช้วิธีกำหนดตัวแปรที่ไม่ต้องการศึกษาให้คงที่ และทดลองเปลี่ยนค่าตัวแปรที่ต้องการศึกษา นำผลที่ได้ไปพิจารณาหาค่าที่เหมาะสมต่อไป

เริ่มแรก ในการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันเท่ากับ 30 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. เวลาทดสอบที่ระยะแรกใช้ที่ 5.5 ชั่วโมง และระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแห้งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ เท่ากับ 30 นาที (ผลจากงานที่ผ่านมา [6] พบว่าเหมาะสมสำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่ม) ซึ่งค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้ายังคงมีค่าเท่ากับ 0 ในขั้นนี้จะเปลี่ยนค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟต่างๆ และ ทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกคือที่ 5.5 ชั่วโมง (ผลจากงานที่ผ่านมา [6] พบว่า สามารถวัดค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ไม่ใช้สารผสมเพิ่มได้) และที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมคือค่าที่ทำให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงในช่วงแรก โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน และใช้พลังงานน้อยที่สุด

หลังจากได้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ ทดสอบหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาตั้งแต่ที่น้ำเริ่มสัมผัสกับปูนซีเมนต์จนถึงเวลาที่น้ำแห้งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ โดยใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่ได้ กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 15 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 15-18 ซม. ในขั้นนี้จะเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าต่างๆ และ ทดสอบค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่เหมาะสม คือค่าที่ทำให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน ในขั้นนี้ทดสอบค่ากำลังอัดที่ 14 วัน แทน 28 วัน เนื่องจากเพื่อต้องการเปรียบเทียบค่ากำลังอัดที่ระยะยาวเท่านั้น และการพัฒนาค่ากำลังอัดจนถึงอายุที่ 14 วัน นับว่านานเพียงพอแล้ว ตามปกติแล้ว ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 14 วันมีค่าประมาณ 85-90% ของค่ากำลังอัดที่ 28 วัน

หลังจากนั้น ในการหาระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเพื่อใช้ในการพิจารณาเวลาทดสอบที่ระยะแรก กำหนดใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟและค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่เหมาะสม ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต โดยทำการวัดอุณหภูมิหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัว ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม ควรเป็นระยะเวลาที่ อุณหภูมิของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า 40°C เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการพัฒนาค่ากำลังอัดที่ไม่สูงเกินไป ที่จะทำให้ค่ากำลังอัดที่ระยะแรกที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากเกินไปในการทำซ้ำ กำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตต่างๆ กันคือ (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

4. ผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

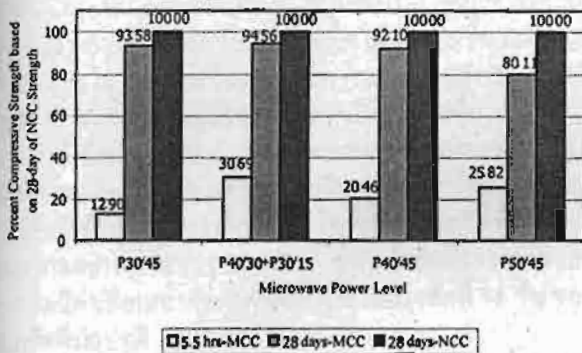
4.1 ผลการหากระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

4.1.1 ผลการหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟ

เมื่อกำหนดเวลาทดสอบที่ระยะแรกเท่ากับ 5.5 ชั่วโมง ใช้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่น้ำแห้งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่ 30 นาที และใช้ค่าระดับกำลังที่ P30(275 วัตต์), P40(362 วัตต์) และ P50(396 วัตต์) เป็นระยะเวลา 45 นาที เพื่อทดสอบหาค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด

ผลการทดลองพบว่าค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้ที่สูงกว่า P40 มีค่าสูงเกินไป เป็นผลให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่อายุ 28 วัน มีค่าน้อยกว่าค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มปกติที่อายุ 28 วัน ถึง 20% (ดูรูปที่ 1) และพบว่าค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุด ควรอยู่ระหว่าง P40 และ P30 ในการให้ความร้อนเป็นเวลา 45 นาที ดังนั้น จึงเลือกใช้ค่าระดับกำลังของ P40 เป็นเวลา 30 นาทีและตามด้วย P30 เป็นเวลา 15 นาที (หรือ P40(30)+P30(15)) เนื่องจากจากการทดลองของ Leung และ Pheeraphan [5] พบว่าในการให้ความร้อนไมโครเวฟแก่แท่งทดสอบ ควรใช้ระดับกำลังที่สูงก่อนและตามด้วยระดับกำลังต่ำเพื่อให้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวถูกรบกวนน้อยที่สุด จากรูปที่ 1 พบว่าในการใช้ค่าระดับกำลังของ P40 เป็นเวลา 30 นาทีและตามด้วย P30 เป็นเวลา 15 นาที ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่อายุ 5.5 ชั่วโมงมีค่าสูงถึง 30.69% และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 94.56% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติ ดังนั้นการให้ความร้อน

ด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระดับกำลัง P40 และ P30 เป็นเวลา 30 และ 15 นาทีตามลำดับ จึงเป็นระดับกำลังที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองนี้



รูปที่ 1 ผลของค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ระยะแรกคือที่ 5.5 ชั่วโมง และที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 28 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ

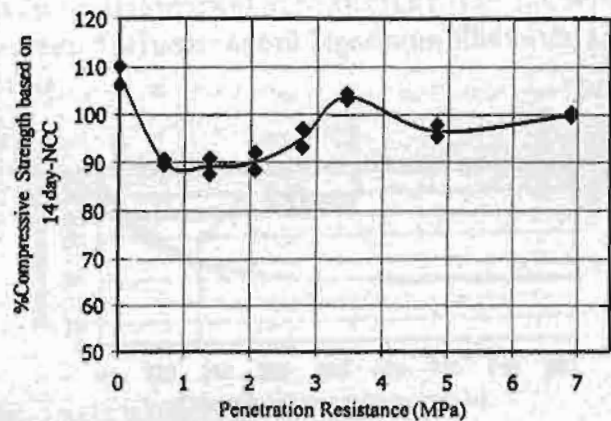
4.1.2 ผลการหาค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้า

ในการทดลองนี้เพื่อให้สามารถทดสอบค่ากำลังอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่มได้ เนื่องจากสารเคมีผสมเพิ่มสามารถส่งผลกระทบต่ออัตราการก่อตัวและอัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต จึงใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาดังแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ (แทนการใช้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟที่ 30 นาที) โดยใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสม ที่ระดับกำลัง P40 เป็นเวลา 30 นาทีและตามด้วย P30 เป็นเวลา 15 นาที และใช้ส่วนผสมของคอนกรีตที่ค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 15 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 15-18 ซม. นั่นคือคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และ สัดส่วนของ ปูนซีเมนต์ ต่อ หิน ค่อ หิน มีค่าเท่ากับ 0.79 และ 1:3.09:3.47 ตามลำดับ

ผลการเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าตั้งแต่ 0-7 MPa (0-1000 psi) ที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ แสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายผลแยกได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้า มีค่า 0 MPa, ช่วง 0.7-2.8 MPa, และช่วง 3.5-7 MPa

ในช่วงค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้า มีค่าเท่ากับ 0 MPa หรือช่วงระยะเวลาก่อนช่วงดอร์แมนท์(dormant period)ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ (ถึงแม้ว่าที่จริงแล้วค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าเป็นการวัดค่าการก่อตัวของคอนกรีต ซึ่งเกิดไม่ตรงกันกับระยะเวลาการก่อตัวของปูนซีเมนต์) หรือช่วงระยะเวลาดังแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่ง

ทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟมีค่า 30 นาที ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่า 106 และ 110% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมาใน [6] และสามารถอธิบายได้ว่าการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะเวลานี้ นำอิสรส่วนหนึ่งสามารถถูกกำจัดก่อนเข้าสู่ช่วงดอร์แมนท์หรือช่วงที่เริ่มมีการพัฒนาโครงสร้างของซีเมนต์เฟส ทำให้ช่วยลดรูพรุนและทำให้ค่ากำลังอัดมีค่าสูงขึ้นได้ เช่นเดียวกับที่ได้อธิบายไว้ใน [7]



รูปที่ 2 กราฟแสดงผลการเปลี่ยนค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่มีต่อค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวเทียบกับค่ากำลังอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ

ในช่วงค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้า มีค่า 0.7-2.8 MPa หรือในช่วงระยะเวลาระหว่างช่วงดอร์แมนท์(ซึ่งปกติจะใช้เวลาประมาณ 2-4 ชั่วโมง) หรือช่วงก่อนระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นของคอนกรีต ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าอยู่ในช่วง 88-97% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ซึ่งไม่สามารถอธิบายได้ง่าย แต่เชื่อได้ว่าสิ่งที่เกิดขึ้นคือในช่วงนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากมี ผลึกภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น CSH เป็นต้น เคลือบอยู่บนเม็ดปูนซีเมนต์ ดังนั้นเมื่อให้พลังงานไมโครเวฟในการเร่งการแข็งตัวแก่คอนกรีตในช่วงเวลานี้จะช่วยทำให้เร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดเร็วขึ้น ผลึกภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดแข็งตัวขึ้น และขัดขวางไม่ให้เม็ดปูนซีเมนต์ที่อยู่ภายในทำปฏิกิริยาต่อไปได้ รวมทั้งการเร่งการแข็งตัวนี้ไม่สามารถลดช่องว่างที่เกิดขึ้นได้เหมือนในช่วงที่คอนกรีตยังไม่เข้าสู่ช่วงค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้า มีค่า 0 MPa จึงส่งผลให้ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตมีค่าลดลง จากผลการทดลองจะเห็นได้ชัดว่าในช่วง 0.7-2.0 MPa ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วันลดลงอย่างมากถึง 12%

ในช่วงค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้า มีค่า 3.5-7 MPa หรือในช่วงระยะเวลาล่วงช่วงดอร์แมนท์ หรือช่วงระยะเวลาการ

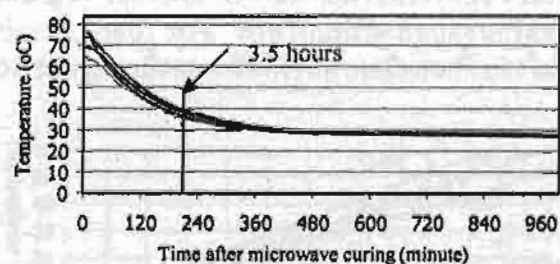
ก่อนเริ่มต้นของคอนกรีต (3.5MPa) ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าอยู่ในช่วง 95-104% ของค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ ซึ่งสามารถอธิบายว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน เช่น CSH ที่เกิดขึ้นที่ผิวของเม็ดปูนซีเมนต์ได้ถูกทำให้แตกตัวออกแล้ว ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้เร็วมากขึ้น และ การให้พลังงานไมโครเวฟในการเร่งการแข็งตัวแก่คอนกรีตในช่วงเวลานี้ จะช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันให้เกิดเร็วขึ้น ทำให้การพัฒนาการกำลังอัดเร็วขึ้น ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวจึงมีค่าที่เทียบเท่าหรือลดลงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 3.5 MPa ค่ากำลังอัดที่ระยะยาวของคอนกรีตมีค่าที่เทียบเท่ากับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 14 วัน ของคอนกรีตที่บ่มปกติ

จากผลการทดลองดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวกำหนดระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ คือในช่วงค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้า มีค่าเท่ากับ 0 MPa หรือ 3.5 MPa นั่นคือควรเร่งการแข็งตัวของคอนกรีตด้วยพลังงานไมโครเวฟ ในช่วงระยะเวลานี้สำหรับคอนกรีตที่ไม่ใช้และใช้สารเคมีผสมเพิ่ม ตามลำดับ เนื่องจากการใช้สารเคมีผสมเพิ่มจะส่งผลต่อการก่อตัวและแข็งตัว จึงควรรอให้ผลดังกล่าวหมดไปก่อนการใช้พลังงานไมโครเวฟ ในการเร่งการแข็งตัว ดังนั้นในขั้นตอนนี้ที่มีการใช้สารเคมีผสมเพิ่มมีค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่เหมาะสมที่ควรใช้มีค่าเท่ากับ 3.5 MPa เนื่องจาก เป็นระยะเวลาที่เร็วที่สุดที่กำหนดขึ้นเพื่อให้พลังงานไมโครเวฟแก่คอนกรีต

4.1.3 ผลการหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว หมายถึง ระยะเวลาที่ยอมให้คอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวแล้วพัก เพื่อให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันดำเนินต่อไปจนกว่าจะทำการทดสอบกำลังอัดที่ระยะแรก ในการหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวนี้ ใช้ค่าระดับกำลังของเตาอบไมโครเวฟที่เหมาะสมที่ระดับกำลัง P40 เป็นเวลา 30 นาทีและตามด้วย P30 เป็นเวลา 15 นาที ในการเร่งการแข็งตัวของคอนกรีต และใช้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ต้าที่เหมาะสม ที่ 3.5 MPa เป็นค่ากำหนดเวลาเริ่มให้พลังงานไมโครเวฟ และกำหนดใช้ส่วนผสมของคอนกรีตต่างๆ กันที่ (1) ส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 15 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 15-18 ซม. (2) ส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารลดน้ำพิเศษ 2% ของปริมาณปูนซีเมนต์ (3) ส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารเร่งการก่อตัว 1.25% ของปริมาณปูนซีเมนต์ และ (4) ส่วนผสมที่มีค่ากำลังอัดที่ 28 วันมีค่าเท่ากับ 20 MPa และมีค่าการยุบตัวเท่ากับ 8-10 ซม. ใช้สารหน่วงการก่อตัว 0.4% ของปริมาณปูนซีเมนต์

ในการทดลองนี้ จะวัดอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัว สำหรับคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม ถูกกำหนดในที่นี้ว่า ควรเป็นระยะเวลาที่อุณหภูมิของตัวอย่างคอนกรีตมีค่าต่ำกว่า 40°C เนื่องจากอยู่ในช่วงที่มีการพัฒนาค่ากำลังอัดที่ไม่สูงเกินไป ผลจากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าไม่ปรากฏว่ามีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของคอนกรีตสำหรับส่วนผสมที่ใช้ เกิดขึ้นภายหลังจากการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และที่เวลาประมาณ 3.5 ชั่วโมง หลังจากเสร็จสิ้นการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ อุณหภูมิของคอนกรีตสำหรับส่วนผสมที่ใช้มีค่าต่ำกว่า 40°C ดังนั้น ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสม สำหรับการทดลองนี้ จึงถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 3.5 ชั่วโมง



รูปที่ 3 กราฟแสดงอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางของแท่งทดสอบคอนกรีต หลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟเพื่อหาค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ เมื่อใช้ค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมง จากตารางพบว่า เป็นที่ชัดเจนว่าค่ากำลังอัดของทุกส่วนผสมที่ใช้ที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะแรกให้ค่าที่มากกว่า 16% ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ผ่านการบ่มปกติที่ 28 วัน ในที่นี้ให้ค่ามากกว่า 2.94 MPa นั้นหมายถึง ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวที่ 3.5 ชั่วโมงดังกล่าวให้ค่ากำลังอัดที่ค่อนข้างเหมาะสมสูงจากตัวอย่างส่วนผสมดังกล่าวข้างต้น และยังสามารถวัดค่าได้ ดังนั้นจึงกำหนดใช้ค่าระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวแล้วที่ระยะเวลา 3.5 ชั่วโมง

4.2 ผลการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะยาวของคอนกรีตที่ได้จากบ่มปกติ

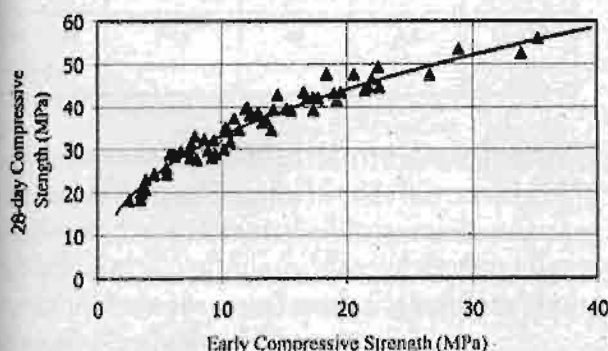
หลังจากได้กระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดแล้ว นำกระบวนการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าวไปใช้ในการเร่งการแข็งตัว

ของคอนกรีตที่มีค่าอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และอัตราส่วนของปูนซีเมนต์:ทราย:หิน ต่างๆกัน รวมถึงการใช้สารเคมีผสมเพิ่มต่างๆ ในปริมาณต่างๆ ที่กำหนด โดยผู้ผลิต

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตหลังจากผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟที่ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวแล้ว 3.5 ชั่วโมง

ส่วนผสม	ค่ากำลังต้านทานแรงอัด			
	คอนกรีตบ่มไมโครเวฟที่ระยะแรก		คอนกรีตบ่มปกติที่ 28 วัน	
	(MPa)	(%)	(MPa)	(%)
1	2.94	16.12	18.26	100
2	8.07	29.25	27.57	100
3	5.66	22.21	25.476	100
4	3.94	17.07	23.05	100

เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วันแล้ว สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก กับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน ได้ (ดูรูปที่ 4) และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 1



รูปที่ 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ระยะแรกที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวและค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ได้จากการบ่มปกติที่ 28 วัน

$$S_{28d-NCC} = (12.078) * (S_{early-MCC})^{0.437} \quad (1)$$

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

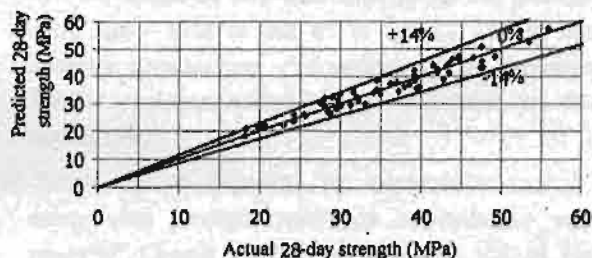
$S_{28d-NCC}$ = ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการบ่มปกติ (MPa)

จากสมการที่ 1 ที่ได้ ทำให้สามารถทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันได้ เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟ

4.3 ผลการทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาว

การทำนายค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตปกติที่ 28 วัน จากสมการที่ 1 ที่ได้ สามารถทำได้เมื่อทราบค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว ด้วยกระบวนการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสมที่สุดที่ได้

ผลการทำนายค่าแสดงไว้ในรูปที่ 5 พบว่าให้เปอร์เซ็นต์ผิดพลาดไม่เกิน ± 14 โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันมีค่าอยู่ในช่วง 18.3-56.0 MPa สำหรับแท่งทดสอบคอนกรีตขนาด 76.2×152.4 มม. เมื่อคอนกรีตที่ใช้มีสารเคมีผสมเพิ่มและไม่มี



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่ากำลังต้านทานแรงอัดจริงที่ 28 วันของคอนกรีตบ่มปกติกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากการทำนายค่า

ตารางที่ 2 แสดงเวลารวมที่ใช้ในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยระยะเวลาดังแต่เริ่มผสมจนถึงเวลาที่นำแท่งทดสอบเข้าเตาอบไมโครเวฟ ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ และระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว โดยแยกออกตามชนิดของสารเคมีผสมเพิ่มที่ใช้ จากตารางพบว่าคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวใช้เวลานานที่สุดถึง 11-20.5 ชั่วโมง ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้สารลดน้ำพิเศษ สารเร่งการก่อตัว และไม่ใช่สารเคมีผสมเพิ่มเลย ใช้เวลาดังแต่ 7.5-9.5 ชั่วโมง เนื่องจากว่าคอนกรีตที่มีสารหน่วงการก่อตัวจะใช้เวลานานที่สุดในการรอให้ค่าแรงต้านทานการจมของเข็มในมอร์ตาร์มีค่าเท่ากับ 3.5 MPa ก่อนนำเข้าเตาอบไมโครเวฟเพื่อเร่งการแข็งตัว

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

แนวคิดของการใช้เทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟในการทำนายค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วันนี้ คือต้องใช้กระบวนการเร่งการแข็งตัวที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัวมีค่าสูงในช่วงแรก โดยที่ค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่ระยะยาวมีค่า

ใกล้เคียงกับค่ากำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตบ่มปกติที่ระยะเวลาเดียวกัน และใช้พลังงานน้อยที่สุด

วิธีการทำนาคำนวณนี้ให้ความแม่นยำในการทำนาคำนวณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับสมการที่ใช้ซึ่งเป็นผลมาจากประเภทของปูนซีเมนต์ที่ใช้ ชนิดของวัสดุผสม และกระบวนการเร่งการแข็งตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องยังที่ควรจะทำการศึกษาทดลองสมการที่ได้นี้กับคอนกรีตที่จะใช้ก่อน แต่งานวิจัยที่ดำเนินอยู่ในปัจจุบัน ได้ทำการทดลองใช้สมการกับคอนกรีตผสมเสร็จที่ใช้อยู่ทั่วไป ซึ่งจะได้เสนอผลต่อไป

ตารางที่ 2 เวลาที่ใช้ในการทำนาคำนวณค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีส่วนผสมต่าง ๆ

ชนิดของคอนกรีต	ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มผสมจนถึงนำเข้าเตาอบไมโครเวฟ (ชั่วโมง)	ระยะเวลาในการให้ความร้อนด้วยพลังงานไมโครเวฟ (นาที)	ระยะเวลาการพักคอนกรีตที่ผ่านการเร่งการแข็งตัว (ชั่วโมง)	รวมเวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)
ไม่มีสารผสมเสริม	3-4	45	3.5	7.5-8.5
มีสารลดน้ำพิเศษ	3-5	45	3.5	7.5-9.5
มีสารเร่งการก่อตัว	3-4	45	3.5	7.5-8.5
มีสารหน่วงการก่อตัว	7-16	45	3.5	11-20.5

จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำนาคำนวณนี้สามารถใช้กับคอนกรีตที่มีสารเคมีผสมเพิ่มได้ แต่ยังไม่สามารถใช้ได้กับคอนกรีตผสมเถ้าลอย หรือคอนกรีตที่มีสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ งานวิจัยที่กำลังดำเนินการอยู่ได้มุ่งเน้นให้ความสำคัญกับเทคนิคการทำนาคำนวณค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ซึ่งจะได้นำเสนอผลต่อไป

ค่ากำลังอัดที่แสดงในบทความนี้เป็นค่ากำลังอัดของแท่งทดสอบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 76.2 มม. สูง 152.4 มม. หากต้องการแปลงให้เป็นค่ากำลังอัดของแท่งทดสอบมาตรฐานรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 152.4 มม. สูง 304.8 มม. ให้คูณค่ากำลังอัดที่ได้ด้วย 0.936

5. สรุปผลการทดลอง

เทคนิคการเร่งการแข็งตัวด้วยพลังงานไมโครเวฟนี้สามารถใช้ทำนายค่ากำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตที่ใช้และไม่ใช้สารเคมี

ผสมเพิ่มได้ ภายในระยะเวลาไม่น้อยกว่า 21 ชั่วโมง โดยอาศัยค่ากำลังอัดที่ได้จากการเร่งการแข็งตัวที่ระยะแรก และสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ระยะแรกของคอนกรีตที่ได้จากการเร่งการแข็งตัว และค่ากำลังต้านทานแรงอัดที่เวลาทดสอบที่ 28 วันของคอนกรีตที่ได้จากบ่มปกติ และผลการทดลองพบว่าให้ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 14\%$ จากผลการทดสอบจริง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้รหัสโครงการ PDF/36/2542

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dewar, J.D. and Anderson, R., *Manual of ready-mixed concrete*, 2nd edition, Chapman & Hall, 1992.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Leung, C.K.Y. and T. Pheeraphan, "Very high early strength of microware cured concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 1, pp. 136-146, 1995.
- [5] Leung, C.K.Y. and T. Pheeraphan, "Determination of optimal process for microware curing of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 463-472, 1997.
- [6] Pheeraphan, T., L. Cayliani, M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul, "Prediction of later-age compressive strength of normal concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microware energy" *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 4, pp. 521-527, April 2002.
- [7] X. Wu, J. Dong, and M. Tang, "Microware curing technique in concrete manufacture", *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, No. 2, pp. 205-210, 1987.

ต้องการข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อ น.ต.ชนกร พิระพันธุ์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา โรงเรียนนายเรืออากาศ, โทร. 0-2534-4951 หรือ petevml@alum.mit.edu

DEVELOPMENT OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH PREDICTION TECHNIQUE USING THE ACCELERATED CURING WITH MICROWAVE ENERGY

Thanakorn Pheeraphan¹ Tanabodee Harithaithaworn² and Pichai Nimityongskul³

ABSTRACT: The formula for the 28-day strength prediction of concrete using the accelerated strength of concrete cured with microwave energy was developed previously using a certain microwave oven. This work focused on (1) the verification of the formula using ready-mixed concrete and (2) the development of the prediction technique to use with any microwave oven. The parameters to study included ready-mixed concrete made with different source of cement and microwave power histories applied by different microwave ovens. The results showed that the formula could be used to predict the 28-day strength of ready-mixed concrete within 20% agreement with actual test results. Moreover, the technique could be applied to any microwave oven if the amount of microwave power energy per specimen and the microwave power histories followed the developed guidelines.

Key Words: microwave processing, compressive strength, Portland cement

1. INTRODUCTION

It has long been accepted that knowing potential 28-day compressive strength of concrete at the earliest possible time after concrete is produced, especially in a few hours, can be beneficial for quality control in concrete production and construction. Several rapid test methods to predict the 28-day concrete compressive strength at early age were developed [1-3].

Pheeraphan et al. proposed the accelerated curing method using the microwave-heating technique for later-age strength prediction of normal concrete without any chemical admixture [4]. Predictions of strength at 28 days of concrete were within 15% agreement with actual test results. Recently, the technique was developed for 28-day compressive strength prediction of normal-cured concrete with and without chemical admixtures based on accelerated strength of concrete cured with microwave energy [5]. The technique included use of the determined optimal microwave curing process to accelerate the strength of concrete and used the accelerated strength to predict the 28-day strength with use of a formula which was developed from mix-in-lab concrete. The verification of the formula was performed previously based on the mix-in-lab concrete, not the commercially available ready-mixed concrete, and the results showed that the predictions of 28-day compressive strength were within $\pm 14\%$ compared with actual test results

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Royal Thai Air Force Academy, Thailand, petevmi@alum.mit.edu

² Graduate Student, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand.

³ Associate Professor, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand, pichai@ait.ac.th

[5]. Moreover, this technique had some limitation; that is, the developed formula was valid only for the same optimal microwave curing process using the same microwave oven.

In this work, the prediction formula were verified with the ready-mixed concrete samples from six plants in Thailand using the developed technique. Some correction factor was introduced due to difference source of cement used in each ready-mixed concrete. Then the prediction technique was developed further to be applicable to any microwave oven models so that the previously developed formula was still valid for 28-day strength prediction.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 Materials and equipment

Ordinary Portland cement was 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. Chemical admixture was added to some concrete mixture to improve certain properties of fresh and hardened concrete. Dosages of admixture were 0.6-2.5% by weight of cement for superplasticizer, 0.2-0.5% by weight of cement for set-retarder, and 0.5-1.5% by weight of cement for accelerator.

To perform microwave heating, several commercial kitchen microwave ovens were used including the original microwave oven, designated as GS. Table 1 showed the characteristics of each microwave oven. In this work, three additional microwave ovens were used to heat the specimens so that their accelerated strengths could be compared with those of specimens heated by GS microwave oven. These microwave ovens were selected from the models available commercially in Thailand. Their sizes varied from medium size of 27 liters to large size of 32 liters while their levels of power setting varied from 5 to 10.

Table 1 Characteristics of selected commercial microwave ovens

Designation	Microwave oven			
	GS	WP	HI	SH
Cavity dimension WxHxD(mm)	390x268x400	312x225x390	349x220x355	374.5x231.5x391.1
Capacity (Liter)	42	27	27	32
Power setting (from technical specification)	Every 10% of maximum output power (850 watts)	90/160/350/500/ 650/750/850/1000	90/180/270/360/450/ 540/630/720/810/900	10%/30%/50%/70%/ 100% of maximum output power (900 watts)
Microwave output power (unit in watt)	67/129/187/262/ 318/394/461/506/ 579/680	79/136/314/429/ 523/621/677/779	81/148/223/302/366/ 439/488/593/654/759	83/258/419/564/829

It should also be noted that, for each microwave oven, the power settings obtained from the technical specification of each microwave oven were not equal to the measured microwave

output power. Table 1 illustrated comparison of the power settings and microwave output power for each microwave oven. For all microwave ovens, the power settings were calibrated into unit of watt using the standard method in the International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 705 rating standard [6] which was used to measure microwave output power of the oven at its maximum microwave power setting. However, for comparison purpose, the same method was adopted to obtain the output powers in unit of watt at various power settings.

2.2 Optimal microwave curing process

For each batch, several 76.2-mm. by 152.4-mm. cylindrical specimens were cast in polyethylene moulds and one 150x150x150 mm sieved mortar specimen was cast in a steel mould to measure the penetration resistance level according to ASTM C403. After the measured penetration resistance reached 3.45 MPa, three or four cylindrical specimens were cured with designated microwave energy while the rests were cured normally. The internal dimension and the capacity of the oven determined the number of heated specimens. 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 curing process. The accelerate strength of specimen were measured after finishing microwave curing for 3.5 hours. This period of time was called the rest time. Generally, the microwave-cured specimens were removed from their moulds using a piston at thirty minutes before compression test and then capped with sulfur mortar. For later-age strength test 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. The previously determined processing parameters affecting the optimal microwave curing process were obtained from [5]. To refer to the microwave power level and curing duration in this work, the symbol #W(#M) was used. For instance, 262W(30M)+187W(15M) represented the combination of microwave curing at the successive power levels of 262 watts and 187 watts for 30 and 15 minutes, respectively.

2.3 Experiment

2.3.1 Verification of the prediction formula

To verify the formula for 28-day strength prediction with the mix-in-lab concrete samples and ready-mixed concrete samples from six plants, the GS microwave oven was used to accelerate strength of the specimens that were prepared under the optimal microwave curing process. The accelerated strength was therefore used in Eq.(1), which obtained from [5], to predict the 28-day compressive strength. Then the accuracy of predicted 28-day strength calculated from Eq. (1) was determined by comparing with the actual 28-day strength.

$$S_{28d-NCC} = (12.078) * (S_{early-MCC})^{0.437} \quad (1)$$

where $S_{28d-NCC}$ = the 28-day compressive strength (MPa)
 $S_{early-MCC}$ = the accelerated compressive strength (MPa)

2.3.2 Development of the prediction technique for use with any microwave ovens

The development of the prediction technique for use with any commercial microwave ovens was carried out based on the optimal microwave curing process which was established with use of GS microwave oven so that the previously established formula could still be used with reasonable accuracy. It should be noted that the number of heated specimens and the microwave power output of each microwave oven were different; therefore, the important parameters to consider were the number of heated specimens and the rate of heating.

To select the microwave power output for each microwave model, three guidelines were established so that there would be small difference effect on the accelerated strength. Firstly, the applied microwave energy per specimen should remain the same. Secondly, the total heating duration should remain 45 minutes. Thirdly, the selected power histories should be similar to those of Goldstar MS-4025, which used to heat 4 cylindrical specimens in the optimal microwave curing process, as much as possible. However, there were additional study on the effect of rate of heating on the prediction technique. Several different power histories were used to heat the specimens. The power setting level was set high at the beginning and lower at the final period of heating while the applied microwave energy per specimen remained the same as the one heated under the optimal microwave curing process. Table 2 illustrated the selected microwave power histories and the applied microwave energy per specimen of each microwave oven model.

Table 2 The selected microwave power histories and the applied microwave energy per specimen of each microwave oven model.

Microwave-Power Type-Number of Specimen	Number of specimens	Power setting	Total applied energy (kJ)	Applied energy per specimen (kJ)	Percentage of error
GS-P1-S4*	4	262W(30M)+187W(15M)	639.9	160.0	0
GS-P1-S3	3	262W(26M)+ 67W(19M)	485.1	161.7	1.1
WP-P1-S4	4	314W(25M)+136W(20M)	634.2	158.6	-0.9
WP-P1-S3	3	314W(15M)+136W(15M)+79W(15M)	476.1	158.7	-0.8
HI-P1-S3	3	223W(31M)+81W(14M)	482.8	160.9	0.6
SH-P1-S3	3	258W(24M)+83W(21M)	476.1	158.7	-0.8
GS-P2-S3	3	506W(11.5M)+67.5W(33.5M)	484.8	161.6	1.0
WP-P2-S4	4	523W(16M)+79W(29M)	639.5	159.9	-0.1
HI-P2-S3	3	439W(12M)+81W(33M)	476.5	158.8	-0.7

* optimal power setting from [5]

Based on these two different microwave power histories (one was similar to the original microwave power histories and the other resulted in higher rate of heating), the compressive results could be compared at two different ages: the early age and the 28 days. In some case of this study, the early-age results would be compared to those of the optimal microwave curing

process since the accelerated strength could provide enough information about the accuracy of the developed prediction technique.

3. RESULTS

3.1 Results of verification of the prediction formula

3.1.1 Using the mix-in-lab concrete

To verify the predicted formula with use of mix-in-lab concrete, 15 mix proportions were selected. Eq. (1) was used to predict the 28-day strength of mix-in-lab concrete once the accelerated strength was measured experimentally. For the range of 28-day compressive strength between 23-48 MPa, it was found that the maximum percentage of error was within ± 15 . Fig. 1 showed the measured and predicted compressive strength at 28 days of mix-in-lab concrete.

3.1.2 Using the ready-mixed concrete

To verify the predicted formula with use of ready-mixed concrete, six ready-mixed concrete plants, whose cement brand used were rather different and mostly available in Thailand, were selected. Each plant randomly provided 4 mix proportions at different time. After the accelerated strength was measured, Eq. (1) was also used to predict the 28-day strength of ready-mixed concrete. It was found that the maximum percentage of error was within about ± 13 for the range of 28-day compressive strength between 23-39 MPa for plants #1, 2, 3, 4, and 5 while plant #6 yielded maximum percentage of error from +17 to +20. Fig. 2 showed the measured and predicted compressive strength at 28 days of ready-mixed concrete.

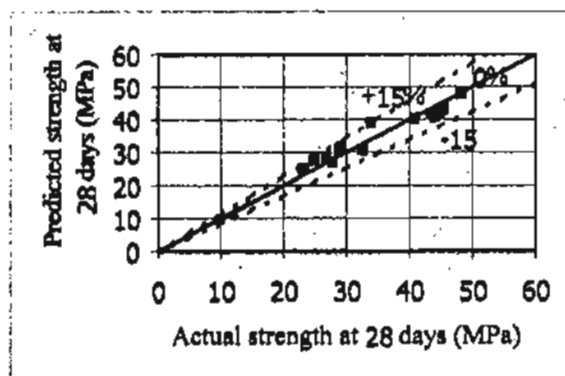


Fig. 1 Prediction of the 28-day strength of mix-in-lab concrete

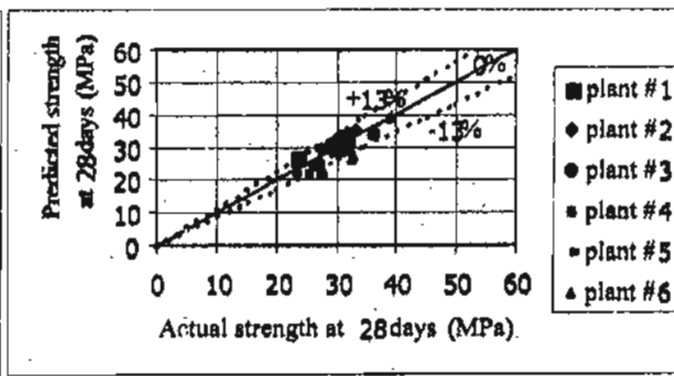


Fig. 2 Prediction of the 28-day strength of ready-mixed concrete

3.2 Results of development of the prediction technique for use with any microwave ovens

3.2.1 Determination of microwave power histories

Table 3 compared the early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power with those of concrete specimens cured under microwave power heating which followed the power histories of the optimal microwave power. The percentages of error were within ± 6 .

Table 3 Comparisons of early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power histories with those cured under similar microwave power histories.

Target strength (MPa)	Microwave-Power Type-Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Microwave-Power Type-Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Percentage of error
15	GS-P1-S4	5.31	WP-P1-S4	5.46	2.9
15	GS-P1-S4	5.31	HI-P1-S3	5.12	-3.5
15	GS-P1-S4	5.31	GS-P1-S3	5.55	4.5
30	GS-P1-S4	8.00	WP-P1-S4	7.60	-5.0
30	GS-P1-S4	8.00	HI-P1-S3	7.53	-5.9
30	GS-P1-S4	8.00	GS-P1-S3	8.11	1.4
45	GS-P1-S4	19.21	WP-P1-S4	19.11	-0.5
45	GS-P1-S4	19.21	HI-P1-S3	20.39	6.2
45	GS-P1-S4	19.21	GS-P1-S3	18.77	-2.3

Table 4 compared the early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power histories with those of concrete specimens cured under different microwave power histories resulting higher rate of heating. It was obvious that the percentages of error were quite high in the range of +14 to +44 except one data indicated the percentage of error of -23.

Table 4 Comparisons of early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power histories with those cured under higher rate of heating.

Target strength (MPa)	Microwave-Power Type-Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Microwave-Power Type-Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Percentage of error
15	GS-P1-S4	4.39	WP-P2-S4	5.50	25.3
15	GS-P1-S4	4.39	HI-P2-S3	5.54	26.2
15	GS-P1-S4	4.39	GS-P2-S3	5.16	17.5
30	GS-P1-S4	7.07	WP-P2-S4	10.18	44.0
30	GS-P1-S4	7.07	HI-P2-S3	9.12	29.0
30	GS-P1-S4	7.07	GS-P2-S3	8.65	22.4
45	GS-P1-S4	18.42	WP-P2-S4	21.06	14.3
45	GS-P1-S4	18.42	HI-P2-S3	21.54	17.0
45	GS-P1-S4	18.42	GS-P2-S3	14.28	-22.5

By comparison the results in Tables 3 and 4, it was obvious that the appropriate microwave power histories to accelerate the strength of concrete specimens for prediction formula should follow the power histories of the optimal microwave power.

3.2.2 Prediction accuracy of the 28-day compressive strength

After the appropriate microwave power histories were determined for each microwave oven, the concrete specimens were made and heated under each microwave oven and their accelerated strengths were used in Eq.(1) to predict the 28-day compressive strength. Here, several microwave ovens using different number of specimens were used, such as GS(4 heated specimens), HI(3 heated specimens), WP(3 and 4 heated specimens) and SH(3 heated specimens). Figure 3 showed the plots of comparison of 28-day predicted compressive strength versus measured strength at the same age. Predictions of strength at 28 days were within 14% agreement with actual test results.

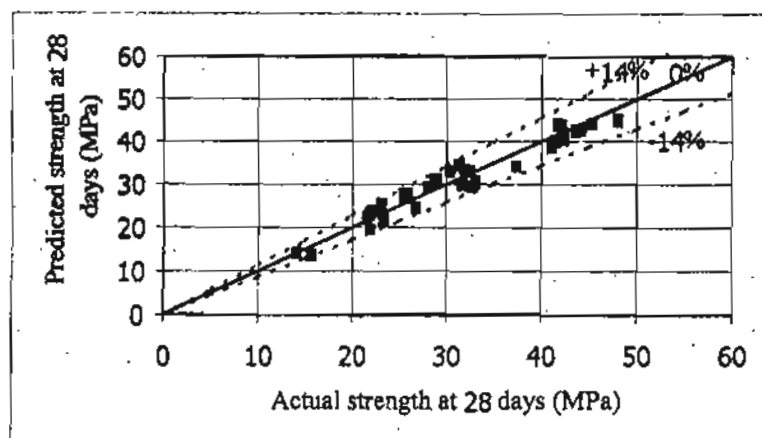


Fig. 3 Prediction of the 28-day compressive strength of concrete heated under different conditions such as different microwave ovens and different number of specimens.

4. DISCUSSION

The 28-day strength prediction technique was shown to be useful for concrete with and without chemical admixtures and was reliable based on the mix-in-lab concrete and ready-mixed concrete except ready-mixed concrete from plant #6. It was found that source of cement could significantly affect the accuracy of this prediction method since it could affect rate of strength development. Fig. 4 showed the plots of rate of strength development of mortar made with different brands of Type I Portland cement under normal curing. Three brands of cement used mostly in Thailand were used to study their rates of strength development, especially at early age. It should be noted that cement brand #1, used by plant #2, was used to develop Eq.(1) to predict the 28-day strength of concrete while cement brand #3 was the one used by plant #6. Moreover, cement brand #2 was used by plants #3 and 4. Here, cement brands from plants #1 and 5 were not considered.

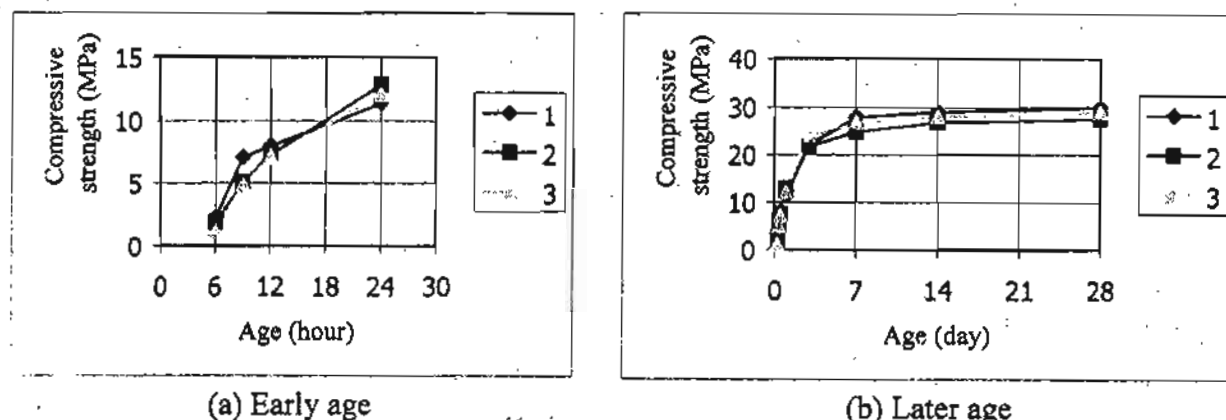


Fig. 4 Strength development of mortar made from different brand of Type I cement (water/cement = 0.485 and cement : standard graded sand (ASTM C 778) = 1:2.75)

It was obvious from the strength development curve in Fig.4 (a) that mortar made with cement brand #3 developed strength lower than mortar made with other brands at early age. For example, at 6 hours, mortar made with cement brand #3 attained the strength value of 1.17 MPa (52%) which was much lower than those made with cement brands #1 and #2, which attained the strength values of 2.24 (100%) and 1.83 MPa (82%), respectively. At 9 hours, cement brands #1, 2 and 3 attained the strength values of 6.07 (100%), 5.05 (83%) and 4.89 MPa (81%), respectively. For 28 days, the strength values of 30.0 (100%), 27.5 (92%) and 29.0 MPa (97%) were obtained for cement brands #1, 2 and 3, respectively. It was therefore obvious that the lower the early strength of specimens made with cement brand #3, the lower the 28-day predicted strength which resulted in higher percentage of error in 28-day strength prediction.

The results were obvious that the accuracy of this prediction method significantly depended on the formula that relied on several factors such as source of cement, type of aggregates, and microwave curing process as stated previously in [4]. Therefore, it was necessary to study the rate of strength development of mortar made by different source of cement before using this prediction method so that additional correction factor could be applied to the prediction formula. For example, the correction factor of about 1.241, which were calculated from the 9-hours strength of cement brand #1 divided by that of cement brand #3, could be applied to Eq.(1) in order to predict the 28-day strength more accurately. The results showed that the prediction accuracy was improved resulting in the value of ± 4 percentages of error. The 9-hours strengths were chosen because the value of early strength of 6.07 MPa was close to the accelerate strengths of specimens made by cement brand #3, which were reported to be 4.11, 4.30, 5.81, and 6.40 MPa for four different mix proportions.

The guidelines for use any microwave oven to apply the microwave energy to concrete specimens were established so that the previous prediction formula could be used. Results in Fig. 3 were satisfactory and showed that it was possible to use any microwave oven. The concept of using any microwave oven model to apply the optimal microwave power so that the formula for 28-day strength prediction, Eq.(1) was still valid within a reasonable accuracy was that (1) the

applied microwave energy should be equal to 160 kJ per specimen, (2) the selected power history should be close to 262 watt for 30 minutes and 187 watts for 15 minutes and (3) the total heating duration should be equal to 45 minutes. Moreover, the previously determined processing parameters affecting the optimal microwave curing process should be followed.

It should be noted further that all measured strength results were obtained from 76.2-mm. by 152.4-mm. cylinders. Therefore, to compare with the strength value of the standard-sized cylinder, the correction factor of 0.936 should be multiplied to the strength value obtained from a 76.2-mm. by 152.4-mm. cylinders [4].

5. CONCLUSION

The study could be concluded that

- (1) This technique could predict 28-day strength of any ready-mixed concrete but a correction factor due to source of cement should be determined and applied to the prediction formula to improve the accuracy prediction.
- (2) This technique should follow the optimal microwave curing process and the proposed guidelines to select the microwave power histories so that any microwave oven could be used.

REFERENCES

1. 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, in: H.W. Reinhardt (Eds.), *Testing during concrete construction: Proceedings of an International RILEM workshop*, March 1990, pp. 58-81.
2. Tango, C.E., "An extrapolation method for compressive strength prediction of hydraulic cement products", *Cement and Concrete Research*, 28(7), 1998, pp.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. Pheeraphan, T., Cayliani, L., Dumangas Jr., M.I., and Nimityongskul, P., "Prediction of later-age compressive strength of normal concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy", *Cement and Concrete Research*, 32(4), 2002, pp. 521-527.
5. Pheeraphan, T., Aneksrup, T., and Nimityongskul, P., "Development of an optimal microwave curing process for concrete containing admixtures to predict 28-day compressive strength," *Proceeding of the First National Concrete Convention*, Karnchanaburi, Thailand, May 2003, pp. 243-250.
6. Voss, W.A.G. and Greenwood-Madsen, T., "Brief communication: a simple instrument for measuring microwave oven power," *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 22(4), 1987, pp. 209-211.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by a postdoctoral grant from the Thailand Research Fund through the grant number TRF4580074.

DEVELOPMENT OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH PREDICTION TECHNIQUE USING THE ACCELERATED CURING WITH MICROWAVE ENERGY

Thanakorn Pheeraphan^a
Tanabodee Harithaithaworn^b and Pichai Nimityongskul^b

ABSTRACT

The formula for the 28-day strength prediction of concrete using the accelerated strength of concrete cured with microwave energy was developed earlier using a certain microwave oven. This work focused on the verification of the formula using ready-mixed concrete and the development of the prediction technique to use with any microwave oven. The parameters to study included ready-mixed concrete made with different source of cement and microwave power histories applied by different microwave ovens. The results showed that the formula could be used to predict the 28-day strength of ready-mixed concrete within 20% agreement with actual test results. Moreover, the technique could be applied to any microwave oven if the amount of microwave power energy per specimen and the microwave power histories followed the developed guidelines.

KEY WORDS: Microwave Processing (PROCESSING), Compressive Strength (PROPERTIES), Portland Cement (COMPOSITION), Strength Prediction (APPLICATIONS)

1. INTRODUCTION

It has long been accepted that knowing potential 28-day compressive strength of concrete at the earliest possible time after concrete is produced, especially in a few hours, can be beneficial for quality control in concrete production and construction. Several rapid test methods to predict the 28-day concrete compressive strength at early age were developed [1-3].

Pheeraphan et al. proposed the accelerated curing method using the microwave-heating technique for later-age strength prediction of normal concrete without any chemical admixture [4]. Predictions of strength at 28 days of concrete were within 15% agreement with actual test results. Recently, the technique was developed for 28-day compressive strength prediction of normal-cured concrete with and without chemical admixtures based on accelerated strength of concrete cured with microwave energy [5]. The technique included use of the determined optimal microwave curing process to accelerate the strength of concrete and used the accelerated strength to predict the 28-day strength with use of a formula which was developed from mix-in-lab concrete. The verification of the formula was performed previously based on the mix-in-lab concrete, not the commercially available ready-mixed concrete, and the results showed that the

^a 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

predictions of 28-day compressive strength were within $\pm 14\%$ compared with actual test results [5]. Moreover, this technique had some limitation; that is, the developed formula was valid only for the same optimal microwave curing process using the same microwave oven.

In this work, the prediction formula was verified with the ready-mixed concrete samples from six plants in Thailand using the developed technique. Then the prediction technique was developed further to be applicable to any microwave oven models so that the previously developed formula was still valid for 28-day strength prediction.

2. EXPERIMENTAL PROGRAM

2.1 Materials and equipment

Ordinary Portland cement was 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. Physical properties of materials were shown in Table 1. Chemical admixture was added to some concrete mixture to improve certain properties of fresh and hardened concrete. Dosages of admixture were 0.6-2.5% by weight of cement for superplasticizer, 0.2-0.5% by weight of cement for set-retarder, and 0.5-1.5% by weight of cement for accelerator. Table 2 showed the examples of mix proportions of concrete used.

To perform microwave heating, four commercial kitchen microwave ovens were used including the original microwave oven, designated as GS. Table 3 showed the characteristics of each microwave oven. In this work, three additional microwave ovens were used to heat the specimens so that their accelerated strengths could be compared with those of specimens heated by GS microwave oven. These microwave ovens were selected from the models available commercially in Thailand. Their capacities varied from 27 liters to 32 liters while their levels of power setting varied from 5 to 10.

It should also be noted that, for each microwave oven, the power settings obtained from the technical specification of each microwave oven were not equal to the measured microwave output power. Table 3 illustrated comparison of the power settings and microwave output power for each microwave oven. For all microwave ovens, the power settings were calibrated into unit of watt using the standard method in the International Electrotechnical Commission (IEC) Publication 705 rating standard [6] which was used to measure microwave output power of the oven at its maximum microwave power setting. However, for comparison purpose, the same method was adopted to obtain the output powers in unit of watt at various power settings.

2.2 Optimal microwave curing process

For each batch, several 76.2-mm. by 152.4-mm. cylindrical specimens were cast in polyethylene moulds and one 150x150x150 mm sieved mortar specimen was cast in a steel mould to measure the penetration resistance level according to ASTM C403. After the measured penetration resistance reached 3.45 MPa, three or four cylindrical specimens were cured with designated

microwave energy while the rests were cured normally. The internal dimension and the capacity of the oven determined the number of heated specimens. 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 curing process. The accelerated strengths of specimen were measured after finishing microwave curing for 3.5 hours. This period of time was called the rest time. Generally, the microwave-cured specimens were removed from their moulds using a piston at thirty minutes before compression test and then capped with sulfur mortar. For later-age strength test 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. The previously determined processing parameters affecting the optimal microwave curing process were obtained from [5]. To refer to the microwave power level and curing duration in this work, the symbol #W(#M) was used. For instance, 262W(30M)+187W(15M) represented the combination of microwave curing at the successive power levels of 262 watts and 187 watts for 30 and 15 minutes, respectively.

2.3 Experiment

2.3.1 Verification of the prediction formula

To verify the formula for 28-day strength prediction with the mix-in-lab concrete samples and ready-mixed concrete samples from six plants, the GS microwave oven was used to accelerate strength of the specimens that were prepared under the optimal microwave curing process. The accelerated strength was therefore used in Eq.(1), which obtained from [5], to predict the 28-day compressive strength. Then the accuracy of predicted 28-day strength calculated from Eq. (1) was determined by comparing with the actual 28-day strength.

$$S_{28d-NCC} = (12.078) * (S_{early-MCC})^{0.437} \quad (\text{Eq. 1})$$

where $S_{28d-NCC}$ = the 28-day compressive strength (MPa)
 $S_{early-MCC}$ = the accelerated compressive strength (MPa)

2.3.2 Development of the prediction technique for use with any microwave ovens

The development of the prediction technique for use with any commercial microwave ovens was carried out based on the optimal microwave curing process which was established with use of GS microwave oven so that the previously established formula could still be used with reasonable accuracy. It should be noted that the number of heated specimens and the microwave power output of each microwave oven were different; therefore, the important parameters to consider were the number of heated specimens and the rate of heating.

To select the microwave power output for each microwave model, three guidelines were established so that there would be small difference effect on the accelerated strength. Firstly, the applied microwave energy per specimen should remain the same. Secondly, the total heating duration should remain 45 minutes. Thirdly, the selected power histories should be similar to

those of Goldstar MS-4025, which used to heat 4 cylindrical specimens in the optimal microwave curing process, as much as possible. However, there was additional study on the effect of rate of heating on the prediction technique. Several different power histories were used to heat the specimens. The power setting level was set high at the beginning and lower at the final period of heating while the applied microwave energy per specimen remained the same as the one heated under the optimal microwave curing process. Table 4 illustrated the selected microwave power histories and the applied microwave energy per specimen of each microwave oven model.

Based on these two different microwave power histories (one was similar to the original microwave power histories and the other resulted in higher rate of heating), the compressive results could be compared at two different ages: the early age and the 28 days. In some case of this study, the early-age results would be compared to those of the optimal microwave curing process since the accelerated strength could provide enough information about the accuracy of the developed prediction technique.

3. RESULTS

3.1 Results of verification of the prediction formula

3.1.1 Using the mix-in-lab concrete

To verify the predicted formula with use of mix-in-lab concrete, 15 mix proportions were selected. Eq. (1) was used to predict the 28-day strength of mix-in-lab concrete once the accelerated strength was measured experimentally. For the range of 28-day compressive strength between 23-48 MPa, it was found that the maximum percentage of error was within ± 15 . Fig. 1 showed the measured and predicted compressive strength at 28 days of mix-in-lab concrete.

3.1.2 Using the ready-mixed concrete

To verify the predicted formula with use of ready-mixed concrete, six ready-mixed concrete plants whose cement brand used were rather different and mostly available in Thailand were selected. Each plant randomly provided 4 mix proportions at different time. After the accelerated strength was measured, Eq. (1) was also used to predict the 28-day strength of ready-mixed concrete. It was found that the maximum percentage of error was within about ± 13 for the range of 28-day compressive strength between 23-39 MPa for plants #1, 2, 3, 4, and 5 while plant #6 yielded maximum percentage of error from +17 to +20. Fig. 2 showed the measured and predicted compressive strength at 28 days of ready-mixed concrete.

3.2 Results of development of the prediction technique for use with any microwave ovens

3.2.1 Determination of microwave power histories

Table 5 compared the early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power with those of concrete specimens cured under microwave power heating which followed the power histories of the optimal microwave power. The percentages of error were within ± 6 .

Table 6 compared the early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power histories with those of concrete specimens cured under different microwave power histories resulting higher rate of heating. It was obvious that the percentages of error were quite high in the range of +14 to +44 except one data indicated the percentage of error of -23.

By comparison the results in Tables 5 and 6, it was obvious that the appropriate microwave power histories to accelerate the strength of concrete specimens for prediction formula should follow the power histories of the optimal microwave power.

3.2.2 Prediction accuracy of the 28-day compressive strength

After the appropriate microwave power histories were determined for each microwave oven, the concrete specimens were made and heated under each microwave oven and their accelerated strengths were used in Eq.(1) to predict the 28-day compressive strength. Here, several microwave ovens using different number of specimens were used, such as GS(4 heated specimens), HI(3 heated specimens), WP(3 and 4 heated specimens) and SH(3 heated specimens). Figure 3 showed the plots of comparison of 28-day predicted compressive strength versus measured strength at the same age. Predictions of strength at 28 days were within 14% agreement with actual test results.

4. DISCUSSION

The 28-day strength prediction technique was shown to be useful for concrete with and without chemical admixtures and was reliable based on the mix-in-lab concrete and ready-mixed concrete except ready-mixed concrete from plant #6. It was found that source of cement could significantly affect the accuracy of this prediction method since it could affect rate of strength development. Fig. 4 showed the plots of rate of strength development of mortar made with different brands of Type I Portland cement under normal curing. Three brands of cement used mostly in Thailand were used to study their rates of strength development, especially at early age. It should be noted that cement brand #1, used by plant #2, was used to develop Eq.(1) to predict the 28-day strength of concrete while cement brand #3 was the one used by plant #6. Moreover, cement brand #2 was used by plants #3 and 4. Here, cement brands from plants #1 and 5 were not considered.

It was obvious from the strength development curve in Fig.4 (a) that mortar made with cement brand #3 developed strength lower than mortar made with other brands at early age. For example, at 6 hours, mortar made with cement brand #3 attained the strength value of 1.17 MPa (52%) which was much lower than those made with cement brands #1 and #2, which attained the strength values of 2.24 (100%) and 1.83 MPa (82%), respectively. At 9 hours, cement brands #1, 2 and 3 attained the strength values of 6.07 (100%), 5.05 (83%) and 4.89 MPa (81%), respectively. For 28 days, the strength values of 30.0 (100%), 27.5 (92%) and 29.0 MPa (97%)

were obtained for cement brands #1, 2 and 3, respectively. It was therefore obvious that the lower the early strength of specimens made with cement brand #3, the lower the 28-day predicted strength which resulted in higher percentage of error in 28-day strength prediction.

The results were obvious that the accuracy of this prediction method significantly depended on the formula that relied on several factors such as source of cement and microwave curing process. Therefore, it was necessary to study the rate of strength development of mortar made by different source of cement before using this prediction method so that additional correction factor could be applied to the prediction formula. This correction factor could be derived by considering (1) the rate of early strength development and/or (2) the 28-day strength of mortar made with cement used to derive the formula and mortar made with cement under current use. For example, the correction factor of about 1.241, which was calculated from the 9-hour strength of cement brand #1 divided by that of cement brand #3, could be applied to Eq.(1) in order to predict the 28-day strength more accurately. The results showed that the prediction accuracy was improved resulting in the value of ± 4 percentages of error. The 9-hour strengths were chosen because the value of early strength of 6.07 MPa was close to the accelerated strengths of specimens made by cement brand #3, which were reported to be 4.11, 4.30, 5.81, and 6.40 MPa for four different mix proportions.

The guidelines for use any microwave oven to apply the microwave energy to concrete specimens were established so that the previous prediction formula could be used. Results in Fig. 3 were satisfactory and showed that it was possible to use any microwave oven. The concept of using any microwave oven model to apply the optimal microwave power so that the formula for 28-day strength prediction, Eq.(1) was still valid within a reasonable accuracy was that (1) the applied microwave energy should be equal to 160 kJ per specimen or 230 MJ per 1 m³ of concrete, (2) the selected power history should be close to 262 watt for 30 minutes and 187 watts for 15 minutes and (3) the total heating duration should be equal to 45 minutes. Moreover, the previously determined processing parameters affecting the optimal microwave curing process should be followed.

It should be noted further that all measured strength results were obtained from 76.2-mm. by 152.4-mm. cylinders. Therefore, to compare with the strength value of the standard-sized cylinder, the correction factor of 0.936 should be multiplied to the strength value obtained from a 76.2-mm. by 152.4-mm. cylinders.

5. CONCLUSION

The study could be concluded that

(1) This technique could predict 28-day strength of any ready-mixed concrete but a correction factor due to source of cement should be determined and applied to the prediction formula to improve the accuracy prediction.

(2) This technique should follow the optimal microwave curing process and the proposed guidelines to select the microwave power histories so that any microwave oven could be used.

6. ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by a postdoctoral grant from the Thailand Research Fund through the grant number TRF4580074.

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. T. Pheeraphan, L. Cayliani, M.I. Dumangas Jr., and P. Nimityongskul, Prediction of later-age compressive strength of normal concrete based on the accelerated strength of concrete cured with microwave energy, *Cem Concr Res* 32(4) (2002) 521-527.
5. T. Pheeraphan, T. Aneksrup, and P. Nimityongskul, Development of an optimal microwave curing process for concrete containing admixtures to predict 28-day compressive strength, Proceeding of the First National Concrete Convention, Karnchanaburi, Thailand, May 2003, pp. 243-250.
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.

Table 1. Physical properties of materials

Physical properties	Type I cement	Fine aggregate	Coarse aggregate
Specific gravity	3.15	2.52	2.70
Fineness modulus	-	2.94	-
Unit weight (kg/m ³)	-	-	1539

Table 2. Examples of Mix Proportions

Target strength (MPa)	Measured slump (cm)	Dosage of admixtures (%)	Type of Admixture	(Water+Admixture) /Cement	C:S:A (by weight)
15	8.5	-	-	0.89	1:3.67:4.08
15	15	-	-	0.91	1:3.41:3.79
20	9	1.25	Accelerator	0.78	1:3.42:3.80
20	8	0.30	Retarder	0.74	1:3.42:3.82
20	8.5	1.5	Superplasticizer	0.58	1:3.43:3.81
30	8	-	-	0.57	1:2.37:2.58
30	8	1	Superplasticizer	0.54	1:2.68:2.79
30	8	1.25	Accelerator	0.58	1:2.68:2.79
40	8	0.45	Retarder	0.45	1:1.88:2.20
40	10	0.75	Accelerator	0.50	1:1.87:2.18
40	10	2	Superplasticizer	0.44	1:1.88:2.17
45	8	-	-	0.39	1:1.33:1.79
45	15	-	-	0.43	1:1.20:1.70

Table 3. Characteristics of selected commercial microwave ovens

Designation	Microwave Oven Model			
	GS	WP	HI	SH
Cavity dimension WxHxD (unit in mm)	390x268x400	312x225x390	349x220x355	374.5x231.5x391.1
Capacity (Liter)	42	27	27	32
Power setting (from technical specification)	Every 10% of maximum output power (850 watts)	90/160/350/ 500/650/750/ 850/1000	90/180/270/360/ 450/540/630/ 720/810/900	10%/30%/50%/ 70%/100% of maximum output power (900 watts)
Microwave output power (unit in watt)	67/129/187/ 262/318/394/ 461/506/579/ 680	79/136/314/ 429/523/621/ 677/779	81/148/223/302/ 366/439/488/ 593/654/759	83/258/419/ 564/829

Table 4. The selected microwave power histories and the applied microwave energy per specimen of each microwave oven model.

Microwave -Power Type- Number of Specimen	Number of specimens	Power setting	Total applied energy (kJ)	Applied energy per specimen (kJ)	Percentage of error
GS-P1-S4*	4	262W(30M)+187W(15M)	639.9	160.0	0
GS-P1-S3	3	262W(26M)+ 67W(19M)	485.1	161.7	1.1
WP-P1-S4	4	314W(25M)+136W(20M)	634.2	158.6	-0.9
WP-P1-S3	3	314W(15M)+136W(15M) +79W(15M)	476.1	158.7	-0.8
HI-P1-S3	3	223W(31M)+81W(14M)	482.8	160.9	0.6
SH-P1-S3	3	258W(24M)+83W(21M)	476.1	158.7	-0.8
GS-P2-S3	3	506W(11.5M)+67.5W(33.5M)	484.8	161.6	1.0
WP-P2-S4	4	523W(16M)+79W(29M)	639.5	159.9	-0.1
HI-P2-S3	3	439W(12M)+81W(33M)	476.5	158.8	-0.7

* optimal power setting from [5]

Table 5. Comparisons of early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power histories with those cured under similar microwave power histories.

Target strength (MPa)	Microwave- Power Type- Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Microwave- Power Type- Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Percentage of error
15	GS-P1-S4	5.31	WP-P1-S4	5.46	2.9
15	GS-P1-S4	5.31	HI-P1-S3	5.12	-3.5
15	GS-P1-S4	5.31	GS-P1-S3	5.55	4.5
30	GS-P1-S4	8.00	WP-P1-S4	7.60	-5.0
30	GS-P1-S4	8.00	HI-P1-S3	7.53	-5.9
30	GS-P1-S4	8.00	GS-P1-S3	8.11	1.4
45	GS-P1-S4	19.21	WP-P1-S4	19.11	-0.5
45	GS-P1-S4	19.21	HI-P1-S3	20.39	6.2
45	GS-P1-S4	19.21	GS-P1-S3	18.77	-2.3

Table 6. Comparisons of early-age strengths of concrete specimens cured under optimal microwave power histories with those cured under higher rate of heating.

Target strength (MPa)	Microwave- Power Type- Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Microwave- Power Type- Number of Specimen	Early-age strength (MPa)	Percentage of error
15	GS-P1-S4	4.39	WP-P2-S4	5.50	25.3
15	GS-P1-S4	4.39	HI-P2-S3	5.54	26.2
15	GS-P1-S4	4.39	GS-P2-S3	5.16	17.5
30	GS-P1-S4	7.07	WP-P2-S4	10.18	44.0
30	GS-P1-S4	7.07	HI-P2-S3	9.12	29.0
30	GS-P1-S4	7.07	GS-P2-S3	8.65	22.4
45	GS-P1-S4	18.42	WP-P2-S4	21.06	14.3
45	GS-P1-S4	18.42	HI-P2-S3	21.54	17.0
45	GS-P1-S4	18.42	GS-P2-S3	14.28	-22.5

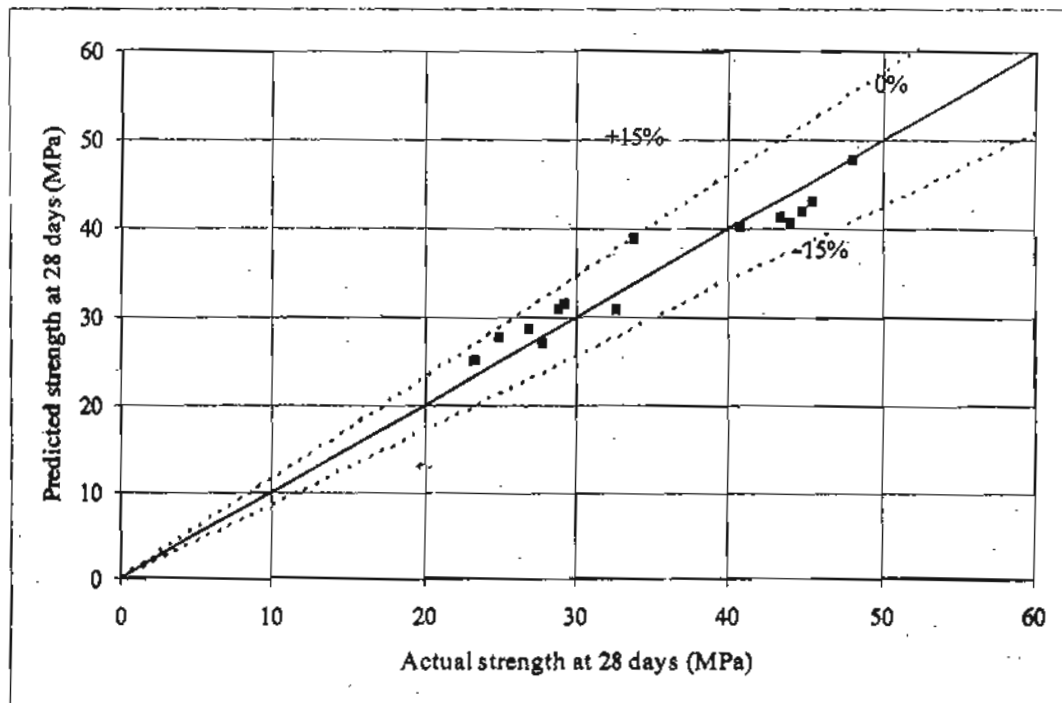


Fig. 1. Prediction of the 28-day strength of mix-in-lab concrete

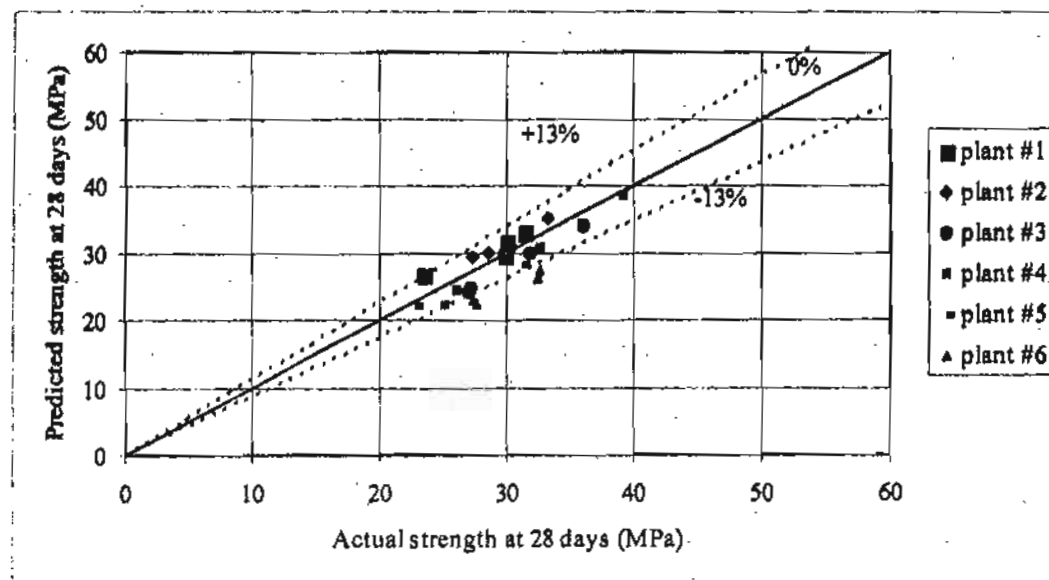


Fig. 2. Prediction of the 28-day strength of ready-mixed concrete

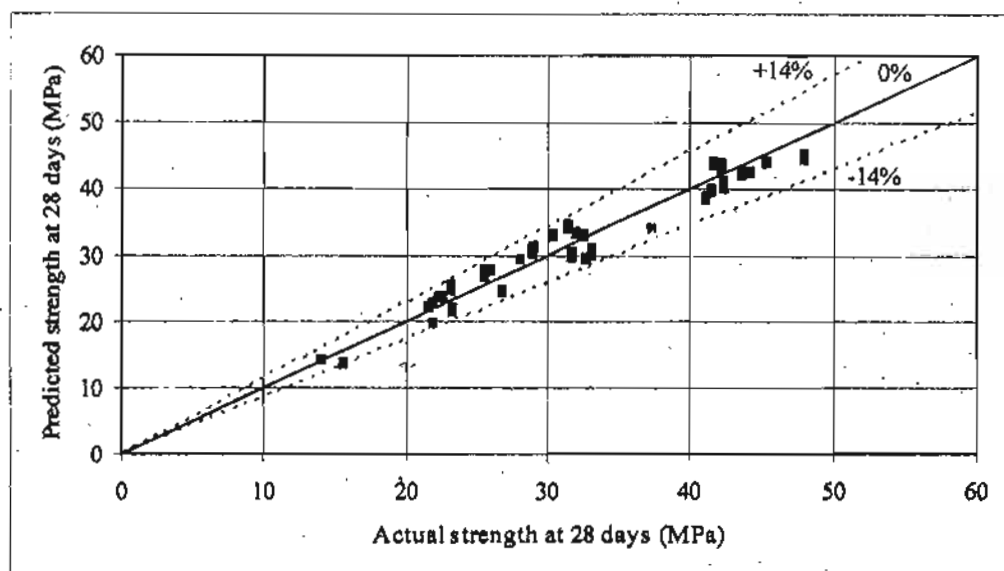
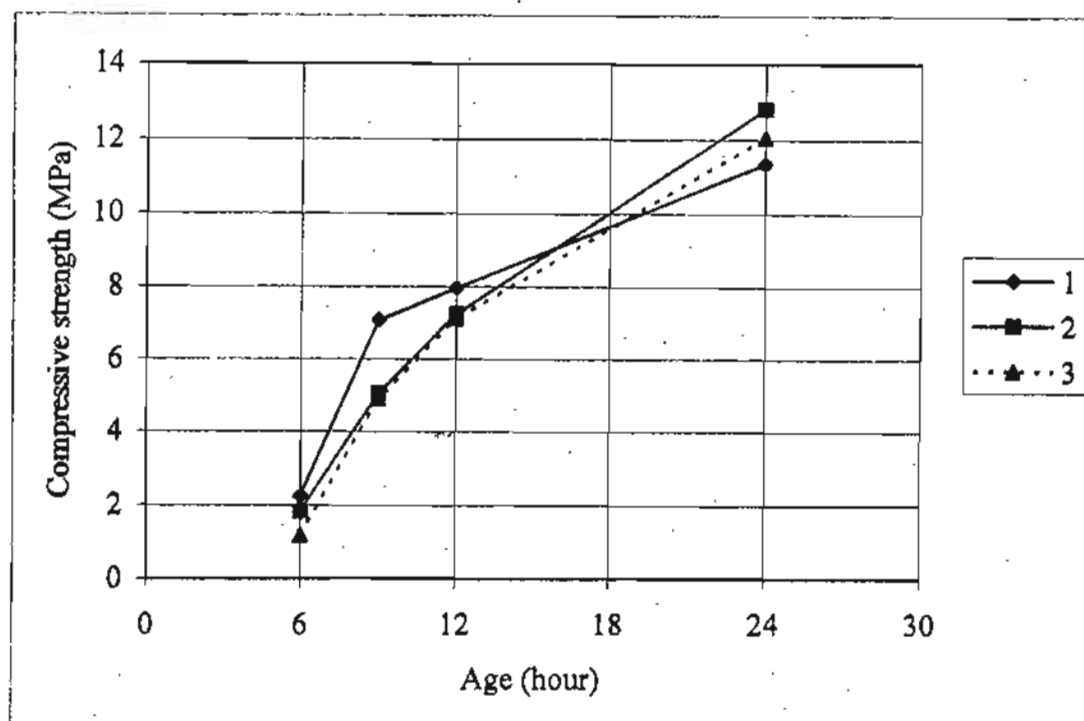
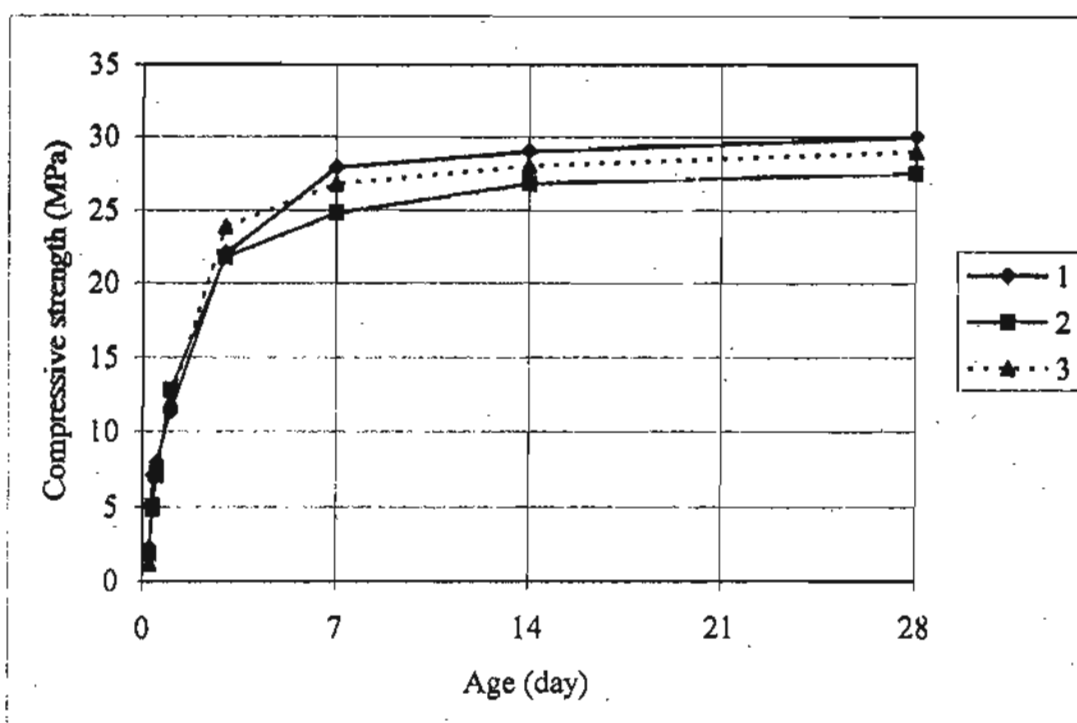


Fig. 3. Prediction of the 28-day compressive strength of concrete heated under different microwave ovens and number of specimens.



(a) At early age



(b) At later-age

Fig. 4. Strength development of mortar made from different brand of Type I cement (water/cement = 0.485 and cement : graded sand (ASTM C 778) = 1:2.75)