

พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากเพลิงไหม้และซ่อมแซมด้วย  
แผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน



นายไกรวุฒิ สาทิศากยบุตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

FLEXURAL BEHAVIOR OF FIRE-DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS REPAIRED  
WITH CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER SHEETS

Mr. Kraiwuth Satisagayabutra



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากเพลิงไหม้และซ่อมแซมด้วยแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

โดย

นายไกรวุฒิ สาดิศากยบุตร

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี่

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัครวัชร เล่นวารี่)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โปธิศิริ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.พุทธิพงศ์ หะลีหิรัตน์วัฒนา)

โกรวุฒิ สาดิศากยบุตร : พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากเพลิงไหม้และซ่อมแซมด้วยแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน. (FLEXURAL BEHAVIOR OF FIRE-DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS REPAIRED WITH CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER SHEETS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อัศววัชร เล่นวารี, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหายจากการเผาไฟที่ทดสอบตามมาตรฐาน ISO834 ที่ระยะเวลาการเผาไฟ 60, 90 และ 120 นาที และทำการซ่อมแซมภายหลังการเผาไฟด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) การทดสอบกระทำภายใต้การดัดแบบสี่จุดที่มีความยาวช่วงคานเท่ากับ 1.8 เมตร การทดสอบชุดแรกประกอบด้วยคานทดสอบจำนวน 10 ตัวอย่าง โดยคานทดสอบมีขนาดหน้าตัด 15 x 30 เซนติเมตร มีปริมาณของเหล็กเสริมรับแรงดึงเท่ากับ 1.03%, ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 25 เซนติเมตร และกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 309.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การทดสอบชุดที่สองประกอบด้วยคานทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่าง โดยคานทดสอบมีขนาดหน้าตัด 15 x 30 เซนติเมตร มีปริมาณของเหล็กเสริมรับแรงดึงเท่ากับ 1.03%, เปอร์เซ็นต์ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 25 เซนติเมตร และกำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีตเท่ากับ 412.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีการเสริมเหล็กรับแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น เพื่อป้องกันการวิบัติจากแรงเฉือนที่พบจากการทดสอบคานในชุดทดสอบที่ 1 จากผลการทดสอบทั้งสองครั้งพบว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกลดลง กำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของคานมีค่าลดลงตามระยะเวลาในการเผาไฟที่นานขึ้น และการซ่อมแซมคานตัวอย่างที่ได้รับความเสียหายจากไฟด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนไม่มีผลต่อค่ากำลังรับน้ำหนักบรรทุกทุกของคานตัวอย่างเนื่องจากเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อน เนื่องจากคานตัวอย่างของการทดสอบชุดที่ 1 วิบัติแบบเฉือน และแบบจำลองวิเคราะห์หน้าตัดลดลงโดยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C (500 °C Isotherm Method) ทำนายเฉพาะการวิบัติแบบดัด ทำให้ไม่สามารถทำการเปรียบเทียบได้ จึงเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและผลการทดสอบชุดที่ 2 เท่านั้น พบว่า การทำนายน้ำหนักบรรทุกสูงสุด แบบจำลองขอบเขตล่างมีค่าความแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 15.77 เปอร์เซ็นต์ และการทำนายระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคาน แบบจำลองขอบเขตบนแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 31.42 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

# # 5370535621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: RC BEAM / FIRE / FRP

KRAIWUTH SATISAGAYABUTRA: FLEXURAL BEHAVIOR OF FIRE-DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS REPAIRED WITH CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER SHEETS. ADVISOR: ASSOC. PROF. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., 127 pp.

This research investigates the behavior of fire-damaged reinforced concrete beams tested in accordance with ISO834 standard for 60, 90 and 120 minutes and then repaired by CFRP sheets. All beam specimens were simply supported with a span length of 1.80 m and subjected to four-point bending. The first series consists of 10 specimens with the cross section of 15 cm x 30 cm, reinforcement ratio of 1.03%, concrete covering of 2.5 cm, and average compressive strength of 309.6 kg/sq.cm. The second series consists of 5 specimens with the cross section of 15 cm x 30 cm, reinforcement ratio of 1.03%, concrete covering of 2.5 cm, and average compressive strength of 412.9 kg/sq.cm. More shear reinforcements were provided in specimens in the second series to prevent the shear failure observed from the specimens in the first series. The test results showed that the compressive strength of concrete cylinder and load carrying capacity of beam specimens decreased as the fire duration increased. The repair method using CFRP sheets did not significantly increase the load carrying capacity of the beams because the plate debonding failure occurred. Because all specimens in the first series failed by shear mode, the ultimate load capacity could not be compared with results of 500 °C isotherm model assumed flexural failure. For specimens in the second series, the ultimate load capacity values predicted by 500 °C isotherm model was different from test results by 15.77 percent in average. Furthermore, midspan deflection at ultimate load by 500 °C isotherm model was different from test result by 31.42 percent in average.

Department: Civil Engineering

Student's Signature .....

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature .....

Academic Year: 2013

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัย พัฒนาและวิศวกรรมจากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ชื่อโครงการ "การประเมินสมรรถนะของ คานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้ซ่อมแซมด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย" รหัสโครงการ P-11-00136 และขอขอบคุณบริษัท ซีก้า (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท รีโทรฟิท สตรัคเจอร์ สเปเชียลลิสต์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและทำการซ่อมแซมคานทดสอบในการทดสอบ

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้ความรู้ แนวทางการดำเนินงาน และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงได้ อีกทั้งขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี ที่รับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข และรองศาสตราจารย์ ดร. ธีญวัฒน์ โปธิศิริ ผู้ซึ่งเป็นกรรมสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึง ดร. พุทธิพงษ์ ทะลีรัตน์วัฒนา ที่ให้ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำที่ดีตลอดมา

ขอขอบคุณนายสมพงษ์ ขำแจ่ม เจ้าหน้าที่ปฏิบัติการหน่วยทดสอบ และเจ้าหน้าที่ทุกคนที่ช่วยในการดำเนินการทดสอบในงานวิจัย ตลอดจนเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโครงสร้างที่ช่วยดำเนินการทดสอบตลอดมา

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำลังใจในการทำงานและสนับสนุนในด้านการศึกษา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกเผาไฟ .....	4
2.2 พฤติกรรมและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเพลิงไหม้.....	6
2.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง .....	7
2.4 การประเมินความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากไฟ .....	8
2.5 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว.....	10
2.6 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากไฟช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย .....	12
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	14
3.1 กราฟไฟมาตรฐาน .....	14
3.2 การลดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผาไฟด้วยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C (500 °C Isotherm Method).....	15
3.3 การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP.....	16
บทที่ 4 รายละเอียดการทดสอบ.....	19
4.1 การทดสอบชุดที่ 1.....	19
4.1.1 รายละเอียดและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ .....	20

4.1.2 รายละเอียดการทดสอบ .....	20
4.2 การทดสอบชุดที่ 2.....	28
4.2.1 รายละเอียดและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ .....	28
4.2.2 รายละเอียดการทดสอบ .....	28
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	34
5.1 ผลการทดสอบชุดที่ 1.....	34
5.1.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม.....	34
5.1.2 อุณหภูมิภายในคอนกรีต.....	34
5.1.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ.....	56
5.1.4 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการเผาไฟ.....	56
5.2 ผลการทดสอบชุดที่ 2.....	68
5.2.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม.....	68
5.2.2 อุณหภูมิภายในคอนกรีต.....	68
5.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ.....	76
5.2.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตทรงกระบอกเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ.....	76
5.2.5 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการเผาไฟ.....	77
บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	83
6.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 1.....	83
6.1.1 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องและเสริม FRP .....	83
6.1.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่เสียหายจากการเผาไฟและซ่อมแซมด้วย FRP.....	84
6.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 2.....	97
6.2.1 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง .....	97
6.2.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่เสียหายจากการเผาไฟและซ่อมแซมด้วย FRP.....	98
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัย.....	106



7.1 สรุปผลการวิจัย.....	106
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	107
รายการอ้างอิง.....	108
ภาคผนวก ก.....	110
ภาคผนวก ข.....	114
ภาคผนวก ค.....	116
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	127



## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ขอบเขตการศึกษากรณีที่ 1 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม) .....	4
ตารางที่ 2-2 ขอบเขตการศึกษากรณีที่ 2 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวธรรมดา) .....	5
ตารางที่ 2-3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง .....	7
ตารางที่ 2-4 ระดับความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากไฟ .....	8
ตารางที่ 2-5 การซ่อมแซมในแต่ละประเภทของระดับความเสียหายจากไฟ .....	9
ตารางที่ 2-6 ผลการทดสอบ .....	11
ตารางที่ 4-1 แสดงรายละเอียดคานตัวอย่างที่จำนวน 10 ตัวอย่าง .....	20
ตารางที่ 4-2 แสดงรายละเอียดคานตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่าง .....	28
ตารางที่ 5-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม .....	34
ตารางที่ 5-2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่เผาด้วยเวลาต่างๆ .....	56
ตารางที่ 5-3 ผลการทดสอบคานชุดที่ 1 .....	57
ตารางที่ 5-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม .....	68
ตารางที่ 5-5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่เผาด้วยเวลาต่างๆ .....	76
ตารางที่ 5-6 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ระดับต่างๆ ที่ไม่เผาไฟและเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ .....	77
ตารางที่ 5-7 ผลการทดสอบคานชุดที่ 2 .....	77
ตารางที่ 6-1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกของการทดสอบและแบบจำลอง .....	94
ตารางที่ 6-2 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง .....	95
ตารางที่ 6-3 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบและแบบจำลอง .....	96
ตารางที่ 6-4 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกของการทดสอบและแบบจำลอง .....	103
ตารางที่ 6-5 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง .....	104
ตารางที่ 6-6 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบและแบบจำลอง .....	105

## สารบัญรูป

รูปที่ 2-1 การทดสอบคานตัวอย่าง .....	10
รูปที่ 3-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิตามกราฟไฟมาตรฐาน .....	14
รูปที่ 3-2 พื้นที่หน้าตัดของข้อมูลการกระจายอุณหภูมิ .....	15
รูปที่ 3-3 ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิที่ระยะเวลาเผาไฟ 30 60 และ 90 นาที .....	15
รูปที่ 3-4 การกระจายของความเค้น และความเครียดของหน้าตัด .....	16
รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต .....	17
รูปที่ 4-1 การเตรียมแบบหล่อขึ้นงาน .....	21
รูปที่ 4-2 ขนาดเหล็กเสริม .....	21
รูปที่ 4-3 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานทดสอบ .....	22
รูปที่ 4-4 ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ (a) เหล็กเสริมและ (b) FRP .....	22
รูปที่ 4-5 การบ่มขึ้นงาน .....	23
รูปที่ 4-6 เตาเผาที่ใช้ในการเผาคาน .....	24
รูปที่ 4-7 การทดสอบเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระดับความรุนแรงของไฟระยะเวลา 60 นาที 24	
รูปที่ 4-8 ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงของไฟต่างๆ 25	
รูปที่ 4-9 การทดสอบการรับแรงดึงของคอนกรีต (Pull out test) .....	25
รูปที่ 4-10 การเตรียมผิวคอนกรีตก่อนซ่อมแซมด้วย FRP .....	26
รูปที่ 4-11 การติดตั้งแผ่น FRP .....	26
รูปที่ 4-12 การทดสอบคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำ 2 จุด .....	27
รูปที่ 4-13 การทดสอบคานในห้องปฏิบัติการ .....	27
รูปที่ 4-14 ขนาดเหล็กเสริม .....	29
รูปที่ 4-15 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานทดสอบ .....	29
รูปที่ 4-16 ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ (a) เหล็กเสริม และ (b) FRP .....	30
รูปที่ 4-17 ทดสอบเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระดับความรุนแรงของไฟระยะเวลา 90 นาที ...	31
รูปที่ 4-18 ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงของไฟต่างๆ .....	31
รูปที่ 4-19 การทดสอบคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำ 2 จุด .....	32
รูปที่ 4-20 การทดสอบคานในห้องปฏิบัติการ .....	33
รูปที่ 5-1 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานตัวอย่าง .....	35
รูปที่ 5-2 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที .....	35





รูปที่ 5-47 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B60.....	59
รูปที่ 5-48 การวิบัติของคาน B60 .....	60
รูปที่ 5-49 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B60F.....	60
รูปที่ 5-50 การวิบัติของคาน B60F .....	61
รูปที่ 5-51 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B90.....	61
รูปที่ 5-52 การวิบัติของคาน B90 .....	62
รูปที่ 5-53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B90F.....	62
รูปที่ 5-54 การวิบัติของคาน B90F .....	63
รูปที่ 5-55 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120 .....	63
รูปที่ 5-56 การวิบัติของคาน B120 .....	64
รูปที่ 5-57 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120F .....	64
รูปที่ 5-58 การวิบัติของคาน B120F .....	65
รูปที่ 5-59 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120W.....	65
รูปที่ 5-60 การวิบัติของคาน B120W.....	66
รูปที่ 5-61 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120WF.....	66
รูปที่ 5-62 การวิบัติของคาน B120WF.....	67
รูปที่ 5-63 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานตัวอย่าง.....	69
รูปที่ 5-64 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที.....	69
รูปที่ 5-65 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 120 นาที.....	70
รูปที่ 5-66 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที.....	70
รูปที่ 5-67 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที .....	71
รูปที่ 5-68 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที.....	71
รูปที่ 5-69 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP.....	72
รูปที่ 5-70 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที .....	72
รูปที่ 5-71 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP.....	73
รูปที่ 5-72 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที.....	73
รูปที่ 5-73 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที .....	74
รูปที่ 5-74 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที.....	74

รูปที่ 5-75 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไประยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP .....	75
รูปที่ 5-76 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไประยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP .....	75
รูปที่ 5-77 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไประยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP .....	76
รูปที่ 5-78 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB00 .....	78
รูปที่ 5-79 การวิบัติของคาน BB00 .....	78
รูปที่ 5-80 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB90 .....	79
รูปที่ 5-81 การวิบัติของคาน BB90 .....	79
รูปที่ 5-82 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB90F.....	80
รูปที่ 5-83 การวิบัติของคาน BB90F .....	80
รูปที่ 5-84 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB120 .....	81
รูปที่ 85 การวิบัติของคาน BB120.....	81
รูปที่ 5-86 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB120F .....	82
รูปที่ 5-87 การวิบัติของคาน BB120F .....	82
รูปที่ 6-1 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B00.....	83
รูปที่ 6-2 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B00F .....	83
รูปที่ 6-3 อุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานตัวอย่างที่ระยะเวลาเผา .....	84
รูปที่ 6-4 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B60 .....	85
รูปที่ 6-5 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B60F .....	86
รูปที่ 6-6 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B90 .....	86
รูปที่ 6-7 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B90F .....	87
รูปที่ 6-8 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120 .....	87
รูปที่ 6-9 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120F .....	88
รูปที่ 6-10 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120W .....	88
รูปที่ 6-11ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120WF .....	89
รูปที่ 6-12 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B60 .....	89
รูปที่ 6-13 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B60F .....	90
รูปที่ 6-14 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B90 .....	90
รูปที่ 6-15 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B90F .....	91

รูปที่ 6-16 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120 .....	91
รูปที่ 6-17 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120F .....	92
รูปที่ 6-18 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120W.....	92
รูปที่ 6-19 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120WF.....	93
รูปที่ 6-20 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB00 .....	97
รูปที่ 6-21 อุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานตัวอย่างที่ระยะเวลาเผาไฟ 90 และ 120 นาที.....	98
รูปที่ 6-22 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB90 .....	99
รูปที่ 6-23 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB90F.....	99
รูปที่ 6-24 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB120.....	100
รูปที่ 6-25 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB120F.....	100
รูปที่ 6-26 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB90 .....	101
รูปที่ 6-27 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB90F .....	101
รูปที่ 6-28 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB120.....	102
รูปที่ 6-29 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB120F.....	102



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

ในปัจจุบันนี้ได้มีโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่เป็นจำนวนมาก กรณีโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับผลกระทบจากอัคคีภัยนั้น เป็นเหตุการณ์ที่พบได้บ่อยครั้งในปัจจุบัน ซึ่งโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเพลิงไหม้ส่วนใหญ่แล้วจะไม่เกิดการพังทลายทั้งอาคาร แต่จะได้รับความเสียหายในบางส่วน ผลที่ตามมาคือโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กมีความสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้น้อยลง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษา พฤติกรรมการรับน้ำหนักของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากไฟ ภายหลังจากซ่อมแซมด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใย หรือ FRP (fiber reinforced polymer) ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ในงานซ่อมแซมและเสริมกำลังโดยทั่วไปในปัจจุบัน เช่น งานซ่อมแซมโครงสร้างเดิมที่เสียหาย งานปรับปรุงเปลี่ยนแปลงต่อเติมการใช้งานโครงสร้างเดิม งานเสริมความแข็งแรงและเสริมกำลังของโครงสร้างเดิม และงานแก้ไขโครงสร้างอาคารที่มีปัญหา เป็นต้น ข้อดีของการเลือกใช้วัสดุ FRP ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังนั้น คือ น้ำหนักเบาไม่เป็นภาระให้กับโครงสร้างเดิม มีขนาดเล็กไม่มีผลต่อรูปแบบสถาปัตยกรรม ติดตั้งสะดวกและรวดเร็วไม่กระทบกับการใช้งานเดิม ทนทานต่อการกัดกร่อนและการสึกหรอ ทนทานต่อสารเคมีเช่นกรด-ด่าง มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สามารถทาสีหรือปิดทับด้วยวัสดุอื่นเพื่อความสวยงามได้ จึงต้องการศึกษาว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะซ่อมแซมส่วนของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วย FRP แทนการรื้อถอนแล้วสร้างใหม่ โดยโครงสร้างยังมีประสิทธิภาพซึ่งสามารถรับน้ำหนักบรรทุกและยังมีความปลอดภัยได้เท่าเดิม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากการเผาไฟและซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
- 2) ศึกษาแบบจำลองทำนายกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากการเผาไฟและซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) คานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด กว้าง 15 ซม. สูง 30 ซม. ยาว 210 ซม. ระยะคานกรีตหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 2.5 ซม.
- 2) พฤติกรรมที่ศึกษาประกอบด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกและระยะการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากการเผาไฟและซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และรูปแบบการวิบัติ
- 3) วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย คือ SikaWrap®-230C/45 (with Sikadur® -330)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เข้าใจผลกระทบของการเผาไฟต่อพฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก
- 2) เข้าใจพฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการเผาไฟและซ่อมแซมด้วย FRP
- 3) สามารถทำนายกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟ และซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
- 4) เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟและซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

## 1.5 แผนดำเนินงานวิจัย

- 1) ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา โดยได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ ผลกระทบของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของคอนกรีต การประเมินและพฤติกรรมของโครงสร้างคอนกรีตเมื่อได้รับความเสียหายจากไฟและพฤติกรรมรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังเสริมกำลังด้วย FRP เป็นต้น
- 2) เตรียมตัวอย่างในการทดสอบ ทำการทดสอบ และบันทึกข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
- 3) สรุปผลการทดสอบ

- 4) วิเคราะห์ผลการทดสอบ
- 5) จัดทำวิทยานิพนธ์และบทความทางวิชาการ



## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกเผาไฟ

ทรงเกียรติ หาญสันติ [1] ได้ศึกษาผลของระยะเวลาที่เผาไฟซึ่งจำลองสภาพตามมาตรฐาน ASTM E119 ที่มีผลต่อกำลังอัดของลูกคอนกรีต พฤติกรรมรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลังเผาไฟ ค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็ก พฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วน คือ

- 1) กรณีศึกษาที่ 1 ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ซึ่งจะศึกษาถึงผลของระยะเวลาเผาไฟ, ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มและชนิดของเหล็กเสริม ที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟ โดยทำการทดสอบตัวอย่างเพื่อศึกษาผลของการเผาไฟที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังเผาไฟจำนวน 72 ตัวอย่าง โดยมีขอบเขตการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ขอบเขตการศึกษาคณิศที่ 1 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม) [1]

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

จากผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 1 สรุปได้ว่า

1. กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ โดยเหล็กกลมจะสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวมากกว่าเหล็กข้ออ้อยที่มีระยะเวลาและที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเดียวกัน กำลังยึดเหนี่ยวเหล็กกลมจะเหลือไม่ถึง 50 % หลังจากเผาไฟ 15 นาที สำหรับทุกระยะหุ้มเหล็กเสริมและหลังจากเผาไฟ 60 นาที เหล็กกลมแทบไม่เหลือกำลังยึดเหนี่ยวเลย
2. ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมของเหล็กเสริมภายหลังการเผา เพราะช่วยป้องกันความร้อนจากไฟ โดยระยะคอนกรีตหุ้ม 25 มม. ที่ทดสอบสามารถช่วยคงคุณสมบัติกำลังดึงครากและกำลังดึงประลัยให้ลดลงไม่เกิน 5% สำหรับการเผาไฟไม่เกิน 90 นาที และพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นไม่มีการเปลี่ยนแปลง

- 2) กรณีศึกษาที่ 2 ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวธรรมดา ซึ่งจะศึกษาถึงผลของระยะเวลาเผาไฟ ที่มีต่อค่ากำลังอัดของลูกคอร์กอนกรีตหลังการเผาไฟ, พฤติกรรมรับแรงดึงของเหล็กเสริมหลังเผาไฟ, พฤติกรรมรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังการเผาไฟ และความเหมาะสมในการประเมินความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย โดยทำการทดสอบชุดคานคอนกรีตเสริมเหล็กและตัวอย่างเพื่อศึกษาถึงผลของการเผาไฟที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก, ค่ากำลังอัดของลูกคอร์กอนกรีตและพฤติกรรมของเหล็กเสริมหลังเผาไฟ จำนวน 10 ชุด โดยมีขอบเขตการวิจัยแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ขอบเขตการศึกษากรณีที่ 2 (ผลของการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวธรรมดา) [1]

การจำลองสภาพไฟไหม้	มาตรฐาน ASTM E119
ระยะเวลาเผาไฟ	0, 30, 60, 90 และ 120 นาที
ขนาดของคานตัวอย่าง	15x30x210 ซม.
ปริมาณการเสริมเหล็ก	0.195 เท่าของที่สภาวะสมดุลย์
การเสริมเหล็กปลอก	เหล็กกลม RB 6 ระยะห่าง 90 ซม. สำหรับพฤติกรรมการรับแรงเฉือน เหล็กกลม RB 6 ระยะห่าง 12.5 ซม. สำหรับพฤติกรรมการรับแรงดัด
อัตราระยะรับแรง เฉือนต่อความลึกประสิทธิ ผลของรูปตัด (a/d)	2.25
วิธีการทดสอบ	ให้แรงกระทำแบบ 2 จุด เท่ากันที่ระยะหนึ่งในสามของความยาวฐานรองรับ
การทดสอบแบบไม่ทำลาย	Ultrasonic pulse velocity test และ Rebound hammer test

จากผลการทดสอบกรณีศึกษาที่ 2 สรุปได้ว่า

1. กำลังอัดของลูกคอร์กอนกรีตที่ได้จากการเจาะตัวอย่างมีแนวโน้มลดลงตามระยะเวลาที่เผาไฟ และมีแนวโน้มความสัมพันธ์กับค่าความเร็วที่ได้จากการทดสอบแบบไม่ทำลายด้วยวิธี ultrasonic pulse velocity
2. กำลังเฉือนของคานตัวอย่างมีแนวโน้มลดลง 10% ทุกๆ 30 นาที ที่เผาไฟเมื่อเทียบกับกำลังเฉือนที่ได้จากข้อกำหนด ACI 318 คำนวนจากกำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน แต่

ค่ากำลังเฉือนตามข้อกำหนด ACI 318 ดังกล่าว ยังคงมีค่าดัชนีความปลอดภัยเท่ากับ 1.23 ที่ระยะเวลาการเผา 60 นาที ส่วนกำลังเฉือนของคานตัวอย่างที่เผาไฟ 90 และ 120 นาทีไม่อาจทดสอบได้เนื่องจากตัวอย่างเสียหายจากการเผาไฟ

3. การเผาไฟที่ไม่เกิน 60 นาที ไม่ส่งผลต่อค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษา แต่ที่ระยะเวลาการเผาไฟ 90 นาที ค่าโมเมนต์ครากและโมเมนต์ประลัยของคานตัวอย่างที่ทำการศึกษาลดลง 16% และ 15% ตามลำดับ และที่ระยะเวลาการเผาไฟ 120 นาที คานตัวอย่างเกิดความเสียหายจนไม่สามารถทำการทดสอบได้

## 2.2 พฤติกรรมและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเพลิงไหม้

ซุซซาคิ สิทิพันธ์ [2] ได้นำเสนอพฤติกรรมและความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเพลิงไหม้ โดยทั่วไปแล้วผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัตินั้น จะมีไม่มากนักที่อุณหภูมิไม่เกิน 200 °C แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 300 °C คอนกรีตจะเริ่มสูญเสียคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ โดยเฉพาะกำลังรับแรงอัดและ โมดูลัสยืดหยุ่น (modulus of elasticity) ซึ่งความเสียหายของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงมีสาเหตุมาจาก

- 1) การเกิดรอยแตกร้าวขนาดเล็ก เพิ่มขึ้นในคอนกรีต เนื่องจากส่วนที่เป็นซีเมนต์เพสต์ในเนื้อคอนกรีตเกิดการหดตัวเนื่องจากสูญเสียน้ำ และส่วนที่เป็นวัสดุมวลรวม เกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง ซึ่งรอยแตกร้าวขนาดเล็กดังกล่าวมีผลทำให้ความสามารถในการรับแรงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตลดลง
- 2) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์เพสต์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำการกำลังของซีเมนต์เพสต์ลดลง
- 3) ประเภทของมวลรวมหยาบ ผลจากการทดลองพบว่าคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมหยาบประเภทซิลิกาจะเสียกำลังอัดเร็วกว่าคอนกรีตที่ทำจากมวลรวมหยาบหินปูน หรือ มวลรวมเบา
- 4) ปริมาณน้ำในคอนกรีต ผลการทดลองพบว่าคอนกรีตที่มีความชื้นสูงจะมีกำลังลดลงมากกว่าคอนกรีตที่มีความชื้นต่ำ เนื่องจากปริมาณความชื้นในคอนกรีตมีผลต่อการเกิดหลุดล่อนเป็นสาเหตุสำคัญอันหนึ่งของการเกิดความเสียหายในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง
- 5) ปริมาณซีเมนต์ในคอนกรีต ผลการทดลองพบว่า อัตราการลดลงของกำลังในคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์มาก (rich mixed) จะสูงกว่าอัตราการลดลงของกำลังในคอนกรีตที่มีปริมาณซีเมนต์ต่ำกว่า (lean mixed)
- 6) อัตราการเย็นตัว ผลการทดลองพบว่า คอนกรีตที่มีอัตราเย็นตัวลงอย่างช้าๆ จะมีอัตราการลดลงของกำลังรับแรงอัดน้อยกว่าคอนกรีตที่มีการลดลงของอุณหภูมิอย่างกะทันหัน

ความเสียหายของคอนกรีตที่เกิดขึ้นจากไฟไหม้นั้นมีลักษณะแบบถาวรคือ ความเสียหายจะคงอยู่ถึงแม้ว่าอุณหภูมิของคอนกรีตจะกลับสู่สภาพปกติแล้ว ซึ่งเป็นเหตุสำคัญที่ทำให้ต้องมีการ

ซ่อมแซมโครงสร้าง เพราะกำลังหรือคุณสมบัติบางประการของคอนกรีตอาจจะลดลงจนทำให้เกิดความไม่ปลอดภัย หรือไม่เหมาะสมในการใช้งาน โครงสร้างคอนกรีตที่ถูกไฟไหม้จะมีความเสียหายดังนี้

- 1) การเกิดการหลุดล่อนในคอนกรีตส่วนที่ถูกเผาไฟอย่างรุนแรง อันเนื่องมาจากการขยายตัวของคอนกรีตเองและความดันของไอน้ำที่มีอยู่ในเนื้อคอนกรีต อาจทำให้เกิดการระเบิดออกของชิ้นส่วนของคอนกรีตบริเวณผิว ซึ่งจะมีผลที่สำคัญต่อความสามารถในการป้องกันไฟไหม้ เหล็กเสริมและอาจทำให้เหล็กเสริมสัมผัสเปลวไฟหรือความร้อนโดยตรง
- 2) ซีเมนต์เพสต์ เปลี่ยนเป็นเหมือนซีเมนต์ที่ยังไม่ได้ผสมน้ำที่อุณหภูมิ 400 °C ทำให้เนื้อคอนกรีตเกิดการเสียสภาพ
- 3) เหล็กเสริมเกิดการสูญเสียกำลัง
- 4) การที่เหล็กมีอุณหภูมิสูงมาก อาจจะทำให้เกิดการขยายตัวและสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตสำหรับความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากไฟไหม้นั้น นอกจากความเสียหายที่มีต่อกำลังของวัสดุโดยตรงนั้นยังอาจมีความเสียหายในทางอ้อมที่อาจมีผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้างนั้น

### 2.3 กำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา [3] ได้ศึกษากำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกไฟไหม้และลดอุณหภูมิทันที ตัวอย่างที่ใช้มีขนาด 15 × 15 × 15 ซม. ก่อนถูกเผามีกำลังอัดประลัยเท่ากับ 381, 455 และ 529 กก./ตร.ซม. เผาที่อุณหภูมิ 300 400 และ 500 °C มีระยะเวลาการเผา 45 60 และ 90 นาที จากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตออกจากเตาเผาแล้วแช่น้ำทันที เป็นเวลา 10 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวในอากาศอีก 7 วัน จึงนำไปทดสอบกำลังอัดประลัย ได้ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง [3]

กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)	อุณหภูมิที่ใช้ ทดสอบ (°C)	กำลังอัดประลัย (กก./ตร.ซม.)(เปอร์เซ็นต์ที่กำลังอัดลดลง)		
		45 นาที	60 นาที	90 นาที
381	300	339(11.2%)	325(15%)	320(16.2%)
	400	305(20.2%)	302(20.8%)	299(21.8%)
	500	291(23.8%)	289(25.3%)	282(26.2%)
455	300	402(11.9%)	363(20.4%)	346(24%)
	400	358(21.6%)	340(25.4%)	332(27.2%)
	500	346(25.1%)	333(27%)	320(29.7%)
529	300	489(5.6%)	464(12.3%)	448(15.5%)
	400	460(13.2%)	453(15.5%)	447(15.5%)
	500	453(15.5%)	446(15.8%)	407(23.2%)

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า

ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มีกำลังอัด 381 กก./ตร.ซม. เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C กำลังอัดลดลงมากที่สุดเท่ากับ 16.2, 21.8 และ 26.2 % ตามลำดับ คอนกรีตที่มีกำลังอัด 455 กก./ตร.ซม. เมื่อเผาที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C กำลังอัดลดลงมากที่สุดเท่ากับ 24, 27.2 และ 29.7 % ตามลำดับ คอนกรีตที่มีกำลังอัด 529 กก./ตร.ซม. เมื่อถูกเผาที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 °C กำลังอัดลดลงมากที่สุดเท่ากับ 15.5, 15.5 และ 23.2 % ตามลำดับ

## 2.4 การประเมินความเสียหายของโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากไฟ

Florian Block และคณะ [4] ได้นำเสนอรายงานเชิงเทคนิคได้นำเสนอแนวทางการประเมินความเสียหาย และหลักในการซ่อมแซมของโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากไฟ การประเมินความเสียหายนั้นได้แยกประเภทของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากไฟออกเป็น 5 ระดับแสดงในตารางที่ 2-4 และการซ่อมแซมในแต่ละประเภทของระดับความเสียหายจากไฟแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 ระดับความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากไฟ [4]

ระดับความเสียหาย	ผิวของคอนกรีต			โครงสร้าง			
	สี (colour)	การหลุดล่อนที่ผิว (plaster/finish)	รอยแตก (Crazing)	การหลุดล่อน (Spalling)	การเผยให้เห็นของเหล็กเสริม (Exposure reinforcement)	การแตก (Cracks)	การแอ่นตัว (Deflection)
0					ไม่ได้รับความเสียหายจากไฟ		
1	ปกติ	บางส่วน	ส่วนน้อย	ส่วนน้อย	น้อย	ไม่มี	ไม่มี
2	ชมพู/แดง	ปานกลาง	ปานกลาง	มุมและผิวท้องคานเล็กน้อย	ไม่เกิน 25%, ไม่มีการโก่งเดาะของเหล็กเสริม	ไม่มี	ไม่มี
3	ชมพู/แดง, ขาว/เทา	ทั้งหมด	กว้าง	มุม, ผิวด้านข้างและผิวท้องคาน	ไม่เกิน 50%, มีการโก่งเดาะของเหล็กเสริมไม่เกิน 1 เส้น	น้อย	ไม่เป็นนัยสำคัญ
4	ขาว/เทา	ทำลาย	พื้นผิวสูญเสีย	พื้นผิวทั้งหมด	มากกว่า เกิน 50%, มีการโก่งเดาะของเหล็กเสริมมากกว่า 1 เส้น	รุนแรง	รุนแรง



ตารางที่ 2-5 การซ่อมแซมในแต่ละประเภทของระดับความเสียหายจากไฟ [4]

ระดับความเสียหาย	ประเภทการซ่อมแซม	ความต้องการในการซ่อมแซม
0	ตกแต่ง	ตกแต่งเล็กน้อย (ถ้าจำเป็น)
1	ผิวฉิน	ซ่อมแซมผิวคอนกรีตโดย โดยไม่มีการเสริมกำลัง
2	ซ่อมแซมทั่วไป	ซ่อมแซมผิวและโครงสร้างคอนกรีตที่เสียหายบางส่วน โดยไม่มีการเสริมกำลัง
3	ซ่อมแซมหลัก	ซ่อมแซมผิว โครงสร้าง และเสริมกำลังให้คอนกรีตและเหล็กเสริม โดยคำนึงถึงความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้าง
4	ซ่อมแซมและรื้อถอน	ซ่อมแซมโครงสร้างของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรง หรือรื้อถอน และทำการหล่อใหม่

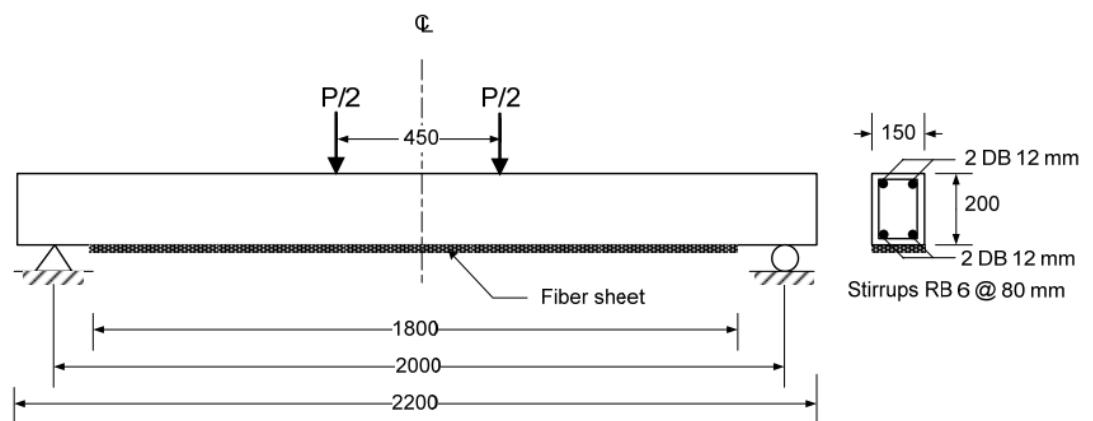
หลักการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากไฟนั้นไม่แตกต่างจากการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตที่ได้รับความเสียหายจากการกัดกร่อน (corrosion) ของเหล็กเสริม โดยที่การซ่อมแซมคอนกรีตจำเป็นต้องสกัดคอนกรีตเดิมที่เสียหายออกหรืออาจใช้การสกัดคอนกรีตที่ใช้วัตถุระเบิดหรือวิธีการทำลายที่รุนแรง เพื่อให้การซ่อมแซมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยปกติแล้วจะต้องกำจัดคอนกรีตที่ไม่ดีออกให้หมดจนถึงเนื้อคอนกรีตที่แกร่ง ซึ่งบางครั้งอาจต้องสกัดคอนกรีตจนถึงแนวเหล็กเสริมคอนกรีตหรือเลยแนวเหล็กเสริมคอนกรีตก็ได้ มีการทำความสะอาดพื้นผิวคอนกรีต (surface cleaning) รวมไปถึงการตรวจสอบเหล็กเสริม การซ่อมแซมส่วนของคอนกรีตที่หลุดล่อนหรือทำการสกัดออกไปนั้น มีการซ่อมแซมโดยใช้มอร์ตาร์กับพื้นที่ขนาดเล็ก (โดยทั่วไปใช้กับพื้นที่น้อยกว่า 1 ตารางเมตร) การพ่นคอนกรีต (sprayed concrete) และใช้มอร์ตาร์ผสมอีพอกซีเรซิน (epoxy resin mortar) ในการซ่อมแซมรวมถึงการซ่อมแซมในส่วนรอยแตก ส่วนการเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กนั้น จะเสริมด้วยการติดตั้งวัสดุคอมโพสิตประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเป็นสารประกอบที่ผลิตขึ้นจากเส้นใยกำลังสูงโดยมีเรซินเป็นตัวประสาน ประเภทของเส้นใยที่ใช้คือ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยอารามิด ซึ่งมีคุณสมบัติ และความทนทานที่แตกต่างกัน

## 2.5 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว

Lenwari และ Thepchatri [5] ได้ศึกษาผลของแผ่นเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้วที่มีต่อพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เมื่อติดตั้งแผ่นเสริมเส้นใยบริเวณที่รับแรงดึงของคาน ใช้คานตัวอย่างจำนวน 8 ตัวอย่าง พบว่า กำลังรับแรงดัดและความแข็งแรงของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากติดตั้งแผ่นเสริมเส้นใย คุณสมบัติของวัสดุ ดังนี้

- 1) คอนกรีตกำลังรับแรงอัดเท่ากับ 550 กก./ตร.ซม. และเหล็กเสริมกำลังรับแรงดึง 4000 กก./ตร.ซม. ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $2 \times 10^6$  กก./ตร.ซม.
- 2) แผ่นเสริมเส้นใยคาร์บอนหนา 0.165 มม. กำลังรับแรงดึงเท่ากับ 35500 กก./ ตร.ซม. โมดูลัสยืดหยุ่น  $2.35 \times 10^6$  กก./ตร.ซม.
- 3) แผ่นเสริมเส้นใยแก้วหนา 0.353 มม. กำลังรับแรงดึงเท่ากับ 17000 กก./ตร.ซม. โมดูลัสยืดหยุ่นเท่ากับ  $7.1 \times 10^5$  กก./ตร.ซม.

