



การทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ฉลอง ปะลาชิตัง

พหุฯ ปณฺทิต ธิเว

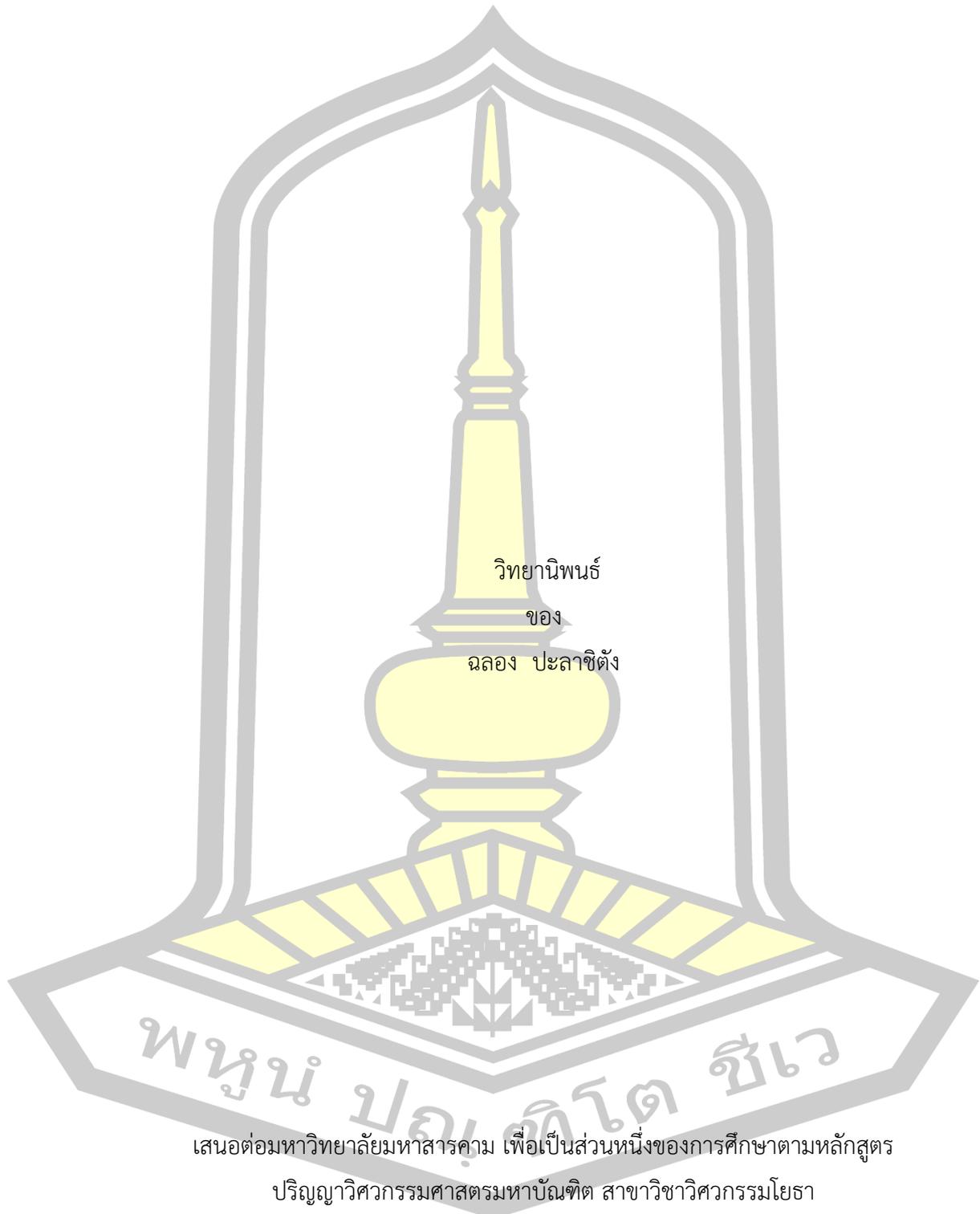
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2560

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้ากลบ



วิทยานิพนธ์

ของ

ฉลอง ปะลาชิตัง

พูนุ่ ปญุ่ติโต ชีเว

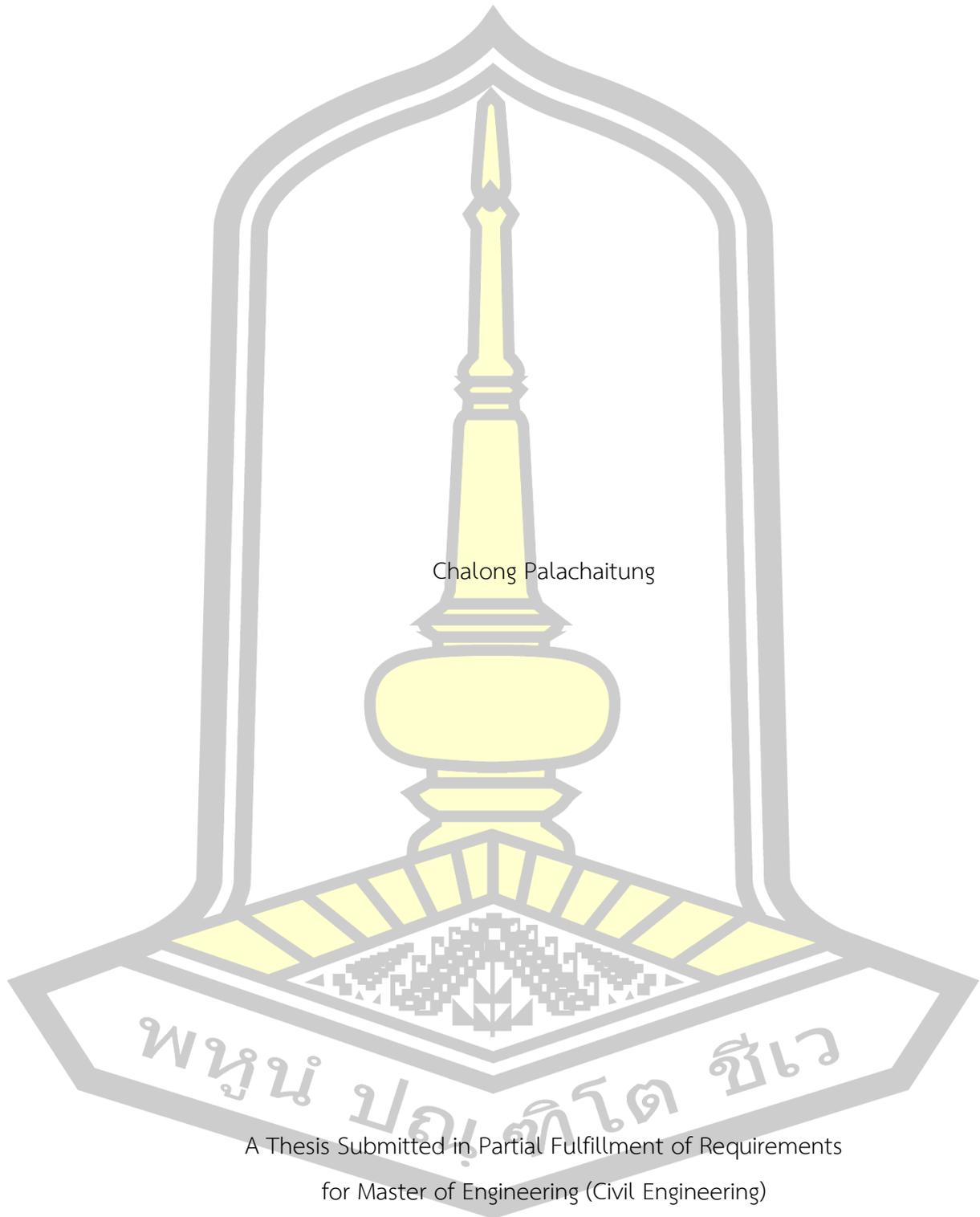
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2560

สงวนลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Fire resistance of concrete containing rice husk ash



Chalong Palachaitung

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Engineering (Civil Engineering)

Academic Year 2017

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายฉลอง ปะลาชิดัง แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. วันชัย สะตะ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผศ. ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สหलग หอมวุฒิวังค์ )

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(รศ. ดร. อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วัน.....เดือน.....ปี.....

ชื่อเรื่อง	การทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบ		
ผู้วิจัย	ฉลอง ปะลาชิตัง		
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เรืองรุชดี ชีระโรจน์		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีการศึกษา	2560

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติการทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดที่อุณหภูมิต่างๆ โดยออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 300 500 และ 700 กก./ $\text{cm}^2$  จากนั้นนำเถ้าแกลบบดละเอียดให้มีขนาดอนุภาคข้างบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เพื่อใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน หล่อตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 x 0.20 เมตร บ่มที่อายุ 90 วัน จากนั้นทำการทดสอบกำลังอัดก่อนและหลังการเผา ที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ ทำการหล่อตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20x0.20x0.80 เมตร บ่มเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นระยะเวลา 90 วัน ทดสอบกำลังประลัยของเสาก่อนและหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

จากผลการทดสอบพบว่า การใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 โดยน้ำหนัก สามารถช่วยพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตที่อายุ 90 วัน สูงกว่าคอนกรีตควบคุมได้ร้อยละ 106 ถึง 111 การใช้อัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย โดยอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักจะให้กำลังอัดสูงสุดสำหรับคอนกรีตก่อนการเผา ส่วนคอนกรีตหลังการเผาพบว่า อัตราส่วนการแทนที่ที่เหมาะสมสำหรับการทนไฟ คือ อัตราการแทนที่ร้อยละ 20 โดยมีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุมร้อยละ 15 ถึง 20 ซึ่งผลสอดคล้องกับการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าเถ้าแกลบบดละเอียดสามารถเพิ่มความสามารถการทนไฟของคอนกรีตได้

คำสำคัญ : การทนไฟ, กำลังอัด, เถ้าแกลบ

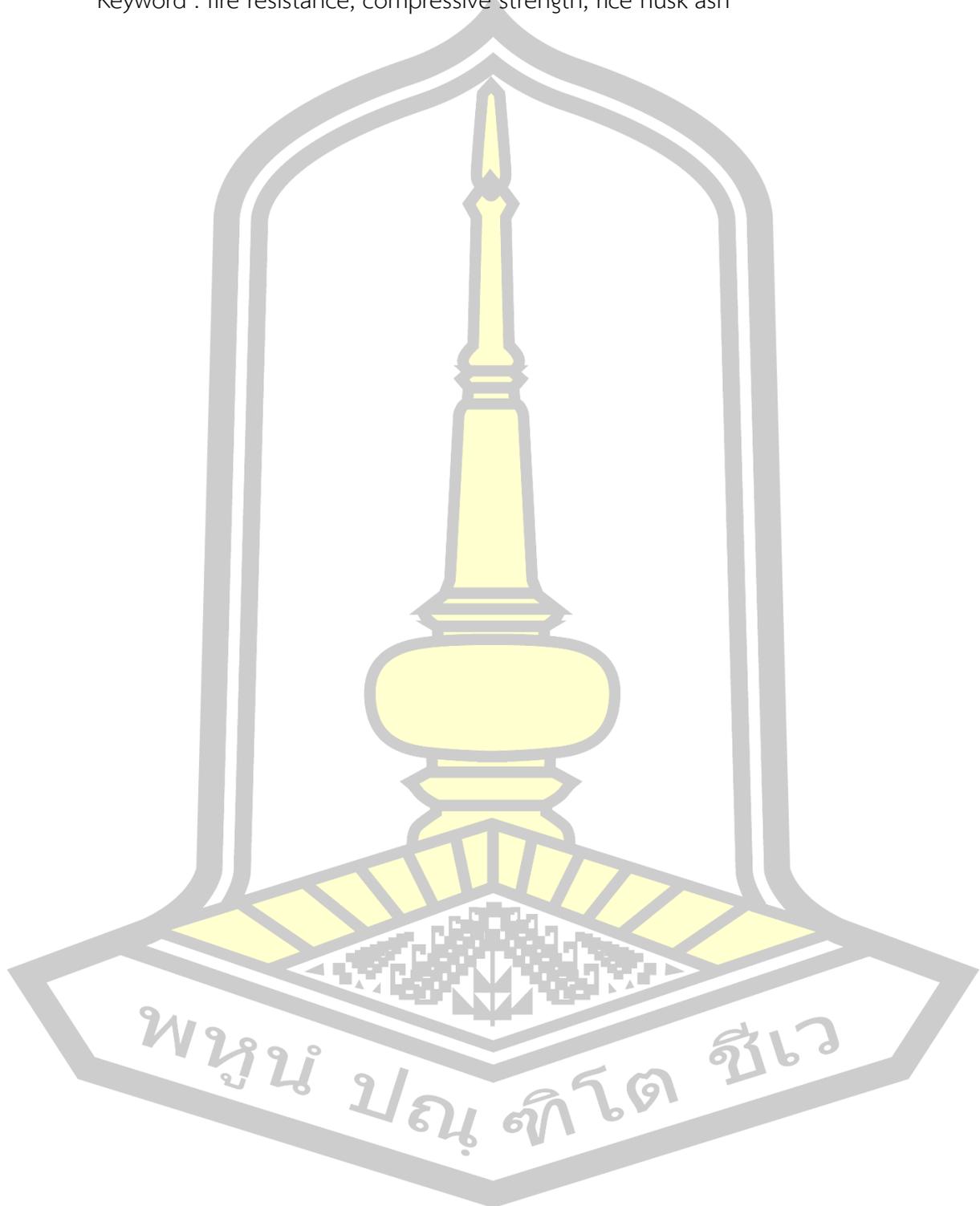
**TITLE** Fire resistance of concrete containing rice husk ash  
**AUTHOR** Chalong Palachaitung  
**ADVISORS** Assistant Professor Raungrut Cheerarot , Ph.D.  
**DEGREE** Master of Engineering **MAJOR** Civil Engineering  
**UNIVERSITY** Mahasarakham **YEAR** 2017  
University

### ABSTRACT

This research was to study the properties of fire resistance of concrete with containing ground rice husk ash at different temperatures. Designed compressive strength of control concrete at 28 days was 300, 500 and 700 kg/cm<sup>2</sup>. Rice husk ash was ground until the particles retaining on sieve No. 325 less than 5% by weight. Portland cement type I was replaced by ground rice husk ash at 0, 10, 20 and 30% by weight. The cylindrical concrete were cast and cured at 90 days and then compressive strength of concrete were tested before and after burning at 200, 400, 600 and 800 °C for 1, 2, 3 and 4-hour, respectively. Reinforced concrete columns were cast at size of 0.20x0.20x0.80 m and were cured at 90 days to test the compressive strength before and after burning at 600 °C for 2 hours.

From the experimental result, it showed that the use of ground rice husk ash at 10 and 20% could improve the compressive strength of concrete at 90 days higher than that of control concrete between 106 to 111% while the use of 30% slightly reduced than that one. The optimum usage of ground rice husk ash for the highest compressive strength of concrete before burning was 10%. For fire resistance, the optimum usage was 20% of replacement which it provided the compressive strength higher than the control concretes about 15 to 20% and it had the same trend of the reinforced concrete columns containing ground rice husk ash. From the result, it can be concluded that ground rice husk ash can increase the fire of reinforced concrete.

Keyword : fire resistance, compressive strength, rice husk ash



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เรืองรุชดี ชีระโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ชี้แนวทางในการศึกษาวิจัย ให้ข้อคิด คำแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่อง และดูแลเอาใจใส่ในทุกๆด้าน ตลอดงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย สะตะ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหลาภ หอมวุฒิวงศ์ กรรมการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ ชัยมูล กรรมการสอบ ที่กรุณาสละเวลาให้ พร้อมทั้งข้อแนะนำอันเป็นประโยชน์ ผู้วิจัยรู้สึกเป็นเกียรติอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณและนิตินิพนธ์ญาโท-เอก ในห้องวิจัยคอนกรีตทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในด้านต่างๆ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ พี่น้องทุกคน ที่อดทนเสียสละ แรงเงิน แรงกาย แรงใจ และขอขอบพระคุณ คุณวิไลลักษณ์ เซ็นนิค์ ที่คอยให้การช่วยเหลือสนับสนุนและเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ในครั้งนี้สำเร็จ

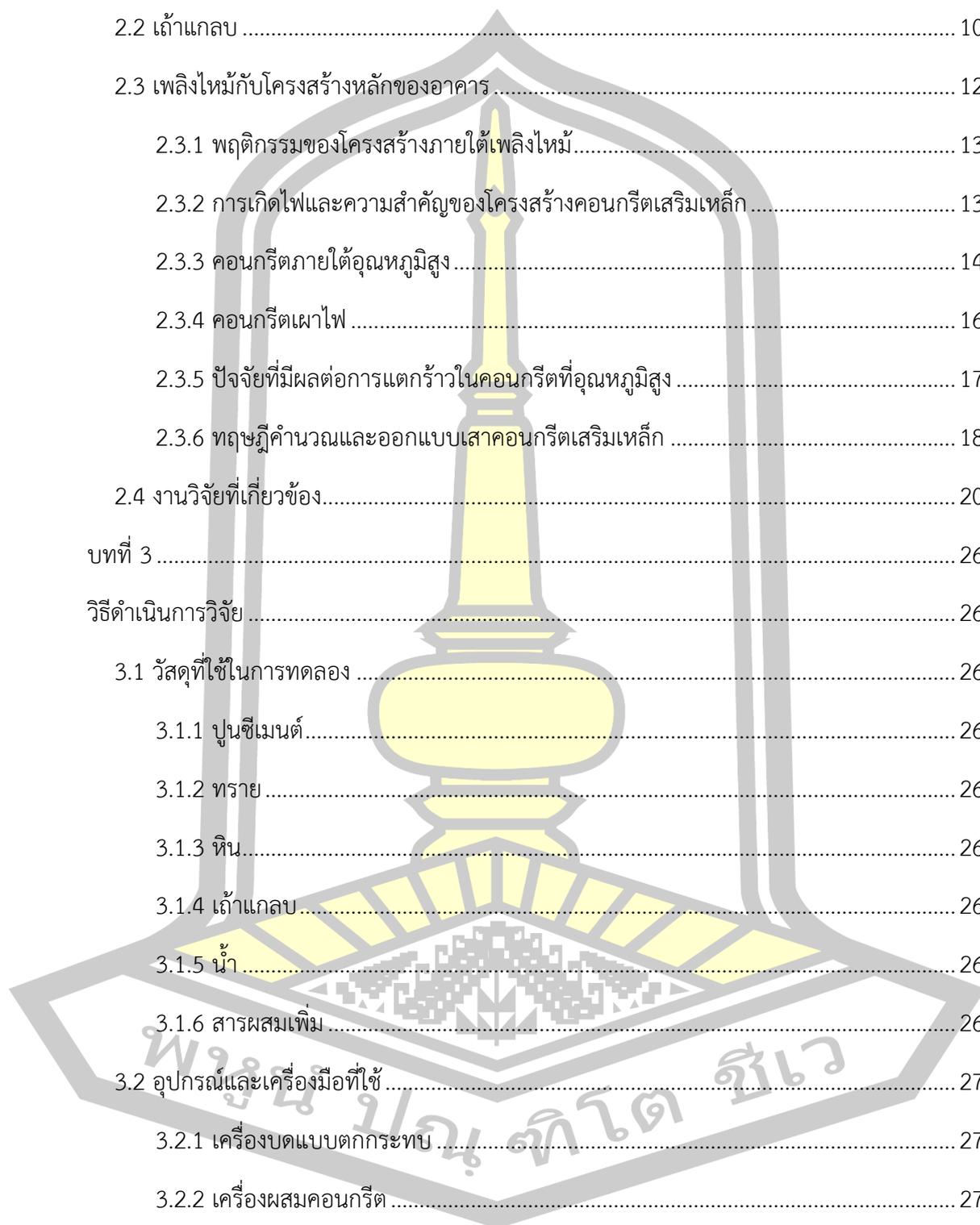
ฉลอง ปะลาชิตัง

พูนุ่ ปณุ่ ทิโต ชีเว

## สารบัญ

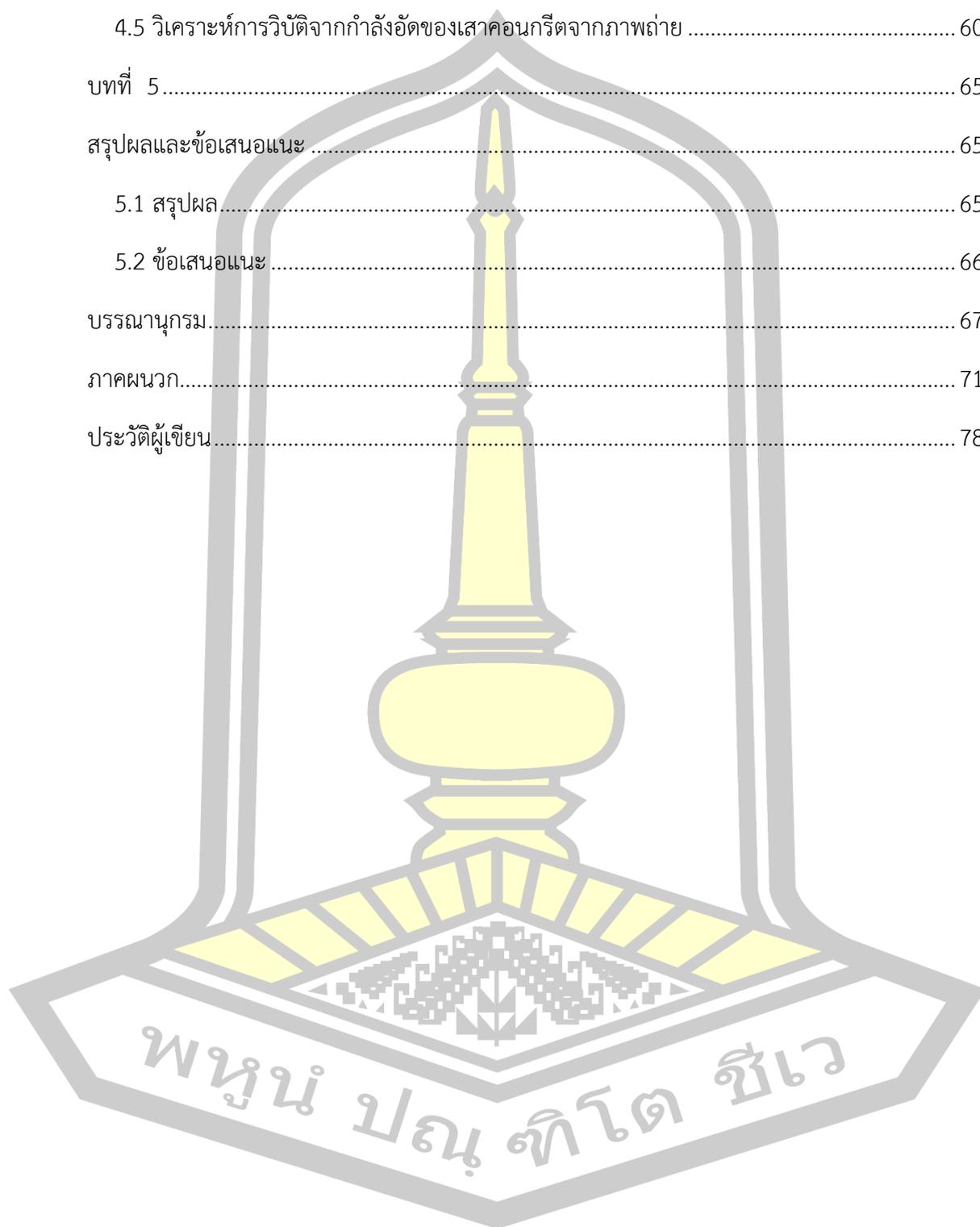
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
บัญชีตาราง.....	ฅ
บัญชีภาพประกอบ.....	ฐ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.2.1 เพื่อศึกษาการทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่อุณหภูมิต่างๆต่อกำลังอัดของ คอนกรีต.....	3
1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าแกลบในคอนกรีตที่มีผลต่อการทนไฟเมื่อออกแบบกำลังอัด ต่างกัน.....	3
1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทนไฟของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเถ้าแกลบเมื่อ การแทนที่ และออกแบบกำลังอัดที่ต่างกัน.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	5
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลาน.....	5
2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
2.1.2 วัสดุปอซโซลาน.....	8

2.1.3 ปฏิบัติการปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน.....	9
2.2 เถ้าแกลบ .....	10
2.3 เพลิงไหม้กับโครงสร้างหลักของอาคาร.....	12
2.3.1 พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้เพลิงไหม้.....	13
2.3.2 การเกิดไฟและความสำคัญของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	13
2.3.3 คอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง .....	14
2.3.4 คอนกรีตเผาไฟ .....	16
2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกร้าวในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง .....	17
2.3.6 ทฤษฎีคำนวณและออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก .....	18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 .....	26
วิธีดำเนินการวิจัย .....	26
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง .....	26
3.1.1 ปูนซีเมนต์.....	26
3.1.2 ทราย.....	26
3.1.3 หิน.....	26
3.1.4 เถ้าแกลบ.....	26
3.1.5 น้ำ.....	26
3.1.6 สารผสมเพิ่ม .....	26
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ .....	27
3.2.1 เครื่องบดแบบตกระทาบ .....	27
3.2.2 เครื่องผสมคอนกรีต.....	27
3.2.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด.....	27
3.2.4 ชุดทดสอบหาค่ายุบตัว.....	27



3.2.5	เตาเผาอุณหภูมิสูง.....	27
3.2.6	ชุดทดลองหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์.....	27
3.2.7	ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน.....	27
3.2.8	แบบหล่อคอนกรีต.....	27
3.2.9	เครื่องวัดอุณหภูมิ.....	27
3.2.10	เครื่องชั่งน้ำหนัก.....	27
3.2.11	เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope, SEM).....	27
3.2.12	เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence, XRF).....	27
3.3	ขั้นตอนการทดสอบ.....	27
3.3.1	การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของวัสดุ.....	27
3.3.2	การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต.....	28
3.3.3	การทดสอบคอนกรีต.....	30
บทที่ 4	.....	34
	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์.....	34
4.1	สมบัติของวัสดุ.....	34
4.1.1	องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้ากลบ.....	34
4.1.2	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้ากลบ.....	35
4.1.3	การกระจายขนาดคละของทรายและหิน.....	36
4.1.4	ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของทราย.....	37
4.1.5	ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมของหิน.....	37
4.1.6	หน่วยน้ำหนักและช่องว่างของหิน.....	37
4.1.7	ความละเอียดของอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้ากลบบดละเอียด.....	37
4.2	การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้ากลบบดละเอียด.....	37
4.3	กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกก่อนและหลังการเผา.....	39

4.4 การทดสอบกำลังอัดของเสาคอนกรีต.....	56
4.5 วิเคราะห์การวิบัติจากกำลังอัดของเสาคอนกรีตจากภาพถ่าย .....	60
บทที่ 5.....	65
สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	65
5.1 สรุปผล.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	66
บรรณานุกรม.....	67
ภาคผนวก.....	71
ประวัติผู้เขียน.....	78



## บัญชีตาราง

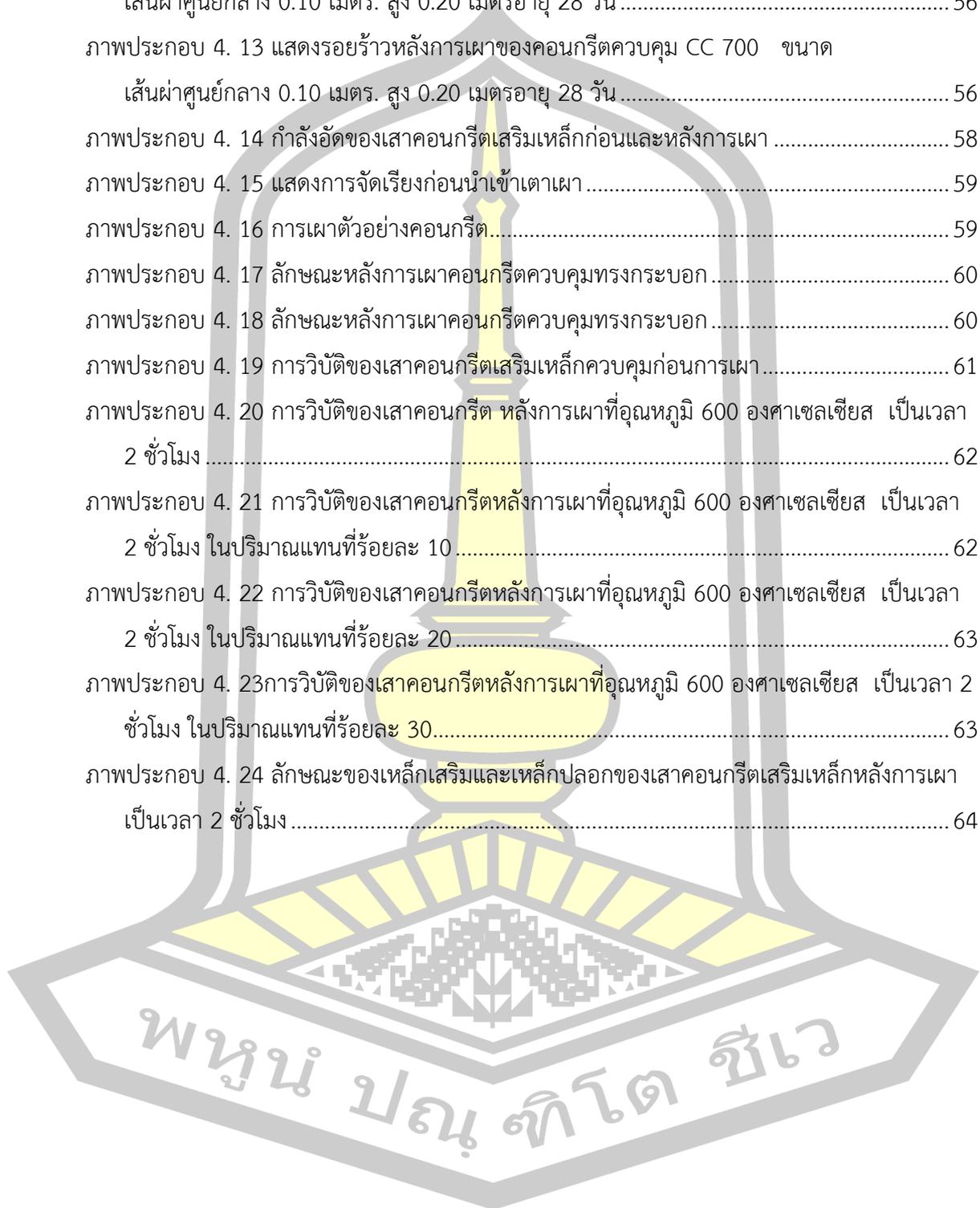
ตาราง 2. 1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	7
ตาราง 3. 1 ส่วนผสมของคอนกรีต.....	29
ตาราง 3. 2 การคำนวณกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	32
ตาราง 4. 1 องค์ประกอบทางเคมีของเก้าอี้และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	35
ตาราง 4. 2 กำลังอัดของคอนกรีตก่อนและหลังเผา.....	38
ตาราง 4. 3 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก CC 300 ก่อนและหลังเผา.....	40
ตาราง 4. 4 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก CC 500 ก่อนและหลังเผา.....	46
ตาราง 4. 5 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก CC 700 ก่อนและหลังเผา.....	51
ตาราง 4. 6 กำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	57
ตารางภาคผนวก 1 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรงมาตรฐาน.....	72
ตารางภาคผนวก 2 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรงมาตรฐาน.....	73
ตารางภาคผนวก 3 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมละเอียด (ทราย).....	74
ตารางภาคผนวก 4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึ่มของมวลรวมหยาบ (หิน).....	75
ตารางภาคผนวก 5 หน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ (หิน).....	76
ตารางภาคผนวก 6 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน.....	77
ตารางภาคผนวก 7 กำลังอัดของคอนกรีต คิวคึม.....	77

