

พฤติกรรมของคานคองกริตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้



นายทรงเกียรติ หาญสันติ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0533-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS AFTER FIRE



Mr. Songkiat Hansanti

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0533-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์
โดย
สาขาวิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้
นายทรงเกียรติ หาญสันติ
วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. เอกสิทธิ์ ลิ้มสุวรรณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นายทรงเกียรติ หาญสันติ : พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้ (BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS AFTER FIRE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ.ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์,
163 หน้า., ISBN 974-03-0533-4.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาที่เผาไฟซึ่งจำลองสภาพไฟไหม้ตามมาตรฐาน ASTM E119 ที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตหลังเผาไฟ, พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลังเผาไฟ, ค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟ, พฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังเผาไฟ และ ความเหมาะสมในการประเมินความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยทำการทดสอบตัวอย่างจำนวน 10 ตัวอย่างเพื่อศึกษาค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตและพฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ฝังไว้หลังการเผาไฟ, ตัวอย่างคอนกรีตเพื่อศึกษาค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟ จำนวน 72 ตัวอย่างด้วยวิธี direct pull-out test และ ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15x30x210 ซม. จำนวน 10 ตัวอย่างซึ่งมีปริมาณการเสริมเหล็กเท่ากับ 0.195 เท่าของที่สภาวะสมดุลย์ จำนวน 10 ตัวอย่าง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังเผาไฟ

ผลการทดสอบพบว่า 1)กำลังอัดของลูกคอนกรีตที่ได้จากการเจาะตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟและมีแนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity 2)ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ เพราะช่วยป้องกันความร้อนจากไฟ โดยระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. ที่ทดสอบสามารถช่วยคงคุณสมบัติกำลังดึงครากและกำลังดัดประลัยภายหลังเผาไฟให้ลดลงในไม่เกิน 5% สำหรับการเผาไฟไม่เกิน 90 นาที และจากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นภายหลังเผาไฟไม่มีการเปลี่ยนแปลงในนัยสำคัญ 3)กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ โดยเหล็กกลมจะสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวมากกว่าเหล็กข้ออ้อยที่ระยะเวลาเผาไฟและที่ระยะคอนกรีตหุ้มเดียวกัน กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลมจะเหลือไม่ถึง 50% หลังจากเผาไฟ 15 นาทีสำหรับทุกระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมที่ศึกษาและหลังจากเผาไฟ 60 นาทีเหล็กกลมแทบไม่เหลือกำลังยึดเหนี่ยวเลย 4)กำลังเฉือนของคานตัวอย่างที่ทดสอบมีแนวโน้มลดลงประมาณ 10% ทุก ๆ 30 นาทีที่เผาไฟไม่เกิน 60 นาทีเมื่อเทียบกับกำลังเฉือนที่ได้จากข้อกำหนด ACI 318 คำนวณจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน แต่อย่างไรก็ดีค่ากำลังเฉือนตามข้อกำหนด ACI 318 ดังกล่าวยังคงมีดัชนีความปลอดภัยที่ระดับ 1.23 ที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 นาที 5)การเผาไฟที่ไม่เกิน 60 นาทีไม่ส่งผลต่อค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษา แต่ที่ระยะเวลาการเผาไฟ 90 นาทีค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษาจะลดลง 16% และ 15% ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา
สาขาวิชา วิศวกรรมโครงสร้าง
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

4170313121 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORD: FIRE / BOND STRENGTH / SHEAR STRENGTH / FLEXURAL STRENGTH / REBOUND HAMMER / ULTRASONIC PULSE VELOCITY

SONGKIAT HANSANTI : BEHAVIORS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS AFTER FIRE.

THESIS ADVISOR : DR. CHADCHART SITTIPUNT, Ph.D. 163 pp. ISBN 974-03-0533-4.

This research investigates the effects of fire duration on behavior of reinforced concrete members. Fire curve according to ASTM E119 was used in fire simulation of the study. Behavior of reinforced concrete studied in this research include compressive strength of coring concrete specimens, tensile behaviors of reinforcing bars, bond strength between concrete and reinforcing bars, pshear and flexure behaviors of reinforced concrete beams. Effectiveness of different nondestructive assessment methods on fire damaged reinforced concrete beams were als studied. Ten specimens were tested in the study of compressive strength of coring concrete specimens and tensile behaviors of reinforcing bars. Seventy two specimens were tested by method of direct pull-out test for the study of bond strength. Ten 15x30x210 cm. reinforced concrete beams with flexural steel reinforcement equal to 0.195 times the amount of reinforcing steel at balanced condition and with different amount of shear reinforceemnt were tested to study shear and flexural behaviors of reinforced concrete beams after fire.

Findings from the experiemental program are summarized as follows: 1)Compressive strength of coring concrete specimens decreased as fire duration increased. Correlation was observed between compressive strength of coring specimens and results from ultrasonic pulse velocity tests. 2)Concrete covering had a significant role in protecting reinforcing bars from fire. Yield strength and ultimate strength of reinforcing steel with 25 mm concrete cover and subjected to 90 minute fire decreased from its orginal values less than 5%. Elastic modulus of reinforcing steel was not changed when subjected to fire between 0 and 120 minutes. 3)Bond strength between concrete and reinforcing bars decreased as fire duration increased. Round bars lost bond strength more than deformed bars at the same fire duration and concrete covering. Round bars lost almost 50% and 100% of bond strength after subjected to 15 min. and 60 min. fire. 4)For the first 60 minutes, shear strength of tested beams decreased about 10% for every 30 minutes of fire duration. Shear strength of the beam that was subjected to 60 minute fire was about 1.23 time shear strength according to ACI 318-99. 5)Yield moment and ultimate moment of the tested beams were not affected by fire duration not exceeding 60 min. Yield moment and ulimate moment of the beam

Department Civil Engineering Student's signature.....

Field of study Structural Engineering Advisor's signature.....

Academic year 2001

กิตติกรรมประกาศ

อันดับแรกต้องขอขอบพระคุณ อ.ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้การอุปถัมภ์ และให้คำแนะนำที่ดีเสมอมา และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ(MTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ เป็นอย่างยิ่งที่อนุมัติเงินทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ในปีงบประมาณ 2543 จนทำให้โครงการนี้เป็นจริงขึ้นมาได้

โครงการนี้อาจสำเร็จได้เลยหากขาดน้อง ๆ นิสิตชั้นปีที่ 4 ของภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อันได้แก่ นายพัทธ์ชลิต กลิ่นหอม(โน้ต) นายสิทธิชัย อัฐฐิศิลป์เวท(เคน) นายอัจฉริย สายสมบัติ(เตน) นายธเนศ สุทธิวาริรักษ์(เนศ) นายธวัช อัครวิทยาภูมิ(วัช) นายธีรยุทธ สุรศักดิ์ชโรธร(ยุทธ) ที่มีส่วนร่วมทุกซ່ວ່มช่วยดำเนินโครงการนี้จนสำเร็จ กระผมขอขอบคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับทุกอย่างที่พวกเรา ได้ทำร่วมกัน

ขอขอบคุณ คุณวันทนีย์ พุกกะคุปต์ และ คุณอุษณีย์ กิตติกำธร นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มีส่วนช่วยในการวิจัยครั้งนี้ด้วยดีเสมอมา

ขอขอบคุณ พี่มนเกียรติ ชนิทรลีลา น้องอนันต์ ญัฐรังษิ และเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึง คุณชูเกียรติ ฉิมรุ่ง และคุณสมพงษ์ ขำแจ้จ้ง เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการคอนกรีต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พี่วิรัตน์ มณีกาญจนสิงหาวิศกรผู้ควบคุมเตา ที่มีส่วนช่วยให้การดำเนินโครงการวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

สุดท้ายต้องขอขอบคุณทุกคนในครอบครัวที่มีส่วนช่วยผลักดันให้ตัวกระผมก้าวเดินอย่างไม่ย่อท้อแม้มันจะยากลำบากเท่าไรก็ตาม ขอขอบคุณคุณยายด้านดีที่ทำให้ความรักและอยู่เป็นกำลังใจให้ผม ขอขอบคุณคุณพ่อสมประสงค์และคุณแม่พรทิพย์ที่ทำให้กำลังใจและสอนให้อดทนต่อสู้อย่างไม่ย่อท้อ ขอขอบคุณคุณป้าทิพย์วรรณที่คอยเป็นห่วงสุขภาพของกระผมตลอดเวลา ขอขอบคุณน้องสาวของกระผมที่คอยบ่นว่า “เมื่อไหร่จะเสร็จเสียที” ขอขอบคุณพี่ชายและพี่สาวของกระผมผู้ดีนรนต์สู่วิตที่ออสเตรเลียที่คอยให้กำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการต่อสู้ปัญหาอย่างไม่รู้จักเหน็ดเหนื่อย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทรงเกียรติ หาญสันติ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ.....	4
2.1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	5
2.1.3 งานวิจัยเกี่ยวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	5
2.2 ความสำคัญของงานวิจัย.....	7
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
2.3.1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง.....	7
2.3.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริมเมื่อเผาไฟ.....	10
2.3.3 กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119.....	10
2.3.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง(strain compatibility method)	12
2.3.5 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต.....	15
2.3.6 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม.....	18
2.3.7 การวิเคราะห์อุณหภูมิในหน้าตัดขณะทำการเผาด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนจากผลการทดสอบการนำ ความร้อนใน 1 มิติของ Abrams และ Gustaferro	19
บทที่ 3 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและกระบวนการในการทดสอบ	
3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ.....	20
3.1.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1.....	20
3.1.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 2.....	22

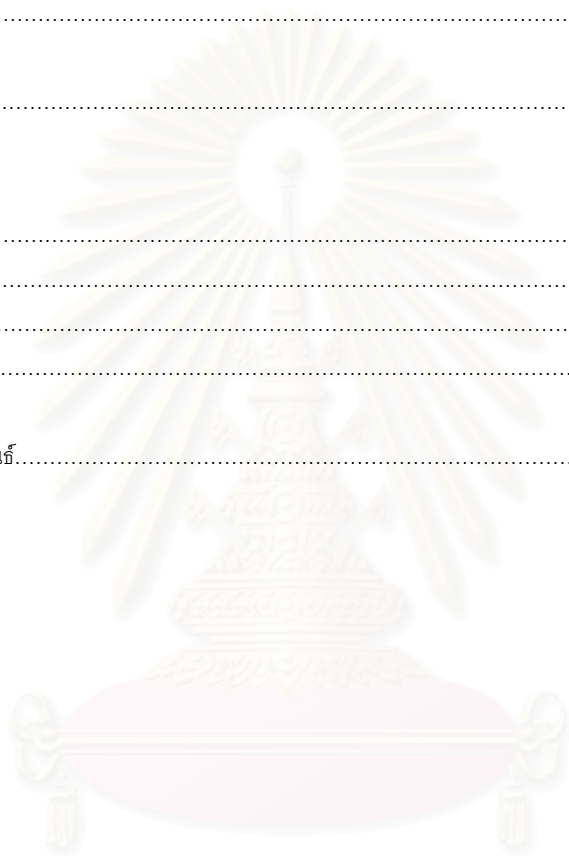
สารบัญ(ต่อ)

3.2 กระบวนการในการทดสอบ.....	25
3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตและเหล็กเสริม.....	25
3.2.2 การทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1.....	25
3.2.3 การทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 2.....	26
บทที่ 4 ผลการทดสอบ	
4.1 คุณสมบัติของคอนกรีต.....	28
4.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม.....	28
4.3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	28
4.3.1 อุณหภูมิภายในเตาขณะทำการเผา.....	28
4.3.2 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็ก.....	29
4.4 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	30
4.4.1 อุณหภูมิภายในเตาขณะทำการเผา.....	30
4.4.2 อุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ในขณะทำการเผา.....	30
4.4.3 อุณหภูมิในตัวอย่างเหล็กเสริมที่ฝังในตัวอย่างชนิด B ในขณะทำการเผา.....	30
4.4.4 อุณหภูมิเหล็กเสริมที่กึ่งกลางคานตัวอย่างในขณะทำการเผา.....	31
4.4.5 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายก่อนและหลังการเผาตัวอย่าง.....	31
4.4.6 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีต.....	31
4.4.7 ผลการทดสอบพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังจากถูกเผาไฟ.....	32
4.4.8 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน.....	33
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	
5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	35
5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	40
5.2.1 อุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างชนิด A ในขณะทำการเผาไฟ.....	40
5.2.2 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีต.....	44
5.2.3 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม.....	45
5.2.4 การวิเคราะห์การประเมินความเสียหายของโครงสร้างที่ถูกไฟเผาด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย.....	49
5.2.5 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเหล็กเสริมเทียบกับคุณสมบัติ ที่ 28 วัน.....	51
5.2.6 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเหล็กเสริมเทียบกับคุณสมบัติ ที่ได้จากการวิเคราะห์กำลังที่หลงเหลือหลังเผาไฟ.....	57

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุป.....	62
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	64
รายการอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	69
ภาคผนวก ข.....	126
ภาคผนวก ค.....	131
ภาคผนวก ง.....	145
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	163



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1-1	ขอบเขตของการศึกษาระดับปริญญาตรีที่ 1 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆที่มีผลต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม).....	2
1-2	ขอบเขตของการศึกษาระดับปริญญาตรีที่ 2 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวยวธรรมดา).....	2
3-1	รายละเอียดของตัวอย่างที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดสอบสำหรับปริญญาตรีที่ 1.....	20
3-2	ค่ากำลังประลัยที่ออกแบบที่ออกแบบตามข้อกำหนด ACI 318.....	23
3-3	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม.....	25
4-1	ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	28
4-2	ผลการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริม.....	28
4-3	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ได้กราฟไฟสะสมในการทดสอบปริญญาตรีที่ 1.....	28
4-4	ค่าเฉลี่ยกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ทำการทดสอบ.....	29
4-5	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ได้กราฟไฟสะสมในการทดสอบปริญญาตรีที่ 2.....	30
4-6	ผลการทดสอบแบบค่ากำลังอัดของลูกคอร์กคอนกรีตหลังเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ.....	31
4-7	ผลการทดสอบ ค่ากำลังดึงคราก ค่ากำลังดึงประลัย และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังจากที่เผาไฟโดยทดสอบที่อุณหภูมิห้องภายหลังการเผา 30 วัน.....	32
5-1	ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ(°C)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro.....	41
5-2	สรุปผลการทดสอบระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอร์กคอนกรีตซึ่งได้จากการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B.....	44
5-3	การวิเคราะห์ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังเฉือนของคานที่ทำการทดสอบเทียบกับ ข้อกำหนด ACI 318.....	51
5-4	ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบคานคอนกรีตที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดกับการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง(คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ).....	55
5-5	ผลการวัดอุณหภูมิสูงสุดในขณะเผาของคานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด.....	55
5-6	ค่าร้อยละของกำลังดึงคราก, กำลังดึงประลัย และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมที่หลงเหลือหลังเผาไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ครากที่หลงเหลือหลังเผาไฟ.....	57
5-7	ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละกำลังรับแรงเฉือนที่หลงเหลือ.....	58
5-8	สรุปคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดที่หลงเหลือ.....	59
5-9	การเปรียบเทียบค่าร้อยละโมเมนต์ครากที่หลงเหลือจากการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ.....	59
ก-1	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39.....	69
ก-2	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ splitting test ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496...	69
ก-3	ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ flexure one point test ตามมาตรฐาน ASTM C293.....	69
ก-4	ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 469.....	70
ก-5	ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม.....	70
ก-6	ผลการวัดขนาดตัวอย่าง(การทดสอบปริญญาตรีที่ 1)	71

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก-7	ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการเผาตัวอย่างของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	72
ก-8	ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 15 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	72
ก-9	ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 30 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	72
ก-10	ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 60 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	73
ก-11	ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ได้เผาไฟ.....	74
ก-12	ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เผาไฟ 15 นาที.....	75
ก-13	ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เผาไฟ 30 นาที.....	76
ก-14	ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เผาไฟ 60 นาที.....	77
ก-15	ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการเผาตัวอย่างของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	79
ก-16	ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 30 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	79
ก-17	ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 60 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	80
ก-18	ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 90 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	81
ก-19	ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	82
ก-20	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ที่ไม่ได้ทำการเผา.....	91
ก-21	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 30 นาที.....	92
ก-22	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 60 นาที.....	92
ก-23	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 90 นาที.....	93
ก-24	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 120 นาที.....	93
ก-25	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างที่มีได้เผาไฟ.....	94
ก-26	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 30 นาที.....	95
ก-27	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 60 นาที.....	96
ก-28	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 90 นาที.....	97
ก-29	ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 120 นาที.....	98
ก-30	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกครกคอนกรีตที่มีได้เผาไฟ.....	99
ก-31	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกครกคอนกรีตที่เผาไฟ 30 นาที.....	100
ก-32	ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกครกคอนกรีตที่เผาไฟ 60 นาที.....	101
ก-33	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่ได้เผาไฟ.....	102
ก-34	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.).....	103
ก-35	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง.....	104
ก-36	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.).....	105

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก-37	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เฝ้าไฟเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง.....	106
ก-38	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เฝ้าไฟเป็นเวลา 90 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.).....	107
ก-39	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เฝ้าไฟเป็นเวลา 90 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง.....	108
ก-40	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เฝ้าไฟเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.)	109
ก-41	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เฝ้าไฟเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง.....	110
ก-42	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง S-0.....	114
ก-43	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง S-30.....	115
ก-44	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง S-60.....	116
ก-45	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-0.....	117
ก-46	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-30.....	118
ก-47	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-60.....	119
ก-48	ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-90.....	120
ข-1	อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเสร็จ.....	130
ค-1	รายละเอียดของตำแหน่งในการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับฝาเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	135
ง-1	ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง ของรูปที่ 5-22 ถึง 5-25.....	150
ง-2	ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง ของรูปที่ 5-30.....	151
ง-3	ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง ของรูปที่ 5-31.....	152
ง-4	ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง ของรูปที่ 5-32.....	153
ง-5	ข้อมูลอุณหภูมิ(°C)จากการ digitize กราฟรูปที่ ง-3.....	155

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2-1	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอัตราส่วนค่ากำลังอัดที่เผาไฟต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิห้องที่เสนอโดย The Institution of Structural Engineers.....	8
2-2	ภาพแสดงกระบวนการเกิด moisture clog spalling.....	9
2-3	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอัตราส่วนกำลังดึงครากที่หลงเหลือหลังเผาไฟต่อกำลังดึงครากที่อุณหภูมิห้องเสนอโดย Tovey.....	10
2-4	กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119.....	11
2-5	ภาพประกอบการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง.....	12
2-6	กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงดึง.....	15
2-7	กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัดแบบไม่มีผลของการไอบริตของเหล็กปลอก(Kent and Park).....	16
2-8	กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัดแบบมีผลของการไอบริตของเหล็กปลอก(Kent and Park)	17
2-9	กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม(Kent and Park)	18
2-10	รูปแสดงแบบจำลองของปัญหาในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน.....	19
3-1	รูปหน้าตัด(ซ้าย) และรูปหน้าตัดด้านข้าง(ขวา)ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1.....	20
3-2	แบบรายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	22
3-3	แบบรายละเอียดการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง.....	23
3-4	แบบตัวอย่างชนิด A ที่ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิในหน้าตัดขณะเผา.....	24
3-5	แบบตัวอย่างชนิด B ที่ฝังเหล็ก DB16 2 ชิ้นและมีการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางของเหล็ก.....	24
4-1	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนทั้งหมดที่ทดสอบ.....	34
4-2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน ของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดทั้งหมดที่ทดสอบ.....	34
5-1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย(บน) และร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง) ของเหล็กกลม RB15 ที่มีระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆกับระยะเวลาที่เผาไฟ.....	35
5-2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย(บน) และร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง) ของเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่มีระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆกับระยะเวลาที่เผาไฟ.....	36
5-3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์กับระยะเวลาที่เผาไฟ ของเหล็กกลม RB15 และเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่ระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ.....	37
5-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวเหล็กจากการวิเคราะห์ของเหล็กกลม RB15 และเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่ระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ.....	38
5-5	แบบจำลองเพื่ออธิบายผลของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่มีต่อ พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก.....	39

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างชนิด A กับเวลาที่เผาไฟ....	40
5-7	กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ(°C)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro ณ เวลาเผา 30 นาที.....	42
5-8	กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ(°C)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro ณ เวลาเผา 60 นาที.....	42
5-9	กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ(°C)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro ณ เวลาเผา 90 นาที.....	43
5-10	กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ(°C)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro ณ เวลาเผา 120 นาที.....	43
5-11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเผาไฟที่กับค่ากำลังอัดของลูกคอร์คอนกรีตซึ่งได้จากการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B.....	44
5-12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงครากเฉลี่ยของเหล็กเสริม(บน) และร้อยละของค่ากำลังดึงครากเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง)กับระยะเวลาที่เผาไฟ.....	45
5-13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ยของเหล็กเสริม(บน) และร้อยละของค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง)กับระยะเวลาที่เผาไฟ.....	46
5-14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของเหล็กเสริม(บน) และร้อยละของค่า โมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง)กับระยะเวลาที่เผา.....	47
5-15	ไดอะแกรมการเปลี่ยนเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน.....	48
5-16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของลูกคอร์คอนกรีตกับความเร็วที่ได้จากการวัดด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity(บน) และค่ากำลังอัดของลูกคอร์คอนกรีตกับค่า rebound number ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี rebound hammer(ล่าง).....	49
5-17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละความเร็วเฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่างๆ(ขวา)ของตัวอย่างคานที่ทดสอบ.....	50
5-18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละความเร็วเฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่างๆ(ขวา)ของตัวอย่างชนิด A และ B.....	50
5-19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า rebound number เฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี rebound hammer กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละ rebound number เฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่างๆ(ขวา)ของตัวอย่างคานที่ทดสอบ.....	50
5-20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า rebound number เฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี rebound hammer กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละ rebound number เฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่างๆ(ขวา)ของตัวอย่างชนิด A และ B.....	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
5-21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนที่ได้จากการทดสอบและที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนด ACI 318 กับระยะเวลาที่เฝ้าไฟ(บน) และค่าร้อยละของกำลังเฉือนเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบกับที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนด ACI 318(ล่าง).....	52
5-22	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-0 กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง(คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีเฝ้าไฟ).....	53
5-23	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-30กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง(คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีเฝ้าไฟ).....	53
5-24	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-60กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง(คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีเฝ้าไฟ).....	54
5-25	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-90กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง(คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีเฝ้าไฟ).....	54
5-26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราส่วนของโมเมนต์ครากที่ได้จากการทดสอบต่อโมเมนต์ครากที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง(คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีเฝ้าไฟ)กับเวลาที่เฝ้าไฟ.....	55
5-27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของอัตราส่วนโมเมนต์ประลัยที่เวลาการเฝ้าไฟต่างๆต่อโมเมนต์ประลัยที่มีเฝ้าไฟกับเวลาที่เฝ้าไฟ.....	56
5-28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของอัตราส่วนดัชนีความเหนียวที่เวลาการเฝ้าไฟต่างๆต่อดัชนีความเหนียวที่มีเฝ้าไฟกับเวลาที่เฝ้าไฟ.....	56
5-29	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละกำลังเฉือนที่หลงเหลือที่ได้จากการทดสอบเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์.....	58
5-30	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-30 กับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่.....	60
5-31	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-60 กับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่.....	60
5-32	กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-90 กับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่.....	61
5-33	กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละโมเมนต์ครากที่หลงเหลือที่ได้จากการทดสอบเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่.....	61
ก-1	กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 15 นาที ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	73
ก-2	กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 30 นาที ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	73
ก-3	กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 60 นาที ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	74
ก-4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่ไม่เฝ้า.....	77
ก-5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่เฝ้า 15 นาที.....	78

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
n-6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่เผา 30 นาที.....	78
n-7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่เผา 60 นาที.....	78
n-8	กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 30 นาที ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	84
n-9	กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 60 นาที ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	85
n-10	กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 90 นาที ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	85
n-11	กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 120 นาที ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	85
n-12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่างๆจากการเผาไฟ 30 นาที.....	86
n-13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่างๆจากการเผาไฟ 60 นาที.....	86
n-14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่างๆจากการเผาไฟ 90 นาที.....	86
n-15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่างๆจากการเผาไฟ 120 นาที.....	87
n-16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลา จากการเผาไฟ 30 นาที.....	87
n-17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลา จากการเผาไฟ 60 นาที.....	87
n-18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลา จากการเผาไฟ 90 นาที.....	88
n-19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลา จากการเผาไฟ 120 นาที.....	88
n-20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 30 นาที.....	88
n-21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 60 นาที.....	89
n-22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 90 นาที.....	89
n-23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 120 นาที.....	89
n-24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 30 นาที.....	90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	เนื้อหา	หน้า
ก-25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 60 นาที.....	90
ก-26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 90 นาที.....	90
ก-27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 120 นาที.....	91
ก-28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่มีได้เผาไฟ.....	111
ก-29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 30 นาที.....	111
ก-30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 60 นาที.....	112
ก-31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 90 นาที.....	112
ก-32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 120 นาที.....	113
ก-33	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่มีได้เผาไฟ.....	121
ก-34	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่เผาไฟ 30 นาที.....	121
ก-35	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่เผาไฟ 60 นาที.....	122
ก-36	ภาพถ่ายแสดงความเสียหายของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ผ่านการเผาไฟ 90 นาที จนไม่อาจทำการทดสอบได้.....	122
ก-37	ภาพถ่ายแสดงความเสียหายของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟ 120 นาที จนไม่อาจทำการทดสอบได้.....	123
ก-38	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดที่มีได้เผาไฟ.....	123
ก-39	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที.....	124
ก-40	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาที.....	124
ก-41	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟเป็นระยะเวลา 90 นาที.....	125
ข-1	ตัวอย่างแบบไม่ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม(กรณีศึกษาที่ 1).....	126
ข-2	ตัวอย่างแบบไม่ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(กรณีศึกษาที่ 2).....	126
ข-3	ภาพการทดสอบกรีตคานชั้นแรก 10 ซม.	127
ข-4	ภาพการจี้คอนกรีตภายในคานชั้นแรก.....	127

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข-5	ภาพการเก็บตัวอย่างลูกปูนขนาด 15x30 ซม.	128
ข-6	ภาพการเก็บตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาด 10x10x50 ซม.	128
ข-7	ภาพการทดสอบกรีตและกระทุ้งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม.....	128
ข-8	ภาพการแต่งและฉาบผิวตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม...	128
ข-9	ภาพการเทและจี้คอนกรีตที่เทชั้นที่สอง.....	128
ข-10	ภาพการติดตั้งเดือยเหล็ก.....	128
ข-11	ภาพการเทและจี้คอนกรีตชั้นสุดท้าย.....	129
ข-12	ภาพการแต่งและฉาบผิว.....	129
ข-13	ภาพแสดงเมื่อแต่งและฉาบผิวเรียบร้อยแล้ว.....	129
ข-14	ภาพการบ่มชื้นด้วยกระสอบ.....	130
ข-15	ภาพการคลุมด้วยพลาสติกเพื่อกันฝน.....	130
ค-1	ภาพการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C143.....	131
ค-2	ภาพการทดสอบปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C231.....	131
ค-3	ภาพการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39.....	131
ค-4	ภาพการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ splitting test คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496.....	132
ค-5	ภาพการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ flexure one point test ตามมาตรฐาน ASTM C293.....	132
ค-6	ภาพการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469.....	132
ค-7	ภาพการทดสอบค่ากำลังของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM E8.....	133
ค-8	การตีความหมายเลขให้ตัวอย่างการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	133
ค-9	การวัดขนาดของตัวอย่างการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	133
ค-10	สัญลักษณ์ของระยะต่างๆของตัวอย่างการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	133
ค-11	ภาพการทำเครื่องหมาย ณ ตำแหน่งเริ่มต้นของเหล็กในคอนกรีตของตัวอย่างการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	133
ค-12	ภาพแสดงหมายเลขตำแหน่งในการติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	134
ค-13	ภาพการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับแผ่นพื้นฝ้าเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	134
ค-14	ภาพการเผาตัวอย่างและวัดอุณหภูมิในขณะที่เผาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์.....	134
ค-15	ภาพการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวด้วยเครื่อง Amsler universal testing machine 20 tons ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1.....	135
ค-16	ภาพแสดงการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับฝ้าเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	136
ค-17	แบบการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับฝ้าเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2.....	136
ค-18	ภาพการหาตำแหน่งเหล็กด้วยเครื่อง rebar locator.....	137
ค-19	ภาพการกำหนดตำแหน่งในการตรวจวัด.....	137
ค-20	ภาพแสดงตำแหน่งในการวัดแบบไม่ทำลายด้วยวิธี rebound hammer ในตัวอย่างคานและตัวอย่างชนิด A และ B.....	137

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ค-21	ภาพแสดงตำแหน่งในการวัดแบบไม่ทำลายด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity ในตัวอย่างคานและตัวอย่างชนิด A และ B.....	138
ค-22	การทดสอบด้วยวิธี rebound hammer.....	138
ค-23	การทดสอบด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity.....	138
ค-24	ภาพการเจาะลูกคอนกรีตจากตัวอย่างชนิด A และ B ด้วยเครื่องเจาะหิน.....	139
ค-25	ภาพการทดสอบหาค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39.....	139
ค-26	แบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังถูกเผาไฟ.....	139
ค-27	ภาพการทดสอบพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังจากถูกเผาไฟตามมาตรฐาน ASTM E8.....	140
ค-28	แบบการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบ.....	140
ค-29	ภาพจากการทดสอบคาน S-0.....	141
ค-30	ภาพจากการทดสอบคาน F-0.....	141
ค-31	ภาพจากการทดสอบคาน S-30.....	142
ค-32	ภาพจากการทดสอบคาน F-30.....	142
ค-33	ภาพจากการทดสอบคาน S-60.....	143
ค-34	ภาพจากการทดสอบคาน F-60.....	143
ค-35	ภาพจากการทดสอบคาน F-90.....	144
ง-1	ภาพประกอบการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งจากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง.....	145
ง-2	ภาพประกอบการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง.....	146
ง-3	กราฟผลการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำจากวัสดุคาร์บอนเนตโดยเผาไฟด้านเดียวของ Abrams M. S., Gustaferro A. H.	154
ง-4	การแบ่งโหนดในหน้าตัดคานตัวอย่างที่ทำการคำนวณ.....	155
ง-5	ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 30 นาทีที่เผาตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119.....	156
ง-6	ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 60 นาทีที่เผาตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119.....	156
ง-7	ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 90 นาทีที่เผาตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119.....	157
ง-8	ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 120 นาทีที่เผาตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119.....	157
ง-9	การแบ่งโหนดในหน้าตัดตัวอย่างที่ทำการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวเหล็กของตัวอย่างที่ศึกษาค่ากำลังยึดเหนี่ยว.....	158
ง-10	ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 30 นาทีที่เผาตามกราฟไฟ มาตรฐาน ASTM E119.....	160
ง-11	ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 60 นาทีที่เผาตามกราฟไฟ มาตรฐาน ASTM E119.....	160
ง-12	ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 90 นาทีที่เผาตามกราฟไฟ มาตรฐาน ASTM E119.....	161

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
ง-13	ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 120 นาทีที่เฝ้าตามกราฟไฟ E119.....	161
ง-14	ภาพประกอบหลักการในการนิยามจุดคราก.....	162
ง-15	กราฟที่ใช้ในการนิยามจุดครากจากข้อมูลผลการทดสอบคาน F-0.....	162



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อัคคีภัยเป็นอุบัติเหตุที่สร้างความสูญเสียต่อชีวิตและทรัพย์สินเป็นอย่างมากในทุกปี ทำให้มีการผลักดันให้มีการออกกฎหมายเพิ่มเติมในพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร (พ.ศ. 2522) ว่าด้วยการก่อสร้างอาคารต้านอัคคีภัย เพื่อช่วยป้องกันและลดความสูญเสียที่จะเกิดขึ้นจากอัคคีภัย ทำให้ในปัจจุบันมีการนำเข้าวัสดุทนไฟและวัสดุป้องกันไฟจากต่างประเทศเป็นจำนวนมากทุกปี เนื่องจากประเทศไทยยังขาดความสามารถในการผลิตภายในประเทศ ในการที่จะพัฒนาวัสดุดังกล่าวจำเป็นต้องมีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเมื่อประสบกับอัคคีภัย แต่ในปัจจุบันยังไม่ได้มีการศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างอาคารเมื่อประสบอัคคีภัยอย่างจริงจัง งานวิจัยครั้งนี้จึงจะมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ประสบอัคคีภัย เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่จำเป็นต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตวัสดุทนไฟและต่อการประเมินโครงสร้างอาคารหลังจากประสบอัคคีภัย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาผลของไฟไหม้ที่ระดับความรุนแรงต่างๆที่มีต่อ

1. การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างขณะเกิดไฟไหม้
2. คุณสมบัติของวัสดุหลังไฟไหม้ อันได้แก่ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ค่ากำลังดึงของเหล็กเสริม ค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม
3. พฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวธรรมดาหลังไฟไหม้
4. ความเหมาะสมของวิธีการประเมินความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังไฟไหม้ด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ

1. กรณีศึกษาที่ 1 ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆที่มีผลต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ซึ่งจะศึกษาถึงผลของระยะเวลาเผาไฟ, ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มและชนิดของเหล็กเสริม ที่มีต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟ
2. กรณีศึกษาที่ 2 ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆที่มีผลต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวธรรมดา ซึ่งจะศึกษาถึงผลของระยะเวลาเผาไฟ ที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอร์กคอนกรีตหลังเผาไฟ, พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลังเผาไฟ, พฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังเผาไฟ

และความเหมาะสมในการประเมินความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย

ใช้กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ในการจำลองสภาพไฟไหม้ โดยทำการทดสอบตัวอย่างเพื่อศึกษาถึงผลของการเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟจำนวน 72 ตัวอย่าง และทำการทดสอบชุดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและตัวอย่างเพื่อศึกษาถึงผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก, ค่ากำลังอัดของลูกคอร์กอร์คอนกรีตและพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังเผาไฟจำนวน 10 ชุด โดยมีขอบเขตการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 1-1 และ 1-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1-1 ขอบเขตของการศึกษากรณีศึกษาที่ 1 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม)

การจำลองสภาพไฟไหม้	มาตรฐาน ASTM E119
ระยะเวลาเผาไฟ	0, 15, 30 และ 60 นาที
ระยะคอนกรีตหุ้ม	25, 50 และ 75 มม.
ชนิดของเหล็กเสริม	เหล็กกลม RB15 และ เหล็กข้ออ้อย DB16
วิธีในการทดสอบ	Direct pull-out test

ตารางที่ 1-2 ขอบเขตของการศึกษากรณีศึกษาที่ 2 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวธรรมดา)

การจำลองสภาพไฟไหม้	มาตรฐาน ASTM E119
ระยะเวลาเผาไฟ	0, 30, 60, 90 และ 120 นาที
ขนาดของคานตัวอย่าง	15x30x210 ซม.
ปริมาณการเสริมเหล็ก	0.195 เท่าของที่สภาวะสมดุลย์
การเสริมเหล็กปลอก	เหล็กกลม RB6 ระยะห่าง 90 ซม. สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือน เหล็กกลม RB6 ระยะห่าง 12.5 ซม. สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด
อัตราส่วนระยะรับแรงเฉือนต่อความลึกประสิทธิผลของรูปตัด(a/d)	2.25
วิธีการทดสอบ	ให้แรงกระทำแบบ 2 จุดเท่ากันที่ระยะหนึ่งในสามของความยาวฐานรองรับ
การทดสอบแบบไม่ทำลาย	Ultrasonic pulse velocity test และ Rebound hammer test

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เข้าใจถึงผลของไฟไหม้ที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีต่อ

1. การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างขณะเกิดไฟไหม้

2. คุณสมบัติของวัสดุหลังไฟไหม้ อันได้แก่ ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ค่ากำลังดึงของเหล็กเสริม ค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม
3. พฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวธรรมดาหลังไฟไหม้
4. ความเหมาะสมของวิธีการประเมินความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังไฟไหม้ด้วยวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย
5. เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการตัดสินใจของวิศวกรในการพิจารณาความเหมาะสมในการประเมินสภาพอาคารที่ประสบอัคคีภัย รวมถึงการทำวิจัยในระดับสูงขึ้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเกี่ยวกับอคติภัยในอาคารที่ทำกันในต่างประเทศ มีมาตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 19 โดยในระยะเริ่มแรกนั้น เป็นงานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติในด้านต่างของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารที่ภาวะอุณหภูมิสูง อันได้แก่ เหล็กและคอนกรีต เป็นหลัก ต่อมาจึงได้มีการขยายผลการวิจัยต่อมาเป็นการวิจัยศึกษาถึงพฤติกรรมของโครงสร้างภายใต้สภาพไฟไหม้ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมของคานที่เกี่ยวกับไฟไหม้ มีดังนี้

2.1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ

ในปี ค.ศ. 1967 Harold W. Brewer [1] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (conductivity) ของคอนกรีต ที่ระดับความชื้นต่าง ๆ เขาได้สรุปผลการศึกษาของเขาว่า แม้ว่าคอนกรีตที่ทำจากวัสดุผสมชนิดเดียวกันและมีหน่วยน้ำหนักเท่ากันก็ให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ต่างกัน ทั้งนี้เพราะผลของความชื้นมีความสำคัญมากกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (transmittance) อาจคำนวณได้จากสูตรที่เขาได้นำเสนอหากทราบ ปริมาณความชื้น หน่วยน้ำหนัก และขนาดของคอนกรีต

ในปี ค.ศ. 1975 Tasnim Uddin และ Charles G. Culver [2] ได้ทำการศึกษารวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างในขณะเกิดไฟไหม้ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ยังมีการกล่าวถึงความไม่น่าเชื่อถือของกราฟไฟมาตรฐาน ซึ่งใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบเกี่ยวกับการทนไฟของโครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจากกราฟดังกล่าวมีสมมุติฐานที่ใช้ในการจำลองสภาพไฟไหม้ที่ไม่เหมาะสมกับความเป็นจริง

ในปี ค.ศ. 1994 Lene Kristensen และ Torben C. Hansen [3] ได้ทำการศึกษาการแตกร้าวของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตเนื่องจากผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (thermal shock) โดยทำการทดสอบตัวอย่างของซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 10x20 ซม. ทำการเพิ่มอุณหภูมิโดยแช่ตัวอย่างในอ่างน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ แล้วสังเกตการแตกร้าวด้วยตาเปล่าและด้วยเครื่อง ultrasonic pulse velocity สำหรับตัวอย่างซีเมนต์เพสต์และคอนกรีตตามลำดับ ซึ่งได้ผลสรุปว่า ตัวอย่างซีเมนต์เพสต์เกิดการแตกร้าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมากกว่า 30 °C และตัวอย่างคอนกรีตเกิดการแตกร้าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วมากกว่า 50 °C

ในปี ค.ศ. 1996 Wei-Ming Lin, T. D. Lin และ L. J. Powers-Couche [4] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างของคอนกรีตที่ถูเผาไฟ ทำการทดสอบกับตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. จำลองสภาพไฟไหม้โดยการนำตัวอย่างไปไว้ในเตาไฟฟ้าและค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการซึ่งอยู่ในช่วง 20-900 °C แล้วทิ้งไว้ประมาณ 15 นาทีจึงนำตัวอย่างออกจากเตาเก็บตัวอย่างโดยการทิ้งไว้ในอากาศและบ่มในน้ำเพื่อศึกษาผลของการปฏิกิริยาไฮเดรชัน ใช้เครื่อง scanning electron microscope (SEM) ในการศึกษา

โครงสร้างของตัวอย่าง ผลการทดสอบพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 300°C คอนกรีตตัวอย่างเกิดการแตกร้าวเล็กน้อย ที่อุณหภูมิ $300-500^{\circ}\text{C}$ มีการแตกร้าวบริเวณรอบมวลรวม และที่อุณหภูมิมากกว่า 500°C เกิดการสลายตัวของสารประกอบที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันทำให้เกิดการแตกร้าวในซีเมนต์เพสต์และที่รอบ ๆ มวลรวมอย่างมาก การบ่มน้ำมีส่วนช่วยให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันซึ่งมีผลต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกเผาไฟ

2.1.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ. 1991 Bruce Ellingwood และ T.D. Lin [5] ทำการศึกษาถึงพฤติกรรมของกำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในขณะเกิดไฟไหม้ โดยทดสอบตัวอย่างคานทั้งหมด 6 ตัวอย่างซึ่งออกแบบการทดสอบไว้เพื่อศึกษาผลของ 1) ความหนาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 2) ชนิดของกราฟไฟที่ใช้จำลองสภาพไฟไหม้ (ASTM E119 และ SDHI (short duration high intensity)) 3) โอกาสและความเป็นไปได้ที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในขณะเกิดไฟไหม้ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าคานทั้งหมดเกิดการวิบัติเนื่องจากผลของแรงดัดทั้งสิ้น แม้ว่าคานทั้งหมดจะเกิดการแตกร้าวบริเวณฐานรองรับขึ้นก่อนการแตกร้าวเนื่องจากแรงดัดที่ช่วงกลางคานก็ตามทำให้พวกเขาสรุปว่า ณ ที่อุณหภูมิสูงเช่นในขณะเกิดไฟไหม้ กำลังรับแรงเฉือนของคานไม่น่าจะเป็นปัญหาสำคัญที่ควบคุมการวิบัติของคาน ส่วนผลของระยะหุ้มคอนกรีตนั้นแทบจะไม่มีผลต่อการแอ่นตัวของคาน และชนิดของกราฟไฟที่ใช้ในการจำลองสภาพไฟไหม้ที่ต่างกันก็ส่งผลต่อการกระจายอุณหภูมิซึ่งทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กมีพฤติกรรมที่ต่างกัน

2.1.3 งานวิจัยเกี่ยวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ในปี ค.ศ. 1976 Eduardo Salse และ Tung D. Lin [6] ได้ทำการศึกษาผลของไฟไหม้ที่มีต่อการวิบัติคานกรตเสริมเหล็ก พวกเขาได้ศึกษาโดยทำการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี finite difference และนำผลอุณหภูมิที่วิเคราะห์ได้ไปทำการคำนวณหากลังโมเมนต์ดัดด้วยวิธี virtual work ทั้งนี้พวกเขาคิดถึงแรงอัดต้านทานการยึดตัว (axial restraint) เนื่องจากส่วนของโครงสร้างอื่นด้วย พวกเขาสรุปผลการศึกษาว่าผลของแรงอัดต้านทานการยึดตัวจะมีผลเพิ่มอัตราคราบน้ำของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแนวที่มันกระทำผ่านและระยะการโค้งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเองด้วย

ในปี ค.ศ. 1977 James M. Becker และ Boris Bresler [7] ได้นำเสนองานวิจัยของพวกเขาเกี่ยวกับ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์โครงเฟรมในสภาพไฟไหม้ด้วยวิธี finite element โดยโปรแกรมนี้จะแบ่งเป็น 2 โปรแกรมย่อย คือ โปรแกรมย่อย FIRES-T ทำหน้าที่วิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิในชิ้นส่วนโครงสร้างตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน และโปรแกรมย่อย FIRES-RC ทำหน้าที่วิเคราะห์โครงสร้างโดยอาศัยวิธี nonlinear direct stiffness method โดยสติฟเนสของโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับการกระจายอุณหภูมิในชิ้นส่วนโครงสร้าง ซึ่งคำนวณจากโปรแกรมย่อย FIRES-T แต่ก็ไม่ได้มีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับข้อมูลการทดสอบจริงแต่อย่างใด

ในปี ค.ศ. 1979 Nestor R. Iwanikiw [8] ทำการศึกษาวิจัยโดยสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์กำลังของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีการยึดรั้งที่ขอบทั้ง 4 ด้านภายใต้สภาพไฟไหม้ โดยใช้วิธี yield line analysis ในการวิเคราะห์และทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับโปรแกรม FASBUS ที่ใช้วิธี

nonlinear finite element analysis ในการวิเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่าโปรแกรมดังกล่าวให้ผลการวิเคราะห์ที่ดี และมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ของโปรแกรม FASBUS แต่มีข้อดีกว่าการใช้โปรแกรม FASBUS หลายประการ คือ เป็นโปรแกรมที่เข้าใจและใช้งานได้ง่ายกว่า และยังมีค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ที่น้อยกว่า

ในปี ค.ศ. 1980 Bruce Ellingwood และ James R. Shaver [9] ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรม FIRES-RC ในการวิเคราะห์การโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาพไฟไหม้ซึ่งจำลองโดยกราฟไฟมาตรฐาน (standard fire curve: ASTM E119) และนำผลที่วิเคราะห์ได้มาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบจริงจากผลการศึกษาของ Gustafarro, Abrams และ Salse ที่ Portland Cement Association ในปี ค.ศ. 1971 ซึ่งใช้กราฟไฟมาตรฐาน ในการจำลองสภาพไฟไหม้เช่นกัน ในผลการเปรียบเทียบแสดงความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี จากนั้นพวกเขาได้ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเดียวกันนี้ แต่เปลี่ยนการจำลองสภาพไฟไหม้ด้วยกราฟไฟมาตรฐาน เป็นกราฟไฟแบบ LDMI (long duration moderate intensity fire curve), SDHI-95 (95 percentile short duration high intensity fire curve) และ SDHI-M (mean short duration high intensity fire curve) เพื่อจำลองสภาพการเกิดไฟไหม้จริง ทั้งนี้เพราะกราฟไฟมาตรฐานมีข้อด้อยในการจำลองสภาพการเกิดไฟไหม้จริงเนื่องจากกราฟดังกล่าวคำนึงถึงการเพิ่มอุณหภูมิตามระยะเวลาที่ผ่านไป ผลการศึกษาโดยการเปลี่ยนกราฟไฟแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

ในปี ค.ศ. 1997 Zhaohui Huang และ Andrew Platten [10] ทำการศึกษาวิจัยโดยสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้สภาพไฟไหม้ โดยใช้วิธี nonlinear finite element analysis ในการวิเคราะห์ และนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบจากผลการศึกษาของ Bruce Ellingwood และ T.D. Lin ในปี ค.ศ. 1991 ผลการเปรียบเทียบพบว่าผลการวิเคราะห์และข้อมูลการทดสอบมีความสอดคล้องในระดับความผิดพลาด 7-22%

การวิจัยในประเทศไทยนั้นยังมีน้อยและส่วนใหญ่จะเป็นการวิจัยในเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิสูงที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุหลังเผาไฟ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

ในปีพ.ศ. 2531 บัณฑิต เกษรมาลา [11] ได้ทำการศึกษาวิจัยถึงผลของกำลังที่แปรเปลี่ยนตามเวลาของคอนกรีตหลังจากถูกไฟไหม้ โดยทำการทดสอบแท่งคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. ที่ผ่านการเผาในเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300-450 °C และนำตัวอย่างดังกล่าวมาทำการศึกษาค่ากำลังอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น และ กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็ก ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 1 วันถึง 6 เดือนหลังจากถูกไฟไหม้ ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าคุณสมบัติทั้ง 3 ที่กล่าวมามีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากผลของไฟไหม้ แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าทั้ง 3 นี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ผ่านไป (โดยเฉพาะค่ากำลังยึดเหนี่ยวจะลดลงต่ำสุดเหลือเท่ากับ 20% ของค่าเริ่มต้นและจะเพิ่มขึ้นเป็น 70% ของค่าเริ่มต้นหลังจากผ่านไปประมาณ 6 เดือน)

ในปีพ.ศ. 2543 เจษฎา เกษมเศรษฐ์ และ หทัยรัตน์ มณีเทศ[12] ได้ศึกษาวิจัยถึงความสัมพันธ์ของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม เมื่อเผาไฟในช่วงเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที สำหรับคอนกรีตที่มีกำลังออกแบบ 280 และ 380 กก./ซม.² โดยใช้เตาเผาปูนด้วยอิฐทนไฟและใช้แก๊สเป็นเชื้อเพลิง มีการหุ้มส่วนของเหล็กเสริมที่ยื่นในตัวอย่างทดสอบด้วยคอนกรีตทรงกระบอก ซึ่งผลการศึกษาพบว่าค่าคุณสมบัติดังกล่าวของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมากตามระยะเวลาที่ใช้ในการเผาไฟ และได้ความสัมพันธ์ของแรงยึดเหนี่ยวภายหลังการเผาไฟในเวลา t นาที ในรูป $\mu(t)/\mu_0 = 1 - \alpha t$ โดยที่ค่า $\alpha = 0.0078$ และ 0.0075 สำหรับค่ากำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 280 และ 380 กก./ซม.² ตามลำดับ

2.2 ความสำคัญของงานวิจัย

จนถึงปัจจุบันยังมิได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังถูกไฟไหม้ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับวิศวกรที่เกี่ยวข้องในการพิจารณาประเมินสภาพอาคารที่ถูกไฟไหม้และอนุมัติให้มีการใช้งานหรือรื้อถอนอาคารต่อไป การเข้าใจถึงพฤติกรรมของคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังถูกไฟไหม้จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานและเพื่อการอ้างอิงสำหรับวิศวกรที่เกี่ยวข้องกับการประเมินสภาพอาคารที่ถูกไฟไหม้

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 คุณสมบัติของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

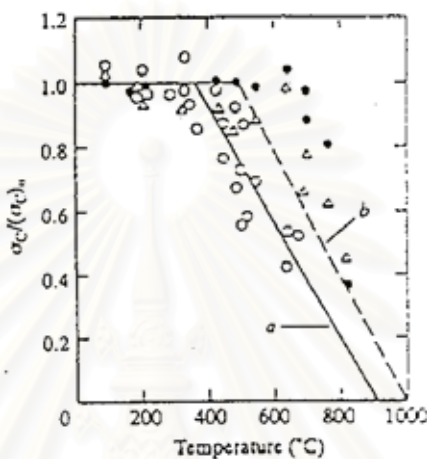
2.3.1.1 กำลังอัด (compressive strength) กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตขึ้นอยู่กับเกิดการไมโครแครกที่ผิวระหว่างมวลหยาบกับซีเมนต์เพสต์และในตัวซีเมนต์เพสต์เอง การวิบัติของคอนกรีตเกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดการแตกร้าวที่ผิวสัมผัสระหว่างมวลหยาบกับมอลตาร์ ซึ่งเรียกว่า บอนด์แครก ร่วมกับการเกิดการแตกร้าวในเนื้อมอลตาร์เองซึ่งเรียกว่า มอลตาร์แครก ที่ระดับความเค้น 70-90% ของค่ากำลังอัดประลัย[13] ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดไมโครแครกมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากผลของการหดตัวของซีเมนต์เพสต์และการขยายตัวของมวลหยาบ สำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงทำได้ 3 วิธี[14] คือ

1. แบบ UR (specimen heated unstressed, tested at room temperature) ทำโดยเผาตัวอย่างจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วปล่อยให้เย็นตัวที่ อุณหภูมิห้อง จากนั้นก็นำไปทดสอบกำลังอัด การทดสอบแบบนี้จะคำนึงถึงกำลังของคอนกรีตภายหลังจากการเผา
2. แบบ UE (specimen heated unstressed, tested at elevated temperature) ทำโดยเผาตัวอย่างจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการแล้วรอให้อุณหภูมิภายในเนื้อคอนกรีตมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ แล้วทำการทดสอบกำลังอัดที่อุณหภูมิสูง
3. แบบ SE (specimen heated stressed, tested at elevated temperature) ทำโดยการกดน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 25-55% ของค่ากำลังอัดประลัยที่อุณหภูมิห้อง) ในขณะที่เราจะได้อุณหภูมิที่ต้องการและรอให้อุณหภูมิภายในเนื้อคอนกรีตมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นก็ทำการเพิ่มน้ำหนักเพื่อทดสอบกำลังรับแรงอัด

จากผลการทดสอบในอดีต [15] มีข้อสังเกตดังนี้

1. อัตราส่วนค่ากำลังอัดที่เผาไฟต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิห้องไม่ขึ้นกับ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์, ชนิดของซีเมนต์ หรือ ค่ากำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง
2. อัตราส่วนมวลหยาบต่อซีเมนต์เพสต์มีผลอย่างมาก โดยคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์มากจะทำให้ค่าอัตราส่วนค่ากำลังอัดที่เผาไฟต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิห้องลดลงมากกว่า คอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์เพสต์น้อยกว่า

3. การทดสอบด้วยวิธี UR จะให้ค่ากำลังอัดต่ำสุด ส่วนวิธี SE จะให้ค่ากำลังอัดสูงสุดโดยไม่ขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักกดในระหว่างการเผา
4. คอนกรีตมวลเบาจะมีค่าอัตราส่วนค่ากำลังอัดที่เผาไฟต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิห้องลดลงน้อยที่สุด ส่วนคอนกรีตที่ทำจากวัสดุพวกซิลิเกตจะมีอัตราส่วนค่ากำลังอัดที่เผาไฟต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิห้องลดลงมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอัตราส่วนค่ากำลังอัดที่เผาไฟต่อกำลังอัดที่อุณหภูมิห้องที่เสนอโดย The Institution of Structural Engineers[16](a คอนกรีตธรรมดา ;b คอนกรีตมวลเบา)

2.3.1.2 โมดูลัสยืดหยุ่น (elastic modulus) จากผลการทดสอบของ Bennetts[15] พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตจะมีค่าลดลงและลดลงเร็วกว่าค่ากำลังอัดของคอนกรีต

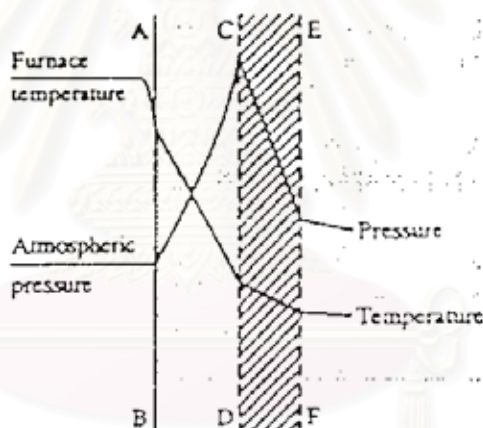
2.3.1.3 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม (bond strength) Schneider[17] ได้รวบรวมและสรุปผลการศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ไว้ดังนี้

1. เหล็กข้อย้อยหรือเหล็กกลมที่เป็นสนิม จะมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมลดลงในอัตราที่ใกล้เคียงการลดลงของค่ากำลังอัด ส่วนเหล็กกลมนั้นจะมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมลดลงในอัตราที่มากกว่าการลดลงของค่ากำลังอัด
2. ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของคอนกรีตมีผลอย่างมากต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม โดยคอนกรีตที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวน้อยกว่าจะมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่สูงกว่าที่อุณหภูมิสูง
3. อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริมไม่มีผลต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม

2.3.1.4 การแตกเนื่องจากผลของอุณหภูมิ(spalling)[18] การแตกดังกล่าวมีด้วยกัน 3 ลักษณะคือ

1. Local spalling เช่น การแตกที่ผิว การแยกตัวของวัสดุผสม หรือการแตกที่มุม เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อุณหภูมิสูง
2. Sloughing off เช่น การแยกตัวของผิวคอนกรีตชั้นเล็กๆ ซึ่งเกิดขึ้นอย่างช้าๆในระหว่างการเผา
3. Explosive spalling เป็นการแตกที่สร้างความเสียหายอย่างรุนแรง ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า moisture clog spalling

การแตกใน 2 แบบแรกนั้นไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างมากนัก แต่การแตกแบบที่ 3 จะก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงต่อโครงสร้าง จะเกิดกับคอนกรีตที่มีความชื้นสูงและมีคุณสมบัติการซึมน้ำต่ำ ซึ่งสามารถอธิบายขบวนการเกิดได้ดังนี้



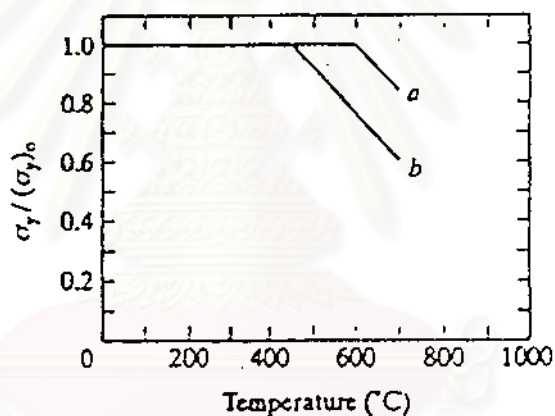
รูปที่ 2-2 ภาพแสดงกระบวนการเกิด moisture clog spalling

