

## ผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของเพสต์ ที่ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบขาว

บุรฉัตร ฉัตรวีระ<sup>1</sup> และ ณรงค์ศักดิ์ มากุล<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต คลองหลวง ปทุมธานี 12121

รับเมื่อ 9 เมษายน 2546 ตอบรับเมื่อ 2 ตุลาคม 2546

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของเพสต์ที่ใช้ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบขาวเป็นวัสดุผงที่ได้จากโรงงานเผาอิฐมอญ โดยคุณสมบัติที่ศึกษาได้แก่ ความชันเหลวกดตี ระยะเวลาก่อตัว กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีก ตัวแปรที่ใช้คืออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (ปูนซีเมนต์หรือปูนซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบขาว) เท่ากับ 0.45 และ 0.50 การแทนที่ของเถ้าแกลบขาวในปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักที่ร้อยละ 20 และ 40 และอุณหภูมิของน้ำที่ใช้สำหรับการบ่มที่ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่า กำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของเพสต์จากซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบขาวขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการแทนที่ของเถ้าแกลบขาว โดยกำลังรับแรงของเพสต์ซึ่งทำการแทนที่เถ้าแกลบขาวในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าการแทนที่เถ้าแกลบขาวที่ร้อยละ 40 ที่ทุกอายุของการบ่ม และการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ในช่วงแรกมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ทำการบ่มเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 50 และ 75 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในขณะที่การบ่มในช่วงหลังกำลังรับแรงอัดของเพสต์บ่มที่ 75 องศาเซลเซียส ต่ำกว่ากำลังรับแรงอัดของเพสต์บ่มที่ 25 องศาเซลเซียส

<sup>1</sup> รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

<sup>2</sup> นักศึกษาปริญญาโทและผู้ช่วยวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

## Effect of Curing Temperature on Mechanical Properties of Cement Mixed with White Rice Husk Ash Paste

Burachat Chatveera<sup>1</sup> and Narongsak Makul<sup>2</sup>

Thammasat University (Rangsit Campus), Khlong Luang, Pathumthani 12121

*Received 9 April 2003 ; accepted 2 October 2003*

### Abstract

The objective of this research was to study the effect of curing temperature on the mechanical properties of cement paste mixed with White Rice Husk Ash (WRHA) from a brick factory. The tested properties were normal consistency, setting time, compressive and splitting tensile strengths. The varied water to binder materials (Portland cement type I and WRHA) ratios were 0.45 and 0.50. The replacements of WRHA for cement were 20% and 40% by weight of cementitious materials and curing water temperatures were 25, 50 and 75 degree Celsius. The test results showed that the compressive and splitting tensile strengths of cement paste mixed with WRHA depended on the percentage of WRHA replacement. The paste with 20% of WRHA replacement of cement had higher strengths than those of paste with 40% of WRHA replacement at every ages of curing and the development of the compressive strength at early age of cement paste increased when the curing temperature increased from 25 to 50 and 75 degree Celsius respectively, whereas for a longer time of curing, the compressive strength of paste cured at 75 degree Celsius was lower than that of paste cured at 25 degree Celsius.

---

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Civil Engineering.

<sup>2</sup> Graduate Student and Research Assistant, Department of Civil Engineering.

## 1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการส่งเสริมให้มีการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างรู้คุณค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด เพราะนอกจากจะมีส่วนช่วยให้ประเทศฟื้นตัวจากปัญหาทางเศรษฐกิจได้เร็วขึ้นแล้ว ยังเป็นการพัฒนาที่มีความยั่งยืน โดยเป็นที่ทราบกันดีว่าพื้นฐานของประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุที่เหลือทิ้งจากภาคการเกษตรอยู่เป็นจำนวนมาก เช่น แกลบ ฟางข้าว เป็นต้น ซึ่งงานวิจัยทั้งในและต่างประเทศได้ทำการศึกษา พบว่าวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างได้ เช่น แกลบขาวที่ผ่านกระบวนการเผาภายใต้อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสมสามารถนำมาใช้ทดแทนในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ได้ [1], [2] และปัจจุบันได้มีการนำแกลบขาวที่ได้จากการเผาอิฐมาใช้ผสมทำเป็นคอนกรีต [3],[4] ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนทำให้การผลิตคอนกรีตตั้งแต่การผสม การลำเลียง การเท และอัดแน่น แม้กระทั่งการบ่มซึ่งโดยปกติคอนกรีตจะเผชิญกับสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงอยู่แล้ว ดังนั้นการนำแกลบขาวมาใช้ในงานคอนกรีตของประเทศไทยจึงควรมีการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีต โดยเฉพาะกับคอนกรีตที่มีแกลบขาวเป็นส่วนประกอบ

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิในการบ่มที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมแกลบขาว

## 3. การทดสอบ

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

ปูนซีเมนต์ : ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

แกลบขาว : ใช้แกลบขาวที่ได้จากโรงงานเผาอิฐมอญ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นำมาบดในเครื่องบด (grinding machine) ซึ่งมีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 61 เซนติเมตร ยาว 88 เซนติเมตร และมีเหล็กเส้นกลมขนาด 9 และ 12 มิลลิเมตร ขนาดละจำนวน 45 เส้น และ ขนาด 15 มิลลิเมตรจำนวน 35 เส้น โดยใช้เวลาในการบดเท่ากับ 75 และ 120 นาที ด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 52 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 1

น้ำ : ใช้น้ำประปา



รูปที่ 1 เครื่องบดแกลบขาว

### 3.2 วิธีการทดสอบ

1. การทดสอบหาปริมาณน้ำที่ความชื้นเหลือปกติและระยะเวลาการก่อตัว ตามมาตรฐาน ASTM C 187 [5] และ ASTM C 191 [6] ตามลำดับ

2. การทดสอบกำลังรับแรงอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของเพสต์ ใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร หลังจากถอดแบบที่ระยะเวลา 1 วัน จึงนำไปบ่มในน้ำที่อุณหภูมิ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส จนถึงเวลาทดสอบที่อายุ 3, 7, 28, 60 และ 90 วัน ตามลำดับ โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกตามมาตรฐาน ASTM C 39 [7] และ ASTM C 496 [8] ตามลำดับ

การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำการบ่มในตู้อบซึ่งควบคุมอุณหภูมิที่  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 60 ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยก่อนนำตัวอย่างเข้าไปทำการบ่มให้ใส่น้ำลงในภาชนะลังกะสีที่มีขนาด  $20 \times 10 \times 8$  เซนติเมตร และตั้งทิ้งไว้ในตู้จนอุณหภูมิของน้ำมีค่าประมาณ 25 องศาเซลเซียส จึงนำตัวอย่างเข้าไปทำการบ่ม

การบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 50 และ 75 องศาเซลเซียส ทำการบ่มในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ  $50 \pm 2$  และ  $75 \pm 2$  องศาเซลเซียส ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยกระทำเช่นเดียวกับการบ่มที่อุณหภูมิ  $25 \pm 2$  องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 ตู้สำหรับใช้บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3 ตู้สำหรับใช้บ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ  $50 \pm 2$  และ  $75 \pm 2$  องศาเซลเซียส

### 3.3 สัดส่วนที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสค์

สัดส่วนของวัสดุที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของซีเมนต์เฟสค์ แสดงได้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัดส่วนของซีเมนต์เฟสค์และเฟสค์ผสมเถ้าแกลบขาวที่ไม่ผ่านและผ่านการบดที่เวลา 75 และ 120 นาที

ร้อยละการแทนที่ ของเถ้าแกลบขาว	อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุผง	สัดส่วนผสม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)		
		ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบขาว	น้ำ
0	0.45	1301	0	585
0	0.50	1222	0	611
20	0.45	1041	260	585
20	0.50	978	244	611
40	0.45	781	520	585
40	0.50	733	489	611

#### 4. ผลการทดสอบ

##### 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบขาว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบขาวแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเถ้าแกลบขาวทั้งที่ไม่ผ่านการบดและผ่านการบด ที่เวลา 75 และ 120 นาที มีปริมาณ SiO<sub>2</sub> สูงถึงร้อยละ 98.04, 96.84 และ 92.00 ตามลำดับ ในขณะที่มีองค์ประกอบอื่นในปริมาณน้อย โดยเฉพาะ CaO ที่มีปริมาณน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างเห็นได้ชัดคือ อยู่ในช่วงร้อยละ 0.57 ถึง 4.70 ในขณะที่ปูนซีเมนต์มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 65.91

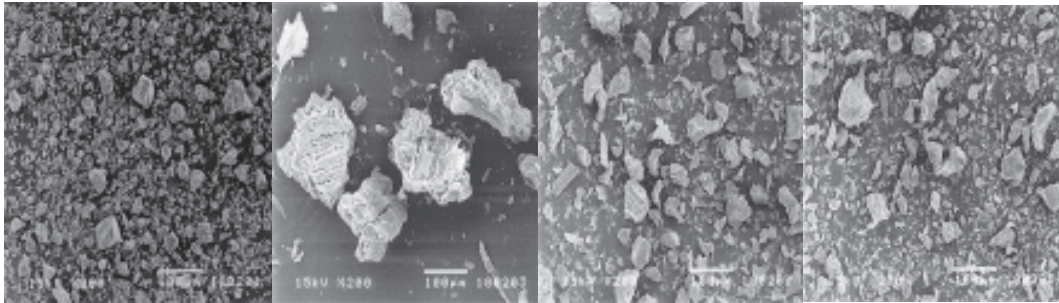
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบขาว

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	เถ้าแกลบขาว		
		ไม่บด	บด 75 นาที	บด 120 นาที
ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO <sub>2</sub> )	21.85	98.04	96.84	92.00
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.39	1.25	1.63	1.85
ไอรอนออกไซด์ (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2.10	0.24	0.53	0.68
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	65.91	1.08	0.57	4.70
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	1.16	0.37	0.49	0.46
โพแทสเซียมออกไซด์ (K <sub>2</sub> O)	0.31	1.44	2.21	1.39
ร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	1.33	4.50	4.81	4.87

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าแกลบขาว

คุณสมบัติทางกายภาพ	ปูนซีเมนต์ ปอร์ตแลนด์	เถ้าแกลบขาว		
		ไม่บด	บด 75 นาที	บด 120 นาที
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ)	0.61	3.10	1.74	2.26
ความละเอียดด้วยวิธีเบลน (ตารางเซนติเมตรต่อกรัม)	3235	4125	6635	9685
ความถ่วงจำเพาะ	3.14	2.05	2.13	2.16
ความสามารถเก็บกักน้ำ (ร้อยละ)	50	65	56	52
ความหนาแน่นรวม (bulk density) (กิโลกรัมต่อลิตร)	1.03	0.21	0.51	0.48

ในส่วนของคุณสมบัติทางกายภาพของเถ้าแกลบขาวพบว่าความละเอียดของพื้นที่ผิวจำเพาะด้วยวิธีเบรอนมีค่ามากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยเถ้าแกลบขาวชนิดที่ไม่ผ่านการบด บดที่เวลา 75 และ 120 นาที มีพื้นที่ผิวจำเพาะเท่ากับ 4125, 6635 และ 9685 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ตามลำดับ ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้ของปูนซีเมนต์มีค่าเท่ากับร้อยละ 1.33 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเถ้าแกลบขาว ในขณะที่ปริมาณความชื้นเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบขาว พบว่าปริมาณความชื้นของเถ้าแกลบขาวมีมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และจากภาพถ่ายอนุภาคของเถ้าแกลบขาวดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5 พบว่าเถ้าแกลบขาวมีโพรงอากาศจำนวนมากจึงทำให้สามารถกักเก็บความชื้นได้มากเห็นได้จากความสามารถในการเก็บกักน้ำของเถ้าแกลบขาวที่ไม่บด บด 75 และ 120 นาที มีค่าเท่ากับร้อยละ 65, 56 และ 52 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่มีค่าเท่ากับร้อยละ 50 และจากภาพถ่ายดังกล่าวสามารถอธิบายถึงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของเถ้าแกลบขาวที่มากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



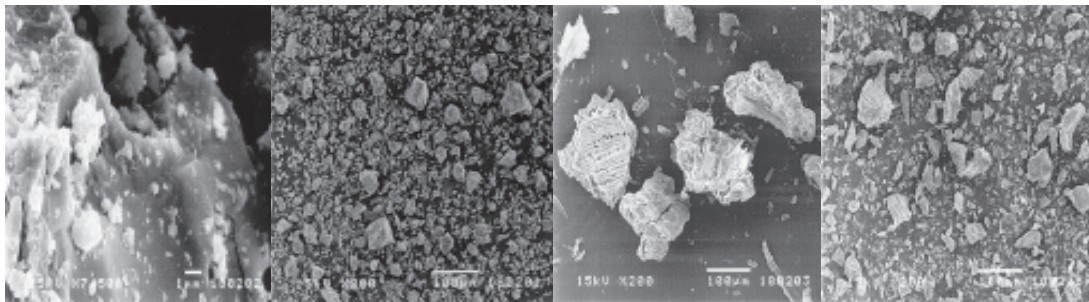
(ก)

(ข)

(ค)

(ง)

**รูปที่ 4** ภาพถ่ายอนุภาคที่กำลังขยาย 200 เท่าของ (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าแกลบขาวชนิดไม่บด (ค) เถ้าแกลบขาวชนิดบด 75 นาที (ง) เถ้าแกลบขาวชนิดบด 120 นาที



(ก)

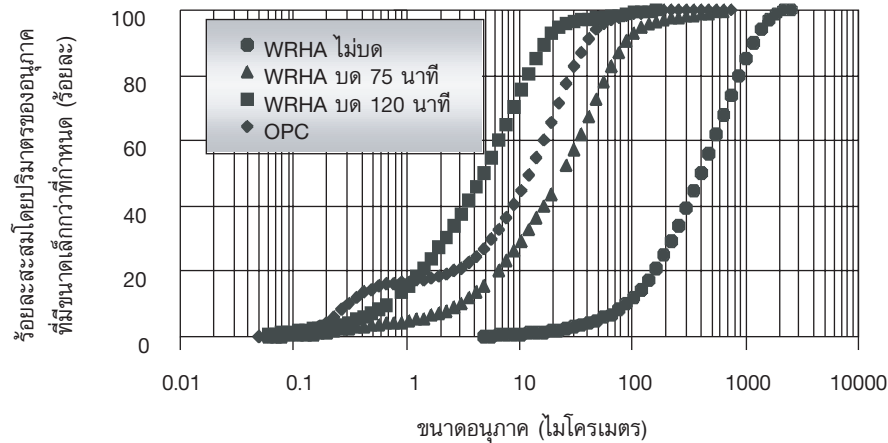
(ข)

(ค)

(ง)

**รูปที่ 5** ภาพถ่ายอนุภาคที่กำลังขยาย 7500 เท่าของ (ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (ข) เถ้าแกลบขาวชนิดไม่บด (ค) เถ้าแกลบขาวชนิดบด 75 นาที (ง) เถ้าแกลบขาวชนิดบด 120 นาที

จากการทดสอบการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในรูปที่ 6 พบว่าถ้าเม็ดกลมขาวที่ไม่ผ่านการบดและบดเป็นเวลา 75 นาที มีอนุภาคขนาดใหญ่กว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในขณะที่เมื่อทำการบดเม็ดกลมขาวเป็นเวลา 120 นาที ทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

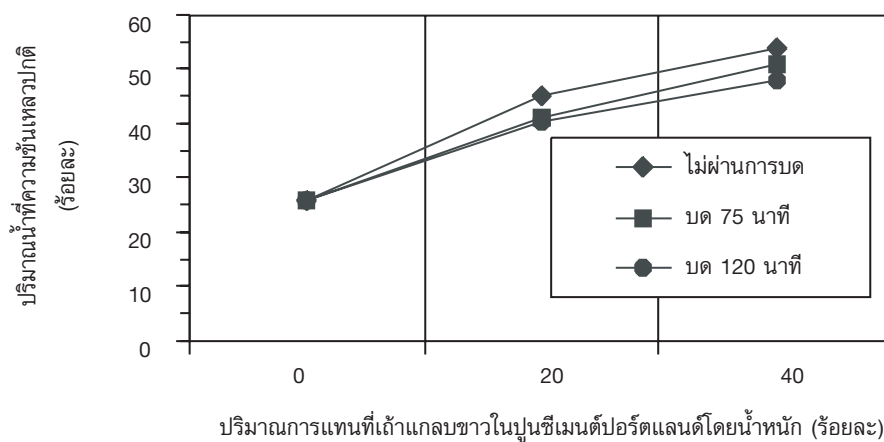


รูปที่ 6 การกระจายของขนาดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) และเม็ดกลมขาว (WRHA) ที่ไม่ผ่านและผ่านการบดที่ 75 และ 120 นาที

## 4.2 คุณสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เพสต์

### 4.2.1 ความชันเหลวปกติ

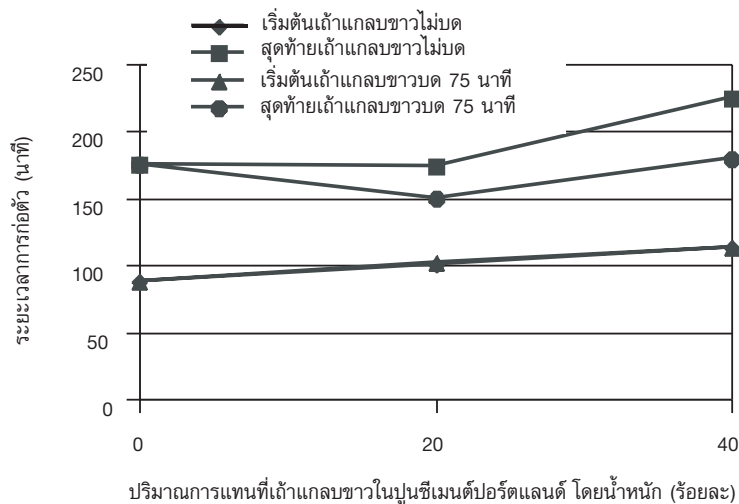
ผลการทดสอบค่าปริมาณน้ำที่ความชันเหลวปกติแสดงในรูปที่ 7 พบว่าซีเมนต์เพสต์ผสมเม็ดกลมขาวมีค่าความชันเหลวปกติมากกว่าซีเมนต์เพสต์ เนื่องจากความพรุนของอนุภาคเม็ดกลมขาวทำให้สามารถดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อทำการบดเม็ดกลมขาวให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความชันเหลวปกติลดลง ทั้งนี้เพราะการบดเม็ดกลมขาวให้ละเอียดสามารถทำลายความพรุนภายในอนุภาคได้ ดังนั้นเมื่อความพรุนลดลงจึงเป็นการลดความสามารถในการดูดซับน้ำของเม็ดกลมขาวจึงมีผลทำให้ค่าความชันเหลวปกติลดลง



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการแทนที่ของเม็ดกลมขาวกับปริมาณน้ำต่อวัสดุผงที่เหมาะสม

#### 4.2.2 ระยะเวลาการก่อตัว

ผลการทดสอบระยะเวลาการก่อตัวของเพสต์แสดงในรูปที่ 8 พบว่าซีเมนต์เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 90 นาที ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเท่ากับ 180 นาที ในขณะที่เพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวมีระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นยาวนานกว่าซีเมนต์เพสต์ กล่าวคือเมื่อมีการแทนที่เถ้าแกลบขาวไม่บดที่ร้อยละ 20 มีค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นเท่ากับ 120 นาที เนื่องจากหลังจากสิ้นสุดช่วงดอร์แมนท์ (Dormant Period) ซึ่งกำลังเข้าสู่จุดก่อตัวเริ่มต้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่เกาะอนุภาคปูนซีเมนต์จะแตกตัวเพื่อทำปฏิกิริยามีปริมาณที่น้อยกว่าทำให้ใช้เวลาในการก่อตัวเริ่มต้นนานขึ้น เมื่อพิจารณาผลของความละเอียดของเถ้าแกลบขาวที่มีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวเถ้าแกลบขาวยังไม่สามารถทำปฏิกิริยา ประกอบกับการแทนที่เถ้าแกลบขาวในปูนซีเมนต์ที่ปริมาณเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ลดปริมาณปูนซีเมนต์ที่ทำปฏิกิริยาในช่วงแรก ในขณะที่ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายของเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวที่มีความละเอียดมากขึ้นมีผลให้ระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายเร็วขึ้น ส่วนผลของการแทนที่เถ้าแกลบขาวในร้อยละที่มากขึ้น ทำให้เพสต์มีระยะเวลาการก่อตัวสุดท้ายนานขึ้น เนื่องจากการแทนที่เถ้าแกลบขาวมากขึ้นทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ลดลงเป็นเหตุให้การก่อตัวสุดท้ายนานขึ้น



รูปที่ 8 ระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้นและสุดท้ายของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาว

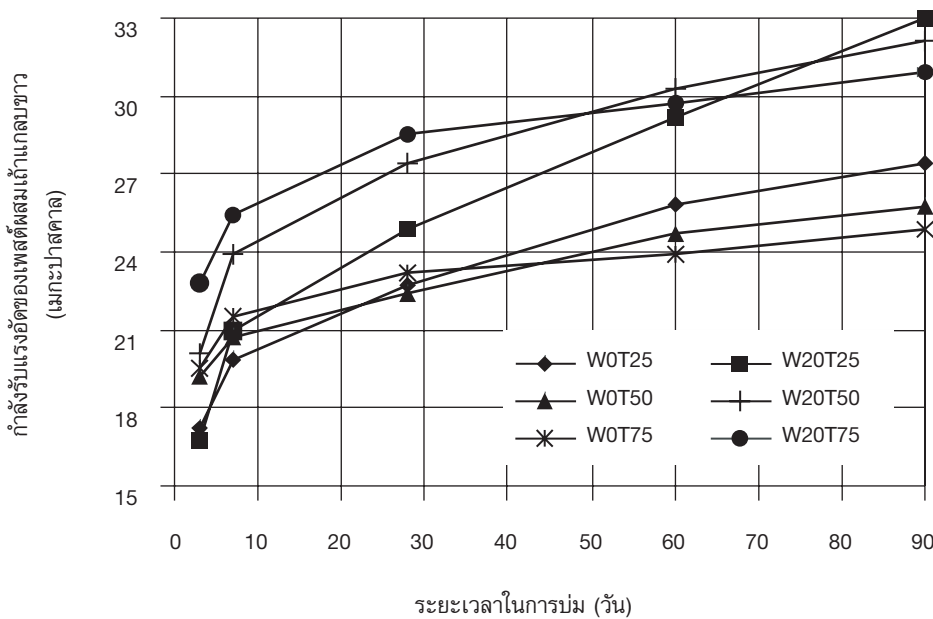
#### 4.2.3 กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบขาว

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาในการบ่มของเพสต์ที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.45 ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่าที่อุณหภูมิของการบ่มเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส การแทนที่เถ้าแกลบขาวที่ไม่ผ่านการบดในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก (การแทนที่เถ้าแกลบขาวที่ร้อยละ 40 ไม่สามารถผสมเป็นเพสต์ได้เนื่องจากการดูดซับน้ำของเถ้าแกลบขาวมีมากกว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงที่ใช้หรือดูได้จากค่าความชื้นเหลวปกติในรูปที่ 7) ทำให้กำลังรับแรงอัดในช่วงต้นมีค่าเพิ่มขึ้นและสูงกว่าซีเมนต์เพสต์ที่อายุ 3 วัน ทั้งนี้เพราะการแทนที่เถ้าแกลบขาวซึ่งมีซิลิโคนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $\text{C-S-H}$ ) ได้เพิ่มขึ้นจึงส่งผลให้เพสต์มีความแข็งแรงสูงทำให้กำลังรับแรงสูงขึ้น และจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการบ่มเป็น 50 และ 75 องศาเซลเซียส



จะเป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่จะทำปฏิกิริยาปอซโซลานกับเถ้าแกลบขาวเพิ่มขึ้น ผลก็คือจะได้เพสต์ที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นตามลำดับ

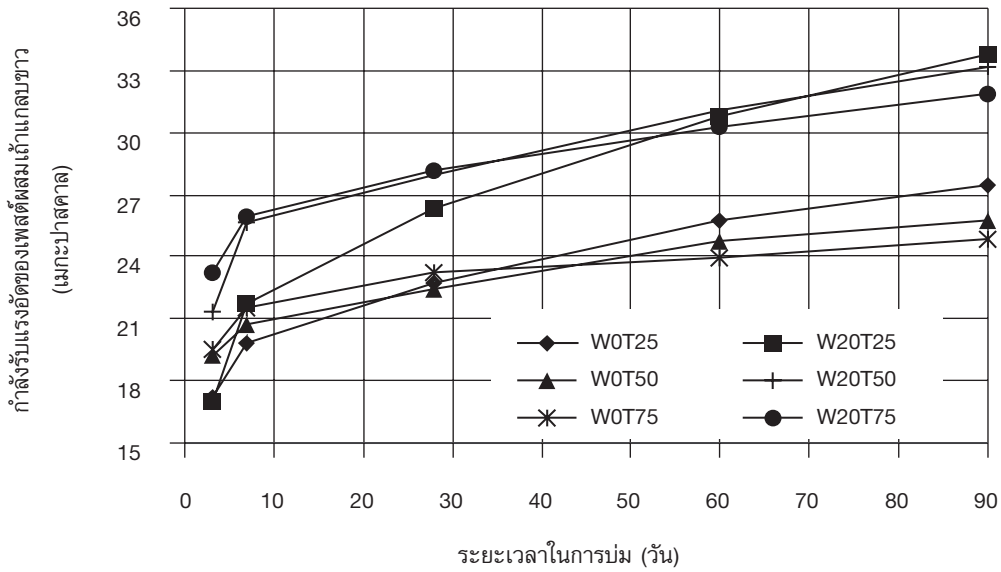
จากรูปดังกล่าวข้างต้นได้แสดงให้เห็นว่ากำลังรับแรงอัดในช่วงหลังของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวซึ่งบ่มที่อุณหภูมิ 50 และ 75 องศาเซลเซียส มีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส อันเนื่องมาจากผลของอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดรอยแตกขนาดเล็กหรือที่เรียกว่า Micro Crack ในเนื้อเพสต์ ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดที่ลดลงตามลำดับ [9], [10]



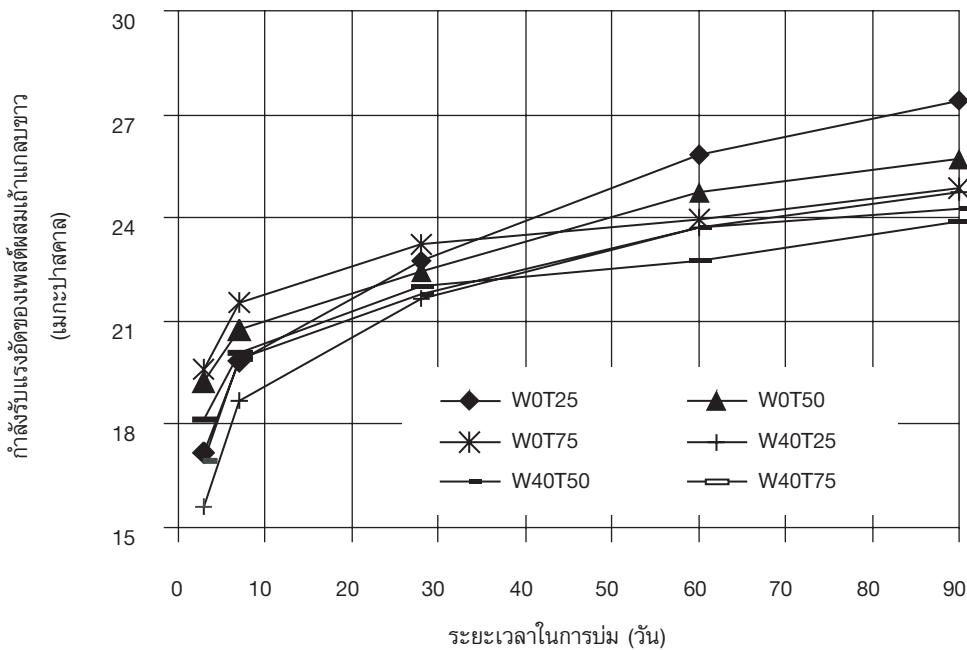
**รูปที่ 9** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวที่ไม่ผ่านการบดกับระยะเวลาในการบ่ม โดยมีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.45 และการแทนที่ของเถ้าแกลบขาวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก

**หมายเหตุ :** WXTY คือร้อยละการแทนที่ของเถ้าแกลบขาว (W) ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เท่ากับ X โดยน้ำหนัก และใช้อุณหภูมิในการบ่ม (T) เท่ากับ Y

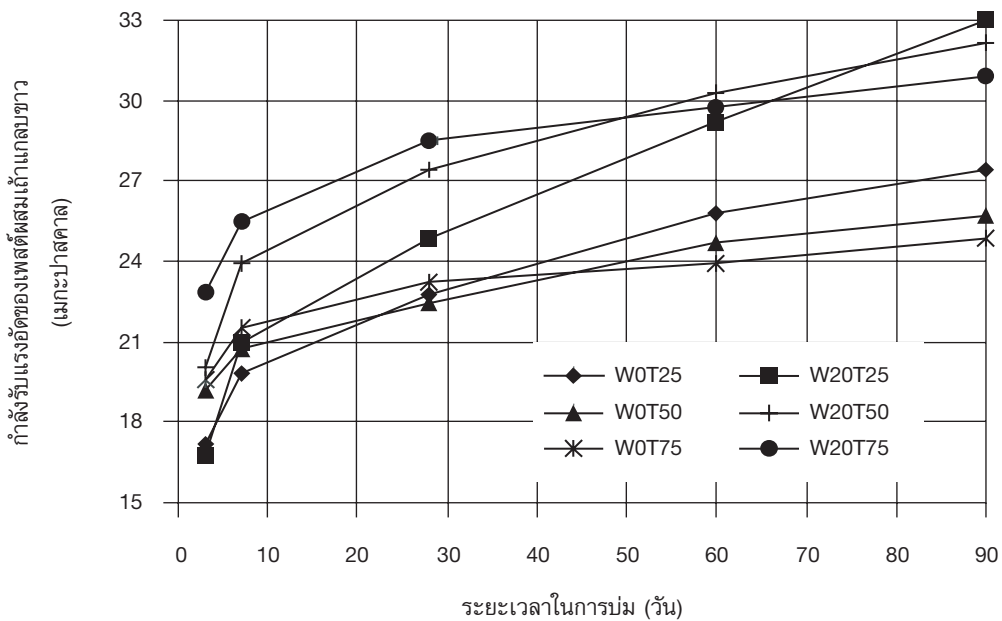
ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดกับระยะเวลาในการบ่มของเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวบด 75 นาที่ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.45 แสดงในรูปที่ 10 และ 11 และเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวไม่ผ่านการบดและบด 75 นาที่ ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผงเท่ากับ 0.50 แสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดที่ได้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวไม่บด แต่เพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวบด 75 นาที่ จะมีค่าสูงกว่า อันเนื่องมาจากความละเอียดของเถ้าแกลบขาวที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานเพิ่มขึ้น



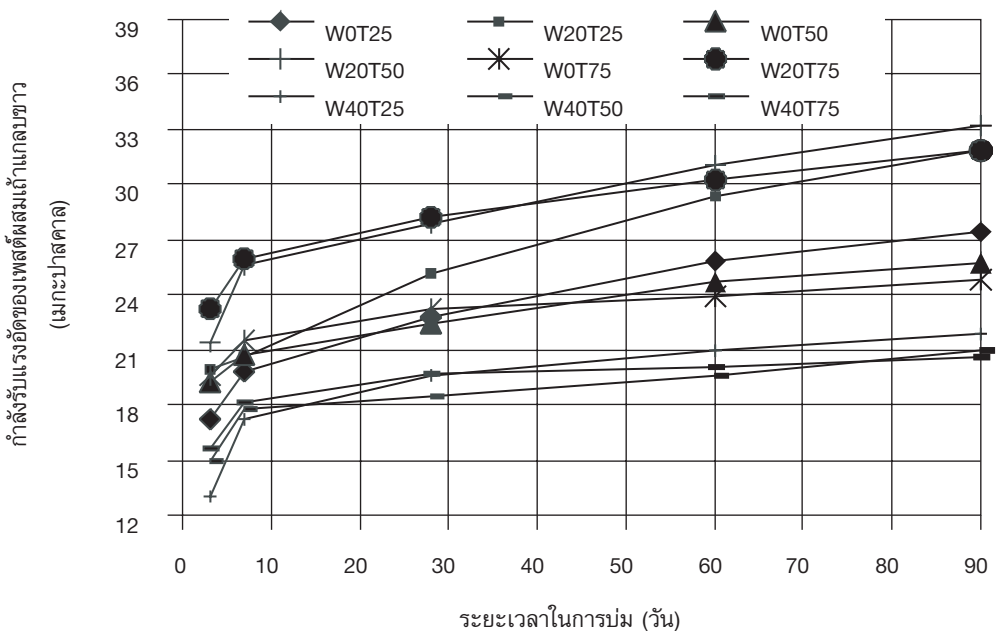
**รูปที่ 10** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของเพสต์ผสมเถ้ากลบขาวที่ผ่านการบด 75 นาที่ กับระยะเวลาในการบ่ม โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.45 และมีการแทนที่เถ้ากลบขาวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



**รูปที่ 11** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของเพสต์ผสมเถ้ากลบขาวที่ผ่านการบด 75 นาที่ กับระยะเวลาในการบ่ม โดยที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.45 และมีการแทนที่เถ้ากลบขาวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 เท่ากับร้อยละ 40 โดยน้ำหนัก



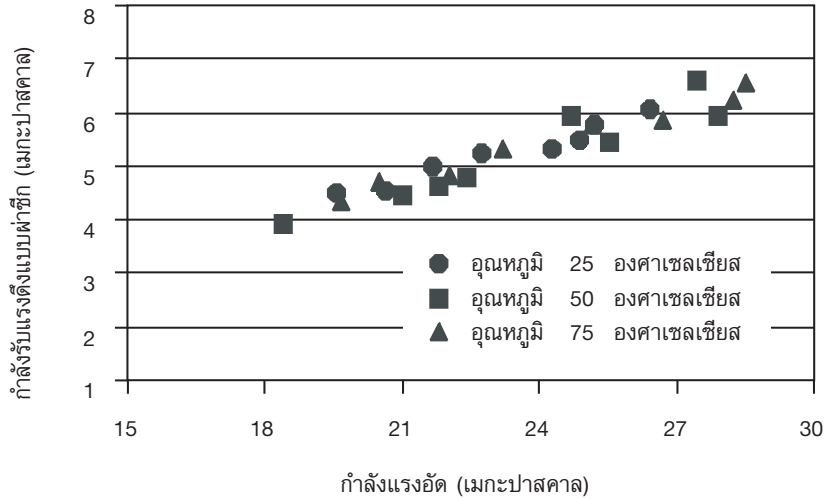
**รูปที่ 12** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของเพสตีผสมเถ้าแกลบขาวไม่บดกับระยะเวลาในการบ่มโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.50 และการแทนที่เถ้าแกลบขาว เท่ากับร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก



**รูปที่ 13** ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของเพสตีผสมเถ้าแกลบขาวที่ผ่านการบด 75 นาที กับระยะเวลาในการบ่มโดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุผง (w/b) เท่ากับ 0.50 และมีการแทนที่เถ้าแกลบขาวในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เท่ากับร้อยละ 20 และ 40 โดยน้ำหนัก

#### 4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของเพสต์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบขาว

จากความสัมพันธ์พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ทำการบ่มไม่มีผลกระทบต่อความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของซีเมนต์เพสต์ผสมเถ้าแกลบขาว ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของกำลังรับแรงอัดและแรงดึงแบบผ่าซีกของเพสต์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบขาว

## 5. สรุปผลการวิจัย

1. เพสต์ที่มีการแทนที่เถ้าแกลบขาวในปูนซีเมนต์ร้อยละ 20 และใช้อุณหภูมิในการบ่มเท่ากับ 25, 50 และ 75 องศาเซลเซียส จะมีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงกว่าซีเมนต์เพสต์
2. กำลังรับแรงอัดของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ที่ผสมเถ้าแกลบขาวในช่วงต้นสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่กำลังรับแรงอัดในช่วงหลังของซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวที่ผ่านการบ่มที่ 75 องศาเซลเซียส มีค่าต่ำกว่าซีเมนต์เพสต์และเพสต์ผสมเถ้าแกลบขาวที่ผ่านการบ่มที่ 25 องศาเซลเซียส

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนใคร่ขอขอบคุณ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์การทดสอบคุณสมบัติของเถ้าแกลบขาว งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. บุรฉัตร ฉัตรวีระ และพิชัย นิมิตยงสกุล, ปอร์ตแลนด์ซีเมนต์ผสมเถ้าแกลบ เถ้าลอย และสารลดน้ำ, 2537, วารสารเทคโนโลยีสุรนารี.
2. Mehta, P.K., 1977, "Properties of Blended Cements Made from RHA", *ACI Materials Journal*, Vol. 74, No. 9, September
3. สาโรจน์ ดำรงค์สีล, 2541, *แบบจำลองในการทำนายกำลังรับน้ำหนักของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ*, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต.
4. อนุวรรตน์ ไคววารินทร์, 2542, *การพัฒนาคอนกรีตความร้อนต่ำโดยใช้เถ้าแกลบ*, วิทยานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยรังสิต.
5. American Society for Testing and Material, 1994. "ASTM C 187 Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.01*, Philadelphia, PA, USA.
6. American Society for Testing and Material, 1994, "ASTM C 191 Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.01*, Philadelphia, PA, USA.,
7. American Society for Testing and Material, 1994, "ASTM C 39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02*, Philadelphia, PA, USA.
8. American Society for Testing and Material, 1994, "ASTM C 496 Standard Test Method for Splitting Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Annual Book of ASTM Standard Vol 4.02*, Philadelphia, PA, USA.
9. Fadhli Al N.A., 1990, "The Influence of Temperature and Time on Fresh Concrete and on the Latent Properties of Hardened Concrete, Properties of Fresh Concrete", *RILEM Proc.*
10. Neville A.M., 1995, *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Pitman Books Limited, London, England.