พูน ปณ ทิโต ชีเว

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ 2. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างไฟและเวลาของการลุกไหม้ .....	13
ภาพประกอบ 2. 2 ความสัมพันธ์ที่ลดลงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส .....	15
ภาพประกอบ 2. 3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลา .....	15
ภาพประกอบ 2. 4 รอยแตกร้าวขนาดเล็กในคอนกรีตบริเวณรอยต่อของมวลรวมและซีเมนต์เพสต์	16
ภาพประกอบ 2. 5 กราฟแสดงความเค้น ความเครียด .....	17
ภาพประกอบ 2. 6 สัดส่วนกำลังอัดและพลังงานการแตกร้าวจากอุณหภูมิ .....	17
ภาพประกอบ 2. 7 เสาสันรับน้ำหนักตามแนวแกน .....	18
ภาพประกอบ 2. 8 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและหน่วยการยืดหด .....	19
ภาพประกอบ 2. 9 ลักษณะของมอร์ตาร์สัมผัสกับไฟ ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 200 400 600 800 1,000 และ 1,200 องศาเซลเซียส .....	20
ภาพประกอบ 2. 10 เปรียบเทียบการหลุดร่อนในเสาคอนกรีตปกติ (NSC) และเสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC) หลังจากการทดสอบความต้านทานไฟ .....	21
ภาพประกอบ 3. 1 กราฟเวลาการไต่อุณหภูมิในเตาเผาสอดคล้องกับตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM E119 .....	31
ภาพประกอบ 3. 2 แผนภูมิการผสมคอนกรีตผสมเถ้าแกลบและการทดสอบกำลังอัด .....	33
ภาพประกอบ 4. 1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า .....	35
ภาพประกอบ 4. 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงอนุภาคเถ้าแกลบ กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า .....	36
ภาพประกอบ 4. 3 การกระจายขนาดคละของทราย .....	36
ภาพประกอบ 4. 4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและชนิดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน .....	39
ภาพประกอบ 4. 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาในการเผา .....	43
ภาพประกอบ 4. 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผา .....	45
ภาพประกอบ 4. 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาในการเผา .....	48
ภาพประกอบ 4. 8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผา .....	50
ภาพประกอบ 4. 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาในการเผา .....	53
ภาพประกอบ 4. 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผา .....	55
ภาพประกอบ 4. 11 แสดงรอยร้าวหลังการเผาของคอนกรีตควบคุม CC 300 ขนาด 0.10 เมตร. สูง 0.20 เมตรอายุ 28 วัน .....	55

ภาพประกอบ 4. 12 แสดงรอยร้าวหลังการเผาของคอนกรีตควบคุม CC 500 ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10 เมตร. สูง 0.20 เมตรอายุ 28 วัน.....	56
ภาพประกอบ 4. 13 แสดงรอยร้าวหลังการเผาของคอนกรีตควบคุม CC 700 ขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10 เมตร. สูง 0.20 เมตรอายุ 28 วัน.....	56
ภาพประกอบ 4. 14 กำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนและหลังการเผา.....	58
ภาพประกอบ 4. 15 แสดงการจัดเรียงก่อนนำเข้าเตาเผา.....	59
ภาพประกอบ 4. 16 การเผาตัวอย่างคอนกรีต.....	59
ภาพประกอบ 4. 17 ลักษณะหลังการเผาของคอนกรีตควบคุมทรงกระบอก.....	60
ภาพประกอบ 4. 18 ลักษณะหลังการเผาของคอนกรีตควบคุมทรงกระบอก.....	60
ภาพประกอบ 4. 19 การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุมก่อนการเผา.....	61
ภาพประกอบ 4. 20 การวิบัติของเสาคอนกรีต หลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	62
ภาพประกอบ 4. 21 การวิบัติของเสาคอนกรีตหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณแทนที่ร้อยละ 10.....	62
ภาพประกอบ 4. 22 การวิบัติของเสาคอนกรีตหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณแทนที่ร้อยละ 20.....	63
ภาพประกอบ 4. 23 การวิบัติของเสาคอนกรีตหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณแทนที่ร้อยละ 30.....	63
ภาพประกอบ 4. 24 ลักษณะของเหล็กเสริมและเหล็กปลอกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการเผา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง.....	64



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

สมบัติการทนไฟของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก นับเป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งสำหรับความปลอดภัยของการใช้งาน เนื่องจากเมื่อเกิดเพลิงไหม้กับอาคาร ผู้ที่อยู่ในอาคารจำเป็นต้องมีระยะเวลาหนึ่งที่ใช้ในการหนีภัยหรือมีระยะเวลาเพียงพอสำหรับนักผจญเพลิงให้ความช่วยเหลือ และหลังเพลิงสงบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอาจได้รับความเสียหาย แม้ว่าโครงสร้างยังไม่วิบัติ แต่ความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างอาจเปลี่ยนแปลงไป เพราะหลังจากถูกเพลิงไหม้แล้วจะมองเห็นเพียงผิวภายนอกของคอนกรีตเสริมเหล็กเท่านั้น ความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลงแต่ระบุไม่ได้ว่าโครงสร้างอาคารนั้นสามารถใช้งานอย่างปลอดภัยหรือไม่ หลังจากที่เกิดเพลิงไหม้ การวิเคราะห์เบื้องต้นเป็นสิ่งสำคัญเพราะจะนำมาซึ่งการพิสูจน์หรือตรวจสอบในเชิงวิศวกรรม เมื่ออาคารคอนกรีตเสริมเหล็กถูกเพลิงไหม้หรืออยู่ภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูงเป็นระยะเวลาหนึ่ง กำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าลดลงและเหล็กเสริมที่อยู่ในคอนกรีตจะมีการสูญเสียกำลัง สมบัติของคอนกรีตหลังเสื่อมสภาพจากเพลิงไหม้มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง ขึ้นกับปัจจัยหลายประการ เช่น ความรุนแรงของเพลิงไหม้หรือระยะเวลาของการเผาไหม้ (ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 2558) สำหรับมาตรฐานการป้องกันอัคคีภัย กำหนดให้อาคารชั้นเดียวมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า 1 ชั่วโมง อาคารหลายชั้นมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า 1½ ชั่วโมง อาคารขนาดใหญ่มีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมงและอาคารสูงเหนือพื้นดินมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง ส่วนอาคารใต้ดินมีอัตราการทนไฟไม่น้อยกว่า 4 ชั่วโมง (กฎกระทรวง ฉบับที่ 60 (พ.ศ.2549) ออกตามความในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ.2522)

คอนกรีตมีส่วนประกอบหลัก คือ ปูนซีเมนต์ ทราย หิน และน้ำ นอกจากนี้อาจมีสารผสมเพิ่มเพื่อปรับปรุงคุณภาพของคอนกรีต คอนกรีตมีสมบัติการทนไฟได้ดีในช่วงระยะเวลาหนึ่ง การนำความร้อนของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่าเหล็กถึง 50 เท่า ในอุณหภูมิที่สูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ความแข็งแรงของคอนกรีตจะลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์จะหดตัวขณะที่มวลรวมมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเพราะเป็นวัสดุเฉื่อย ซึ่งการหดตัวภายในคอนกรีตที่ไม่สัมพันธ์กันนี้ทำให้น้ำคอนกรีตเกิดการแตกร้าว (Harmathy, 1993) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide) ใน

คอนกรีตจะแตกตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide) ทำให้การระเหยของน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้น คอนกรีตจึงเกิดการแตกร้าวมากขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงในคอนกรีตจะทำให้เกิดรอยร้าวเล็กๆ ที่บริเวณผิวนอกของคอนกรีต เนื่องจากซีเมนต์เป็นตัวสร้างแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate, CSH) และ CH ซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของคอนกรีตเมื่อได้รับความร้อนสูง CSH และ CH จะแตกตัวมากขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตเสื่อมลงได้เร็วขึ้น ถ้าแคลสบาลละเอียดช่วยในการทนไฟของคอนกรีตได้ เนื่องจากถ้าแคลสบาลละเอียดจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ที่มีสมบัติการทนไฟที่ดีกว่าจึงทำให้กำลังอัดคงเหลือหลังการเผาของคอนกรีตผสมถ้าแคลสบาลละเอียดสูงกว่า สีของคอนกรีตจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาและอุณหภูมิที่ถูกเผาไหม้ กำลังที่ลดลงจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ (Shoab, Ahmed, & Balaha, 2001) เมื่อนำมอร์ตาร์ที่ผ่านการเผาด้วยอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทำให้เย็นตัวลงด้วยการแช่น้ำ ปล่อยให้ในอากาศที่อุณหภูมิห้อง และปล่อยให้ในเตาเผา พบว่ากำลังอัดของมอร์ตาร์มีค่าลดลงทุกรูปแบบของการเย็นตัว โดยมอร์ตาร์ที่เย็นตัวโดยการแช่น้ำทันทีมีค่าลดลงน้อยที่สุด รองลงมาคือเย็นตัวในเตาเผาและในอากาศ ตามลำดับ และจากงานวิจัยของ (ทรงเกียรติ หาญสันติ, 2544) ซึ่งได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีต ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมหลังการเผาไฟ กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟ มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ ระยะหุ้มคอนกรีตมีส่วนสำคัญต่อเหล็กเสริมภายใน และชนิดของเหล็กเสริมยังมีผลกระทบด้วย โดยเหล็กกลมจะสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวมากกว่าเหล็กข้ออ้อย

ถ้าแคลสบาลเป็นผลพลอยได้จากการใช้แคลสบาลเป็นเชื้อเพลิง ถ้าแคลสบาลส่วนใหญ่จะมีรูปร่างไม่แน่นอน มีรูพรุนสูง และขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดปูนซีเมนต์ ทำให้มีความต้องการใช้น้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นหากต้องการนำถ้าแคลสบาลมาใช้ในงานคอนกรีตจำเป็นต้องบดถ้าแคลสบาลให้ละเอียดใกล้เคียงขนาดปูนซีเมนต์และใช้สารลดน้ำพิเศษเพื่อให้ความสามารถในการเทคงเดิม (พัชร อ่อนพรม, 2557) (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรกร วงศ์คำจันทร์, 2544) ได้ศึกษาพฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมถ้าแคลสบาลละเอียด เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดา พบว่าถ้าแคลสบาลละเอียดมีการทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้ดี สามารถใช้เป็นวัสดุประสานในคอนกรีตได้ ค่ายุบตัวของคอนกรีตผสมถ้าแคลสบาลมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีตผสมถ้าแคลสบาลลดลงเมื่อเพิ่มการแทนที่ กำลังอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปมีค่าสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา โมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อย อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาในทุกส่วนผสม ซึ่งการใช้ถ้าแคลสบาลละเอียดในคอนกรีตจะเป็นการเพิ่มมูลค่าของถ้าแคลสบาล อีกทั้งช่วยลดต้นทุนของคอนกรีตได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้แสดงให้เห็นแล้วว่าถ้าแคลสบาลละเอียดสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ดี แต่ยังคงขาดงานวิจัยในบางส่วนเกี่ยวกับคุณสมบัติการทนไฟของคอนกรีตผสมถ้าแคลสบาลและ

การประยุกต์สำหรับการรับรองของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความมุ่งหมายที่จะศึกษาสมบัติการทนไฟของคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการทนไฟของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่อุณหภูมิต่างๆต่อกำลังอัดของคอนกรีต
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลกระทบของเถ้าแกลบในคอนกรีตที่มีผลต่อการทนไฟเมื่อออกแบบกำลังอัดต่างกัน
- 1.2.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมการทนไฟของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กผสมเถ้าแกลบเมื่อการแทนที่และออกแบบกำลังอัดที่ต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำเถ้าแกลบดำจากบริษัทเป่ามันกาฟลินธุ์ จำกัด ตำบลคำบง อำเภอห้วยผึ้ง จังหวัดกาฬสินธุ์ มาใช้เป็นวัสดุปอชโซลานแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนโดยนำเถ้าแกลบดำไปตากแดดให้แห้ง บดให้มีขนาดอนุภาคค้ำตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ในอัตราส่วนน้อยกว่าร้อยละ 5 งานวิจัยนี้ได้กำหนดขอบเขตงานวิจัยโดยการแบ่งตัวอย่างการทดสอบออกเป็น 2 กลุ่มตัวอย่างดังนี้

กลุ่มที่ 1 ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร สูง 0.20 เมตร ออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 300 500 และ 700 กก./ซม.<sup>2</sup> จากนั้นแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยใช้น้ำหนักวัสดุประสาน ควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีตตามกำหนด โดยใช้สารลดน้ำพิเศษในทุกส่วนผสม ปมคอนกรีตที่อายุ 90 วัน จากนั้นนำก้อนตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส โดยแต่ละอุณหภูมิจะเผาเป็นระยะเวลา 60 120 180 และ 240 นาที สังเกตสีวิเคราะห์ผิวและรอยร้าว ทดสอบกำลังอัดประลัย วิเคราะห์ผลการทดสอบ

กลุ่มที่ 2 ตัวอย่างชิ้นส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20x0.20 เมตร สูง 0.80 เมตร โดยใช้เหล็กยี่ 4DB12 ชั้นคุณภาพ SD30 ใช้เหล็กปลอก RB6@0.20 เมตร ชั้นคุณภาพ SR24 แทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด ในอัตราส่วนร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยนำหน้าวัสดุประสาน หล่อชิ้นส่วนเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ควบคุมค่ายุบตัวของคอนกรีต โดยใช้สารลดน้ำพิเศษในทุกส่วนผสม บ่มคอนกรีตที่อายุ 90 วัน จากนั้นนำตัวอย่างชิ้นส่วนเสาบางส่วนเผาที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที สังเกตสี วิเคราะห์ผิว รอยร้าว และทดสอบกำลังอัดประลัยของเสาก่อนและหลังการเผา



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณการแทนที่ ที่เหมาะสมของเถ้าแกลบในคอนกรีต พฤติกรรมการต้านทานไฟของโครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่เกิดจากการเผา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสรุปได้ดังนี้

- 2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลาน
- 2.2 เถ้าแกลบ
- 2.3 เพลิงไหม้กับโครงสร้างหลักของอาคาร
- 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และวัสดุปอซโซลาน

องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผลิตจากวัตถุดิบหลัก 2 ประเภท คือ วัสดุธาตุปูน (Calcareous materials) เป็นออกไซด์ของธาตุแคลเซียม และวัสดุอาซิลลาเซียส (Argillaceous materials) เป็นออกไซด์ ของซิลิกอน และอลูมิเนียม นอกจากนี้ยังต้องเติมวัตถุดิบอย่างอื่น ได้แก่ ออกไซด์ของเหล็ก (Iron oxide) ซึ่งออกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมจะช่วยให้ปฏิกิริยาในเตาเผาเกิดได้ง่ายขึ้น และต้องเติมยิปซัม (Gypsum) ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อหน่วงปฏิกิริยาไม่ให้ปูนแข็งตัวเร็วเกินไปโดยการบดรวมกันกับเม็ดปูน (Clinker)

กระบวนการที่เกิดขึ้นในเตาเผาแบ่งออกได้ 4 ขั้นตอน คือ

1. ป้อนวัสดุลงในเตาเผาที่อุณหภูมิ 250 ถึง 450 องศาเซลเซียส เพื่อขจัดน้ำอิสระออกไป
2. เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 600 องศาเซลเซียส เพื่อจัดโมเลกุลของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป
3. เมื่อเพิ่มอุณหภูมิประมาณ 1,200 องศาเซลเซียส จะเกิดสารประกอบของแคลเซียมอลูมิเนต และเฟอร์ไรต์เป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาได้สมบูรณ์ ที่อุณหภูมิประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส แคลเซียมอลูมิเนต และเฟอร์ไรต์จะเกิดการหลอมละลายและเริ่มทำปฏิกิริยากับเป็นเม็ดปูน (Clinker) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นถึง 1,400 ถึง 1,600 องศาเซลเซียส ส่วนผสมจะทำปฏิกิริยาเป็นเม็ดปูนก้อนกลมขนาด 3 ถึง 4 มิลลิเมตร

4. ลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็ว เม็ดปูนจะไหลออกจากเตาเผาอัตราการลดลงของอุณหภูมิ จะมีผลต่อความเป็นผลึก (Crystal) ของเม็ดปูน จากนั้นนำเม็ดปูนมาบดรวมกันกับยิปซั่มในปริมาณร้อยละ 2.5 ถึง 3 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ เพื่อหวังการก่อตัวอย่างรวดเร็วของปูนซีเมนต์ องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วยออกไซด์หลัก (Major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ซิลิกาออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์จึงเป็นสารประกอบหลักที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รอง (Minor oxides) ซึ่งได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ ) ออกไซด์ของอัลคาไล ( $\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$ ) ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ( $\text{SO}_3$ ) นอกจากนี้มีส่วนผสมอื่นประกอบอยู่บ้าง เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ ( $\text{TiO}_2$ ) และ ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) และจัดรวมอยู่ในรูปการสูญเสีย น้ำหนัก เนื่องจากการ (Loss on Ignition) และกากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (Insoluble residue) ออกไซด์เหล่านี้จะทำปฏิกิริยากันและรวมตัวกันอยู่ในรูปของสารประกอบ สารประกอบที่สำคัญ มีอยู่ 4 ประเภท คือ

1. ไตรแคลเซียมซิลิเกต ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ) มีมากที่สุดในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 45 ถึง 55 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมีสีเทาแก่
2. ไดแคลเซียมซิลิเกต ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ) มีในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 15 ถึง 35 มีรูปร่างเป็นเม็ดกลม
3. ไตรแคลเซียมอลูมิเนต ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ) มีในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 7 ถึง 15 มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมและมีสีเทาอ่อน
4. เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ ) มีในปูนซีเมนต์ประมาณร้อยละ 5 ถึง 10 อยู่ในสภาพของสารละลายแข็ง

พูน ปณ ทิโต ชีเว

ตาราง 2. 1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (%)	เถ้าแกลบ (%)
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20.8	88.33
Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.7	0.48
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.4	3.37
Calcium oxide (CaO)	65.3	0.52
Magnesium oxide (MgO)	1.5	0.28
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.4	0.15
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.1	2.76
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.7	0.12
Loss on ignition (LOI)	0.9	3.71

### 2.1.1 ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน คือปฏิกิริยาระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำโดยปฏิกิริยานี้จะเป็นตัวกำหนดคุณภาพของซีเมนต์พาสต์ในสภาพพลาสติกและในสภาพแข็งตัว สารประกอบหลักในปูนซีเมนต์ มี 4 ประเภท คือ ไตรแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>3</sub>S) ไดแคลเซียมซิลิเกต (C<sub>2</sub>S) ไตรแคลเซียมอลูมิเนต (C<sub>3</sub>A) และเตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ (C<sub>4</sub>AF) สารประกอบเหล่านี้ เมื่อผสมกับน้ำจะได้ผลิตภัณฑ์แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O หรือ CSH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>, CH) และแคลเซียมอลูมิเนตไฮเดรต (3CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 6H<sub>2</sub>O หรือ CAH) ดังแสดงในสมการ (2.1) ถึง (2.3)



โดยที่ C<sub>3</sub>S = 3CaO.SiO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>S = CaO.SiO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>A = CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, H = H<sub>2</sub>O, CH = Ca(OH)<sub>2</sub>, CSH = 3CaO.2SiO<sub>2</sub>.3H<sub>2</sub>O, CAH = 3CaO. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. 6H<sub>2</sub>O

### 2.1.2 วัสดุปอซโซลาน

ปัจจุบันวัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่นิยมใช้ในงานคอนกรีตกันอย่างแพร่หลาย โดยการแทนที่ในปูนซีเมนต์บางส่วน เนื่องจากวัสดุปอซโซลานช่วยให้คุณสมบัติของคอนกรีตดีขึ้นทั้งในด้านกำลังอัดและความคงทนต่อสารเคมี เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต และกรดต่างๆ

มาตรฐาน ASTM C 618 (1991) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลานไว้ว่า “วัสดุปอซโซลานเป็นวัสดุที่มีซิลิกา หรือซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยทั่วไปแล้ววัสดุปอซโซลานจะไม่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน แต่ถ้าวัสดุปอซโซลานมีความละเอียดมากและมีน้ำหรือความชื้นที่เพียงพอ จะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิกปกติ ทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการยึดประสาน”

ตามมาตรฐาน ASTM C618 (1991) ได้จำแนกปอซโซลานออกเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ได้แก่

1. ชั้นคุณภาพ N (Class N) เป็นปอซโซลานจากธรรมชาติหรือปอซโซลานจากธรรมชาติที่ผ่านขบวนการเผาแล้วเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามต้องการ

2. ชั้นคุณภาพ F (Class F) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินแอนทราไซต์ (Anthracite) หรือบิทูมินัส (Bituminous) โดยมีปริมาณผลรวมของซิลิกาออกไซด์ (Silica oxide,  $\text{SiO}_2$ ) อลูมินาออกไซด์ (Alumina oxide,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Ferric oxide,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มากกว่าร้อยละ 70 และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C618 (1991) ซึ่งโดยทั่วไปเถ้าลอย ชั้นคุณภาพ F มีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide,  $\text{CaO}$ ) ที่ต่ำ

3. ชั้นคุณภาพ C (Class C) เป็นเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์ (Lignite) หรือซับบิทูมินัส (Subbituminous) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณผลรวมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  มากกว่าร้อยละ 50 มีปริมาณ  $\text{CaO}$  สูง และมีคุณสมบัติอื่นตามที่ระบุในมาตรฐาน ASTM C 618, (1991) เถ้าลอยชนิดนี้เรียกชื่ออีกอย่างหนึ่งว่าเถ้าลอยแคลเซียมสูง สำหรับ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  มาจากแร่ดินเหนียว โดยที่ลิกไนต์ประกอบไปด้วยดินเหนียวที่  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำ ทำให้เถ้าลอย Class C นอกจากมี  $\text{SiO}_2$  ต่ำแล้ว ยังมี  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ต่ำด้วย (ACI Committee 232, 2001)

วัสดุจำพวกปอซโซลาน เมื่อนำไปใช้งานจะต้องนำไปผ่านกระบวนการต่างๆ ก่อนจึงจะนำไปใช้งานได้ เช่น การเผา การบด และการทำให้แห้ง เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการนำเอาปอซโซลานจากธรรมชาติไปใช้ประโยชน์ในการสร้างเขื่อนและสะพาน เพื่อช่วยลดความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์กับน้ำช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการกัดกร่อนอันเนื่องมาจากซัลเฟต และช่วยในการควบคุมปฏิกิริยาระหว่างต่างกับซิลิกา

ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์หลังจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ซิลิกาและอลูมินาออกไซด์ที่อยู่ในวัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับ  $\text{Ca(OH)}_2$  ที่ได้จาก

ปฏิกิริยาไฮเดรชัน ได้เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต ซึ่งสารประกอบทั้งสองมีคุณสมบัติในการยึดประสานทำให้ซีเมนต์เพสต์มีความสามารถในการยึดประสานดีขึ้นและเพิ่มความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีต โดยปกติแล้วปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน โดยเริ่มเกิดขึ้นเมื่อมีอายุระหว่าง 7 ถึง 14 วัน และมีปฏิกิริยาไปเรื่อยๆ นอกจากนี้ปฏิกิริยาปอซโซลานจะเกิดได้เร็วขึ้นเมื่อถ้าถ่านหินมีความละเอียดมากขึ้น

การใช้วัสดุปอซโซลานในงานคอนกรีตมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ เพิ่มความสามารถในการเกิดได้ เพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ลดผลกระทบจากการแยกตัว ลดความร้อนที่เกิดขึ้นในคอนกรีต ลดการหดตัว ลดอัตราการซึมของน้ำผ่านคอนกรีต และที่สำคัญคือเพิ่มกำลังอัดและกำลังดึงประลัยของคอนกรีตเมื่อคอนกรีตมีอายุมากขึ้น แต่ทั้งนี้การใช้วัสดุปอซโซลานจะมีข้อเสียด้วย คือ ทำให้อัตราการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตต่ำลงในช่วงอายุต้น ลดความต้านทานต่อสภาวะการแข็งตัวและละลายน้ำสลับกันไป และทำให้ต้องใช้สารเพิ่มฟองอากาศมากขึ้นเพื่อให้ได้คอนกรีตที่มีปริมาณฟองอากาศตามต้องการในระดับเดียวกับคอนกรีตที่ไม่มีถ่านหินผสมอยู่ (ปริญา จินดา ประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547)

### 2.1.3 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของสารปอซโซลาน

ปฏิกิริยาปอซโซลานิก คือ ปฏิกิริยาของซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) และ/หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ในสารปอซโซลานทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการไฮเดรชัน ของไตรแคลเซียมซิลิเกต และไดแคลเซียมซิลิเกต โดยที่ผลิตภัณฑ์ของ ปฏิกิริยาปอซโซลานิกของซิลิคอนไดออกไซด์ได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต

หลังจากเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันขึ้นได้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา คือ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (C-S-H) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ตามสมการ (2.1) (2.2) และ (2.3) เมื่อนำวัสดุปอซโซลานผสมในมอร์ตาร์หรือคอนกรีต สารประกอบออกไซด์ของซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) และอะลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) อันเป็นสารประกอบหลักของวัสดุปอซโซลาน เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์จะได้แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และแคลเซียมอะลูมิเนตไฮเดรต (CAH) ตามสมการ (2.4) และ (2.5)



ค่า  $x$ ,  $y$  และ  $z$  เป็นตัวแปรที่ขึ้นอยู่กับชนิดของแคลเซียมซิลิเกตไฮดรตและแคลเซียมอลูมิเนตไฮดรต

American Society for Testing and Materials (1997) ให้คำจำกัดความของวัสดุปอซโซลาน หมายถึง วัสดุที่ประกอบด้วย ออกไซด์ของซิลิกา (Siliceous) หรือ ซิลิกาและอลูมินา (Siliceous and Aluminous) เป็นองค์ประกอบหลักโดยทั่วไปแล้วตัวของมันเองไม่มีคุณสมบัติเชื่อมประสาน แต่ถ้ามีความละเอียดและความชื้นที่เหมาะสมจะสามารถทำปฏิกิริยากับด่าง หรือ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิปกติทำให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติในการเชื่อมประสาน ได้ดี คล้ายกับปูนซีเมนต์ เรียกปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ว่าปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic Reaction) ตัวอย่างวัสดุปอซโซลาน เช่น เถ้าลอย เถ้าก้นเตา ตะกรันเตาถลุงเหล็ก ซิลิกาฟุ้ง และเถ้าแกลบ เป็นต้น ปริมาณวัสดุปอซโซลานที่ใช้อยู่ระหว่าง 15 ถึง 40 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ซึ่งวัสดุปอซโซลานแต่ละชนิดอาจส่งผลดีหรือเสียต่อคอนกรีตแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุปอซโซลานนั้นๆ โดยองค์ประกอบทางเคมี และแร่ธาตุที่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกและความละเอียดของวัสดุปอซโซลานคือปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานได้ดี

## 2.2 เถ้าแกลบ

แกลบเป็นวัสดุผลพลอยจากโรงสีข้าว เมื่อนำแกลบไปเผา ทำให้คงเหลือเถ้าแกลบเพียงร้อยละ 20 ถึง 25 จากแกลบทั้งหมด เถ้าแกลบเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการเผาแกลบเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากแกลบมีปริมาณซิลิกา (Silica) สูงจึงมีความเป็นวัสดุปอซโซลาน โดยการทดสอบค่าดัชนีกำลังตามมาตรฐาน ASTM C311 โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 20 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การใช้เถ้าแกลบแทนที่ปูนซีเมนต์ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลดีกับกำลังอัดแต่ถ้าหากมีการใช้เถ้าแกลบแทนที่ในปริมาณมากเกินไป จะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ไม่ผสมเถ้าแกลบ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าการใช้เถ้าแกลบร่วมกับเถ้าลอยทำให้ส่วนผสมมีความชื้นไหลและมีกำลังดีขึ้นเนื่องจากเกื้อกูลกัน (Synergic effect)

กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบที่อายุต้นสูงเนื่องจากความว่องไวในการทำปฏิกิริยาขึ้นกับความละเอียดของเถ้าแกลบนั่นเอง นอกจากนี้ยังมีสารลดน้ำพิเศษ เพื่อปรับความสามารถในการเทได้ เพราะเถ้าแกลบมีรูพรุนที่สูงมาก รูปร่างก็ไม่แน่นอนจึงทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมของเถ้าแกลบต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การเผาแกลบที่อุณหภูมิพอเหมาะแล้วบดให้ละเอียด จะพบว่าองค์ประกอบหลักของเถ้าแกลบคือซิลิกาโดยผลึกของซิลิกาจะมี 2 รูป ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยถ้าเผา

แกลบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมจะได้ซิลิกาในรูป ออสัณฐาน (Amorphous) ที่รองรับต่อการทำปฏิกิริยา และ  
 เผาที่อุณหภูมิสูงเกินไปซิลิกาจะกลายเป็นผลึก (Crystal) ที่เฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยา

Saraswathy และ Song (2008) ได้ทดสอบการแทรกซึมของคลอไรด์โดยใช้แรงดันไฟฟ้า  
 ในตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100x50 มิลลิเมตร ใช้เหล็กเส้นกลมขนาด  
 เส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร ฝังลงตรงกลาง แซ่ในสารละลายโซเดียม  
 คลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่อายุ 28 วันการแทนที่ของเถ้าแกลบในปริมาณร้อยละ 5 10 15 20  
 25 และ 30 พบว่า การแทนที่ด้วยเถ้าแกลบในอัตราส่วนร้อยละ 30 ทำให้การซึมผ่านและ  
 การแทรกซึมของคลอไรด์ ของคอนกรีตมีค่าลดลง และช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทานการเกิด  
 สนิมได้อีกด้วย

บุรฉัตร ฉัตรวีระ และ วัชรการ วงศ์คำจันทร์ (2544) ได้ศึกษา พฤติกรรมทางกลของ  
 คอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด เปรียบเทียบกับคอนกรีตธรรมดาได้แก่ค่ายุบตัว หน่วยน้ำหนักใน  
 สภาพสด กำลังอัดและโมดูลัสยืดหยุ่น และอุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ปริมาณการแทนที่ด้วย  
 เถ้าแกลบละเอียดในอัตราร้อยละ 0 20 และ 40 โดยน้ำหนัก พบว่าเถ้าแกลบละเอียดมีการทำ  
 ปฏิกิริยาปอซโซลานิกสูงและสามารถใช้เป็นวัสดุซีเมนต์ในคอนกรีตได้ ค่ายุบตัวของคอนกรีตผสม  
 เถ้าแกลบน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา หน่วยน้ำหนักในสภาพสดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบลดลงเมื่อ  
 เพิ่มการแทนที่ กำลังอัดที่อายุ 28 วันขึ้นไปสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นต่ำกว่าคอนกรีต  
 ธรรมดาเล็กน้อย อุณหภูมิของปฏิกิริยาไฮเดรชัน ต่ำกว่าคอนกรีตธรรมดาในทุกส่วนผสม

พิทยา สุขจินดา และคณะ (2016) ได้ศึกษา กำลังอัดและปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมของ  
 เถ้าแกลบดำที่เหมาะสมสำหรับคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบปริมาณ  
 ร้อยละ 5 15 และ 20 ด้วยน้ำหนักวัสดุประสาน เปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมในสภาวะปกติ  
 ที่ระยะเวลา 3 7 14 และ 28 วัน ใช้การหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอก นำมาบ่ม แล้วจึงทดสอบ  
 หาค่ากำลังอัดที่เวลาต่างๆ ผลการทดสอบพบว่า ระยะเวลาในการบ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีกำลัง  
 อัดมากขึ้น และเมื่อผสมเถ้าแกลบดำในปริมาณมากขึ้น ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลงตามปริมาณ  
 การแทนที่มากขึ้น กำลังอัดที่ 28 วัน มีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมในสภาวะปกติ ปริมาณ  
 การแทนที่ที่เหมาะสมคือ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

### สมบัติของเถ้าแกลบ

องค์ประกอบที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของเถ้าแกลบ ได้แก่ ลักษณะและสมบัติของแกลบ วิธีการเผาแกลบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเถ้าแกลบคือ 1.ความถ่วงจำเพาะ 2.ความละเอียดของเถ้าแกลบ 3.ความเป็นปอซโซลานของเถ้าแกลบ สารประกอบทางเคมีและความละเอียด ความละเอียดของเถ้าแกลบเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่กำหนดคุณสมบัติของเถ้าแกลบ เถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงกว่าย่อมมีความสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกว่า โดยทั่วไปความละเอียดสามารถกำหนดได้จาก

1. พื้นที่ผิวจำเพาะที่หาค่าได้จากการทดสอบด้วยแอร์เพอร์ มีอะบิลิตี (Air permeability Test) หรือเทอร์บิดิเมเตอร์ (Turbidimeter test) วัดค่าพื้นที่ผิวจำเพาะเป็น ตารางเซนติเมตร ต่อเถ้าแกลบ 1 กรัม

2. ร้อยละที่ผ่านตะแกรง (Sieve) เบอร์ 325

3. เวลาที่ใช้ในการบด เถ้าแกลบที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นจะทำให้ มอร์ตาร์ มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นนอกจากนี้เมื่อความละเอียดเพิ่มขึ้นความต้องการน้ำของส่วนผสมก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

การรับกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบขึ้นกับความละเอียดของเถ้าแกลบและปริมาณแทนการที่ที่เหมาะสมเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้นคอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบบดละเอียดจะมีกำลังที่รับกำลังอัดได้สูงแต่ต้องมีสารลดน้ำพิเศษเพื่อปรับความสามารถในการเทจึงจะได้คอนกรีตคุณภาพสูง

### 2.3 เพลิงไหม้กับโครงสร้างหลักของอาคาร

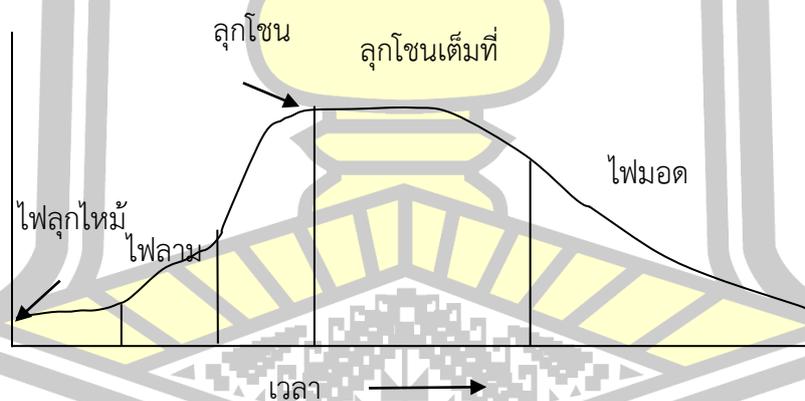
คอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นรูปแบบโครงสร้างที่นิยมใช้ทั่วไป ประกอบด้วยคอนกรีตและเหล็กเสริม ในการก่อสร้างโดยไม่ต้องใช้เทคนิคพิเศษเฉพาะทาง จากการศึกษาของ (Greepala & Nimityongskul, 2007) พบว่าในการเกิดไฟไหม้ ความร้อนจะค่อย ๆ เข้าสู่คอนกรีตอย่างช้า ๆ ประมาณครึ่งชั่วโมงความร้อนจะเข้าถึงเหล็กเสริมหลักในคอนกรีต และความร้อนที่จะทำให้อุณหภูมิของเหล็กเสริมเข้าสู่ภาวะวิกฤตต้องใช้เวลาอย่างน้อยประมาณ 2 ชั่วโมง จึงจะทำให้เหล็กเสริมหลักเริ่มมีการลดกำลังลงอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามคอนกรีตส่วนที่สัมผัสไฟไหม้โดยตรงเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงกำลังของคอนกรีตด้านบนลดลงอย่างมาก อาจมีกำลังเหลืออยู่ไม่ถึงครึ่งของกำลังคอนกรีตก่อนเพลิงไหม้ ขณะที่คอนกรีตใจกลางภายในเหล็กกรัด (เหล็กปลอก) ยังคงมีกำลังลดลงไม่มาก หากการเผาไหม้ยังดำเนินต่อไป เหล็กเสริมหลักจะมีกำลังลดลงอย่างต่อเนื่องและในชั่วโมงที่ 3 นี้ เหล็กเสริมอาจเหลือกำลังเพียงร้อยละ 40 ของเหล็กเสริมก่อนเพลิงไหม้ ขณะที่คอนกรีตใจกลางมีกำลังเพียงครึ่งเมื่อเทียบกับก่อนเพลิงไหม้ ยิ่งไปกว่านั้น การล้าของเหล็กเสริมจะส่งเสริมให้เกิดการแอ่นตัวของโครงสร้าง ทำให้ไม่มีเสถียรภาพและอาจเกิดการวิบัติได้ตลอดเวลา

### 2.3.1 พฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้เพลิงไหม้

เมื่อโครงสร้างได้รับความร้อน หรือมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โครงสร้างจะเกิดการขยายตัว ในกรณีเกิดเพลิงไหม้ ความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นสูง แต่ห้องข้างเคียงมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า โครงสร้างจะยึดตัว ไม่เท่ากันเป็นผลให้เกิดการแตกร้าวได้ ทั้งนี้ระยะเวลาของการแตกร้าวขึ้นอยู่กับสภาพการยึดรั้ง (Restraint) หากโครงสร้างไม่ยึดรั้งโดยโครงสร้างข้างเคียง เสาคือเป็นองค์อาคารเดียวที่ต้านการยึดหดตัวของคานหรือพื้น อาจได้รับความเสียหายก่อน ในอีกทางหนึ่งหากโครงสร้างมีการยึดรั้งกับ โครงสร้างข้างเคียง

เพลิงไหม้ หรือ การเผาไหม้เป็นปฏิกิริยาเคมีของเชื้อเพลิงและอากาศ ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ สูงและมีการปล่อยพลังงาน Walton และ Thomas (2002) ได้เสนอพฤติกรรมของการเผาไหม้ ออกเป็น 5 ช่วง คือ จุดไฟให้ลุกไหม้ (Ignition), ไฟลาม (Growth) ลุกโชน (Flashover) ลุกโชน เต็มที่ (Fully developed fire) ไฟมอด (Decay) ตามภาพประกอบ 2.1

อุณหภูมิ



ภาพประกอบ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างไฟและเวลาของการลุกไหม้  
(Walton & Thomas, 2002)

### 2.3.2 การเกิดไฟและความสำคัญของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก

เพลิงไหม้เป็นปฏิกิริยาทางเคมีเนื่องจาก แหล่งความร้อน (Heat source) และก๊าซ ออกซิเจน (Oxygen) โดยมี วัสดุติดไฟ (Combustible material) เป็นตัวก่อให้เกิดการลุกไหม้

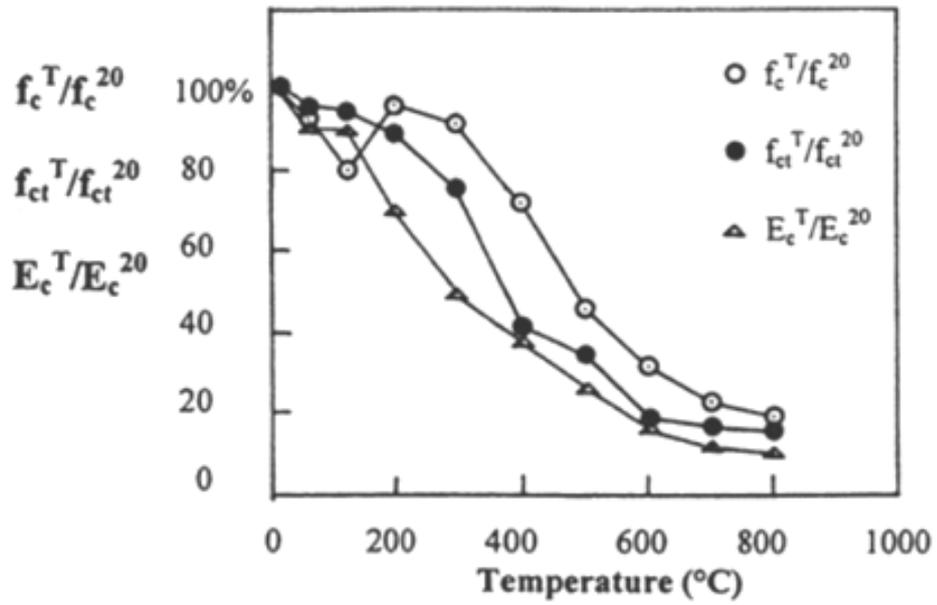
ต่อเนื่อง โดยวงจรในการเผาไหม้ซึ่งทดลองในห้องปฏิบัติการ และปราศจากอุปกรณ์ดับเพลิงใดๆ อย่างไรก็ตามการเผาไหม้ที่แท้จริงอาจไม่มีรูปแบบ เนื่องจากไฟอาจรั่วไหลออกไปนอกห้องได้ทั้งหมด หรืออาจไม่เกิดการลามไฟโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเชื้อเพลิงมีปริมาณน้อย วางแยกกัน หรือไม่มีอากาศเข้ามาสันดาปในระบบ

โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสำคัญมากเพราะหลังจากเกิดไฟไหม้กับอาคารแล้ว หากมองเห็นผิวคอนกรีตมีรอยร้าวจากโครงสร้างหลักทั้งเสา คานและพื้น มีการสูญเสียรูป แนวระดับ ผันงเอียง หรือเกิดการบวมตัวของโครงสร้าง แสดงว่าโครงสร้างนั้นใช้งานต่อไปไม่ได้ วิธีการสังเกตเบื้องต้นคือ สีของคอนกรีตเสริมเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไป ถ้าเป็นโครงสร้างเหล็กจะมองเห็นได้ชัดเจนมากกว่าเพราะเหล็กมีสภาพคดงอ หากมีการใส่น้ำหนักหรือเกิดแรงสะท้อนขึ้นกับอาคารอาจทำให้อาคารวิบัติได้

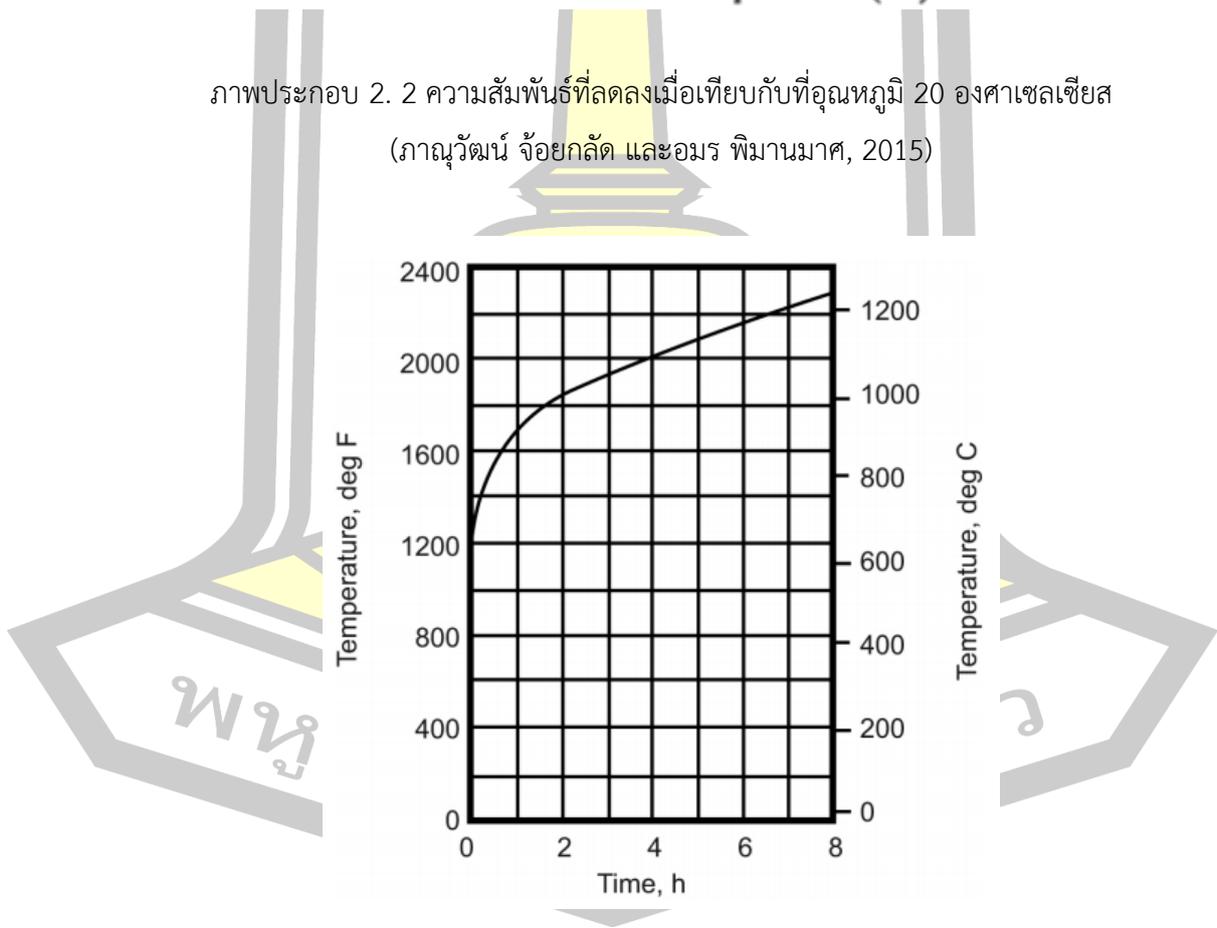
### 2.3.3 คอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง

อุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก (ไม่เกิน 200 องศาเซลเซียส) คอนกรีตจะไม่เป็นอันตรายจากไฟ แต่หากความร้อนสูงเกิน 300 องศาเซลเซียส คอนกรีตจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่สำคัญต่างๆ อย่างชัดเจน การแตกร้าวในคอนกรีตภายใต้ความร้อนสูง เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ร่วมกับการขยายตัวที่ไม่สัมพันธ์กันขององค์ประกอบภายในคอนกรีต โดยภาพประกอบ 2.2 แสดงการเสื่อมลดของกำลังอัด ( $f_c$ ) กำลังดึง ( $f_{ct}$ ) และโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต ( $E_c$ ) เทียบกับสภาวะปกติ (อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) ภาพประกอบ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลา โดยพบว่ากำลังทั้ง 3 ส่วน ลดลงอย่างรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกำลังอัดของคอนกรีตซึ่งถือเป็นหัวใจสำคัญในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง แสดงการอ่อนตัวของเส้นความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตเมื่อรับแรงอัดจากการทดสอบด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

พหุ ประ โท ชี เว

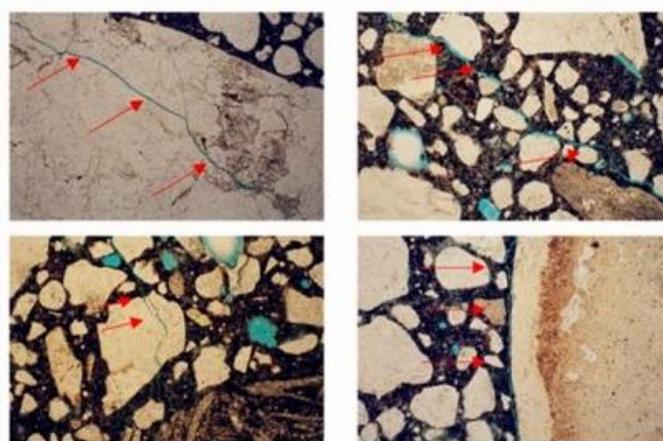


ภาพประกอบ 2. 2 ความสัมพันธ์ที่ลดลงเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด และอมร พิमानมาศ, 2015)



ภาพประกอบ 2. 3 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลา (Bilow & Kamara., 2008)

เหตุผลที่กำลังอัดของคอนกรีตลดลงอย่างมากภายใต้อุณหภูมิสูงมีหลายทฤษฎีและทฤษฎีที่น่าเชื่อถือหนึ่งคือ เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นสูง น้ำอิสระ (Free water) ภายในโพรงของคอนกรีตจะเปลี่ยนจากของเหลวกลายเป็นก๊าซ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวก่อให้เกิดแรงดันสูง ทำให้ส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์ หดตัวลง (Shrink) ในขณะที่มวลรวมซึ่งเป็น วัสดุเฉื่อย (Inert material) มีการเปลี่ยนแปลงน้อย การเปลี่ยนแปลงที่ไม่สัมพันธ์กันดังกล่าวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีตภาพประกอบ 2.4 แสดงการแตกร้าวในเนื้อคอนกรีต



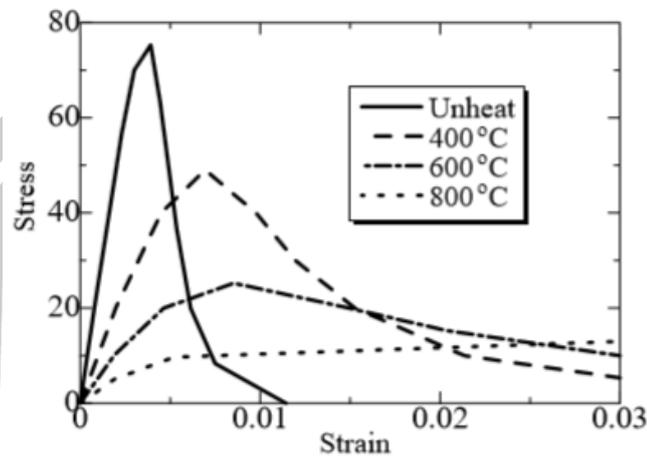
ภาพประกอบ 2.4 รอยแตกร้าวขนาดเล็กในคอนกรีตบริเวณรอยต่อของมวลรวมและซีเมนต์เพสต์ (ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด และอมร พิमानมาศ, 2015)

พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Calcium hydroxide, CH) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในคอนกรีตจะแตกตัวเป็น แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) และน้ำ โดยองค์ประกอบตัวหลังจะเพิ่มการระเหยของน้ำ ซึ่งมีผลให้เกิดการแตกร้าวมากขึ้น รอยร้าวที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีต เนื่องจากการเผาไหม้เป็นเวลานาน

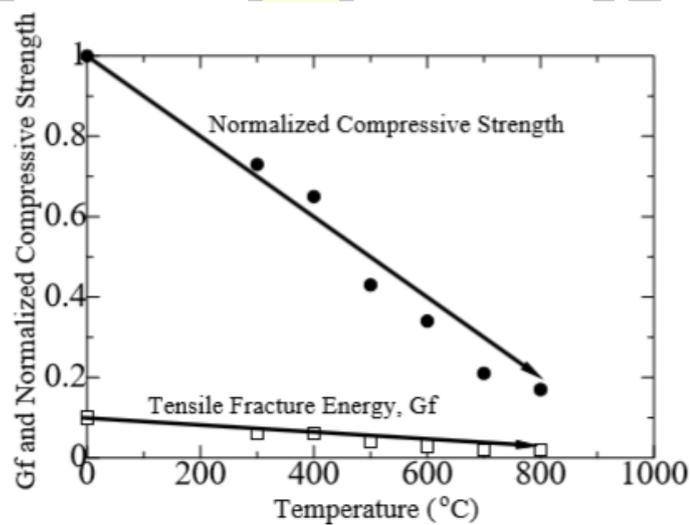
### 2.3.4 คอนกรีตเผาไฟ

จากผลการทดสอบของ Masashi matsudo และคณะ (2006) โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 50×100 มิลลิเมตร ที่กำลังอัด สูงสุด ( $f_c'$ ) เท่ากับ 430 กก./ซม.<sup>2</sup> นำไปเผาไฟที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ซึ่ง ได้ผลการทดสอบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กราฟแสดงความเค้น ความเครียด ดังแสดงภาพประกอบ 2.5 สัดส่วนกำลังอัด

และพลังงานการแตกร้าวจากอุณหภูมิ ดังแสดงภาพประกอบ 2.6 ซึ่งคุณสมบัติทางกลนี้จะถูกนำไปใช้  
เป็นฐานข้อมูลสำหรับแบบจำลอง ทางวัสดุ



ภาพประกอบ 2.5 กราฟแสดงความเค้น ความเครียด



ภาพประกอบ 2.6 สัดส่วนกำลังอัดและพลังงานการแตกร้าวจากอุณหภูมิ

### 2.3.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการแตกร้าวในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

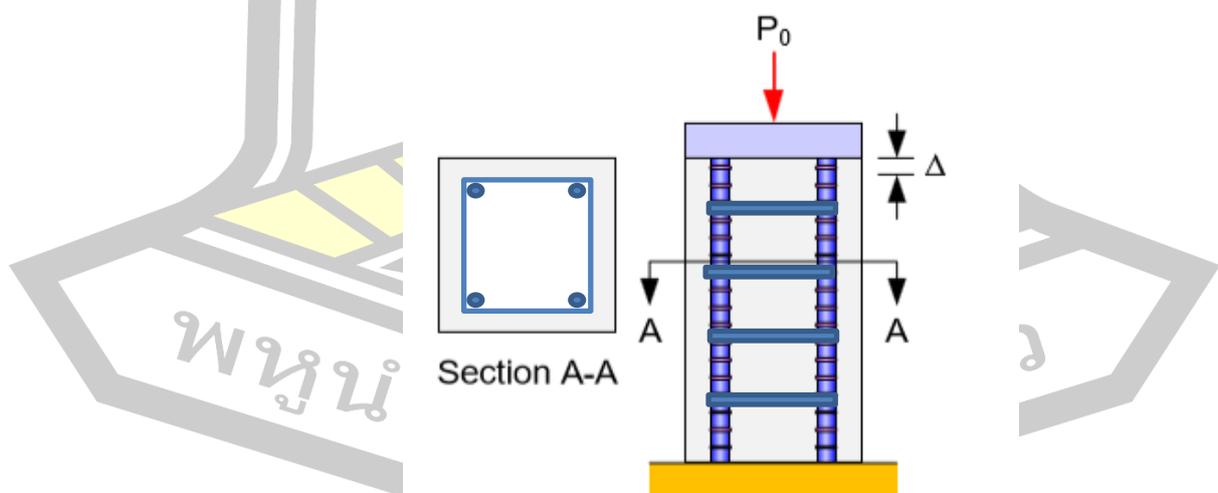
ปัจจัยหลักที่ควบคุมรอยแตกร้าวในคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น มีดังนี้ ประเภทของมวลรวมในคอนกรีต ปริมาณความชื้นในคอนกรีต ปริมาณปูนซีเมนต์ในคอนกรีต การเย็นตัวลงของอุณหภูมิ โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

กรณีพิจารณาผลจากมวลรวมเทียบกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นพบว่า การเปลี่ยนแปลงของกำลังอัด  
 ประลัย ( $f_c', T/f_c'$ ) เมื่อเกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับประเภทของมวลรวมหยาบในคอนกรีต  
 พบว่าเมื่อความร้อนสูงไม่เกิน 300 องศาเซลเซียส กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่ง  
 ที่ความร้อนเพิ่มขึ้นสูงถึงจุดๆหนึ่ง กำลังอัดจะลดลงอย่างรวดเร็ว

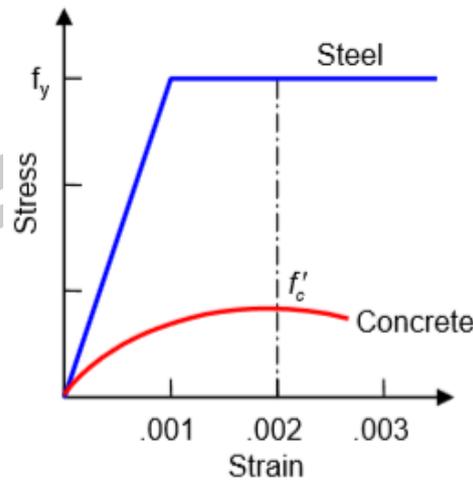
กรณีพิจารณาผลเนื่องจากปริมาณความชื้นในคอนกรีตพบว่า เมื่อเกิดการเผาไหม้คอนกรีต  
 ที่มีความชื้นสูงจะมีอัตราการลดลงของกำลังสูง เนื่องจากจะเกิดการระเหยของน้ำในปริมาณที่มากขึ้น  
 เป็นผลให้เกิดการหดตัวของซีเมนต์เฟลต์มากขึ้นตาม นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณความชื้น (Moisture  
 content) ที่มากกว่าร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ร้อยละ 3 โดยปริมาตร) จะเพิ่มโอกาสที่ผิวคอนกรีตเกิด  
 การกะเทาะออกอีกด้วย เมื่อพิจารณาถึงผลของการเย็นตัวของคอนกรีตพบว่า กำลังอัดของ  
 คอนกรีตซึ่งถูกทำให้เย็นตัวอย่างช้าๆ จะรักษาระดับของกำลังได้ดีกว่าคอนกรีตที่ถูกทำให้เย็นตัวอย่าง  
 รวดเร็ว

### 2.3.6 ทฤษฎีคำนวณและออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชนิดของเสาและการเสริมเหล็ก เสาคอนกรีตเสริมเหล็กอาจถูกจำแนกได้ตามรูปหน้าตัด  
 และการเสริมเหล็ก น้ำหนักบรรทุกที่รับ และ ความขะลุ่ย กำลังของเสารับน้ำหนักตามแนวแกน  
 เมื่อหน้าตัดเสาคอนกรีตเสริมเหล็กน้ำหนักบรรทุก  $P_0$  เสาจะหดสั้นลงเล็กน้อย อัตราการการหดสั้นใน  
 เหล็กและคอนกรีตมีค่าเท่ากัน ตามรูปภาพที่ 2.7 และ 2.8



ภาพประกอบ 2.7 เสารับน้ำหนักตามแนวแกน (Jirawaccharadet, 2546)



ภาพประกอบ 2.8 ความสัมพันธ์หน่วยแรงและหน่วยการยืดหด  
(Jirawaccharadet, 2546)

โครงสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กมีหน้าที่รับแรงใน แนวตั้งเป็นหลัก และรับโมเมนต์ดัดที่บริเวณจุดเชื่อมต่อ ระหว่างคานและแผ่นพื้นซึ่งในการคำนวณและออกแบบ ต้องพิจารณาออกแบบให้หน้าตัดเสาสามารถรับแรงตาม แนวแกนและโมเมนต์ดัดได้ทั้งหมด จึงจะมีความปลอดภัย งานวิจัยนี้ได้พิจารณาออกแบบเฉพาะกรณีของเสาสั้น และใช้เหล็กปลอกเดี่ยวเท่านั้น เสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมต้องมีเหล็กเสริมหรือเรียกว่า “เหล็กยื่น” อย่างน้อยที่สุด 4 เส้นที่แต่ละมุม โดยมีเหล็กปลอกเดี่ยวแบบปิด (Closed loop tie) โอบรัดเหล็กเสริมทุกเส้นอยู่ภายใน ส่วนหน้าตัด กลมต้องมีเหล็กอย่างน้อย 6 เส้น กระจายบนเส้นรอบวงภายในเหล็กปลอกเกลียว หน้าเสาควรมี ขนาดอย่างน้อย 20 ซม. ปริมาณเหล็กเสริมที่ใช้จะอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 0.08 ของพื้นที่ทั้งหมด  $A_g$  ของหน้าตัดเสา โดยเหล็กเสริมที่ใช้ควรมีขนาด 12 มม. ขึ้นไป

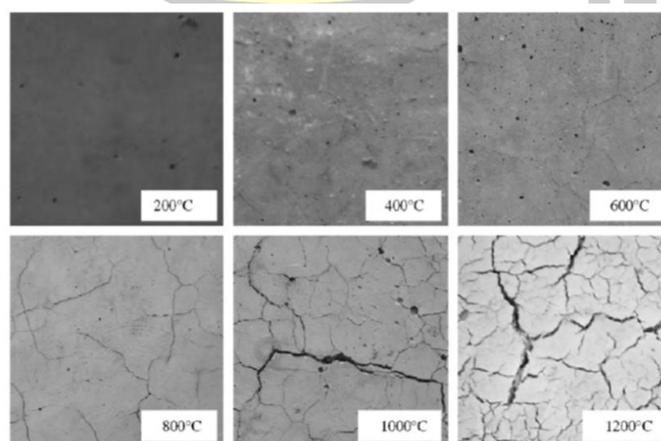
ข้อกำหนดในการใช้เหล็กปลอกเดี่ยวโดยมาตรฐาน วสท. 4303

- เหล็กยื่นทุกเส้นจะต้องถูกห่อหุ้มโดยปลอกเดี่ยว
- ใช้เหล็กปลอกเส้นผ่าศูนย์กลาง RB- 9 มม. สำหรับเหล็กยื่นขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง DB-32 และใช้เหล็กปลอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 มม. สำหรับ เหล็กยื่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง DB-36 และเส้นผ่าศูนย์กลาง DB-40
- ระยะห่างระหว่างปลอกต้องไม่เกิน 16 เท่าเส้นผ่าศูนย์กลาง เหล็กยื่น 48 เท่าเส้นผ่าศูนย์กลาง เหล็กปลอก หรือความกว้างหน้าเสาที่เล็กที่สุด

- ทุกมมของปลอกและที่เหล็กยื่นถูกรองรับต้องไม่เกิน 135 องศา และไม่มีเหล็กยื่นกลางด้านมี ระยะห่างเกิน 15 ซม.

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Rongviriyapanich (2012) ศึกษาคุณสมบัติเชิงเคมี เชิงกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์อบแห้งหลังการสัมผัสเพลิงไหม้ โดยจำลองเหตุการณ์เพลิงไหม้ของชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์ที่มีความหนา 20 มม. และ 40 มม. ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ ASTM E119 เป็นระยะเวลา 60 นาที และ 120 นาที การทดสอบคุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางกลของวัสดุ กระทำบนชิ้นตัวอย่างที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ ผงตัวอย่างมอร์ตาร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.15 มม. ชิ้นตัวอย่างทรงลูกบาศก์ขนาด 5.0 มม. และชิ้นตัวอย่างรูปคานขนาดเล็ก โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่สัมผัสเพลิงไหม้กับคุณสมบัติต่างๆ ที่เปลี่ยนไป ซึ่งผลการทดสอบคุณสมบัติทั้งสามคุณสมบัตินั้นสอดคล้องซึ่งกันและกัน นอกจากนี้การศึกษานี้ยังได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ และความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางกายภาพและทางกล ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่นำเสนอขึ้นสามารถใช้ในการทำนายคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุที่เปลี่ยนไปโดยอาศัยปริมาณสารประกอบเคมีที่คงค้างในชิ้นตัวอย่างมอร์ตาร์หลังการสัมผัสเพลิงไหม้ได้



ภาพประกอบ 2.9 ลักษณะของมอร์ตาร์สัมผัสกับไฟ ที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 200 400 600 800 1,000 และ 1,200 องศาเซลเซียส (Rongviriyapanich, 2012)

Kodur (2003) ได้ศึกษาแนวทางการออกแบบการทนไฟของเสาคอนกรีตกำลังสูง เปรียบเทียบกำลังของเสาคอนกรีตปกติ (NSC) และเสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC) ปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างเสาในสภาวะเกิดไฟ เพื่อลดการหลุดร่อนและเสริมความสามารถการทนไฟของเสา โดยการหล่อเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 305x305 มม. ยาว 3,810 มม. ที่อายุ 28 วัน เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิ การเสีรูปร่างในแนวแกนภายในของเสาคอนกรีตปกติ (NSC) และเสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC) และผลการทดสอบตามรูปภาพ 2.11

เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลการทนไฟของเสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC) โดยใช้แบบจำลองทำนายพฤติกรรม การคำนวณอุณหภูมิของไฟ อุณหภูมิที่ทำให้เสีรูปร่าง และเสีกำลังของคอนกรีต รูปแบบตัวแปรต่างๆสามารถตอบสนองการลดกำลังที่จะพึงจากการลดกำลังเนื่องจากไฟไหม้โดยการเปรียบเทียบผลจากการจำลองของเสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC) พบว่าการทนไฟและขอบเขตการหลุดร่อนในเสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC) ขึ้นกับน้ำหนักที่กดลงเสา ประเภทของมวลรวม และชนิดของไฟ



(a) NSC Column



(b) HSC Column

ภาพประกอบ 2.10 เปรียบเทียบการหลุดร่อนในเสาคอนกรีตปกติ (NSC) และเสาคอนกรีตกำลังสูง (HSC) หลังจากการทดสอบความต้านทานไฟ (Kodur, 2003)

Li และคณะ (2013) ได้ศึกษาคุณสมบัติและการลดลงของคอนกรีตหลังจากสัมผัสกับไฟไหม้ ตรวจสอบผลกระทบของอุณหภูมิ ความร้อน การเสียดำล้างของคอนกรีต หลังจากการบ่ม ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น ทั้งที่ทำให้เย็นตัวด้วยน้ำและเย็นตัวในอากาศ คอนกรีตเมื่อได้รับความร้อนน้อยกว่า 750 องศาเซลเซียส กำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามเวลา

ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์ (2555) ได้ศึกษา การประเมินคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะเสื่อมสภาพเมื่อถูกเพลิงไหม้หากจะนำโครงสร้างดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ การซ่อมแซมอาจเป็นตัวเลือกที่ดี ในแง่ของค่าใช้จ่ายและเวลา แต่ทั้งนี้การซ่อมแซมจะกระทำที่ผิวซึ่งความเสียหายจากเพลิงไหม้ก็จะเกิดขึ้นที่ผิวเช่นกัน โดยอุณหภูมิแต่ละระดับจะทำให้เกิดความเสียหายที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทราบถึงระดับความเสียหายที่ผิวดังกล่าวก่อน จึงจะหาวิธีการซ่อมแซมผิวหน้าที่เหมาะสมกับความเสียหายนั้นๆ ได้ การศึกษาเพื่อตรวจสอบและจำแนกระดับความเสียหายขององค์อาคารที่เกิดเพลิงไหม้ โดยจะมีดัชนีชี้วัดคือการทดสอบแบบไม่ทำลายและแบบกึ่งทำลาย ในงานวิจัยจะใช้ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กซึ่งถูกเผาไฟเพียงด้านเดียวที่ระยะเวลา 30 60 90 และ 120 นาที ตามมาตรฐาน ASTM E119 แล้วจึงตรวจสอบสภาพความเสียหาย โดยใช้การทดสอบ 2 วิธีได้แก่ การทดสอบแบบไม่ทำลายประกอบด้วย การตรวจสอบด้วยสายตา ผลที่ได้คือความเสียหายของชิ้นตัวอย่างจะรุนแรงขึ้น และสีจะเปลี่ยนชัดเจนขึ้นเมื่อถูกเผาไปเป็นระยะเวลานานขึ้น การทดสอบด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อหาระดับความลึกที่เสียหายซึ่งจะตรวจวัดและคำนวณความเสียหายได้ตั้งแต่ปานกลางจนถึงมาก และการทดสอบแบบกึ่งทำลายประกอบด้วย วิธีค้อนกระแทก ซึ่งผลการทดสอบพบว่ายิ่งระยะเวลาถูกเผาไฟนานขึ้นค่าการสะท้อนจะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ การเจาะทดสอบเพื่อดูความสมบูรณ์ของชิ้นตัวอย่างและระดับความลึกของของสีที่เปลี่ยนไป ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลของวิธีคลื่นอัลตราโซนิกแล้วจะมีค่าที่มากกว่า และการดึงทดสอบ ซึ่งพบว่าแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตมีแนวโน้มที่ลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ เมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์ร่วมกันจะสามารถสร้างเป็นตารางสำหรับจำแนกระดับความเสียหายของคอนกรีตเสริมเหล็กและสามารถทำนายความลึกของของผิวที่มีกำลังดึงทดสอบที่ยอมให้สำหรับการซ่อมแซมได้

บัณฑิต คมกริชวรากุล (2544) ได้ศึกษาวิธีการเพิ่มความสามารถในการทนไฟให้แก่แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงตั้งภายหลังชนิดยัดเหนียว ในการศึกษาใช้แผ่นพื้นตัวอย่างขนาด 2.8x1.5 เมตร หนา 12 ซม. ทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง โดยในแต่ละชิ้นตัวอย่างมีการฝังท่อร้อยลวดที่มีลวดอัดแรงและวัสดุเกราท์อยู่ภายใน ตัวแปรที่ศึกษาในการเพิ่มความสามารถในการทนไฟในงานวิจัยนี้ ได้แก่ 1. ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมปกติที่ท้องพื้น 2. ความหนาของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว 3. ชนิดของวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์ในท่อร้อยลวด 4. การทาสารอินทุมเอสเซนที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้น และ 5.

การติดแผ่นยับซึมทนไฟที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้น โดยในการทดสอบทำโดยการติดตั้งชิ้นตัวอย่างที่ด้านบนของเตาเผา และให้ผิวด้านล่างของชิ้นตัวอย่างสัมผัสกับอุณหภูมิตามมาตรฐาน ASTM E119 ระหว่างการทดสอบทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในเตา อุณหภูมิของคอนกรีตที่ผิวบน และที่ระดับ 3 6 และ 9 ซม. จากผิวล่างของแผ่นพื้น อุณหภูมิของเหล็กเสริมปกติ อุณหภูมิของเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดการหลุดร่อนของคอนกรีตที่เกิดขึ้น โดยอัตราการทนไฟของชิ้นตัวอย่างจะพิจารณาจากอุณหภูมิของลวดอัดแรงเป็นหลัก และใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM E119 เป็นตัวกำหนดอัตราการทนไฟของชิ้นตัวอย่าง ผลการศึกษาพบว่าสำหรับชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบ การลดระยะห่างเหล็กเสริมจาก 40 เป็น 20 ซม. ไม่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถทนไฟของแผ่นพื้น การเพิ่มความหนาของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวเพิ่มความสามารถทนไฟที่ดีที่สุด การเปลี่ยนส่วนผสมของวัสดุเกราะช่วยเพิ่มความสามารถทนไฟได้เล็กน้อย การทำสารอินทุมเนสเซนซ์ที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นสามารถชะลอการเพิ่มอุณหภูมิของลวดอัดแรงได้ในช่วง 2 ชั่วโมง และการติดแผ่นยับซึมที่ผิวล่างของแผ่นพื้นอาจมีผลทำให้เกิดการประลัยของแผ่นพื้นอย่างกะทันหันอันเนื่องมาจากการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีตภายหลังจากการหลุดร่อนของแผ่นยับซึม นอกจากนี้ยังพบว่าทฤษฎีการนำความร้อนภายใต้สภาวะแปรปรวน สามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะการเพิ่มอุณหภูมิของชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบได้

Limpaninlachat (2012) ได้ศึกษา พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็ก หลังถูกเพลิงไหม้และวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน พบว่าการเสริมกำลังของโครงสร้างสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมคือการ เสริมกำลังโครงสร้างด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอัตราส่วนกำลังต่อ น้ำหนักสูง มีความสามารถทนทานต่อการกัดกร่อนสูง และเป็นวัสดุที่สะดวกต่อการนำมาใช้ในงาน การศึกษาผลกระทบจากเพลิงไหม้ที่มีผลต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างที่เสียหายและวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพื่อโดยทำการสร้าง แบบจำลอง Interfacial stress-slip อุณหภูมิของเพลิงไหม้ตามมาตรฐานกราฟอุณหภูมิเปลวไฟ-เวลา ASTM E119 และกำหนดให้ อุณหภูมิของไฟ (0 45 และ 90 นาที) ความยาวของวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย (15 20 และ 30 เซนติเมตร) และ ระยะ หุ้มเหล็กเสริม (1 2 3 เซนติเมตร) เป็นตัวแปรในการทดลอง หลังจากทำการทดสอบตัวอย่าง ด้วยวิธี Modified pull out test จะสามารถสร้างกราฟการกระจายความเครียด ซึ่งเป็นขั้นตอน พื้นฐานของการสร้างแบบจำลอง Interfacial stress-slip ระหว่างคอนกรีตที่เสียหายและวัสดุ โพลีเมอร์เสริมเส้นใย

เอกชัย กลิ่นบุบผา และคณะ (2558) ได้ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตหลังการเผาด้วยอุณหภูมิสูง ได้นำคอนกรีตไปเผาที่อุณหภูมิ 600 800 และ 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำมาทดสอบ พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตลดลง กำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 8.4 ถึง 11.7 ของกำลังอัด ส่วนความเร็ว คลื่นอัลตราโซนิคที่วิ่งผ่านตัวอย่างคอนกรีต มีค่าลดลงอย่างมาก นอกจากนี้ยังพบว่าทำให้คุณสมบัติของตัวอย่างคอนกรีตเย็นตัวในเตาเผา ส่งผลต่อการลดลงของกำลังอัดและกำลังรับแรงดึงแบบผ่าซีกของคอนกรีตมากที่สุด รองลงมาคือทำให้เย็นตัวในอากาศ และการแช่ในน้ำทันที

ปฐมเมศ ภาณิตพจมาน และทีฆทัศน์ หทัยพิทักษ์ (2558) ศึกษาการทนไฟของชิ้นส่วนโครงสร้าง คอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งออกแบบตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 (2549) แบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ ข้อกำหนดสำหรับอัตราการทนไฟที่ต้องการ ทั้งโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กและโครงสร้างเหล็ก ศึกษาข้อกำหนดความปลอดภัยด้านอัคคีภัย โดยวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของหน้าตัดเสาคานและพื้นคอนกรีต ขนาดต่างๆ จากแบบจำลองไฟในเอลิเมนต์ ภายใต้อุณหภูมิไฟในระยะเวลาตามมาตรฐาน ASTM E119 ระยะเวลาการทนไฟที่ต้องการ ตามกฎกระทรวง พบว่าสำหรับหน้าตัดวงกต ซึ่งมีการหุ้มป้องกันเหล็กเสริมตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 ตามเกณฑ์ขั้นต่ำ กำลังของเหล็กเสริมที่เหลืออยู่ในหลายกรณีมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 40 โดยเฉพาะกรณีเหล็กเสริมบริเวณมุมมีกำลังที่กำลังต่ำกว่าร้อยละ 25 ซึ่งกำลังของเหล็กเสริมที่เหลืออยู่ถือว่าน้อยกว่าเกณฑ์การออกแบบการทนไฟที่ใช้ทั่วไป

กานต์สินี แก้วเพชร และพรพรรณ อริยะสุข (2558) ได้ศึกษารูปแบบรอยร้าวและกำลังของคอนกรีตที่เสียหายจากไฟ โดยพัฒนาแบบจำลองทางวัสดุเพื่อศึกษาพฤติกรรมและรอยแตกร้าวภายในโครงสร้างคอนกรีตที่ถูกไฟเผา ซึ่งอาศัยหลักการของ Rigid Body Spring Model (RBSM) และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการของตัวอย่างคานคอนกรีตล้วนและคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่สภาวะอุณหภูมิ 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส พบว่าแบบจำลองสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการเกิดรอยแตกร้าวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ โดยความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานและน้ำหนักบรรทุกมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง รวมถึงรูปแบบรอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลอง

ทรงเกียรติ หาญสันติ และชัชชาติ สิทธิพันธุ์ (2544) ได้ทำการศึกษา พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้ โดยจำลองสภาพไฟไหม้ตามมาตรฐาน ASTM E119 พบว่าค่ากำลังอัดของลูกคอร์กคอนกรีตหลังเผาไฟ แนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟและมีแนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี Ultrasonic pulse velocity นอกจากนี้ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ เพราะช่วยป้องกันความร้อนจากไฟ โดยระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. ที่ทดสอบความสามารถช่วยคงคุณสมบัติ

กำลังดึงคราก และกำลังดึงประลัยภายหลังเผาไฟให้ลดลงในไม่เกินร้อยละ 5 สำหรับการเผาไฟไม่เกิน 90 นาที และจากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นภายหลังเผาไฟ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงในนัยสำคัญ และยังพบอีกว่า กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลมจะเหลือไม่ถึงร้อยละ 50 หลังจากเผาไฟ 15 นาทีในทุกระยะคอนกรีตหุ้ม กำลังเฉือนของคานลดลงประมาณ ร้อยละ 10 ทุกๆ 30 นาที หากการเผาไฟที่ไม่เกิน 60 นาที ไม่ส่งผลต่อค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ศึกษา แต่ที่ระยะเวลาในการเผาไฟ 90 นาทีค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษาลดลง ร้อยละ 16 และ ร้อยละ 15 ตามลำดับ



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาโดยมีรายละเอียดและขั้นตอนในการทำวิจัยดังนี้  
ในบทนี้ได้กล่าวถึง วัสดุ เครื่องมือ และวิธีในการดำเนินงานวิจัย โดยสรุปดังนี้

- 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง
- 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้
- 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

#### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 ปูนซีเมนต์

ใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม  
แห่งประเทศไทย มอก. 15-2547 ซึ่งเก็บและบรรจุไว้โดยไม่มี ความชื้น

##### 3.1.2 ททราย

ใช้ทรายแม่น้ำโดยมีการกระจายขนาดคละของทรายตามมาตรฐาน American  
Society of Testing and Materials C 136

##### 3.1.3 หิน

ใช้หินขนาดโตสุด 1/2 นิ้ว ตามมาตรฐาน American Society of Testing and  
Materials C 33-85

##### 3.1.4 ไม้แกลบ

ไม้แกลบ นำไม้แกลบดำไปบดด้วยเครื่องบดแบบตกรกระทบให้ได้ขนาดที่ค้ำบนตระ  
แกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

##### 3.1.5 น้ำ

ใช้น้ำประปาสะอาดในการผสมคอนกรีต

##### 3.1.6 สารผสมเพิ่ม

ใช้สารน้ำยาลดน้ำพิเศษ ชนิด F ตามมาตรฐาน American Society of Testing  
and Materials C 494

### 3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้

- 3.2.1 เครื่องบดแบบตกรกระทบ
- 3.2.2 เครื่องผสมคอนกรีต
- 3.2.3 เครื่องทดสอบกำลังอัด
- 3.2.4 ชุดทดสอบหาค่ายุบตัว
- 3.2.5 เต้าเผาอุณหภูมิสูง
- 3.2.6 ชุดทดลองหาความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์
- 3.2.7 ชุดตะแกรงร่อนมาตรฐาน
- 3.2.8 แบบหล่อคอนกรีต
- 3.2.9 เครื่องวัดอุณหภูมิ
- 3.2.10 เครื่องชั่งน้ำหนัก
- 3.2.11 เครื่องถ่ายภาพขยายกำลังสูง (Scanning Electron Microscope, SEM)
- 3.2.12 เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence, XRF)

### 3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

#### 3.3.1 การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของวัสดุ

3.3.1.1 ความถ่วงจำเพาะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบ โดยใช้ขวดมาตรฐาน เลอชาเตอลิเออร์ (Le Chatelier Flask) ตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 188 (1997)

3.3.1.2 การกระจายและขนาดคละของทรายและหิน เป็นการวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวม โดยใช้ตะแกรงตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 136-01 และหาค่าโมดูลัสความละเอียด (Fineness Modulus, F.M) โดยค่าที่ได้บ่งบอกว่าเป็นลักษณะของมวลรวมละเอียดหรือหยาบ

3.3.1.3 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทรายและหิน เป็นการทดสอบหาความถ่วงจำเพาะสภาพแห้ง (Bulk specific gravity-oven dry) ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้ง (Bulk Specific Gravity-Saturated Surface Dry) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (Apparent Specific Gravity) และร้อยละการดูดซึมน้ำ (Percentage of Absorption) ของทรายตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 128-01 (1997) และ C 127-01 (1997)

3.3.1.4 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างของมวลรวม เป็นค่าน้ำหนักของมวลรวมทั้งหมดในหนึ่งหน่วยปริมาตร โดยรวมช่องว่างระหว่างมวลรวมใช้สำหรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักเป็นค่าปริมาตร หรือค่าปริมาตรเป็นน้ำหนักเพื่อใช้ในการออกแบบส่วนผสม โดยทดสอบตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 29 (1997)

3.3.1.5 ความละเอียดของอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบละเอียด โดยทดสอบตามมาตรฐาน American Society of Testing and Materials C 430 (1997) ใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตร โดยนำตัวอย่างใส่ตะแกรงร้อนผ่านน้ำจมน้ำใส จากนั้นนำส่วนที่ค้างบนตะแกรงไปอบหำร้อยละของน้ำหนักที่ค้าง

3.3.1.6 ภาพขยายกำลังสูงของเถ้าแกลบละเอียด โดยการถ่ายภาพ Scanning Electron Microscope (SEM)

3.3.1.7 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และเถ้าแกลบโดยใช้เครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (X-Ray Fluorescence, XRF) ซึ่งอยู่ในรูปองค์ประกอบของออกไซด์

### 3.3.2 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

#### 3.3.2.1 การออกแบบส่วนผสม

คอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยออกแบบกำลังอัดของคอนกรีตควบคุมโดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นวัสดุประสานเพียงอย่างเดียวที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 300 500 และ 700 กก./ชม.<sup>2</sup> จากนั้นนำเถ้าแกลบละเอียดมาแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราร้อยละ 0 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

#### 3.3.2.2 สัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

CC หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เพียงอย่างเดียว

RA หมายถึง เถ้าแกลบละเอียด

สัญลักษณ์ตัวเลข 20 และ 30 คือ ร้อยละของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ด้วยเถ้าแกลบละเอียด

ตัวอย่างสัญลักษณ์ 20-RA หมายถึง คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบละเอียดในอัตราการแทนที่ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

30-RA หมายถึง คอนกรีตควบคุมที่ผสมเถ้าแกลบละเอียดในอัตราการแทนที่ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน

ตาราง 3.1 ส่วนผสมของคอนกรีต

ประเภท คอนกรีต	อัตราส่วนผสม (กก./ชม. <sup>3</sup> )					
	น้ำ	ปูนซีเมนต์	เถ้าแกลบ บดละเอียด	ทราย	หิน	สารผสม เพิ่มชนิด F (กก.)
CC300	200	285	0	841	1018	2
10-RA300	203	257	28	837	1012	2
20-RA300	203	229	57	833	1006	2
30-RA300	206	200	86	829	1000	2
CC500	180	439	0	670	1024	3.6
10-RA500	180	395	44	667	1020	3.6
20-RA500	180	351	88	664	1015	3.6
30-RA500	180	307	132	662	1011	3.6
CC700	160	533	0	644	1024	4.8
10-RA700	160	480	53	641	1019	4.8
20-RA700	160	426	107	637	1013	4.8
30-RA700	160	373	160	634	1008	4.8

CC = Control Concrete RA = Rice husk ash 10 20 30 = Percent Replacement

### 3.3.2.3 การผสมและหล่อคอนกรีต

การผสมคอนกรีตใช้เครื่องผสมแบบกะทะ ตามมาตรฐาน American society of Testing and materials C 192 และหล่อคอนกรีตโดยใช้แบบหล่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. สูง 200 มม. บรรจุคอนกรีตลงในแบบ 3 ชั้น ในปริมาณชั้นละเท่าๆ กัน แต่ละชั้น กระทุ้งด้วยเหล็กปลายกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ชั้นละ 25 ครั้ง

การหล่อเสาคอนกรีต ประกอบเหล็กยื่นและเหล็กปลอก ประกอบแบบหล่อเสา คอนกรีตขนาด 0.20x0.20 เมตร สูง 0.80 เมตร ตรวจสอบการได้ดิ่งของแบบหล่อ นำเหล็กที่เตรียมไว้ใส่ในแบบหล่อ จัดเหล็กให้อยู่ในตำแหน่ง จากนั้นเทคอนกรีตลงในแบบหล่อให้เต็ม ปรับแต่งผมหัน

ให้มีความเรียบโดยใช้เกรียงเหล็ก ถอดแบบหล่อที่อายุ 1 วัน ทาด้วยน้ำยาบ่มคอนกรีต รักษา อุณหภูมิ ควบคุมและป้องกันการระเหยของน้ำโดยใช้กระสอบเพื่อควบคุมอุณหภูมิของคอนกรีต

### 3.3.3 การทดสอบคอนกรีต

#### 3.3.3.1 การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต (Slump test)

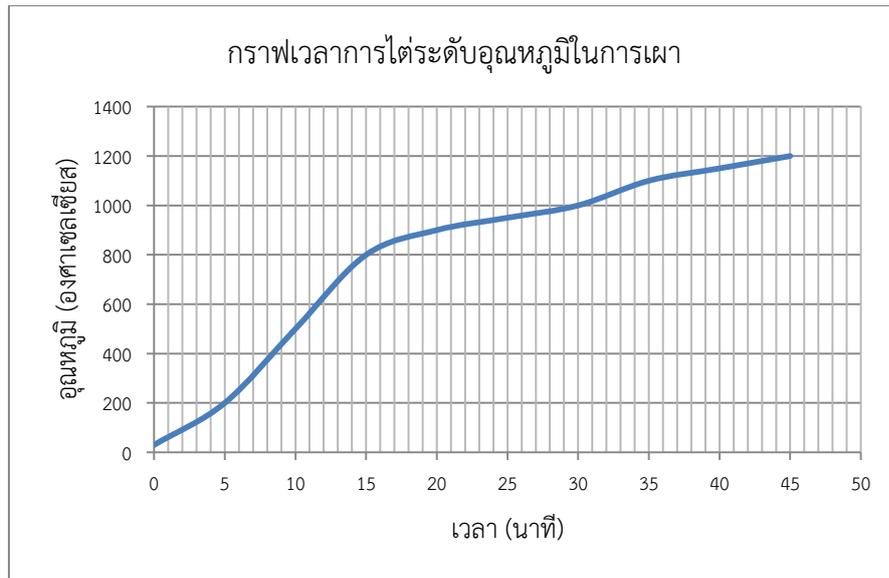
การทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีต ตามมาตรฐาน American society of Testing and Materials C 143-90a โดยควบคุมให้มีค่ายุบตัวไม่น้อยกว่า  $10 \pm 2$  ซม. ซึ่งใช้แบบกรวยเส้นผ่านศูนย์กลางตอนบน 102 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางตอนล่าง 203 มม. สูง 305 มม. โดยบรรจุคอนกรีตลงในแบบ 3 ชั้น ในปริมาณชั้นละเท่าๆกันแต่ละชั้นกระทุ้งด้วยเหล็กปลายกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. ยาว 600 มม. ชั้นละ 25 ครั้ง จากนั้นยกแบบออกแล้ววัดค่ายุบตัว

#### 3.3.3.2 การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength)

หลังจากถอดแบบคอนกรีตที่มีอายุ 1 วัน แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำที่ห้องควบคุม อุณหภูมิ  $23 \pm 2$  องศาเซลเซียส โดยทำตามมาตรฐาน American society of Testing and materials C 192 เมื่อครบอายุการทดสอบ ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ที่อายุ 90 วัน ตามมาตรฐาน American society of Testing and materials C 39 โดยหล่อผิวหน้าให้สม่ำเสมอด้วยกัมมะถัน ตามมาตรฐาน American society of Testing and materials C 617 ก่อนการทดสอบ

#### 3.3.3.3 การเผาคอนกรีต

หลังจากหล่อคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.10 เมตร. สูง 0.20 เมตร. และเสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด  $0.20 \times 0.20$  เมตร สูง 0.80 เมตร ตามกำลังอัดที่ออกแบบ 300 500 และ 700 กก./ซม.<sup>2</sup> แล้วนำตัวอย่างไปบ่มในน้ำที่อายุ 90 วัน และนำตัวอย่างขึ้นจากน้ำแล้วผึ่งให้แห้ง จากนั้นเริ่มการเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 60 120 180 และ 240 นาที เมื่อเผาตัวอย่างแล้วเสร็จนำไปตรวจสอบผิวคอนกรีต ต่อมาทำการนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่ากำลังอัด



ภาพประกอบ 3.1 กราฟเวลาการไต่ระดับอุณหภูมิในเตาเผาสอดคล้องกับตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุ  
ASTM E119

### ตัวอย่างรายการคำนวณการออกแบบเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ข้อกำหนด เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เสาภายในปลอกเดี่ยว กำหนดค่า  $f_y = 3,000$  กก./ชม.<sup>2</sup>  
 $f'_c = 300$  กก./ชม.<sup>2</sup> กำลังรับน้ำหนักน้อยสุดของเสา ออกแบบเสาขนาด 0.20x0.20 เมตร โดยวิธี  
กำลัง

ข้อกำหนดที่ใช้ออกแบบ

$$f'_c = 300 \text{ กก./ชม.}^2$$

$$f_y = 3,000 \text{ กก./ชม.}^2$$

ขนาดหน้าตัดของเสา 0.20x0.20 เมตร

ระยะ Covering=2.50 ซม.

ใช้เหล็กข้ออ้อย 4-DB12

Sol<sup>n</sup>

จากสมการ

$$\begin{aligned}
 \text{หาค่า } P_n \text{ จากสูตร } P_n &= 0.80[0.85 f'_c(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \\
 &= 0.80 \times [(0.85 \times 0.30 \times (20^2 - (4 \times 1.13))) + (3 \times 4 \times 1.13)] = 88.444 \text{ ตัน} \\
 P_u &= \phi P_n = 0.7 \times 94,293 = 58.410 \text{ ตัน}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{หาค่า } P_0 \text{ จากสูตร } P_0 &= f_y A_{st} + f'_c (A_g - A_{st}) \\
 &= [(3 \times 4 \times 1.13) + ((0.30) \times (20^2 - 4.25))] = 132.285 \text{ ตัน}
 \end{aligned}$$

ออกแบบเหล็กปลอก

ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง 16 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กยื่น  
 $= 16 \times 1.2 = 19.2$  ซม.

ระยะเรียงเหล็กลูกตั้ง 48 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กลูกตั้ง  
 $= 48 \times 0.6 = 28.8$  ซม.

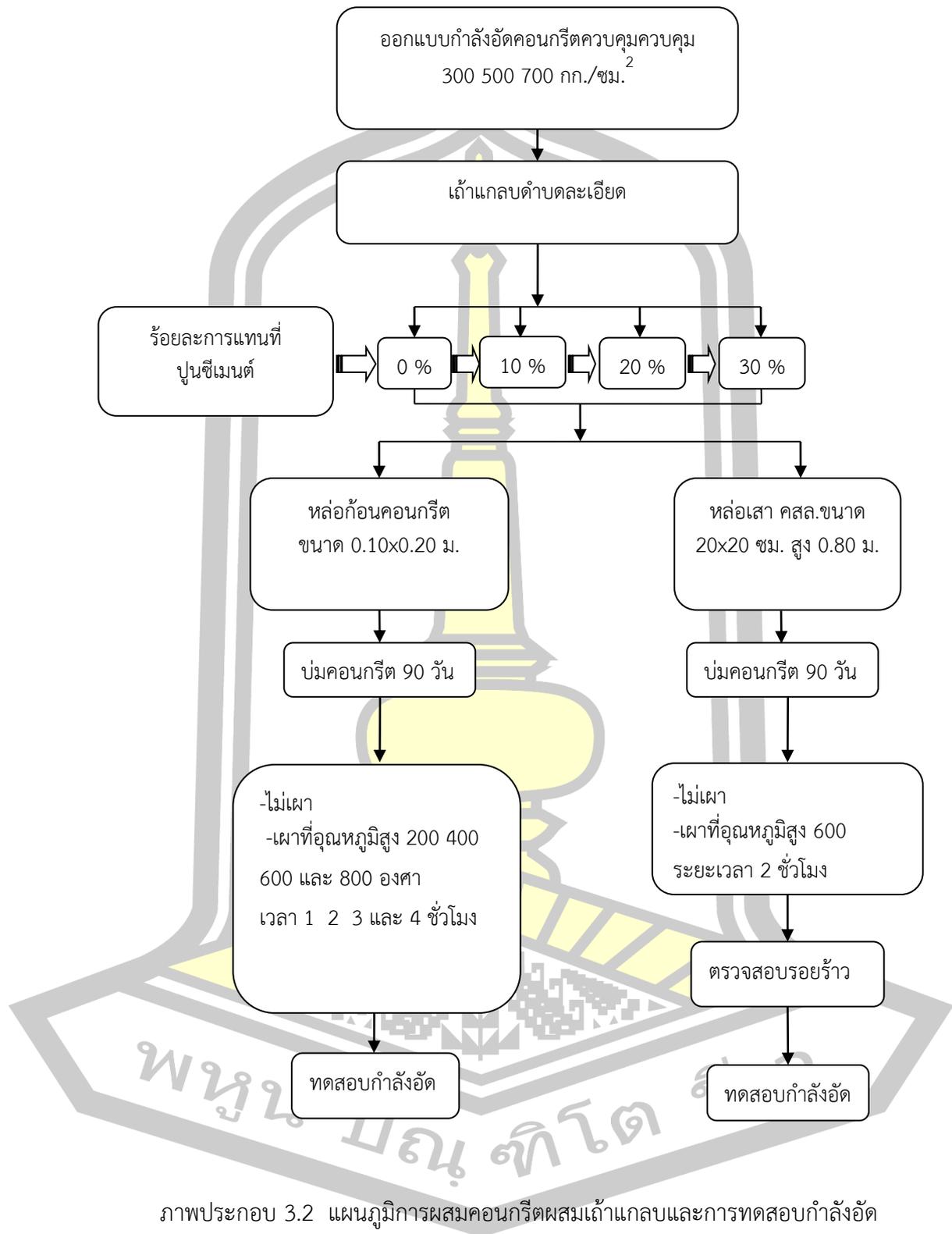
ด้านแคบสุดของเสา = 20 ซม.

ดังนั้นระยะเหล็กปลอกน้อยที่สุด 1-RB6 @ 19.2 ซม. เลือกใช้เหล็กปลอก

1-RB6 @ 20 ซม.

ตาราง 3.2 การคำนวณกำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

เสาปลอกเดี่ยวขนาด 0.20x0.20x0.80 เมตร	กำลังอัดของเสา(ตัน)		
f 'c (ksc)	$P_u = \phi P_n$	$P_n$	$P_0$
300	58.41	88.44	132.28
500	97.35	139.47	211.43
700	136.29	194.70	290.58



ภาพประกอบ 3.2 แผนภูมิการผสมคอนกรีตผสมแกลบและการทดสอบกำลังอัด

## บทที่ 4

### ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ในบทนี้ได้กล่าวถึง คุณสมบัติพื้นฐาน ทั้งทางกายภาพ และเคมี ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- 4.1 สมบัติของวัสดุ
- 4.2 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด
- 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก
- 4.4 กำลังอัดของเสาคอนกรีตแบบไม่ทำลาย
- 4.5 กำลังอัดของเสาคอนกรีตแบบทำลาย
- 4.6 วิเคราะห์การวิบัติจากกำลังอัดของเสาคอนกรีต

#### 4.1 สมบัติของวัสดุ

##### 4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบ

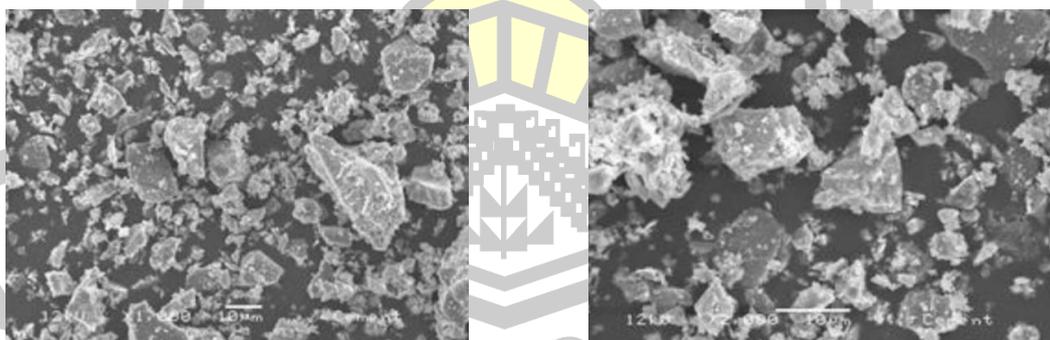
จากตารางที่ 4.1 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประกอบด้วยออกไซด์หลัก (Major oxides) ได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) อลูมินาออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ทั้ง 4 นี้รวมกันได้ร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ จึงเป็นसानประกอบหลักที่กำหนดคุณสมบัติและคุณภาพของปูนซีเมนต์ เถ้าแกลบมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่คือ SiO<sub>2</sub> ร้อยละ 90.2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 0.67 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ร้อยละ 0.95 รวมร้อยละ 82.91 มีค่าการสูญเสียจากการเผาไหม้ LOI ร้อยละ 41.3 และ SO<sub>3</sub> ร้อยละ 21.0 ตาม ASTM C 618 เถ้าแกลบบดละเอียดที่ใช้ในการวิจัยนี้จึงมีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดี เมื่อเถ้าแกลบบดละเอียดค้ำบดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 อยู่ที่ร้อยละ 5 (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรารกร วงศ์คำจันทร์, 2544; พิชร อ่อนพรม, 2557)

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบและปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

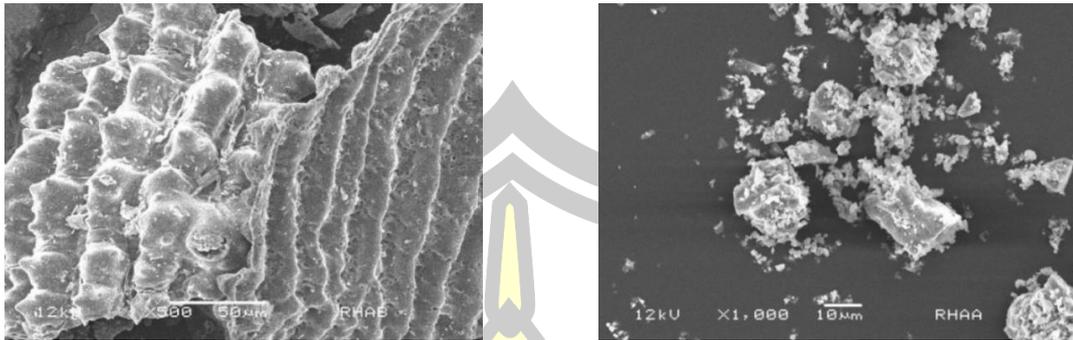
องค์ประกอบทางเคมี	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (%)	เถ้าแกลบ (%)
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	20.62	90.2
Aluminium oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.22	0.67
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.10	0.95
Calcium oxide (CaO)	65.0	0.94
Magnesium oxide (MgO)	0.91	0.49
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.50	0.12
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.07	3.75
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	2.70	0.21
Loss on ignition (LOI)	1.13	3.41

#### 4.1.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และเถ้าแกลบ

ถ่ายภาพโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีรูปร่างลักษณะโดยส่วนมากเป็นเหลี่ยมเป็นมุม พื้นผิวค่อนข้างเรียบ เนื้อแน่นไม่มีรูพรุน ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1 ส่วนลักษณะทางกายภาพเถ้าแกลบมีรูปร่างเป็นเหลี่ยมเป็นมุม ไม่แน่นอนผิวขรุขระ และมีรูพรุนสูง ดังแสดงในภาพประกอบ 4.2 ตามลำดับ



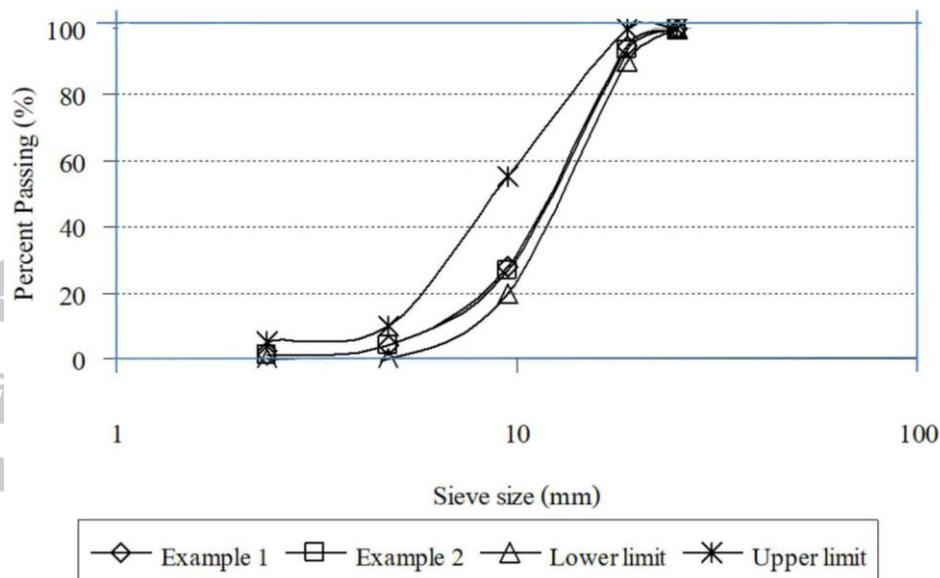
ภาพประกอบ 4.1 ภาพถ่ายขยายอนุภาคปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า



ภาพประกอบ 4.2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงอนุภาคเถ้าแกลบ กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า

#### 4.1.3 การกระจายขนาดคละของทรายและหิน

จากผลการวิเคราะห์หาขนาดคละของมวลรวมละเอียดโดยใช้ตะแกรง ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้มาจาก 2 ตัวอย่าง ในภาคผนวก 1 และ 2 พบว่าค่าโมดูลัสความละเอียดของทรายมีค่าเท่ากับ 2.76 และหินมีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.32 เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟเพื่อหาการกระจายขนาดคละของทราย ดังภาพประกอบ 4.3 พบว่าการกระจายตัวของทรายอยู่ในขอบเขตบนและล่างเป็นไปตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials (1997) จึงจัดเป็นทรายมาตรฐาน



ภาพประกอบ 4.3 การกระจายขนาดคละของทราย

#### 4.1.4 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของทราย

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของทราย ภาคผนวก 3 ซึ่งประกอบด้วยค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งเท่ากับ 2.61 ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.62 ความถ่วงจำเพาะปรากฏเท่ากับ 2.69 และร้อยละการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของทรายเท่ากับร้อยละ 1.37

#### 4.1.5 ความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของหิน

ผลการทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของหิน ภาคผนวก 4 ซึ่งประกอบด้วยค่าความถ่วงจำเพาะเฉลี่ยต่างๆ ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความถ่วงจำเพาะสภาพแห้งเท่ากับ 2.64 ความถ่วงจำเพาะอิ่มตัวผิวแห้งเท่ากับ 2.65 ความถ่วงจำเพาะแท้จริงเท่ากับ 2.68 และร้อยละการดูดซึมน้ำเฉลี่ยของหินเท่ากับ 0.79

#### 4.1.6 หน่วยน้ำหนักและช่องว่างของหิน

จากการทดสอบใช้หินจำนวน 2 ตัวอย่างในการหาค่าเฉลี่ย พบว่าหินที่ใช้ในการทดสอบมีหน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งเท่ากับ 1,573 กก./ลบ.ม. และมีร้อยละของปริมาณช่องว่างเฉลี่ยเท่ากับ 39.75 ดังตารางในภาคผนวก 5

#### 4.1.7 ความละเอียดของอนุภาคปูนซีเมนต์และเถ้าแกลบบดละเอียด

โดยการใช้ตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 ที่มีขนาดช่องเปิด 45 ไมโครเมตรในการหาความละเอียดของตัวอย่าง จากการทดสอบพบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 10.8 โดยน้ำหนัก และเถ้าแกลบบดละเอียดมีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 เท่ากับร้อยละ 3.4 ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials (1997 K : 296-298) ได้กำหนดไว้ว่าเถ้าแกลบที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานต้องมีปริมาณค้ำบนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 34 โดยน้ำหนัก

## 4.2 การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียด

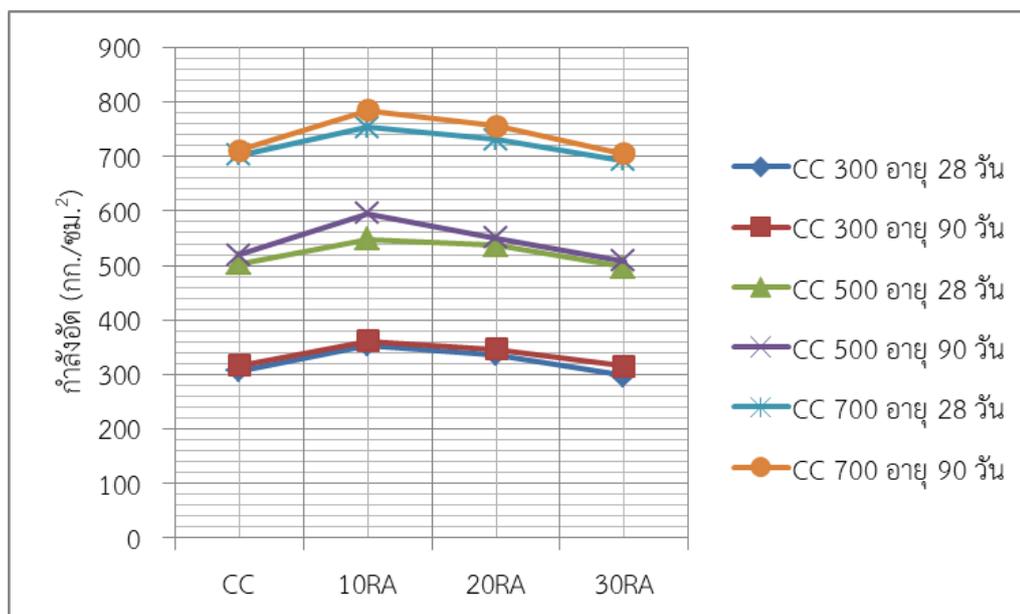
การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบเป็นไปอย่างต่อเนื่อง ความละเอียดของเถ้าแกลบมีส่วนสำคัญอย่างมาก สามารถช่วยในการทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้เร็วขึ้น เนื่องจากเถ้าแกลบบดละเอียดมีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ดังนั้นอนุภาคของเถ้าแกลบบดละเอียดจึงช่วยอุดช่องว่างในคอนกรีต ทำให้คอนกรีตแน่นขึ้นจึงรับกำลังอัดได้มากขึ้น

พิจารณาผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกแสดงในตารางที่ 4.2 พบว่า CC300 CC500 และ CC700 มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 306 503 และ 692 กก./ซม.<sup>2</sup> ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกำลังอัดที่ออกแบบไว้ และเมื่อแทนที่ด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 พบว่าคอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้น ร้อยละ 106 ถึง 112

ส่วนปริมาณการแทนที่ ร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยในปริมาณที่สูงเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่าคอนกรีตผสมเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยที่มีกำลังอัดเพิ่มขึ้นอีกประมาณร้อยละ 2-6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลานดังแสดงในภาพที่ 4.4 (ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล, 2547) ดังนั้นปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมสำหรับกำลังอัดสูงสุดคืออัตราการแทนที่ร้อยละ 10 แต่หากพิจารณาอัตราการทนไฟแทนที่สูงสุด ปริมาณการแทนที่ที่เหมาะสมคืออัตราการแทนที่ร้อยละ 20

ตาราง 4.2 กำลังอัดของคอนกรีตก่อนและหลังเผา

ประเภทคอนกรีต	ตัวอย่างทรงกระบอก	
	กำลังอัด (กก./ซม. <sup>2</sup> ) - ร้อยละกำลังอัด	
	อายุ 28 วันไม่เผา	อายุ 90 วัน ไม่เผา
CC 300	306-(100)	317-(100)
10RA300	354-(116)	361-(114)
20RA300	336-(110)	347-(109)
30RA300	298-(97)	315-(99)
CC 500	503-(100)	519-(100)
10RA500	548-(109)	595-(115)
20RA500	537-(107)	550-(106)
30RA500	497-(99)	508-(98)
CC 700	703-(100)	711-(100)
10RA700	753-(107)	785-(111)
20RA700	731-(104)	756-(107)
30RA700	692-(98)	705-(99)



ภาพประกอบ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและชนิดของคอนกรีตที่อายุ 28 และ 90 วัน

#### 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกก่อนและหลังการเผา

จากผลการทดสอบพบว่ากำลังอัดคอนกรีตควบคุมทรงกระบอก ที่อายุ 90 วัน CC300 CC500 และ CC700 มีค่าเท่ากับ 317 519 และ 711 กก./ชม.<sup>2</sup> เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงเท่ากับ 172 287 และ 397 กก./ชม.<sup>2</sup> โดยมีอัตราการลดกำลังคงเหลือคิดเป็นร้อยละ 54 55 และ 56 ของคอนกรีตควบคุม เห็นได้ว่ากำลังอัดลดลงประมาณร้อยละ 45 เกือบเท่ากันทุกส่วนผสมที่ออกแบบ

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดหลังการเผาพบว่าการแทนที่ร้อยละ 10-30 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดจะให้กำลังอัดหลังการเผาสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกการออกแบบ โดยการแทนที่ร้อยละ 20 จะให้กำลังอัดคงเหลือสูงสุดในทุกการออกแบบ โดยมีกำลังอัดร้อยละ 72 71 และ 78 ของคอนกรีตควบคุมก่อนการเผา ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดคงเหลือมีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมหลังการเผา แม้ว่ากำลังอัดก่อนการเผาจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย นั้นแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบบดละเอียดช่วยในการทนไฟของคอนกรีตได้ เนื่องจากเถ้าแกลบบดละเอียดจะทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์แล้วเปลี่ยนไปเป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตที่มีสมบัติการทนไฟที่ดีกว่าจึงทำให้กำลังอัดคงเหลือหลังการเผาของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบบดละเอียดสูงกว่านั่นเอง (Tanyildizi, Harun and Coskun Ahmet, 2008) แสดงในภาพ 4.2

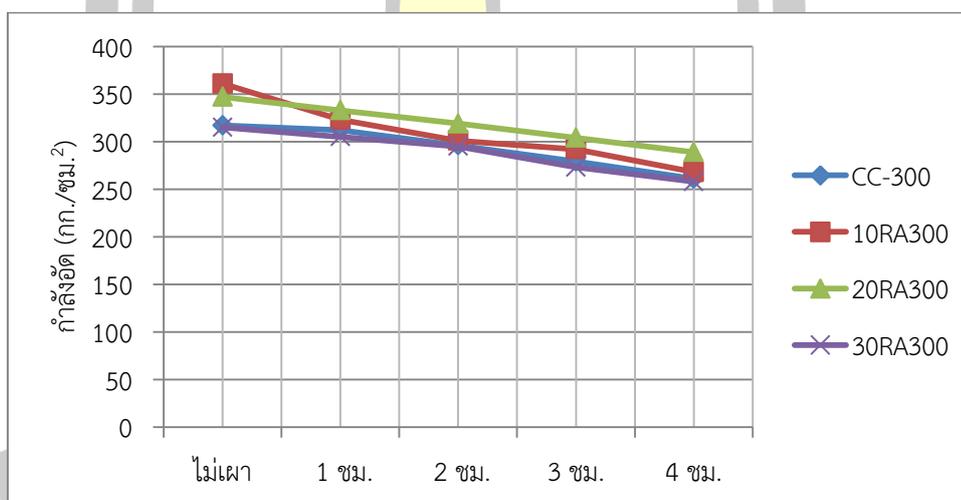
ตาราง 4.3 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก CC 300 ก่อนและหลังเผา

ประเภทคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม <sup>2</sup> ) - (ร้อยละกำลังอัด)				
	ไม่เผา	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 300	317-(100)	312-(98)	296-(93)	279-(88)	261-(82)
10RA300	361-(114)	323-(102)	301-(95)	292-(92)	268-(85)
20RA300	347-(109)	333-(105)	319-(101)	304-(96)	289-(91)
30RA300	315-(99)	305-(96)	295-(93)	273-(86)	258-(81)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 300	317-(100)	287-(91)	252-(79)	214-(68)	192-(61)
10RA300	361-(114)	309-(97)	268-(85)	238-(75)	209-(73)
20RA300	347-(109)	325-(103)	283-(89)	249-(79)	218-(69)
30RA300	315-(99)	278-(88)	249-(79)	213-(67)	187-(59)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 300	317-(100)	257-(81)	172-(54)	134-(42)	98-(31)
10RA300	361-(114)	274-(86)	213-(67)	149-(47)	106-(33)
20RA300	347-(109)	295-(93)	229-(72)	154-(49)	112-(35)
30RA300	315-(99)	255-(80)	179-(56)	129-(41)	97-(31)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 300	317-(100)	148-(47)	82-(26)	43-(14)	22-(7)
10RA300	361-(114)	173-(55)	87-(27)	46-(15)	25-(8)
20RA300	347-(109)	182-(57)	90-(28)	49-(15)	29-(9)
30RA300	315-(99)	159-(50)	80-(25)	40-(13)	19-(6)

ผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกคอนกรีตควบคุมที่ออกแบบกำลังอัด 300 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่อายุ 90 วัน

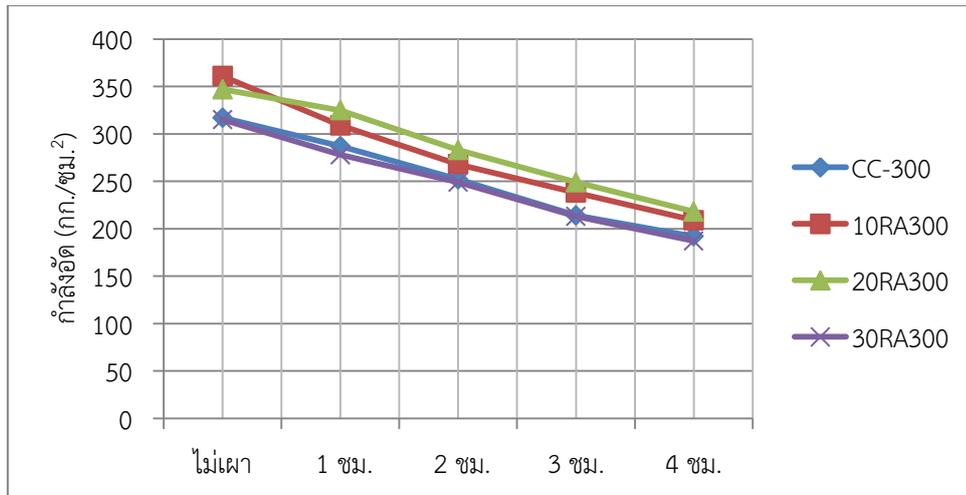
ภาพประกอบ 4.5 (ก-ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาในการเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดที่ออกแบบมีค่าลดลงเท่ากับ 317 กก./ซม.<sup>2</sup> อุณหภูมิที่ 600 องศาเซลเซียส มีความแปรผันสูงสุด โดยมีอัตราการลดกำลังคงเหลือคิดเป็นร้อยละ 81 54 42 และ 31 ของคอนกรีตควบคุม เห็นได้ว่าการกำลังอัดลดลงทุกส่วนผสมและมีกำลังคงเหลือที่ 4 ชั่วโมง ร้อยละ 31 แสดงในตาราง 4.3

พิจารณาคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดหลังการเผาพบว่าการแทนที่ร้อยละ 10-30 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดจะให้กำลังอัดหลังการเผาสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกการออกแบบ โดยการแทนที่ร้อยละ 20 จะให้กำลังอัดคงเหลือสูงสุดในทุกการออกแบบ โดยมีกำลังอัดร้อยละ 93 72 49 และ 35 ของคอนกรีตควบคุมก่อนการเผา ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดคงเหลือมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมหลังการเผา แม้ว่ากำลังอัดก่อนการเผาจะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย นั่นแสดงให้เห็นว่าเถ้าแกลบบดละเอียดช่วยในการทนไฟของคอนกรีตได้

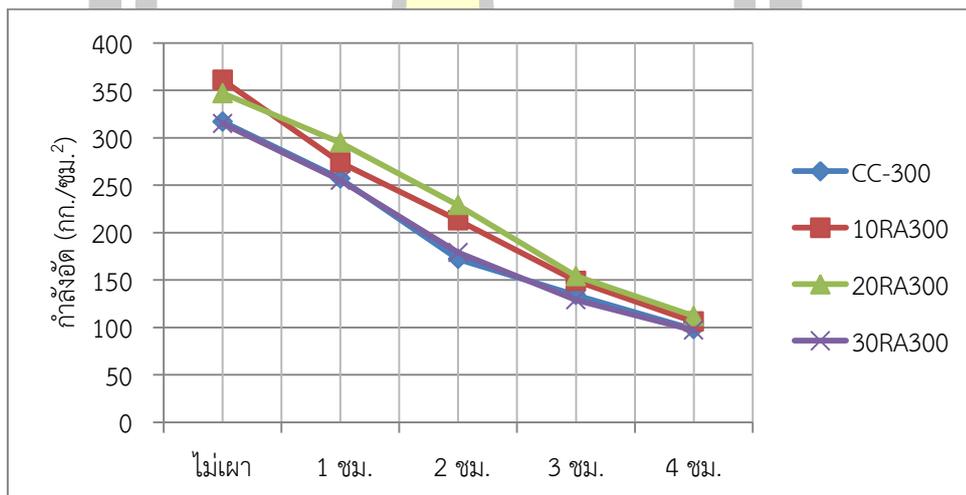


(ก) อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

พหุ ประถมศึกษา

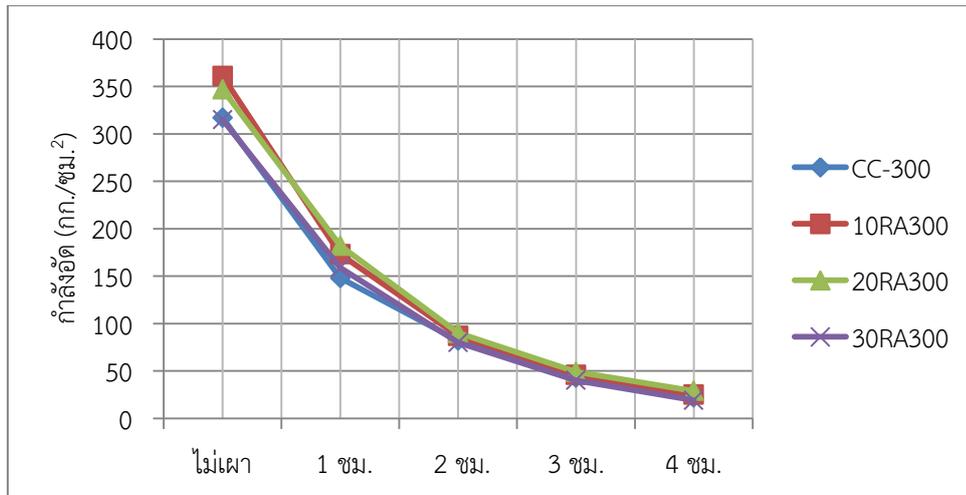


(ข) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส





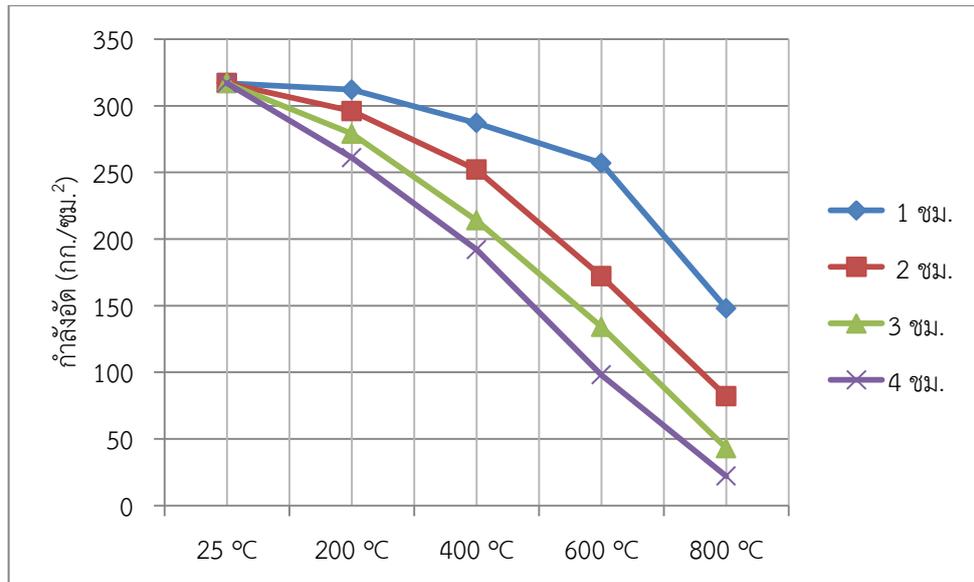
(ง) อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

#### ภาพประกอบ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาในการเผา

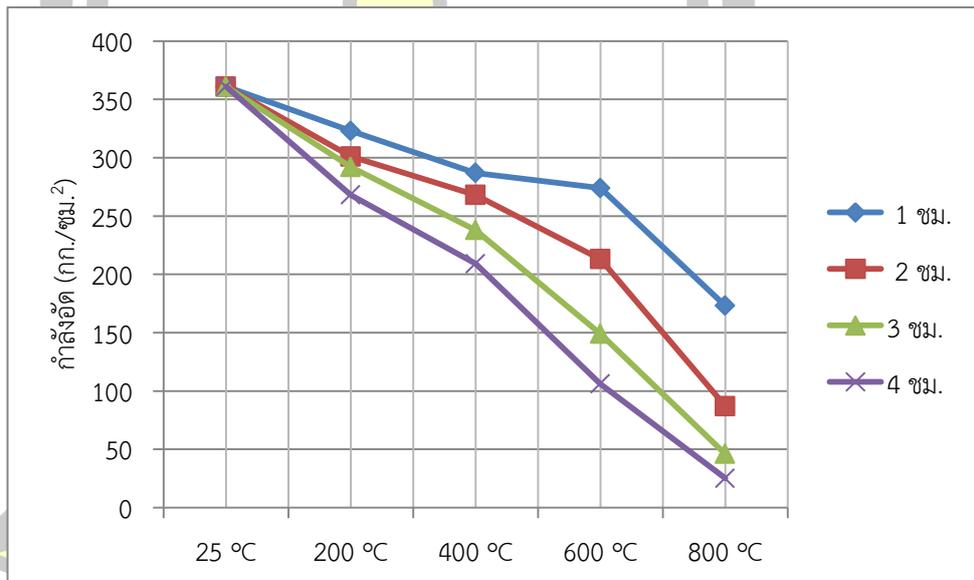
ผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 0.10 x 0.20 เมตร คอนกรีตควบคุมที่ ออกแบบกำลังอัด 300 กก./ชม.<sup>2</sup> ทดสอบที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 317 กก./ชม.<sup>2</sup> และเมื่อแทนที่ ด้วยแก้วเคลือบละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 361 และ 347 กก./ชม.<sup>2</sup> พบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นโดยการแทนที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 20 และลดลงเล็กน้อยเมื่อ แทนที่ในปริมาณร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 315 กก./ชม.<sup>2</sup> ปริมาณร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ภาพประกอบ 4.6 (ก-ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดลดลง ทุกการแทนที่และลดลงในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับ Matsudo และคณะ (2006)

พูน ปรณ ทิโต ชีเว

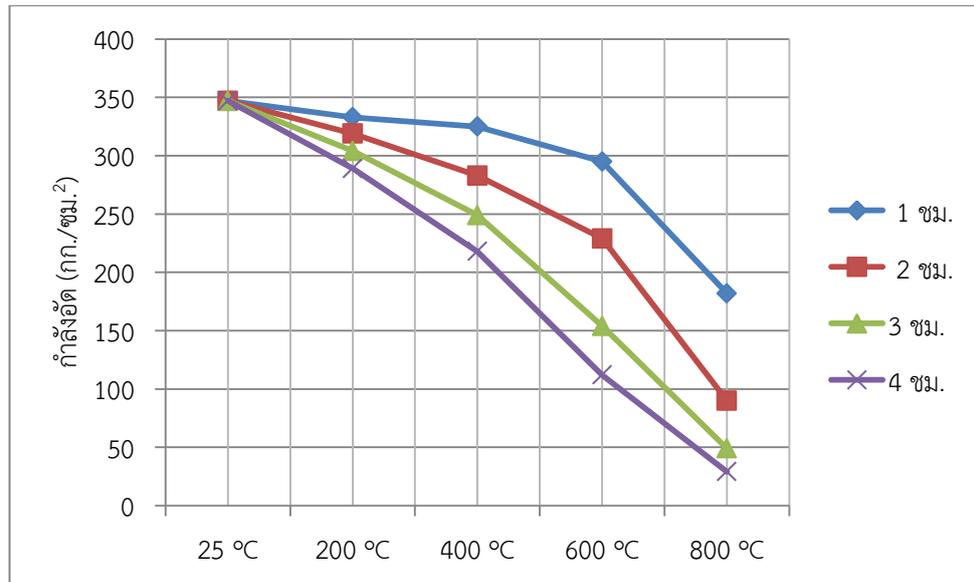


CC 300

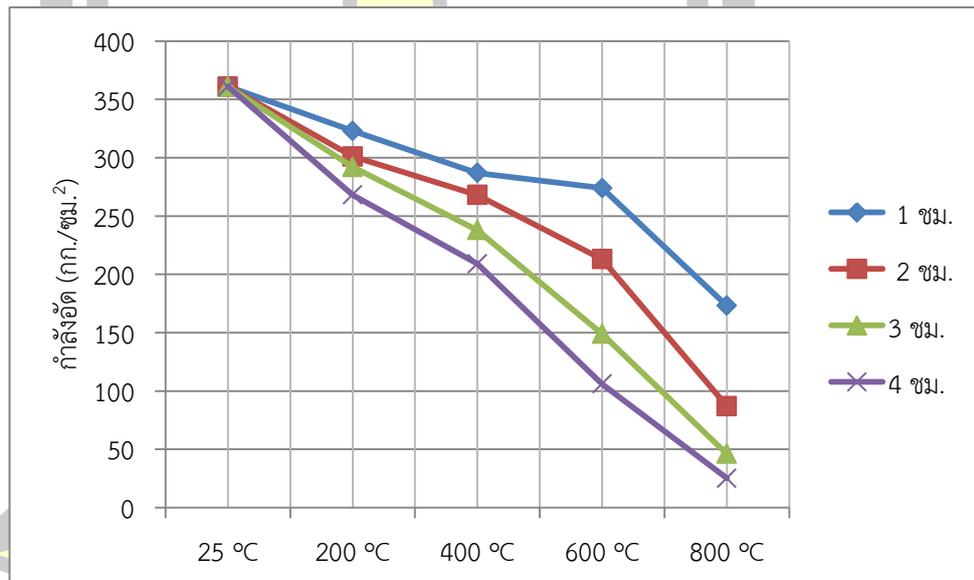


(ก) 10RA300

พหุ ประถมศึกษา ชีวะ



(จ) 20RA300



(ง) 30RA300

ภาพประกอบ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผา

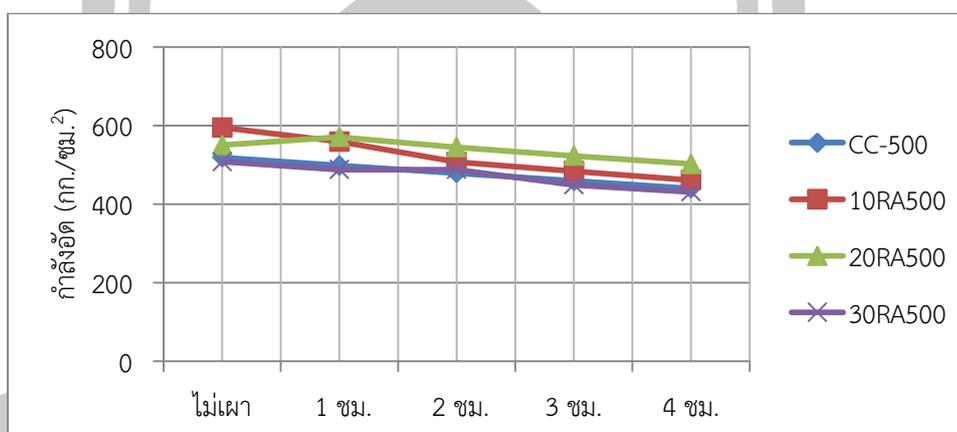
ตาราง 4.4 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก CC 500 ก่อนและหลังเผา

ประเภทคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม. <sup>2</sup> ) - (ร้อยละกำลังอัด)				
	ไม่เผา	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 500	519-(100)	498-(96)	479-(92)	459-(88)	440-(85)
10RA500	595-(115)	559-(108)	507-(98)	484-(93)	461-(89)
20RA500	550-(106)	571-(110)	545-(105)	523-(101)	502-(97)
30RA500	508-(98)	488-(94)	488-(94)	449-(87)	431-(83)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 500	519-(100)	448-(86)	359-(69)	332-(64)	314-(61)
10RA500	595-(115)	513-(199)	363-(70)	345-(66)	325-(73)
20RA500	550-(106)	558-(108)	386-(74)	362-(70)	345-(66)
30RA500	508-(98)	478-(92)	362-(70)	329-(63)	321-(62)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 500	519-(100)	332-(64)	287-(55)	228-(44)	135-(26)
10RA500	595-(115)	387-(75)	352-(68)	286-(55)	149-(29)
20RA500	550-(106)	423-(82)	370-(71)	317-(61)	181-(35)
30RA500	508-(98)	401-(77)	330-(64)	247-(48)	146-(28)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 500	519-(100)	164-(32)	84-(16)	49-(9)	25-(5)
10RA500	595-(115)	183-(35)	89-(17)	55-(11)	27-(5)
20RA500	550-(106)	189-(36)	96-(18)	56-(11)	32-(6)
30RA500	508-(98)	176-(34)	86-(17)	50-(10)	21-(4)

ผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกคอนกรีตควบคุมที่ออกแบบกำลังอัด 500 กก./ชม.<sup>2</sup> ที่อายุ 90 วัน

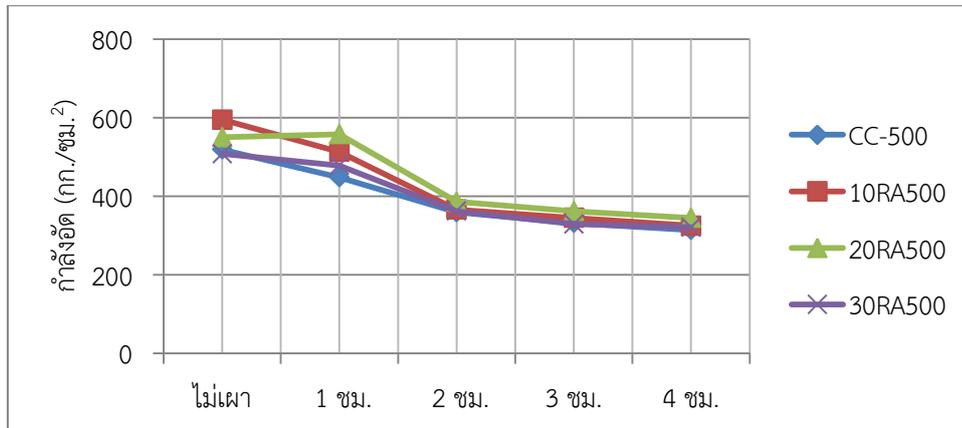
ภาพประกอบ 4.7 (ก-ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาในการเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดควบคุมมีค่าลดลงเท่ากับ 519 กก./ชม.<sup>2</sup> โดยมีอัตราการลดกำลังคงเหลือคิดเป็นร้อยละ 64 55 44 และ 26 ของคอนกรีตควบคุม เห็นได้ว่ากำลังอัดลดลงทุกส่วนผสมและลดลงในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาคอนกรีตที่แทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส พบว่าการแทนที่ร้อยละ 10-30 ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดจะให้กำลังอัดหลังการเผาสูงกว่าคอนกรีตควบคุมทุกการออกแบบ โดยการแทนที่ร้อยละ 20 จะให้กำลังอัดคงเหลือสูงสุดในทุกการออกแบบ โดยมีกำลังอัดร้อยละ 105 74 71 และ 18 ของคอนกรีตควบคุมก่อนการเผา ส่วนการแทนที่ร้อยละ 30 พบว่ากำลังอัดคงเหลือมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมหลังการเผา แสดงในตาราง 4.4

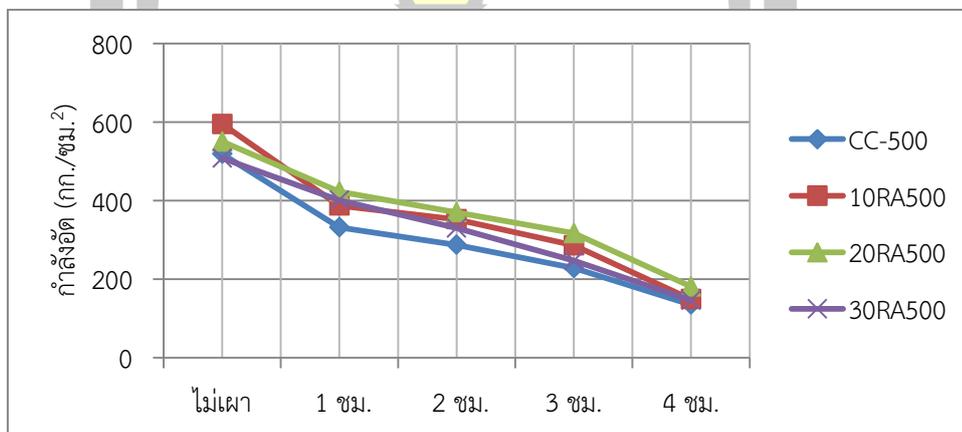


(ก) อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

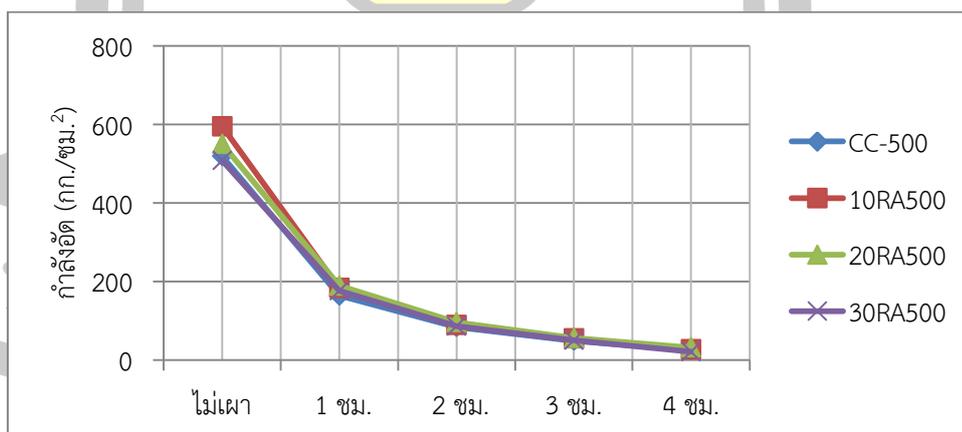
พหุ ประถมศึกษา



(ข) อุณหภูมิก่อตัว 400 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิก่อตัว 600 องศาเซลเซียส

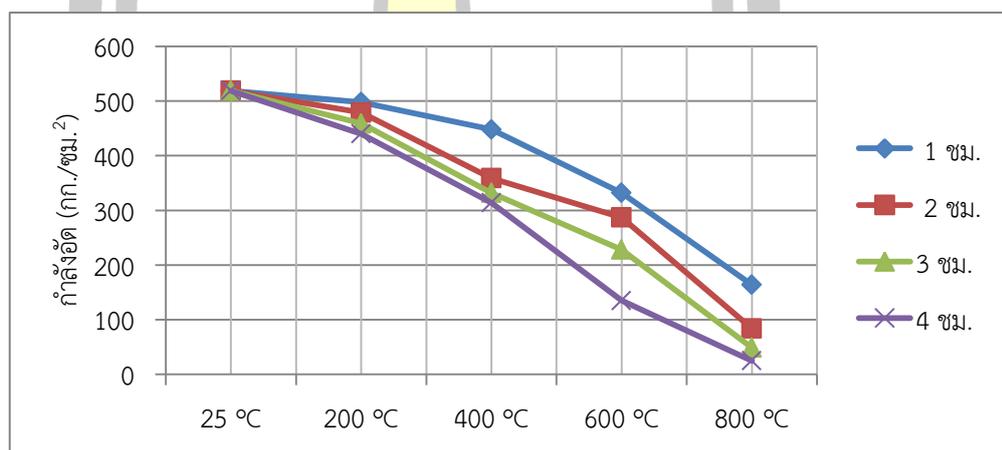


(ง) อุณหภูมิก่อตัว 800 องศาเซลเซียส

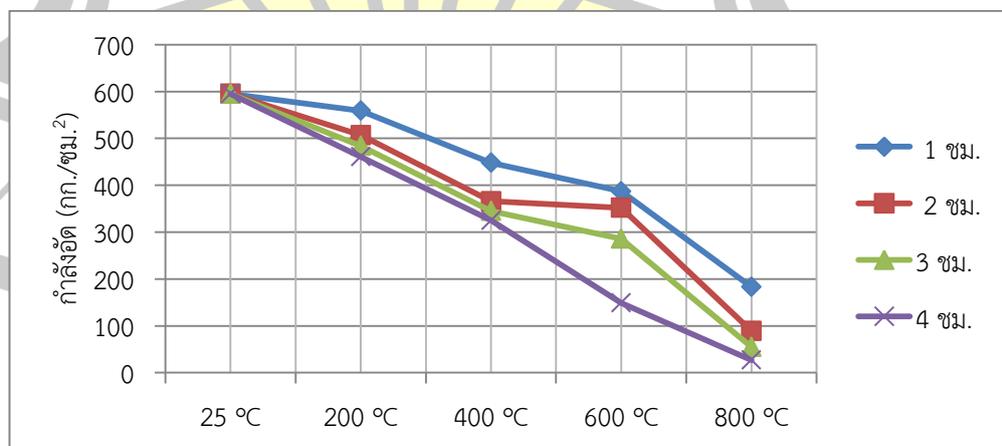
ภาพประกอบ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาในการเผา

ผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 0.10 เมตร สูง 0.20 เมตร คอนกรีตควบคุมที่ออกแบบกำลังอัด 500 กก./ซม.<sup>2</sup> ทดสอบที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 519 กก./ซม.<sup>2</sup> และเมื่อแทนที่ด้วยเส้นใยกลบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 595 และ 550 กก./ซม.<sup>2</sup> พบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นโดยการแทนที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 20 และลดลงเล็กน้อยเมื่อแทนที่ในปริมาณร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 508 กก./ซม.<sup>2</sup> ปริมาณร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.4

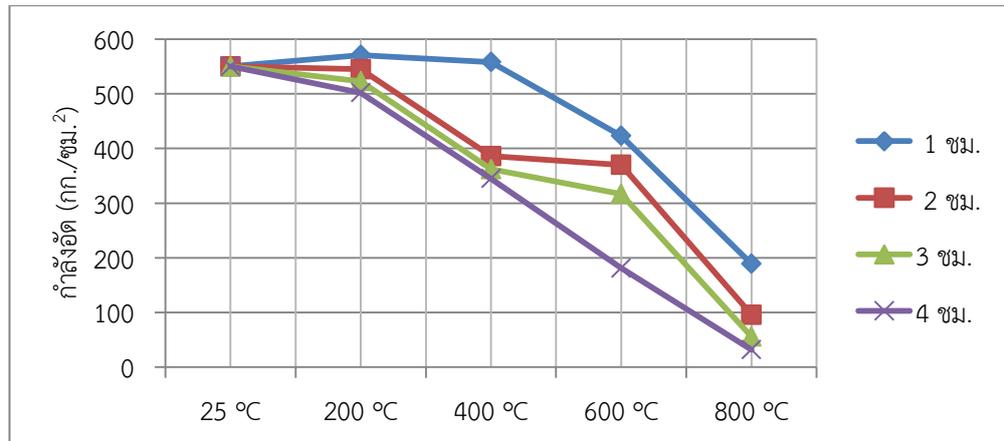
ภาพประกอบ 4.8 (ก-ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดลดลงทุกส่วนผสมและลดลงในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน



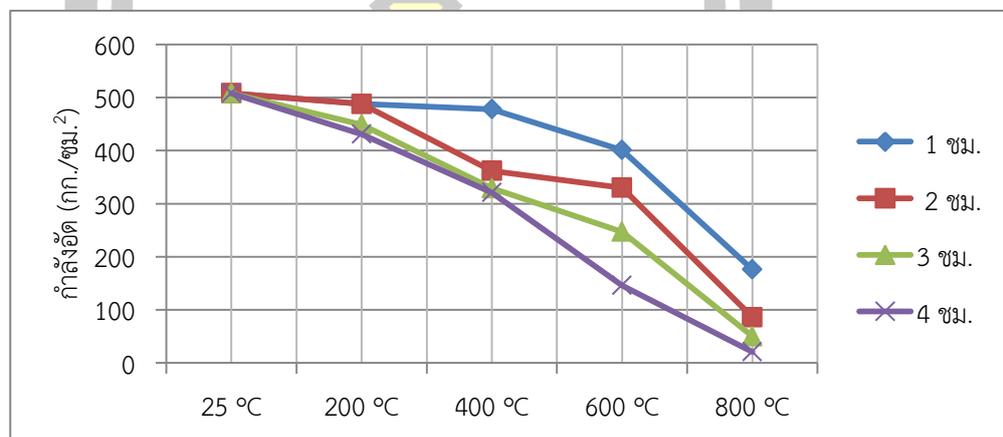
(ก) CC 500



(ข) 10RA500



(ค) 20RA500



(ง) 30RA500

ภาพประกอบ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผา

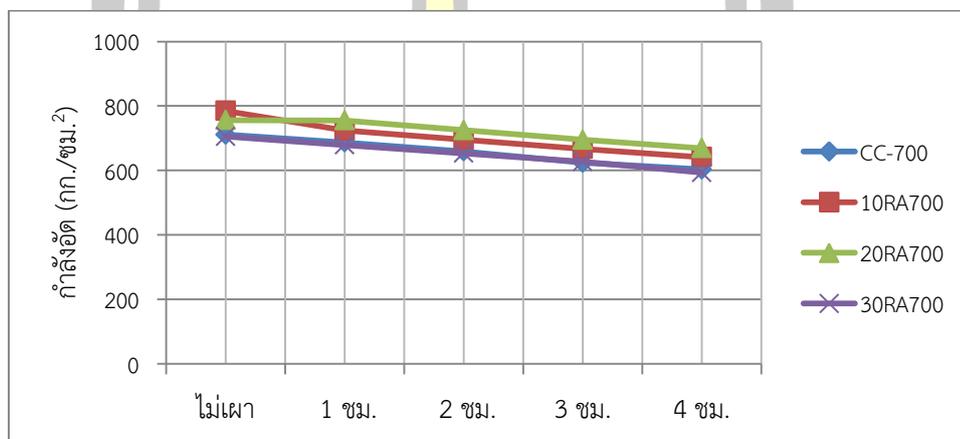


ตาราง 4.5 กำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอก CC 700 ก่อนและหลังเผา

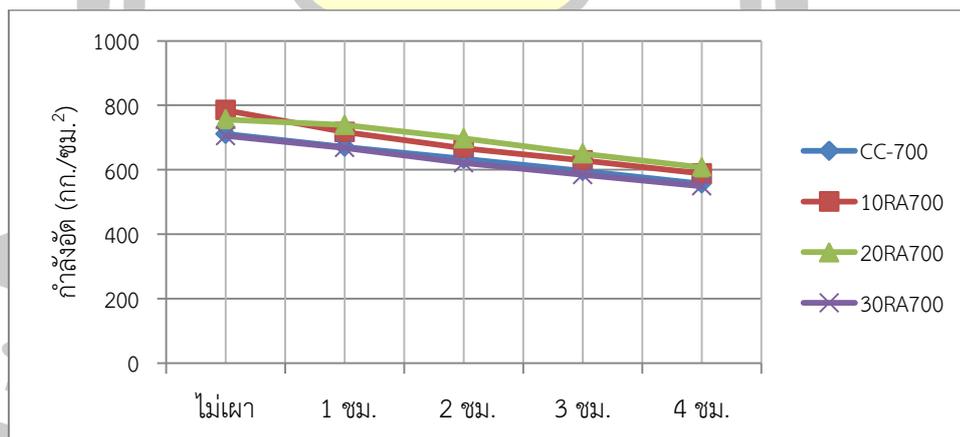
ประเภทคอนกรีต	กำลังอัด (กก./ซม <sup>2</sup> ) - (ร้อยละกำลังอัด)				
	ไม่เผา	1 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 700	711-(100)	687-(97)	659-(93)	624-(88)	603-(85)
10RA700	785-(110)	724-(102)	695-(98)	667-(94)	641-(90)
20RA700	756-(106)	755-(106)	725-(102)	695-(98)	669-(94)
30RA700	705-(99)	679-(95)	653-(92)	627-(88)	593-(83)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 700	711-(100)	671-(94)	634-(89)	596-(84)	557-(78)
10RA700	785-(110)	717-(101)	667-(94)	629-(88)	588-(88)
20RA700	756-(106)	739-(104)	697-(98)	650-(91)	607-(85)
30RA700	705-(99)	668-(94)	621-(87)	584-(82)	549-(77)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 700	711-(100)	562-(79)	397-(56)	285-(40)	146-(21)
10RA700	785-(110)	612-(86)	489-(69)	299-(42)	173-(24)
20RA700	756-(106)	664-(93)	552-(78)	328-(46)	205-(29)
30RA700	705-(99)	559-(79)	445-(63)	278-(39)	126-(18)
ตัวอย่างทรงกระบอก เเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ที่อายุ 90 วัน					
CC 700	711-(100)	172-(24)	87-(12)	53-(7)	28-(4)
10RA700	785-(110)	186-(26)	91-(13)	56-(8)	30-(4)
20RA700	756-(106)	195-(27)	97-(14)	57-(8)	39-(5)
30RA700	705-(99)	174-(24)	89-(13)	54-(8)	29-(4)

ผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกคอนกรีตควบคุมที่ออกแบบกำลังอัด 700 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่อายุ 90 วัน

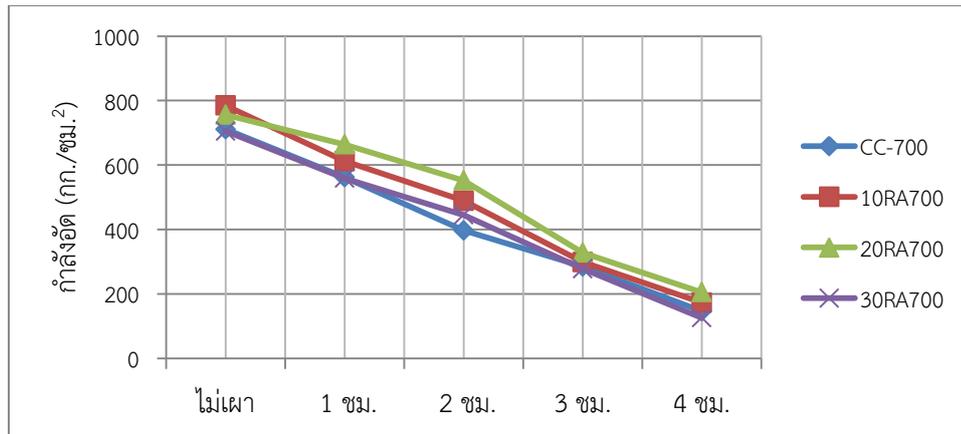
ภาพประกอบ 4.9 (ก-ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับระยะเวลาในการเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงเท่ากับ 711 กก./ซม.<sup>2</sup> โดยมีอัตราการลดกำลังคงเหลือคิดเป็นร้อยละ 79 56 40 และ 21 ของคอนกรีตควบคุม เห็นได้ว่ากำลังอัดลดลงทุกส่วนผสมและลดลงในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันตามอุณหภูมิและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น



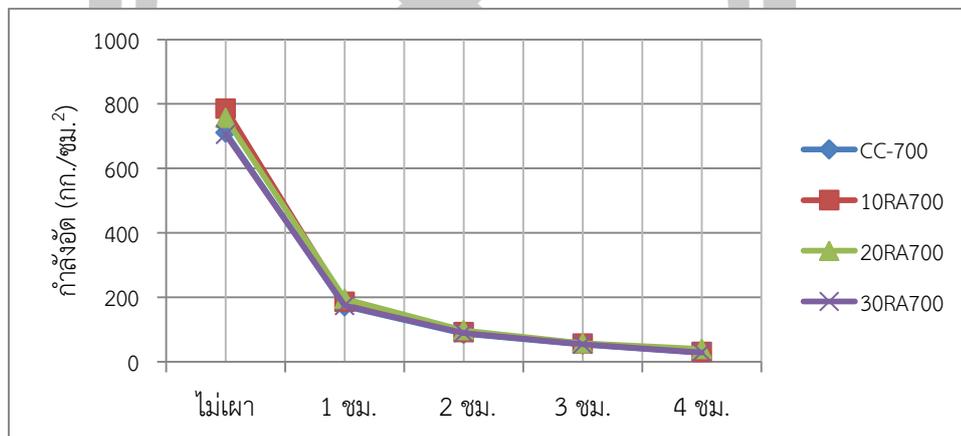
(ก) อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



(ข) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



(ค) อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

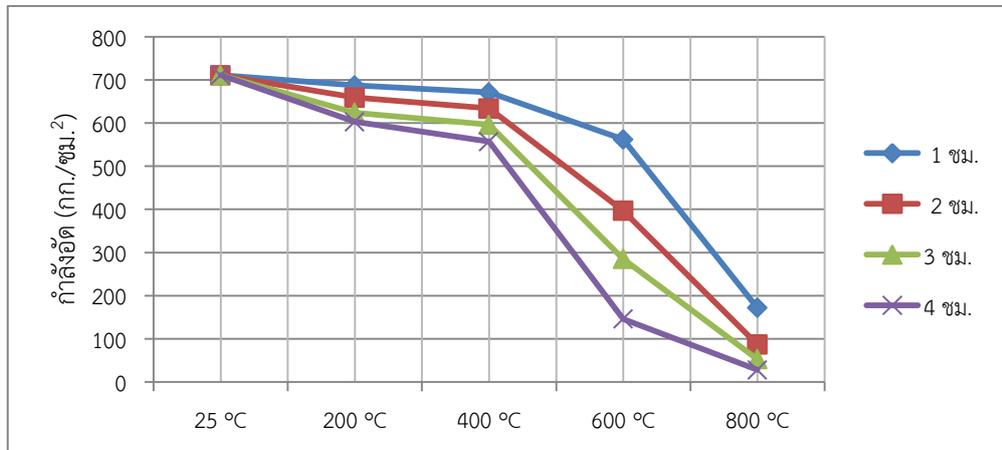


(ง) อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

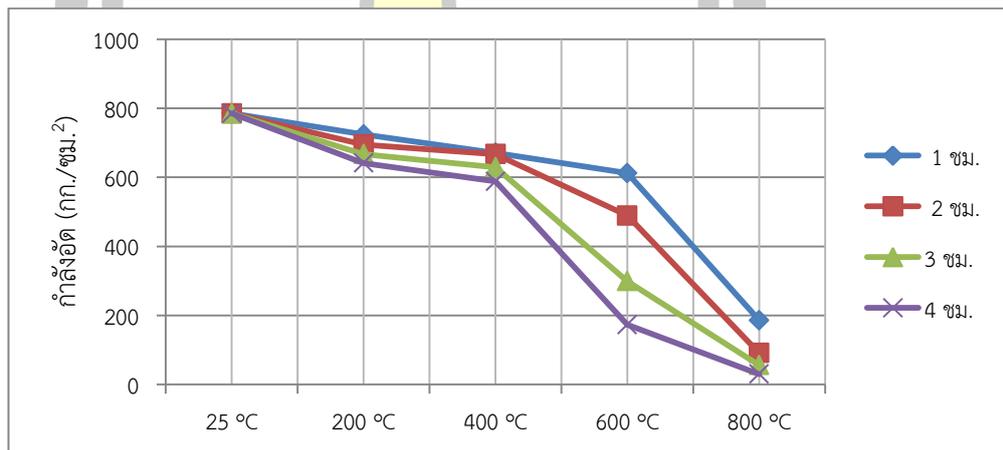
ภาพประกอบ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับเวลาในการเผา

ผลการทดสอบกำลังอัดตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาด 0.10 เมตร สูง 0.20 เมตร คอนกรีตควบคุมที่ออกแบบกำลังอัด 700 กก./ชม.<sup>2</sup> ทดสอบที่อายุ 90 วัน มีค่าเท่ากับ 711 กก./ชม.<sup>2</sup> และเมื่อแทนที่ด้วยเถ้าแกลบดละเอียดในปริมาณร้อยละ 10 และ 20 กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 785 และ 756 กก./ชม.<sup>2</sup> พบว่ากำลังอัดมีค่าเพิ่มขึ้นโดยการแทนที่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 20 และลดลงเล็กน้อยเมื่อแทนที่ในปริมาณร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม เท่ากับ 705 กก./ชม.<sup>2</sup> ปริมาณร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 4.5

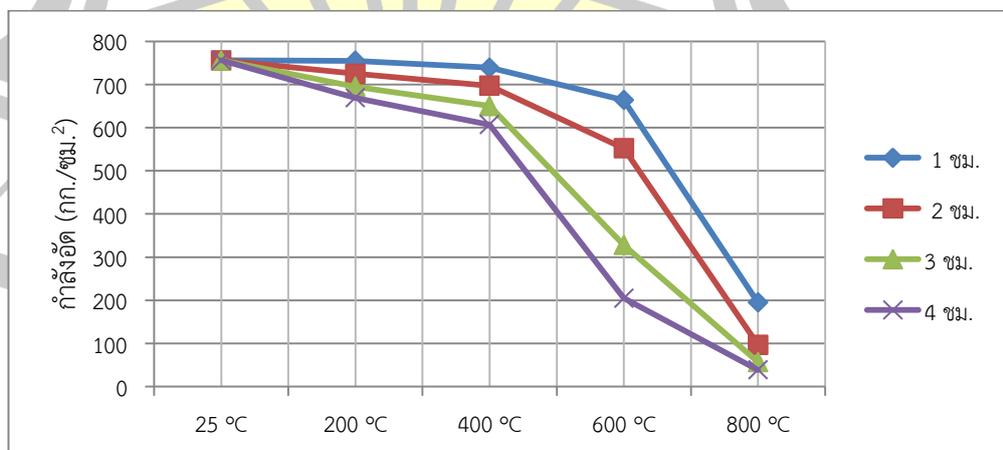
ภาพประกอบ 4.10 (ก-ง) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผาที่อุณหภูมิ 200 400 600 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 2 3 และ 4 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดลดลงทุกส่วนผสมและลดลงในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน



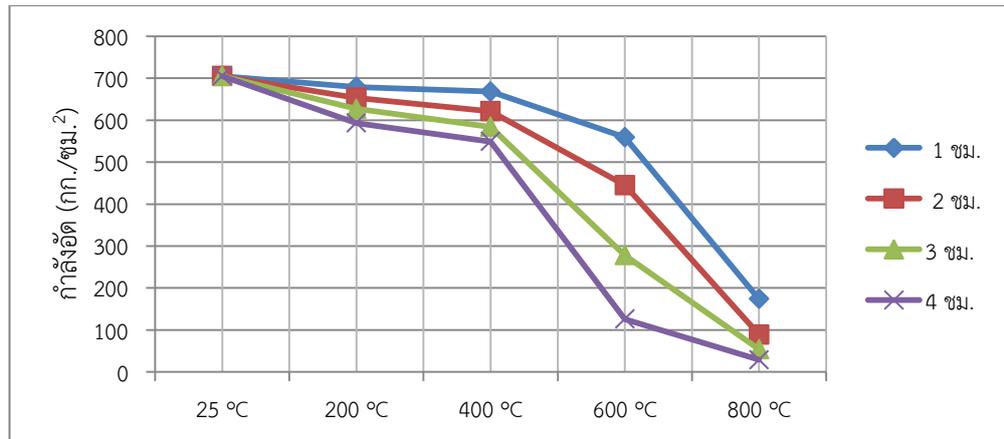
(ก) CC 700



(ข) 10RA700



(ค) 20RA700



(ง) 30RA700

ภาพประกอบ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับอุณหภูมิในการเผา

ภาพแสดงรอยร้าวอย่างชัดเจนเมื่อผ่านการเผาของคอนกรีตควบคุมทรงกระบอก



ภาพประกอบ 4.11 แสดงรอยร้าวหลังการเผาของคอนกรีตควบคุม

CC 300 ขนาด 0.10 เมตร. สูง 0.20 เมตรอายุ 28 วัน

พหุบัน ปณ ทัโต ชิว



ภาพประกอบ 4.12 แสดงรอยร้าวหลังการเผาของคอนกรีตควบคุม CC 500  
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10 เมตร. สูง 0.20 เมตรอายุ 28 วัน



ภาพประกอบ 4.13 แสดงรอยร้าวหลังการเผาของคอนกรีตควบคุม CC 700  
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.10 เมตร. สูง 0.20 เมตรอายุ 28 วัน

#### 4.4 การทดสอบกำลังอัดของเสาคอนกรีต

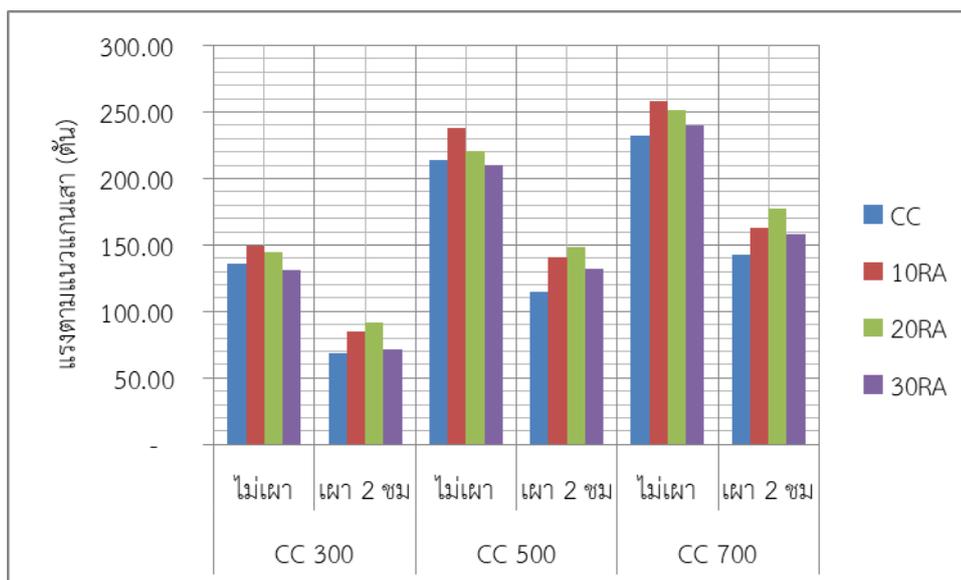
กำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนและหลังการเผา ในการทดสอบกำลังอัดของเสา คอนกรีตเสริมเหล็กจะทำการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้ค้อนกระทบและการทดสอบแบบทำลาย ด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ จากผลการทดสอบเสาคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า แรงตามแนวแกน ของเสาคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 90 วัน แรงตามแนวแกนควบคุม มีค่าเท่ากับ 136 204 และ 232 ตัน เมื่อเผาเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เสา

คอนกรีตเสริมเหล็กจะมีค่ากำลังอัดลดลง เท่ากับ 68.80 114.80 และ 142.80 ตัน คิดเป็นอัตราลดกำลังคงเหลือร้อยละ 50 54 และ 62 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4.6

เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมก่อนการเผา เห็นได้ว่าเมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กมีกำลังอัดของคอนกรีตที่สูงขึ้น การทนไฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.14 ซึ่งผลที่ได้แตกต่างจากคอนกรีตทรงกระบอก ซึ่งอาจเป็นเหตุผลเนื่องจากขนาดที่แตกต่างกันและการนำความร้อนที่ต่างกัน (Tanyildizi & Coskun, 2008) สำหรับการทนไฟของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่แทนที่ด้วยแก้วกลมบดละเอียดที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า มีค่าแรงตามแนวแกนสูงกว่าคอนกรีตควบคุมหลังการเผา โดยในอัตราส่วนการแทนที่ด้วยแก้วกลมบดละเอียดร้อยละ 10 และ 20 สามารถช่วยพัฒนาการทนไฟได้ประมาณร้อยละ 13 ถึง 34 ของคอนกรีตควบคุมหลังการเผา และที่ปริมาณการแทนที่ด้วยแก้วกลมบดละเอียดร้อยละ 20 สามารถทำให้คอนกรีตทนไฟได้ดีที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าผลการทดสอบการทนไฟที่ได้มีความสอดคล้องกันทั้งการทดสอบแบบทรงกระบอก ทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยค้อนกระแทก และทดสอบแบบทำลาย ดังนั้นในการตรวจสอบอาคารหลังเพลิงไหม้สามารถใช้ค้อนกระแทกหรือการคอร์คอนกรีตเพื่อทดสอบกำลังอัดเพื่อใช้ประเมินกำลังอัดของเสาจริงได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากการทดสอบเสาจริงไม่สามารถกระทำได้

ตาราง 4.6 กำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตัวอย่างเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก กำลังอัด (ตัน) - ร้อยละกำลังอัด		
ประเภทคอนกรีต	อายุ 90 วัน ไม่เผา	อายุ 90 วัน เผา 2 ชม
CC 300	136.40-(100)	68.80-(50)
10RA300	149.60-(110)	85.20-(62)
20RA300	144.40-(106)	91.61-(67)
30RA300	131.60-(96)	71.60-(52)
CC 500	204.00-(100)	114.80-(54)
10RA500	237.60-(111)	140.80-(66)
20RA500	220.40-(103)	148.00-(69)
30RA500	210.00-(98)	132.00-(62)
CC 700	232.00-(100)	142.80-(62)
10RA700	258.00-(111)	162.60-(70)
20RA700	251.00-(108)	177.20-(76)
30RA700	240.00-(103)	158.00-(68)



ภาพประกอบ 4.14 กำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กก่อนและหลังการเผา

ผลการทดสอบกำลังอัดด้วยเครื่องทดสอบเบรกประสงค์ ของคอนกรีตทรงกระบอกที่อายุ 90 วัน โดยออกแบบคอนกรีตควบคุมที่กำลังอัด 300 กก./ชม.<sup>2</sup> มีค่าเท่ากับ 317 กก./ชม.<sup>2</sup> จากนั้นเมื่อแทนที่ด้วยแก้วเกลบดละเอียด ในปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 กำลังอัดของคอนกรีต มีค่าเท่ากับ 361 347 และ 315 กก./ชม.<sup>2</sup> จะเห็นได้ว่าการแทนที่ด้วยแก้วเกลบดละเอียด ในปริมาณในร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงสุด ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 114 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 20 มีค่ากำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตควบคุม ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 109 ปริมาณการแทนที่ร้อยละ 30 มีค่ากำลังอัดลดลงเล็กน้อยเทียบกับคอนกรีตควบคุมซึ่งคิดเป็นร้อยละ 99 ตามลำดับ

พิจารณาเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยออกแบบคอนกรีตควบคุมที่กำลังอัด 300 กก./ชม.<sup>2</sup> อายุ 90 วัน มีค่ากำลังอัดลดลง เท่ากับ 172 กก./ชม.<sup>2</sup> และเมื่อพิจารณาการแทนที่ปริมาณร้อยละ 10 20 และ 30 มีค่าเท่ากับ 213 229 และ 179 กก./ชม.<sup>2</sup> คิดเป็นกำลังอัดลดลงร้อยละ 54 67 72 และ 56 ตามลำดับ

พูน ปณ ทิโต ชิว

วิเคราะห์ก่อนและหลังการเผาของคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 0.10 เมตร.สูง 0.20 เมตรจาก  
ภาพถ่าย



ภาพประกอบ 4.15 แสดงการจัดเรียงก่อนนำเข้าเตาเผา



ภาพประกอบ 4.16 การเผาตัวอย่างคอนกรีต

พหุ ประถม ๓๒๓ ๓๒๓ ๓๒๓



ภาพประกอบ 4.17 ลักษณะหลังการเผาคอนกรีตควบคุมทรงกระบอก



ภาพประกอบ 4.18 ลักษณะหลังการเผาคอนกรีตควบคุมทรงกระบอก

#### 4.5 วิเคราะห์การวิบัติจากกำลังอัดของเสาคอนกรีตจากภาพถ่าย

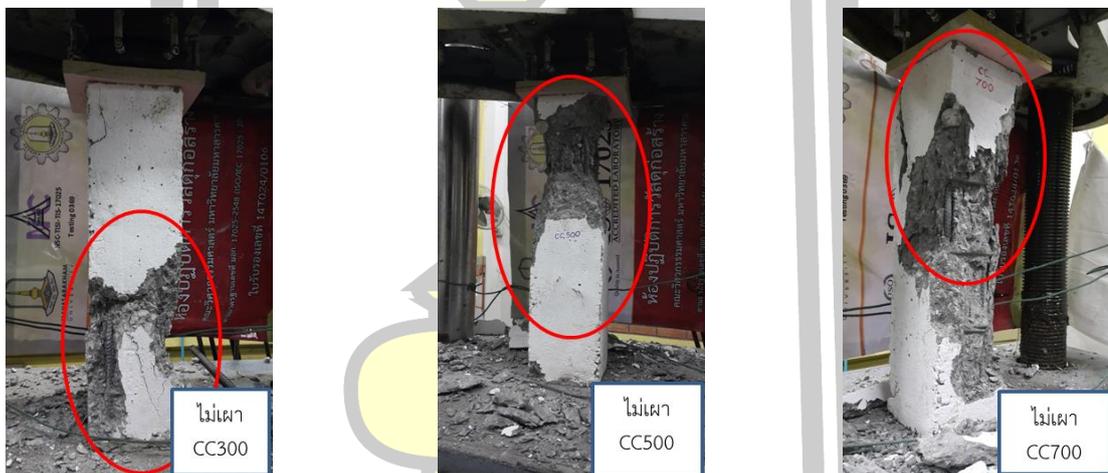
การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุมพบว่าตำแหน่งการวิบัติส่วนมากจะอยู่ที่โคนเสา และหัวเสา การวิบัติจะทำให้เหล็กแกนคด เหล็กปลอกง้างออกมองเห็นชัดเจนซึ่งเกิดจากการเสียรูป ทั้งเหล็กยื่นและเหล็กปลอก ดังแสดงในรูปภาพ 4.24

เมื่อนำเสาคอนกรีตเสริมเหล็กเผาไฟอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าตำแหน่งวิบัติจะอยู่ที่หัวเสา เหล็กยื่นและเหล็กปลอกจะค้อยไม่เสียรูป โดยระยะหุ้มของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญมากเนื่องจากความร้อนทำลายสมบัติทางกายภาพคอนกรีต ทำให้แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กจะหายไป สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (จิรพจน์ ศุภวิริยะกิจ, 2544) การแตกร้าวเป็นแนวตั้งไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน เมื่อแทนที่ด้วยเก้าอี้กลบดละเอียดในปริมาณมากขึ้นการแตกก็มีมากขึ้น บ่งบอกถึงคอนกรีตสูญเสียกำลังอย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปภาพ 4.19-4.23

ตัวอย่างของเสาคอนกรีตควบคุม ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ เสาคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 0.20x0.20 เมตร สูง 0.80 เมตร โดยออกแบบเสาคอนกรีตควบคุมที่กำลังอัด 300 500 และ 700 กก./ซม.<sup>2</sup> ภายนอกคอนกรีตควบคุมตำแหน่งคอนกรีตวิบัติจะอยู่ที่โคนและหัวของเสา

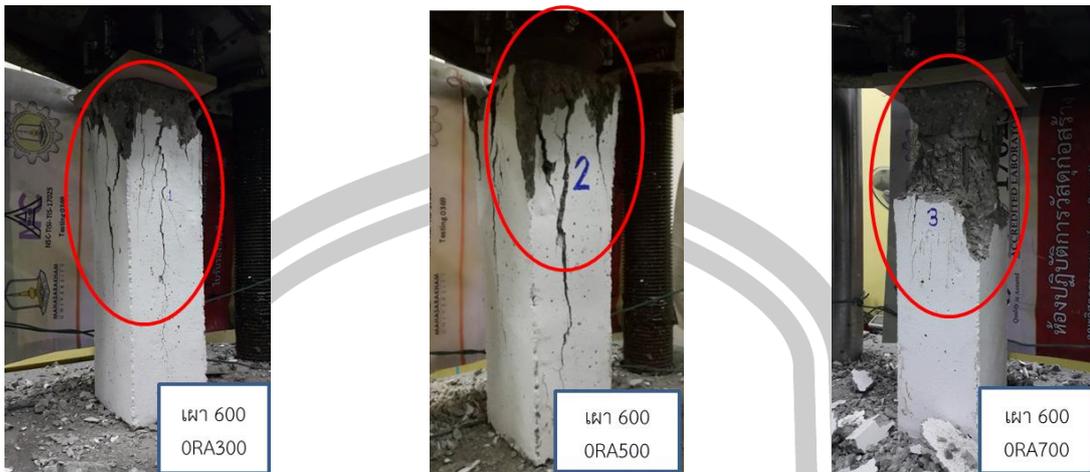
สอดคล้องกับคู่มือการเสริมเหล็ก (คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา, 2538) ทำให้เหล็กแกนคด เหล็กปลอกง้างออกมองเห็นชัดเจนซึ่งเกิดจากการเสียรูปทั้งเหล็กยื่นและเหล็กปลอก ดังแสดงในรูปภาพ 4.19

เมื่อนำเสาคอนกรีตเผาไฟอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงพบว่าไฟมีผลกับคอนกรีตมากกว่าเหล็ก เมื่อผ่านการเผา ตำแหน่งวิบัติจะอยู่ที่หัวเสา เหล็กแกนและเหล็กปลอกไม่เสียรูป ระยะหุ้มของคอนกรีตเป็นสิ่งสำคัญมากเนื่องจากความร้อนทำลายสมบัติทางกายภาพคอนกรีตทำให้แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กจะหายไป สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ธีระพจน์ ศุภวิริยะกิจ, 2543) การแตกร้าวเป็นแนวตั้งไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน เมื่อแทนที่ด้วยเก้าอี้กลบดละเอียดในปริมาณมากขึ้น การแตกก็มีมากขึ้น บ่งบอกถึงคอนกรีตเสียกำลังอย่างชัดเจน



ภาพประกอบ 4.19 การวิบัติของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กควบคุมก่อนการเผา

พหุ ประ โท ชี เว



ภาพประกอบ 4.20 การวิบัติของเสาคอนกรีต หลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 4.21 การวิบัติของเสาคอนกรีตหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณแอมที่ร้อยละ 10

พหุพันธ์ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 4.22 การวิบัติของเสาคอนกรีตหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณแทนที่ร้อยละ 20



ภาพประกอบ 4.23 การวิบัติของเสาคอนกรีตหลังการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในปริมาณแทนที่ร้อยละ 30

พหุพันธ์ ปณ ทัต ชีเว

จากภาพที่ 4.24 ตัวอย่างเสาคอนกรีต ทาสีขาวเพื่อให้เห็นรอยร้าวที่ผิวชัดเจนขึ้น เมื่อผ่านการเผาแล้วนำตัวอย่างเสามาทดสอบ การตรวจพินิจความเสียหายด้ายสายตาทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการแตกร้าว พบว่าคอนกรีตเสี้ยก้าง (ทรงเกียรติ หาญสันติ, 2544) แต่เหล็กภายในยังปกติไม่เสียรูป เสาจะหดสั้นลงเล็กน้อย ในเบื้องต้นรอยร้าว(Cracking)สามารถรอบอกได้ถึงก้างที่เหลือน้อย จำนวนของรอยแตกร้าวที่หัวเสากระจายไม่มีทิศทาง และอัตราการขยายตัวของรอยร้าวการหลุดร่อนของคอนกรีตคือ ลักษณะของสูญเสียน้ำในเนื้อคอนกรีตสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพประกอบ 4.24 ลักษณะของเหล็กเสริมและเหล็กปลอกของเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

พหุ ประถม ศึกษาศาสตร์

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้ได้กล่าวถึง สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ ของการใช้เถ้าแกลบบดละเอียด ในคอนกรีต ซึ่งได้ลำดับดังต่อไปนี้

- 5.1 สรุปผล
- 5.2 ข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากผลการทดลองการใช้เถ้าแกลบบดละเอียดในคอนกรีต ซึ่งออกแบบกำลังอัดของคอนกรีต ควบคุมเท่ากับ 300 500 และ 700 กก./ซม.<sup>2</sup> ที่อายุ 90 วัน ในอัตราส่วน ร้อยละ 10 20 และ 30 โดยน้ำหนักวัสดุประสาน สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

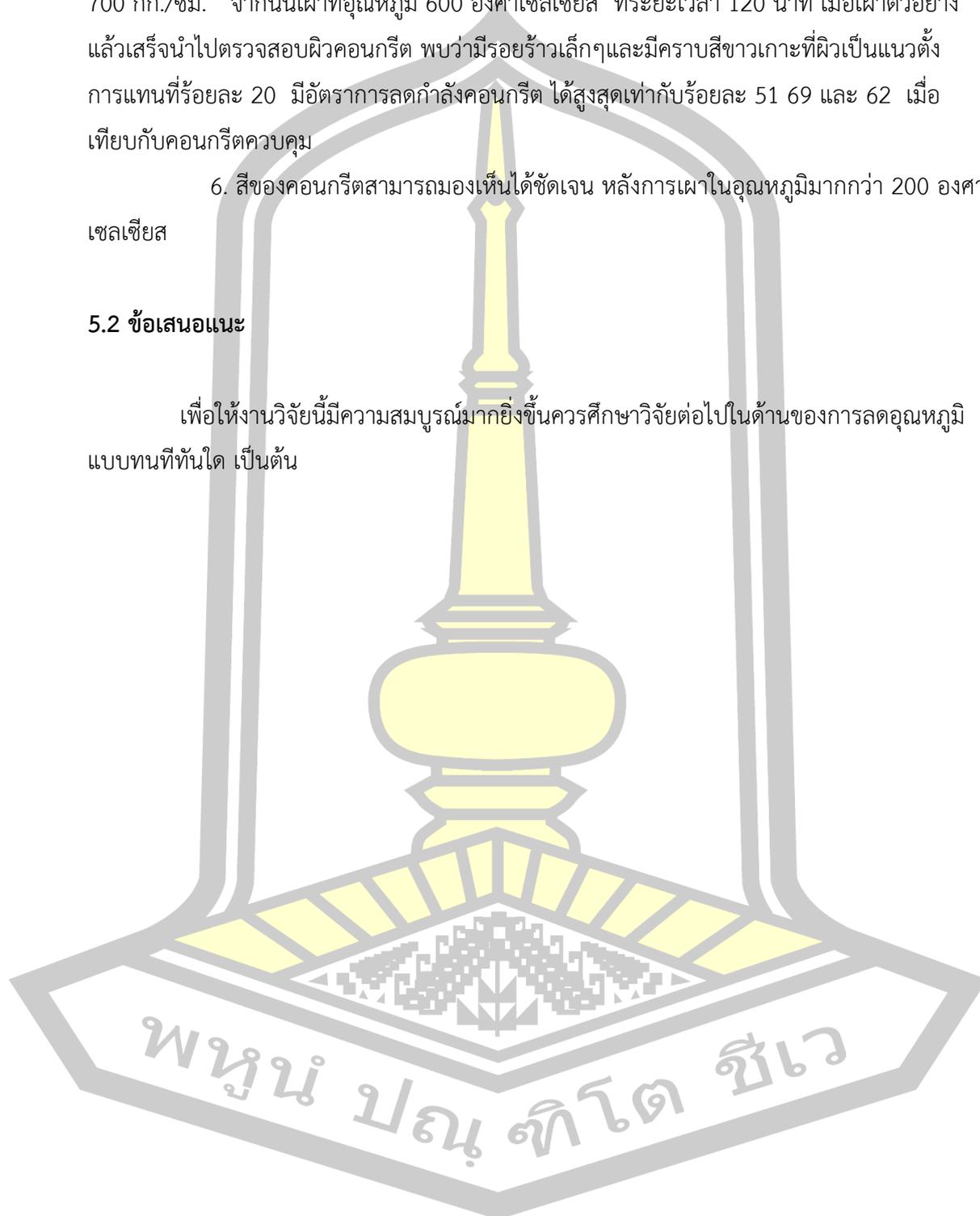
1. การทดสอบค่ายุบตัวของคอนกรีต โดยควบคุมให้มีค่ายุบตัวไม่น้อยกว่า  $10 \pm 2$  ซม. การทำงานได้ของคอนกรีตลดลง จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารลดน้ำพิเศษไม่เกิน 2 % ของปริมาณน้ำ เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด เพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดของคอนกรีต
2. กำลังอัดของคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก เมื่อแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียด โดยการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 พบว่าค่ากำลังอัดมากกว่าคอนกรีตควบคุม เพิ่มขึ้น ร้อยละ 106 ถึง 112 เนื่องจากเถ้าแกลบบดละเอียดมีอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ การแทนที่ร้อยละ 30 ค่ากำลังอัดมีค่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าแกลบบดละเอียดใน ปริมาณที่สูงเกินไปจะทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง การแทนที่ร้อยละ 10 มีค่ากำลังอัดสูงสุด
3. ตัวอย่างรูปทรงกระบอก ที่อายุ 90 วัน เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่ากำลังอัดมีค่าลดลงเท่ากับ 172 287 และ 397 กก./ซม.<sup>2</sup> โดยมี อัตราการลดกำลังคงเหลือคิดเป็นร้อยละ 54 55 และ 56 ของคอนกรีตควบคุม เห็นได้ว่ากำลังอัด ลดลงประมาณร้อยละ 45 เกือบเท่ากันทุกส่วนผสมที่ออกแบบ
4. กำลังอัดของเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก ตามกำลังอัดที่ออกแบบ 300 500 และ 700 กก./ซม.<sup>2</sup> โดยการแทนที่ร้อยละ 10 และ 20 ค่าแรงตามแนวแกนมากกว่าคอนกรีตควบคุม เพิ่มขึ้น ร้อยละ 103 ถึง 111

5. การเผาคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่อายุ 90 วัน ตามกำลังอัดที่ออกแบบ 300 500 และ 700 กก./ชม.<sup>2</sup> จากนั้นเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลา 120 นาที เมื่อเผาตัวอย่างแล้วเสร็จนำไปตรวจสอบผิวคอนกรีต พบว่ามีรอยร้าวเล็กๆและมีคราบสีขาวเกาะที่ผิวเป็นแนวตั้ง การแทนที่ร้อยละ 20 มีอัตราการลดกำลังคอนกรีต ได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 51 69 และ 62 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุม

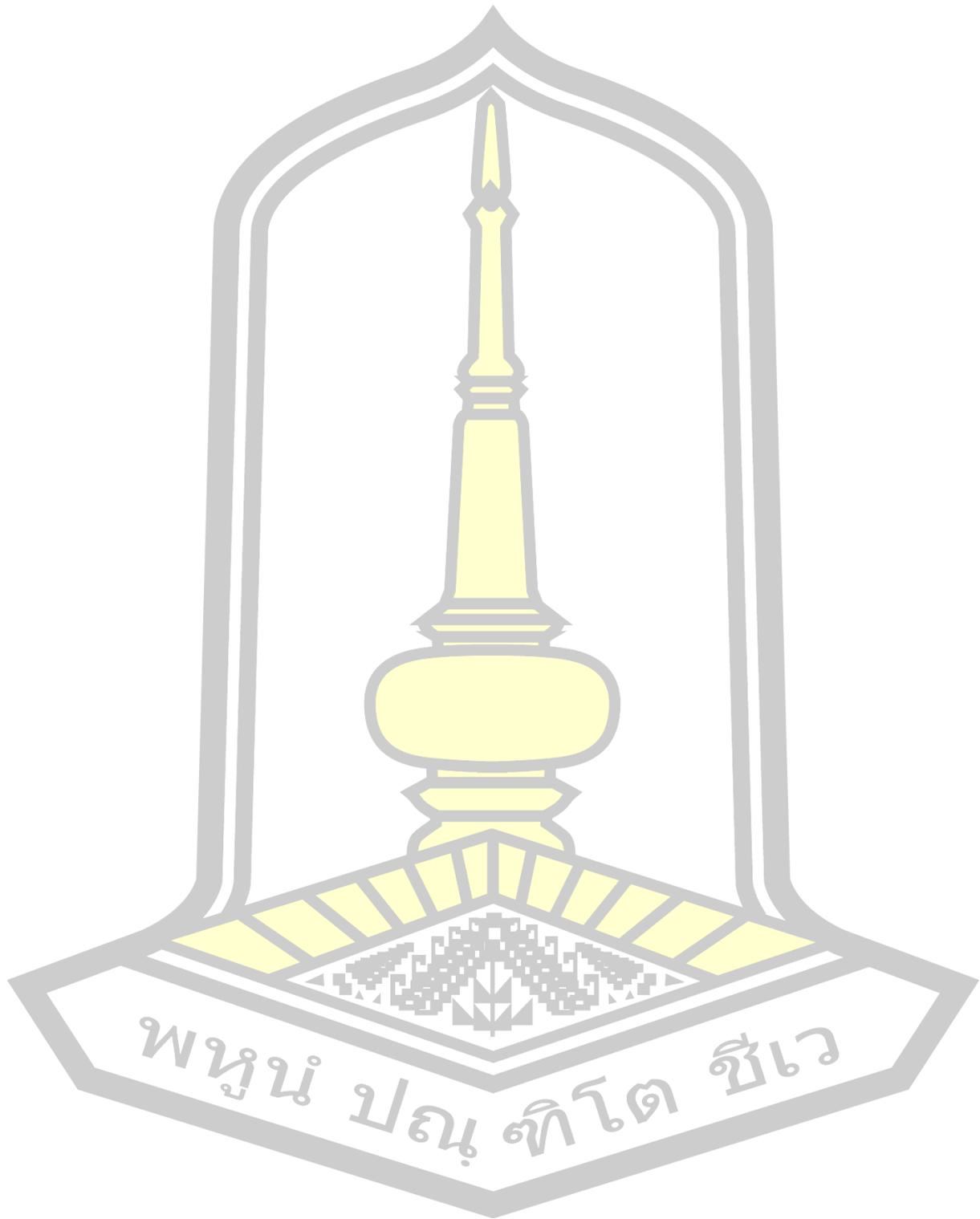
6. สีของคอนกรีตสามารถมองเห็นได้ชัดเจน หลังการเผาในอุณหภูมิมากกว่า 200 องศาเซลเซียส

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นควรศึกษาวิจัยต่อไปในด้านการลดอุณหภูมิแบบทันทีทันใด เป็นต้น



บรรณานุกรม

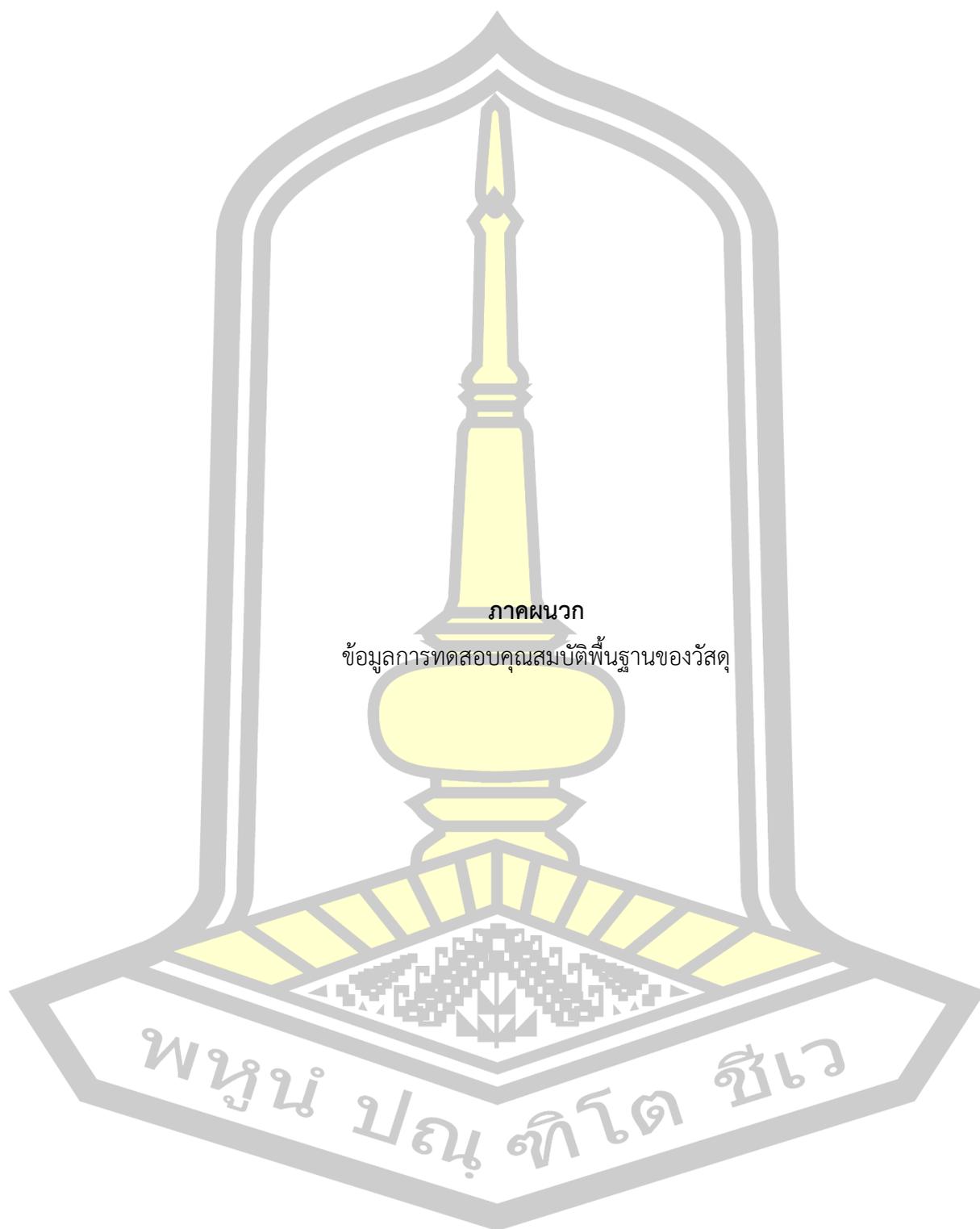


## บรรณานุกรม

- กานต์สินี แก้วเพ็ชร์,พรพรรณ อริยะสุขอัครา โชคเจริญมหาศาล. (2558). รูปแบบรอยร้าวและกำลังของคอนกรีตที่เสียหายจากไฟ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมโยธา. (2538). มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีกำลัง. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- ทรงเกียรติ หาญสันติ. (2544). พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Retrieved from <http://www.chulabook.com/description.asp?barcode=9789740334224>
- ทศวัฒน์ ดวงวิไลลักษณ์. (2555). การประเมินคอนกรีตที่เสียหายจากเพลิงไหม้. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัญวัฒน์ โพธิศิริ. (2558). การออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยด้านอัคคีภัย. กรุงเทพมหานคร: กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. Retrieved from <http://www.chulabook.com/description.asp?barcode=9789740334224>
- ธีระพงษ์ ศุภวิริยะกิจ. (2543). การศึกษาเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตกำลังปกติกับคอนกรีตผสมเถ้าลอยหลังถูกไฟเผา. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัย เชียงใหม่.
- บัณฑิต คมกริชวรากล. (2544). การศึกษาวิธีเพิ่มความสามารถทนไฟให้แก่แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- บุรฉัตร ฉัตรวีระ และวัชรกร วงศ์คำจันทร์. (2544). พฤติกรรมทางกลของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบละเอียด. วิจัยและพัฒนา มจร., 24(3), 327–342.
- ปฐเมศ ภาณิตพจมาน และที่ชท์ศน์ หทัยพิทักษ์. (2558). การทนไฟของชิ้นส่วนโครงสร้าง คสล. ซึ่งออกแบบตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60. In *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 20*. ชลบุรี.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. (2547). ปูนซีเมนต์ปอซโซลานและคอนกรีต (3rd ed.). กรุงเทพฯ: สมาคมคอนกรีต.
- พัชร อ่อนพรม. (2557). เซลลูลอสคอนกรีตผสมวัสดุปอซโซลาน. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.
- พิทยา สุขจินดา และคณะ. (2016). ปริมาณเถ้าแกลบดำที่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีตโครงสร้างทั่วไป. In *การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ครั้งที่ 1*.

- ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด และอมร พิमानมาศ. (2015). การออกแบบอาคารต้านอัคคีภัย. Retrieved from <http://www.thaiengineering.com/2015/index.php/technology/item/811-fire-resistant-building-design>
- เอกชัย กลิ่นบุบผา และคณะ. (2558). คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตหลังการเผาด้วยอุณหภูมิสูง. In *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 20, ชลบุรี*.
- ACI Committee 232. (2001). *Use of fly ash in concrete (ACI 232.2R-96)*. American: Farmington Hill.
- American Society for Testing and Materials. (1997). Standard Test Method for Electrical of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *Annual Book of ASTM Standards, 4(2)*, 651–656.
- American Society for Testing and Materials (ASTM C 188). (1997). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. *1997 Annual Book of ASTM Standard, 4(1)*, 160–161.
- American Society for Testing and Materials (ASTM C 618). (1991). Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. *Annual Book of ASTM Standards, 4(2)*, 95–106.
- American Society for Testing and Materials (C 127-01). (1997). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards, 4(2)*, 68–73.
- American Society for Testing and Materials (C 29). (1997). Standard Test Method for Unit Weight and Voids in Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards, 4(2)*, 1–4.
- American Society for Testing and Materials (C 430). (1997). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45 m (No. 325) Sieve. *1997 Annual Book of ASTM Standard, 4(1)*, 149–150.
- American Society for Testing and Materials (C128-01). (1997). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. *Annual Book of ASTM Standards, 4(2)*, 74–79.
- Bilow, D. N., & Kamara., M. E. (2008). Fire and concrete structures. *Structures Congress 2008: Crossing Borders*, 1–10.

- Greepala, V., & Nimityongskul, P. (2007). Influence of heating envelope on post-fire mechanical properties of ferrocement jackets. *Thammasat Int. J. Sc. Tech*, 12(3).
- Harmathy. (1993). *Fire Design of Concrete Structures - Structural Behaviour and Assessment*. London: Longman Scientific and Technical.
- Jirawaccharadet, M. (2546). เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก. Retrieved from eng.sut.ac.th/ce/CE\_homework/T05 RC Column.pdf
- Kodur, V. K. R. (2003). Fiber reinforcement for minimizing spalling in High Strength Concrete structural members exposed to fire. *Special Publication*, 216, 221–236.
- Li, Q., & al Et. (2013). The effect of a proprietary inorganic coating on compressive strength and carbonation depth of simulated fire-damaged concrete. *Magazine of Concrete Research*, 65(11), 651–659.
- Limpaninlachat, P. (2012). *Bonding behavior between reinforced concrete after fire and carbon fiber reinforced polymer*. Chulalongkorn University.
- Matsudo, M., & Al., E. (2006). Mechanical properties of ultra-high strength concrete after heating. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 71(603), 171–177.
- Rongviriyapanich, O. (2012). *Chemical physical and mechanical properties of oven – dried mortar after fire exposure*. Bangkok : Chulalongkorn University.
- Saraswathy, V., & Song, H.-W. (2008). Evaluation of cementitious repair mortars for corrosion resistance. *Portugaliae Electrochimica Acta*, 26(5), 417–432.
- Shoib, M. M., Ahmed, S. A., & Balaha, M. M. (2001). Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars. *Cement and Concrete Research*, 31(11), 1533–1538. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00561-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00561-0)
- Tanyildizi, H., & Coskun, A. (2008). The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(11), 2269–2275.
- Walton, W., & Thomas PH. (2002). *Estimating temperatures in compartment fires*. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Society of Fire Protection Engineers (2nd ed.). Quincy MA: NFPA and SFPE.



ภาคผนวก  
ข้อมูลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

พหุ ประจักษ์ ชัยเว

ตารางภาคผนวก 1 การวิเคราะห์ขนาดของทรายด้วยตะแกรงมาตรฐาน

ตัวอย่าง 1 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์ 500 กรัม

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กรัม)	น้ำหนัก ตะแกรง+ น้ำหนักค้ำ (กรัม)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
4	528.26	532.52	4.26	0.85	0.85	99.15
8	467.93	493.29	25.36	5.07	5.92	94.08
16	447.20	540.33	93.13	18.63	24.55	75.45
30	410.01	598.19	188.18	37.64	62.19	37.81
50	400.22	496.69	96.47	19.29	81.48	18.52
100	394.31	476.48	82.17	16.43	97.91	2.09
ถาดรอง	378.89	389.32	10.43	2.086	100.00	0.00
รวม			500	โมดูลัสความละเอียด = 2.73		

ตัวอย่าง 2 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์ 500 กรัม

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กรัม)	น้ำหนัก ตะแกรง+ น้ำหนักค้ำ (กรัม)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
4	528.27	535.91	7.64	1.53	1.53	98.47
8	467.93	497.2	29.27	5.85	7.38	92.62
16	447.23	543.97	96.74	19.35	26.73	73.27
30	409.93	594.82	184.89	36.98	63.71	36.29
50	400.02	490.65	90.63	18.13	81.83	18.17
100	394.03	474.11	80.08	16.02	97.85	2.15
ถาดรอง	378.86	389.61	10.75	2.15	100.00	0.00
รวม			500	โมดูลัสความละเอียด = 2.79		

ตารางภาคผนวก 2 การวิเคราะห์ขนาดของหินด้วยตะแกรงมาตรฐาน

ตัวอย่าง 1 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์ 10 กิโลกรัม

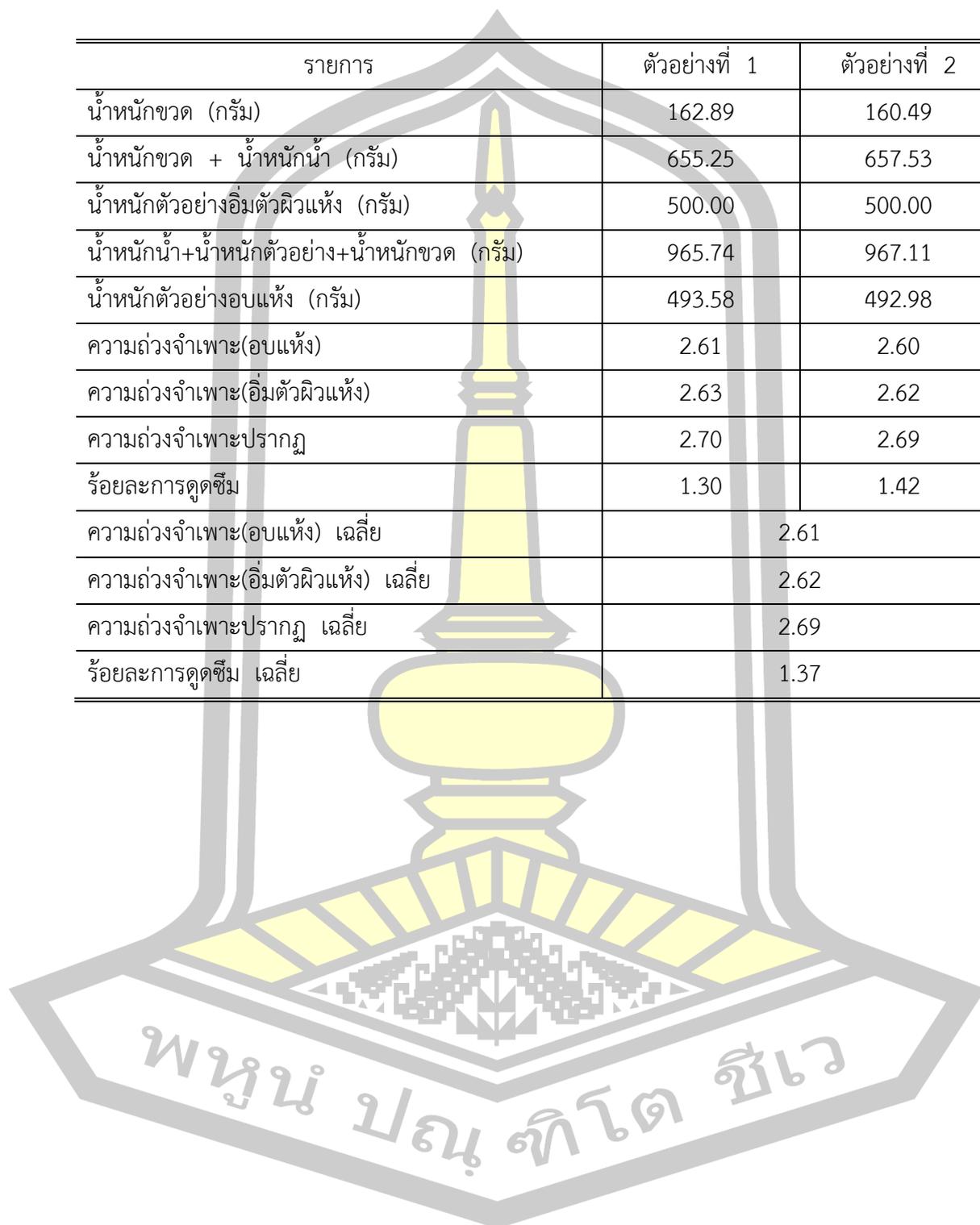
ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กก.)	น้ำหนัก ตะแกรง+ ค้ำ (กก.)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
1 1/2"	5.58	5.58	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	5.34	5.34	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	5.65	5.65	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	5.71	5.71	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	5.82	10.05	4.23	42.30	42.30	57.70
# 4	5.67	10.94	5.27	52.70	95.00	5.00
# 8	5.75	6.10	0.35	3.50	98.50	1.50
ถาดรอง	5.13	5.28	0.15	1.50	100.00	0.00
รวม			10.00	โมดูลัสความละเอียด = 6.30		

ตัวอย่าง 2 น้ำหนักก่อนการวิเคราะห์ 10 กิโลกรัม

ขนาด ตะแกรง	น้ำหนัก ตะแกรง (กก.)	น้ำหนัก ตะแกรง+ ค้ำ (กก.)	น้ำหนักค้ำ บนตะแกรง	ร้อยละที่ ค้ำบน ตะแกรง	ร้อยละค้ำ สะสมบน ตะแกรง	ร้อยละผ่าน สะสม
1 1/2"	5.58	5.58	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	5.34	5.34	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	5.65	5.65	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2"	5.71	5.71	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8"	5.82	10.10	4.28	42.30	42.30	57.20
# 4	5.67	10.97	5.30	52.70	95.00	4.20
# 8	5.75	6.05	0.30	3.50	98.50	1.20
ถาดรอง	5.13	5.25	0.12	1.50	100.00	0.00
รวม			10.00	โมดูลัสความละเอียด = 6.34		

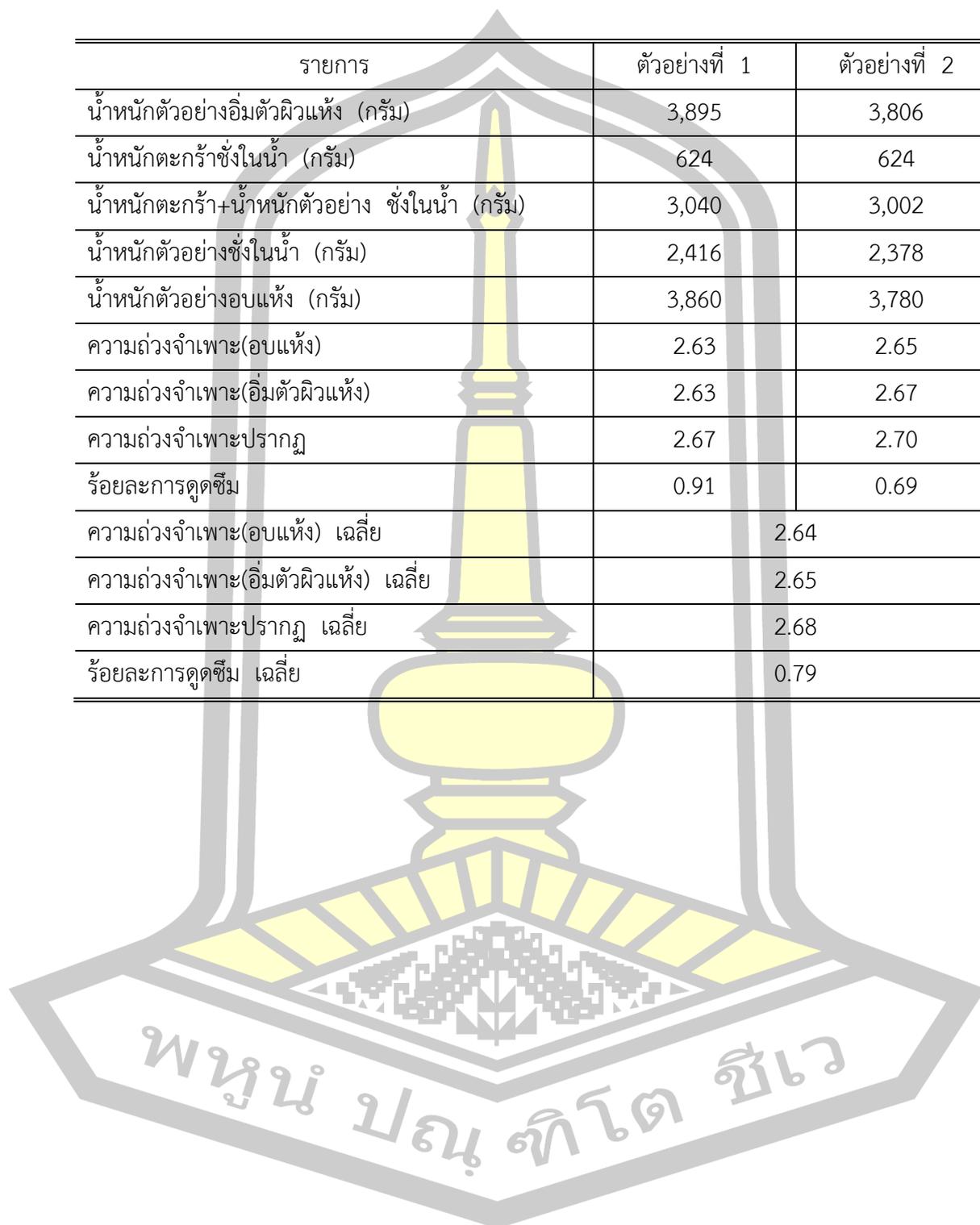
ตารางภาคผนวก 3 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมนองมวลรวมละเอียด (ทราย)

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักขวด (กรัม)	162.89	160.49
น้ำหนักขวด + น้ำหนักน้ำ (กรัม)	655.25	657.53
น้ำหนักตัวอย่างอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	500.00	500.00
น้ำหนักน้ำ+น้ำหนักตัวอย่าง+น้ำหนักขวด (กรัม)	965.74	967.11
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)	493.58	492.98
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง)	2.61	2.60
ความถ่วงจำเพาะ(อิ่มตัวผิวแห้ง)	2.63	2.62
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.70	2.69
ร้อยละการดูดซึมนอง	1.30	1.42
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง) เฉลี่ย		2.61
ความถ่วงจำเพาะ(อิ่มตัวผิวแห้ง) เฉลี่ย		2.62
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ เฉลี่ย		2.69
ร้อยละการดูดซึมนอง เฉลี่ย		1.37



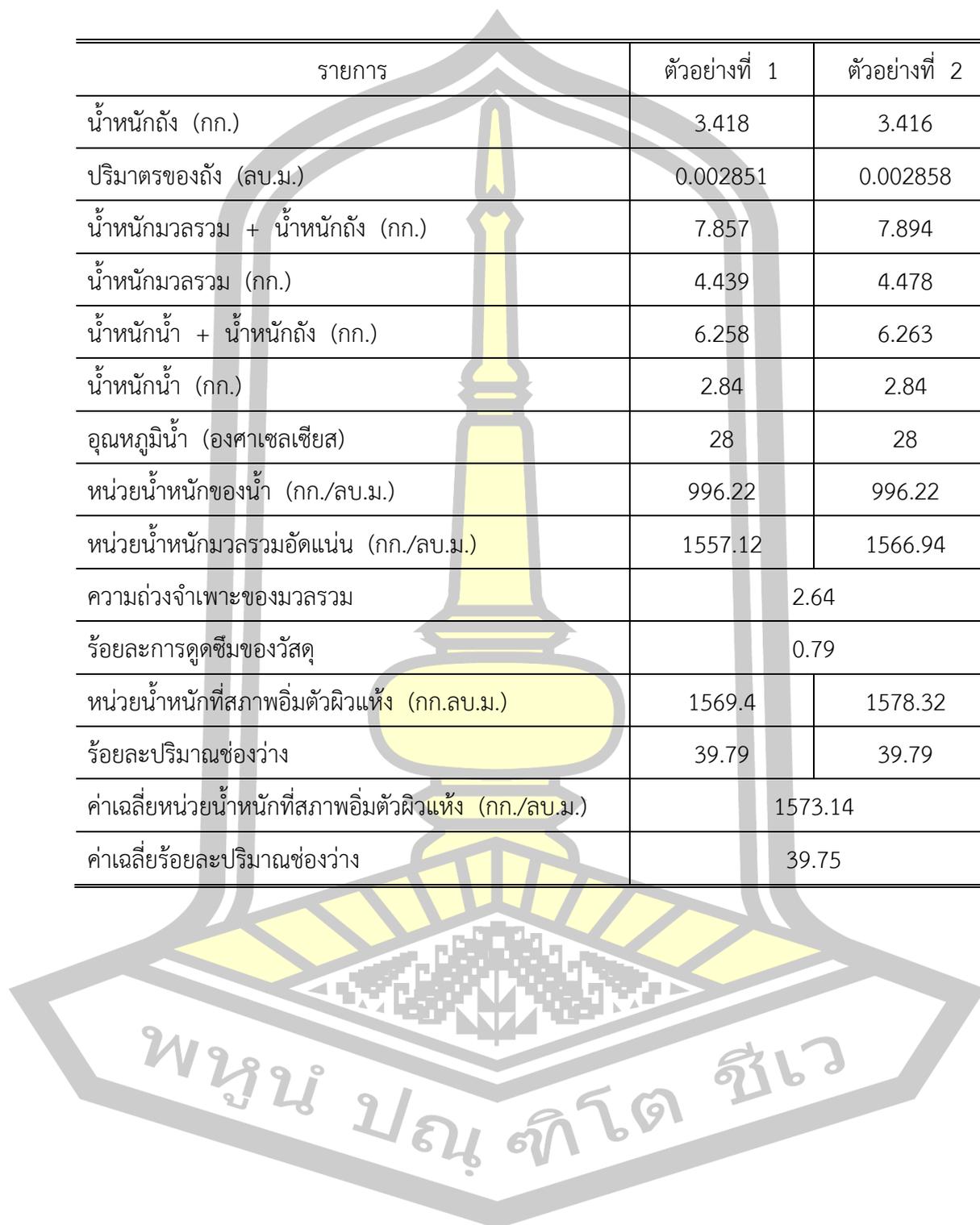
ตารางภาคผนวก 4 การหาค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมนองมวลรวมหยาบ (หิน)

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักตัวอย่างอิมตัวผิวแห้ง (กรัม)	3,895	3,806
น้ำหนักตะกร้าชั่งในน้ำ (กรัม)	624	624
น้ำหนักตะกร้า+น้ำหนักตัวอย่าง ชั่งในน้ำ (กรัม)	3,040	3,002
น้ำหนักตัวอย่างชั่งในน้ำ (กรัม)	2,416	2,378
น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)	3,860	3,780
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง)	2.63	2.65
ความถ่วงจำเพาะ(อิมตัวผิวแห้ง)	2.63	2.67
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ	2.67	2.70
ร้อยละการดูดซึมนอง	0.91	0.69
ความถ่วงจำเพาะ(อบแห้ง) เฉลี่ย		2.64
ความถ่วงจำเพาะ(อิมตัวผิวแห้ง) เฉลี่ย		2.65
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ เฉลี่ย		2.68
ร้อยละการดูดซึมนอง เฉลี่ย		0.79



ตารางภาคผนวก 5 หน่วยน้ำหนักแบบกระทุ้งและปริมาณช่องว่างระหว่างมวลรวมหยาบ (หิน)

รายการ	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
น้ำหนักถัง (กก.)	3.418	3.416
ปริมาตรของถัง (ลบ.ม.)	0.002851	0.002858
น้ำหนักมวลรวม + น้ำหนักถัง (กก.)	7.857	7.894
น้ำหนักมวลรวม (กก.)	4.439	4.478
น้ำหนักน้ำ + น้ำหนักถัง (กก.)	6.258	6.263
น้ำหนักน้ำ (กก.)	2.84	2.84
อุณหภูมิน้ำ (องศาเซลเซียส)	28	28
หน่วยน้ำหนักของน้ำ (กก./ลบ.ม.)	996.22	996.22
หน่วยน้ำหนักมวลรวมอัดแน่น (กก./ลบ.ม.)	1557.12	1566.94
ความถ่วงจำเพาะของมวลรวม	2.64	
ร้อยละการดูดซึมของวัสดุ	0.79	
หน่วยน้ำหนักที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (กก.ลบ.ม.)	1569.4	1578.32
ร้อยละปริมาณช่องว่าง	39.79	39.79
ค่าเฉลี่ยหน่วยน้ำหนักที่สภาพอิ่มตัวผิวแห้ง (กก./ลบ.ม.)	1573.14	
ค่าเฉลี่ยร้อยละปริมาณช่องว่าง	39.75	



ตารางภาคผนวก 6 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสาน

ชนิดตัวอย่าง	ตัวอย่างที่	ปริมาตร (ก่อน) กรัม	ปริมาตร (หลัง) กรัม	น้ำหนัก (ก่อน) กรัม	น้ำหนัก (หลัง)	ถ.พ.
ปูนซีเมนต์ปอร์ต แลนด์ Type I	1	0.60	20.20	321.99	384.07	3.14
	2	0.80	21.20	318.45	382.78	3.15
เถ้าแกลบบดละเอียด	1	0.30	20.50	319.39	367.55	2.38
	2	1.80	23.50	340.89	387.56	2.15

ตารางภาคผนวก 7 กำลังอัดของคอนกรีต ควบคุม

ประเภทคอนกรีต	คอนกรีตควบคุม. /ตัวอย่างที่			ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	
CC 300	333	308	311	317
10RH	369	365	350	361
20RH	357	345	340	347
30RH	323	311	312	315
CC 500	493	515	550	519
10RH	575	625	584	595
20RH	536	572	543	550
30RH	517	510	498	508
CC 700	721	715	698	711
10RH	791	785	778	785
20RH	745	759	764	756
30RH	712	714	688	705

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ฉลอง ปะลาชิตัง
วันเกิด	วันที่ 6 มีนาคม พ.ศ.2520
สถานที่เกิด	อำเภอเกษตรสมบูรณ์ จังหวัดชัยภูมิ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 23 หมู่ 8 ตำบลหนองข่า อำเภอเกษตรสมบูรณ์ จังหวัดชัยภูมิ รหัสไปรษณีย์ 36120
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	วิศวกรโยธา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ รหัสไปรษณีย์ 36000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2532 ประถมศึกษาโรงเรียนหนองแดงกุดจิก จังหวัดชัยภูมิ พ.ศ. 2538 มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนหนองบัวแดงวิทยา อำเภอหนองบัวแดง จังหวัดชัยภูมิ พ.ศ. 2548 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยศรีปทุม พ.ศ. 2561 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูนุ่ ปณุ่ ทิโต ชีเว