ดังรูปที่ 2-2 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ปริมาณความชื้นที่สะสมในเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวที่สัมผัสความร้อนจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่เย็นกว่า และจะถูกดูดซึมไว้ เมื่อเวลาผ่านไปบริเวณที่แห้งจะขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ ความชื้นจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่เย็นกว่าและสะสมจนเกิดชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว (CDEF) เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นที่สะสมที่ผิวหน้าของชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว(CD)ระเหยกลายเป็นไอเคลื่อนที่ไปยังผิวสัมผัสไฟผ่านชั้น ABCD เนื่องจากไม่อาจผ่านชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว (CDEF) ไปได้ หากคอนกรีตมีคุณสมบัติการซึมน้ำสูงจะทำให้ความชื้นที่สะสมอยู่ในชั้น CDEF สามารถระบายออกไปได้และลดความดันลง แต่หากคอนกรีตมีคุณสมบัติการซึมน้ำต่ำจะทำให้เกิดความดันสูงที่ผิวหน้าของชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว (CD) และเมื่อความดันดังกล่าวมีค่าเกินกว่าค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตจะทำให้เกิดการแตกขึ้น กระบวนการดังกล่าวก็จะเริ่มเกิดขึ้นอีกและเกิดขึ้นไปเรื่อยๆ โดยทั่วไปความหนาของรอยแตกจะประมาณ 25 มม.จากผิวสัมผัสไฟ

2.3.2 คุณสมบัติของเหล็กเมื่อเผาไฟ

จากผลการศึกษาของ Holmes[19] เกี่ยวกับคุณสมบัติของเหล็กที่รีดร้อน (hot-rolled) ที่อุณหภูมิสูง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เหล็กที่สัมผัสไฟที่ระดับ 600 °C ในระยะเวลาที่จำกัด จะไม่มีผลต่อกำลังดึงภายหลังการเผาและโครงสร้างภายในเนื้อเหล็ก
2. ที่อุณหภูมิ 600 °C แต่ไม่เกิน 727 °C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงในอนุภาคของเหล็กซึ่งเรียกว่า spheroidization ซึ่งจะทำให้กำลังดึงภายหลังการเผาจะลดลงเมื่อเทียบกับกำลังดึงที่อุณหภูมิห้อง
3. ที่อุณหภูมิสูงกว่า 727 °C โครงสร้างภายในเนื้อเหล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างที่มีอนุภาคหยาบขึ้น และกำลังดึงภายหลังการเผาจะลดลงเมื่อเทียบกับกำลังดึงที่อุณหภูมิห้อง ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าอัตราส่วนกำลังดึงครากที่หลงเหลือหลังเผาไฟต่อกำลังดึงครากที่อุณหภูมิห้องเสนอโดย Tovey[20] (a เหล็กที่รีดร้อน; b เหล็กที่รีดเย็น)

2.3.3 กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119

จากการศึกษาวิจัยข้อมูลจากสภาพไฟไหม้จริงในอดีต ได้มีการพัฒนากราฟไฟมาตรฐานขึ้นเพื่อใช้จำลองสภาพไฟไหม้จริงในการทดสอบ โดยอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ซึ่งริเริ่มโดยนักวิจัยชาวอเมริกัน Ingberg[21] เขาเสนอแนวคิดในการสร้างกราฟไฟมาตรฐานโดยเรียกว่า แนวคิดเกี่ยวกับปริมาณไฟ (fire load concept) ซึ่งมีสมมุติฐานที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. อัตราการทนไฟขององค์อาคารขึ้นอยู่กับ ความรุนแรงของไฟ (fire severity) เพียงอย่างเดียว โดยความรุนแรงของไฟที่เกิดขึ้นในอาคารหรือเกิดจากการจำลองของเตาทดสอบคือ พื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิ-เวลา

2. ความรุนแรงของไฟขึ้นอยู่กับ ความเข้มของปริมาณไฟ (fire load density) ซึ่งก็คือ อุณหภูมิเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

สมมุติฐานทั้งสองข้อที่ใช้สร้างกราฟมาตรฐานไฟเพื่อจำลองสภาพไฟไหม้จริง เมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าไม่มีความสมเหตุสมผลในการจำลองสภาพไฟไหม้จริง ทั้งนี้เพราะ

1. ตามสมมุติฐานข้อที่ 1 หากไฟไหม้ที่มีความเข้มของปริมาณไฟมากในระยะเวลาสั้น ๆ กับไฟไหม้ที่มีความเข้มของปริมาณไฟน้อยในระยะเวลาสั้น ๆ แต่มีพื้นที่ใต้กราฟ อุณหภูมิ-เวลาเท่ากันจะมีพฤติกรรมที่ไม่ต่างกันเนื่องจากมีความรุนแรงของไฟเท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่เป็นเช่นนั้น เพราะการเพิ่มอุณหภูมิอย่างกะทันหันจะทำให้เกิดการวิบัติของโครงสร้าง ในขณะที่การที่อุณหภูมิที่ละน้อยอาจไม่ทำให้โครงสร้างเกิดการวิบัติ
2. ตามสมมุติฐานข้อที่ 2 ความรุนแรงของไฟจริง ๆ แล้วไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของปริมาณไฟเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับ พื้นที่ของช่องเปิด, ชนิดและปริมาณของ เชื้อเพลิง, อัตราการเผาไหม้, ปริมาณวัสดุที่ไม่ติดไฟ และ คุณสมบัติการนำความร้อนของ กำแพง พื้น และ ฝ้าเพดาน

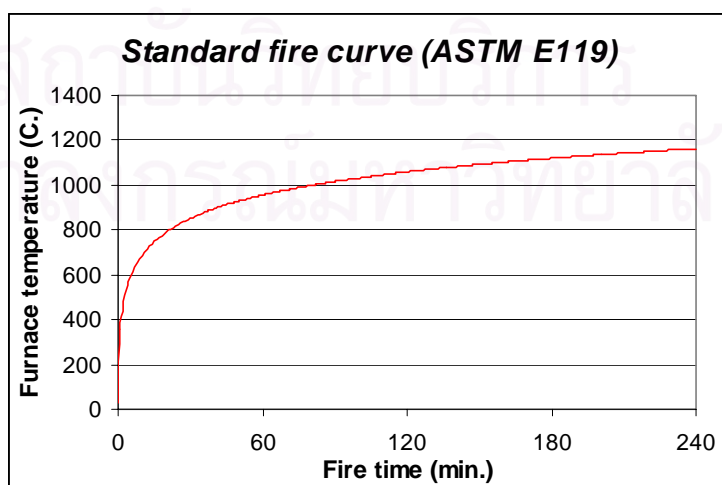
แม้ว่าสมมุติฐานทั้งสองข้อที่ใช้ในการสร้างกราฟไฟมาตรฐานจะไม่ค่อยถูกต้องนัก ในการจำลองสภาพไฟไหม้จริง แต่อย่างไรก็ตามกราฟดังกล่าวก็ยังคงได้รับการยอมรับโดยทั่วไป ในการจำลองสภาพไฟไหม้ที่ใช้ในการทดสอบอัตราการทนไฟของโครงสร้าง ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ-เวลาของกราฟไฟมาตรฐาน ดังรูปที่ 2-4 เป็นไปตามสมการ 2.1

$$T = T_0 + 345 \cdot \text{Log}(8t + 1) \quad (2.1)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลา t , °C

T_0 = อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้น, °C

t = เวลานั้นนับตั้งแต่เริ่มการทดสอบ, นาที



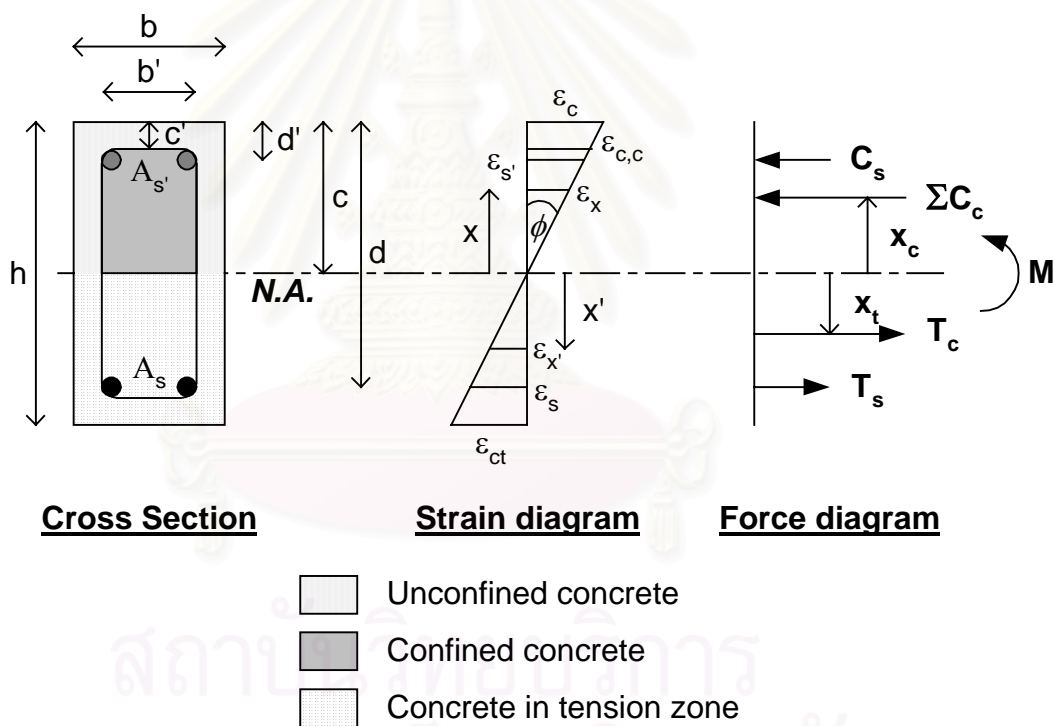
รูปที่ 2-4 กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119

2.3.4 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (strain compatability method)

สมมุติฐานของการวิเคราะห์ มีดังนี้

1. ภาชนะรูปตัดยังคงเป็นระนาบทั้งก่อนและหลังการรับแรงดัด
2. การยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเป็นไปอย่างสมบูรณ์
3. ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นไปตามแบบจำลองที่เลือกใช้

วิธีการวิเคราะห์อาศัยหลักการสมดุลของแรงอัดและแรงดึงบนหน้าตัดแสดงในรูปที่ 2-5 โดยมีหลักการดังนี้



รูปที่ 2-5 ภาพประกอบการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง

จากสมมุติฐานข้อ 1 และ 2 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของความเครียดในหน้าตัด ได้ดังสมการ 2.2

$$\phi = \frac{\mathcal{E}_x}{x} = \frac{\mathcal{E}_{x'}}{x'} = \frac{\mathcal{E}_{ct}}{h-c} = \frac{\mathcal{E}_s}{d-c} = \frac{\mathcal{E}_{s'}}{c-d'} = \frac{\mathcal{E}_{cc}}{c-c'} = \frac{\mathcal{E}_c}{c} \quad (2.2)$$

เมื่อ \mathcal{E}_x = ความเครียดที่วัดจากแกนสะเทินไปทางด้านรับแรงอัดไประยะ x

x = ระยะทางจากแกนสะเทินไปทางด้านรับแรงอัด

$\mathcal{E}_{x'}$ = ความเครียดที่วัดจากแกนสะเทินไปทางด้านรับแรงดึงไประยะ x'

x' = ระยะทางจากแกนสะเทินไปทางด้านรับแรงดึง

\mathcal{E}_{ct} = ความเครียดที่ผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงดึง

h = ความลึกของหน้าตัดคาน

c = ระยะแกนสะเทินวัดจากผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัด

\mathcal{E}_s = ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงดึง

d = ความลึกประสิทธิภาพของคานวัดจากผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงดึง

$\mathcal{E}_{s'}$ = ความเครียดในเหล็กเสริมรับแรงอัด

d' = ระยะผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัดถึงศูนย์กลางของเหล็กเสริมรับแรงอัด

\mathcal{E}_{cc} = ความเครียดที่ขอบนอกของเหล็กปลอกด้านรับแรงอัด

c' = ระยะผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัดถึงขอบนอกของเหล็กปลอก

\mathcal{E}_c = ความเครียดที่ผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัด

ฉะนั้น ณ ความเครียดของคอนกรีตที่ผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัด (\mathcal{E}_c) ค่าหนึ่ง ๆ หากเราสมมุติค่าระยะแกนสะเทินจากผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัด (c) ขึ้นมาก็สามารถหาค่า ความเครียด ทุก ๆ ตำแหน่งในหน้าตัดได้ แต่ค่าระยะแกนสะเทินที่สมมุติขึ้นนี้จะเป็ค่าที่ถูกต้องก็ต่อเมื่อทำให้เกิดสมดุลย์ของแรงอัดและแรงดึงภายในหน้าตัด

จากสมมุติฐานข้อ 3 เราสามารถทราบค่าความเค้นที่ความเครียดใด ๆ ของวัสดุ i ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการ 2.3 และเราสามารถหาแรงลัพธ์ของวัสดุนั้นได้โดยการอินทิเกรตดังสมการ 2.4 ส่วนระยะแขนจากแกนสะเทินสามารถหาได้ดังสมการ 2.5

$$\sigma_i = f_i(\varepsilon_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

$$F_i = \int f_i(\varepsilon_i) dA_i \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.4)$$

$$\bar{x}_i = \frac{\int f_i(\varepsilon_i) \cdot x_i dx_i}{\int f_i(\varepsilon_i) dx_i} \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

โดยสรุปแล้วการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งด้วยวิธีความเครียด สอดคล้องมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าความเครียดของคอนกรีตที่ผิวผิวนอกสุดของคอนกรีตที่รับแรงอัด (\mathcal{E}_c)
2. สมมุติค่าระยะแกนสะเทิน (C)
3. หาค่าความเครียด ณ ตำแหน่งในหน้าตัดที่ต้องการจากสมการ 2.2
4. จากค่าความเครียดในข้อ 3 หาแรงที่ต้องการจากสมการ 2.4
5. พิจารณาผลรวมของแรงลัพธ์ในหน้าตัดว่าสมดุลหรือไม่ ถ้าสมดุลแสดงว่าค่าระยะแกนสะเทินที่สมมุตินั้นถูกต้องแล้ว แต่ถ้าไม่สมดุลต้องทำข้อ 2 ถึง 5 ใหม่

เมื่อได้ค่าระยะแกนสะเทินที่ถูกต้อง ณ ความเครียดของคอนกรีตที่ผิวบนที่กำหนดแล้ว สามารถหาค่าโมเมนต์ในหน้าตัด (M) โดยอาศัยสมดุลย์ของโมเมนต์รอบแนวเหล็กเสริมที่รับแรงดึง ได้ดัง สมการ 2.6 และค่าความโค้ง (ϕ) ดังสมการ 2.2

$$M = C_s(d - d') + \sum C_c(d - c + x_c) - T_c(d - c - x_t) \quad (2.6)$$

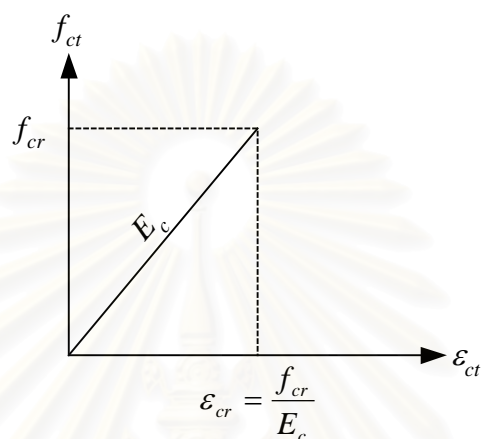
- เมื่อ
- M = โมเมนต์
 - C_s = แรงอัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด
 - $\sum C_c$ = แรงอัดลัพธ์ของคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัด
 - x_c = แขนของแรงอัดลัพธ์ของคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัดวัดจากแกนสะเทินไปทางด้านรับแรงอัด
 - T_c = แรงดึงของคอนกรีตส่วนที่รับแรงดึง
 - x_t = แขนของแรงดึงของคอนกรีตส่วนที่รับแรงดึงวัดจากแกนสะเทินไปทางด้านรับแรงดึง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.5 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีด้วยกัน 3 แบบคือ

2.3.5.1 แบบจำลองของคอนกรีตที่รับแรงดึง แสดงได้ดังรูปที่ 2-6 และ สมการที่ 2.7



รูปที่ 2-6 กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงดึง

$$f_{ct} = \begin{cases} E_c \cdot \epsilon_{ct} & , \epsilon_{ct} \leq \epsilon_{cr} \\ 0 & , \epsilon_{ct} > \epsilon_{cr} \end{cases}$$

(2.7)

$$\epsilon_{cr} = \frac{f_{cr}}{E_c}$$

เมื่อ f_{ct} = ความเค้นของคอนกรีตที่รับแรงดึง

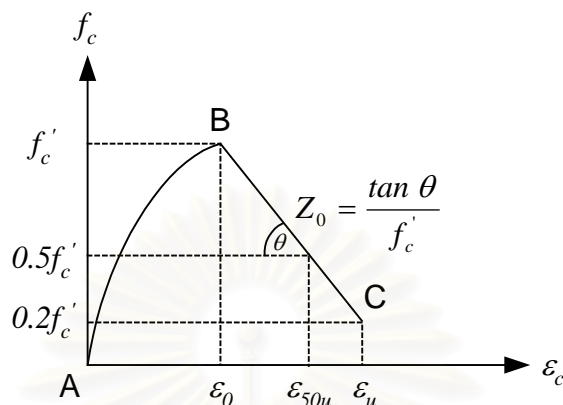
ϵ_{ct} = ความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงดึง

E_c = โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต

f_{cr} = โมดูลัสแตกกร้าวของคอนกรีต

ϵ_{cr} = ความเครียด ณ ความเค้นเท่ากับค่าโมดูลัสแตกกร้าวของคอนกรีต

2.3.5.2 แบบจำลองของคอนกรีตที่รับแรงอัดแบบไม่มีผลของการโอบรัดของเหล็กปลอก
แสดงได้ดังรูปที่ 2-7 และ สมการที่ 2.8



รูปที่ 2-7 กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัดแบบไม่มีผลของการโอบรัดของเหล็กปลอก(Kent and Park)[22]

$$f_c = \begin{cases} f'_c \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) & , \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f'_c (1 - Z_0 (\varepsilon_c - \varepsilon_0)) & , \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_u \\ 0 & , \varepsilon_c > \varepsilon_u \end{cases}$$

(2.8)

$$Z_0 = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_0}$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.02845 f'_c}{14.2258 f'_c - 1000}$$

เมื่อ f_c = ความเค้นของคอนกรีตที่รับแรงอัด (กก./ซม.²)

ε_c = ความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัด

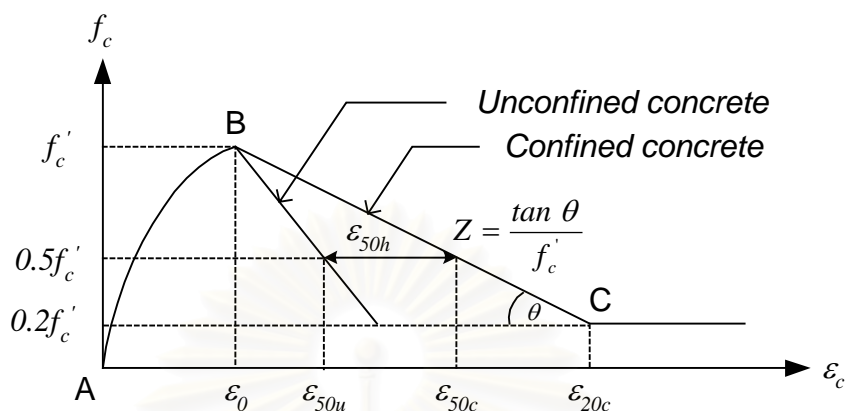
f'_c = กำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน (กก./ซม.²)

ε_0 = ความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ณ จุดประลัย

ε_{50u} = ความเครียดที่ 50% ของค่ากำลังอัดประลัย(خالง)แบบไม่มีผลการโอบรัดของเหล็กปลอก

ε_u = ความเครียดที่ 20% ของค่ากำลังอัดประลัย(خالง)แบบไม่มีผลการโอบรัดของเหล็กปลอก

2.3.5.3 แบบจำลองของคอนกรีตที่รับแรงอัดแบบมีผลของการโอบรัดของเหล็กปลอก แสดงได้ดังรูปที่ 2-8 และ สมการที่ 2.9



รูปที่ 2-8 กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัดแบบมีผลของการโอบรัดของเหล็กปลอก(Kent and Park)[22]

$$f_c = \begin{cases} f'_c \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) & , \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f'_c (1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)) & , \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{20c} \\ 0.2 f'_c & , \varepsilon_c > \varepsilon_{20c} \end{cases}$$

$$Z = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_0} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.02845 f'_c}{14.2258 f'_c - 1000}$$

$$\varepsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b'}{s_h}}$$

เมื่อ f'_c = ความเค้นของคอนกรีตที่รับแรงอัด (กก./ ซม.²)

ε_c = ความเครียดของคอนกรีตที่รับแรงอัด

f'_c = กำลังอัดของแท่งคอนกรีตทรงกระบอกมาตรฐาน (กก./ ซม.²)

ε_0 = ความเครียดสูงสุดของคอนกรีต ณ จุดประลัย

ε_{50u} = ความเครียดที่ 50% ของค่ากำลังอัดประลัย(ขาลง)แบบไม่มีผลการโอบรัดของเหล็กปลอก

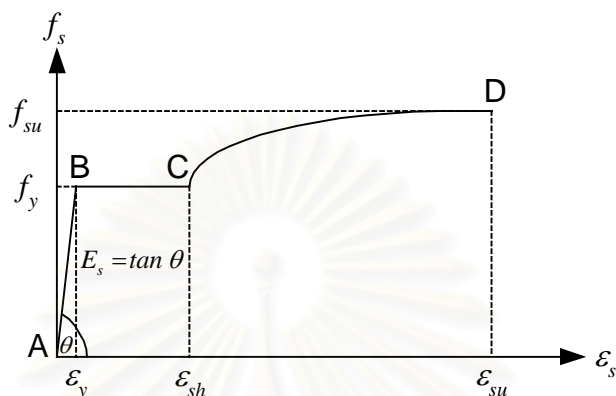
ρ_s = อัตราส่วนปริมาตรของเหล็กปลอกต่อปริมาตรของคอนกรีตที่ได้รับการโอบรัดโดยคิดจากเส้นรอบนอกของเหล็กปลอก

b' = ความกว้างของคอนกรีตที่มีการโอบรัดโดยคิดจากเส้นรอบนอกของเหล็กปลอก

s_h = ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก

2.3.6 แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม

ในการวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม แสดงได้ดังรูปที่ 2-9 และ สมการที่ 2.10



รูปที่ 2-9 กราฟแสดงแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริม(Kent and Park)[22]

$$f_s = \begin{cases} E_s \cdot \varepsilon_s & , \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y & , \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y \left[\frac{m(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right] & , \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (2.10)$$

$$m = \frac{(f_{su} / f_y)(30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2}$$

$$r = \varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}$$

เมื่อ f_s = ความเค้นของเหล็กเสริม

ε_s = ความเครียดของเหล็กเสริม

E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม

f_y = กำลังดึงครากของเหล็กเสริม

f_{su} = กำลังดึงประลัยของเหล็กเสริม

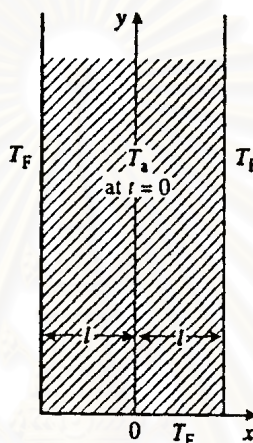
ε_y = ความเครียด ณ ค่าความเค้นเท่ากับกำลังดึงคราก

ε_{sh} = ความเครียดที่เหล็กเสริมเริ่มเข้าสู่ภาวะความเครียดแข็ง(strain hardening)

ε_{su} = ความเครียด ณ ค่าความเค้นเท่ากับกำลังดึงประลัย

2.3.7 การวิเคราะห์อุณหภูมิในหน้าตัดขณะทำการเผาด้วยเทคนิคการถ่ายเทความร้อนจากผลการทดสอบการนำความร้อนใน 1 มิติของ Abrams และ Gustafarro[14],[23]

สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิในหน้าตัดของคานตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ซึ่งสามารถจำลองรูปแบบของปัญหาได้ดังรูปที่ 2-10 ซึ่งสามารถหาค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง x, y ณ เวลา t ใดๆ ในหน้าตัดได้ดังสมการ 2.11 ซึ่งหลักการโดยคร่าวในการวิเคราะห์ปัญหาดังกล่าว อาศัยหลักการจำลองปัญหาการนำความร้อนใน 2 มิติด้วยการนำความร้อนใน 1 มิติ 2 ทิศทาง และอาศัยหลักการรวมกัน(superposition)และหลักสมมาตรของหน้าตัดในการแก้ปัญหา



รูปที่ 2-10 รูปแสดงแบบจำลองของปัญหาในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

$$\frac{T_F - T_{(x,y)}}{T_F - T_a} = \frac{T_F - T_x}{T_F - T_a} \times \frac{T_F - T_y}{T_F - T_a} \quad ; \quad T_a \leq T_{(x,y)} \leq T_F \quad (2.11)$$

เมื่อ T_F = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวสัมผัสไฟ ณ เวลา t

$T_{(x,y)}$ = อุณหภูมิที่ตำแหน่ง (x, y) ในหน้าตัด ณ เวลา t

T_a = อุณหภูมิเริ่มต้นในหน้าตัด

T_x, T_y = อุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และ y จากผิวสัมผัสไฟซึ่งวัดได้จากผลการทดสอบหรือได้จากการวิเคราะห์การนำความร้อนใน 1 มิติ ณ เวลา t

อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวสัมผัสไฟ (T_F) มิใช่ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา (สมการที่ 2.1) แต่จะเป็นอุณหภูมิเฉลี่ยต่อช่วงเวลาซึ่งหาได้ดังสมการที่ 2.12 ซึ่งจะต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตา

$$T_F = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} [T_0 + 345 \cdot \text{Log}(8t + 1)] dt \quad (2.12)$$

อุณหภูมิที่ตำแหน่ง x และ y จากผิวสัมผัสไฟซึ่งวัดได้จากผลการทดสอบการนำความร้อนใน 1 มิติ ณ เวลา t ใดๆสามารถหาได้จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro[23] ดังแสดงในรูปที่ ง-3

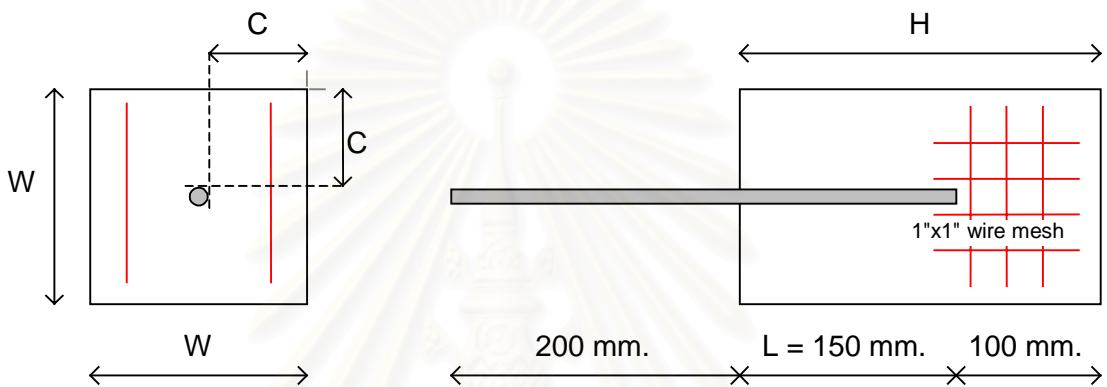
บทที่ 3

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบและกระบวนการในการทดสอบ

3.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

3.1.1 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1 (ผลของไฟที่มีต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟ)

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามีทั้งสิ้น 72 ตัวอย่าง ซึ่งมีรายละเอียด ดังแสดงในรูปที่ 3-1 และ ตารางที่ 3-1



รูปที่ 3-1 รูปหน้าตัด(ซ้าย) และรูปหน้าตัดด้านข้าง(ขวา)ของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ 3-1 รายละเอียดของตัวอย่างที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

เวลาที่เผาไฟ (นาท.)	ระยะหุ้ม C (มม.)	ชนิดเหล็ก	ขนาด W x W x H (มม. x มม. x มม.)	หมายเลขตัว อย่าง	จำนวน
0	25	RB15	65x65x250	1-3	3
		DB16	66x66x250	4-6	3
	50	RB15	115x115x250	7-9	3
		DB16	116x116x250	10-12	3
	75	RB15	165x165x250	13-15	3
		DB16	166x166x250	16-18	3
15	25	RB15	65x65x250	19-21	3
		DB16	66x66x250	22-24	3
	50	RB15	115x115x250	25-27	3
		DB16	116x116x250	28-30	3
	75	RB15	165x165x250	31-33	3
		DB16	166x166x250	34-36	3

ตารางที่ 3-1(ต่อ) รายละเอียดของตัวอย่างที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

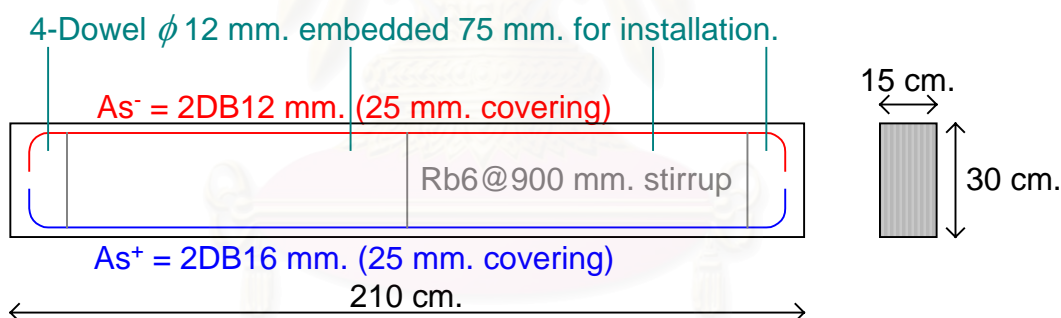
เวลาที่เผาไฟ (นาที)	ระยะหุ้ม C (มม.)	ชนิดเหล็ก	ขนาด W x W x H (มม. x มม. x มม.)	หมายเลขตัวอย่าง	จำนวน
30	25	RB15	65x65x250	37-39	3
		DB16	66x66x250	40-42	3
	50	RB15	115x115x250	43-45	3
		DB16	116x116x250	46-48	3
	75	RB15	165x165x250	49-51	3
		DB16	166x166x250	52-54	3
60	25	RB15	65x65x250	55-57	3
		DB16	66x66x250	58-60	3
	50	RB15	115x115x250	61-63	3
		DB16	116x116x250	64-66	3
	75	RB15	165x165x250	67-69	3
		DB16	166x166x250	70-72	3
รวม					72

- ทั้งนี้ขนาดหน้าตัดที่เลือกใช้ทั้ง 6 ขนาด คือ 65x65, 115x115, 165x165, 66x66, 115x115 และ 116x116 มม. x มม. เพื่อศึกษาผลของระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมทั้ง 3 แบบ
- เลือกใช้ระยะฝัง 150 มม. ในทุกตัวอย่าง ซึ่งพิจารณาจากความเหมาะสมในการนำตัวอย่างเข้าเผาไฟในเตาเผาและความเหมาะสมของชุดทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ด้วยวิธี direct pull-out test ที่มีภายในห้องปฏิบัติการ รวมถึงเทียบเคียงกับมาตรฐานการทดสอบ ASTM C234
- เลือกใช้ความยาวของตัวอย่าง 250 มม. เพื่อลดผลของความร้อนจากการเผาไฟที่จะเข้ามาทางท้ายของตัวอย่าง
- ใส่ลวดตะแกรงขนาด 1"x1" ที่ส่วนท้ายของตัวอย่างเพื่อป้องกันการแตกของคอนกรีตในขณะทำการเผาไฟ
- สำหรับตัวอย่างที่จะทำการเผาไฟ จะมีการทำเกลียวที่ปลายเป็นระยะ 8 cm. เพื่อใช้ในการแขวนตัวอย่างเข้ากับฝาเตา

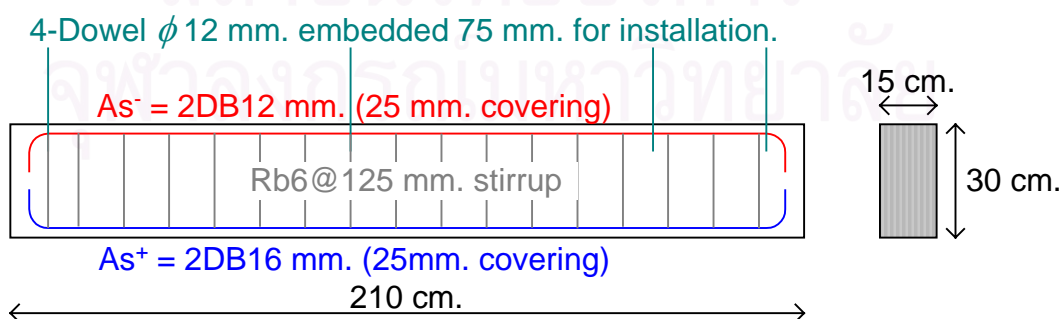
3.1.2 ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 2 (ผลของไฟที่มีต่อพฤติกรรมกรรมการรับแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังเผาไฟ)

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย

- คานคอนกรีตเสริมเหล็ก 10 ตัวอย่างซึ่งแบ่งเพื่อใช้ศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมกรรมการรับแรงเนื้องานและแรงดัดอย่างละ 5 ตัวอย่าง และมีการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิดังมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3-2, 3-3 และตารางที่ 3-2
- ตัวอย่างคานกรีตขนาด 15x30x36 ซม. จำนวน 10 ตัวอย่าง เพื่อใช้ในการศึกษากำลั้งอัดของคอนกรีตภายหลังการเผาโดยการเจาะลูกคอร์กกรีตและเพื่อใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังจากถูกเผาไฟโดยการสกัดตัวอย่างมาทำการทดสอบหลังจากการเผาไฟ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ
 - ชนิด A ซึ่งทำการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิในหน้าตัดของก้านตัวอย่าง เพื่อทำการวัดการกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดขณะทำการเผา จำนวน 5 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3-4
 - ชนิด B ซึ่งมีตัวอย่างเหล็กเสริมที่ติดตั้งสายวัดอุณหภูมิภายในก้านตัวอย่าง เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังจากการเผาไฟ จำนวน 5 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3-5

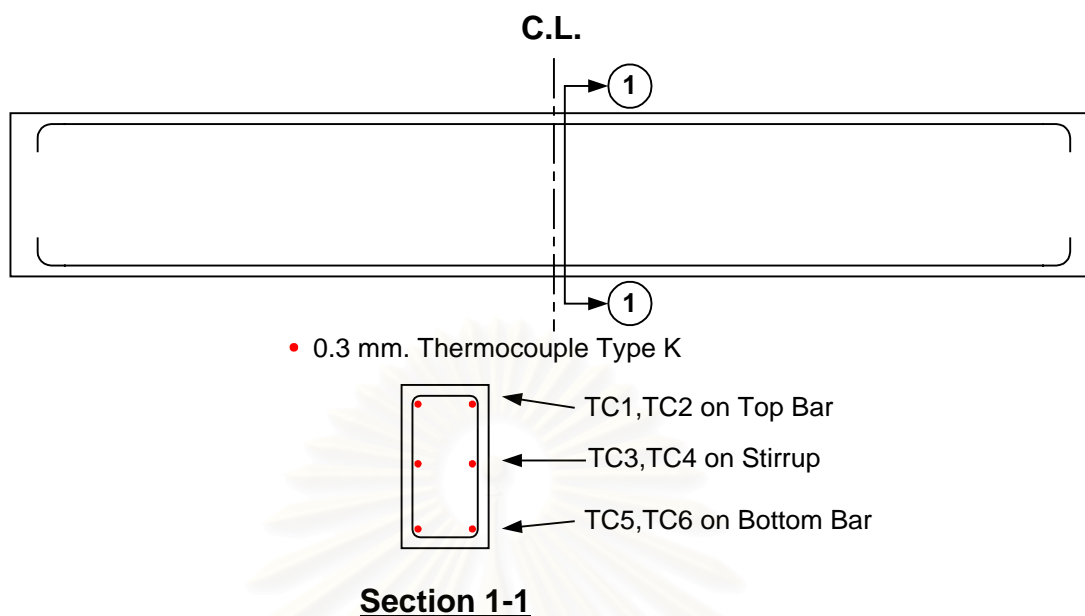


Shear beam specimen



Flexural beam specimen

รูปที่ 3-2 แบบรายละเอียดคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้ง 2 ชนิดที่ใช้ในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

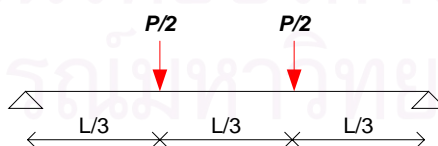


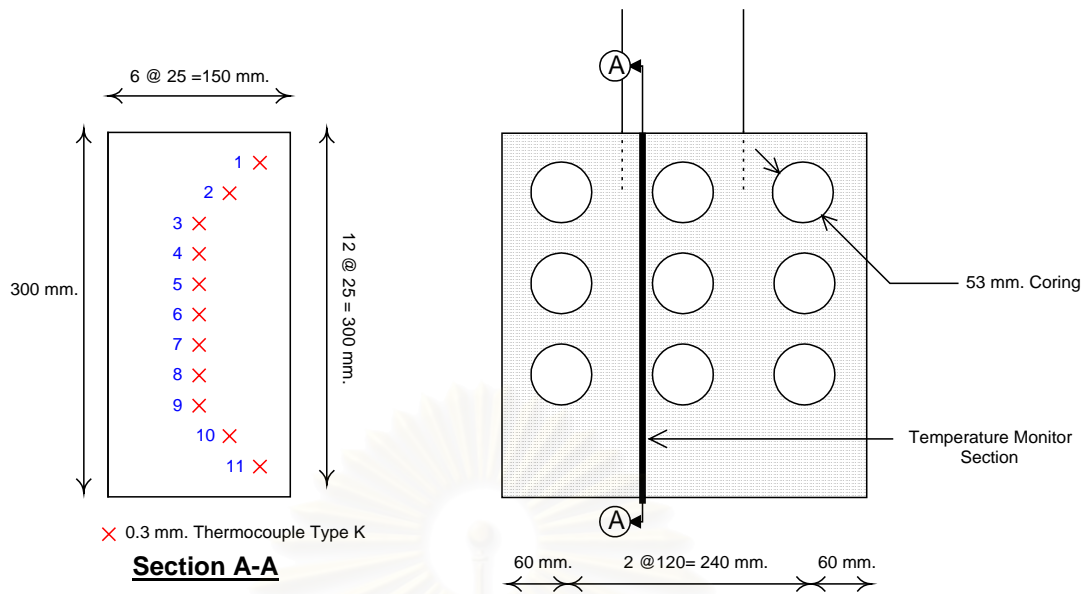
รูปที่ 3-3 แบบรายละเอียดการติดตั้งสายวัดอุณหภูมิในเหล็กเสริมของคานตัวอย่าง

ตารางที่ 3-2 ค่ากำลังประลัยที่ออกแบบตามข้อกำหนด ACI 318[25]

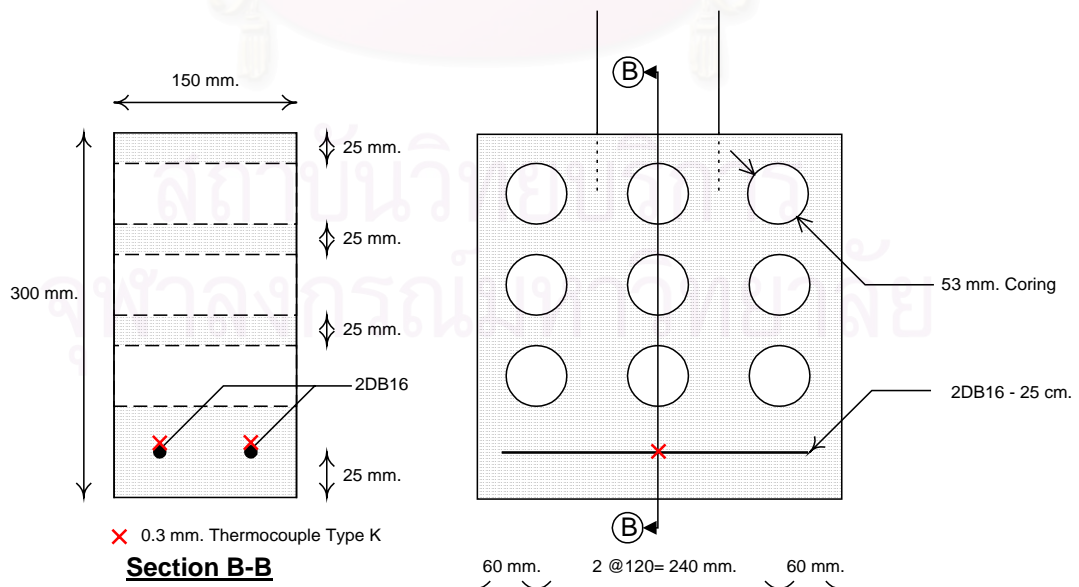
ชนิดการวิบัติ	f'_c (กก./ซม. ²) (i)	f_y (กก./ซม. ²) (ii)	$(f_y)_v$ (กก./ซม. ²) (iii)	แรงที่โมเมนต์คราก (กก.) (iv)	แรงที่แรงเฉือนประลัย (กก.) (iv)
แรงเฉือน	300	3,000	2,400	9,686	7,290
แรงดัด	300	3,000	2,400	9,686	13,130

- (i) กำลังอัดของคอนกรีต
(ii) กำลังดึงครากของเหล็กเสริมรับแรงอัดและเหล็กเสริมรับแรงดึง
(iii) กำลังดึงครากของเหล็กปลอก
(iv) คัดจากแรงกระทำแบบ 2 จุดที่ระยะ 1 ใน 3 ของความยาวระหว่างฐานรองรับ และ ระยะฐานรองรับเท่ากับ 1.8 ม.





รูปที่ 3-4 แบบตัวอย่างชนิด A ที่ติดสายวัดอุณหภูมิในหน้าตัดขณะเผา



รูปที่ 3-5 แบบตัวอย่างชนิด B ที่ฝังเหล็ก DB16 2 ชิ้น และมีการติดสายวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางของเหล็ก

3.2 กระบวนการในการทดสอบ

3.2.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตและเหล็กเสริม

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริมแสดงดังตารางที่ 3-3 รูปการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-1 ถึง ค-7

ตารางที่ 3-3 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กเสริม

คุณสมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ
1. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด	ASTM C143
2. ค่าปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตสด	ASTM C231
3. ค่ากำลังอัดที่ 28 วัน	ASTM C39
4. ค่ากำลังรับแรงดึงแบบ splitting test ที่ 28 วัน	ASTM C496
5. ค่ากำลังรับแรงดึงแบบ flexure one point test ที่ 28 วัน	ASTM C93
6. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ 28 วัน	ASTM C469
7. ค่ากำลังดึงครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริม	ASTM E8

3.2.2 การทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 1

มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. ทำการวัดขนาดตัวอย่างและทำเครื่องหมาย ณ ตำแหน่งเริ่มต้นของเหล็กในคอนกรีตด้วยน้ำยาแต้มคำผิด เพื่อใช้ในการวัดระยะฝั่งจริงของเหล็กเสริมในคอนกรีตในภายหลัง
2. เผาตัวอย่างเพื่อจำลองสภาพไฟไหม้ โดยใช้เตาพลังงานแก๊สที่อยู่ในห้องปฏิบัติการคอนกรีต ในการจำลองสภาพไฟไหม้เลือกใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E119 ในการติดตั้งตัวอย่างเข้าทำการเผา ทำโดยแขวนตัวอย่างกับฝาเตาซึ่งเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความหนา 12 cm. เพื่อป้องกันมิให้ตัวอย่างสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง และทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ต้องการในขณะเผา
3. การทดสอบค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ทำการทดสอบแบบ direct pull-out bond test โดยมีขั้นตอนดังนี้
 - ติดตั้งตัวอย่างที่จะทำการทดสอบเข้ากับเฟรมที่ให้แรงกระทำ ซึ่งเฟรมนี้จะติดตั้งอยู่กับเครื่อง Amsler universal testing machine 20 tons ซึ่งเป็นเครื่องต้นกำลังในการทดสอบ
 - ทำการเพิ่มแรงกระทำ ด้วยอัตรา 2,240 กก./นาที จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ
 - จดบันทึกค่า แรงสูงสุด ลักษณะการวิบัติ วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็ก และวัดระยะฝั่งจริงของเหล็กในคอนกรีต

รูปการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-8 ถึง ค-15

3.2.3 การทดสอบสำหรับกรณีศึกษาที่ 2

3.2.3.1 การทดสอบตัวอย่างควบคุม มีกระบวนการในการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบแบบไม่ทำลาย มีวิธีการทดสอบ คือ

- กำหนดตำแหน่งในการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้เครื่อง rebar locator ในการหาตำแหน่งเหล็กปลอกในคานตัวอย่าง ทั้งนี้เพื่อเลี่ยงการกำหนดตำแหน่งทำการทดสอบที่มีเหล็กปลอกสำหรับการทดสอบด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity test
- ทดสอบด้วยวิธี rebound number ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C805 โดยมีวิธีการทดสอบคือ ทำยิงตัวอย่างทดสอบด้วย rebound hammer ณ ตำแหน่งที่ได้ทำการกำหนดไว้ก่อน ทั้ง 2 ด้าน
- ทดสอบด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity test ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C597 โดยมีวิธีการทดสอบคือ วัดระยะเวลาที่คลื่นใช้ในการเคลื่อนที่จากเครื่องทดสอบ แล้วทำการวัดระยะทางในการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความเร็วคลื่น

รูปของการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-18 ถึง ค-23

2. การทดสอบลูกคอร์กอนกรีต มีวิธีการทดสอบ คือ

- ทำการเจาะตัวอย่างด้วยเครื่องเจาะหิน ซึ่งจะได้ลูกคอร์กอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 53 มม.
- ทำการตัดหัวท้าย และเค้นหัวท้าย วัดขนาด และนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C39

รูปของการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-24 และ ค-25

3. การทดสอบพฤติกรรมของคานตัวอย่าง มีวิธีการทดสอบ คือ

- ปรับขนาดฐานรองรับให้ได้ระยะที่ต้องการ คือ 180 ซม. แล้วทำการติดตั้งคานตัวอย่างเข้ากับคานรองรับ และย้ายคานรองรับเข้าไปในเครื่อง Amsler universal testing machine 500 tons ซึ่งใช้เป็นเฟรมสำหรับให้แรงกระทำ
- ทำการติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงกระทำ อันประกอบด้วย load beam(I-sectionขนาด 10x10x70 ซม.), load cell ขนาด 20 ตัน และ jack ขนาด 30 ตัน โดยให้แรงกระทำแบบ 2 จุด ที่ระยะ 60 ซม. จากฐานรองรับทั้งสองข้าง
- ทำการติดตั้ง LVDT ซึ่งอุปกรณ์ดิจิตอลที่ใช้ในการวัดการโก่งตัวของคานที่กึ่งกลางคาน ดังแสดงในรูปที่ ค-28
- ให้แรงกระทำ วัดการโก่งตัวของคานที่กึ่งกลางคาน และบันทึกรอยร้าว โดยเพิ่มแรงกระทำที่ละประมาณ 500 กก./นาที่ แต่ในกรณีที่คานตัวอย่างมีพฤติกรรมการครากก็จะเปลี่ยนเป็นการให้น้ำหนักให้การโก่งตัวของคานตัวอย่างเพิ่มขึ้นทีละ 1 มม./นาที่

รูปของการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-29 และ ค-30

3.3.2.2 การทดสอบตัวอย่างที่เผาไฟ มีกระบวนการในการทดสอบดังนี้

1. การทดสอบแบบไม่ทำลายก่อนการเผา โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม
2. เผาตัวอย่างเพื่อจำลองสภาพไฟไหม้ ในการจำลองสภาพไฟไหม้เลือกใช้มาตรฐานการทดสอบ ASTM E119 การติดตั้งตัวอย่างเข้าทำการเผา ทำโดยแขวนตัวอย่างกับฝาเตาซึ่งเป็นแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กความหนา 12 cm. เพื่อป้องกันมิให้ตัวอย่างสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง และทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่ต้องการในขณะที่เผา รูปของการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-16 และ ค-17
3. ทำการทดสอบแบบไม่ทำลายหลังการเผา โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 1. เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเผาไฟ
4. การทดสอบลูกคอร์กอร์คอนกรีต มีวิธีการทดสอบ คือ
 - ทำการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B ด้วยเครื่องเจาะ ซึ่งจะได้ลูกคอร์กอร์คอนกรีตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 53 มม.
 - ทำการตัดหัวท้าย และเคັบหัวท้าย วัดขนาด และนำไปทดสอบหากำลังรับแรงอัดตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM C39 รูปของการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-24 และ ค-25
5. การทดสอบพฤติกรรมของคานตัวอย่าง โดยทำการทดสอบเช่นเดียวกับตัวอย่างควบคุม รูปของการทดสอบแสดงในรูปที่ ค-31 ถึง ค-35

3.3.2.3 การทดสอบพฤติกรรมเหล็กเสริมหลังถูกเผาไฟ ตัวอย่างที่ทำการทดสอบเป็นเหล็กข้ออ้อยชนิด DB16(SD30) ซึ่งเป็นเหล็กคาร์บอนต่ำ(low carbon)ตามมาตรฐาน มอก. 20-2527 และ มอก. 20-2527 โดยมีตัวอย่างทั้งหมด 18 ตัวอย่าง แบ่งได้ดังนี้

1. ตัวอย่างควบคุมที่มีได้เฝามี 2 ตัวอย่าง
2. ตัวอย่างที่เผา 30, 60, 90 และ 120 นาที จะมี 4 ตัวอย่างต่อ 1 ระยะเวลา ซึ่งใน 4 ตัวอย่างนี้ แบ่งเป็นตัวอย่างที่ฝังในตัวอย่างชนิด B จำนวน 2 ตัวอย่าง และตัวอย่างที่นำไปเผาในเตาโดยตรงจำนวน 2 ตัวอย่าง

ทำการทดสอบโดยนำเหล็กตัวอย่างมาขึ้นรูปแล้วทำการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E8 รูปที่ ค-26 แสดงแบบของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ รูปที่ ค-27 แสดงภาพถ่ายการทดสอบด้วยเครื่อง Universal tensile tester

บทที่ 4
ผลการทดสอบ

4.1 คุณสมบัติของคอนกรีต

ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตแสดงดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

คุณสมบัติ	ค่าจากการทดสอบ
1. ค่าการยุบตัวของคอนกรีตสด (ASTM C143)	15.5 ซม.
2. ค่าปริมาณฟองอากาศของคอนกรีตสด (ASTM C231)	1.5 %
3. ค่าเฉลี่ยกำลังอัดที่ 28 วัน (ASTM C39)	306 กก./ซม. ²
4. ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงแบบ Splitting test ที่ 28 วัน (ASTM C496)	32 กก./ ซม. ²
5. ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงดึงแบบ Flexure one point test ที่ 28 วัน (ASTM C93)	45 กก./ ซม. ²
4. ค่าเฉลี่ยโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ 28 วัน (ASTM C469)	310,811 กก./ ซม. ²

4.2 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

ผลการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริมแสดงดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการทดสอบคุณสมบัติของเหล็กเสริม

ชนิดเหล็ก	ค่าเฉลี่ยกำลังดึงคราก (กก./ซม. ²)	ค่าเฉลี่ยกำลังดึงประลัย (กก./ซม. ²)
RB6	-	6,735
DB12	3,450	5,258
RB15	3,265	5,080
DB16	3,433	5,351

4.3 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

4.3.1 อุณหภูมิภายในเตาขณะทำการเผา

ตารางที่ 4-3 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ใต้กราฟไฟสะสมในช่วงเวลาที่ทดสอบทั้งหมด และ กราฟไฟของการทดสอบเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 15, 30 และ 60 นาที แสดงได้ดังรูปที่ ก-1 ถึง ก-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ใต้กราฟไฟสะสมในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

ระยะเวลาที่เผาไฟ (นาที)	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ใต้กราฟไฟสะสม	ค่าที่ยอมรับได้ [ASTM E119]
15	6%	10%
30	4%	10%
60	3%	10%

4.3.2 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็ก

ตารางที่ 4-4 แสดงค่าเฉลี่ยกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ทำการทดสอบทั้งหมด และรูปที่ ก-4 ถึง ก-7 แสดงกราฟของผลการทดสอบ

ตารางที่ 4-4 ค่าเฉลี่ยกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ทำการทดสอบ

เวลาที่เผาไฟ (นาท.)	ระยะหุ้ม (มม.)	ชนิดเหล็ก	ค่าเฉลี่ยกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม (กก./ชม. ²)
0	25	RB15	61.8
		DB16	64.4
	50	RB15	69.0
		DB16	98.9
	75	RB15	52.3
		DB16	110.8
15	25	RB15	8.7
		DB16	32.7
	50	RB15	18.3
		DB16	83.1
	75	RB15	21.5
		DB16	82.9
30	25	RB15	0.2
		DB16	14.8
	50	RB15	4.9
		DB16	44.7
	75	RB15	15.3
		DB16	61.2
60	25	RB15	0.3
		DB16	12.0
	50	RB15	1.2
		DB16	23.4
	75	RB15	2.1
		DB16	34.5

4.4 ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

4.4.1 อุณหภูมิภายในเตาขณะทำการเผา

ตารางที่ 4-5 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ใต้กราฟไฟสะสมในช่วงเวลาที่ทดสอบทั้งหมด และ กราฟไฟของการทดสอบเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 30, 60, 90 และ 120 นาที แสดงได้ดังรูปที่ ก-8 ถึง ก-11 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ใต้กราฟไฟสะสมในการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

ระยะเวลาที่เผาไฟ (นาที)	ค่าความคลาดเคลื่อนของผลรวมพื้นที่ใต้กราฟไฟสะสม	ค่าที่ยอมรับได้ [ASTM E119]
30	8%	10%
60	9%	10%
90	4%	7.5%
120	1%	7.5%

4.4.2 อุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ในขณะทำการเผา

ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A แสดงดังรูปที่ 3-4 และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของตำแหน่งต่างๆกับเวลาสำหรับการเผาไฟ 30, 60, 90 และ 120 นาที แสดงได้ดังรูปที่ ก-12 ถึง ก-15 ตามลำดับ โดยสายวัด Tc7 และ Tc1 ของการทดสอบเผาไฟ 30 และ 60 นาที เกิดการขาดในขั้นตอนการติดตั้งและไม่อาจทำการวัดค่าในขณะทำการเผาได้ ส่วนการวัดอุณหภูมิในขณะทำการเผา ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ต้องเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ระยะเวลาที่เผาไฟแต่จะมีบางค่าที่วัดแล้วอุณหภูมิกลับลดลง ทั้งนี้เนื่องจากฉนวนหุ้มสายวัดเกิดการละลายและทำให้เกิดการลัดวงจรขึ้นซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่ไม่น่าเชื่อถือ

4.4.3 อุณหภูมิในตัวอย่างเหล็กเสริมที่ฝังในตัวอย่างชนิด B ในขณะทำการเผา

ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิเหล็กเสริมที่ฝังในของก้อนเจาะชนิด B แสดงดังรูปที่ 3-5 และ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมกับเวลาสำหรับการเผาไฟ 30, 60, 90 และ 120 นาที แสดงได้ดังรูปที่ ก-16 ถึง ก-19 ตามลำดับ ผลการวัดในการเผา 30 นาทีพบว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิก่อนข้างมากในสองตัวอย่างทั้งนี้เมื่อพิจารณาเทียบเคียงกับผลการทดสอบที่เวลาอื่นๆแล้วค่าที่วัดจากสายวัด St1 นำเกิดจากความผิดพลาดในขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทำให้สายวัดหลุดจากตัวอย่างเหล็กและเลื่อนไปยังตำแหน่งที่ใกล้กับผิวสัมผัสไฟทำให้ค่าที่วัดได้มีค่ามากกว่าค่าที่วัดจากสายวัด St2 ส่วนผลการวัดในการเผา 60, 90 และ 120 นาทีพบว่าค่าที่วัดได้ของตัวอย่างเหล็กทั้ง 2 มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน และเกิดการลัดวงจรของสายวัดในช่วงท้ายของการเผา 90 และ 120 นาที

4.4.4 อุณหภูมิเหล็กเสริมที่กึ่งกลางคานตัวอย่างในขณะทำการเผา

ตำแหน่งทั้ง 6 ที่ทำการวัดอุณหภูมิเหล็กเสริมในคานตัวอย่าง แสดงรูปที่ 3-3 และ กราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาสำหรับการเผาไฟ 30, 60, 90 และ 120 นาที แสดงดังรูปที่ ก-20 ถึง ก-23 สำหรับคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนตามลำดับ และ แสดงดังรูปที่ ก-24 ถึง ก-27 สำหรับคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดตามลำดับ โดยสายวัด Tc4 ของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนในการทดสอบเผาไฟ 30 และ 60 นาที เกิดการขาดในขั้นตอนการติดตั้งและไม่อาจทำการวัดค่าในขณะทำการเผาไฟได้ และพบการลัดวงจรของสายวัดเกือบทุกตัวอย่างที่ทำการทดสอบ

4.4.5 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายก่อนและหลังการเผาตัวอย่าง

ตารางที่ ก-20 ถึง ก-24 แสดงผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาทีตามลำดับ

ตารางที่ ก-25 ถึง ก-29 แสดงผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลา 0, 30, 60, 90 และ 120 นาทีตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งของการทดสอบแสดงดังรูปที่ ค-20 และ ค-21

4.4.6 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกคอร์กอนกรีต

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการทดสอบแบบค่ากำลังอัดของลูกคอร์กอนกรีตหลังเผาไฟ 0, 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4-6 ผลการทดสอบแบบค่ากำลังอัดของลูกคอร์กอนกรีตหลังเผาไฟที่ระยะเวลาต่าง ๆ

ตำแหน่ง	ค่ากำลังอัด (กก./ซม. ²)									
	เผาไฟ 0 นาที		เผาไฟ 30 นาที		เผาไฟ 60 นาที		เผาไฟ 90 นาที		เผาไฟ 120 นาที	
	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B
1	367	354	337	284	N.A.*	205	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*
2	319	301	142	265	N.A.*	157	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*
3	336	235	-	194	-	187	-	N.A.*	-	N.A.*
4	375	399	234	284	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*
5	400	306	N.A.*	N.A.*	N.A.*	218	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*
6	356	353	-	311	-	N.A.*	-	N.A.*	-	N.A.*
7	505	279	243	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*
8	349	375	275	234	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*	N.A.*
9	401	397	-	383	-	N.A.*	-	N.A.*	-	N.A.*
ค่าเฉลี่ย	379	333	246	279	-	192	-	-	-	-

- = ไม่ได้ทำการทดสอบเนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผา

N.A.* = ไม่อาจทดสอบเนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเจาะ

4.4.7 ผลการทดสอบพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังจากถูกเผาไฟ

ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อ ค่ากำลังดึงคราก ค่ากำลังดึงประลัย และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังจากที่เผาไฟแสดงดังตารางที่ 4-7 และรูปที่ ก-28 ถึง ก-32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่มีได้เผาไฟและที่ผ่านการเผาไฟ 30, 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ

ตารางที่ 4-7 ผลการทดสอบ ค่ากำลังดึงคราก ค่ากำลังดึงประลัย และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังจากที่เผาไฟ โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้องภายหลังการเผา 30 วัน

ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	หมายเลข* ตัวอย่าง	อุณหภูมิสูงสุด** (°C)	กำลังดึงคราก (กก./ซม. ²)	กำลังดึงประลัย (กก./ซม. ²)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ซม. ²)
0	00-1	30	3,317	4,815	2.01E+06
	00-2	30	3,358	4,828	2.04E+06
30	30-1	404	3,253	4,837	2.08E+06
	30-2	212	3,312	4,877	2.01E+06
	30-3	788	2,628	3,689	2.02E+06
	30-4	788	2,645	3,648	2.16E+06
60	60-1	415	3,160	4,768	2.08E+06
	60-2	412	3,325	4,779	1.95E+06
	60-3	882	2,490	3,611	2.05E+06
	60-4	882	2,450	3,660	1.95E+06
90	90-1	> 495.2	3,153	4,638	2.05E+06
	90-2	550	3,134	4,644	2.07E+06
	90-3	981	2,618	3,699	2.04E+06
	90-4	981	2,461	3,649	2.02E+06
120	120-1	> 611.7	2,682	4,246	2.02E+06
	120-2	> 684.6	2,816	4,276	2.06E+06
	120-3	1,012	2,009	3,469	2.08E+06
	120-4	1,012	1,930	3,452	2.03E+06

* -1,-2 เป็นตัวอย่างที่ฝังในคอนกรีตมีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. ; -3,-4 เป็นตัวอย่างที่วางไว้ในเตา

** -1,-2 วัดจากสายวัดอุณหภูมิที่ติดตั้งไว้ ; -3,-4 อุณหภูมิเตา

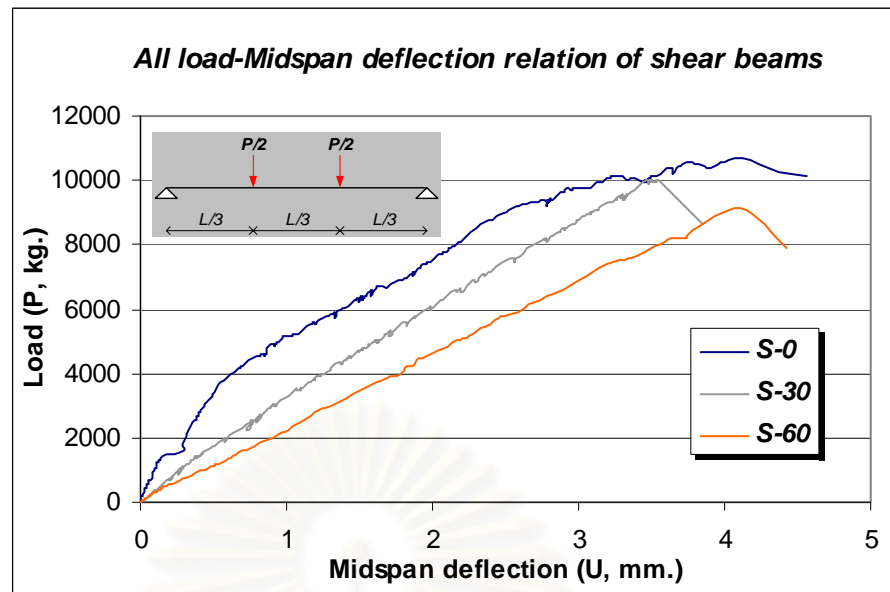
*** ไม่อาจทำการวัดได้เนื่องจากสายวัดอุณหภูมิเกิดความเสียหายขึ้น แต่มีแนวโน้มมากกว่าค่าที่แสดง

4.4.8 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัว ณ กึ่งกลางคาน

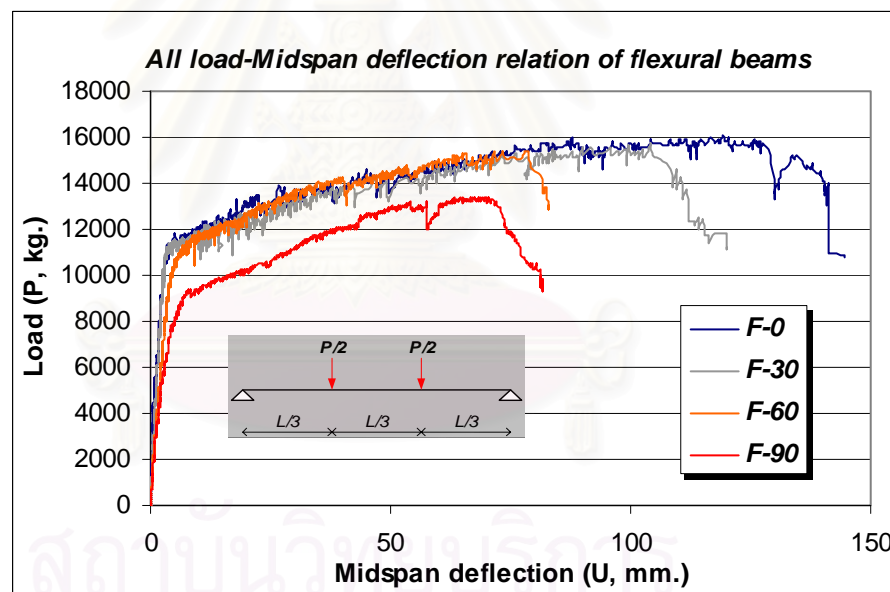
รูปที่ 4-1 และ 4-2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดทั้งหมดที่ทดสอบ

รูปที่ ก-33 ถึง ก-35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโค้งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือน ที่มีได้เฉาไฟและที่ผ่านการเฉาไฟเป็นระยะเวลา 30 และ 60 นาที ตามลำดับ สำหรับคานตัวอย่างที่เฉาไฟที่เวลา 90 และ 120 นาที นั้นไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากคานตัวอย่างดังกล่าวเกิดการเสียหายจากการเฉาไฟทำให้คอนกรีตที่ผิวล่างหลุดกระเทาะออก จนไม่อาจทำการทดสอบได้ ดังแสดงในรูปที่ ก-36 และ ก-37 จากการทดสอบพบว่า คานตัวอย่างที่มีได้เฉาไฟจะมีค่าแรงกระทำแตกร้าวกว่าเท่ากับ 1,421 กก. ส่วนคานอื่นไม่ปรากฏค่าแรงกระทำแตกร้าวกว่าที่ชัดเจน ค่าความแข็งแรงของคานตัวอย่าง(ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้ง)มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเฉาไฟที่เพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4-1 และคานตัวอย่างทั้งหมดที่ทดสอบเกิดการวิบัติอย่างฉับพลันเนื่องจากการเกิดรอยร้าวจากแรงเฉือนตามแนวระหว่างแรงกระทำและฐานรองรับซึ่งเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

รูปที่ ก-38 ถึง ก-41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการโค้งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด ที่มีได้เฉาไฟและที่ผ่านการเฉาไฟเป็นระยะเวลา 30, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ สำหรับคานตัวอย่างที่เฉาไฟ 120 นาที นั้นไม่สามารถทำการทดสอบได้เนื่องจากคานตัวอย่างดังกล่าว เกิดการเสียหายจากการเฉาไฟทำให้คอนกรีตที่ผิวล่างหลุดกระเทาะออก จนไม่อาจทำการทดสอบได้ ดังแสดงในรูปที่ ก-37 จากการทดสอบพบว่า คานตัวอย่างที่มีได้เฉาไฟจะมีค่าแรงกระทำแตกร้าวกว่าเท่ากับ 4,126 กก. ส่วนคานอื่นไม่ปรากฏค่าแรงกระทำแตกร้าวกว่าที่ชัดเจน โดยพบว่าการเฉาไฟ 30 นาทีไม่ทำให้ค่าความแข็งแรงของคานตัวอย่างก่อนการครากลดลง แต่ค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเฉาไฟที่เพิ่มขึ้นมากกว่า 30 นาที ส่วนค่าความแข็งแรงของคานตัวอย่างหลังการครากของคานที่เฉาไฟ 60 และ 90 นาทีมีค่ามากกว่าคานตัวอย่างที่มีได้เฉาไฟและที่เฉาไฟ 30 นาที ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4-2 คานตัวอย่างทั้งหมดจะมีพฤติกรรมการครากซึ่งเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ หลังการครากคานตัวอย่างยังคงสามารถรับแรงกระทำเพิ่มขึ้นได้ และคานตัวอย่างทั้งหมดที่ทดสอบเกิดการวิบัติเนื่องจากการโค้งเดาะของเหล็กรับแรงอัด โดยการโค้งตัวที่กึ่งกลางคาน ณ แรงกระทำประลัยมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เฉาไฟที่เพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนทั้งหมดที่ทดสอบ

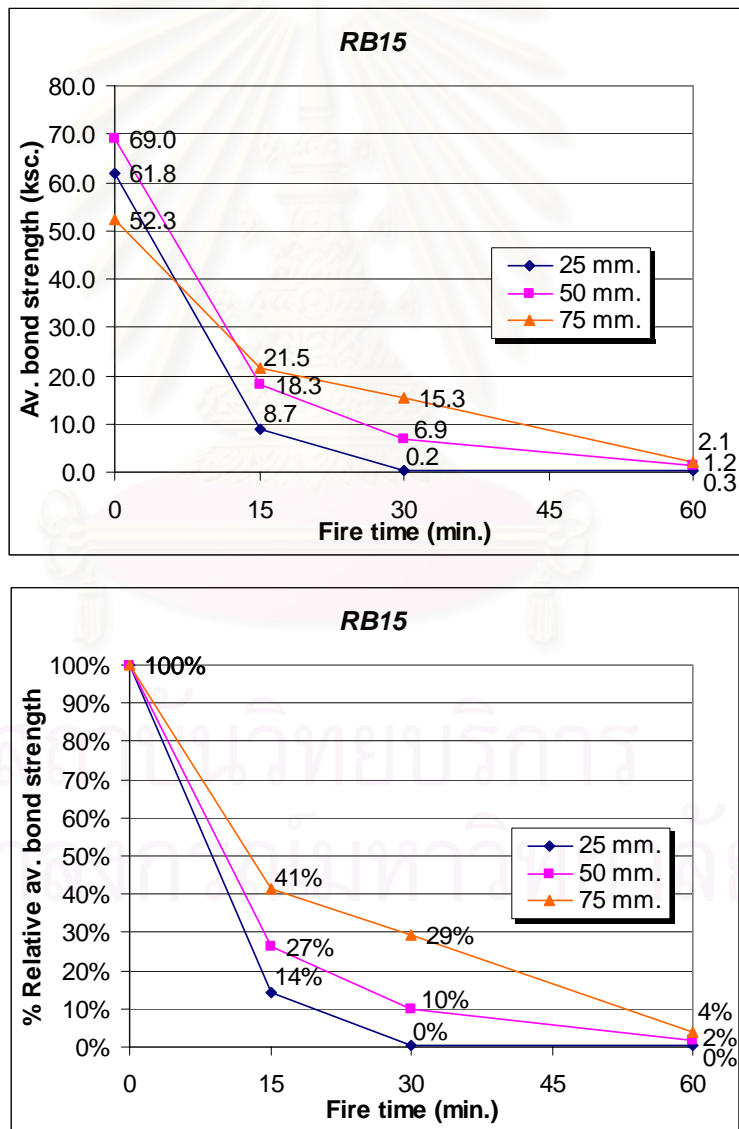


รูปที่ 4-2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน ของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดทั้งหมดที่ทดสอบ

บทที่ 5
การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

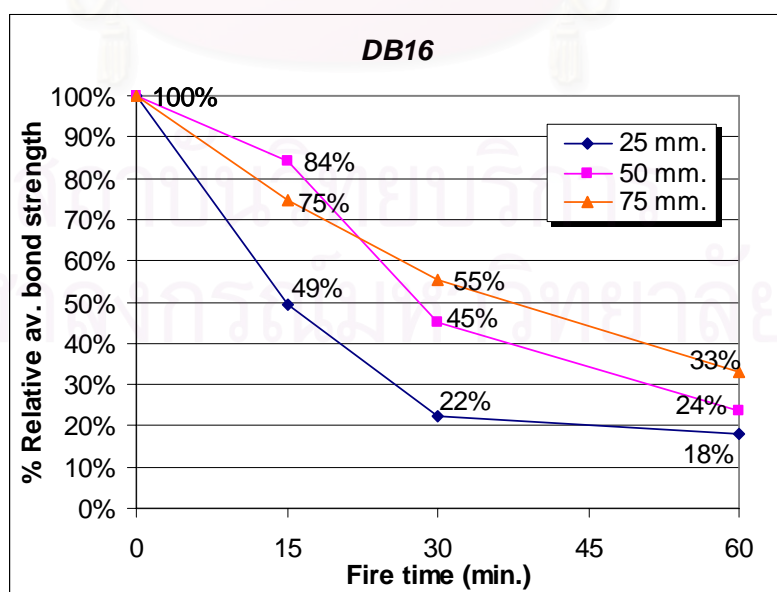
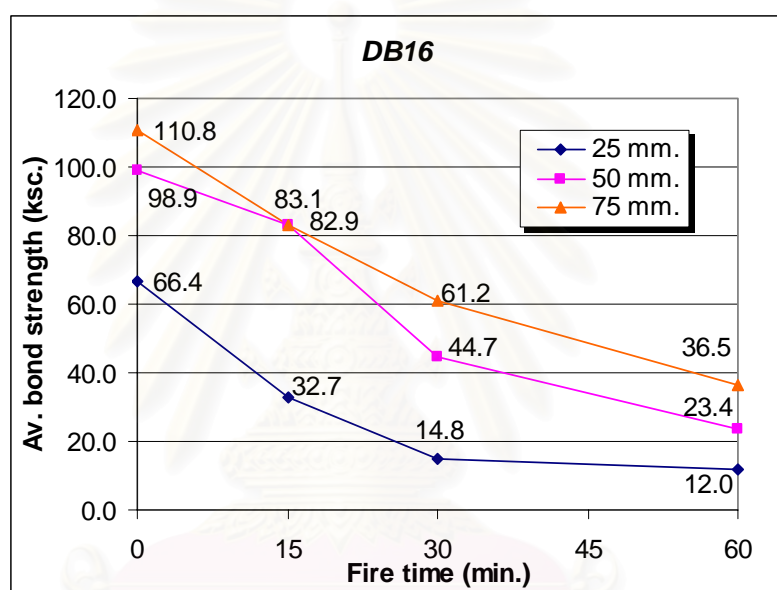
5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

รูปที่ 5-1 แสดงกราฟสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลม RB15 ที่มีระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆกับระยะเวลาที่เผาไฟ พบว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลมซึ่งขึ้นอยู่กับเกาะยึดทางเคมีและความฝืดระหว่างผิวของเหล็กและคอนกรีตเป็นสำคัญ มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วทุกระยะคอนกรีตหุ้มตั้งแต่ 15 นาทีที่ทำการเผาโดยเหลือกำลังยึดเหนี่ยวไม่ถึง 50% และค่อยๆลดลงเข้าสู่ศูนย์ที่เวลาการทดสอบ 60 นาที การลดลงของค่ากำลังยึดเหนี่ยวนี้เป็นผลเนื่องจาก ความร้อนจากไฟทำลายพันธะการยึดเกาะทางเคมีและทำลายกำลังของคอนกรีต ประกอบกับการขยายตัวขณะเผาและการหดตัวขณะเย็นตัวที่ต่างกันระหว่างเหล็กและคอนกรีตส่งผลทำลายความฝืดระหว่างผิวของเหล็กและคอนกรีต



รูปที่ 5-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (บน) และร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพันธ์(ล่าง) ของเหล็กกลม RB15 ที่มีระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆกับระยะเวลาที่เผาไฟ

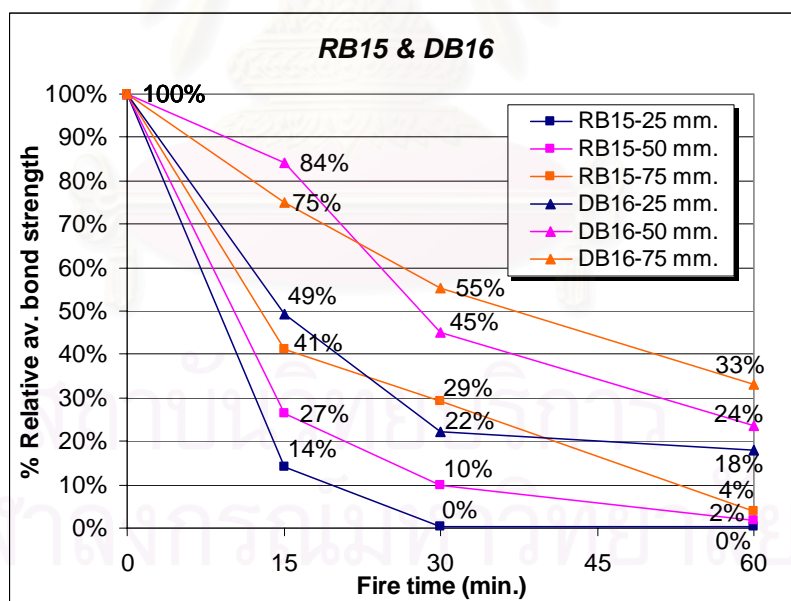
รูปที่ 5-2 แสดงกราฟสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่มีระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ กับระยะเวลาที่เผาไฟ พบว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยลดลงรวดเร็วสำหรับระยะหุ้ม 25 มม. และค่อยๆ ลดลงสำหรับระยะคอนกรีตหุ้ม 50 และ 75 มม. ตามระยะเวลาที่เผาไฟ โดยอัตราการลดลงเกือบจะเป็นเส้นตรงในช่วง 30 นาทีที่ทำการเผา และอัตราการลดลงนี้จะลดลงหลังจากการเผาที่ 30 นาที สำหรับระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. จะเห็นได้ว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ระยะเวลา 30 และ 60 นาที มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวดังกล่าวน่าจะเป็นผลของรูปร่างเหล็กข้ออ้อยที่เป็นครึ่งเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบของเหล็กกลมที่พบว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวสำหรับระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. มีค่าเท่ากับ 0 หากเผาไฟตั้งแต่ 30 นาทีขึ้นไป สาเหตุสำคัญของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม คือ ความร้อนที่กระจายเข้าไปยังเหล็กเสริม ซึ่งจะทำลายพันธะการยึดเกาะทางเคมีรวมทั้งทำลายกำลังของคอนกรีต นอกจากนั้นแล้วความร้อนยังทำให้เหล็กและคอนกรีตขยายในขณะเผาและหดตัวในขณะที่เย็นตัวที่ต่างกัน



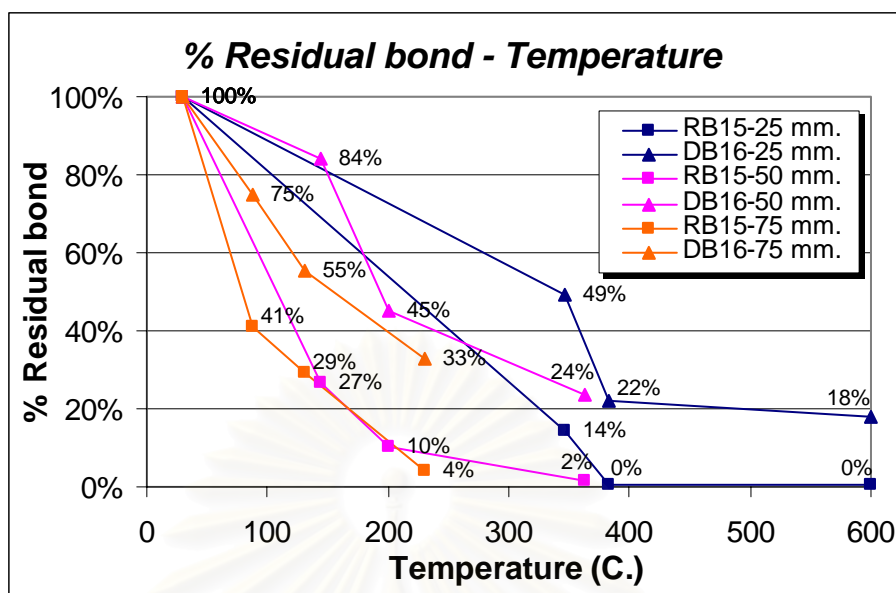
รูปที่ 5-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย(บน) และร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพันธ์(ล่าง) ของเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่มีระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ กับระยะเวลาที่เผาไฟ

รูปที่ 5-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์ กับระยะเวลาที่เผาไฟของเหล็กกลม RB15 และเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่ระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า

1. ค่ากำลังยึดเหนี่ยวหลังการเผาไฟลดลงตามระยะเวลาเผาไฟที่มากขึ้น
2. เหล็กกลมมีอัตราการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวรวดเร็วกว่าเหล็กข้ออ้อยเมื่อเทียบที่ระยะคอนกรีตหุ้มเดียวกัน และเหล็กกลมทุกระยะคอนกรีตหุ้มเกือบไม่เหลือกำลังยึดเหนี่ยวเลยเมื่อเผาไฟเป็นเวลา 60 นาที
3. เหล็กกลมมีอัตราการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก เหล็กข้ออ้อยมีอัตราการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรกแต่ลดลงด้วยอัตราที่น้อยกว่าเหล็กกลม
4. ระยะคอนกรีตหุ้มมีส่วนสำคัญที่ช่วยมิให้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวหลังการเผาไฟลดลงมากนัก โดยตัวอย่างที่มีระยะคอนกรีตหุ้มมากกว่าจะมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวหลังเผาไฟที่สูงกว่าตัวอย่างที่มีระยะคอนกรีตหุ้มน้อยกว่าที่ระยะเวลาเผาไฟและชนิดของเหล็กเดียวกัน
5. ผลของรูปร่างเหล็กเสริมมีส่วนสำคัญต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวหลังการเผาไฟ โดยเหล็กข้ออ้อยจะมีค่ากำลังยึดเหนี่ยวหลังเผาไฟที่สูงกว่าเหล็กกลมที่ระยะเวลาเผาไฟและระยะคอนกรีตหุ้มเดียวกัน



รูปที่ 5-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์กับระยะเวลาที่เผาไฟ ของเหล็กกลม RB15 และเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่ระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ

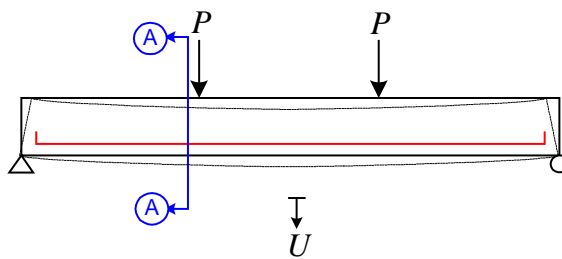


รูปที่ 5-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวเหล็กจากการวิเคราะห์ของเหล็กกลม RB15 และเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่ระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ

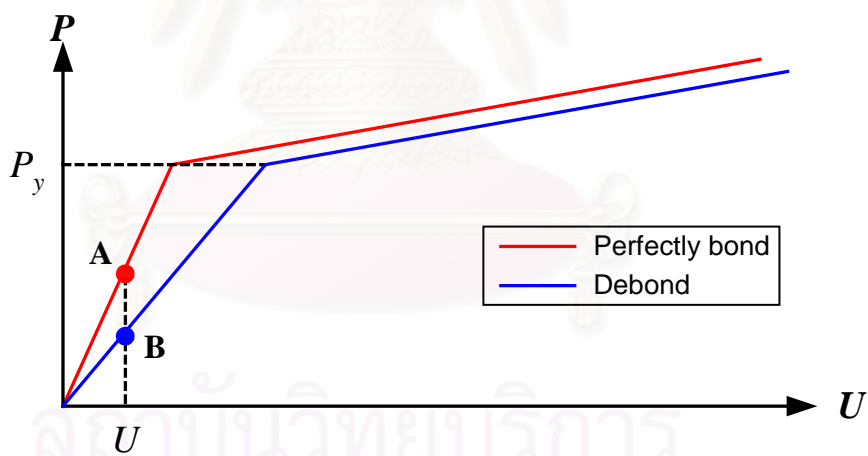
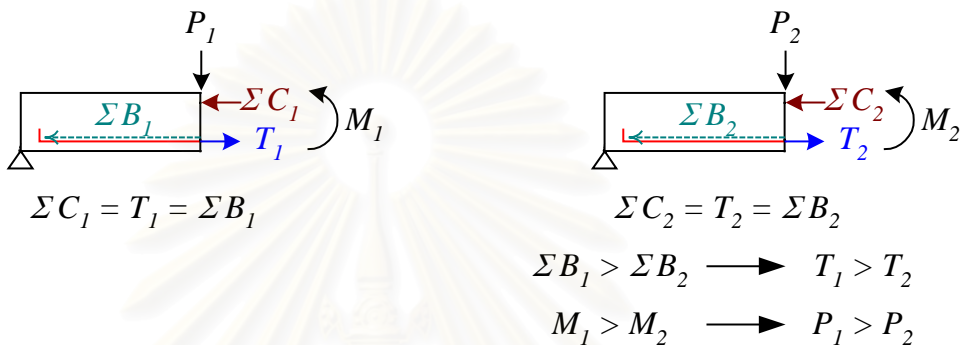
รูปที่ 5-4 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวเหล็กจากการวิเคราะห์ของเหล็กกลม RB15 และเหล็กข้ออ้อย DB16 ที่ระยะคอนกรีตหุ้มต่างๆ ซึ่งจะพบว่าเหล็กข้ออ้อยจะมีค่าร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยสัมพัทธ์หลังเผาไฟที่สูงกว่าเหล็กกลมที่ระยะคอนกรีตหุ้มเดียวกัน

ผลของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและเหล็กเสริม จะทำให้ความแข็งแรง (ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับการโก่งตัว) ในช่วงก่อนการครากของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง ดังแสดงการเปรียบเทียบด้วยจุด A และ B ในรูปที่ 5-5(d) ซึ่งสามารถพิจารณาจากสมดุลย์ของแรงในส่วนย่อยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ดังแสดงในรูปที่ 5-5 ซึ่งสามารถอธิบายผลที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อเปรียบเทียบสมดุลย์ของแรงในหน้าตัดดังรูป 5-5(b) และ (c) พบว่า ณ การโก่งตัวเดียวกันผลของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะทำให้ค่าแรงกระทำลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ผลของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมจะความแข็งแรงในช่วงก่อนการครากของคานคอนกรีตเสริมเหล็กลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a) At the same U



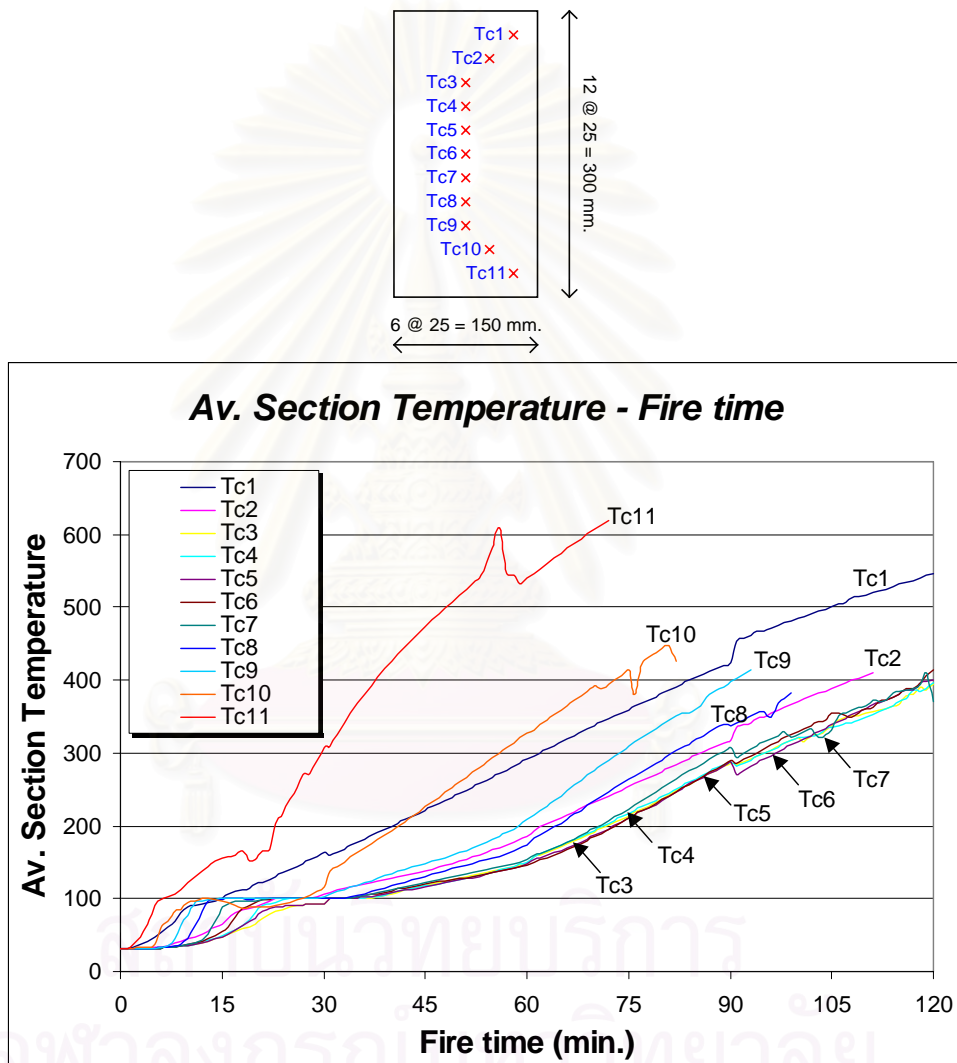
(d) Compare of P-U

รูปที่ 5-5 แบบจำลองเพื่ออธิบายผลของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่มีต่อ พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

5.2.1 อุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างชนิด A ในขณะทำการเผาไฟ

รูปที่ 5-6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างชนิด A ที่ทำการวัดในขณะทำการเผาไฟกับเวลาที่เผาไฟ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิเกือบทุกจุดในหน้าตัดที่ทำการวัดจะมีค่าเกิน 300 °C เมื่อระยะเวลาการเผาไฟมากกว่า 90 นาที ซึ่งที่ระดับอุณหภูมิ 300 °C นี้คอนกรีตจะแตกร้าวและเกิดความเสียหายในเนื้อคอนกรีต[4]



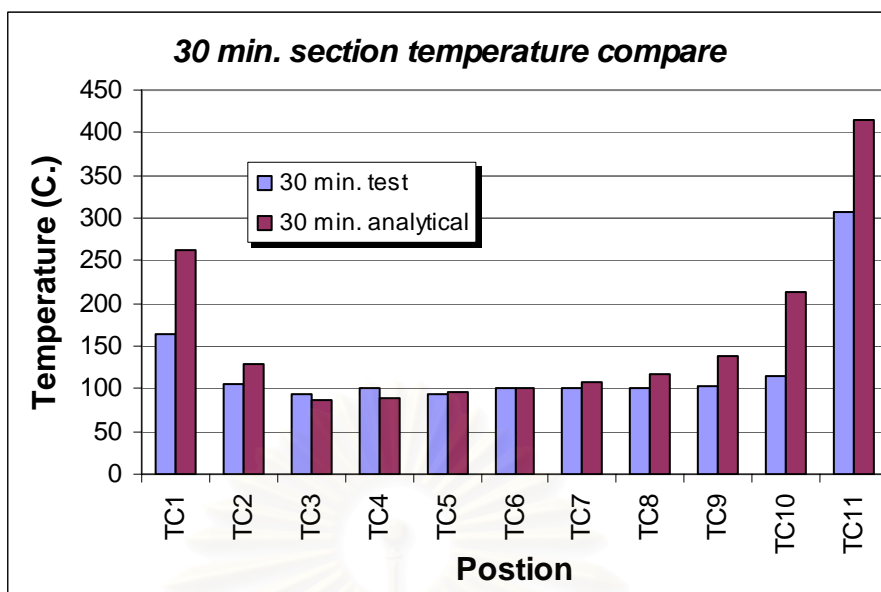
รูปที่ 5-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างชนิด A กับเวลาที่เผาไฟ

ตารางที่ 5-1 และ รูปที่ 5-7 ถึง 5-10 แสดงผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro พบว่า ผลการวิเคราะห์จะให้ค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าที่วัดได้ในจากการทดสอบในช่วงไม่เกิน 60 นาทีที่เผาไฟ แต่ที่เวลาเผาไฟ 90 และ 120 นาทีผลการวิเคราะห์จะให้ค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่วัดได้ในจากการทดสอบ ทั้งนี้มีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างดังกล่าว เช่น ความชื้นในตัวอย่าง การกระจายอุณหภูมิในเตาเผา เป็นต้น

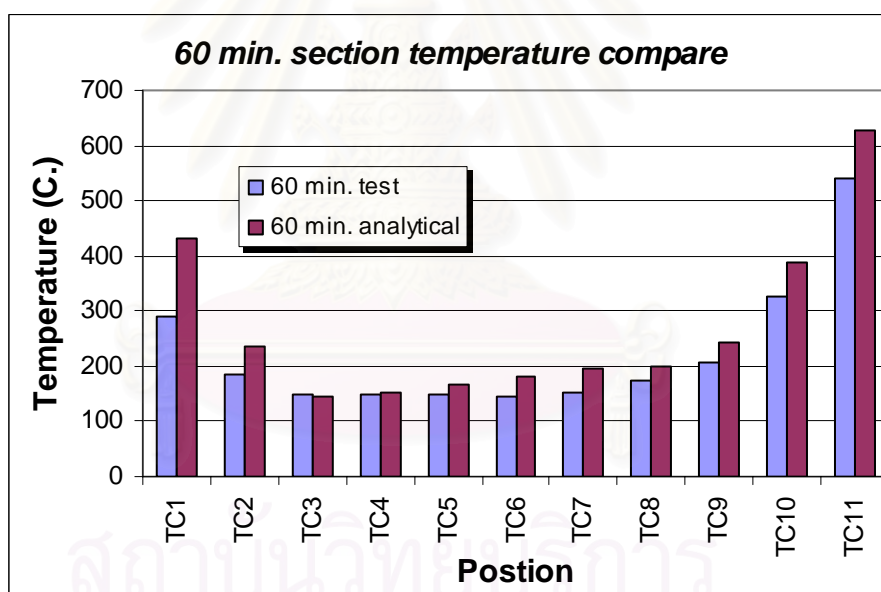
ตารางที่ 5-1 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ
Abrams และ Gustafarro (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)		30		60		90		120	
ตำแหน่ง			% ผลต่าง		% ผลต่าง		% ผลต่าง		% ผลต่าง
Tc1	ทดสอบ	163	61%	291	48%	424	20%	546	4%
	วิเคราะห์	263		431		511		568	
Tc2	ทดสอบ	106	22%	185	28%	318	1%	—*	—
	วิเคราะห์	130		236		321		382	
Tc3	ทดสอบ	93	-6%	149	-3%	286	-33%	394	-38%
	วิเคราะห์	87		144		193		244	
Tc4	ทดสอบ	100	-11%	150	2%	289	-28%	396	-36%
	วิเคราะห์	89		153		209		254	
Tc5	ทดสอบ	93	2%	148	13%	287	-22%	400	-30%
	วิเคราะห์	95		167		225		279	
Tc6	ทดสอบ	100	1%	147	23%	289	-17%	414	-27%
	วิเคราะห์	101		181		241		304	
Tc7	ทดสอบ	100	7%	153	28%	308	-16%	371	-11%
	วิเคราะห์	107		195		258		329	
Tc8	ทดสอบ	100	17%	173	16%	337	-20%	—*	—
	วิเคราะห์	117		201		268		347	
Tc9	ทดสอบ	103	34%	208	16%	397	-21%	—*	—
	วิเคราะห์	138		242		315		406	
Tc10	ทดสอบ	116	85%	327	18%	—*	—	—*	—
	วิเคราะห์	214		387		512		593	
Tc11	ทดสอบ	307	35%	540	16%	—*	—	—*	—
	วิเคราะห์	415		626		716		777	

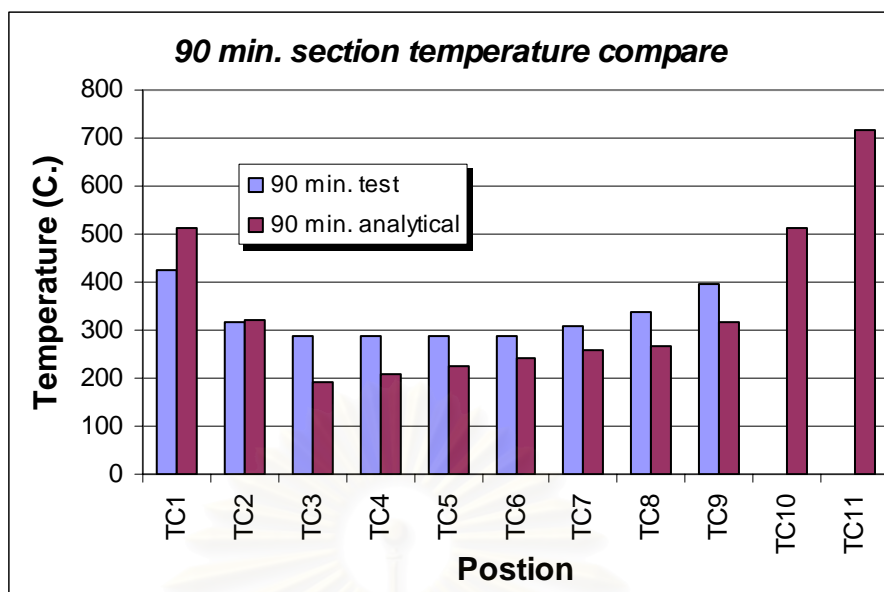
—* ไม่อาจวัดได้เนื่องจากสายวัดเกิดความเสียหาย



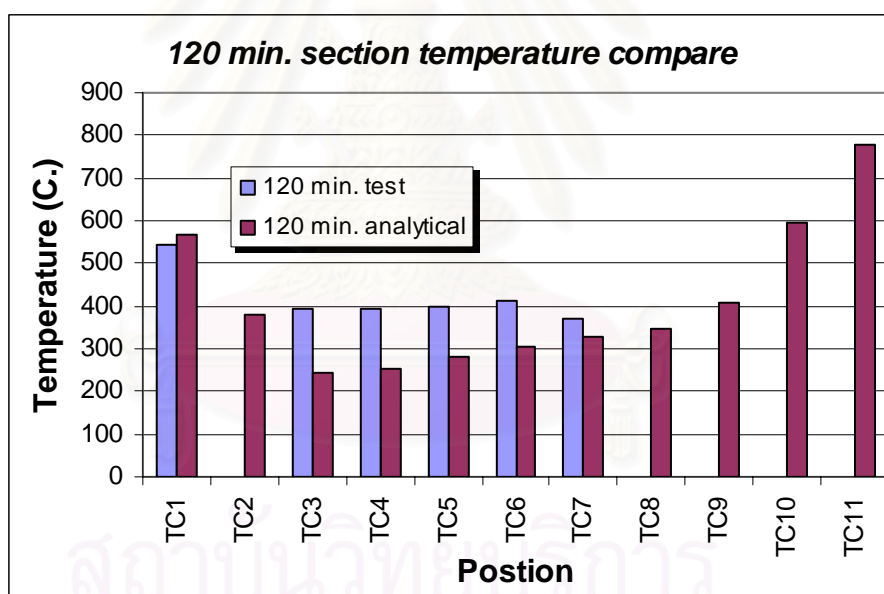
รูปที่ 5-7 กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustaferrro ณ เวลาเผา 30 นาที



รูปที่ 5-8 กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustaferrro ณ เวลาเผา 60 นาที



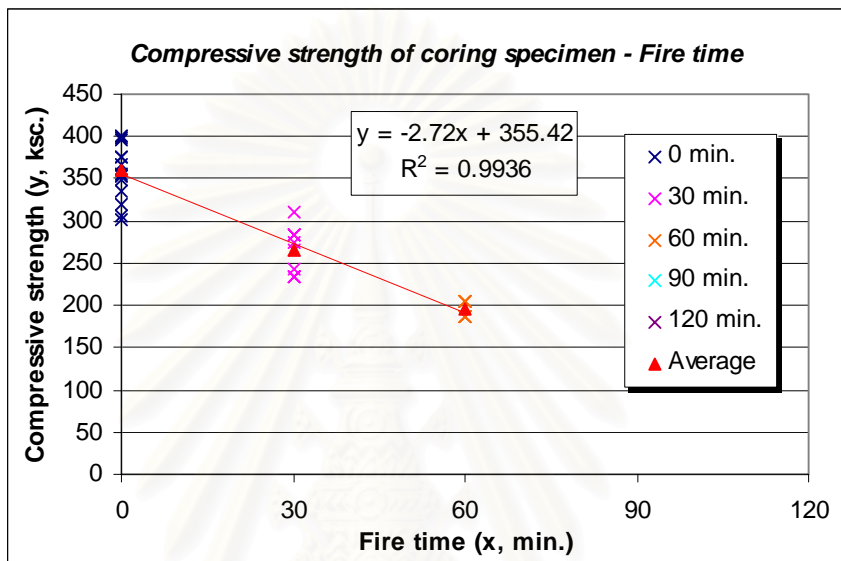
รูปที่ 5-9 กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro ณ เวลาเผา 90 นาที



รูปที่ 5-10 กราฟผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)ที่ได้จากการทดสอบกับการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustafarro ณ เวลาเผา 120 นาที

5.2.2 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีต

ผลการทดสอบสามารถนำมาสรุปผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตคอนกรีตซึ่งได้จากการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5-11 และ ตารางที่ 5-2 โดยข้อมูลแต่ละระยะเวลาที่เผาไฟจะพิจารณาเฉพาะข้อมูลที่มีค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตที่อยู่ในช่วงระหว่าง $\bar{X} \pm S.D.$ พบว่าค่ากำลังอัดมีค่าลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟดังสมการที่แสดงในกราฟรูปที่ 5-11 โดยตัวอย่างที่เผาไฟจะเสียหายจากการเจาะเป็นส่วนใหญ่และไม่อาจจะทดสอบตัวอย่างที่เผาไฟ 90 และ 120 นาทีได้เลยเนื่องจากตัวอย่างทั้งหมดเสียหายจากการเผาและการเจาะ



รูปที่ 5-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่เผาไฟกับค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตซึ่งได้จากการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B

ตารางที่ 5-2 สรุปผลการทดสอบระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตซึ่งได้จากการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B

	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	0	30	60	90	120
ค่ากำลังอัด (กก./ซม. ²)	ต่ำสุด	301	234	187	-	-
	สูงสุด	401	311	205	-	-
	พิสัย	301 - 401	234 - 311	187 - 205	-	-
	ค่าเฉลี่ย	359	266	196	-	-
	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	32	26	9	-	-
	ร้อยละสัมพัทธ์	100%	74%	55%	-	-

จากค่าร้อยละสัมพัทธ์ในตารางที่ 5-2 สามารถเขียนเป็นสมการเพื่อหาค่ากำลังอัดหลังจากเผาไฟที่เวลาต่างๆได้ดังสมการที่ 5.1

$$(f'_c)_t = f'_c(0.9895 - 0.00757t) \quad ; \quad 0 \leq t \leq 60 \text{ min.} \tag{5.1}$$

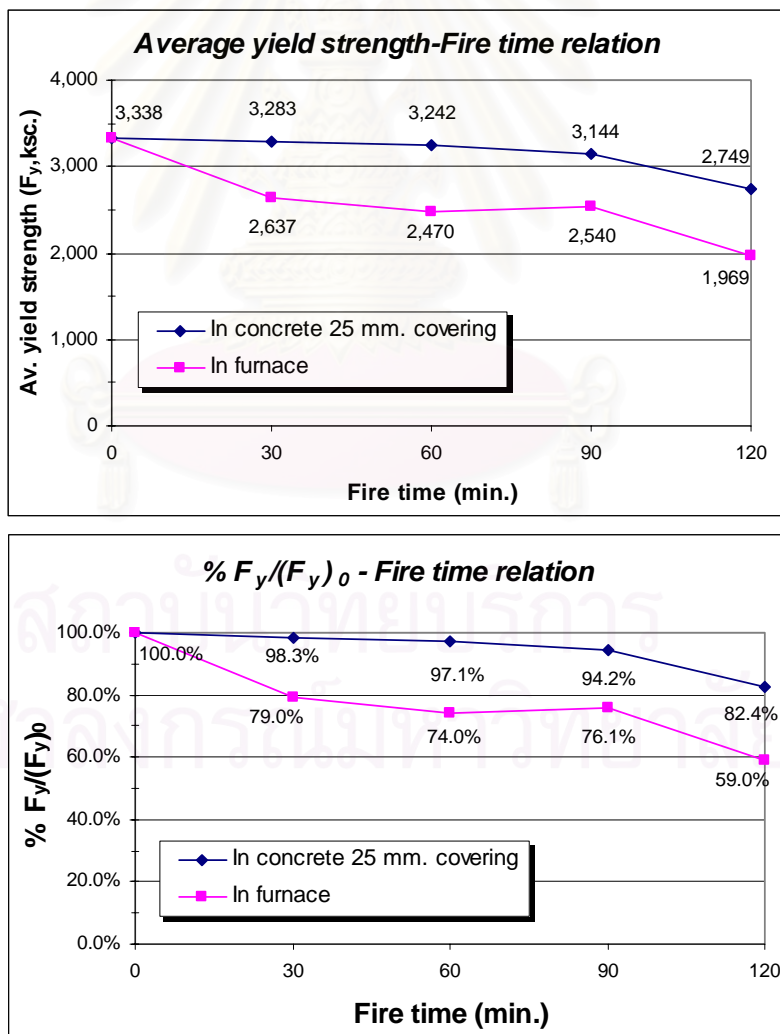
เมื่อ $(f'_c)_t$ = กำลังอัดหลังจากที่เผาไฟเป็นระยะเวลา t นาที (กก./ซม.²)

$$f'_c = \text{กำลังอัดที่มีได้เผาไฟ (กก./ซม.}^2\text{)}$$

5.2.3 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริม

5.2.3.1 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังดึงครากของเหล็กเสริม แสดงดังรูปที่ 5-12

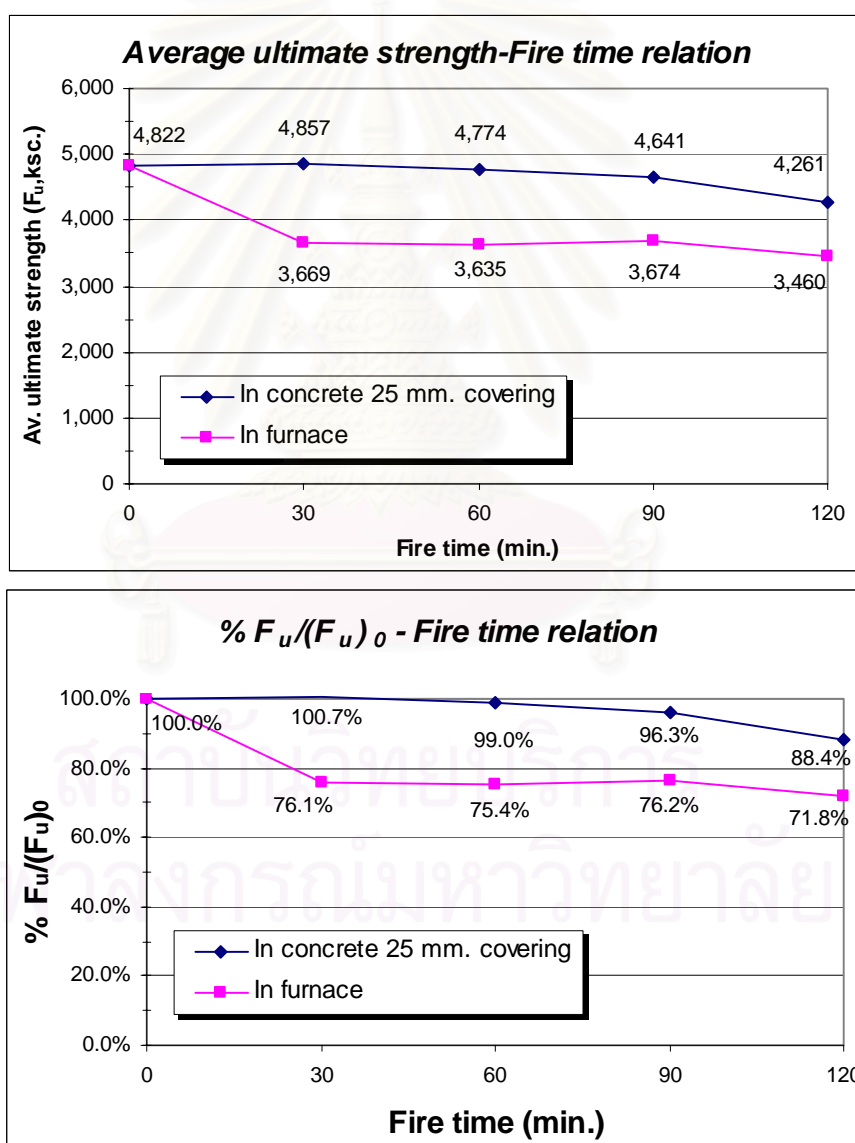
- ตัวอย่างที่อยู่ในคอนกรีตที่มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. พบว่า สำหรับระยะเวลาการเผาไม่เกิน 90 นาที ค่าร้อยละของค่ากำลังดึงครากเฉลี่ยสัมพัทธ์มีอัตราการลดลงประมาณ 2% ทุกๆ 30 นาทีที่เผาไฟ แต่หากเผาไฟ 120 นาที ค่าดังกล่าวจะลดลงเหลือแค่ 82% ทั้งนี้เพราะตัวอย่างที่เผาไม่เกิน 90 นาทีนั้นอุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างในขณะทำการเผามีค่าไม่เกิน 600 °C (ได้จากการวัดในขณะทำการเผา) ส่วนตัวอย่างที่เผาเป็นระยะเวลา 120 นาทีนั้นอุณหภูมิสูงสุดของตัวอย่างในขณะทำการเผามีค่ามากกว่า 600 °C เป็นเวลานาน ซึ่งที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C จะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในอนุภาคเหล็กอื่นจะได้กล่าวต่อไป
- ตัวอย่างที่อยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง ค่าร้อยละของค่ากำลังดึงครากเฉลี่ยสัมพัทธ์มีค่าลดลงไปประมาณ 25% สำหรับระยะเวลาการเผาไม่เกิน 90 นาที และ ลดเหลือแค่ 59% เมื่อเผาเป็นเวลา 120 นาที ทั้งนี้อธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับตัวอย่างที่อยู่ในคอนกรีตที่มีระยะหุ้ม 25 มม.



รูปที่ 5-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงครากเฉลี่ยของเหล็กเสริม(บน) และร้อยละของค่ากำลังดึงครากเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง)กับระยะเวลาที่เผาไฟ

5.2.3.2 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังดึงประลัยของเหล็กเสริม แสดงดังรูปที่ 5-13

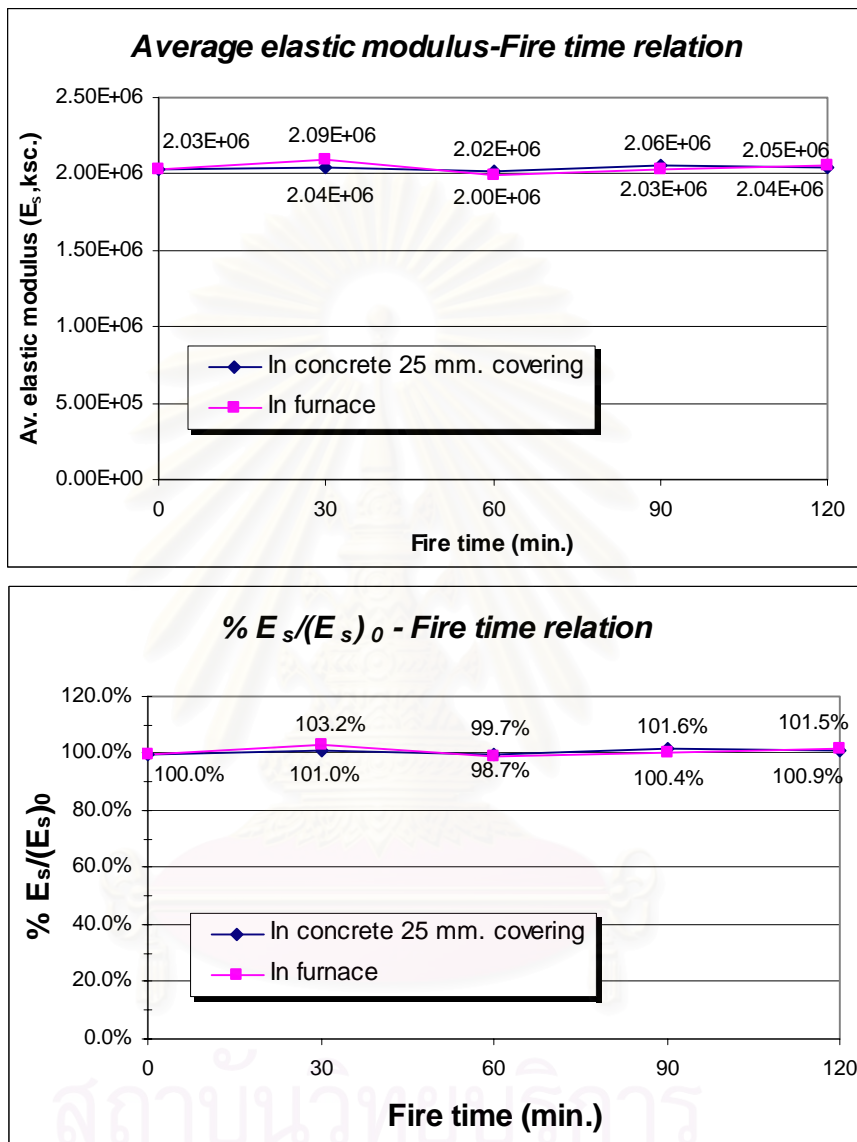
- ตัวอย่างที่อยู่ในคอนกรีตที่มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. พบว่า ค่าร้อยละของค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ยสัมพัทธ์มีค่าลดลงไม่เกิน 4% สำหรับระยะเวลาการเผาไม่เกิน 90 นาที และ ลดเหลือแค่ 88% เมื่อเผาเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังครากของตัวอย่างที่อยู่ในคอนกรีตที่มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.
- ตัวอย่างที่อยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง ค่าร้อยละของค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ยสัมพัทธ์มีค่าลดลงไปประมาณ 25% สำหรับระยะเวลาการเผาไม่เกิน 90 นาที และมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟหลังจาก 90 นาที ทั้งนี้เป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงภายในอนุภาคของเหล็กเนื่องจากการเผาไฟ



รูปที่ 5-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ยของเหล็กเสริม(บน) และร้อยละของค่ากำลังดึงประลัยเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง)กับระยะเวลาที่เผาไฟ

5.2.3.3 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริม แสดงดังรูปที่ 5-14

พบว่าผลจากการเผาไฟไม่ทำให้ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเปลี่ยนแปลง ทั้งตัวอย่างที่อยู่ในคอนกรีตซึ่งมีระยะหุ้ม 25 มม. และตัวอย่างที่อยู่ในเตาและสัมผัสกับความร้อนโดยตรง

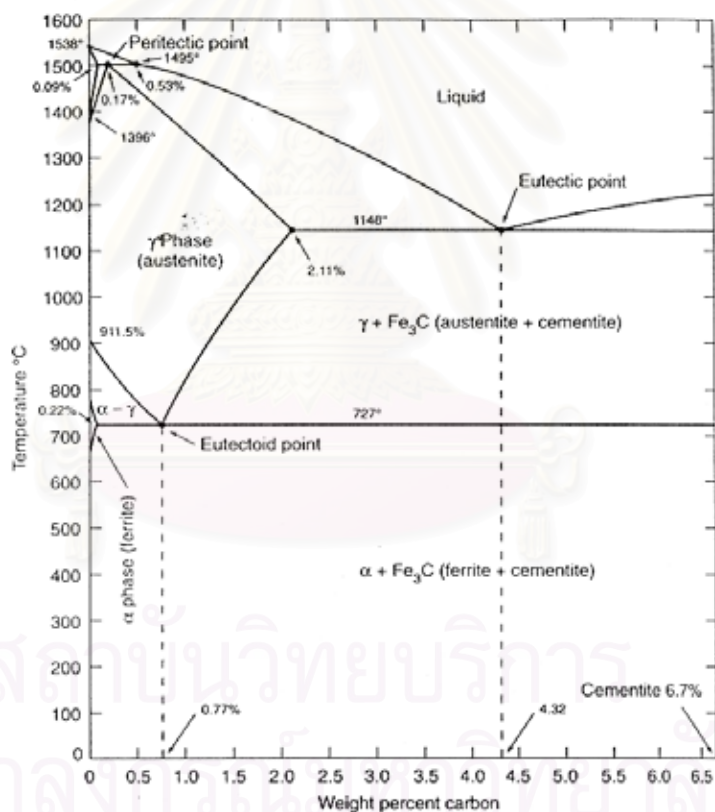


รูปที่ 5-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยของเหล็กเสริม(บน) และร้อยละของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ยสัมพัทธ์(ล่าง)กับระยะเวลาที่เผา

รูปที่ 5-15 แสดงไดอะแกรมการเปลี่ยนเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน และผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมาในหัวข้อ 5.2.3.1 ถึง 5.2.3.3 สามารถอธิบายด้วยหลักทางโลหะวิทยาของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำที่ใช้ในงานก่อสร้างซึ่งมีปริมาณคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.0218% ถึง 0.77%(เหล็กกล้าไฮโปยูเทคตอยด์) ได้ดังนี้

- หากเหล็กสัมผัสกับอุณหภูมิไม่เกิน 600 °C ในระยะเวลาที่จำกัด จะส่งผลให้กำลังที่หลงเหลือหลังการเผาไฟของเหล็กลดลงเล็กน้อย[14]

- หากเหล็กสัมผัสกับอุณหภูมิระหว่าง 600-727 °C จะเกิดการรวมตัวกันระหว่าง pearlite และ cementite ซึ่งเรียกว่าปฏิกิริยา spheroidization และ ที่อุณหภูมิสูงกว่า 727 °C โครงสร้าง ferrite-pearlite จะเปลี่ยนเป็นโครงสร้าง ferrite-austenite ซึ่งมีอนุภาคหยาบในการเย็นตัวหลังการเผาจะเกิดโครงสร้างหยาบของ ferrite-pearlite ซึ่งจะส่งผลทำให้กำลังที่หลงเหลือหลังการเผาไฟของเหล็กลดลง ซึ่งการลดลงดังกล่าวขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอนุภาคเหล็กเป็นสำคัญ[14]
- ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กไม่ได้รับผลกระทบจากการเผาไฟ เพราะค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุและมีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กับแรงดึงดูดระหว่างอะตอมต่ออะตอม โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุประเภทเดียวกัน เช่น เหล็ก จึงมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะเป็นเหล็กอ่อนหรือเหล็กกล้าชุบแข็ง(ยกเว้นในกรณีส่วนผสมของเหล็กทั้งสองต่างกันมาก คือ มีอะตอมของธาตุอื่นเข้าไปผสมอยู่มากจนแรงดึงดูดเฉลี่ยระหว่างอะตอมต่ออะตอมมีค่าเปลี่ยนไป)[28]

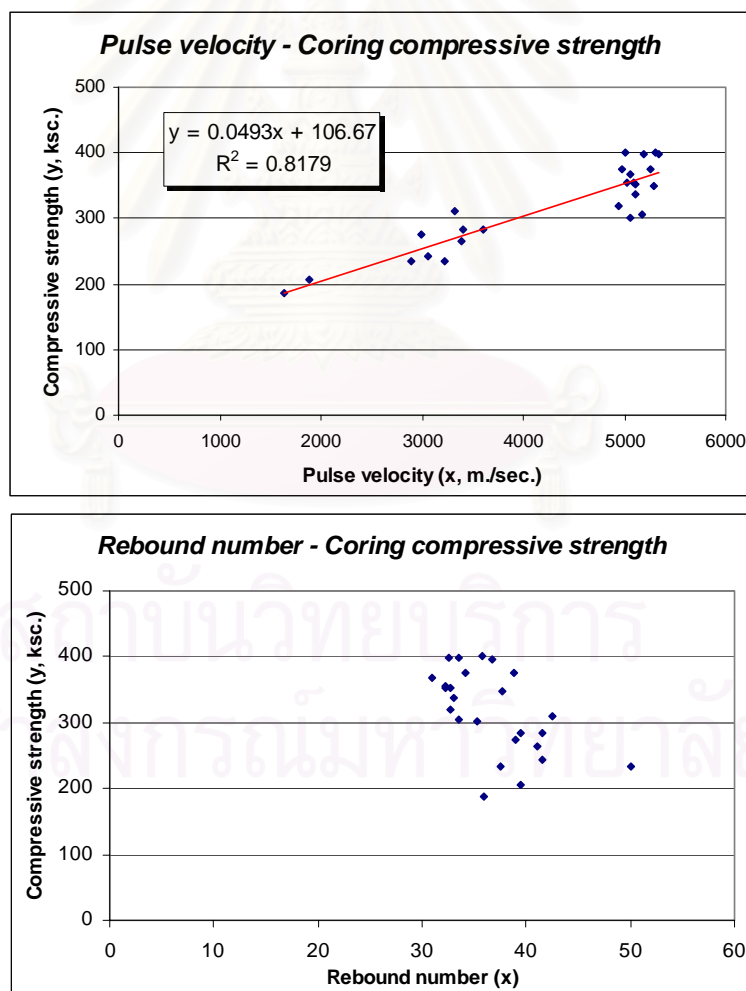


รูปที่ 5-15 ไดอะแกรมการเปลี่ยนเฟสของเหล็กกล้าคาร์บอน

จะเห็นได้ว่าระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ เพราะช่วยป้องกันความร้อนจากไฟ โดยระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. ที่ทดสอบสามารถช่วยคงคุณสมบัติกำลังดึงครากและกำลังดึงประลัยภายหลังไฟไหม้ให้ลดลงไม่มากนักหากเผาไฟไม่เกิน 90 นาที แต่หากเหล็กสัมผัสไฟโดยตรงแล้วค่าทั้งสองจะลดลงอย่างคงที่ประมาณ 25% สำหรับการเผาไฟไม่เกิน 90 นาที แต่เมื่อเผาไฟ 120 นาทีที่ค่าทั้งสองจะลดลงประมาณ 40% และ 30% ตามลำดับ และจากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นภายหลังเผาไฟของทั้งตัวอย่างที่มีคอนกรีตหุ้ม 25 มม. และที่เผาไฟโดยตรงไม่มีการเปลี่ยนแปลงในนัยสำคัญ

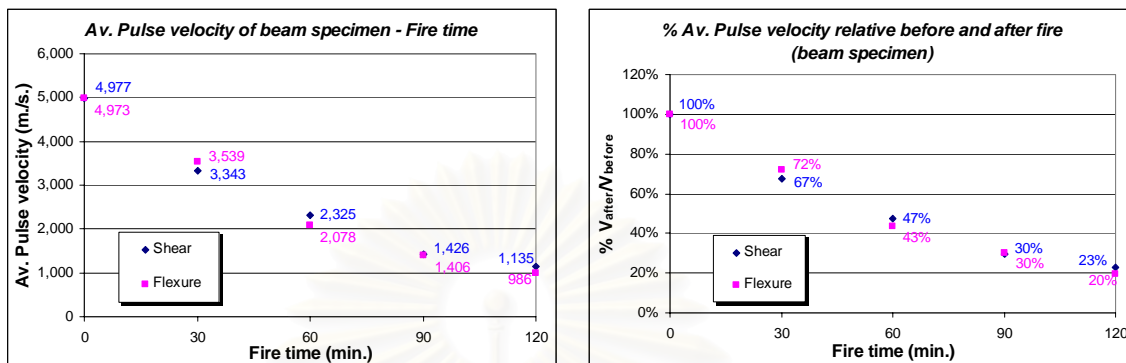
5.2.4 การวิเคราะห์การประเมินความเสียหายของโครงสร้างที่ถูกไฟเผาด้วยการทดสอบแบบไม่ทำลาย

5.2.4.1 ความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีต รูปที่ 5-16 แสดงความสัมพันธ์ของผลการทดสอบแบบไม่ทำลายทั้งสองแบบที่เลือกทำการทดสอบกับค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตที่ได้จากการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B ซึ่งเป็นข้อมูลที่สอดคล้องกับข้อมูลในหัวข้อ 5.2.2 จากกราฟดังกล่าวพบว่า การวัดด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity มีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตมากกว่าวิธีการวัดด้วย rebound hammer ทั้งนี้เนื่องจากการวัดด้วยวิธี rebound hammer นั้นมีหลักการพื้นฐานสำคัญที่ว่า ค่ากำลังอัดของคอนกรีตแปรผันตรงกับค่าความแข็งที่ผิว[24] ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วไม่อาจนำมาใช้ได้กับโครงสร้างที่ถูกไฟเผา เพราะผิวของโครงสร้างที่ถูกไฟเผาจะเกิดความเสียหายอย่างมาก ส่วนหลักการพื้นฐานสำคัญของการทดสอบด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity คือ ความเร็วของคลื่นเสียงจะแปรผันตามกับความหนาแน่นของวัสดุ ซึ่งแปรผันตามกับค่ากำลังอัดของวัสดุ หากวัสดุที่มีความหนาแน่นมากก็จะมีค่ากำลังอัดมาก ทำให้ความเร็วคลื่นเสียงที่วัดได้มีค่ามาก[24] การเผาไฟทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวโดยจะแตกร้าวมากบริเวณผิวที่สัมผัสไฟซึ่งจะส่งผลให้ความเร็วคลื่นเสียงที่วัดได้มีค่าลดลง

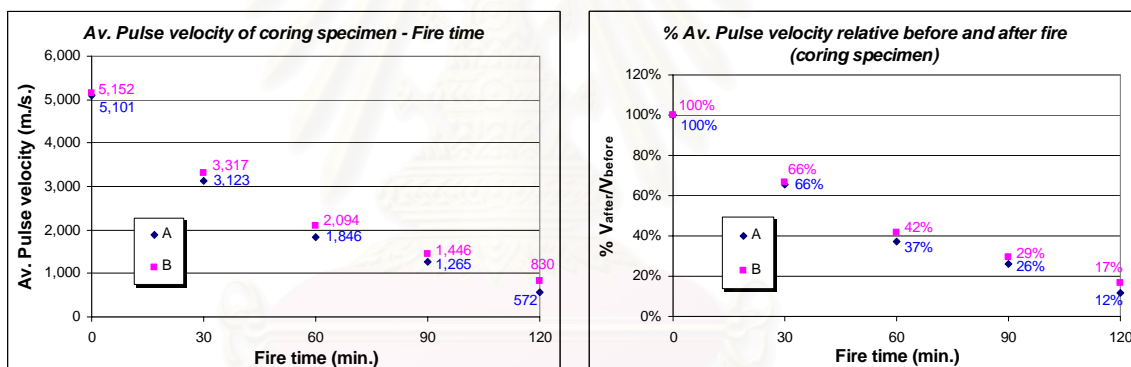


รูปที่ 5-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตกับความเร็วที่ได้จากการวัดด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity(บน) และค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตกับค่า rebound number ที่ได้จากการวัดด้วยวิธี rebound hammer(ล่าง)

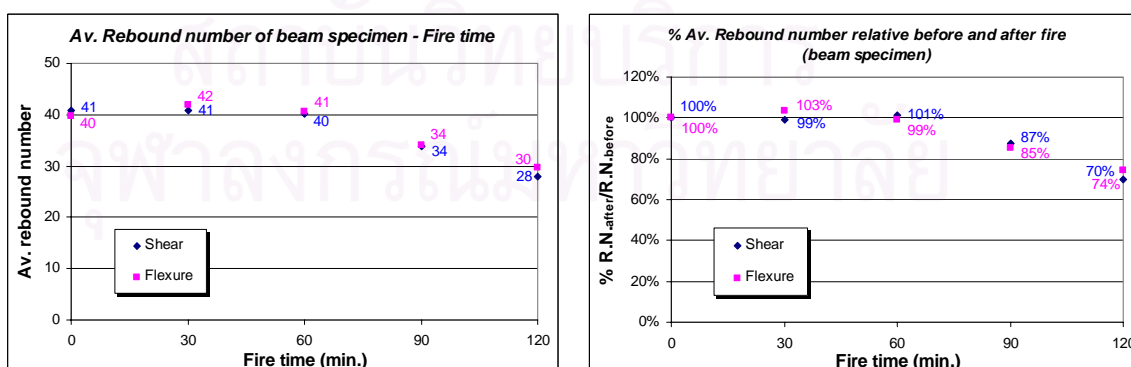
5.2.4.2 ความสัมพันธ์ของค่าที่วัดก่อนและหลังการเผา รูปที่ 5-17 ถึง 5-20 แสดงความสัมพันธ์ของผลการวัดแบบไม่ทำลายทั้งสองวิธีกับตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ซึ่งจากกราฟดังกล่าวพบว่า ค่าความเร็วที่วัดได้มีแนวโน้มลดลงตามเวลาที่เผาไฟอย่างต่อเนื่อง แต่ค่า rebound number ที่วัดได้มีค่าคงที่ในช่วง 60 นาทีและเริ่มลดลงหลังจาก 60 นาทีที่เผาไฟ



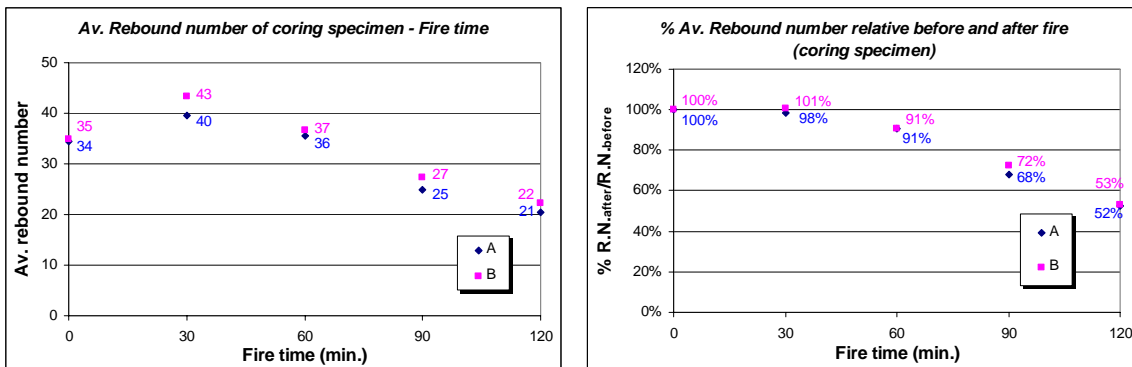
รูปที่ 5-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละความเร็วเฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่างๆ(ขวา)ของตัวอย่างคานที่ทดสอบ



รูปที่ 5-18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละความเร็วเฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่างๆ(ขวา)ของตัวอย่างชนิด A และ B



รูปที่ 5-19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า rebound number เฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี rebound hammer กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละ rebound number เฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่างๆ(ขวา)ของตัวอย่างคานที่ทดสอบ



รูปที่ 5-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า rebound number เฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธี rebound hammer กับเวลาที่เผาไฟ(ซ้าย) และค่าร้อยละ rebound number เฉลี่ยสัมพัทธ์ที่วัดได้ก่อนและหลังการเผาไฟที่เวลาต่าง ๆ(ขวา)ของตัวอย่างชนิด A และ B

5.2.5 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเหล็กเสริมเทียบกับคุณสมบัติที่ 28 วัน

5.2.5.1 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานที่ทดสอบ ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5-3 และรูปที่ 5-21

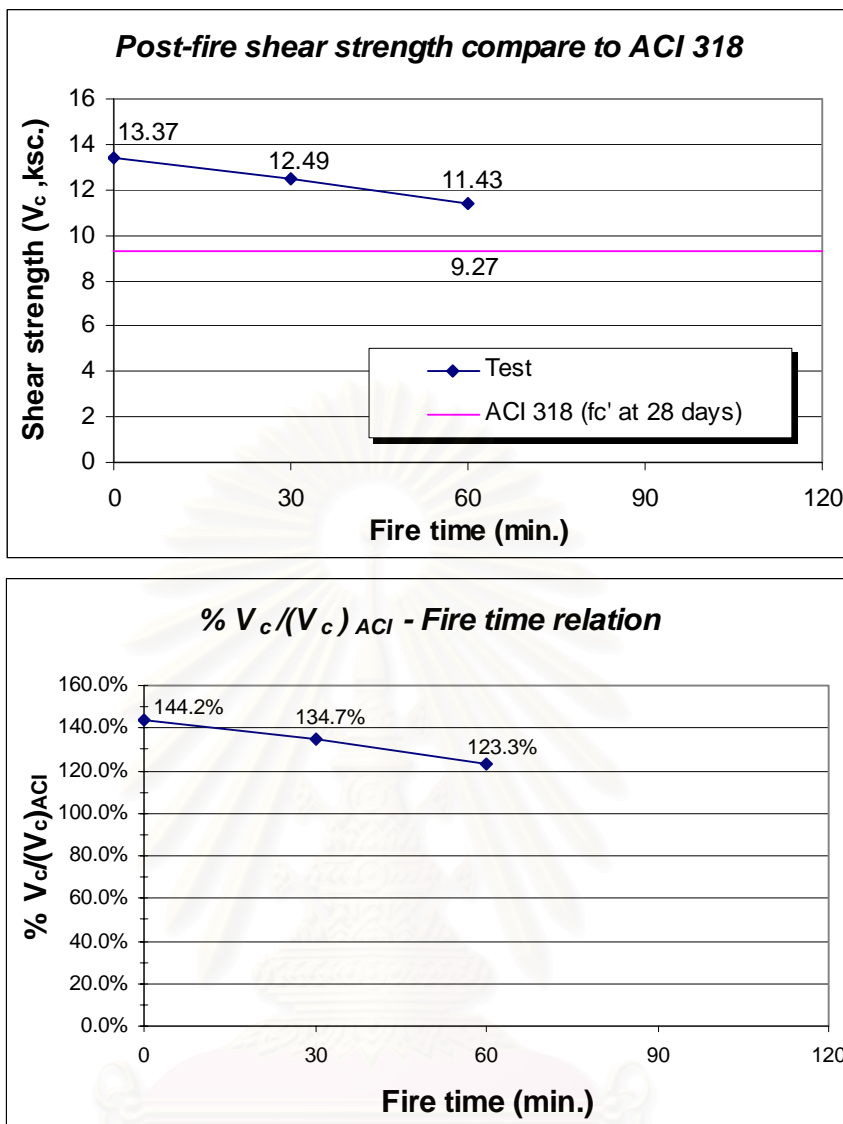
ตารางที่ 5-3 การวิเคราะห์ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังเฉือนของคานที่ทำการทดสอบเทียบกับ ข้อกำหนด ACI 318[25]

ระยะเวลาเผาไฟ	0	30	60	90	120
แรงเฉือนสูงสุดจากการทดสอบ (V, กก.)	5,355	5,001	4,578	—*	—*
ความกว้างหน้าตัด (b, ซม.)	15.0	15.0	15.0	15.0	16.0
ความลึกประสิทธิผล (d, ซม.)	26.7	26.7	26.7	26.7	26.7
กำลังเฉือนที่ได้จากการทดสอบ (V_c , กก./ซม. ²)**	13.37	12.49	11.43	—*	—*
กำลังเฉือนสูงสุดที่ได้จากการสูตร ACI 318 ($(V_c)_{ACI}$, กก./ซม. ²)***	9.27	9.27	9.27	9.27	9.27
ร้อยละอัตราส่วน $V_c/(V_c)_{ACI}$	144.2%	134.7%	123.3%	—*	—*
ร้อยละอัตราส่วน $V_c/(V_c)_0$	100.0%	93.4%	85.5%	—*	—*

* ไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผาจนไม่สามารถทำการทดสอบได้

** $V_c = V/(b \cdot d)$

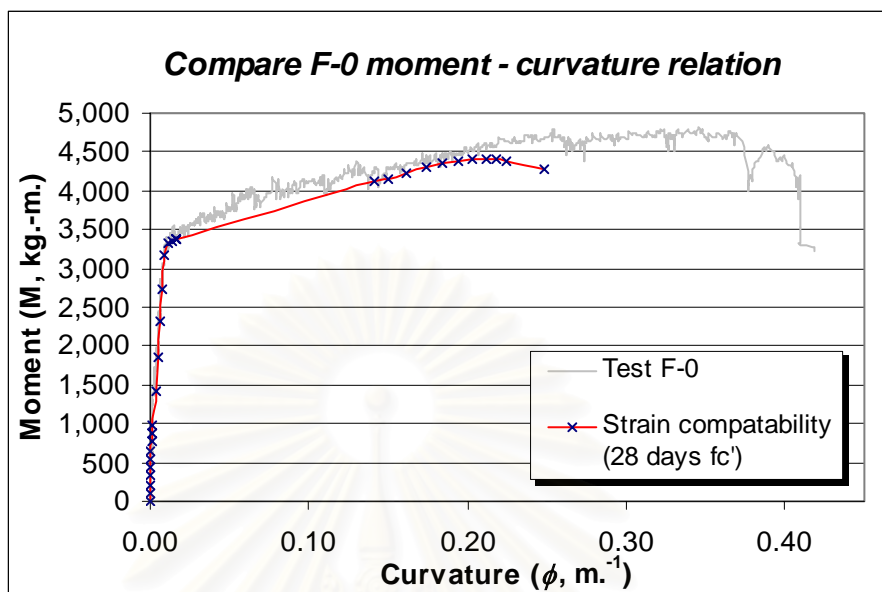
*** คัดกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน = 306 กก./ซม.² $\{(V_c)_{ACI} = 0.53\sqrt{f'_c}\}$



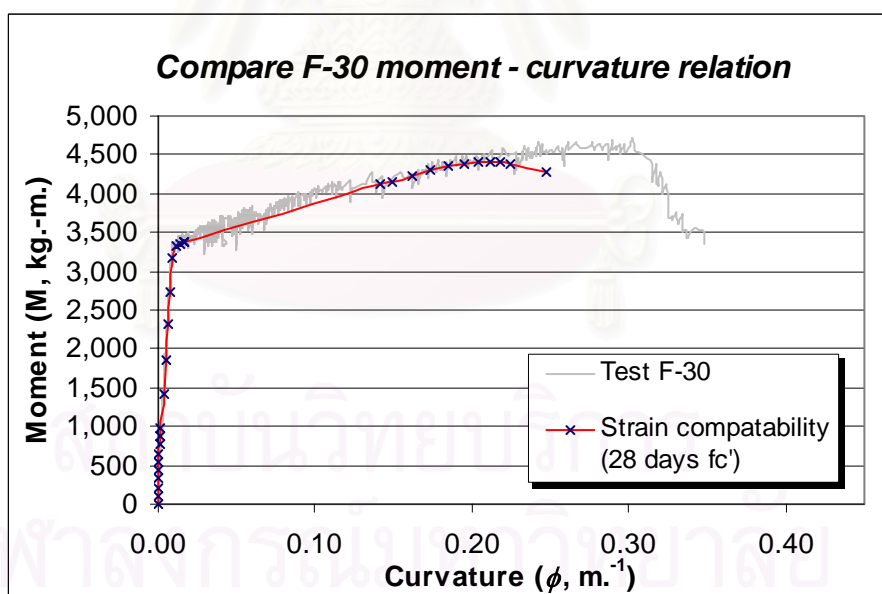
รูปที่ 5-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังเฉือนที่ได้จากการทดสอบและที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนด ACI 318 กับระยะเวลาที่เผาไฟ(บน) และค่าร้อยละของกำลังเฉือนเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบกับที่ได้จากการคำนวณตามข้อกำหนด ACI 318(ล่าง)

จากผลการวิเคราะห์ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5-21 พบว่าค่ากำลังเฉือนที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระยะเวลาที่เผาไฟ กล่าวคือ ลดลงประมาณ 10% ทุก ๆ 30 นาทีที่เผาไฟ และเมื่อเทียบกับกำลังเฉือนที่ได้จากข้อกำหนด ACI 318 ค่าคำนวณจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน แต่อย่างไรก็ดีค่ากำลังเฉือนที่คำนวณตามข้อกำหนด ACI 318 ค่าคำนวณจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน ยังคงมีความปลอดภัยที่ระดับดัชนีความปลอดภัย(factor of safety) 1.23 ที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 นาที ส่วนตัวอย่างที่เผาไฟ 90 และ 120 นาที ซึ่งเสียหายจนไม่สามารถทดสอบได้เนื่องจากคอนกรีตที่ด้านล่างมีการแตกออก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาผลการวัดอุณหภูมิในหน้าตัดตัวอย่างที่ทำการทดสอบจะพบว่าที่เวลา 90 นาที อุณหภูมิเกือบทุกจุดที่ทำการวัดมีค่าเกิน 300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่คอนกรีตเริ่มมีการแตกร้าวและเกิดความเสียหายในเนื้อวัสดุ ประกอบกับการเสียกำลังยึดเหนี่ยวเนื่องจากผลของไฟที่ทำให้คอนกรีตที่ด้านล่างหลุดออกจนไม่อาจทำการทดสอบได้

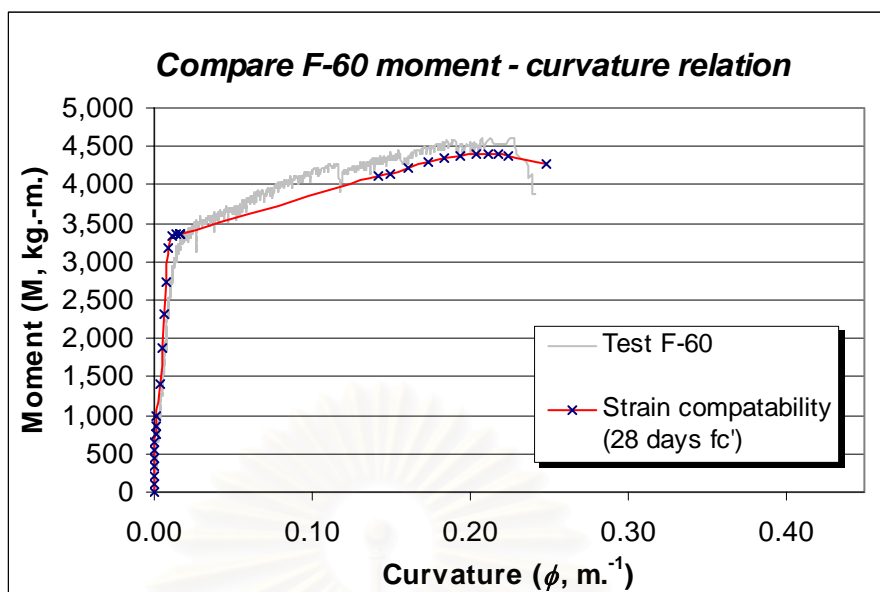
5.2.5.2 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่ทดสอบ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 5-22 ถึง 5-25 และตารางที่ 5-4



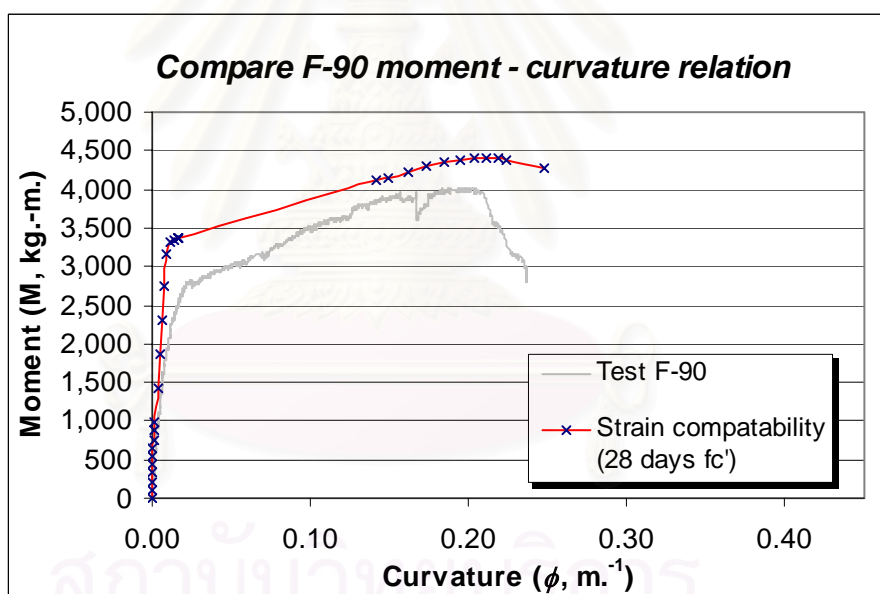
รูปที่ 5-22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-0 กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ)



รูปที่ 5-23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-30 กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ)



รูปที่ 5-24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-60 กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ)



รูปที่ 5-25 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-90 กับที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ)

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 5-22 ถึง 5-26 พบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ) ให้ผลที่ใกล้เคียงสำหรับคานตัวอย่างที่มีได้เผาไฟและที่เผาไฟเป็นเวลา 30 และ 60 นาที แสดงให้เห็นว่า สำหรับคานที่ทำการศึกษาการเผาไฟที่ระยะเวลาไม่เกิน 60 นาที ไม่ทำให้พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานเปลี่ยนไป ส่วนที่เวลา 90 นาที ผลการวิเคราะห์ต่างจากผลการทดสอบอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กเสริมและคอนกรีตได้รับความเสียหายจากผลของไฟ ตารางที่ 5-5 แสดงผลการวัดอุณหภูมิในขณะเผาของคานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด ซึ่งจะเห็นว่าเหล็กเสริมรับแรงดัดของคาน F-90 มีอุณหภูมิสูงสุดเกินกว่า 600 °C ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในอนุภาคเหล็กซึ่งจะทำให้กำลังของเหล็กเสริมภายหลังการเผาผลลงและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานหลังเผาไฟ

ตารางที่ 5-4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบคานคอนกรีตที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดกับการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ)

		โมเมนต์คราก (M_y , กก.-ม.)	โมเมนต์ประลัย (M_u , กก.-ม.)	ดัชนีความเหนียว ($R = \phi_u / \phi_y$)	
คำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง*		3,323	-	-	
ผลการทดสอบ	เวลาเผาไฟ (นาที)	0	3,305	4,634	38.5
		30	3,380	4,715	26.3
		60	3,247	4,616	13.5
		90	2,778	3,936	9.6
		120	-	-	-

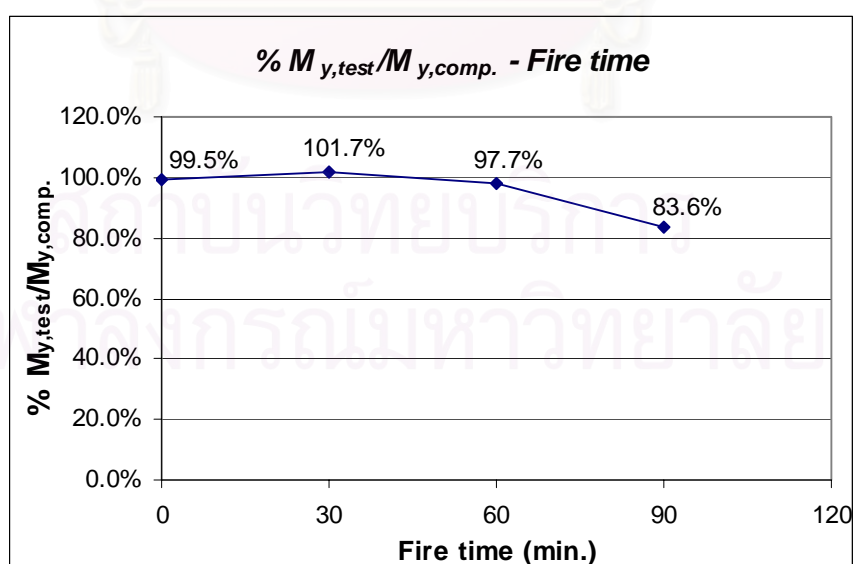
* ใช้คุณสมบัติวัสดุที่ได้จากการทดสอบในการคำนวณและคิดกำลังอัดคอนกรีตที่ 28 วัน

ตารางที่ 5-5 ผลการวัดอุณหภูมิสูงสุดในขณะเผาของคานตัวอย่างที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัด

คานตัวอย่าง	อุณหภูมิสูงสุด ($^{\circ}\text{C}$)					
	T1*	T2*	T3*	T4*	T5*	T6*
F-30	152	127	267	245	271	297
F-60	254	249	388	462	>396.6**	>399.8**
F-90	338	433	>556.5**	>549.7**	>540.5**	>630.5**
F-120	>376.8**	>486**	>509.4**	>618.9**	>573.4**	>602.1**

* T1-T2 = อุณหภูมิในเหล็กเสริมรับแรงอัด, T3-T4 = อุณหภูมิในเหล็กปลอก, T5-T6 = อุณหภูมิในเหล็กเสริมรับแรงดึง

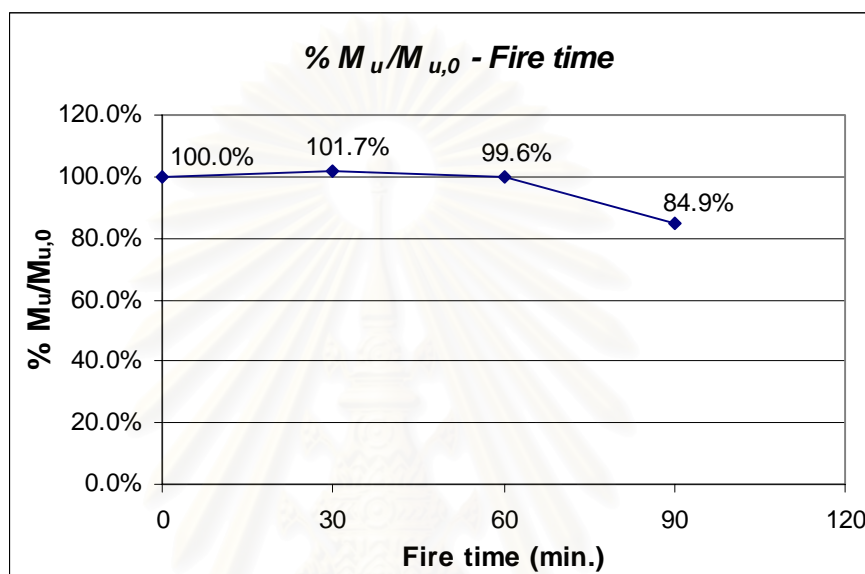
** ไม่อาจวัดค่าสูงสุดได้เนื่องจากสายวัดอุณหภูมิเกิดความเสียหาย แต่มีแนวโน้มมากกว่าค่าที่แสดง



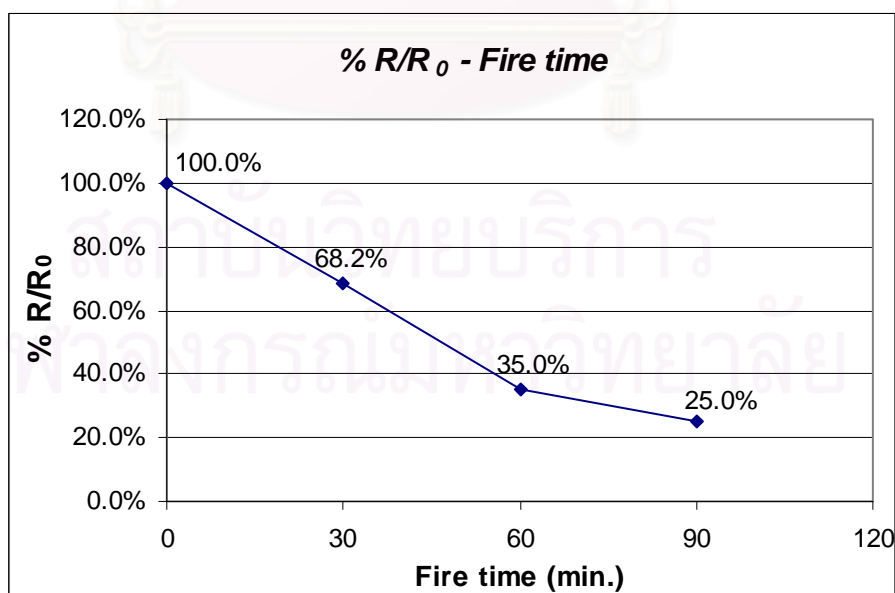
รูปที่ 5-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละอัตราส่วนของโมเมนต์ครากที่ได้จากการทดสอบต่อโมเมนต์ครากที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (คิดจากคุณสมบัติวัสดุที่มีได้เผาไฟ) กับเวลาที่เผาไฟ

ผลของระยะเวลาที่เผาไฟต่อค่าโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 5-27 ซึ่งจากผลการทดสอบพบว่าที่ระยะเวลาเผาไฟไม่เกิน 60 นาที ค่าโมเมนต์ประลัยมิได้รับผลกระทบจากผลของไฟไหม้ ส่วนที่ระยะเวลาเผา 90 นาที จะเห็นผลการลดลงได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุหลักมาจากความเสียหายของคอนกรีตและเหล็กเสริมจากผลของการเผาไฟ

แม้ระยะเวลาเผาไฟไม่เกิน 60 นาทีจะไม่ส่งผลต่อค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่าง แต่จากรูปที่ 5-28 แสดงให้เห็นถึงการลดลงของดัชนีความเหนียวของคานตัวอย่างหลังเผาไฟจากผลของการเผาไฟ โดยค่าดังกล่าวจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นสำหรับการเผาไฟในช่วงไม่เกิน 60 นาที กล่าวคือ ลดลงประมาณ 65% ใน 60 นาทีแรกที่เผาไฟ และเมื่อเผาไฟ 90 นาทีค่าดังกล่าวจะลดลงไป 75%



รูปที่ 5-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของอัตราส่วนโมเมนต์ประลัยที่เวลาการเผาไฟต่าง ๆ ต่อโมเมนต์ประลัยที่มีได้เผาไฟกับเวลาที่เผาไฟ



รูปที่ 5-28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละของอัตราส่วนดัชนีความเหนียวที่เวลาการเผาไฟต่าง ๆ ต่อดัชนีความเหนียวที่มีได้เผาไฟกับเวลาที่เผาไฟ

5.2.6 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเหล็กเสริมเทียบกับคุณสมบัติที่ได้จากการวิเคราะห์กำลังที่หลงเหลือหลังเผาไฟ

สมมุติฐานของการวิเคราะห์มีดังนี้

1. ค่าร้อยละกำลังอัดหลังเผาไฟของคอนกรีตเป็นไปตามสมการที่เสนอโดย Institution of Structural Engineers[16] ดังสมการ 5.2 และยังมีพฤติกรรมเป็นไปตามแบบจำลองของ Kent and Park[22]

$$\frac{f'_c}{(f'_c)_0} = \begin{cases} 1 & \text{if } 20 \leq T \leq 350 \text{ } ^\circ\text{C}. \\ 1.622 - 0.00178T & \text{if } 350 \leq T \leq 911 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (5.2)$$

เมื่อ f'_c คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิ T °C

$(f'_c)_0$ คือ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่มีได้เผา

2. ค่าร้อยละของกำลังดึงคราก, กำลังดึงประลัย และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมรับแรงดึงที่หลงเหลือหลังเผาไฟ ได้จากการสุ่มแทนค่าโดยพิจารณาจากแนวโน้มผลกรทดสอบให้หัวข้อ 5.2.3 และผลการวัดอุณหภูมิในขณะทำการเผาตั้งตารางที่ 5-5 ซึ่งค่าที่ใช้สรุปได้ตั้งตารางที่ 5-6

ตารางที่ 5-6 ค่าร้อยละของกำลังดึงคราก, กำลังดึงประลัย และ ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมที่หลงเหลือหลังเผาไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ครากที่หลงเหลือหลังเผาไฟ

ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	% f_y/f_{y0}	% f_u/f_{u0}	% E_s/E_{s0}
0	100.0%	100.0%	100.0%
30	98.0%	98.0%	100.0%
60	97.0%	97.0%	100.0%
90	82.5%	82.5%	100.0%

3. การวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องยังคงใช้ได้กับโครงสร้างที่ถูกละไฟเผา

5.2.6.1 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของคานที่หลงเหลือ ตามข้อกำหนด ACI 318 ค่ากำลังเฉือนของหน้าตัดคานคอนกรีตขึ้นกับค่ารากที่สองของกำลังอัดคอนกรีต ($(V_c)_{ACI} = 0.53\sqrt{f'_c}$) ในการวิเคราะห์ค่าร้อยละกำลังเฉือนที่หลงเหลือจึงพิจารณาต้องพิจารณาค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตที่หลงเหลือ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

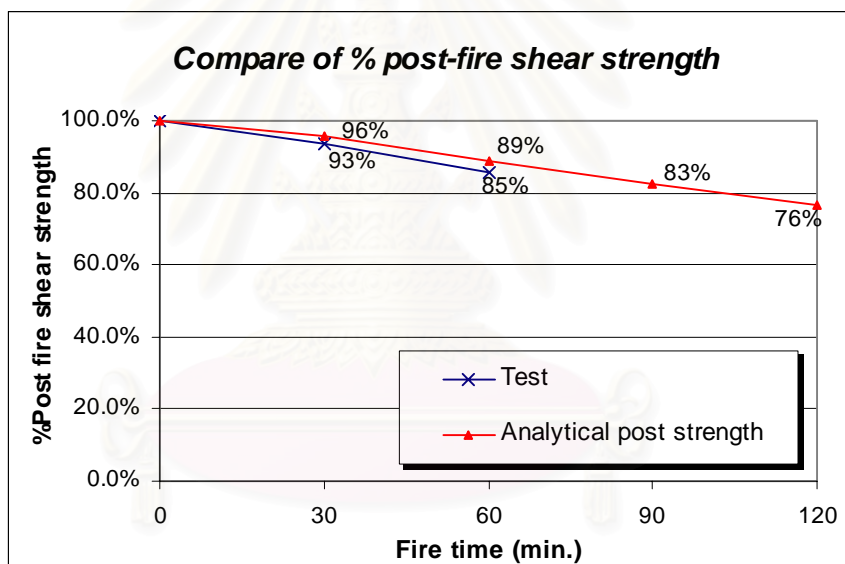
1. ทำการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัด และทำการเฉลี่ยอุณหภูมิในแต่ละส่วนของหน้าตัด(จากการเฉลี่ยค่า 4 โหนดที่ปิดล้อมส่วนของหน้าตัดนั้น)
2. จากผลในข้อ 1. ทำการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดหลังเผาไฟของคอนกรีตตาม สมการ 5.2 และทำการเฉลี่ยค่าร้อยละกำลังอัดหลังเผาไฟของคอนกรีตทั้งหน้าตัด

ตารางที่ 5-7 และ รูปที่ 5-29 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าจากการวิเคราะห์มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบประมาณ 4% (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 5-7 ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละกำลังรับแรงเฉือนที่หลงเหลือ

ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	ค่าร้อยละกำลังอัดของที่หลงเหลือ เฉลี่ยของหน้าตัด (α)	$\sqrt{\alpha}$	$\% \left(\frac{\sqrt{\alpha}}{\sqrt{\alpha_0}} \right)$	ค่าจากการทดสอบ
0	100%	1.000	100%	100.0%
30	91%	0.956	96%	93.4%
60	79%	0.886	89%	85.5%
90	68%	0.826	83%	-*
120	58%	0.764	76%	-*

* ไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผาจนไม่สามารถทำการทดสอบได้



รูปที่ 5-29 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละกำลังเฉือนที่หลงเหลือที่ได้จากการทดสอบเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์

5.2.6.2 ผลของระยะเวลาเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่หลงเหลือ ในการวิเคราะห์นอกจากใช้สมมุติฐานตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว การหาค่ากำลังอัดที่หลงเหลือของคอนกรีตจำต้องใช้ การเฉลี่ยจากส่วนที่รับแรงอัดเท่านั้น(มิใช่ทั้งหน้าตัดซึ่งจะให้ค่าเฉลี่ยที่ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น) ซึ่งมีขั้นตอนในการหา ดังนี้

1. ทำการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัด และทำการเฉลี่ยอุณหภูมิในแต่ละส่วนของหน้าตัด(จากการเฉลี่ยค่า 4 โหนดที่ปิดล้อมส่วนของหน้าตัดนั้น)
2. จากผลในข้อ 1. ทำการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือหลังเผาไฟของคอนกรีตตาม สมการ 5.2 และทำการเฉลี่ยค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือหลังเผาไฟของคอนกรีต เฉพาะส่วนที่รับแรงอัด ซึ่งทั้งนี้ส่วนที่รับแรงอัดนิยามจากตำแหน่งของแกนสะเทินจาก ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง ณ สภาวะคราก ของตัวอย่างที่มีได้เผา ซึ่งได้ค่าเท่ากับ 7.359 ซม. จากผิวบนของหน้าตัด

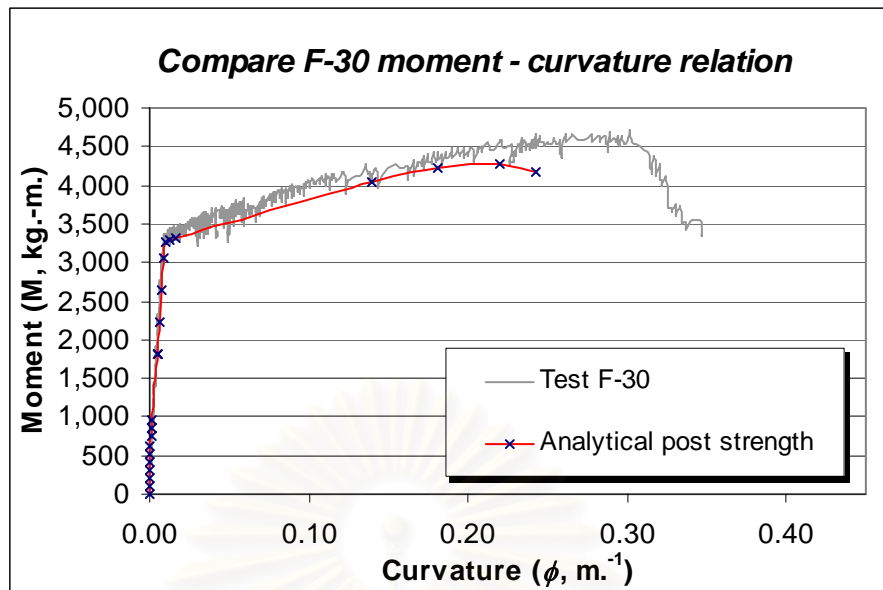
สรุปคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดที่หลงเหลือ แสดงดังตารางที่ 5-8 และผลการวิเคราะห์แสดงดัง ตารางที่ 5-9 และ รูปที่ 5-30 ถึง 5-33

ตารางที่ 5-8 สรุปคุณสมบัติที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดที่หลงเหลือ

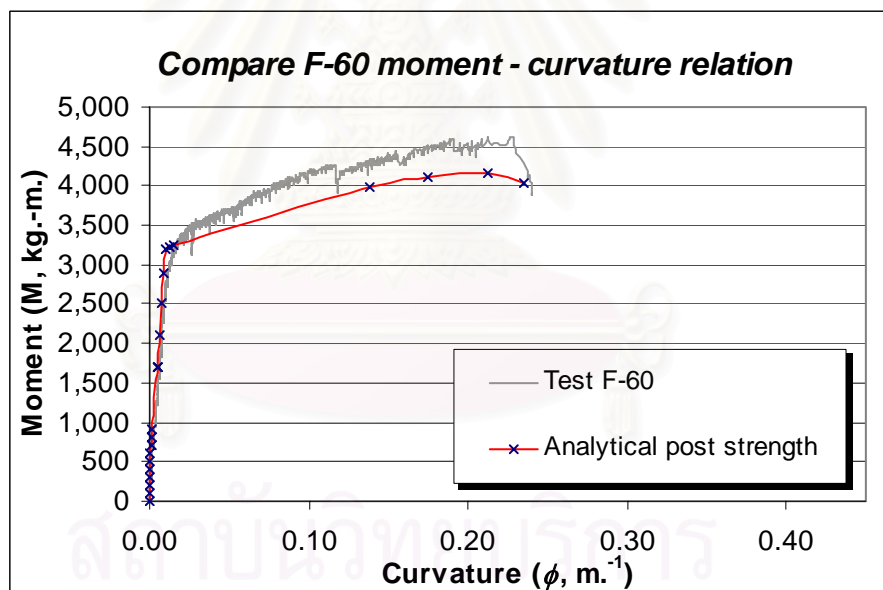
ระยะเวลาเผาไฟ (นาท.)	ค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือเฉลี่ย ของหน้าตัดส่วนที่รับแรงอัด (กก./ซม. ²)	กำลังดึงคราก (กก./ซม. ²)	กำลังดึงประลัย (กก./ซม. ²)	โมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ซม. ²)
0	306 (100%)	3,433(100%)	5,351(100%)	2×10^6 (100%)
30	288 (94%)	3,364(98%)	5,244(98%)	2×10^6 (100%)
60	260 (85%)	3,330(97%)	5,190(97%)	2×10^6 (100%)
90	238 (78%)	2,832(82.5%)	4,415(82.5%)	2×10^6 (100%)

ตารางที่ 5-9 การเปรียบเทียบค่าร้อยละโมเมนต์ครากที่หลงเหลือจากการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ

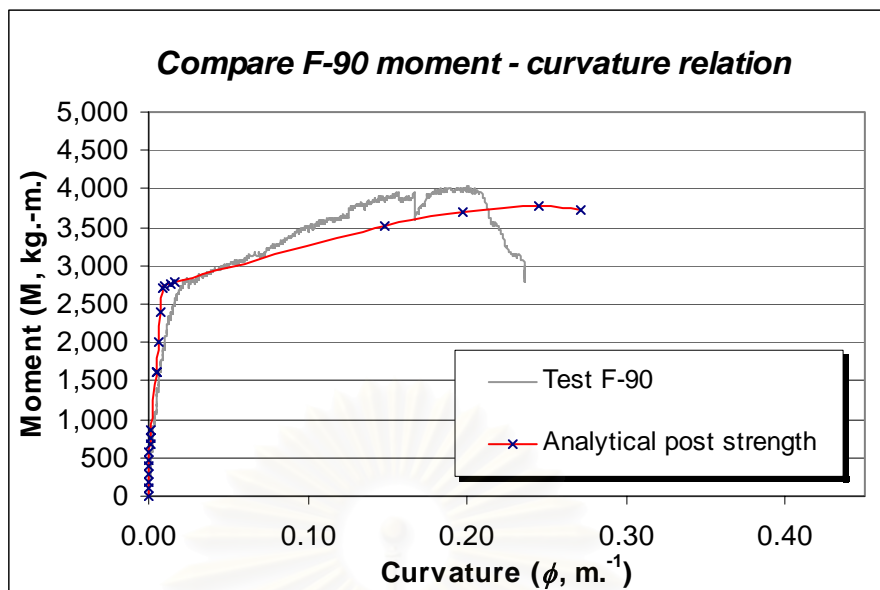
ระยะเวลาเผาไฟ (นาท.)	การวิเคราะห์		การทดสอบ	
	โมเมนต์คราก (M_y , กก.-ม.)	$\% \frac{M_{y,analytical}}{(M_{y,analytical})_0}$	โมเมนต์คราก (M_y , กก.-ม.)	$\% \frac{M_{y,experimental}}{(M_{y,experimental})_0}$
0	3,323	100%	3,305	100%
30	3,256	98%	3,380	102%
60	3,192	96%	3,247	98%
90	2,704	81%	2,778	84%



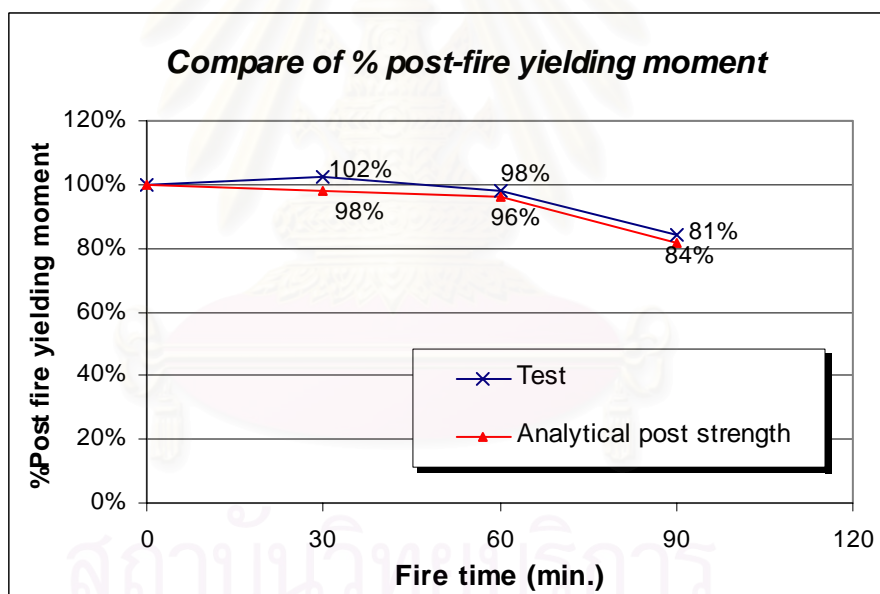
รูปที่ 5-30 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-30 กับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่



รูปที่ 5-31 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-60 กับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่



รูปที่ 5-32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งที่ได้จากการทดสอบคาน F-90 กับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่



รูปที่ 5-33 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าร้อยละโมเมนต์ครากที่หลงเหลือที่ได้จากการทดสอบเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องจากกำลังที่หลงเหลืออยู่

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 5-30 ถึง 5-33 พบว่า การวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้องโดยใช้คุณสมบัติวัสดุตามที่ประเมินในตารางที่ 5-8 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แต่ผลจากการวิเคราะห์คาน F-60 และ F-90 พบว่าความแข็งแรงเชิงดัด(ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้ง)ช่วงก่อนการครากมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากผลการทดสอบตามลำดับ ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมดัดที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าสำหรับคานที่ทดสอบซึ่งมีปริมาณเหล็กเสริมน้อยกว่าที่สภาวะสมดุลย์ ความใกล้เคียงของการวิเคราะห์ค่าโมเมนต์ครากที่หลงเหลือหลังการเผาไฟขึ้นอยู่กับประเมินค่ากำลังดัดครากของเหล็กเสริมที่หลงเหลือหลังการเผาไฟเป็นสำคัญ

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุป

6.1.1 จากผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ได้ทำการทดสอบ พบว่าค่าดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ โดยเหล็กกลมจะสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวมากกว่าเหล็กข้ออ้อยที่ระยะเวลาเผาไฟและที่ระยะคอนกรีตหุ้มเดียวกัน กำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กกลมจะเหลือไม่ถึง 50% หลังจากเผาไฟ 15 นาทีทุกระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมและหลังจากเผาไฟ 60 นาทีเหล็กกลมแทบไม่เหลือกำลังยึดเหนี่ยวเลย และผลของการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมเนื่องจากการเผาไฟ จะทำให้ความแข็งแรงเชิงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงก่อนการครากมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับคานที่ไม่ได้เผาไฟ

6.1.2 ผลการทดสอบกำลังอัดของลูกคอร์กอนกรีตที่ได้จากการเจาะตัวอย่างชนิด A และ B มีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ โดยมีแนวโน้มมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity ดังสมการที่ 6.1 โดยตัวอย่างที่เผาไฟจะเสียหายจากการเจาะเป็นส่วนใหญ่และไม่อาจจะทดสอบตัวอย่างที่เผาไฟ 90 และ 120 นาทีได้เลย

$$f'_c = 0.0493 \cdot V + 106.67 \quad (6.1)$$

เมื่อ f'_c คือ กำลังอัดหลังจากที่เผาไฟเป็นระยะเวลา t นาที (กก./ซม.²)

V คือ ค่าความเร็วคลื่นที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity (ม./วินาที)

6.1.3 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ เพราะช่วยป้องกันความร้อนจากไฟที่จะส่งผลกระทบต่อารเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในของเหล็กเสริม อันจะทำให้กำลังดึงหลังเผาไฟลดลง โดยระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. ที่ทดสอบสามารถช่วยคงคุณสมบัติกำลังดึงครากและกำลังดึงประลัยภายหลังเผาไฟให้ลดลงไม่เกิน 5% สำหรับระยะเวลาเผาไฟไม่เกิน 90 นาที แต่เมื่อเผาไฟ 120 นาทีค่าทั้งสองจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเผาไฟที่เพิ่มขึ้น หากสัมผัสไฟโดยตรงแล้วค่าทั้งสองจะลดลงอย่างคงที่ประมาณ 25% สำหรับการเผาไฟไม่เกิน 90 นาที และเมื่อเผาไฟเกินกว่า 90 นาทีค่าทั้งสองจะมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาเผาไฟที่เพิ่มขึ้น และจากการทดสอบพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นภายหลังเผาไฟของทั้งตัวอย่างที่มีคอนกรีตหุ้ม 25 มม. และที่เผาไฟโดยตรงไม่มีการเปลี่ยนแปลงในนัยสำคัญ

6.1.4 กำลังเฉือนของคานตัวอย่างที่ทดสอบมีแนวโน้มลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระยะเวลาที่เผาไฟ กล่าวคือ ลดลงประมาณ 10% ทุก ๆ 30 นาทีที่เผาไฟเมื่อเทียบกับกำลังเฉือนที่ได้จากข้อกำหนด ACI 318 คำนวณจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน แต่อย่างไรก็ดีค่ากำลังเฉือนตามข้อกำหนด ACI 318 ดังกล่าวยังคงมีดัชนีความปลอดภัย(factor of safety)ที่ระดับ 1.23 ที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 นาที ส่วนกำลังเฉือนของคานตัวอย่างที่เผาไฟ 90 และ 120 นาทีไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผาไฟ

6.1.5 วิธีการวิเคราะห์กำลังเฉือนของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่หลงเหลือหลังจากการเผาไฟในหัวข้อที่ 5.2.6.1 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบโดยมีค่ามากกว่าผลการทดสอบประมาณ 4%

6.1.6 จากการทดสอบคานตัวอย่างที่ทำการศึกษา พบว่า การเผาไฟที่ไม่เกิน 60 นาที ไม่ส่งผลต่อค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษา แต่ที่ระยะเวลาการเผาไฟ 90 นาที ค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษาจะลดลง 16% และ 15% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการเผาไฟ 120 นาที คานตัวอย่างเกิดความเสียหายจนไม่สามารถทำการทดสอบได้

6.1.7 วิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่หลงเหลือหลังจากการเผาไฟในหัวข้อที่ 5.2.6.2 ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ทั้งนี้ความใกล้เคียงของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับค่ากำลังดัดที่หลงเหลือหลังการเผาไฟของเหล็กเสริมเป็นสำคัญ

6.1.8 ผลของการเผาไฟทำให้ดัชนีความเหนียวของคานคองกรีตเสริมเหล็กที่ทดสอบมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับระยะเวลาที่เผาไฟในช่วง 60 นาทีแรก กล่าวคือ ลดลงประมาณ 65% ใน 60 นาทีแรกที่เผาไฟ และค่าดังกล่าวจะลดลง 75% เมื่อเผาไฟ 90 นาที

6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 แม้การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมด้วยวิธี direct pull-out test ไม่อาจจำลองสภาพการรับแรงจริง ๆ ของที่เกิดขึ้นในโครงสร้างคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ แต่ผลการทดสอบก็แสดงให้เห็นแนวโน้มของผลการเผาไฟที่ระยะเวลาต่าง ๆ ที่มีต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่มีชนิดเหล็กและระยะหุ้มต่าง ๆ ที่ทำการทดสอบ ซึ่งเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการทำการศึกษาวิจัยในระดับที่สูงขึ้นไป

6.2.2 จากผลการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานที่ศึกษาซึ่งการวัดควบคุมด้วยพฤติกรรมของเหล็กเสริม พบว่าการประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างหลังเผาไฟจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องของการประเมินพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังเผาไฟเป็นสำคัญ ฉะนั้นจึงควรจะได้มีการศึกษาหาวิธีในการประเมินพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังเผาไฟที่เหมาะสมต่อไป

6.2.3 แม้ว่าจากผลการทดสอบพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากเผาไฟที่ได้ทำศึกษา พบว่าการเผาไฟที่ระยะเวลาไม่เกิน 60 นาที จะไม่ทำให้โมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานดังกล่าวลดลงมากนัก แต่ก็ควรมีการศึกษาถึงพฤติกรรมในระยะยาวของคานดังกล่าวต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Harold W. Brewer. General Relation of Heat Flow Factors to the Unit Weight of Concrete. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 9 (January 1967): 48-60.
2. Tasnim Uddin and Charles G. Culver. Effects of Elevated Temperature on Structural Members. ACSE : Journal of Structural Division 101 (July 1975): 1531-1549.
3. Lene Kristensen and Torben C. Hansen. Cracks in Concrete Core Due to Fire or Thermal Heating Shock. ACI Materials Journal 91 (September-October 1994): 453-459.
4. Wei-Ming Lin, T. D. Lin and L. J. Powers-Couche. Microstructures of Fire-Damaged Concrete. ACI Materials Journal 93 (May-June 1996): 199-205.
5. Bruce Ellingwood and T.D. Lin. Flexure and Shear Behavior of Concrete Beams during Fires. ACSE : Journal of Structural Division 117 (February 1991): 440-458.
6. Eduardo Salse and Tung D. Lin. Structural Fire Resistance of Concrete. ACSE : Journal of Structural Division 102 (January 1976): 51-63.
7. James M. Becker and Boris Bresler. Reinforced Concrete Frames in Fire Environment. ACSE : Journal of Structural Division 103 (January 1977): 211-224.
8. Nestor R. Iwankiw. Thermal Effects on Load Capacity of Concrete Slabs. ACSE : Journal of Structural Division 105 (July 1979): 1417-1433.
9. Bruce Ellingwood and James R. Shaver. Effects of Fire on Reinforced Concrete Members. ACSE : Journal of Structural Division 106 (November 1980): 2151-2166.
10. Zhaohui Huang and Andrew Platten. Nonlinear Finite Element Analysis of Planar Reinforced Concrete Members Subjected to Fires. ACI Structural Journal 94(May-June 1997): 272-282.
11. บัณฑิต เกษรมาลา. การศึกษากำลั้ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาของคอนกรีตหลังจากการถูกไฟไหม้ที่ระดับความรุนแรงปานกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2531.
12. เจษฎา เกษมเศรษฐ์ และ หทัยรัตน์ มณีเทศ. การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตก่อนและหลังการเผาไหม้. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 1(วันที่ 10-12 พฤษภาคม 2543): MAT93 - MAT99.
13. Powers T. C. Physical properties of cement paste. In Chemistry of Cement, Vol.II, Proceedings of the Fourth International Symposium, 2-7 October, 1960, Washington DC, National Bureau of Standards Monograph 43-Vol.II, US Government Printing Office, p.577, 1962.

14. Harmathy T. Z. Fire Safety Design and Concrete. 1st Ed. Essex : Longman Scientific&Technical, 1993.
15. Bennetts I. D. Elevated temperature behavior of concrete and reinforcing steel. Report No. MRL/PS23/81/001, BHP Melbourne Research Laboratories, Clayton, Victoria, Australia, 1981.
16. Bobrowski J. (Ed.) Design and Detailing of Concrete Structures for Fire Resistance, Interim Guidance by a Joint Committee of The Institution of Structural Engineers and The Concrete Society, The Institution of Structural Engineers, London, 1978.
17. Schneider U. (Ed.) Properties of Materials at High Temperatures, Concrete, published by Department of Civil Engineering, Kassel University, Germany, on behalf of RILEM, F-75015 Paris, 1985.
18. Harmathy T. Z. Effect of moisture on the fire endurance of building elements. In Moisture in Materials in Relation to Fire Tests, ASTM STP 385, American Society for Testing and Materials, Philadelphia PA, p.74, 1965.
19. Holmes M., Anchor R. D. , Cook G. M. E., Cook R. N. The effects of elevated temperatures on the strength properties of reinforcing and prestressing steels. *The Structural Engineer* 60B(1): 7, 1982.
20. Tovey A. K. Assessment and repair of fire-damaged concrete structures-an update. In Evaluation and Repair of Fire Damage to Concrete, Publication SP-92, Harmathy T. Z. (Ed.), American Concrete Institute, Detroit MI, p.47, 1986.
21. Ingberg S. H. Tests of severity of building fires. *NFPA Quarterly* 22: 43, 1928.
22. R. Park and T. Paulay. Reinforced Concrete Structures. Singapore : John Wiley & Sons, 1975.
23. Abrams M. S. and Gustaferro A. H. Fire endurance of concrete slabs as influenced by thickness, aggregate type and moisture. Journal of PCA Research and Development Laboratories. 10: 9, 1968.
24. Peter H. Emmons. Concrete Repair and Maintenance Illustrated. : R.S. Means, 1993.
25. ACI-Committee 318. Building Code Requirements for Reinforced Concrete(ACI 318-99) and Commentary(ACI 318R-99). American Concrete Institute.
26. American Society for Testing and Materials. 1996 Annual Book of ASTM Standards. Vol. 3.01(Metals-Mechanical Testing; Elevated and Low-Temperature Tests; Metallograph), 1996.
27. American Society for Testing and Materials. 1996 Annual Book of ASTM Standards. Vol. 4.02(Concrete and Aggregates), 1996.

28. เล็ก สีคง. วัสดุวิศวกรรม. ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และโลหะวิทยา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
สงขลานครินทร์, พฤษภาคม 2533.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก
ข้อมูลผลการทดสอบ

ก.1 ข้อมูลผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตและเหล็กเสริม

ตารางที่ ก-1 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39

ตัวอย่างที่	1	2	3
อายุ (วัน)	28	28	28
เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d,มม.)	149.75	149.75	150.35
พื้นที่หน้าตัด (ซม. ²)	176.13	176.13	177.54
ความสูง (L,มม.)	299	300	299
แรงอัดสูงสุด (กก.)	51,988	56,065	54,027
อัตราส่วน L/d	2.00	2.00	1.99
ค่าปรับแก้จากอัตราส่วน L/d	1	1	1
ค่ากำลังอัด (กก./ ซม. ²)	295.2	318.3	304.3
ค่ากำลังอัดเฉลี่ย (กก./ ซม. ²)	305.9		
ลักษณะการพังทลาย	Cone & Split	Columnar	Columnar

ตารางที่ ก-2 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ splitting test ของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496

ตัวอย่างที่	1	2	3
อายุ (วัน)	28	28	28
เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d,มม.)	150.2	150.0	150.0
ความสูง (L,มม.)	297.0	299.5	300.0
แรงดึงสูงสุด (กก.)	21,407	21,407	25,484
กำลังรับแรงดึง (กก./ ซม. ²)	30.6	30.3	36.1
กำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (กก./ ซม. ²)	32.3		
ค่าประมาณร้อยละของมวลหยาบที่แตก ณ ระยะเวลาพังทลาย	50%	40%	70%

ตารางที่ ก-3 ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ flexure one point test ตามมาตรฐาน ASTM C293

ตัวอย่างที่	1	2	3
อายุ (วัน)	28	28	28
ความกว้างเฉลี่ย (มม.)	99.0	99.7	101.0
ความลึกเฉลี่ย (มม.)	100.0	100.7	100.3
ระยะระหว่างฐานรองรับ (มม.)	305	305	305
แรงกระทำสูงสุด (กก.)	1,090	970	900
ค่าโมดูลัสแตกหัก (กก./ ซม. ²)	50.4	43.9	40.5
ค่าโมดูลัสแตกหักเฉลี่ย (กก./ ซม. ²)	44.9		

ตารางที่ ก-4 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 469

ตัวอย่างที่	1	2	3
ขนาดตัวอย่าง (มม.×มม.)	149.4×302.0	150.75×306.0	150.25×302.0
อายุ (วัน)	32	32	32
ค่ากำลังอัด (กก./ ซม. ²)	299.5	322.7	290.3
40% ค่ากำลังอัด (กก./ ซม. ²)	119.7	129.1	116.1
ความเครียดที่ 40% ของค่ากำลังอัด	0.000351	0.00037374	0.00032
ความเค้นที่ความเครียด 5×10^{-5} (กก./ ซม. ²)	27.5	27.0	31.7
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (กก./ ซม. ²)	306,300	315,300	310,800
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเฉลี่ย (กก./ ซม. ²)	310,800		

ตารางที่ ก-5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

ชนิด	พื้นที่* (ซม. ²)	แรง ณ จุดคราก (กก.)	กำลังคราก (กก./ ซม. ²)	แรงดึงสูงสุด (กก.)	กำลังประลัย (กก./ ซม. ²)	ร้อยละการยืด (%)	ค่าเฉลี่ยกำลังคราก (กก./ ซม. ²)	ค่าเฉลี่ยกำลังประลัย (กก./ ซม. ²)
RB6	0.290	-	-	1,910	6,589	-	-	6,735
RB6	0.273	-	-	1,860	6,803	-		
RB6	0.280	-	-	1,910	6,812	-		
DB12*	1.081	3,900	3,607	6,100	5,642	32%	3,450	5,258
DB12*	1.079	3,950	3,662	6,050	5,609	33%		
DB12*	1.039	3,200	3,080	4,700	4,524	35%		
RB15	1.827	5,600	3,066	8,600	4,708	34%	3,265	5,080
RB15	1.767	5,900	3,339	9,300	5,263	33%		
RB15	1.755	5,950	3,390	9,250	5,270	35%		
DB16*	1.895	6,600	3,482	10,300	5,435	31%	3,433	5,351
DB16*	2.003	6,500	3,245	10,250	5,117	33%		
DB16*	1.918	6,850	3,572	10,550	5,501	34%		

* สำหรับเหล็กที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ พื้นที่หน้าตัดหาโดยการวัดความยาวและชั่งน้ำหนัก และคำนวณพื้นที่หน้าตัด โดยใช้ความหนาแน่นของเหล็ก 7,850 กก./ม.³

ก.2 ข้อมูลผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ ก-6 ผลการวัดขนาดตัวอย่าง(การทดสอบกรณีศึกษาที่ 1)

ตัวอย่างที่	ขนาดตัวอย่าง (มม.xmm.xmm.)	ระยะคอนกรีต หุ้มเหล็ก (มม.)	ตัวอย่างที่	ขนาดตัวอย่าง (มม.xmm.xmm.)	ระยะคอนกรีต หุ้มเหล็ก (มม.)
1	66.5x68.25x250.5	26.00	32	165.5x167x251	76.00
2	66x68x249	26.50	33	165.5x166.5x250	76.25
3	69.25x65.75x250	26.13	34	160.75x164.25x250	76.00
4	64.5x69.5x249.5	26.00	35	164.25x162x250	70.25
5	66.5x66.5x250	25.88	36	164x167.75x250	74.50
6	68.75x65.75x248.5	24.75	37	67.75x65x250	26.38
7	115x117.5x249.5	51.13	38	67.75x64.5x249	25.63
8	118.5x114x249	50.25	39	67x69x249	26.63
9	117.75x114.25x250	50.88	40	68.5x66.25x250	25.00
10	118.5x114.25x250	50.13	41	68x65.5x249	25.75
11	115.5x117.75x248.5	49.88	42	66.5x66.75x249	25.13
12	116.5x116.25x250	50.50	43	115.5x117.75x249	51.38
13	167.5x165.5x251	76.50	44	117.25x114x250	51.25
14	167.75x165.25x250	76.13	45	118x115.25x250	51.00
15	168.25x166.25x250.5	77.50	46	117.5x117.5x249	49.75
16	167x166.75x249.5	74.25	47	116x117x250	50.38
17	165.75x163.5x249.5	75.13	48	116.75x117x250	50.25
18	165.25x167.75x249.5	75.13	49	142.75x166.5x250	76.63
19	68.5x68x252	25.50	50	166.75x164.75x250	75.88
20	69x65x253.5	25.38	51	164x166.75x250	73.88
21	65.75x67x250	26.63	52	165.25x164.25x249	75.50
22	66.25x66x249	25.25	53	165.5x168.5x249	74.63
23	66.5x65.5x251.5	25.63	54	168.25x167.5x250	75.75
24	67x66x250.5	24.63	55	66x66.5x250	25.25
25	120x114x250.5	50.75	56	71x64.75x250	25.38
26	117.5x113x250	50.50	57	69x63x250	25.63
27	113.5x114.5x252	49.00	58	66.5x68x250	24.25
28	117.75x109.5x250	48.00	59	67x68.25x249.5	26.25
29	117.25x117x251	49.00	60	69x65x250	25.50
30	117.25x115x251.5	49.50	61	115.75x118x250	51.13
31	168.25x167x250	76.50	62	114x118.25x249	50.38

ตารางที่ ก-6(ต่อ) ผลการวัดขนาดตัวอย่าง(การทดสอบกรณีศึกษาที่ 1)

ตัวอย่างที่	ขนาดตัวอย่าง (มม.×มม.×มม.)	ระยะคอนกรีต หุ้มเฉลี่ย (มม.)	ตัวอย่างที่	ขนาดตัวอย่าง (มม.×มม.×มม.)	ระยะคอนกรีต หุ้มเฉลี่ย (มม.)
63	114×118.25×250	51.00	68	165.25×166×250	75.25
64	117×115.25×250	50.13	69	168×167×250	75.75
65	116×117×250	50.25	70	166.25×166×250	74.88
66	112.5×114.75×250	49.88	71	167×165.75×250	75.25
67	165.5×165.5×250	75.63	72	163.75×165×250	77.75

ตารางที่ ก-7 ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการเผาตัวอย่างของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

	เวลาที่ทำการเผา (นาที)	ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการเผา (กก.)
กรณีศึกษาที่ 1	15	17.4
	30	25.3
	60	50.8

ตารางที่ ก-8 ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 15 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ* (T1,T2,T3,T4,T5,T6 : °C)
0	44.4,44.7,45.8,42.9,43,44.5
5	501.1,485.1,496.6,478.3,525.1,472.8
10	702.8,692.6,669.3,682.2,698.3,630.4
15	753.2,742.1,721.7,733.1,742.1,684.7

*T1-T6 = อุณหภูมิเตา

ตารางที่ ก-9 ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 30 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

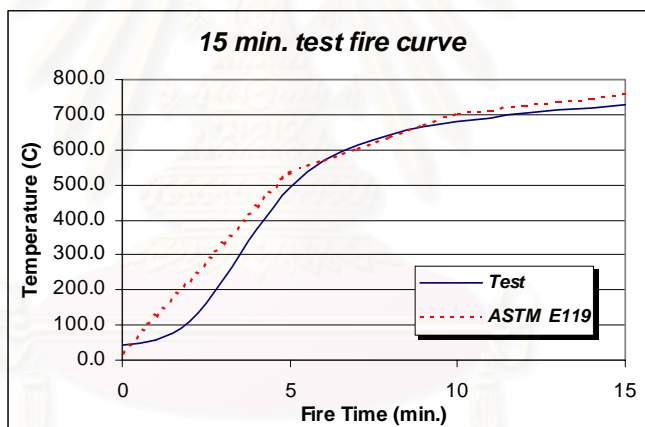
เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ* (T1,T2,T3,T4,T5,T6 : °C)
0	47.1,47.4,48.8,44.8,45.4,47.5
5	531.6,520.6,530,511.5,538.3,498.5
10	695.2,689.3,671.1,681.1,698.1,637.1
15	742.8,736.7,716.2,731.1,739.4,682.4
20	778,771.1,751.2,766.8,771.3,718.9
25	808.8,801.8,781.6,797.9,800.3,751.5
30	838.2,829.6,812.3,826.6,828.5,782.4

*T1-T6 = อุณหภูมิเตา

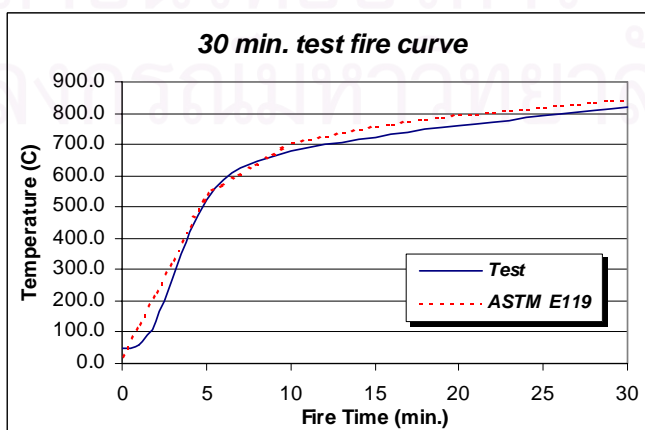
ตารางที่ ก-10 ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 60 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ* (T1,T2,T3,T4,T5,T6 : °C)
0	41.3,41.6,42.2,40.2,40.4,41.7
5	520.3,503.2,516.3,509.9,525.7,489.5
10	695.6,688.4,665.5,682.5,696.2,626.7
15	734.8,726.6,701.5,723.5,729.9,664.7
20	769.6,761,735.9,757.5,760.1,701
25	804.7,793.8,772,791.5,792.5,736.1
30	833.3,822.4,802.6,820.3,820.5,767
35	859.9,848.4,830.8,845.8,846,796.3
40	881.6,871,852.8,869.7,868.1,820.3
45	903.1,892.8,875,892.4,890,844
50	922.7,912.5,894.2,912.1,909,864.5
55	940.9,930.4,914.3,929.6,927.5,885.3
60	958.2,947.4,932.1,947.3,944.7,904.4

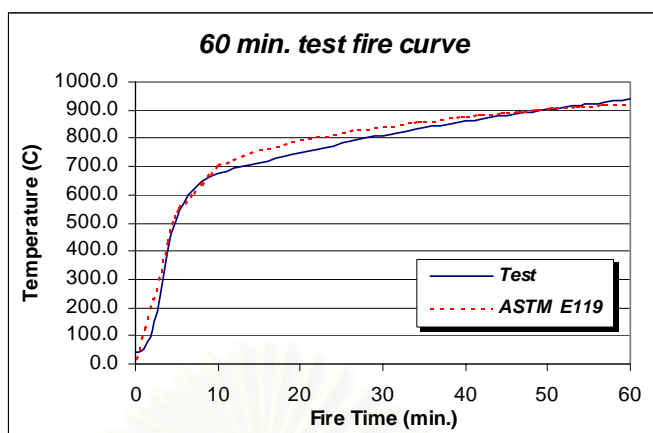
*T1-T6 = อุณหภูมิเตา



รูปที่ ก-1 กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 15 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ ก-2 กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 30 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ ก-3 กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 60 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

ตารางที่ ก-11 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่มีได้เผาไฟ

ตัวอย่างที่	แรงกระทำสูงสุด (กก.)	พื้นที่ผิวยึดเหนี่ยว (ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยว (กก./ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
1	4,750	68.08	69.8	61.8
2	4,100	70.69	58.0	
3	4,050	70.45	57.5	
4	5,600	77.52	72.2	66.4
5	6,600	89.11	74.1	
6	4,450	84.04	52.9	
7	4,980	68.79	72.4	69.0
8	5,750	78.75	73.0	
9	4,300	69.98	61.4	
10	7,350	78.04	94.2	98.9
11	7,900	88.91	88.9	
12	9,200	80.97	113.6	
13	3,250	69.98	46.4	52.3
14	3,050	70.69	43.1	
15	4,700	69.96	67.2	
16	7,700	74.42	103.5	110.8
17	9,650	78.57	122.8	
18	8,600	81.04	106.1	

ตารางที่ ก-12 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เผาไฟ 15 นาที

ตัวอย่างที่	แรงกระทำสูงสุด (กก.)	พื้นที่ผิวยึดเหนี่ยว (ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยว (กก./ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
19	530	71.15	7.4	8.7
20	490	69.39	7.1	
21	830	70.80	11.7	
22	2,270	80.29	28.3	32.7
23	2,130	77.80	27.4	
24	3,300	77.80	42.4	
25	1,310	70.45	18.6	18.3
26	780	70.33	11.1	
27	1,780	70.80	25.1	
28	5,200	77.01	67.5	83.1
29	7,130	76.88	92.7	
30	7,150	80.41	88.9	
31	1,360	71.15	19.1	21.5
32	1,420	69.98	20.3	
33	1,750	69.51	25.2	
34	5,970	77.59	76.9	82.9
35	8,320	77.09	107.9	
36	5,380	84.16	63.9	

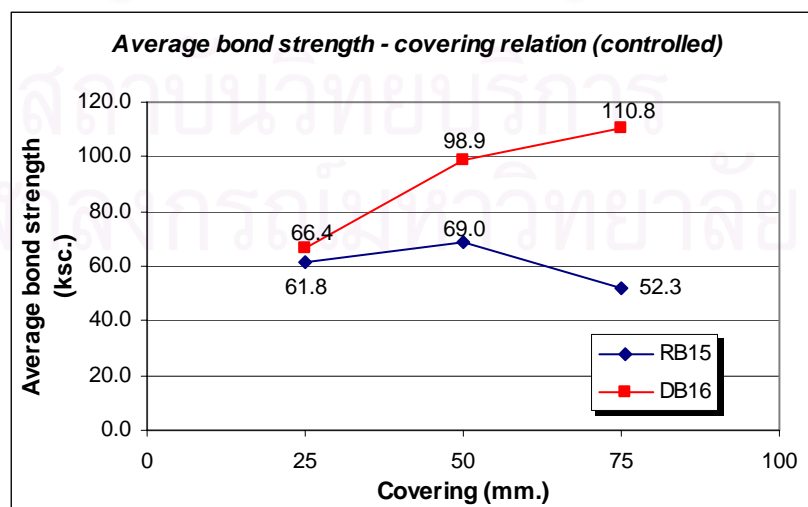
ตารางที่ ก-13 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เผาไฟ 30 นาที

ตัวอย่างที่	แรงกระทำสูงสุด (กก.)	พื้นที่ผิวยึดเหนี่ยว (ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยว (กก./ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
37	0	71.39	0.0	0.2
38	0	71.16	0.0	
39	50	70.45	0.7	
40	1,010	77.05	13.1	14.8
41	880	80.10	11.0	
42	1,690	83.81	20.2	
43	130	69.28	1.9	6.9
44	280	71.15	3.9	
45	1,040	69.86	14.9	
46	3,400	86.94	39.1	44.7
47	2,480	74.43	33.3	
48	4,800	77.80	61.7	
49	1,230	70.45	17.5	15.3
50	400	68.10	5.9	
51	1,600	71.16	22.5	
52	4,280	78.55	54.5	61.2
53	7,020	80.14	87.6	
54	3,580	86.25	41.5	

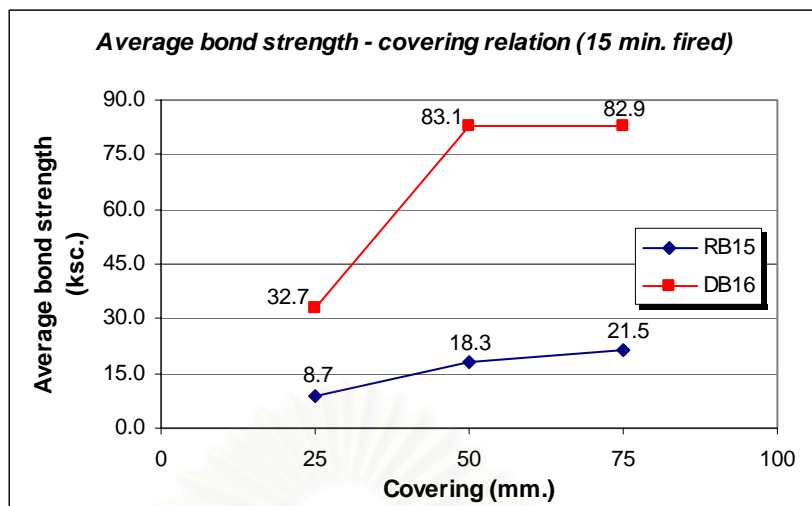
ตารางที่ ก-14 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่เผาไฟ 60 นาที

ตัวอย่างที่	แรงกระทำสูงสุด (กก.)	พื้นที่ผิวยึดเหนี่ยว (ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยว (กก./ซม. ²)	ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ย (กก./ซม. ²)
55	0	70.69	0.0	0.3
56	30	70.92	0.4	
57	30	69.98	0.4	
58	450	77.35	5.8	12.0
59	1,210	80.53	15.0	
60	1,300	86.59	15.0	
61	40	70.69	0.6	1.2
62	N.A.	-	-	
63	130	70.92	1.8	
64	1,800	83.41	21.6	23.4
65	1,820	80.10	22.7	
66	2,050	79.03	25.9	
67	180	70.92	2.5	2.1
68	90	70.92	1.3	
69	170	69.63	2.4	
70	3,160	77.64	40.7	36.5
71	1,640	76.72	21.4	
72	3,680	77.47	47.5	

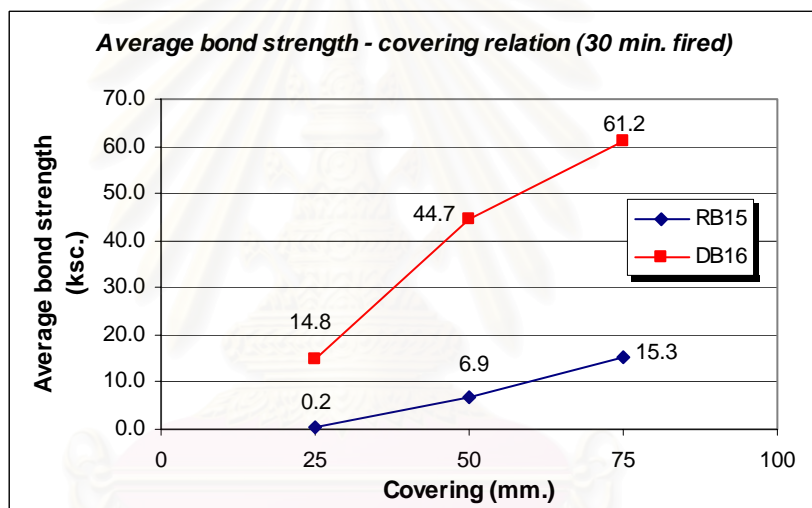
(N.A. = คอนกรีตหลุดจากเหล็กเสริมจนไม่สามารถทำการทดสอบได้)



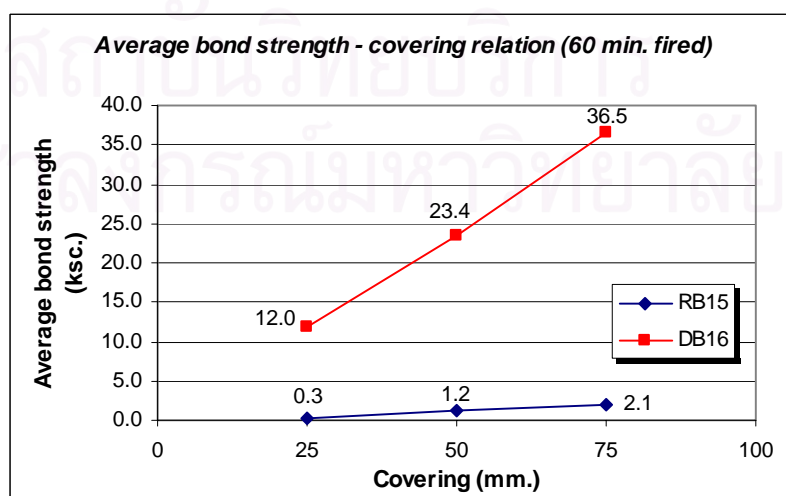
รูปที่ ก-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่ไม่ได้เผา



รูปที่ ก-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่เผา 15 นาที



รูปที่ ก-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่เผา 30 นาที



รูปที่ ก-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังยึดเหนี่ยวกับระยะคอนกรีตหุ้มของตัวอย่างที่เผา 60 นาที

ก.3 ข้อมูลผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

ตารางที่ ก-15 ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการเผาตัวอย่างของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

	เวลาที่ทำการเผา (นาที)	ปริมาณแก๊สที่ใช้ในการเผา (กก.)
กรณีศึกษาที่ 2	30	25.3
	60	43.0
	90	71.6
	120	108.5

ตารางที่ ก-16 ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 30 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ (T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,T22, T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31 : °C)
0	33.9,33.8,34,34,33.8,34.1,32,32.2,32.1,32.1,32.4,32.8,-,32.9,32.9,32.8,32.7,33.1,32.4, 32.7,32.5,33.2,33.1,33.1,33.5,32.8,32.5,33.1,-,33.3,33.3
5	537.3,496.3,475.5,514.6,512.5,439.7,50.1,33.8,32.2,32.2,32.5,32.8,-,33.1,33.1,40.7, 102.6,114.3,46.2,32.8,38.6,71,65.2,32.9,64.5,40.8,40.5,66.6,-,59.6,55.4
10	695.8,671.8,626.2,684.5,676.2,590.9,101.4,47.5,35.4,36.2,36.3,37.3,-,63.5,100.9,104.4, 140.9,170.2,100.1,79.3,60,34.1,114.5,33.2,124.6,63.9,63.9,112.3,-,121.2,131.3
15	737.7,715.9,669.5,727,716.7,634.1,108.3,74.6,46.3,47.9,39.4,57.8,-,103.9,104.7,88.8, 177.6,241.4,109.6,107.4,82.3,152.4,144.5,120.8,155.7,88.8,88.8,137.9,-,143.2,134.5
20	771.9,749.9,705.1,758.9,749.4,669,132.3,103.2,56.3,91.7,48.5,86.8,-,102,102.4,50.3, 230.1,300.3,141.8,117.5,113,179.4,165,38.8,208.3,111.8,115.9,176.5,-,190.6,173
25	799,778.3,735.5,787.9,776.8,698.9,154.6,102.1,59.5,100.9,59.7,101.4,-,101,101.2,60.8, 294.6,354,175.8,130.4,122.7,224.3,205.3,224.4,257.1,124.5,126.2,216.7,-,238.3,220.5
30	823.8,801.9,761,812.2,801.4,724.9,179.2,71.9,71.1,100.4,71.7,101.2,-,100.6,101,72.3, 354.4,404.2,212.1,152.1,127.1,266.9,244.7,270.6,296.8,139.2,139.9,253.3,-,278.8,261.4

T1-T6 = อุณหภูมิเตา

T7-T17 = อุณหภูมิในหน้าตัดทั้ง 11 จุดของตัวอย่างชนิด A

T18-T19 = อุณหภูมิในเหล็กเสริมที่ฝังในของตัวอย่างชนิด B

T20-T25 = อุณหภูมิในคานชนิดศึกษาแรงดัดทั้ง 6 จุด

T26-T31 = อุณหภูมิในคานชนิดศึกษาแรงเฉือนทั้ง 6 จุด

- = สายวัดอุณหภูมิชำรุดไม่อาจวัดค่าได้

ตารางที่ ก-17 ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 60 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ (T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,T22, T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31 : °C)
0	32.4,32,32.2,32.3,32.2,33.2,-,29.9,29.6,29.8,29.6,29.5,29.6,29.9,29.9,29.9,30.2,29.9, 29.9,29.9,29.9,30.5,30.6,30.6,30.5,30.1,30.2,30.5,-,30.7,30.6
5	493,451,438.3,447.3,476.7,426.2,-,31.2,29.7,29.9,29.9,29.9,29.8,29.9,30,34.4,98.2, 44.8,43.8,38.8,38.4,56.3,75.3,48.6,63.6,36.3,43.3,63.3,-,55.1,47.5
10	675.9,654.8,606.9,654.8,658.4,577.6,-,42,33.6,34.1,34.1,34.4,34.1,41,90.9,98.7,120.8, 105.3,98.6,63.2,59.4,98.2,119,114.8,126.6,57.4,70.9,107.5,-,120.4,102.1
15	721.3,701.9,651.6,702,701.3,621.5,-,60.6,44.7,45.6,45.8,48.6,94.1,97.6,97.2,99.6,163.6, 108.9,109.9,84.8,84.6,114.5,157.7,132.4,154.4,83.6,108.5,139.9,-,149.1,132
20	754.7,734,686.4,732.5,733.5,654.9,-,81.7,60.4,62.4,70.2,99.5,99.2,99.3,99.2,100.5,160, 140.1,136.9,111.2,110.7,135.4,196.5,156.7,199.2,110.9,126.8,160.8,-,178.3,129.5
25	781.3,758.7,713.7,757,759.3,683.5,-,100,94.4,97.8,99.7,99.7,99.7,100,100.5,107.4, 102.9,171.2,168,128,126.4,160.2,237.1,195.5,248,119.8,137.8,190.9,-,218.3,166.4
30	804.9,783.5,739.3,782.7,782.9,708.3,-,103.7,99.9,100.3,100.2,99.9,100,100,101.9, 130.7,281.5,208.8,202.5,138.2,136.8,199.8,273.8,238.6,293.4,128.5,152,229.8, -,258.7,214.2
35	825,803.8,761,802.3,802.8,731.8,-,117,100.5,100.3,102,101.6,105.2,102.7,120,164.1, 372.7,246,238.2,158.4,148.6,233.6,311.8,275.1,341.6,137.1,171.6,266.1,-,297.9,251.9
40	844.8,823.2,784.9,822.8,823,754.5,-,126.3,109.6,103,110.2,110.8,114.6,114.5,136.5, 195.8,434,282.1,274.1,176.2,165.6,264.2,362.6,306.6,362.4,151.3,189,299.9, -,334.7,290.1
45	863.4,842.9,806,844.3,841.9,775.3,-,137.2,122.4,115.8,118,119.8,123.1,124,146.2, 230.4,484.2,316.3,309.3,194,184.2,297.4,389.8,342.2,347.2,167.8,205.6,331, -,370.1,324.5
50	880.9,861.1,827.3,863.3,860.3,796.7,-,149.9,131,124,125.2,127.4,131.5,134,157.8,265, 526.4,351,345.4,214.4,205.7,328,415.5,374.2,352.8,184.2,222.9,360.5,-,404.2,360.9
55	897.7,877.9,845.3,880.8,876.5,816.1,-,162.5,135.7,132.4,133.4,135.7,138.9,145.4, 180.1,298.5,563.1,383.1,379.2,234.3,227.9,358,444.5,339.1,375.8,197.9,241.8,387.1, -,405.9,394.2
60	913.6,893.7,861.9,897.3,892.1,833.7,-,176,138.5,140,141.9,144.2,146.6,159.5,208.3, 331.4,491.9,415.2,411.7,254.3,249.1,387.8,462.4,362.3,399.8,226.1,261.1,414.1, -,428.6,425.3

T1-T6 = อุณหภูมิเตา

T7-T17 = อุณหภูมิในหน้าตัดทั้ง 11 จุดของตัวอย่างชนิด A

T18-T19 = อุณหภูมิในเหล็กเสริมที่ฝังในของตัวอย่างชนิด B

T20-T25 = อุณหภูมิในคานชนิดศึกษาแรงดัดทั้ง 6 จุด

T26-T31 = อุณหภูมิในคานชนิดศึกษาแรงเฉือนทั้ง 6 จุด

- = สายวัดอุณหภูมิชำรุดไม่อาจวัดค่าได้

ตารางที่ ก-18 ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 90 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ (T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,T22, T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31 : °C)
0	40.9,41.2,41.7,39.8,40.2,41.3,34.3,34.1,34.1,34.2,34.1,34.2,34.2,34.4,34.4,34.6,34.8,34.4, 34.2,34.3,33.9,34.5,34.5,35.3,35.2,33.8,34.3,34.1,34.4,35.1,35.2
5	557.5,528.9,524.9,528.4,537.4,94.3,45.7,35.3,34.4,34.4,34.5,34.4,34.7,34.7,35.3,38.8,72.3, 81.9,49.7,38.1,48.7,71.7,81.1,64.9,65.7,41.6,49.7,74.1,63.2,69.1,62.5
10	700.7,685.2,644.6,67.8,685.3,611.8,66.9,43.7,39.1,40.4,40.1,40.4,40.2,41.5,50.8,94,105.1, 98.2,101.7,52.8,74.4,119,127.2,135.3,133.3,61.4,76.9,116.9,109.4,137.8,121.7
15	736.1,723.5,680.5,709.7,721.2,647.1,90.4,57.9,52.5,56.7,59.4,58.8,74.4,97.6,100.2, 100.6,112.3,105.7,106.9,70.1,101.6,145.8,152.3,151.5,160.4,86.2,100.6,145.5,132, 155.9,144.8
20	765.4,755.4,711.3,732.2,752.8,677.2,99.4,75.2,73.7,94.7,99.3,91.7,93.7,99.6,100.1, 100.7,121.8,134.4,128.5,86.3,122.4,179.5,193.6,197.3,211.8,115.8,124.7,179.4,156.8, 202.5,182.3
25	788.2,777.7,739.1,766.3,776.1,705.2,113.1,99.7,100,100,100,99.5,99.9,100,100,111.9, 159.9,171.1,53.7,128.3,132.8,226.2,241.7,246.9,255.1,127.7,133.6,226.6,188.4,247.5, 210.4
30	811.6,800.6,763.7,90.1,798.4,727.5,132.4,106.7,100,100,100,99.1,100,100.1,100.8, 135.2,236.1,210.1,185,131.4,146.6,270.1,284.3,291.5,297.8,132.2,150.9,266.9,224.3, 287,229.9
35	833.8,821.6,785.3,814.2,818.8,749.2,150.3,117.6,100.6,100.3,101.3,101.5,100.7,102.3, 114.6,162.9,311.2,250.6,220,130.2,164.5,309.4,322,332.3,339.1,139.2,171.5,303.1, 258.5,318.2,266.4
40	854.7,843.7,808.5,832.1,841.3,772.7,167.6,124.5,104.6,109.2,112.5,109.6,108.3,116.5, 129.1,191.7,371.3,289.2,255.6,136.3,183.5,347.2,346.6,371.4,371.4,150.7,192.7,336.9, 290.3,345.7,298.3
45	873.5,860.4,826.1,848.4,856.5,790.6,185.2,129.2,117.4,119.8,123.7,118.5,121.7,129.8, 144.6,221.4,421.9,326,290.2,147.3,206.8,380.8,377.7,413.8,396.4,164.6,213.6,368.9, 319.4,381,330.8
50	889.8,879.9,847.9,863.8,875.3,812.4,204.4,137.4,127.6,130.7,134.6,126.7,133.6,142.7, 162.1,252,465.6,365.7,317.3,163.1,231.3,409.6,361.4,442.1,427.9,181.2,234.1,396.4, 346.3,415.6,362.6
55	904.4,898.5,867.6,878.9,894.9,833.5,225.9,151.4,140.1,144.2,145.9,134.4,145.2,156.9, 183.4,284.8,503.7,398.8,348.2,181.1,255.8,437.6,389.4,393.3,400.3,200.7,256.1,415.5, 372,450.3,363.6
60	921.2,915.1,885.5,895.7,910.5,853.2,251.4,171.9,157.2,162.7,160,148.3,160.2,176.3, 212.1,319,539.9,427.4,379.4,201.9,281.8,463.6,412.2,412.2,427.4,220.6,276.8,406.9, 398.3,480.9,358
65	937.1,932.4,905.2,912.4,928.7,873.9,276,194.9,176.4,182.6,178.3,166.2,181.7,203.2, 244.8,351.1,574.7,453.9,409.8,223.5,307.9,488.2,457.1,438.3,489.6,242.2,302.6,429.9, 421.9,515.5,384.2
70	953.8,947.6,920.8,929.8,942.7,890.6,301.5,217.1,199,205.7,203.4,191.3,209.7,235.7, 277.3,382.3,607.4,372.9,439.7,245.8,333.9,511.6,491.7,486.4,527.9,263.8,325,455.2, 446.3,548.3,411.3

ตารางที่ ก-18(ต่อ) ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 90 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เวลาที่เผา	อุณหภูมิ
------------	----------

(นาที)	(T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,T22, T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31 : °C)
75	967.4,959,930.9,946.2,952.5,903.3,326.6,238.5,219.7,229.6,231.4,219.4,240.9,267.5, 308.5,413.3,637.2,414.1,469.4,268.4,358,535.1,465.8,489.9,573.7,285.3,346.4,488, 469.8,572.6,435.9
80	977.7,967.8,942.8,958.9,962.5,915.1,351.8,260.5,243.8,252.2,257.5,247.2,271.2,297.6, 338.6,443.4,332.8,446.8,466,291.3,382.9,556.5,441.9,525,600.3,307.2,365.7,505.6, 492.5,587.8,457.4
85	991.5,980.4,957,972,974.6,929.2,375,283.8,269.4,276.5,283.4,272.4,299.7,326.6,353.1, 360.4,334.7,377.2,525.4,314.6,407.7,428.5,535.4,480.4,448.7,330.2,383.2,522.2,515.1, 603.6,477.5
90	1002.7,993.8,972.9,983.9,989.2,945.1,398.1,306.3,294.6,301.4,308.4,297.6,326.8,317.2,397.7,502.6, 342.6,393.9,549.6,337.5,432.9,465.6,525.8,478.5,562.3,352.7,406.5,438.7, 537.1,603.4,499.2

T1-T6 = อุณหภูมิเตา

T7-T17 = อุณหภูมิในหน้าตัดทั้ง 11 จุดของตัวอย่างชนิด A

T18-T19 = อุณหภูมิในเหล็กเสริมที่ฝั่งในของตัวอย่างชนิด B

T20-T25 = อุณหภูมิในคานชนิดศึกษาแรงดัดทั้ง 6 จุด

T26-T31 = อุณหภูมิในคานชนิดศึกษาแรงเฉือนทั้ง 6 จุด

- = สายวัดอุณหภูมิชำรุดไม่อาจวัดค่าได้

ตารางที่ ก-19 ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ (T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,T22, T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31 : °C)
0	33.1,32.8,33.2,33.1,33,33.5,30.8,30.6,30.6,30.7,30.8,30.8,30.8,30.8,30.9,30.9,31.2,30.9, 31.1,30.9,30.5,31.2,31.6,31.6,30.8,31.2,31.1,31.3,31.4,31.5,31.4
5	530.5,489.5,475,511.3,501.9,447.7,46.4,32.2,30.9,30.9,30.9,31.1,31,31,31.3,35.7,93.6, 50.9,52.2,35.2,30.8,54.9,92.1,53.5,46,41.4,38.3,62.8,59.1,56.3,56.8
10	713.3,701.3,658.5,695.1,708.9,619.6,99.4,45.6,35.1,35.3,35.2,35.7,35.9,38.1,65,84, 119.2,114.2,106.8,55.7,31.2,101.4,148.6,120.4,40.9,67,57.1,113.6,110,125.6,126.2
15	746.4,744.1,705.3,728.4,757.4,672.8,101.2,70.5,47.8,48,47.5,52.5,96.7,98.9,98.4,100.2, 166.5,122.8,129.2,79.7,32.4,139.3,184.6,149.9,56,105.7,85.2,141.4,137.6,154.5,153.1
20	776.7,774,737.8,758.3,785.3,704.2,127.3,97,72.7,75.7,76.7,99.6,99.3,99.6,99.6,100.3, 105.4,156.9,164.9,111.2,34.7,156.9,243.9,199.7,194.7,119.5,116.1,172.4,170.5,200.3, 203.1
25	811.2,809.3,774,793.4,819.3,741.1,152.2,100.6,100.1,99.9,99.7,99.9,99.6,100,100.4, 100.3,255.2,193.9,207.5,123.5,39.4,185.4,293.9,254.2,243.3,132.7,128.6,220.2,212.1, 241,253.6
30	837,834.8,802.9,819.9,844.6,770,178,108.1,100.2,100.2,100.2,100.4,99.9,100.3,107.2, 125.6,356.3,233.3,250.5,126.1,97.9,223.3,341.5,293.3,287.8,144.9,140.9,259.5,253.1, 270.1,285.9
35	859.1,857.8,827.7,844.9,867.6,798.4,204.7,120.9,100.5,101.5,100.5,105.6,102.5,107.2, 122.8,163.8,422.3,271.2,292.2,138.1,176,261.4,376.8,326,339.7,163.1,157.5,299.4, 294.3,302.1,316

ตารางที่ ก-19(ต่อ) ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ (T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,T22, T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31 : °C)
----------------------	--

40	880.5,879.1,850.1,866.5,888.6,821.4,232.3,133.4,106,110.2,103.2,113.8,114.9,121.9, 137.2,193.4,472.9,314.5,331.7,152.1,198.2,296.4,413.4,362.6,399.3,185.5,178.8,331.8, 331.3,334.6,342
45	900.9,898.5,874.2,887.7,907.7,845.1,258.4,149,115.6,116.5,108,123.1,124.9,138.8, 154.8,226.5,515.3,357.1,369.3,169.3,220.2,328.5,445.8,400.6,433.5,202,200,378.3, 366.1,350.3,372.7
50	911.8,909.9,887.1,898.2,916.9,857.2,283.4,166.8,125,124,116.5,129.4,132.5,153,168.4, 261.9,555.5,394.4,406.4,189,245,357.7,421.6,411.1,472.7,222.8,221.4,405,395.7,376.2, 407
55	936.3,935,912.1,923.2,941.6,884.9,307.7,186.7,136.9,134.2,127.1,136.9,141.2,166.5, 180.4,296.9,681.1,431.2,434.6,209.8,267.9,384,426.7,426.8,411,244,243.3,420.7,425.2, 389.6,379.9
60	951.6,950.1,928.9,939.5,956.6,902.2,330.4,206.8,150.1,147.8,140.9,147.9,151.7,182.8, 203.7,331.8,399.6,465.3,437.4,231.3,294.4,407.8,539.4,476,440.1,268.8,267.5,456, 481.4,414.3,466.3
65	959,957.4,938.9,946.6,963.2,911.2,353.7,227.3,165.9,162.8,154.7,159.6,165.2,202.1, 237.6,365.5,548.2,495.4,504.9,251.4,316.4,432.4,565.7,514.4,517.3,293,288.5,396.7, 370.9,468.4,414.8
70	964.4,962.9,947.3,952.8,968.6,919.7,373.1,247.5,184.9,182.4,170.1,178.8,183,232.8, 275.4,401.3,565.2,530,513.9,272.1,339.7,426.1,467.9,457.5,421.9,317.8,311,403.5, 388.4,522.8,355.7
75	972.3,970.9,956,960.1,975.6,929.1,392.9,268.6,207.2,204.2,189.2,200.7,205.9,260.4, 309.1,329.5,583.3,560.6,556.3,293.1,368.2,419.7,448.4,571.6,461.6,337.3,332.1,488.2, 409.5,511.3,375.9
80	978,976.7,963.6,966.8,981.5,936.7,413,289.4,230.9,228.6,213.2,225.6,234.6,283.5, 339.4,326.2,603.4,585.3,577.2,315.3,392.5,415.5,472,545.3,482.9,347.4,352.7,442.8, 485.1,571.6,395.2
85	988.2,987,974.7,977.6,992,948.6,431.8,310.2,255.7,252.6,239.7,253.6,262.2,311.2, 368.4,346.5,401.1,608.6,606,337.8,382.1,464.1,563.1,545.8,549.4,381,372.6,462,470.7, 381.5,415.3
90	998,997.2,985.6,988.1,1,001.6,959.5,450.6,330.4,278.1,275.9,266.2,281.2,289.2,336.5, 397.2,365.5,409.8,405.5,624.4,360,416.2,400.3,551.2,401.6,388,397.5,393.3,483.3, 441.5,580.3,436.7
95	995.9,994.2,984.6,986.5,998.7,959.2,467.9,350,300,298.8,291.5,306.6,314.7,356.6, 324.8,332.5,354.6,498.4,641.2,344.8,446.8,470.7,573.2,450.1,399.3,419.7,412.6,608.3, 425.5,418.1,456.8
100	1004.4,1002.7,993.9,995.5,1007.2,968.8,485.5,370.5,321.5,321.3,315.5,328.6,326.2, 339.3,331.9,347.5,364.9,383.9,655.2,354.4,449.9,509.4,569.5,418,429.4,438.5,433.7, 623.3,501.5,408.9,474.4
105	1012,1011.5,1002,1004,1014.7,977.8,500,388.7,337.3,335.6,338.3,354.2,330.6,333.9, 322,366,262.1,408.2,674.3,341.8,435,362,587.6,551.9,440.8,458.7,438.2,559.1,483.4, 424,492.5

ตารางที่ ก-19(ต่อ) ผลการวัดอุณหภูมิขณะเผาตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2

เวลาที่เผา (นาที)	อุณหภูมิ (T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7,T8,T9,T10,T11,T12,T13,T14,T15,T16,T17,T18,T19,T20,T21,T22,
----------------------	--

	T23,T24,T25,T26,T27,T28,T29,T30,T31 : °C)
110	1012,1010.3,1002.5,1003.9,1015.9,979.2,516.6,407,354.3,349.5,360.1,360.9,363.9, 345.8,338,387.2,276.7,440,600.5,359.4,469.6,358.6,389.4,461.2,467.7,435.7,419.6, 631.6,479.9,440.2,485.8
115	1017.6,1015.2,1007.6,1009.6,1021.5,985.2,532.4,388.5,367.7,370.2,381.5,380.9,385.1, 362.8,344.9,409.2,289.9,506.8,392.7,365.4,397.7,376.9,416.8,472.8,491.2,351.1,491.2, 601.6,543.7,476.7,492
120	1019.5,1017.2,1010.5,1012.8,1023.9,988.4,545.6,414.6,394.1,395.9,399.8,414.1,371.3, 400.7,372.6,441.6,305.5,499.2,402,375,482.2,392.1,434.2,422.8,602.1,355.5,507.8, 340.7,563.3,382.9,552.1

T1-T6 = อุณหภูมิเตา

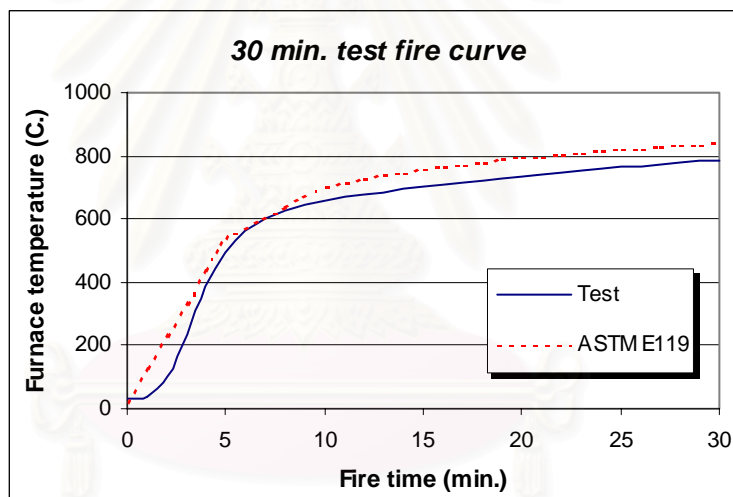
T7-T17 = อุณหภูมิในหน้าตัดทั้ง 11 จุดของตัวอย่างชนิด A

T18-T19 = อุณหภูมิในเหล็กเสริมที่ฝังในของตัวอย่างชนิด B

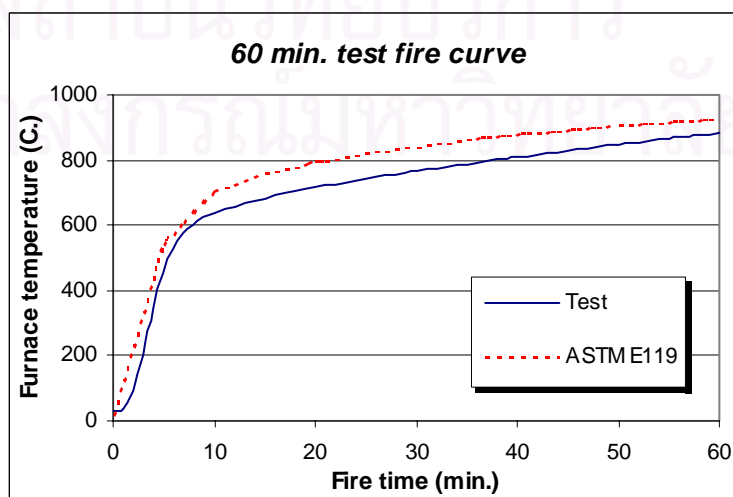
T20-T25 = อุณหภูมิในคานชนิดค้ำยันแรงดัดทั้ง 6 จุด

T26-T31 = อุณหภูมิในคานชนิดค้ำยันแรงเฉือนทั้ง 6 จุด

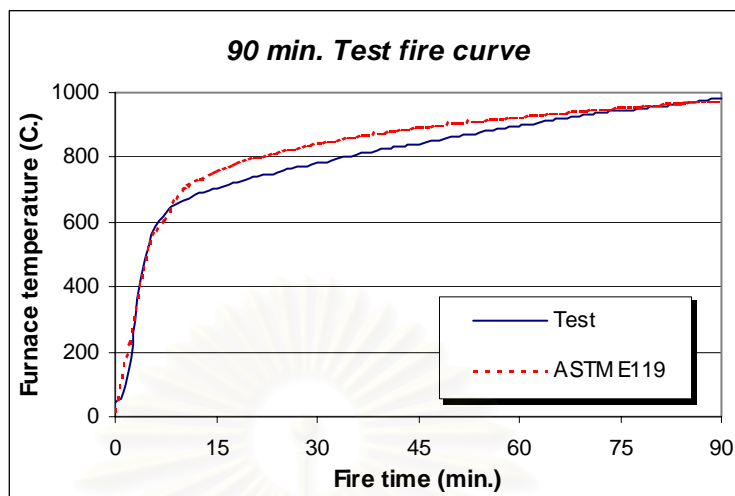
- = สายวัดอุณหภูมิชำรุดไม่อาจวัดค่าได้



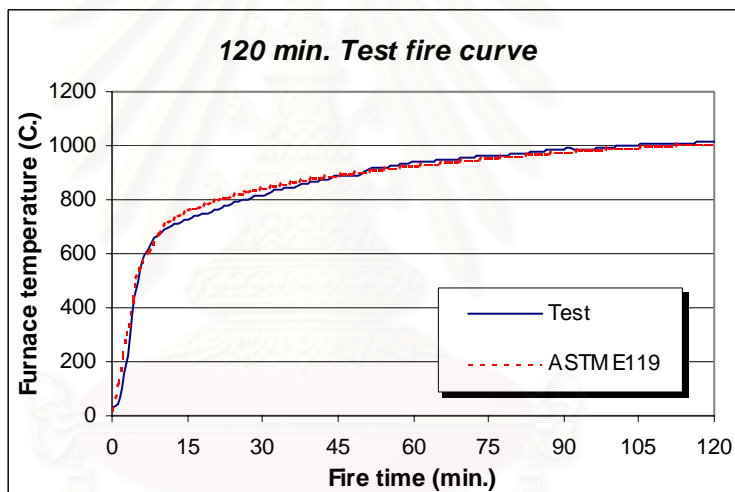
รูปที่ ก-8 กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 30 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2



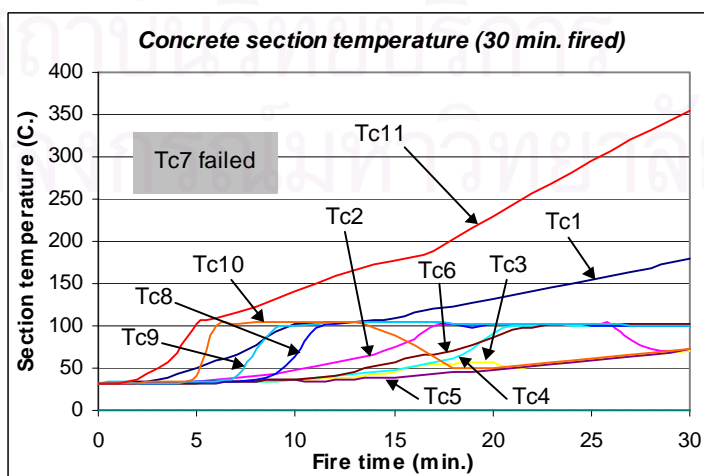
รูปที่ ก-9 กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 60 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2



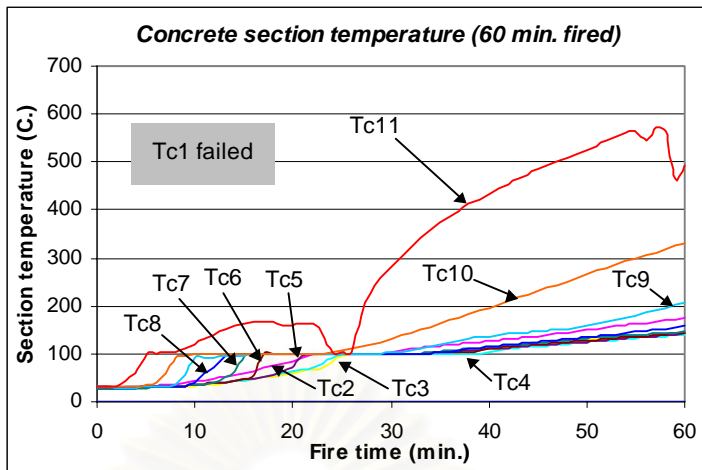
รูปที่ ก-10 กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 90 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2



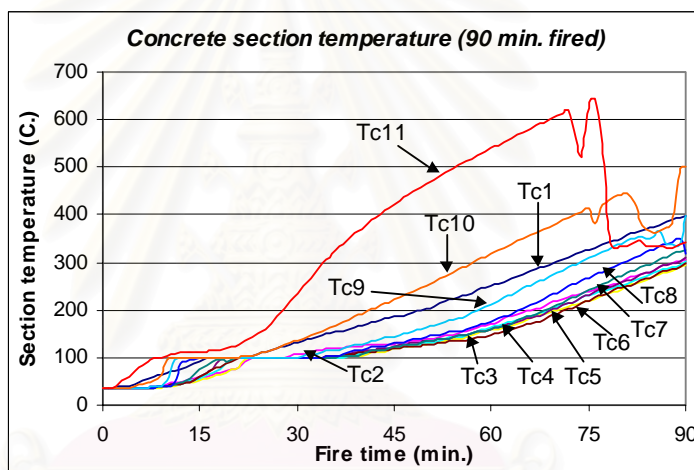
รูปที่ ก-11 กราฟไฟของการเผาตัวอย่างเป็นระยะเวลา 120 นาทีของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2



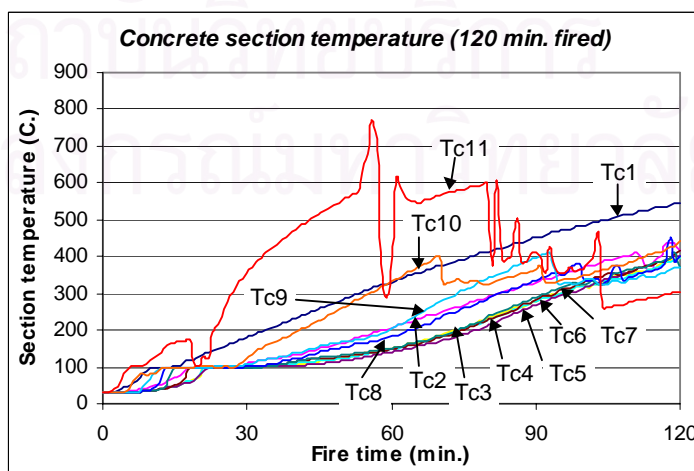
รูปที่ ก-12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากการเผาไฟ 30 นาที



รูปที่ ก-13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่างๆ จากการเผาไฟ 60 นาที

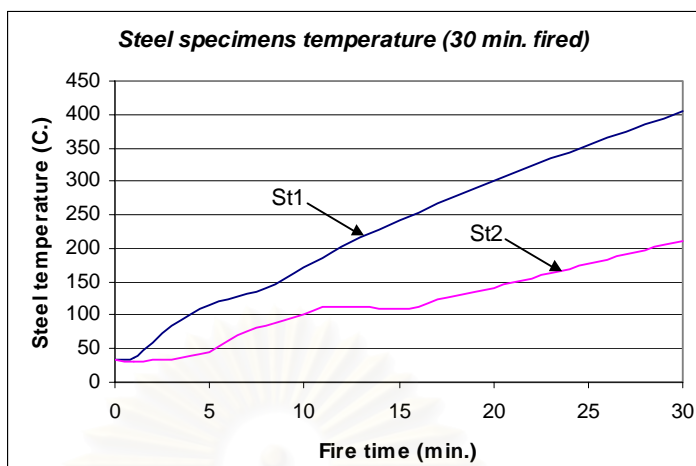


รูปที่ ก-14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่างๆ จากการเผาไฟ 90 นาที

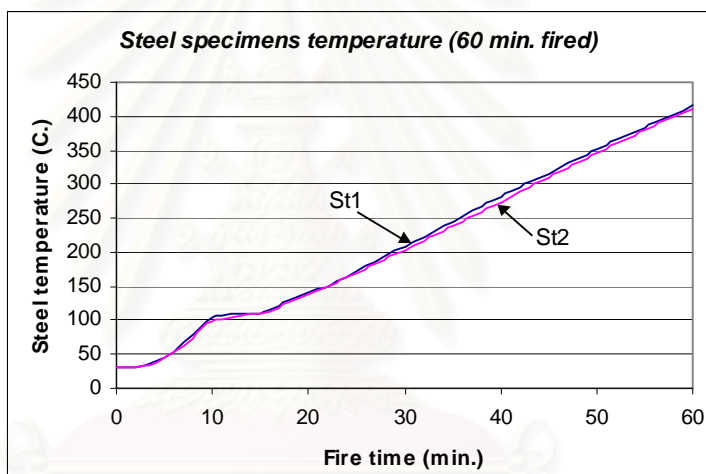


รูปที่ ก-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในหน้าตัดของตัวอย่างชนิด A ที่ตำแหน่งต่างๆ จากการเผาไฟ

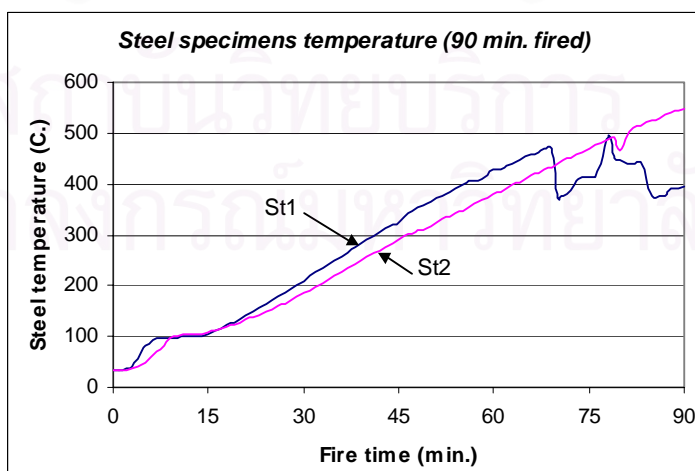
120 นาที



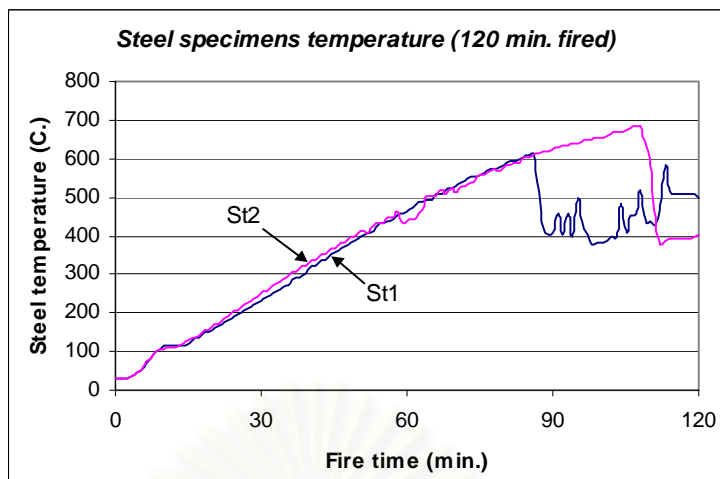
รูปที่ ก-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลาจากการเผาไฟ 30 นาที



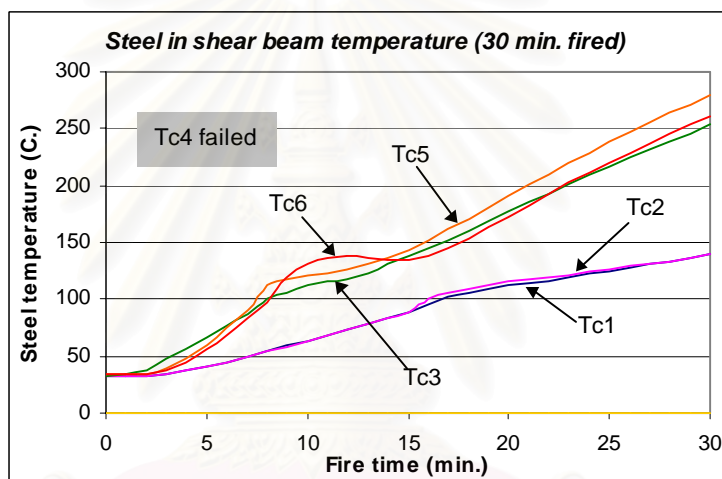
รูปที่ ก-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลาจากการเผาไฟ 60 นาที



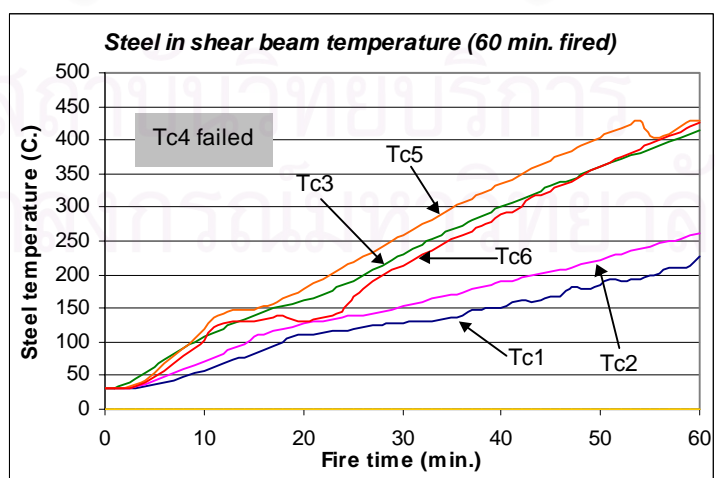
รูปที่ ก-18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลา จากการเผาไฟ 90 นาที



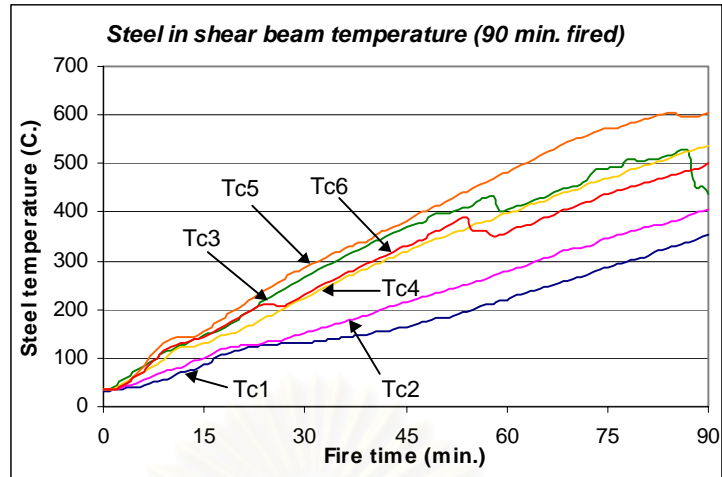
รูปที่ ก-19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของเหล็กเสริมในตัวอย่างชนิด B กับเวลา จากการเผาไฟ 120 นาที



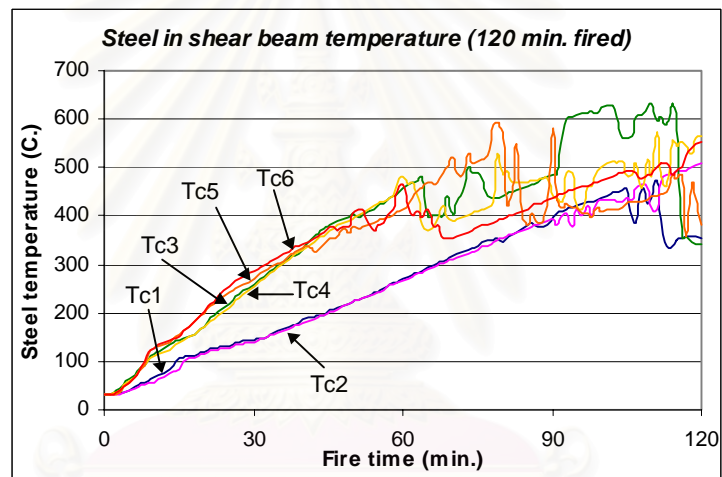
รูปที่ ก-20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาจากการเผาไฟ 30 นาที



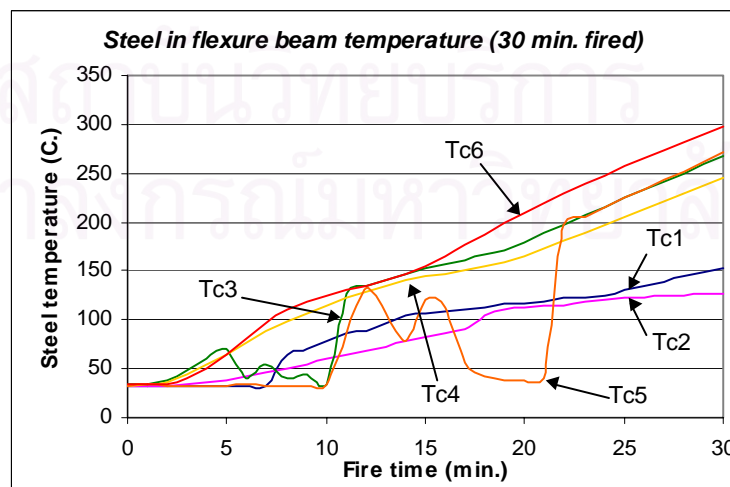
รูปที่ ก-21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาจากการเผาไฟ 60 นาที



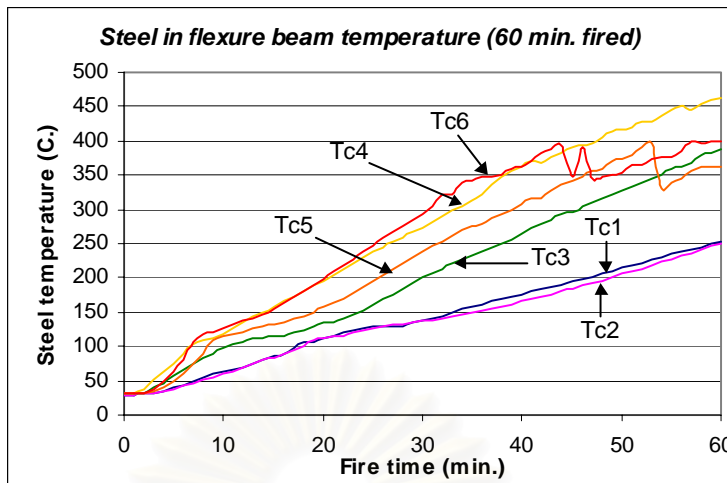
รูปที่ ก-22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 90 นาที



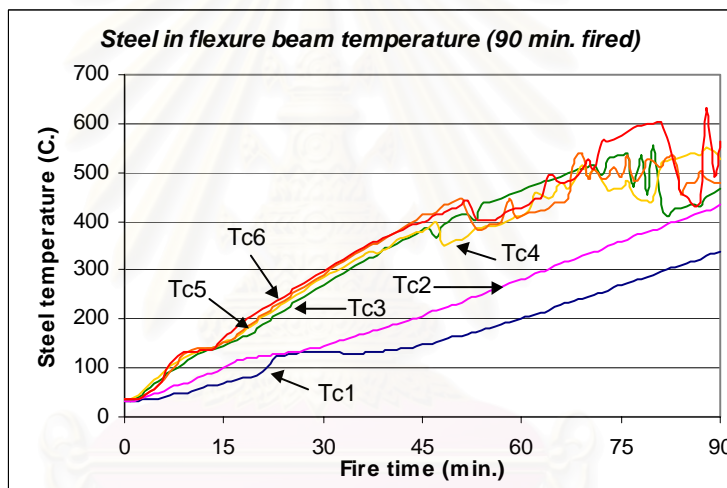
รูปที่ ก-23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 120 นาที



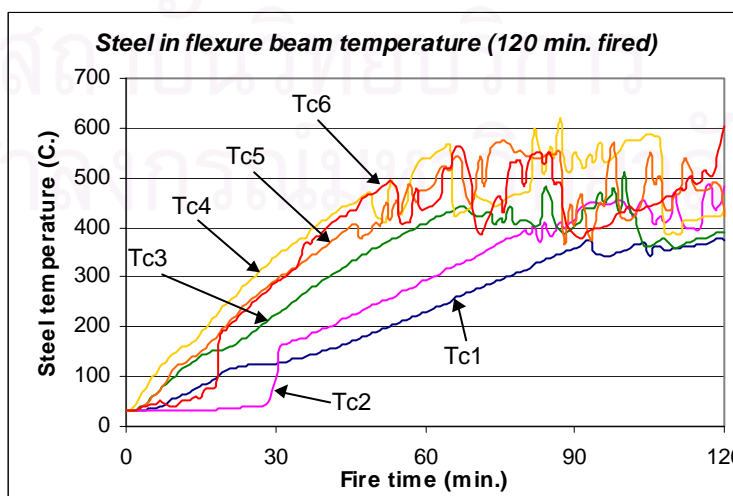
รูปที่ ก-24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 30 นาที



รูปที่ ก-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาจากการเผาไฟ 60 นาที



รูปที่ ก-26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับเวลาจากการเผาไฟ 90 นาที



รูปที่ ก-27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กเสริมของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับ

แรงดัดที่ตำแหน่งต่างๆกับเวลาจากการเผาไฟ 120 นาที

ตารางที่ ก-20 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ที่ไม่ได้ทำการเผา

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B
1	5,050	5,017	-	-	31	33	-	-
2	4,935	5,051	-	-	33	35	-	-
3	5,102	4,950	-	-	33	35	-	-
4	4,983	5,193	-	-	34	34	-	-
5	5,000	5,175	-	-	33	34	-	-
6	5,085	5,103	-	-	32	32	-	-
7	5,173	5,286	-	-	40	36	-	-
8	5,283	5,248	-	-	38	39	-	-
9	5,302	5,341	-	-	36	37	-	-
ค่าเฉลี่ย	5,101	5,152	-	-	34	35	-	-

- = ไม่ได้ทำการทดสอบ

ตารางที่ ก-21 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 30 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B
1	4,093	4,950	3,304	3,606	40	38	37	42
2	4,715	5,000	3,371	3,394	40	38	39	41
3	4,613	4,870	N.A.*	3,036	40	39	N.A.*	38
4	4,700	4,934	2,899	3,409	38	40	38	40
5	4,885	4,792	3,098	3,488	41	41	42	38
6	4,745	4,870	N.A.*	3,319	40	41	N.A.*	43

7	5,051	5,263	3,066	3,440	40	48	42	48
8	4,983	5,226	2,998	3,226	41	52	39	50
9	5,085	5,034	N.A.*	2,935	41	51	N.A.*	51
ค่าเฉลี่ย	4,763	4,993	3,123	3,317	40	43	40	43

N.A.* = ไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผา

ตารางที่ ก-22 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 60 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B
1	4,854	4,902	1,724	1,882	37	39	37	40
2	5,000	4,934	2,641	2,206	37	36	36	34
3	4,762	5,172	N.A.*	1,630	40	39	N.A.*	36
4	4,934	5,000	1,840	2,358	41	39	36	36
5	4,918	4,983	2,041	2,326	40	40	39	37
6	4,854	4,967	N.A.*	1,918	39	39	N.A.*	34
7	5,051	5,119	1,071	2,143	39	47	32	41
8	5,034	4,902	1,756	2,219	42	46	33	41
9	4,902	5,190	N.A.*	2,165	38	40	N.A.*	32
ค่าเฉลี่ย	4,923	5,019	1,846	2,094	39	41	36	37

N.A.* = ไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผา

ตารางที่ ก-23 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 90 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B
1	4,671	4,822	N.A.*	1,872	34	35	N.A.*	29
2	4,853	5,017	1,757	1,438	37	35	23	29
3	4,730	5,017	1,541	1,488	34	39	26	26
4	4,730	4,934	N.A.*	1,352	37	37	N.A.*	26
5	4,853	4,934	1,047	1,787	36	39	26	28
6	4,715	4,870	1,278	1,450	37	35	25	29
7	4,838	5,051	N.A.*	1,175	41	37	N.A.*	25

8	4,934	4,776	1,046	1,280	36	42	24	30
9	5,034	5,155	919	1,168	38	42	26	25
ค่าเฉลี่ย	4,818	4,953	1,265	1,446	37	38	25	27

N.A.* = ไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผา

ตารางที่ ก-24 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของตัวอย่างชนิด A และ B ก่อนและหลังการเผาไฟ 120 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด A	ชนิด B
1	4,794	4,950	785	765	38	38	22	23
2	4,824	4,950	842	1,463	40	39	20	21
3	4,704	4,902	N.A.*	1,133	38	38	N.A.*	24
4	4,778	4,853	463	793	39	40	20	21
5	4,748	4,838	437	651	39	40	22	18
6	4,719	4,822	N.A.*	761	40	41	N.A.*	21
7	5,033	5,017	457	583	38	46	20	25
8	4,967	5,000	450	552	41	49	19	25
9	4,983	5,017	N.A.*	770	39	46	N.A.*	23
ค่าเฉลี่ย	4,839	4,928	572	830	39	42	21	22

N.A.* = ไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผา

ตารางที่ ก-25 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างที่มีได้เผาไฟ

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	แรงเฉือน	แรงตัด	แรงเฉือน	แรงตัด	แรงเฉือน	แรงตัด	แรงเฉือน	แรงตัด
1	-	-	-	-	41	37	-	-
2	-	-	-	-	44	40	-	-
3	5,137	5,085	-	-	42	40	-	-
4	-	-	-	-	38	39	-	-
5	4,934	4,823	-	-	42	40	-	-
6	-	-	-	-	38	39	-	-
7	4,917	4,839	-	-	43	38	-	-

8	-	-	-	-	38	37	-	-
9	-	-	-	-	39	37	-	-
10	4,730	4,934	-	-	37	42	-	-
11	-	-	-	-	40	40	-	-
12	4,967	5,000	-	-	40	40	-	-
13	-	-	-	-	41	41	-	-
14	5,174	5,154	-	-	40	41	-	-
15	-	-	-	-	44	42	-	-
16	-	-	-	-	46	44	-	-
ค่าเฉลี่ย	4,977	4,973	-	-	41	40	-	-

- = ไม่ได้ทำการทดสอบ

ตารางที่ ก-26 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 30 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด
1	-	-	-	-	39	40	39	44
2	-	-	-	-	46	48	45	45
3	4,950	4,713	2,770	3,333	41	40	39	42
4	-	-	-	-	40	41	35	43
5	4,951	4,806	3,230	3,410	41	39	43	39
6	-	-	-	-	41	41	42	42
7	5,050	5,050	3,341	3,348	40	42	39	41

8	-	-	-	-	39	41	42	42
9	-	-	-	-	39	39	36	44
10	4,869	4,951	3,333	3,352	42	42	42	40
11	-	-	-	-	43	39	43	41
12	4,983	5,067	3,553	3,763	42	36	46	39
13	-	-	-	-	41	42	43	43
14	4,951	4,967	3,832	4,027	43	39	38	42
15	-	-	-	-	42	40	43	44
16	-	-	-	-	41	41	39	41
ค่าเฉลี่ย	4,959	4,926	3,343	3,539	41	41	41	42

- = ไม่ได้ทำการทดสอบ

ตารางที่ ก-27 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 60 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด
1	-	-	-	-	38	42	38	39
2	-	-	-	-	40	43	43	43
3	4,885	4,967	2,113	2,013	40	41	39	40
4	-	-	-	-	41	40	41	38
5	4,934	4,716	2,042	1,746	40	40	43	36
6	-	-	-	-	39	41	38	40
7	4,903	4,732	2,302	1,775	39	38	36	39

8	-	-	-	-	39	39	38	39
9	-	-	-	-	43	41	42	40
10	4,951	4,792	2,301	2,242	41	41	41	43
11	-	-	-	-	38	43	36	43
12	4,983	4,823	2,521	2,504	39	40	42	41
13	-	-	-	-	38	42	38	42
14	4,902	4,777	2,669	2,190	39	43	43	43
15	-	-	-	-	42	42	42	42
16	-	-	-	-	39	41	42	43
ค่าเฉลี่ย	4,926	4,801	2,325	2,078	40	41	40	41

- = ไม่ได้ทำการทดสอบ

ตารางที่ ก-28 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 90 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด
1	-	-	-	-	38	38	33	30
2	-	-	-	-	46	46	37	36
3	4,545	4,598	1,514	1,111	38	38	31	31
4	-	-	-	-	39	34	31	33
5	4,673	3,902	1,365	1,566	40	41	32	32
6	-	-	-	-	39	42	29	33
7	4,934	4,632	986	1,189	38	40	34	35

8	-	-	-	-	35	39	32	32
9	-	-	-	-	38	38	34	33
10	4,967	5,033	1,440	1,343	38	40	32	39
11	-	-	-	-	36	40	34	35
12	4,822	4,672	1,646	1,797	39	40	37	35
13	-	-	-	-	39	41	38	37
14	4,967	5,085	1,602	1,432	40	38	35	35
15	-	-	-	-	38	41	36	35
16	-	-	-	-	41	41	38	33
ค่าเฉลี่ย	4,818	4,654	1,426	1,406	39	40	34	34

- = ไม่ได้ทำการทดสอบ

ตารางที่ ก-29 ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของคานตัวอย่างก่อนและหลังการเผาไฟ 120 นาที

วิธีทดสอบ	Pulse velocity (ม./วินาที.)				Rebound number			
	ก่อนเผา		หลังเผา		ก่อนเผา		หลังเผา	
	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด	แรงเฉือน	แรงดัด
1	-	-	-	-	40	39	29	25
2	-	-	-	-	43	42	31	33
3	5,017	4,868	1,218	1,192	41	39	25	33
4	-	-	-	-	39	39	26	31
5	4,902	5,102	1,014	868	39	43	25	29
6	-	-	-	-	38	42	28	29
7	4,839	5,119	1,188	838	39	38	27	30

8	-	-	-	-	39	37	27	30
9	-	-	-	-	40	37	29	29
10	4,918	5,050	963	941	39	38	27	29
11	-	-	-	-	40	44	27	31
12	4,854	5,120	1,019	1,039	38	40	24	31
13	-	-	-	-	40	40	29	30
14	4,967	4,950	1,407	1,035	39	41	30	28
15	-	-	-	-	42	41	34	30
16	-	-	-	-	41	38	28	27
ค่าเฉลี่ย	4,916	5,035	1,135	986	40	40	28	30

- = ไม่ได้ทำการทดสอบ

ตารางที่ ก-30 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตที่มีได้เผาไฟ

หมายเลข	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	พื้นที่ (ชม. ²)	อัตราส่วน L/d	ค่าปรับแก้จาก อัตราส่วน L/d	แรงอัดสูงสุด (กก.)	กำลังอัด (กก./ชม. ²)
00A-1	53.88	22.80	2.06	1.000	8,370	367
00A-2	54.10	22.99	2.03	1.000	7,330	319
00A-3	53.95	22.86	2.05	1.000	7,690	336
00A-4	54.08	22.97	2.02	1.000	8,620	375
00A-5	53.90	22.82	1.86	0.989	9,120	400
00A-6	54.00	22.90	2.06	1.000	8,150	356
00A-7	53.85	22.78	2.07	1.000	11,500	505
00A-8	53.88	22.80	2.01	1.000	7,950	349

00A-9	53.98	22.88	2.05	1.000	9,180	401
00B-1	53.90	22.82	2.04	1.000	8,070	354
00B-2	53.95	22.86	2.05	1.000	6,880	301
00B-3	53.98	22.88	2.06	1.000	5,380	235
00B-4	53.98	22.88	2.05	1.000	9,120	399
00B-5	54.00	22.90	2.05	1.000	7,000	306
00B-6	53.98	22.88	2.04	1.000	8,070	353
00B-7	54.00	22.90	2.04	1.000	6,400	279
00B-8	53.95	22.86	2.04	1.000	8,570	375
00B-9	53.95	22.86	2.04	1.000	9,070	397

ตารางที่ ก-31 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตที่เผาไฟ 30 นาที

หมายเลข	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	พื้นที่ (ซม. ²)	อัตราส่วน L/d	ค่าปรับแก้จาก อัตราส่วน L/d	แรงอัดสูงสุด (กก.)	กำลังอัด (กก./ซม. ²)
30A-1	53.90	22.82	2.00	1.000	7,700	337
30A-2	54.03	22.92	1.48	0.958	3,250	142
30A-3	-	-	-	-	-	-
30A-4	53.95	22.86	1.20	0.936	5,350	234
30A-5	-	-	-	-	-	-
30A-6	-	-	-	-	-	-
30A-7	53.98	22.88	1.82	0.985	5,550	243

30A-8	53.98	22.88	1.96	0.997	6,300	275
30A-9	-	-	-	-	-	-
30B-1	53.95	22.86	1.33	0.947	6,500	284
30B-2	53.95	22.86	1.46	0.957	6,050	265
30B-3	54.03	22.92	1.37	0.950	4,450	194
30B-4	53.98	22.88	2.00	1.000	6,500	284
30B-5	-	-	-	-	-	-
30B-6	53.95	22.86	1.52	0.962	7,100	311
30B-7	-	-	-	-	-	-
30B-8	53.95	22.86	2.00	1.000	5,350	234
30B-9	53.95	22.86	1.80	0.984	8,750	383

- = ไม่อาจทำการทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผาและการเจาะ

ตารางที่ ก-32 ผลการทดสอบค่ากำลังอัดของลูกคอนกรีตที่เผาไฟ 60 นาที

หมายเลข	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (มม.)	พื้นที่ (ชม. ²)	อัตราส่วน L/d	ค่าปรับแก้จาก อัตราส่วน L/d	แรงอัดสูงสุด (กก.)	กำลังอัด (กก./ชม. ²)
60A-1	-	-	-	-	-	-
60A-2	-	-	-	-	-	-
60A-3	-	-	-	-	-	-
60A-4	-	-	-	-	-	-
60A-5	-	-	-	-	-	-
60A-6	-	-	-	-	-	-

60A-7	-	-	-	-	-	-
60A-8	-	-	-	-	-	-
60A-9	-	-	-	-	-	-
60B-1	53.98	22.88	1.34	0.947	4,700	205
60B-2	53.95	22.86	1.11	0.929	3,600	157
60B-3	54.05	22.94	1.11	0.929	4,300	187
60B-4	-	-	-	-	-	-
60B-5	54.05	22.94	1.28	0.942	5,000	218
60B-6	-	-	-	-	-	-
60B-7	-	-	-	-	-	-
60B-8	-	-	-	-	-	-
60B-9	-	-	-	-	-	-

- = ไม่อาจทำการทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผาและการเจาะ

ตารางที่ ก-33 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่มีได้เผาไฟ

00-1		00-2	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
4.210E-04	680	3.570E-04	621
8.460E-04	1,377	7.550E-04	1,328
1.296E-03	2,172	1.184E-03	2,107
2.185E-03	3,317*	1.860E-03	3,358*
4.774E-03	3,210	2.000E-03	3,397

1.140E-02	3,370	8.500E-03	3,306
1.430E-02	3,631	1.360E-02	3,556
1.750E-02	3,854	1.630E-02	3,800
2.040E-02	4,002	1.890E-02	3,946
2.390E-02	4,147	2.220E-02	4,100
2.760E-02	4,277	2.580E-02	4,236
3.190E-02	4,396	2.990E-02	4,358
3.650E-02	4,498	3.450E-02	4,466
4.140E-02	4,583	3.940E-02	4,556
4.690E-02	4,652	4.460E-02	4,631
5.280E-02	4,706	5.030E-02	4,691
5.880E-02	4,749	5.620E-02	4,740
6.520E-02	4,779	6.230E-02	4,776
7.170E-02	4,800	6.880E-02	4,802
7.840E-02	4,812	7.540E-02	4,820
7.920E-02	4,815**	8.180E-02	4,828**
9.180E-02	4,800	8.890E-02	4,823
9.810E-02	4,757	9.550E-02	4,797
		1.018E-01	4,722

* = ความเค้นคราก, ** = ความเค้นประลัย

ตารางที่ ก-34 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟ
เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.)

30-1		30-2	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
1.480E-04	578	3.090E-04	588
4.850E-04	1,265	7.060E-04	1,286
8.860E-04	2,055	1.146E-03	2,090
1.742E-03	3,253*	1.768E-03	3,312*
3.500E-03	3,186	4.600E-03	3,174

1.130E-02	3,282	1.160E-02	3,378
1.460E-02	3,634	1.500E-02	3,703
1.800E-02	3,847	1.810E-02	3,840
2.070E-02	3,984	2.050E-02	4,029
2.340E-02	4,104	2.420E-02	4,192
2.760E-02	4,250	2.830E-02	4,334
3.200E-02	4,375	3.270E-02	4,458
3.670E-02	4,482	3.770E-02	4,563
4.190E-02	4,571	4.310E-02	4,651
4.740E-02	4,645	4.870E-02	4,722
5.330E-02	4,705	5.460E-02	4,778
5.940E-02	4,750	6.090E-02	4,820
6.590E-02	4,786	6.730E-02	4,850
7.260E-02	4,811	7.400E-02	4,868
7.960E-02	4,827	8.050E-02	4,877**
8.770E-02	4,837**	8.820E-02	4,868
9.430E-02	4,835	9.550E-02	4,828
1.021E-01	4,825		
1.101E-01	4,792		

* = ความเค้นคราก, ** = ความเค้นประลัย

ตารางที่ ก-35 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 30 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง

30-3		30-4	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
2.640E-04	550	2.630E-04	511
6.330E-04	1,172	6.080E-04	1,101
1.027E-03	1,870	9.710E-04	1,771

1.333E-03	2,499	1.408E-03	2,645*
1.349E-03	2,628*	1.900E-03	2,420
1.364E-03	2,586	8.500E-03	2,527
1.450E-02	2,602	1.450E-02	2,593
1.740E-02	2,779	1.690E-02	2,821
2.020E-02	2,909	1.930E-02	2,919
2.360E-02	3,031	2.270E-02	3,046
2.740E-02	3,139	2.640E-02	3,158
3.140E-02	3,233	3.030E-02	3,254
3.570E-02	3,316	3.430E-02	3,339
4.030E-02	3,388	3.820E-02	3,410
4.500E-02	3,450	4.270E-02	3,471
5.000E-02	3,502	4.740E-02	3,522
5.520E-02	3,546	5.280E-02	3,562
6.060E-02	3,581	5.850E-02	3,598
6.610E-02	3,612	6.310E-02	3,621
7.150E-02	3,637	6.820E-02	3,640
7.730E-02	3,656	7.240E-02	3,648**
8.300E-02	3,671	7.780E-02	3,640
8.880E-02	3,682	8.080E-02	3,596
9.450E-02	3,687		
9.480E-02	3,689**		
1.045E-01	3,679		

* = ความเค้นคราก, ** = ความเค้นประลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-36 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟ
เป็นเวลา 60 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.)

60-1		60-2	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
2.960E-04	631	2.870E-04	562
6.970E-04	1,329	6.610E-04	1,213

1.140E-03	2,118	1.088E-03	1,964
1.721E-03	3,160*	1.538E-03	2,769
3.200E-03	3,144	1.816E-03	3,325*
9.800E-03	3,226	8.200E-03	3,038
1.250E-02	3,476	1.280E-02	3,470
1.520E-02	3,670	1.480E-02	3,592
1.810E-02	3,848	1.750E-02	3,783
2.150E-02	4,015	2.100E-02	3,954
2.530E-02	4,164	2.470E-02	4,110
2.900E-02	4,294	2.900E-02	4,249
3.360E-02	4,404	3.370E-02	4,369
3.840E-02	4,495	3.880E-02	4,468
4.340E-02	4,569	4.420E-02	4,550
4.870E-02	4,630	4.980E-02	4,617
5.450E-02	4,676	5.570E-02	4,669
6.040E-02	4,713	6.210E-02	4,711
6.670E-02	4,738	6.860E-02	4,740
7.330E-02	4,756	7.560E-02	4,761
8.140E-02	4,768*	8.690E-02	4,779*
8.660E-02	4,767	9.020E-02	4,779
9.230E-02	4,754	9.800E-02	4,777
9.820E-02	4,706	1.061E-01	4,764
		1.145E-01	4,740
		1.238E-01	4,695

* = ความเค้นคราก, ** = ความเค้นประลัย

ตารางที่ ก-37 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 60 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง

60-3		60-4	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
2.700E-04	666	3.030E-04	513
6.270E-04	1,328	6.370E-04	1,095
1.000E-03	2,013	1.003E-03	1,752

1.240E-03	2,490*	1.290E-03	2,450*
4.300E-03	2,356	4.591E-03	2,330
1.260E-02	2,453	1.100E-02	2,468
1.500E-02	2,634	1.320E-02	2,643
1.780E-02	2,755	1.560E-02	2,778
2.110E-02	2,882	1.780E-02	2,887
2.480E-02	2,997	2.080E-02	3,014
2.870E-02	3,100	2.430E-02	3,130
3.290E-02	3,192	2.810E-02	3,235
3.750E-02	3,271	3.220E-02	3,325
4.240E-02	3,339	3.670E-02	3,403
4.760E-02	3,398	4.130E-02	3,468
5.300E-02	3,445	4.610E-02	3,523
5.870E-02	3,486	5.110E-02	3,568
6.460E-02	3,522	5.610E-02	3,603
7.060E-02	3,547	6.150E-02	3,630
7.680E-02	3,569	7.200E-02	3,660**
7.710E-02	3,587	7.230E-02	3,660
8.350E-02	3,599	7.770E-02	3,656
8.990E-02	3,606	8.280E-02	3,636
9.840E-02	3,611**	6.720E-02	3,583
1.035E-01	3,608		
1.104E-01	3,599		
1.189E-01	3,577		

* = ความเค้นตรง, ** = ความเค้นประลัย

ตารางที่ ก-38 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 90 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.)

90-1		90-2	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
2.960E-04	591	3.820E-04	700
6.480E-04	1,233	7.900E-04	1,422
1.050E-03	1,961	1.234E-03	2,240
1.482E-03	2,737	1.702E-03	3,134*

1.690E-03	3,153*	6.700E-03	3,008
6.600E-03	3,046	1.190E-02	3,284
1.260E-02	3,330	1.500E-02	3,480
1.440E-02	3,450	1.720E-02	3,647
1.680E-02	3,628	2.070E-02	3,820
2.000E-02	3,795	2.470E-02	3,979
2.370E-02	3,947	2.920E-02	4,118
2.790E-02	4,083	3.370E-02	4,234
3.240E-02	4,200	3.900E-02	4,333
3.720E-02	4,300	4.420E-02	4,415
4.230E-02	4,382	5.000E-02	4,481
4.770E-02	4,450	5.610E-02	4,534
5.340E-02	4,504	6.250E-02	4,573
5.930E-02	4,548	6.930E-02	4,604
6.550E-02	4,581	7.630E-02	4,626
7.200E-02	4,606	8.800E-02	4,644**
7.850E-02	4,624	9.100E-02	4,644
9.060E-02	4,638**	9.880E-02	4,643
9.220E-02	4,636		
9.910E-02	4,632		
1.058E-01	4,608		
1.119E-01	4,543		
1.176E-01	4,407		
1.242E-01	4,179		

* = ความเค้นคราก, ** = ความเค้นประลัย

ตารางที่ ก-39 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 90 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง

90-3		90-4	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
2.150E-04	524	3.800E-04	621
5.980E-04	1,174	7.490E-04	1,288
9.930E-04	1,903	1.168E-03	2,042
1.688E-03	2,618*	1.461E-03	2,461*
5.200E-03	2,623	6.500E-03	2,643

7.400E-03	2,794	8.700E-03	2,781
1.000E-02	2,928	1.160E-02	2,921
1.290E-02	3,050	1.480E-02	3,050
1.600E-02	3,157	1.820E-02	3,161
1.920E-02	3,254	2.200E-02	3,261
2.270E-02	3,339	2.630E-02	3,346
2.630E-02	3,413	3.090E-02	3,419
3.060E-02	3,476	3.590E-02	3,479
3.500E-02	3,528	4.130E-02	3,527
3.980E-02	3,571	4.700E-02	3,565
4.490E-02	3,606	5.300E-02	3,595
5.030E-02	3,634	5.940E-02	3,617
5.600E-02	3,656	6.600E-02	3,633
6.200E-02	3,672	7.300E-02	3,644
6.820E-02	3,684	8.300E-02	3,649**
7.480E-02	3,692	8.740E-02	3,647
8.540E-02	3,699**	9.470E-02	3,637
8.830E-02	3,699	1.021E-01	3,608
9.530E-02	3,697	1.098E-01	3,548
1.021E-01	3,690		
1.092E-01	3,666		
1.169E-01	3,611		
1.253E-01	3,515		
1.346E-01	3,359		

* = ความเค้นตรง, ** = ความเค้นประลัย

ตารางที่ ก-40 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งฝังอยู่ในตัวอย่างชนิด B (มีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม.)

120-1		120-2	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
3.570E-04	579	2.040E-04	494
7.910E-04	1,290	5.640E-04	1,147
1.425E-03	2,682*	9.780E-04	1,898
1.444E-03	2,677	1.547E-03	2,816*

6.900E-03	2,673	1.170E-02	2,564
1.210E-02	2,883	1.340E-02	2,838
1.420E-02	3,034	1.590E-02	3,006
1.690E-02	3,213	1.900E-02	3,179
2.020E-02	3,389	2.230E-02	3,356
2.400E-02	3,544	2.550E-02	3,515
2.820E-02	3,681	2.960E-02	3,653
3.270E-02	3,799	3.410E-02	3,777
3.750E-02	3,898	3.810E-02	3,881
4.250E-02	3,982	4.280E-02	3,972
4.760E-02	4,050	4.790E-02	4,048
5.290E-02	4,106	5.330E-02	4,109
5.860E-02	4,151	5.880E-02	4,160
6.460E-02	4,187	6.450E-02	4,201
7.090E-02	4,214	7.020E-02	4,233
7.710E-02	4,233	7.600E-02	4,256
8.790E-02	4,246**	8.500E-02	4,276**
9.010E-02	4,245	8.700E-02	4,276
9.540E-02	4,233	9.000E-02	4,269
		9.170E-02	4,261

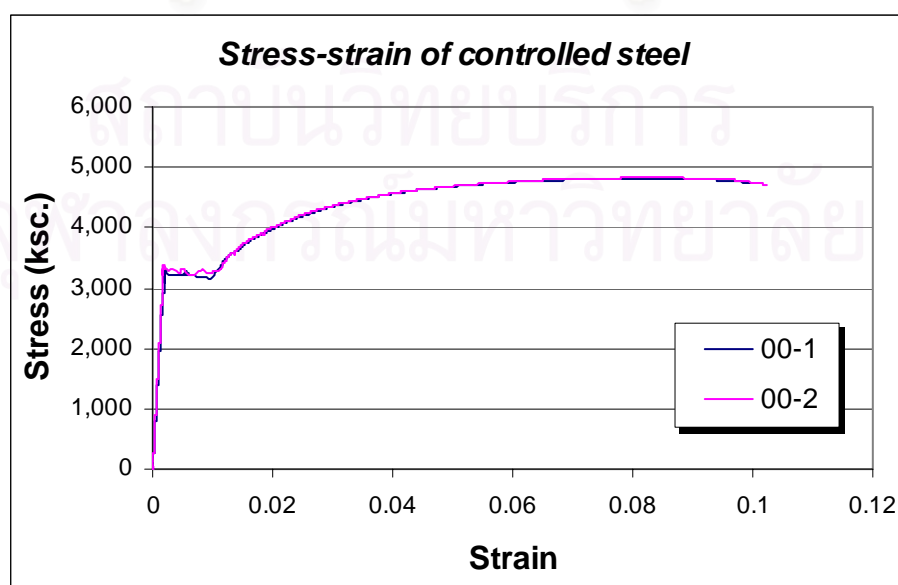
* = ความเค้นตรง, ** = ความเค้นประลัย

ตารางที่ ก-41 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่เผาไฟเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งอยู่ในเตาและสัมผัสกับแก๊สร้อนโดยตรง

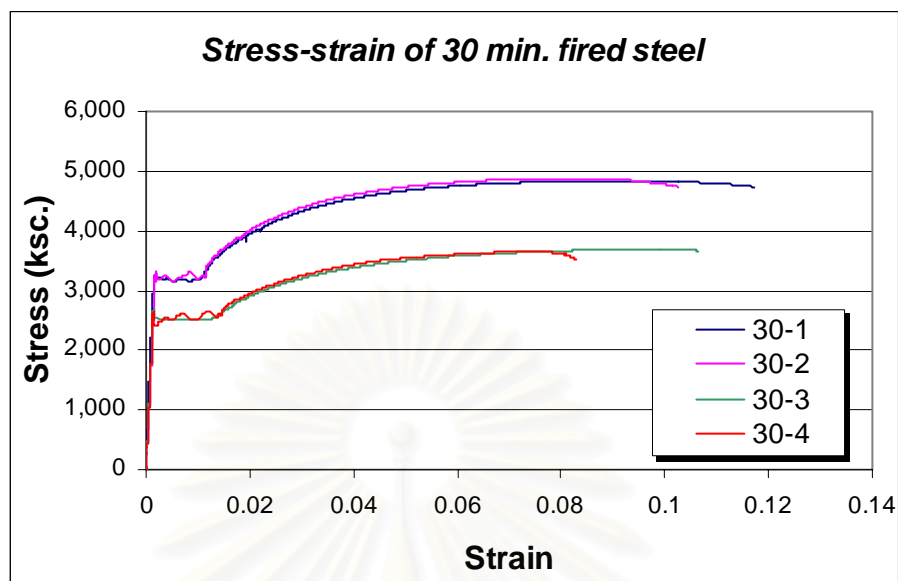
120-3		120-4	
ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)	ความเครียด	ความเค้น(กก./ชม. ²)
0.000E+00	0	0.000E+00	0
2.390E-04	571	3.070E-04	548
5.860E-04	1,216	6.840E-04	1,175
1.085E-03	2,009*	1.021E-03	1,930*
3.800E-03	1,948	5.300E-03	1,899
7.800E-03	2,082	7.500E-03	2,067

1.020E-02	2,279	1.010E-02	2,253
1.320E-02	2,463	1.310E-02	2,436
1.650E-02	2,632	1.660E-02	2,607
2.010E-02	2,780	2.040E-02	2,757
2.410E-02	2,906	2.440E-02	2,883
2.840E-02	3,014	2.870E-02	2,993
3.290E-02	3,105	3.320E-02	3,087
3.770E-02	3,181	3.810E-02	3,165
4.280E-02	3,246	4.320E-02	3,230
4.800E-02	3,298	4.860E-02	3,285
5.350E-02	3,343	5.410E-02	3,329
5.910E-02	3,378	5.970E-02	3,365
6.480E-02	3,408	6.540E-02	3,394
7.080E-02	3,430	7.130E-02	3,416
7.680E-02	3,448	7.740E-02	3,433
8.300E-02	3,460	8.380E-02	3,445
9.070E-02	3,469**	9.010E-02	3,452**
9.540E-02	3,469	9.670E-02	3,452
1.013E-01	3,462	1.023E-01	3,442
1.066E-01	3,443	1.084E-01	3,413
1.107E-01	3,390		

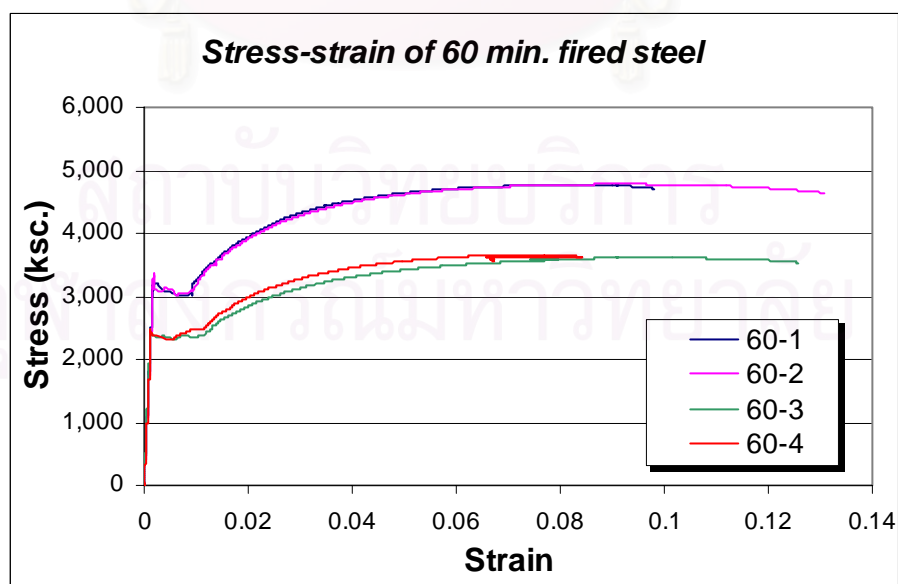
* = ความเค้นคราก, ** = ความเค้นประลัย



รูปที่ ก-28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่มีได้เผาไฟ

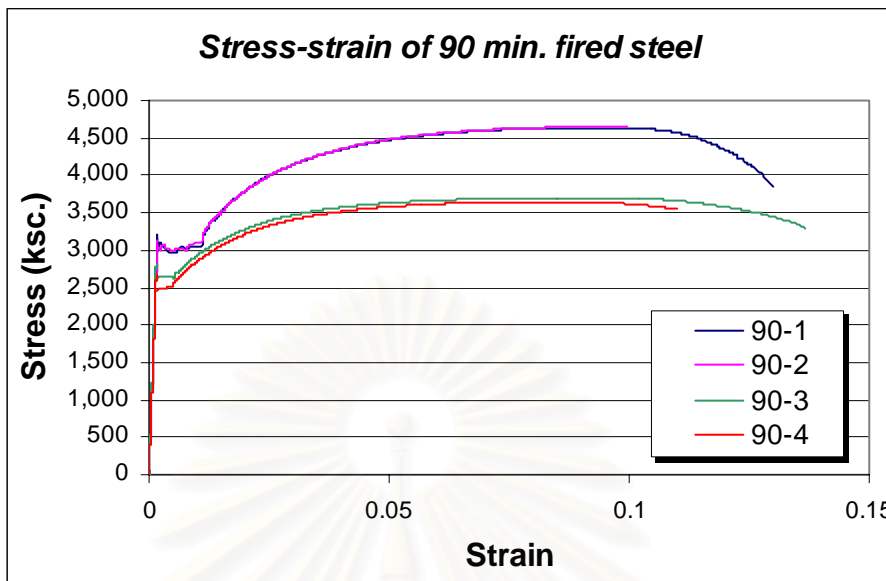


รูปที่ ก-29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 30 นาที (-1,-2 ฝังในก้อนคอนกรีตมีระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. ; -3,-4 วางไว้ในเตาเผา)

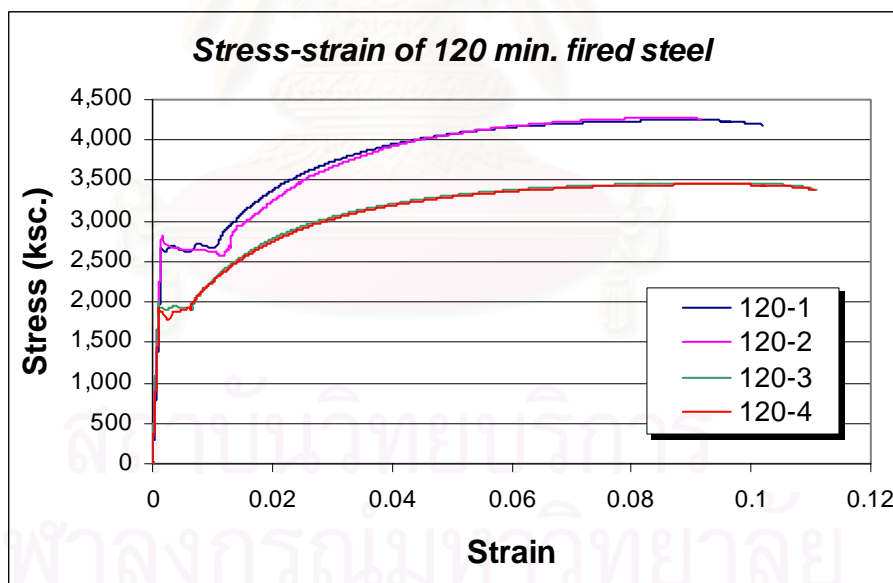


รูปที่ ก-30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 60 นาที

(-1,-2 ฝังในก้อนคอนกรีตมีคอนกรีตระยะหุ้ม 25 มม. ; -3,-4 วางไว้ในเตาเผา)



รูปที่ ก-31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 90 นาที (-1,-2 ฝังในก้อนคอนกรีตมีคอนกรีตระยะหุ้ม 25 มม. ; -3,-4 วางไว้ในเตาเผา)



รูปที่ ก-32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมตัวอย่างที่เผาไฟ 120 นาที (-1,-2 ฝังในก้อนคอนกรีตมีคอนกรีตระยะหุ้ม 25 มม. ; -3,-4 วางไว้ในเตาเผา)

ตารางที่ ก-42 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง S-0

แรงกระทำ* (กก.)	การโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน* (มม.)	ความแข็งแกร่งเชิงตัด** (EI, กก.-ม. ²)	โมเมนต์** (M, กก.-ม.)	ความโค้ง** (M/EI, ม. ⁻¹)
0	0.000	0	0	0.000E+00
899	0.089	1,050,164	270	2.569E-04
1,421 ⁺	0.150	982,011	426	4.342E-04
1,643	0.303	561,926	493	8.772E-04
1,799	0.287	647,974	540	8.329E-04
2,099	0.315	689,914	630	9.126E-04
3,250	0.474	709,956	975	1.373E-03
3,796	0.569	690,963	1,139	1.648E-03
4,521	0.798	586,536	1,356	2.313E-03
5,469	1.140	496,421	1,641	3.305E-03
6,296	1.473	442,289	1,889	4.271E-03
7,406	1.953	392,401	2,222	5.662E-03
8,263	2.238	382,210	2,479	6.486E-03

9,031	2.500	373,797	2,709	7.248E-03
9,276	2.638	363,951	2,783	7.646E-03
9,312	2.690	358,305	2,794	7.797E-03
9,684	2.950	339,789	2,905	8.550E-03
9,798	3.100	327,173	2,939	8.984E-03
10,014	3.323	311,925	3,004	9.631E-03
10,068	3.359	310,182	3,020	9.737E-03
10,404	3.638	296,017	3,121	1.054E-02
10,584	3.775	290,163	3,175	1.094E-02
10,494	3.959	274,367	3,148	1.147E-02
10,710 ⁺⁺	4.069	272,438	3,213	1.179E-02
10,248	4.374	242,475	3,074	1.268E-02
10,158	4.564	230,366	3,047	1.323E-02

* = จากผลการทดสอบ, ** = จากการคำนวณ

+ = แรงกระทำแตกร้าว, ++ = แรงกระทำสูงสุด

ตารางที่ ก-43 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง S-30

แรงกระทำ* (กก.)	การโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน* (มม.)	ความแข็งแรงแรงเชิงตัด** (EI, กก.-ม. ²)	โมเมนต์** (M, กก.-ม.)	ความโค้ง** (M/EI, ม. ⁻¹)
0	0.000	0	0	0.000E+00
678	0.180	388,816	203	5.228E-04
1,211	0.332	377,892	363	9.616E-04
1,445	0.406	368,553	434	1.176E-03
1,871	0.570	339,653	561	1.652E-03
2,614	0.789	342,905	784	2.287E-03
3,016	0.924	337,707	905	2.679E-03
3,496	1.085	333,344	1,049	3.146E-03
4,132	1.298	329,434	1,239	3.762E-03
4,725	1.520	321,690	1,418	4.407E-03
5,493	1.817	312,946	1,648	5.265E-03
6,584	2.197	310,221	1,975	6.367E-03
7,454	2.483	310,649	2,236	7.198E-03
8,185	2.764	306,548	2,456	8.010E-03
8,473	2.902	302,184	2,542	8.412E-03

8,941	3.063	302,100	2,682	8.878E-03
9,354	3.208	301,800	2,806	9.299E-03
9,492	3.301	297,585	2,848	9.569E-03
9,534	3.327	296,586	2,860	9.644E-03
9,822	3.411	298,038	2,947	9.887E-03
10,002 ⁺⁺	3.472	298,147	3,001	1.006E-02
9,984	3.504	294,876	2,995	1.016E-02
8,617	3.849	231,709	2,585	1.116E-02

* = จากผลการทดสอบ, ** = จากการคำนวณ

+ = แรงกระทำแตกร้าว, ++ = แรงกระทำสูงสุด

ตารางที่ ก-44 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง S-60

แรงกระทำ* (กก.)	การโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน* (มม.)	ความแข็งแรงเชิงตัด** (EI, กก.-ม. ²)	โมเมนต์** (M, กก.-ม.)	ความโค้ง** (M/EI, ม. ⁻¹)
0	0.000	0	0	0.000E+00
414	0.142	302,169	124	4.108E-04
977	0.422	239,756	293	1.223E-03
1,601	0.705	234,920	480	2.045E-03
2,129	0.941	234,261	639	2.726E-03
2,698	1.160	240,859	810	3.361E-03
3,610	1.559	239,665	1,083	4.519E-03
3,910	1.723	234,827	1,173	4.995E-03
3,964	1.784	229,903	1,189	5.172E-03
4,126	1.804	236,730	1,238	5.228E-03
4,737	2.039	240,479	1,421	5.910E-03
5,115	2.235	236,834	1,534	6.479E-03
5,805	2.490	241,296	1,741	7.217E-03
6,176	2.657	240,568	1,853	7.702E-03
6,596	2.896	235,769	1,979	8.393E-03

7,376	3.192	239,158	2,213	9.252E-03
7,573	3.340	234,681	2,272	9.681E-03
8,041	3.566	233,418	2,412	1.033E-02
8,203	3.636	233,478	2,461	1.054E-02
8,209	3.736	227,405	2,463	1.083E-02
8,275	3.736	229,232	2,483	1.083E-02
9,157 ⁺⁺	4.107	230,772	2,747	1.190E-02
7,885	4.426	184,414	2,366	1.283E-02

* = จากผลการทดสอบ, ** = จากการคำนวณ

+ = แรงกระทำแตกร้า, ++ = แรงกระทำสูงสุด

ตารางที่ ก-45 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-0

แรงกระทำ* (กก.)	การโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน* (มม.)	ความแข็งแรงเชิงตัด** (EI, กก.-ม. ²)	โมเมนต์** (M, กก.-ม.)	ความโค้ง** (M/EI, ม. ⁻¹)
0	0.000	0	0	0.000E+00
1,043	0.116	929,672	313	3.367E-04
2,249	0.254	917,312	675	7.354E-04
3,424	0.416	852,435	1,027	1.205E-03
4,126 ⁺	0.538	793,669	1,238	1.559E-03
4,779	0.728	679,900	1,434	2.109E-03
5,709	1.143	516,808	1,713	3.314E-03
6,470	1.437	466,109	1,941	4.164E-03
7,130	1.767	417,655	2,139	5.121E-03
8,263	1.975	433,092	2,479	5.724E-03
9,456	2.397	408,394	2,837	6.946E-03
9,906	2.549	402,168	2,972	7.389E-03
10,392	2.889	372,332	3,118	8.373E-03
10,710	3.069	361,170	3,213	8.896E-03
11,015 ⁺⁺	3.344	340,923	3,305	9.693E-03

11,351	3.564	329,622	3,405	1.033E-02
11,477	4.552	260,982	3,443	1.319E-02
11,849	5.166	237,391	3,555	1.497E-02
12,646	17.372	75,346	3,794	5.035E-02
13,816 ⁺⁺⁺	36.960	38,689	4,145	1.071E-01
14,865	65.867	23,358	4,460	1.909E-01
15,621	82.444	19,610	4,686	2.390E-01
15,974	120.235	13,751	4,792	3.485E-01
15,447 ⁺⁺⁺⁺	128.754	12,417	4,634	3.732E-01
13,324	129.974	10,610	3,997	3.767E-01

* = จากผลการทดสอบ, ** = จากการคำนวณ

+ = แรงกระทำแตกเร็ว, ++ = แรงกระทำคราก, +++ = แรงกระทำแตกหัก, ++++ = แรงกระทำประลัย

ตารางที่ ก-46 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-30

แรงกระทำ* (กก.)	การโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน* (มม.)	ความแข็งแรงเชิงตัด** (EI, กก.-ม. ²)	โมเมนต์** (M, กก.-ม.)	ความโค้ง** (M/EI, ม. ⁻¹)
0	0.000	0	0	0.000E+00
1,223	0.209	604,743	367	6.068E-04
2,117	0.412	531,396	635	1.195E-03
3,106	0.644	499,061	932	1.867E-03
4,144	0.899	477,230	1,243	2.605E-03
5,103	1.179	448,025	1,531	3.417E-03
6,188	1.466	437,041	1,856	4.248E-03
7,010	1.707	425,003	2,103	4.948E-03
8,341	2.116	407,958	2,502	6.134E-03
9,025	2.345	398,344	2,707	6.797E-03
10,098	2.702	386,753	3,029	7.833E-03
10,800	3.031	368,789	3,240	8.785E-03
11,267 ⁺⁺	3.965	294,119	3,380	1.149E-02
11,465	6.619	179,279	3,440	1.919E-02
12,053	15.290	81,589	3,616	4.432E-02
12,694 ⁺⁺⁺	25.915	50,698	3,808	7.512E-02

13,630	40.235	35,061	4,089	1.166E-01
14,655	60.154	25,216	4,397	1.744E-01
15,213	73.298	21,481	4,564	2.125E-01
15,429	84.365	18,928	4,629	2.445E-01
15,573	95.645	16,852	4,672	2.772E-01
15,717 ⁺⁺⁺⁺	104.167	15,616	4,715	3.019E-01
14,637	108.454	13,969	4,391	3.144E-01

* = จากผลการทดสอบ, ** = จากการคำนวณ

+ = แรงกระทำแตกช้า, ++ = แรงกระทำคราก, +++ = แรงกระทำแตกหัก, ++++ = แรงกระทำประลัย

ตารางที่ ก-47 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-60

แรงกระทำ* (กก.)	การโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน* (มม.)	ความแข็งแรงเชิงตัด** (EI, กก.-ม. ²)	โมเมนต์** (M, กก.-ม.)	ความโค้ง** (M/EI, ม. ⁻¹)
0	0.000	0	0	0.000E+00
1,091	0.332	340,477	327	9.616E-04
2,303	0.734	324,526	691	2.129E-03
3,004	1.040	298,875	901	3.016E-03
4,173	1.494	289,031	1,252	4.332E-03
5,145	1.852	287,523	1,543	5.368E-03
6,182	2.335	274,015	1,855	6.769E-03
7,124	2.686	274,476	2,137	7.786E-03
8,005	3.163	261,953	2,402	9.168E-03
9,127	3.746	252,167	2,738	1.086E-02
10,020	4.332	239,391	3,006	1.256E-02
10,824 ⁺⁺	5.849	191,520	3,247	1.695E-02
11,213	7.128	162,822	3,364	2.066E-02
11,483	8.197	144,989	3,445	2.376E-02
12,664 ⁺⁺⁺	22.221	58,988	3,799	6.441E-02

13,690	33.262	42,598	4,107	9.641E-02
14,337	45.147	32,868	4,301	1.309E-01
14,883	57.876	26,615	4,465	1.678E-01
15,315	64.943	24,407	4,594	1.882E-01
15,399	73.433	21,704	4,620	2.129E-01
15,387 ^{****}	78.883	20,188	4,616	2.286E-01
14,703	79.253	19,201	4,411	2.297E-01

* = จากผลการทดสอบ, ** = จากการคำนวณ

+ = แรงกระทำแตกช้า, ++ = แรงกระทำคราก, +++ = แรงกระทำแตกหัก, ++++ = แรงกระทำประลัย

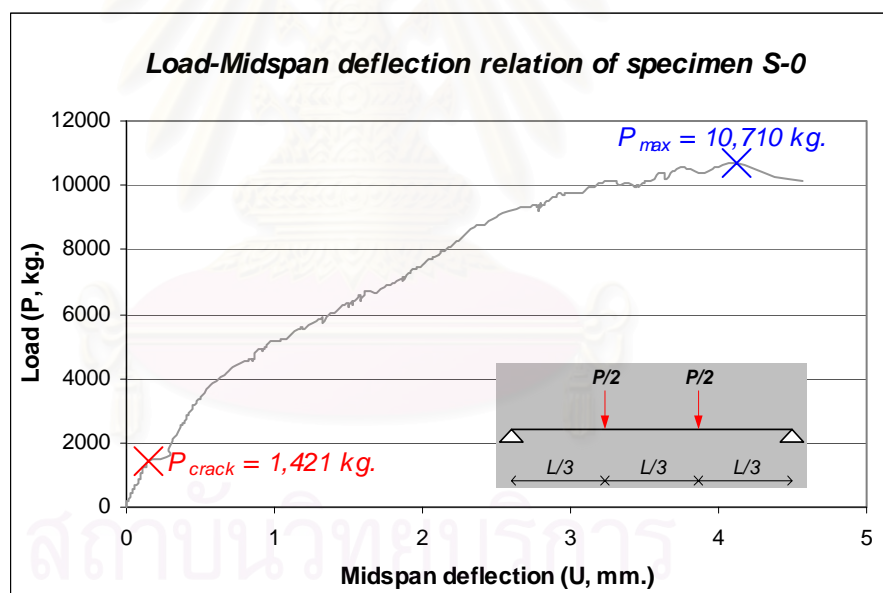
ตารางที่ ก-48 ผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง F-90

แรงกระทำ* (กก.)	การโก่งตัว ณ กึ่งกลางคาน* (มม.)	ความแข็งแรงเชิงตัด** (EI, กก.-ม. ²)	โมเมนต์** (M, กก.-ม.)	ความโค้ง** (M/EI, ม. ⁻¹)
0	0.000	0	0	0.000E+00
1,163	0.388	310,143	349	1.125E-03
2,153	0.728	306,254	646	2.109E-03
3,250	1.226	274,422	975	3.553E-03
3,670	1.550	245,080	1,101	4.492E-03
4,545	1.932	243,510	1,364	5.600E-03
5,331	2.231	247,254	1,599	6.468E-03
5,757	2.568	232,036	1,727	7.443E-03
5,906	2.828	216,201	1,772	8.196E-03
6,422	3.408	195,020	1,927	9.879E-03
6,620	3.537	193,731	1,986	1.025E-02
7,513	4.182	185,964	2,254	1.212E-02
7,567	4.264	183,675	2,270	1.236E-02
7,687	4.432	179,508	2,306	1.285E-02
8,155	5.218	161,759	2,447	1.512E-02
8,563	6.104	145,182	2,569	1.769E-02

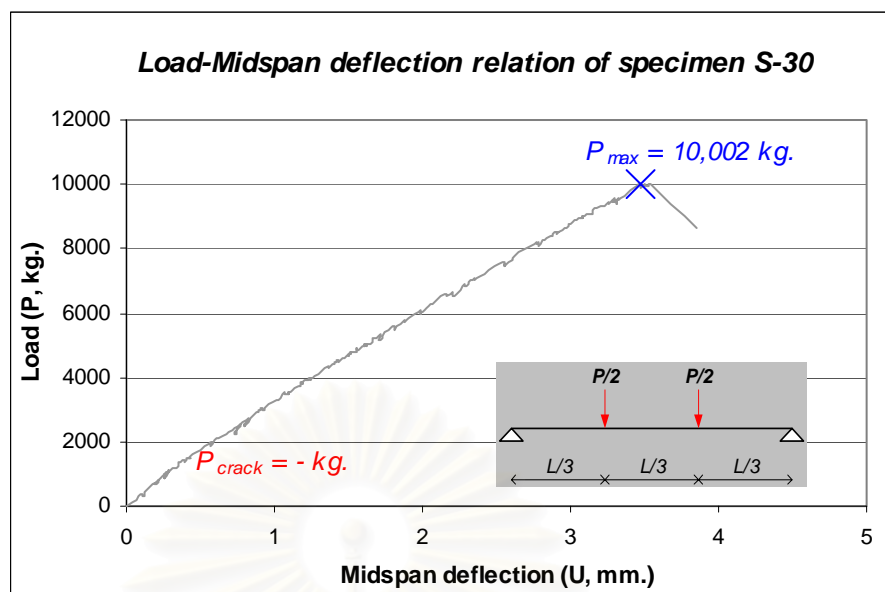
9,121	7.092	133,108	2,736	2.056E-02
9,258 ⁺⁺	7.504	127,691	2,778	2.175E-02
9,540	11.194	88,210	2,862	3.245E-02
10,128	18.781	55,814	3,038	5.444E-02
10,979	29.000	39,185	3,294	8.406E-02
11,147 ⁺⁺⁺	29.575	39,011	3,344	8.572E-02
12,754	48.514	27,210	3,826	1.406E-01
13,000	50.333	26,732	3,900	1.459E-01
13,270	62.976	21,809	3,981	1.825E-01
13,366	67.650	20,449	4,010	1.961E-01
13,120 ⁺⁺⁺⁺	72.244	18,796	3,936	2.094E-01
12,874	73.036	18,244	3,862	2.117E-01
12,017	74.127	16,778	3,605	2.149E-01

* = จากผลการทดสอบ, ** = จากการคำนวณ

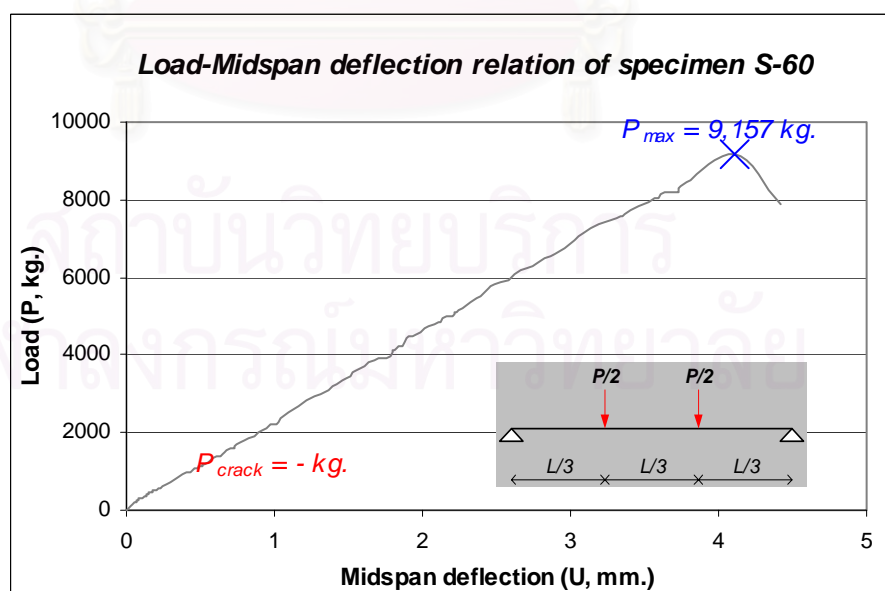
+ = แรงกระทำแตกร้าว, ++ = แรงกระทำคราก, +++ = แรงกระทำแตกหัก, ++++ = แรงกระทำประลัย



รูปที่ ก-33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่มีได้เผาไฟ



รูปที่ ก-34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่เผาไฟ 30 นาที



รูปที่ ก-35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่เผาไฟ 60 นาที

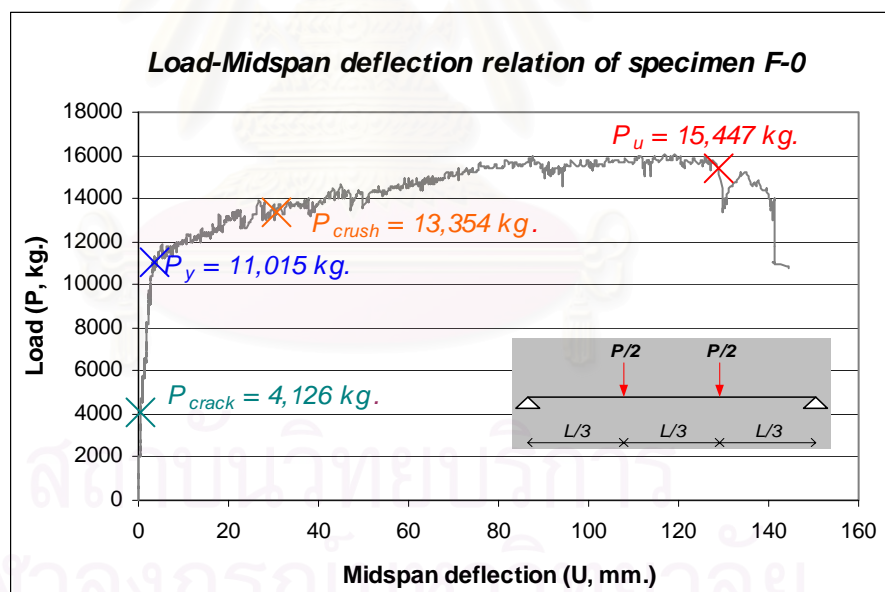


รูปที่ ก-36 ภาพถ่ายแสดงความเสียหายของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนที่ผ่านการเผาไฟ 90 นาที จนไม่อาจทำการทดสอบได้

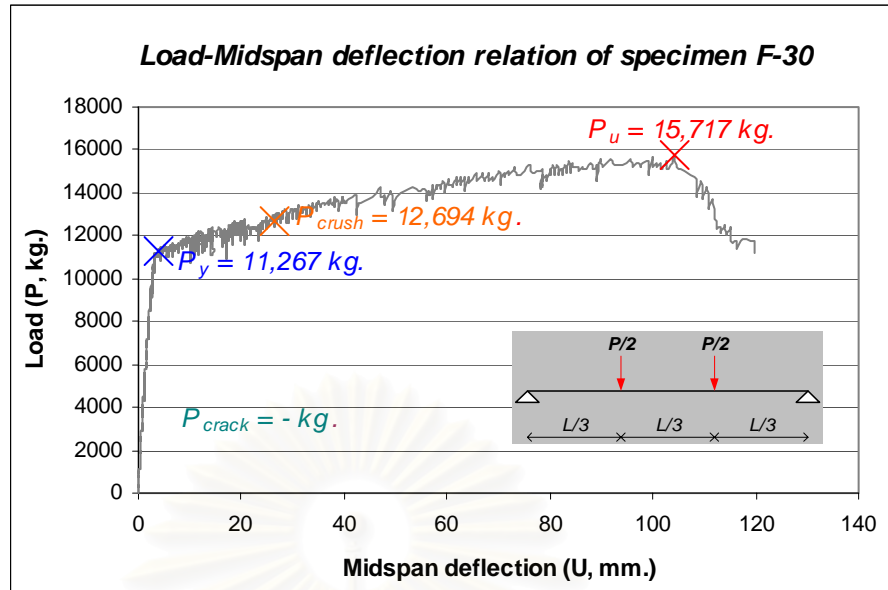
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



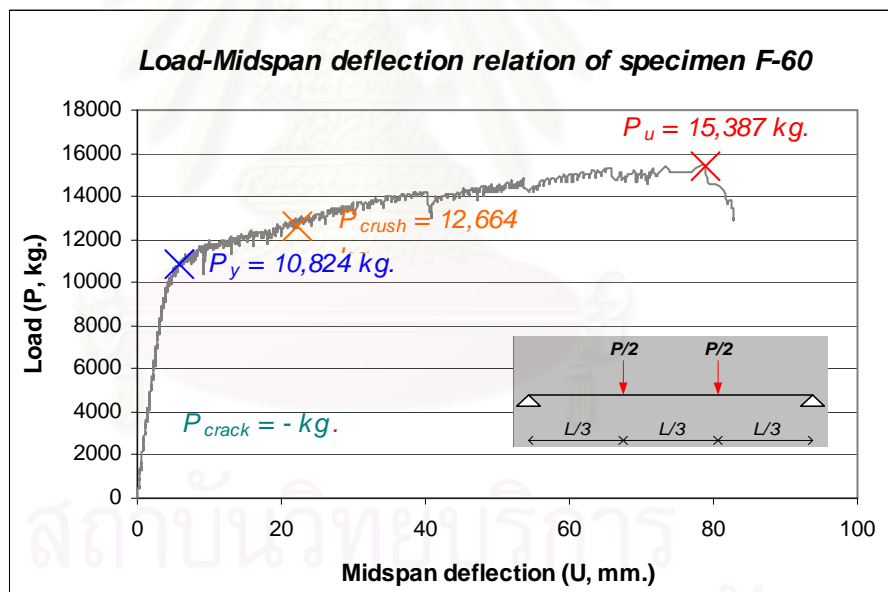
รูปที่ ก-37 ภาพถ่ายแสดงความเสียหายของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟ 120 นาที จนไม่อาจทำการทดสอบได้



รูปที่ ก-38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดที่มีได้เผาไฟ

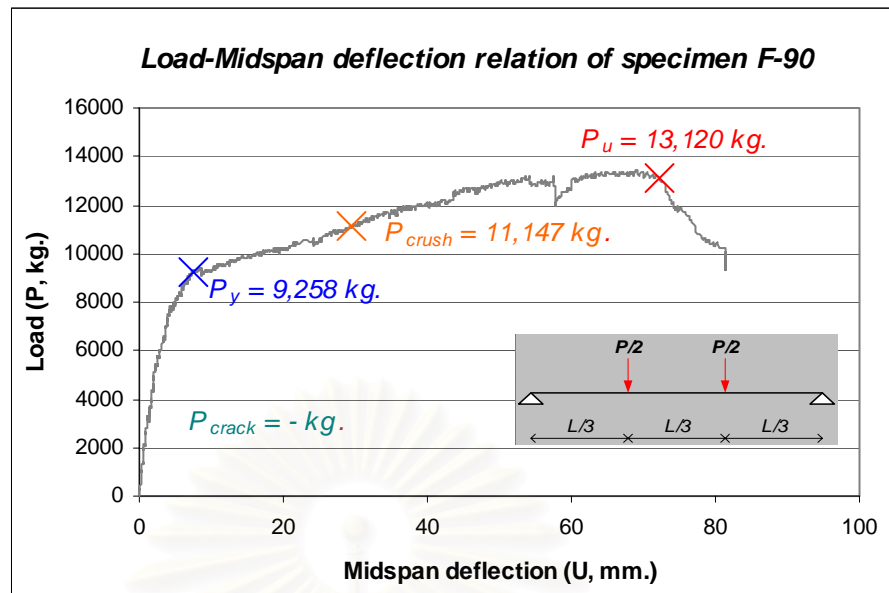


รูปที่ ก-39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟเป็นระยะเวลา 30 นาที



รูปที่ ก-40 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ กึ่งกลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษา พฤติกรรมการรับแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาที

พฤติ



รูปที่ ก-41 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ณ ที่กลางคานของคานตัวอย่างที่ศึกษ
กรรมกรรับแรงดัดที่ผ่านการเผาไฟเป็นระยะเวลา 90 นาที

พฤติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข
การเตรียมตัวอย่าง

ขั้นตอนในการเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย การเตรียมแบบไม้ การเทคอนกรีต การบ่มตัวอย่าง โดยมีรายละเอียดในการเตรียมตัวอย่างดังนี้

ข.1 การเตรียมแบบไม้

รูปที่ ข-1 แสดงตัวอย่างแบบไม้ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม(กรณีศึกษาที่ 1) และรูปที่ ข-2 แสดงแบบไม้ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(กรณีศึกษาที่ 2)



รูปที่ ข-1 ตัวอย่างแบบไม้ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม(กรณีศึกษาที่ 1)



รูปที่ ข-2 ตัวอย่างแบบไม้ที่ใช้ในการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก(กรณีศึกษาที่ 2)

ข.2 ขั้นตอนในการเทคอนกรีต

ลำดับขั้นตอนในการเทคอนกรีต เป็นดังนี้

1. เทคอนกรีตชั้นแรกในคานทั้ง 16 ตัวจนได้ความประมาณลึก 10 ซม. ดังรูปที่ ข-3
2. ทำการจี้คอนกรีตที่เทชั้นแรกในคานทั้ง 16 ตัว ดังรูปที่ ข-4 เก็บตัวอย่างคอนกรีตชุดที่ 1 เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติในภายหลังซึ่งได้แก่ ลูกปุ่นขนาด 15x30 ซม. จำนวน 10 ลูก ดังรูปที่ ข-5 และแท่งคอนกรีตขนาด 10x10x50 ซม. จำนวน 3 ท่อน ดังรูปที่ ข-6
3. เทคอนกรีตชั้นที่สองในคานทั้ง 16 ตัวจนได้ความลึก 20 ซม. และแบ่งชุดทำงานไปเริ่มเทคอนกรีตในตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ดังรูปที่ ข-7 และ ข-8
4. ทำการจี้คอนกรีตที่เทชั้นที่สองในคานทั้ง 16 ตัว ดังรูปที่ ข-9 เก็บตัวอย่างคอนกรีตชุดที่ 2 เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติในภายหลัง ซึ่งได้แก่ ลูกปุ่นขนาด 15x30 ซม. จำนวน 10 ลูก และแท่งคอนกรีตขนาด 10x10x50 ซม. จำนวน 3 ท่อน
5. ทำการติดตั้งเดือยเหล็ก ดังรูปที่ ข-10
6. เทคอนกรีตชั้นที่สามในคานทั้ง 16 ตัวจนได้ความลึก 30 ซม.
7. ทำการจี้คอนกรีตที่เทชั้นที่สามในคานทั้ง 16 ตัว ดังรูปที่ ข-11 เก็บตัวอย่างคอนกรีตชุดที่ 3 เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติในภายหลัง ซึ่งได้แก่ ลูกปุ่นขนาด 15x30 ซม. จำนวน 10 ลูก และแท่งคอนกรีตขนาด 10x10x50 ซม. จำนวน 3 ท่อน แล้วทำการวัดค่าการยุบตัวและค่าปริมาตรฟองอากาศในคอนกรีต
8. ทำการฉาบแต่งผิวหน้าคานตัวอย่าง ดังรูปที่ ข-12 และรูปที่ ข-13 แสดงภาพเมื่อแต่งและฉาบผิวเรียบร้อยแล้ว



รูปที่ ข-3 ภาพการเทคอนกรีตคานชั้นแรก 10 ซม.



รูปที่ ข-4 ภาพการจี้คอนกรีตภายในคานชั้นแรก



รูปที่ ข-5 ภาพการเก็บตัวอย่างลูกปูนขนาด 15x30 ซม.



รูปที่ ข-6 ภาพการเก็บตัวอย่างแท่งคอนกรีตขนาด 10x10x50 ซม.



รูปที่ ข-7 ภาพการเทคอนกรีตและกระทุ้งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม



รูปที่ ข-8 ภาพการแต่งและฉาบผิวตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม



รูปที่ ข-9 ภาพการเทและจี้คอนกรีตที่เทชั้นที่สอง



รูปที่ ข-10 ภาพการติดตั้งเดือยเหล็ก



รูปที่ ข-11 ภาพการเทและจัดคอนกรีตชั้นสุดท้าย



รูปที่ ข-12 ภาพการแต่งและฉาบผิว



รูปที่ ข-13 ภาพแสดงเมื่อแต่งและฉาบผิวเรียบร้อยแล้ว

ข.3 การบ่มตัวอย่าง

ภายหลังจากที่ทำการหล่อคอนกรีตเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการบ่มคอนกรีตให้ได้กำลังตามที่ต้องการ ดังขั้นตอนต่อไปนี้ คือ

1. แกะแบบที่อายุ 3 วัน และย้ายตัวอย่างไปทำการบ่ม
2. ทำการบ่มชื้นด้วยกระสอบจนอายุ 28 วัน ดังรูปที่ ข-14
3. ทิ้งไว้ให้แห้งในอากาศ และคลุมด้วยพลาสติกเพื่อกันฝน ดังรูปที่ ข-15



รูปที่ ข-14 ภาพการบ่มชิ้นด้วยกระสอบ



รูปที่ ข-15 ภาพการคลุมด้วยพลาสติกเพื่อกันฝน

ข.4 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต (concrete mix design)

ในการหล่อคานคอนกรีตสำหรับการทดสอบนั้นจะใช้คอนกรีตผสมเสร็จ(ready mixed) ซึ่งมีอัตราส่วนผสมของคอนกรีตตามใบเสนอส่วนผสมดังตารางที่ ข-1

ตารางที่ ข-1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตผสมเสร็จ

fc' (ksc.) (i)	Mix proportion in 1 m ³ (kg.)				Admixture	Water/ Binder ratio	Slump (cm.)	Product code
	Cementinou s material	Water	Sand	Rock				
240	318	166	(Normal) 770	(3/4" #1) 1130	(CPAC 31401) 670	0.52	7.5- 12.5	MZBA100

ที่มา : ข้อมูลจากใบเสนอส่วนผสมของ บริษัท ผลิตภัณฑ์และวัตถุก่อสร้าง จำกัด (CPAC)

(i) cylindrical strength

ภาคผนวก ค
ภาพจากการทดสอบ



รูปที่ ค-1 ภาพการทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C143
(ซ้าย-การตึงโคน, ขวา-การอ่านค่าการยุบตัว)



รูปที่ ค-2 ภาพการทดสอบปริมาณฟองอากาศในคอนกรีตสดตามมาตรฐาน ASTM C231
(ซ้าย-การเปิดวาล์วเพื่อใส่น้ำ, ขวา-การอัดอากาศและทำการอ่านค่าระดับน้ำ)



รูปที่ ค-3 ภาพการทดสอบค่ากำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39
(ซ้าย-แท่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ, ขวา-การกดแท่งตัวอย่าง)



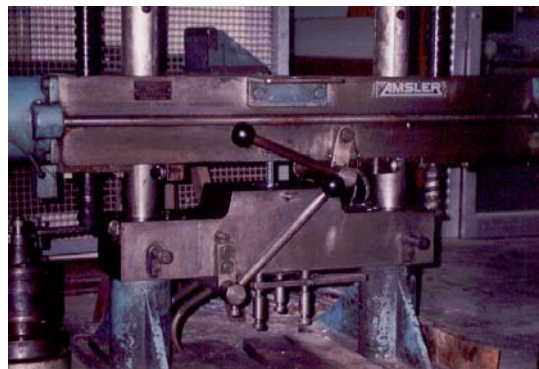
รูปที่ ค-4 ภาพการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ splitting test คอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C496 (ซ้าย-แท่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ, ขวา-การกดแท่งตัวอย่าง)



รูปที่ ค-5 ภาพการทดสอบค่ากำลังรับแรงดึงแบบ flexure one point test ตามมาตรฐาน ASTM C293 (ซ้าย-แท่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ, ขวา-การกดแท่งตัวอย่าง)



รูปที่ ค-6 ภาพการทดสอบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C469 (ซ้าย-แท่งตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ, ขวา-การกดแท่งตัวอย่าง)

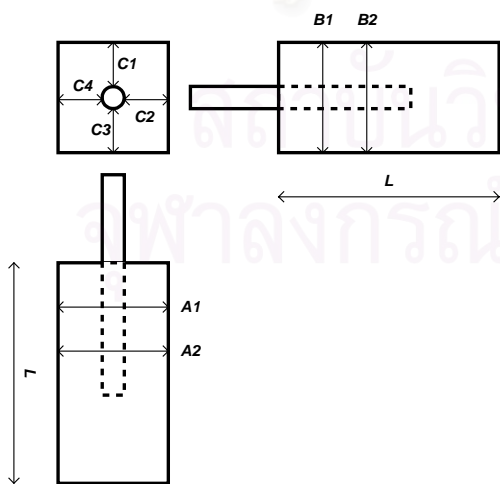


รูปที่ ค-7 ภาพการทดสอบค่ากำลังของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM E8 (ซ้าย-ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ, ขวา-การดึงตัวอย่าง)



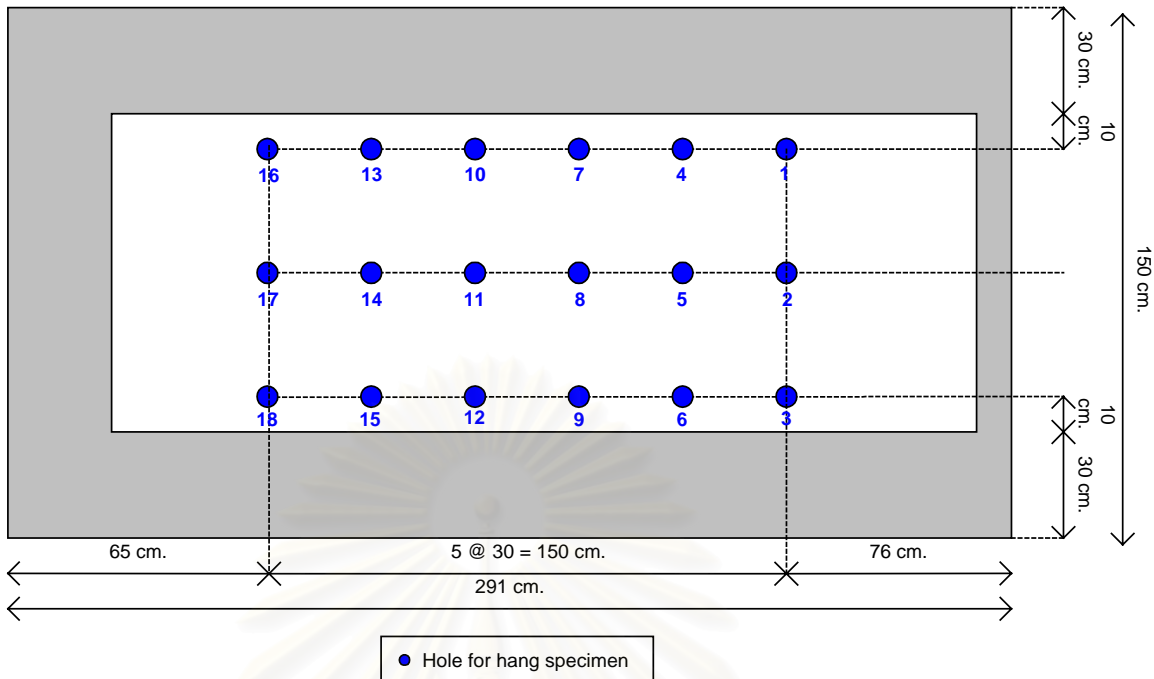
รูปที่ ค-8 การติดหมายเลขให้ตัวอย่างการทดสอบ
กรณีศึกษาที่ 1

รูปที่ ค-9 การวัดขนาดของตัวอย่างการทดสอบกรณี
ศึกษาที่ 1



รูปที่ ค-10 สัญลักษณ์ของระยะต่างๆของตัวอย่างการ
ทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

รูปที่ ค-11 ภาพการทำเครื่องหมาย ณ ตำแหน่งเริ่มต้นของเหล็กใน
คอนกรีตของตัวอย่างการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ ค-12 ภาพแสดงหมายเลขตำแหน่งในการติดตั้งตัวอย่างสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1



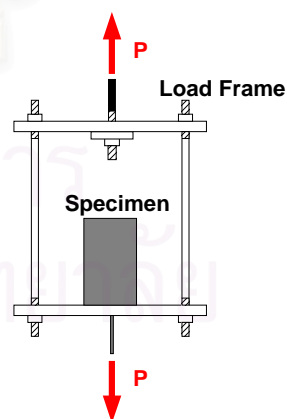
รูปที่ ค-13 ภาพการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับแผ่นพื้นฝ้าเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1



รูปที่ ค-14 ภาพการเผาตัวอย่างและวัดอุณหภูมิในขณะที่เผาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์

ตารางที่ ค-1 รายละเอียดของตำแหน่งในการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับฝาเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1

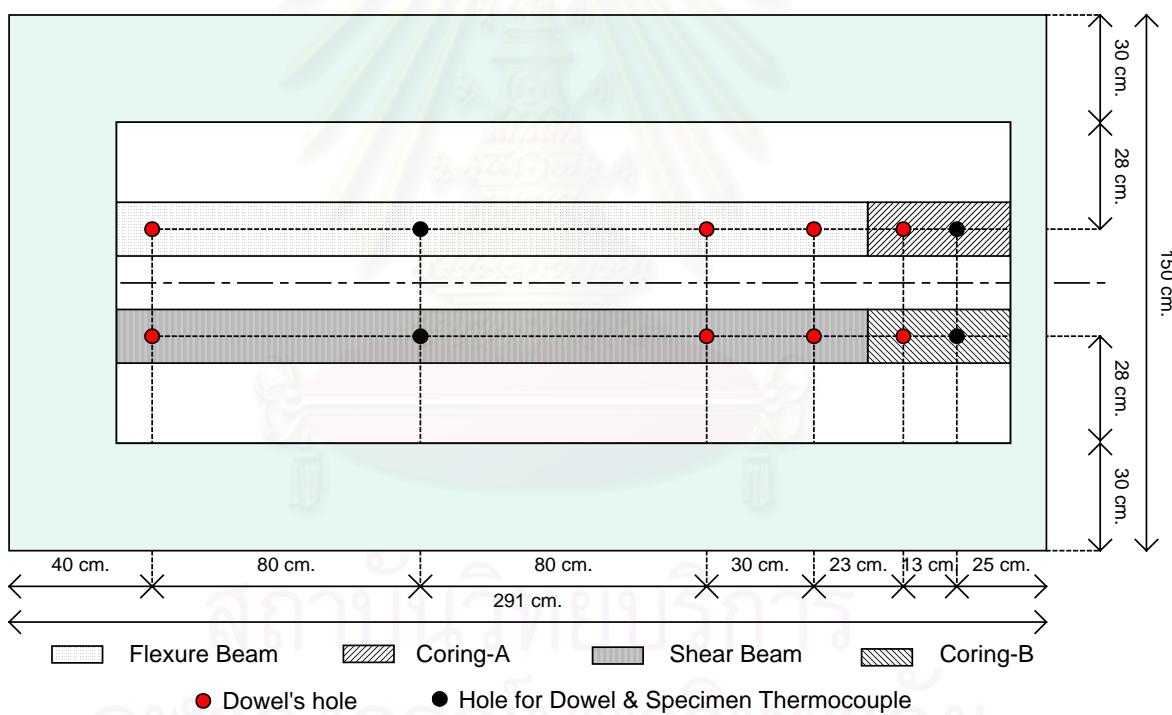
หมายเลขตำแหน่ง	หมายเลขตัวอย่างที่ติดตั้ง	ชนิดของตัวอย่าง
1	19 , 37 , 55	RB15 ระยะหุ้ม 25 mm.
2	20 , 38 , 56	
3	21 , 39 , 57	
4	22 , 40 , 58	DB16 ระยะหุ้ม 25 mm.
5	23 , 41 , 59	
6	24 , 42 , 60	
7	25 , 43 , 61	RB15 ระยะหุ้ม 50 mm.
8	26 , 44 , 62	
9	27 , 45 , 63	
10	28 , 46 , 64	DB16 ระยะหุ้ม 50 mm.
11	29 , 47 , 65	
12	30 , 48 , 66	
13	31 , 49 , 67	RB15 ระยะหุ้ม 75 mm.
14	32 , 50 , 68	
15	33 , 51 , 69	
16	34 , 52 , 70	DB16 ระยะหุ้ม 75 mm.
17	35 , 53 , 71	
18	36 , 54 , 72	



รูปที่ ค-15 ภาพการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวด้วยเครื่อง Amsler universal testing machine 20 tons ของการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1



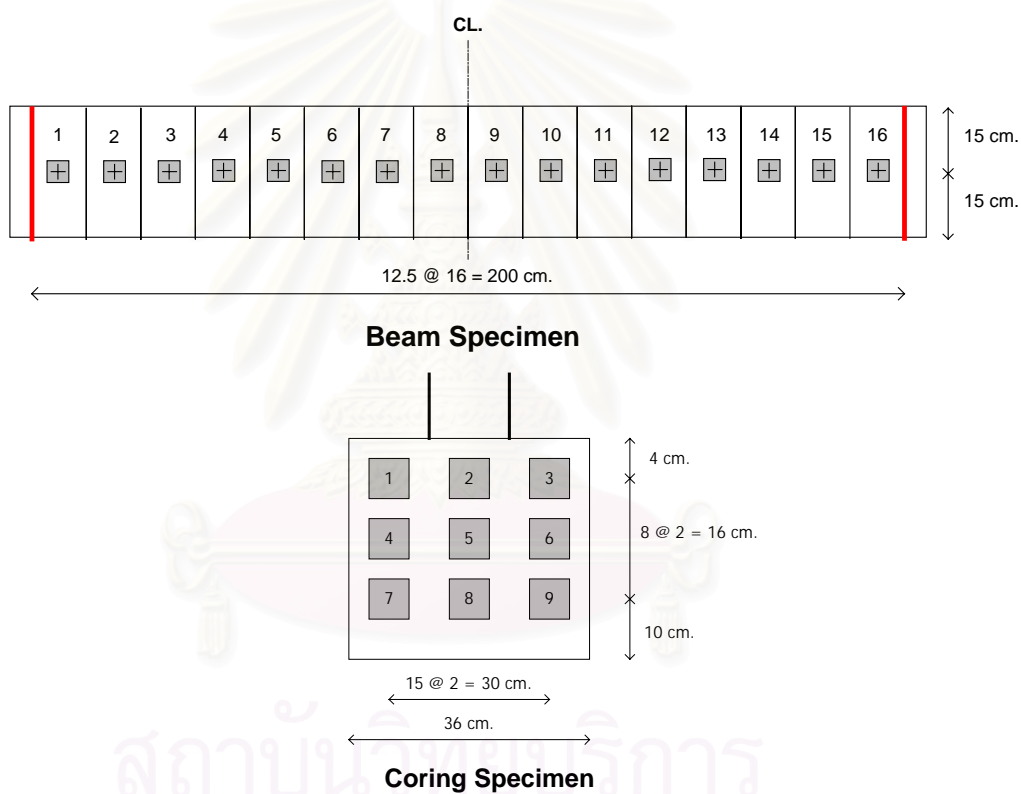
รูปที่ ค-16 ภาพแสดงการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับฝาเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2



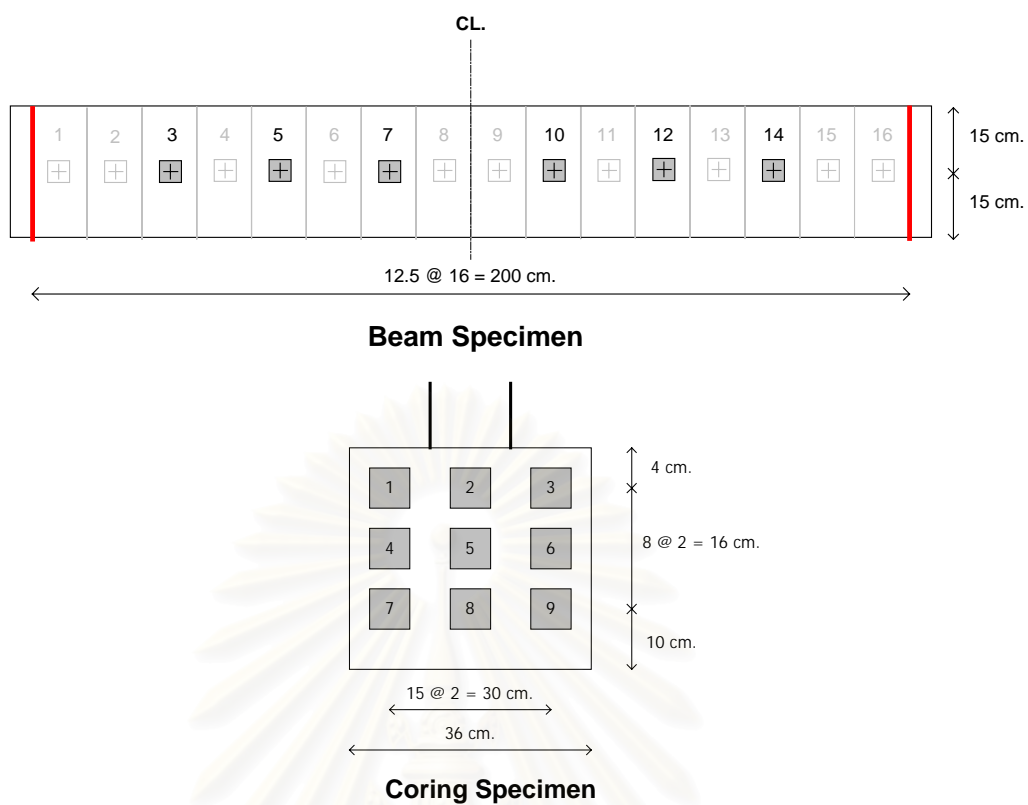
รูปที่ ค-17 แบบการติดตั้งตัวอย่างเข้ากับฝาเตาสำหรับการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2



รูปที่ ค-18 ภาพการหาตำแหน่งเหล็กด้วยเครื่อง rebar locator รูปที่ ค-19 ภาพการกำหนดตำแหน่งในการตรวจวัด



รูปที่ ค-20 ภาพแสดงตำแหน่งในการวัดแบบไม่ทำลายด้วยวิธี rebound hammer ในตัวอย่างคานและตัวอย่างชนิด A และ B



รูปที่ ค-21 ภาพแสดงตำแหน่งในการวัดแบบไม่ทำลายด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity ในตัวอย่างคานและตัวอย่างชนิด A และ B



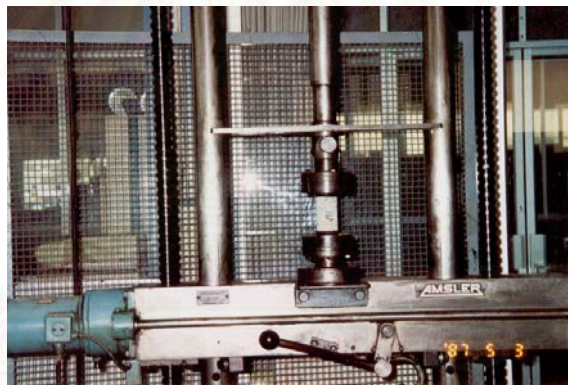
รูปที่ ค-22 การทดสอบด้วยวิธี rebound hammer



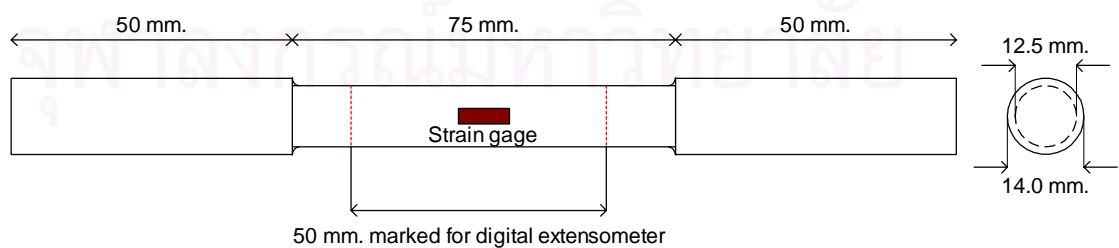
รูปที่ ค-23 การทดสอบด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity



รูปที่ ค-24 ภาพการเจาะลูกคอนกรีตจากตัวอย่างชนิด A และ B ด้วยเครื่องเจาะหิน



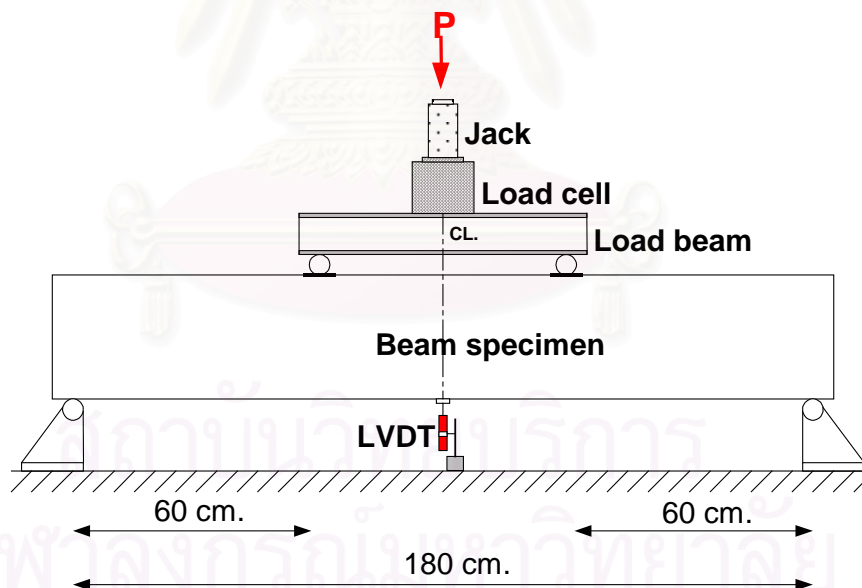
รูปที่ ค-25 ภาพการทดสอบหาค่าลึงอัดของลูกคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C39



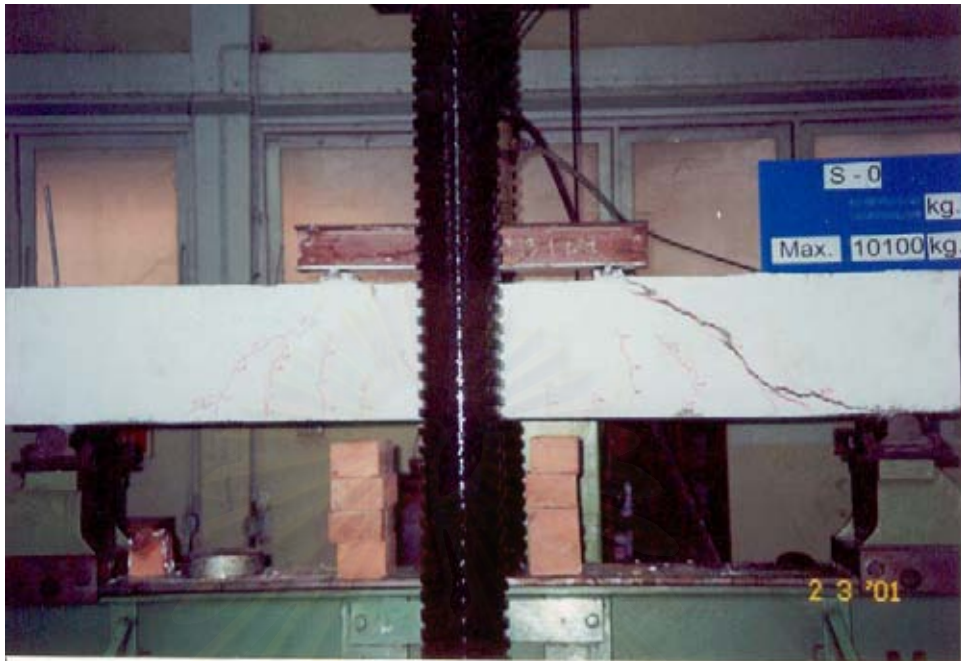
รูปที่ ค-26 แบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังถูกเผาไฟ



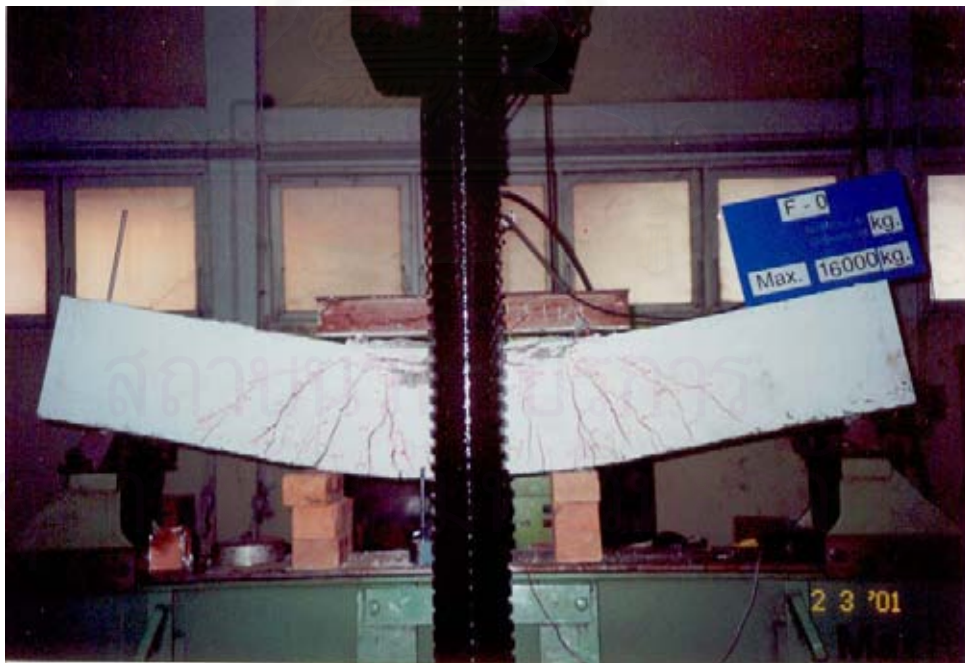
รูปที่ ค-27 ภาพการทดสอบพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังจากถูกเผาไฟตามมาตรฐาน ASTM E8



รูปที่ ค-28 แบบการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ทำการทดสอบ