ตัวอย่างขนาดหน้าตัด  $15 \times 20$  ซม. วางบนฐานรองรับช่วงเดียว ความยาวช่วงคาน 2 ม. ความยาวของแผ่นเสริมเส้นใย 1.8 ม. คานถูกออกแบบมาให้เกิดการวิบัติด้วยแรงดัด ไม่เกิดการวิบัติด้วยแรงเฉือน โดยมีการทดสอบดังรูปที่ 2-1 และผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 2-6



รูปที่ 2-1 การทดสอบคานตัวอย่าง [5]

ตารางที่ 2-6 ผลการทดสอบ [5]

คานตัวอย่าง	ประเภทของแรงที่ใช้ การทดสอบ	ประเภท FRP	น้ำหนักที่วิบัติ (กิโลนิวตัน)	ระยะการโก่งตัว สูงสุดที่ตำแหน่ง กึ่งกลางคาน (มม.)	ลักษณะการวิบัติ
CB1	แรงกระทำที่มีการ ปลดแรงแบบคาบ (periodic unloadings)	-	53.0	45.3	คอนกรีตแตกละเอียด (concrete crushing)
CB2	แรงกระทำในทิศทาง เดียว (monotonic)	-	45.1	-	คอนกรีตแตกละเอียด
CF1	แรงกระทำที่มีการ ปลดแรงแบบคาบ	คาร์บอน 1 ชั้น	53.0	-	FRP ขาด และ FRP หลุด ล่อน (FRP debonding)
GF1	แรงกระทำที่มีการ ปลดแรงแบบคาบ	แก้ว 1 ชั้น	61.8	-	FRP หลุดแยกออกเป็นแผ่น (delamination)
CF2	แรงกระทำที่มีการ ปลดแรงแบบคาบ	คาร์บอน 2 ชั้น	93.2	31.3	FRP หลุดล่อน
GF2	แรงกระทำที่มีการ ปลดแรงแบบคาบ	แก้ว 2 ชั้น	97.1	36.2	FRP หลุดล่อน
CF-GF1	แรงกระทำที่มีการ ปลดแรงแบบคาบ	คาร์บอน ชั้นที่ 1 และแก้ว ชั้นที่ 2	93.2	29.8	FRP หลุดล่อน
CF-GF2	แรงกระทำในทิศทาง เดียว	คาร์บอน ชั้นที่ 1 และแก้ว ชั้นที่ 2	85.3	31.6	FRP หลุดล่อน

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า

- 1) ความแข็งแรง และน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ติดตั้งแผ่นเสริมเส้นใย มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนชั้นในการติดตั้งเพิ่มขึ้น แต่ไม่เกิน 2 ชั้น

- 2) จำนวนชั้นที่เท่ากัน การติดตั้งแผ่นเสริมเส้นใยแก้วจะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกประลัยได้ดีกว่าแผ่นเสริมเส้นใยคาร์บอน การติดตั้งแผ่นเสริมเส้นใยแก้ว 1 และ 2 ชั้น จะเพิ่มน้ำหนักบรรทุกประลัย 17% และ 83%

## 2.6 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับความเสียหายจากไฟช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

Xiang Kai และคณะ [6] ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเหล็กรูปตัวที (T beam) ต่อเนื่อง 2 ช่วง จำนวน 4 ตัวอย่าง โดยมีคานควบคุมที่อุณหภูมิปกติ 1 คาน ส่วนคานอื่นๆให้ความร้อนตามมาตรฐาน ISO-384 (ISO 834, 1975) เป็นระยะเวลา 75 นาทีกับคาน 3 ตัวอย่าง แบ่งเป็นคานที่เผาไฟคานแรกไม่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นคานเผาไฟควบคุม ส่วนคานเผาไฟที่เหลือช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ที่ต่างกัน คือเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในส่วนที่รับโมเมนต์บวก(sagging moment) เปรียบเทียบกับการเสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในส่วนที่รับโมเมนต์ลบ (hogging moment) การให้แรงกระทำเป็นชุดเดียวกันทั้ง 4 ตัวอย่าง โดยศึกษาผลของแรงกระทำที่บริเวณกลางคาน, ค่าแรงกระทำสูงสุด, ค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) และความเหนียว ของคานต่อเนื่องที่มีอิทธิพลของการเสียหายจากไฟ เปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติ พบว่าค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) และความเหนียวมีค่าลดลงมาก การช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนภายหลังเสียหายจากไฟ ทำให้ความสามารถในการรับแรงและค่าความแข็งเกร็งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวมีค่าลดลง อีกทั้งมีผลกระทบต่อค่าการกระจายโมเมนต์ขึ้นใหม่ (moment redistribution) ลักษณะการวิบัติของคานทดสอบตัวอย่างเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดในคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และเกิดการวิบัติแบบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยฉีกขาด (FRP rupture) ในตัวอย่างที่ช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ โดยแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าความแข็งเกร็ง (stiffness ratio) และอัตราส่วนของโมเมนต์ (moment ratio) ของคานต่อเนื่องดังกล่าว

Xiang Kai และคณะ [6] ได้ทำการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมเหล็กรูปตัวที (T beam) ต่อเนื่อง 2 ช่วง จำนวน 7 ตัวอย่าง มีขนาดเดียวกันทุกตัวอย่าง มีคานควบคุมที่อุณหภูมิปกติ 1 คาน ส่วนคานอื่นๆให้ความร้อนตามมาตรฐาน ISO-384 คานที่ให้ความร้อนแบ่งเป็น 2 ชุด โดยให้ความร้อนแตกต่างกันที่ระยะเวลา 60 นาทีและ 75 นาที ในแต่ละกลุ่มจะมีคานที่ได้รับความร้อนไม่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นคานเผาไฟควบคุมชุดละ 1 คาน ส่วนคานที่เผาไฟอื่นๆช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ที่ต่างกัน โดยศึกษาผลของแรงกระทำที่บริเวณกลางคาน, ค่าแรงกระทำสูงสุด, ค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) และความเหนียว ของคานต่อเนื่องที่มีอิทธิพลของการเสียหายจากไฟ เปรียบเทียบกับคานคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติ พบว่าค่าความแข็งเกร็ง (stiffness) และความเหนียวมีค่าลดลงมาก การช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนภายหลังเสียหายจากไฟ ทำให้ความสามารถในการรับแรงและค่าความแข็งเกร็งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความเหนียวมีค่าลดลง อีกทั้งมีผลกระทบต่อค่าการกระจายโมเมนต์ขึ้นใหม่ (moment redistribution) ปัจจัยที่ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าการกระจายโมเมนต์ขึ้นใหม่ (moment redistribution) ได้แก่การเผาไฟ โดยระยะเวลาการเผาไฟเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ค่าการกระจายโมเมนต์ขึ้นใหม่

(moment redistribution)มีการเปลี่ยนแปลง และซ่อมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนก็มีผลกระทบต่อการจัดกระจายโมเมนต์ขึ้นใหม่ (moment redistribution) เช่นกัน ลักษณะการวิบัติของคานทดสอบตัวอย่างส่วนใหญ่ เกิดการวิบัติแบบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยฉีกขาด (FRP rupture) ในตัวอย่างที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์ โดยแสดงอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่าความแข็งแรงแรง (stiffness ratio) และอัตราส่วนของโมเมนต์ (moment ratio) ของคานต่อเนื่องดังกล่าว

Xiang Kai และคณะ [7] ได้เสนอวิธีการคำนวณกำลังรับแรงดัดของคานที่ได้รับผลกระทบจากไฟซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) กำลังรับแรงดัดคำนวณโดยวิธีวิเคราะห์หน้าตัดคานที่ได้รับผลกระทบของไฟในหน้าตัดส่วนที่รับแรงดิ่งและแรงอัด การคำนวณใช้ความเครียดประสิทธิผล (effective strain) ของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน วิธีที่นำเสนอได้ถูกตรวจสอบภายใต้ผลการทดลอง โดยผลลัพธ์แสดงถึงแนวทางในการทำนายโมเมนต์ของคานที่ได้รับผลกระทบจากไฟเพื่อประโยชน์ในการออกแบบ

### ทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 กราฟไฟมาตรฐาน

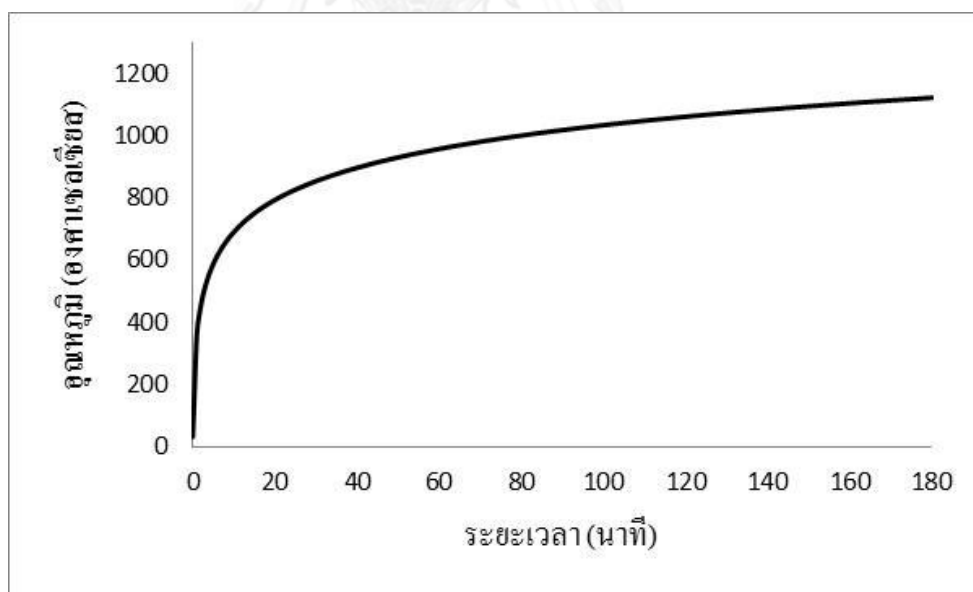
ไฟมาตรฐาน คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ที่ได้จากการทดสอบความต้านทานไฟของวัสดุก่อสร้างและชิ้นส่วนโครงสร้างแบบเต็มขนาด โดยการทดสอบที่ใช้นี้อ้างอิง กราฟไฟมาตรฐาน ISO834 [8] ดังรูปที่ 3-1 แสดงดังสมการ (3.1) [8]

$$T = T_0 + 345 \log(8t + 1) \quad (3.1)$$

โดยที่  $T$  คือ อุณหภูมิที่เวลาใดๆ ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0$  คือ อุณหภูมิห้อง ( $^{\circ}\text{C}$ )

$t$  คือ เวลาใดๆ (นาที)



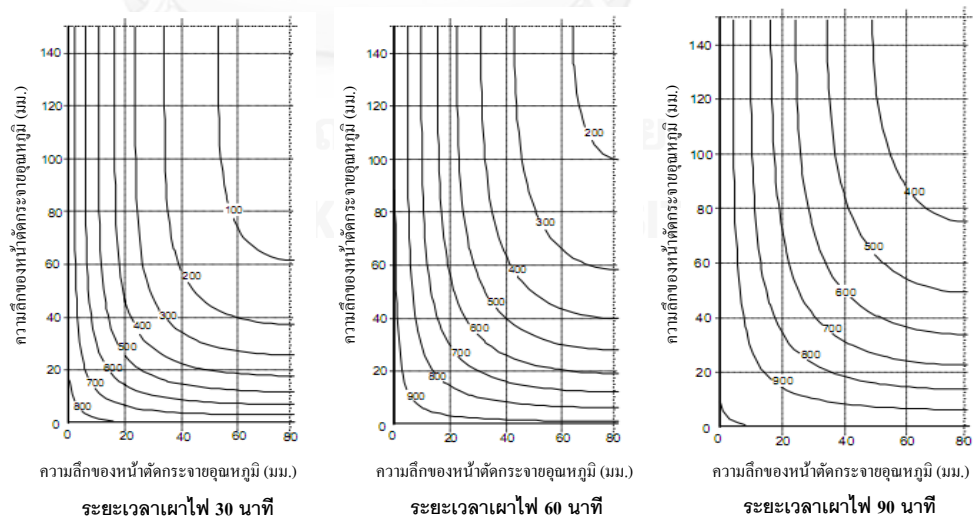
รูปที่ 3-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิตามกราฟไฟมาตรฐาน

### 3.2 การลดหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เผาไฟด้วยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C (500 °C Isotherm Method)

วิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C (500 °C Isotherm Method) [9] พิจารณาการลดหน้าตัดคอนกรีตตามส่วนที่เสียหายจากความร้อน โดยกำหนดความลึกของส่วนที่เสียหาย เท่ากับความลึกเฉลี่ยของเส้นอุณหภูมิระดับ 500 °C ในบริเวณหน้าตัดชิ้นส่วนคอนกรีตเสริมเหล็กที่รับแรงอัด และพิจารณาให้คอนกรีตที่เสียหาย กล่าวคือคอนกรีตที่มีอุณหภูมิเกิน 500 °C ไม่สามารถรองรับน้ำหนักบรรทุก ในขณะที่คอนกรีตส่วนที่เหลือยังสามารถคงกำลังและโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นไว้โดยสมบูรณ์ เท่ากับค่าเริ่มต้นที่อุณหภูมิปกติ รูปที่ 3-2 และรูปที่ 3-3 แสดงตัวอย่างข้อมูลการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดของคานที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 90 และ 120 นาที ตามลำดับ



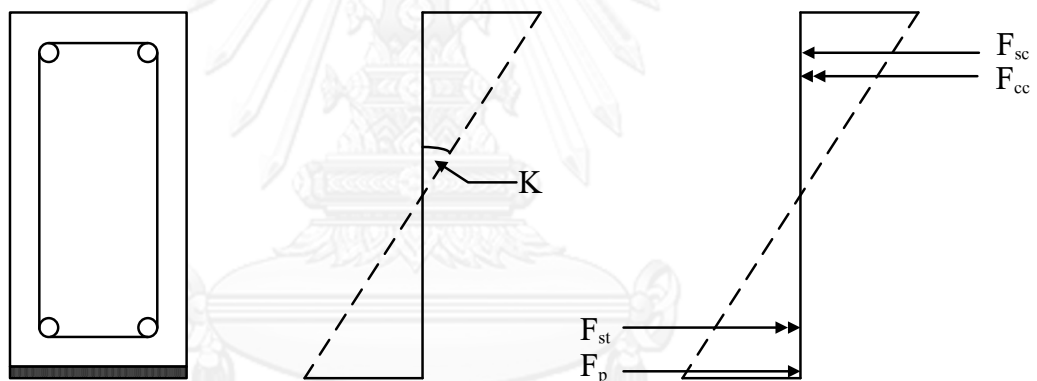
รูปที่ 3-2 พื้นที่หน้าตัดของข้อมูลการกระจายอุณหภูมิ [9]



รูปที่ 3-3 ข้อมูลการกระจายอุณหภูมิที่ระยะเวลาเผาไฟ 30 60 และ 90 นาที [9]

### 3.3 การวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP

แบบจำลองโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากสมมติฐานของหน้าตัดยังคงรักษาระนาบ และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ การวิเคราะห์สมดุลของแรงในหน้าตัดสามารถทำได้โดยเริ่มจากพิจารณาการกระจายของความเครียดของหน้าตัดเป็นเส้นตรง เนื่องจากระนาบของหน้าตัดยังคงรักษาระนาบซึ่งจะมีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าสองตัว คือ ความเครียดที่ผิวของท้องคานและหลังคาน จากนั้นใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุ เปลี่ยนนาการกระจายของความเครียดเป็นการกระจายของความเค้น ซึ่งจากความเค้นดังกล่าวก็จะสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตแลเหล็กเสริม โดยเนื้อแกนสะเทินจะเป็นส่วนที่รับแรงอัด และภายใต้แกนสะเทินเป็นส่วนที่รับแรงดึงของหน้าตัด ทำการปรับค่าความเครียดที่ผิวของท้องคานหรือหลังคานจนกระทั่งแรงภายในหน้าตัดอยู่ในสมดุล ซึ่งในขั้นนี้พิจารณากรณีหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปไม่มีแรงตามแนวแกน ดังนั้นเมื่อแรงภายในหน้าตัดอยู่ในสมดุลก็จะสามารถหาความโค้งจากการกระจายของความเครียด และโมเมนต์ดัดที่ทำให้เกิดความโค้งดังกล่าวจากแรงภายในหน้าตัด แสดงดังรูปที่ 3-4 หลักการวิเคราะห์หน้าตัดจะไม่มีผลของแรงดิ่งในคอนกรีต



รูปที่ 3-4 การกระจายของความเค้น และความเครียดของหน้าตัด

ในการจำลองพฤติกรรมของคอนกรีต กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในช่วงความเครียดแข็งเพิ่ม (strain hardening) มีลักษณะเป็นพาราโบลาตามสมการที่ (3.2) [5] และในช่วงความเครียดแข็งลด (strain softening) ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดมีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (3.3) [5]

$$f_c = f'_c \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad ; \quad 0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (3.2)$$

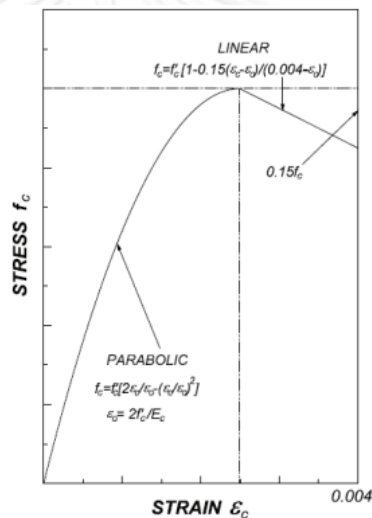
$$f_c = f'_c \left[ 1 - \frac{0.15}{0.004 - \epsilon_0} (\epsilon_c - \epsilon_0) \right] \quad ; \quad 0 \leq \epsilon_c \leq 0.004 \quad (3.3)$$



$$E_c = 5000\sqrt{f'_c} \quad (3.4)$$

โดยที่  $f'_c$  คือ กำลังอัดคอนกรีต (เมกะปาสคาล)  
 $\epsilon_0$  คือ ความเครียดขณะที่คอนกรีตเกิดหน่วยแรงเท่ากับค่ากำลังอัดคอนกรีต  
 $E_c$  คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีต (เมกะปาสคาล)

จากสมการที่ (3.2) และ (3.3) สามารถเขียนรูปความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตได้ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต [10]

กำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กเสริมเป็นแบบอีลาสโตพลาสติก (elasto-plastic) กล่าวคือหน่วยแรงของเหล็กเสริมสัมพันธ์กับความเครียดของเหล็กเสริมแบบเชิงเส้นจนถึงความเครียดที่จุดคราก และหน่วยแรงมีค่าคงที่เมื่อความเครียดของเหล็กเสริมมีค่ามากกว่าความเครียดที่จุดคราก และสำหรับ FRP ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรงจนถึงหน่วยแรงดิ่งประลัยของ FRP

สำหรับระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP สามารถคำนวณได้จากหลักการงานเสมือน (virtual work principle) ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (3.5) [5]

$$\Delta_{mid} = 2 \left( \int_0^{L_0} \delta M \cdot \kappa_1 dx + \int_{L_0+L_d}^{L/2} \delta M \cdot \kappa_{II} dx \right) \quad (3.5)$$

โดยที่	$\Delta_{mid}$	คือ ระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP (เมตร)
	$L_0$	คือ ระยะจากฐานรองรับถึงปลาย FRP (เมตร)
	$L_d$	คือ ระยะจากปลาย FRP (เมตร) เพื่อพัฒนากำลังเนื่องจากวัสดุประกอบ (composite action) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0
	$L$	คือ ระยะห่างระหว่างฐานรองรับ (เมตร)
	$\delta M$	คือ โมเมนต์ดัดของคานในระบบโครงสร้างเสมือน (นิวตัน×เมตร)
	$\kappa_1$	คือ ความโค้งเนื่องจากแรงที่กระทำบนหน้าตัดคานที่ไม่มีการเสริมกำลังด้วย FRP (องศา <sup>-1</sup> )
	$\kappa_{11}$	คือ ความโค้งเนื่องจากแรงที่กระทำบนหน้าตัดคานที่เสริมกำลังด้วย FRP (องศา <sup>-1</sup> )
	$dx$	คือ ระยะอนุพันธ์ (differential length) ของคาน

ในการคำนวณระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วย FRP ตามสมการที่ (3.5) ต้องสร้างความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง (curvature) ของหน้าตัดคอนกรีตทั้งแบบที่ไม่เสริมกำลังด้วย FRP และแบบที่เสริมกำลังด้วย FRP โดยมีสมมติฐานดังนี้

- 1) การกระจายความเครียดตลอดหน้าตัดมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง
- 2) ไม่คิดผลเนื่องจากการไถล (slip) ระหว่างคอนกรีตและ FRP
- 3) คอนกรีตไม่รับแรงดึง

## บทที่ 4

### รายละเอียดการทดสอบ

การทดสอบมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของการเผาไฟต่อพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กและประสิทธิภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ความรุนแรงของการเผาไฟ กล่าวคือ ทดสอบเผาไฟภายใต้ Standard fire temperature curve (e.g. ISO834) [8] และอัตราการเย็นตัวภายหลังการเผาไฟ ซึ่งได้ทำการทดสอบ 2 ครั้ง มีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การทดสอบชุดที่ 1

ข้อมูลเบื้องต้นของคานทดสอบ มีดังนี้

- คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด  $15 \times 30 \times 210$  ซม.
- ปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ 0.0103 (1.03 %)
- เหล็กรับแรงดึงขนาด DB16 (SD50), เหล็กรับแรงอัดขนาด DB12 (SD50) และเหล็กปลอกขนาด RB6 (SD30)
- ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 25 มม
- กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ระยะเวลา 28 วัน เท่ากับ 350 กก/ตร.ซม.
- เผาไฟที่ระยะเวลา 60, 90 และ 120 นาที
- วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย คือ SikaWrap®-230C/45 (with Sikadur® -330)
- มอร์ตาร์ที่ซ่อมแซม คือ Sika® MonoTop® -610

#### 4.1.1 รายละเอียดและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด  $15 \times 30 \times 210$  ซม. ประกอบด้วยเหล็กเสริมรับแรงดึง 2-DB16 เหล็กรับแรงอัด 2-DB12 และเหล็กปลอก RB6 ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 12.5 ซม. และมีระยะคานกรีตหุ้ม 2.5 ซม. จำนวนทั้งหมด 10 ตัวอย่าง รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงรายละเอียดคานตัวอย่างที่จำนวน 10 ตัวอย่าง

ชื่อคานตัวอย่าง	เวลาที่ใช้ในการเผาไฟ (นาที)	ลักษณะการลดอุณหภูมิ	จำนวนชั้นที่ติด FRP
B00	-	-	-
B00F	-	-	1 ชั้น
B60	60	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	-
B60F	60	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	1 ชั้น
B90	90	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	-
B90F	90	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	1 ชั้น
B120	120	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	-
B120F	120	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	1 ชั้น
B120W	120	ลดอุณหภูมิโดยการฉีบน้ำ	-
B120WF	120	ลดอุณหภูมิโดยการฉีบน้ำ	1 ชั้น

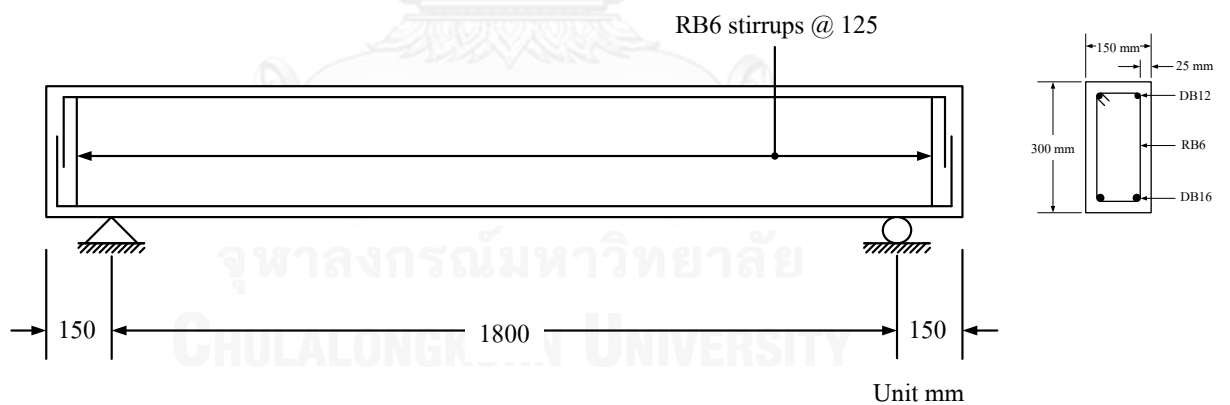
#### 4.1.2 รายละเอียดการทดสอบ

1. การเตรียมแบบหล่อชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3-1

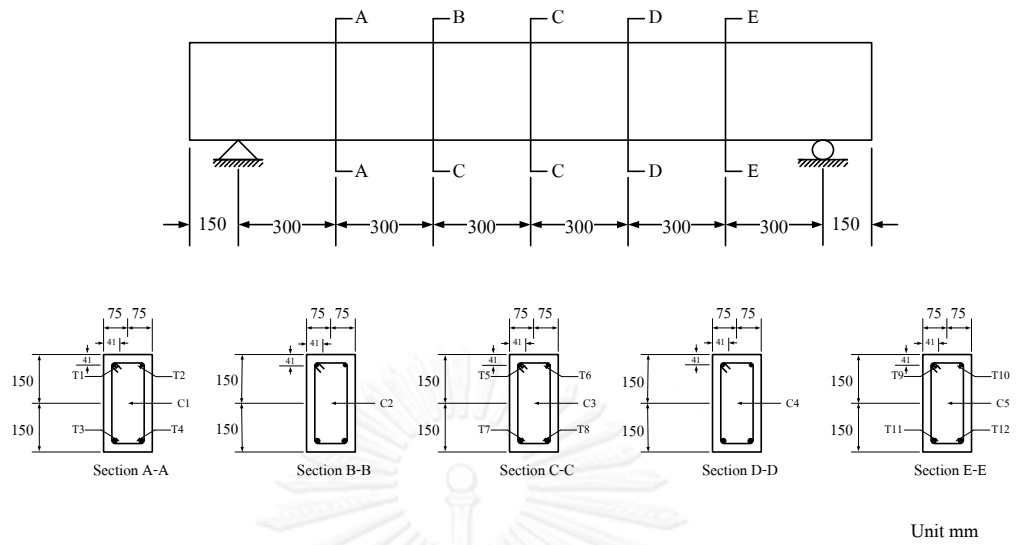


รูปที่ 4-1 การเตรียมแบบหล่อชิ้นงาน

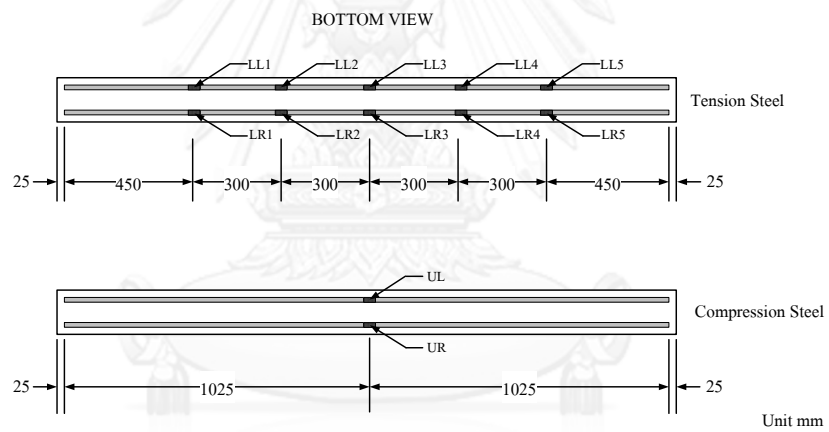
- การผูกเหล็กเสริม, การติดตั้ง TC และ strain gage ตามตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-2 ถึงรูปที่ 4-4 ตามลำดับ ก่อนทำการหล่อคานทดสอบ การผูกเหล็กเสริม เหล็กรับแรงดึงขนาด DB16 (SD50), เหล็กรับแรงอัดขนาด DB12 (SD50), เหล็กปลอกขนาด RB6 (SD30) และ ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก เท่ากับ 125 มม.



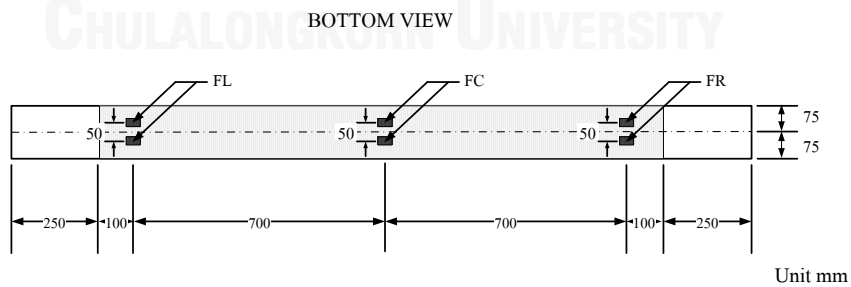
รูปที่ 4-2 ขนาดเหล็กเสริม



รูปที่ 4-3 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานทดสอบ



(a) ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่เหล็กเสริม



(b) ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่ FRP

รูปที่ 4-4 ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ (a) เหล็กเสริมและ (b) FRP

3. การทดสอบกริดที่ค่ากำลังรับแรงอัด 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พร้อมเก็บตัวอย่างเหล็กเสริม (DB16, DB12) และคอนกรีต (15 ตัวอย่าง) และบ่มคานคอนกรีตเสริมเหล็กไว้ที่เวลา 28 วัน โดยทำการบ่มด้วยการพันพลาสติกใส แสดงดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 การบ่มชิ้นงาน

4. การเผาไฟ มีรายละเอียดดังนี้

การเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ชิ้นงานและทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐาน โดยมีการป้องกันไฟที่ผิวเฉพาะปลายทั้งสองของคานและภายหลังจากการเผา 6 ชั่วโมงจึงเปิดเตานำชิ้นงานออกมา รูปที่ 4-6 แสดงรูปถ่ายภายในเตาเผาที่ใช้ในการเผาคาน

เผาที่ระยะเวลา 60 นาที จำนวน 2 ชิ้นงาน และเย็นตัวแบบ air cooling

เผาที่ระยะเวลา 90 นาที จำนวน 2 ชิ้นงาน และเย็นตัวแบบ air cooling

เผาที่ระยะเวลา 120 นาที จำนวน 2 ชิ้นงาน และเย็นตัวแบบ air cooling

เผาที่ระยะเวลา 120 นาที จำนวน 2 ชิ้นงาน และเย็นตัวแบบ water cooling



รูปที่ 4-6 เตาเผาที่ใช้ในการเผาแกน

รูปที่ 4-7 แสดงตัวอย่างการทดสอบเผาไฟแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระดับความรุนแรงของไฟที่ระยะเวลา 60 นาที และรูปที่ 4.8 แสดงความเสียหายของแกนคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงของไฟต่าง ๆ



รูปที่ 4-7 การทดสอบเผาไฟแกนคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระดับความรุนแรงของไฟ ระยะเวลา 60 นาที





รูปที่ 4-8 ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงของไฟต่างๆ

5. การติดตั้งวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วทิ้งให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กกับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ (ประมาณ 3 สัปดาห์) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

เริ่มจากการเตรียมผิวคอนกรีตบริเวณที่จะทำการติดตั้ง FRP โดยถ้าบริเวณผิวคอนกรีตมีการหลุดล่อนเนื่องจากการเผาไฟให้ซ่อมแซมด้วยมอร์ตาร์และบ่มมอร์ตาร์ระยะเวลา 1 สัปดาห์ โดยต้องตรวจสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Pull out test) ดังแสดงในรูปที่ 4-9 และรูปที่ 4-10 หลังจากนั้นทำการทาสีพอกซีเรซินบริเวณที่จะติดตั้ง FRP จากนั้นติดแผ่น FRP เข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 4-11 จากนั้นทำการบ่มอีพอกซีเรซินประมาณ 2 สัปดาห์



รูปที่ 4-9 การทดสอบการรับแรงดึงของคอนกรีต (Pull out test)

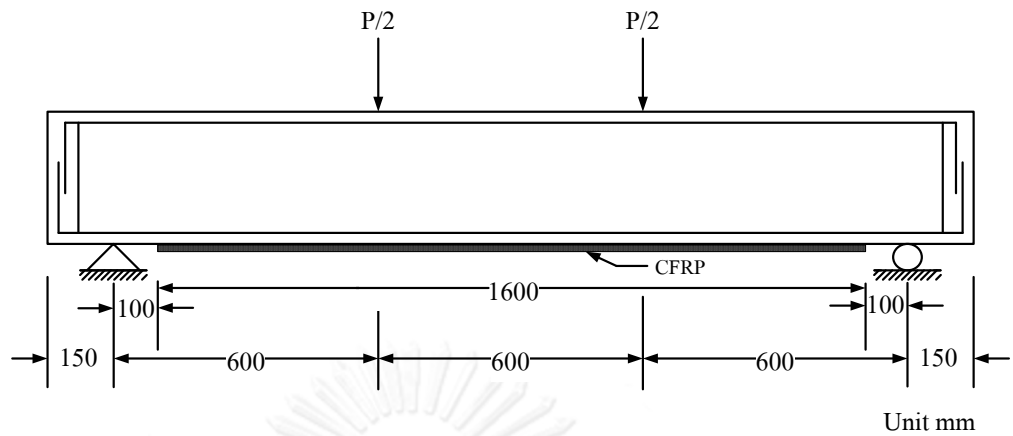


รูปที่ 4-10 การเตรียมผิวคอนกรีตก่อนซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 4-11 การติดตั้งแผ่น FRP

6. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เผาไฟสองตัวอย่าง พร้อมทดสอบกำลังของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 สูง 30 เซนติเมตร รูปที่ 4-12 และรูปที่ 4-13 แสดงลักษณะการทดสอบคานในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำ 2 จุดที่ระยะ 1 ใน 3 ของความยาวช่วงคาน



รูปที่ 4-12 การทดสอบคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำ 2 จุด



รูปที่ 4-13 การทดสอบคานในห้องปฏิบัติการ

7. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 8 ตัวอย่างที่เผาไฟและติดตั้ง CFRP แล้ว พร้อมทดสอบกำลังของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 สูง 30 เซนติเมตรที่ถูกเผาไฟ

## 4.2 การทดสอบชุดที่ 2

ข้อมูลเบื้องต้นของคานทดสอบ มีดังนี้

- คานคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาด 15×30×210 ซม.
- ปริมาณเหล็กเสริมเท่ากับ 0.0103 (1.03 %)
- เหล็กรับแรงดึงขนาด DB16 (SD30), เหล็กรับแรงอัดขนาด DB12 (SD30) และเหล็กปลอกขนาด DB10 (SD40)
- ระยะหุ้มเหล็กเสริมเท่ากับ 25 มม.
- กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่ระยะเวลา 28 วัน เท่ากับ 350 กก/ตร.ซม.
- เฝ้าไฟที่ระยะเวลา 90 และ 120 นาที
- วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย คือ SikaWrap®-230C/45 (with Sikadur® -330)
- มอร์ตาร์ที่ซ่อมแซม คือ Sika® MonoTop® -610

### 4.2.1 รายละเอียดและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างคานคอนกรีตเสริมเหล็กขนาด 15 × 30 × 210 ซม. ประกอบด้วยเหล็กเสริมรับแรงดึง 2-DB16 เหล็กรับแรงอัด 2-DB12 และเหล็กปลอก DB10 ระยะห่างระหว่างเหล็กปลอกเท่ากับ 10 ซม. และมีระยะคอนกรีตหุ้ม 2.5 ซม. จำนวนทั้งหมด 5 ตัวอย่าง รายละเอียดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบแสดงในตารางที่ 4-2

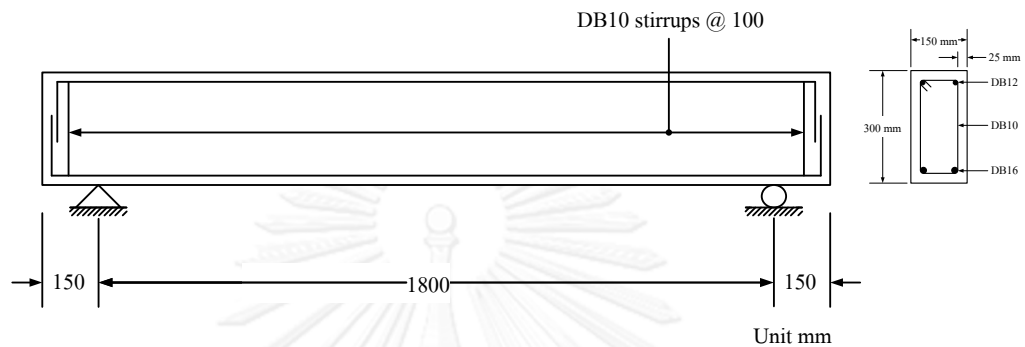
ตารางที่ 4-2 แสดงรายละเอียดคานตัวอย่างจำนวน 5 ตัวอย่าง

ชื่อคานตัวอย่าง	เวลาที่ใช้ในการเผาไฟ (นาที)	ลักษณะการลดอุณหภูมิ	จำนวนชั้นที่ติด FRP
BB00	-	-	-
BB90	90	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	-
BB90F	90	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	1 ชั้น
BB120	120	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	
BB120F	120	ลดอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง	1 ชั้น

### 4.2.2 รายละเอียดการทดสอบ

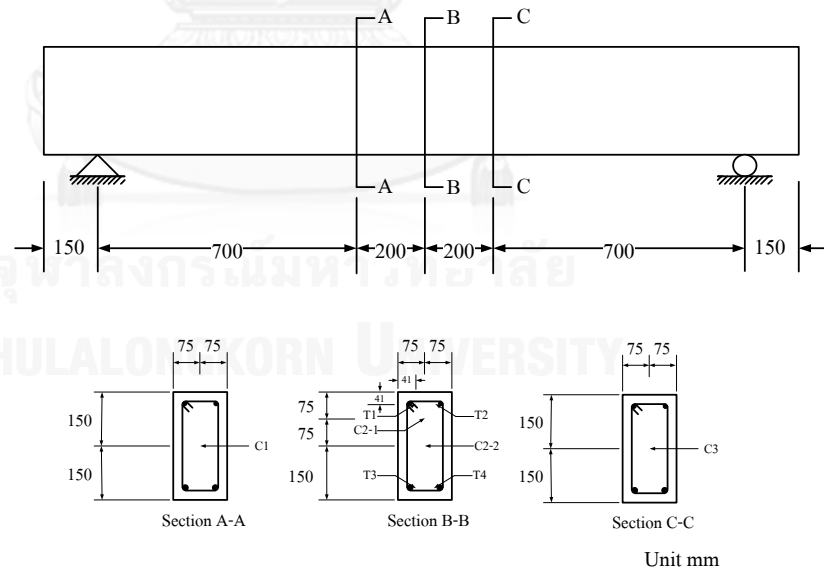
1. การเตรียมแบบหล่อชิ้นงาน (เหมือนการทดสอบชุดที่ 1)

2. การผูกเหล็กเสริม เหล็กรับแรงดึงขนาด DB16 (SD30), เหล็กรับแรงอัดขนาด DB12 (SD30), เหล็กปลอกขนาด DB10 (SD40) และระยะห่างระหว่างเหล็กปลอก เท่ากับ 10 ซม. ดังแสดงในรูปที่ 4-14

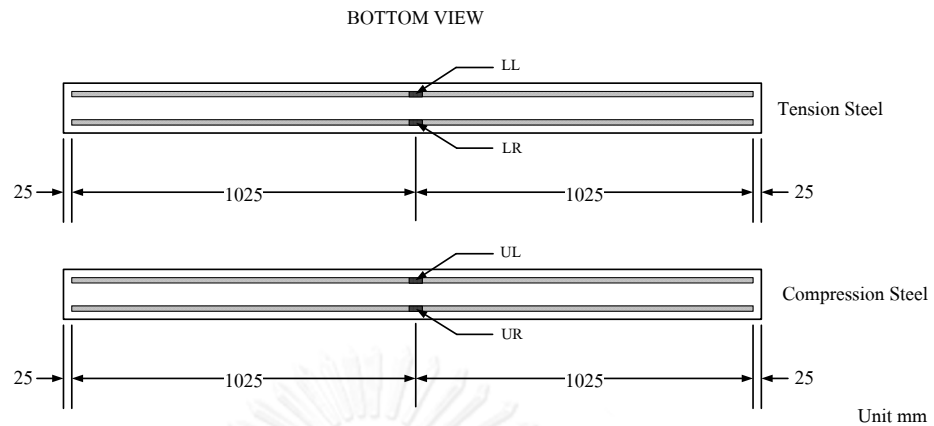


รูปที่ 4-14 ขนาดเหล็กเสริม

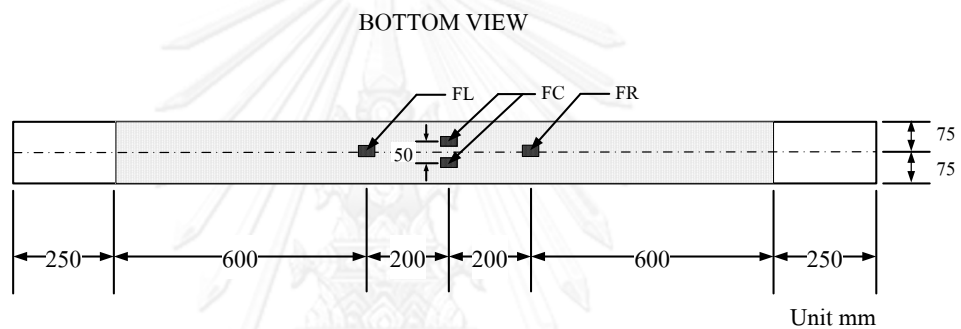
3. การติดตั้ง TC และ strain gage ตามตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4-15 และรูปที่ 4-16 ตามลำดับ ก่อนทำการหล่อคานทดสอบ



รูปที่ 4-15 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานทดสอบ



(a) ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่เหล็กเสริม



(b) ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่ FRP

รูปที่ 4-16 ตำแหน่ง strain gage ที่ติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ (a) เหล็กเสริม และ (b) FRP

4. การเทคอนกรีตที่ค่ากำลังรับแรงอัด 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พร้อมเก็บตัวอย่างเหล็กเสริม (DB16, DB12 และ DB10) และคอนกรีต (9 ตัวอย่าง) และบ่มคานคอนกรีตเสริมเหล็กไว้เป็นเวลา 28 วัน โดยทำการบ่มด้วยการพันพลาสติกใส (เหมือนการทดสอบชุดที่ 1)
5. การเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 4 ชั้นงานและทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐาน ทำการเผา คานคอนกรีตที่ระยะเวลา 90 นาที จำนวน 2 ชั้นงาน เผาที่เวลา 120 นาที จำนวน 2 ชั้นงาน การเย็นตัวเป็นแบบ air cooling ทั้ง 4 ชั้นงาน มีการป้องกันไฟที่ผิวคานสามด้าน (ที่ผิวปลาย ทั้งสองและที่ผิวด้านบน) และภายหลังจากการเผา 24 ชั่วโมงจึงเปิดเตานำชิ้นงานออกมา รูปที่ 4-17 แสดงตัวอย่างการทดสอบเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระดับความรุนแรงของไฟ ที่ระยะเวลา 90 นาที และรูปที่ 4-18 แสดงความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเผาไฟที่ระดับความรุนแรงของไฟต่าง ๆ



รูปที่ 4-17 ทดสอบเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ระดับความรุนแรงของไฟ  
ระยะเวลา 90 นาที



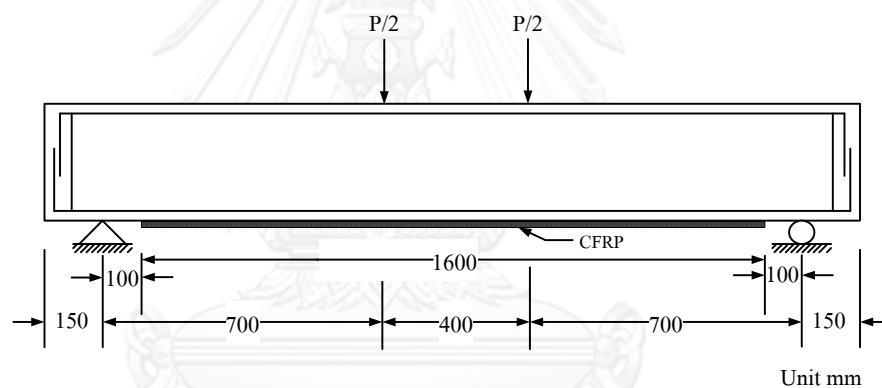
รูปที่ 4-18 ความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการเผาไฟที่ระดับความ  
รุนแรงของไฟต่างๆ

6. การติดตั้งวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กแล้วทิ้งให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กกับวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ (ประมาณ 3 สัปดาห์) โดยมีรายละเอียด ดังนี้
  - 1) เตรียมผิวคอนกรีตบริเวณที่จะทำการติดตั้ง FRP (เหมือนการทดสอบชุดที่ 1)
  - 2) ตรวจสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีต (Pull out test) เริ่มจากการตรวจสอบกำลังรับแรงดึงที่ระดับผิวคอนกรีตและทำการเจาะคอนกรีตส่วนที่เสียหายออกเมื่อค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตมีค่าน้อยกว่า 1.5 เมกะปาสคาล ถ้าหากคอนกรีตเสียหายลึกกว่าระยะหุ้มเหล็กเสริม จะทำการเจาะคอนกรีตส่วนที่เสียหายถึงระดับ

ระยะหุ้มเหล็กเสริม เนื่องจากไม่สามารถทำการซ่อมแซมคอนกรีตส่วนที่เสียหายในระดับที่ลึกกว่าเหล็กเสริมได้

- 3) ซ่อมแซมคอนกรีตเสียหายด้วยมอร์ตาร์ จากนั้นทำการบ่มมอร์ตาร์ประมาณ 1 สัปดาห์ (เหมือนการทดสอบชุดที่ 1)
- 4) ทำการทาสีพอกซีเรซินบริเวณที่จะติดตั้ง FRP และติดแผ่น FRP เข้าไป จากนั้นทำการบ่มอีพอกซีเรซิน ประมาณ 2 สัปดาห์ (เหมือนการทดสอบชุดที่ 1)

7. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เผาไฟจำนวน 1 ตัวอย่าง คือคานตัวอย่าง BB00 พร้อมทดสอบกำลังของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 สูง 30 ซม. รูปที่ 4-19 และรูปที่ 4-20 แสดงลักษณะการทดสอบคานในห้องปฏิบัติการ โดยทำการทดสอบคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำ 2 จุด โดยมีระยะห่างระหว่างจุด เท่ากับ 40 ซม.



รูปที่ 4-19 การทดสอบคานช่วงเดียวภายใต้แรงกระทำ 2 จุด





รูปที่ 4-20 การทดสอบคานในห้องปฏิบัติการ

8. การทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 4 ตัวอย่างที่เผาไฟและติดตั้ง CFRP ได้แก่คานตัวอย่าง BB90, BB90F, BB120 และ BB120F พร้อมทดสอบกำลังของทรงกระบอกคอนกรีตมาตรฐานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 สูง 30 ซม. ที่ถูกเผาไฟ

## บทที่ 5

### ผลการทดสอบ

#### 5.1 ผลการทดสอบชุดที่ 1

##### 5.1.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

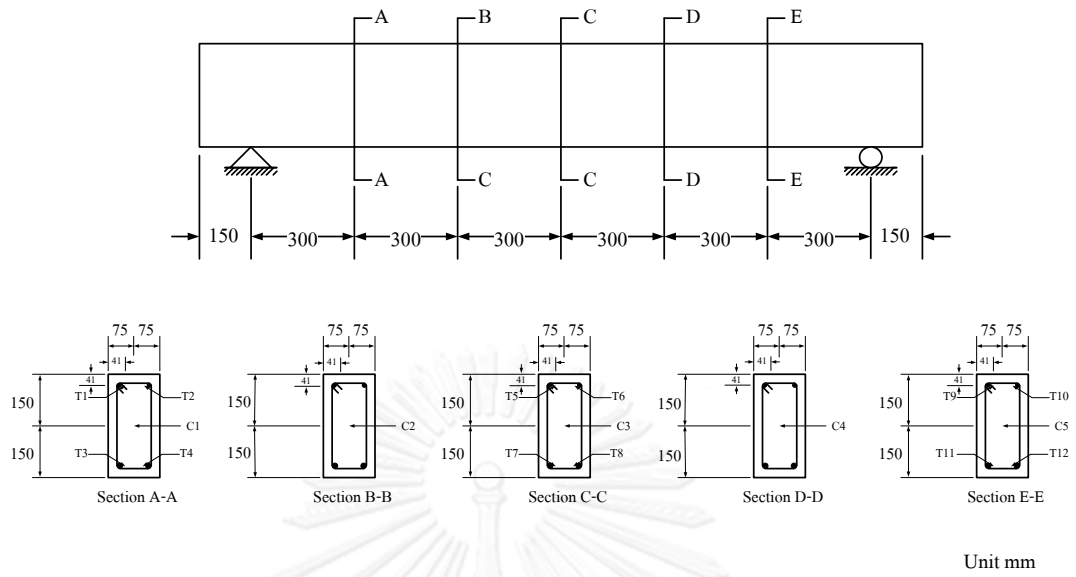
ตารางที่ 5-1 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมด้วยการดึงเหล็กเส้นขนาด DB12 DB16 และ RB6 ที่ใช้ในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 5-1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

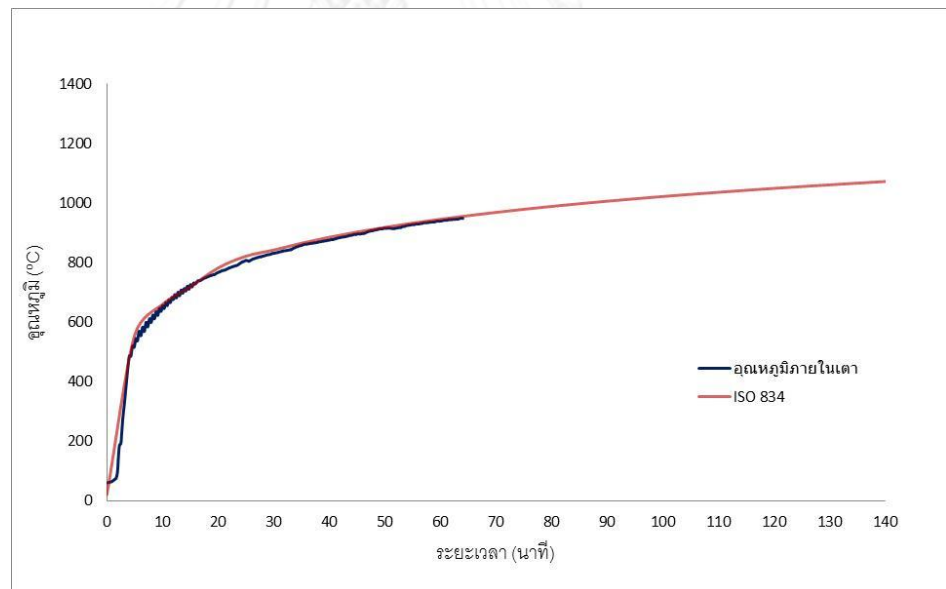
ตัวอย่าง	ขนาด	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	ช่วงความยาวที่วัด (มม.)	หน่วยแรง		การยืดตัว	
				จุดคราก (กก./ตร.ซม.)	สูงสุด (กก./ตร.ซม.)	(มม.)	(%)
1	DB 16 (SD50)	15.9	80	5770	7003	19.0	24
2	DB 16 (SD50)	15.9	80	5698	6932	18.0	23
3	DB 16 (SD50)	15.9	80	5770	7034	18.0	23
4	DB 12 (SD50)	11.8	60	5127	6412	16.0	27
5	DB 12 (SD50)	11.8	60	5127	6504	16.1	27
6	DB 12 (SD50)	11.8	60	5127	6453	16.5	28
7	RB 6 (SD30)	6.0	30	3894	4924	10.0	33
8	RB 6 (SD30)	6.0	30	3823	4862	11.0	37
9	RB 6 (SD30)	6.0	30	3710	4811	11.0	37

##### 5.1.2 อุณหภูมิภายในคอนกรีต

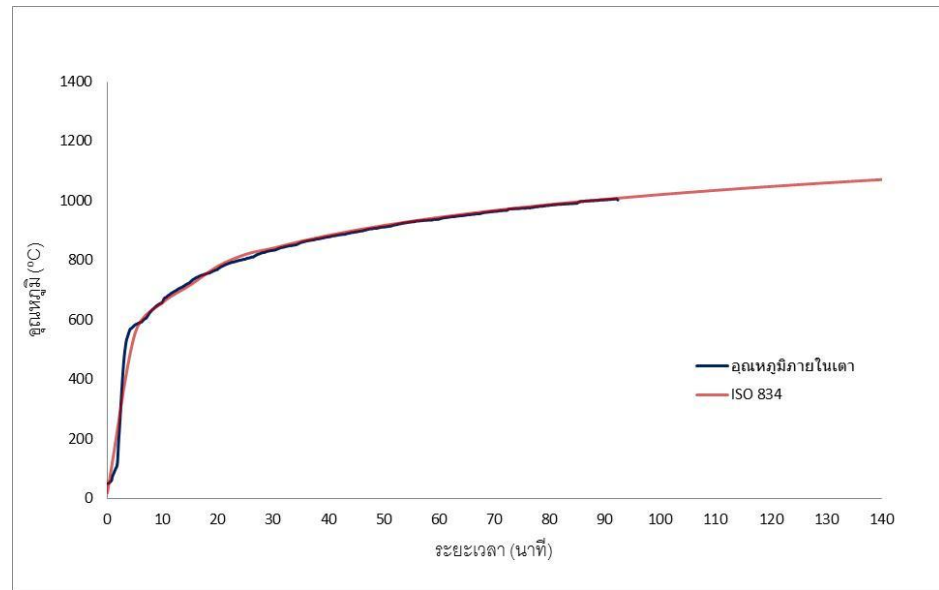
มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในเตาเผาไฟและคานตัวอย่างเพื่อวัดค่าอุณหภูมิภายในคอนกรีต รูปที่ 5-1 แสดงตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลภายในคานตัวอย่าง และรูปที่ 5-2 ถึง รูปที่ 5-5 แสดง อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ เทียบกับกราฟไฟมาตรฐาน (ISO834) [8]



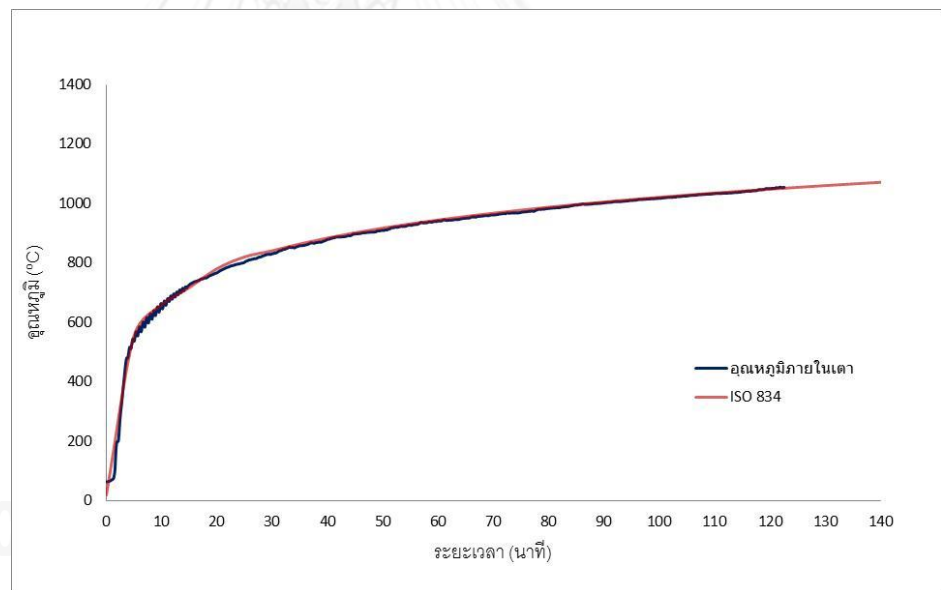
รูปที่ 5-1 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานตัวอย่าง



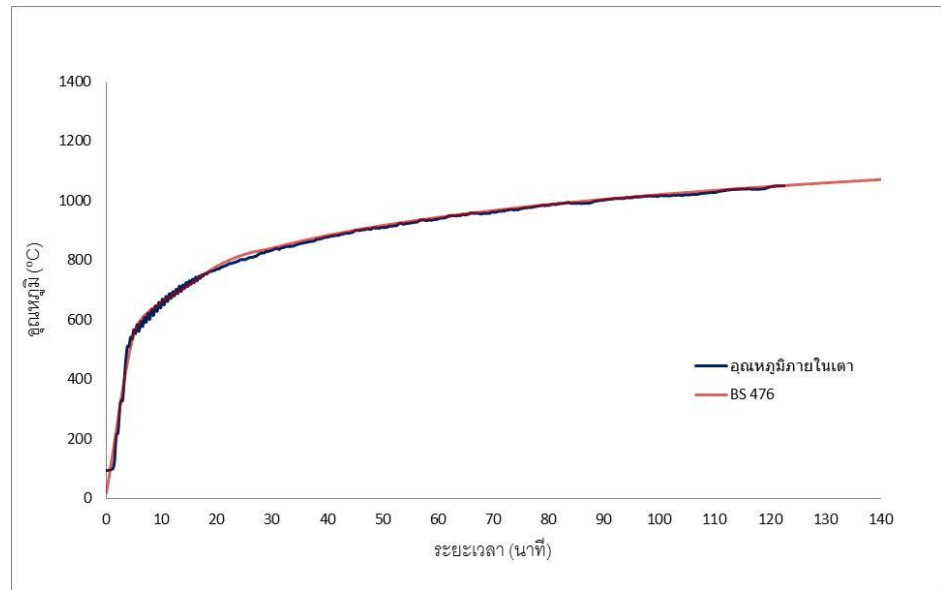
รูปที่ 5-2 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 60 นาที



รูปที่ 5-3 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที



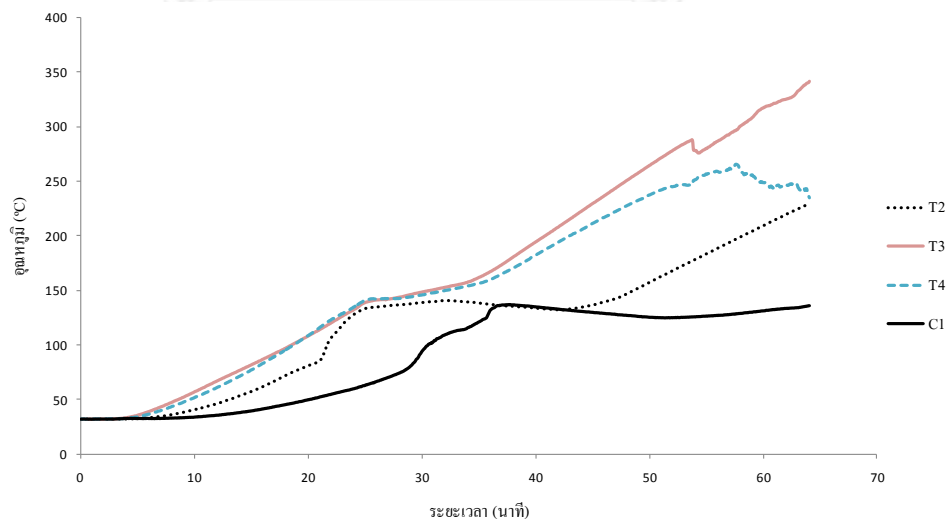
รูปที่ 5-4 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 120 นาที



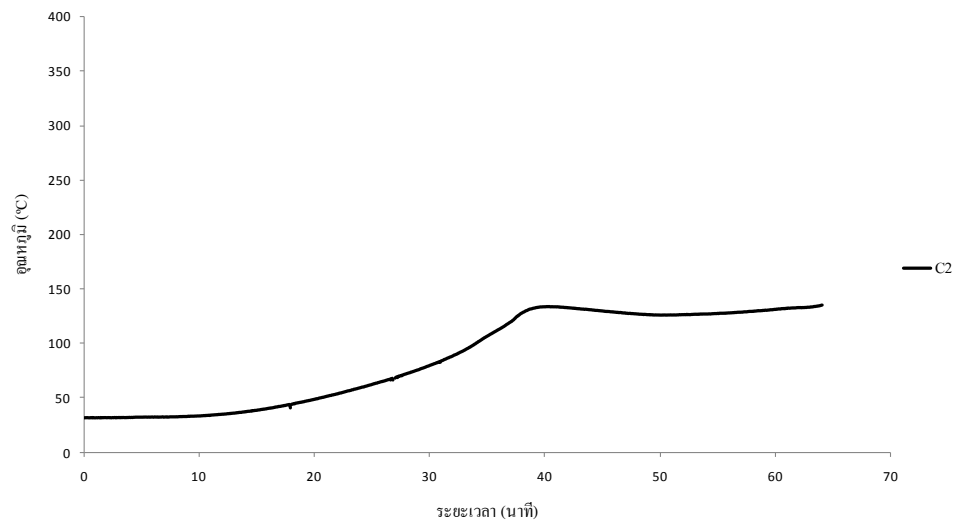
รูปที่ 5-5 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 120 นาที และลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ

#### 5.1.2.1 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที (B60)

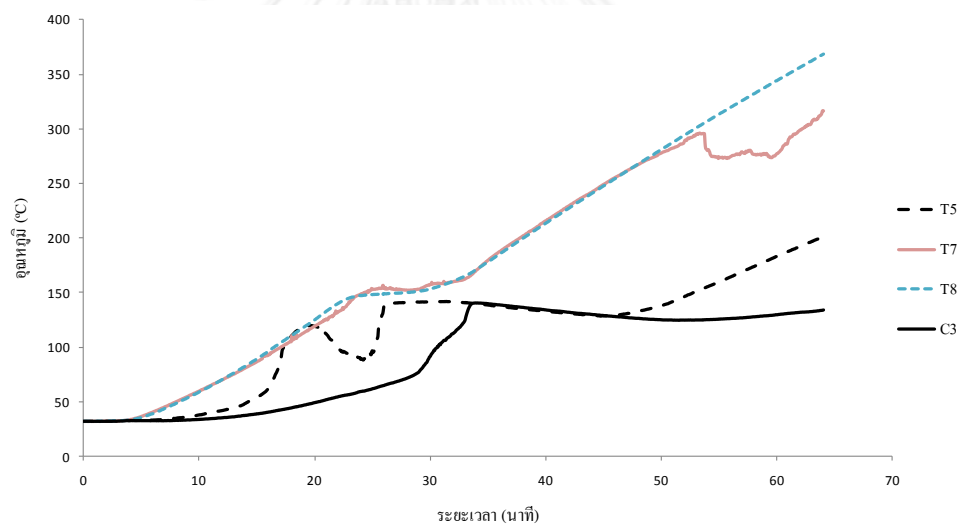
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 60 นาที รูปที่ 5-6 ถึงรูปที่ 5-10 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ T1 T6 T9 T10 และ C5



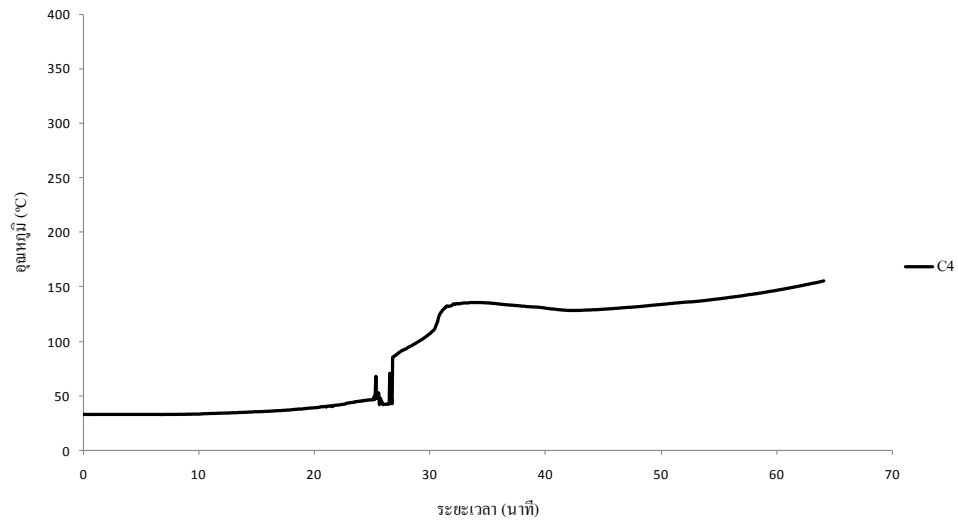
รูปที่ 5-6 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที



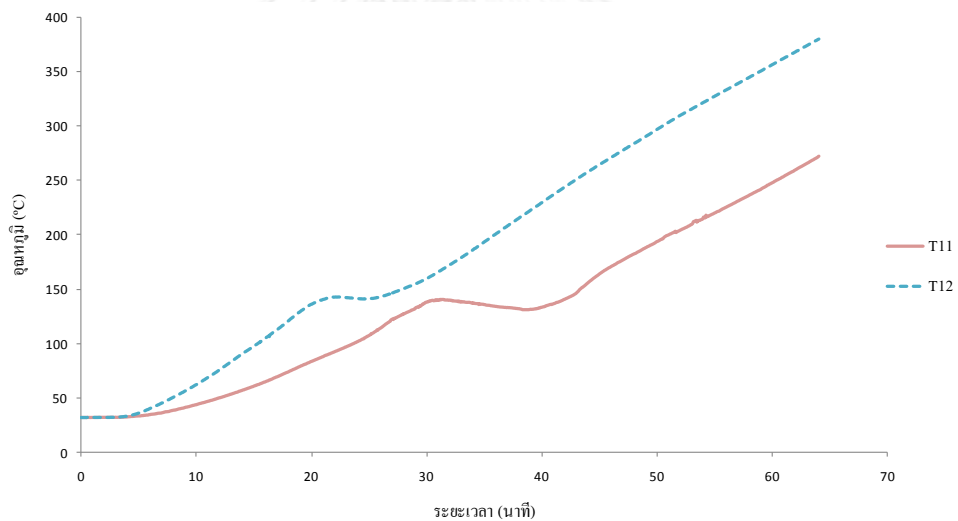
รูปที่ 5-7 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที



รูปที่ 5-8 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที



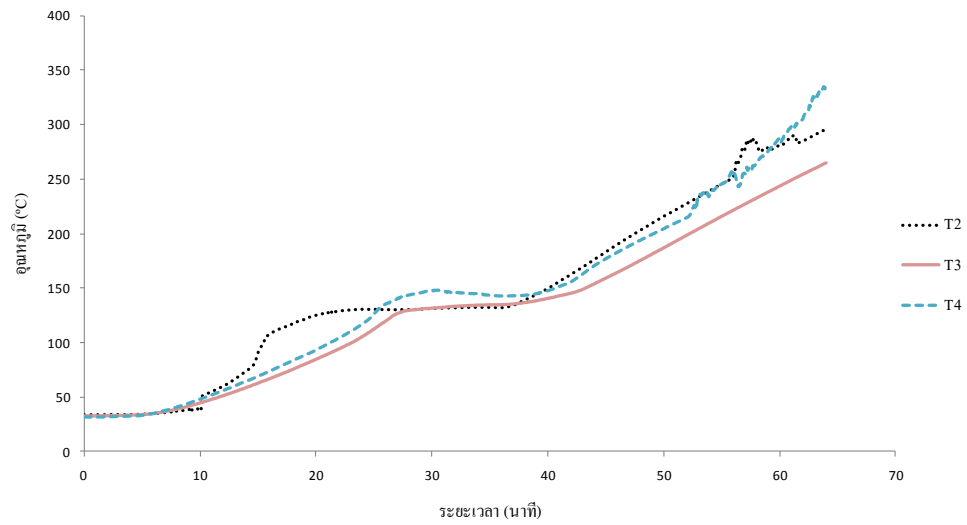
รูปที่ 5-9 อุณหภูมิภายในหน้าตัด D-D ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที



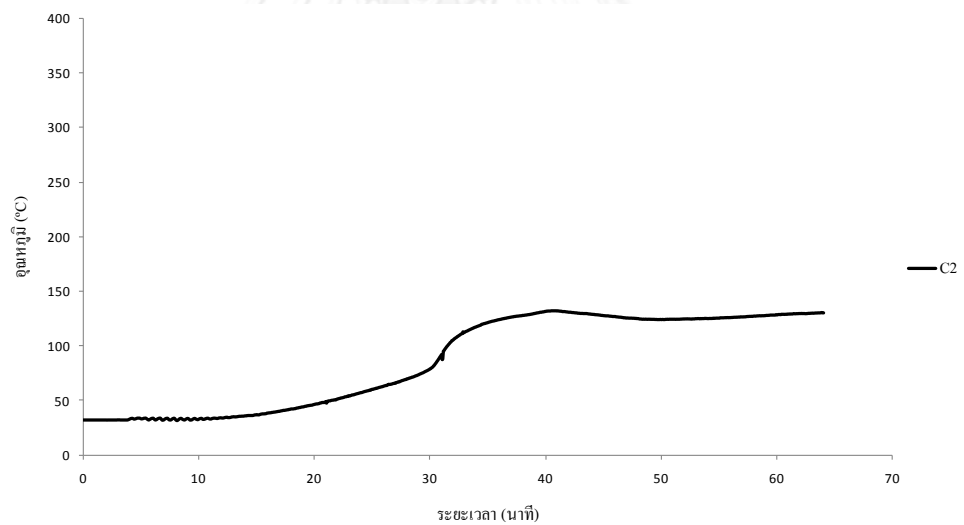
รูปที่ 5-10 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที

#### 5.1.2.2 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP (B60F)

เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 60 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP รูปที่ 5-11 ถึงรูปที่ 5-15 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ T1 และ C1

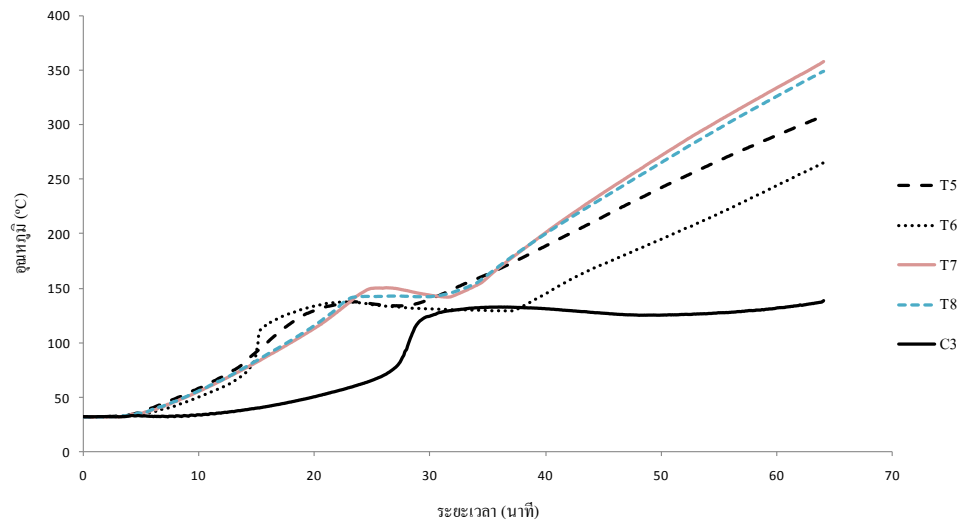


รูปที่ 5-11 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP

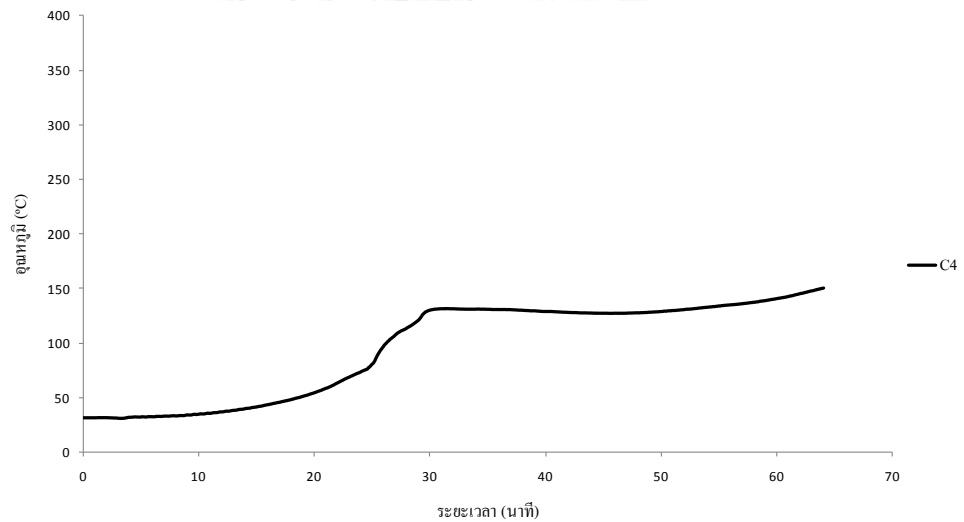


รูปที่ 5-12 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP

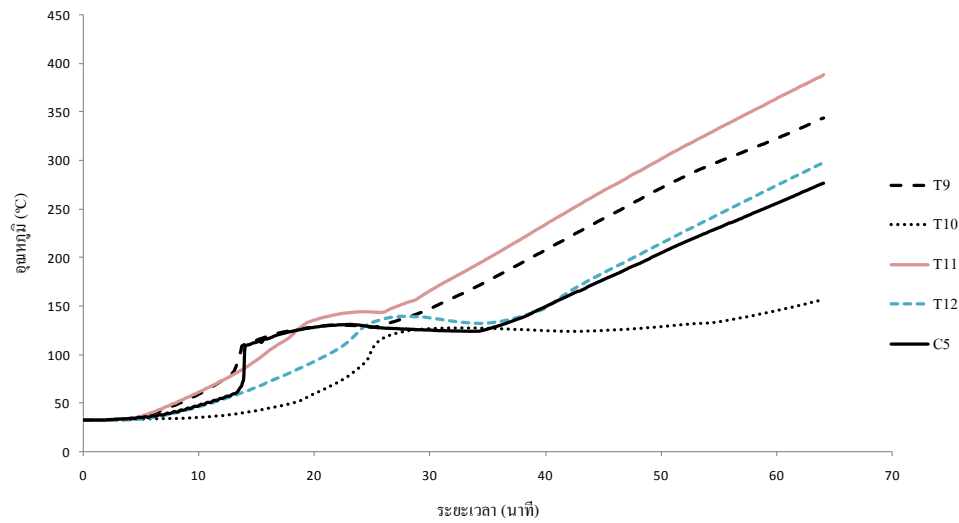




รูปที่ 5-13 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที และ  
ซ่อมแซมด้วย FRP



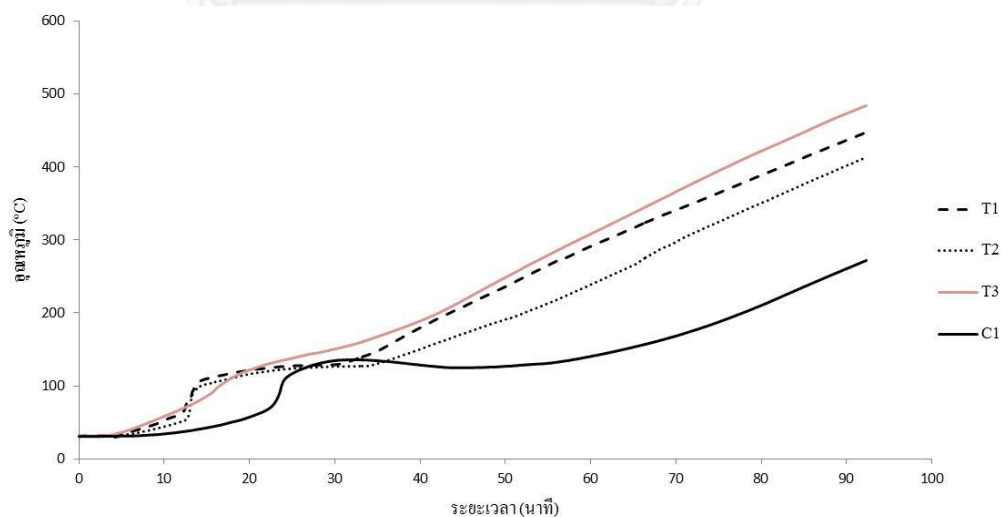
รูปที่ 5-14 อุณหภูมิภายในหน้าตัด D-D ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาทีและ  
ซ่อมแซมด้วย FRP



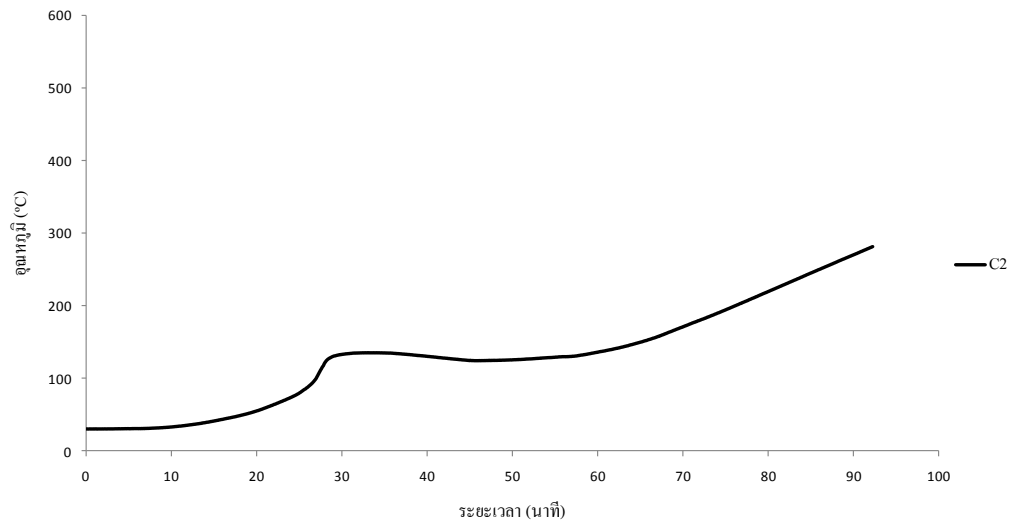
รูปที่ 5-15 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 60 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP

#### 5.1.2.3 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที (B90)

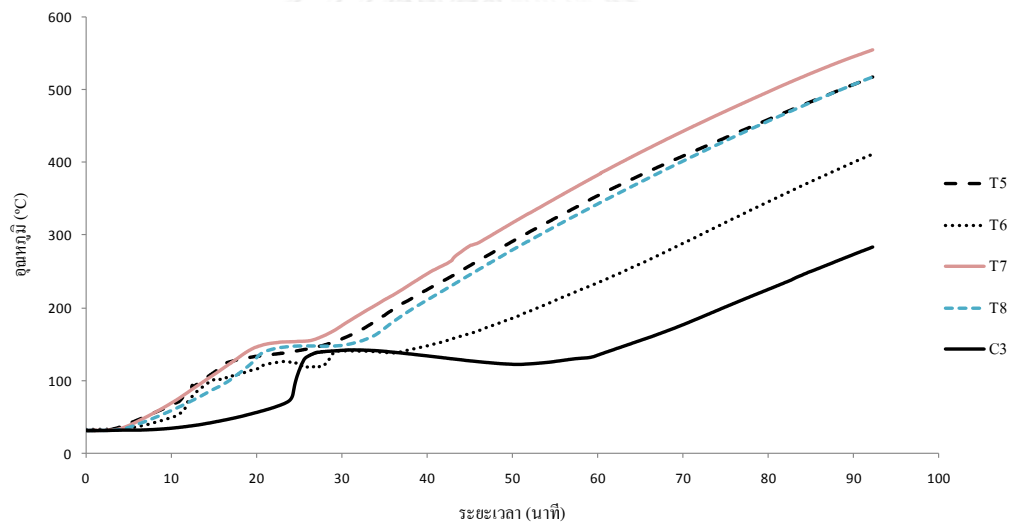
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 90 นาที รูปที่ 5-16 ถึงรูปที่ 5-20 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ T4



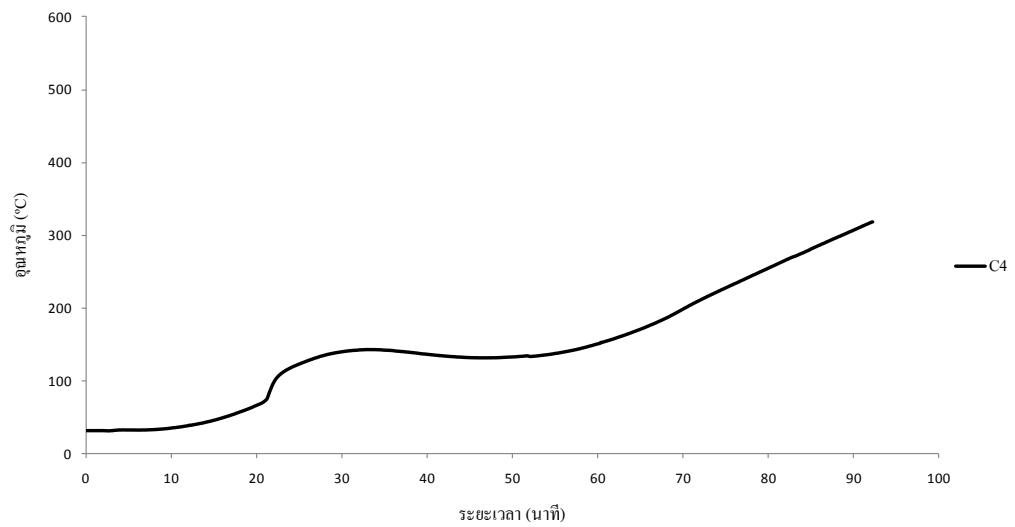
รูปที่ 5-16 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที



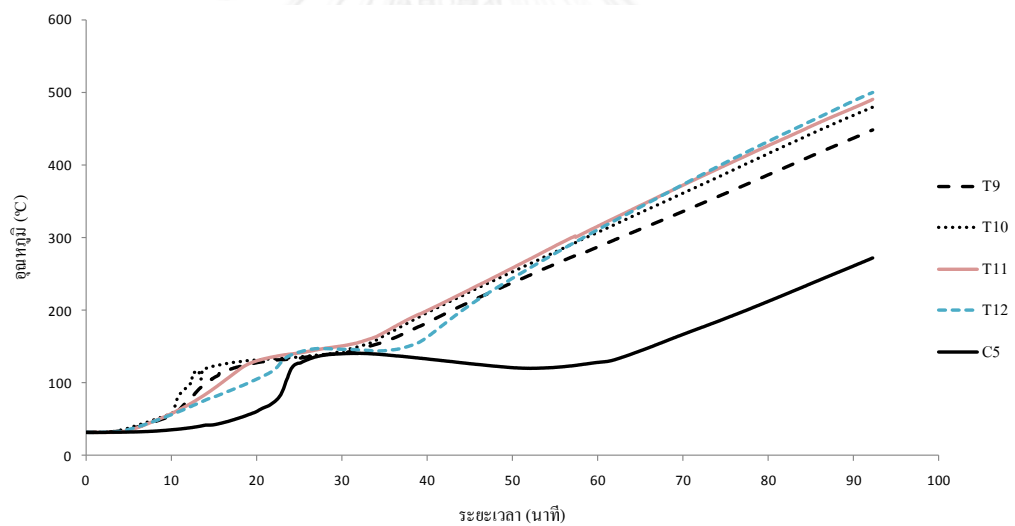
รูปที่ 5-17 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที



รูปที่ 5-18 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที



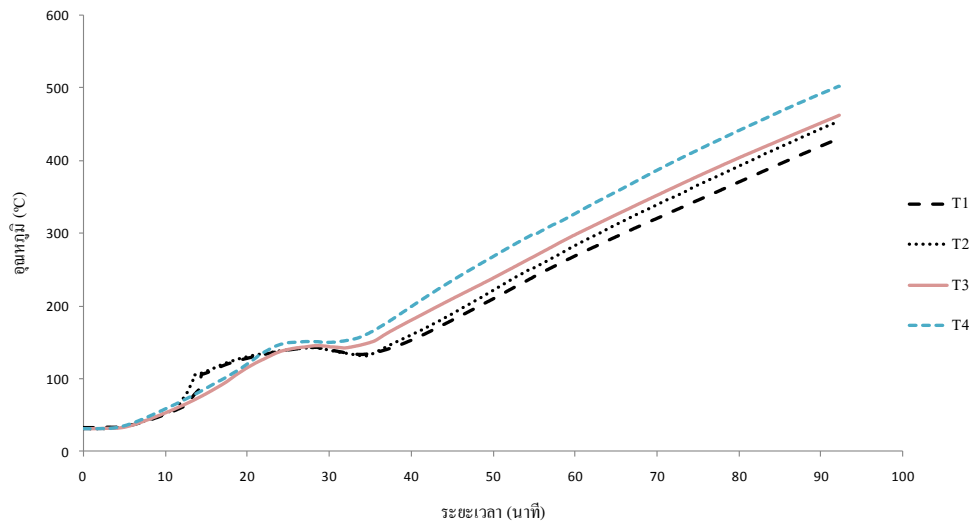
รูปที่ 5-19 อุณหภูมิภายในหน้าตัด D-D ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที



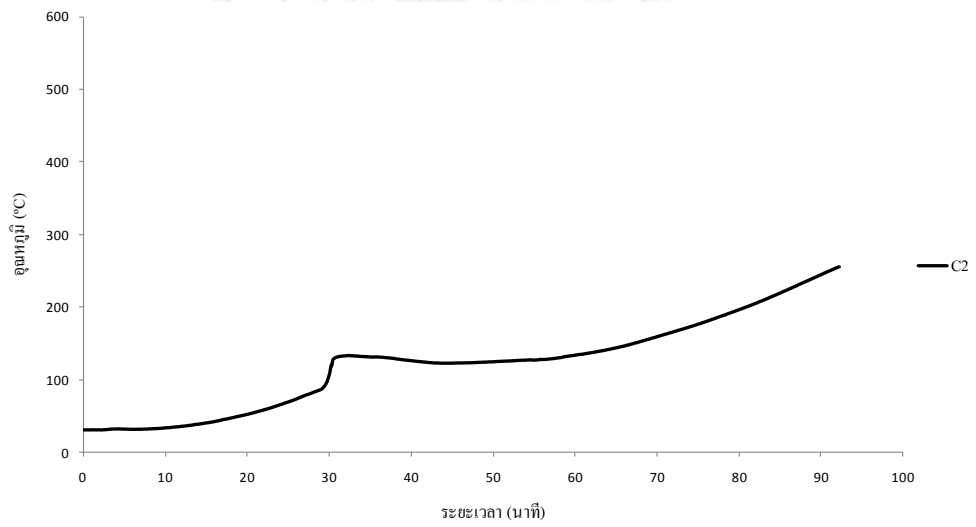
รูปที่ 5-20 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที

#### 5.1.2.4 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP (B90F)

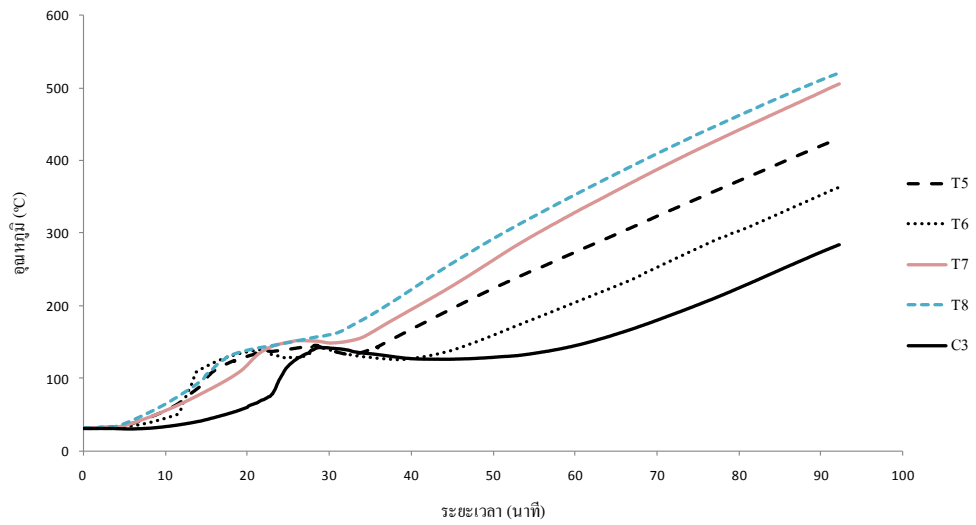
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP รูปที่ 5-21 ถึงรูปที่ 5-25 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ C1 และ T10



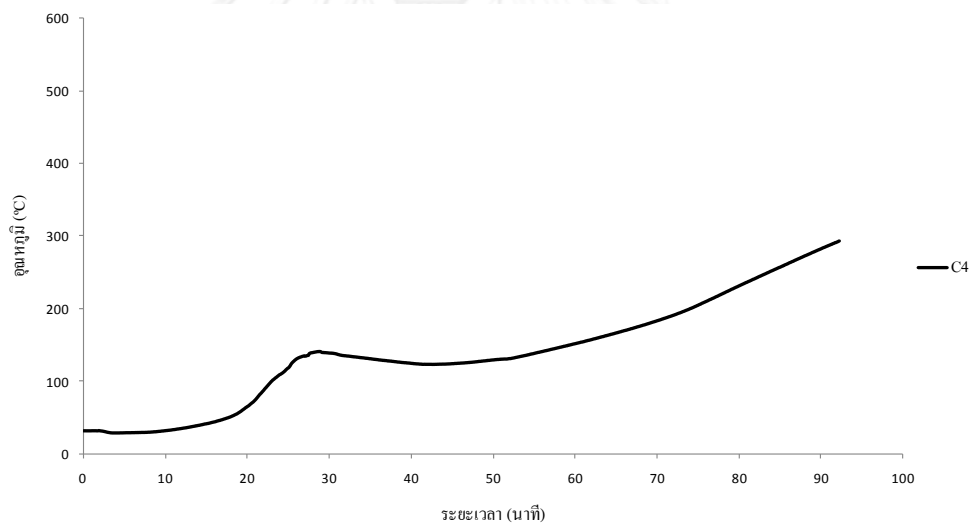
รูปที่ 5-21 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP



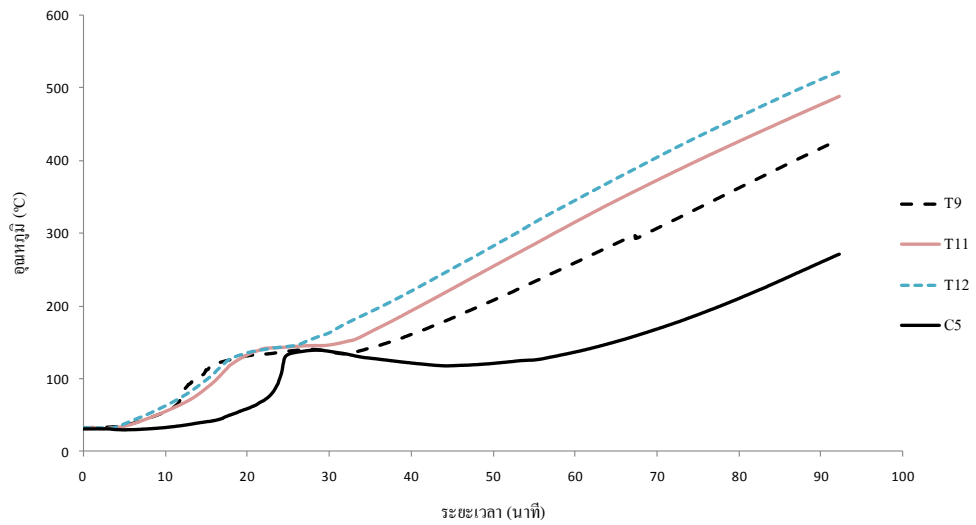
รูปที่ 5-22 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-23 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP



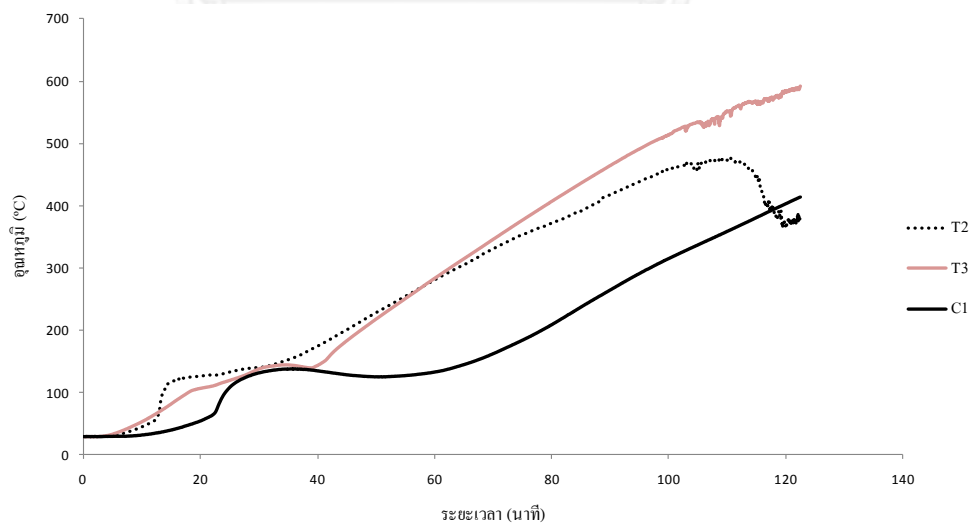
รูปที่ 5-24 อุณหภูมิภายในหน้าตัด D-D ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP



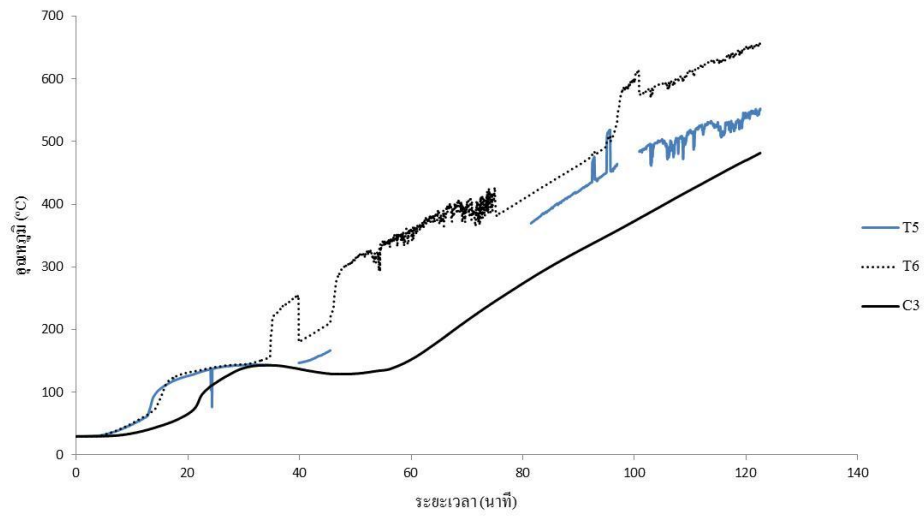
รูปที่ 5-25 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP

#### 5.1.2.5 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที (B120)

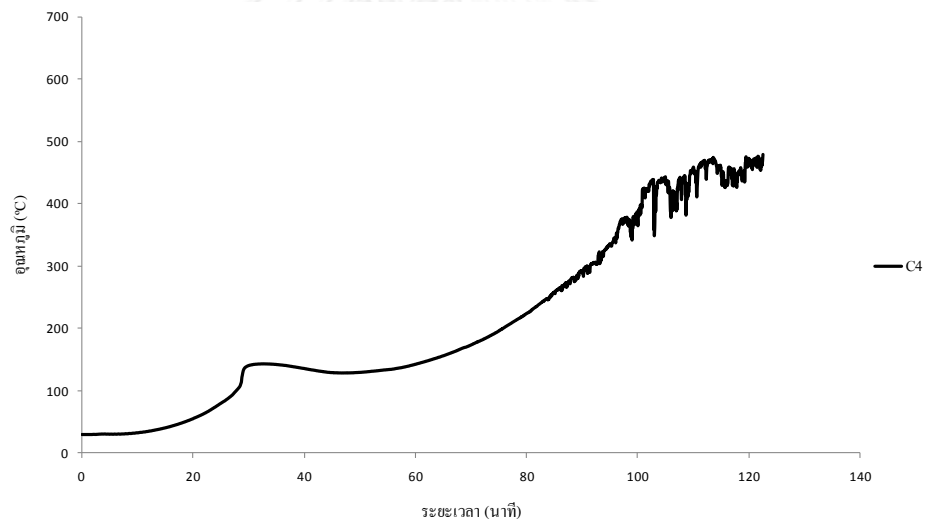
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาที รูปที่ 5-26 ถึงรูปที่ 5-29 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ T1 T4 T7 T8 และ T10



รูปที่ 5-26 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที

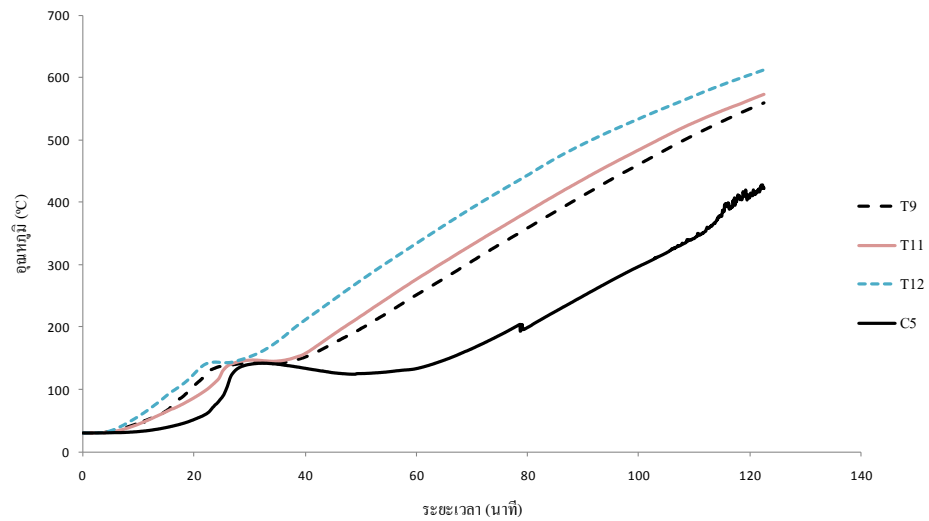


รูปที่ 5-27 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที



รูปที่ 5-28 อุณหภูมิภายในหน้าตัด D-D ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที

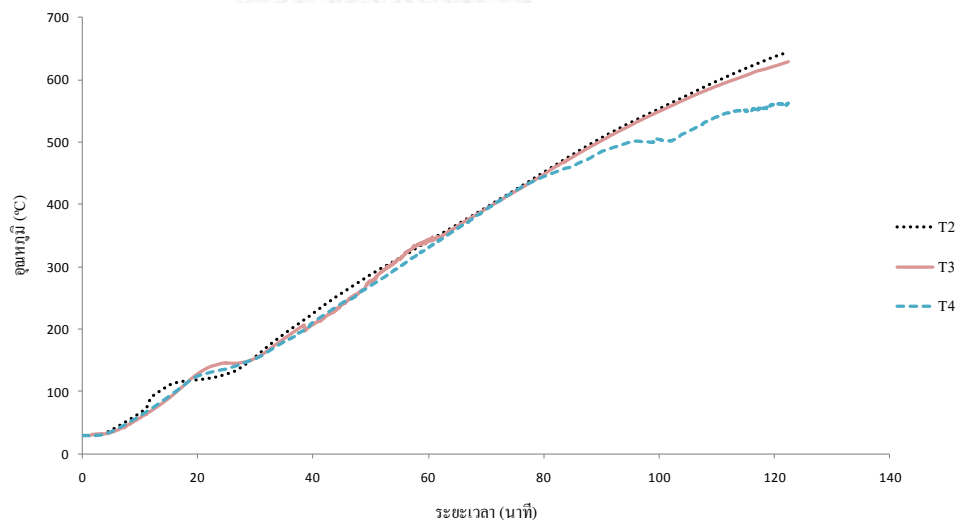




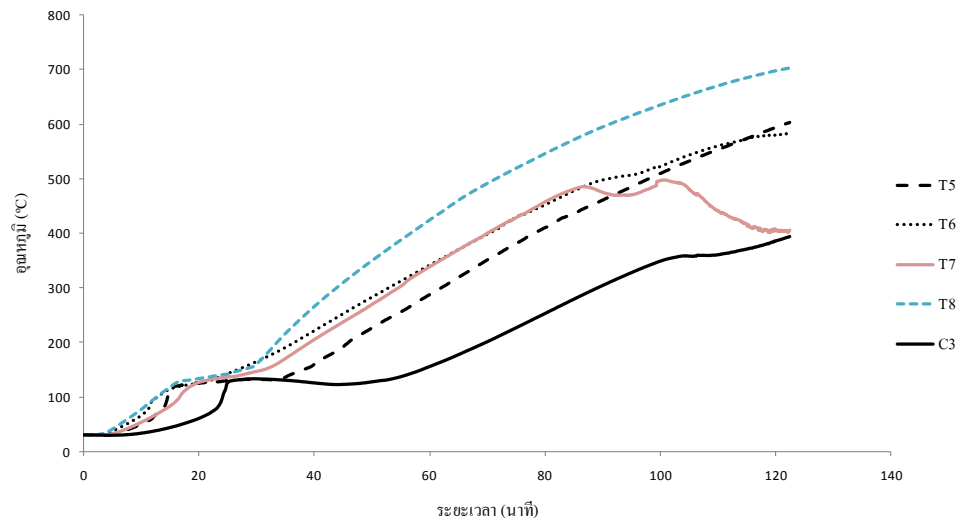
รูปที่ 5-29 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที

#### 5.1.2.6 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP (B120F)

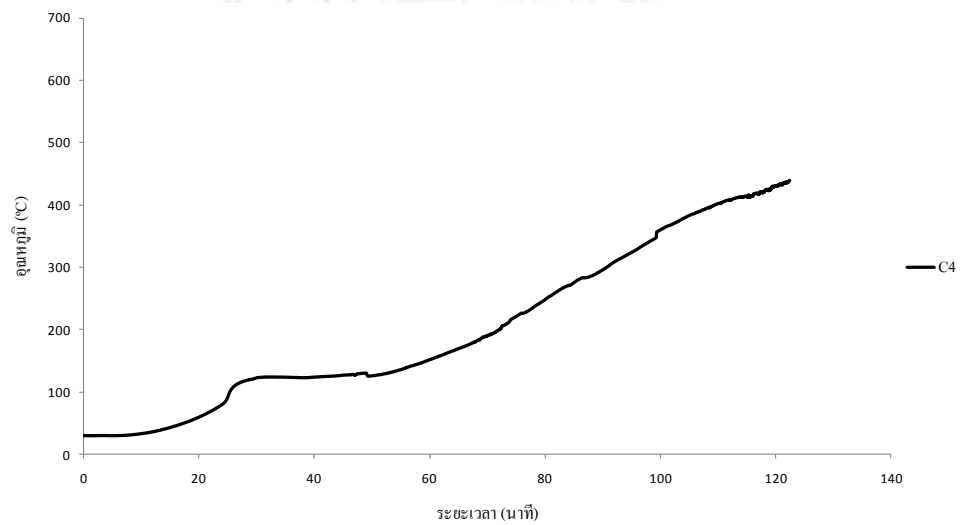
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP รูปที่ 5-30 ถึงรูปที่ 5-33 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ T1 C1 T11 และ C5



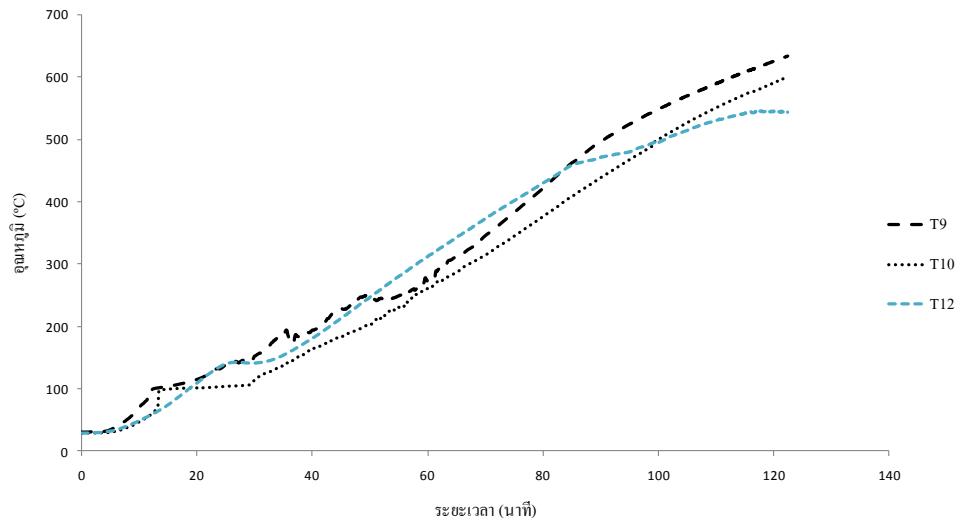
รูปที่ 5-30 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-31 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP



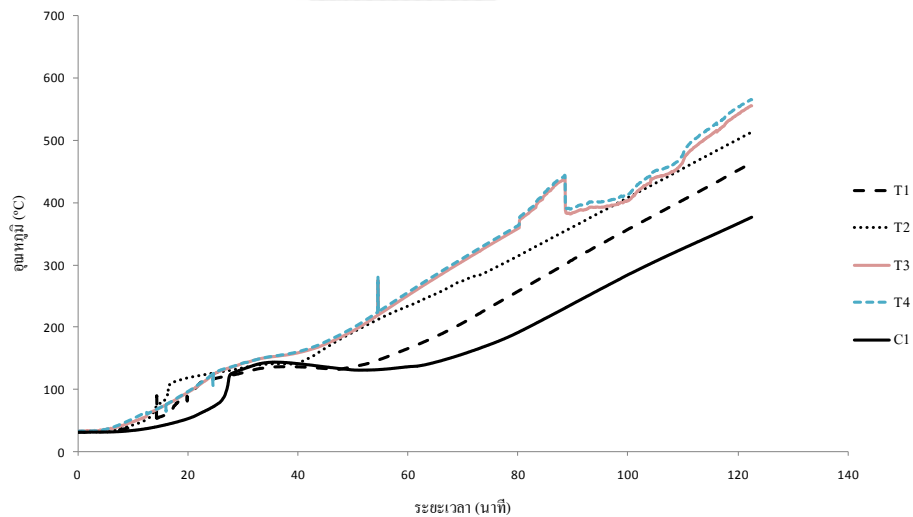
รูปที่ 5-32 อุณหภูมิภายในหน้าตัด D-D ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP



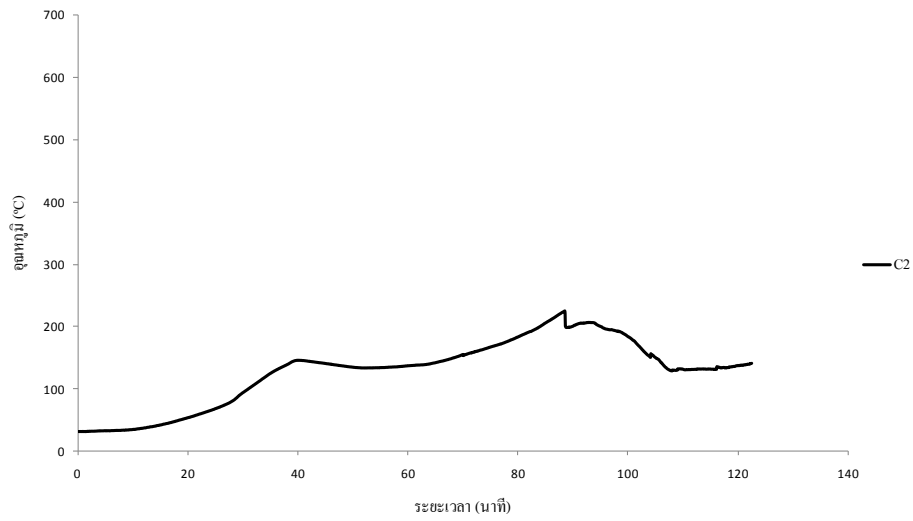
รูปที่ 5-33 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP

#### 5.1.2.7 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ (B120W)

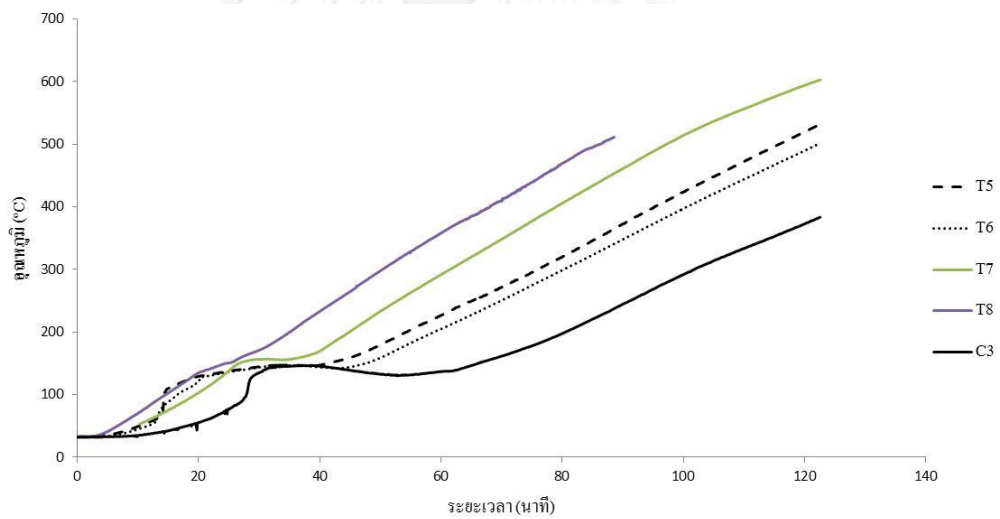
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาที และลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ รูปที่ 5.34 ถึงรูปที่ 5.37 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ C4



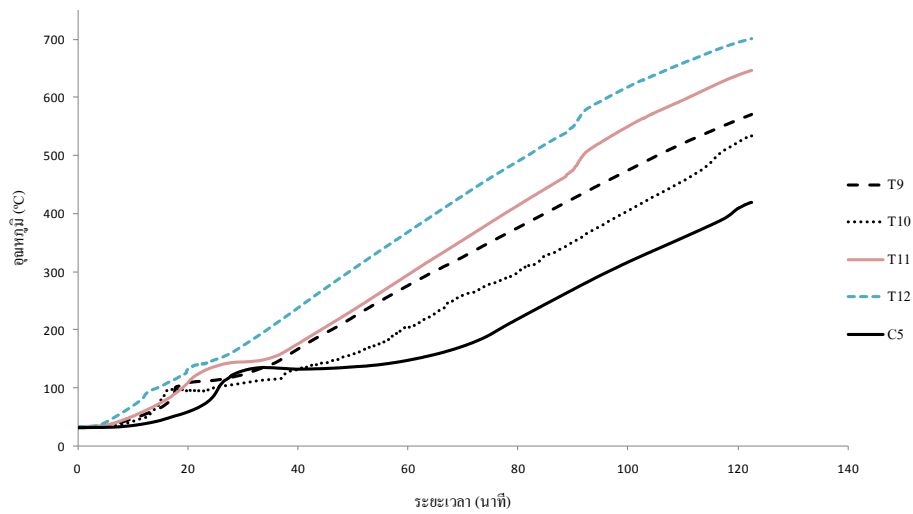
รูปที่ 5-34 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ



รูปที่ 5-35 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ



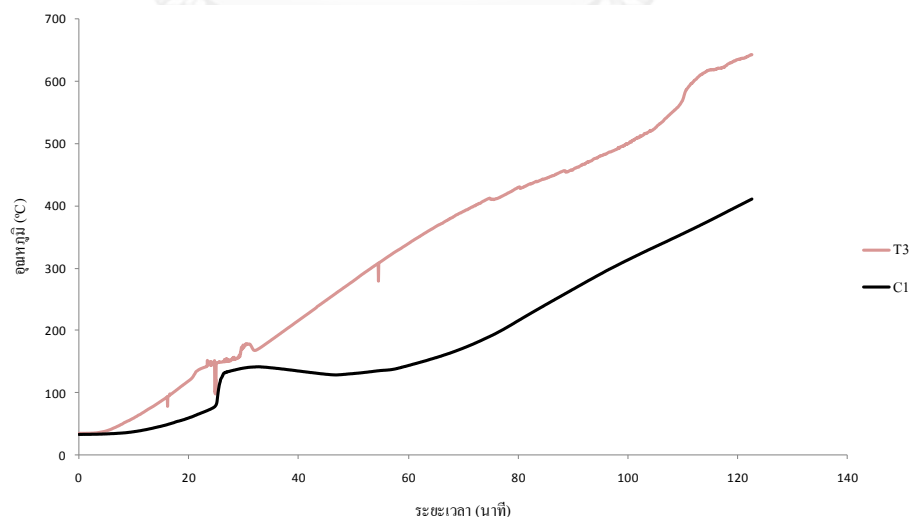
รูปที่ 5-36 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ



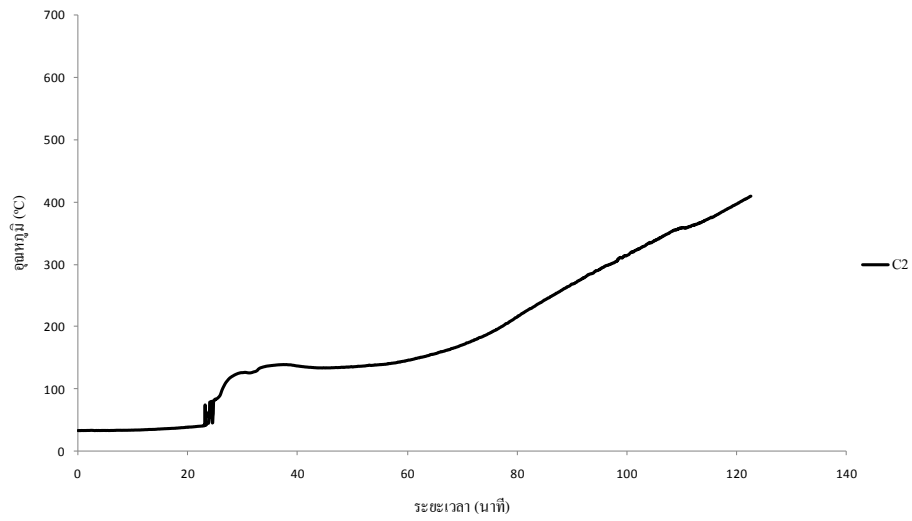
รูปที่ 5-37 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ

#### 5.1.2.8 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ และซ่อมแซมด้วย FRP (B120WF)

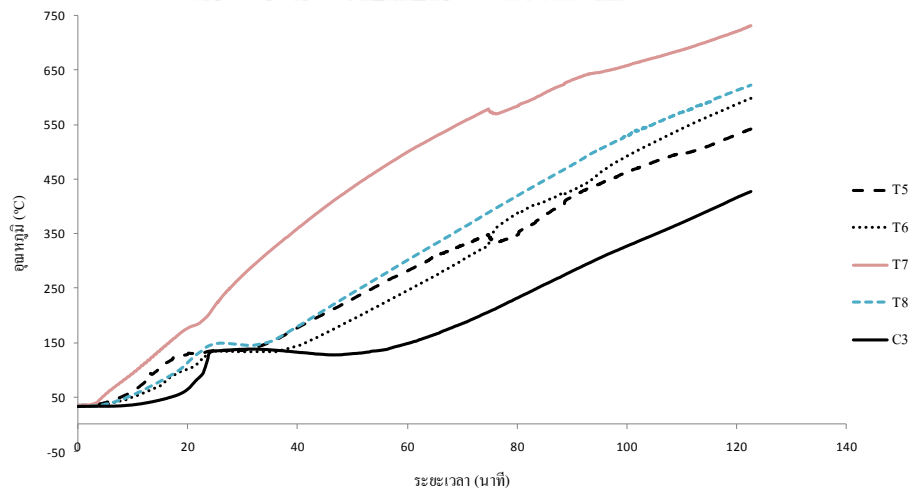
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ และซ่อมแซมด้วย FRP รูปที่ 5-38 ถึงรูปที่ 5-42 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ T1 T2 และ T4



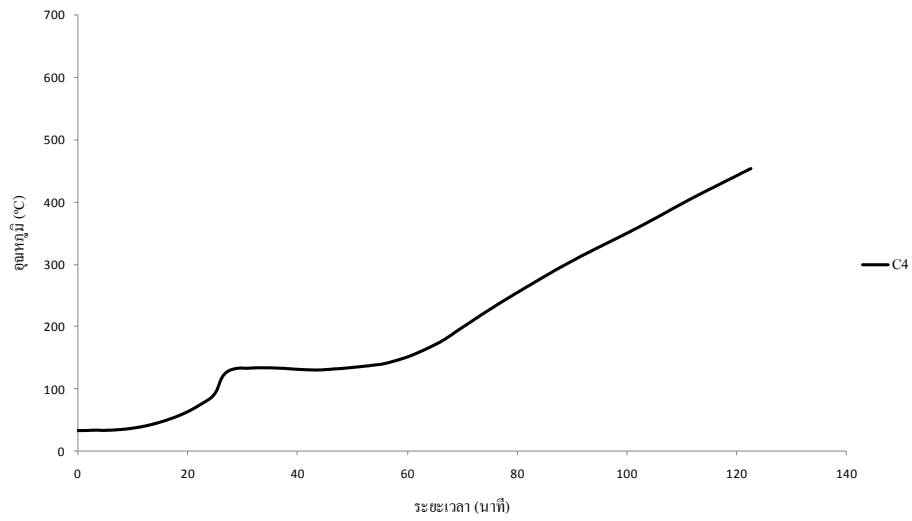
รูปที่ 5-38 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ และซ่อมแซมด้วย FRP



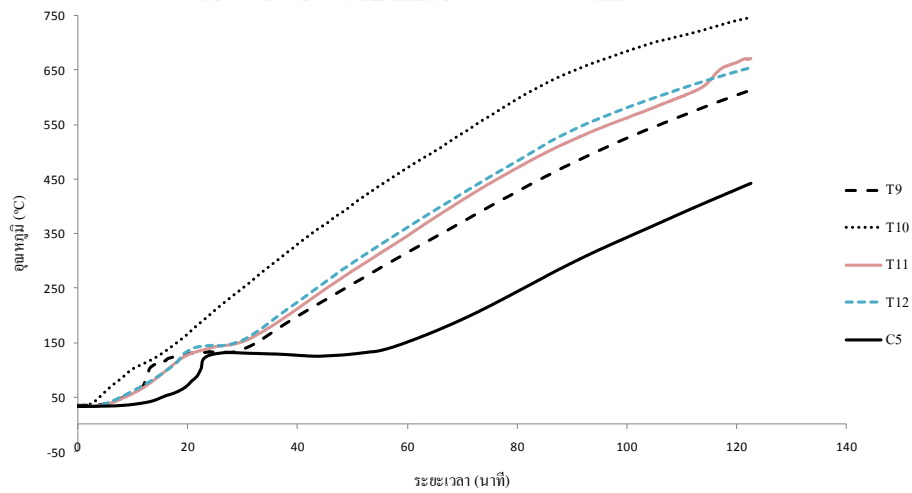
รูปที่ 5-39 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ และซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-40 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ และซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-41 อุณหภูมิภายในหน้าตัด D-D ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ และซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-42 อุณหภูมิภายในหน้าตัด E-E ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีดน้ำ และซ่อมแซมด้วย FRP

### 5.1.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ

ค่าของการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. แสดงดังตารางที่ 5-2

ตารางที่ 5-2 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่เผาด้วยเวลาต่างๆ

ค่ากำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)				
ไม่เผาไฟ (อุณหภูมิห้อง)	เผาไฟ 60 นาที	เผาไฟ 90 นาที	เผาไฟ 120 นาที	เผาไฟ 120 นาที และฉีดน้ำ
309.6	150.9	101.9	72.1	118.2

### 5.1.4 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการเผาไฟ

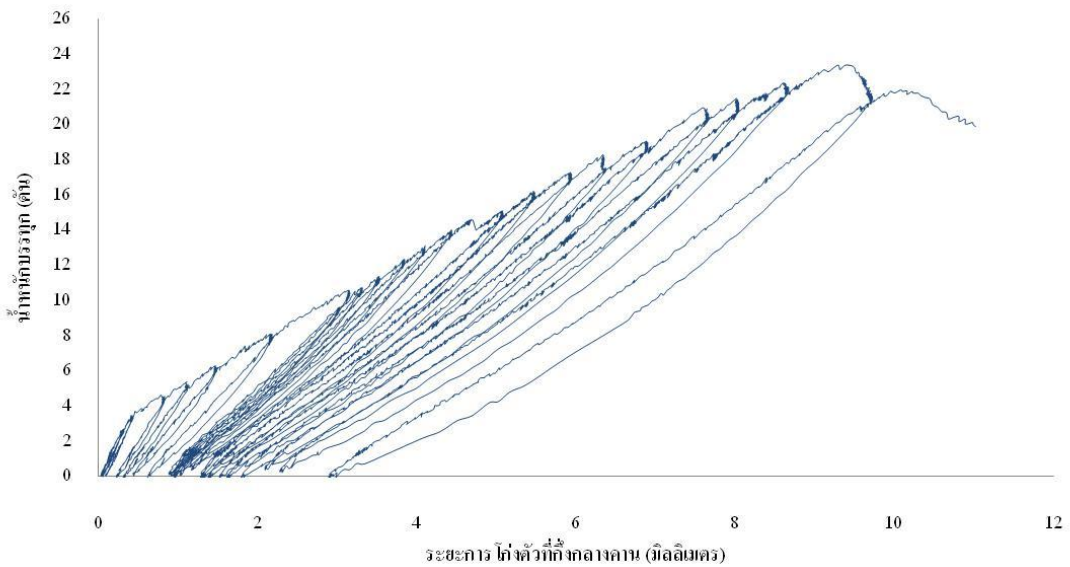
ตารางที่ 5-3 แสดงข้อมูลจากการทดสอบคาน 10 ตัวอย่าง และรูปที่ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะโก่งตัวของคานและรูปแบบการวิบัติของคานแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 5-43 ถึง รูปที่ 5-61 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคานและรูปแบบการวิบัติของทุกคานทดสอบ

จากผลการทดสอบพบว่า คานส่วนใหญ่เกิดการวิบัติแบบเฉือน ทำให้ไม่สามารถประเมินประสิทธิภาพของการซ่อมแซมด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยทางด้านกำลังได้อย่างเหมาะสม จึงจะทำการทดสอบชุดที่ 2 เพิ่มเติมโดยมีการออกแบบเพื่อป้องกันการวิบัติแบบเฉือน



ตารางที่ 5-3 ผลการทดสอบคานชุดที่ 1

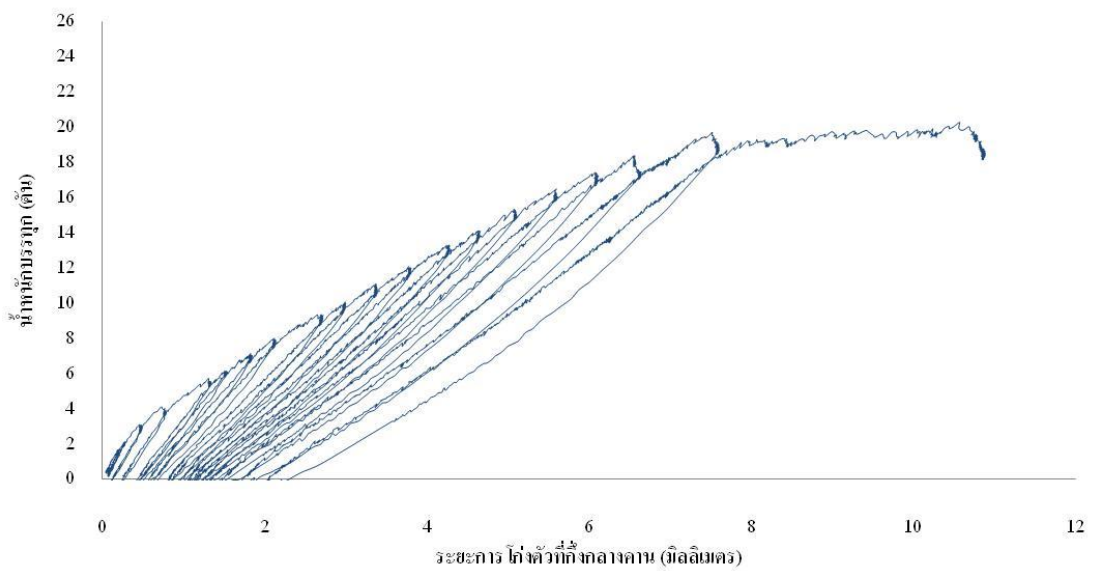
คานตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาที)	วิธีเย็นตัว	จำนวนแผ่น FRP	รูปแบบการวิบัติ	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ตัน)
B00	-	-	-	การเฉือน	23.40
B00F	-	-	1 ชั้น	การเฉือน	20.26
B60	60	อากาศ	-	การเฉือนและการดัด	19.37
B60F	60	อากาศ	1 ชั้น	การเฉือน	21.68
B90	90	อากาศ	-	การเฉือน	17.17
B90F	90	อากาศ	1 ชั้น	การเฉือน	19.70
B120	120	อากาศ	-	การเฉือน	15.26
B120F	120	อากาศ	1 ชั้น	การเฉือน	16.04
B120W	120	ฉีดน้ำ	-	การเฉือน	16.66
B120WF	120	ฉีดน้ำ	1 ชั้น	การเฉือน	15.21



รูปที่ 5-43 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B00



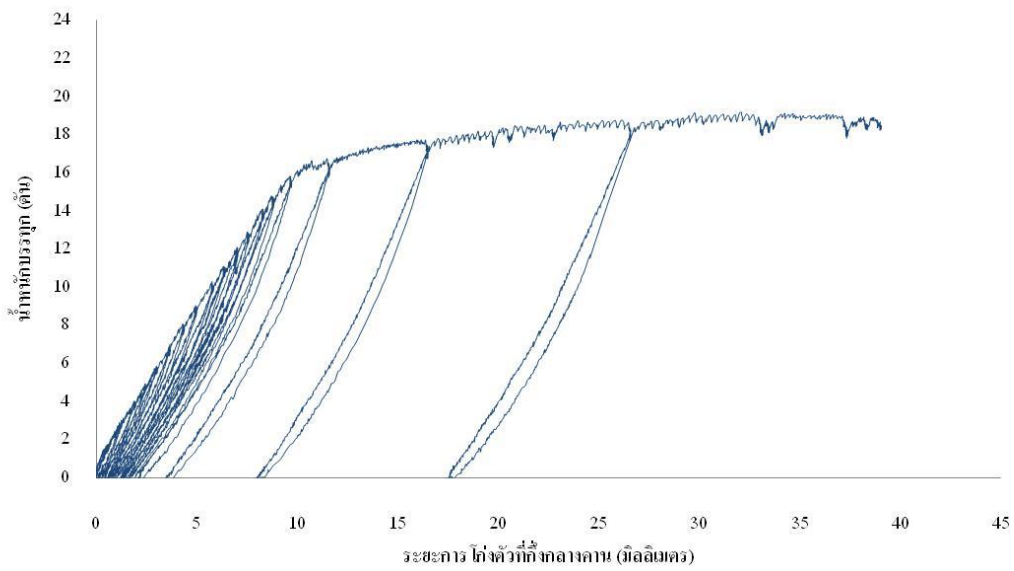
รูปที่ 5-44 การวิบัติของคาน B00



รูปที่ 5-45 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B00F



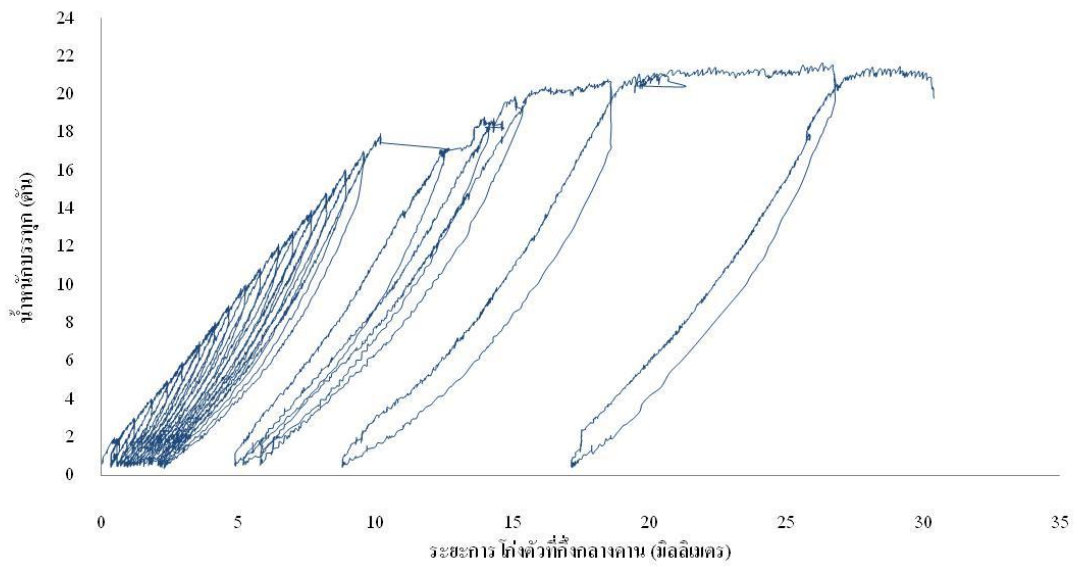
รูปที่ 5-46 การวิบัติของคาน BOOF



รูปที่ 5-47 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B60



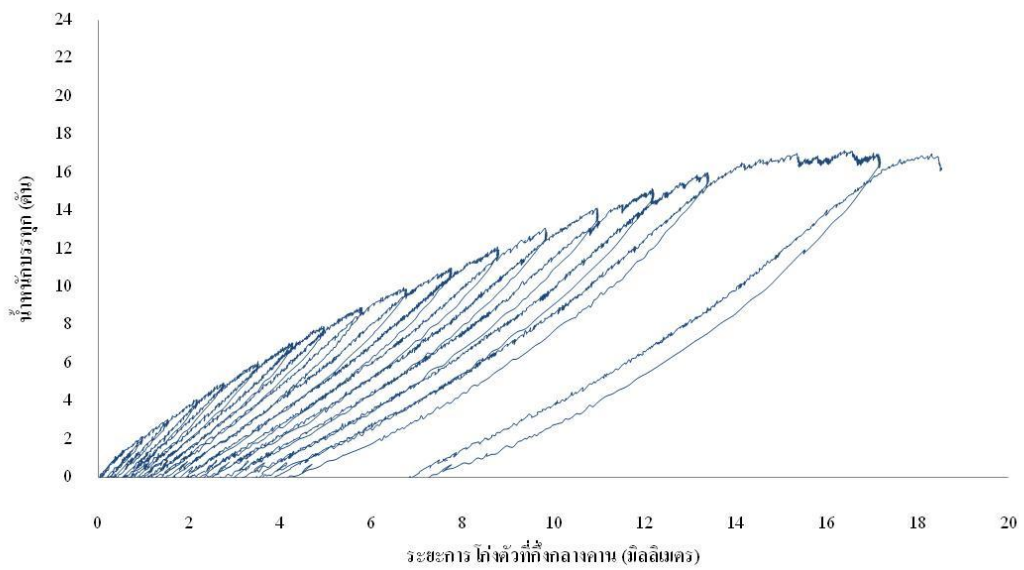
รูปที่ 5-48 การวิบัติของคาน B60



รูปที่ 5-49 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B60F



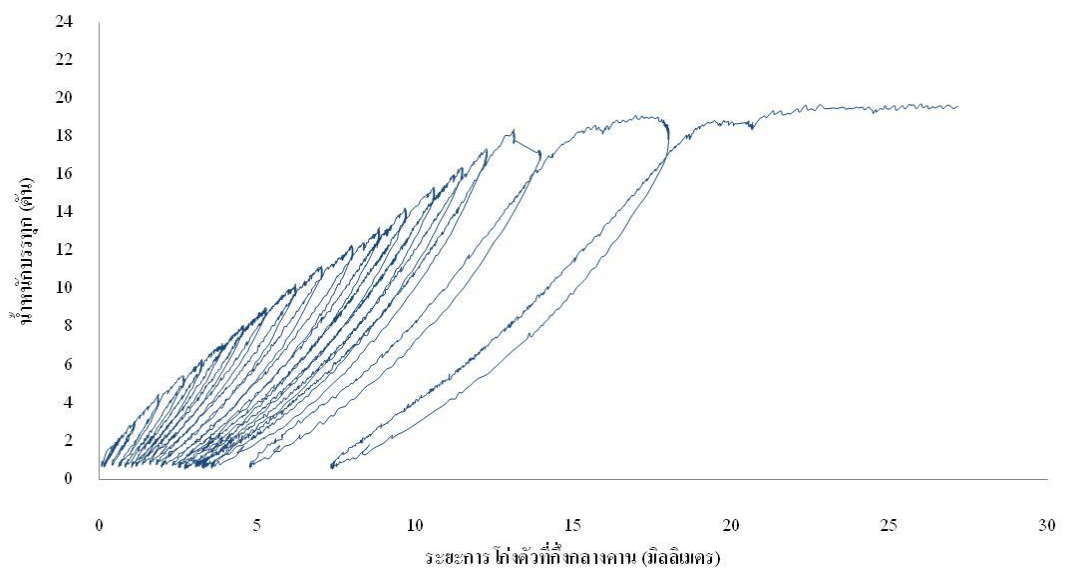
รูปที่ 5-50 การวิบัติของคาน B60F



รูปที่ 5-51 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B90



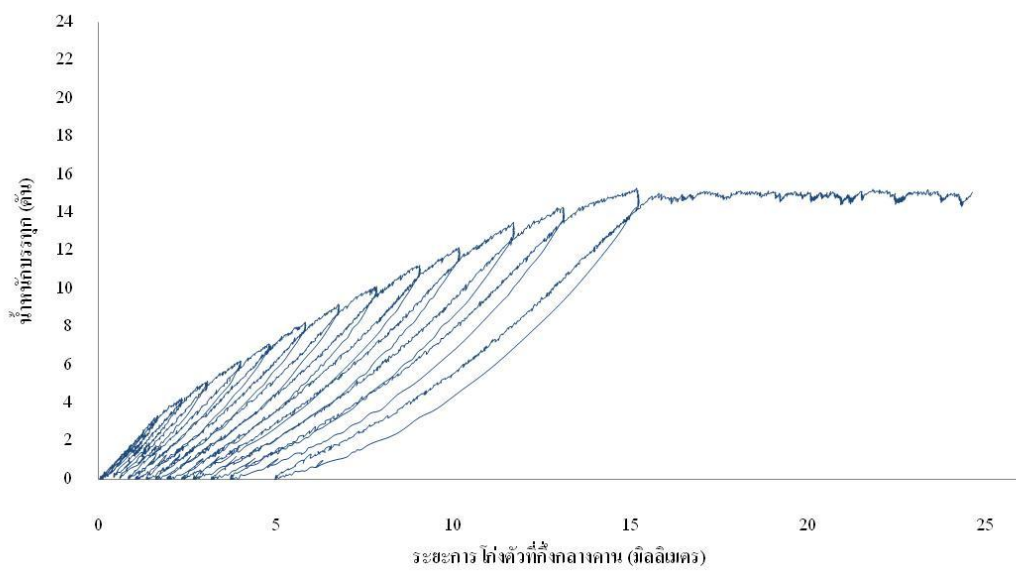
รูปที่ 5-52 การวิบัติของคาน B90



รูปที่ 5-53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B90F



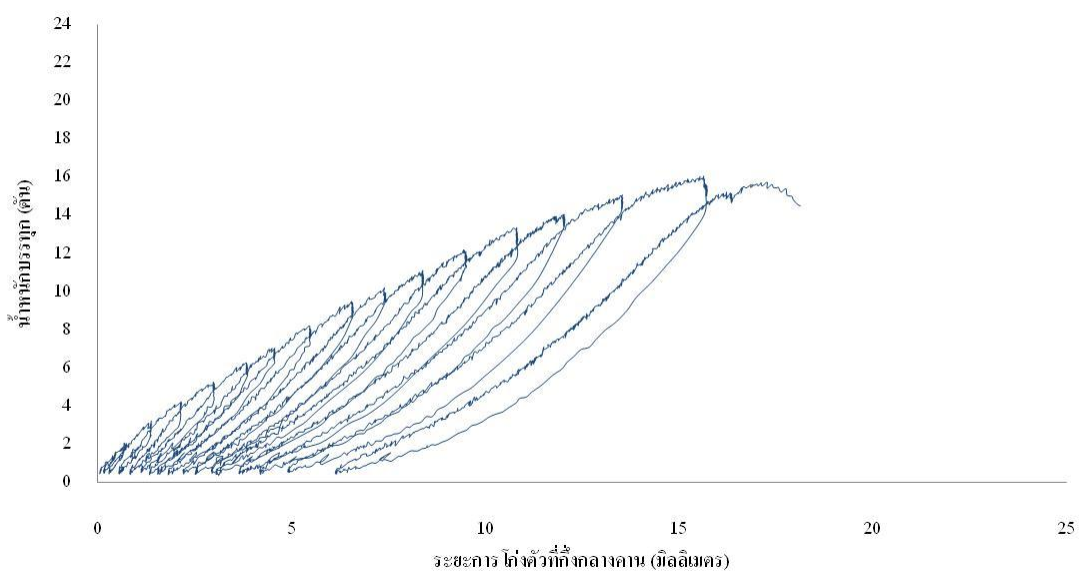
รูปที่ 5-54 การวิบัติของคาน B90F



รูปที่ 5-55 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120



รูปที่ 5-56 การวัดของคาน B120

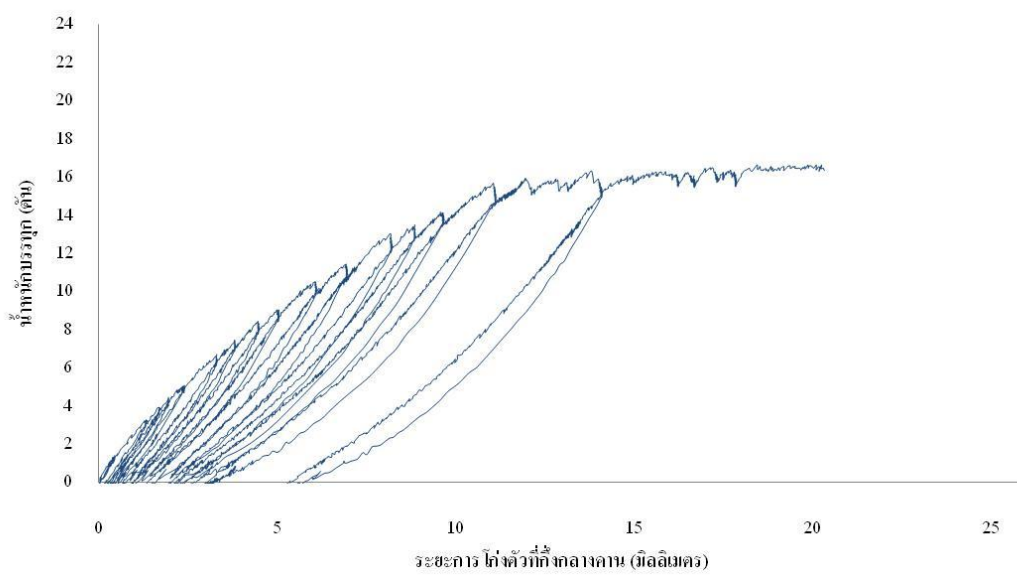


รูปที่ 5-57 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120F





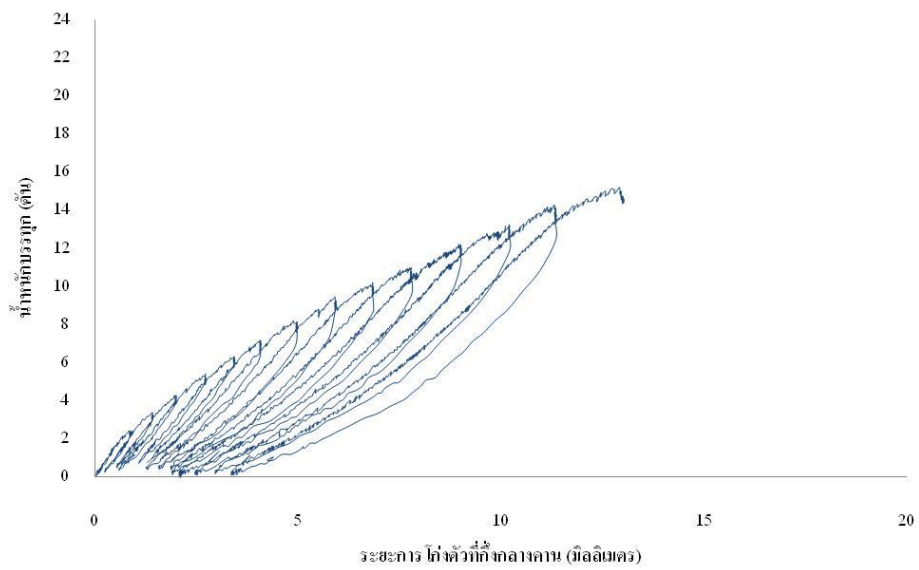
รูปที่ 5-58 การวิบัติของคาน B120F



รูปที่ 5-59 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120W



รูปที่ 5-60 การวิบัติของคาน B120W



รูปที่ 5-61 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน B120WF



รูปที่ 5-62 การวิบัติของคาน B120WF

## 5.2 ผลการทดสอบชุดที่ 2

### 5.2.1 คุณสมบัติของเหล็กเสริม

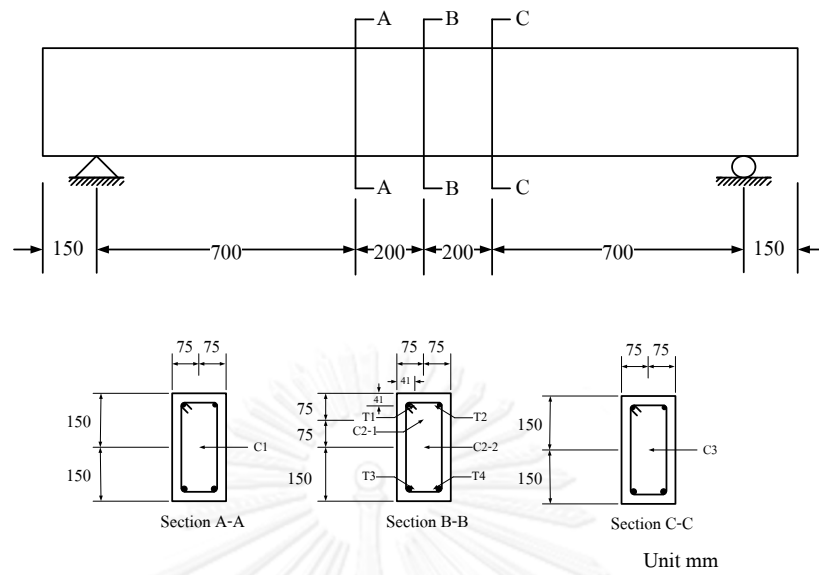
ตารางที่ 5-4 แสดงผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริมด้วยการดึงเหล็กเส้นขนาด DB12 DB16 และDB10 ที่ใช้ในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 5-4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของเหล็กเสริม

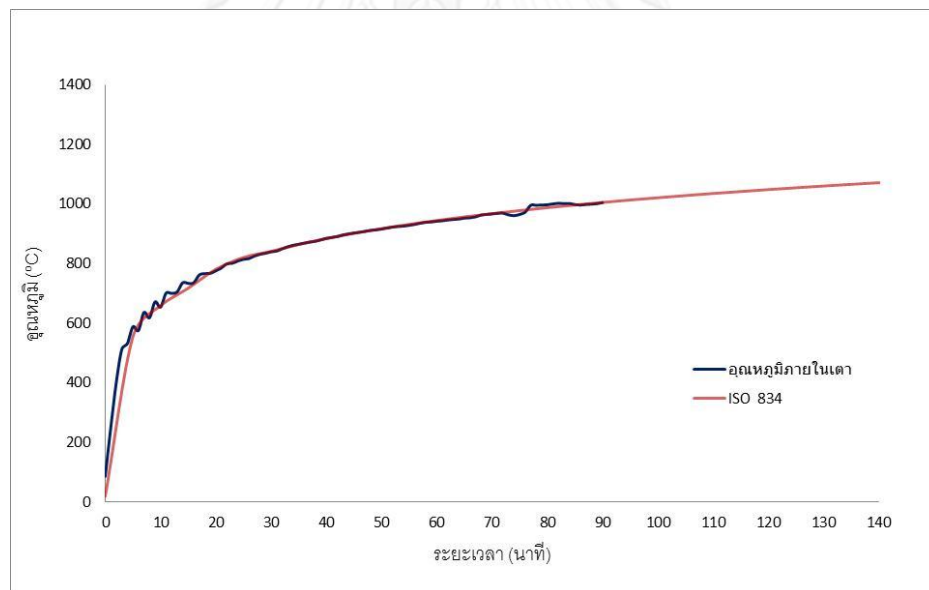
ตัวอย่าง ที่	ขนาด	เส้นผ่าศูนย์กลาง (มม.)	ช่วงความยาวที่ วัด(มม.)	หน่วยแรง		การยืดตัว	
				จุดคราก (กก./ตร. ซม.)	สูงสุด (กก./ตร. ซม.)	(มม.)	(%)
1	DB 16 (SD30)	15.9	80.0	3200	5100	23.0	28.8
2	DB 16 (SD30)	15.8	80.0	2985	4751	19.0	23.8
3	DB 16 (SD30)	15.2	80.0	3184	5000	25.0	30.0
4	DB 12 (SD30)	11.5	60.0	3584	4956	21.0	35.0
5	DB 12 (SD30)	12.3	60.0	3150	4655	20.0	33.3
6	DB 12 (SD30)	11.4	60.0	3318	4655	21.0	35.0
7	DB 10 (SD40)	10.8	50.0	4127	6624	15.0	28.0
8	DB 10 (SD40)	10.4	50.0	4242	6561	10.0	20.0
9	DB 10 (SD40)	10.5	50.0	4777	7350	12.0	25.0

### 5.2.2 อุณหภูมิภายในคอนกรีต

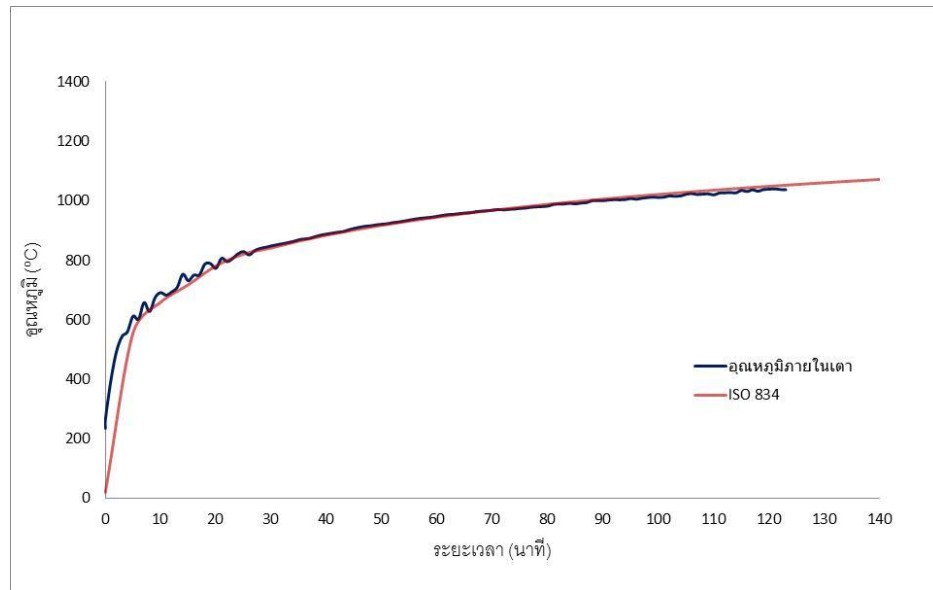
มีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในเตาเผาไฟและคานตัวอย่างเพื่อวัดค่าอุณหภูมิภายในคอนกรีต รูปที่ 5-62 แสดงตำแหน่งของเทอร์คัปเปิลภายในคานตัวอย่าง และรูปที่ 5-63 และรูปที่ 5-64 แสดงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ เทียบกับกราฟไฟมาตรฐาน (ISO 834) [8]



รูปที่ 5-63 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลในคานตัวอย่าง



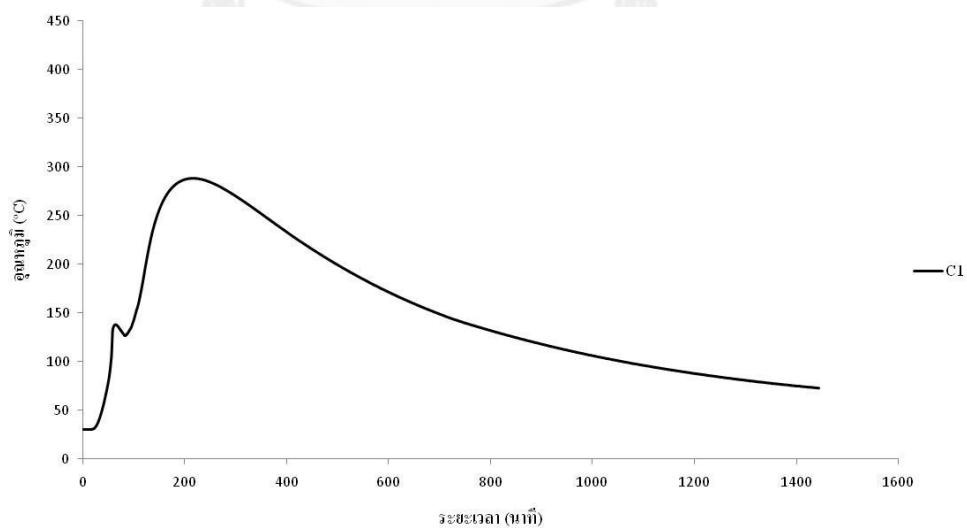
รูปที่ 5-64 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที



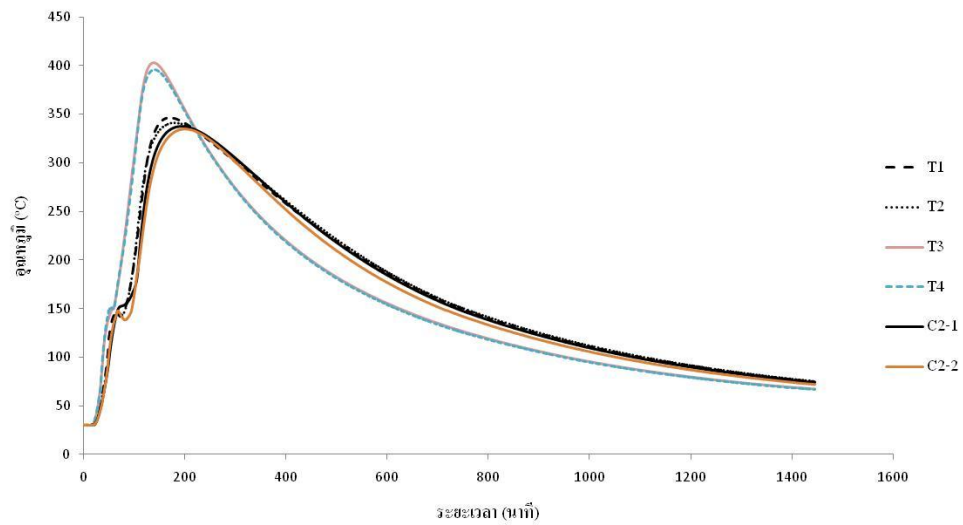
รูปที่ 5-65 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไฟที่ระยะเวลา 120 นาที

#### 5.2.2.1 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที (BB90)

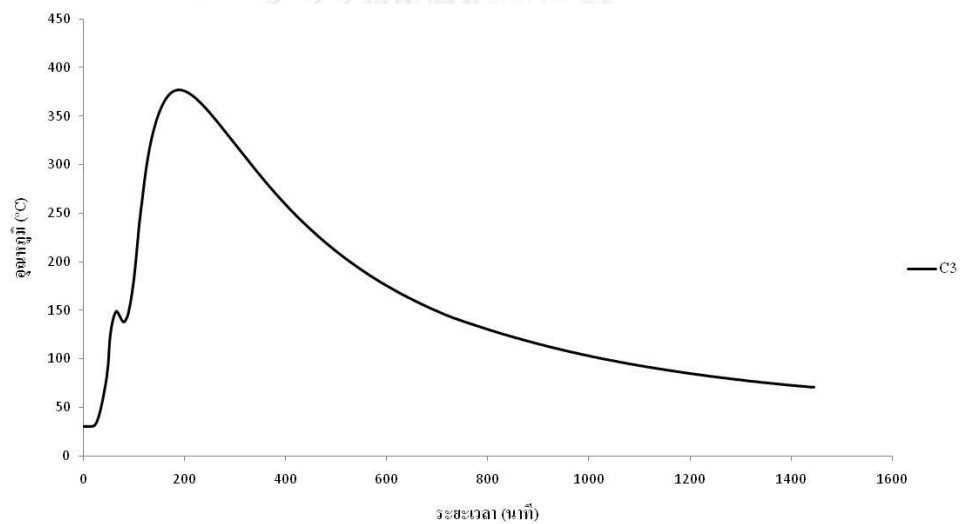
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 90 นาที รูปที่ 5-65 ถึงรูปที่ 5-67 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟแสดงอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานตัวอย่างจะเก็บค่าอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มเผาไฟไปจนถึงระยะเวลาในการเผาไฟ คือ 90 นาที และเก็บค่าอุณหภูมิต่อไปจนครบ 1,440 นาที หรือ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5-66 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที



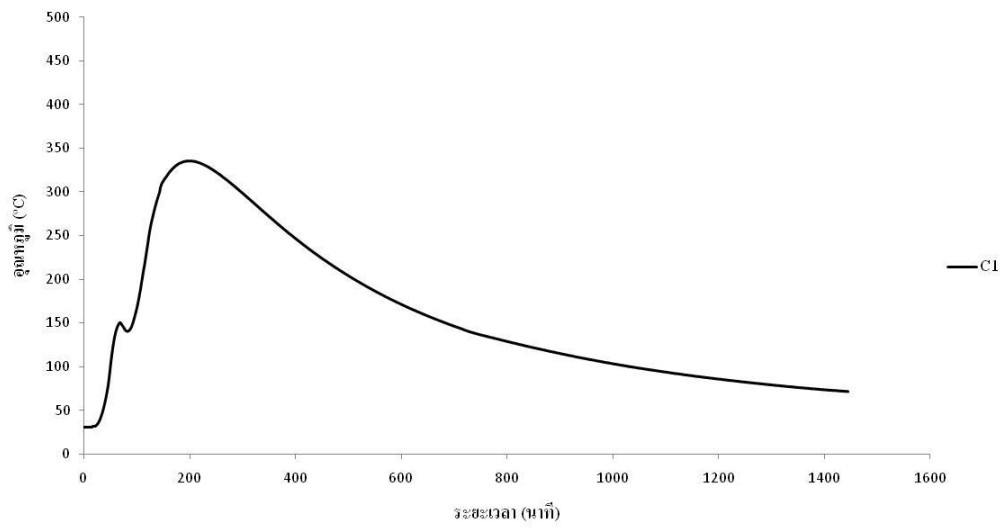
รูปที่ 5-67 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที



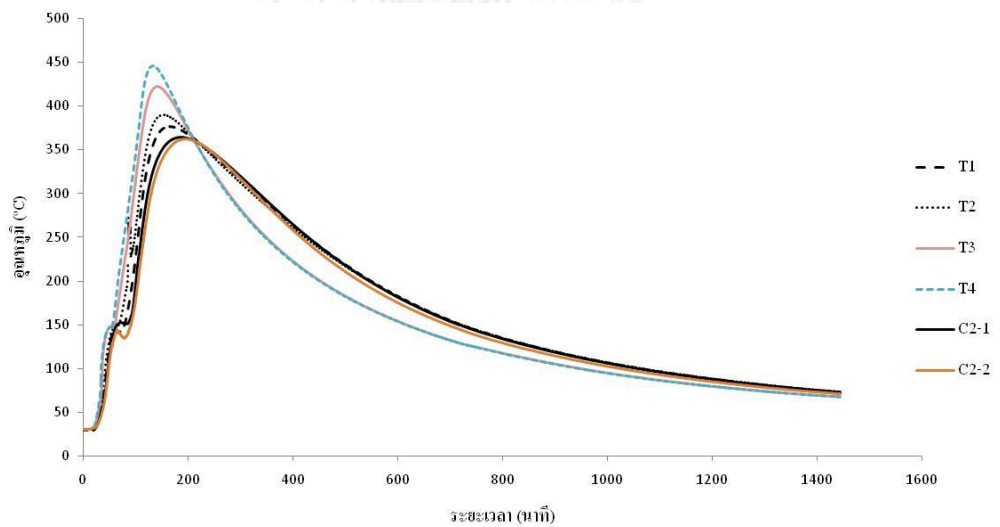
รูปที่ 5-68 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที

#### 5.2.2.2 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP (BB90F)

เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP รูปที่ 5-68 ถึงรูปที่ 5-70 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟแสดงอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานตัวอย่าง จะเก็บค่าอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มเผาไฟไปจนถึงระยะเวลาในการเผาไฟ คือ 90 นาที และเก็บค่าอุณหภูมิต่อไปจนครบ 1,440 นาที หรือ 24 ชั่วโมง

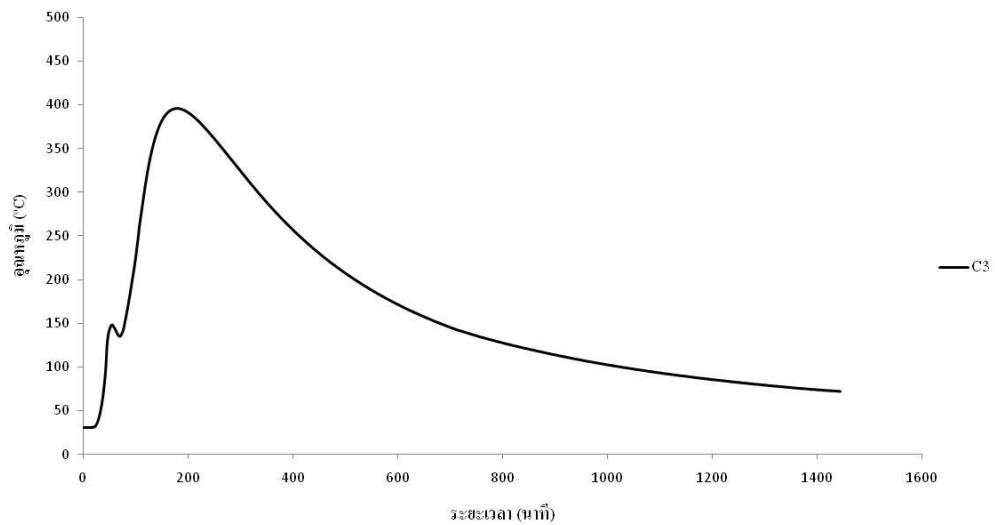


รูปที่ 5-69 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และ  
ซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-70 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที  
และซ่อมแซมด้วย FRP

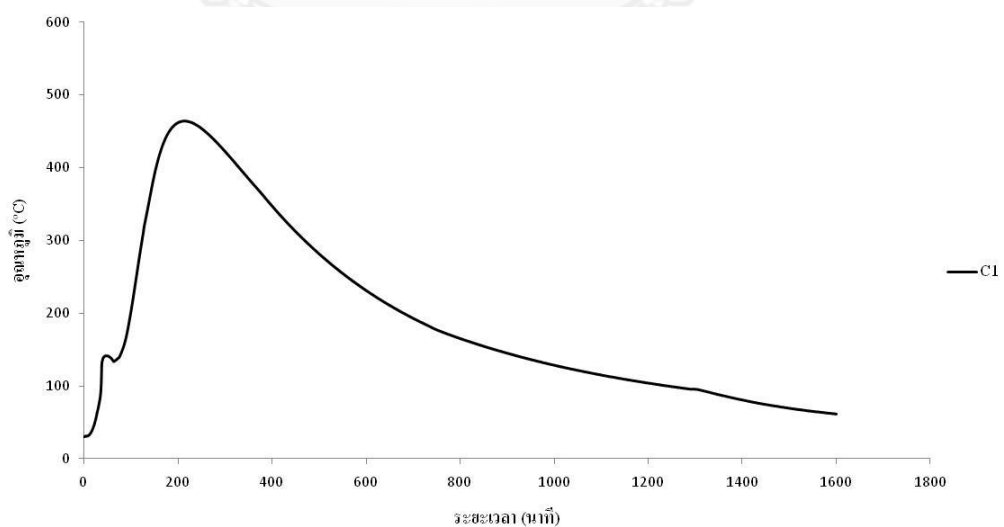




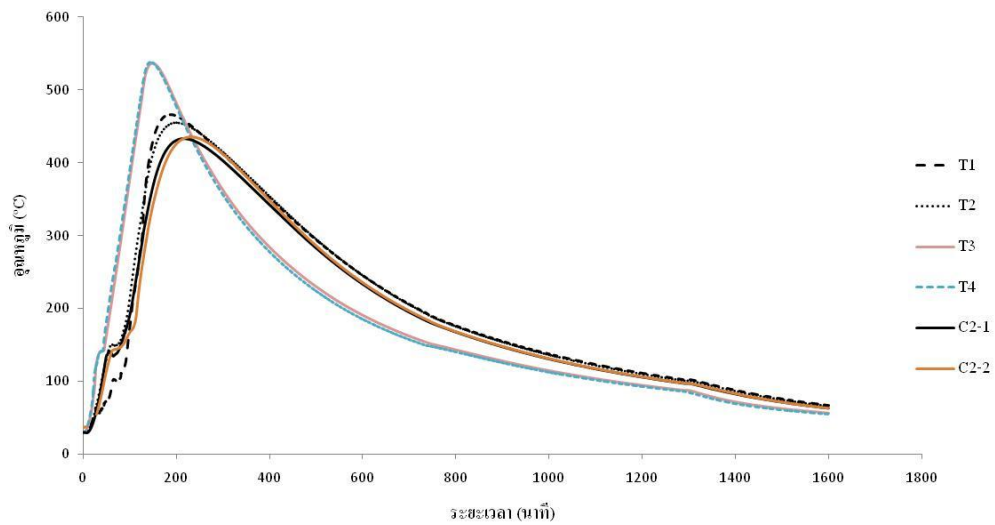
รูปที่ 5-71 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP

#### 5.2.2.3 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที (BB120)

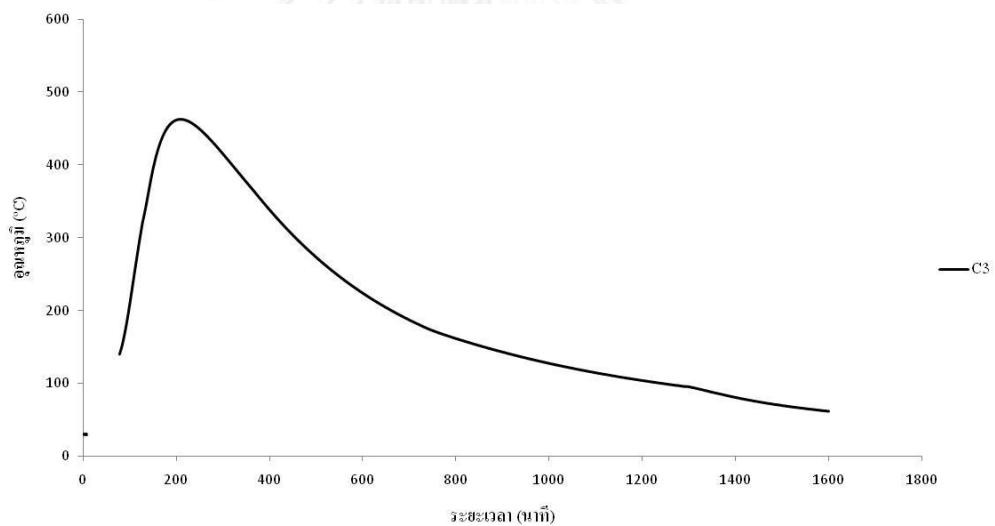
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาที รูปที่ 5-71 ถึงรูปที่ 5-73 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟแสดงอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานตัวอย่างจะเก็บค่าอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มเผาไฟไปจนถึงระยะเวลาในการเผาไฟ คือ 120 นาที และเก็บค่าอุณหภูมิต่อไปจนครบ 1,440 นาที หรือ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5-72 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที



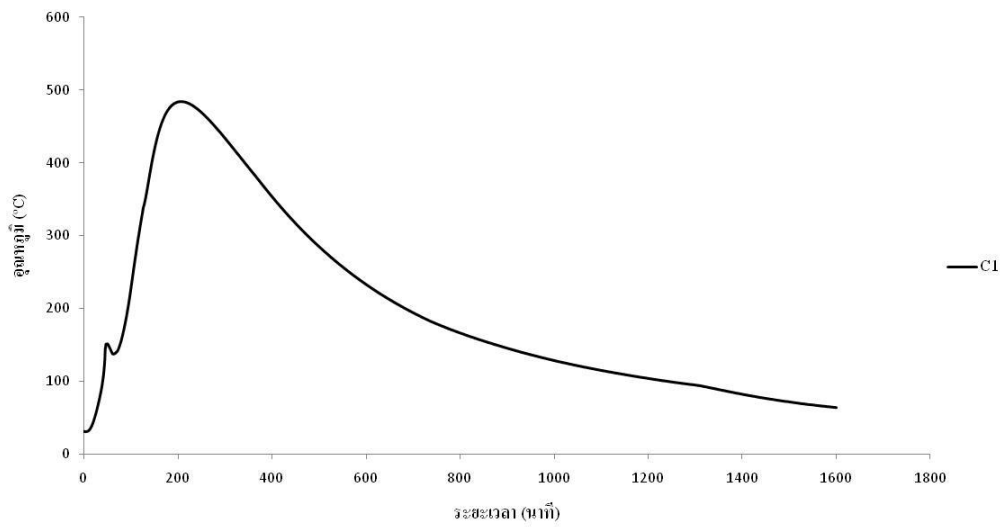
รูปที่ 5-73 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที



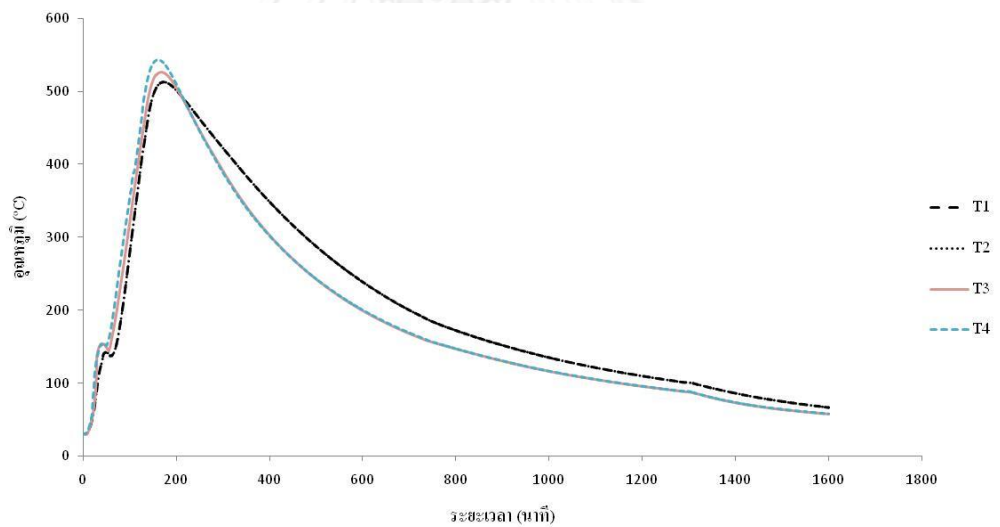
รูปที่ 5-74 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที

#### 5.2.2.4 คานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP (BB120F)

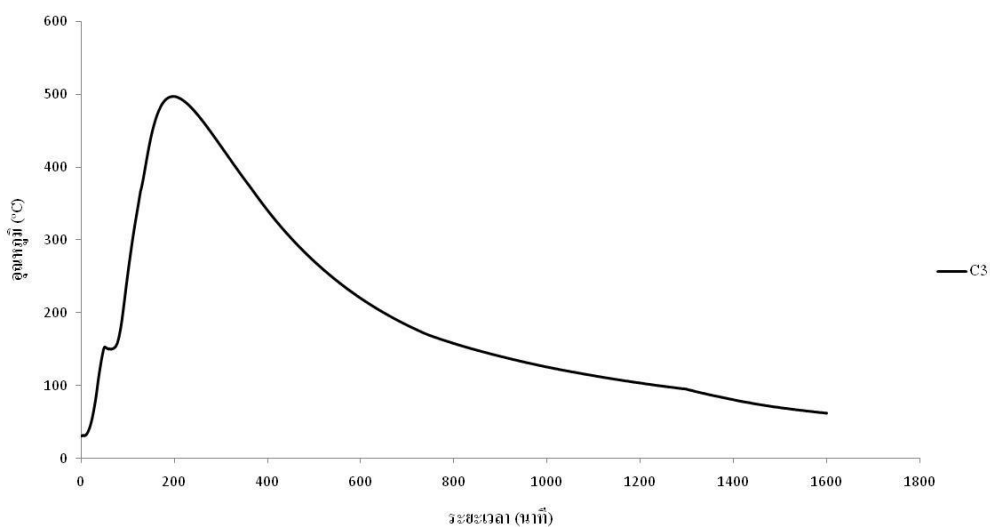
เผาไฟคานตัวอย่างที่ระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP รูปที่ 5-74 ถึงรูปที่ 5-76 แสดงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในคานตัวอย่าง จากกราฟจะไม่แสดงผลของตัววัดอุณหภูมิที่เสียหายเนื่องจากการเผาไฟซึ่งได้แก่ C2-1 และ C2-2 กราฟแสดงอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานตัวอย่าง จะเก็บค่าอุณหภูมิตั้งแต่เริ่มเผาไฟไปจนถึงระยะเวลาในการเผาไฟ คือ 120 นาที และเก็บค่าอุณหภูมิต่อไปจนครบ 1,440 นาที หรือ 24 ชั่วโมง



รูปที่ 5-75 อุณหภูมิภายในหน้าตัด A-A ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และ  
ซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-76 อุณหภูมิภายในหน้าตัด B-B ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และ  
ซ่อมแซมด้วย FRP



รูปที่ 5-77 อุณหภูมิภายในหน้าตัด C-C ของคานตัวอย่างที่เผาไฟระยะเวลา 120 นาที และซ่อมแซมด้วย FRP

### 5.2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ

ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 30 ซม. แสดงดังตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่เผาด้วยเวลาต่างๆ

ค่ากำลังอัดเฉลี่ย (กก./ตร.ซม.)		
ไม่เผาไฟ (อุณหภูมิห้อง)	เผาไฟ 90 นาที	เผาไฟ 120 นาที
412.9	71.9	เสียหายจนไม่สามารถทำการทดสอบได้

### 5.2.4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงดึงของคอนกรีตทรงกระบอกเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ

ค่ากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ระดับต่างๆ ที่ไม่เผาไฟและเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5-6 กำลังรับแรงดึงของคอนกรีตที่ระดับต่างๆ ที่ไม่เผาไฟและเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ

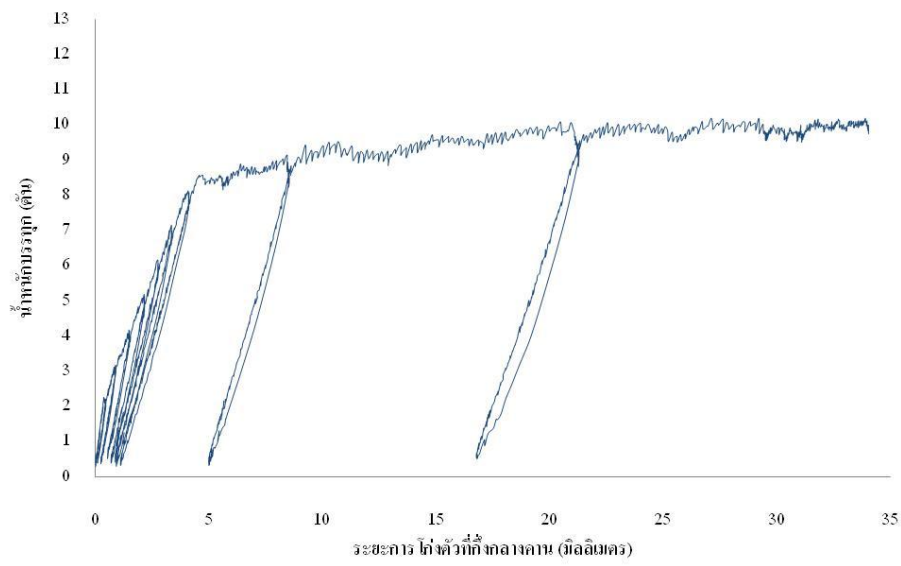
คานตัวอย่าง	กำลังรับแรงดึงเฉลี่ย (เมกะปาสคาล)	
	ระดับผิวคอนกรีต	ระดับความลึก 2.5 ซม. (ระยะหุ้มเหล็กเสริม)
BB90F	0.59	1.02
BB120F	0.46	0.61

### 5.2.5 พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังการเผาไฟ

ตารางที่ 5-7 แสดงข้อมูลจากการทดสอบคาน 5 ตัวอย่าง และส่วนความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักกับระยะโก่งตัวของคานและรูปแบบการวิบัติของคานแต่ละตัว ดังแสดงในรูปที่ 5-77 ถึงรูปที่ 5-86 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกกับระยะโก่งตัวของคานและรูปแบบการวิบัติของทุกคานทดสอบ

ตารางที่ 5-7 ผลการทดสอบคานชุดที่ 2

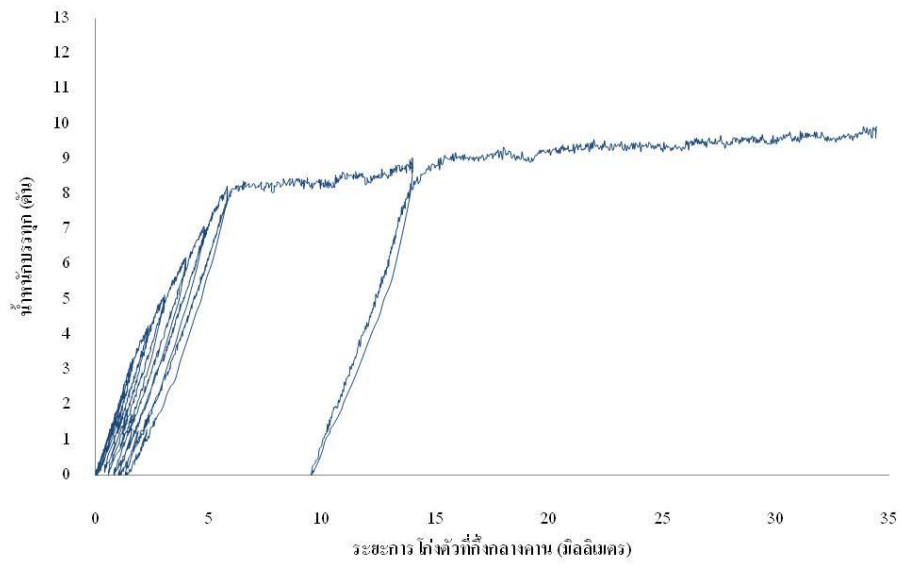
คานตัวอย่าง	ระยะเวลาเผาไฟ (นาทีก)	จำนวนแผ่น FRP	รูปแบบการวิบัติ	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ตัน)
BB00	-	-	คอนกรีตแตก	10.18
BB90	90	-	คอนกรีตแตก	9.92
BB90F	90	1 ชั้น	แผ่น FRP หลุดล่อน	12.04
BB120	120	-	คอนกรีตแตก	9.91
BB120F	120	1 ชั้น	แผ่น FRP หลุดล่อน	10.03



รูปที่ 5-78 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB00



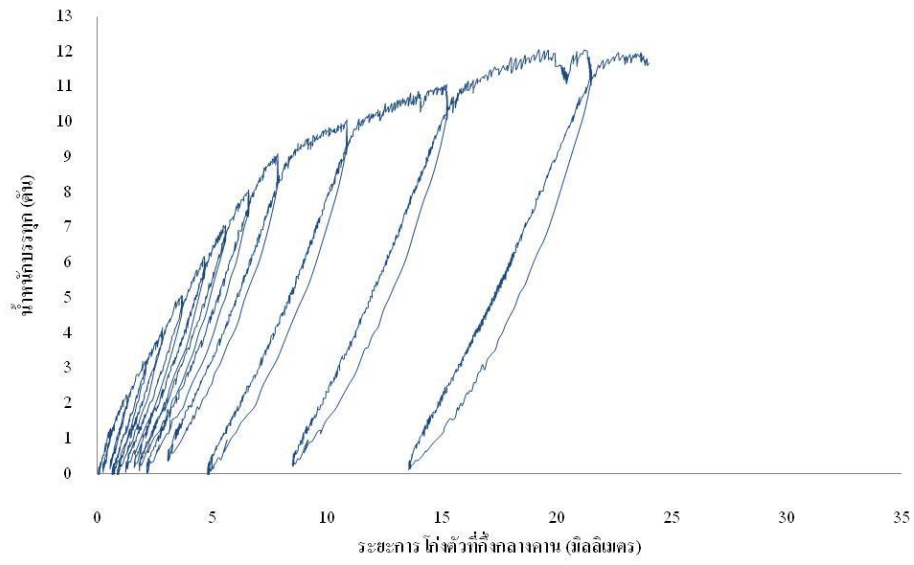
รูปที่ 5-79 การวิบัติของคาน BB00



รูปที่ 5-80 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB90



รูปที่ 5-81 การวิบัติของคาน BB90

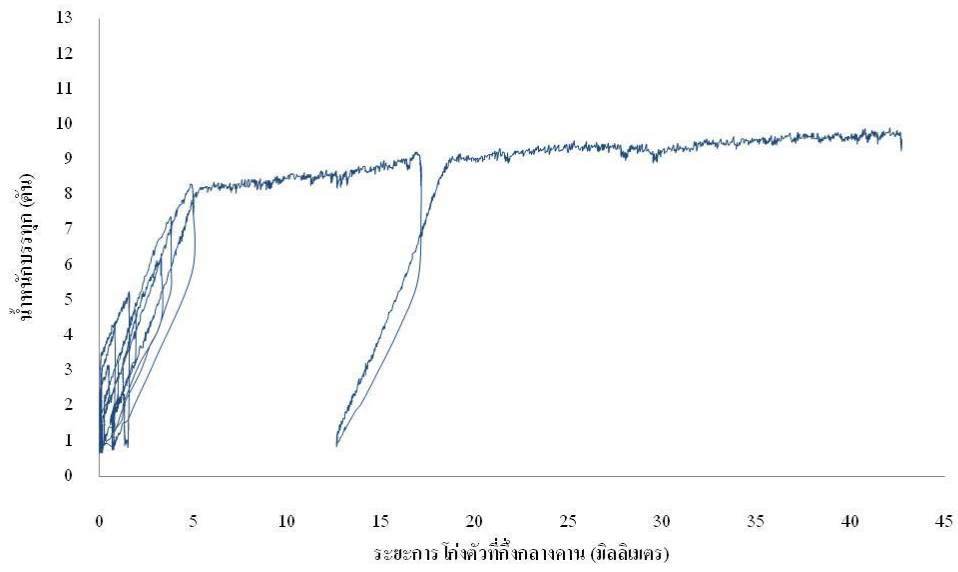


รูปที่ 5-82 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่ดูดกับระยะเวลาโกงตัวของคาน BB90F



รูปที่ 5-83 การวิบัติของคาน BB90F

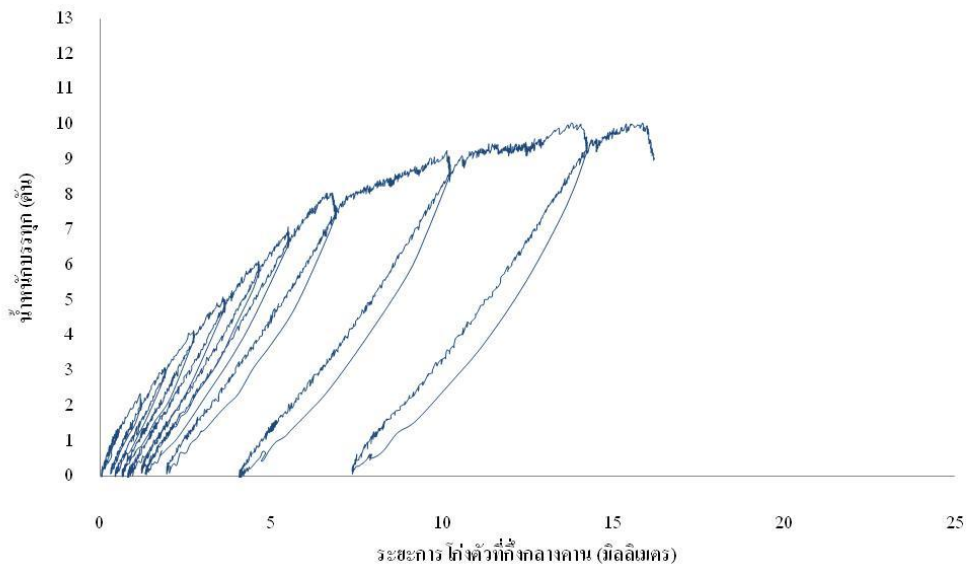




รูปที่ 5-84 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB120



รูปที่ 85 การวิบัติของคาน BB120



รูปที่ 5-86 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกกับระยะโก่งตัวของคาน BB120F



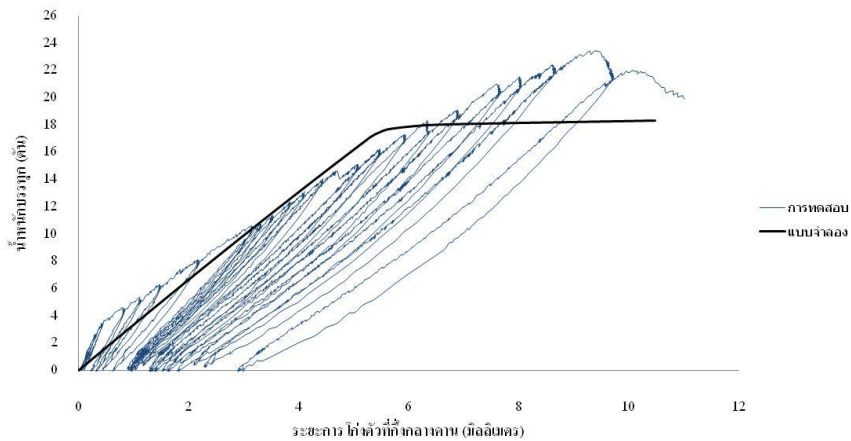
รูปที่ 5-87 การวิบัติของคาน BB120F

## บทที่ 6 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

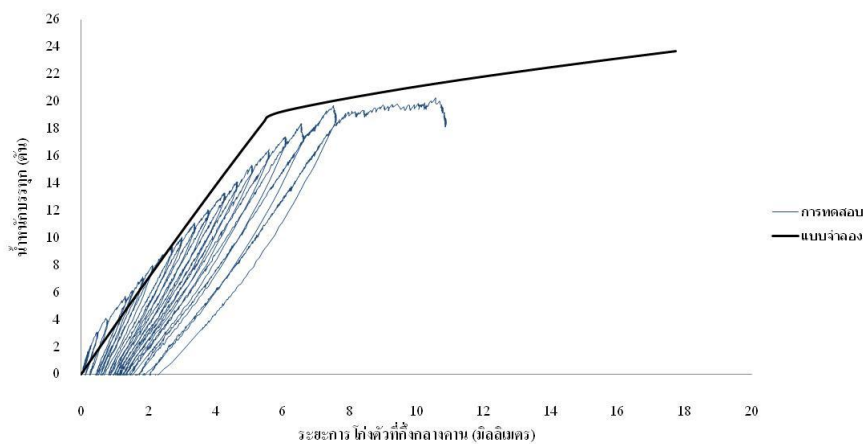
### 6.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 1

#### 6.1.1 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องและเสริม FRP

รูปที่ 6-1 และรูปที่ 6-2 แสดงการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B00 และ B00F ตามลำดับ



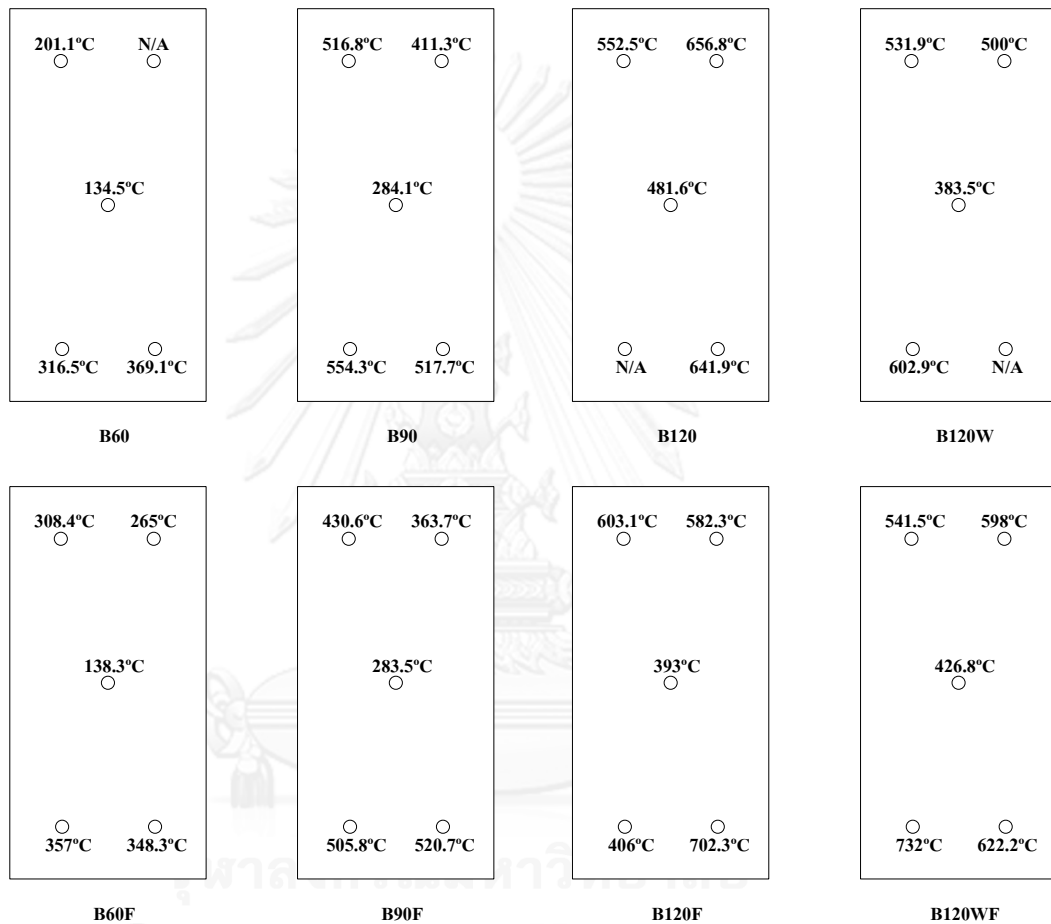
รูปที่ 6-1 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B00



รูปที่ 6-2 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B00F

### 6.1.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่เสียหายจากการเผาไฟและซ่อมแซมด้วย FRP

รูปที่ 6-3 แสดงอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานตัวอย่างที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 90 และ 120 นาที ลดอุณหภูมิด้วยการฉีบน้ำ ตามลำดับ



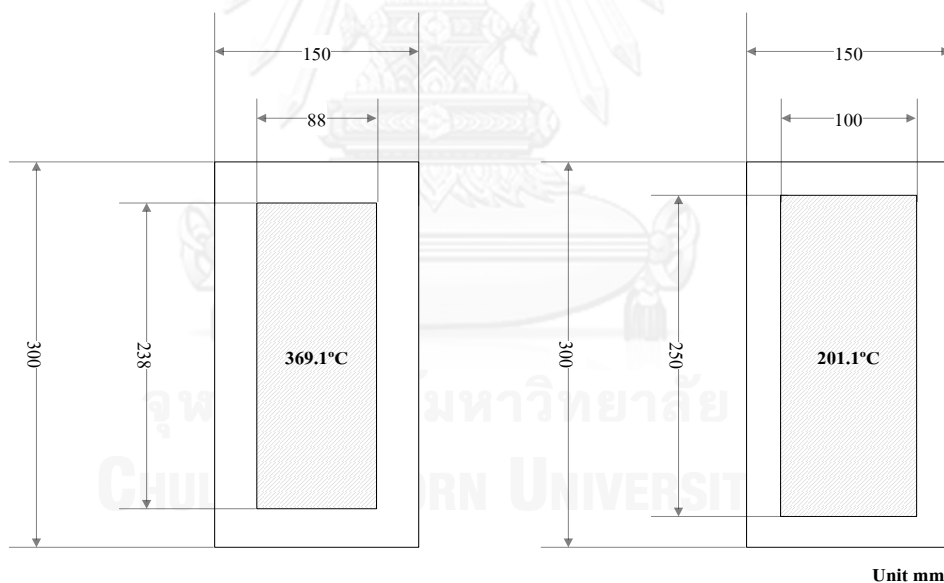
รูปที่ 6-3 อุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานตัวอย่างที่ระยะเวลาเผาไฟต่างๆ

### วิธีการกำหนดขนาดที่หน้าตัดลดลง (อ้างอิงอุณหภูมิเตาเผาไฟ)

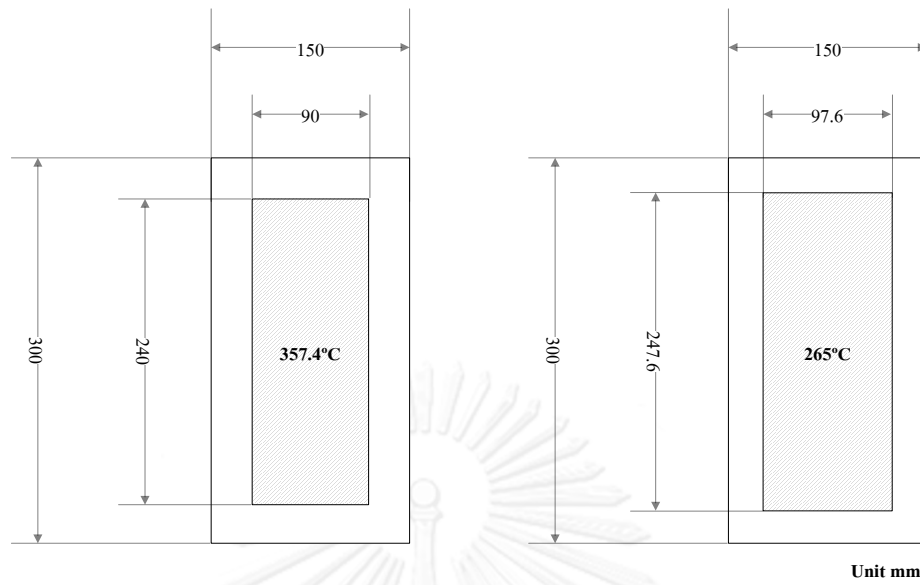
ขนาดหน้าตัดลดขอบเขตล่าง เป็นหน้าตัดลดลงโดยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C ทำการประมาณแบบเชิงเส้น (liner interpolation) ค่าอุณหภูมิ 500 °C ภายในหน้าตัดคานตัวอย่าง โดยอ้างอิงอุณหภูมิที่สูงสุดภายในหน้าตัดคานตัวและอุณหภูมิที่ผิวคานตัวอย่าง (อุณหภูมิเตาเผาไฟ ณ เวลาที่เผาไฟ) ซึ่งระยะเวลาในการเผาไฟ 60 90 120 และ 120 นาที ลดอุณหภูมิโดยการฉีดน้ำ เตาเผาไฟมีอุณหภูมิเท่ากับ 939.4, 1004.4, 1050.7 และ 1047.4 องศาเซลเซียส

ขนาดหน้าตัดลดขอบเขตบน เป็นหน้าตัดลดลงโดยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C ทำการประมาณแบบเชิงเส้น (liner interpolation) ค่าอุณหภูมิ 500 °C ภายในหน้าตัดคานตัวอย่าง โดยอ้างอิงอุณหภูมิที่ต่ำสุดภายในหน้าตัดคานตัวและอุณหภูมิที่ผิวคานตัวอย่าง (อุณหภูมิเตาเผาไฟ ณ เวลาที่เผาไฟ) ซึ่งระยะเวลาในการเผาไฟ 60 90 120 และ 120 นาที ลดอุณหภูมิโดยการฉีดน้ำ เตาเผาไฟมีอุณหภูมิเท่ากับ 939.4, 1004.4, 1050.7 และ 1047.4 องศาเซลเซียส

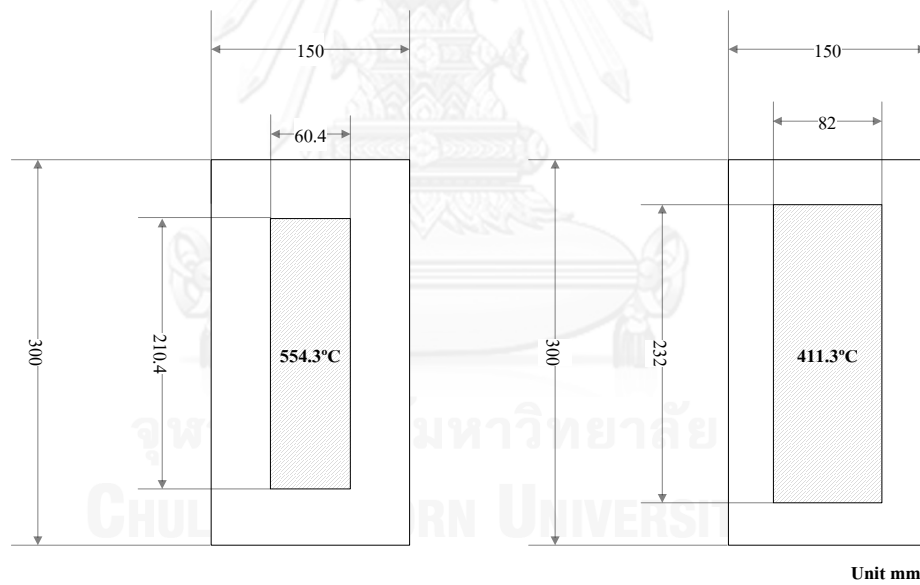
รูปที่ 6.4 ถึงรูปที่ 6.11 แสดงขนาดหน้าตัดลดลงโดยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C ของคานตัวอย่าง โดยรูปซ้ายแสดงหน้าที่ลดลงจากขอบเขตล่างและรูปขวาแสดงหน้าที่ลดลงจากขอบเขตบนที่ระยะเวลาเผาไฟ 60 90 120 และ 120 นาที ลดอุณหภูมิต่อการฉีดน้ำ ตามลำดับ



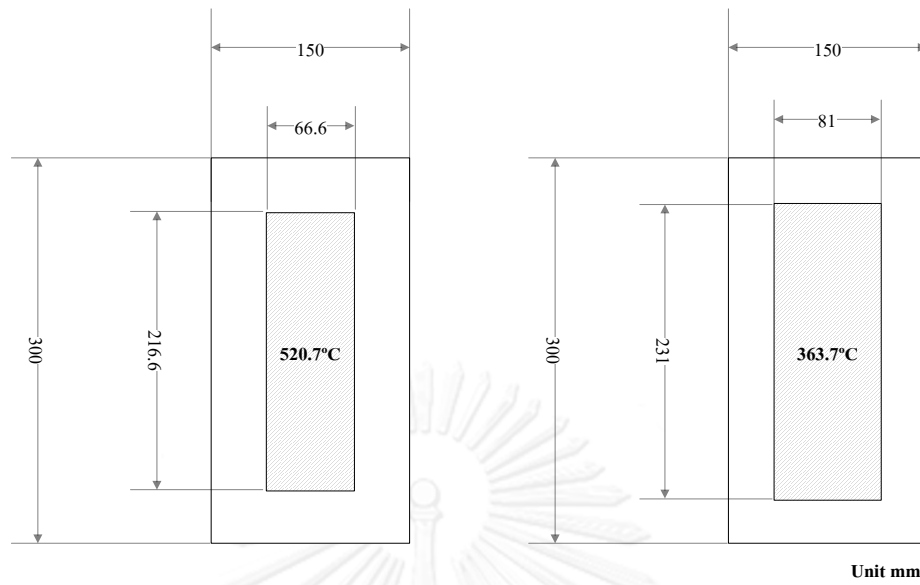
รูปที่ 6-4 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B60



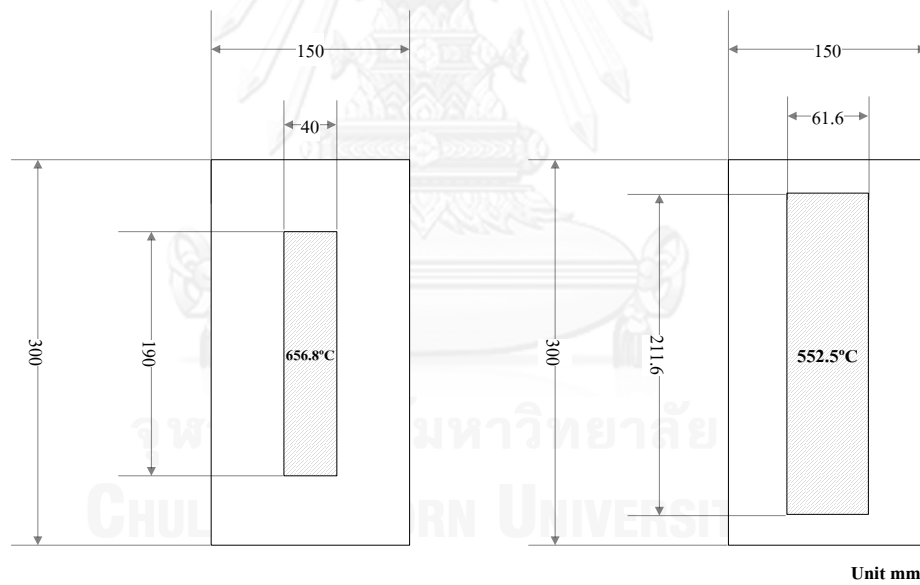
รูปที่ 6-5 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B60F



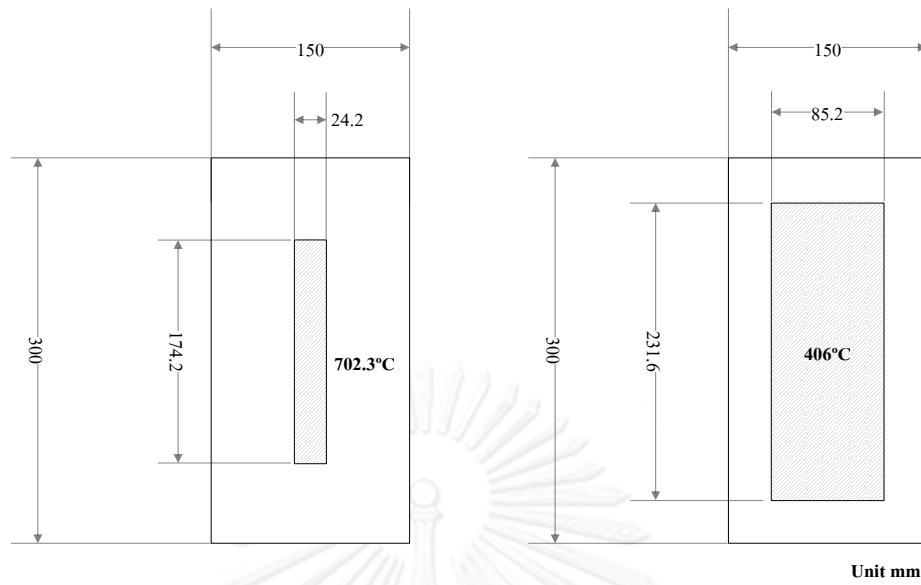
รูปที่ 6-6 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B90



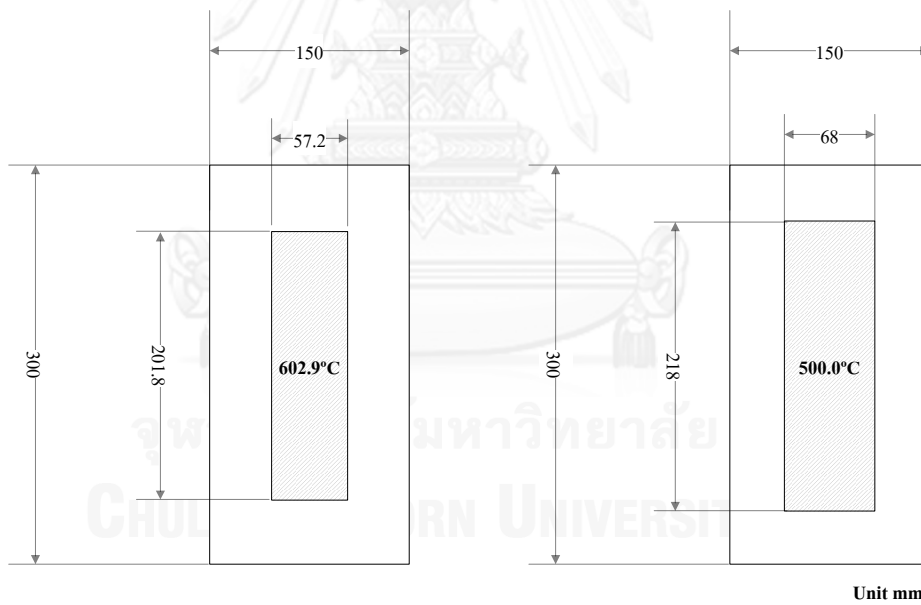
รูปที่ 6-7 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B90F



รูปที่ 6-8 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120



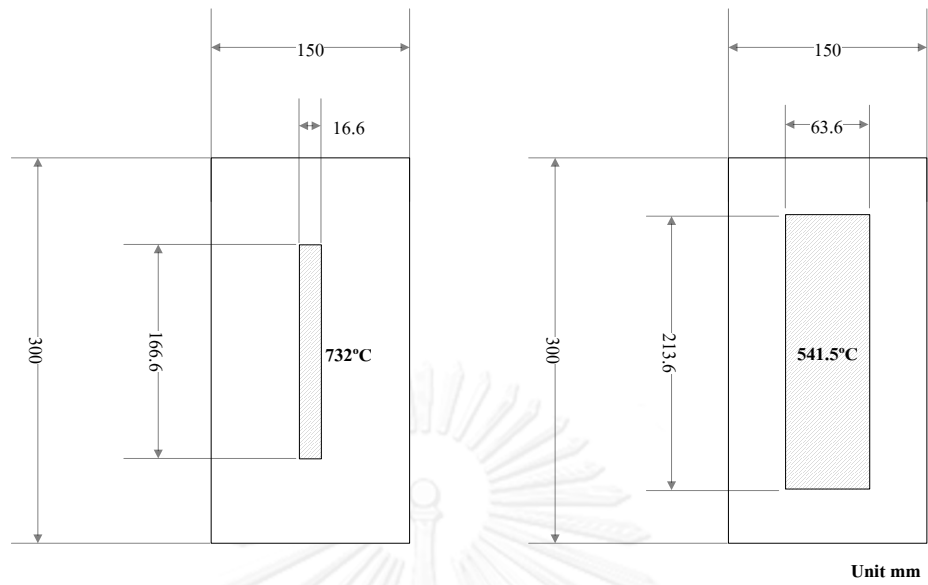
รูปที่ 6-9 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120F



B120W

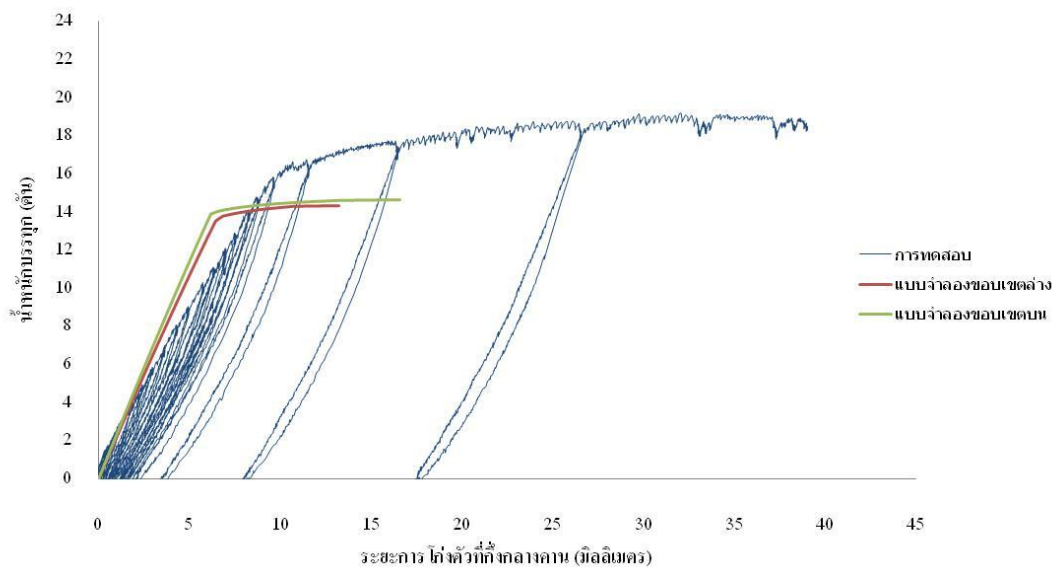
รูปที่ 6-10 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120W



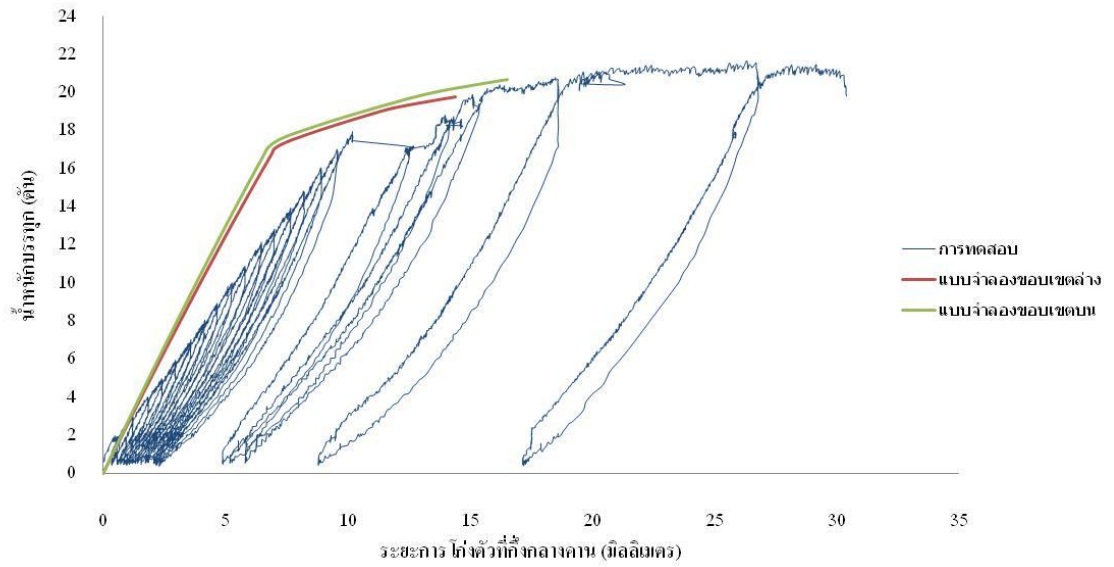


รูปที่ 6-11 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน B120WF

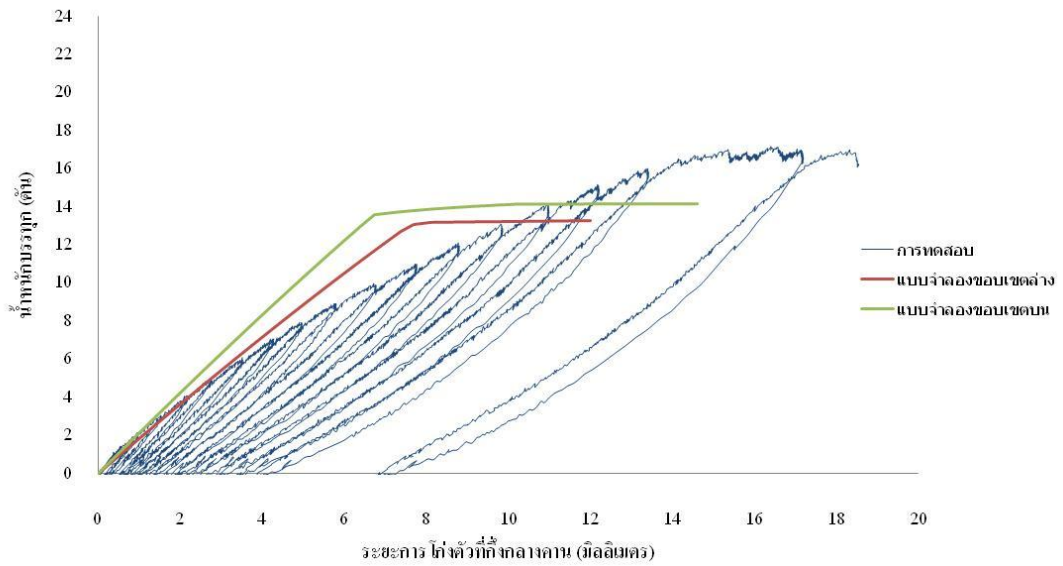
รูปที่ 6-12 ถึง รูปที่ 6-19 แสดงการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B60 B60F B120 B120F B120W และ B120WF ตามลำดับ



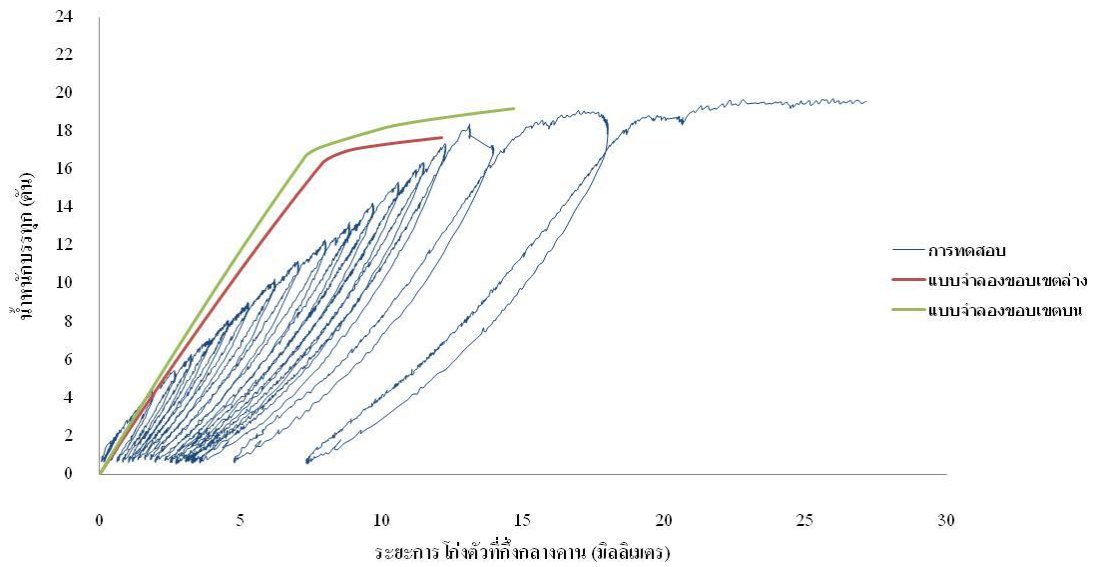
รูปที่ 6-12 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B60



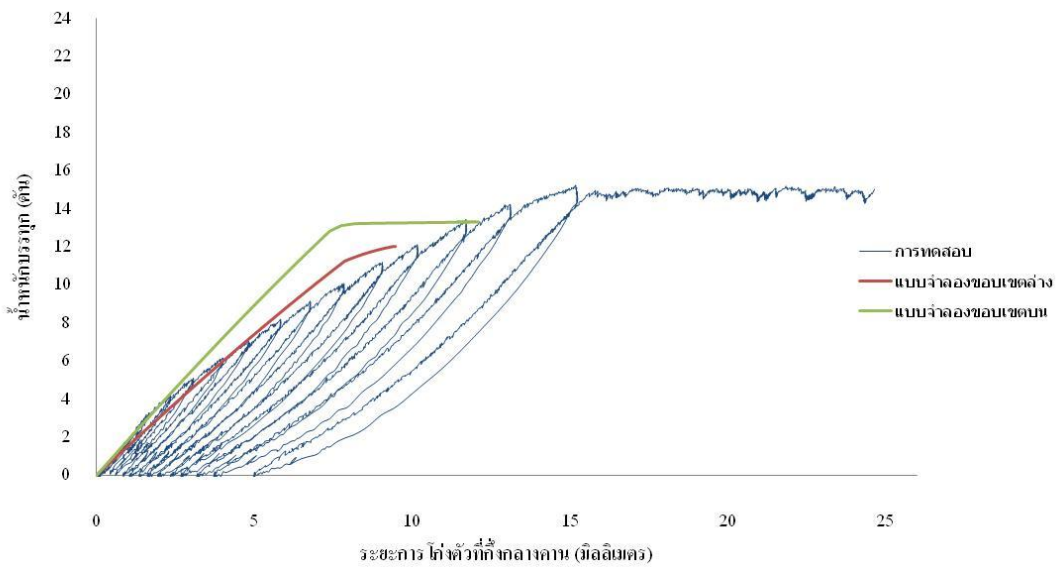
รูปที่ 6-13 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B60F



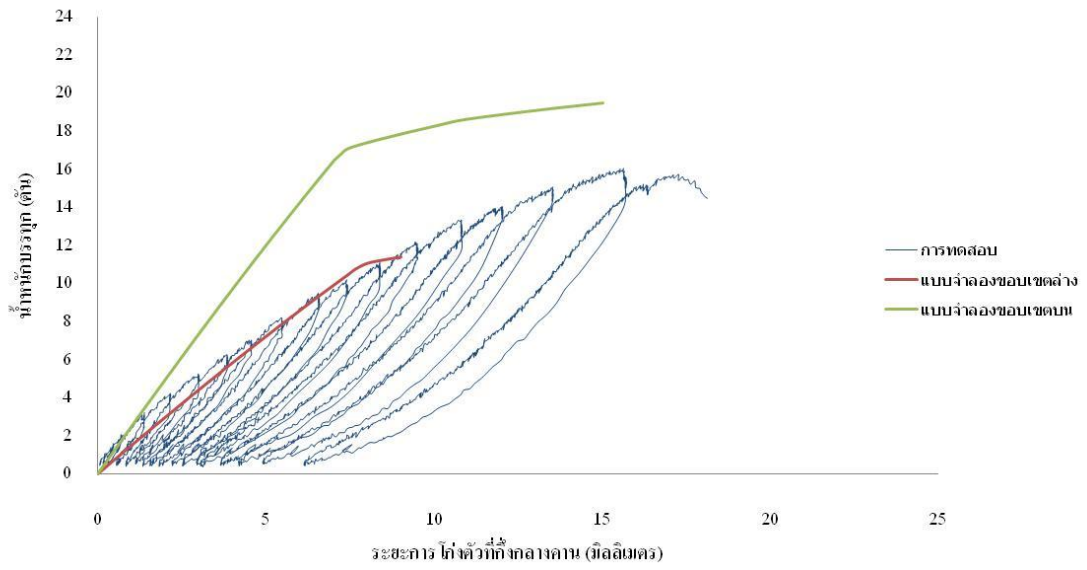
รูปที่ 6-14 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B90



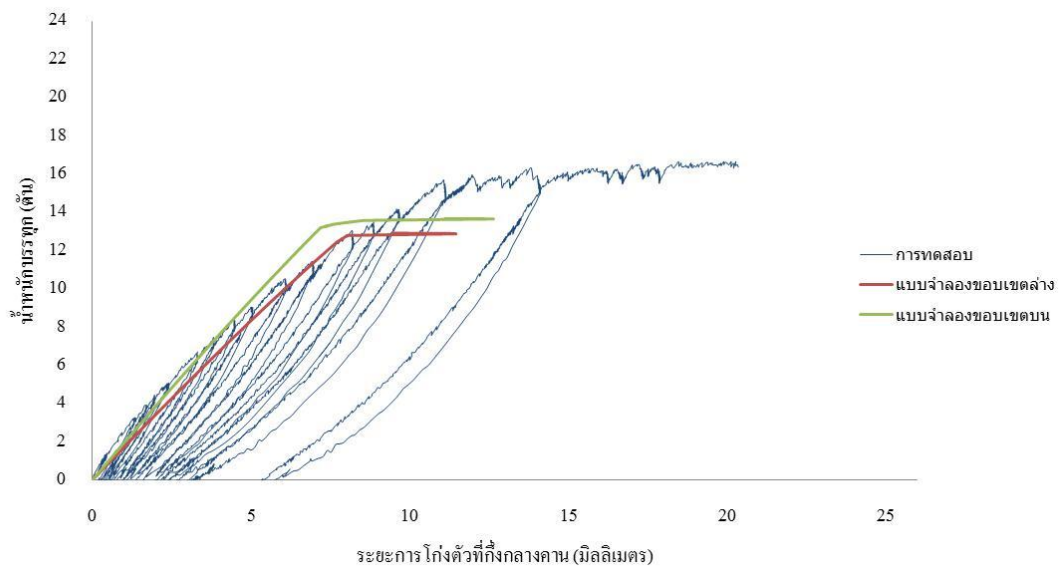
รูปที่ 6-15 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B90F



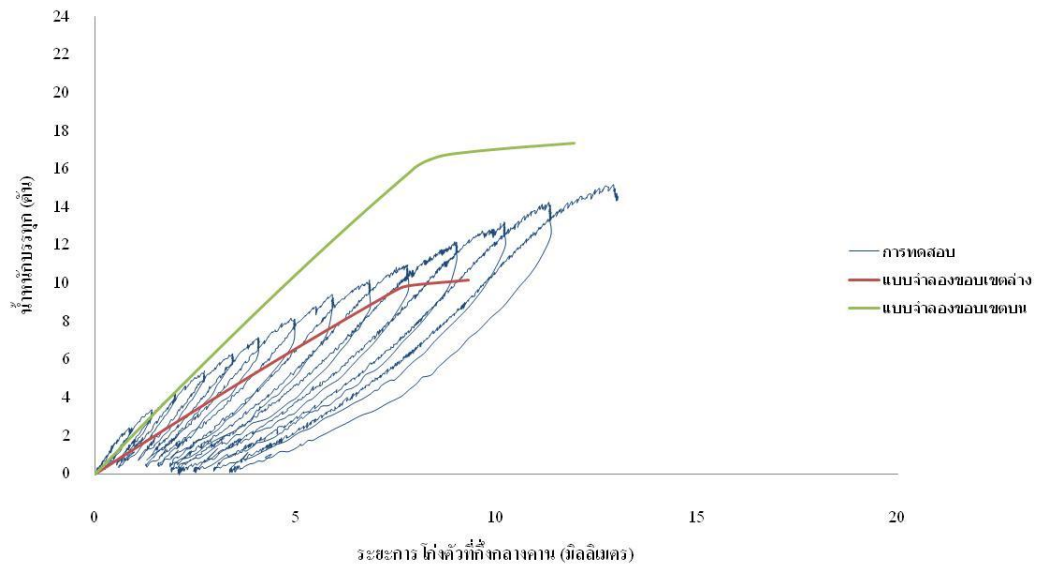
รูปที่ 6-16 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120



รูปที่ 6-17 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120F



รูปที่ 6-18 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120W



รูปที่ 6-19 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ B120WF

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6-1 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง จากตารางพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลจากแบบจำลองและการทดสอบ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างน้ำหนักรรทุกสูงสุดจากแบบจำลองขอบเขตบนมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองขอบเขตล่าง โดยมีค่าแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 15.98 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6-1 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกทุกของการทดสอบและแบบจำลอง

คานตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด (ตัน)			ความแตกต่างของน้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	
	การทดสอบ	แบบจำลอง		การทดสอบและ แบบจำลองขอบเขตบน	การทดสอบและ แบบจำลองขอบเขตล่าง
		ขอบเขตบน	ขอบเขตล่าง		
B00	23.40	18.30	18.30	-27.79	-27.79
B00F	20.26	23.70	23.70	16.98	16.98
B60	19.37	14.64	14.34	-24.42	-25.97
B60F	21.68	20.70	19.80	-4.52	-8.67
B90	17.17	14.20	13.29	-17.30	-22.60
B90F	19.70	19.20	17.70	-2.54	-10.15
B120	15.26	13.37	12.05	-12.39	-21.04
B120F	16.04	19.50	11.40	21.57	-28.93
B120W	16.66	13.68	12.92	-17.89	-22.45
B120WF	15.21	17.40	10.20	14.40	-32.94
		ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์		15.98	21.75
		ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างสัมบูรณ์		8.00	7.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 6-2 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดของการทดสอบ และแบบจำลอง จากตารางพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลจากแบบจำลองและการทดสอบ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกทุกสูงสุดจากแบบจำลองขอบเขตบนมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองขอบเขตล่างโดยมีค่าแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 31.43 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6-2 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง

คานตัวอย่าง	ระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (มม.)			ความแตกต่างของระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	
	การทดสอบ	แบบจำลอง		การทดสอบและแบบจำลองขอบเขตบน	การทดสอบและแบบจำลองขอบเขตล่าง
		ขอบเขตบน	ขอบเขตล่าง		
B00	9.38	10.48	10.48	11.73	11.73
B00F	10.58	17.74	17.74	67.67	67.67
B60	44.03	16.62	13.25	-62.25	-69.91
B60F	26.33	16.53	14.42	-37.22	-45.23
B90	16.40	14.62	12.01	-10.85	-26.77
B90F	25.99	14.69	12.14	-43.48	-53.29
B120	15.18	11.45	9.48	-24.57	-37.55
B120F	15.64	15.04	9.02	-3.84	-42.36
B120W	20.28	11.11	9.46	-45.22	-53.37
B120WF	12.92	11.95	9.32	-7.51	-27.86
		ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์		31.43	43.57
		ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างสัมบูรณ์		23.15	18.40

ตารางที่ 6-3 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบและแบบจำลอง จากแบบจำลองให้ผลทำนายลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างที่แตกต่างจากการทดสอบ

ตารางที่ 6-3 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบและแบบจำลอง

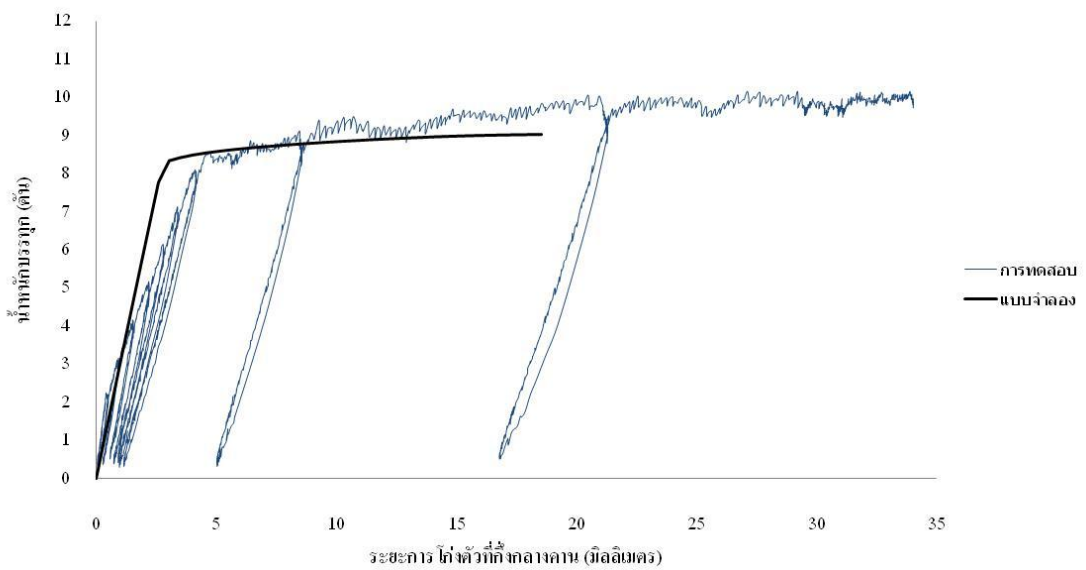
คานตัวอย่าง	ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบ	ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากแบบจำลอง	
		ขอบเขตบน	ขอบเขตล่าง
B00	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	
B00F	การเฉือน	แผ่น FRP ขาด (FRP rupture)	
B60	การเฉือนและการตัด	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
B60F	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
B90	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
B90F	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
B120	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
B120F	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
B120W	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
B120WF	การเฉือน	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)



## 6.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบชุดที่ 2

### 6.2.1 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง

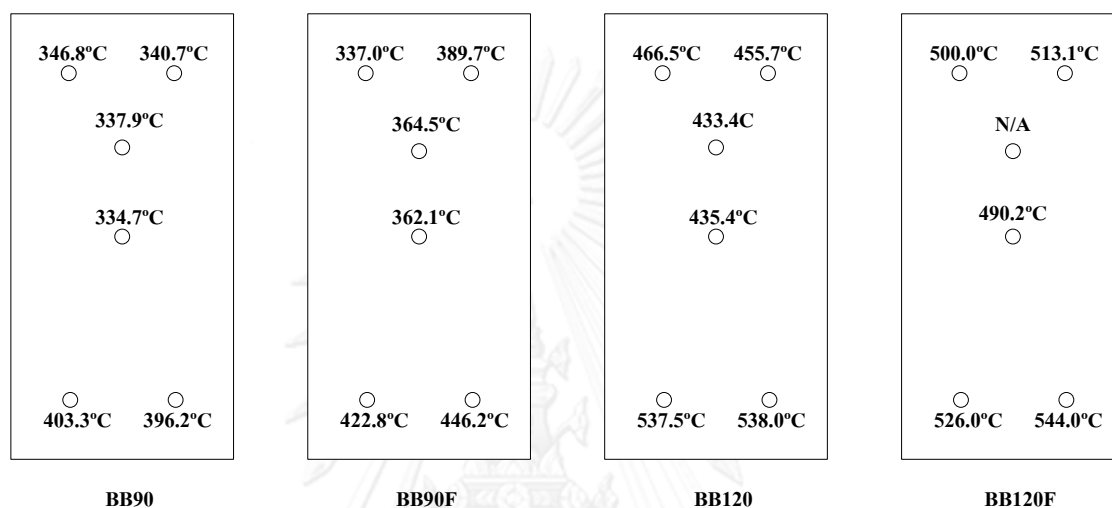
การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB00 แสดงดังรูปที่ 6-20



รูปที่ 6-20 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB00

## 6.2.2 เปรียบเทียบผลจากแบบจำลองพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างคานคอนกรีตที่เสียหายจากการเผาไฟและซ่อมแซมด้วย FRP

รูปที่ 6-21 แสดงอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานตัวอย่างที่ระยะเวลาเผาไฟ 90 และ 120 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 6-21 อุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคานตัวอย่างที่ระยะเวลาเผาไฟ 90 และ 120 นาที

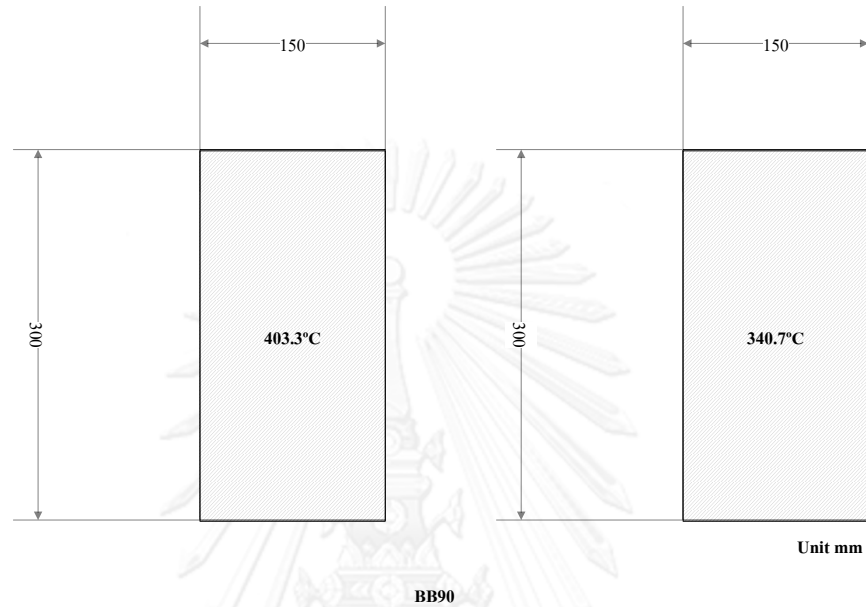
### วิธีการกำหนดขนาดที่หน้าตัดลดลง (อ้างอิงอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานตัวอย่าง)

ขนาดหน้าตัดลดขอบเขตล่าง เป็นหน้าตัดลดลงโดยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C ทำการประมาณแบบเชิงเส้น (liner interpolation) ค่าอุณหภูมิ 500 °C ภายในหน้าตัดคานตัวอย่าง โดยอ้างอิงอุณหภูมิที่สูงสุดและอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรงกลางของหน้าตัดคานตัวอย่าง

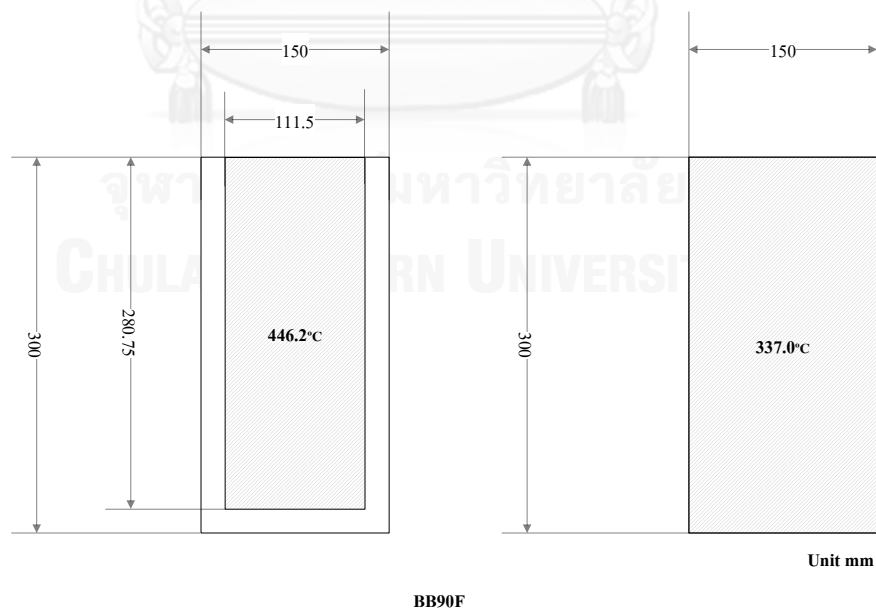
ขนาดหน้าตัดลดขอบเขตบน เป็นหน้าตัดลดลงโดยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C ทำการประมาณแบบเชิงเส้น (liner interpolation) ค่าอุณหภูมิ 500 °C ภายในหน้าตัดคานตัวอย่าง โดยอ้างอิงอุณหภูมิที่ต่ำสุดและอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรงกลางของหน้าตัดคานตัวอย่าง

เนื่องจากการทดสอบการเผาไฟคานตัวอย่างจำลองการเผาไฟเหมือนคานคอนกรีตในโครงสร้างที่ได้รับผลกระทบจากไฟจริงๆ โดยที่ให้มีพื้นที่หน้าตัดที่สัมผัสกับไฟ 3 ด้าน ได้แก่ หน้าตัดด้านข้างทั้งสอง และหน้าตัดใต้ท้องคานตัวอย่าง ส่วนหน้าตัดด้านบนห่อหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อนเซรามิกทนไฟ ดังนั้นวิธีการกำหนดหน้าตัดลดลง จะกำหนดให้หน้าตัดด้านบนที่ห่อหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน ไม่มีระยะความลึกของความเสียหายจากอุณหภูมิ

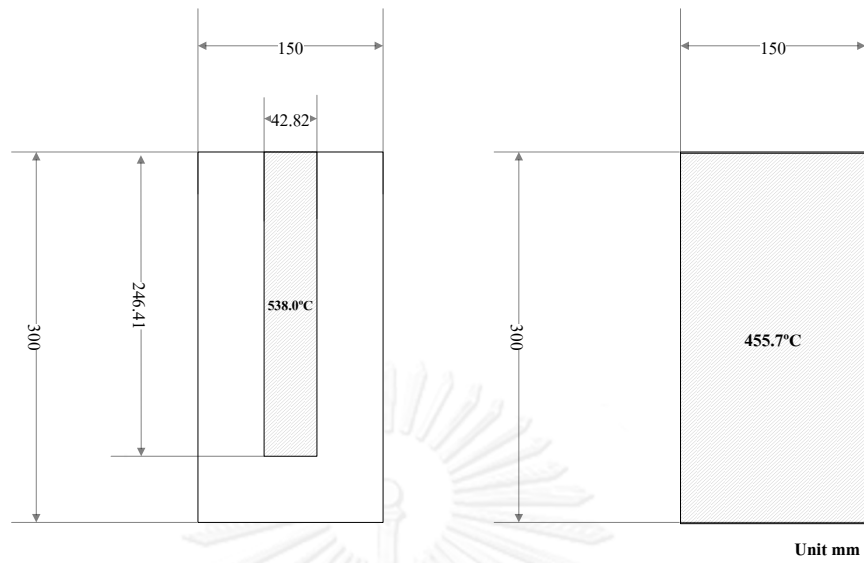
รูปที่ 6-22 ถึงรูปที่ 6-25 แสดงขนาดหน้าตัดที่ลดลงโดยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C ของคานตัวอย่าง โดยรูปซ้ายแสดงหน้าตัดที่ลดลงจากขอบเขตล่างและรูปขวาแสดงหน้าตัดที่ลดลงจากขอบเขตบนที่ระยะเวลาเผาไฟ 90 และ 120 นาที ตามลำดับ



รูปที่ 6-22 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB90

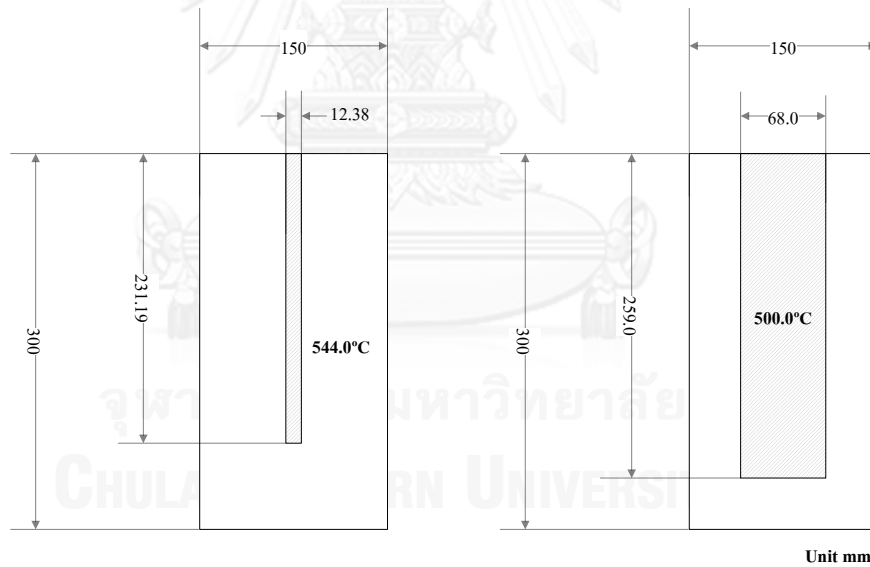


รูปที่ 6-23 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB90F



BB120

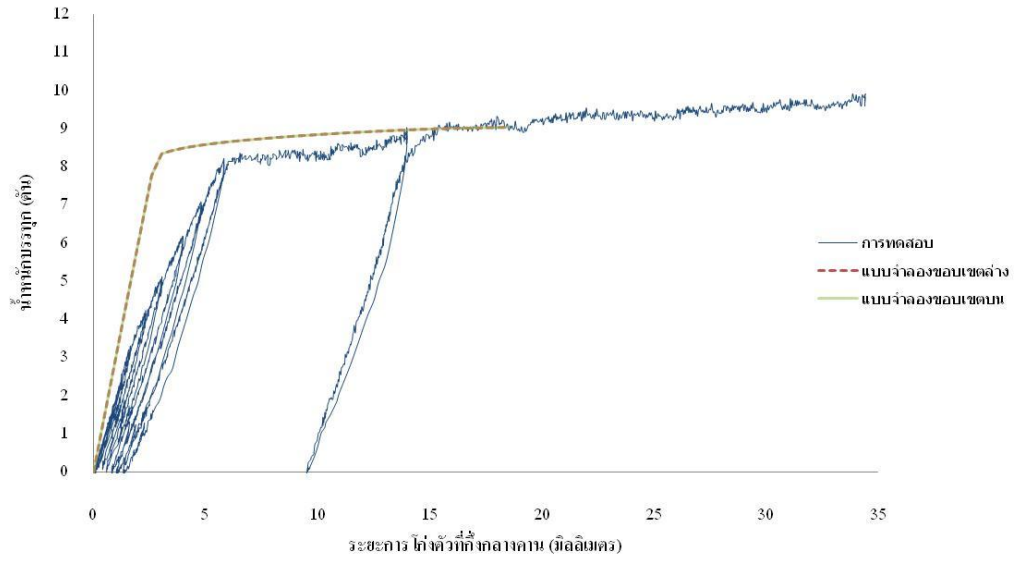
รูปที่ 6-24 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB120



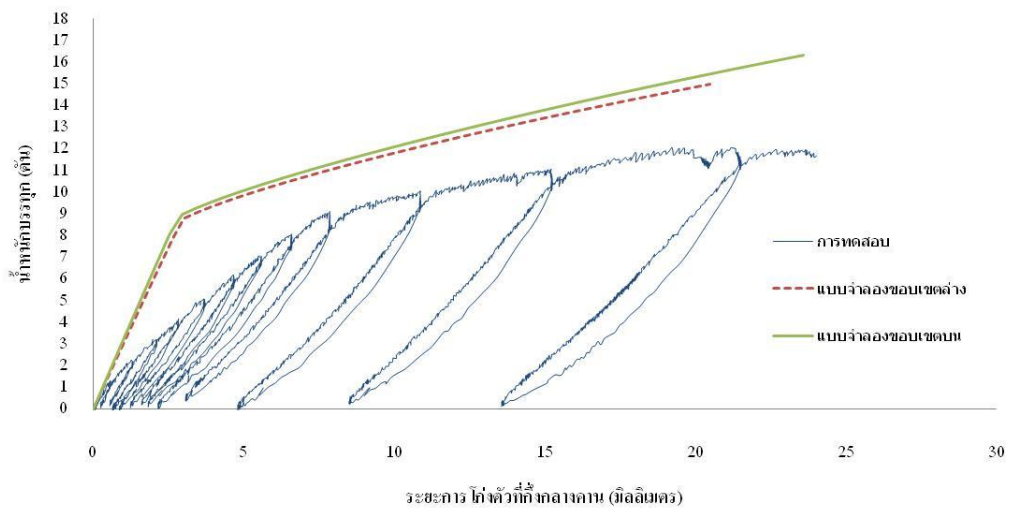
BB120F

รูปที่ 6-25 ขนาดหน้าตัด Reduced cross section ของคาน BB120F

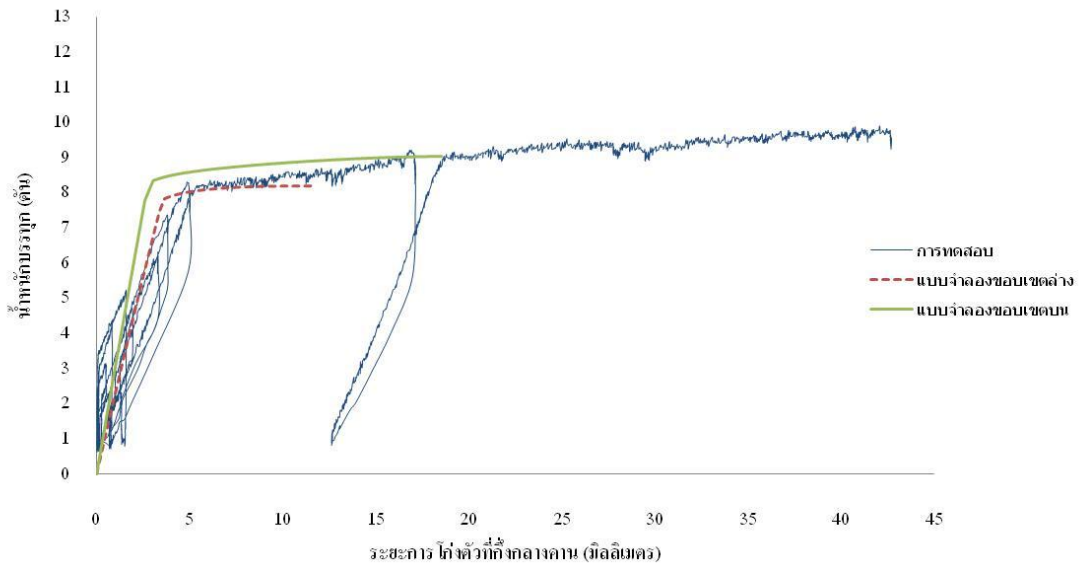
รูปที่ 6-26 ถึงรูปที่ 6-29 แสดงการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB90 BB90F BB120 และBB120F ตามลำดับ



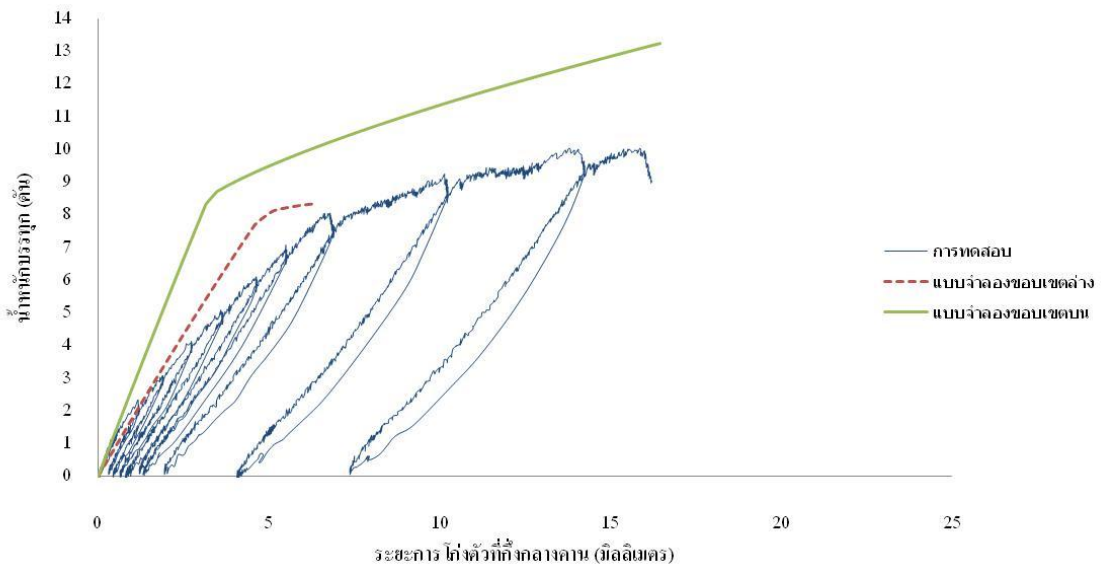
รูปที่ 6-26 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB90



รูปที่ 6-27 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB90F



รูปที่ 6-28 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB120



รูปที่ 6-29 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและข้อมูลทดสอบของคานทดสอบ BB120F

ตารางที่ 6-4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง จากตารางพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลจากแบบจำลองและการทดสอบ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากแบบจำลองขอบเขตล่างมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองขอบเขตบน โดยมีค่าแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 15.77 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6-4 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง

คานตัวอย่าง	น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (ตัน)			ความแตกต่างของน้ำหนักบรรทุกสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	
	การทดสอบ	แบบจำลอง		การทดสอบและ แบบจำลองขอบเขตบน	การทดสอบและ แบบจำลองขอบเขตล่าง
		ขอบเขตบน	ขอบเขตล่าง		
BB00	10.18	9.04	9.04	-11.2	-11.2
BB90	9.92	9.04	9.04	-8.87	-8.87
BB90F	12.04	16.34	15.01	35.71	24.67
BB120	9.91	9.04	8.20	-8.78	-17.25
BB120F	10.03	13.24	8.34	32.00	-16.85
		ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์		19.31	15.77
		ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างสัมบูรณ์		13.38	6.15

ตารางที่ 6-5 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างระยะการโค้งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง จากตารางพบว่า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลจากแบบจำลองและการทดสอบ ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์ระหว่างระยะการโค้งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดจากแบบจำลองขอบเขตบนมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองขอบเขตล่าง โดยมีค่าแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 31.42 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 6-5 เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างระยะการโค้งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุดของการทดสอบและแบบจำลอง

คานตัวอย่าง	ระยะการ โค้งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (มม.)			ความแตกต่างของระยะการ โค้งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (เปอร์เซ็นต์)	
	การทดสอบ	แบบจำลอง		การทดสอบและแบบจำลองขอบเขตบน	การทดสอบและแบบจำลองขอบเขตล่าง
		ขอบเขตบน	ขอบเขตล่าง		
BB00	27.10	18.54	18.54	-31.59	-31.59
BB90	33.86	18.54	18.54	-45.25	-45.25
BB90F	19.22	23.60	20.48	22.79	6.56
BB120	42.08	18.54	11.57	-55.94	-72.50
BB120F	16.22	16.47	6.38	1.54	-60.67
		ค่าเฉลี่ยของความแตกต่างสัมบูรณ์		31.42	43.31
		ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแตกต่างสัมบูรณ์		20.98	25.72



ตารางที่ 6-6 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบและแบบจำลอง จากแบบจำลองสามารถทำนายลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างที่ไม่ติดตั้ง FRP (BB00 BB90 และ BB120) เหมือนการทดสอบ แต่ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างที่ติดตั้ง FRP (BB90F และ BB120F) ให้ผลทำนายที่แตกต่างจากการทดสอบ

ตารางที่ 6-6 ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบและแบบจำลอง

คานตัวอย่าง	ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากการทดสอบ	ลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างจากแบบจำลอง	
		ขอบเขตบน	ขอบเขตล่าง
BB00	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	
BB90	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
BB90F	แผ่น FRP หลุดล่อน (FRP debonding)	แผ่น FRP ขาด (FRP rupture)	แผ่น FRP ขาด (FRP rupture)
BB120	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)
BB120F	แผ่น FRP หลุดล่อน (FRP debonding)	แผ่น FRP ขาด (FRP rupture)	คอนกรีตแตก (concrete crushing)

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้การเผาไฟและซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และศึกษาแบบจำลองทำนายกำลังของคานตัวอย่างดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบ จากที่ได้แสดงทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่ออุณหภูมิและเวลาในการเผาเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมากขึ้น โดยการทดสอบชุดที่ 1 คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่บ่มที่ 28 วันเท่ากับ 309.6 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเผาไฟที่ระยะเวลา 60, 90, 120 และ 120 นาที ลดอุณหภูมิหลังจากการเผาไฟโดยการฉีดน้ำ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงเหลือ 150.9, 101.9, 72.1 และ 118.2 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ การทดสอบชุดที่ 2 คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดที่บ่มที่ 28 วันเท่ากับ 412.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะลดลงเหลือ 71.9 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และเผาไฟที่ระยะเวลา 120 นาที ไม่สามารถทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ เนื่องจากคอนกรีตทรุดกระบองเสียหาย
2. อุณหภูมิและเวลาในการเผาไฟมีส่งผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานตัวอย่าง โดยการทดสอบชุดที่ 1 และ 2 พบว่า อุณหภูมิและระยะเวลาในการเผาไฟที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ารับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานตัวอย่างลดลง
3. เมื่อซ่อมแซมคานตัวอย่างหลังจากการเผาไฟด้วย FRP จะส่งผลต่อการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานตัวอย่าง โดยการทดสอบชุดที่ 1 และ 2 พบว่าเมื่อทำการซ่อมแซมคานตัวอย่างหลังจากการเผาไฟด้วย FRP จะส่งผลให้ค่ารับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของคานตัวอย่างสูงกว่าคานตัวอย่างที่ไม่ได้ซ่อมแซมด้วย FRP ยกเว้นคานตัวอย่างหลังจากการเผาไฟ 120 นาที และลดอุณหภูมิโดยการฉีดน้ำ ซ่อมแซมด้วย FRP ของการทดสอบชุดที่ 1 เพียงตัวอย่างเดียวที่มีผลของค่ารับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดน้อยกว่าคานตัวอย่างที่ไม่ได้ซ่อมแซมด้วย FRP
4. แบบจำลองที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบชุดที่ 1 พบว่า แบบจำลองไม่สามารถทำนายน้ำหนักบรรทุกสูงสุดได้เนื่องการวิบัติของการทดสอบและแบบจำลองต่างกัน, การทำนายระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด แบบจำลองขอบเขตบนมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองขอบเขตล่างโดยมีค่าความแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 29.82 เปอร์เซ็นต์ และการทำนายลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างแบบจำลองขอบเขตบนและขอบเขตล่างให้ผลทำนายลักษณะการวิบัติแตกต่างการทดสอบ

5. แบบจำลองที่ศึกษาเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบชุดที่ 2 พบว่า การทำนายน้ำหนักบรรทุกสูงสุด แบบจำลองขอบเขตล่างมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองขอบเขตบน โดยค่าความแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 15.77 เปอร์เซ็นต์, การทำนายระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่น้ำหนักบรรทุกสูงสุด แบบจำลองขอบเขตบนมีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองขอบเขตล่างโดยมีค่าความแตกต่างจากการทดสอบเท่ากับ 31.42 เปอร์เซ็นต์ และการทำนายลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่าง คานตัวอย่างที่ไม่ติดตั้ง FRP แบบจำลองขอบเขตบนและขอบเขตล่างสามารถทำนายลักษณะการวิบัติได้เหมือนการทดสอบ ส่วนคานตัวอย่างที่ติดตั้ง FRP แบบจำลองขอบเขตบนและขอบเขตล่างให้ผลทำนายลักษณะการวิบัติที่ต่างกัน โดยแบบจำลองขอบเขตบนให้ผลการทำนายลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างวิบัติที่ FRP เหมือนกับการทดสอบแต่แบบจำลองไม่สามารถทำนาย การหลุดล่อนของ FRP ได้ และแบบจำลองขอบเขตล่างให้ผลการทำนายลักษณะการวิบัติของคานตัวอย่างวิบัติคอนกรีต ซึ่งแตกต่างจากการทดสอบ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการวิจัย พบว่าควรเพิ่มประสิทธิภาพของ FRP โดยการป้องกันการหลุดล่อนของ FRP เพื่อที่จะอธิบายประสิทธิภาพของการซ่อมแซมคานคอนกรีตที่เผาไฟซ่อมแซมด้วย FRP ได้ ส่วนการวิเคราะห์หน้าตัดคานตัวอย่างที่ลดลงหลังจากการเผาไฟด้วยวิธีอุณหภูมิระดับ 500 °C (500 °C Isotherm Method) เป็นวิเคราะห์ห้อย่างง่าย ให้ผลการวิเคราะห์ที่มีความละเอียดน้อย และการประมาณหน้าตัดอุณหภูมิระดับ 500 °C นั้น ใช้การวิเคราะห์แบบการประมาณเชิงเส้น (linear interpolation) ผู้วิจัยแนะนำให้มีการศึกษาวิธีการลดหน้าตัดหลังจากการเผาไฟที่มีความละเอียดมากขึ้น และการประมาณหน้าตัดอุณหภูมิระดับ 500 °C ควรเป็นการประมาณไม่เชิงเส้น (non-linear interpolation) จึงจะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความละเอียดมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

1. ทรงเกียรติ หาญสันติ, พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้, วิศวกรรมศาสตร์. 2544, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2. ชัชชาติ สิทธิพันธ์, พฤติกรรมการประเมินและการซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเพลิงไหม้, โยธาสาร. 2547.
3. นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา, กำลังอัดของคอนกรีตที่ถูกไฟไหม้และลดอุณหภูมิทันที, งานประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 10. 2548.
4. Florian Block, and et al., Assessment, Design and Repair of Fire-damaged Concrete Structures, Technical Report No.68. 2008, Report of a Concrete Society Working Group.
5. Akhrawat Lenwari and Thaksin Thepchatri, Experimental Study on RC Beams Strengthened with Carbon and Glass Fiber. Department of Civil Engineering Chulalongkorn University, 2009.
6. Xiang Kai, et al., Experiment and Analysis of CFRP Strengthened Fire-damaged Reinforced Concrete Continuous T-Beams., The 5th Conference on Performance-based Fire and Fire Protection Engineering. 2011.
7. Xiang Kai, et al., Flexural Strengthening of Fire-damaged Reinforced Concrete Continuous T-Beams with CFRP sheets, International Conference on Electric Technology and Civil Engineering. 2011: China. p. 372-379.
8. ISO 834, Fire-Resistance Tests-Elements of building Construction. 1999, International Organization for Standardization: Switzerland.
9. CEN., Eurocode 2; Design of Concrete Structures. Part 1.2, General Rules- Structure Fire Design. 2004.
10. Park, R. and T. Paulay, Reinforced concrete structures. 1 ed. 1975, New York: John Wiley & Sons.
11. ACI 318, Building Code Requirements for Reinforced concrete. 1989.
12. ACI440.2R, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures 2008.
13. บริษัท ซิก้า ประเทศไทย, งานเสริมกำลังของโครงสร้าง, <http://tha.sika.com/>.
14. กรมโยธาธิการและผังเมือง, มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (มผย. 1502), วิธีการหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก. 2551.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ภาคผนวก ก

## 1. รายการคำนวณการออกแบบตัวอย่างของการทดสอบชุดที่ 1

ตามข้อกำหนด ACI 318-89 [11] และ ACI 440-08 [12]

$$f'_c = 309.6 \text{ ksc}$$

$$f_y = 5746 \text{ ksc}$$

$$f_v = 3809 \text{ ksc}$$

$$E_s = 2 \times 10^6 \text{ ksc}$$

$$E_f = 2.8 \times 10^6 \text{ ksc}$$

คานขนาด  $15 \times 30 \times 210$  ซม. ระยะห่างระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 180 ซม. ระยะหุ้ม 2.5 ซม.

$$d = 26.1 \text{ ซม.} \quad d' = 3.7 \text{ ซม.} \quad \beta_1 = 0.8$$

คำนวณหาค่า  $c$

$$T = C_c + C_s$$

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b \beta_1 c + A'_s f'_s$$

$$\text{เมื่อ } f'_s = \epsilon'_s E_s = \frac{c - d'}{c} 0.004 E_s$$

$$0.85 f'_c b \beta_1 c^2 + (8000 A'_s - A_s f_y) c - 8000 d' A'_s = 0$$

แทนค่าต่างๆ และแก้สมการกำลังสองจะได้

$$c = 4.32 \text{ ซม.}$$

$$a = \beta_1 c = 0.8 \times 4.11 = 3.46 \text{ ซม.}$$

หาค่ากำลังรับโมเมนต์

$$M_n = 0.85 f'_c b a (d - 0.5a) + A'_s f'_s (d - d')$$

$$M_n = 3588.46 \text{ กก.-ม.}$$

$$P = \frac{6M}{1.8} = \frac{6(3588.46)}{1.8} = 11961.53 \text{ กก.}$$

วิเคราะห์หากำลังรับแรงเฉือน

$$V = 0.53\sqrt{f'_c}bd + A_v f_y d / s$$

$$V = 0.53\sqrt{309.6}(15)(26.1) + 2(0.283)(3809)(26.1) / 12.5 = 8152.48 \text{ กก.}$$

สำหรับคานที่เสริม FRP

$$T + T_f = C_c + C'_s$$

$$A_s f_y + f_{fe} A_f = f'_s A'_s + 0.85 f'_c b \beta_1 c$$

$$f_{fe} = 0.004 \frac{h-c}{c} E_f$$

$$0.85 f'_c b \beta_1 c^2 + (8000 A'_s - A_s f_y + 11200 A_f) c - 8000 d' A'_s - 11200 h A_f = 0$$

แทนค่าและแก้สมการกำลังสอง

$$c = 2.87 \text{ ซม.}$$

$$a = \beta_1 c = 0.8 \times 2.87 = 2.30 \text{ ซม.}$$

$$f_{fe} = 11200 \frac{30 - 2.87}{2.87} = 105873.17 \text{ ksc}$$

$$f'_s = 8000 \frac{26.1 - 2.87}{2.87} = 64752.61 \text{ ksc}$$

$$M_n = 0.85 f'_c b a (d - 0.5a) + A'_s f'_s (d - d') + A_f f_{fe} (h - 0.5a)$$

แทนค่า  $f_{fe}$  และ  $f'_s$

$$M_n = 6448.6 \text{ กก.-ม.}$$

$$P = \frac{6448.6 \times 6}{1.8} = 21495.33 \text{ กก.}$$

## 2. รายการคำนวณการออกแบบคานตัวอย่างของการทดสอบชุดที่ 2

ตามข้อกำหนด ACI 318-89 [11] และ ACI 440-08 [11]

$$f'_c = 412.9 \text{ ksc}$$

$$f_y = 3123 \text{ ksc}$$

$$f_v = 4382 \text{ ksc}$$

$$E_s = 2 \times 10^6 \text{ ksc}$$

$$E_f = 2.8 \times 10^6 \text{ ksc}$$

คานขนาด 15×30×210 ซม. ระยะห่างระหว่างฐานรองรับเท่ากับ 180 ซม. ระยะหุ้ม 2.5 ซม.

$$d = 25.7 \text{ ซม.} \quad d' = 4.1 \text{ ซม.} \quad \beta_1 = 0.8$$

คำนวณหาค่า  $c$

$$T = C_c + C_s$$

$$A_s f_y = 0.85 f'_c b \beta_1 c + A'_s f'_s$$

เมื่อ  $f'_s = \epsilon'_s E_s = \frac{c-d'}{c} 0.004 E_s$

$$0.85 f'_c b \beta_1 c^2 + (8000 A'_s - A_s f_y) c - 8000 d' A'_s = 0$$

แทนค่าต่างๆ และแก้สมการกำลังสองจะได้

$$c = 3.13 \text{ ซม.}$$

$$a = \beta_1 c = 0.8 \times 3.13 = 2.50 \text{ ซม.}$$

หาค่ากำลังรับโมเมนต์

$$M_n = 0.85 f'_c b a (d - 0.5a) + A'_s f'_s (d - d')$$

$$M_n = 3477.91 \text{ กก.-ม.}$$

$$P = \frac{4M}{1.8} = \frac{4(3477.91)}{1.8} = 7728.69 \text{ กก.}$$

วิเคราะห์หาค่ากำลังรับแรงเฉือน

$$V = 0.53 \sqrt{f'_c} b d + A_v f_v d / s$$

$$V = 0.53 \sqrt{412.9} (15)(25.7) + 2(0.785)(4382)(25.7) / 10 = 21832.6 \text{ กก.}$$



สำหรับคานาที่เสริม FRP

$$T + T_f = C_c + C_s'$$

$$A_s f_y + f_{fe} A_f = f_s' A_s' + 0.85 f_c' b \beta_1 c$$

$$f_{fe} = 0.004 \frac{h-c}{c} E_f$$

$$0.85 f_c' b \beta_1 c^2 + (8000 A_s' - A_s f_y + 11200 A_f) c - 8000 d' A_s' - 11200 h A_f = 0$$

แทนค่าและแก้สมการกำลังสอง

$$c = 2.39 \text{ ซม.}$$

$$a = \beta_1 c = 0.8 \times 2.39 = 1.91 \text{ ซม.}$$

$$f_{fe} = 11200 \frac{30 - 2.39}{2.39} = 129385.77 \text{ ksc}$$

$$f_s' = 8000 \frac{25.7 - 2.38}{2.38} = 78386.55 \text{ ksc}$$

$$M_n = 0.85 f_c' b a (d - 0.5a) + A_s' f_s' (d - d') + A_f f_{fe} (h - 0.5a)$$

แทนค่า  $f_{fe}$  และ  $f_s'$

$$M_n = 7800.73 \text{ กก.-ม.}$$

$$P = \frac{7800.73 \times 4}{1.8} = 17334.96 \text{ กก.}$$

## ภาคผนวก ข

### รายละเอียดคุณสมบัติของวัสดุซ่อมแซมและเสริมกำลัง

เกิดความเสียหายที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังจากการเผาไฟที่ระยะเวลาต่างๆ หลังจากนั้นทำการซ่อมแซมคานด้วยวัสดุ ซึ่งได้แก่ มอร์ตาร์ซ่อมแซม แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน และอีพอกซีเรซินเชื่อมประสาน มีรายละเอียดคุณสมบัติ ดังนี้

#### 1. มอร์ตาร์ซ่อมแซม

มอร์ตาร์ที่ใช้ซ่อมแซมส่วนคอนกรีตที่เสียหายของคานตัวอย่าง คือ Sika® MonoTop® - 610 [13] มีรายละเอียดคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ ข-1 รายละเอียดคุณสมบัติของมอร์ตาร์ซ่อมแซม Sika® MonoTop® -610

ความหนาแน่น	1.15 กิโลกรัมต่อลิตร (ผงแห้ง)
	2.00 กิโลกรัมต่อลิตร (เมื่อผสมเสร็จ)
ค่ากำลังทางกล	ค่ากำลังอัด > 50 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (28 วัน)
ค่ากำลังยึดเกาะ	> 2.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (บนผิวคอนกรีตที่ได้รับการเตรียม)

#### 2. แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในการเสริมกำลังคานตัวอย่าง คือ SikaWrap®-230C/45 [13] มีรายละเอียดคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ ข-2 รายละเอียดคุณสมบัติของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน SikaWrap®-230C/45

ประเภทเส้นใย	Laminate
น้ำหนักต่อพื้นที่	225 กรัมต่อตารางเมตร
ความหนาของแผ่น	1 มิลลิเมตรต่อชั้น
กำลังรับแรงดึงของเส้นใย	350 กิโลนิวตันต่อเมตร
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเส้นใย	28,000 กิโลนิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
การยืดตัวเมื่อแตกหัก	1.5%

### 3. อีพอกซีเรซินเชื่อมประสาน

อีพอกซีเรซินที่ใช้เชื่อมประสานระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและมอร์ตาร์ซ่อมแซมตัวอย่าง คือ Sikadur® -330 [13] มีรายละเอียดคุณสมบัติดังนี้

ตารางที่ ข-3 รายละเอียดคุณสมบัติของอีพอกซีเรซิน Sikadur® -330

ความหนาแน่น	1.30 กิโลกรัมต่อลิตร
กำลังรับแรงดึง	30 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร
กำลังยึดเกาะ	> 4.0 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (>1วัน )
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น	3,800 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (การตัด)
	4,500 นิวตันต่อตารางมิลลิเมตร (การดึง)

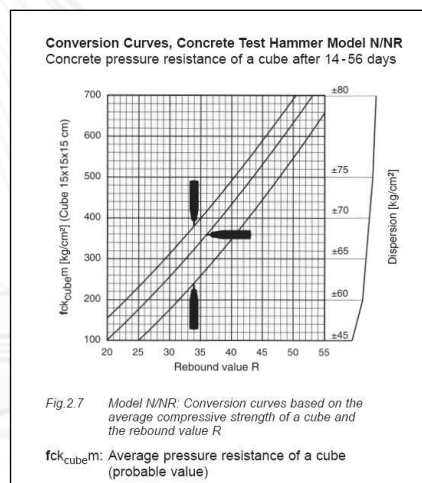
## ภาคผนวก ค

### การทดสอบแบบไม่ทำลายเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (rebound hammer)

เป็นการทดสอบโดยอาศัยหลักการกระแทกและกระดอนกลับของมวลสปริง (spring mass) ค่า Rebound Number ที่ได้จะขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของผิวที่ถูกกระแทก (ตัวอย่างการทดสอบรูปที่ ค-1 (ก.)) การตรวจสอบวิธีนี้อาจได้ค่าไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง โดยกระบวนการทดสอบดังกล่าวเป็นไปตามมาตรฐาน มยผ.1502-51 (มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (rebound hammer) [14] จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของ Rebound Number และทิศทางที่ใช้ในการทดสอบมาแปลงเป็นค่ากำลังอัดของคอนกรีต (ดังแสดงในรูปที่ ค-1 (ข.))



(ก.)



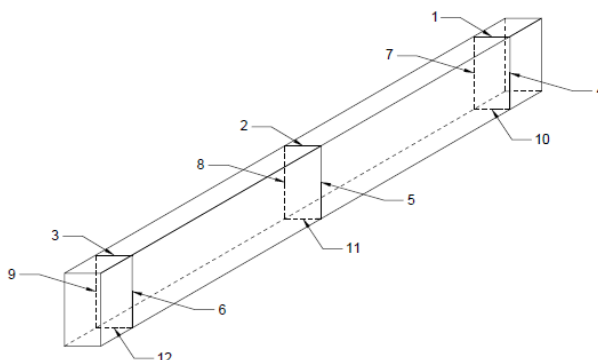
(ข.)

รูปที่ ค-1 (ก.) แสดงการทดสอบหาค่ากำลังคอนกรีตด้วยวิธี Rebound Hammer

รูปที่ ค-1 (ข.) ความสัมพันธ์ค่า Rebound กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

### 1. ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของการทดสอบชุดที่ 1

ผลการทดสอบค่าสะท้อนและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Rebound hammer ของคานตัวอย่างต่างๆ ตำแหน่งที่ทดสอบค่อนกระแทกแสดงดังรูปที่ ค-2 และผลการทดสอบของคานตัวอย่างต่างๆ แสดงดังตารางที่ ค-1 ถึง ตารางที่ ค-10



รูปที่ ค-2 ตำแหน่งที่ทดสอบค่อนกระแทก

ตารางที่ ค-1 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B00

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	35.0	32.0	36.0	36.0	38.0	34.0	42.0	38.0	37.0	34.0	36.2	430
2	37.0	35.0	40.0	35.0	35.0	36.0	38.0	31.0	36.0	37.0	36.0	420
3	35.0	36.0	38.0	35.0	33.0	33.0	39.0	37.0	35.0	33.0	35.4	404
4	39.0	36.0	34.0	40.0	44.0	40.0	42.0	41.0	36.0	46.0	39.8	430
5	38.0	38.0	40.0	43.0	39.0	38.0	39.0	33.0	39.0	36.0	38.3	410
6	37.0	37.0	32.0	41.0	40.0	41.0	36.0	37.0	39.0	37.0	37.7	398
7	39.0	39.0	39.0	40.0	40.0	38.0	40.0	44.0	46.0	40.0	40.5	435
8	40.0	40.0	34.0	39.0	36.0	40.0	37.0	40.0	39.0	38.0	38.3	410
9	38.0	40.0	37.0	38.0	40.0	38.0	43.0	40.0	39.0	38.0	39.1	420
10	40.0	40.0	44.0	42.0	50.0	46.0	42.0	40.0	44.0	41.0	42.9	360
11	44.0	47.0	51.0	54.0	47.0	49.0	40.0	46.0	43.0	43.0	46.4	409
12	43.0	49.0	48.0	42.0	40.0	44.0	47.0	44.0	38.0	45.0	44.0	390

ตารางที่ ค-2 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B00F

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	38	35	38	45	35	35	36	34	33	34	36.3	410
2	32	37	40	35	36	35	34	36	35	33	35.3	394
3	35	32	36	36	36	37	35	38	35	37	35.7	402
4	40	40	40	38	36	39	38	39	40	38	38.8	402
5	39	39	40	38	41	36	38	40	38	38	38.7	401
6	41	41	43	43	40	40	39	40	44	38	40.9	442
7	38	39	39	45	41	41	40	41	44	42	41.0	444
8	46	39	41	38	39	42	39	40	41	41	40.6	436
9	40	40	38	39	39	37	40	39	41	40	39.3	410
10	45	38	41	46	48	45	47	43	40	44	43.7	412
12	48	48	48	50	44	52	50	56	55	56	50.7	555

ตารางที่ ค-3 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B60

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	22	25	25	24	27	28	24	28	29	27	25.9	240
2	31	25	24	27	31	25	25	25	23	21	25.7	233
3	24	26	28	25	26	29	31	24	25	28	26.6	250
4	32	35	35	39	40	38	34	36	36	38	36.3	359
5	36	36	31	39	39	39	37	36	39	39	37.1	370
6	32	36	34	35	35	35	36	39	40	38	36.0	352
7	33	38	37	32	35	35	36	34	38	36	35.4	346
8	36	38	38	38	36	36	38	37	37	40	37.4	380
9	31	35	31	33	34	34	32	38	40	38	34.6	330
10	41	41	42	41	43	43	34	45	39	40	40.9	357
11	40	36	36	42	44	44	43	41	45	42	41.3	362
12	44	43	38	40	36	36	41	42	40	37	39.7	349

ตารางที่ ค-4 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B60F

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	32	30	27	31	31	31	25	30	32	29	29.8	301
2	24	31	35	25	30	34	35	30	30	26	30.0	302
3	27	27	26	28	30	28	28	25	25	26	27.0	270
4	38	35	37	38	36	36	39	40	35	37	37.1	378
5	31	35	35	37	37	37	38	38	39	38	36.5	364
6	33	38	38	41	38	39	40	37	37	39	38.0	398
7	31	33	35	35	34	37	35	35	38	39	35.2	340
8	34	35	30	36	32	33	35	35	37	39	34.6	332
9	32	36	30	34	32	39	33	33	33	38	34.0	320
10	39	43	37	34	33	45	35	31	34	31	36.2	280
12	36	39	38	40	40	40	44	34	39	37	38.7	310

ตารางที่ ค-5 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B90

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	24	16	19	28	22	16	17	22	16	19	19.9	150
2	26	20	26	26	24	22	24	26	26	24	24.4	218
3	20	26	26	24	25	25	29	22	26	26	24.9	222
4	34	33	32	34	32	36	32	32	34	36	33.5	312
5	31	30	34	36	34	38	34	34	30	36	33.7	315
6	38	31	32	33	32	31	33	32	37	34	33.3	308
7	33	33	33	33	32	31	34	34	36	36	33.5	312
8	31	34	31	34	31	31	32	35	36	33	32.8	298
9	30	32	32	33	38	34	30	34	34	33	33.0	300
10	35	34	43	41	42	35	34	40	36	38	37.8	309
11	40	38	36	42	40	38	40	42	39	40	39.5	340
12	41	40	40	40	41	42	40	34	34	38	39.0	329

ตารางที่ ค-6 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B90F

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	24	25	22	24	24	24	29	22	23	19	23.6	200
2	20	20	23	19	16	20	20	17	19	20	19.4	150
3	28	26	28	22	22	23	26	21	23	22	24.1	208
4	35	34	34	34	36	35	34	35	36	38	35.1	342
5	33	35	34	36	35	34	34	37	36	32	34.6	332
6	29	27	27	34	32	32	36	34	36	35	32.2	288
7	35	33	30	36	35	33	33	35	36	37	34.3	328
8	34	35	35	33	33	34	35	34	33	32	33.8	319
9	34	33	31	36	33	34	35	33	32	32	33.3	292
10	29	30	26	35	34	24	29	28	28	32	29.5	168
12	36	33	24	32	27	30	30	30	30	24	29.6	175

ตารางที่ ค-7 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B120

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	18	16	18	18	20	15	22	22	22	18	18.9	N/A
2	23	20	18	22	18	18	18	20	18	14	18.9	N/A
3	18	22	22	20	21	24	24	20	21	23	21.5	170
4	25	27	27	28	32	27	33	30	31	27	28.7	250
5	26	27	25	27	23	28	28	25	26	23	25.8	180
6	29	30	30	30	32	30	31	34	32	29	30.7	260
7	27	24	24	22	23	25	25	25	26	26	24.7	170
8	26	29	36	30	29	29	31	26	28	28	29.2	240
9	30	30	30	30	28	32	29	28	29	31	29.7	250
10	36	34	33	33	33	34	35	35	34	35	34.2	320
11	35	33	38	38	36	35	37	37	37	34	36.0	350
12	35	32	38	35	35	32	37	33	33	35	34.5	330



ตารางที่ ค-8 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B120F

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	24	21	20	20	24	26	18	18	19	20	21.0	160
2	18	20	22	17	18	19	21	20	24	24	20.3	155
3	26	26	27	22	24	23	24	18	21	20	23.1	190
4	26	30	28	28	32	36	29	29	33	32	30.3	250
5	28	22	28	28	28	30	31	30	28	29	28.2	220
6	25	24	22	22	28	30	28	26	30	28	26.3	190
7	28	29	33	33	28	34	34	33	30	33	31.5	260
8	26	26	30	28	32	31	28	26	31	29	28.7	240
9	25	29	26	26	29	30	30	27	34	30	28.6	238
10	33	31	34	30	33	30	31	29	32	26	30.9	190
12	32	35	38	36	35	32	33	37	36	35	34.9	258

ตารางที่ ค-9 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B120W

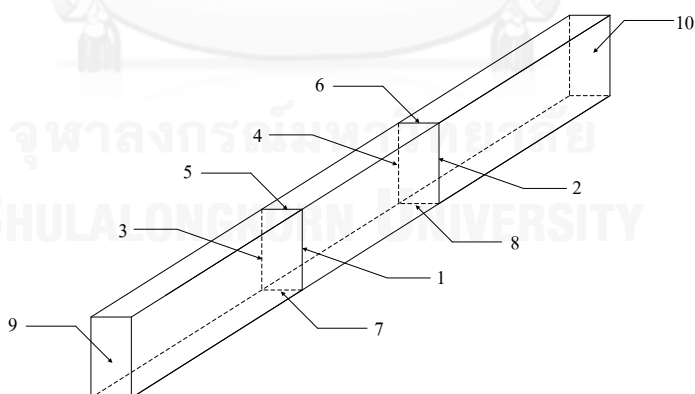
ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	21	24	18	20	18	14	12	18	16	16	17.7	N/A
2	27	26	28	30	24	24	21	28	24	25	25.7	240
3	22	23	22	18	19	24	25	20	18	21	21.2	165
4	26	31	32	33	32	32	31	32	34	37	32.0	282
5	29	30	33	26	37	33	39	37	37	35	33.6	310
6	28	30	28	34	34	37	32	32	37	35	32.7	300
7	29	28	28	28	30	30	27	31	31	36	29.8	250
8	34	31	30	30	33	29	31	33	27	34	31.2	270
9	29	26	25	30	30	26	28	31	28	33	28.6	230
10	36	35	37	39	34	37	33	36	39	39	36.5	280
11	37	34	35	37	37	36	33	37	39	37	36.2	270
12	39	39	34	34	33	31	33	37	32	30	34.2	240

ตารางที่ ค-10 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง B120WF

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	18	12	22	18	16	20	14	22	21	16	17.9	N/A
2	22	24	22	24	18	20	20	20	18	19	20.7	160
3	20	18	16	20	16	17	13	18	18	14	17.0	N/A
4	27	26	29	29	31	29	30	34	31	30	29.6	240
5	29	30	26	26	30	32	27	28	30	31	28.9	235
6	25	26	28	25	26	27	28	25	28	32	27.0	200
7	29	30	32	30	33	33	33	32	33	33	31.8	280
8	30	31	29	33	34	27	31	33	30	33	31.1	270
9	26	26	25	27	28	26	22	31	26	26	26.3	290
10	24	37	39	31	34	35	30	29	34	28	32.1	210
12	26	39	33	27	27	28	28	23	29	27	28.7	155

## 2. ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายของการทดสอบชุดที่ 2

ผลการทดสอบค่าสะท้อนและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดย Rebound hammer ของคานตัวอย่างต่างๆ ตำแหน่งที่ทดสอบค้อนกระแทกแสดงดังรูปที่ ค-3 และผลการทดสอบของคานตัวอย่างต่างๆ แสดงดังตารางที่ ค-11 ถึง ตารางที่ ค-16



รูปที่ ค-3 ตำแหน่งที่ทำทดสอบค้อนกระแทก

ตารางที่ ค-11 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง BB00

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	33	36	39	37	39	36	39	35	38	33	36.5	345
2	28	34	32	33	32	31	30	31	31	28	31.0	260
3	33	37	32	40	42	40	34	38	38	38	37.2	310
4	36	36	41	40	35	38	41	40	39	38	38.4	330
5	33	36	34	36	34	33	33	38	40	40	35.7	290
6	32	36	26	30	33	30	34	38	36	40	33.5	260
7	30	33	32	30	34	35	34	33	36	38	33.5	260
8	32	35	36	35	38	40	40	39	36	41	37.2	310
9	33	37	36	38	36	39	33	45	40	40	37.7	255
10	35	37	38	34	37	38	40	41	35	36	37.1	250

ตารางที่ ค-12 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง BB90

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	37	37	37	36	36	36	36	37	35	36	36.3	343
2	29	37	37	40	40	38	40	35	36	36	36.8	348
3	38	36	34	37	36	30	37	37	36	35	35.6	290
4	32	28	34	32	33	33	34	34	33	30	32.3	240
5	38	41	34	36	39	37	40	34	39	39	37.7	320
6	33	33	34	33	31	34	36	34	34	34	33.6	260
7	34	34	31	33	32	32	30	30	28	28	31.2	220
8	33	32	34	33	38	38	36	36	38	36	35.4	280
9	34	36	30	34	30	30	33	36	35	32	33.0	190
10	33	28	33	35	31	33	32	34	33	31	32.3	175

ตารางที่ ค-13 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง BB90F

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	33	35	34	36	35	34	34	37	36	32	34.6	310
2	29	27	27	34	32	32	36	34	36	35	32.2	280
3	37	33	32	32	38	33	36	32	34	35	34.2	263
4	28	25	27	26	33	26	32	27	29	26	27.9	220
5	33	30	33	30	34	33	34	31	33	31	32.2	235
6	26	27	28	30	30	30	30	30	27	29	28.7	195
7	32	33	34	34	35	36	32	33	34	34	33.7	255
8	28	26	27	26	27	29	27	28	27	29	27.4	170
9	29	30	26	35	34	24	29	28	28	32	29.5	200
10	36	33	24	32	27	30	30	30	30	24	29.6	208

ตารางที่ ค-14 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง BB120

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	34	33	36	37	39	38	33	35	35	35	35.5	330
2	40	38	36	35	37	31	39	33	34	31	35.4	329
3	30	27	28	22	24	25	32	26	27	32	27.3	170
4	18	20	21	17	21	19	17	21	20	16	19.0	NA
5	23	24	26	23	26	20	18	20	25	21	22.6	110
6	38	34	32	30	37	35	32	33	33	28	33.2	250
7	26	22	22	23	22	24	27	25	26	24	24.1	130
8	28	27	27	26	25	23	24	25	27	27	25.9	150
9	24	21	20	20	24	26	18	18	19	20	21.0	N/A
10	18	20	22	17	18	19	21	20	24	24	20.3	N/A

ตารางที่ ค-15 แสดงค่าสะท้อนและกำลังรับแรงอัดของคานตัวอย่าง BB120F

ตำแหน่ง	ค่าการสะท้อน (Rebound)											กำลังรับแรงอัด (กก./ตร.ซม.)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9	ครั้งที่ 10	เฉลี่ย	
1	30	26	30	27	35	29	24	25	30	27	28.3	225
2	34	36	32	35	34	36	38	35	31	35	34.6	310
3	26	24	28	24	25	28	22	25	28	31	26.1	150
4	29	28	27	22	32	19	23	18	22	18	23.8	125
5	19	20	25	21	23	22	18	26	25	22	22.1	110
6	27	20	21	24	23	26	22	21	23	25	23.2	113
7	12	19	20	16	20	17	18	15	14	17	16.8	N/A
8	32	30	28	26	20	26	30	25	24	27	26.8	263
9	18	16	18	18	20	15	22	22	22	18	18.9	N/A
10	23	20	18	22	18	18	18	20	18	14	18.9	N/A

### 3. สรุปผลการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีค้อนกระแทก

สรุปผลการทดสอบแบบไม่ทำลายโดยวิธีค้อนกระแทก แสดงดังตารางที่ ค-16 และตารางที่ ค-17

ตารางที่ ค-16 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธี Rebound hammer ของการทดสอบชุดที่ 1

กานตัวอย่าง	จำนวนจุดทดสอบ	ค่าการสะท้อน			ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	
B00	12	31.0	54.0	39.6	401.9
B00F	12	32.0	56.0	40.1	419.9
B60	12	21.0	45.0	34.7	321.1
B60F	12	24.0	45.0	34.3	320.6
B90	12	16.0	43.0	32.1	279.0
B90F	12	16.0	38.0	30.0	249.9
B120	12	14.0	38.0	27.7	247.2
B120F	12	17.0	38.0	27.6	209.7
B120W	12	12.0	39.0	30.0	253.0
B120WF	12	12.0	39.0	26.5	222.4

ตารางที่ ค-17 สรุปผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยวิธี Rebound hammer ของการทดสอบชุดที่ 2

กานตัวอย่าง	จำนวนจุดทดสอบ	ค่าการสะท้อน			ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต (กก./ตร.ซม.)
		ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย	
BB00	10	26.0	45.0	35.8	287.0
BB90	10	28.0	41.0	34.4	266.6
BB90F	10	24.0	38.0	31.0	233.6
BB120	10	16.0	40.0	26.4	209.9
BB120F	10	12.0	38.0	24.0	185.1

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-สกุล ไกรวุฒิ สาดิศากยบุตร

วัน-เดือน-ปีเกิด 15 สิงหาคม พ.ศ. 2530

ประวัติการศึกษา ระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2552 และระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ. 2556

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ ไกรวุฒิ สาดิศากยบุตร และอัครวัชร เล่นวาริ, 2557, พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหายจากเพลิงไหม้ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 19



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY