



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยการใช้การเร่งกำลังด้วยความร้อน

ในการทำนาคำลังและคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

Heat Accelerated Test to Predict Strength and Durability Properties of

Fly Ash Concrete

โดย

รศ. สุวิมล สัจจาภิษฐ์

มิถุนายน 2546



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยการใช้การเร่งกำลังด้วยความร้อน

ในการทำนํายกกำลังและคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

**Heat Accelerated Test to Predict Strength and Durability Properties of
Fly Ash Concrete**

โดย

รศ. สุวิมล สัจจวาณิชย์

มิถุนายน 2546

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยการใช้การเร่งกำลังด้วยความร้อน
ในการทำนากำลังและคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าลอย
Heat Accelerated Test to Predict Strength and Durability Properties of
Fly Ash Concrete

รศ. สุวิมล สัจจาณิษฐ์
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : PDF /24 / 2543

ชื่อโครงการ : การใช้การเร่งกำลังด้วยความร้อนในการทำน่ายกำลังและคุณสมบัติด้านความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

ชื่อนักวิจัย : รศ. สุวิมล สัจจาณิษฐ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail address: fengsusa@ku.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : 1 กรกฎาคม 2543-30 มิถุนายน 2545

การใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยในงานก่อสร้างภายในประเทศในปัจจุบันมีแนวโน้มสูงขึ้นมาก แต่ความสม่ำเสมอของคุณสมบัติเถ้าลอยยังเป็นประเด็นสำคัญสำหรับคุณภาพของคอนกรีต งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของความร้อนจากการบ่มต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมต่างๆของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอยในด้านการพัฒนากำลัง ความทนทานบางประการ และเปรียบเทียบการพัฒนาโครงสร้างภายในของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่บ่มด้วยวิธีมาตรฐานและวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนเพื่อเป็นแนวทางหาวิธีการทดสอบที่เหมาะสมที่ใช้เวลาเวลาสั้นๆ เพื่อใช้ตรวจสอบและควบคุมคุณภาพสำหรับงานก่อสร้าง โดยเป็นการศึกษาจากชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์และคอนกรีตทั้งที่ไม่ผสมและผสมเถ้าลอยที่ผันแปรปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ 5 ระดับ ภายใต้ภาวะต่างๆคือบ่มขึ้นปกติ บ่มด้วยวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนทันทีในถังบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิ 35 °C , 75°C และ 95°C และบ่มด้วยวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนเมื่อมีอายุครบ 24 ชม. โดยใช้เวลา 24, 3 1/2 และ 3 1/2 ชม. ตามลำดับ

ผลการศึกษาพบว่าเถ้าลอยจากต่างแหล่งมาจากวัตถุดิบและกระบวนการผลิตต่างกัน มีความแตกต่างกันทั้งองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพ แหล่งของเถ้าลอยมีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังอัดแต่ไม่มีผลชัดเจนต่ออัตราส่วนกำลังจากวิธีบ่มเร่งต่อกำลังจากวิธีบ่มปกติที่อายุ 28 วัน การบ่มอุณหภูมิสูงมีผลต่อการพัฒนากำลังทั้งแรงอัด แรงดัดและ แรงดึงในระยะต้น โดยเฉพาะแรงอัด มีความผันแปรอยู่ในช่วงร้อยละ 10 ค่ากำลังของมอร์ตาร์และคอนกรีตที่บ่ม 95°C มีค่าสูงกว่าการบ่มที่ 75°C ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนกำลังของมอร์ตาร์จากการบ่มเร่งต่อกำลังจากการบ่มปกติที่อายุ 28 วัน และปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ อยู่ในช่วง 0.2 – 0.60 ขึ้นอยู่กับ ปริมาณการแทนที่ และระดับอุณหภูมิ การยืดระยะเวลาการบ่มเร่ง มีผลต่อการลดความผันแปรของค่าอัตราส่วนกำลัง ค่ากำลังอัดจากการบ่มเร่งมีความสัมพันธ์ของกำลังอัดจากการบ่มปกติค่อนข้างชัดเจน ทั้งอัตราส่วนกำลังดัดและกำลังดึงมีค่าลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาคอนกรีตพบว่า การบ่มด้วยอุณหภูมิสูงมีผลต่อทั้งคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกระดับการแทนที่ สำหรับคอนกรีตปกติ ค่าเฉลี่ยกำลังอัดจากการบ่มเร่งกำลังอุณหภูมิสูงทันทีในแต่ละกรณีมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่การบ่มเร่งยืดเวลา 24 ชั่วโมงไม่แสดงแนวโน้มชัดเจน และความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มเร่งหลังยืดเวลาไปแล้ว 24 ชั่วโมงกับกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วันมีความผันแปรน้อยกว่ากรณีการบ่มเร่งทันที การบ่ม

อุณหภูมิสูงมีผลต่อการพัฒนากำลังสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยมาก ทั้งปริมาณการแทนที่และระดับ อุณหภูมิมีผลต่อการเร่งกำลัง และการทำนายกำลังอัดระยะยาว ค่ากำลังอัดจากการบ่มเร่งมีความ สัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิ W/B และปริมาณการแทนที่ในลักษณะเชิงเส้น แต่ผลกระทบของระดับ อุณหภูมิต่อค่าอัตราส่วนกำลังอัดมีน้อยกว่าเมื่อเทียบกับกรณีของกำลังอัด อิทธิพลของอุณหภูมิต่อ ความต้านทานการขยายตัวจากเกลือซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยมีพฤติกรรมค่อนข้างแตกต่าง จากคอนกรีตปกติ แต่ข้อมูลการแช่ระยะสั้นที่มีอยู่ได้มีความผันแปรมากไม่อาจสรุปได้ชัดเจน คอนกรีต ควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกระดับการแทนที่ ที่บ่มด้วยอุณหภูมิสูง 3.5 ซม. มีค่าความต้าน ทานการซึมได้ของคลอไรด์ต่ำ จนไม่อาจวัดได้ แต่ผลกระทบจากอุณหภูมิสูงยังคงมีผลต่อความต้าน ทานการซึมได้แม้เมื่อบ่มต่อที่อุณหภูมิปกติสำหรับคอนกรีตทั้งสองชนิด อุณหภูมิสูงมีผลต่อการ พัฒนาโครงสร้างภายในอย่างชัดเจนและมี อิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยา pozzolanic ในระดับที่แตก ต่างกัน เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของอุณหภูมิสูงและความเหมาะสมในการใช้งาน อาจสรุปได้การบ่ม ด้วยอุณหภูมิสูง 3.5 ซม.ทันทีที่มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้เป็นวิธีตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ ในระยะเวลาสั้นๆ ทั้งอุณหภูมิ 75°C และ 95°C ให้ความสัมพันธ์กับ กำลังอัดระยะยาวที่มีความน่าเชื่อถือ ได้ทางสถิติ

คำหลัก: การเร่งกำลังด้วยความร้อน กำลัง คอนกรีตผสมเถ้าลอย

Abstract

Project Code : PDF /24 / 2543

Project Title : Heat Accelerated Test to Predict Strength and Durability Properties of Fly Ash Concrete

Investigator: Dr.Suvimol Sujjavanich

Department of Civil Engineering Kasetsart University

E-mail Address: fengsusa@ku.ac.th

Project period: July 1, 2543- June 30,2545

The trend of fly ash utilization in concrete industry is increasing to unprecedented degree. However, the uniformity of fly ash is still questionable for quality of final concrete. Therefore, the means for quality control during construction become necessary. This report aimed to investigate the effect of high curing temperature on strength development, some durability properties and also the development of the microstructure, compare to that of the standard curing condition, to aid finding accelerated early strength method for quality control of fly ash concrete. The study investigated the effect of high curing temperature and duration on fly ash cement mortar and concrete with the following parameters.

Five cement replacement percentages, namely 0, 20,30,40 and 50; 3 levels of water/binder ratios, viz, 0.40, 0.50 and 0.60; and three curing conditions, namely standard and high temperature curing promptly and after 24 hours of casting for 3 ½ hours.

The results indicated favorable outcome of accelerated curing from the inclusion of fly ash in concrete. Different sources of fly ash which yielded different chemical composition and physical properties appeared to affect individual strength gain, but not the ratios of accelerated strength to strength at 28 days. High curing temperatures strongly influence strength development of fly ash cement mortar, including compressive, tensile and flexural strength. The ratios of accelerated compressive strength to strength at 28 days varied within 10 percent range. The strength of both mortar and concrete under 95 °C curing is always significantly higher than of 75 °C curing, regardless to the used condition. The strength ratios of fly ash mortar were found to be in the range of 0.20-0.60, depending on percent replacement, and temperature level. Delayed curing

condition clearly reduced the variation of strength ratio. The clear relationship between accelerated compressive strength and normal cure compressive strength was found. The strength ratio of compressive, flexural and tensile strength decreased as the percent replacement increased.

For concrete, the strong effect of prompt curing under both high temperature levels, 75°C and 95 °C on strength development of concrete both with and without fly ash was revealed. For normal concrete, the difference in means of compressive strength from both temperature in each condition was statistically significant. However, the difference in means of the delayed accelerated cure compressive strength under 75°C and 95 °C was not clear. The variation of the relationship between accelerated and normal compressive strength was less in this case than that of the prompt curing. High temperature curing strongly affected strength development of fly ash concrete. Both replacement percentage and temperature level affect strength development and later age strength prediction. The relationship of accelerated and temperature, w/b and percentage replacement was found to be linear. However, the effect from temperature level on flexural strength ratio was less than that of compressive strength. The effect of temperature on resistance to sulfate expansion was not clear. Only conclusion that could be drawn from the wide variation of the limited data was the behavior of fly ash and normal concrete in this aspect is different. From rapid chloride permeability test, fly ash concrete under heat cure 3 ½ hours showed the immeasurably low resistance of chloride penetration. The heat effect influenced permeability development even after the heat source was removed. Different high temperature influenced hydration and pozzolanic reaction of fly ash concrete to different degree.

On the basis of the results and with consideration of proper flexible working schedule and feasibility of each method, both 75°C and 95°C promptly cured for 3 ½ hours was proposed as means for quality control and corrective measure. It was concluded that the relationship of accelerated and normal strength was statistically significant.

Keywords: Heat Accelerated, Strength, Fly Ash Concrete

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่เล็งเห็นความสำคัญของการวิจัยและการพัฒนานักวิจัยและให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้ในลักษณะทุนวิจัยหลังปริญญาเอก ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ได้ให้การสนับสนุนงานวิจัยในด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย สถานที่ และเวลาที่ใช้ในงานวิจัยมาโดยตลอดและขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตที่ได้เอื้อเฟื้อถ้อยคำและอำนวยความสะดวกในการวิจัยครั้งนี้

คำนำ

ในปัจจุบันมีการใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างแพร่หลายและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยตลอด เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ผลิตได้ในประเทศมีคุณภาพดีขึ้น และมีรายงานการศึกษาถึงศักยภาพของการนำมาใช้ในงานก่อสร้างสูง และราคาที่ถูกกว่าปูนซีเมนต์ นอกจากนี้ยังมีผลดีในเชิงของการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและการจัดการอีกด้วย แต่ทว่าคุณสมบัติที่สม่ำเสมอจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศ หรือแม้แต่แหล่งเดียวกันยังเป็นประเด็นสำคัญสำหรับคุณภาพของคอนกรีต ดังนั้นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นในชั้นการปฏิบัติงานและจัดเป็นเรื่องสำคัญต่อวิศวกรและผู้เกี่ยวข้อง

วิธีการทดสอบที่ใช้เวลานั้นๆ จะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอของวัสดุ โดยเฉพาะสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอยซึ่งนิยมทดสอบคุณสมบัติที่อายุมากกว่าคอนกรีตปกติคือที่ 56 หรือ 91 วัน ซึ่งจัดว่านานมากสำหรับกระบวนการควบคุมคุณภาพ การทดสอบที่สามารถรู้ผลได้อย่างรวดเร็วทันทีที่จะช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างเหมาะสมและเป็นไปตามความต้องการได้ทันเวลาและเหมาะสมในแง่เศรษฐศาสตร์ งานวิจัยเกี่ยวกับการเร่งกำลังคอนกรีตผสมเถ้าลอยด้วยความร้อนจะเป็นงานที่รองรับการใช้คอนกรีตดังกล่าวในอุตสาหกรรมก่อสร้างซึ่งในปัจจุบันประเทศไทยยังมิได้มีแนวทางปฏิบัติสำหรับการทดสอบเพื่อการควบคุมคุณภาพโดยตรง และข้อมูลจากการศึกษานี้ยังใช้เป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย และผลกระทบจากความร้อน ต่อการพัฒนาโครงสร้างภายใน ตลอดจน พฤติกรรมของคอนกรีตดังกล่าว ซึ่งเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างโดยตรงอีกด้วย

จากการสนับสนุนในด้านทุนวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการนี้ยังมีส่วนร่วมในการผลิตนักวิจัยระดับปริญญาโทจำนวน 1 คน โครงการวิจัยในระดับปริญญาตรีจำนวน 2 คน และบทความทางวิชาการจำนวน 4 บทความ ซึ่งได้ตีพิมพ์ในการประชุมทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นส่วนหนึ่งของความรู้พื้นฐานในการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากเถ้าลอยต่อไปในอนาคตอีกด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	
Abstract	
กิตติกรรมประกาศ	
คำนำ	
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(3)
สารบัญภาพ	(5)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 คำนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 แนวทางการศึกษา	2
บทที่ 2 งานศึกษาในอดีต	4
2.1 ปฏิกิริยาhydrationของระบบซีเมนต์และระบบซีเมนต์-ปอซโซลาน	4
2.2 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อการพัฒนากำลังอัด	5
2.3 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อการทำลายเนื่องจากเกลือซัลเฟต	6
2.4 ผลกระทบของการกัดกร่อนของคลอไรด์	7
2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิสูงจากภายนอก	9
2.6 ผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย	10
บทที่ 3 วิธีการทดสอบ	12
3.1 การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอย	12
3.2 การศึกษาจกชั้นตัวอย่างมอร์ตาร์	12
3.2.1 การศึกษาผลกระทบจากคุณภาพของเถ้าลอยจากต่างแหล่งต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์	12
3.2.2 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ	13
3.3 การศึกษาชิ้นตัวอย่างคอนกรีต	13
3.4 การศึกษาโครงสร้างภายใน	14

3.5. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	14
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	15
4.1 การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอย	15
4.2 การศึกษามอร์ตาร์	16
4.2.1 ผลกระทบจากคุณภาพของเถ้าลอยจากต่างแหล่งต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์	16
4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าลอย	19
4.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ	21
4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ	22
4.2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ	24
4.3 การศึกษาชิ้นตัวอย่างคอนกรีต	26
4.3.1 ผลกระทบของรูปร่างชิ้นตัวอย่าง	26
4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอย	27
4.3.3 ค่ากำลังรับแรงอัด	39
4.3.4 การศึกษาผลกระทบจากอุณหภูมิต่อความต้านทานการขยายตัวจากเกลือซัลเฟต	48
4.3.5 การศึกษาความต้านทานการซึมได้ของคลอไรด์	48
4.3.6 ผลการศึกษาด้าน microstructure	49
บทที่ 5 บทสรุปงานวิจัย	62
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก ภาพแสดงการทดสอบ	ก-1
ภาคผนวก ข ข้อมูลการทดลองมอร์ตาร์	ข-1
ภาคผนวก ค ข้อมูลการทดลองคอนกรีต	ค-1

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของเถ้าลอยที่ใช้เปรียบเทียบกับเถ้าลอยตามข้อกำหนดของ ASTM	16
ตารางที่ 4.2.1.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากต่างแหล่ง	17
ตารางที่ 4.2.4.1 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดจากการบ่มแรงภาวะต่างๆและการบ่มปกติกับระดับอุณหภูมิ W/B และปริมาณการแทนที่	24
ตารางที่ 4.2.5.1 อัตราส่วนกำลังดึงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และปริมาณการแทนที่ และสภาวะการบ่ม	25
ตารางที่ 4.3.1.1 กำลังอัดของตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ที่อายุต่างๆเทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก	27
ตารางที่ 4.3.2.1 ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดคอนกรีตในภาวะการบ่มต่างๆ	28
ตารางที่ 4.3.2.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังอัดคอนกรีตในภาวะการบ่มต่างๆ	29
ตารางที่ 4.3.2.3 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดจากการบ่มแรงกับกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน	30
ตารางที่ 4.3.2.4 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดจากการบ่มแรงกับอุณหภูมิ และ W/B	32
ตารางที่ 4.3.2.5 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย จากการบ่มแรงกับระดับอุณหภูมิ W/B และปริมาณการแทนที่	34
ตาราง 4.3.2.6 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอย จากการบ่มแรงสภาวะต่างๆกับกำลังอัดระยะยาว	34
ตารางที่ 4.3.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดจากการบ่มแรงในภาวะต่างๆต่อกำลังอัดจากการบ่มปกติและอุณหภูมิและอัตราส่วน W/B	40
ตารางที่ 4.3.3.2 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดจากการบ่มแรงในภาวะต่างๆและกำลังอัดจากการบ่มปกติ	41
ตารางที่ 4.3.3.3 ค่าเฉลี่ยกำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกระดับ W/B ทุกกรณีบ่มและทุกอายุ	44
ตารางที่ 4.3.3.4 ความสัมพันธ์กำลังรับแรงอัดจากการบ่มแรงในภาวะต่างๆและกำลังอัดจากการบ่มปกติ	45
ตารางที่ 4.3.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังรับแรงอัดต่ออุณหภูมิ อัตราส่วน W/B และปริมาณการแทนที่เถ้าลอย	47
ตารางที่ 4.3.4.1 ผลการทดสอบ Rapid Chloride Permeability.	49
ภาคผนวก	
ตาราง ข1 การหาระยะเวลาการสั้นที่เหมาะสมของมอร์ตาร์ซีเมนต์ W/B=0.3	ข-2
ตาราง ข 2 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุม W/B=0.5	ข-3
ตาราง ข 3 ผลการทดลองกำลังอัดมอร์ตาร์ควบคุม W/B=0.6	ข-4

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตาราง ข 4 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 20 %จากราชนูรี W/B=0.5	ข -5
ตาราง ข 5 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 20 % จากระยอง W/B=0.5	ข -6
ตาราง ข 6 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 20 %จากราชนูรี W/B=0.6	ข -7
ตาราง ข 7 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 20%จากระยอง W/B=0.6	ข -8
ตาราง ข 8 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ด้วย Fly ash 40% จากราชนูรี W/B=0.5	ข -9
ตาราง ข 9 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ด้วย Fly ash 40%จากระยอง W/B=0.5	ข -10
ตาราง ข 10 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 40% จากราชนูรี W/B=0.6	ข -11
ตาราง ข 11 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 40% จากระยอง W/B=0.6	ข -12
ตาราง ข 12 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 60% จากราชนูรี W/B=0.5	ข -13
ตาราง ข 13 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 60% จากระยอง W/B=0.5	ข -14
ตาราง ข 14 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 60% จากราชนูรี W/B=0.6	ข -15
ตาราง ข 15 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วย Fly ash 60% จาก ระยอง W/B=0.6	ข -16
ตาราง ข 16 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0-50% จาก แม่เมาะ W/B=0.4	ข -17
ตาราง ข 17 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0-50% จาก แม่เมาะ W/B=0.5	ข -17
ตาราง ข 18 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0-50% จาก แม่เมาะ w/b=0.4-0.5	ข -18
ตาราง ข 19 ผลการทดลองกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 0-50% จาก แม่เมาะ w/b=0.4-0.5	ข -19
ตารางที่ ค1 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตในภาวะการบ่มแรงต่อกำลังอัดที่อายุ 28 และ 56 วัน	ค-2
ตารางที่ ค2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตในภาวะการบ่มแรงต่อกำลังอัดที่อายุ 28 และ 56 วัน (w/b=0.50)	ค-5
ตารางที่ ค3 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังอัดของคอนกรีตในภาวะการบ่มแรงต่อกำลังอัดที่อายุ 28 และ 56 วัน (w/b=0.60)	ค-6
ตาราง ค4 อัตราส่วนของกำลังอัดจากการบ่มแรงทันที ต่อ จากการบ่มแรงปกติที่ 28 และ 56 วัน	ค-7

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.1.1 ลักษณะอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้	15
ภาพที่ 4.1.2 ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้	15
ภาพที่ 4.2.1.1 ก ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆจากการบ่ม แรงและปริมาณการแทนที่ (w/b 0.5)	18
ภาพที่ 4.2.1.1 ข ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆจากการบ่ม แรง 95 °C และปริมาณการแทนที่ (w/b 0.5)	18
ภาพที่ 4.2.2.1 การวิเคราะห์ TGA ของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าลอยที่บ่ม 75 °C 3.5 ชั่วโมง	19
ภาพที่ 4.2.2.2 การวิเคราะห์ TGA ของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าลอยที่บ่ม 95 °C 3.5 ชั่วโมง	20
ภาพที่ 4.2.2.3 การวิเคราะห์ TGA ของซีเมนต์เพสต์ล้วนที่บ่มปกติ 28 วัน	20
ภาพที่ 4.2.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาต่ออัตราส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย	21
ภาพที่ 4.2.3.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจากการบ่มแรงและการบ่มปกติ	22
ภาพที่ 4.2.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาต่อความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดของ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และปริมาณการแทนที่	23
ภาพที่ 4.2.5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาต่อความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดของ มอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และปริมาณการแทนที่	25
ภาพที่ 4.3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของตัวอย่างรูปลูกบาศก์และตัวอย่างรูปทรงกระบอก	26
ภาพที่ 4.3.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการบ่มแรงและ w/b ของคอนกรีตควบคุม	29
ภาพที่ 4.3.2.2 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มแรงทันทีที่อุณหภูมิ 75 °C และ กำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน	30
ภาพที่ 4.3.2.3 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มแรงทันทีที่อุณหภูมิ 95 °C และ กำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน	31
ภาพที่ 4.3.2.4 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มแรงหลังยัดเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 75 °C และกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน	31
ภาพที่ 4.3.2.5 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มแรงหลังยัดเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 95 °C และกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน	32
ภาพที่ 4.3.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพจากการยัดเวลาการบ่มแรงทันทีเป็น 24 ชั่วโมงและปริมาณ การแทนที่เถ้าลอยของคอนกรีตที่มีค่า w/b ต่างกัน	33
ภาพที่ 4.3.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดจากการบ่มแรงต่อกำลังอัดที่ 28 วันจากการบ่มแรง สภาวะต่างๆและปริมาณการแทนที่เถ้าลอยของคอนกรีตที่มีค่า w/b ต่างกัน	33
ภาพที่ 4.3.2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการบ่มแรงต่อกำลังอัดที่ 28 วันและ 56 วันจากการบ่มแรง ทันทีของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่มีค่า w/b ต่างกัน	35

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาพที่ 4.3.3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการบ่มแรงและปริมาณการแทนที่ของคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอย w/b0.4 จากการบ่มแรง 75 °C, 95 °C จากการบ่มทันทีและยัดเวลา 24 ชั่วโมง	46
ภาพที่ 4.3.3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการบ่มแรงและปริมาณการแทนที่ของคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอย w/b0.5 จากการบ่มแรง 75 °C, 95 °C จากการบ่มทันทีและยัดเวลา 24 ชั่วโมง	46
ภาพที่ 4.3.3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการบ่มแรงและปริมาณการแทนที่ของคอนกรีตที่ผสม เถ้าลอย w/b0.6 จากการบ่มแรง 75 °C, 95 °C จากการบ่มทันทีและยัดเวลา 24 ชั่วโมง	47
ภาพที่ 4.6.1 การเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอยสภาวะบ่มในน้ำ (7 วัน)	52
ภาพที่ 4.6.2 การเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยในสภาวะบ่มในน้ำ (อายุ 1 เดือน)	52
ภาพที่ 4.6.3 การเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอยสภาวะบ่มในน้ำ (อายุ 8 เดือน)	53
ภาพที่ 4.6.4 การเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใช้เถ้าลอยสภาวะบ่มอุณหภูมิสูง 75 °C 3.5 ชั่วโมง	54
ภาพที่ 4.6.5 การเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ไม่ใช้เถ้าลอยสภาวะบ่มอุณหภูมิสูง 95 °C 3.5 ชั่วโมง	55
ภาพที่ 4.6.6 การเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอย 35 % สภาวะบ่มอุณหภูมิสูง 75 °C 3.5 ชั่วโมง	56
ภาพที่ 4.6.7 การเปรียบเทียบโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอย 35 % สภาวะบ่มอุณหภูมิสูง 95 °C 3.5 ชั่วโมง	57
ภาพที่ 4.6.8 X-ray Diffractogram (ที่ อายุ 7 วัน)	58
ภาพที่ 4.6.9 X-ray Diffractogram (ที่ อายุ 1 เดือน)	58
ภาพที่ 4.6.10 X-ray Diffractogram (ที่ อายุ 8 เดือน)	58
ภาพที่ 4.6.11 X-ray Diffractogram ที่บ่มอุณหภูมิสูง 75 °C และสูง 95 °C (ที่ อายุ 3.5 ชั่วโมง)	59
ภาพที่ 4.6.12 X-ray Diffractogram ของซีเมนต์เพสต์ ที่บ่มอุณหภูมิสูง 75 °C (ที่ อายุ 3.5 ชั่วโมง)	59
ภาพที่ 4.6.13 X-ray Diffractogram ของซีเมนต์เพสต์ ที่บ่มอุณหภูมิสูง 95 °C (ที่ อายุ 3.5 ชั่วโมง)	60
ภาพที่ 4.6.14 X-ray Diffractogram ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย 35 % ที่บ่มอุณหภูมิสูง 75 °C (ที่ อายุ 3.5 ชั่วโมง)	60
ภาพที่ 4.6.15 X-ray Diffractogram ของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอย 35 % ที่บ่มอุณหภูมิสูง 95 °C (ที่ อายุ 3.5 ชั่วโมง)	61

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
ภาคผนวก	
ภาพที่ ก1 แผนภูมิแสดงการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มเติมจากการเกิดปฏิกิริยาhydrationปกติ	ก-2
ภาพที่ ก 2 แบบหล่อที่ใช้สำหรับการทดสอบกำลังอัด	ก-3
ภาพที่ ก 3 การอัดแน่นขึ้นตัวอย่างด้วยโต๊ะเขย่า	ก-3
ภาพที่ ก4 ตัวอย่างมอร์ตาร์ที่บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้อง	ก-3
ภาพที่ ก5 ตัวอย่างมอร์ตาร์ขณะบ่มอุณหภูมิสูง	ก-3
ภาพที่ ก6 การทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์	ก-3
ภาพที่ ก7 ตัวอย่างมอร์ตาร์หลังทดสอบการรับกำลังอัด	ก-3
ภาพที่ ก8 ลักษณะตัวอย่างมอร์ตาร์หลังการทดสอบกำลังอัด	ก-3
ภาพที่ ก9 การเปรียบเทียบก่อนทดสอบขึ้นตัวอย่าง	ก-4
ภาพที่ ก10 การวัดการขยายตัวของแท่งคอนกรีต	ก-4
ภาพที่ ต1.1 ขึ้นตัวอย่างการขยายตัวและแท่งวัดความยาวเปรียบเทียบ	ก-4
ภาพ ข1. กราฟกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์W/B=0.3ที่ทำการสั่นตัวอย่างระยะเวลาต่างๆ	ข-2

บทที่ 1

บทนำ

1. คำนำ

ในปัจจุบันการใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยในงานก่อสร้างภายในประเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นมากและมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็นที่คาดการณ์ว่าความต้องการใช้เถ้าลอยจะเพิ่มขึ้นต่อไปอีกเป็นเวลานาน ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของเถ้าลอยจากแหล่งผลิตในประเทศมีคุณภาพดีขึ้น และมีรายงานการศึกษาถึงศักยภาพของการนำมาใช้ในงานก่อสร้างสูง นอกจากนั้นการนำมาใช้งานคอนกรีตในแง่ของการแทนที่ซีเมนต์ในปริมาณมากยังส่งผลดีในเชิงของการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและการจัดการอีกด้วย ราคาของเถ้าลอยที่ต่ำกว่าซีเมนต์มากเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำเถ้าลอยมาใช้งานคอนกรีตอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมคอนกรีตผสมเสร็จและงานผลิตชิ้นส่วนสำเร็จรูปตลอดระยะ 2-3 ปีหลัง ถึงแม้ว่าคุณสมบัติที่สม่ำเสมอจากแหล่งต่างๆ ในประเทศหรือแม้แต่แหล่งเดียวกันยังเป็นประเด็นสำคัญสำหรับคุณภาพของคอนกรีต

การทำงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไปมีขั้นตอนและการตรวจสอบเพื่อการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตซึ่งต้องอาศัยเวลา ขณะเดียวกันงานก่อสร้างเป็นงานที่ต้องดำเนินต่อเนื่อง การหยุดชะงักหมายถึงค่าใช้จ่ายและความเสียหายทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นเมื่อมีการใช้คอนกรีตผสมเถ้าลอยในงานก่อสร้างมากขึ้น วิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบและควบคุมคุณภาพของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจึงเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นในขั้นการปฏิบัติงานเช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ

สำหรับคอนกรีตปกตินิยมใช้กำลังที่อายุ 28 วันเป็นเกณฑ์ ในบางกรณีอาจใช้กำลังที่อายุ 3 หรือ 7 วันเพื่อทำนายกำลังที่ 28 วันโดยไม่ผิดพลาดมากนัก เนื่องจากอัตราของปฏิกิริยา hydration มักเกิดขึ้นเร็วในช่วง 3 วันแรก แต่คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีพฤติกรรมการพัฒนาโครงสร้างภายในต่างไปจากคอนกรีตธรรมดาซึ่งจะเป็นผลสืบเนื่องไปถึงคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์คอนกรีต ปฏิกิริยา Pozzolanitic ซึ่งเป็นปฏิกิริยาในขั้นที่ 2 ของคอนกรีตที่มีเถ้าลอยเป็นส่วนผสม จะเกิดขึ้นช้ากว่าปฏิกิริยา hydration ตามปกติของซีเมนต์ทำให้ต้องพิจารณาคุณสมบัติต่างๆที่อายุมากกว่าคอนกรีตปกติ โดยทั่วไปนิยมทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่อายุ 56 หรือ 91 วัน ซึ่งจัดว่านานมากสำหรับกระบวนการควบคุมคุณภาพ วิธีการทดสอบที่ใช้เวลาสั้นๆภายในไม่กี่ชั่วโมงหลังจากเทคอนกรีตซึ่งสามารถทำนายคุณสมบัติระยะยาวได้จะเป็นประโยชน์ต่อการควบคุมคุณภาพและความสม่ำเสมอของวัสดุซึ่งจะช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยน วัสดุ ส่วนผสมและวิธีการทำงานให้เหมาะสมเพื่อให้สามารถพัฒนาคุณภาพคอนกรีตให้เป็นไปตามความต้องการได้ทันเวลาและเหมาะสมในแง่เศรษฐศาสตร์

สำหรับคอนกรีตปกติในระหว่าง 24 ชั่วโมงแรกเป็นช่วงที่มีความเปลี่ยนแปลงมาก โดยปฏิกิริยาและการพัฒนาโครงสร้างภายในส่วนใหญ่ซึ่งเป็นผลต่อกำลังโดยตรงจะเกิดขึ้นในช่วงนี้ ทำให้การทดสอบกำลังไม่แน่นอน แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าในวัสดุคอนกรีตทั่วไปซึ่งรวมถึงคอนกรีตผสมเถ้าลอย อุณหภูมิสูงมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยามากเป็นผลให้มีการเพิ่มกำลังได้เร็วขึ้น ทำให้เกิดแนวความคิดในการใช้ความร้อนจากภายนอกเร่งปฏิกิริยาเพื่อทำนายกำลังในระยะยาวของคอนกรีตปกติและนำไปใช้ประโยชน์ในการควบคุมคุณภาพในงานก่อสร้าง แต่ประเทศไทยยังมิได้มีแนวทางปฏิบัติสำหรับการทดสอบเพื่อการควบคุมคุณภาพโดยตรง ดังนั้นงานวิจัยเกี่ยวกับการเร่งกำลังคอนกรีตผสมเถ้าลอยด้วยความร้อนจะเป็นงานที่รองรับการใช้คอนกรีตดังกล่าวและเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างโดยตรง

รายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการบ่มด้วยอุณหภูมิสูงต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมต่างๆของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอยในด้านการพัฒนากำลัง รวมถึงคุณสมบัติด้านความทนทานบาง

ประการ และโครงสร้างภายในที่อายุต่างๆ รวมถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจากการเร่งกำลังด้วยความร้อนและจากการบ่มตามวิธีมาตรฐานที่อายุต่างๆ เพื่อหาวิธีการทดสอบแบบเร่งกำลังที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวิธีตรวจสอบและควบคุมคุณภาพในระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างโดยตรง นอกจากนั้นข้อมูลจากการศึกษานี้ยังอาจใช้เป็นฐานข้อมูลคุณสมบัติและพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยสำหรับการศึกษาอื่นอีกด้วย แต่เนื่องจากในประเทศไทยเถ้าลอยที่นำมาใช้ในงานก่อสร้างมาจากหลายแหล่ง แหล่งที่สำคัญและมีปริมาณมากที่สุดคือ จากอ.แม่เมาะ จ.ลำปาง นอกจากนั้นยังมีแหล่งอื่น เช่น ระยอง ,ราชบุรี ,สมุทรสาคร เป็นต้นซึ่งเถ้าลอยจากต่างแหล่งมีความแตกต่างกันทั้งในด้านวัตถุดิบ กระบวนการ คุณภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมี และข้อมูลการศึกษาเถ้าลอยจากแหล่งอื่นโดยเฉพาะผลกระทบจากอุณหภูมิสูงยังมีน้อย ดังนั้นส่วนหนึ่งของรายงานฉบับนี้จึงเป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ทำการบ่มซึ่งมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยจาก 3 แหล่งคือ แม่เมาะ ระยองและราชบุรี แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณต่าง ๆ กัน

1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยคือการศึกษาผลกระทบของความร้อนต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากแหล่งใหญ่ในประเทศเพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงการพัฒนาเป็นวิธีตรวจสอบและควบคุมคุณภาพในระยะเวลาสั้นๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของความร้อนจากการบ่มต่อคุณสมบัติและพฤติกรรมต่างๆของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอยในด้านการพัฒนากำลัง รวมถึงคุณสมบัติด้านความทนทานบางประการ และโครงสร้างภายในที่อายุต่างๆ
2. เพื่อศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังจากการเร่งกำลังด้วยความร้อนและกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่บ่มตามวิธีมาตรฐานอายุที่ 7, 28, 56 และ 91 วัน
3. เพื่อหาวิธีการทดสอบการเร่งกำลังที่เหมาะสมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นวิธีตรวจสอบและควบคุมคุณภาพในระยะเวลาสั้น
4. เพื่อเปรียบเทียบการพัฒนาโครงสร้างภายในของคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่บ่มด้วยมาตรฐานและวิธีเร่งกำลัง

1.3. ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตการศึกษาคุณสมบัติของมอร์ตาร์และคอนกรีตผสมเถ้าลอยโดยผันแปรปริมาณเถ้าลอยที่แทนที่ซีเมนต์ 5 ระดับคือ 0%, 20%, 30%, 40% และ 50% และอัตราส่วน W/C 3 ค่าคือ 0.3, 0.4 และ 0.5 โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติที่อายุ 28 วันของชิ้นตัวอย่างที่บ่มด้วยวิธีมาตรฐาน, วิธีการให้ความร้อนด้วยน้ำอุ่นและการต้ม คุณสมบัติที่ทำการศึกษาคือ กำลังดัด กำลังดึง กำลังอัดและการพัฒนาโครงสร้างภายในด้วยวิธี scanning electron microscope (SEM) และ X Ray Diffraction (XRD)

1.4. แนวทางการศึกษา

โครงร่างรายงานฉบับนี้แยกเป็นหลายส่วนดังนี้ ในบทที่ 2 เป็นการค้นคว้างานวิจัยในอดีตทั้งในและต่างประเทศ ในบทที่ 3 กล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอย วิธีการทดสอบคุณสมบัติต่างๆและ การศึกษาจากชิ้นตัว

อย่างมอรัตรและคอนกรีต บทที่ 4 เป็นการรายงานผลการศึกษาและวิเคราะห์ บทที่ 5 เป็นการสรุปผลและข้อเสนอแนะ
จากการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการใช้ถั่วลอยในงานคอนกรีตให้ได้ประโยชน์สูงสุด

บทที่ 2

งานศึกษาในอดีต

คอนกรีตทั้งที่ผสมและไม่ผสมเถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อนและผันแปรตามเวลา นอกจากนั้นพฤติกรรมต่างๆยังขึ้นกับปัจจัยภายนอกอื่นๆที่มากระทบอีกด้วย คุณสมบัติส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับการพัฒนาโครงสร้างภายใน ดังนั้นในรายงานส่วนนี้จะรวบรวมงานศึกษาในอดีตที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการศึกษานี้ โดยรวมถึงปฏิกิริยาhydration ของทั้งระบบซีเมนต์และซีเมนต์-ปอซโซลาน ผลกระทบของเถ้าลอยต่อพฤติกรรมการรับแรงอัด การรับแรงดัด และแรงดึง ผลกระทบของเถ้าลอยต่อความทนทาน ผลกระทบของอุณหภูมิสูงจากภายนอกต่อการพัฒนาโครงสร้างภายในซึ่งกระทบต่อคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอย ดังต่อไปนี้

2.1 ปฏิกิริยาhydrationของระบบซีเมนต์และระบบซีเมนต์-ปอซโซลาน

เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยาhydrationกับน้ำ พฤติกรรมที่เกิดขึ้นประกอบด้วยด้วยขบวนการ dissolution, diffusion และ Reaction และมีความร้อนเกิดขึ้น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะจากกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาPozzolanic อาจอธิบายโดยใช้อัตราความร้อนที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสัดส่วนกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้คือ [1,2]

เมื่อซีเมนต์ทำปฏิกิริยาเคมีกับน้ำ C_3S และ C_2S ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของซีเมนต์จะปล่อย Ca^{+} และ OH^{-} ออกมาอย่างรวดเร็ว ทำให้ส่วนผสมมีสภาพความเป็นด่างสูง ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นให้อัตราความร้อนสูงและลดลงเร็วในช่วงเวลาสั้นๆ จากนั้นยังเกิดปฏิกิริยาต่อไปแต่ในอัตราที่ช้ามากจนกล่าวได้ว่าเป็นช่วงrelative inactivity หรือdormant period ซึ่งทำให้คอนกรีตมีสภาพplastic อยู่เป็นเวลานาน การก่อตัวระยะต้นเกิดขึ้นปลายช่วงนี้ ที่เวลาประมาณ 2-4 ชม. ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มข้นของไอออน Calcium และ hydroxide ถึงจุดวิกฤต สารละลายเริ่มก่อตัวเป็นผลึกของhydration product ได้แก่ Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) และ Calcium Hydroxide (CH) โดย CH ก่อตัวเป็นผลึกจากสารละลาย ขณะที่ C-S-H ก่อตัวจากผิวของ C_3S หรือ C_2S โดยก่อตัวคลุมผิวของอนุภาค ในช่วงนี้ C_3S จะเริ่มทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วอีกครั้งหนึ่ง จนกระทั่งอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดที่ปลายช่วงซึ่งใช้เวลาประมาณ 4-8 ชม คอนกรีตเกิดการก่อตัวระยะปลายและเริ่มแข็งตัว ในขณะที่เดียวกันความหนาของชั้นที่เกิดปฏิกิริยาของ C-S-H จะค่อยเพิ่มขึ้นและกลายเป็นแนวกันซึ่งน้ำจะต้องเคลื่อนผ่านไปจนถึงส่วนที่ยังไม่เกิดปฏิกิริยาของ C_3S ซึ่งไอออน จะต้อง diffuse ไปถึง growing crystal เพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาต่อ ดังนั้นการเคลื่อนผ่านชั้น C-S-H จะเป็นตัวกำหนดอัตราการเกิดปฏิกิริยาและ การdiffusion จะเป็นตัวควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ดังนั้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเริ่มช้าลง และอัตราการให้ความร้อนเริ่มลดลง และช้าลงมากขึ้นเมื่อ diffusion barrier หนาเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึง Steady state (stage V) ซึ่งเกิดขึ้นภายใน 12-24 ชม.

C_2S ซึ่งมีปริมาณ reactive compound น้อยกว่า C_3S จะเกิดปฏิกิริยาล้าลึงกันแต่ช้ากว่า รวมถึงให้ปริมาณความร้อนที่ต่ำกว่ามากจนยากที่จะวัดในการทดลอง ความร้อนมีผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีเหล่านี้เกือบทุกช่วงค่อนข้างมาก ซึ่งส่วนใหญ่ ปฏิกิริยาเคมี เป็นตัวควบคุม แต่เมื่อถึง ช่วงสุดท้ายซึ่งเป็นช่วงที่ควบคุมโดย diffusion โดยสมบูรณ์ ผลกระทบ จากอุณหภูมิจะส่งผลแตกต่างกันอย่างมาก

แต่ในระบบซีเมนต์-ปอซโซลาน ปฏิกิริยาปอซโซลานิกและปฏิกิริยาhydrationไม่ได้เกิดขึ้นแยกกันโดยอิสระ [3] Takemotoและ Uchikawa [4] ได้ใช้แผนภูมิ(ดังแสดงในภาพที่ ก1 ภาคผนวก ก) อธิบายการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกเพิ่มเติมจากการเกิดปฏิกิริยาhydrationปกติว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์จากสารประกอบกลุ่มแคลเซียมซิลิเกตจะถูกดูดซับบนผิวอนุภาคปอซโซลาน และชั้น C-S-H ที่ค่อนข้างพรุนกว่าก่อตัวขึ้นบนผิวอนุภาคปอซโซลานขณะเดียวกับที่ชั้น C-S-H ที่ทึบแน่นกว่าก่อตัวบนผิว C_3S ความเข้มข้นของ OH^- ที่เพิ่มขึ้นและการละลายของ SiO_4^{4-} และ AlO_2^- ที่เร็วขึ้นจากการละลายของ Na^+ และ K^+ เมื่อรวมกับ Ca^{2+} จะทำให้เกิดเปลือกหนาเพิ่มขึ้น โดยยังคงมีช่องว่างระหว่างอนุภาคปอซโซลานและเปลือก และแตกออกอีกครั้งดังภาพซ้ายทำให้ Ca^{2+} แทรกเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวอนุภาคได้อีก

การให้อุณหภูมิสูงจากภายนอกในช่วงคอนกรีตอายุต่ำซึ่งเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาเคมีและมีการพัฒนาโครงสร้างภายในส่วนใหญ่ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาและต่ออัตราการเพิ่มกำลังคอนกรีตในช่วงต้น เป็นผลต่อการพัฒนา กำลังเร็วขึ้น โดยเฉพาะการบ่มเร่งกำลังด้วยความร้อนที่มีผลต่อพฤติกรรมในช่วง dormant period ทำให้ช่วง dormant period สั้นลงปฏิกิริยาเกิดเร็วขึ้น สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย อุณหภูมิสูงมีผลต่อทั้งปฏิกิริยาhydrationและปฏิกิริยาPozzolanic เช่นกันแต่ในลักษณะที่อาจต่างจากคอนกรีตปกติ

2.2 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อการพัฒนา กำลังอัด

เถ้าลอยมีผลดีต่อคอนกรีตทั้งในลักษณะ filling effect และจากปฏิกิริยาปอซโซลาน ลักษณะแรกเกิดจากอนุภาคค่อนข้างกลมของเถ้าลอยขนาดเล็กซึ่งมีความผันแปรตั้งแต่ 1-100 ไมครอน เข้าไปแทรกช่องว่างระหว่างอนุภาคซีเมนต์ หิน และทราย ทำให้เนื้อคอนกรีตทึบแน่นมากขึ้น โดยเฉพาะในบริเวณรอยต่อระหว่างมวลรวมและเพสต์ (Interfacial Transition Zone, ITZ) ซึ่งมักมีผลกระทบจาก wall effect และความพรุนซึ่งมากกว่าเนื้อคอนกรีตส่วนอื่น [5,6] เนื่องจากลักษณะและปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่าปกติเรียงกันอย่างหลวมๆ ในบริเวณนี้ซึ่งพบในคอนกรีตปกติ นอกจากนั้นอนุภาคขนาดเล็กของเถ้าลอยยังอาจอุดแทรกปิดขวางช่องทางการเยื่อน้ำของคอนกรีตทำให้ช่องว่างจากการเยื่อน้ำลดลง[6]

ลักษณะที่สองคือผลกระทบจากปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินาในเถ้าลอยทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากปฏิกิริยาไฮเดรชันภายใต้สภาวะความเป็นด่างที่เหมาะสมให้สารเชื่อมประสาน C-S-H ซึ่งใกล้เคียงกับสารจากปฏิกิริยาของซีเมนต์ [7] โดยปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งบนผิวอนุภาคของเถ้าลอยและบริเวณโดยรอบ เถ้าลอยมีผลต่อการลดปริมาณ CH อย่างมาก และมีผลต่อการปรับปรุงความหนาของ ITZ ซึ่งลดลงจาก 50 ถึง 10 ไมครอนหรือน้อยกว่านั้น ผลเหล่านี้ทำให้โครงสร้างภายในคอนกรีตทึบแน่นขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป [8] มีรายงานว่ากระบวนการพัฒนาโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ผสมเถ้าลอยมักเกิดขึ้นมากในช่วง 6 เดือนแรก [9]

ผลกระทบหลังทำให้คอนกรีตมีปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง ซึ่งมีผลต่อแนวโน้มการลดการชะออก หรือลดความไวต่อปฏิกิริยาจากสารอื่นลง มีความทึบแน่นมากขึ้น นอกจากนี้ลักษณะกลมของเถ้าลอยมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มความสามารถทำงานได้จากลักษณะ ball bearing effect ทำให้อาจลดปริมาณน้ำที่ใช้ในส่วนผสมลงได้ระหว่าง 5 - 15 % [7] โดยคอนกรีตยังคงความสามารถเทได้ตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งการลดน้ำหรือลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานนี้มีผลส่งเสริมให้โครงสร้างภายในคอนกรีตมีเนื้อที่ทึบแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยส่งเสริมผลจาก filling effect และปฏิกิริยาปอซโซลานิก ทำให้คอนกรีตทึบแน่นมากยิ่งขึ้น ลักษณะเช่นนี้ทำให้อิออนหรือสารละลายที่อาจเป็นอันตรายหรือแม้แต่น้ำซึมหรือแพร่เข้าไปทำความเสียหายให้เนื้อคอนกรีตได้ยากขึ้น แต่

ทั้งนี้การบ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปมีความสำคัญต่อมอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมเถ้าลอยอย่างยิ่ง และมีความสำคัญมากกว่าเมื่อเทียบกับคอนกรีตปกติ [10] การบ่มขึ้นนาน 28 วัน ทำให้ความชื้นได้ของคอนกรีตผสมเถ้าลอยลดลง 1.5 ถึง 3 เท่าของคอนกรีตปกติที่มีกำลังและความสามารถในการทำงานได้เท่ากันเมื่อทดสอบความชื้นได้ด้วยน้ำและออกซิเจน [11] มีรายงานว่าเถ้าลอยจากแหล่งภายในประเทศมีผลกระทบต่อการพัฒนาโครงสร้างภายในอย่างชัดเจน โดยระดับการแทนที่ด้วยเถ้าลอยจากแม่เถ้า 35% ลดการเกิด *efflorescence* ซึ่งพบในรูปของ *needle-like formation* ทั้งอายุระยะต้นและระยะยาว และค่า Peak ของ $\text{Cl}^- (\text{OH})^-$ ของซีเมนต์โพสต์ผสมเถ้าลอยต่ำกว่าของซีเมนต์โพสต์ล้วน [12] และจากรายงานการศึกษาเดียวกันระบุว่าควรเติมเถ้าลอยแม่เถ้าถึงระดับ 15% สามารถเพิ่มกำลังอัดประลัยของคอนกรีตได้ แม้ที่อายุต้นๆ [12]

สำหรับผลกระทบของการเติมเถ้าลอยต่อกำลังรับแรงอัดระยะยาวนั้นงานวิจัยหลายชิ้นรายงานถึงการพัฒนากำลังอัดในระยะยาว (หลังจาก 3-5 ปี) ที่ไม่เปลี่ยนแปลงของคอนกรีตผสมเถ้าลอยชนิด F ที่ใช้อัตราส่วน w/c 0.5-0.8 [13,14] และสำหรับเถ้าลอยชนิด C บางชนิดซึ่งทำปฏิกิริยาได้เร็วกว่าเถ้าลอยชนิด F ไม่มีการเพิ่มกำลังในระยะยาวให้เห็นชัดเจน [15] มีรายงานว่าแสดงว่าปริมาณการแทนที่ซีเมนต์เกินร้อยละ 20 ไม่มีผลดีต่อการพัฒนากำลังและที่ร้อยละ 30 แสดงให้เห็นชัดเจนถึงการผลิตกำลังในระยะยาว [16] อย่างไรก็ตามหัวข้อกำลังระยะยาวยังคงมีความขัดแย้งกับการศึกษาบางชิ้น [17,18]

2.3 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อการทำลายเนื่องจากเกลือซัลเฟต

ในปัจจุบันรายงานพฤติกรรมความเสียหายเนื่องจากซัลเฟตของคอนกรีตผสมเถ้าลอยยังไม่ชัดเจน เนื่องจากมีความเกี่ยวพันระหว่างองค์ประกอบทางแร่ธาตุและทางเคมีของทั้งซีเมนต์และสารปอซโซลาน เถ้าลอยบางชนิดอาจเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟต ขณะที่บางชนิดอาจเป็นผลเสีย [19,20] เถ้าลอยชนิด F อาจมีผลดีต่อการปรับปรุงความคงทนในด้านนี้เนื่องจากปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ลดลง แต่ผลกระทบจากเถ้าลอยชนิด C ยังไม่มีรายงานที่ชัดเจน [21]

สารองค์ประกอบของเถ้าลอยเช่นออกไซด์ของซิลิกาและอลูมินา อาจมีผลต่อการเกิดเอทริงไกต์ในภายหลัง [20] แต่ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมินาด้วย [22] Dunstan [23] ได้รายงานว่าปริมาณ CaO และ Fe_2O_3 ในเถ้าลอยเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความต้านทานความเสียหายจากซัลเฟต โดยความต้านทานจะลดลงหากปริมาณ CaO สูงกว่า 5% หรือ Fe_2O_3 ลดลง และได้เสนอค่าปัจจัยความทนทาน (R) เพื่อใช้คำนวณปริมาณสารทั้งสอง เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้แนวโน้มการลดลงความต้านทานการกัดกร่อนจากซัลเฟต และ US. Bureau of Reclamation [24] ได้ปรับปรุงขีดจำกัดของอัตราคังกล่าวและระบุไว้ใน Concrete manual แต่มีรายงานอื่นที่ระบุว่าค่าดังกล่าวอาจไม่เป็นจริงเสมอไป [25] ผลการศึกษาหลายชิ้นของ Dunstan และคณะ [23,26,27] แสดงว่าการเติมเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์หรือขี้เถ้าบดบดจะลดความต้านทานการกัดกร่อนของซัลเฟตอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตที่เติมเถ้าลอยบิทูมินัส

Fraay [28] รายงานผลกระทบของเถ้าลอยต่อการขยายตัวของแท่งมอร์ตาร์ และคอนกรีตผสมเถ้าลอย 20 % ซึ่งแช่ในสารละลาย Na_2SO_4 หลังจากบ่มขึ้นนาน 28 วัน และพบว่าเถ้าลอย 8 ใน 9 ชนิด มีค่าการขยายตัวจากซัลเฟตลดลง และส่วนผสมที่ใช้ทำอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (w/c) ค่ามีการขยายตัวน้อยกว่า

Bing และ Cohen [29] รายงานว่าการขยายตัวของ Alite paste เนื่องจากการทำสลายจากซัลเฟตเกิดจากชิปซัมที่เกิดขึ้นหลังจากแช่ตัวอย่างในสารละลาย Na_2SO_4 5% และการเกิดรอยร้าวอย่างรุนแรงโดยไม่ปรากฏการเกิดเอทริงไกต์แสดงว่า ขบวนการกัดกร่อนจากซัลเฟตซับซ้อนและ ไม่ได้เกิดจากเอทริงไกต์เพียงอย่างเดียว นอก

ากนั้น Khatri และ Sirivatnanon [30] รายงานว่าทั้งมอร์ตาร์และคอนกรีตมีแนวโน้มการขยายตัวจากซัลเฟตต่างกัน และชนิดของสารเชื่อมประสานมีผลสำคัญต่อความต้านทานการขยายตัวจากซัลเฟต

Mather [31] จัดลำดับประสิทธิภาพในการต้านทานซัลเฟตของคอนกรีตต่างชนิด โดยเรียงลำดับจากดีมาดังนี้ คอนกรีตผสม condensed silica fume คอนกรีตผสม volcanic ash คอนกรีตผสมเถ้าลอยจากถ่านหินชั้นบิทูมินัส คอนกรีตผสมเถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัส และคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ และสรุปว่าสารปอซโซลานที่มีความละเอียดสูง มีปริมาณซิลิกาสูง และปริมาณซิลิกาที่อยู่ในรูป amorphous สูง จะมีประสิทธิภาพในการลดการขยายตัวจากซัลเฟตได้ดี ในขณะที่ผลการศึกษาของ Dikeou [20] แสดงว่าการใช้เถ้าลอยจากถ่านหินบิทูมินัสผสมในคอนกรีตระหว่างร้อยละ 20 – 35 ช่วยปรับปรุงความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟตเรียงตามลำดับจากดีมากถึงคือน้อยที่สุดดังนี้ คือ ซีเมนต์ชนิดที่ห้าใช้ร่วมกับเถ้าลอย ซีเมนต์ชนิดที่สองใช้ร่วมกับเถ้าลอย ซีเมนต์ชนิดที่ห้าล้วน ซีเมนต์ชนิดที่สองล้วน ซีเมนต์ชนิดที่หนึ่งใช้ร่วมกับเถ้าลอย และซีเมนต์ชนิดที่หนึ่งเพียงอย่างเดียว

สำหรับงานวิจัยเกี่ยวกับความทนทานของคอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยในประเทศหลายชิ้นที่แสดงว่าการใช้เถ้าลอยจากแหล่งใหญ่ในประเทศมีความต้านทานต่อการกร่อนหรือซัลเฟตได้ดี [32,33] และเถ้าลอยที่มีปริมาณ SO_3 ต่ำจะช่วยลดการกัดกร่อนจากกรดซัลฟูริกได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนั้นการใช้เถ้าลอยแยกขนาดที่มีขนาดอนุภาคเล็กมากในส่วนผสมร้อยละ 20 และ 30 จะสามารถต้านทานซัลเฟตได้สูงมาก และให้กำลังคิกว่าส่วนผสมที่ไม่มีเถ้าลอย การใช้เถ้าลอยจากแหล่งแม่เมาะร่วมกับซีเมนต์ประเภทที่ 1 ในช่วงการแทนที่ร้อยละ 15 - 35 และใช้ร่วมกับซีเมนต์ประเภทที่ 5 ในช่วงการแทนที่ร้อยละ 25 - 50 โดยน้ำหนัก มีผลดีต่อการเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อนของซัลเฟต และการใช้ซีเมนต์ประเภทที่ 5 ร่วมกับเถ้าลอยให้ผลดีที่สุดในช่วงที่ทดสอบ แต่หากปริมาณน้ำสูงมากถึง 0.65 จะมีผลเสียต่อความทนทานต่อซัลเฟต แม้จะใช้ร่วมกับซีเมนต์ประเภทที่ 5 ก็ตาม[34]

2.4 ผลกระทบของเถ้าลอยต่อการซึมหรือแพร่ผ่านของคลอไรด์

ปัญหาความเสียหายของคอนกรีตโครงสร้างเนื่องจากคลอไรด์มักเกิดจากการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออนจากภายนอกซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ของคอนกรีตโครงสร้างของประเทศไทย โดยเฉพาะโครงสร้างที่อยู่ในสภาพแวดล้อมชายฝั่งทะเล ซึ่งผิวคอนกรีตต้องสัมผัสน้ำทะเล หรืออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีไอเกลือตลอดเวลา คลอไรด์ที่มีอยู่ในเนื้อคอนกรีตอาจอยู่ในสองลักษณะคือ Free chloride ซึ่งละลายอยู่ในน้ำในโพรงคอนกรีตซึ่งหากมีปริมาณมากพอจะเป็นผลให้เหล็กที่เสริมในคอนกรีตเกิดสนิม และ Bound chloride ซึ่งเป็นคลอไรด์ที่เกาะยึดในผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์หรือคลอไรด์บางส่วนที่เกาะยึดทางกายภาพ หรือถูกดูดซับบนผิวของ gel pores และ ไม่มีผลต่อการเกิดสนิม

ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดในเนื้อคอนกรีต หรือ Total chloride เป็นผลรวมของ Free chloride และ Bound chloride เมื่อคลอไรด์ไอออนซึมหรือแพร่ผ่านเข้ามาในเนื้อคอนกรีต บางส่วนอาจถูกจับยึดอยู่ในผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์และเปลี่ยนไปในรูปของ calcium chloroaluminate hydrate และบางส่วนอาจอยู่ในรูปของ Free chloride ปะปนอยู่ในสารละลายในโพรงคอนกรีต บางส่วนอาจถูกจับไว้ด้วยผลิตภัณฑ์ไฮดรอกไซด์ หากเป็นคอนกรีตผสมเถ้าลอย คลอไรด์ไอออนบางส่วนอาจถูกดูดซับด้วยเถ้าลอยทั้งที่เกิดขึ้นและไม่เกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงยังคงมีคลอไรด์ไอออนบางส่วนที่อยู่ในรูปของ Free chloride ซึ่งสามารถทำให้เหล็กเกิดสนิมได้

ผลกระทบจากคลอไรด์จากแหล่งภายนอกจัดเป็นปัญหาใหญ่ต่อความทนทานของคอนกรีตโดยตรง การเข้าทำลายของคลอไรด์ไอออนอาจเกิดขึ้นได้ 3 ลักษณะ คือ การไหลผ่าน (flow) การซึม(sorption) หรือแพร่ผ่าน

diffusion) ซึ่งทั้ง 3 ลักษณะนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านความพรุน และปัจจัยที่สำคัญอีกหลายประการ ได้แก่ อุณหภูมิ ชนิดของซีเมนต์ ชนิดของแคลซิออน ความเข้มข้นของเกลือ สภาพการบ่ม สภาพแวดล้อม เป็นต้น

คอนกรีตในสภาพเปียกสลับแห้งจะได้รับผลกระทบอย่างรุนแรง จากการซึมผ่านเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพแห้ง และจากการแพร่ผ่านเมื่อคอนกรีตอยู่ในสภาพเปียก ดังนั้นคลอไรด์ไอออนที่เข้ามาจึงมีความเข้มข้นและมีปริมาณมาก เมื่อถึงระดับหนึ่งที่เรียกว่า ระดับ Threshold จะมีผลต่อการเกิดสนิมเหล็กในคอนกรีต

สำหรับความเข้มข้นของปริมาณคลอไรด์ที่ระดับ Threshold ซึ่งจะทำให้เกิดสนิมนั้น ยังไม่มีการกำหนดค่าที่แน่นอนเนื่องจากขึ้นกับปัจจัยอีกหลายประการ ซึ่งยังไม่มีข้อมูลที่ชัดเจน นักวิจัยหลายรายได้เสนอระดับดังกล่าวว่าอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 0.2-1.33 กก./ม³ ของคอนกรีต หรืออยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 75-1175 ppm ของคอนกรีต [35]

อย่างไรก็ตามสำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย ค่าระดับดังกล่าวแตกต่างไปจากคอนกรีตปกติเนื่องจากมีปัจจัยที่มีผลกระทบแตกต่างออกไป การเติมเถ้าลอยมีผลกระทบให้คอนกรีตมีความทึบแน่นมากขึ้น ช่องว่าง capillary ที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งมีผลต่อการซึมหรือแพร่ผ่านของคลอไรด์ไอออน คอนกรีตผสมเถ้าลอยมีค่าการดูดซึมน้ำต่ำลงและลดการแพร่ผ่าน โดยมีสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายของคลอไรด์ไอออนต่ำกว่าคอนกรีตปกติที่ใช้งานชายทะเล ประมาณ 3 เท่า คือ 14.7×10^{-10} ซม./วินาที เมื่อเทียบกับ 44.7×10^{-10} ซม./วินาที [36] แต่อย่างไรก็ตามการใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์เกิน 50% ไม่เกิดประโยชน์และอาจเกิดผลเสียด้วย [37]

มีรายงานว่า การเติมเถ้าลอยในคอนกรีตช่วยให้ความสามารถในการจับยึดคลอไรด์เพิ่มขึ้น [38] จนถึงระดับการแทนที่ 50% [37] และการศึกษาในสภาพที่ชื้นตัวอย่างคอนกรีตผสมเถ้าลอยแช่น้ำทะเลจริงและน้ำทะเลจำลอง พบว่า คลอไรด์ในน้ำทะเลแพร่ได้เร็วกว่าซัลเฟตและทำปฏิกิริยาเกิดเป็น Friedel's Salt และทำให้มีปริมาณ Friedel's Salt มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตปกติ [37] และมีการศึกษาเปรียบเทียบซึ่งแสดงว่าการจับยึดคลอไรด์ของเถ้าลอยในคอนกรีตที่ผสมสารผสมเพิ่มแร่ธาตุ 3 ชนิด การแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอย 35% จับยึดคลอไรด์ได้ดีกว่า OPC และดีกว่า Silica Fume 10% แต่น้อยกว่าการใช้ GGBS 65% [39]

คุณภาพของเถ้าลอยเองไม่มีผลกระทบโดยตรงต่อค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายของคอนกรีต แต่ปัจจัยที่สำคัญคือปริมาณที่ใช้ [40] นอกจากนั้นคุณสมบัติในด้านความซึมได้ยังขึ้นกับการบ่มขึ้น และอุณหภูมิที่ใช้บ่มคอนกรีต มีรายงานว่าคอนกรีตผสมเถ้าลอยที่บ่มที่อุณหภูมิต่ำ ยังคงให้ค่าความต้านทานการแทรกซึมของคลอไรด์ได้ดีกว่าคอนกรีตปกติ ซึ่งแสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานยังคงดำเนินต่อไปช้าๆ และมีความสำคัญต่อการพัฒนาโครงสร้างภายใน ซึ่งเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการจับ Free chloride ไว้ด้วย C_3A และเปลี่ยนเป็น Friedel's salt [41] ซึ่งทำให้ลดอัตราการซึมผ่านของคลอไรด์ไอออน รวมถึงมีปริมาณ water-soluble chloride น้อยลงด้วย [42]

อย่างไรก็ตาม Ampadu [43] ได้รายงานว่า การใช้เถ้าลอยในส่วนผสมที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ค่าประมาณ 0.35 ไม่ช่วยลดสัมประสิทธิ์ของการแพร่ผ่าน เนื่องจากเนื้อคอนกรีตมีความพรุนต่ำ มีขนาดช่องว่างเล็กและคดเคี้ยวอยู่แล้วโดยธรรมชาติ การใช้เถ้าลอยจึงอาจไม่มีผลต่อการปรับปรุงส่วนนี้มากนัก Halstead [44] ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังอัดและความทนทานของคอนกรีตในด้านความซึมได้ของคลอไรด์ โดยใช้วิธี Rapid Chloride Test (ASTM C 1202) โดยศึกษาคอนกรีตควบคุม 2 ชนิด ซึ่งใช้ซีเมนต์ Type 2 และ 3 กับคอนกรีตผสมเถ้าลอย Class F และซิลิกาฟูม และพบว่าสภาพการบ่มที่อุณหภูมิในช่วง 23-38 °C ให้ผลดีทั้งกำลังอัดและความต้านทานความซึมได้ของคลอไรด์ สำหรับคอนกรีตทุกชนิดที่อายุ 28 วัน สำหรับการบ่มที่

อุณหภูมิ 6°C ไม่เป็นผลดีต่อคอนกรีตทุกชนิด เมื่อพิจารณาชนิดซีเมนต์ที่ใช้ในคอนกรีตถ้าลดยผสมซิลิกาฟูมพบว่า คอนกรีตผสมซีเมนต์ Type 3 ให้กำลังสูงและความต้านทานการซึมได้ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตผสมซีเมนต์ Type 2

Wangjeeraphat [45] ได้ทำการศึกษาการซึมได้ของคลอไรด์ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากแม่เมาะ โดยทำการศึกษาด้วยการฟั่นสารละลาย Silvernitrate 0.1N การแช่ในสารละลาย NaCl และเจาะเก็บผงมาทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ ผลการศึกษาแสดงว่าเถ้าลอยลดการซึมผ่านของคลอไรด์ และการเพิ่มปริมาณการแทนที่ช่วยลดระดับความลึกของการซึมผ่านได้ โดยแนะนำปริมาณการแทนที่ซีเมนต์อยู่ระหว่างร้อยละ 15-35 โดยน้ำหนัก ผลกระทบของปริมาณการแทนที่ที่มีความสำคัญต่อการลดการซึมผ่านได้มากกว่าผลกระทบจากการลดอัตราส่วน w/c ผลการศึกษาคณสมบัติระยะยาวของคอนกรีตผสมเถ้าลอยจากแม่เมาะ [12] ยืนยันการลดการแทรกซึมของคลอไรด์ของเถ้าลอยได้ ทั้งในสภาวะการแช่ (Ponding) และในสภาวะ Wetting and Drying และค่า w/b เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการแทรกซึมของคลอไรด์

2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิสูงจากภายนอก

เป็นที่ยอมรับกันว่าอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นมีผลต่อปฏิกิริยา hydration ของระบบซีเมนต์ทำให้มีการนำเสนอการใช้วิธีการเร่งกำลังด้วยความร้อนเพื่อทำนายกำลังอัดของคอนกรีตปกติที่อายุ 28 วันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1927 [46] ซึ่ง Gerend ใช้การเร่งกำลังคอนกรีตภายใน 48 ชั่วโมง โดยใช้ไอน้ำอัดตัวภายใต้ความดัน 80-100 psi และได้ผลน่าพอใจ แต่วิธีนี้ยังไม่ได้รับการยอมรับในขณะนั้น ในปี ค.ศ. 1933 Patch [47] นำเสนอผลการประยุกต์ใช้จริงกับการก่อสร้างเขื่อน Hoover Dam โดยใช้การค้ำเป็นเวลา 7 ชั่วโมง แต่ผลการคาดกำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 28 วัน มีความแปรปรวนไม่น่าพอใจ นับจากนั้นการพัฒนาความรู้ในด้านนี้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง จนในปี ค.ศ. 1959 Institution of Civil Engineers ในลอนดอน ได้ตั้งคณะกรรมการขึ้นมาศึกษาวิธีการเร่งกำลังแบบต่างๆ และความเหมาะสมเพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการควบคุมคุณภาพและจัดพิมพ์ผลการศึกษาในปี ค.ศ. 1968 [48] ในปี ค.ศ. 1971 ASTM ได้พิมพ์ ASTM C684 ซึ่งเป็นโครงการบ่มวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อน 3 วิธี และได้ปรับปรุงจนเป็น ASTM C 684-74 และวิธีการเร่งกำลังด้วยความร้อนเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายสำหรับการควบคุมและประกันคุณภาพในปัจจุบัน [49,50] งานวิจัยจำนวนมากได้ระบุว่า การเร่งกำลังคอนกรีตด้วยความร้อนให้ความแม่นยำในการทำนายกำลังคอนกรีตระหว่าง 12-15% [51] และสามารถทำซ้ำด้วยประสิทธิภาพสูงพอกับการบ่มด้วยวิธีมาตรฐาน [52,53]

ASTM Committee C-9 ได้กำหนดวิธีการเร่งกำลัง 3 แบบ (ASTM C-684) คือการบ่มด้วยน้ำอุ่น (35°C) การค้ำ (95°C) และการบ่มภายในตัวเอง (Autogenous curing) [54] และมาตรฐานอังกฤษ BS 1881:Part 112 – 1983 ได้กำหนดวิธีการเร่งกำลังคล้ายคลึงกันยกเว้นอุณหภูมิสำหรับ 2 วิธีหลังกำหนดที่ 55°C และ 82°C ในฝรั่งเศส มีการพัฒนาใช้การบ่มในเตาอบที่อุณหภูมิ 60°C และ 80°C [55] เพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้าง ในระหว่างปี ค.ศ. 1971-1975 การก่อสร้างอุโมงค์ในโครงการ Deep Drainage System ใน Mexico ได้ใช้การบ่มเร่งกำลังโดยการค้ำ ตามวิธี B ASTM ในการควบคุมคุณภาพและให้ผลที่น่าพอใจในการทำนายกำลังคอนกรีตที่ 28 วัน โดยใช้เวลา 28 ชม. [56]

มีการพัฒนาหรือประยุกต์วิธีการบ่มเร่งกำลังด้วยความร้อนที่ ASTM แนะนำอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์มากขึ้น เช่น Trejo และ Casho [57] ได้พัฒนากระบวนการ โดยใช้อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เพื่อหาความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดที่อายุ 28 ½ ชั่วโมง และ 28 วัน สำหรับการทำนายกำลังอัดคอนกรีต

ใช้ซีเมนต์ประเภทที่ I ที่มีกำลัง 175 – 300 กก/ชม² และเสนอความสัมพันธ์ในรูปของสมการ โดยมีความผิดพลาดสูงสุดประมาณ 12 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในช่วงความผิดพลาดเดียวกันของการศึกษาอื่น ๆ [58, 59]

Ramakrishnan และ Dietz [52] ได้ทำการศึกษาการบ่มแรงกำลังโดยเปรียบเทียบวิธี ที่ ASTM กำหนดกับวิธีที่ปรับปรุงจากASTMและพบว่าอัตราส่วน f_{cu}/f_{28} มีค่า 0.51 0.33 และ 0.41ตามลำดับ โดยการใช้ อุณหภูมิ 75 °C บ่มหลังจากหล่อคอนกรีต 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมงให้ค่าอัตราส่วนสูงกว่าวิธีการดัดของASTM Malhotra [60] ได้รายงานว่าการ Splitting tensile strength จากการบ่มแรงกำลังมีความสัมพันธ์กับ ค่าจากการบ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และอาจนำมาใช้ในการทำนายกำลังได้หากมีการสร้างความสัมพันธ์ขึ้นมาโดยเฉพาะสำหรับมวลรวมและซีเมนต์ชนิดต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับที่ Ghosh และคณะ รายงานและนำมาใช้ในงานควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างถนน [61]

อย่างไรก็ตามเป็นที่ยอมรับกันว่าอุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นยังมีส่วนต่อการหน่วงปฏิกิริยาในช่วงต่อมาให้ช้าลงและเกิดความไม่สม่ำเสมอในการพัฒนาโครงสร้างภายในของคอนกรีต โดยเฉพาะการเกิด ettringite คุณภาพต่ำจากการให้ความร้อนสูงในระดับการคั่งซึ่งเป็นผลทางอ้อมต่อกำลังในช่วงหลังที่ลดลงของคอนกรีตปกติ [62] นอกจากนี้มีรายงานว่า การบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C มีผลให้เกิดปริมาณช่องว่างขนาดใหญ่ (>150 nm) มากกว่าจากการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า (27 °C) [63] ซึ่งช่องว่างขนาดใหญ่เหล่านี้มีผลต่อคุณสมบัติด้านความทนทานโดยตรง สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย อุณหภูมิการบ่มที่สูงขึ้นมีผลต่อทั้งปฏิกิริยา hydration และปฏิกิริยา

Pozzolanic ของระบบซีเมนต์-ปอซโซลาน

2.6 ผลกระทบของอุณหภูมิสูงต่อพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอย

สำหรับคอนกรีตผสมเถ้าลอย อุณหภูมิสูงจากการบ่มมีผลในทางบวกต่างจากคอนกรีตปกติ [64] การให้ อุณหภูมิสูงในช่วงต้นๆ เร่งปฏิกิริยา Pozzolanic และมีผลให้ซีเมนต์ที่มีสารปอซโซลานผสมแข็งตัวเร็วขึ้น [65] Mortureux และคณะ [66] พบว่าที่อุณหภูมิ 80 °C คอนกรีตมีการพัฒนากำลังในระดับหนึ่ง โดยใช้เวลาเพียงร้อยละ 4 ของเวลาที่ใช้ในการพัฒนากำลังในระดับเดียวกันที่ อุณหภูมิ 20 °C นอกจากนี้ยังมีผลให้กำลังที่ 28 วัน เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมที่ต่างจากคอนกรีต [64, 67] Thorne และ Watt [68] รายงานถึงความสัมพันธ์ที่ไม่ดีนักระหว่างกำลังอัดกับ carbon content, glass content, silica-alumina content, ความหนาแน่นและพื้นที่ผิวของเถ้าลอยเมื่อคิดเป็นตัวแปรเดียวในสภาพการบ่มแรง

แม้ว่ายังไม่มีการพัฒนาวิธีการเร่งกำลังเพื่อทำนายคุณสมบัติโดยตรง แต่ Kohno และคณะ [69] ได้รายงานถึงผลกระทบของการบ่มคอนกรีตผสมเถ้าลอยด้วยไอน้ำ อุณหภูมิสูงระหว่าง 65-80 °C โดยใช้คอนกรีตที่มีปริมาณเถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ 20 และ 40% คอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกอัตราส่วนให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 1 วัน ต่ำกว่าที่อายุ 28 วัน เช่นเดียวกับคอนกรีตธรรมดา และระยะเวลาบ่ม 4-6 ชั่วโมงซึ่งใกล้เคียงกับวิธีเร่งกำลังของ ASTM ให้ผลดีกว่าการบ่มในระยะสั้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น [70] และพบว่าที่อุณหภูมิดังกล่าว ค่าสัมพัทธ์ของกำลังคอนกรีตผสมเถ้าลอยมิได้ขึ้นกับปริมาณเถ้าลอยมากนัก

งานวิจัยของ Ravina [71] ได้แสดงถึงพฤติกรรมของคอนกรีตผสมเถ้าลอยอันสืบเนื่องจาก Pozzolanic Reactivity ว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากเถ้าลอย-ซีเมนต์ไฮดรเจนอันเป็นผลจากการเร่งปฏิกิริยาคด้วยความร้อนมีแนวโน้มแตกต่างจากคอนกรีตปกติทั้งในเชิงสัดส่วนและลักษณะการก่อตัว (morphology) Nasser และ Marzouk [72] รายงานผลของอุณหภูมิต่อโครงสร้างของคอนกรีตเถ้าลอยโดยทดสอบคอนกรีตทรงกระบอก บ่มที่อุณหภูมิ 24-232 °C เป็นเวลา 6 เดือนว่าอุณหภูมิ 24-71 °C อุณหภูมิมีผลต่อกำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นน้อยมาก ใน

ช่วงอุณหภูมิ 121-149 °C ค่ากำลังรับแรงอัดเพิ่มสูงขึ้น ส่วนค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของโทเบอโมไรต์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างซิลิเนียมไฮดรอกไซด์กับซีเมนต์ที่ความดันและอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 177-232 °C กำลังรับแรงอัดและค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นมีค่าลดลงประมาณ 60 ถึง 65 %

นอกจากนี้รายงานการศึกษาของ Bauer และคณะ [73] ได้แสดงว่าการทำนายกำลังโดยใช้วิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนของ Slag Concrete มีความเป็นไปได้สูง สำหรับเถ้าลอยแม่เมาะจากแหล่งผลิตในประเทศมีผลงานวิจัยที่แสดงว่ามีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาจากสภาวะอุณหภูมิสูง สูงกว่าเถ้าลอย class F จากบางแหล่งในต่างประเทศ [74]

ความร้อนมีผลต่อปฏิกิริยา hydration และ Pozzolanic reaction ในคอนกรีตผสมเถ้าลอยเช่นเดียวกับคอนกรีตปกติ และผลการศึกษาหลายชิ้นแสดงว่าผลกระทบนั้นมีความสำคัญ และมีแนวโน้มไปในเชิงเพิ่มกำลังในระยะปลายซึ่งต่างจากคอนกรีตทั่วไป ดังนั้นการศึกษาเรื่องผลกระทบของความร้อนในการเร่งปฏิกิริยาคือคุณสมบัติของคอนกรีตในด้านต่าง ๆ คาดว่าจะให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการทำนายคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งระยะสั้นและระยะยาวนอกเหนือไปจากการควบคุมคุณภาพของวัสดุในด้านกำลังเพียงอย่างเดียว ซึ่งอาจเป็นประโยชน์ต่อการกำหนดแนวทางปฏิบัติเพื่อการควบคุมคุณภาพของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในงานก่อสร้าง

บทที่ 3

วิธีการทดสอบ

ในการวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นแรกเป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเพื่อใช้เป็นแนวทางเพื่อการศึกษาการเร่งกำลังด้วยความร้อนในการทำนํ้ากําลังและคุณสมบัติของคอนกรีตผสมเถ้าลอยในขั้นที่สอง โดยในการศึกษาขั้นแรกรวมการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยที่มาจากต่างแหล่ง คือ เถ้าลอยลิกไนต์ จากแม่เมาะ เถ้าลอยจากราชบุรีและระยอง การศึกษาวิจัยนี้มีขั้นตอนและวิธีในการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอย

ศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอยที่ใช้ในการศึกษานี้โดยตรวจสอบลักษณะทางกายภาพบางประการ ตรวจสอบลักษณะอนุภาคโดยใช้ภาพถ่าย SEM และการกระจายขนาดของอนุภาค รวมถึงตรวจสอบรายละเอียดองค์ประกอบทางเคมี

3.2 การศึกษาจากชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์

เนื่องจากในการศึกษานี้ต้องเตรียมชิ้นตัวอย่างจำนวนมากภายในเวลาสั้นๆ กระบวนการ เตรียมตัวอย่างอย่างรวดเร็วจึงมีความสำคัญ และมีผลกระทบต่อทดสอบและค่าที่ได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาเลือกวิธีการอัดแน่นด้วยโต๊ะเขย่าเพื่อลดเวลาทำงานให้สั้นและมีความสม่ำเสมอมากที่สุด ก่อนดำเนินการทดสอบจริงจึงต้องทำการทดลองหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเขย่ามอร์ตาร์โดยใช้โต๊ะเขย่าต่อกําลังอัดหลายค่า โดยพิจารณาค่าที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างกําลังอัด และเวลาที่ดีที่สุดและ ได้ผลสรุปว่าช่วงเวลา 30 วินาทีเป็นเวลาอัดแน่นที่เหมาะสมในการ เตรียมตัวอย่าง

3.2.1 การศึกษาผลกระทบจากคุณภาพของเถ้าลอยจากต่างแหล่งต่อการพัฒนากําลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์

ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ทำการบ่มซึ่งมีผลต่อการพัฒนากําลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยจาก 3 แหล่งคือ แม่เมาะ ระยองและราชบุรี แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยในปริมาณต่างๆกัน วิธีการทดสอบทำโดย

1. ห่อชิ้นตัวอย่างถูกบาศก์ขนาด 5x5x5 ซม. จากส่วนผสมมอร์ตาร์ควบคุม(ไม่มีการแทนที่ซีเมนต์) และมอร์ตาร์เถ้าลอยที่ทำการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจาก 3 แหล่งคือ แม่เมาะ ระยองและราชบุรี ใช้อัตราส่วนซีเมนต์ผสมเถ้าลอย : ทราย = 1:3 โดยทำการแทนที่ซีเมนต์ 3 ระดับคือ 20%, 40% และ 60% ด้วยอัตราส่วน W/B 2 ค่าคือ 0.5 และ 0.6 วิธีการเตรียมตัวอย่างแสดงในภาพที่ 2 และ 3 ในภาคผนวก ก

- หลังจากใส่มอร์ตาร์ลงแบบหล่อ เก็บตัวอย่างชุดที่ 1 ในห้องบ่มชื้นและถอดแบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ควบคุมทั้งมอร์ตาร์ปกติและมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยเมื่อมีอายุ 24 ชม. และบ่มต่อไปถึงบ่มจนถึงอายุทดสอบดังแสดงในภาพที่ 4 ในภาคผนวก ก แล้วจึงนำไปทดสอบหากําลังรับแรงอัดที่ 3.5 ชม., 27.5 ชม., 7, 28 และ 91 วันตามลำดับ
2. บ่มชื้นตัวอย่างชุดที่ 2, 3, 4 โดยวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนในถังบ่มโดยบรรจุแบบหล่อในอุปกรณ์พิเศษ นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75°C, 95°C เป็นเวลา 3.5 ชม. ดังแสดงในภาพที่ 5 ในภาคผนวก ก ก่อนจะทิ้งให้เย็น

ทดสอบกำลังอัดภายในครึ่งชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 6 ในภาคผนวก ก ลักษณะตัวอย่างมอร์ตาร์หลังการทดสอบกำลังอัด แสดงในภาพที่ 7 และภาพที่ 8 ในภาคผนวก ก

3. นำตัวอย่างชุดที่ 1 หลังจากบีบแล้วและมีอายุ 24 ชม. ส่วนหนึ่งบ่มต่อในน้ำ อีกส่วนหนึ่งนำมาบรรจุในอุปกรณ์พิเศษแล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิที่ 75°C , 95°C เป็นเวลา 3.5 ชม. ก่อนจะทำให้เย็นและทดสอบภายในครึ่งชั่วโมง

3.2.2 การศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ

ทำการศึกษผลกระทบของอุณหภูมิที่ทำการบ่มซึ่งมีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ที่ใช้เถ้าลอยจากแหล่งใหญ่คือ แม่เมาะ โดยทำการทดสอบดังนี้

1. หล่อขึ้นตัวอย่างมอร์ตาร์รูปลูกบาศก์ขนาด 5 ซม. X 5 ซม. X 5 ซม. โดยผันแปรปริมาณการแทนที่ซีเมนต์ 5 ระดับ คือ 0%, 20%, 30%, 40% และ 50% โดยมีมอร์ตาร์ที่มีเถ้าลอย 0% ใช้เป็นมอร์ตาร์ควบคุม
2. แบ่งขึ้นตัวอย่างเป็น 3 ชุด ชุดแรกเก็บขึ้นตัวอย่างในห้องบ่มขึ้น ชุดที่ 2 นำมาบ่มด้วยวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนทันทีในถังบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชม. สำหรับวิธี Warming water และบ่มด้วยในถังบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิ 75°C และ 95°C เป็นเวลา 3.5 ชม. ก่อนจะทำให้เย็นและทดสอบภายใน 0.5 ชม. ชุดที่ 3 นำมาบ่มด้วยวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนเมื่อมีอายุครบ 24 ชม. ในถังบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิ 35°C , 75°C และ 93°C เช่นเดียวกับขึ้นตัวอย่างชุดที่ 2 โดยใช้เวลา 24, และ 3 ชม. ตามลำดับ ก่อนจะทำให้เย็นและทดสอบภายใน 0.5 ชม.
3. ในการวิจัยนี้ได้ใช้ขึ้นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าลอยที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 75°C และ 95°C เป็นเวลา 3.5 ชม. และบ่มในน้ำตามปกติ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาโวลานิกของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้เถ้าลอยด้วย TGA เทคนิคโดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 550°C และหาความชื้นที่หายไปเพื่อนำมาคำนวณกลับเป็นปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์

3.3 การศึกษาขึ้นตัวอย่างคอนกรีต

1. ในขั้นที่สองหล่อขึ้นตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ขนาด $75 \times 75 \times 75$ ซม. จากส่วนผสมคอนกรีตควบคุม และคอนกรีตผสมเถ้าลอย โดยทำการหล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกมาตรฐาน 15×30 ซม. จากส่วนผสมเดียวกันเพื่อทดสอบเปรียบเทียบอายุ 91 วัน เก็บขึ้นตัวอย่างในห้องบ่มขึ้นเหมือน 3.2.2 ข้อ 1
2. ถอดแบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ควบคุมทั้งคอนกรีตปกติและคอนกรีตผสมเถ้าลอย เมื่อมีอายุ $23 \frac{1}{2}$ ชม. และบ่มต่อในถังบ่มที่ใช้สารละลาย lime saturated water จนถึงอายุทดสอบ
3. บ่มขึ้นตัวอย่างด้วยวิธีเร่งกำลังด้วยความร้อนในถังบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิ 75°C และ 93°C เป็นเวลา $3 \frac{1}{2}$ ชั่วโมง และ ตามช่วงเวลาทีเลือกตามข้อ 3 ก่อนจะทำให้เย็นและทดสอบภายใน $\frac{1}{2}$ ชม.
4. ใช้วิธีทางสถิติวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ ระหว่างกำลังที่ได้จากการเร่งกำลัง และกำลังที่ได้จากวิธีบ่มปกติที่อายุ 28, 56, และ 91 วัน
5. ในด้านความคงทน นำตัวอย่างที่ได้รับการบ่มด้วยวิธีต่างๆ ทดสอบใน 2 ลักษณะคือความทนทานต่อการแทรกซึมของคลอไรด์ และความต้านทานการขยายตัวจากซัลเฟต

การศึกษาความต้านทานต่อการแทรกซึมได้ของคลอไรด์ทำโดยวิธี Rapid Chloride Permeability โดยแช่ ชิ้นตัวอย่างในสารละลาย NaOH และ NaCl ในเซลล์พิเศษและเร่งด้วยกระแสไฟฟ้า เปรียบเทียบกับชิ้นตัวอย่างที่บ่มด้วยวิธีมาตรฐาน เพื่อหาความสัมพันธ์ที่อาจมี

การศึกษาความต้านทานการขยายตัวจากซัลเฟต ทำโดยแช่ชิ้นตัวอย่างในสารละลายซัลเฟต โดยวัดการเปลี่ยนแปลงความยาวทุก 15 วัน เป็นเวลา 360 วัน

เนื่องจากการศึกษานี้ต้องใช้ตัวอย่างจำนวนมากดังนั้นชิ้นตัวอย่างที่ใช้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนาค่ากำลังอัดจึงใช้ตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 7.5 ซม. x 7.5 ซม. x 7.5 ซม. เพื่อลดความผันแปรของผลการทดสอบ จากข้อจำกัดของเครื่องผสมคอนกรีตดังนั้นเพื่อส่วนหนึ่งของการศึกษาจึงรวมผลกระทบของรูปร่างชิ้นตัวอย่างไว้ด้วย โดยทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 7.5 ซม. x 7.5 ซม. x 7.5 ซม. ที่อายุต่างๆเทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 7.5 ซม. x 15 ซม. ที่อายุเดียวกัน

3.4 การศึกษาโครงสร้างภายใน

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อนและผันแปรตามเวลา คุณสมบัติส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับพัฒนาโครงสร้าง แม้ว่าจะยังไม่มีการพัฒนาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างของคอนกรีตและคุณสมบัติอื่นอย่างสมบูรณ์ แต่การศึกษาการพัฒนาโครงสร้างภายในจะช่วยให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น โดยเฉพาะผลกระทบจากอุณหภูมิสูง ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาการพัฒนาโครงสร้างภายในของซีเมนต์เพสต์ที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอยสภาวะบ่มในน้ำ ปกติและการบ่มอุณหภูมิสูง ด้วยวิธี scanning electron microscope (SEM) และ XRD

ชิ้นตัวอย่างซีเมนต์เพสต์ที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอยถูกหล่อในแบบรูปลูกบาศก์ขนาด 7.5 ซม. X 7.5 ซม. X 7.5 ซม. เช่นเดียวกับชิ้นตัวอย่างรับแรงอัดเพื่อลดปัญหาความแตกต่างผลกระทบจากอุณหภูมิสูงเนื่องจากขนาด โดยแบ่งชิ้นตัวอย่างซึ่งใช้ w/b 0.50 ออกเป็นสองกลุ่ม กลุ่มแรกไม่มีเถ้าลอยในส่วนผสม กลุ่มที่สองใช้เถ้าลอยแทนที่ซีเมนต์ร้อยละ 35 ในส่วนผสม แล้งแบ่งตัวอย่างออกเป็นสองชุด บ่มทันทีในถังบ่มที่ควบคุมอุณหภูมิ 75°C และ 93°C เป็นเวลา $3 \frac{1}{2}$ ชั่วโมง แล้วสกัดชิ้นตัวอย่างให้แตกบริเวณตรงกลางเป็นชิ้นเล็กๆ นำมาแช่ในสารละลาย acetone เพื่อหยุดยั้งปฏิกิริยาก่อนนำไปตรวจสอบด้วยวิธี SEM และ XRD เพื่อเปรียบเทียบกับ microstructure ของเพสต์ที่บ่มในน้ำที่อุณหภูมิห้องตามปกติ ที่ 7 วัน 1 เดือน และ 8 เดือน

3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

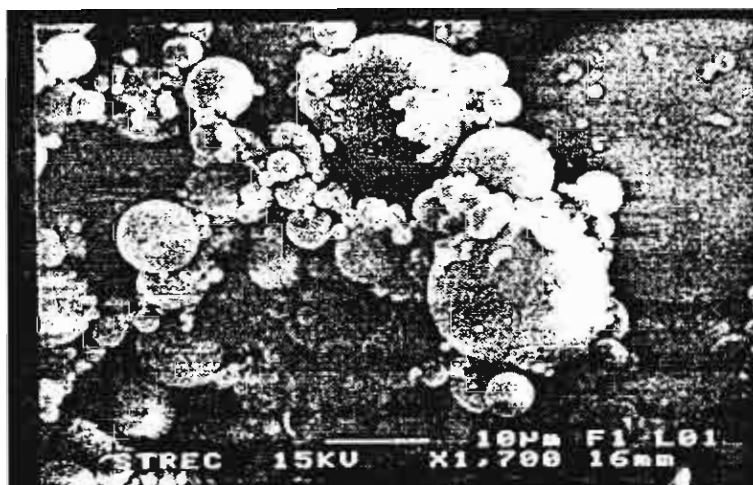
- 3.5.1 Compression Machine ขนาด 15 ตัน (Versa Tester)
- 3.5.2 Tensile Strength Machine ขนาด 1000 lbs. (Zeromax) ชนิด Power block
- 3.5.3 Mixers ขนาดความจุ 0.1 ม³
- 3.5.4 เตาอบควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25-150 °C
- 3.5.5 Controlled-Temperature Curing Tank (Range 30-110 °C)
- 3.5.6 Cube and Cylinder moulds ขนาด 5x5x5 ซม. 7.5x7.5x7.5 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5x15 ซม. และ 15x30 ซม.
- 3.5.7 Modified Controlled Temperature Accessories

บทที่ 4

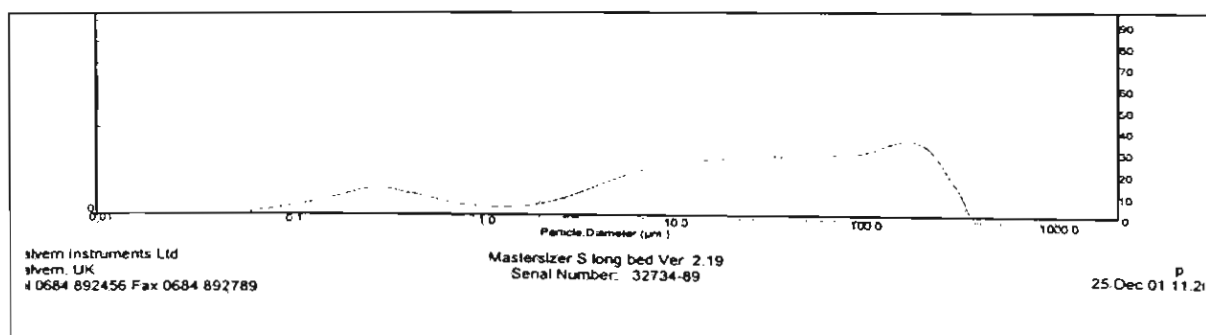
ผลการทดสอบ

4.1 การศึกษาคุณสมบัติของเถ้าลอย

ในการศึกษานี้ส่วนใหญ่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ (fa) จากแม่เมาะ ซึ่งมีลักษณะอนุภาคกลมดังภาพที่ 4.1.1 มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.1-600 ไมครอน มีการกระจายขนาดของอนุภาคดังแสดงในภาพที่ 4.1.2 มีปริมาณรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 86%, ปริมาณ CaO 6 % รายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการแสดงในตารางที่ 4.1.1 โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 3122 ซม.²/กรัม เถ้าลอยจากแหล่ง จ.ราชบุรี ได้มาจากถ่านหินซับบิทูมินัส จากประเทศอินโดนีเซีย แต่มีเปลือกไม้, เยื่อกระดาษเผา รวมกับถ่านหินในการผลิตของโรงงานไฟฟ้าด้วย จึงทำให้มีสีค่อนข้างเข้ม สำหรับเถ้าลอยแหล่ง จ.ระยอง ได้มาจากการเผาถ่านหินจำพวกซับบิทูมินัส จากประเทศอินโดนีเซียล้วน เถ้าลอยที่ได้จึงมีสีอ่อนกว่า สำหรับความร้อนที่ใช้ในการเผาไหม้ถ่านหินจากทั้งแหล่ง จ.ราชบุรี และระยอง ใช้อุณหภูมิในการเผาประมาณ 800-900 °C ซึ่งส่วนประกอบทางเคมีของเถ้าลอยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมีของถ่านหิน ซึ่งแตกต่างกันตามแหล่งกำเนิดและการผลิต ดังแสดงในตารางที่ 4.1.1



ภาพที่ 4.1.1 ลักษณะอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ในการศึกษานี้



ภาพที่ 4.1.2 ลักษณะการกระจายขนาดของอนุภาคเถ้าลอยลิกไนต์ที่ใช้ในการศึกษานี้

ตารางที่ 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพบางประการของเถ้าลอยที่ใช้เปรียบเทียบกับเถ้าลอยตามข้อกำหนดของ ASTM

Description	Maemoh Ilyash*	Rayong **	Ratchaburi **	Class C ASTM	Class F ASTM
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (Min.%)	81.4	70.5	85.6	50.0	70.0
SO_3 (Max.%)	1.3	4.8	1.5	5.0	5.0125
CaO (%)	9.6	14.9	4.2	>10.0	<10.0
LOI (%)	0.4	6.2	6.9	6.0	6.0
Free lime	0.21	Na	Na		
Specific gravity	1.9	2.6	2.4		
Bulk density (g/cm^3)	0.843	Na	Na		
Specific surface area (cm^2/g)	3233	3808	3880		
Mean diameter (μm)	67.7	Na	Na		
Percent retained on 45 μm sieve	39.5				

* จาก คู่มือเครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พศ.2545

** จาก Taurus Pozzolans CO.,LTD. วิเคราะห์ผลวันที่ 7 และ 8 มีนาคม พศ.2543

4.2 การศึกษา mortar

4.2.1 ผลกระทบจากคุณภาพของเถ้าลอยจากต่างแหล่งต่อการพัฒนากำลังอัดของ mortars ซีเมนต์

ข้อมูลจากการหาระยะเวลาการสั้นที่เหมาะสมของ mortars ซีเมนต์และกราฟแสดงกำลังอัดของ mortars ซีเมนต์ ที่ทำการสั้นด้วยระยะเวลาต่างๆแสดงรายละเอียดในตาราง ข.1 และภาพ ข.1 ในภาคผนวก ข จาก การทดสอบหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเขย่า mortars โดยใช้โตะเขย่าต่อกำลังอัดหลายค่า โดยพิจารณาค่าที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัด และเวลาที่ดีที่สุดและ ได้ผลสรุปว่าช่วงเวลา 30 วินาทีเป็นเวลาอัดแน่นที่เหมาะสมในการเตรียมตัวอย่าง ผลการทดสอบกำลังอัดของ mortars แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากแหล่งระยอง ราชบุรีและแม่เมาะซึ่งทำการบ่มด้วยก้อนตัวอย่างด้วยวิธีมาตรฐาน, 35°C , 75°C และ 95°C ได้ผลสรุปดังตารางที่ 4.2.1.1 โดยผลกระทบของสภาวะการบ่ม ระยะเวลา และการยึดเวลาการบ่มเร่งต่อกำลังอัดของตัวอย่างซีเมนต์ mortars ควบคุม และ mortars ที่ผสมเถ้าลอยจากต่างแหล่งมีรายละเอียดในภาคผนวก ข. ตาราง ข.2 – ข.17 จากผลการศึกษาขั้นต้นพบว่า การบ่มโดยใช้อุณหภูมิ 35°C เป็นเวลา 24 ชม. ให้ผลไม่แตกต่างจากการบ่มอุณหภูมิห้องมากนักที่อายุเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนกำลังจากการบ่มเร่งต่อกำลังจากการบ่มปกติที่อายุ 28 วัน และปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยจากแหล่งต่าง ๆ แสดงในภาพ 4.2.2.1 ก และข ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวอยู่ในช่วง 0.2 – 0.60 ขึ้นอยู่กับปริมาณการแทนที่ ระดับอุณหภูมิ และสภาวะการบ่มทันที หรือยึดเวลา ที่ 75°C การบ่มทันทีให้ค่าความผันแปรเนื่องจากแหล่งน้อยกว่าที่ 95°C (0.2-0.4 เทียบกับ 0.25-0.6) ขณะที่การบ่มทันทีทั้ง 75°C และ 95°C ให้ค่าความผันแปรน้อยกว่า

การบ่มยี่ดเวลาเมื่อพิจารณาผลกระทบจากแหล่ง ที่ปริมาณการแทนที่ 20 – 40% อัตราส่วนกำลังก่อนข้างไวต่อระดับอุณหภูมิการบ่มน้อยกว่าที่ปริมาณการแทนที่สูงขึ้น มีข้อสังเกตว่าความขึ้นขณะบ่มอุณหภูมิสูง โดยเฉพาะกรณีบ่มแรงดัน ที่มีผลเสียต่อกรพัฒนาค่ากำลังอัดอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.2.1.1 ผลการทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์แทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากต่างประเทศ

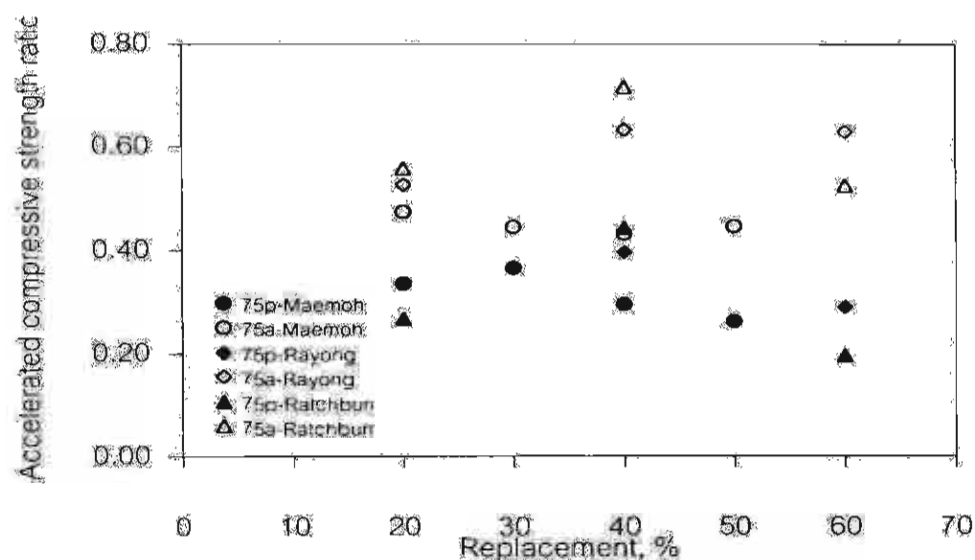
เถ้าลอย	ปริมาณที่ W/B=0.5	กำลังรับแรงอัดเฉลี่ย(ksc.)										
		3.5 ซม.				27.5 ซม.				7 วัน		
		S*	A*	75°C	95°C	S*	A*	75°C	95°C	S*	S*	S*
ควบคุม	0	28	33	109	142	239	237	259	267	148	281	316
	20	4	7	109	139	168	175	227	184	283	408	334
ราชบุรี	40	7	12	166	181	143	154	268	234	329	375	382
	60	5	3	61	132	82	49	165	187	181	315	349
ระยอง	20	6	8	126	173	170	166	199	193	340	378	411
	40	5	9	155	206	132	154	248	282	319	392	393
ควบคุม	60	3	3	85	176	71	76	185	226	224	295	337
แม่เมาะ	0		160	105	139		201	151	176	251	356	
	20		134	98	125		171	138	161	236	293	
	30		121	91	111		147	111	143	202	250	
	40		99	71	109		112	103	131	167	239	
	50		72	47	102		84	80	112	125	179	

Note: S* การบ่มที่อุณหภูมิห้องที่เวลา 3.5 ซม. 7 วัน 28 วัน (standard cure)

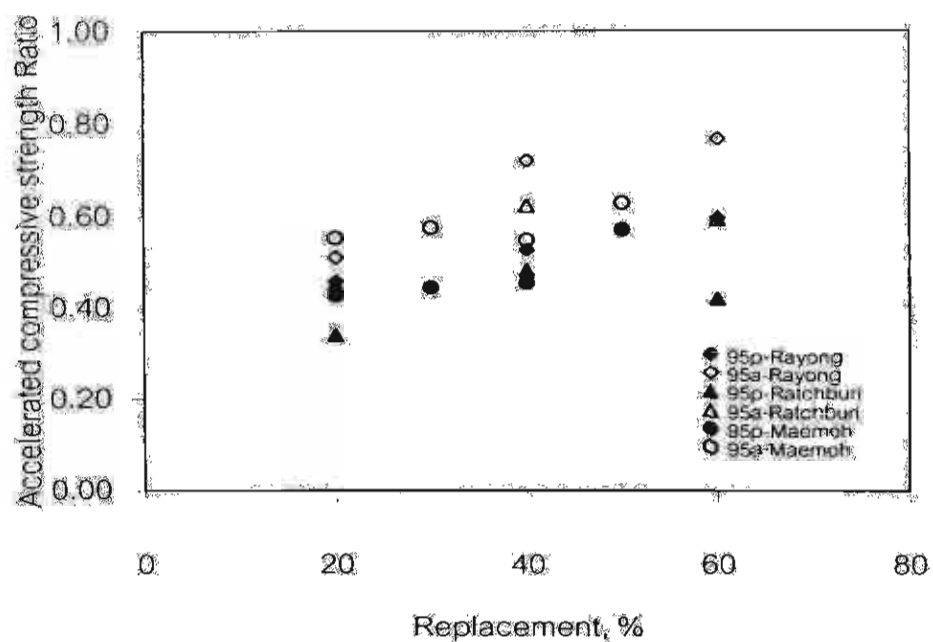
A* การบ่มที่อุณหภูมิ 35 C 24 ซม. (autogenous cure)

ผลการศึกษาค้นคว้าของมอร์ตาร์พบว่า แหล่งของเถ้าลอยมีผลกระทบต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัด แต่ไม่มีผลกระทบชัดเจนเมื่อพิจารณาในเชิงอัตราส่วนของกำลังจากวิธีการบ่มแรงค่อกำลังจากการบ่มแรงปกติ

เมื่อพิจารณาผลกระทบจากแหล่งเถ้าลอยแล้วได้ว่าการบ่มที่ทั้ง 75°C และ 95°C ให้ค่าความดันแปรน้อยกว่าการบ่มยี่ดเวลาและเถ้าลอยจากแหล่งแม่เมาะมีความดันแปรจากอุณหภูมิการบ่มน้อยกว่าจากแหล่งอื่น



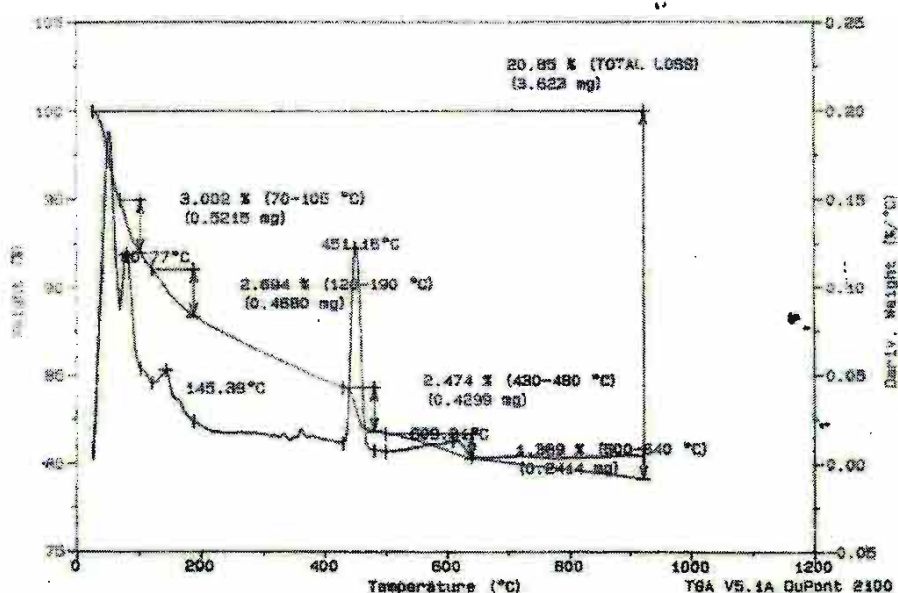
ภาพที่ 4.2.1.1 ก ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆจากการบ่มเร่ง และปริมาณการแทนที่ (w/b 0.5)



ภาพที่ 4.2.1.1 ข ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอยจากแหล่งต่างๆจากการบ่มเร่ง 95°C และปริมาณการแทนที่ (w/b 0.5)

4.2.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าลอย

ในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าลอยด้วย TGA เทคนิค โดยให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิประมาณ 550°C และหาความชื้นที่หายไปเพื่อนำมาคำนวณกลับเป็นปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นสารประกอบหลักอย่างหนึ่ง [57] แทนการหาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์โดยตรงซึ่งยังไม่มีวิธีหาที่แน่นอน ผลการศึกษาของซีเมนต์เพสต์ ที่ผสมเถ้าลอยที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 75°C และ 95°C และที่อายุ 28 วัน บ่มในน้ำด้วยอุณหภูมิห้องแสดงดังภาพที่ 4.2.2.1 4.2.2.2 และ 4.2.2.3 ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่มาคำนวณได้สำหรับกรณีบ่ม 75°C 3.5 ชั่วโมง และ บ่ม 95°C 3.5 ชั่วโมง และที่ 28 วัน บ่มในน้ำด้วยอุณหภูมิห้องคือ 10.17 และ 8.0 และ 8.13% ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิสูง 95°C และการบ่มที่ 28 วัน ในน้ำมีแนวโน้มการใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใกล้เคียงกัน ขณะที่ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากการบ่มด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า (75°C) มีค่าสูงกว่า ซึ่งอาจใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ถึงการพัฒนาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ที่มีมากกว่าจากการบ่มด้วยอุณหภูมิสูงและที่ 28 วัน



Sample : CEMENT PASTE (75 °C 3.5hr.)

Operator: PANPEE

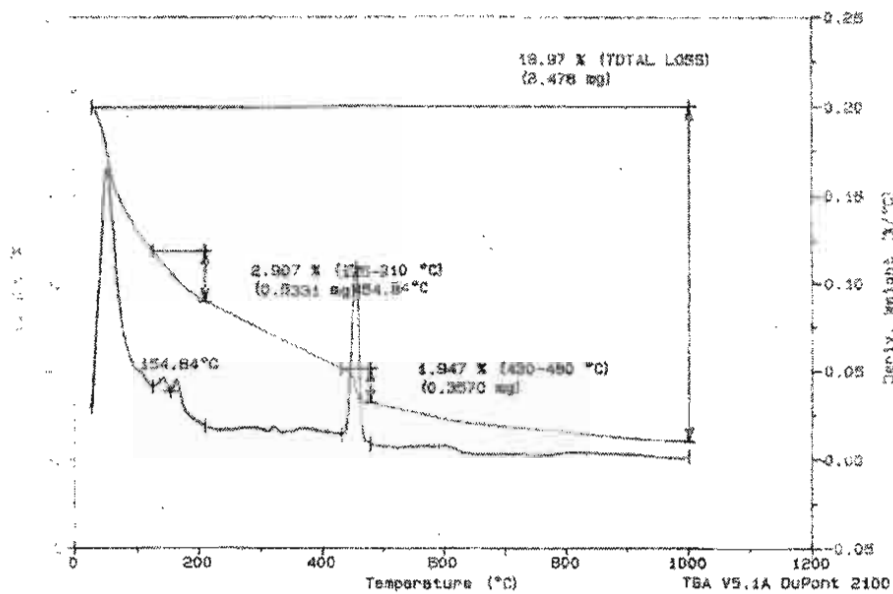
Size: 17.3740 mg.

Method : RT TO 1000 °C, 10 °C/M

Comment: RT-1000 °C, 10 °C/M, N2 55CC/M AIR 75

Run Date: 2-Oct-01 11:47

พทที่ 4.2.2.1 การวิเคราะห์ TGA ของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้เถ้าลอยที่บ่ม 75°C 3.5 ชั่วโมง



Sample : CEMENT PASTE (95 °C 3.5hr.)

Operator: PANPEE

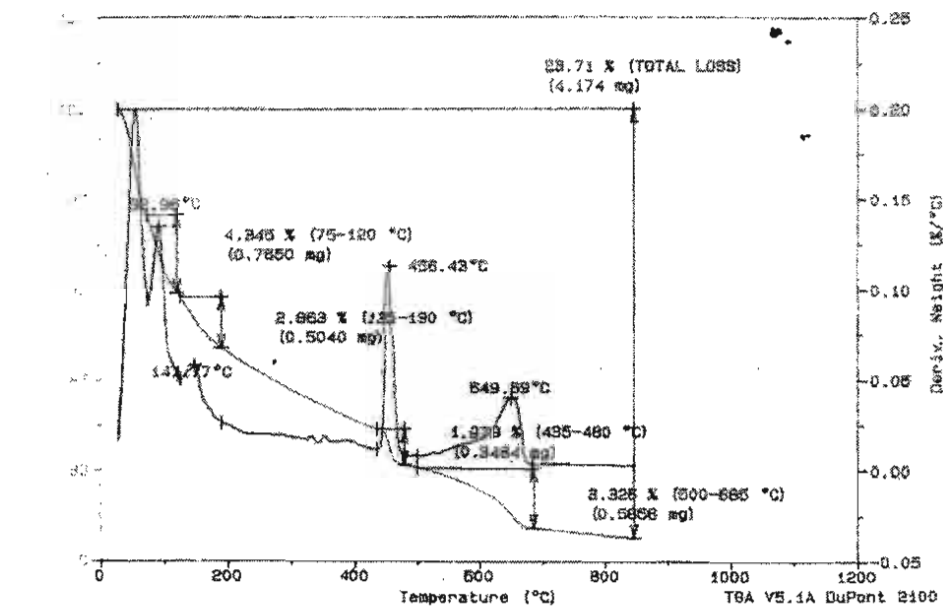
Size: 18.3360 mg.

Method : RT TO 1000 °C, 10 °C/M

Comment: RT-1000 °C, 10 °C/M, N2 55CC/M AIR 75

Run Date: 2-Oct-01 13:58

ภาพที่ 4.2.2.2 การวิเคราะห์ TGA ของซีเมนต์เพสต์ ที่ใช้แล้วล่อยที่บ่ม 95 °C 3.5 ชั่วโมง



: CEMENT PASTE (CONTROL)

Operator: PANPEE

17.6060 mg.

Method : RT TO 1000 °C, 10 °C/M

RT-1000 °C, 10 °C/M, N2 55CC/M AIR 75

2-Oct-01 09:14

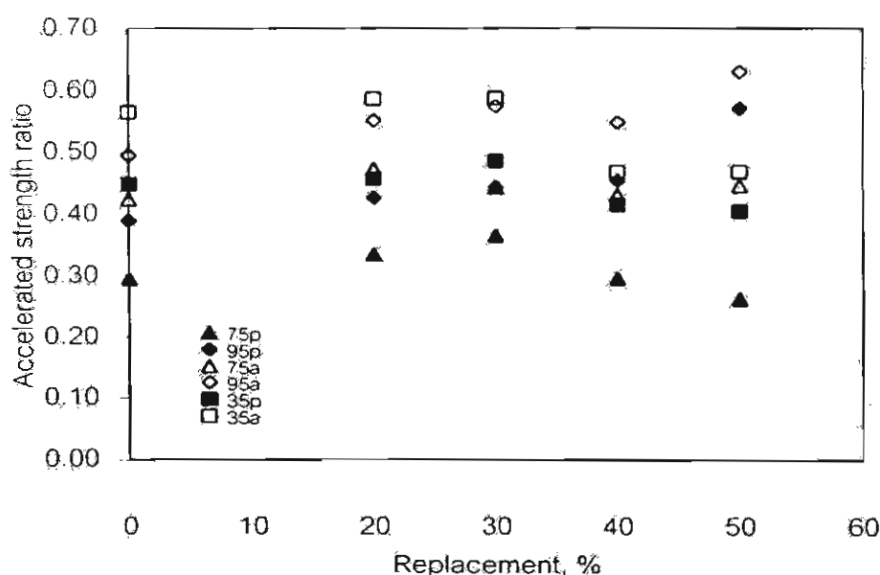
4.2.2.3 การวิเคราะห์ TGA ของซีเมนต์เพสต์ลิ้นวที่บ่มปกติ 28 วัน

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น อาจกล่าวได้ว่าการบ่มด้วยอุณหภูมิสูง 95°C และการบ่มที่ 28 วันในน้ำมีแนวโน้มการใช้ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ใกล้เคียงกัน ขณะที่ปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จากการบ่มด้วยอุณหภูมิต่ำกว่า (75°C) มีค่าสูงกว่า ซึ่งอาจบ่งถึงการพัฒนาปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีมากกว่าจากการบ่มด้วยอุณหภูมิสูงและที่ 28 วัน

4.2.3 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ

การบ่มอุณหภูมิสูงทันทีโดยเฉพาะที่ 75°C และ 95°C มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะต้น โดยอัตราส่วนกำลังมีความผันแปรส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 10% ยกเว้นที่ปริมาณการแทนที่ 50% และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3- 0.45 ขึ้นกับปริมาณการแทนที่ กำลังแรงอัดจากการบ่มอุณหภูมิสูง 95°C มีค่าสูงกว่ากำลังจากการบ่มที่ 75°C เสมอ

การยี้ระยะเวลาการบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง หลังจากหล่อเสร็จมีผลต่อการลดความผันแปรของค่าอัตราส่วนกำลัง ดังแสดงในภาพ 4.2.3.1 โดยเฉพาะการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C และการบ่มที่ 95°C ให้ค่าอัตราส่วนกำลังอัดสูงกว่าเสมอ การบ่ม 35°C ทั้งสภาวะการบ่มทันที และการบ่มยี้เวลา เป็นเวลา 24 ชม. ให้ค่าอัตราส่วนกำลังใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิ 95°C โดยเฉพาะการบ่มทันทีที่มีความผันแปรค่อนข้างน้อยแต่เมื่อพิจารณาความสะดวกในการทำ เหนือทั้งช่วงเวลาและความยากง่ายในการควบคุมอุณหภูมิ และวัตถุประสงค์ที่จะได้ผลเร็วที่สุดแล้ว การบ่มสภาวะนี้อาจไม่เหมาะสมเท่าการบ่มที่อุณหภูมิ 75°C และการบ่มที่ 95°C ทันที



ภาพที่ 4.2.3.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาต่ออัตราส่วนกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย

เมื่อนำค่ากำลังอัดจากการบ่มเร่งมาเขียนความสัมพันธ์กับกำลังอัดจากการบ่มปกติ ดังแสดงในภาพ 4.2.2.2 พบว่าความสัมพันธ์อยู่ในรูปสมการดังต่อไปนี้

35°C , for 24 hours:

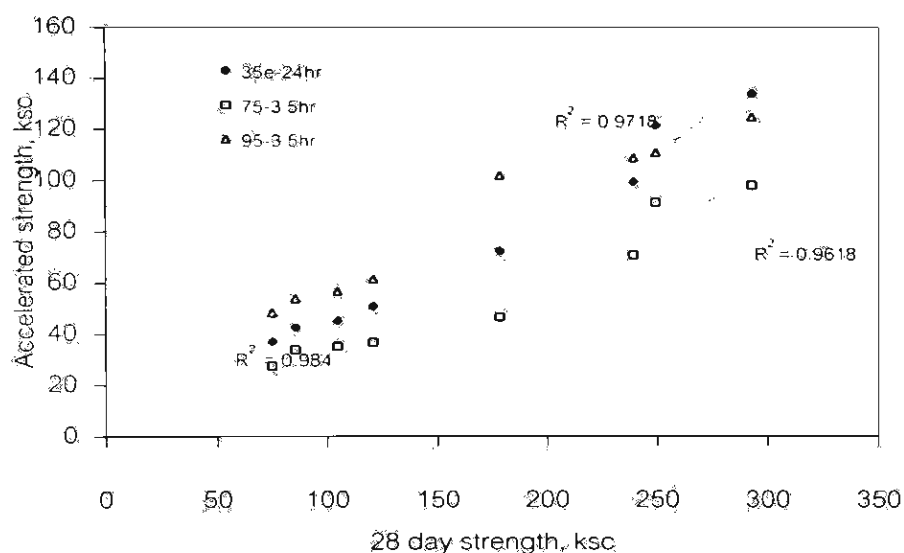
$$y = 0.0009x^2 + 0.1328x + 22.467 \quad \dots (R^2 = 0.984)$$

75 °C for 3.5 hours:

$$y = 0.001x^2 - 0.045x + 27.375 \dots \dots \dots (R^2 = 0.962)$$

95 °C for 3.5 hours:

$$y = -0.0008x^2 + 0.6488x + 1.679 \dots \dots \dots (R^2 = 0.972)$$

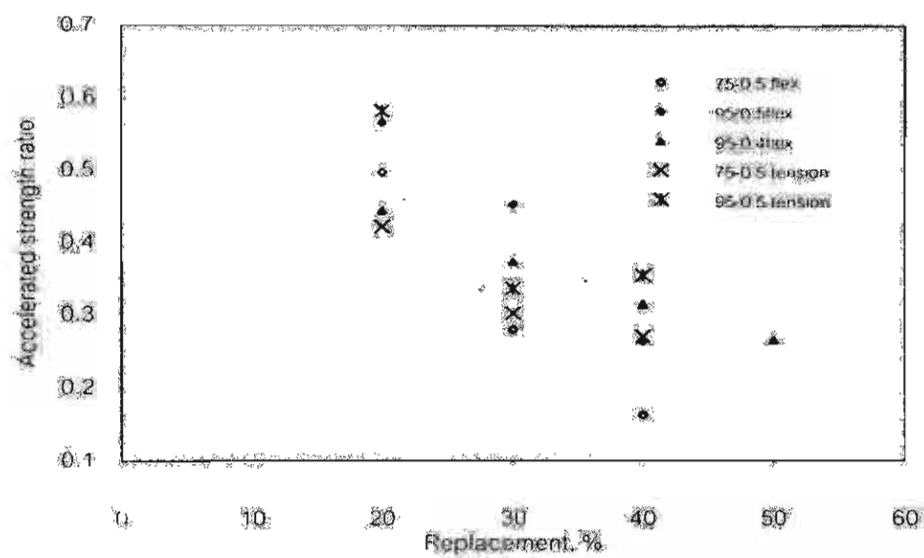


ภาพที่ 4.2.3.2 กำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมแล้วสอยจากการบ่มแรงและการบ่มปกติ

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะอาจกล่าวได้ว่าการบ่มอุณหภูมิสูงทันที (75 °C, 95 °C) มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดในระยะต้น แต่การยืดระยะเวลาการบ่มแรง 24 ชั่วโมงหลังจากหล่อเสร็จมีความผันแปรของค่าอัตราส่วนกำลังน้อยกว่า และความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดจากการบ่มแรงและการบ่มปกติ อยู่ในรูปสมการพหุนาม

4.2.4 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ

ค่าเฉลี่ยของข้อมูลของค่าการทดสอบกำลังอัดจากการบ่มที่สภาวะต่าง ๆ เมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังอัดจากการบ่มแรงและปริมาณการแทนที่จะได้ความสัมพันธ์ดังภาพ 4.2.4.1 โดยมีข้อมูลการทดสอบ แสดงในตารางที่ 4.2.4.1 และมีรายละเอียดดังตารางที่ ข.18 ภาคผนวก ข. ซึ่งอัตราส่วนกำลังมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.2.4.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาต่อความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังค้ำค้ำของมอร์ตาร์ผสมเส้นใย และปริมาณการแทนที่

ตารางที่ 4.2.4.1 ความสัมพันธ์ของกำลังค้ำจุนของรบบรับแรงดัดงอและการบ่มปกติกับระดับอุณหภูมิ w/b และ ปริมาณเหล็กเสริม

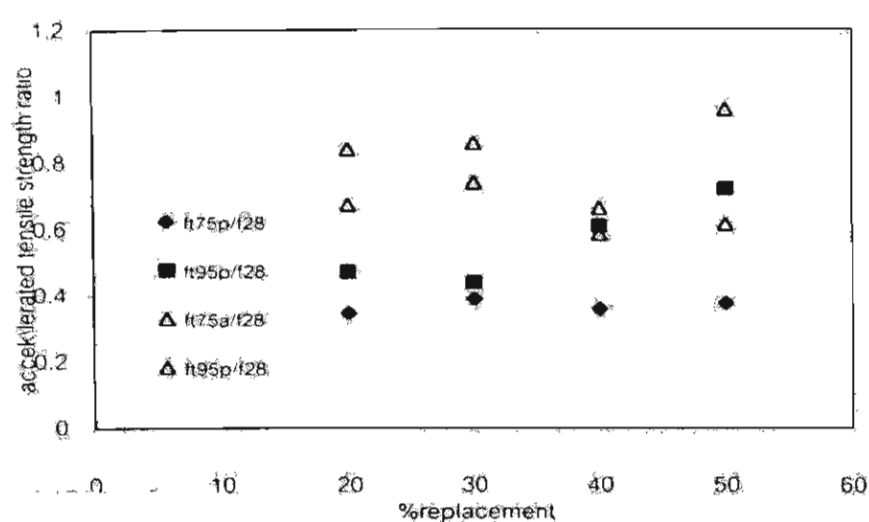
Description	w/b	Accelerated flexural strength /normal flexural strength				
		% replacement				
		0	20	30	40	50
S.35 c = 24.1	0.4	21.3	17.2	11.6	8.8	6.9
S.75 c = 3.5	0.4	12.3	4.5			
S.95 c = 3.5	0.4	20.2	13.0	10.2	7.3	4.7
L.35 c = 24.1	0.4	23.7	10.2	18.0	15.4	11.0
L.75 c = 3.5	0.4	18.3	11.3	6.2	1.8	
L.95 c = 3.5	0.4	25.4	21.6	19.0	9.2	
Normal 24.1	0.4	11.7	9.2	7.1	5.6	
Normal 7 d;	0.4	23.1	19.1	17.5	13.4	12.0
Normal 28 d	0.4	43.4	29.2	27.2	23.2	17.6
Normal 91 d	0.4	46.1	32.8	28.5	25.4	21.5
S.35 c = 24.1	0.5	36.3	26.1	24.9	13.5	3.7
S.75 c = 3.5	0.5	23.7	11.6	6.1	3.3	
S.95 c = 3.5	0.5	27.1	18.7	9.9	7.3	6.4
L.35 c = 24.1	0.5	43.3	37.8	32.5	21.6	19.2
L.75 c = 3.5	0.5	28.3	23.5	21.4	15.2	11.9
L.95 c = 3.5	0.5	35.4	23.4	22.3	21.6	18.7
Normal 24.1	0.5	25.6	19.4	15.1	9.0	5.3
Normal 7 d;	0.5	44.2	35.6	30.2	26.6	21.1
Normal 28 d	0.5	47.7	41.3	37.3	33.7	25.5
Normal 91 d	0.5	50.9	43.0	39.7	35.9	34.4

4.2.5 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการฟื้นตัวกำลังดึงของนอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ให้ค่าลดหย่อนเหมาะสม

ข้อมูลจากการทดสอบการรับแรงดัดมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.19 ลักษณะภาพ ข. ค่าอัตราส่วนกำลังค้ำจุนการบ่มแรงดัดค่าถึงวันที่ 28 วัน แสดงในตารางที่ 4.2.5.1 อัตราส่วนกำลังจะมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงในภาพ 4.2.4.1 และ 4.2.8.1

ตารางที่ 4.2.5.1 อัตราส่วนกำลังดึงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และปริมาณการแทนที่ และสภาวะการบ่ม

Description	Avg. Ten. Strength ratio					
	% replacement					
	w/b	0	20	30	40	50
S.35 c - 24	0.40	0.58	0.65	0.65	0.55	0.56
S.75 c - 3.1	0.40	0.42	0.34	0.39	0.36	0.37
S.95 c - 3.1	0.40	0.71	0.47	0.44	0.61	0.72
L.35 c - 24	0.40	0.84	0.64	0.85	0.65	0.66
L.75 c - 3.1	0.40	0.72	0.84	0.74	0.58	0.61
L.95 c - 3.1	0.40	0.58	0.67	0.86	0.66	0.96
Normal 24	0.40	0.54	0.57	0.46	0.57	0.48
Normal 7 c	0.40	0.73	0.70	0.94	0.68	0.71
Normal 28	0.40	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
S.35 c - 24	0.50	0.56	0.61	0.57	0.42	0.54
S.75 c - 3.1	0.50	0.44	0.42	0.30	0.27	0.29
S.95 c - 3.1	0.50	0.50	0.58	0.34	0.35	0.73
L.35 c - 24	0.50	0.69	0.76	0.45	0.65	0.46
L.75 c - 3.1	0.50	0.60	0.58	0.39	0.53	0.42
L.95 c - 3.1	0.50	0.68	0.48	0.51	0.62	0.69
Normal 24	0.50	0.53	0.53	0.41	0.36	0.40
Normal 7 c	0.50	0.75	0.92	0.66	0.85	0.77
Normal 28	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00



ภาพที่ 4.2.5.1 ผลกระทบของอุณหภูมิการบ่มและระยะเวลาต่อความสัมพันธ์ของอัตราส่วนกำลังดึงของมอร์ตาร์ผสมเถ้าลอย และปริมาณการแทนที่

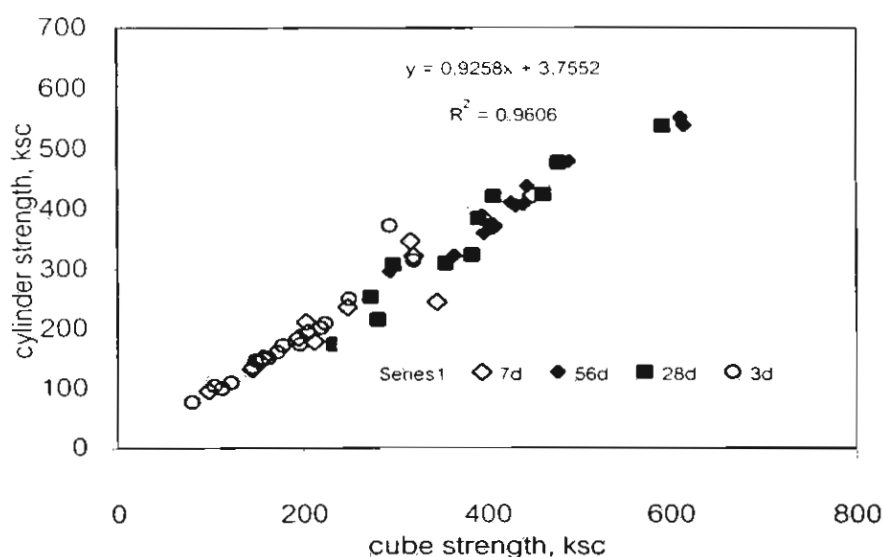
เมื่อพิจารณาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังดึงของมอร์ตาร์ซีเมนต์ ที่ใช้เถ้าลอยแม่เมาะ อาจกล่าวได้ว่า อัตราส่วนกำลังดึงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น

4.3 การศึกษาชิ้นตัวอย่างคอนกรีต

4.3.1 ผลกระทบของรูปร่างชิ้นตัวอย่าง

จากการศึกษาผลกระทบของรูปร่างชิ้นตัวอย่างโดยทดสอบกำลังอัดของตัวอย่างรูปลูกบาศก์ขนาด 7.5 ซม. x 7.5 ซม. x 7.5 ซม. ที่อายุต่างๆ เทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 7.5 ซม. x 15 ซม. ที่อายุเดียวกันมีความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพที่ 4.3.1.1 และ ไม่ขึ้นกับปัจจัยใดนอกจากกำลัง ความสำคัญของปัจจัยอื่นๆ เช่น อายุ อัตราส่วน w/b และปริมาณการแทนที่ของเถ้าลอยสะท้อนออกมาในรูปค่ากำลัง ดังแสดงในตารางที่ 4.3.1.1 รายละเอียดของข้อมูลแสดงใน ตารางที่ ค1 ภาคผนวก ค ความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังสมการ

$$y = 0.9258x + 3.7552 \quad R^2 = 0.9606$$



ภาพที่ 4.3.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของตัวอย่างรูปลูกบาศก์และตัวอย่างรูปทรงกระบอก

ตารางที่ 4.3.1.1 กำลังอัดของตัวอย่างรูปลูกบาศก์ ที่อายุต่างๆเทียบกับกำลังอัดของตัวอย่างรูปทรงกระบอก

		cube	cylinder	cube	cylinder	cube	cylinder	cube	cylinder
w/b	%fa	3day	3day	7day	7day	28day	28day	56day	56day
0.4	0	295	373	450	424	591	539	610	553
0.4	20	251	250	395	386	478	478	614	540
0.4	30	219	201	317	346	462	424	489	480
0.4	40	179	172	321	321	407	421	444	438
0.4	50	149	147	205	193	384	324	426	411
0.5	0	321	313	407	372	440			
0.5	20	197	174	249	235	403			
0.5	30	146	136	195	184	448			
0.5	40	172	160	203	210	375			
0.5	50	123	109	153	144	299	307	407	371
0.5	0	225	208	346	244	392	384	432	406
0.6	20	163	151	212	178	358	309	440	408
0.6	30	112	100	157	151	274	253	397	360
0.6	40	105	104	145	133	282	215	365	323
0.6	50	80	77	98	95	234	174	295	295

4.3.2 ผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตทั้งที่ใช้และไม่ใช้เถ้าลอย

ผลการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อการพัฒนากำลังอัดพบว่า การบ่มด้วยอุณหภูมิสูง 3.5 °C มีผลต่อทั้งคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมเถ้าลอยทุกระดับการแทนที่อย่างชัดเจน ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดคอนกรีตในภาวะการบ่มต่างๆและที่อายุต่างๆแสดงในตารางที่ 4.3.2.1 และค่าอัตราส่วนกำลังอัดคอนกรีตในภาวะการบ่มต่างๆต่อกำลังอัดที่อายุ 28 และ 56 วัน สำหรับ w/b 0.4, 0.5, 0.6 แสดงในตารางที่ 4.3.2.2

จากการศึกษาพบว่า สำหรับคอนกรีตปกติ ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการบ่มแรงกำลังอุณหภูมิสูงในแต่ละกรณีให้ค่าแตกต่างกัน ค่าเฉลี่ยของการบ่มที่ 75 °C และ 95 °C พื้นที่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value = 0.0413) ขณะที่ค่าเฉลี่ยของการบ่มแรงหลังจากหล่อคอนกรีตไปแล้ว 24 ชั่วโมง ไม่แสดงแนวโน้มชัดเจน (P-value = 0.284) ที่อุณหภูมิ 95 °C ให้ค่ากำลังอัดสูงกว่าเสมอ และผลกระทบนี้ชัดเจนในกรณีการบ่มแรงพื้นที่มากกว่าจากการบ่มแรงหลังจาก 24 ชั่วโมง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิ 75 °C ซึ่งแสดงว่าอุณหภูมิมีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างภายในในช่วงต้นมากกว่ากรณีที่คอนกรีตมีการพัฒนาโครงสร้างไปส่วนหนึ่งแล้ว โดยที่ที่ W/B 0.4 ค่ากำลังเฉลี่ยจากการบ่มที่ 75 °C พื้นที่มีค่า 210.6 กก/ซม² และ เพิ่ม

ขึ้น 40 % เมื่อวัดเวลาการบ่มเสร็จหลังจากอายุ 24 ชั่วโมง มีค่าเป็น 294.7 กก/ชม² ในขณะที่การบ่ม 95 °C ชั้นที่ 1 มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 254.4 กก/ชม² และ เพิ่มขึ้น 20% เป็น 305.5 กก/ชม² ในกรณีเดียวกัน

ตารางที่ 4.3.2.1 ค่าเฉลี่ยของกำลังอัดคอนกรีตในภาวะการบ่มต่างๆ

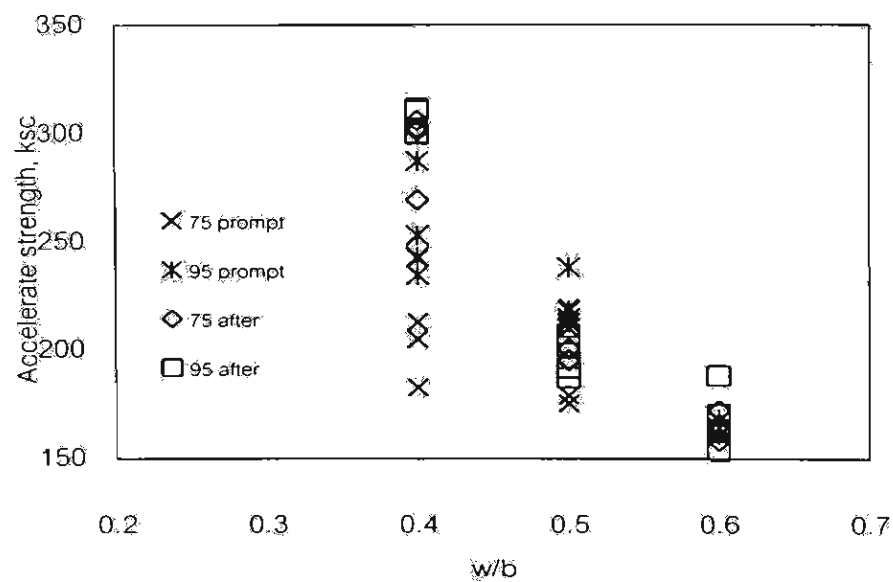
		compressive strength, ksc							
conditions		prompt	prompt	4hr&heat3.5hr		Cube	cube	cube	cube
w/b	%replace	av.75C	av.95C	av.75C	av.95C	3day	7day	28day	56day
0.4	0	211	254	295	305	295	450	591	610
0.4	20	188	221	195	249	251	395	478	614
0.4	30	144	190	181	197	219	317	462	489
0.4	40	109	178	141	170	179	321	407	444
0.4	50	79	150	103	144	149	205	384	426
0.5	0	196	221	198	197	321	407	440	
0.5	20	136	163	121	144	197	249	403	
0.5	30	96	131	110	143	146	195	448	
0.5	40	98	143	117	134	172	203	375	
0.5	50	57	120	80	112	123	153	299	407
0.6	0	132	163	165	168	225	346	392	432
0.6	20	88	113	114	126	163	212	356	440
0.6	30	57	98	82	102	112	157	274	397
0.6	40	61	97	73	86	105	145	282	365
0.6	50	39	82	53	77	80	98	234	295

แต่ที่ค่า W/B สูงขึ้น 0.5 และ 0.6 ผลกระทบของการยืดเวลาการบ่มเสร็จหลัง 24 ชั่วโมงอยู่ในช่วง 25% ในกรณี 95 °C มีผลกระทบน้อยลงมากกว่ากรณี 75 °C อัตราส่วนของกำลังจากการบ่มเร่งทันที ต่อกำลังจากการบ่มขึ้นปกติที่ 28 วัน และ 56 วัน อยู่ในช่วง 0.30 – 0.50 ขณะที่ความผันแปรของอัตราส่วนดังกล่าว จากการบ่มเร่งเสร็จจาก 24 ชั่วโมงแรกมีค่าอยู่ในช่วงแคบกว่า (0.40-0.51) ดังแสดงในตาราง 4.4.2 และ ในช่วงที่ศึกษาที่ค่า W/B ต่ำ (0.4) การบ่มอุณหภูมิสูงทั้ง 75 °C และ 95 °C มีค่าความผันแปรกว้างกว่าค่าของคอนกรีตที่ใช้ W/B สูงขึ้น (0.5, 0.6) ดังภาพที่ 4.3.2.1

ค่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มเร่งทันทีที่อุณหภูมิ 75 °C, 95 °C และบ่มหลังยืดเวลาไปแล้ว 24 ชั่วโมงเมื่อนำมาเขียนความสัมพันธ์กับกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน แสดงในรูป 4.3.2.2, 4.3.2.3, 4.3.2.4 และ 4.3.2.5 โดยมีรูปสมการและค่า R² ดังแสดงในตารางที่ 4.3.2.3 และเมื่อนำค่ากำลังอัดจากการบ่มเร่งมาหาความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ และ W/B พบว่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น $y = a + bx_1 + cx_2$ เมื่อ y = กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มเร่ง x_1 = อุณหภูมิ และ x_2 = W/B โดยมีรูปสมการและค่า R² ดังแสดงในตารางที่ 4.3.2.4

ตารางที่ 4.3.2.2 ค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนกำลังอัดคอนกรีตในภาวะการบ่มต่างๆ

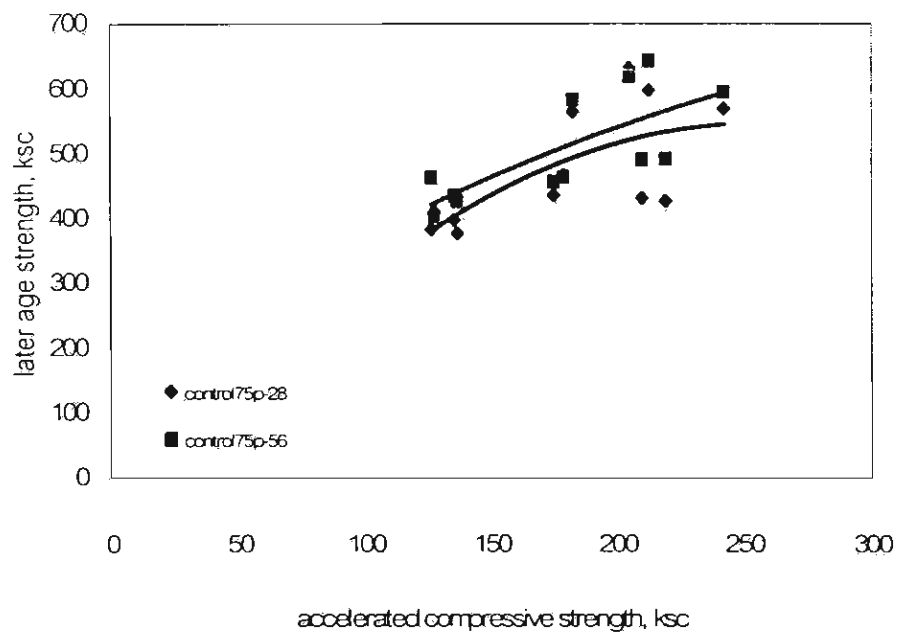
compressive strength ratio									
conditions	prompt	prompt	prompt	prompt	hr&heat3.5	hr&heat3.5	hr&heat3.5	hr&heat3.5	hr&heat3.5
w/b	'replaceme	f75p /f28	f95p /f28	f75p /f56	f95p /f56	f75a /f28	f95a /f28	f75a /f56	f95a /f56
0.4	0	0.356	0.430	0.345	0.417	0.498	0.517	0.483	0.500
0.4	20	0.393	0.463	0.305	0.360	0.408	0.521	0.317	0.405
0.4	30	0.312	0.411	0.295	0.388	0.391	0.426	0.369	0.402
0.4	40	0.267	0.437	0.245	0.401	0.347	0.418	0.318	0.383
0.4	50	0.206	0.391	0.186	0.353	0.268	0.374	0.242	0.337
0.5	0	0.445	0.502	0.412	0.464	0.450	0.447	0.416	0.414
0.5	20	0.337	0.405	0.281	0.338	0.301	0.358	0.252	0.299
0.5	40	0.261	0.382	0.225	0.330	0.311	0.359	0.269	0.310
0.5	50	0.192	0.400	0.141	0.294	0.267	0.375	0.196	0.275
0.6	0	0.336	0.417	0.305	0.378	0.420	0.430	0.381	0.390
0.6	20	0.247	0.318	0.199	0.257	0.322	0.353	0.260	0.285
0.6	30	0.207	0.356	0.143	0.245	0.298	0.371	0.206	0.256
0.6	40	0.216	0.344	0.167	0.266	0.260	0.305	0.201	0.236
0.6	50	0.167	0.351	0.133	0.279	0.225	0.330	0.179	0.262



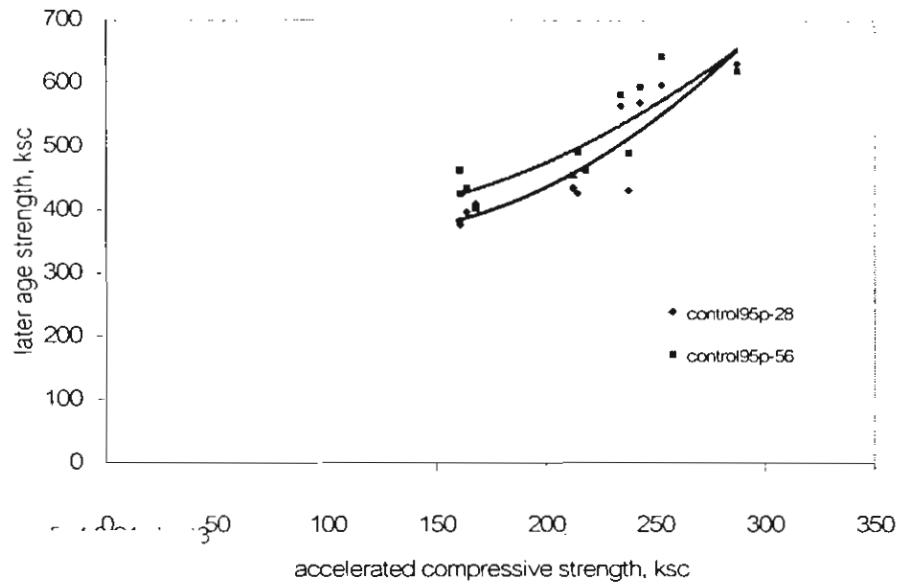
ภาพที่ 4.3.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดจากการบ่มเร่งและ w/b ของคอนกรีตควบคุม

ตารางที่ 4.3.2.3 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดจากการบ่มเร่งกับกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน

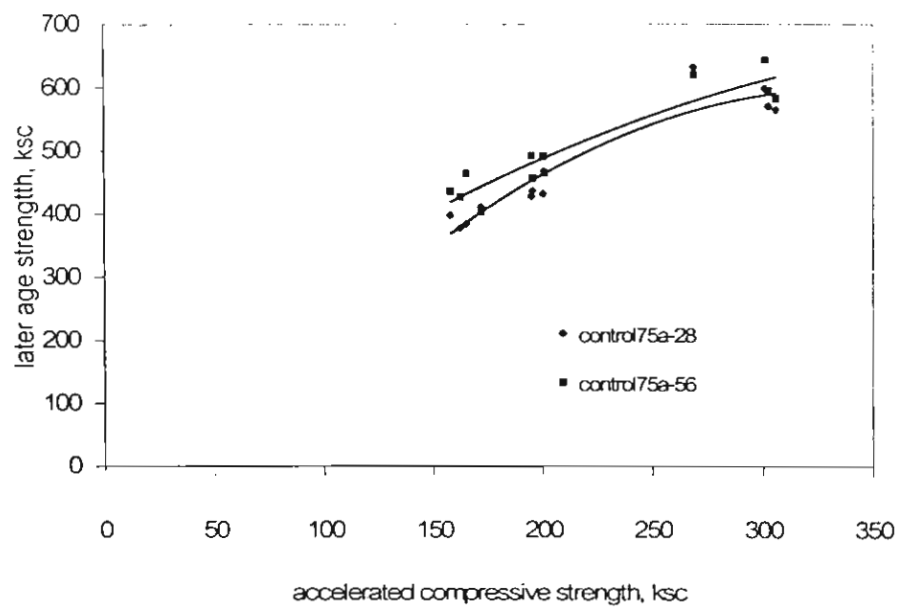
condition	equation	R^2
control f75p-28	$y = -0.0098x^2 + 5.0331x - 98.839$	$R^2 = 0.4785$
control f95p-56	$y = -0.003x^2 + 2.6067x + 140.92$	$R^2 = 0.549$
control f95p-28	$y = 0.0094x^2 - 2.0883x + 477.28$	$R^2 = 0.8105$
control f95p-56	$y = 0.0064x^2 - 1.0286x + 426.19$	$R^2 = 0.7499$
control f75a-28	$y = -0.007x^2 + 4.7375x - 207.58$	$R^2 = 0.9041$
control f75a-56	$y = -0.0029x^2 + 2.7003x + 64.516$	$R^2 = 0.8862$
control f95a-56	$y = 0.004x^2 - 0.507x + 374.97$	$R^2 = 0.9222$
control f95a-28	$y = 0.0026x^2 + 0.0028x + 366.34$	$R^2 = 0.8992$



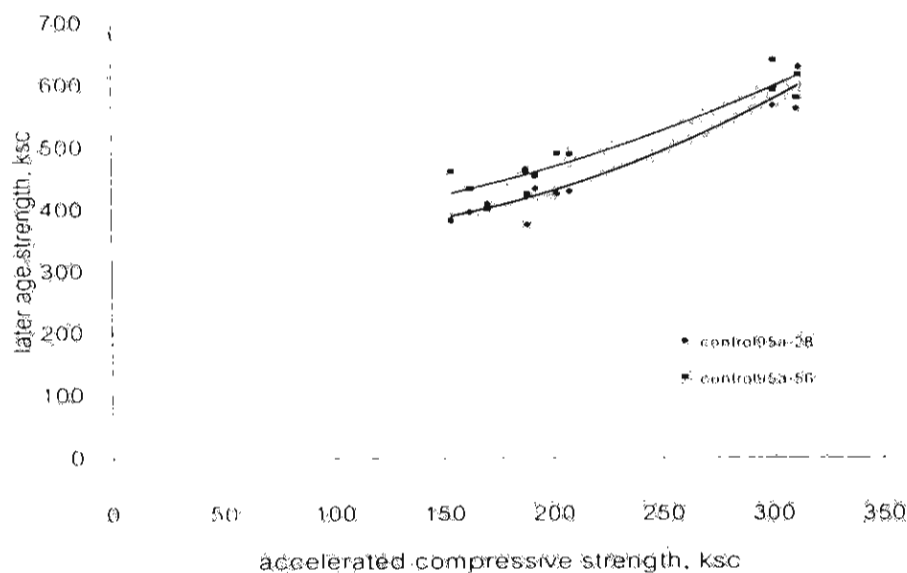
ภาพที่ 4.3.2.2 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มเร่งทันทีที่อุณหภูมิ 75°C และกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน



ภาพที่ 4.3.2.3 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มแรงดันที่อุณหภูมิ 95°C และกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน



ภาพที่ 4.3.2.4 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มแรงดันหลังยึดเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 75°C และกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน



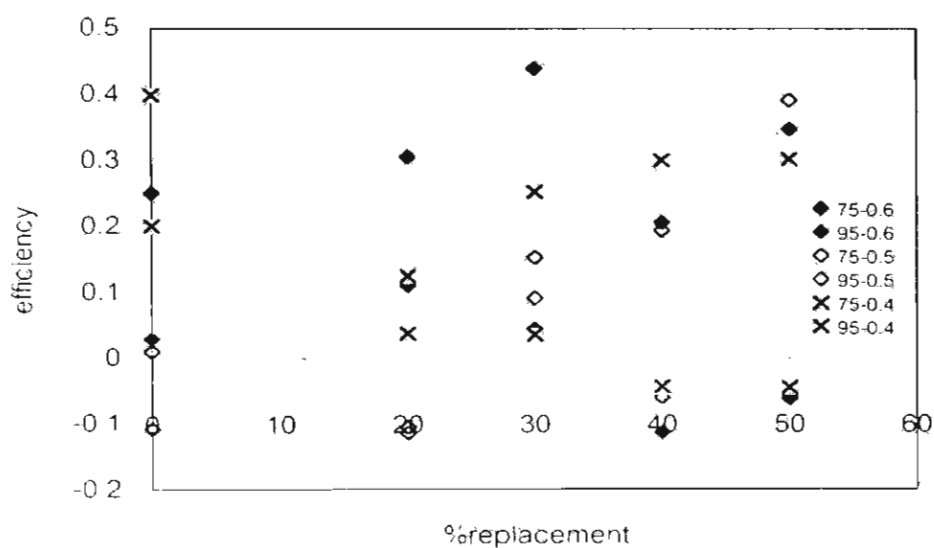
ภาพที่ 4.3.2.5 ความสัมพันธ์ของกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มเร่งหลังยี้ดเวลา 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 95°C และกำลังอัดระยะยาว 28 และ 56 วัน

ตารางที่ 4.3.2.4 ความสัมพันธ์ของค่ากำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มเร่งกับอุณหภูมิ และ W/B

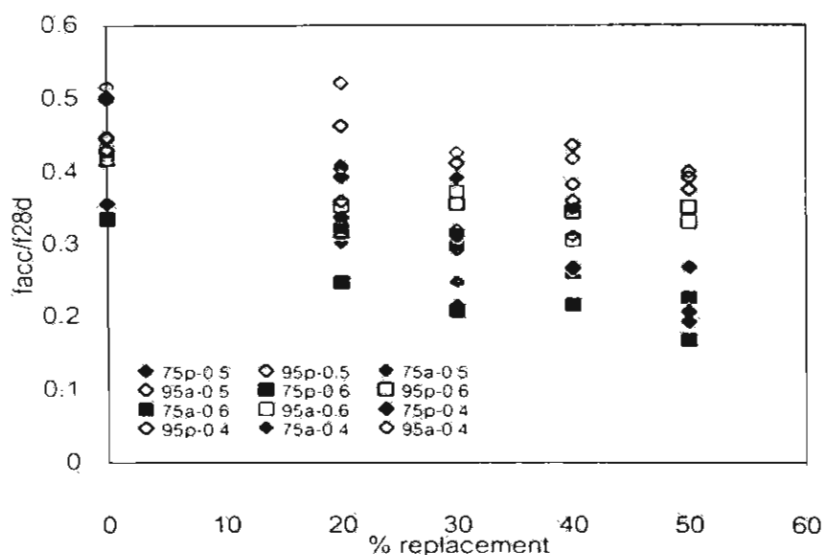
Condition	equation	coefficient			p values			R2
		a	b	c	p for a	p for b	p for c	
Prompt	$y=a+bx_1+cx_2$	265.9321	1.677622	-424.805	1.84E-06	0.000295	1.29E-08	0.8249
24 hr after	$y=a+bx_1+cx_2$	535.968	0.228623	-668.146	6.97E-11	0.594893	1.94E-11	0.8879

สำหรับคอนกรีตผสมถั่วลันเตา การบ่มอุณหภูมิสูงมีผลกระทบต่อการพัฒนา กำลังมาก และทั้งปริมาณการแทนที่ และระดับอุณหภูมิที่ใช้บ่มมีผลต่อการเร่งกำลัง เมื่อใช้อุณหภูมิ 95°C ผลกระทบจากการยี้ดเวลาการบ่มเร่ง 24 ชั่วโมง จากการบ่มทันที มีน้อยอยู่ถึงระดับ 1-12% สำหรับทุกค่า W/B และทุกระดับการแทนที่ ในขณะที่การบ่มเร่ง 75 °C ปริมาณการแทนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการยี้ดเวลาบ่มเร็วกำลัง ที่ปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น การยี้ดเวลาการบ่มเร่ง หลัง 24 ชม. จะให้ค่ากำลังอัดจากการบ่มเร่งสูงขึ้น ดังแสดงในภาพ 4.3.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนส่วนกำลัง อัดจากการบ่มเร่งต่อกำลังอัดที่ 28 วันของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตผสมถั่วลันเตาในภาวะต่างๆ แสดงดังภาพ 4.3.2.7 สำหรับการบ่มเร่งกำลังมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณการแทนที่เพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มที่ไม่ชัดเจนกรณีการบ่มอุณหภูมิสูง 95 °C และการบ่มเร่งหลังจากการยี้ดเวลาการบ่ม 24 ชม. ทั้งสองอุณหภูมิสำหรับคอนกรีตที่ควบคุม 75°C , และ 95°C ไม่ได้ส่งผลต่อความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของกำลังอัด . (P-value = 0.2843, 0.8528, 0.644) สำหรับ W/B 0.4, 0.5, 0.6 ตามลำดับ ค่ากำลังอัดจากการบ่มเร่งมีความสัมพันธ์กับระดับอุณหภูมิ W/B และปริมาณการแทนที่ในลักษณะเชิงเส้น $y=a+bx_1+cx_2+dx_3$ เมื่อ y =กำลังอัดของคอนกรีตควบคุมจากการบ่มเร่ง x_1 =อุณหภูมิ และ x_2 = W/B x_3 =

ปริมาณการแทนที่เป็นร้อยละดังสมการในตารางที่ 4.3.2.5 ทั้งนี้ค่าP ของสัมประสิทธิ์ทั้งสามปัจจัยมีค่าต่ำมากและมีค่า R^2 โดยรวม 0.88-0.91 ซึ่งแสดงว่าทั้งสามปัจจัยมีความสัมพันธ์กับกำลังอัดจากการบ่มแรงอย่างชัดเจน



ภาพที่ 4.3 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพจากการยึดเวลาการบ่มแรงทันทีเป็น 24 ชั่วโมงและปริมาณการแทนที่เส้นลวดของคอนกรีตที่มีค่า w/b ต่างกัน



ภาพที่ 4.3.2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกำลังอัดจากการบ่มแรงต่อกำลังอัดที่ 28 วันจากการบ่มแรงสภาวะต่างๆ และปริมาณการแทนที่เส้นลวดของคอนกรีตที่มีค่า w/b ต่างกัน