รูปที่ ค-29 ภาพจากการทดสอบคาน S-0



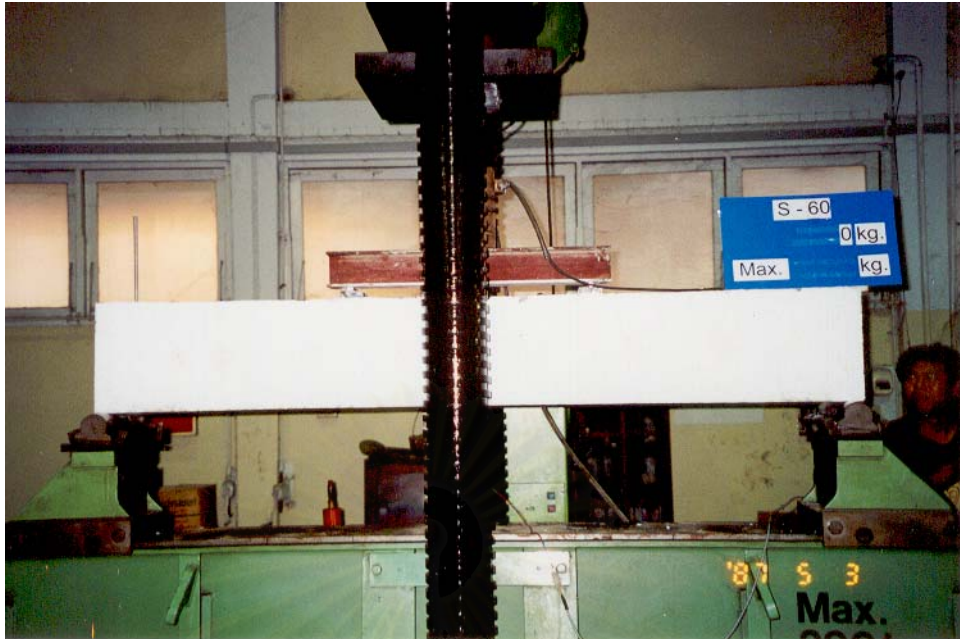
รูปที่ ค-30 ภาพจากการทดสอบคาน F-0



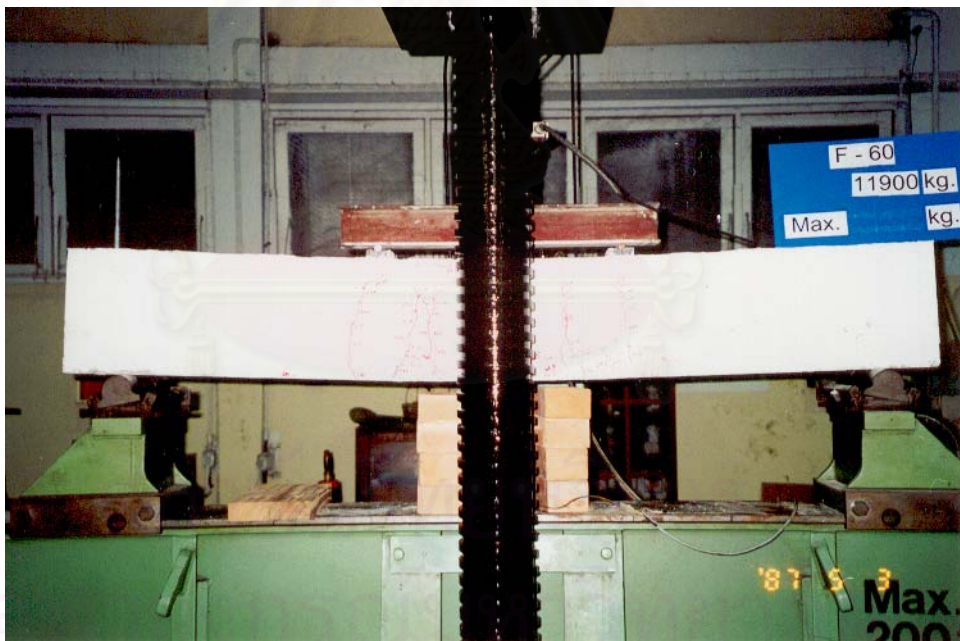
รูปที่ ค-31 ภาพจากการทดสอบคาน S-30



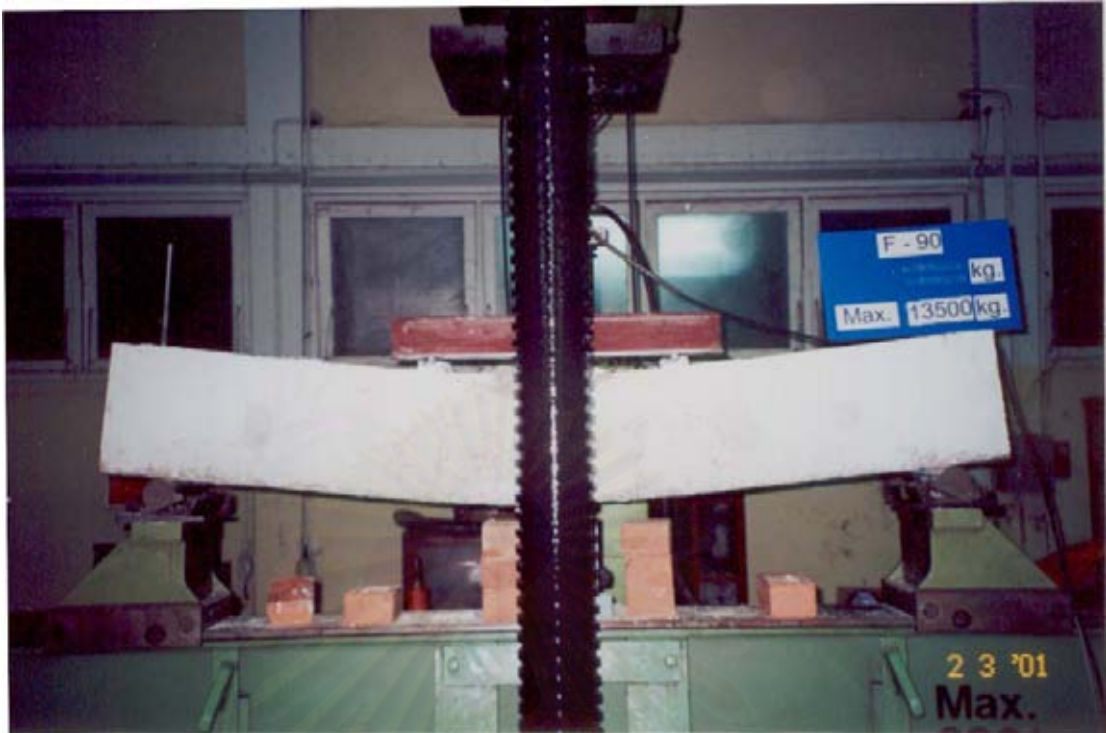
รูปที่ ค-32 ภาพจากการทดสอบคาน F-30



รูปที่ ค-33 ภาพจากการทดสอบคาน S-60



รูปที่ ค-34 ภาพจากการทดสอบคาน F-60

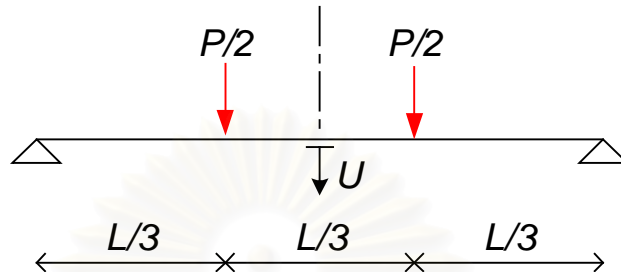


รูปที่ ค-35 ภาพจากการทดสอบคาน F-90

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณ

ง.1 การคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งจากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง



รูปที่ ง-1 ภาพประกอบการคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งจากผลการทดสอบหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานตัวอย่าง

สมการ ง-1 แสดงการหาค่าโมเมนต์(M)ที่กึ่งกลางคาน ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวแสดงในรูปที่ ง-1 แสดงได้ตั้งสมการที่ ง-2 ซึ่งสามารถหาค่าความแข็งแกร่งเชิงตัด(EI) เมื่อทราบค่าแรงกระทำ(P), ความยาวระหว่างฐานรองรับ(L) และ การโก่งตัวที่กึ่งกลางของคาน(U) ส่วนค่าความโค้ง(ϕ)สามารถหาได้ตั้งสมการที่ ง-3

$$M = \frac{PL}{6} \quad (\text{ง-1})$$

$$EI = \frac{23}{1296} \cdot \frac{PL^3}{U} \quad (\text{ง-2})$$

$$\phi = \frac{M}{EI} \quad (\text{ง-3})$$

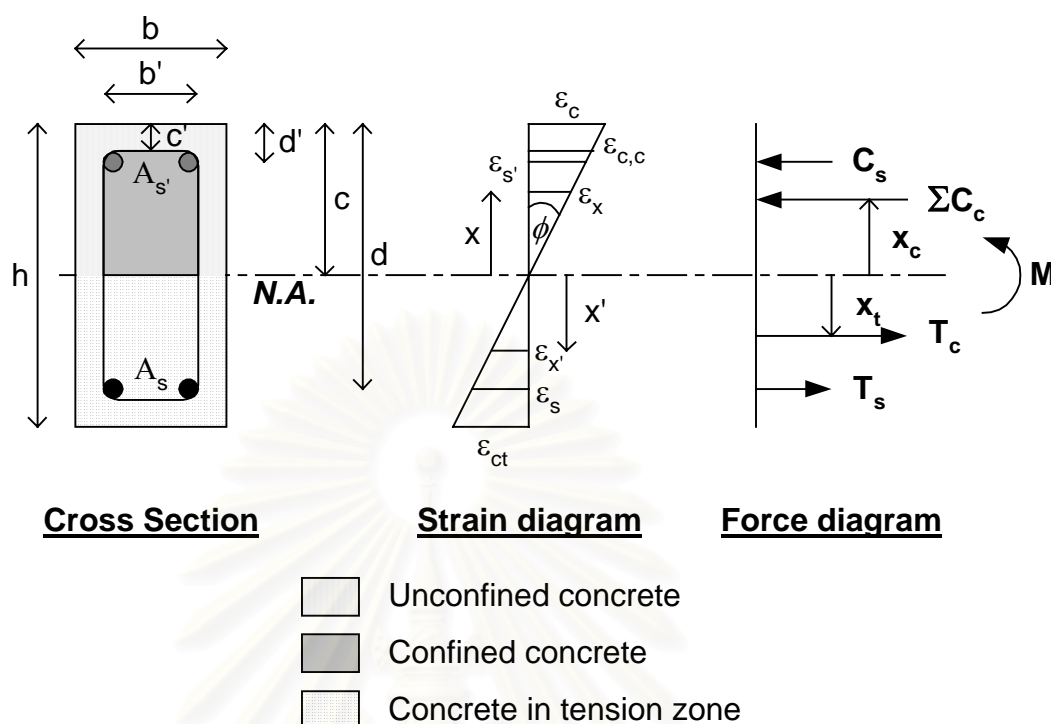
ตัวอย่างการคำนวณ จากข้อมูลผลการทดสอบคาน S-0 ได้ว่า ที่แรงกระทำ 899 กก. คานตัวอย่างมีการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานเท่ากับ 0.089 มม. เมื่อความยาวระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 1.80 ม. สามารถคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้ง ได้ดังนี้

1. หาค่าโมเมนต์จากสมการ ง-1
$$M = \frac{899 \cdot 1.8}{6} = 270 \text{ kg.} - \text{m.}$$

2. หาค่าความแข็งแกร่งเชิงตัดจากสมการ ง-2
$$EI = \frac{23}{1296} \cdot \frac{899 \cdot 1.8^3}{8.9 \times 10^{-5}} = 1.05 \times 10^6 \text{ kg.} - \text{m.}^2$$

2. หาค่าความโค้งจากสมการ ง-3
$$\frac{M}{EI} = \frac{270}{1.05 \times 10^6} = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m.}^{-1}$$

ง.2 การคำนวณค่าความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับความโค้งด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง



รูปที่ ง-2 ภาพประกอบการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง

รูปที่ ง-2 แสดงภาพประกอบการคำนวณ จากข้อมูลของคานตัวอย่างที่ใช้ทดสอบซึ่งมีขนาดหน้าตัด 15x30 ซม. ใช้เหล็ก DB16(SD30) และ DB12(SD30) อย่างละ 2 เส้นเป็นเหล็กรับแรงดึงและ แรงอัดตามลำดับ มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม 2.5 ซม. และใช้เหล็ก RB6(SD24) เป็นเหล็กปลอกโดยมีระยะห่าง 12.5 ซม. กำลังอัดของคอกกรีตที่ 28 วันเท่ากับ 306 กก./ซม.² กำลังดึงครากและกำลังดึงประลัยของเหล็กเสริมเท่ากับ 3,433 และ 5351 กก./ซม.²ตามลำดับ จากข้อมูลข้างต้นสามารถกำหนดค่าที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

ระยะในหน้าตัด

$$h = 30 \text{ ซม.}$$

$$d = 30 - 2.5 - 1.6/2 = 26.7 \text{ ซม.}$$

$$d' = 2.5 + 1.2/2 = 3.1 \text{ ซม.}$$

$$c' = 2.5 - 0.6 = 1.9 \text{ ซม.}$$

$$b = 15 \text{ ซม.}$$

$$b' = 15 - 2(1.9) = 11.2 \text{ ซม.}$$

คุณสมบัติของเหล็กเสริม

$$f_y = 3,433 \text{ กก./ซม.}^2, f_{su} = 5,351 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$E_s = 2,000,000 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$A_s = 4.02 \text{ ซม.}^2$$

$$A_{s'} = 2.26 \text{ ซม.}^2$$

$$\epsilon_{sh} = 0.02$$

$$\epsilon_{su} = 0.1$$

คุณสมบัติของคอนกรีต

$$f_c' = 306 \text{ กก./ซม.}^2, \epsilon_0 = 0.002$$

$$E_c = 15210 \sqrt{f_c'} = 266,066 \text{ กก./ซม.}^2$$

$$f_{cr} = 2 \sqrt{f_c'} = 35 \text{ กก./ซม.}^2$$

กำหนด $\varepsilon_c = 0.0005$ และสัณฐานค่า $c = 7.860$ ซม. จากสมการที่ 2.2 จะได้ว่า $\phi = 6.361 \times 10^{-3} \text{ ม.}^{-1}$ และสามารถคำนวณหาค่าความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆได้ดังนี้

ความเครียดที่ระดับต่างๆ

$$\varepsilon_{ct} = 1.408 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_s = 1.198 \times 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{s'} = 3.028 \times 10^{-4}$$

$$\varepsilon_{cc} = 3.791 \times 10^{-4}$$

จากความเครียดข้างต้นสามารถนำไปคำนวณหาค่าแรงได้ดังนี้

1. แรงดึงจากคอนกรีตส่วนที่รับแรงดึง (T_c)

จากสมการที่ 2.7 เมื่อ $\varepsilon_{cr} = 1.315 \times 10^{-4}$ ซึ่ง $\varepsilon_{ct} > \varepsilon_{cr}$ ได้ว่า

$$\begin{aligned} T_c &= \int E_c \cdot \varepsilon_{x'} \cdot dA = \int E_c \cdot \varepsilon_{x'} \cdot b dx' = \frac{b \cdot E_c}{\phi} \int \varepsilon_{x'} \cdot \varepsilon_{x'} d\varepsilon_{x'} \\ &= \frac{15 \cdot 266066}{6.361 \times 10^{-5}} \int_0^{\varepsilon_{cr}} \varepsilon_{x'} \cdot \varepsilon_{x'} d\varepsilon_{x'} \\ &= 4.75 \times 10^{-2} \rightarrow 0 \text{ kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_t &= \frac{\int E_c \cdot \varepsilon_{x'} \cdot x' dx'}{\int E_c \cdot \varepsilon_{x'} dx'} = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{\int \varepsilon_{x'} \cdot \varepsilon_{x'} d\varepsilon_{x'}}{\int \varepsilon_{x'} d\varepsilon_{x'}} \\ &= \frac{1}{6.361 \times 10^{-5}} \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_{cr}} \varepsilon_{x'} \cdot \varepsilon_{x'} d\varepsilon_{x'}}{\int_0^{\varepsilon_{cr}} \varepsilon_{x'} d\varepsilon_{x'}} \\ &= 1.38 \text{ cm.} \end{aligned}$$

2. แรงดึงจากเหล็กเสริมรับแรงดึง (T_s)

จากสมการที่ 2.10 เมื่อ $\varepsilon_y = 1.717 \times 10^{-3}$ ซึ่ง $\varepsilon_s < \varepsilon_y$ ได้ว่า

$$\begin{aligned} T_s &= \int E_s \cdot \varepsilon_s dA = E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s = 2 \times 10^6 \cdot 1.198 \times 10^{-3} \cdot 4.02 \\ &= 9638 \text{ kg.} \end{aligned}$$

3. แรงอัดจากเหล็กเสริมรับแรงอัด (C_s)

จากสมการที่ 2.10 เมื่อ $\varepsilon_y = 1.717 \times 10^{-3}$ ซึ่ง $\varepsilon_{s'} < \varepsilon_y$ ได้ว่า

$$\begin{aligned} C_s &= \int E_s \cdot \varepsilon_s dA = E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s = 2 \times 10^6 \cdot 3.028 \times 10^{-4} \cdot 2.26 \\ &= 1370 \text{ kg.} \end{aligned}$$

4. แรงอัดจากคอนกรีตที่รับแรงอัด (ΣC_c)

4.1 แรงอัดของคอนกรีตที่ไม่คิดผลของการโอบรัดของเหล็กปลอก

จากสมการที่ 2.8 เมื่อ $\varepsilon_c = 5 \times 10^{-4}$ ซึ่ง $\varepsilon_c < \varepsilon_0$ ได้ว่า

$$C_{un,all} = \frac{b}{\phi} \int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x = \frac{15 \cdot 306}{6.361 \times 10^{-5}} \int_0^{\varepsilon_c} \left(\frac{2\varepsilon_x}{0.002} - \left(\frac{\varepsilon_x}{0.002} \right)^2 \right) d\varepsilon_x$$

$$= 8268 \text{ kg.}$$

$$x_{un,all} = \frac{\int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot x dx}{\int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) dx} = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{\int \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot \varepsilon_x d\varepsilon_x}{\int \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x}$$

$$= \frac{1}{6.361 \times 10^{-5}} \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_c} \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot \varepsilon_x d\varepsilon_x}{\int_0^{\varepsilon_c} \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x}$$

$$= 5.18 \text{ cm.}$$

จากสมการที่ 2.8 เมื่อ $\varepsilon_{cc} = 3.791 \times 10^{-4}$ ซึ่ง $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_0$ ได้ว่า

$$C_{un,core} = \frac{b'}{\phi} \int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x = \frac{11.2 \cdot 306}{6.361 \times 10^{-5}} \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(\frac{2\varepsilon_x}{0.002} - \left(\frac{\varepsilon_x}{0.002} \right)^2 \right) d\varepsilon_x$$

$$= 3628 \text{ kg.}$$

$$x_{un,core} = \frac{\int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot x dx}{\int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) dx} = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{\int \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot \varepsilon_x d\varepsilon_x}{\int \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x}$$

$$= \frac{1}{6.361 \times 10^{-5}} \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot \varepsilon_x d\varepsilon_x}{\int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x}$$

$$= 3.94 \text{ cm.}$$

4.2 แรงอัดของคอนกรีตที่คิดผลของการโอบรัดของเหล็กปลอก

จากสมการที่ 2.9 เมื่อ $\varepsilon_{cc} = 3.791 \times 10^{-4}$ ซึ่ง $\varepsilon_{cc} < \varepsilon_0$ ได้ว่า

$$C_{con} = \frac{b'}{\phi} \int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x = \frac{11.2 \cdot 306}{6.361 \times 10^{-5}} \int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(\frac{2\varepsilon_x}{0.002} - \left(\frac{\varepsilon_x}{0.002} \right)^2 \right) d\varepsilon_x$$

$$= 3628 \text{ kg.}$$

$$x_{con} = \frac{\int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot x dx}{\int f_c' \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) dx} = \frac{1}{\phi} \cdot \frac{\int \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot \varepsilon_x d\varepsilon_x}{\int \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x}$$

$$= \frac{1}{6.361 \times 10^{-5}} \cdot \frac{\int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \cdot \varepsilon_x d\varepsilon_x}{\int_0^{\varepsilon_{cc}} \left(\frac{2\varepsilon_x}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) d\varepsilon_x}$$

$$= 3.94 \text{ cm.}$$

แรงอัดลัพธ์และแกนของแรงอัดลัพธ์ของคอนกรีตส่วนที่รับแรงอัด มีค่าคือ

$$\Sigma C_c = C_{un,all} - C_{un,core} + C_{con} = 8268 - 3628 + 3628 = 8268 \text{ kg.}$$

$$x_{ct} = \frac{C_{un,all} \cdot x_{un,all} - C_{un,core} \cdot x_{un,core} + C_{con} \cdot x_{con}}{C_{un,all} - C_{un,core} + C_{con}}$$

$$= \frac{8268 \cdot 5.18 - 3628 \cdot 3.94 + 3628 \cdot 3.94}{8268}$$

$$= 5.18 \text{ cm.}$$

ตรวจสอบสมดุลย์ของแรงอัดและแรงดึงบนหน้าตัด ได้ดังนี้

$$\Sigma C = \Sigma T$$

$$C_s + \Sigma C_c = T_c + T_s$$

$$1370 + 8268 = 0 + 9638$$

$$9638 = 9638 \quad OK!$$

แสดงว่าค่า c ที่สมมติขึ้นเป็นค่าที่ถูกต้อง สามารถหาโมเมนต์ได้จากสมการที่ 2.6

$$M = C_s(d - d') + \Sigma C_c(d - c + x_c) - T_c(d - c - x_t)$$

$$= 1370(26.7 - 3.1) + 8268(26.7 - 7.860 + 5.18) - 0$$

$$= 230932 \text{ kg.} - \text{cm.} = 2309 \text{ kg.} - \text{m.}$$

ตารางที่ ง-1 ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง
ของรูปที่ 5-22 ถึง 5-25

ความเครียดที่ผิวบน ของคอนกรีต	ระยะแกนสะเทินจาก ผิวบน (ซม.)	ความเค้นในเหล็ก เสริมรับแรงดึง (กก./ซม. ²)	ความโค้ง (ϕ , ม. ⁻¹)	โมเมนต์ (M, กก.-ม.)
0.00E+00	13.350	0	0.000E+00	0
1.43E-05	14.816	23	9.622E-05	109
2.85E-05	14.825	46	1.926E-04	219
4.29E-05	14.833	69	2.890E-04	328
5.72E-05	14.842	91	3.855E-04	437
7.16E-05	14.851	114	4.822E-04	546
8.60E-05	14.859	137	5.790E-04	655
1.00E-04	14.868	160	6.759E-04	763
1.15E-04	14.877	183	7.729E-04	872
1.30E-04	14.886	206	8.700E-04	980
3.00E-04	7.759	1465	3.866E-03	1,414
4.00E-04	7.809	1935	5.122E-03	1,867
5.00E-04	7.860	2397	6.361E-03	2,309
6.00E-04	7.913	2849	7.583E-03	2,742
7.00E-04	7.966	3292	8.787E-03	3,165
8.00E-04	7.359	3433	1.087E-02	3,323*
9.00E-04	6.629	3433	1.358E-02	3,350
1.00E-03	6.062	3433	1.650E-02	3,371
1.00E-03	6.062	3433	1.650E-02	3,371
1.00E-03	6.062	3433	1.650E-02	3,371
6.10E-03	4.315	4313	1.414E-01	4,124
8.00E-03	4.953	4483	1.615E-01	4,227
8.00E-03	4.953	4483	1.615E-01	4,227
9.00E-03	5.190	4576	1.734E-01	4,294
1.00E-02	5.422	4650	1.844E-01	4,343
1.50E-02	6.694	4828	2.241E-01	4,387
2.00E-02	8.069	4865	2.479E-01	4,280

* = โมเมนต์คราก

ตารางที่ ง-2 ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง
ของรูปที่ 5-30

ความเครียดที่ผิวบน ของคอนกรีต	ระยะแกนสะเทินจาก ผิวบน (ซม.)	ความเค้นในเหล็ก เสริมรับแรงดึง (กก./ซม. ²)	ความโค้ง (ϕ , ม. ⁻¹)	โมเมนต์ (M, กก.-ม.)
0.00E+00	13.350	0	0.000E+00	0
1.45E-05	14.934	23	9.698E-05	106
2.90E-05	14.943	46	1.941E-04	212
4.35E-05	14.952	68	2.913E-04	318
5.81E-05	14.960	91	3.886E-04	424
7.28E-05	14.969	114	4.860E-04	529
8.74E-05	14.978	137	5.835E-04	635
1.02E-04	14.987	160	6.812E-04	740
1.17E-04	14.996	182	7.790E-04	845
1.32E-04	15.004	205	8.769E-04	950
4.00E-04	7.983	1876	5.010E-03	1,805
4.00E-04	7.983	1876	5.010E-03	1,805
5.00E-04	8.035	2323	6.223E-03	2,233
6.00E-04	8.088	2761	7.418E-03	2,652
7.00E-04	8.142	3191	8.597E-03	3,060
8.00E-04	7.633	3376	1.048E-02	3,256*
9.00E-04	6.867	3376	1.311E-02	3,285
1.00E-03	6.273	3376	1.594E-02	3,306
6.00E-03	4.301	4221	1.395E-01	4,043
1.00E-02	5.524	4539	1.810E-01	4,235
1.50E-02	6.822	4716	2.199E-01	4,278
2.00E-02	8.229	4750	2.430E-01	4,168

* = โมเมนต์คราก

ตารางที่ 3-3 ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง
ของรูปที่ 5-31

ความเครียดที่ผิวบน ของคอนกรีต	ระยะแกนสะเทินจาก ผิวบน (ซม.)	ความเค้นในเหล็ก เสริมรับแรงดึง (กก./ซม. ²)	ความโค้ง (ϕ , ม. ⁻¹)	โมเมนต์ (M, กก.-ม.)
0.00E+00	13.350	0	0.000E+00	0
1.49E-05	15.130	23	9.826E-05	101
2.98E-05	15.139	45	1.966E-04	201
4.47E-05	15.148	68	2.951E-04	302
5.97E-05	15.157	91	3.937E-04	402
7.47E-05	15.166	114	4.925E-04	502
8.97E-05	15.175	136	5.913E-04	603
1.05E-04	15.184	159	6.903E-04	703
1.20E-04	15.193	182	7.894E-04	802
1.35E-04	15.202	204	8.886E-04	902
4.00E-04	8.278	1780	4.832E-03	1,707
4.00E-04	8.278	1780	4.832E-03	1,707
5.00E-04	8.331	2205	6.002E-03	2,112
6.00E-04	8.385	2621	7.156E-03	2,508
7.00E-04	8.440	3029	8.294E-03	2,894
8.00E-04	8.247	3335	9.701E-03	3,192*
9.00E-04	7.402	3335	1.216E-02	3,222
1.00E-03	6.746	3335	1.482E-02	3,246
6.00E-03	4.340	4151	1.382E-01	3,982
1.00E-02	5.717	4421	1.749E-01	4,115
1.50E-02	7.068	4597	2.122E-01	4,157
2.00E-02	8.531	4626	2.345E-01	4,042

* = โมเมนต์คราก

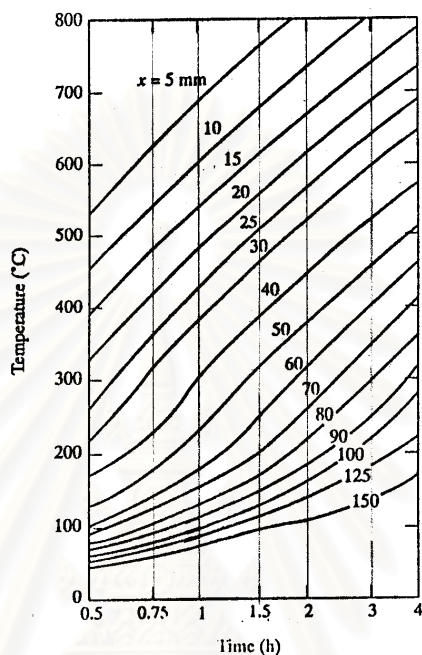
ตารางที่ ง-4 ผลการการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความโค้งและโมเมนต์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง
ของรูปที่ 5-32

ความเครียดที่ผิวบน ของคอนกรีต	ระยะแกนสะเทินจาก ผิวบน (ซม.)	ความเค้นในเหล็ก เสริมรับแรงดึง (กก./ซม. ²)	ความโค้ง (ϕ , ม. ⁻¹)	โมเมนต์ (M, กก.-ม.)
0.00E+00	13.350	0	0.000E+00	0
1.52E-05	15.303	23	9.941E-05	96
3.05E-05	15.312	45	1.989E-04	192
4.57E-05	15.321	68	2.986E-04	288
6.11E-05	15.330	91	3.984E-04	384
7.64E-05	15.339	113	4.983E-04	480
9.18E-05	15.348	136	5.983E-04	576
1.07E-04	15.358	158	6.985E-04	671
1.23E-04	15.367	181	7.987E-04	767
1.38E-04	15.376	204	8.992E-04	862
4.00E-04	8.544	1700	4.682E-03	1,625
4.00E-04	8.544	1700	4.682E-03	1,625
5.00E-04	8.597	2106	5.816E-03	2,010
6.00E-04	8.652	2503	6.935E-03	2,387
7.00E-04	8.510	2832	8.226E-03	2,704*
8.00E-04	7.500	2832	1.067E-02	2,735
9.00E-04	6.742	2832	1.335E-02	2,757
1.00E-03	6.157	2832	1.624E-02	2,774
6.00E-03	4.051	3638	1.481E-01	3,513
1.00E-02	5.057	3934	1.977E-01	3,702
1.50E-02	6.129	4096	2.448E-01	3,778
2.00E-02	7.380	4130	2.710E-01	3,712

* = โมเมนต์คราก

ง.3 การคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัดขณะทำการเผาด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนจากผลการทดสอบของ Abrams และ Gustaffero

รูปที่ ง-3 แสดงกราฟผลการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำจากวัสดุคาร์บอนेटโดยเผาไฟด้านเดียวของ Abrams M. S., Gustaffero A. H.[23] ซึ่งจุดต่างๆของกราฟดังกล่าวสามารถหาได้โดยการ digitize ซึ่งได้ผลดังตารางที่ ง-5



รูปที่ ง-3 กราฟผลการทดสอบการกระจายตัวของอุณหภูมิในแผ่นพื้นคอนกรีตที่ทำจากวัสดุคาร์บอนेटโดยเผาไฟด้านเดียวของ Abrams M. S., Gustaffero A. H.

ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัดของคานตัวอย่าง ในการทำคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัดทำโดยการแบ่งหน้าตัดออกเป็นส่วน ๆ โดยอาศัยการแบ่งโหนด ซึ่งในการคำนวณเลือกแบ่งโหนดที่ละ 5 มม. และเนื่องจากหน้าตัดมีความสมมาตรจึงทำการคำนวณเพียงครึ่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ ง-4 กำหนดให้คำนวณหาอุณหภูมิในหน้าตัดที่ตำแหน่ง $(x,y) = (40,40)$ มม. เมื่อเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาทีตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) เท่ากับ 30°C มีขั้นตอนในการคำนวณดังนี้

1. คำนวณค่า T_F ดังสมการที่ 2.12 ได้ว่า

$$T_F = \frac{1}{60} \int_0^{60} [30 + 345 \cdot \text{Log}(8t + 1)] dt = 807^\circ\text{C}$$

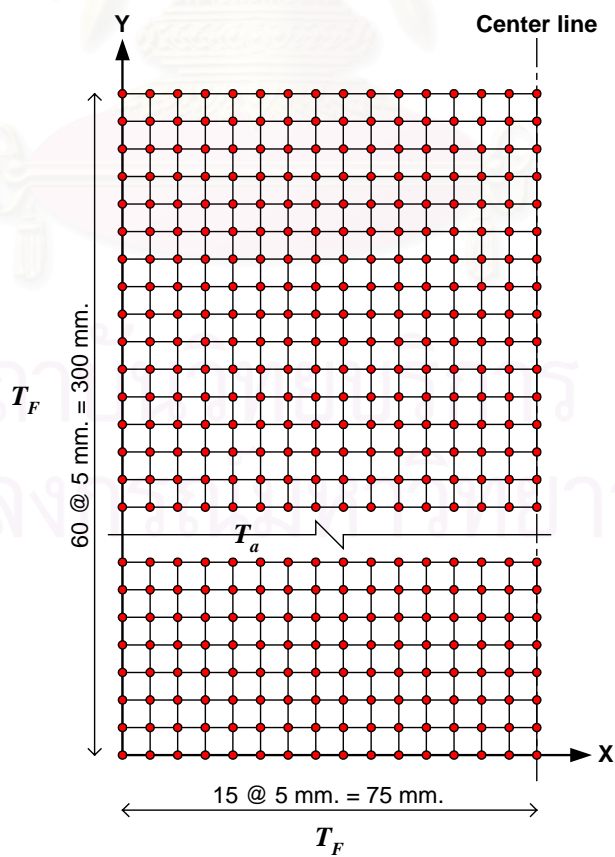
2. จากตารางที่ ง-5 ได้ว่าที่เวลาเผาไฟ 60 นาที $T_{40} = 309^\circ\text{C}$ สามารถหาค่า $T_{(40,40)}$ ได้ดังสมการที่ 2.11 คือ

$$\frac{807 - T_{(40,40)}}{807 - 30} = \frac{807 - 309}{807 - 30} \times \frac{807 - 309}{807 - 30}$$

$$T_{(40,40)} = 487^\circ\text{C}$$

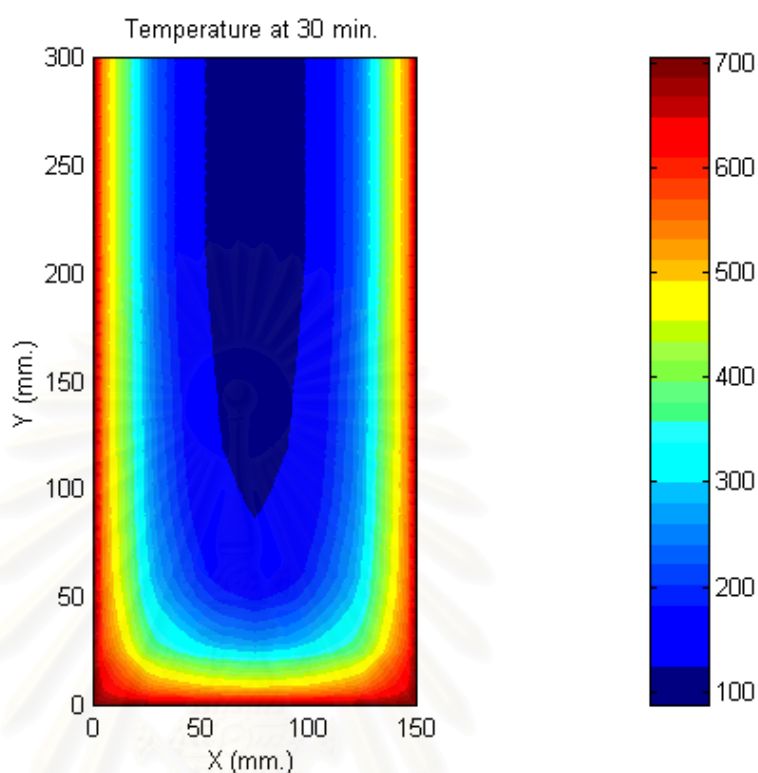
ตารางที่ ง-5 ข้อมูลอุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)จากการ digitize กราฟรูปที่ ง-3

ความหนา (x, มม.)	ระยะเวลาที่เผาไฟ (นาที)						
	30	45	60	90	120	180	240
5	531	627	690	767	-	-	-
10	455	544	604	680	734	-	-
15	392	485	541	614	671	744	790
20	332	422	485	561	617	690	737
25	262	365	432	511	568	644	690
30	219	322	385	468	524	601	647
40	173	232	309	392	451	528	574
50	129	179	236	322	382	461	515
60	103	143	179	256	322	408	468
70	93	126	156	202	266	352	418
80	80	106	133	173	222	302	365
90	70	93	113	149	189	252	322
100	63	80	96	129	166	222	282
125	53	73	90	116	143	186	226
150	46	60	73	96	110	143	173

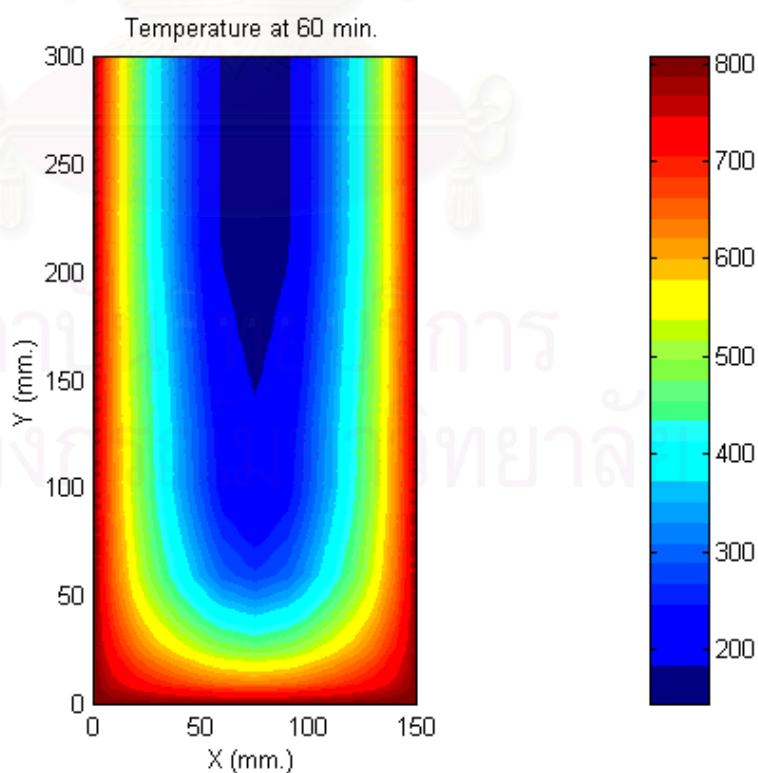


รูปที่ ง-4 การแบ่งโหนดในหน้าตัดคานตัวอย่างที่ทำการคำนวณ

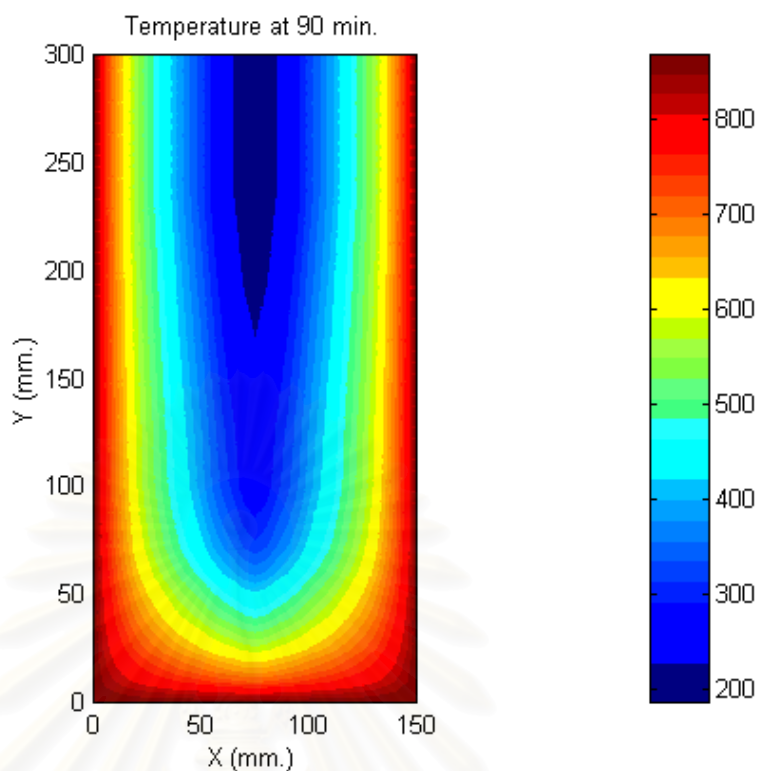
ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 30, 60, 90 และ 120 ที่เผตามกราฟไฟ มาตรฐาน ASTM E119 แสดงดังรูปที่ ง-5 ถึง ง-8 ตามลำดับ



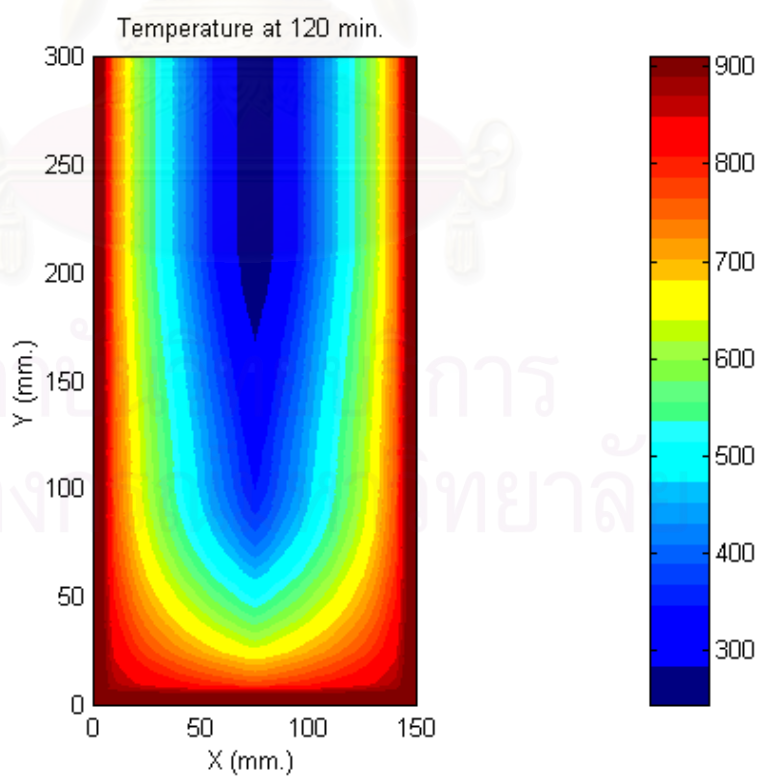
รูปที่ ง-5 ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 30 นาทีที่เผตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119



รูปที่ ง-6 ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 60 นาทีที่เผตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119

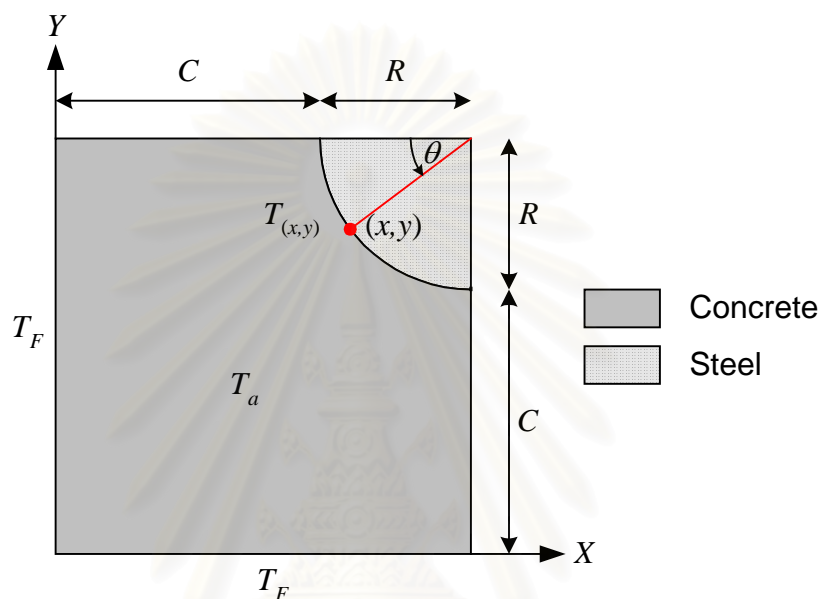


รูปที่ ง-7 ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 90 นาทีที่เผตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119



รูปที่ ง-8 ผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด ณ เวลา 120 นาทีที่เผตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119

ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวเหล็กของตัวอย่างที่ศึกษาค่ากำลังยึดเหนี่ยว ใช้ขนาดรัศมีของเหล็กเสริมเท่ากับ 8 มม. ($R = 8$ มม.) ทั้งตัวอย่างเหล็กกลม RB15 และเหล็กข้ออ้อย DB16 กำหนดให้คำนวณหาอุณหภูมิที่ผิวเหล็กเสริมของตัวอย่างที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเท่ากับ 25 มม. ($C = 25$ มม.) เมื่อเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาทีตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ($T_F = 807$ °C) เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้น (T_a) เท่ากับ 30 °C เนื่องจากตัวอย่างมีความสมมาตรทั้งสองแกน จึงพิจารณาคำนวณเพียงส่วนย่อยหนึ่งในสี่ส่วนของหน้าตัดดังแสดงในรูปที่ ง-9 อุณหภูมิที่ผิวเหล็ก ณ ตำแหน่งต่างสามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ ง-9 การแบ่งโหนดในหน้าตัดตัวอย่างที่ทำการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวเหล็กของตัวอย่างที่ศึกษาค่ากำลังยึดเหนี่ยว

1. คำนวณตำแหน่ง (x, y) ที่ต้องการหาค่าอุณหภูมิ ในที่นี้เลือกคำนวณที่ตำแหน่ง $\theta = 0^\circ$ ได้ว่า

$$x = C + R(1 - \cos\theta) = 25 + 8(1 - \cos 0^\circ) = 25 \text{ mm.}$$

$$y = C + R(1 - \sin\theta) = 25 + 8(1 - \sin 0^\circ) = 33 \text{ mm.}$$

2. จากตารางที่ ง-5 ได้ว่าที่เวลาเผาไฟ 60 นาที $T_{25} = 432$ °C และ $T_{33} = 362$ °C สามารถหาค่า $T_{(25,33)}$ ได้ตั้งสมการที่ 2.11 คือ

$$\frac{807 - T_{(25,33)}}{807 - 30} = \frac{807 - 432}{807 - 30} \times \frac{807 - 362}{807 - 30}$$

$$T_{(25,33)} = 592 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ง.4 การคำนวณค่ากำลังอัดของคอนกรีตจากผลการคำนวณอุณหภูมิในหน้าตัด

ตัวอย่างการคำนวณ กำหนดให้หาค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่หลงเหลือของชิ้นส่วนย่อยในหน้าตัดที่ถูกปิดล้อมด้วยโหนดที่มีคู่อันดับดังนี้ $(x,y) = (40,40), (40,45), (45,40)$ และ $(45,45)$ มม. เมื่อเผาไฟเป็นระยะเวลา 60 นาทีตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ($T_F = 807\text{ }^{\circ}\text{C}$) โดยอุณหภูมิเริ่มต้น(T_0)เท่ากับ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

1. คำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีในหัวข้อที่ ง.3 จะได้ผลการคำนวณอุณหภูมิที่โหนดทั้ง 4 ดังนี้

$$x = 40 \quad y = 40 \quad T_x = 309\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_y = 309\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{(40,40)} = 487\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$x = 40 \quad y = 45 \quad T_x = 309\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_y = 272\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{(40,45)} = 464\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$x = 45 \quad y = 40 \quad T_x = 272\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_y = 309\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{(45,40)} = 464\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$x = 45 \quad y = 45 \quad T_x = 272\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_y = 272\text{ }^{\circ}\text{C} \quad T_{(45,45)} = 439\text{ }^{\circ}\text{C}$$

2. คำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นส่วนที่ถูกปิดล้อมด้วยโหนดทั้ง 4

$$\begin{aligned} T_{av} &= \frac{T_{(40,40)} + T_{(40,45)} + T_{(45,40)} + T_{(45,45)}}{4} = \frac{487 + 464 + 464 + 439}{4} \\ &= 464\text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

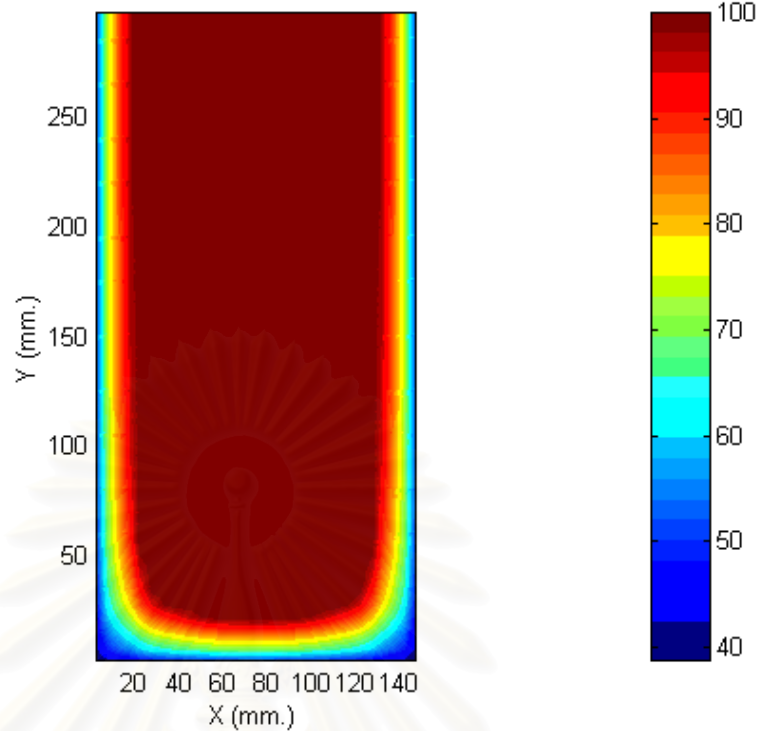
3. นำค่าที่คำนวณได้ในข้อ 2. แทนในสมการที่ 5.2 ได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{f_c'}{(f_c')_0} &= 1.622 - 0.00178T = 1.622 - 0.00178(464) = 0.796 \\ &= 79.6\% \end{aligned}$$

ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดของคอนกรีตที่หลงเหลือบนหน้าตัดหลังจากเผาไฟ 30, 60, 90 และ 120 นาทีตามกราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 แสดงดังรูปที่ ง-10 ถึง ง-13 ตามลำดับ

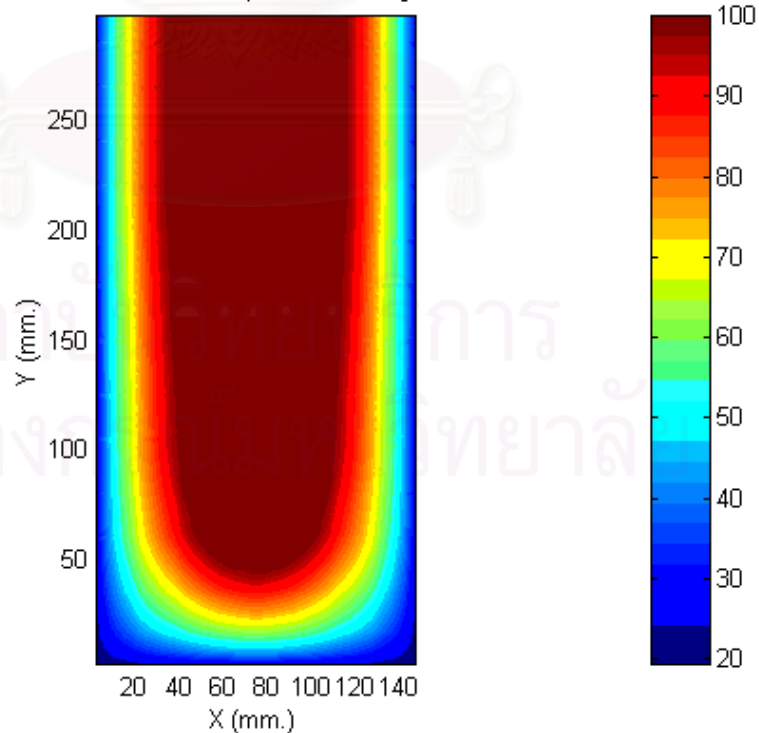
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Contour of % residual compressive strength at 30 min.



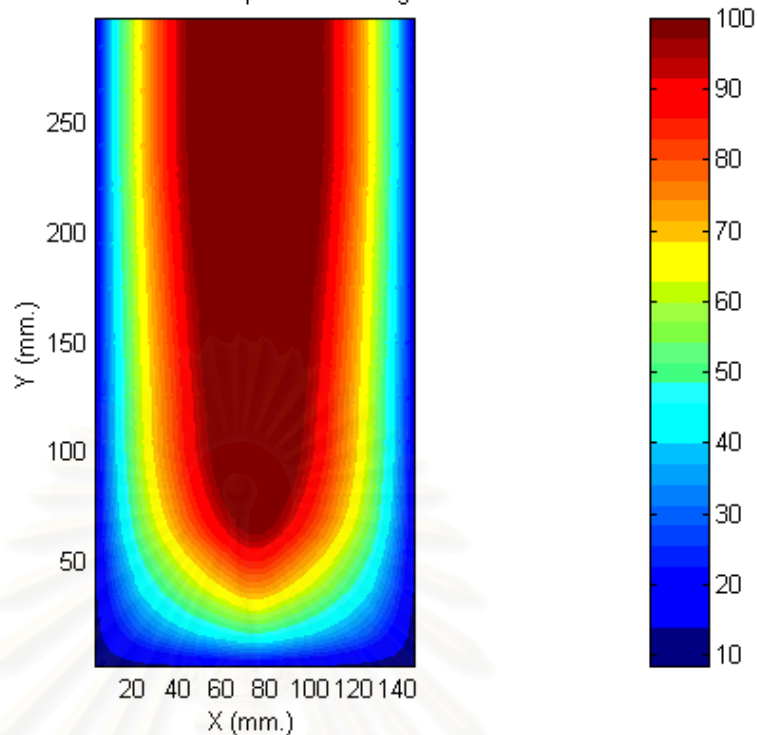
รูปที่ ง-10 ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 30 นาทีที่เผาตามกราฟไฟ
มาตรฐาน ASTM E119

Contour of % residual compressive strength at 60 min.



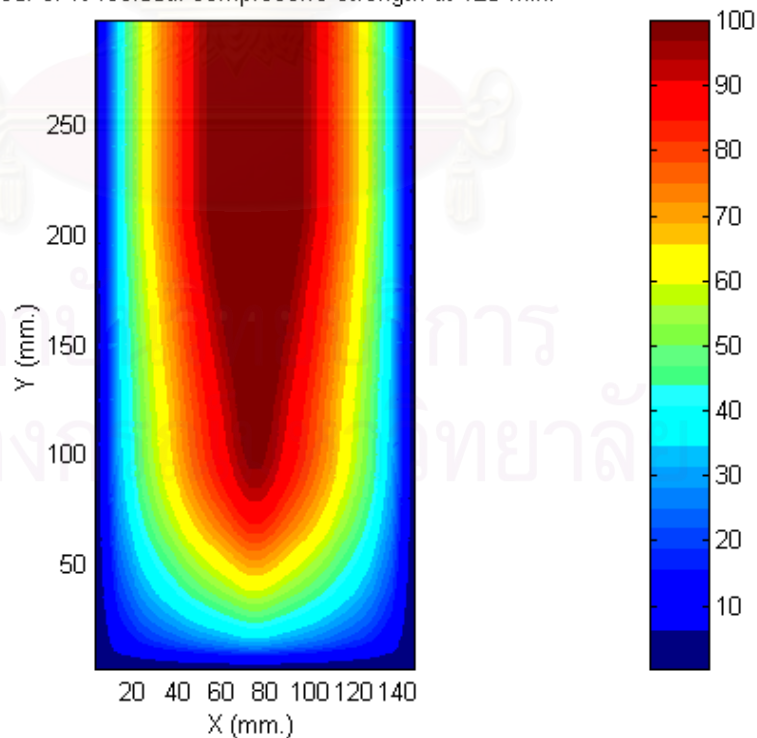
รูปที่ ง-11 ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 60 นาทีที่เผาตามกราฟไฟ
มาตรฐาน ASTM E119

Contour of % residual compressive strength at 90 min.



รูปที่ ง-12 ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 90 นาทีที่เผาตามกราฟไฟ
มาตรฐาน ASTM E119

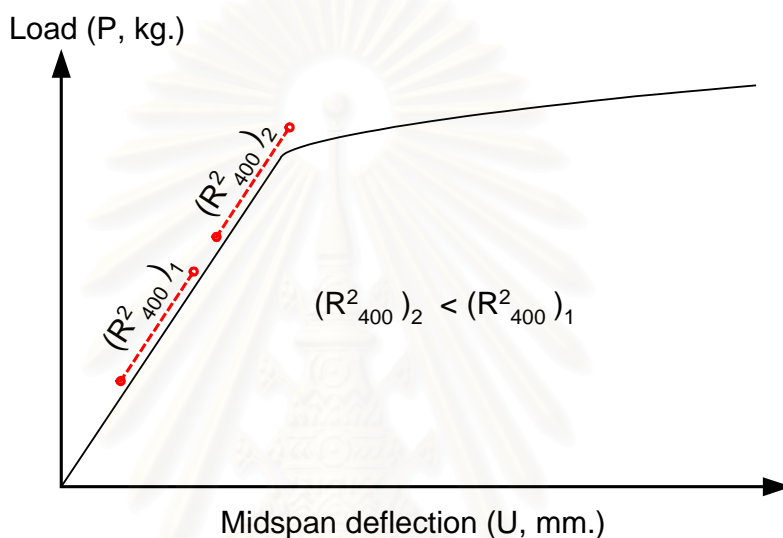
Contour of % residual compressive strength at 120 min.



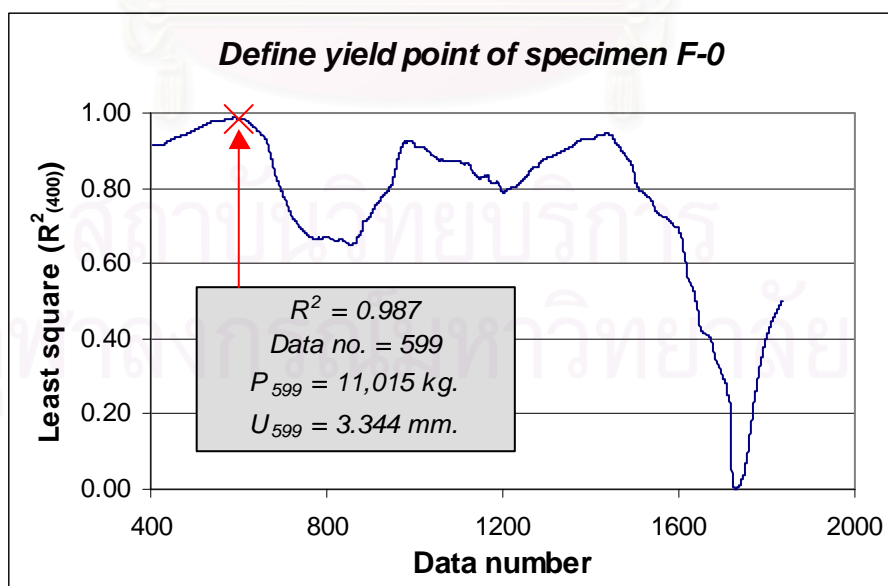
รูปที่ ง-13 ผลการคำนวณค่าร้อยละกำลังอัดที่หลงเหลือบนหน้าตัด ณ เวลา 120 นาทีที่เผาตามกราฟไฟ
มาตรฐาน ASTM E119

ง.5 การนิยามจุดครากจากข้อมูลผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงดัด

การนิยามจุดครากจากผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมการรับแรงดัด นิยามโดยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงโดยอาศัยหลักกำลังสองที่น้อยที่สุด (least square) ของข้อมูล 400 จุดต่อเนื่องกัน จุดครากคือจุดสุดท้ายก่อนที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงนี้ลดลงอย่างต่อเนื่อง รูปที่ ง-14 แสดงภาพประกอบหลักการในการนิยามจุดคราก และตั้งรูปที่ ง-15 ซึ่งแสดงตัวอย่างกราฟที่ใช้ในการนิยามจุดครากจากข้อมูลผลการทดสอบคาน F-0



รูปที่ ง-14 ภาพประกอบหลักการในการนิยามจุดคราก



รูปที่ ง-15 กราฟที่ใช้ในการนิยามจุดครากจากข้อมูลผลการทดสอบคาน F-0

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทรงเกียรติ หาญสันติ เกิดเมื่อวันที่ 19 กันยายน พ.ศ. 2520 เป็นบุตรคนที่ 3 จากทั้งหมด 4 คนของคุณพ่อสมประสงค์ หาญสันติ และคุณแม่พรทิพย์ วัฒนชาติภักดิ์ เข้ารับการศึกษาในระดับประถมและมัธยมที่โรงเรียนเซนต์คาเบรียล และสอบเทียบเข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาตรี ที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541 หลังจากนั้นได้เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาโท ที่สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย