

การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FLEXURAL ANALYSIS OF FIRE-EXPOSED REINFORCED CONCRETE BEAMS
STRENGTHENED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PLATES

Mr. Seksith Tiantongnukul



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผา |
| | ไฟเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย |
| โดย | นายเศกสิทธิ์ เทียนทองนุกูล |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมโยธา |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติศรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิ์ศิริ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐมศ วัฒนิตพจมาน)

เศกสิทธิ์ เทียนทองนุกูล : การวิเคราะห์การดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FLEXURAL ANALYSIS OF FIRE-EXPOSED REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PLATES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อัศววัชร เล่นวารีย์, 110 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากเผาไฟทั้งที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและไม่ได้เสริมกำลัง โดยคำนึงถึงผลของการเย็นตัวของคานภายหลังจากเผาไฟ และใช้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังจากเผาไฟ การวิเคราะห์ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) การวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ โดยจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการวิเคราะห์ด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834(1999) และจำลองการเย็นตัวของคานด้วยการลดลงแบบเชิงเส้นของอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้อง คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตอ้างอิงจากมาตรฐาน EN-1992-1-2(2004) เพื่อหาการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคาน 2) การวิเคราะห์หน้าตัด โดยนำผลของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานร่วมกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังจากเผาไฟ และคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง และ 3) การประยุกต์ใช้หลักการของงานเสมือนเพื่อวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ซึ่งได้ตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์จากผลการทดสอบของ Kumar และ Kumar(2003) ทรงเกียรติ(2001) และไกรวุฒิ(2013) จากการวิเคราะห์พบว่าวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ทำนายการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังจากเผาไฟจากการวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้นได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ อัตราการเย็นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีผลให้การกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานเกิดขึ้นในช่วงที่เย็นตัวลง โดยการเพิ่มขึ้นของการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานจะลดลงเมื่อระยะเวลาเผาไฟนานขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5670414621 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: NONLINEAR TRANSIENT THERMAL ANALYSIS / FINITE ELEMENT METHOD / FLEXURAL BEHAVIORS / REINFORCED CONCRETE BEAMS / FIRE / FIBER-REINFORCED POLYMER

SEKSITH TIANTONGNUKUL: FLEXURAL ANALYSIS OF FIRE-EXPOSED REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH FIBER-REINFORCED POLYMER PLATES. ADVISOR: ASSOC. PROF. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., 110 pp.

This research presents the flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with fiber reinforced polymer (FRP) plates after fire exposure by considering the effects of cooling after fire. The residual mechanical properties of concrete and steel after fire are used. The analysis consists of 1) two-dimensional nonlinear transient thermal analysis by the finite element method. The beam models are subjected to ISO 834(1999) standard fire during the heating phase and linearly decreasing temperature to room temperature during the cooling phase. The thermal properties given in EN 1992-1-2(2004) are used for determining the peak temperature distributions in the beam sections, 2) section analysis by combining the peak temperature distributions in the beam sections, mechanical properties of concrete and steel after fire, and mechanical properties of FRP plates for determining the moment-curvature relationship, and 3) application of virtual work principle for determining the load-deflection relationship. To validate the proposed analysis, the experimental data by Kumar and Kumar (2003), Hansanti (2001) and Satisagayabutra (2013) are chosen for comparison. It was found that the finite element method can suitably predict the peak temperature distributions in beam sections. Also, the cooling rates influence the peak temperature distributions in beam sections. The effects are reduced by prolonged fire durations. The peak temperature distributions in beam sections occurred after heating phase.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

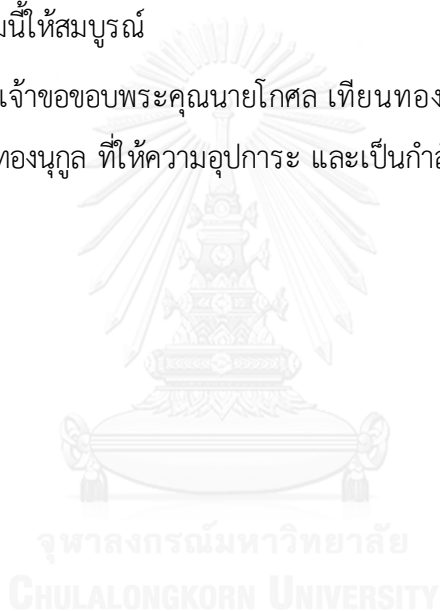
Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาในการให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำในการทำวิจัย รวมถึงให้กำลังใจ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาตรี, รองศาสตราจารย์ ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฐเมศ ภาณิตพจมาน ที่ให้ความรู้ให้ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำต่างๆด้วยดีเสมอมา เพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณนายโกศล เทียนทองนุกูล นางสุพิศ เทียนทองนุกูล และนายธนวัฒน์ เทียนทองนุกูล ที่ให้ความอุปการะ และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้ามาโดยตลอด



สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| 1.5 แนวทางดำเนินงานวิจัย..... | 4 |
| บทที่ 2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กทดสอบ | 5 |
| 2.1.1 การวัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก | 5 |
| 2.1.2 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กในขณะที่ เผาไฟ..... | 6 |
| 2.1.3 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลัง เผาไฟ..... | 8 |
| 2.2 พฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ..... | 10 |
| 2.3 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 18 |
| 2.4 พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ | 21 |

| | |
|---|----|
| 2.5 พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือนหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย | 24 |
| บทที่ 3 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคาน..... | 27 |
| 3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต..... | 27 |
| 3.2 กราฟไฟสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ..... | 30 |
| 3.3 สมการควบคุมสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ | 33 |
| 3.4 แบบจำลองไฟในต้อลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ | 34 |
| บทที่ 4 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้แรงเฉือนหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยวิธีวิเคราะห์หน้าตัด | 39 |
| 4.1 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายใต้แรงเฉือน..... | 39 |
| 4.2 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมภายใต้แรงเฉือน..... | 48 |
| 4.3 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 51 |
| 4.4 การวิเคราะห์หน้าตัด..... | 52 |
| 4.5 การวิเคราะห์การตัดของคานในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว | 56 |
| บทที่ 5 การตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต .. | 59 |
| 5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ Kumar และ Kumar[1]..... | 61 |
| 5.1.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก | 61 |
| 5.1.2 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายใต้แรงเฉือน..... | 63 |
| 5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของทรงเกียรติ[2] | 67 |
| 5.2.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก | 67 |
| 5.2.2 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายใต้แรงเฉือน..... | 71 |
| 5.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของไกรวุฒิ[3] | 76 |
| 5.3.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก | 76 |
| 5.3.2 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายใต้แรงเฉือน..... | 80 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.3 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 84 |
| บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย..... | 90 |
| 6.1 สรุปผลการวิจัย..... | 90 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ..... | 92 |
| รายการอ้างอิง..... | 93 |
| ภาคผนวก ก การตรวจสอบความเหมาะสมของจำนวนเอลิเมนต์ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ | 99 |
| ภาคผนวก ข ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] 2 มิติ..... | 100 |
| ภาคผนวก ค ตัวอย่างการวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 104 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 110 |

สารบัญตาราง

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 3.1 รายละเอียดขนาดของหน้าตัดของคาน ขนาดของเอลิเมนต์ และจำนวนเอลิเมนต์ จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ | 38 |
| ตารางที่ 3.2 แสดงการส่งผ่านความร้อนจากกราฟไฟสู่อลิเมนต์ กราฟไฟสำหรับให้ความร้อน และอุณหภูมิสม่ำเสมอในหน้าตัดจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 38 |
| ตารางที่ 5.1 รายละเอียดการเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์..... | 59 |
| ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีวิเคราะห์..... | 60 |
| ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมลางทั้งด้านนอกและด้านในของคาน คอนกรีตเสริมเหล็กขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟ..... | 61 |
| ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการ ทดสอบ Kumar และKumar[1] และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที.... | 65 |
| ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการ ทดสอบ Kumar และKumar[1] และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Sharma และคณะ[31] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที | 65 |
| ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมลางของคานขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟ... | 70 |
| ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการ ทดสอบทรงเกียรติ[2] และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ [30] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที..... | 75 |
| ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการ ทดสอบทรงเกียรติ[2] และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Sharma และ คณะ[31] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที..... | 75 |
| ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมลางของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขณะเผาไฟ และภายหลังเผาไฟ..... | 79 |

ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโค้งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการทดสอบทรงเกียรติ[2] และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ [30] และSharma และคณะ[31] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 60 นาที84

ตารางที่ ค.1 ผลรวมของแรงภายในของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ระดับต่างๆ และผลการคำนวณโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 60 นาทีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....109



สารบัญรูปภาพ

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 2.1 อุณหภูมิเตาเผาและอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งต่างๆที่แปรผันตามเวลา [9]..... | 6 |
| ภาพที่ 2.2 อุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งต่างๆที่แปรผันตามเวลาจากการทดสอบและการวิเคราะห์ [9]..... | 9 |
| ภาพที่ 2.3 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [23]..... | 9 |
| ภาพที่ 2.4 การลดลงของกำลังอัดในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟจากการทดสอบของ Abrams [25] | 10 |
| ภาพที่ 2.5 การลดลงของกำลังอัดในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟจากการทดสอบของ Malhotra [26]..... | 10 |
| ภาพที่ 2.6 ลักษณะการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของคอนกรีตที่ตำแหน่งต่างๆภายหลังหยุดเผาไฟของคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตร [8]..... | 11 |
| ภาพที่ 2.7 การลดลงของกำลังครากในเหล็กเสริมขณะที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟสำหรับเหล็กเสริมชนิด 34GS [27]..... | 12 |
| ภาพที่ 2.8 การลดลงของกำลังครากในเหล็กเสริมขณะที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟสำหรับเหล็กเสริมชนิด 18G2 [28]..... | 12 |
| ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีกำลังอัด 40 เมกะปาสกาล ภายหลังได้รับความร้อนจากการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ [30]..... | 14 |
| ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังได้รับความร้อนจากการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ [31] | 15 |
| ภาพที่ 2.11 อุณหภูมิภายในหน้าตัดทรงกระบอกคอนกรีตที่แปรผันตามเวลาจากการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนดไว้ [31] | 16 |
| ภาพที่ 2.12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองและการทดสอบ [32] | 17 |
| ภาพที่ 2.13 พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [33]..... | 19 |
| ภาพที่ 2.14 ลักษณะของหน้าตัดคานที่ถูกเสริมกำลังคานและการทดสอบการตัดภายใต้แรงกระทำสี่จุด [33]..... | 19 |

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับระยะแอนตัวที่กึ่งกลางคาน [33]..... | 20 |
| ภาพที่ 2.16 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนชนิดเส้นไฟเบอร์ทิศทางเดียวเป็นรูปตัวยู 2 ชั้น [33]..... | 20 |
| ภาพที่ 2.17 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมชนิดเส้นไฟเบอร์สองทิศทางไม่เป็นรูปตัวยู [33] | 20 |
| ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างการวิบัติแบบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลุดล่อนของคานทดสอบภายหลังเผาไฟ ที่ระยะเวลา 90 นาทีแล้วซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย[3]..... | 26 |
| ภาพที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อนของคอนกรีตและอุณหภูมิ [13]..... | 29 |
| ภาพที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของคอนกรีตและอุณหภูมิ [13]..... | 29 |
| ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตและอุณหภูมิ [13]..... | 29 |
| ภาพที่ 3.4 กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานของ Kumar และ Kumar[1].. | 31 |
| ภาพที่ 3.5 อุณหภูมิในเตาเผาจากการทดสอบของศุภณัฐ[41]..... | 32 |
| ภาพที่ 3.6 กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานของทรงเกียรติและไกรวุฒิ[2, 3]..... | 33 |
| ภาพที่ 3.7 ลักษณะของเอลิเมนต์ PLANE 55 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ [15]..... | 35 |
| ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก | 36 |
| ภาพที่ 3.9 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่ได้ลดอุณหภูมิแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้อง | 36 |
| ภาพที่ 3.10 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของ Kumar และ Kumar[1] จากโปรแกรม ANSYS[15]..... | 37 |
| ภาพที่ 3.11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของทรงเกียรติและไกรวุฒิ [2, 3] จากโปรแกรม ANSYS[15]..... | 37 |
| ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่แปรผันตามอุณหภูมิของ Chang และคณะ[30]..... | 40 |
| ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่แปรผันตามอุณหภูมิของ Sharma และคณะ[31] | 45 |

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 4.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตของแบบจำลองต่างๆที่แปรผันตามอุณหภูมิ | 46 |
| ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลภายหลังเผาไฟและในขณะที่เผาไฟที่อุณหภูมิห้อง | 47 |
| ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตจากแบบจำลอง คุณสมบัติเชิงกลภายหลังเผาไฟและในขณะที่เผาไฟที่ (ก) อุณหภูมิ 200°C (ข) อุณหภูมิ 400°C (ค) อุณหภูมิ 600°C และ (ง) อุณหภูมิ 800°C..... | 47 |
| ภาพที่ 4.6 ลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ [32]..... | 49 |
| ภาพที่ 4.7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่แปรผันตามอุณหภูมิ | 49 |
| ภาพที่ 4.8 ลักษณะโดยทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 52 |
| ภาพที่ 4.9 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ | 53 |
| ภาพที่ 4.10 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย..... | 53 |
| ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งและไดอะแกรมโมเมนต์ดัดจากโครงสร้างจริง..... | 56 |
| ภาพที่ 4.12 ไดอะแกรมโมเมนต์ดัดดัดเสมือนเนื่องจากแรงเสมือน 1 หน่วยจากโครงสร้างเสมือน..... | 57 |
| ภาพที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานที่เวลา 60 นาที (ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ..... | 62 |
| ภาพที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานที่เวลา 90 นาที (ก.) ขณะเผาไฟ (ข.) ภายหลังเผาไฟ..... | 62 |
| ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30]..... | 63 |
| ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31] | 64 |

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง | 66 |
| ภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 60 นาที | 66 |
| ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 90 นาที | 67 |
| ภาพที่ 5.8 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก | 67 |
| ภาพที่ 5.9 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 60 นาที | 68 |
| ภาพที่ 5.10 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 90 นาที | 68 |
| ภาพที่ 5.11 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 120 นาที | 69 |
| ภาพที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่กราฟไฟ 60 นาที (ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ | 70 |
| ภาพที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่กราฟไฟ 90 นาที (ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ | 70 |
| ภาพที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่กราฟไฟ 120 นาที (ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ | 71 |
| ภาพที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและ ภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] | 72 |
| ภาพที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและ ภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31] | 72 |
| ภาพที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง | 73 |
| ภาพที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที | 73 |

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคองกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 90 นาที..... | 74 |
| ภาพที่ 5.20 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคองกรีตเสริมเหล็ก..... | 76 |
| ภาพที่ 5.21 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 60 นาที..... | 76 |
| ภาพที่ 5.22 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 90 นาที..... | 77 |
| ภาพที่ 5.23 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการวัดอุณหภูมิคานคองกรีตเสริม เหล็กที่กราฟไฟ 120 นาที..... | 77 |
| ภาพที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่เวลา 60 นาที (ก) ขณะ เผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ..... | 78 |
| ภาพที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่เวลา 90 นาที (ก) ขณะ เผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ..... | 78 |
| ภาพที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่เวลา 120 นาที (ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ..... | 79 |
| ภาพที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและ ภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30]..... | 81 |
| ภาพที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและ ภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31] | 81 |
| ภาพที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคองกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง | 82 |
| ภาพที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคองกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที..... | 82 |
| ภาพที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคองกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 90 นาที..... | 83 |
| ภาพที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโค้งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคองกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 120 นาที..... | 83 |

| | |
|--|-----|
| ภาพที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและ ภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30]..... | 86 |
| ภาพที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและ ภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31] | 86 |
| ภาพที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง | 87 |
| ภาพที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที..... | 87 |
| ภาพที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 90 นาที..... | 88 |
| ภาพที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 120 นาที..... | 88 |
| ภาพที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเหล็กเสริมและเวลาที่แปรผันตามจำนวนโอลิเมนตีใน หน้าตัดจากแบบจำลองเพื่อเทียบกับผลการทดสอบของ Kumar และ Kumar[1]..... | 99 |
| ภาพที่ ข.1 ลักษณะของการสร้างภาพสีเหลืองเล็กๆเชื่อมต่อกัน[15] | 101 |
| ภาพที่ ข.2 การแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา[15] | 102 |
| ภาพที่ ข.3 การเลือกจุดต่อที่ในหน้าตัดที่ต้องการแสดงผลของอุณหภูมิ[15] | 103 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีอัตราการเกิดอัคคีภัยเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จากหลายสาเหตุ เช่น เกิดจากความตั้งใจเพื่อก่อวินาศกรรม เกิดจากความประมาทขาดความระมัดระวังในการใช้อุปกรณ์ อื่นๆ ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายด้านชีวิตและทรัพย์สินอย่างต่อเนื่อง โครงสร้างที่ได้รับความเสียหายภายหลังเกิดอัคคีภัยจำเป็นต้องประเมินความเสียหายสำหรับเลือกวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสมในกรณี que โครงสร้างได้รับความเสียหายไม่มากและคุ้มค่าแก่การซ่อมแซม แนวทางการซ่อมแซมโครงสร้างคือการทดแทนวัสดุที่เสียหายเพื่อให้องค์อาคารคืนรูปร่างเดิมและสามารถรองรับน้ำหนักบรรทุกได้อย่างปลอดภัย เนื่องจากในการทดสอบโครงสร้างที่เสียหายจากอัคคีภัยโดยตรงเพื่อศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างภายหลังเกิดอัคคีภัยมีค่าใช้จ่ายสูงและสูญเสียเวลามาก จึงทำให้การวิเคราะห์เพื่อทำนายพฤติกรรมโครงสร้างหลังเกิดอัคคีภัยเพื่อซ่อมแซมโครงสร้างให้มีความปลอดภัยเป็นที่นิยมในการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้เลือกการวิเคราะห์ห้องอาคารสำหรับเป็นตัวแทนในการศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายหลังเกิดอัคคีภัย องค์อาคารที่สนใจคือคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นที่นิยมในการก่อสร้างอาคารในปัจจุบันและคานคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นองค์อาคารพื้นฐานที่สำคัญ มีหน้าที่ในการถ่ายน้ำหนักบรรทุกจากพื้นสู่เสา ซึ่งจะทำให้เกิดพฤติกรรมการดัด การเฉือน และการบิดได้ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะพฤติกรรมการดัดของคานช่วงเดียวเพราะสามารถพิจารณาพฤติกรรมของคานได้ง่ายและเป็นขอบเขตของการวิจัย จากการศึกษาพบว่า มีงานวิจัยที่ศึกษาพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังอัคคีภัยน้อยและเป็นงานวิจัยที่เน้นการทดสอบเป็นหลัก โดยมีงานวิจัยที่ทดสอบพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟของ Kumar และ Kumar[1] งานวิจัยที่ทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟของทรงเกียรติ[2] และไกรวุฒิ[3] และงานวิจัยที่ทดสอบและวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟแล้วซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของ Haddad และคณะ[4] และไกรวุฒิ[3]

งานวิจัยส่วนใหญ่ที่วิเคราะห์พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเพลิงไหม้มีรายละเอียดแสดงในบทที่ 2 พบว่า ใช้การวิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่อุณหภูมิสูง ไม่คำนึงถึงผลของการเย็นตัวของคานภายหลังเผาไฟ[5, 6] และในการวิเคราะห์โครงสร้างจะใช้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่อุณหภูมิสูง[5, 7] ไม่ได้ใช้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ ทั้งนี้ได้มีการศึกษาพบว่า อัตราการเย็นตัวของ

คอนกรีตมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในหน้าตัดและเพิ่มความเสียหายแก่คอนกรีต ส่งผลต่อพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก[7-10] รวมถึงในกรณีที่ต้องเสริมกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟสามารถประยุกต์ใช้วัสดุประเภทพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber-reinforced polymer: FRP) ที่มีกำลังดึงและโมดูลัสยืดหยุ่นสูง[11]

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งคำนึงถึงผลของการเย็นตัวลงของคานภายหลังเผาไฟ และใช้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ การวิเคราะห์ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

1. การวิเคราะห์อุณหภูมิในสถานะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้น 2 มิติ (Non-linear transient thermal analysis) จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite element model: FEM) จะจำลองอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากกราฟเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] และจำลองการเย็นตัวลงของคานด้วยอุณหภูมิที่ลดลงแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้อง สำหรับคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตอ้างอิงจากมาตรฐาน EN-1992-1-2 [13] เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคาน และตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองจากการเปรียบเทียบกับผลทดสอบของทรงเกียรติ [2] และ ไกรวุฒิ[3]
2. การวิเคราะห์หน้าตัด (Section analysis) โดยนำผลของการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคาน คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ คุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมาร่วมพิจารณา เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง(Moment-curvature relationship) ของหน้าตัดคาน
3. การประยุกต์ใช้หลักการของงานเสมือน (Virtual work) [14] ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว (Load-deflection relationship) ของคาน

ผลการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการดัดภายใต้แรงกระทำสี่จุด (Four-point bending test) ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟของ Kumar และ Kumar[1] ทรงเกียรติ [2] และไกรวุฒิ [3] และการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของไกรวุฒิ [3] เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. นำเสนอการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 มิติ ที่เผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 [12] โดยคำนึงถึงการเย็นตัวของคาน ภายหลังเผาไฟ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method -FEM) และ ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีตที่เกี่ยวข้อง
2. นำเสนอวิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวภายหลัง ถูกเผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยมีดังนี้

1. พิจารณาเฉพาะพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดี่ยวที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังถูกเผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 ที่ระยะเวลา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที รวมถึงเสริมกำลังคานภายหลังเผาไฟด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
2. ไม่พิจารณาความเครียดเริ่มต้น (Initial strain) ในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ
3. ในการวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จะไม่พิจารณากำลังรับแรงดึงของ คอนกรีต และไม่พิจารณาการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP Debonding)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้คาดว่าจะมีประโยชน์ ดังต่อไปนี้

1. สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองการทำนายอุณหภูมิสูงสุดในคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายหลังเผาไฟที่นำเสนอในการวิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อ เสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังได้รับความเสียหายจากเพลิงไหม้ได้

2. สามารถทำนายพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการวิเคราะห์ที่นำเสนอ
3. เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงการวิเคราะห์สำหรับทำนายพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อไป

1.5 แนวทางดำเนินงานวิจัย

แนวทางดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งจากการทดสอบและการวิเคราะห์
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ
3. ศึกษาการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่เกี่ยวข้อง
4. รวบรวมผลการศึกษาและวิธีการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้ในการเสนอวิธีวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังถูกเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
5. ตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่เกี่ยวข้อง
6. สรุปผลการวิจัย เขียนบทความวิชาการและวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง

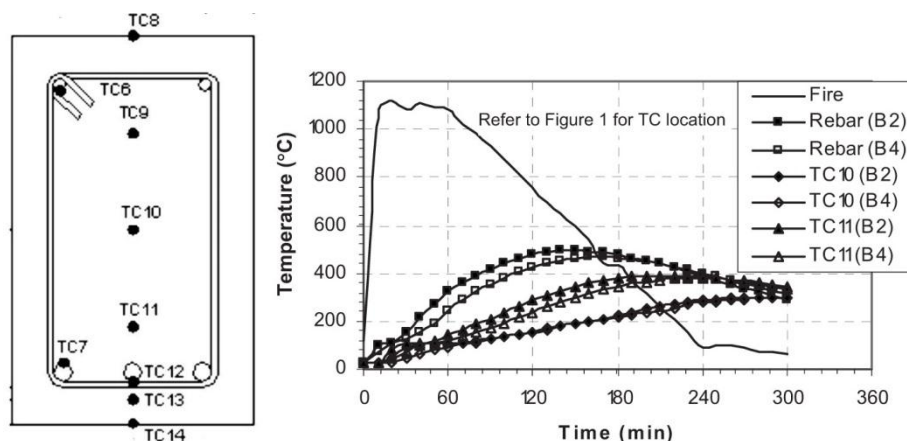
การวิเคราะห์พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่นำเสนอเป็นผลจากการรวบรวมงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องแล้วนำมาประยุกต์เพื่อสร้างวิธีการวิเคราะห์ โดยงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องมีรายละเอียดของงานวิจัยเกี่ยวกับการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการทดสอบและการวิเคราะห์ พฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ การซ่อมแซมหรือเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ และพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

2.1 การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กทดสอบ

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ประกอบด้วย การวัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้จากการทดสอบ การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กขณะเผาไฟ และการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ

2.1.1 การวัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ. 2009 Dwaikat และ Kodur [9] ได้ทดสอบความต้านทานไฟของคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 6 ตัวอย่าง โดยติดตั้งตัววัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ที่ตำแหน่งเหล็กเสริม และกึ่งกลางหน้าตัด เป็นต้น การทดสอบจะพิจารณาผลของกำลังคอนกรีต ความชื้นของคอนกรีต ชนิดฐานรองรับ อัตราส่วนของแรงกระทำก่อนเผาไฟ และลักษณะไฟที่ใช้ในเตาเผา เมื่อพิจารณาคาน B2 เป็นคานที่มีกำลังคอนกรีตปกติ มีฐานรองรับอย่างง่าย มีแรงกระทำ 50 กิโลนิวตัน มีลักษณะของไฟที่ใช้ในการเผาเป็นกราฟออกแบบที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจนถึงเวลา 1 ชั่วโมง และมีการลดลงของอุณหภูมิแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้องที่เวลา 4 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพที่ 2.1 พบว่าอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการวัดอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่งได้แก่ ตำแหน่งเหล็กเสริม (Rebar) ตำแหน่งกึ่งกลางคอนกรีตที่มีความลึก 200 มิลลิเมตร (TC10) และ 300 มิลลิเมตร (TC11) ไม่ได้เกิดขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิในเตาเผาเพิ่มขึ้น แต่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิในเตาเผาลดลง



ภาพที่ 2.1 อุณหภูมิเตาเผาและอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งต่างๆที่แปรผันตามเวลา [9]

ในปี ค.ศ. 2012 Yuye Xu และคณะ [10] ได้ทดสอบพฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ทั้งคานหน้าตัดสี่เหลี่ยมและหน้าตัดรูปตัวที (T-shape) ภายหลังจากเผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง และได้เก็บข้อมูลการเย็นตัวภายในเตาเผาภายหลังจากเผาไฟ โดยได้ติดตั้งตัววัดอุณหภูมิสำหรับคานหน้าตัดสี่เหลี่ยม 5 ตำแหน่งและคานหน้าตัดรูปตัวที 6 ตำแหน่ง ผลการวัดอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากการวัดด้วยตัววัดอุณหภูมิเกิดขึ้นภายหลังจากเผาไฟที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยจะสังเกตเห็นได้ชัดที่การวัดอุณหภูมิตำแหน่งตรงกลางหน้าตัด

2.1.2 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กในขณะเผาไฟ

ในปี ค.ศ. 1986 Wickström [16] ได้เสนอแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดองค์อาคารคอนกรีตจากเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] แบบจำลองนี้เป็นวิธีประมาณค่าการกระจายของอุณหภูมิแบบหยาบ เนื่องจากไม่คำนึงถึงความแตกต่างของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิชนิดของมวลรวม กำลังของคอนกรีต และการเปลี่ยนผันของคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิ ในการคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิจะคำนึงถึงการไหลถ่ายความร้อน (Heat flow) โดยพิจารณาว่าหน้าตัดมีการไหลถ่ายความร้อน 1 มิติหรือ 2 มิติ ซึ่งจะมีสูตรการคำนวณการกระจายของอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป คำนึงความลึกจากผิวสัมผัสความร้อน คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิ ระยะเวลาทนไฟของคอนกรีต และสมมติฐานของการใช้วิธีนี้คือหน้าตัดขององค์อาคารเป็นคอนกรีตทั้งหมด โดยสูตรการคำนวณมาจากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ TASEF-2 ที่มีความซับซ้อน ซึ่งวิธีการหาการกระจายของอุณหภูมิจะต้องแบ่งพื้นที่หน้าตัดเป็นเส้นที่มีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากันทั้งแนวตั้งและแนวนอน เพื่อที่จะสามารถคำนวณหาอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆและอุณหภูมิที่ผิวของหน้าตัดได้

ในปี ค.ศ. 1997 ACI 216.1[17] ได้เสนอข้อมูลการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในภาวะเพลิงไหม้มาตรฐาน ASTM E119 สำหรับคอนกรีตน้ำหนักปกติ (Normal weight concrete) กับน้ำหนักกึ่งมวลเบา (Semi-lightweight concrete) โดยแสดงข้อมูลในรูปแบบของเส้นโค้งอุณหภูมิเสมอ (Isotherm) และเนื่องจากข้อมูลการกระจายของอุณหภูมิพัฒนาจากผลการทดสอบทำให้มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้ในการทำนายการกระจายอุณหภูมิขององค์อาคารในลักษณะอื่น เช่น มีชนิดของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต ขนาดหน้าตัดของคอนกรีต และจำนวนด้านของพื้นที่ผิวสัมผัสความร้อนที่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น

ในปี ค.ศ. 2004 EN 1992-1-2 [13] ได้กำหนดข้อมูลการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กในภาวะเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] สำหรับคอนกรีตมวลรวมเนื้อซิลิกา (Siliceous aggregate -SA) โดยแสดงข้อมูลในรูปแบบของเส้นโค้งอุณหภูมิเสมอ (Isotherm curves) และเนื่องจากข้อมูลการกระจายของอุณหภูมิพัฒนาจากผลการทดสอบทำให้มีข้อเสียคือไม่สามารถใช้กับการทำนายการกระจายอุณหภูมิขององค์อาคารในลักษณะอื่น เช่น มีชนิดของมวลรวมที่ใช้ผสมคอนกรีต ขนาดหน้าตัดของคอนกรีต และจำนวนด้านของพื้นที่ผิวสัมผัสความร้อนที่เปลี่ยนแปลง เป็นต้น

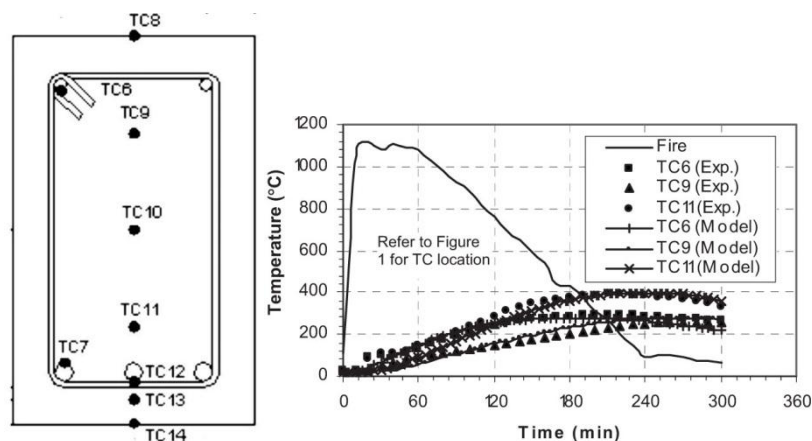
ในปี ค.ศ. 2012 Zandi และคณะ[18] ได้วิเคราะห์การกระจายของอุณหภูมิในหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีที่ต่างกันไป นั่นคือ วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method -FDM) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้น (Non-linear finite element method) และวิธีการทำนายการกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดอย่างง่ายที่ถูกเสนอโดย Wickström[16] โดยไม่พิจารณาเหล็กเสริมในคานเนื่องจากส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในหน้าตัดน้อย และเปรียบเทียบกับข้อมูลการกระจายอุณหภูมิจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] ที่พัฒนาจากการทดสอบ ในการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์จะสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical model) ที่เปลี่ยนไปตามเวลา โดยกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ระบุสถานะเริ่มต้น ขอบเขต ส่วนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นมาจากการพัฒนาจากเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ของ Burnaz และ Durmus [19] และวิธีวิเคราะห์อุณหภูมิที่ถูกเสนอโดย Wickström[16] เป็นวิธีวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิอย่างง่าย ซึ่งทั้ง 3 วิธีใช้สมการส่งผ่านความร้อนแบบ 2 มิติขึ้นกับเวลาและต้องกำหนดเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] เพื่อจำลองการให้ความร้อนแก่องค์อาคารที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ต่างๆ ในสมการ ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดที่เวลาเพลิงไหม้ต่างๆ ของทั้ง 3 วิธีและข้อมูลการกระจายอุณหภูมิจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] พบว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใกล้เคียงกับข้อมูลการกระจายอุณหภูมิจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] มากที่สุด ดังนั้น การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มาจากการ

พัฒนาโดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบไม่เชิงเส้นสามารถใช้ในการคำนวณการกระจายอุณหภูมิของหน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็กในภาวะเพลิงไหม้ได้ ส่วนวิธีอื่นสามารถใช้ได้ในเชิงปฏิบัติเช่นกัน

ในปี ค.ศ. 2013 Kodur และคณะ [20] ได้เสนอแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กในภาวะเพลิงไหม้ โดยรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบและจากการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีผลต่อขนาดหน้าตัด กำลังของคอนกรีต ชนิดของมวลรวม ลักษณะการเผาไหม้ของคอนกรีต เพื่อสร้างข้อมูลด้านอุณหภูมิเพื่อมาวิเคราะห์แบบถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear regression analysis) และพบว่า สมการมีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยวิธี Wickström[16] ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถใช้ในอุณหภูมิเพลิงไหม้มาตรฐานจาก ISO 834[12] และ ASTM E119[21] สามารถใช้ได้กับคอนกรีตปกติ (Normal weight concrete -NC) และคอนกรีตกำลังสูง (High strength concrete -HSC) รวมถึงคอนกรีตมวลรวมเนื้ปูน (Calcareous aggregate -CA) และคอนกรีตมวลรวมเนื้อซิลิกา และในการสู่มทำนายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัดเทียบกับเวลาพบว่าวิธีนี้ให้ผลการทำนายดีกว่าวิธีของ Wickstrom[16] เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของวิธีนี้เข้าใกล้ผลของการทดสอบมากกว่ากราฟที่ถูกลงเสนอโดย Wickström[16]

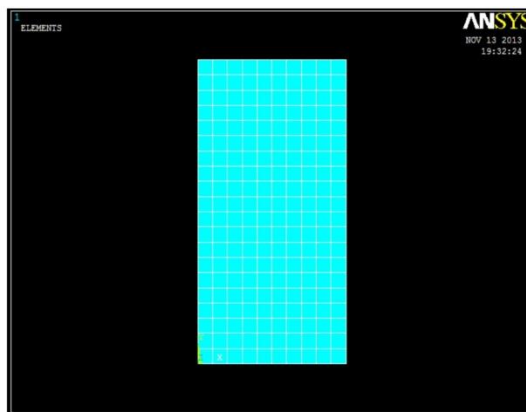
2.1.3 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ

ในปี ค.ศ. 2009 Dwaikat และ Kodur [9] ได้ทำนายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะชั่วครู่แบบไร้เชิงเส้น (Non-linear transient thermal analysis) ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเปรียบเทียบกับผลการวัดอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบความต้านทานไฟของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยมีลักษณะของกราฟไฟในเตาเผาเป็นกราฟออกแบบที่มีช่วงการลดลงของอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิห้องซึ่งแทนช่วงการเย็นตัวของคาน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้คุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal properties) จากมาตรฐาน ASCE 1992[22] ประกอบด้วย การนำความร้อน (Thermal conductivity) และความจุความร้อน (Heat capacity) ที่แปรผันตามอุณหภูมิ จากการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และผลการวัดอุณหภูมิทั้ง 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ตำแหน่งเหล็กเสริมบน (TC6) ตำแหน่งกึ่งกลางคานที่ความลึก 100 มิลลิเมตร (TC9) และ 300 มิลลิเมตร (TC11) พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เลือกใช้มีความเหมาะสมในการทำนายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตดังแสดงในภาพที่ 2.2 และพบว่ากำลังของคอนกรีตไม่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญสำหรับการตอบสนองของอุณหภูมิ (Thermal response) ต่อโครงสร้างคอนกรีต



ภาพที่ 2.2 อุณหภูมิภายในเตาเผาและอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่ตำแหน่งต่างๆที่แปรผันตามเวลาจากการทดสอบและการวิเคราะห์ [9]

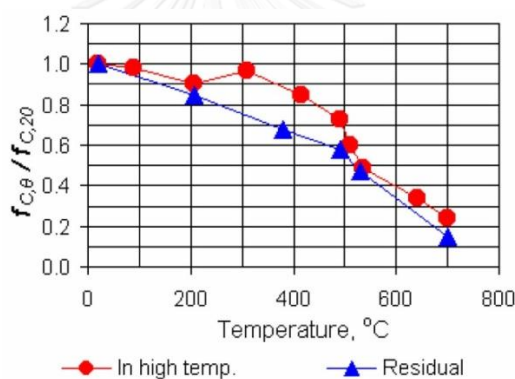
ในปี ค.ศ. 2013 Jacob และคณะ[23] ได้วิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] และเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IS 456:2000 จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ มีขนาด 200x400 ตารางมิลลิเมตร แบ่งเป็นหน้าตัดเล็กๆทั้งหมด 200 เอลิเมนต์ แต่ละเอลิเมนต์ขนาด 20x20 ตารางมิลลิเมตร โดยใช้เอลิเมนต์ชนิด PLANE 55 ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มี 4 จุดต่อ(nodes) และมีระดับชั้นความเสรีคืออุณหภูมิที่แต่ละจุดต่อ กำหนดคุณสมบัติเชิงความร้อนอ้างอิงตามมาตรฐาน IS 456:2000[24] กำหนดการส่งผ่านความร้อนจากไฟสู่เอลิเมนต์ในรูปแบบของการพาความร้อนที่พื้นผิว สำหรับพื้นผิวที่ได้รับความร้อน(ด้านข้างและด้านล่าง)กำหนดให้มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และกำหนดกำหนดให้หน้าตัดคอนกรีตมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้อง 20°C ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากมาตรฐาน IS 456:2000[24]



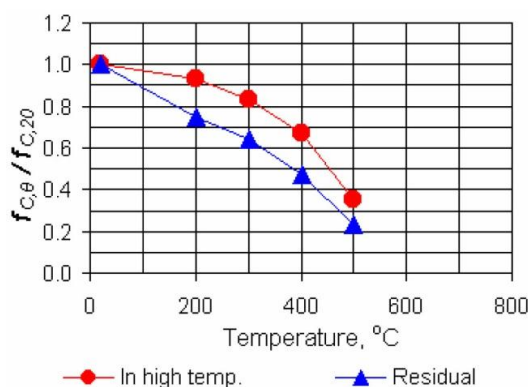
ภาพที่ 2.3 ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [23]

2.2 พฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังจากเผาไฟ

ในปี ค.ศ. 2007 Abramowicz และ Kowalski [8] กล่าวว่า การลดลงของกำลังอัด (Compressive strength) ของคอนกรีตบันทึกไว้ที่อุณหภูมิสูง (In high temperature) แต่เมื่อปล่อยให้คอนกรีตเย็นตัวลงภายหลังจากเผาไฟ (Residual) การลดลงของกำลังอัดยิ่งเพิ่มขึ้น ทำให้กำลังอัดที่เหลืออยู่มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อยู่ในอุณหภูมิสูง เนื่องจากผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตของ Abrams [25] พบว่า กำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงและภายหลังจากเผาไฟมีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญที่อุณหภูมิระหว่าง 200 °C และ 500 °C และเมื่อพิจารณาในช่วงอุณหภูมิที่ทำให้การทดสอบพบว่า กำลังอัดในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงมีค่ามากกว่ากำลังอัดในคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟ ดังภาพที่ 2.4 และผลการทดสอบกำลังอัดในคอนกรีตของ Malhotra [26] พบว่ากำลังอัดในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงและภายหลังจากเย็นตัวลงมีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญในช่วงอุณหภูมิที่ทดสอบคือระหว่าง 20°C ถึง 500°C ดังภาพที่ 2.5



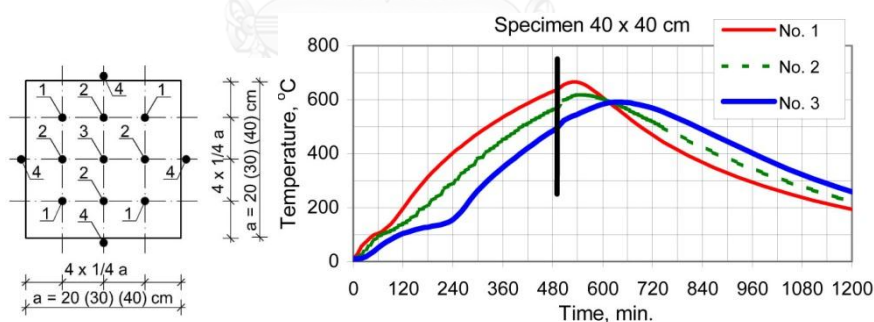
ภาพที่ 2.4 การลดลงของกำลังอัดในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงและภายหลังจากเผาไฟจากการทดสอบของ Abrams [25]



ภาพที่ 2.5 การลดลงของกำลังอัดในคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงและภายหลังจากเผาไฟจากการทดสอบของ Malhotra [26]

Abramowicz และ Kowalski [8] ได้ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า 3 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างคอนกรีตที่ 1 มีความกว้าง 20 เซนติเมตร มีความยาว 20 เซนติเมตร ตัวอย่างคอนกรีตที่ 2 มีความกว้าง 30 เซนติเมตร มีความยาว 30 เซนติเมตร และตัวอย่างคอนกรีตที่ 3 มีความกว้าง 40 เซนติเมตร มีความยาว 40 เซนติเมตร และทุกตัวอย่างคอนกรีตมีความสูง 20 เซนติเมตร โดยด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างคอนกรีตจะหุ้มด้วยแผ่นหินฉนวนกันความร้อนเพื่อให้ความร้อนเข้าเฉพาะด้านข้างของตัวอย่างคอนกรีต และติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ นำตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 3 ตัวอย่างเข้าเตาเผา โดยเพิ่มอุณหภูมิเตาเผาจนกระทั่งมีอุณหภูมิ 800 °C และปล่อยให้เย็นตัวลงจนอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางคอนกรีตมีอุณหภูมิเหลือ 500 °C หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตออกจากเตาเผาแล้วปล่อยให้ตัวอย่างคอนกรีตเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง

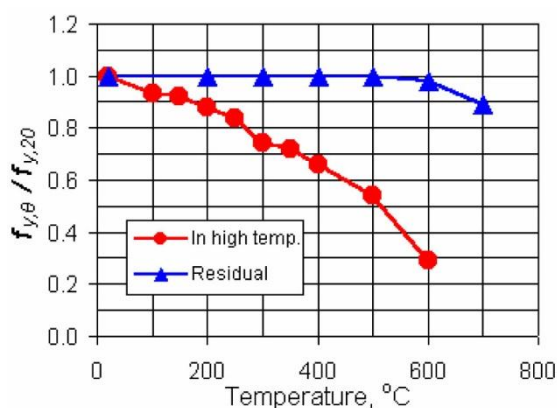
ผลการทดสอบพบว่าภายหลังจากเผาไฟแก่ตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 3 ตัวอย่าง อุณหภูมิภายในตัวอย่างคอนกรีตทั้ง 3 ตำแหน่งยังคงเพิ่มขึ้นประมาณ 100 °C ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กำลังอัดของคอนกรีตยิ่งลดลง และพบว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ยังมีขนาดหน้าตัดใหญ่จะมีอุณหภูมิสูงสุดที่กึ่งกลางหน้าตัดภายหลังจากหยุดเผาไฟที่เวลานานขึ้นซึ่งเป็นผลจากอุณหภูมิความเฉื่อย (Thermal inertia) ของคอนกรีตดังภาพที่ 2.6 โดยจะทำให้อุณหภูมิภายในหน้าตัดเพิ่มขึ้น 3-4 ชั่วโมงหลังหยุดเผาไฟ ทำให้กำลังอัดที่กึ่งกลางหน้าตัดลดลง และช่วงความเสียหายภายนอกที่เกิดจากการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น ดังนั้นโครงสร้างอาจไม่พังทลายระหว่างเพลิงไหม้แต่จะพังทลายภายหลัง



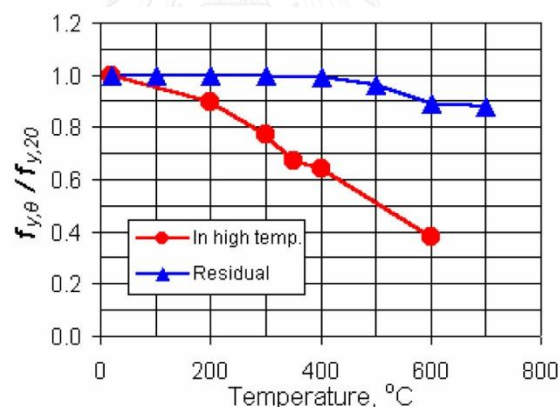
ภาพที่ 2.6 ลักษณะการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิและการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของคอนกรีตที่ตำแหน่งต่างๆ ภายหลังจากหยุดเผาไฟของคอนกรีตขนาด 40x40 เซนติเมตร [8]

สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมภายหลังจากเผาไฟพบว่า เมื่อโครงสร้างเย็นตัวลงพฤติกรรมและคุณสมบัติเชิงกลเหล็กเสริมแตกต่างจากในกรณีของคอนกรีตโดยสิ้นเชิง เนื่องจากเหล็กเสริมเมื่อถูกความร้อนและหลังจากเย็นตัวลงพบว่า สามารถฟื้นฟูคุณสมบัติเชิงกลได้ส่วนใหญ่ จากผลการวิจัยของ Slowanski และคณะ [27] ได้ทดสอบเหล็กเสริมชนิด 34GS และงานวิจัยของ Slowanski และ Zielinski [28] ได้ทดสอบเหล็กเสริมชนิด 18G2 พบว่าการทดสอบทั้ง 2 แบบมีผลการทดสอบคล้ายคลึงกัน คือเมื่อเปรียบเทียบการลดลงของกำลังคราก (Yielding strength) ของ

เหล็กที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟพบว่า ในกรณีที่อุณหภูมิของเหล็กเสริมต่ำกว่า 500°C จะไม่เกิดการลดลงของกำลังครากของเหล็กเสริมภายหลังได้รับความร้อน ส่วนอุณหภูมิระหว่าง 500°C - 700°C จะทำให้เกิดการลดลงของกำลังครากในเหล็กเสริมภายหลังได้รับความร้อนแต่ไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ ดังภาพที่ 2.7 และ 2.8



ภาพที่ 2.7 การลดลงของกำลังครากในเหล็กเสริมขณะที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟสำหรับเหล็กเสริมชนิด 34GS [27]



ภาพที่ 2.8 การลดลงของกำลังครากในเหล็กเสริมขณะที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟสำหรับเหล็กเสริมชนิด 18G2 [28]

ในปี ค.ศ. 2011 Xiaoyong และ Fanjie[29] ได้ทดสอบกำลังอัดและกำลังดึง (Tensile strength) ของคอนกรีตรูปทรงกระบอกภายหลังเผาไฟ ที่อุณหภูมิระหว่าง 100°C ถึง 600°C ด้วยตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดมาตรฐานสูง 300 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ที่มีความกว้าง ความยาวและความสูง 150 มิลลิเมตร โดยใช้คอนกรีตมวลรวมเนื้อซึลิกา วิธีทดสอบคือนำตัวอย่างคอนกรีตติดเครื่องวัดอุณหภูมิเข้าเตาเผาไฟฟ้า แล้วกำหนดให้ตัวอย่างคอนกรีตมีความร้อนเพิ่มขึ้น 5°C ต่อนาที หยุดให้ความร้อน 1 ชั่วโมง แล้ว

ปล่อยให้เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดมาทดสอบกำลังอัด กำลังดึง และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น(Elastic modulus)

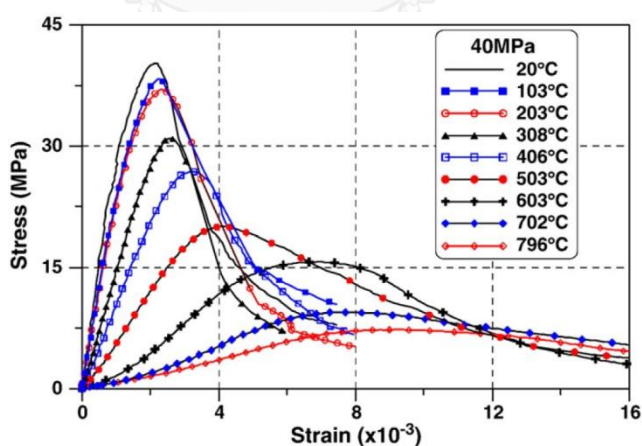
จากการทดสอบพบว่า คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายหลังเผาไฟมีค่าลดลงโดยขึ้นกับ อุณหภูมิ สำหรับอุณหภูมิระหว่าง 20°C - 150°C เกิดการสูญเสียของกำลังเล็กน้อยเนื่องจากเกิดการ ระเหยของน้ำในช่องว่างของคอนกรีตทำให้เพิ่มความพรุนในคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของความพรุนใน คอนกรีตทำให้เกิดการขยายตัวของช่องว่างในคอนกรีตส่งผลให้สภาพการซึมผ่านได้ของคอนกรีต เพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิระหว่าง 150°C - 300°C เกิดการเพิ่มขึ้นเฉพาะของกำลังอัด แต่กำลังดึงและ โมดูลัสยืดหยุ่นยังคงลดลงเหมือนกับที่สังเกตได้ในอุณหภูมิช่วงแรกเนื่องจากน้ำในคอนกรีตถูกจำกัดทำ ให้เกิดการสูญเสียมวลของคอนกรีต การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดจะเกิดจากการปรับปรุงคุณสมบัติเชิง พันธะระหว่างซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300°C คุณสมบัติเชิงกลของ คอนกรีตภายหลังเผาไฟจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเมื่ออุณหภูมิของตัวอย่างคอนกรีตถึง 600°C คุณสมบัติเชิงกลจะมีค่าน้อยมาก ซึ่งการลดลงของคุณสมบัติเชิงกลจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติทาง กายภาพ สรุปผลจากข้อมูลการทดสอบพบว่ากำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับ กำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง กำลังอัดภายหลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิ 200°C - 300°C มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่ประมาณ 400°C

ในปี ค.ศ. 2006 Chang และคณะ[30] ได้เสนอแบบจำลองทำนายความสัมพันธ์ของ คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตมวลรวมเนื้อซิลิกาภายหลังเผาไฟ(ได้รับความร้อนและเย็นตัวลงจนถึง อุณหภูมิห้อง) ที่แปรผันตามอุณหภูมิด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของการทดสอบคอนกรีตรูป ทรงกระบอก โดยการนำไปเผาไฟเพื่อให้ได้รับความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นตัวลง โดยมีค่าพารามิเตอร์ ที่เกี่ยวข้อง เช่น กำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้น สูงสุดภายหลังเผาไฟ โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น และความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ

จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ พบว่ากำลังอัดลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200°C จะมีอัตราการลดลงน้อย ส่วนอัตราการลดลงของกำลัง อัดจะเพิ่มขึ้นช่วงที่อุณหภูมิมากกว่า 200°C อาจเกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน(Dehydration) ของไฮ เดรทซีเมนต์เพสต์ (Hydrated cement paste) ในช่วงอุณหภูมิ 105°C - 850°C และการ เปลี่ยนแปลงของการเกิดผลึกจากแอลฟาควอตซ์ (α -quartz) เป็นบีตาควอตซ์(β -quartz) และค่า กำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่อุณหภูมิ ต่างๆ

จากการทดสอบพบว่าความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุด ภายหลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิต่ำกว่า $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ไม่มีอิทธิพลของความร้อนต่อความเครียด โดยความเครียดจะมีค่าเพิ่มขึ้นรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C} - 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ และพบว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องมีผลต่อความเครียดนี้ โดยกำลังอัดที่อุณหภูมิห้องที่น้อยลงจะทำให้ค่าความเครียดมากขึ้น ส่วนโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินการเปลี่ยนรูปของคอนกรีตที่ได้รับเสียหายจากไฟ พบว่าจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกันการลดลงของโมดูลัสยืดหยุ่นมีค่ามากกว่าการลดลงของกำลังอัด และกำลังอัดของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องไม่ส่งผลต่อโมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิต่างๆ

ภาพที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟจากการทดสอบพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นโมดูลัสยืดหยุ่นสัมผัสเริ่มต้น (Initial tangent elastic modulus) และโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant modulus) ที่ค่าความเค้นสูงสุดจะมีค่าลดลงและเป็นเส้นตรงมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ โมดูลัสยืดหยุ่นสัมผัสเริ่มต้นอาจมีค่าน้อยกว่าโมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ โดยกราฟจะเป็นลักษณะโค้งคว่ำตั้งแต่จุดเริ่มต้นการให้น้ำหนักกดลงแก่คอนกรีตจนถึงตำแหน่งที่เริ่มมีรอยแตกซึ่งเป็นผลจากการให้ความร้อนและเย็นตัวลง ทำให้พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่ไม่ได้รับความร้อนมีลักษณะแตกต่างกับกราฟที่ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

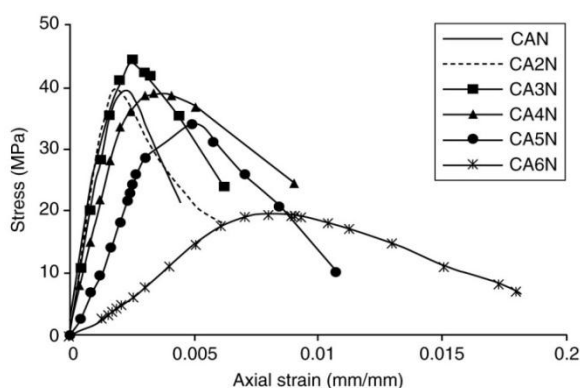


ภาพที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีกำลังอัด 40 เมกะปาสกาล ภายหลังจากได้รับความร้อนจากการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ [30]

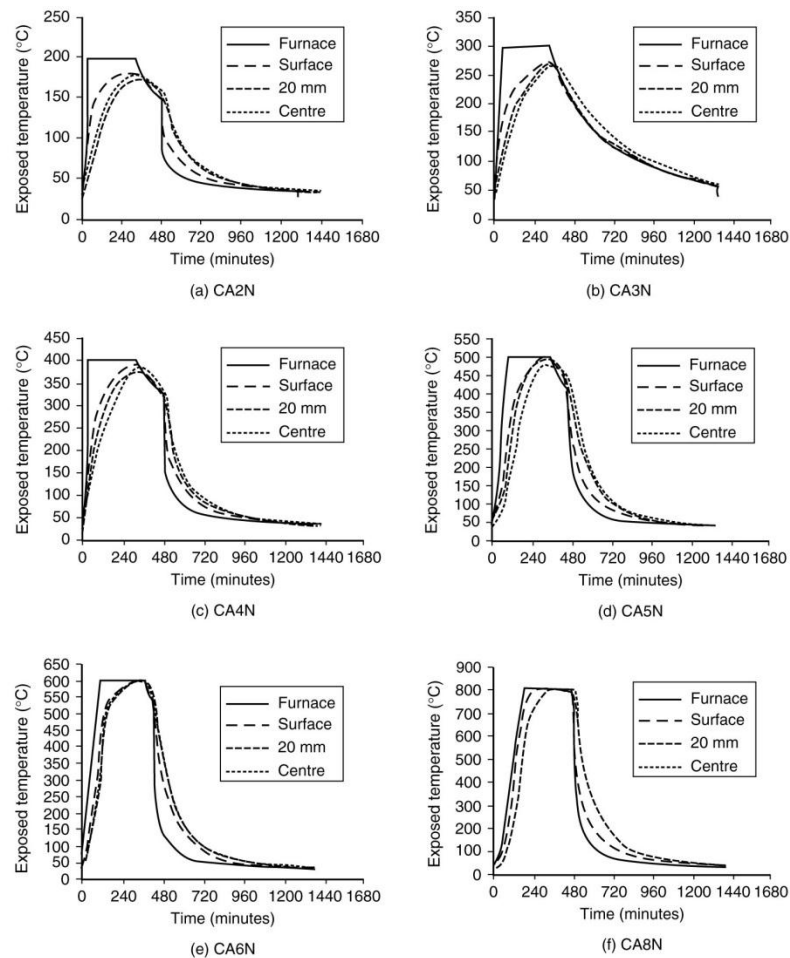
จากการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟที่อุณหภูมิต่างๆจากสมการที่เสนอและจากการทดสอบพบว่า สมการที่เสนอสามารถนำมาใช้หา

ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟได้สอดคล้องกับผลการทดสอบ และสมการนี้ยังสามารถใช้หาความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง

ในปี ค.ศ. 2012 Shama และคณะ [31] ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีต(ไม่ระบุชนิดของมวลรวม) ภายหลังเผาไฟ (ได้รับความร้อนและเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้อง) จากการทดสอบคอนกรีตหน้าเรียบที่ไม่มีผลการโอบรัด(Unconfined plain concrete) และคอนกรีตผสมไฟเบอร์(Fibrous concrete) ภายใต้อัดในแนวแกน โดยมีพารามิเตอร์ที่ศึกษาได้แก่ กำลังของคอนกรีต ปริมาตรของเศษไฟเบอร์ชนิดเหล็ก(Steel fibres) ไฟเบอร์ชนิดโพลีโพรพิลีน(Polypropylene fibres) และไฮบริดไฟเบอร์(Hybrid fibres) และอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา เมื่อพิจารณาเฉพาะคอนกรีตหน้าเรียบที่ไม่มีผลการโอบรัดชนิดกำลังปรกติจากการนำคอนกรีตไปเผาไฟที่อุณหภูมิ 200°C(CA2N) 300°C(CA3N) 400°C(CA4N) 500°C(CA5N) 600°C(CA6N) และ 800°C(CA8N) เป็นระยะเวลา 4.5 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสภาวะคงตัวของอุณหภูมิ (Thermal steady state) นั่นคือควบคุมอุณหภูมิภายในหน้าตัดให้มีค่าเท่ากันดังภาพที่ 2.11 ที่มีอุณหภูมิภายในหน้าตัดใกล้เคียงกันตามอุณหภูมิของเตาเผาที่กำหนดไว้ แต่จะสังเกตได้ว่าต้องเผา คอนกรีตถึงอุณหภูมิ 400°C อุณหภูมิภายในหน้าตัดถึงมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเตาเผา โดยมีคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องเป็นการทดสอบควบคุม(CAN) ภายหลังจากคอนกรีตเย็นตัวลงนำไปทดสอบรับแรงกด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟดังภาพที่ 2.10 จากการรวบรวมข้อมูลการทดสอบสามารถนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายความสัมพันธ์ได้ สรุปผลการศึกษาดังนี้ กำลังอัดของคอนกรีตกำลังปรกติจะไม่ลดลงเมื่อคอนกรีตมีอุณหภูมิต่ำกว่า 400°C และแบบจำลองที่นำเสนอสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟได้เนื่องจากมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ

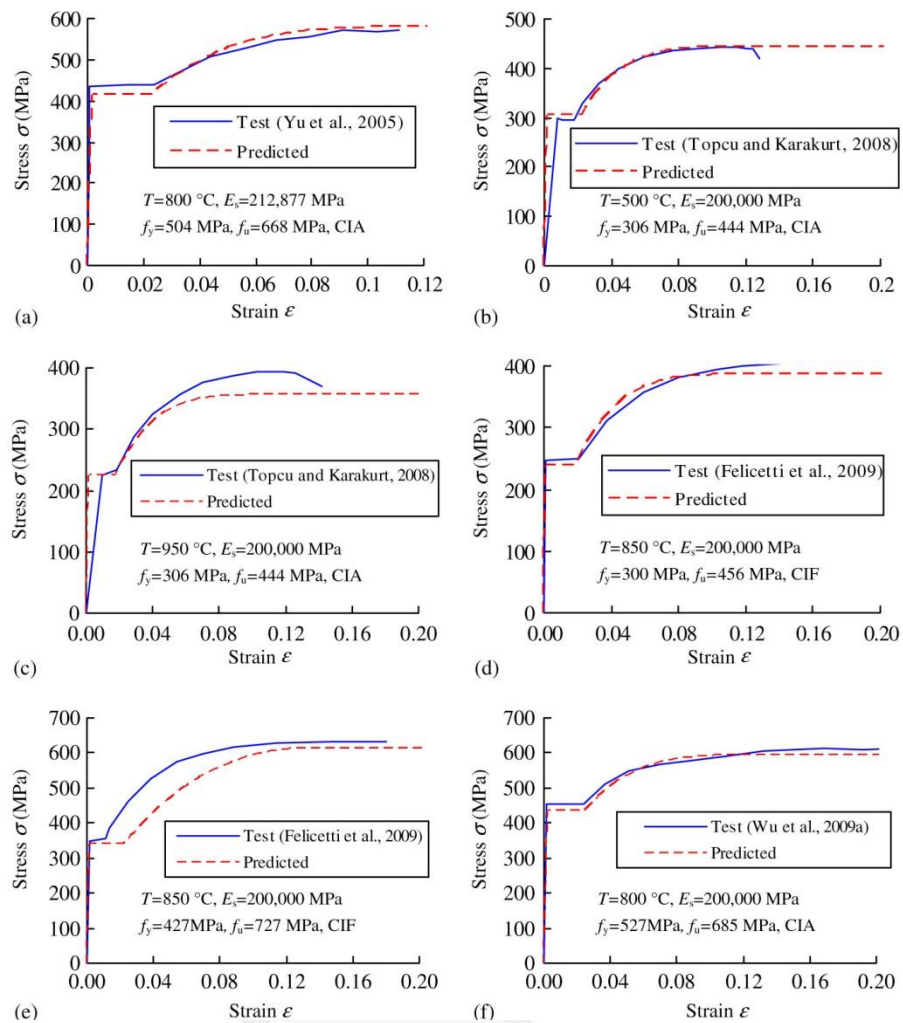


ภาพที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังได้รับความร้อนจากการทดสอบที่อุณหภูมิต่างๆ [31]



ภาพที่ 2.11 อุณหภูมิภายในหน้าตัดทรงกระบอกคอนกรีตที่แปรผันตามเวลาจากการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาให้มีค่าคงที่ตามที่กำหนดไว้ [31]

ในปี ค.ศ. 2013 Tao และคณะ [32] ได้เสนอแบบจำลองทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กโครงสร้างและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟจากการวิเคราะห์การถดถอย โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กโครงสร้างและเหล็กเสริมเป็น 4 ช่วงระยะเวลาคือ ช่วงที่เหล็กมีคุณสมบัติเป็นอลาสติก (Elastic stage) ช่วงที่เหล็กมีคุณสมบัติเป็นพลาสติก (Plastic stage) ช่วงที่เหล็กยืดออกเนื่องจากความแข็ง (Strain hardening stage) และช่วงที่เหล็กวิบัติ (Failure stage) ซึ่งใกล้เคียงกับแบบจำลองที่อุณหภูมิปรกติ และเมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์บางชนิด มาเปรียบเทียบกับ การทดสอบเพื่อยืนยันในความถูกต้องของแบบจำลองดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองและการทดสอบ [32]

จากการทดสอบกำลังครากและกำลังประลัยของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำกว่า $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความร้อนจะไม่ส่งผลกระทบต่อกำลังครากและกำลังประลัยของเหล็กเสริม แต่เมื่อเผาต่อไปพบว่ากำลังครากและกำลังประลัยลดลงเรื่อยๆ โดยที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ เหล็กเสริมจะสูญเสียกำลังคราก 30% และสูญเสียกำลังประลัย 24% และเมื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยพบว่าที่อุณหภูมิต่ำกว่า $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ สมการจะให้กำลังครากและกำลังประลัยของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟเท่ากับค่าที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเป็นสมการเชิงเส้นที่ให้กำลังครากและกำลังประลัยของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น และพบว่ากำลังประลัยมีความสัมพันธ์กับกำลังครากของเหล็กเสริมที่อุณหภูมิห้อง ส่วนการทดสอบโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟพบว่า ที่อุณหภูมิมากกว่า $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ กราฟจะมีลักษณะลาดลงเล็กน้อยแบบเชิงเส้น โดยที่อุณหภูมิ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ พบว่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟลดลง 6.5 % ของที่

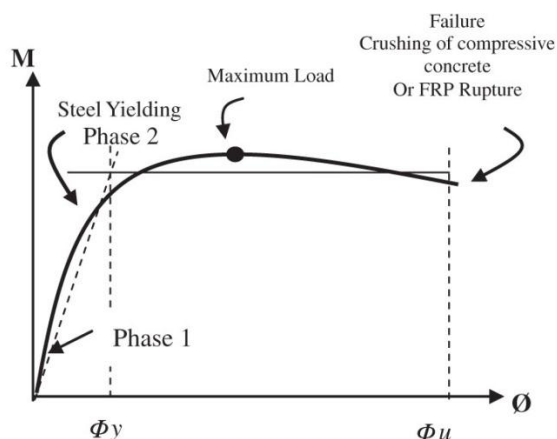
อุณหภูมิห้อง(สมมติให้โมดูลัสยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้องมีค่า 200,000 เมกะปาสกาล ถ้าเกิดไม่มีการวัดตรวจสอบ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟของการทดสอบจากภาพที่ 2.12 พบว่า อัตราส่วนของโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งแรงด้วยความเครียดกับโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟอยู่ในช่วง 0.01-0.05 เลยจึงกำหนดให้โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งแรงด้วยความเครียดเป็น 0.03 เท่าของโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ

และยังพบว่า ความเครียดที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งแรงด้วยความเครียดกับความเครียดประลัยของเหล็กเสริมสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟเมื่อทราบค่ากำลังครากและกำลังประลัยของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ โดยไม่พบอัตราส่วนของความเครียดที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งแรงด้วยความเครียดกับความเครียดที่เกิดจากการครากของเหล็กเสริมแปรผันตามอุณหภูมิ แต่พบว่ามีค่าแปรผันต่อกำลังครากของเหล็กเสริมโดยอัตราส่วนดังกล่าวจะมีค่าลดลงเมื่อกำลังครากของเหล็กเสริมสูงขึ้น

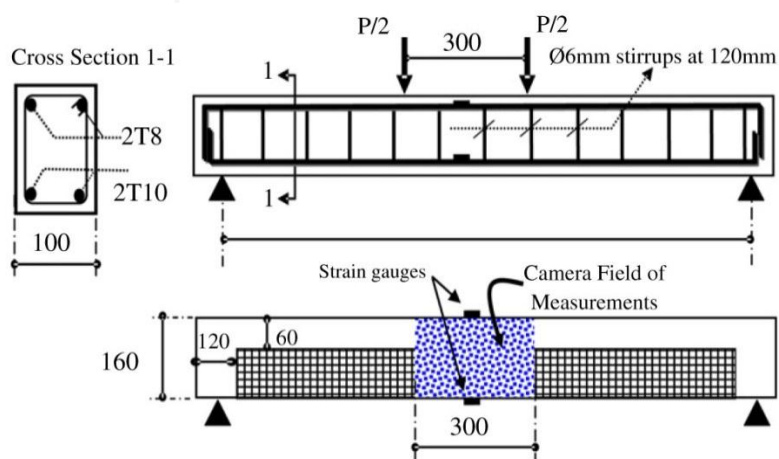
2.3 การเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ในปี ค.ศ. 2012 Attari และคณะ [33] ได้ทดสอบการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย 3 ชนิดด้วยมาตรฐาน NF T57-101 เทียบเท่ากับมาตรฐาน ASTM D638 คือ แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน(Carbon fibre reinforced polymer-CFRP) แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว(Glass fibre reinforced polymer-GFRP) และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสม(เส้นใยแก้วรวมกับเส้นใยคาร์บอน) เนื่องจากพบว่าการใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยทั้ง 2 ชนิดร่วมกันเสริมกำลังจะทำให้คุณสมบัติของการเสริมกำลังดีขึ้น เช่น คุณสมบัติด้านความเหนียวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วและคุณสมบัติด้านกำลังของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กทั้งหมด 7 ตัวอย่าง (ซึ่งมีคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนรูปตัวยู (U-shape) และเสริมเส้นใยแบบผสมไม่เป็นรูปตัวยู และคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง) นำผลการทดสอบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ทั้ง 3 ชนิดมาเปรียบเทียบในด้านกำลัง ความแข็งแรง ความเหนียว และลักษณะการวิบัติ แล้วนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายลักษณะการวิบัติเมื่อเสริมกำลังและแสดงพฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อเสริมกำลังภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากวิธีวิเคราะห์หน้าตัด โดยทั่วไปพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะมีลักษณะดังภาพที่ 2.13

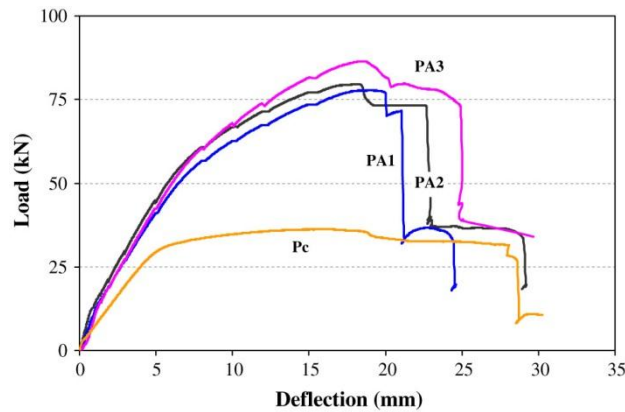


ภาพที่ 2.13 พฤติกรรมคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [33]

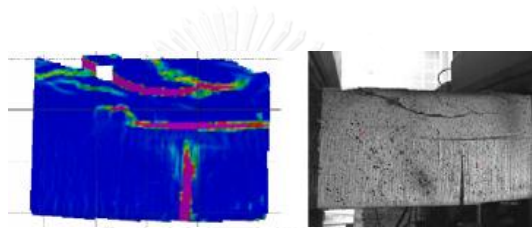
ภายหลังเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนำคานคอนกรีตเสริมเหล็กไปทดสอบการดัดภายใต้แรงกระทำสี่จุด (Four-point bending test) ดังภาพที่ 2.14 จนกระทั่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กวิบัติ เมื่อพิจารณาผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (PA1) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวดังภาพที่ 2.15 พบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถรับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้น 114% เมื่อเปรียบเทียบกับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ไม่ได้เสริมกำลัง (P_c) ระยะการโก่งตัวตำแหน่งกึ่งกลางคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพิ่มขึ้น 8 % โดยมีลักษณะวิบัติแบบการแตกละเอียดของคอนกรีตด้านรับแรงอัด (Concrete crushing) และตามมาด้วยการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (FRP rupture) ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.14 ลักษณะของหน้าตัดคานที่ถูกเสริมกำลังคานและการทดสอบการดัดภายใต้แรงกระทำสี่จุด [33]

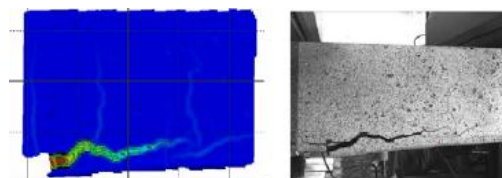


ภาพที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่กระทำกับระยะแอ่นตัวที่กึ่งกลางคาน [33]



ภาพที่ 2.16 ลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนชนิดเส้นไฟเบอร์ทิศทางเดียวเป็นรูปตัวยู 2 ชั้น [33]

ภาพที่ 2.17 แสดงการวิบัติแบบฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมจะเกิดการหลุดล่อนมาพร้อมกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และเกิดรอยร้าวที่ตำแหน่งกึ่งกลางคานในตำแหน่งที่รับโมเมนต์สูงสุดกรณีเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบไม่เป็นรูปตัวยู ทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กเกิดการวิบัติอย่างรวดเร็วและส่งผลให้สามารถรับน้ำหนักที่กระทำได้น้อยลง และจากการทดสอบพบว่า การเสริมกำลังคานคอนกรีตในลักษณะรูปตัวยูให้ผลดีที่สุด ซึ่งจะช่วยพัฒนากำลังรับแรงดัดและกระจายแรงภายในส่งผ่านการเปลี่ยนรูปของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 2.17 การวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยผสมชนิดเส้นไฟเบอร์สองทิศทางไม่เป็นรูปตัวยู [33]

2.4 พฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ

ในปี ค.ศ. 2001 ทรงเกียรติ [2] ได้ศึกษากำลั้งอัดของทรงกระบอกคอนกรีต (Concrete cylinder) ภายหลังเผาไฟ พฤติกรรมการรับแรงดึงของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ ค่ากำลั้งยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมหลังภายหลังเผาไฟ ความเหมาะสมในกระประเมินความเสียหายของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกเผาไฟของการทดสอบไม่ทำลาย และพฤติกรรมการรับแรงเฉือนและแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ ได้ทดสอบการดัดภายใต้แรงกระทำสี่จุดทั้งหมด 5 ตัวอย่าง ภายหลังจากเผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ASTM E119 ที่ระยะเวลา 30 นาที 60 นาที 90 นาที 120 นาที และคานที่อุณหภูมิห้อง

จากผลการทดสอบและการวิเคราะห์พฤติกรรมการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กพบว่า ผลการทดสอบโมเมนต์คราก (Yield moment) และโมเมนต์ประลัย (Ultimate moment) ของคานตัวอย่างที่ศึกษาจะมีค่าเท่าเดิมเมื่อเผาคานที่ระยะเวลาไม่เกิน 60 นาที แต่จะทำให้มีค่าลดลง 16% และ 15% เมื่อเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาที และไม่สามารถหาค่าได้เมื่อเผาไฟที่ระยะเวลา 120 นาที เนื่องจากคานตัวอย่างที่ศึกษาเสียหายจนไม่สามารถทดสอบได้ ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีความเครียดสอดคล้อง (Strain compatibility) ของคานตัวอย่างภายหลังเผาไฟพบว่าให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ทั้งนี้ความใกล้เคียงขึ้นอยู่กับการประเมินค่ากำลั้งดึงที่หลงเหลือหลังการเผาไฟของเหล็กเสริม

ในปี ค.ศ. 2003 Kumar และ Kumar [1] ได้ทดสอบพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวที่มีฐานรองรับอย่างง่าย (Simple supported RC beams) ที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 1 ชั่วโมง 1.5 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง โดยรายละเอียดการทดสอบและผลการทดสอบอ้างอิงจาก Ozbolt และคณะ [7] การทดสอบจะแบ่งเป็น 4 รูปแบบคือ ทดสอบพฤติกรรมการดัดคานที่อุณหภูมิห้องเพื่อเป็นการทดสอบควบคุมและทดสอบพฤติกรรมการดัดของคานภายหลังเผาไฟ ซึ่งในการเผาไฟจะควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาให้เป็นดังกราฟเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 [12] ที่เวลาเผาไฟ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที เผา 3 ด้าน โดยผิวของคานด้านบนไม่ได้รับความร้อน ภายหลังจากคานเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องจะทดสอบการดัดภายใต้แรงกระทำสี่จุดจนกระทั่งคานวิบัติ ผลการทดสอบจะอยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิห้อง, ภายหลังเผาไฟ 1 ชั่วโมง และภายหลังเผาไฟ 1.5 ชั่วโมง พบว่ามีแรงกระทำสูงสุด 168, 142 และ 121 กิโลนิวตันตามลำดับ ส่วนภายหลังเผาไฟ 2 ชั่วโมงไม่สามารถทดสอบได้

ในปี ค.ศ. 2008 Hsu และ Lin [5] ได้ศึกษาผลกระทบของไฟที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลภายหลังเผาไฟและพฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากการวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิและโครงสร้างร่วมกันสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิจะใช้วิธีไฟในตัดไฟเพอเรนซีในการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนของไฟเข้าสู่คานคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อสร้างแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัด ส่วนการวิเคราะห์โครงสร้างใช้วิธี Lumped system (การส่งผ่านความร้อนที่สนใจเฉพาะอุณหภูมิที่แปรผันเชิงเส้นตามเวลา โดยอุณหภูมิและคุณสมบัติเชิงกลสมมติว่าอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของแต่ละหน่วยหน้าตัดคอนกรีต) เพื่อวิเคราะห์โมเมนต์ดัดสูงสุด กำลังเฉือน และโมดูลัสยืดหยุ่นภายหลังจากเผาไฟ โดยเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบของ Moetaz [34] และ Ho [35] ในการวิเคราะห์โมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กอ้างอิงมาตรฐาน ACI 318-R-02[36] โดยพิจารณาที่สถานะสมดุลเมื่อใช้วิธีกำลัง (Strength design method) ซึ่งแรงอัดในคอนกรีตและแรงดึงในเหล็กเสริมจะใช้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่อุณหภูมิสูงจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] ซึ่งจะคำนวณหากำลังอัดของคอนกรีตได้จากอุณหภูมิและความเครียด

Moetaz [34] ได้ทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิด B0(คานควบคุม),B1,B2 และ B3เผาไฟจนเตาเผามีอุณหภูมิ 650 °C แล้วนำคานออกจากเตาเผาที่เวลา 30 ,60 และ 120 นาทีตามลำดับ ภายหลังจากเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องได้ทดสอบการวิบัติของคานโดยวิธีการทดสอบรับแรงดัดแบบ 4 จุดจนวิบัติ เมื่อเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่ได้จากการวิเคราะห์และจากการทดสอบพบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็ก B3 (ระยะเวลาเผาไฟ 120 นาที) มีโมเมนต์ดัดสูงสุดจากการทดสอบน้อยกว่าการวิเคราะห์ ซึ่งอาจจะบ่งชี้ว่าความเสียหายที่เกิดจากไฟเป็นระยะเวลานานอาจทำให้โครงสร้างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กได้ถูกทำลาย ซึ่งแบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์ควรจะให้ผลเชิงอนุรักษ์ในกรณีนี้

Ho [35] ได้ทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็ก (N3B2,B3B2 และ D3B2) โดยคานทั้งหมดเผาด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ASTM E119 มีระยะเวลาในการเผา 0,2.5 และ 3.5 ชั่วโมง ตามลำดับ และควบคุมให้มีการส่งผ่านความร้อนทั้งหมด 3 ด้าน ซึ่งด้านบนของคานถูกทำให้เป็นฉนวน ภายหลังจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กเย็นตัวลงภายหลังเผานำไปทดสอบโดยวิธีการทดสอบรับแรงดัดแบบ 4 จุดจนวิบัติ เมื่อเปรียบเทียบโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่ได้จากการวิเคราะห์และจากการทดสอบพบว่า โมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากการวิเคราะห์มีค่าน้อยกว่าผลโมเมนต์ดัดสูงสุดจากการทดสอบเล็กน้อย ซึ่งหมายถึงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้ผลการวิเคราะห์เชิงอนุรักษ์ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมในการศึกษา

ในปี ค.ศ. 2010 Kodur และคณะ[37] ได้เสนอวิธีการประเมินกำลังของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเพลิงไหม้ โดยมี 4 ขั้นตอนคือ 1.การประมาณอุณหภูมิสูงสุดของเพลิงไหม้ ระยะเวลา

เพลิงไหม้ โดยพิจารณาจากนักผจญเพลิง การสำรวจลักษณะคอนกรีต สีของคอนกรีต อื่นๆ 2. การประมาณอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมจากสมการที่ได้เสนอ ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะเวลาการให้ความร้อน ระยะเวลาการเย็นตัวลง ความกว้างของหน้าตัด ความสูงของหน้าตัด และระยะจากจุดศูนย์กลางเหล็กเสริมถึงระยะที่ใกล้สุด 3. การประมาณกำลังของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟจากความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเหล็กเสริมและอุณหภูมิ 4. จำนวนโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟโดยประยุกต์ใช้ ACI 318 (ACI,2008) ซึ่งเป็นสมการที่อุณหภูมิห้องโดยพิจารณาผลของการลดลงของกำลังในเหล็กเสริมและการลดลงของหน้าตัดคอนกรีต โดยเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลการทดสอบในอดีต ผลการศึกษาพบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟยังสามารถรับโมเมนต์ดัดสูงสุดได้ส่วนใหญ่ในกรณีที่เหล็กเสริมในคานมีอุณหภูมิต่ำกว่า 500 °C โดยอุณหภูมิเหล็กเสริมเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ. 2014 Ozbolt และคณะ[7] ได้วิเคราะห์พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยจำลองการเผาไฟ 3 ด้านด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 ที่ระยะเวลาเผาไฟ 1 ชั่วโมง 1.5 ชั่วโมง และ 2 ชั่วโมง แล้วเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องภายหลังเผาไฟ 2 ชั่วโมง และวิเคราะห์การทดสอบการดัดภายใต้แรงกระทำสี่จุด โดยมีคานที่อุณหภูมิห้องเป็นคาบควบคุม สำหรับคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตใช้แบบจำลองชนิด Microplane ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิ ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองจะประกอบด้วย การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดคานที่เวลาเผาไฟต่างๆ ลักษณะของรอยร้าวที่เวลาเผาไฟต่างๆ (Crack pattern) ความแข็งแรงแรง (Stiffness) รูปแบบการวิบัติ (Failure mode) และกราฟระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ซึ่งจะเปรียบเทียบความถูกต้องกับการทดสอบของ Kumar และ Kumar[1] ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติสามารถทำนายพฤติกรรมของคานคอนกรีตภายหลังเผาไฟได้ดี ได้แก่ การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่มีความสอดคล้องกับผลการศึกษาในอดีต กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความโค้ง ลักษณะรอยแยกและลักษณะการวิบัติที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ รวมถึงพบว่าการเย็นตัวของคอนกรีตจนถึงอุณหภูมิห้องทำให้เกิดความเสียหายต่อคานคอนกรีตเพิ่มมากขึ้นจากผลของความเครียดที่เกิดจากอุณหภูมิ (Thermally induced strains)

ในปี ค.ศ. 2014 Lakhani และคณะ[6] ได้เสนอวิธีอย่างง่ายในการประเมินพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว โดยพิจารณาความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิสูงและภายหลังการเย็นตัว โดยมี 3 ขั้นตอนคือ 1. การวิเคราะห์อุณหภูมิเพื่อประมาณการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่ระยะเวลาเผาไฟต่างๆ 2. การวิเคราะห์โมเมนต์-ความโค้งโดยการประมาณความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดที่มีการ

กระจายอุณหภูมิสูงสุด แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีหน้าตัดโดยความแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงและภายหลังเผาไฟจะแตกต่างกันที่คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริม จึงควรเลือกให้ให้เหมาะสม 3. การวิเคราะห์โดยการให้แรงกระทำ (Pushover analysis) จากการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติด้วยลักษณะของหน้าตัดที่กำหนดจากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง ผลการวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว และตรวจสอบความถูกต้องจากแบบจำลองของ Kumar และ Kumar[1] ผลการวิเคราะห์พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงมีค่าต่ำกว่าการวิเคราะห์ภายหลังเผาไฟ และกราฟจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อวิเคราะห์ที่อุณหภูมิสูงที่เวลาเผาไฟมากกว่า 1 ชั่วโมง

2.5 พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่ซ่อมแซมหรือเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ในปี ค.ศ. 2007 Haddad และคณะ [4] ได้ศึกษาการซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็กกำลังสูงที่มีความกว้างมากกว่าความลึกของคาน(Shallow beams) ภายหลังได้รับความเสียหายจากไฟอุณหภูมิ 600 °C เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมงแล้วเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง ซ่อมแซมด้วยวัสดุประกอบชั้นสูงหลายชนิดรวมถึงแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว แล้วนำมาทดสอบการตัดภายใต้แรงกระทำที่จุดประกอบด้วย 3 ส่วนคือ การทดสอบคานที่อุณหภูมิห้อง การทดสอบคานภายหลังเผาไฟ และการทดสอบคานภายหลังเผาไฟที่ได้ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว ซึ่งผลการทดสอบจะอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก จากการทดสอบพบว่าคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟรับแรงกระทำสูงสุดลดลงเหลือ 71.4% ของคานที่อุณหภูมิห้อง แต่เมื่อซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วสามารถรับแรงกระทำสูงสุดได้ 126.5% ของคานที่อุณหภูมิห้อง เพราะฉะนั้นการซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็กกำลังสูงภายหลังเผาไฟด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้วจะทำให้คานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถกลับมารับน้ำหนักได้เพิ่มขึ้นกว่าคานที่อุณหภูมิห้อง

ในปี ค.ศ. 2013 Kai และ Guo-hui [38] ได้สร้างสมการเพื่อคำนวณโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟแล้วเสริมกำลังรับแรงดัดด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนโดยใช้วิธีวิเคราะห์หน้าตัดและเปรียบเทียบกับโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบ ซึ่งมีขั้นตอนการเสริมกำลังดังนี้ นำส่วนของผิวคอนกรีตด้านนอกที่มีอุณหภูมิเกิน 600 °C ออกไปเพราะเป็นส่วนที่เสียหายจากไฟ ติดวัสดุประสาน เพื่อเป็นตัวกลางในการยึดเนื้อคอนกรีตกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน แล้วติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเพื่อเสริมกำลัง โดยมาตรฐาน

ACI 440. 2R-02 [39] ได้กำหนดการวิบัติของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ได้แก่ การแตกละเอียดของคอนกรีตด้านรับแรงอัดก่อนเหล็กเสริมถึงจุดคราก เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากแล้วแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยฉีกขาด เหล็กเสริมรับแรงดึงถึงจุดครากแล้วเกิดการแตกละเอียดของคอนกรีตด้านรับแรงอัด การหลุดล่อนของคอนกรีตหุ้มด้านรับแรงดึง และเกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย แต่ สำหรับการวิบัติแบบคัต(Flexural failure) ของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีการวิบัติ 2 รูปแบบได้แก่การฉีกขาดด้านรับแรงดึงของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนหรือการแตกละเอียดของคอนกรีตด้านรับแรงอัด ซึ่งคล้ายคลึงกับลักษณะการวิบัติของคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยทั่วไป แต่มีความแตกต่างเล็กน้อยจากความเปราะบางของการยึดเหนี่ยวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยปรกติการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะเกิดขึ้นภายหลังการครากของเหล็กเสริมรับแรงดึง แต่การครากของเหล็กเสริมอาจจะไม่เกิดขึ้นถ้าเหล็กเสริมรับแรงดึงอยู่ห่างจากผิวคอนกรีตด้านรับแรงดึง

จากการศึกษาการเสริมกำลังคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสียหายจากไฟด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่า อาจเกิดการหลุดล่อนของคอนกรีตหุ้มและการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยได้ง่ายขึ้น จึงใช้ความเครียดประสิทธิผลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่จุดหน้าตัดวิบัติที่เป็น 45 เปอร์เซ็นต์ของความเครียดสูงสุดที่เกิดการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และเมื่อเปรียบเทียบผลของโมเมนต์ดัดสูงสุดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟจากสมการคำนวณและจากการทดสอบ พบว่าผลของโมเมนต์ดัดสูงสุดที่เกิดจากการสามารถทำนายค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ออกแบบ

ในปี ค.ศ. 2013 ไกรวุฒิ [3] ได้ศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับ ความเสียหายจากการเผาไฟที่ทดสอบตามมาตรฐาน ISO 834[12] ภายหลังเผาไฟและซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน แล้วทดสอบการดัดภายใต้น้ำหนักบรรทุกทุกแบบสี่จุดจนวิบัติ คานทดสอบทั้งหมดมีขนาดหน้าตัด 15×30 เซนติเมตร มีความยาวระหว่างฐานรองรับของคาน 1.8 เมตร การทดสอบคานแบ่งเป็น 2 ชุด ชุดทดสอบแรกทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 10 ตัวอย่าง โดยคานถูกเผาไฟ 4 ด้าน ได้แก่ คานทดสอบที่อุณหภูมิห้อง(คานควบคุม) และภายหลังเผาไฟ 60 นาที 90 นาที 120 นาที คานทดสอบที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ 60 นาที 90 นาที 120 นาทีที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน คานทดสอบภายหลังเผาไฟ 120 นาทีเย็นตัวลงด้วยวิธีฉีบน้ำ และคานทดสอบภายหลังเผาไฟ 120 นาทีเย็นตัวลงด้วยวิธีฉีบน้ำซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ผลทดสอบพบว่าเกิดการวิบัติจากการเฉือน โดยที่คานทดสอบที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที มีการวิบัติจากการดัดร่วมด้วย ส่วนการทดสอบชุดที่ 2 ทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 5 ตัวอย่างโดยคานถูกเผาไฟ 3 ด้าน ได้แก่ คานทดสอบที่อุณหภูมิห้อง คานทดสอบภายหลัง

เผาไฟ 90 นาที คานทดสอบภายหลังเผาไฟ 90 นาทีที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน คานทดสอบภายหลังเผาไฟ 120 นาที และคานทดสอบภายหลังเผาไฟ 120 นาทีที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยผลการทดสอบอยู่ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ตัววัดอุณหภูมิถูกติดตั้งที่เหล็กเสริมและกึ่งกลางของหน้าตัดคานคอนกรีต ที่บริเวณกึ่งกลางด้านยาวของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก และมีขั้นตอนการซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคือ เตรียมผิวคอนกรีตบริเวณที่จะติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งถ้ามีการหลุดล่อนของผิวคอนกรีตจะต้องซ่อมแซมด้วยมอร์ตาร์และบ่มมอร์ตาร์เป็นระยะเวลา 7 วัน และตรวจสอบการยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมกับคอนกรีตด้วยวิธีการดึง (Pull out test) หลังจากนั้นทาอีพ็อกซีเรซิน(Epoxy resin)เป็นวัสดุเชื่อมประสานกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและบ่มอีพ็อกซีเป็นระยะเวลา 7 วัน และได้ทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตทรงกระบอกที่ระยะเวลาเผาไฟต่างๆ จากการหล่อคอนกรีตทรงกระบอกที่มีส่วนผสมเดียวกันกับคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ผลการทดสอบชุดที่ 2 พบว่าคานทดสอบที่ไม่ได้ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจะวิบัติแบบคอนกรีตแตก(Concrete crushing) ส่วนคานทดสอบที่ซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนจะวิบัติแบบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลุดล่อน (FRP debonding) ดังภาพที่ 2.18 และพบว่า แรงกระทำสูงสุดที่ทำให้คานทดสอบวิบัติมีค่าลดลงประมาณ 2% จากคานควบคุม ทั้งการเผาที่ระยะเวลา 90 นาทีและ 120 นาที อีกทั้งพบว่าแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้คานทดสอบวิบัติที่เผาระยะเวลา 90 นาทีและ 120 นาที มีค่าเท่ากัน แต่คานทดสอบเผาไฟที่ระยะเวลา 120 นาที มีความเสียหายมากกว่าเนื่องจากระยะการโก่งตัวที่กึ่งกลางคานมากกว่า 19.8% ส่วนการทดสอบการตัดของคานทดสอบที่เผาไฟระยะเวลา 90 นาทีและ 120 นาที และซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนพบว่าแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้คานทดสอบวิบัติเพิ่มขึ้นประมาณ 21.2% และ 1% ตามลำดับและระยะโก่งตัวที่กึ่งกลางคานทดสอบลดลง 38.3% และ 61.1% ตามลำดับ



ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างการวิบัติแบบแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลุดล่อนของคานทดสอบภายหลังเผาไฟที่ระยะเวลา 90 นาทีแล้วซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย[3]

บทที่ 3

การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคาน

การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะพิจารณาอุณหภูมิในสถานะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้น 2 มิติ (2-D Nonlinear transient thermal analysis) ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element model) จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต (Thermal properties) กราฟไฟสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ (Design fire) สมการควบคุมสำหรับวิเคราะห์ (Governing equation) และวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในบทนี้

3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต

คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปกติ (Normal weight concrete) จะแปรผันตามชนิดของมวลรวม (Aggregate Type) และอุณหภูมิ [40] โดยสามารถแบ่งชนิดของมวลรวม 2 กลุ่มได้แก่ มวลรวมเนื้อปูน (Carbonate Aggregates) และมวลรวมเนื้อซิลิกา (Siliceous aggregates) มวลรวมเนื้อปูนมีองค์ประกอบหลักคือแร่คาร์บอเนต (Calcite) มีสูตรโครงสร้างเป็น CaCO_3 หรือแร่โดโลไมต์ (Dolomite) มีสูตรโครงสร้างเป็น $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ได้แก่ หินปูน หินบะซอลต์ หินโดโลไมต์ เป็นต้น ส่วนมวลรวมเนื้อซิลิกามีแร่ซิลิกา (Silica) เป็นองค์ประกอบหลัก มีสูตรโครงสร้างเป็น SiO_2 ได้แก่ หินแกรนิต หินควอตไซต์ และกรวดแม่น้ำ เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์นี้จะอ้างอิงคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] ได้แก่ สภาพการนำความร้อน (Thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) และความหนาแน่น (Density)

สภาพการนำความร้อนของคอนกรีตกำลังปกติได้เสนอให้ใช้ค่าระหว่างช่วงขีดจำกัดบน (Upper limit) และขีดจำกัดล่าง (Lower limit) ในช่วงอุณหภูมิ 20-1200°C เนื่องจากคอนกรีตเป็นวัสดุผสม (Composite material) ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ การวิเคราะห์อุณหภูมิเทียบกับผลทดสอบของ Kumar และ Kumar[1] จะใช้สภาพการนำความร้อนที่ขีดจำกัดล่าง ส่วนการวิเคราะห์อุณหภูมิเทียบกับทรงเกียรติ [2] และไกรวุฒิ [3] จะใช้สภาพการนำความร้อนที่ขีดจำกัดบน

$$k = 2.0 - 0.2451 \left(\frac{T_c}{100} \right) + 0.0107 \left(\frac{T_c}{100} \right)^2 \quad (3.1)$$

$$k = 1.36 - 0.136 \left(\frac{T_c}{100} \right) + 0.0057 \left(\frac{T_c}{100} \right)^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ k = สภาพนำความร้อนของคอนกรีต (W/m-K)

T_c = อุณหภูมิของคอนกรีต ($^{\circ}\text{C}$)

ความร้อนจำเพาะของคอนกรีตปกติจะแปรผันตามความชื้นในคอนกรีตและอุณหภูมิ เนื่องจากไม่มีข้อมูลความชื้นจากการทดสอบ จึงสมมติให้คอนกรีตอยู่ในภาวะแห้ง(ความชื้น0%) ในช่วงอุณหภูมิ 20-1200 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะให้ผลการวิเคราะห์เป็นค่าเชิงอนุรักษ์ ดังสมการที่ (3.3)

$$\begin{aligned} c_c &= 900 & , 20^{\circ}\text{C} \leq T_c \leq 100^{\circ}\text{C} \\ &= 900 + (T_c - 100) & , 100^{\circ}\text{C} < T_c \leq 200^{\circ}\text{C} \\ &= 1000 + \frac{(T_c - 200)}{2} & , 200^{\circ}\text{C} < T_c \leq 400^{\circ}\text{C} \\ &= 1100 & , 400^{\circ}\text{C} < T_c \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (3.3)$$

โดยที่ c_c = ความร้อนจำเพาะของคอนกรีต (J/kg-K)

T_c = อุณหภูมิของคอนกรีต ($^{\circ}\text{C}$)

ส่วนความหนาแน่นของคอนกรีตจะแปรผันตามอุณหภูมิโดยมีค่าลดลงเนื่องจากการสูญเสีย น้ำในคอนกรีตดังสมการที่ (3.4)

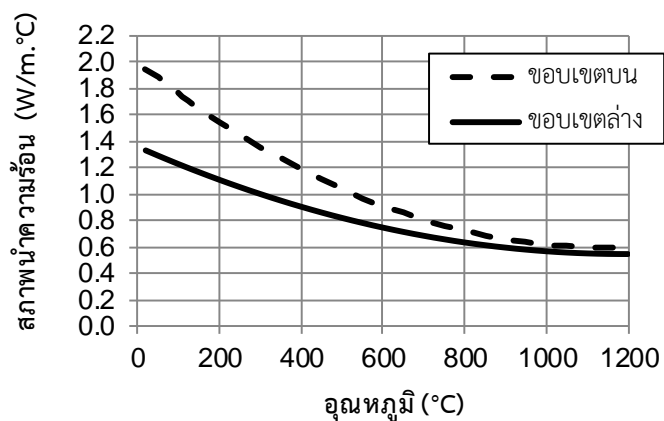
$$\begin{aligned} p_c &= p_{c,20^{\circ}\text{C}} & , 20^{\circ}\text{C} \leq T_c \leq 115^{\circ}\text{C} \\ &= p_{c,20^{\circ}\text{C}} \left(1 - 0.02 \frac{T_c - 115}{85} \right) & , 115^{\circ}\text{C} < T_c \leq 200^{\circ}\text{C} \\ &= p_{c,20^{\circ}\text{C}} \left(0.98 - 0.03 \frac{T_c - 200}{200} \right) & , 200^{\circ}\text{C} < T_c \leq 400^{\circ}\text{C} \\ &= p_{c,20^{\circ}\text{C}} \left(0.98 - 0.03 \frac{T_c - 200}{200} \right) & , 400^{\circ}\text{C} < T_c \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (3.4)$$

โดยที่ p_c = ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิ T_c (J/kg-K)

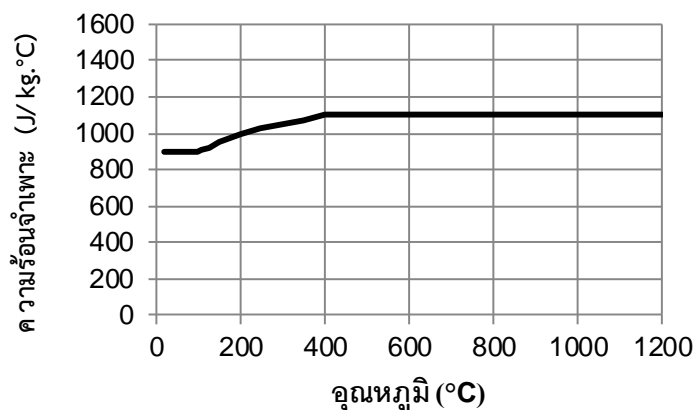
$p_{c,20^{\circ}\text{C}}$ = ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง(20 $^{\circ}\text{C}$) โดยมาตรฐาน EN 1994-1-2 เสนอให้ใช้ 2300 kg/m³ ส่วนการออกแบบในประเทศไทย นิยมใช้ 2400 kg/m³

T_c = อุณหภูมิของคอนกรีต ($^{\circ}\text{C}$)

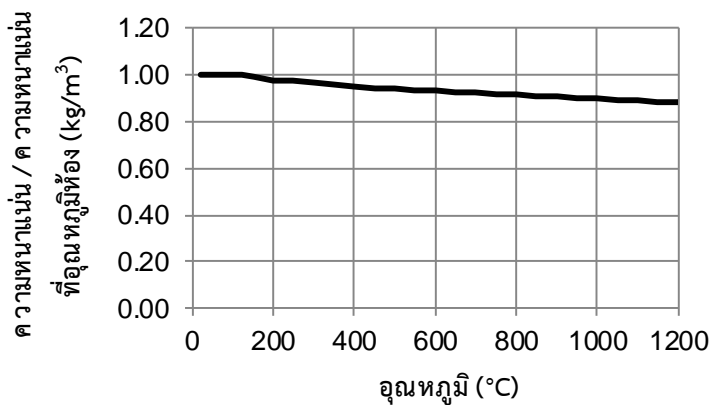
จากสมการของคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตสามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตและอุณหภูมิได้ดังภาพที่ 3.1-3.3



ภาพที่ 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อนของคอนกรีตและอุณหภูมิ [13]



ภาพที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของคอนกรีตและอุณหภูมิ [13]



ภาพที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตและอุณหภูมิ [13]

3.2 กราฟไฟสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ

จากการทำนายอุณหภูมิภายในหน้าตัดของคานคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยการวิเคราะห์อุณหภูมิในสภาวะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้นด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของDwaikat และKodur [9] พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถจำลองการเย็นตัวของเตาเผาได้โดยกำหนดให้กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์มีอุณหภูมิลดลงแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้อง ซึ่งกราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์จะพิจารณาผลของการเย็นตัวของเตาเผาซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน

1. กราฟส่วนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาเพิ่มขึ้นซึ่งแทนระยะเวลาเผาไฟด้วยกราฟเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] ดังแสดงในสมการที่ (3.5)

$$T(t) = T(t_o) + 345 \log(0.133t + 1) \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่ } T(t_o) &= \text{อุณหภูมิเริ่มต้น} (^{\circ}\text{C}) \\ t &= \text{เวลาเผาไฟ (วินาที)} \end{aligned}$$

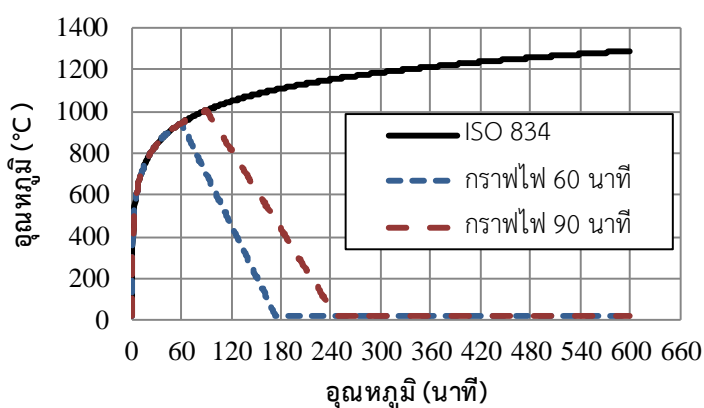
2. กราฟส่วนที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาลดลงซึ่งแทนการเย็นตัวของเตาเผา ซึ่งกำหนดให้เป็นการลดลงของอุณหภูมิแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้อง โดยอัตราการลดลงของอุณหภูมิสำหรับการทดสอบของ Kumar และ Kumar[1] จะอ้างอิงจาก Kodur และคณะ[37] สำหรับการทดสอบของทรงเกียรติ[2] และไกรวุฒิจะอ้างอิงจากการทดสอบของศุภณัฐ [41]

กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานของ Kumar และ Kumar[1] ที่ระยะเวลา 60 นาที และ 90 นาที แทนระยะเวลาเผาไฟด้วยกราฟเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] ที่ระยะเวลา 60 นาทีและ 90 นาทีตามลำดับ และสมมติการเย็นตัวของเตาเผาโดยอ้างอิงงานวิจัยจาก Kodur และคณะ[37] ซึ่งให้อัตราการเย็นตัวภายหลังจากหยุดให้ความร้อนเป็น 500 และ 375 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงตามลำดับ หรือระยะเวลาเย็นตัว 1.9 ชั่วโมงและ 2.6 ชั่วโมงตามลำดับ จนถึงอุณหภูมิห้องและหยุดให้ความร้อนที่ 600 นาที ดังสมการที่ (3.6) และ (3.7) ตามลำดับ และแสดงในภาพที่ 3.4

$$\begin{aligned} T(t) &= 20 + 345 \log(0.133t + 1) & , 0 \leq t \leq 3600 \\ &= 945 - \left(\left(\frac{945 - 20}{6840} \right) \times (t - 3600) \right) & , 3600 < t \leq 10440 \\ &= 20 & , 10440 < t \leq 36000 \end{aligned} \quad (3.6)$$

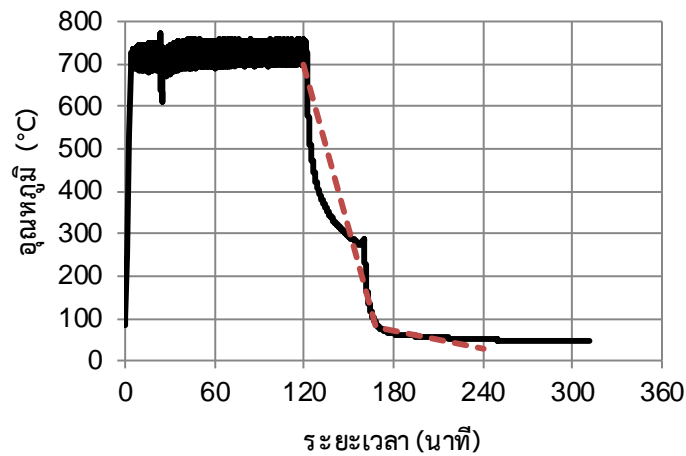
$$\begin{aligned}
 T(t) &= 20 + 345 \log(0.133t + 1) && , 0 \leq t \leq 5400 \\
 &= 1006 - \left(\left(\frac{1006 - 20}{9360} \right) \times (t - 5400) \right) && , 5400 < t \leq 14760 \\
 &= 20 && , 14760 < t \leq 36000
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

โดยที่ $T(t)$ = อุณหภูมิในเตาเผาที่เวลาเผาไฟ t ($^{\circ}\text{C}$)
 t = เวลาเผาไฟ (วินาที)



ภาพที่ 3.4 กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานของ Kumar และ Kumar[1]

กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานของทรงเกียร์ติและไกรวุฒิที่เวลา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที แทนระยะเวลาเผาไฟด้วยกราฟเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] ที่ระยะเวลา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ สำหรับการเย็นตัวของเตาเผาจะอ้างอิงการทดสอบพฤติกรรมการอัดทรงกระบอกคอนกรีตที่เสียหายจากไฟช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนของศุภณัฐ[41] ซึ่งใช้เตาเผาเครื่องเดียวกันกับการทดสอบของทรงเกียร์ติและไกรวุฒิและได้เก็บข้อมูลการเย็นตัวของอุณหภูมิในเตาเผา เนื่องจากไม่มีข้อมูลทดสอบที่อุณหภูมิสูงกว่า 700°C จึงได้ใช้ระยะเวลาการเย็นตัวของเตาเผาจากการเผาทรงกระบอกคอนกรีตที่อุณหภูมิ 700°C แทนการเย็นตัวของอุณหภูมิในเตาเผาจากการทดสอบของทรงเกียร์ติและไกรวุฒิดังภาพที่ 3.5 และมีสมการของกราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์ดังสมการที่ (3.8) ถึง (3.10) ตามลำดับ โดยสมการสามารถแสดงในรูปแบบกราฟไฟได้ดังภาพที่ 3.6



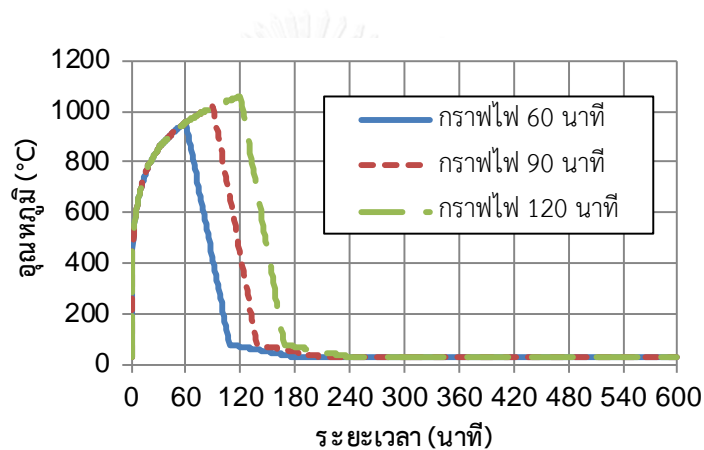
ภาพที่ 3.5 อุณหภูมิในเตาเผาจากการทดสอบของศุภณัฐ [41]

$$\begin{aligned}
 T(t) &= 30 + 345 \log(0.133t + 1) && , 0 \leq t \leq 3600 \\
 &= 955 - \left(\left(\frac{955 - 79}{2880} \right) \times (t - 3600) \right) && , 3600 < t \leq 6480 \\
 &= 79 - \left(\left(\frac{79 - 30}{4320} \right) \times (t - 6480) \right) && , 6480 < t \leq 10800 \\
 &= 30 && , 10800 < t \leq 36000
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}
 T(t) &= 30 + 345 \log(0.133t + 1) && , 0 \leq t \leq 5400 \\
 &= 1016 - \left(\left(\frac{1016 - 79}{2880} \right) \times (t - 5400) \right) && , 5400 < t \leq 8280 \\
 &= 79 - \left(\left(\frac{79 - 30}{4320} \right) \times (t - 8280) \right) && , 8280 < t \leq 12600 \\
 &= 30 && , 12600 < t \leq 36000
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{aligned}
 T(t) &= 30 + 345 \log(0.133t + 1) & , 0 \leq t \leq 7200 \\
 &= 1059 - \left(\left(\frac{1059 - 79}{2880} \right) \times (t - 7200) \right) & , 7200 < t \leq 10080 \\
 &= 79 - \left(\left(\frac{79 - 30}{4320} \right) \times (t - 10080) \right) & , 10080 < t \leq 14400 \\
 &= 30 & , 14400 < t \leq 36000
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

โดยที่ $T(t)$ = อุณหภูมิในเตาเผาที่เวลาเผาไฟ t ($^{\circ}\text{C}$)
 t = เวลาเผาไฟ (วินาที)



ภาพที่ 3.6 กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานของทรงเกียรติและไกรวุฒิ[2, 3]

3.3 สมการควบคุมสำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ

จากแนวคิดการส่งผ่านความร้อน ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากกราฟไฟสู่พื้นผิวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน และจากพื้นผิวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กเข้าไปด้านในคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการนำความร้อน ซึ่งการนำความร้อนชั่วครู่ (Transient heat conduction) ในปริภูมิ 2 มิติ (x, y) ของคอนกรีต[42] เป็นไปตามตั้งสมการที่ (3.11)

$$k(T) \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] = \rho(T) c(T) \frac{\partial T}{\partial t}
 \tag{3.11}$$

โดยมีเงื่อนไขสภาวะขอบเขตของสมการสามารถแสดงในสมการที่ (3.12)

$$-k(T) \left[\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y \right] = h [T_f - T_s] + \varepsilon_{res} \sigma [(T_f + 273)^4 - (T_s + 273)^4] \quad (3.12)$$

โดย $k(T)$ = สภาพนำความร้อนของคอนกรีตแปรผันตามอุณหภูมิ(W/m.°C)

$\rho(T)$ = ความหนาแน่นของคอนกรีตแปรผันตามอุณหภูมิ(kg/m³)

$c(T)$ = ความร้อนจำเพาะของคอนกรีตแปรผันตามอุณหภูมิ(J/kg.°C)

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน(W/m².°C)

T_f = ความร้อนจากกราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยแปรผันตามเวลา(°C)

T_s = ความร้อนที่พื้นผิวของคอนกรีต(°C)

ε_{res} = สภาพเปล่งรังสีลึกลับ(ไม่มีหน่วย),

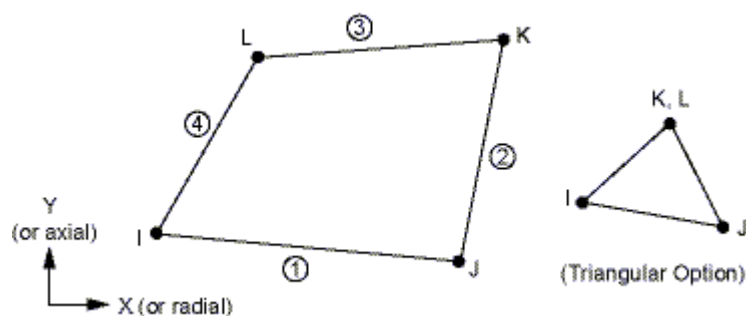
σ = ค่าคงตัวของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (5.67x10⁻⁸W/m².K⁴)

n_x, n_y = ทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของคอนกรีตในทิศทาง x และ y ตามลำดับ

3.4 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

เนื่องจากสมการควบคุมที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบไร้เชิงเส้นและในสภาวะชั่วคราว (Nonlinear transient equation) จึงวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเลือกโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] เป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความซับซ้อน และเนื่องจากผลการวิเคราะห์เป็นผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำ โดยความถูกต้องของการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงต้องตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบเพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ โดยได้ตรวจสอบการลู่เข้าของอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานดังแสดงในภาคผนวก ก

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิกำหนดโดยสมการ (3.11) และ (3.12) จะใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] แบบ 2 มิติ โดยเลือกเอลิเมนต์ (Element) ของคอนกรีตเป็น PLANE 55 [23] ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มี 4 จุดต่อ(nodes) และมีระดับชั้นความเสรีคืออุณหภูมิที่แต่ละจุดต่อดังภาพที่ 3.7



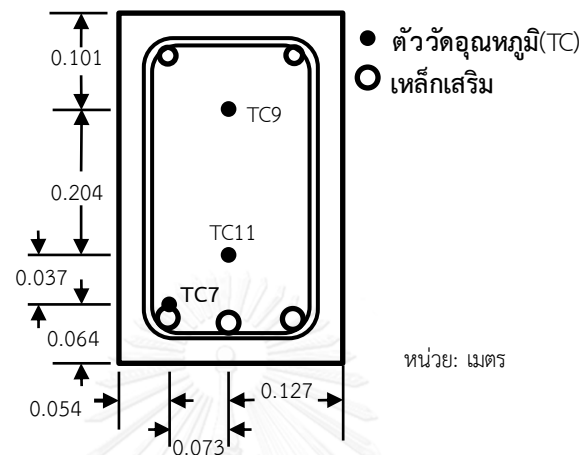
ภาพที่ 3.7 ลักษณะของเอลิเมนต์ PLANE 55 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ [15]

ทั้งนี้คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.1 โดยแบ่งหน้าตัดเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ ให้มีจำนวนที่เหมาะสม และให้จุดต่อของเอลิเมนต์ผ่านตำแหน่งเหล็กเสริม โดยสมมติให้อุณหภูมิของเหล็กเสริมเท่ากับอุณหภูมิของคอนกรีตที่ตำแหน่งเหล็กเสริมเนื่องจากเหล็กเสริมไม่มีอิทธิพลต่อการกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดอย่างมีนัยสำคัญ[20] การให้ความร้อนแก่หน้าตัดคอนกรีตจะกำหนดให้หน้าตัดคอนกรีตมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้องต่อมากำหนดให้ส่งผ่านความร้อนจากราฟไฟที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.2 สู่อลิเมนต์ (Heat transfer from fire to element) ในรูปแบบของการพาความร้อนที่ขอบพื้นผิว (By Convection on line) สำหรับพื้นผิวที่ได้รับความร้อน(ด้านข้างและด้านล่าง)และไม่ได้รับความร้อน(ด้านบน) และกำหนดให้มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ $25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ และ $9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ตามลำดับ[43, 44] แต่ไม่คำนึงถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากโปรแกรม ANSYS สามารถกำหนดการแผ่รังสีได้เฉพาะจากแหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งไม่ใช่ความร้อนรอบๆคอนกรีต[45] และกำหนดจำนวนขั้นการวิเคราะห์ทั้งหมด 600 ขั้น จนกระทั่งหยุดที่ 600 นาที

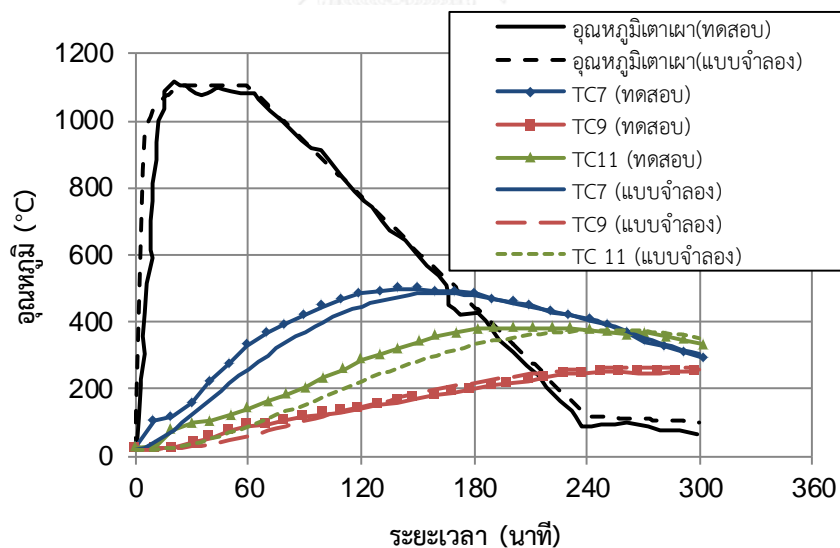
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิที่นำเสนอข้างต้นได้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบการเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้ลดอุณหภูมิของเตาเผาแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้องจากงานวิจัยของ Dwaikat และKodur [9] พบว่าผลวิเคราะห์อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัดมีความสอดคล้องกับผลการวัดอุณหภูมิจากการทดสอบ เพราะฉะนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานภายหลังเผาไฟหรือหยุดให้ความร้อนในเตาเผาได้

ภาพที่ 3.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานจากการทดสอบของ Dwaikat และ Kodur [9] ได้แก่ ตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง(TC7) ตำแหน่งกึ่งกลางคอนกรีตที่ความลึก 101 มิลลิเมตร(TC9) และ 305 มิลลิเมตร (TC11)

ภาพที่ 3.9 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเปรียบเทียบกับผลการวัดอุณหภูมิคานของ Dwaikat และ Kodur [9] ที่มีตำแหน่งตัววัดอุณหภูมิดังภาพที่ 3.8 ที่มีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาของเตาเผาจำลองการเย็นตัวของคานจากการลดอุณหภูมิแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้อง



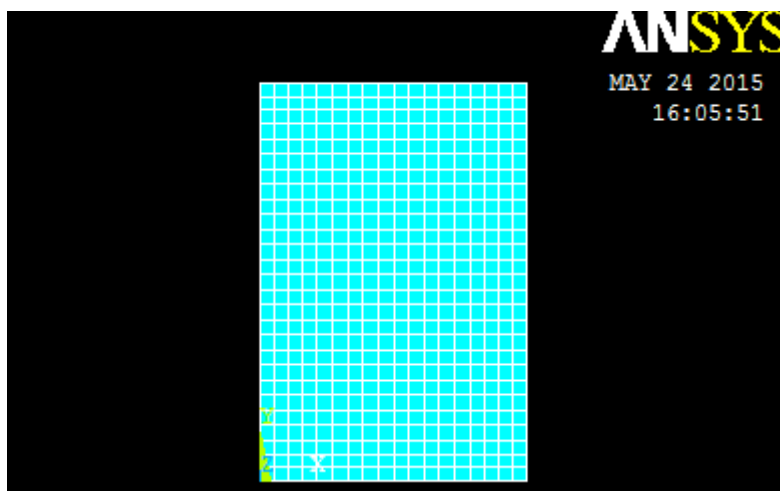
ภาพที่ 3.8 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



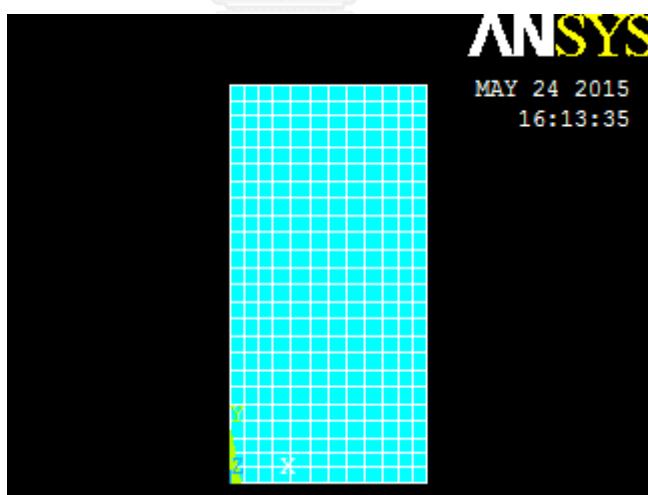
ภาพที่ 3.9 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่ได้ลดอุณหภูมิแบบเชิงเส้นจนถึงอุณหภูมิห้อง

รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของ Kumar และ Kumar[1] ได้แสดงดังภาพที่ 3.10 ส่วนของทรงกึ่งรูป[2]และไกรวุฒิ[3]ได้แสดงดังภาพที่ 3.11 ซึ่งมี

รายละเอียดขนาดของหน้าตัดของคาน ขนาดของเอลิเมนต์ และจำนวนเอลิเมนต์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังตารางที่ 3.1 และลักษณะการให้ความร้อน วิธีการให้ความร้อนจากกราฟไฟ การกำหนดอุณหภูมิสม่ำเสมอในหน้าตัดจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ดังตารางที่ 3.2



ภาพที่ 3.10 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของ Kumar และ Kumar[1] จากโปรแกรม ANSYS[15]



ภาพที่ 3.11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของทรงเกียรติและไกรวุฒิ [2, 3] จากโปรแกรม ANSYS[15]

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดขนาดของหน้าตัดของคาน ขนาดของเอलिเมนต์ และจำนวนเอลิเมนต์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

| แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ | ขนาดหน้าตัดคาน (ตารางมิลลิเมตร) | ขนาดเอลิเมนต์ไม่เกิน (ตารางมิลลิเมตร) | จำนวนเอลิเมนต์ |
|--|---------------------------------|---------------------------------------|----------------|
| Kumar และ Kumar[1] | 200x300 | 12x12 | 486 |
| ทรงเกียรติ[2] | 150x300 | 11x14 | 288 |
| ไกรวุฒิ[3] | 150x300 | 11x14 | 288 |

ตารางที่ 3.2 แสดงการส่งผ่านความร้อนจากกราฟไฟสู่อะลิเมนต์ กราฟไฟสำหรับให้ความร้อน และอุณหภูมิสม่ำเสมอในหน้าตัดจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

| แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ | การส่งผ่านความร้อนจากกราฟไฟสู่อะลิเมนต์ | กราฟไฟสำหรับให้ความร้อน | อุณหภูมิ(°C) สม่ำเสมอในหน้าตัดเริ่มต้น |
|--|---|-------------------------|--|
| Kumar และ Kumar[1] | การพาความร้อนที่ขอบพื้นผิว 3 ด้าน | จากหัวข้อ 3.2 | 20 |
| ทรงเกียรติ[2] | การพาความร้อนที่ขอบพื้นผิว 3 ด้าน | จากหัวข้อ 3.2 | 30 |
| ไกรวุฒิ[3] | การพาความร้อนที่ขอบพื้นผิว 4 ด้าน | จากหัวข้อ 3.2 | 30 |

บทที่ 4

การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยวิธีวิเคราะห์หน้าตัด

การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ได้จากการนำผลการวิเคราะห์อุณหภูมิในรูปแบบการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกล(Mechanical properties) ของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ และคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มาวิเคราะห์หน้าตัด (Section analysis) ร่วมกัน โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง(Moment-curvature relationship) และประยุกต์ใช้หลักการของงานเสมือน(Virtual work principle)[14] สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กในรูปความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว(Load-deflection relationship)

4.1 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ

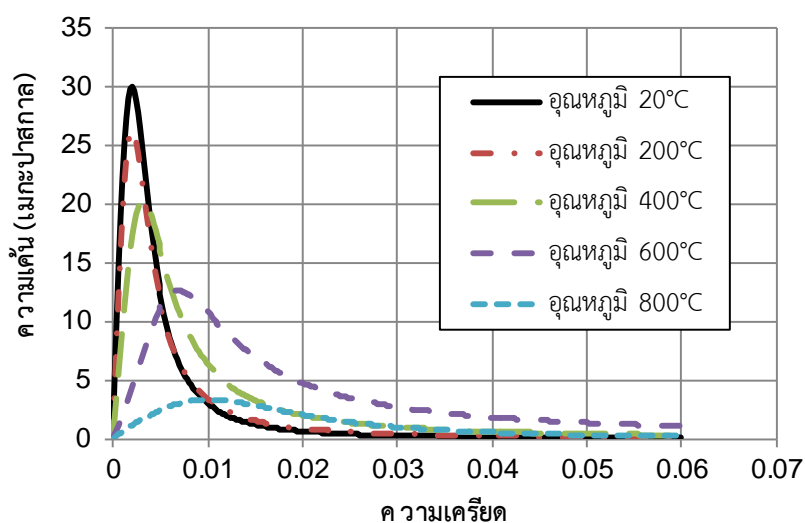
งานวิจัยนี้ได้พิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตมวลรวมเนื้อซิลิกาภายหลังเผาไฟ(ได้รับความร้อนและเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง) ของ Chang และคณะ[30] ในการประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์หน้าตัดซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.4 แบบจำลองนี้ใช้สำหรับคอนกรีตมวลรวมเนื้อซิลิกาที่อุณหภูมิห้องและภายหลังได้รับความร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 20°C-800°C ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดภายหลังเผาไฟแสดงในสมการที่ (4.1)

$$f_{cr} = \frac{M \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{or}} \right)}{1 + \left(M - \frac{n}{n-1} \right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{or}} \right) + \left(\frac{1}{n-1} \right) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{or}} \right)^n} f'_{cr} \quad (4.1)$$

โดย f_{cr} = ความเค้นของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)

ε_c = ความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ

ภาพที่ 4.1 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง 30 เมกะปาสกาลและความเครียดขณะที่ความเค้นสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง 0.001969 ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ โดยแสดงให้เห็นถึงการลดลงของความเค้นในคอนกรีตเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 800°C ความเค้นในคอนกรีตมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 5 เมกะปาสกาล เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้ได้สำหรับอุณหภูมิไม่เกิน 800°C จึงสมมติให้ไม่มี ความเค้นในคอนกรีตในกรณีที่มีอุณหภูมิเกิน 800 °C ซึ่งจะส่งผลการวิเคราะห์เป็นค่าเชิงอนุรักษ์มากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่แปรผันตามอุณหภูมิของ Chang และคณะ[30]

ในแบบจำลองมีตัวแปรประกอบด้วย ตัวแปร n ดังสมการที่ (4.2) ตัวแปร n_0 ดังแสดงในสมการที่ (4.3) ตัวแปร M ดังแสดงในสมการที่ (4.4) ตัวแปร M_0 ดังแสดงในสมการที่ (4.5) กำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ (Residual ultimate compressive strength) ดังแสดงในสมการที่ (4.6) ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุดภายหลังเผาไฟ (Peak strain) ดังแสดงในสมการที่ (4.7) โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ (Secant elastic modulus) ของคอนกรีตภายหลังเผาไฟดังแสดงในสมการที่ (4.8) โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องดังแสดงในสมการที่ (4.9) และโมดูลัสยืดหยุ่นสัมผัสเริ่มต้นของคอนกรีต (Initial tangent elastic modulus) ภายหลังเผาไฟดังแสดงในสมการที่ (4.10) เนื่องจากแบบจำลองไม่ได้กำหนดข้อมูลของความเครียดสูงสุด (Ultimate strain) ของคอนกรีตภายหลังเผาไฟจึงอ้างอิงความเครียดสูงสุดขณะเผาไฟจากมาตรฐาน EN-1992-1-2 [13] และจาก Knaack และคณะ [46] ดังแสดงในสมการที่ (4.11) และ (4.12)

$$n = n_o \left(\frac{M}{M_o} \right)^{1.014 - 0.0007T} \quad (4.2)$$

$$n_o = \left[\frac{f'_c(\text{MPa})}{12} \right] + 0.77 > 1.0 \quad (4.3)$$

$$M = \frac{E_{or}}{E_{pr}} \quad (4.4)$$

$$M_o = \frac{E_o}{E_p} \quad (4.5)$$

$$\frac{f'_{cr}}{f'_c} = 1.008 + \frac{T}{450 \ln(T/5800)} \geq 0, 20^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \quad (4.6)$$

โดย f'_{cr} = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)

f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง(เมกะปาสกาล)

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{or}}{\varepsilon_o} &= 1, 20^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\ &= (-0.1f'_c + 7.7) \left[\frac{e^{-5.8+0.01T}}{1+e^{-5.8+0.01T}} - 0.0219 \right] + 1, 200^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.7)$$

โดย ε_{or} = ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุดภายหลังเผาไฟ

ε_o = ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง

$$E_{pr} = \frac{f'_{cr}}{\varepsilon_{or}} \quad (4.8)$$

$$E_p = \frac{f'_c}{\varepsilon_o} \quad (4.9)$$

โดย E_{pr} = โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)

E_p = โมดูลัสยืดหยุ่นซีแคนต์ของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง(เมกะปาสกาล)

$$\begin{aligned}
\frac{E_{or}}{E_o} &= -0.00165T + 1.033 & , 20^\circ\text{C} < T \leq 125^\circ\text{C} \\
&= \frac{1}{1.2 + 18(0.0015T)^{4.5}} & , 125^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\
&= \frac{1}{1.2 + 18(0.0015T)^{4.5}} (1 - 0.002(T - 500)) & , 500^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \\
&= \frac{1}{1.2 + 18(0.0015T)^{4.5}} (0.6 + 0.004(T - 700)) & , 700^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

โดย E_{or} = โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพัทธ์เริ่มต้นของคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟ(เมกะปาสกาล)

E_o = โมดูลัสยืดหยุ่นสัมพัทธ์เริ่มต้นของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง(เมกะปาสกาล)

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{ur} &= 0.02 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 20) & , 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\
&= 0.0225 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 100) & , 100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C} \\
&= 0.025 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 200) & , 200^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C} \\
&= 0.0275 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 300) & , 300^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\
&= 0.03 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 400) & , 400^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C} \\
&= 0.0325 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 500) & , 500^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C} \\
&= 0.0350 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 600) & , 600^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \\
&= 0.0375 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 700) & , 700^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \\
&= 0.04 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 800) & , 800^\circ\text{C} < T \leq 900^\circ\text{C} \\
&= 0.0425 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 900) & , 900^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \\
&= 0.0450 + 2.5 \times 10^{-5} (T - 1000) & , 1000^\circ\text{C} < T \leq 1100^\circ\text{C}
\end{aligned} \tag{4.11}$$

โดย ε_{ur} = ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟ

$$\begin{aligned}
\frac{\varepsilon_{ur}}{\varepsilon_u} &= 0.979 + \left(3.377 \times 10^{-4} \left(\frac{9}{5}T + 32 \right) \right) - \left(7.561 \times 10^{-7} \left(\frac{9}{5}T + 32 \right)^2 \right) \\
&\quad + \left(1.186 \times 10^{-9} \left(\frac{9}{5}T + 32 \right)^3 \right) & , 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

โดย ε_{ur} คือ ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตภายหลังจากเผาไฟ

ε_u คือ ความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง

งานวิจัยนี้ยังพิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ(ได้รับความร้อนและเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง)ของ Sharma และคณะ[31] ในการประยุกต์ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีหน้าตัดซึ่งจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.4 เช่นเดียวกัน แต่แบบจำลองนี้จะแตกต่างจากแบบจำลองของ Chang และคณะ[30] เนื่องจากไม่ได้ระบุชนิดของมวลรวมและสามารถใช้ทำนายที่อุณหภูมิห้องและภายหลังได้รับความร้อนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 20°C-800°C เช่นกัน ซึ่งมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟแสดงในสมการที่ (4.13)

$$\frac{f_{cr}}{f_{co}} = \frac{n_1 \beta (\varepsilon_c / \varepsilon_{co})}{n_1 \beta - 1 + (\varepsilon_c / \varepsilon_{co})^{n_2 \beta}} \quad (4.13)$$

โดย f_{cr} = ความเค้นของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)
 ε_c = ความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ

ในแบบจำลองมีตัวแปรประกอบด้วย กำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่แปรผันตามอุณหภูมิดังแสดงในสมการที่ (4.14) ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุดภายหลังเผาไฟดังแสดงในสมการที่ (4.15) ตัวแปร β ที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยมีค่าดังสมการที่ (4.16) โดยมีตัวแปร A (MPa) และ C (MPa) ประกอบการคำนวณดังสมการที่ (4.17) และ (4.18) ตามลำดับ ส่วนตัวแปร n_1 และ n_2 ในสมการที่ (4.19) และ (4.20) ตามลำดับ จะแปรผันตามกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ โดยมีตัวแปร D (MPa) และ G (MPa) ประกอบการคำนวณดังสมการที่ (4.21) และ (4.22) ตามลำดับ

เนื่องจากแบบจำลองไม่ได้กำหนดข้อมูลของความเครียดสูงสุด(Ultimate strain) ของคอนกรีตภายหลังเผาไฟจึงอ้างอิงความเครียดสูงสุดขณะเผาไฟจากมาตรฐาน EN-1992-1-2[13] และ Knaack และคณะ[46] ดังแสดงในสมการที่ (4.11) และ (4.12) เช่นเดียวกัน

$$\begin{aligned} \frac{f_{co}}{f'_c} &= 0.98 + 0.00008T, & 20^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C} \\ &= 1.27 - 0.0013T, & 400^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.14)$$

โดย f_{co} = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)
 f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง(เมกะปาสกาล)

$$\begin{aligned}
\frac{\varepsilon_{co}}{\varepsilon'_c} &= 1.00+0.0012T & , 20^\circ\text{C}<T \leq 200^\circ\text{C} \\
&= 0.052+0.004T & , 200^\circ\text{C}<T \leq 500^\circ\text{C} \\
&= 1.80+0.0028T & , 500^\circ\text{C}<T \leq 800^\circ\text{C}
\end{aligned}
\tag{4.15}$$

โดย ε_{co} = ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุดภายหลังเผาไฟ

ε'_c = ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง

$$\beta = \left[\frac{f_{co}}{A} \right]^3 + C \tag{4.16}$$

$$A = 40.54 + (8.7 \times 10^{-4} T) \quad , 20^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \tag{4.17}$$

$$C = 1.15 + (2.86 \times 10^{-3} T) \quad , 20^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \tag{4.18}$$

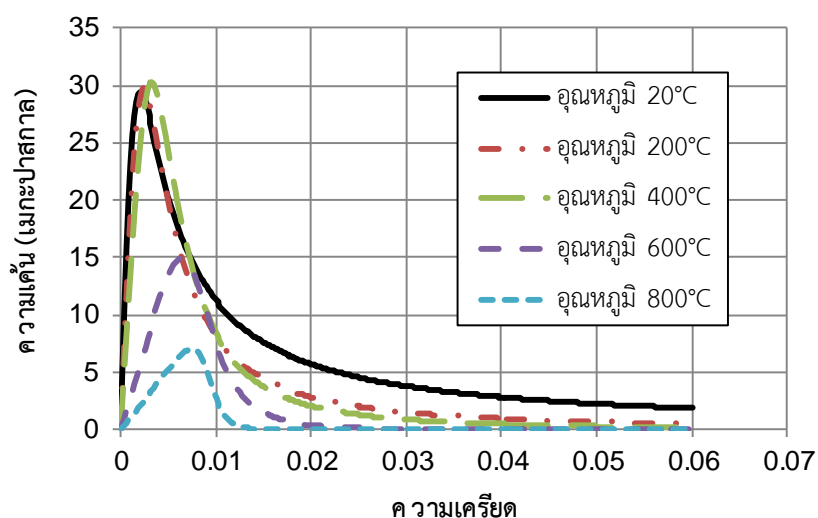
$$n_1 = \left[\frac{D}{f_{co}} \right]^{0.4} \tag{4.19}$$

$$n_2 = \left[\frac{G}{f_{co}} \right]^{0.8} \tag{4.20}$$

$$D = 56.15 - 0.032T \quad , 20^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \tag{4.21}$$

$$G = 37.97 - 0.010 T \quad , 20^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \tag{4.22}$$

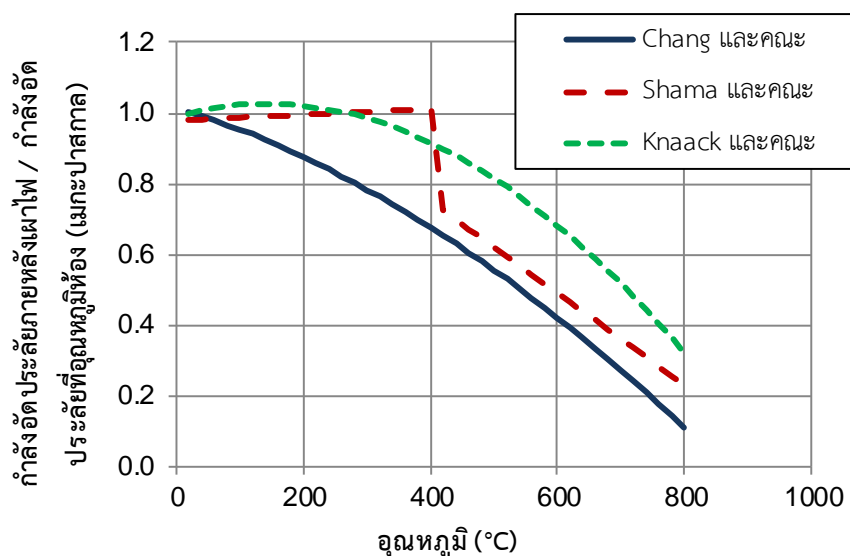
ภาพที่ 4.2 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง 30 เมกะปาสกาลและความเครียดขณะที่ความเค้นสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง 0.001969 ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ พบว่าความเค้นในคอนกรีตจะลดลงเมื่อคอนกรีตมีอุณหภูมิสูงกว่า 400°C และพบว่าที่อุณหภูมิ 800°C ความเค้นในคอนกรีตมีค่าสูงสุดน้อยกว่า 7 เมกะปาสกาล เนื่องจากแบบจำลองนี้ใช้ได้สำหรับอุณหภูมิไม่เกิน 800°C จึงสมมติให้ไม่มีความเค้นในคอนกรีตในกรณีที่คอนกรีตมีอุณหภูมิเกิน 800 °C ซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์เป็นค่าเชิงอนุรักษ์มากยิ่งขึ้น



ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่แปรผันตามอุณหภูมิของ Sharma และคณะ[31]

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟและอุณหภูมิของแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลทั้ง Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] พบว่าสามารถเปรียบเทียบแนวโน้มของทั้ง 2 แบบจำลองได้เนื่องจากกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟแปรผันตามกำลังอัดประลัยที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิ ซึ่งเมื่อเปลี่ยนค่ากำลังอัดประลัยที่อุณหภูมิห้องพบว่าไม่ทำให้ลักษณะแนวโน้มของกราฟเปลี่ยนแปลง และยังสามารถเปรียบเทียบแนวโน้มกับแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตขณะเผาไฟของ Knaack และคณะ[46] ได้

ภาพที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบกำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] และกำลังอัดประลัยของคอนกรีตขณะเผาไฟ(ที่อุณหภูมิสูง)ของ Knaack และคณะ[46] ในรูปของอัตราส่วนระหว่างกำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายหลังเผาไฟและกำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องพบว่า กำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองของ Chang และคณะ[30] มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตขณะเผาไฟของ Knaack และคณะ[46] ทุกช่วงอุณหภูมิ ส่วนกำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองของ Sharma และคณะ[31] มีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตขณะเผาไฟของ Knaack และคณะ[46] ยกเว้นช่วงอุณหภูมิมระหว่าง 280°C-420°C เนื่องจากพบว่าคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่มีอุณหภูมिन้อยกว่า 400°C ไม่ทำให้กำลังอัดลดลง ซึ่งการเปรียบเทียบกำลังอัดที่แปรผันตามอุณหภูมิ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Abramowicz และ Kowalski[8] ที่พบว่ากำลังอัดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟมีค่าน้อยกว่ากำลังอัดของคอนกรีตในขณะเผาไฟจากการทดสอบกำลังอัดของAbrams[25] และ Malhotra[26]

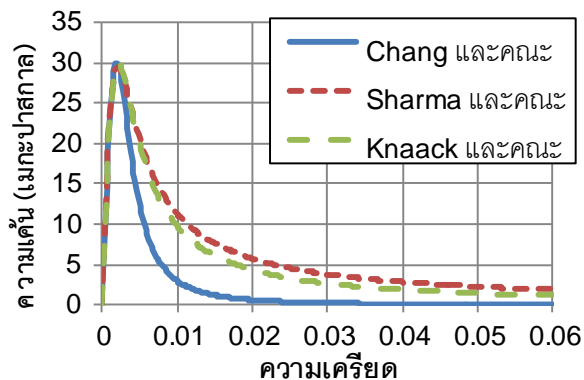


ภาพที่ 4.3 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตของแบบจำลองต่างๆที่แปรผันตามอุณหภูมิ

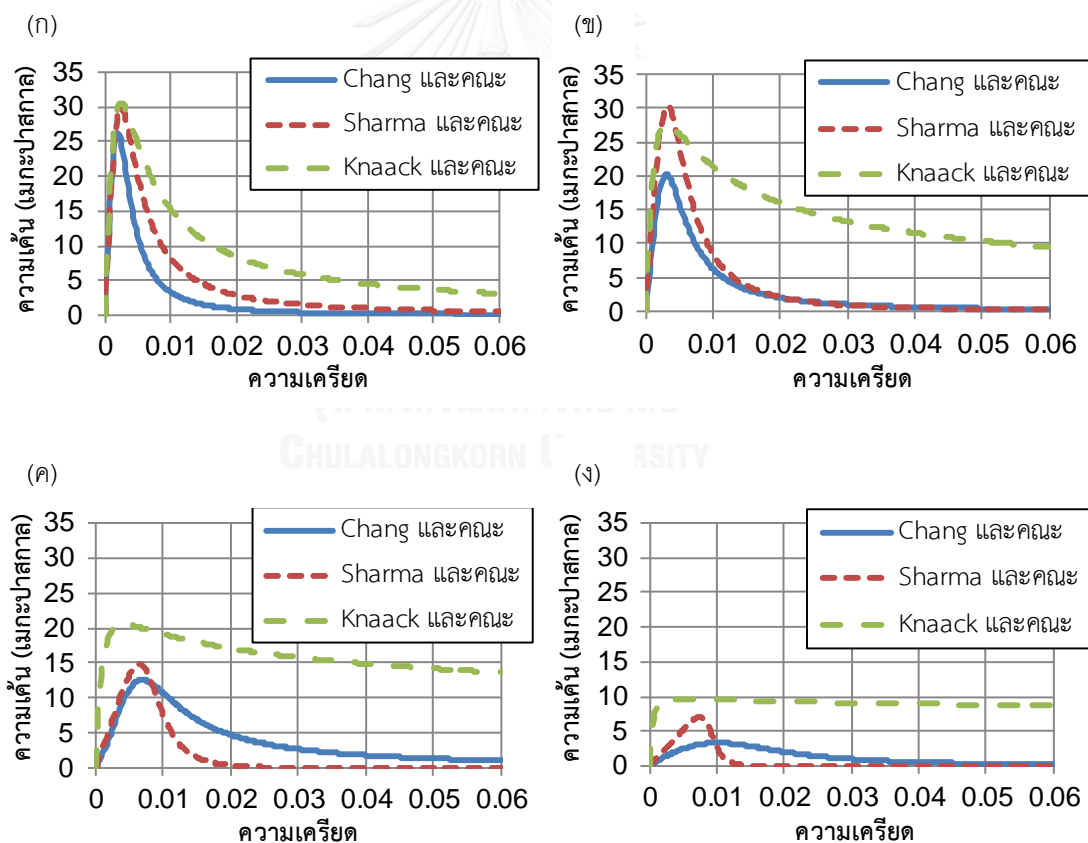
จากการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายหลังเผาไฟของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] แปรผันตามคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง เช่น กำลังอัดประลัย โมดูลัสยืดหยุ่น ความเครียดขณะที่ความเค้นสูงสุด ซึ่งเมื่อเปลี่ยนคุณสมบัติเชิงกลดังกล่าวพบว่าลักษณะของกราฟจากทั้ง 2 แบบจำลองไม่มีแนวโน้มเดียวกัน จึงทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ในกรณีที่คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องไม่ใช่ค่าเดียวกัน และเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตขณะเผาไฟของ Knaack และคณะ[46] พบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] มีค่าน้อยกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตขณะเผาไฟจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Knaack และคณะ [46] ทุกช่วงอุณหภูมิ ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟจากแบบจำลองคุณสมบัติของ Sharma และคณะ[31] มีค่าน้อยกว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตขณะเผาไฟจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของของ Knaack และคณะ[46] ยกเว้นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 280°C-420°C

ภาพที่ 4.4 และ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตภายหลังเผาไฟของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] และแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตขณะเผาไฟของ Knaack และคณะ [46] ที่มีกำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง 30 เมกะปาสกาลและมีความเครียดขณะที่ความเค้นสูงสุด

ที่อุณหภูมิห้อง 0.001969 ที่แปรผันตามอุณหภูมิ สำหรับที่อุณหภูมิห้อง(20°C) และที่อุณหภูมิต่างๆ (200°C 400°C 600°C และ 800°C) ตามลำดับ



ภาพที่ 4.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและความเคียดของคอนกรีตจากแบบจำลอง คุณสมบัติเชิงกลภายหลังเผาไฟและในขณะเผาไฟที่อุณหภูมิห้อง



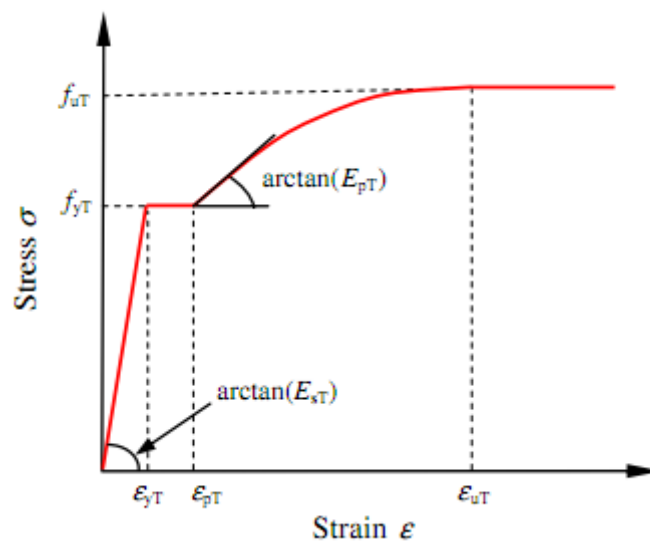
ภาพที่ 4.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความพรุนและความเคียดของคอนกรีตจากแบบจำลอง คุณสมบัติเชิงกลภายหลังเผาไฟและในขณะเผาไฟที่ (ก) อุณหภูมิ 200°C (ข) อุณหภูมิ 400°C (ค) อุณหภูมิ 600°C และ (ง) อุณหภูมิ 800°C

รวมถึงพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องของทุกแบบจำลองมีความแตกต่างกันเฉพาะในช่วงภายหลังที่ความเค้นมีค่าสูงสุด จึงสรุปได้ว่าคอนกรีตภายหลังเผาไฟจะสูญเสียคุณสมบัติเชิงกลมากกว่าคอนกรีตขณะเผาไฟ ซึ่งอาจเกิดจากผลของการเย็นตัวลงของคอนกรีตภายหลังหยุดเผาไฟที่แสดงในบทที่ 3 ทำให้คอนกรีตมีความเสียหายเพิ่มขึ้น เมื่อนำมาทดสอบกำลังอัดประลัยจึงทำให้รับแรงอัดได้น้อยลง

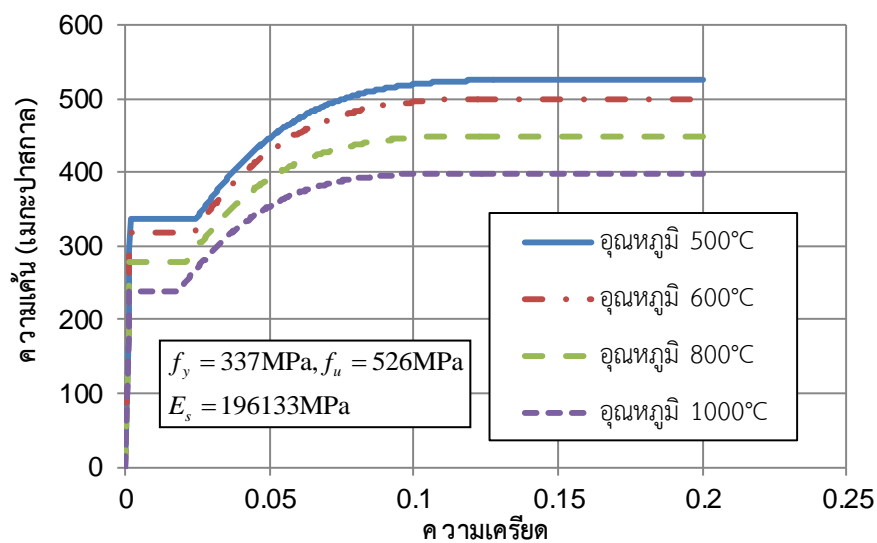
4.2 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ

Tao และคณะ [32] ได้เสนอแบบจำลองเพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังได้รับความร้อนและเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง โดยอ้างอิงและพัฒนาจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กโครงสร้างและเหล็กเสริมดังแสดงในสมการที่ (4.23) เป็น 4 ช่วงระยะเวลาคือ ช่วงที่เหล็กมีคุณสมบัติเป็นอีลาสติก (Elastic stage) ช่วงที่เหล็กมีคุณสมบัติเป็นพลาสติก (Plastic stage) ช่วงการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด (Strain hardening stage) และช่วงสุดท้ายจนกระทั่งเหล็กวิบัติ (Necking and failure stage) ซึ่งใกล้เคียงกับแบบจำลองที่อุณหภูมิห้อง โดยมีลักษณะทั่วไปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟดังภาพที่ 4.6 และตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่แปรผันตามอุณหภูมิดังภาพที่ 4.7

$$\begin{aligned}
 f_{sr} &= E_{sT} \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{yT} \\
 &= f_{yT}, & \varepsilon_{yT} \leq \varepsilon < \varepsilon_{pT} \\
 &= f_{uT} - (f_{uT} - f_{yT}) \times \left(\frac{\varepsilon_{uT} - \varepsilon}{\varepsilon_{uT} - \varepsilon_{pT}} \right)^p, & \varepsilon_{pT} \leq \varepsilon < \varepsilon_{uT} \\
 &= f_{uT}, & \varepsilon \geq \varepsilon_{uT}
 \end{aligned} \tag{4.23}$$



ภาพที่ 4.6 ลักษณะทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ [32]



ภาพที่ 4.7 ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กเสริมที่แปรผันตามอุณหภูมิ

โดยมีตัวแปรประกอบในการคำนวณได้แก่ โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ (Residual modulus of elasticity) ดังแสดงในสมการที่ (4.24) กำลังครากของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ (Residual yield strength) ดังแสดงในสมการที่ (4.25) กำลังประลัยของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ (Residual ultimate strength) ดังแสดงในสมการที่ (4.26) กำลังประลัยของเหล็กเสริม (Ultimate strength) ที่อุณหภูมิห้องดังแสดงในสมการที่ (4.27) ความเครียดครากของเหล็กเสริม (Yield strain) ดังแสดงในสมการที่ (4.28) ความเครียดที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด

ของเหล็กเสริม (Strain at the onset of strain hardening) ดังแสดงในสมการที่ (4.29) ความเครียดประลัยของเหล็กเสริม (Ultimate strain corresponding to the ultimate strength) ดังแสดงในสมการที่ (4.30) เลขชี้กำลังสำหรับการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด (Strain-hardening exponent) ดังแสดงในสมการที่ (4.31) และโมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียดของเหล็กเสริม (Initial modulus of elasticity at the onset of strain hardening) ดังแสดงในสมการที่ (4.32)

$$\begin{aligned} E_{sT} &= E_s, & T &\leq 500^\circ\text{C} \\ &= [1 - 1.30 \times 10^{-4}(T - 500)]E_s, & T &> 500^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.24)$$

โดย E_{sT} = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)
 E_s = โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมที่อุณหภูมิห้อง(เมกะปาสกาล)

$$\begin{aligned} f_{yT} &= f_y, & T &\leq 500^\circ\text{C} \\ &= [1 - 5.82 \times 10^{-4}(T - 500)]f_y, & T &> 500^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.25)$$

โดย f_{yT} = กำลังครากของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)
 f_y = กำลังครากของเหล็กเสริมที่อุณหภูมิห้อง(เมกะปาสกาล)

$$\begin{aligned} f_{uT} &= f_u, & T &\leq 500^\circ\text{C} \\ &= [1 - 4.85 \times 10^{-4}(T - 500)]f_u, & T &> 500^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$f_u = [1.6 - 9.17 \times 10^{-4}(f_y - 200)]f_y, \quad 200 \leq f_y \leq 800\text{MPa} \quad (4.27)$$

โดย f_{uT} = กำลังประลัยของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ(เมกะปาสกาล)
 f_u = กำลังประลัยของเหล็กเสริมที่อุณหภูมิห้อง(เมกะปาสกาล)

$$\varepsilon_{yT} = \frac{f_{yT}}{E_{sT}} \quad (4.28)$$

โดย ε_{yT} = ความเครียดครากของเหล็กเสริม

$$\begin{aligned}\varepsilon_{pT} &= 15\varepsilon_{yT} & , f_y \leq 300 \text{ MPa} \\ &= [15 - 0.018(f_y - 300)]\varepsilon_{yT} & , 300 < f_y \leq 800 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.29)$$

โดย ε_{pT} = ความเครียดที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด

$$\begin{aligned}\varepsilon_{uT} &= 100\varepsilon_{yT} & , f_y \leq 300 \text{ MPa} \\ &= [100 - 0.15(f_y - 300)]\varepsilon_{yT} & , 300 < f_y \leq 800 \text{ MPa}\end{aligned}\quad (4.30)$$

โดย ε_{uT} = ความเครียดประลัยของเหล็กเสริม

$$p = E_{pT} \times \left(\frac{\varepsilon_{uT} - \varepsilon_{pT}}{f_{uT} - f_{yT}} \right) \quad (4.31)$$

$$E_{pT} = 0.03E_{sT} \quad (4.32)$$

โดย p = เลขชี้กำลังสำหรับการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด

E_{pT} = โมดูลัสยืดหยุ่นเริ่มต้นที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียดของเหล็กเสริม

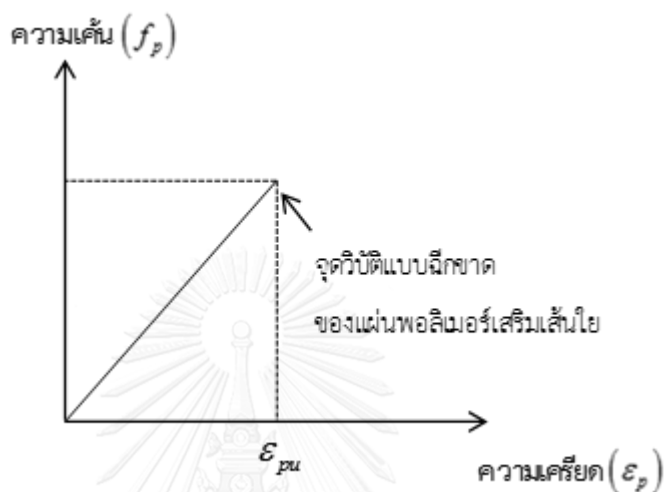
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนโดยทั่วไปมีความเค้นดึงเป็นลักษณะเชิงเส้น ดังสมการที่ (4.33) โดยมีคุณสมบัติเชิงกลที่สำคัญในการรับแรงดึงได้แก่ กำลังรับแรงดึง และโมดูลัสยืดหยุ่น ซึ่งจะสามารถรับแรงดึงจนถึงค่าความเครียดสูงของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่กำหนดไว้แล้วฉีกขาด (FRP rupture) ดังภาพที่ 4.8 และมีสมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$f_p = E_p \varepsilon_p \quad , 0 \leq \varepsilon_p < \varepsilon_{pu} \quad (4.33)$$

- โดย f_p = ความเค้นดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสกาล)
 ϵ_p = ความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
 ϵ_{pu} = ความเครียดประลัยของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
 E_p = โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสกาล)



ภาพที่ 4.8 ลักษณะโดยทั่วไปของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

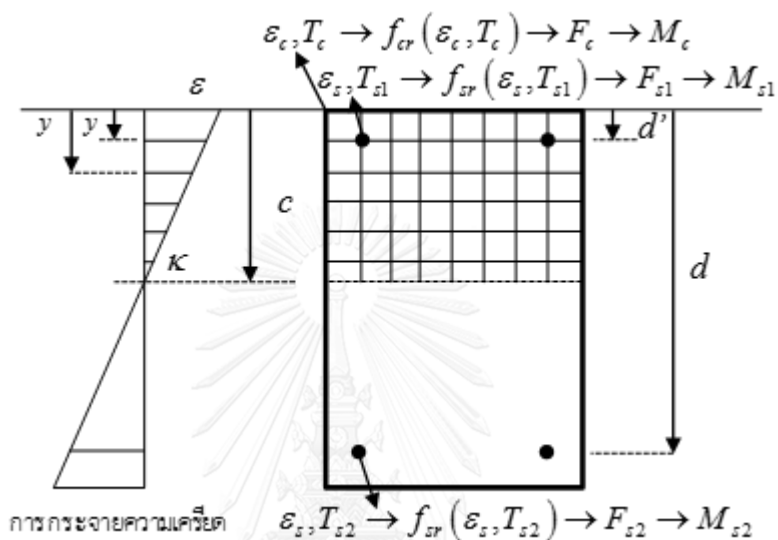
4.4 การวิเคราะห์หน้าตัด

การวิเคราะห์หน้าตัดเพื่อทำนายความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานาคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากเผาไฟ และคานาคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังจากเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีสมมติฐานของการวิเคราะห์ดังนี้

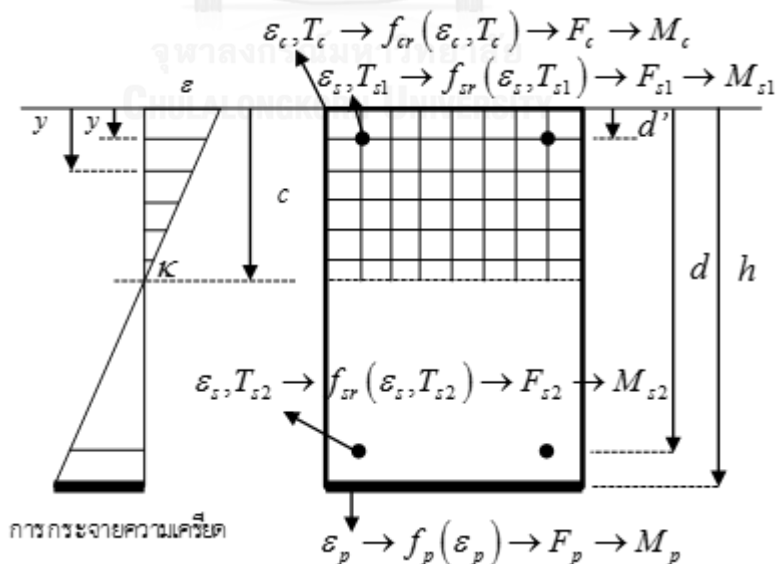
1. หน้าตัดยังคงเป็นระนาบ หรือการกระจายความเครียดในหน้าตัดเป็นแบบเชิงเส้น
2. ความเครียดในเหล็กเสริมและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเท่ากับความเครียดในคอนกรีตที่ระดับเดียวกัน
3. ความเค้นในคอนกรีต เหล็กเสริม สามารถคำนวณได้จากความเครียดและอุณหภูมิสูงสุด โดยมาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังจากเผาไฟ
4. ความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคำนวณได้จากความเครียด โดยมาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

5. ไม่พิจารณากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตและการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ และคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ดังแสดงในภาพที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ โดยอ้างอิงจากการวิเคราะห์หน้าตัดของ Lakhani และคณะ[6] มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้



ภาพที่ 4.9 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ



ภาพที่ 4.10 การวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1. สำหรับค่าความโค้งใดๆ สมมติค่า c สามารถคำนวณความเครียดที่ระยะต่างๆจากขอบรับแรงอัด ดังแสดงในสมการที่ (4.34)

$$\varepsilon = \kappa|y-c| \quad (4.34)$$

โดย ε = ความเครียด

κ = ความโค้ง (1/เมตร)

y = ระยะจากขอบรับแรงอัด (เมตร)

c = ระยะจากขอบรับแรงอัดของคอนกรีตถึงแนวแกนสะเทิน (เมตร)

2. สำหรับการวิเคราะห์หน้าตัดที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิจะเท่ากันทั้งหมดในหน้าตัดนั้นคือเท่ากับ อุณหภูมิห้อง ส่วนการวิเคราะห์หน้าตัดภายหลังเผาไฟผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำให้ทราบการกระจายของอุณหภูมิสูงสุดที่ตำแหน่งพิกัดต่างๆในหน้าตัด โดยแต่ละตำแหน่ง พิกัดจะทราบค่าความเครียดและอุณหภูมิ ซึ่งสามารถนำไปหาความเค้นได้จากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ จะทำให้ได้ความเค้นอัดในคอนกรีตที่ตำแหน่งพิกัดต่างๆในหน้าตัด รวมถึงความเค้นที่ตำแหน่งเหล็กเสริมรับแรงอัด และความเค้นในเหล็กเสริมรับแรงดึง โดยไม่พิจารณาความเค้นอัดในตำแหน่งที่คอนกรีตมีอุณหภูมิสูงกว่า $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากมีค่าน้อยมาก ในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ค่าความเครียดจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถหาความเค้นได้จากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

3. คำนวณแรงภายในหน้าตัดจากความเค้นในคอนกรีตและเหล็กเสริม โดยสำหรับคอนกรีตจะการ นำความเค้นอัดในคอนกรีตคูณพื้นที่ของคอนกรีตรอบจุดที่พิจารณาดังสมการที่ (4.35) เหล็กเสริมจะ นำความเค้นในเหล็กเสริมคูณกับพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมดังสมการที่ (4.36) และ (4.37) ในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะพิจารณาผลของแรงภายในจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ร่วมด้วย ซึ่งคำนวณได้จากความเค้นในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคูณพื้นที่หน้าตัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยดังสมการที่ (4.38)

$$F_c = f_{cr} \times A_c \quad (4.35)$$

$$F_{s1} = f_{sr} \times A_{s1} \quad (4.36)$$

$$F_{s2} = f_{sr} \times A_{s2} \quad (4.37)$$

$$F_p = f_p \times A_p \quad (4.38)$$

- โดย F_c = แรงอัดในคอนกรีต (นิวตัน)
 F_{s1} = แรงอัดในเหล็กเสริมบน (นิวตัน)
 F_{s2} = แรงดึงในเหล็กเสริมล่าง (นิวตัน)
 F_p = แรงดึงในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (นิวตัน)
 A_c = พื้นที่ของคอนกรีตโดยรอบจุดที่พิจารณา (ตารางมิลลิเมตร)
 A_{s1} = พื้นที่ของเหล็กเสริมบน (ตารางมิลลิเมตร)
 A_{s2} = พื้นที่ของเหล็กเสริมล่าง (ตารางมิลลิเมตร)
 A_p = พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ตารางมิลลิเมตร)

4. ตรวจสอบสมดุลของแรงภายในหน้าตัด โดยแรงอัดมาจากแรงภายในของคอนกรีตด้านรับแรงอัด (เหนือแกนสะเทิน) และแรงอัดของเหล็กเสริมรับแรงอัด(เหล็กเสริมบน) ส่วนแรงดึงมาจากแรงภายในของเหล็กเสริมรับแรงดึง(เหล็กเสริมล่าง) ดังแสดงในสมการที่ (4.39) ในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะพิจารณาผลของแรงดึงจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยร่วมด้วย ดังแสดงในสมการที่ (4.40) ซึ่งถ้าสมการไม่สมดุลจะต้องสมมติค่าใหม่จนกระทั่งสมดุล

$$\sum F_c + F_{s1} - F_{s2} = 0 \quad (4.39)$$

$$\sum F_c + F_{s1} - F_{s2} - F_p = 0 \quad (4.40)$$

5. คำนวณโมเมนต์ดัดในหน้าตัดรอบแกนสะเทิน(Neutral Axis, N.A.) ซึ่งเกิดจากผลรวมแรงภายในคอนกรีตหรือเหล็กเสริมที่ระดับต่างๆในหน้าตัดคูณกับระยะห่างระหว่างคอนกรีตหรือเหล็กเสริมที่ระดับต่างๆถึงแกนสะเทิน ดังแสดงในสมการที่ (4.41) ในกรณีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะพิจารณาผลของโมเมนต์จากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยร่วมด้วยดังแสดงในสมการที่ (4.42)

$$M = \sum F_c (c - y) + F_{s1} (c - d') + F_{s2} (d - c) \quad (4.41)$$

$$M = \sum F_c (c - y) + F_{s1} (c - d') + F_{s2} (d - c) + F_p (h - c) \quad (4.42)$$

โดย M = โมเมนต์ดัด (นิวตัน.เมตร)

d' = ระยะระหว่างขอบรับแรงอัดถึงเหล็กเสริมรับแรงอัด (เมตร)

d = ระยะระหว่างขอบรับแรงอัดถึงเหล็กเสริมรับแรงดึง (เมตร)

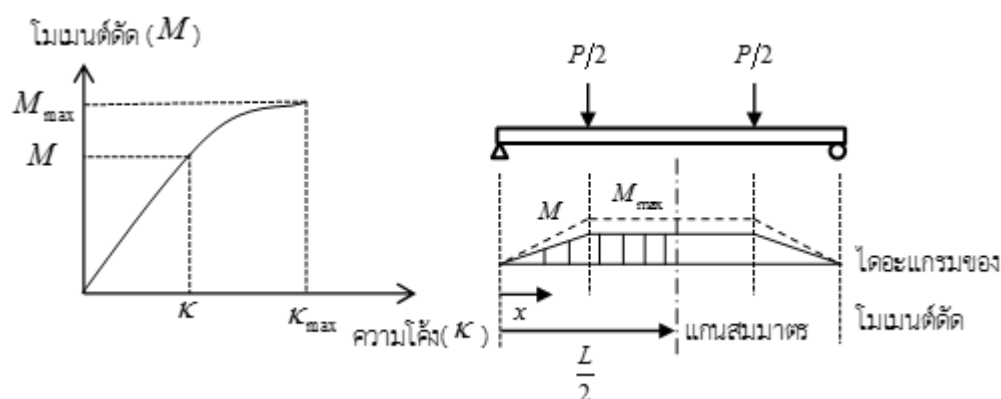
h = ระยะระหว่างขอบรับแรงอัดถึงแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมตร)

จะทำให้ได้คู่ลำดับความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดที่คำนวณได้จากค่าความโค้งที่กำหนด โดยจะทำได้จนกว่าถึงความเครียดสูงสุดของคอนกรีตภายหลังเผาไฟที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คานคอนกรีตเสริมเหล็กจะวิบัติ จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ และคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

4.5 การวิเคราะห์การดัดของคานในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว

ผลการวิเคราะห์หน้าตัดจะอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์โมเมนต์และความโค้งซึ่งเป็นคุณสมบัติของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก สามารถวิเคราะห์เป็นพฤติกรรมการดัดของคานภายใต้แรงกระทำที่จุด ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวได้จากการประยุกต์ใช้หลักของงานเสมือน (Virtual work principle) [14] มีวิธีดังนี้

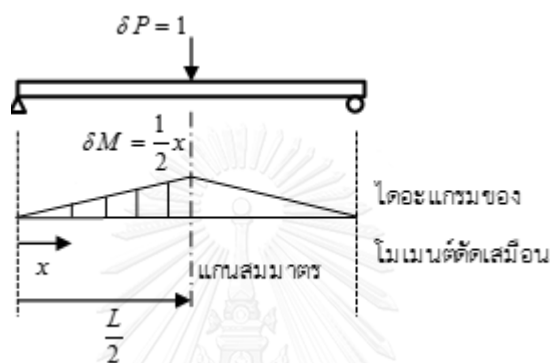
1. กำหนดแรงกระทำเริ่มต้นที่กระทำต่อคานจากการทดสอบการดัดภายใต้แรงกระทำที่จุด จะสามารถคำนวณได้อะแกรมของโมเมนต์ดัดของคานเนื่องจากแรงกระทำนั้นได้จากโครงสร้างจริง
2. โมเมนต์ดัดของหน้าตัดต่างๆตามความยาวคานจากไดอะแกรมของโมเมนต์ดัด สามารถหาความโค้งได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดนั้น (ได้จากวิธีวิเคราะห์หน้าตัด) จากโครงสร้างจริง ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งและไดอะแกรมโมเมนต์ดัดจากโครงสร้างจริง

สำหรับความโค้งที่ใช้ในการคำนวณการโก่งตัวนั้นเป็นความโค้งที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งที่ได้จากการวิเคราะห์หน้าตัด ซึ่งมีลักษณะไม่เชิงเส้น จึงไม่สามารถใช้สมการเชิงเส้นของความโค้ง $\kappa = \frac{M}{EI}$ ได้ ซึ่งทำให้ไม่ต้องใช้ค่า EI ในการคำนวณการโก่งตัว

3. กำหนดให้มีแรงเสมือน 1 หน่วยที่กระทำกึ่งกลางคานเพื่อหาการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน จะสามารถคำนวณไดอะแกรมของโมเมนต์ดัดเสมือนของคานเนื่องจากแรงเสมือน 1 หน่วยจากโครงสร้างเสมือนดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 ไดอะแกรมโมเมนต์ดัดเสมือนเนื่องจากแรงเสมือน 1 หน่วยจากโครงสร้างเสมือน

4. อินทิเกรตผลคูณระหว่างโมเมนต์ดัดเสมือนและความโค้งทุกหน้าตัดตามความยาวคาน สำหรับกรณีคานที่ไม่ได้เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยดังสมการที่ (4.43) และ (4.44) โดยพิจารณาหลักความสมมาตรของคาน เพื่อหาการโก่งตัวที่กึ่งกลางคาน

5. เขียนคู่ลำดับของการโก่งตัวที่คำนวณได้กับแรงกระทำ แล้วเพิ่มค่าแรงกระทำจนกระทั่งเป็นแรงกระทำที่ทำให้เกิดโมเมนต์สูงสุดจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดนั้น จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟทั้งที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและไม่ได้อเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

$$\Delta_{mid} = 2 \left(\int_0^{L/2} \delta M \cdot \kappa_1 dx \right) \quad (4.43)$$

$$\Delta_{mid} = 2 \left(\int_0^{L_0} \delta M \cdot \kappa_1 dx + \int_{L_0}^{L/2} \delta M \cdot \kappa_{11} dx \right) \quad (4.44)$$

- โดย Δ_{mid} = ระยะการโก่งตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางของคาน (เมตร)
- L = ระยะระหว่างฐานรองรับ (เมตร)
- L_o = ระยะระหว่างฐานรองรับถึงขอบของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (เมตร)
- δM = การกระจายโมเมนต์คัตของคานเนื่องจากแรงเสมือน
- κ_1 = ความโค้งเนื่องจากแรงกระทำบนหน้าคัตคานที่ไม่มีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (1/เมตร)
- κ_{11} = ความโค้งเนื่องจากแรงกระทำบนหน้าคัตคานที่มีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (1/เมตร)
- dx = ระยะอนุพันธ์ตามแนวยาวของคาน (Differential length)



บทที่ 5

การตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต

การทดสอบการตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟของทรงเกียรติและไกรวุฒิที่ได้บันทึกของผลการวัดอุณหภูมิภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็กสามารถเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับการตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์จะเปรียบเทียบกับผลการทดสอบการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟของ Kumar และ Kumar[1] ทรงเกียรติ [2] และไกรวุฒิ [3] และภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของไกรวุฒิ[3] โดยมีรายละเอียดการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ดังตารางที่ 5.1 และ 5.2

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดการเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กสำหรับเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์

| คานคอนกรีตเสริมเหล็ก | ลักษณะคานและฐานรองรับ | ขนาดหน้าตัดคาน (มิลลิเมตร) | ระยะระหว่างฐานรองรับ (มิลลิเมตร) | ระยะระหว่างแรงกระทำ (มิลลิเมตร) | ลักษณะการเผาไฟ | ภายหลังเผาไฟ (นาท) |
|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------|
| Kumar และ Kumar[1] | คานช่วงเดียวฐานรองรับอย่างง่าย | 200x300 | 3200 | 1600 | 3 ด้าน ยกเว้น ด้านบน | 60 และ 90 |
| ทรงเกียรติ [2] | คานช่วงเดียวฐานรองรับอย่างง่าย | 150x300 | 1800 | 600 | 3 ด้าน ยกเว้น ด้านบน | 60, 90 และ 120 |
| ไกรวุฒิ[3] | คานช่วงเดียวฐานรองรับอย่างง่าย | 150x300 | 1800 | 600 | 4 ด้าน | 60, 90 และ 120 |
| *ไกรวุฒิ[3] (เสริมกำลังคาน) | คานช่วงเดียวฐานรองรับอย่างง่าย | 150x300 | 1800 | 600 | 4 ด้าน | 60, 90 และ 120 |

*หมายเหตุ : เสริมกำลังคานภายหลังเผาไฟด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเต็มหน้าตัดคานที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ติดตั้งระหว่างฐานรองรับเป็นระยะ 1600 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5.2 รายละเอียดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้เปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีวิเคราะห์

| คาน คอนกรีต เสริมเหล็ก | เหล็กเสริมบน เหล็กเสริมล่าง ตามลำดับ | ระยะขั้ว คอนกรีต (มิลิเมตร) | กำลังอัด ประลัยของ คอนกรีต (เมกะปาสกาล) | โมดูลัสยืดหยุ่น ของคอนกรีต (เมกะปาส กาล) | กำลังคราก ของเหล็ก เสริม(เมกะ ปาสกาล) | กำลังประลัย ของเหล็กเสริม (เมกะปาสกาล) | โมดูลัส ยืดหยุ่นของ เหล็กเสริม (เมกะปาส กาล) | แรงดึงสูงสุด ของแผ่นพอลิ เมอร์เสริมเส้น ใยต่อความ กว้าง (กิโลนิว ตัน/เมตร) | โมดูลัสยืดหยุ่น ของแผ่นพอลิ เมอร์เสริมเส้นใย (เมกะปาสกาล) |
|-----------------------------------|--|-----------------------------------|--|---|--|--|--|---|--|
| Kumar และ Kumar[1] | 2 DB12 4 DB12 | 25 | 17.1 | 19600 | 480 480 | 550 550 | 200000 200000 | - - | - |
| ทรงเกียรติ [2] | 2 DB12 2 DB16 | 25 | 30 | 30480 | 338 337 | 516 526 | 196133 196133 | - - | - |
| ไกรวุฒิ[3] | 2 DB12 2 DB16 | 25 | 30.4 | 25898 | 503 563 | 633 685 | 200000 200000 | - - | - |
| ไกรวุฒิ[3] (เสริมกำลัง คาน) | 2 DB12 2 DB16 | 25 | 30.4 | 25898 | 503 563 | 633 685 | 200000 200000 | 350 | 25000 |

ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ ทั้งที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและไม่ได้เสริมกำลังจะอยู่ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้ง และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว สำหรับการตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีวิเคราะห์ที่นำเสนอจะเปรียบเทียบเฉพาะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว เนื่องจากการทดสอบไม่มีข้อมูลของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้ง

5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของ Kumar และ Kumar[1]

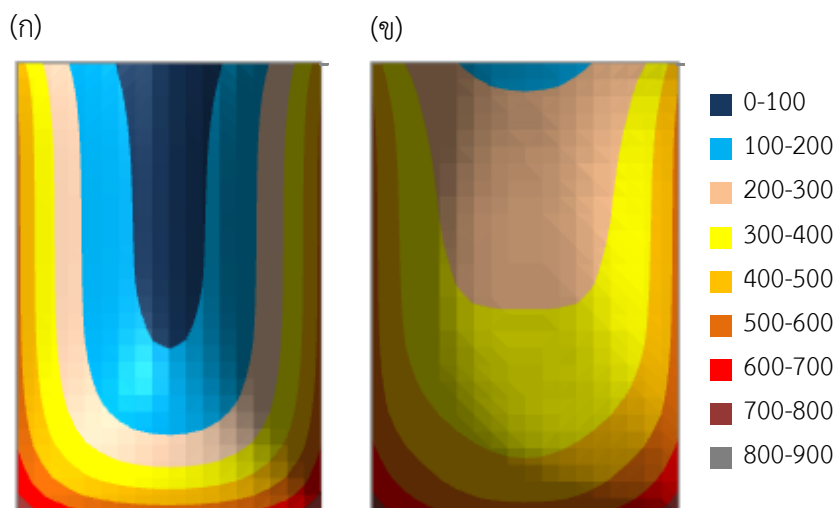
5.1.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

การทดสอบการตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟของ Kumar และ Kumar[1]ไม่มีผลจากการวัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงได้เสนอแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ ซึ่งรายละเอียดของแบบจำลองรวมถึงวิธีการสร้างแบบจำลองได้แสดงในบทที่ 3 และได้ตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองจากการเปรียบเทียบกับผลการวัดอุณหภูมิของทรงเกียรติ[2]และไกรวุฒิ[3] ซึ่งจะแสดงในหัวข้อที่ 5.2.1 และ 5.3.1 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากกราฟไฟสำหรับวิเคราะห์ 60 นาทีและ 90 นาที จะอยู่ในรูปแบบการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ เนื่องจากพบว่าอัตราการเย็นตัวของคอนกรีตจะทำให้หน้าตัดคานเสียหายมากขึ้น โดยได้แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟจากกราฟไฟที่ใช้วิเคราะห์ที่เวลา 60 นาทีและ 90 นาที ดังภาพที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ และได้เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมล่างของคานขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมล่างทั้งด้านนอกและด้านในของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟ

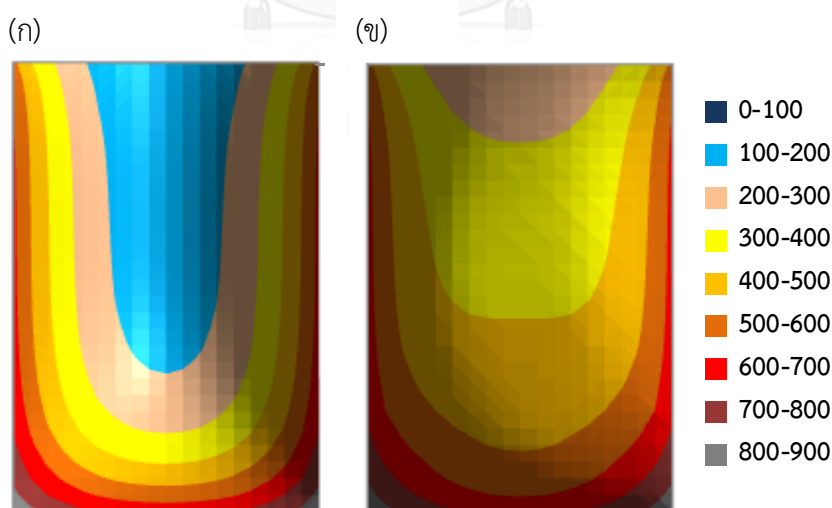
| ตำแหน่งเหล็กเสริม | กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ | อุณหภูมิสูงสุดในขณะเผาไฟ(°C) | อุณหภูมิสูงสุดในภายหลังเผาไฟ(°C) | เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| ด้านนอก | 60 นาที | 402 | 503 | 25 |
| | 90 นาที | 529 | 612 | 16 |
| ด้านใน | 60 นาที | 288 | 419 | 45 |
| | 90 นาที | 404 | 525 | 30 |

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมกลางในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานสามารถรับได้พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กเสริมด้านในมีค่ามากกว่าที่เหล็กเสริมด้านนอก 20% และ 14% ที่กราฟไฟสำหรับวิเคราะห์ 60 นาทีและ 90 นาที ตามลำดับ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะลดลงเมื่อมีระยะเวลาการเผานานขึ้น



ภาพที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่เวลา 60 นาที

(ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังกเผาไฟ



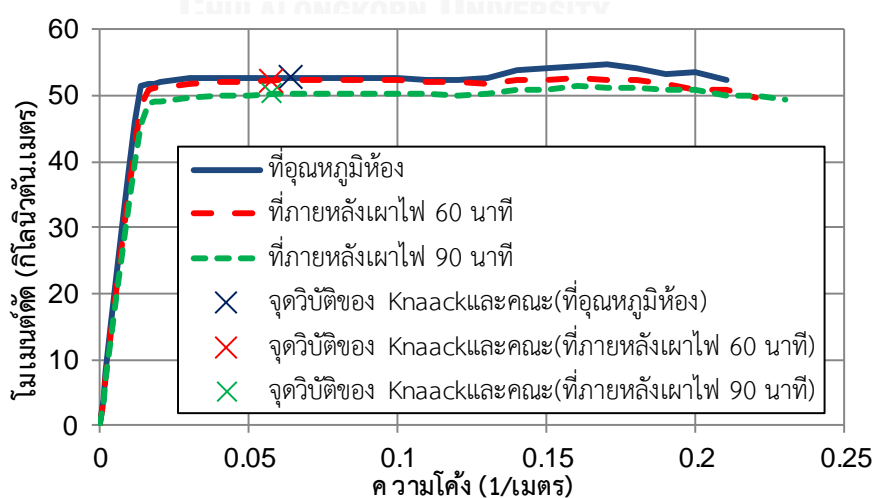
ภาพที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่เวลา 90 นาที

(ก.) ขณะเผาไฟ (ข.) ภายหลังกเผาไฟ

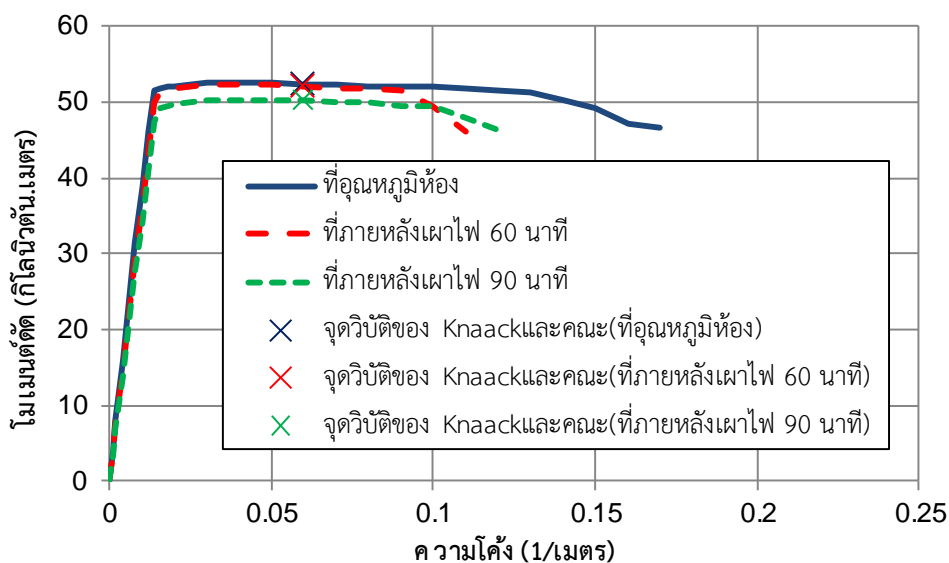
5.1.2 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ

ภาพที่ 5.3-5.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ตัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟจากการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ [30] และ Sharma และคณะ[31] ตามลำดับ และได้กำหนดจุดวิบัติของคานจากความเครียดสูงสุดของคอนกรีตจากขอบรับแรงอัดจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46] (จุดกากบาทในกราฟ) และมาตรฐาน EN 1992-1-2 [13] (จุดสิ้นสุดของกราฟ) โดยมีลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาที เริ่มจากเหล็กเสริมล่างคราก ถัดมาด้วยเหล็กเสริมบนคราก และคอนกรีตอัดแตก (ความเครียดของคอนกรีตที่ขอบรับแรงอัดมากกว่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่ได้กำหนดไว้)

ผลการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งพบว่าลักษณะของกราฟของทั้ง 2 แบบจำลองไม่ต่างกันในช่วงแรกเนื่องจากโมเมนต์ส่วนใหญ่เกิดจากแรงในเหล็กเสริม เมื่อพิจารณาจุดวิบัติจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] พบว่าโมเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยภายหลังเกิดการครากของเหล็กเนื่องจากผลของการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด(Strain hardening) ของเหล็กเสริมเล็กน้อย รวมถึงพบว่าแบบจำลองของ Sharmaและคณะ[31] ถึงจุดวิบัติก่อนแบบจำลองของ Chang และคณะ[30] แต่ถ้าพิจารณาจุดวิบัติจากงานวิจัยของ Knaackและคณะ[46] พบว่าการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] ถึงจุดวิบัติก่อนเกิดโมเมนต์สูงสุดในหน้าตัด ส่วนการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31]ถึงจุดวิบัติหลังเกิดโมเมนต์สูงสุดในหน้าตัด แต่ทั้ง 2 แบบจำลองถึงจุดวิบัติไม่แตกต่างกัน



ภาพที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30]



ภาพที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31]

อีกทั้งยังพบว่าโมเมนต์ดัดและสติฟเนสการดัด(Flexural Stiffness) น้อยลงเมื่อมีระยะเวลาเผาไฟนานขึ้น

ภาพที่ 5.5-5.7 ตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ

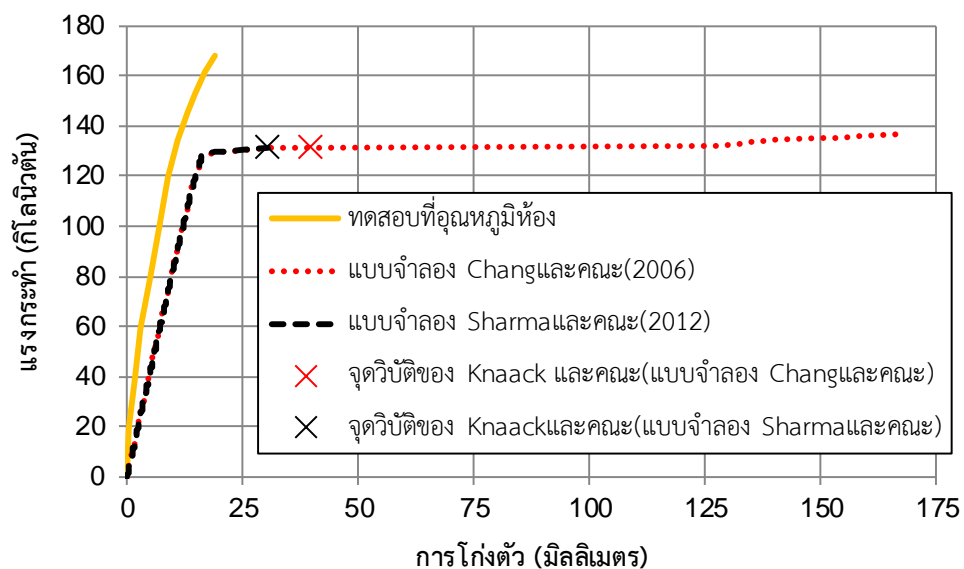
ตารางที่ 5.4-5.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดจากการทดสอบและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] ตามลำดับ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที พบว่าการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองของ Sharma และคณะ[31] มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาที เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนของแรงกระทำสูงสุดที่ใช้วิเคราะห์น้อยกว่า 10% อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความคลาดเคลื่อนของการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดค่อนข้างมาก แต่จากการวิเคราะห์ที่ใช้ทั้ง 2 แบบจำลองยังไม่เหมาะสมในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนของแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดมาก

ตารางที่ 5.4 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการทดสอบ Kumar และ Kumar[1] และการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาที

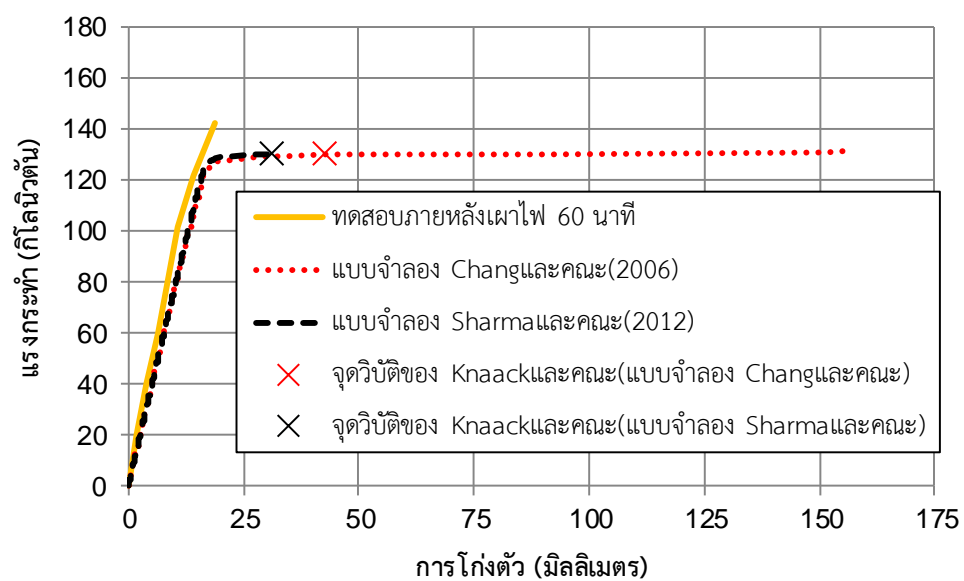
| การวิเคราะห์ที่ ภายหลังจากเผาไฟ | แรงกระทำ สูงสุดจาก การทดสอบ (กิโลนิวตัน) | แรงกระทำ สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (กิโลนิวตัน) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของแรง กระทำสูงสุด | การโก่งตัว สูงสุดจาก การทดสอบ (มิลลิเมตร) | การโก่งตัว สูงสุดจาก การ วิเคราะห์ (มิลลิเมตร) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของ การโก่งตัว สูงสุด |
|------------------------------------|---|---|---|--|--|---|
| 0 นาที (อุณหภูมิห้อง) | 168 | 137 | 18 | 19 | 167 | 779 |
| 60 นาที | 142 | 132 | 7 | 19 | 157 | 726 |
| 90 นาที | 121 | 128 | 6 | 23 | 156 | 578 |

ตารางที่ 5.5 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการทดสอบ Kumar และ Kumar[1] และการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Sharma และคณะ [31] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาที

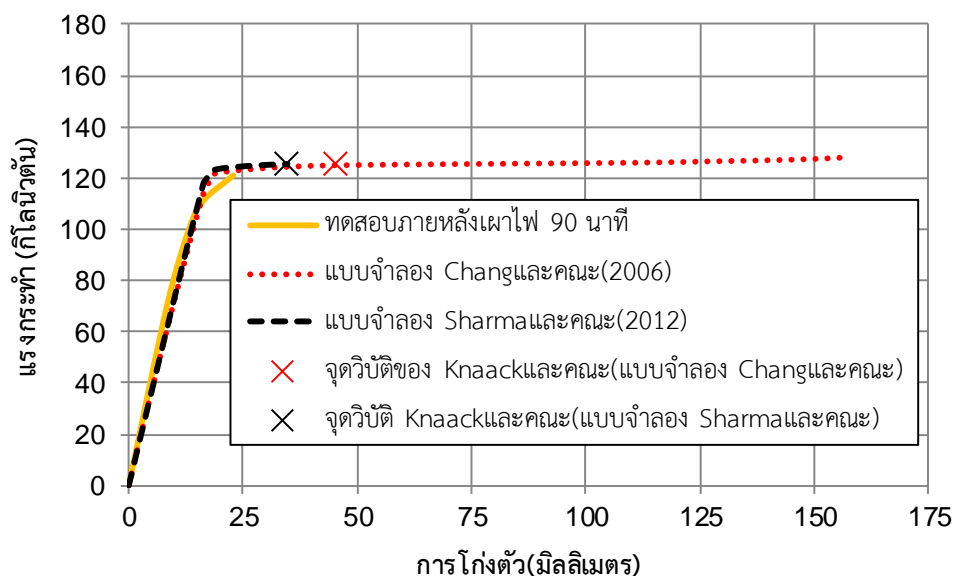
| การวิเคราะห์ที่ ภายหลังจากเผาไฟ | แรงกระทำ สูงสุดจาก การทดสอบ (กิโลนิวตัน) | แรงกระทำ สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (กิโลนิวตัน) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของแรง กระทำสูงสุด | การโก่งตัว สูงสุดจาก การทดสอบ (มิลลิเมตร) | การโก่งตัว สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (มิลลิเมตร) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของ การโก่งตัว สูงสุด |
|------------------------------------|---|---|---|--|--|---|
| 0 นาที (อุณหภูมิห้อง) | 168 | 131 | 22 | 19 | 30 | 58 |
| 60 นาที | 142 | 131 | 8 | 19 | 31 | 63 |
| 90 นาที | 121 | 126 | 4 | 23 | 35 | 52 |



ภาพที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 60 นาที

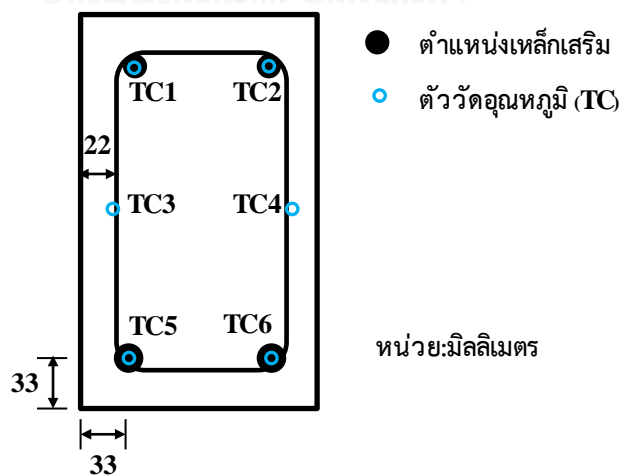


ภาพที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 90 นาที

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของทรงเกียร์ติ[2]

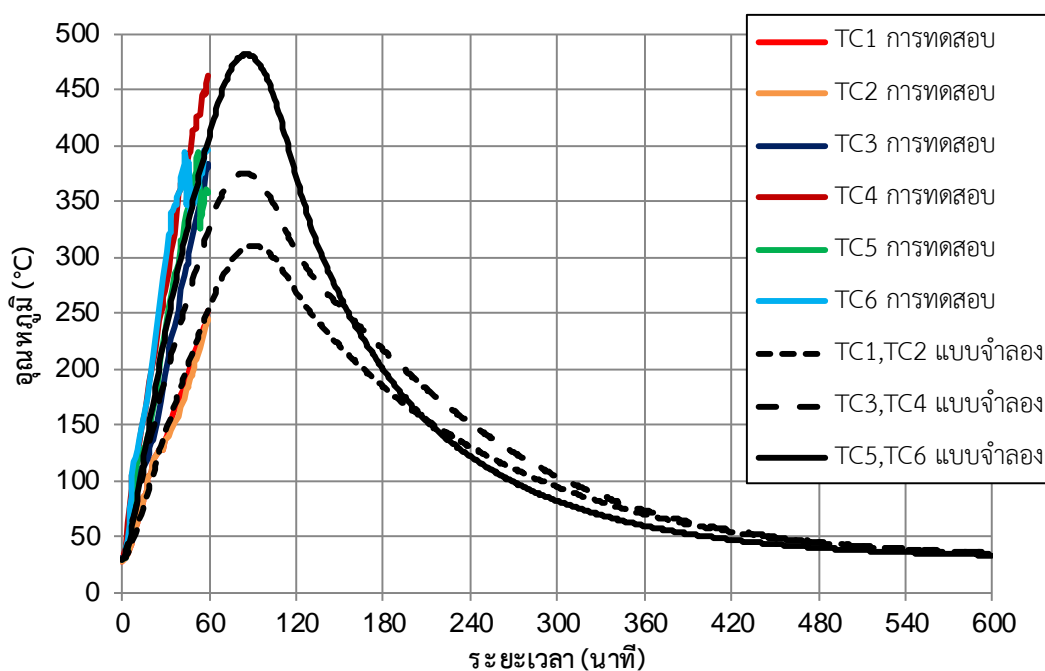
5.2.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ภาพที่ 5.8 แสดงตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กของทรงเกียร์ติ ได้แก่ตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง(TC5,TC6) เหล็กเสริมบน(TC1,TC2) และตำแหน่งเหล็กปลอก(TC3,TC4)

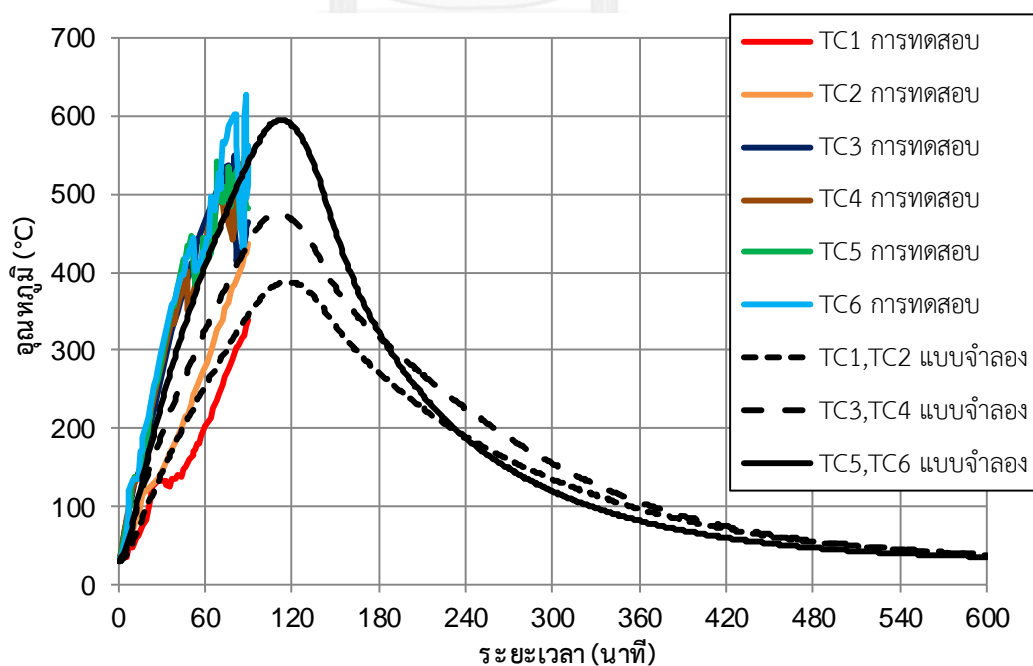


ภาพที่ 5.8 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

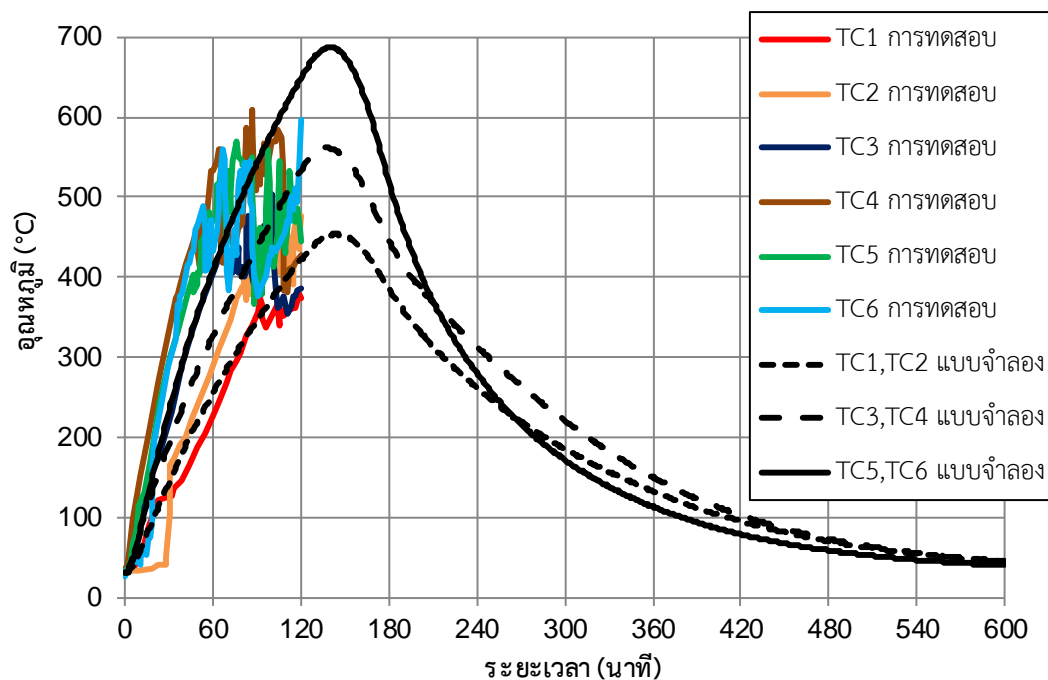
ภาพที่ 5.9-5.11 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเปรียบเทียบกับกราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจากการทดสอบการเผาไฟคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตำแหน่งตัววัดอุณหภูมิดังภาพที่ 5.8 จากกราฟวิเคราะห์ที่กราฟไฟ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 5.9 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 60 นาที



ภาพที่ 5.10 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 90 นาที



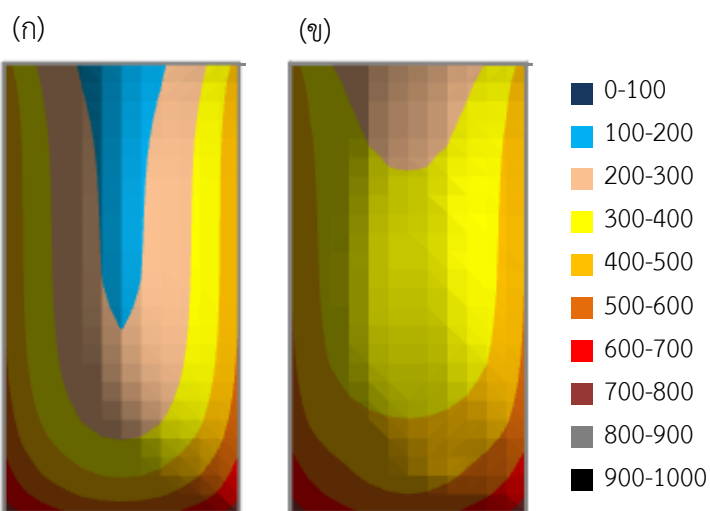
ภาพที่ 5.11 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 120 นาที

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิคานของทรงเกียรติ [2] มีรายละเอียดของแบบจำลองรวมถึงวิธีการสร้างแบบจำลองได้แสดงในบทที่ 3 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากกราฟไฟสำหรับวิเคราะห์ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาทีจะอยู่ในรูปแบบการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟเนื่องจากพบว่าอัตราการเย็นตัวของคอนกรีตจะทำให้หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสียหายมากขึ้น โดยได้แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟจากกราฟไฟที่ใช้วิเคราะห์ที่เวลา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาทีดังภาพที่ 5.12-5.14 ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากมีอิทธิพลอย่างมากต่อโมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานสามารถรับได้ พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กเสริม 18% 10% และ 6% ที่กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาทีตามลำดับ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะลดลงเมื่อระยะเวลาการเผาเพิ่มขึ้น ดังตารางที่ 5.6

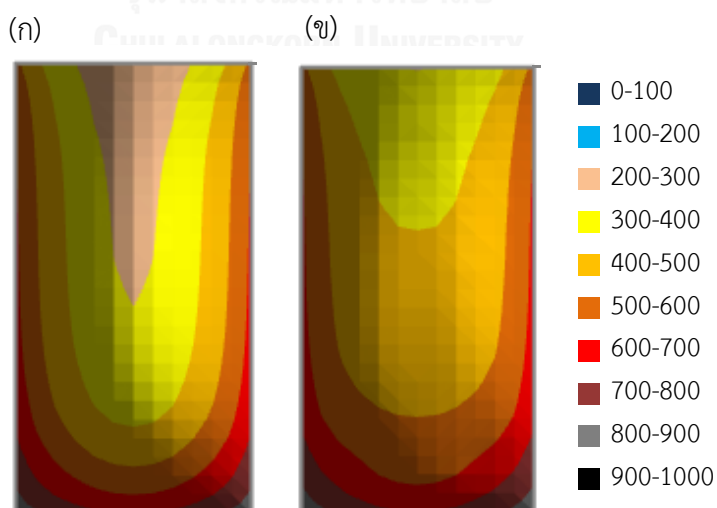
ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมล่างของคานขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟ

| กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ | อุณหภูมิสูงสุดขณะเผาไฟ(°C) | อุณหภูมิสูงสุดภายหลังเผาไฟ(°C) | เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ |
|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 60 นาที | 409 | 482 | 18 |
| 90 นาที | 542 | 594 | 10 |
| 120 นาที | 649 | 687 | 6 |



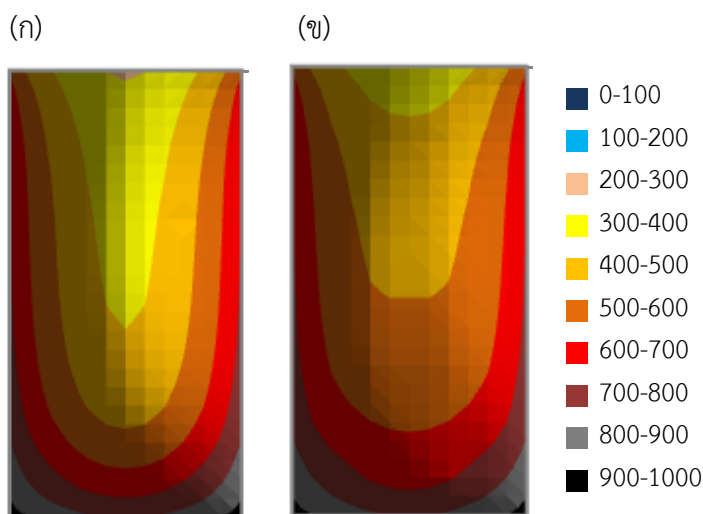
ภาพที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานที่กราฟไฟ 60 นาที

(ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ



ภาพที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานที่กราฟไฟ 90 นาที

(ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ



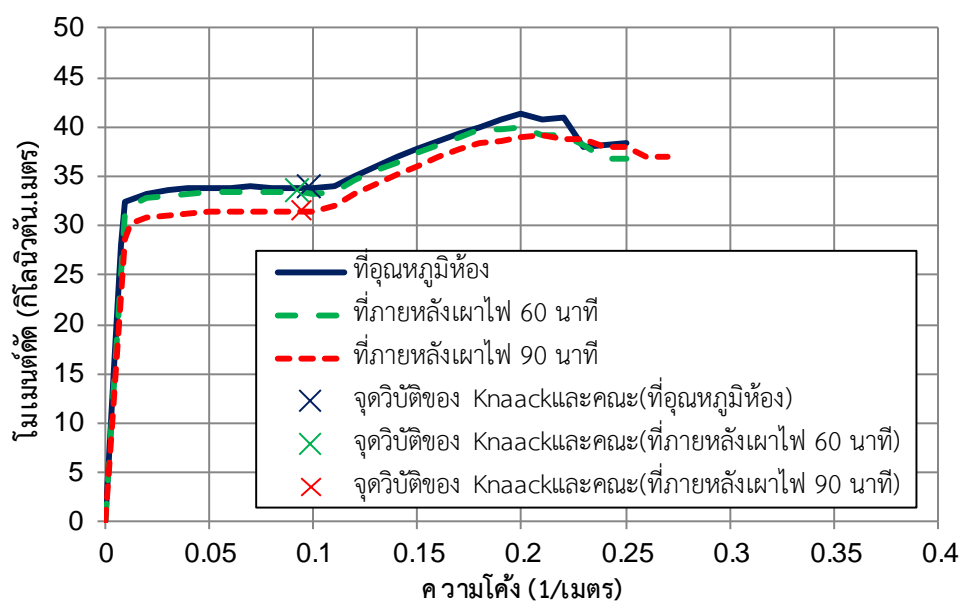
ภาพที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานที่กราฟไฟ 120 นาที
(ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังกเผาไฟ

5.2.2 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังกเผาไฟ

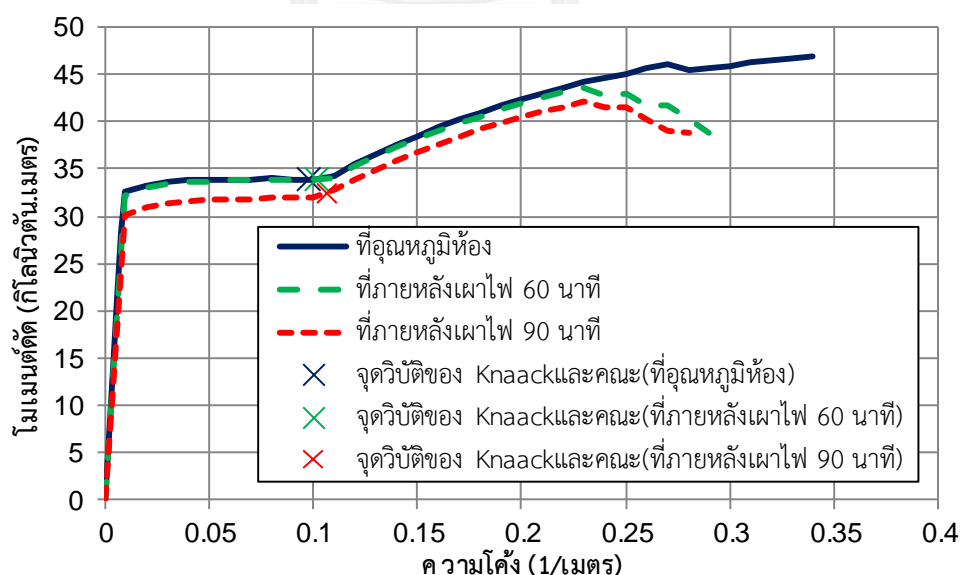
ภาพที่ 5.15-5.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังกเผาไฟจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] ตามลำดับ และได้กำหนดจุดวิบัติของคานจากความเครียดสูงสุดของคอนกรีตจากขอบรับแรงอัดจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46] (จุดกากบาทในกราฟ) และมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] (จุดสิ้นสุดของกราฟ) โดยมีลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและภายหลังกเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาที เริ่มจากเหล็กเสริมล่างคราก ถัดมาด้วยเหล็กเสริมบนคราก และคอนกรีตอัดแตก(ความเครียดของคอนกรีตที่ขอบรับแรงอัดมากกว่าความเครียดสูงสุดของคอนกรีตที่ได้กำหนดไว้)

ผลการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งพบว่าลักษณะของกราฟของทั้ง 2 แบบจำลองไม่ต่างกันในช่วงแรกเนื่องจากโมเมนต์ส่วนใหญ่เกิดจากแรงในเหล็กเสริม เมื่อพิจารณาจุดวิบัติจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] พบว่ามีโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นช่วงที่ความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าสูง จนทำให้เหล็กเสริมอยู่ในช่วงการเพิ่มความแข็งแรงด้วยความเครียด (Strain hardening stage) ทำให้เหล็กเสริมสามารถรับความเค้นได้สูงขึ้น จึงส่งผลทำให้โมเมนต์ดัดในหน้าตัดสูงขึ้น รวมถึงพบว่าผลการวิเคราะห์ของทั้ง 2 แบบจำลองที่ภายหลังกเผาไฟถึงจุดวิบัติไม่แตกต่างกัน แต่สำหรับการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องพบว่าแบบจำลองของ Sharma และคณะ [31] ถึงจุดวิบัติช้ากว่าแบบจำลองของ Chang และคณะ[30]

เมื่อพิจารณาจุดวิบัติจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ [46] พบว่าการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบจำลองถึงจุดวิบัติไม่แตกต่างกัน และถึงจุดวิบัติก่อนที่โมเมนต์จะสูงขึ้นจากผลของการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด อีกทั้งยังพบว่าโมเมนต์ดัดและสติฟเนสการดัด (Flexural stiffness) ที่ได้จากผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบจำลองมีค่าน้อยลงเมื่อมีระยะเวลาเผาไฟนานขึ้น

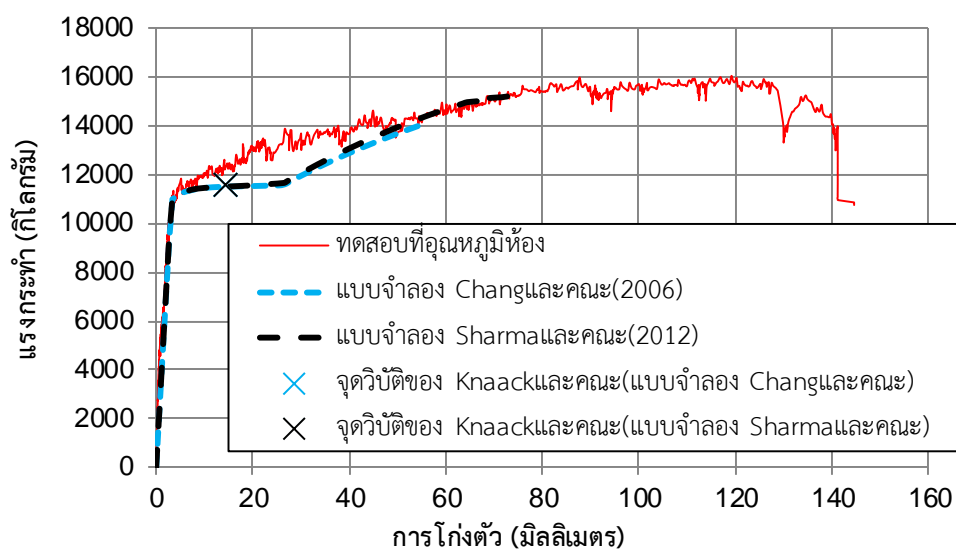


ภาพที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ [30]

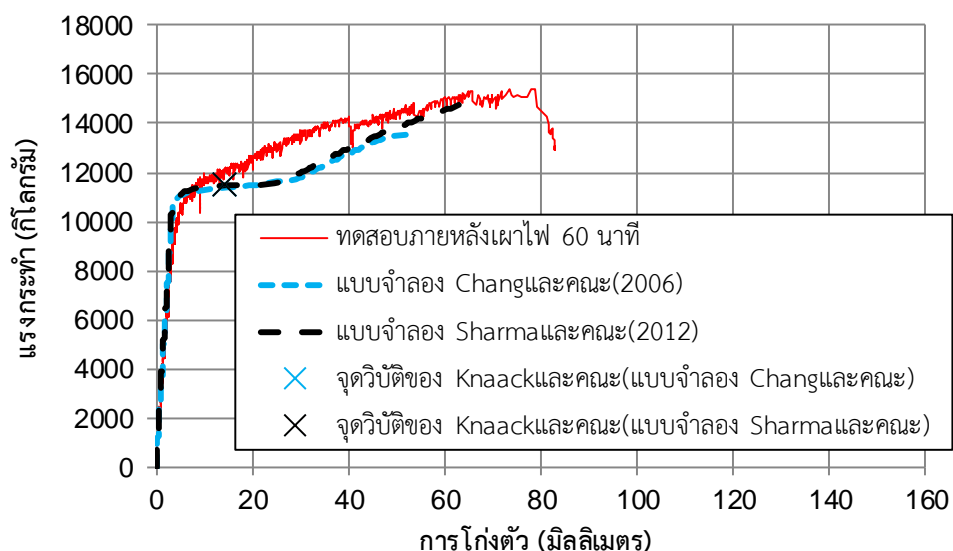


ภาพที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ [31]

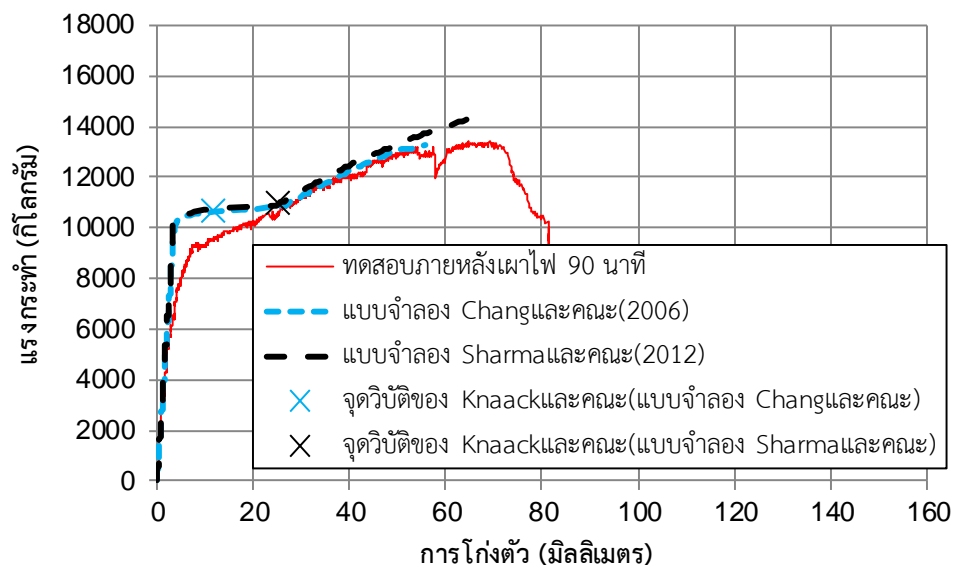
ภาพที่ 5.17-5.19 ตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟของทรงเกียรติ [2] ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาที ตามลำดับ



ภาพที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที



ภาพที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 90 นาที

จากการศึกษาพฤติกรรมการตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวที่ได้จากการทดสอบของทรงเกียรติ[2] พบว่าได้แสดงจุดวิบัติของคานได้แก่ แรงกระทำแตกร้าว แรงกระทำคราก แรงกระทำแตกหัก และแรงกระทำประลัย แสดงให้เห็นพฤติกรรมการตัดของคานจนกระทั่งคานวิบัติ จึงใช้การทดสอบนี้เป็นการทดสอบหลักในการเปรียบเทียบพฤติกรรมการตัดของคานภายหลังเผาไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์มีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดสอบแต่มีการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดน้อยกว่าการทดสอบ

ตารางที่ 5.7-5.8 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดจากผลการทดสอบและการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] ตามลำดับ ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที พบว่าการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองของ Sharma และคณะ[31] มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ทั้งที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนของแรงกระทำสูงสุดที่ใช้วิเคราะห์น้อยกว่า 10% อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความคลาดเคลื่อนของการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโค้งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการทดสอบ ทรงเกียรติ[2] และการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] ของ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที

| การวิเคราะห์ที่ ภายหลังจากเผาไฟ | แรงกระทำ สูงสุดจาก การทดสอบ (กิโลกรัม) | แรงกระทำ สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (กิโลกรัม) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของแรง กระทำสูงสุด | การโค้งตัว สูงสุดจาก การทดสอบ (มิลลิเมตร) | การโค้งตัว สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (มิลลิเมตร) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของ การโค้งตัว สูงสุด |
|------------------------------------|---|---|---|--|--|---|
| 0 นาที (อุณหภูมิห้อง) | 16058 | 14016 | 13 | 119 | 54 | 55 |
| 60 นาที | 15405 | 13558 | 12 | 78 | 53 | 32 |
| 90 นาที | 13420 | 13252 | 1 | 69 | 56 | 19 |

ตารางที่ 5.8 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโค้งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการทดสอบ ทรงเกียรติ[2] และการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Sharma และคณะ[31] ของ คานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากเผาไฟ 60 นาทีและ 90 นาที

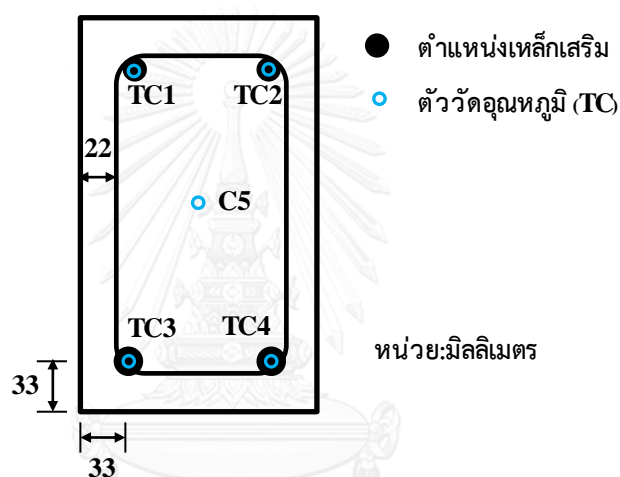
| การวิเคราะห์ที่ ภายหลังจากเผาไฟ | แรงกระทำ สูงสุดจาก การทดสอบ (กิโลกรัม) | แรงกระทำ สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (กิโลกรัม) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของแรง กระทำสูงสุด | การโค้งตัว สูงสุดจาก การทดสอบ (มิลลิเมตร) | การโค้งตัว สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (มิลลิเมตร) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของ การโค้งตัว สูงสุด |
|------------------------------------|---|---|---|--|--|---|
| 0 นาที (อุณหภูมิห้อง) | 16058 | 15291 | 5 | 119 | 74 | 38 |
| 60 นาที | 15405 | 14781 | 4 | 78 | 64 | 18 |
| 90 นาที | 13420 | 14271 | 6 | 69 | 64 | 7 |

5.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กของไกรวุฒิ[3]

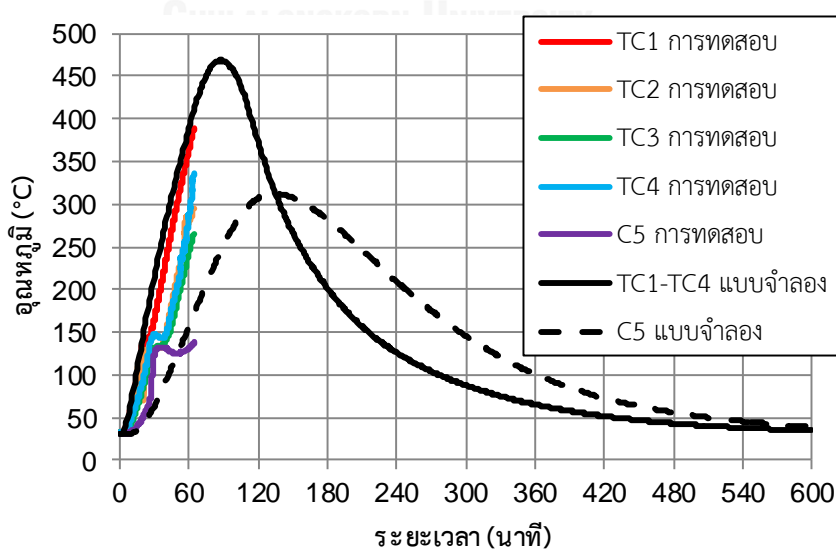
5.3.1 การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ภาพที่ 5.21-5.23 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเปรียบเทียบกับกราฟระหว่างอุณหภูมิและเวลาจากการวัดอุณหภูมิคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ตำแหน่งดังภาพที่ 5.12 จากการวิเคราะห์ที่กราฟไฟ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ

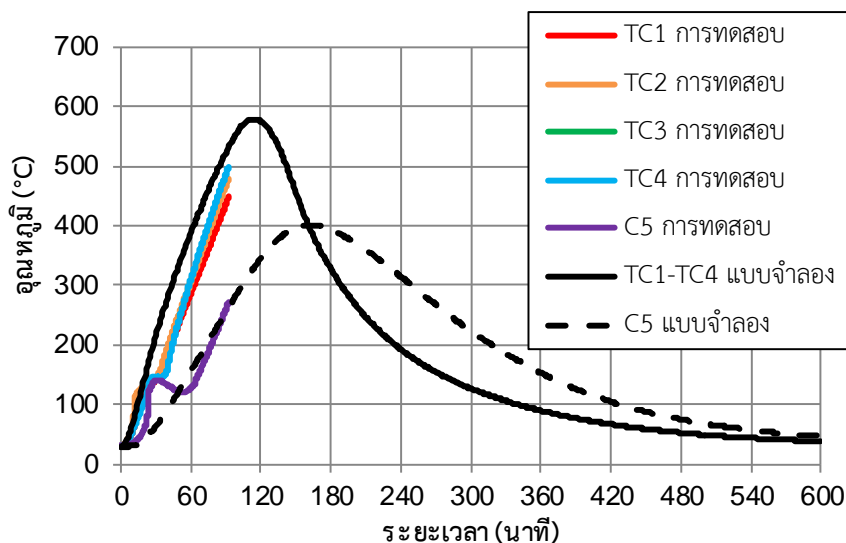
ภาพที่ 5.20 แสดงตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กของไกรวุฒิ ได้แก่ตำแหน่งเหล็กเสริมล่าง เหล็กเสริมบน และตำแหน่งกึ่งกลางหน้าตัด



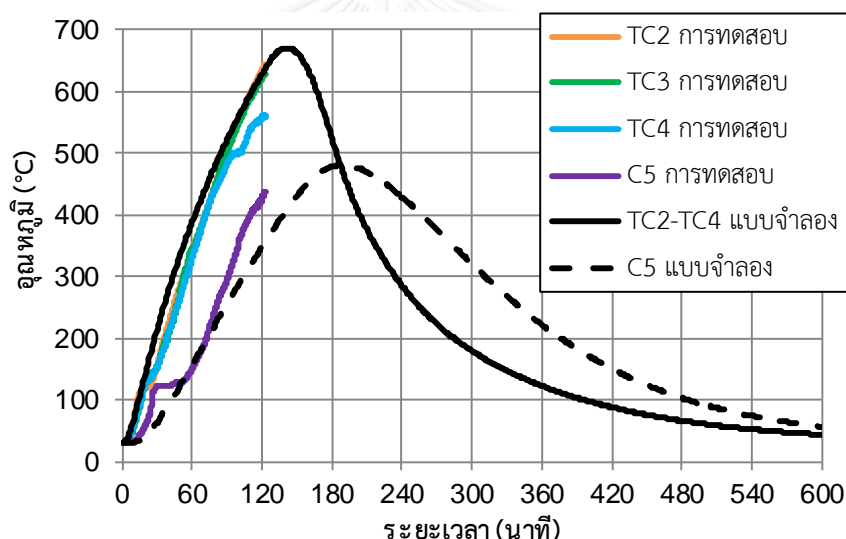
ภาพที่ 5.20 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก



ภาพที่ 5.21 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 60 นาที



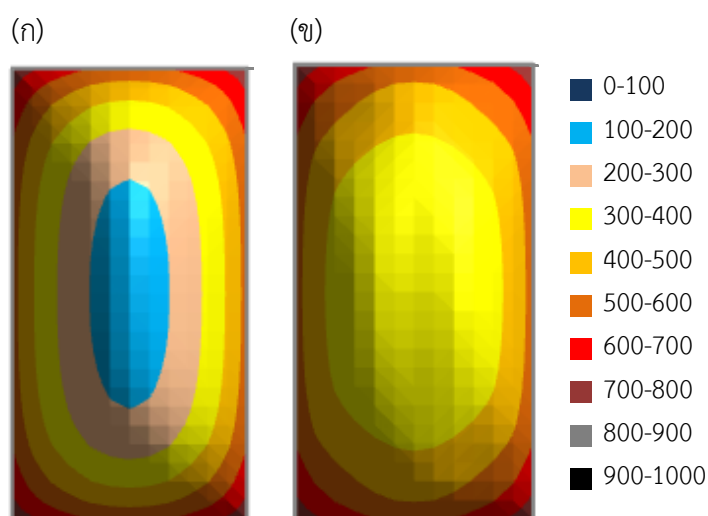
ภาพที่ 5.22 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบเผาไฟคานที่กราฟไฟ 90 นาที



ภาพที่ 5.23 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการวัดอุณหภูมิคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่กราฟไฟ 120 นาที

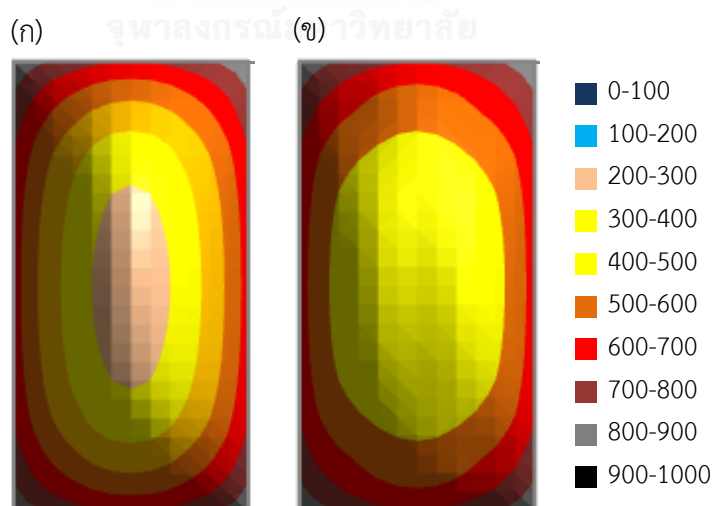
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิคานคอนกรีตเสริมเหล็กของไกรวุฒิ [3] ทั้งการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ และคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟที่เสริมแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะมีลักษณะเหมือนกัน เนื่องจากได้ติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยภายหลังจากคานคอนกรีตเสริมเหล็กเผาไฟแล้วเย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง และไม่พิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในหน้าตัดเนื่องจากจากการซ่อมแซมคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยมอร์ตาร์ก่อนการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และมีรายละเอียดของแบบจำลองรวมถึงวิธีการสร้างแบบจำลองได้แสดงในบทที่ 3

ภาพที่ 5.24-5.26 แสดงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากกราฟไฟสำหรับในรูปแบบการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟเนื่องจากพบว่าอัตราการเย็นตัวของคอนกรีตจะทำให้หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเสียหายมากขึ้น โดยได้แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานขณะเผาไฟและภายหลังเผาไฟจากกราฟไฟที่ใช้วิเคราะห์ที่เวลา 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ



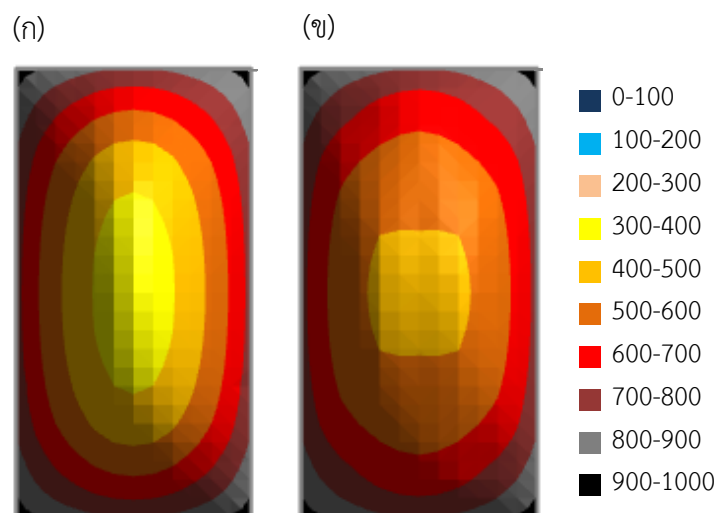
ภาพที่ 5.24 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานที่เวลา 60 นาที

(ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ



ภาพที่ 5.25 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานที่เวลา 90 นาที

(ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังเผาไฟ



ภาพที่ 5.26 ผลการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานที่เวลา 120 นาที
(ก) ขณะเผาไฟ (ข) ภายหลังจากเผาไฟ

และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหล็กเสริมล่างในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กเนื่องจากมีอิทธิพลอย่างมากต่อค่าโมเมนต์ดัดสูงสุดที่คานสามารถรับได้พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กเสริม 20% 11% และ 7% ที่กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาที ตามลำดับ แต่อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะลดลงเมื่อมีระยะเวลาการเผานานขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 เปรียบเทียบอุณหภูมิสูงสุดในเหล็กเสริมล่างของคานคอนกรีตเสริมเหล็กขณะเผาไฟและภายหลังจากเผาไฟ

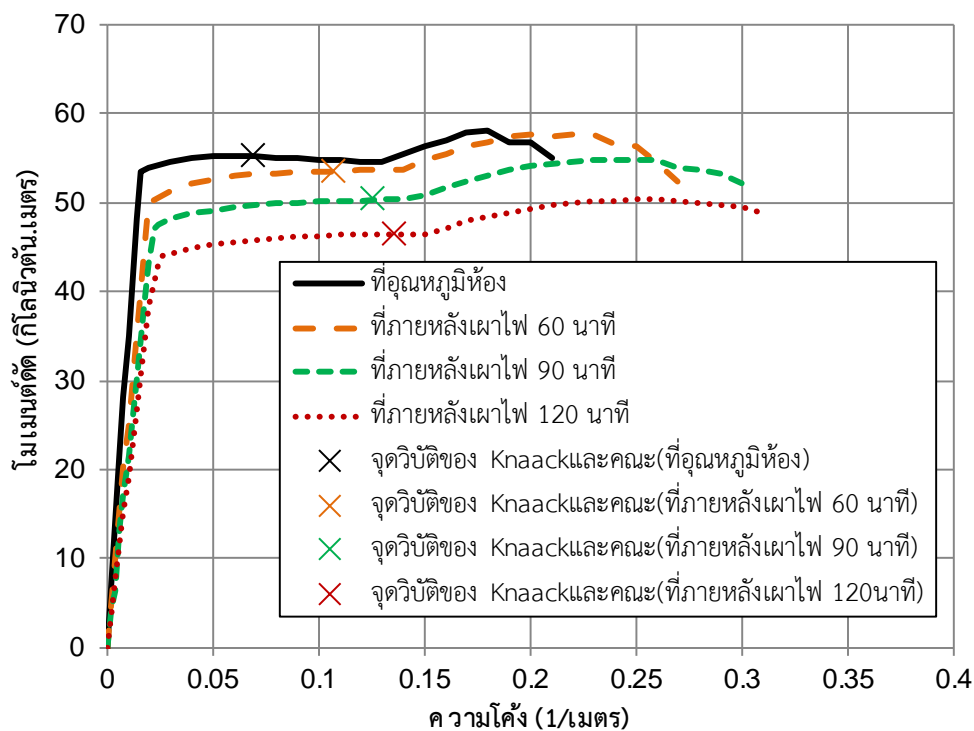
| กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ | อุณหภูมิสูงสุดขณะเผาไฟ(°C) | อุณหภูมิสูงสุดภายหลังจากเผาไฟ(°C) | เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 60 นาที | 389 | 468 | 20 |
| 90 นาที | 523 | 579 | 11 |
| 120 นาที | 629 | 671 | 7 |

5.3.2 การวิเคราะห์การตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ

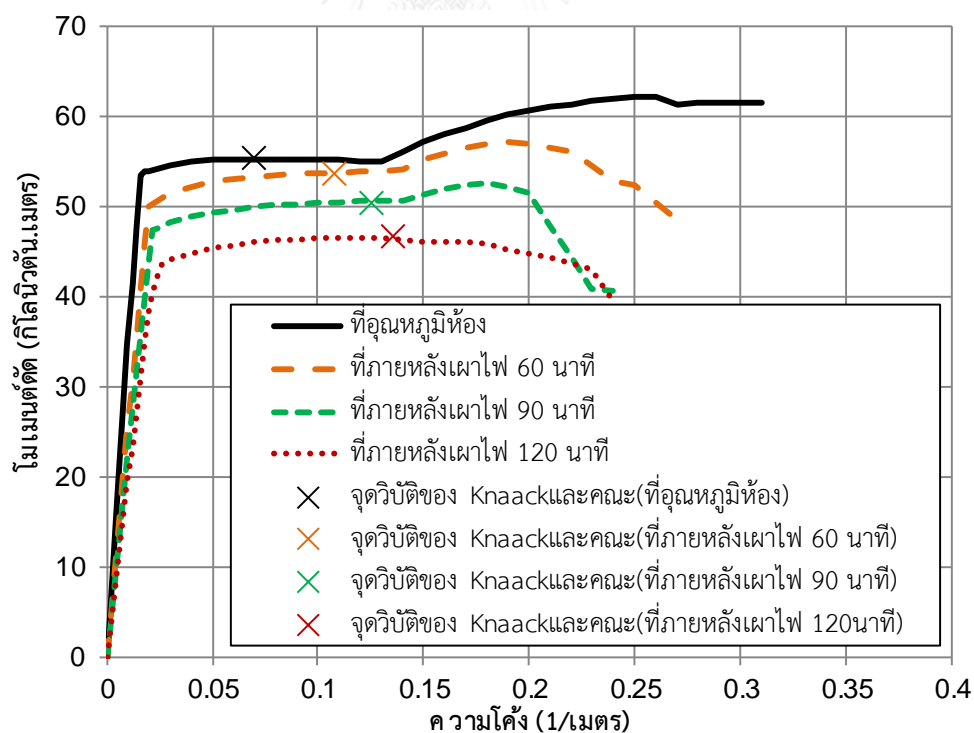
ภาพที่ 5.27-5.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] ตามลำดับ และได้กำหนดจุดวิบัติของคานจากความเครียดสูงสุดของคอนกรีตจากขอบรับแรงอัดจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46] (จุดกากบาทในกราฟ) และมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] (จุดสิ้นสุดของกราฟ) โดยมีลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ 60 นาที และ 90 นาทีของทั้ง 2 แบบจำลองเริ่มจากเหล็กเสริมล่างคราก ถัดมาด้วยเหล็กเสริมบนคราก และคอนกรีตอัดแตก ส่วนลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่ภายหลังเผาไฟ 120 นาทีของทั้ง 2 แบบจำลอง จะเริ่มจากเหล็กบนคราก ถัดมาด้วยเหล็กล่างคราก และคอนกรีตอัดแตก ซึ่งอาจเกิดจากเป็นการวิเคราะห์จากการเผาไฟคาน 4 ด้านที่ภายหลังเผาไฟ 120 นาทีซึ่งมีการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดสูง ทำให้ไม่มีแรงในคอนกรีตที่บริเวณขอบนอกของหน้าตัดจากการกำหนดให้ไม่มีความเค้นในคอนกรีตเมื่อมีอุณหภูมิสูงกว่า 800°C ส่งผลให้ระยะแกนสะเทินมากเพื่อให้แรงในหน้าตัดสมดุล ทำให้ความเครียดที่เหล็กเสริมบนมีค่ามาก รวมถึงอุณหภูมิที่เหล็กเสริมบนและเหล็กเสริมล่างมีค่าเท่ากัน แต่เหล็กบนมีความเครียดครากต่ำกว่าเหล็กล่าง จึงถึงจุดครากก่อนเหล็กล่าง

ผลการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งพบว่า ลักษณะของกราฟของทั้ง 2 แบบจำลองไม่ต่างกันในช่วงแรกเนื่องจากโมเมนต์ส่วนใหญ่เกิดจากแรงในเหล็กเสริม เมื่อพิจารณาจุดวิบัติจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] พบว่ามีโมเมนต์ดัดเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นช่วงที่ความเครียดของคอนกรีตและเหล็กเสริมมีค่าสูง จนทำให้เหล็กเสริมอยู่ในช่วงการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด (Strain hardening stage) ทำให้เหล็กเสริมสามารถรับความเค้นได้สูงขึ้น จึงส่งผลทำให้โมเมนต์ดัดในหน้าตัดสูงขึ้น พบว่าโมเมนต์สูงสุดจากแบบจำลองของ Chang และคณะ[30] มีค่ามากกว่าแบบจำลองของ Sharma และคณะ[31] และการวิเคราะห์ที่ภายหลังเผาไฟของแบบจำลอง Sharma และคณะ[31] ถึงจุดวิบัติก่อนจากแบบจำลองของ Chang และคณะ[30] แต่สำหรับการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องพบว่ามีแบบจำลองของ Sharma และคณะ[31] ถึงจุดวิบัติภายหลังแบบจำลองของ Chang และคณะ[30] แต่ถ้าพิจารณาจุดวิบัติจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46] พบว่าการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟทั้ง 2 แบบจำลองถึงจุดวิบัติไม่แตกต่างกัน แต่ถึงจุดวิบัติก่อนที่โมเมนต์จะสูงขึ้นจากผลของการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด

อีกทั้งยังพบว่าโมเมนต์ดัดและสติเฟนสการดัดที่ได้จากผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบจำลองมีค่าน้อยลงเมื่อมีระยะเวลาเผาไฟนานขึ้น

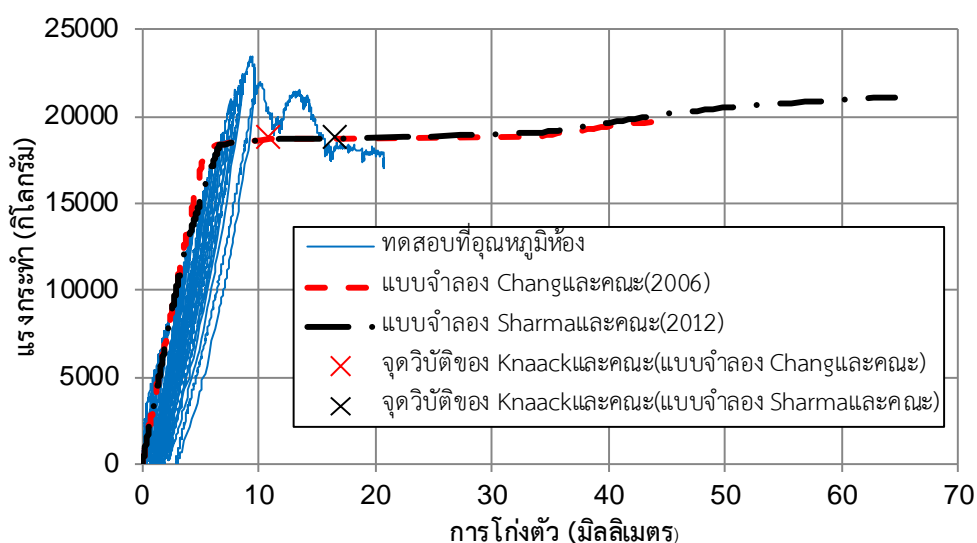


ภาพที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30]

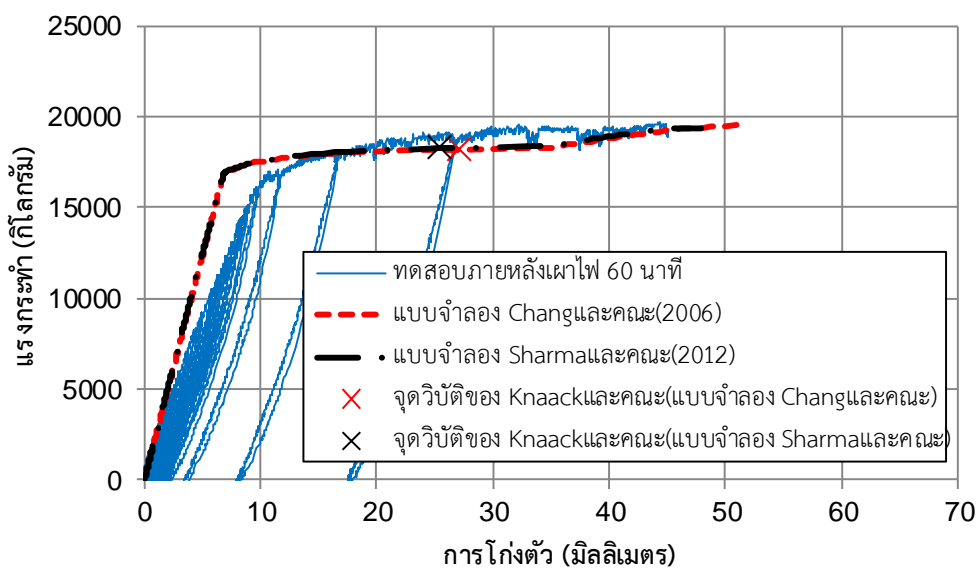


ภาพที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31]

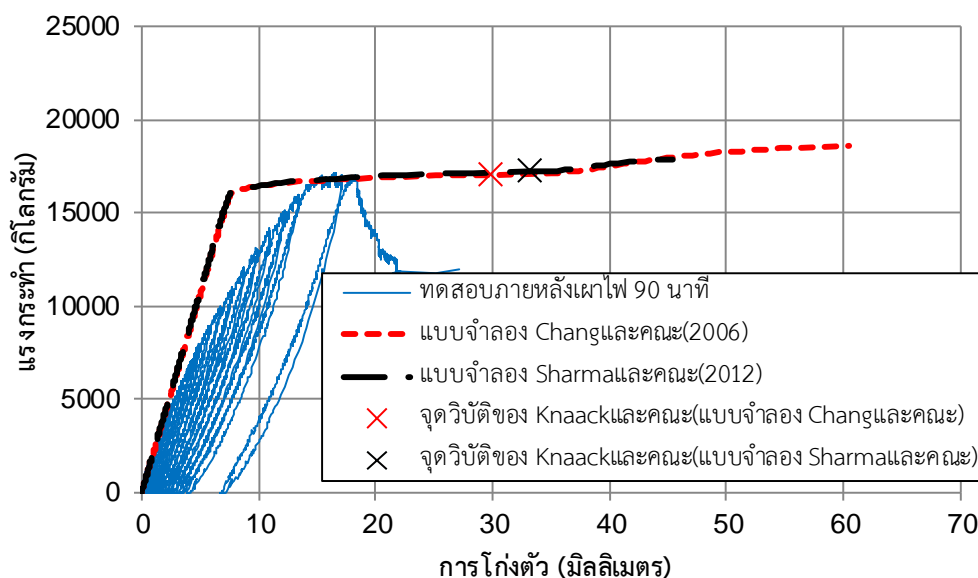
ภาพที่ 5.29-5.32 ตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟของไกรวุฒิ [3] ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาทีตามลำดับ



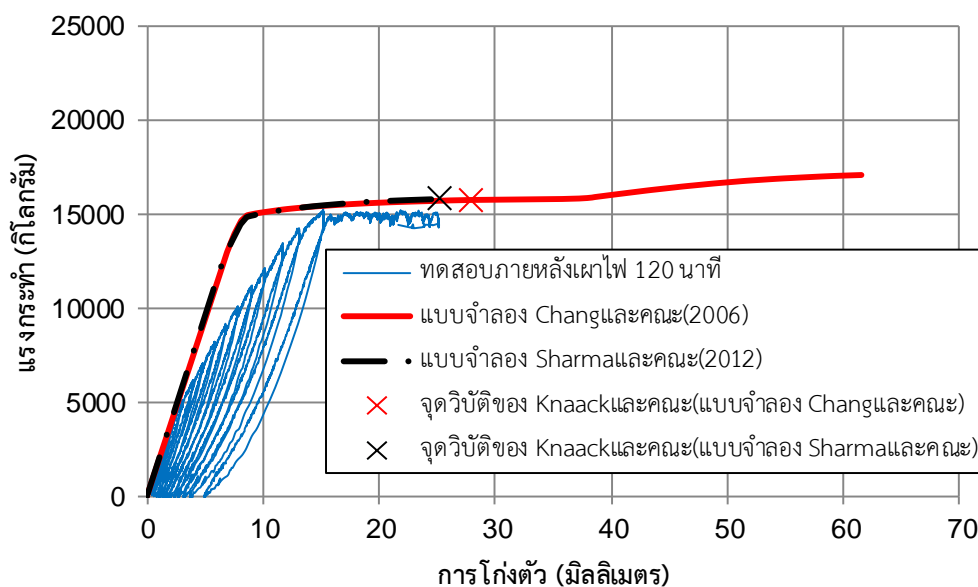
ภาพที่ 5.29 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 5.30 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที



ภาพที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 90 นาที



ภาพที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 120 นาที

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟ ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว พบว่าลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ของทั้ง 2 แบบจำลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดสอบแต่มีการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดมากกว่าการทดสอบ เนื่องจากพบว่าลักษณะวิบัติของคานที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 90 นาทีและ

120 นาที พบว่ามีลักษณะวิบัติที่เกิดจากการเฉือน (Shear failure) ซึ่งเกิดขึ้นก่อนการวิบัติแบบการดัด (Flexural failure) ทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กยังไม่ถูกพัฒนาได้เต็มที่ จึงไม่สามารถเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวสูงสุดที่แรงกระทำ สูงสุดได้ แต่ลักษณะวิบัติจากการทดสอบภายหลังเผาไฟ 60 นาทีที่เกิดจากการดัด (Flexural failure) จึงใช้เฉพาะการทดสอบภายหลังเผาไฟ 60 นาทีในการเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวสูงสุดดังตารางที่ 5.10 พบว่าการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองของ Sharma และคณะ[31] มีความเหมาะสมในการวิเคราะห์เนื่องจากมีคลาดเคลื่อนทั้งแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดน้อยกว่า 10% ตารางที่ 5.10 เปรียบเทียบค่าแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด จากผลการทดสอบทรงเกียรติ[2] และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] ของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 60 นาที

| การวิเคราะห์ที่ ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีจาก แบบจำลอง | แรงกระทำ สูงสุดจาก การทดสอบ (กิโลกรัม) | แรงกระทำ สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (กิโลกรัม) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของแรง กระทำสูงสุด | การโก่งตัว สูงสุดจาก การทดสอบ (มิลลิเมตร) | การโก่งตัว สูงสุดจาก การวิเคราะห์ (มิลลิเมตร) | เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อนของ การโก่งตัว สูงสุด |
|---|---|---|---|--|--|---|
| Changและ คณะ[30] | 19723 | 19572 | 1 | 44 | 51 | 16 |
| Sharmaและ คณะ[31] | 19723 | 19419 | 2 | 44 | 48 | 9 |

5.3.3 การวิเคราะห์การดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

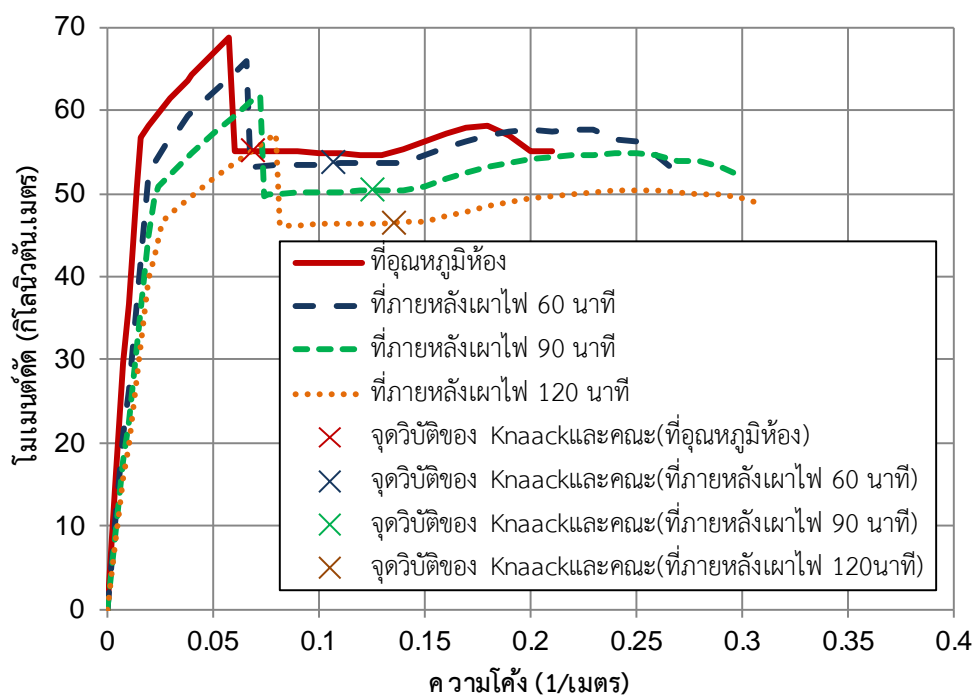
ภาพที่ 5.33-5.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งของหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคานคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] ตามลำดับ และได้กำหนดจุดวิบัติของคานจากความเครียดสูงสุดของคานคอนกรีตจากขอบรับแรงอัดจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46] (จุดกากบาทในกราฟ) และมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] (จุดสิ้นสุดของกราฟ) โดยมีลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิห้องของทั้ง 2 แบบจำลองเริ่มจากเหล็กเสริมล่างคราก ถัดมาด้วยการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

(FRP rupture) จากนั้นเหล็กเสริมบนคราก และคอนกรีตอัดแตก ส่วนลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาทีของทั้ง 2 แบบจำลอง เริ่มจากเหล็กเสริมล่างคราก ถัดมาด้วยเหล็กเสริมบนคราก จากนั้นเกิดการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และคอนกรีตอัดแตก สำหรับลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่ภายหลังเผาไฟ 90 นาทีของทั้ง 2 แบบจำลองพบว่าเหล็กเสริมล่างและเหล็กเสริมบนครากใกล้เคียงกัน ถัดมาด้วยการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตอัดแตก และสำหรับลักษณะวิบัติของคานจากการวิเคราะห์ที่ภายหลังเผาไฟ 120 นาทีของทั้ง 2 แบบจำลองเริ่มจากเหล็กเสริมบนคราก ถัดมาด้วยเหล็กเสริมล่างคราก จากนั้นเกิดการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตอัดแตก ซึ่งเหล็กเสริมบนครากก่อนเหล็กเสริมล่างเกิดจากสาเหตุเดียวกันกับการวิเคราะห์คานที่ไม่ได้เสริมกำลัง

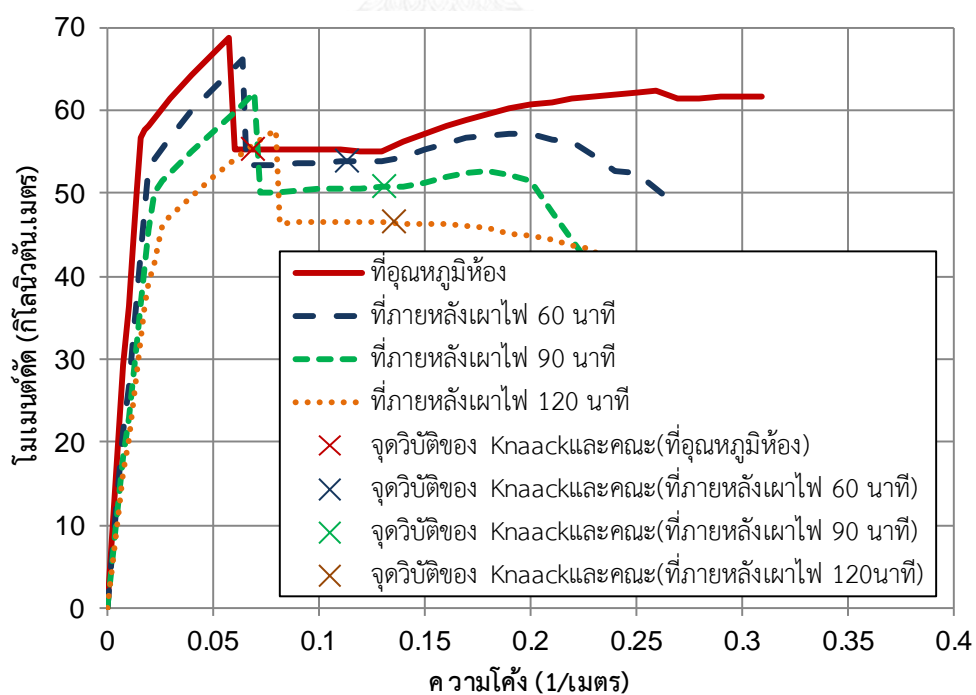
ผลการวิเคราะห์กราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งพบว่าลักษณะของกราฟของทั้ง 2 แบบจำลองไม่ต่างกันเนื่องจากโมเมนต์ส่วนใหญ่เกิดจากแรงในเหล็กเสริม อีกทั้งยังพบว่าภายหลังเหล็กเสริมล่างคราก คานยังสามารถรับโมเมนต์ได้เพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะเชิงเส้นเนื่องจากผลของการเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเป็นเชิงเส้นจนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยฉีกขาด โมเมนต์ในคานจะลดลงเนื่องจากไม่มีผลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจนคานวิบัติ ซึ่งในความเป็นจริงคานจะวิบัติภายหลังการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเนื่องจากโมเมนต์สูงสุดที่กระทำขณะที่คานเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีค่ามากกว่าโมเมนต์สูงสุดที่คานรับได้ขณะที่ไม่ได้เสริมกำลัง

เมื่อพิจารณาจุดวิบัติจากมาตรฐาน EN 1992-1-2[13] และจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46]พบว่าถึงจุดวิบัติภายหลังเกิดการฉีกขาดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยซึ่งเป็นจุดวิบัติของคาน ทำให้ไม่พิจารณาจุดวิบัติดังกล่าว และพบว่าโมเมนต์สูงสุดจากแบบจำลองของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] มีค่าไม่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบว่าโมเมนต์ดัดและสติฟเนสการดัดที่ได้จากผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 แบบจำลองมีค่าน้อยลงเมื่อมีระยะเวลาเผาไฟนานขึ้น

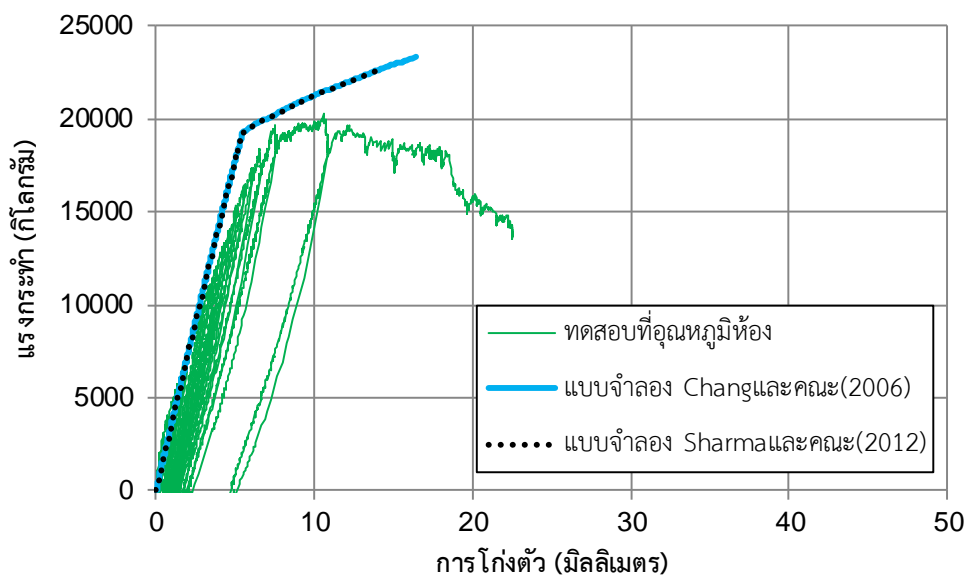
ภาพที่ 5.35-5.38 ตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30] และ Sharma และคณะ[31] โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยของไกรวุฒิ[3] ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟ 60 นาที 90 นาที และ 120 นาทีตามลำดับ



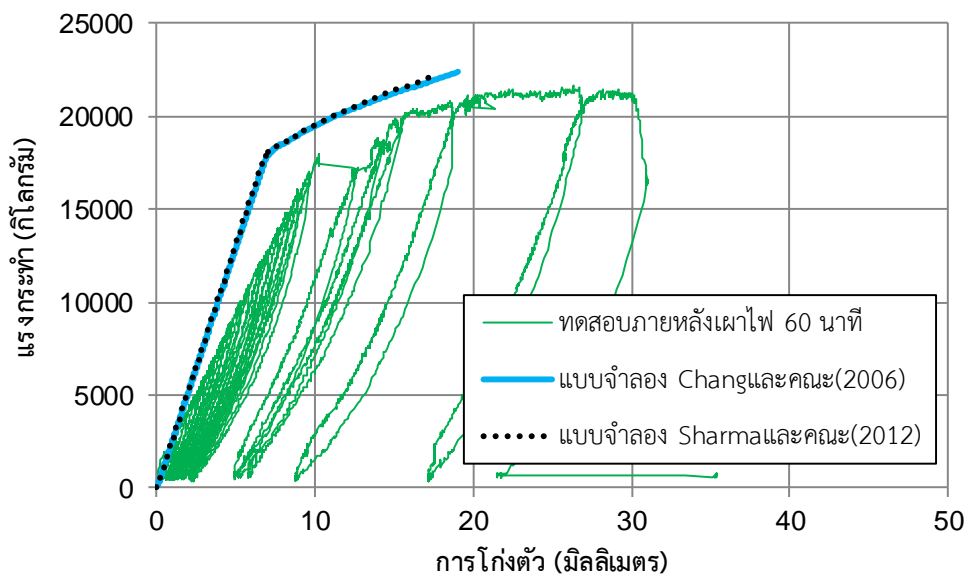
ภาพที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Chang และคณะ[30]



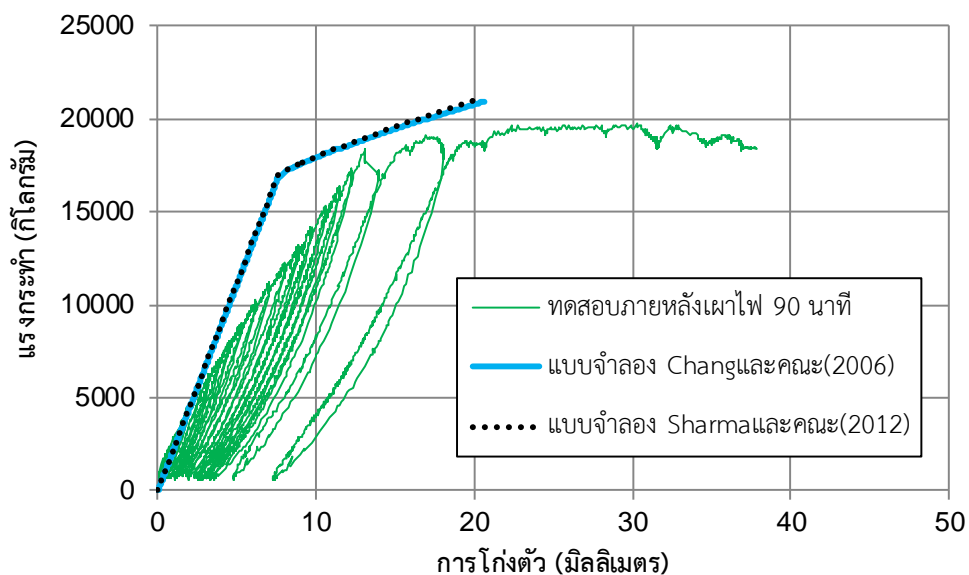
ภาพที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และค่าความโค้งของหน้าตัดคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟโดยใช้แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตของ Sharma และคณะ[31]



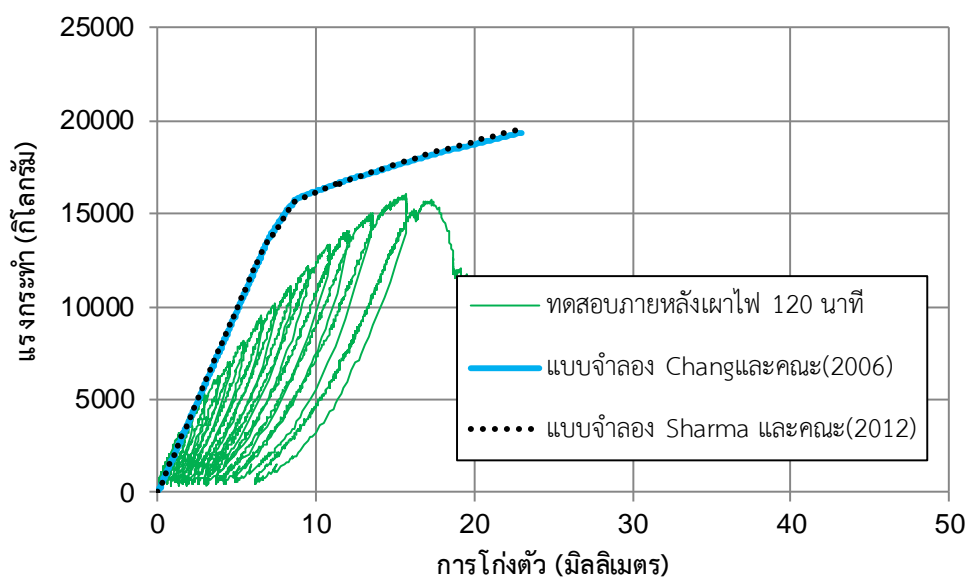
ภาพที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 60 นาที



ภาพที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 90 นาที



ภาพที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ภายหลังเผาไฟ 120 นาที

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว พบว่าลักษณะกราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ของทั้ง 2 แบบจำลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยพบว่าการวิเคราะห์ที่ใช้แบบจำลอง Changและคณะ[30] มีค่าแรงกระทำสูงสุด

มากกว่าแบบจำลอง Sharma และคณะ[31] เล็กน้อย แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบกับผลการทดสอบได้ เนื่องจากเกิดคานที่ใช้ทดสอบเกิดวิบัติแบบการเฉือน และแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลุดล่อน (FRP debonding) ทำให้ความสามารถในการรับแรงดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยยังไม่ถูกพัฒนาได้เต็มที่

เนื่องจากข้อจำกัดของผลการทดสอบที่ศึกษาพฤติกรรมการดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายหลังจากเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้ในการเปรียบเทียบ เพราะต้องทราบข้อมูลของอุณหภูมิในหน้าตัดที่ได้จากการวัดอุณหภูมิจากการทดสอบการเผาไฟเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และต้องเก็บข้อมูลการเย็นตัวของเตาเผาเพื่อใช้ในการจำลองการเย็นตัวของคาน รวมถึงทราบพฤติกรรมการดัดในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัว ในการศึกษาเพิ่มเติมควรทดสอบคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยเก็บผลการวัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดคาน รวมถึงเก็บข้อมูลการเย็นตัวของเตาเผาเพื่อให้มีข้อมูลจริงที่ใช้ในการวิเคราะห์มากที่สุด และคานคอนกรีตเสริมเหล็กควรจะติดแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในลักษณะที่ไม่ทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งจะทำให้เกิดพฤติกรรมการดัดอย่างสมบูรณ์ ผลการวิเคราะห์จึงจะมีความถูกต้องและใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากที่สุด

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิสูงสุดภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก 2 มิติ ที่เผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] โดยคำนึงถึงการเย็นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และนำเสนอการวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กช่วงเดียวที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังจากเผาไฟด้วยเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834[12] ทั้งที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและไม่ได้เสริมกำลังจากการวิเคราะห์หน้าตัดและตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์จากการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีตของ Kumar และ Kumar[1] ทรงเกียรติ[2] และไกรวุฒิ[3] ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติสามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟจากการวิเคราะห์อุณหภูมิในสถานะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้นได้อย่างเหมาะสม
2. ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าอัตราการเย็นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟมีผลต่อการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กโดยจะทำให้อุณหภูมิภายในคานคอนกรีตเสริมเหล็กมีค่าสูงขึ้น และการกระจายอุณหภูมิสูงสุดในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะเกิดขึ้นภายหลังได้รับความร้อนหรือช่วงที่คอนกรีตเย็นตัวลง โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กจะลดลงเมื่อมีระยะเวลาเผานานขึ้น
3. จุดวิบัติของกราฟที่กำหนดจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46] เมื่อใช้วิเคราะห์พบว่าไม่เหมาะสมเนื่องจากไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของคานภายหลังจากที่เหล็กเสริมในคานมีความเครียดที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียด (Strain hardening) ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงช่วงที่มีโมเมนต์สูงสุดได้ อีกทั้งเมื่อเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวจากการวิเคราะห์กับการทดสอบพบว่าการวิเคราะห์โดยใช้จุดวิบัติที่กำหนดจากงานวิจัยของ Knaack และคณะ[46] ทำให้คานถึงจุดวิบัติก่อนจุดวิบัติจริงที่ได้จากการทดสอบ

4. ผลการวิเคราะห์ในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์และความโค้งจากการวิเคราะห์โดยใช้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตจากแบบจำลองของ Chang และคณะ [30] และแบบจำลองของ Sharma และคณะ [31] พบว่าไม่แตกต่างกันในช่วงก่อนที่โมเมนต์จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเนื่องจากเกิดความเครียดที่เริ่มเกิดการเพิ่มความแข็งด้วยความเครียดของเหล็กเสริม เนื่องจากโมเมนต์ส่วนใหญ่เกิดจากแรงในเหล็กเสริม แต่การวิเคราะห์จากทั้ง 2 แบบจำลองมีความแตกต่างกันของจุดวิบัติจากมาตรฐาน EN 1992-1-2 [13] ซึ่งจากการวิเคราะห์และการทดสอบไม่สามารถทำนายค่าการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุด
5. การวิเคราะห์โดยใช้คุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตจากแบบจำลองของ Sharma และคณะ [31] พบว่ามีความเหมาะสมมากกว่าแบบจำลองของ Chang และคณะ [30] เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการโก่งตัวของคานจากการทดสอบของทรงเกียรติที่มีพฤติกรรมการตัดของคานที่อุณหภูมิห้องและภายหลังเผาไฟจนกระทั่งวิบัติพบว่ามีลักษณะของกราฟ รวมถึงแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากกว่า
6. การวิเคราะห์พฤติกรรมการตัดของคานภายหลังเผาไฟที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยพบว่ามีลักษณะของกราฟใกล้เคียงกับผลการทดสอบ แต่ไม่สามารถเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดและการโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดได้เนื่องจากคานเกิดวิบัติแบบการเฉือนและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลุดล่อน ซึ่งเกิดขึ้นก่อนการวิบัติแบบการตัด ทำให้ความสามารถในการรับแรงตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยยังไม่ถูกพัฒนาได้เต็มที่
7. การวิเคราะห์การโก่งตัวที่แรงกระทำสูงสุดของคานคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง ภายหลังเผาไฟของการทดสอบจาก Kumar และ Kumar [1] และทรงเกียรติ [2] ยังมีความคลาดเคลื่อน ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การวิเคราะห์อุณหภูมิจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 2 มิติ สามารถนำไปศึกษาผลของอัตราการเย็นตัวของคอนกรีตต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในคอนกรีตภายหลังเผาไฟได้ และถ้าทราบข้อมูลการเย็นตัวของคานคอนกรีตเสริมเหล็กคอนกรีตที่แน่นชัด จะทำให้การวิเคราะห์อุณหภูมิใกล้เคียงกับผลทดสอบมากยิ่งขึ้น และทำให้การวิเคราะห์พฤติกรรมการคัดของคานภายหลังเผาไฟใกล้เคียงกับผลการทดสอบมากขึ้นเช่นกัน
2. การวิเคราะห์ที่นำเสนอสามารถนำไปปรับปรุงเพื่อหาพฤติกรรมการคัดของคานรูปแบบอื่นได้ เช่น รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปตัวที (T-beam) และยังสามารถประยุกต์เพื่อหาพฤติกรรมของเสาภายหลังเผาไฟในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและโมเมนต์คัดได้



รายการอ้างอิง

1. Kumar, A. and V. Kumar, *Behaviour of RCC beams after exposure to elevated temperatures*. Journal of the Institution of Engineers (India): Civil Engineering Division, 2003. **84**(3): p. 165-170.
2. ทรงเกียรติ ชาญสันติ, พฤติกรรมของคานคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกไฟไหม้, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา 2544, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
3. ไกรวุฒิ สาดิศากยบุตร, พฤติกรรมการตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่ได้รับ ความเสียหาย จากเพลิงไหม้และซ่อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา. 2556, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
4. Haddad, R., M.J. Shannag, and A. Moh'd, *Repair of heat-damaged RC shallow beams using advanced composites*. Materials and Structures, 2008. **41**(2): p. 287-299.
5. Hsu, J.H. and C.S. Lin, *Effect of fire on the residual mechanical properties and structural performance of reinforced concrete beams*. Journal of Fire Protection Engineering, 2008. **18**: p. 245-274.
6. Lakhani, H., et al., *Prediction of post fire load deflection response of RC flexural members using simplistic numerical approach*. Structural Engineering and Mechanics, 2014. **50**(6): p. 755-772.
7. Ožbolt, J., et al., *3D numerical analysis of reinforced concrete beams exposed to elevated temperature*. Engineering Structures, 2014. **58**(0): p. 166-174.
8. Abramowicz M. and Kowalski R. *Residual mechanical material properties for reassessment of reinforced concrete structures after fire*. in *The 9th International Conference: Modern Building Materials, Structures and Techniques*. 2007. Lithuania.
9. Dwaikat, M.B. and V.K.R. Kodur, *Response of restrained concrete beams under design fire exposure*. Journal of Structural Engineering, 2009. **135**(11): p. 1408-1417.

10. Yuye, X., et al., *Experimental Study on Residual Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams after Exposure to Fire*. *Advanced Material Research* 2012. **457-458**: p. 183-187.
11. ธีญวัฒน์ โพธิศิริ, การออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยด้านอัคคีภัย. 2556, กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 325.
12. ISO 834-1, *Fire resistance tests- elements of building construction, in Part 1: general requirement*. 1999: Geneva.
13. EN 1992-1-2, *Eurocode 2: Design of concrete structures, in Part 1-2: general rules - structural fire design* 2004: Brussels(Belgium): European Committee for Standardization.
14. Lenwari A. and Thepchatri T., *Experimetal Study on RC Beams Strengthened with Carbon and Glass Fiber Sheets*. *Engineering Journal*, 2009. **13**(2): p. 9-18.
15. ANSYS Inc, *ANSYS:A Finite Element Computer Software and User Manual for Nonlinear Structural Analysis*. 2011: Canonsburg, Pennsylvania.
16. Wickstrom, U., *VERY SIMPLE METHOD FOR ESTIMATING TEMPERATURE IN FIRE EXPOSED CONCRETE STRUCTURES*. 1986, SWEDISH NATIONAL TESTING INSTITUTE: Sweden. p. 186-194.
17. ACI/TMS Committee 216, *ACI 216.1, in Standard Method for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies*. 1997.
18. Zandi, Y., O. Burnaz, and A. Durmus, *Determining the Temperature Distributions of Fire Exposed Reinforced Concrete Cross Sections with Different Methods*. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 2012. **4**(8): p. 782-788.
19. Burnaz, O. and A. Durmus. *Nonlinear thermal analysis of reinforced concrete beams exposed to fire*. in *Proceeeding of ULIBTK07 16th National Thermal Science and Technology Congress*. 2007. Kaysseri, Turkey.
20. Kodur, V.K.R., B. Yu, and M.M.S. Dwaikat, *A simplified approach for predicting temperature in reinforced concrete members exposed to standard fire*. *Fire Safety Journal*, 2013. **56**(0): p. 39-51.

21. American Society for Testing and Material (ASTM), *ASTM E119*, in *Standard methods of fire test of building construction and materials* 2001: West Conshohocken, Pennsylvania.
22. American Society of Civil Engineers (ASCE), *Structural fire protection: Manual of practice No. 78* 1992: New York.
23. Jacob, B., A. Balaji, and E. John, *Behaviour of concrete structures under fire – a comparative study between IS 456: 2000 and finite element software ANSYS*. American Journal of Engineering Research, 2013. **3**: p. 62-66.
24. IS 456, *Indian Standard Plain and Reinforced concrete*, in *Code of Practice*. 2000: New Delhi.
25. Abrams M.S., *Compressive strength of Concrete at Temperatures to 1600 F*, in *ACI Publication SP25, Paper SP25-2*,. 1971: Detroit.
26. Malhotra, H.L., *The effect of temperature on the compressive strength of concrete*, in *Magazine of Concrete Research* 1956. p. 85-94.
27. Slowanski L., Grabowski J., and Kosiorek M., *The influence of temperature on mechanical properties of reinforcing steel 34GS*. Inzynieria i Budownictwo, 1971. **4**: p. 157-161.
28. Slowanski L. and Zielinski W., *The influence of temperature on mechanical properties of steel 18G2*. Inzynieria i Budownictwo, 1973. **4**: p. 178-180.
29. Xiaoyong, L. and B. Fanjie, *Residual Strength for Concrete after Exposure to High Temperatures*, in *Innovative Computing and Information*, M. Dai, Editor. 2011, Springer Berlin Heidelberg. p. 382-390.
30. Chang, Y.F., et al., *Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures*. Cement and Concrete Research, 2006. **36**(10): p. 1999-2005.
31. Sharma, U., K. Zaidi, and N. Bhandari, *Residual Compressive Stress-Strain Relationship for Concrete Subjected to Elevated Temperatures*. Journal of Structural Fire Engineering, 2012. **3**(4): p. 327-350.

32. Tao, Z., X.Q. Wang, and B. Uy, *Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013. **25**(9): p. 1306-1316.
33. Attari, N., S. Amziane, and M. Chemrouk, *Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets*. Construction and Building Materials, 2012. **37**(0): p. 746-757.
34. Moetaz, M.E., et al., *Effect of Fire on Flexural Behavior of RC Beams* Construction and Building Materials, 1996. **10**(2): p. 147-150.
35. Ho, S.W., *A Study of the Mechanical Behavior of Concrete Members after fire*. 1989, National Taiwan Industrial and Technological Institute: Taiwan.
36. American Concrete Institute(ACI 318R-02), *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. 2002: Michigan.
37. Kodur, V.K.R., M.B. Dwaikat, and R.S. Fike, *An approach for evaluating the residual strength of fire-exposed RC beams*. Magazine of Concrete Research, 2010. **62**(7): p. 479-488.
38. Xiang, K. and G.-H. Wang, *Calculation of Flexural Strengthening of Fire-Damaged Reinforced Concrete Beams with CFRP Sheets*. Procedia Engineering, 2013. **52**(0): p. 446-452.
39. ACI Committee 440, *ACI 440.2R-02 Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structure*. 2002: Farmington Hills, Michigan.
40. Kodur, V.K.R., M.M.S. Dwaikat, and M.B. Dwaikat, *High-temperature properties of concrete for fire resistance modeling of structures*. ACI Materials Journal, 2008. **105**(5): p. 517-527.
41. ศุภณัฐ วุ่นประเสริฐ, พฤติกรรมรับแรงอัดของทรงกระบอกคอนกรีตที่เสียหายจากไฟช้อมแซมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, ภาควิศวกรรมโยธา. 2555, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
42. Kreith, F., R.M. Manglik, and M.S. Bohn, *Principles Of Heat Transfer*. 2011, Cengage Learning, Colorado, USA. .
43. Gao, W.Y., et al., *Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire*. Engineering Structures, 2013. **52**: p. 488-501.

44. EN 1991-1-2, *Eurocode 1 : Actions on structures -Part 1-2 : General actions, in Actions on structures exposed to fire*. 2002: Brussels.
45. Emberley, R.L., *A study into the behavior of reinforced-concrete columns under fire exposures using spreadsheet-based numerical model*. 2013, Worcester polytechnic institute: Worcester.
46. Knaack, A.M., Y.C. Kurama, and D.J. Kirkner, *Stress-Strain Properties of Concrete at Elevated Temperatures*. 2009, University of Notre Dame: Notre Dame, Indiana.



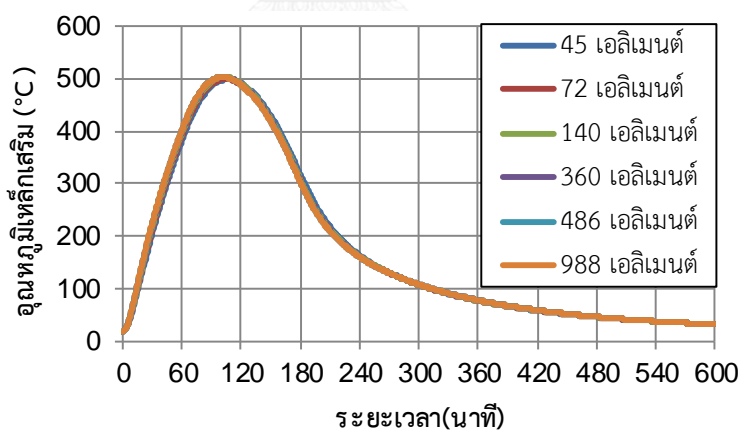


ภาคผนวก ก

การตรวจสอบความเหมาะสมของจำนวนอิเล็กเมนต์ในแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์
สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

การตรวจสอบความเหมาะสมของจำนวนอิเล็กเมนต์จากแบบจำลองไฟไนต์อิเล็กเมนต์จะอ้างอิงจากการสร้างแบบจำลองเพื่อเทียบกับผลการทดสอบของ Kumar และ Kumar[1] โดยจะพิจารณาจุดต่อที่แสดงอุณหภูมิในเหล็กเสริมกลางในการอ้างอิงการลู่เข้า (Convergence) ของอุณหภูมิเมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กเมนต์ จากการวิเคราะห์อุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนต์อิเล็กเมนต์ที่กราฟไฟ 60 นาที พบว่า จำนวนอิเล็กเมนต์ที่เพิ่มขึ้นในหน้าตัดส่งผลต่ออุณหภูมิในเหล็กเสริมกลางที่พิจารณาเพียงเล็กน้อยดังภาพที่ ก.1

ในงานวิจัยจะเลือกใช้อิเล็กเมนต์ในการสร้างแบบจำลองเพื่อเทียบกับผลการทดสอบของ Kumar และ Kumar[1] จำนวน 486 อิเล็กเมนต์ ส่วนการสร้างแบบจำลองเพื่อเทียบกับผลการทดสอบของทรงเกียรติ[2]และไกรวุฒิ[3] ที่มีขนาดหน้าตัดเท่ากัน จำนวน 288 อิเล็กเมนต์ โดยอิเล็กเมนต์มีขนาดไม่เกิน 15x15 มิลลิเมตร เพื่อความละเอียดของผลการวิเคราะห์ที่จะต้องนำไปใช้สำหรับวิเคราะห์หน้าตัดต่อไป



ภาพที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเหล็กเสริมและเวลาที่แปรผันตามจำนวนอิเล็กเมนต์ในหน้าตัดจากแบบจำลองเพื่อเทียบกับผลการทดสอบของ Kumar และ Kumar[1]

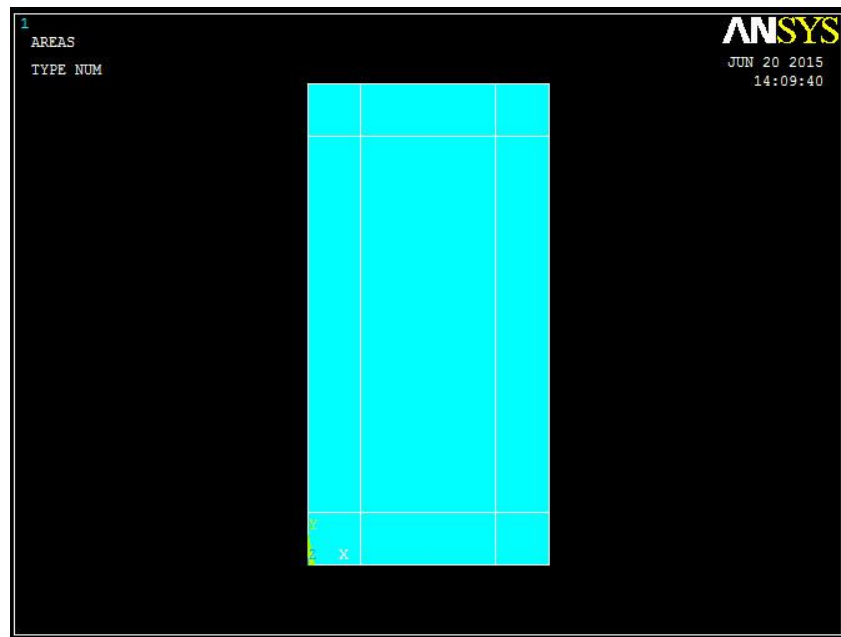
ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดด้วย
โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] 2 มิติ

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] 2 มิติมีดังนี้

1. Preferences>Thermal>OK
2. Preprocessor
 - 2.1 Element Type>Add/Edit/Delete>Add...>Solid>Quad4nodes55>OK>Close
 - 2.2 Material Props
 - 2.2.1 Temperature Units>Celsius>OK
 - 2.2.2 Material Models>Thermal
 - 2.2.2.1 Conductivity>Isotropic>input (ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อนของคอนกรีตและอุณหภูมิในรูปแบบตาราง)
 - 2.2.2.2 Specific heat>input (ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะของคอนกรีตและอุณหภูมิในรูปแบบตาราง)
 - 2.2.2.3 Density>input (ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของคอนกรีตและอุณหภูมิในรูปแบบตาราง)
 - 2.3 Modeling
 - 2.3.1 Create>Areas>Rectangle>input (พิกัด x และ y ในการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยม โดยสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมให้ผ่านตำแหน่งเหล็กเสริม ดังภาพที่ ข.1
 - 2.3.2 Operate>Booleans>Glue>Areas>Click Area (ทำให้พื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆเชื่อมกัน)
 - 2.4 Meshing>Mesh Tool>Size Controls>Line>Set>Click Line>OK>NDIV>input (จำนวนเส้นที่จะแบ่งที่ขอบของพื้นที่สี่เหลี่ยมด้านที่สนใจ)>OK>ทำทุกด้าน>Mesh>Click พื้นที่ที่ต้องการ>Close
3. Solution
 - 3.1 Analysis Type
 - 3.1.1 New Analysis>Transient>OK>Full>OK
 - 3.1.2 Sol'n Controls>Basic>

- 3.1.2.1 Time Control>Time at end of loadstep>input(เวลาสิ้นสุดการวิเคราะห์หน่วยวินาที)>Automatic time stepping>Off>Number of substeps>input(จำนวนขั้นตอนในการวิเคราะห์)
- 3.1.2.2 Frequency>Write every substep>OK



ภาพที่ ข.1 ลักษณะของการสร้างภาพสี่เหลี่ยมเล็กๆเชื่อมต่อกัน[15]

3.2 Define Loads

3.2.1 Settings>Uniform Temp>input (อุณหภูมิห้อง)

3.2.2 Apply

3.2.2.1 Functions>Define/Edit>input(สมการของกราฟไฟที่ใช้วิเคราะห์)>Read File>Open Function>ตั้งชื่อ Function

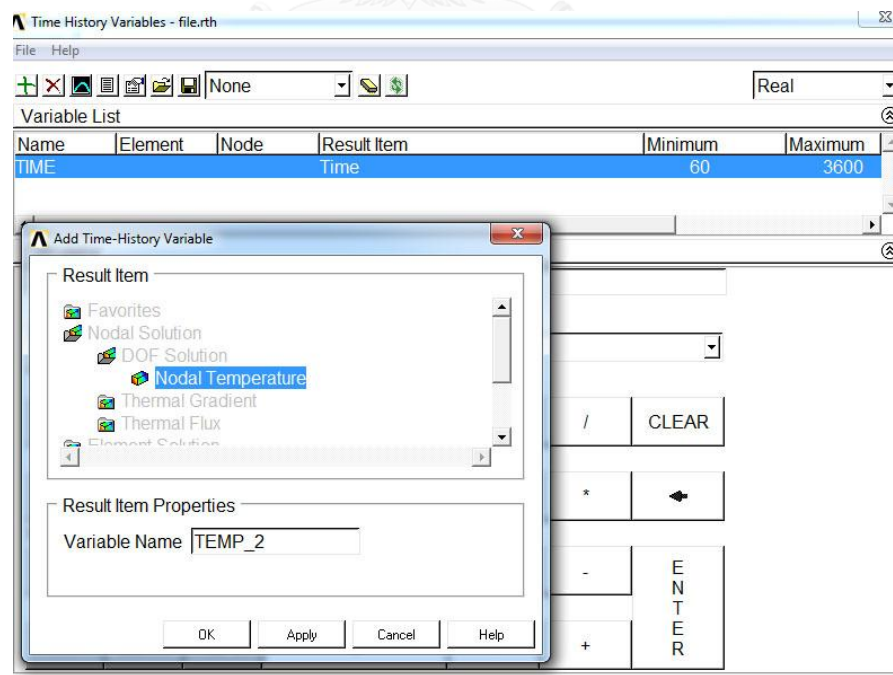
3.2.2.2 กรณีด้านที่ได้รับความร้อน Thermal>Convection>On Lines>Click เส้นที่ได้รับความร้อน>Film coefficient>input ($25 \text{ W/m}^2\text{C}$)>Apply Bulk Temp on lines>Existing table>เลือก File ที่ตั้งชื่อไว้>OK

3.2.2.3 กรณีด้านที่ไม่ได้รับความร้อน Thermal>Convection>On Lines>Click
เส้นที่ไม่ได้รับความร้อน>Film coefficient>input (9 W/m²°C)>Apply
Bulk Temp on lines>constant values>Bulk Temperature>input
(อุณหภูมิภายนอกของผิวคอนกรีตที่ไม่ได้รับความร้อน)

3.3 Solve>Current LS>OK

วิธีแสดงผลที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิมี 2 รูปแบบ (โดยจะต้องเลือกจุดต่อที่สนใจก่อน)

1. แสดงผลของอุณหภูมิที่จุดต่อ(Nodes)หรือที่เวลาเผาไฟที่ต้องการ
>General Postproc
 - 1.1 Read Results>By Time>input (เวลาเผาไฟที่ต้องการแสดงผลของอุณหภูมิหน่วยวินาที)
 - 1.2 List Results>Nodal solution>DOF Solution>Nodal Temperature>OK
2. แสดงผลของอุณหภูมิที่จุดต่อในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา ดังภาพที่ ข.2
>TimeHist Postpro>Click เครื่องหมาย+ (Add DATA) >Nodal Solution>DOF
Solution>Nodal Temperature>ตั้งชื่อตัวแปร>OK>เลือกจุดต่อที่ต้องการให้แสดงผล(อาจ
กรอกเลขจุดต่อลงไปก็ได้) >OK>เลือกจุดต่อนั้น>Click รูปกระดาษ(List DATA)



ภาพที่ ข.2 การแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา[15]

วิธีเลือกจุดต่อ(Node)ในหน้าต่างที่ต้องการแสดงผลของอุณหภูมิ ดังภาพที่ ข.3

1. เลือกจุดต่อของพิกัด x และ y ที่สนใจ
 - 1.1 Select>Entities...>Node>By Location>x coordinate>input (ใส่พิกัด x)>From Full>OK
 - 1.2 Select>Entities...>Node>By Location>y coordinate>input (ใส่พิกัด y)>Reselect >OK
2. เลือกจุดต่อของหลัก x หรือแกน y สนใจ
 - 2.1 Select>Entities...>Node>By Location>x หรือ y coordinate>input (ใส่พิกัด xหรือ y)>From Full>OK



ภาพที่ ข.3 การเลือกจุดต่อที่ในหน้าต่างที่ต้องการแสดงผลของอุณหภูมิ[15]

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ
ที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การวิเคราะห์หน้าตัดจะใช้โปรแกรม Microsoft office Excel 2010 เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โดยได้ใช้ฟังก์ชัน Goal seek ในการเปลี่ยนค่าแกนสะเทินเพื่อทำให้แรงในหน้าตัดสมดุล โดยมีความถูกต้องของทศนิยมถึงตำแหน่งที่ 3

ตัวอย่างการวิเคราะห์หน้าตัดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 60 นาทีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจากแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของ Sharma และคณะ [31] เพื่อหาคู่ลำดับความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ดัดและความโค้งในการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของไกรวุฒิ ที่ความโค้ง (κ) 0.00003 1/มิลลิเมตร และสมมติระยะลึกของแกนสะเทิน (c) 105.409 มิลลิเมตร เพื่อให้หน้าตัดอยู่ในสมดุล

กำหนดคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่อุณหภูมิห้อง :

กำลังอัดประลัย (f'_c) 30.361 เมกะปาสกาล
โมดูลัสยืดหยุ่น (E_c) 25897.549 เมกะปาสกาล
ความเครียดที่กำลังอัดประลัย (ϵ'_c) 0.002345

กำหนดคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเสริมอุณหภูมิห้อง :

เหล็กเสริมล่าง DB16 :
ระยะระหว่างขอบรับแรงอัดถึงเหล็กเสริมล่าง (d) 267 มิลลิเมตร
พื้นที่ของเหล็กเสริม 2.01 ตารางเซนติเมตร
กำลังคราก (f_y) 563.490 เมกะปาสกาล
กำลังประลัย (f_u) 685.485 เมกะปาสกาล
โมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) 200,000 เมกะปาสกาล

เหล็กเสริมบน DB12 :

ระยะระหว่างขอบรับแรงอัดถึงเหล็กเสริมบน (d') 33 มิลลิเมตร
พื้นที่ของเหล็กเสริม 1.13 ตารางเซนติเมตร

กำลังคราก (f_y) 502.787 เมกะปาสกาล

กำลังประลัย (f_u) 633.117 เมกะปาสกาล

โมดูลัสยืดหยุ่น (E_s) 200,000 เมกะปาสกาล

กำหนดคุณสมบัติเชิงกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอุณหภูมิห้อง :

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหนา (t) 0.1 เซนติเมตร มีความกว้าง (w) 15 เซนติเมตร

แรงดึงสูงสุดต่อจำนวนชิ้นของการเสริมกำลัง (F_{pmax}) 350 กิโลนิวตันต่อเมตร

โมดูลัสยืดหยุ่นของการดึง (E_p) 25 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร

หมายเหตุ : ผลลัพธ์จากตัวอย่างการคำนวณในสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หน้าตัดอาจมีความคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากการปัดเศษจากจุดทศนิยมที่ถูกสะสมในการคำนวณ

1. การคำนวณความเค้นของคอนกรีตจากสมการที่ (4.13) และแรงภายในของคอนกรีตจากสมการที่ (4.35) ที่มีพื้นที่ของคอนกรีตโดยรอบจุดที่พิจารณานั้นคือจุดที่มี $x = 22$ มิลลิเมตร และ $y = 22$ มิลลิเมตร เท่ากับ 121 ตารางมิลลิเมตร และจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS[15] พบว่าจุดที่พิจารณามีอุณหภูมิ 543°C :

ตัวอย่างการคำนวณความเครียดของคอนกรีตที่ระดับ $y = 22$ มิลลิเมตร

$$\varepsilon_{cy} = \kappa(c - y) = 0.00003(105.409 - 22) = 0.00250$$

สำหรับ $500^\circ\text{C} < T_c \leq 800^\circ\text{C}$

ความเครียดของคอนกรีตขณะที่ความเค้นสูงสุดภายหลังเผาไฟ :

$$\varepsilon_{co} = (1.80 + 0.0028(543))0.002345 = 0.00779$$

กำลังอัดประลัยของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ :

$$f_{co} = (1.27 - 0.0013(543))30.361 = 17.127 \text{ เมกะปาสกาล}$$

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการคำนวณความเค้นของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ :

$$A = 40.54 + (8.7 \times 10^{-4}(543)) = 41.01241$$

$$C = 1.15 + (2.86 \times 10^{-3} (543)) = 2.70298$$

$$\beta = \left[\frac{f_{co}}{A} \right]^3 + C = 2.77581$$

$$D = 56.15 - (0.032(543)) = 38.77400$$

$$G = 37.97 - (0.010(543)) = 32.54000$$

$$n_1 = \left[\frac{D}{f_{co}} \right]^{0.4} = 1.38658$$

$$n_2 = \left[\frac{G}{f_{co}} \right]^{0.8} = 1.75273$$

เนื่องจาก $\varepsilon_{cy} \leq \varepsilon_{co} = 0.00779$ เพราะฉะนั้นความเค้นของคอนกรีตภายหลังเผาไฟ :

$$f_{cr} = \left(\frac{1.38658(2.77581)(0.002500/0.00779)}{(1.38658(2.77581)) - 1 + (0.002500/0.00779)^{1.75273(2.77581)}} \right)^{17.127}$$

$$= 7.426 \text{ เมกะปาสกาล}$$

พื้นที่ของคอนกรีตโดยรอบจุดที่พิจารณา :

$$A_c = (11)(11) = 121 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

เพราะฉะนั้นแรงภายในของคอนกรีตรอบจุดที่พิจารณา :

$$F_c = 7.426 \times 1000(0.000121) = 0.899 \text{ กิโลนิวตัน}$$

2. การคำนวณความเค้นของเหล็กเสริมล่างจากสมการที่ (4.37) และแรงภายในเหล็กเสริมล่างจากสมการที่ (4.35) ที่มีพื้นที่ของเหล็กเสริมของจุดที่พิจารณานั้นคือจุดที่มี $x = 33$ มิลลิเมตร และ $y = 267$ มิลลิเมตร เท่ากับ 2.01 ตารางมิลลิเมตร และจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS พบว่าจุดที่พิจารณามีอุณหภูมิ 503°C :

ตัวอย่างการคำนวณความเครียดของเหล็กเสริมที่ระดับ $y = 267$ มิลลิเมตร

$$\varepsilon_{cy} = \kappa(y - c) = 0.00003(267 - 105.409) = 0.00485$$

สำหรับ $T_c \geq 500^\circ\text{C}$

กำลังครากของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ :

$$f_{yT} = [1 - 5.82 \times 10^{-4} (503 - 500)] 563.490 = 563.490 \text{ เมกะปาสกาล}$$

โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ :

$$E_{sT} = [1 - 1.30 \times 10^{-4} (503 - 500)] 200000 = 200000 \text{ เมกะปาสกาล}$$

เพราะฉะนั้นความเครียดครากของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ :

$$\varepsilon_{yT} = \frac{f_{yT}}{E_{sT}} = \frac{563.490}{200000} = 0.00282$$

ความเครียดที่เริ่มเกิดความแข็งแรงด้วยความเครียดของเหล็กเสริมภายหลังเผาไฟ :

$$\varepsilon_{pT} = [15 - 0.018(563.490 - 300)] 0.00282 = 0.02890$$

เนื่องจาก $\varepsilon_{yT} \leq \varepsilon_{cy} \leq \varepsilon_{pT}$ ดังนั้นความเค้นของเหล็กเสริม :

$$f_{sr} = f_{yT} = 563.490 \text{ เมกะปาสกาล}$$

แรงภายในเหล็กเสริมล่าง 1 เส้นภายหลังเผาไฟ :

$$F_{s2} = f_{yT} A_{s2} = (563.490 \times 1000)(0.000201) = 113.261 \text{ กิโลนิวตัน}$$

โดยความเค้นในเหล็กเสริมบนและแรงภายในเหล็กเสริมบนมีวิธีการคำนวณเดียวกัน

3. การคำนวณความเค้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (f_p) จากสมการที่ (4.33) และแรงภายในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (F_p) จากสมการที่ (4.38)

ความเครียดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ระดับ $y = 300$ มิลลิเมตร :

$$\varepsilon_{cy} = \kappa(y - c) = 0.00003(300 - 105.409) = 0.00584$$

ความเค้นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย :

$$f_p = E_p \varepsilon_{cy} = 25000(0.00584) = 145.943 \text{ เมกะปาสกาล}$$

พื้นที่หน้าตัดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย :

$$A_p = wt = (150)(1) = 150 \text{ ตารางมิลลิเมตร}$$

เนื่องจากแรงกระทำสูงสุดของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย :

$$F_{p\max} = (350)(0.15)(1) = 52.5 \text{ กิโลนิวตัน}$$

แรงกระทำในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย :

$$F_p = f_p A_p = (145.943 \times 1000)(0.000150) = 21.891 \text{ กิโลนิวตัน}$$

เนื่องจาก $F_p \leq F_{p\max}$ เพราะฉะนั้นแรงกระทำในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย :

$$F_p = 21.891 \text{ กิโลนิวตัน}$$

3. ตรวจสอบจากสมดุลของแรงภายในหน้าตัดจากสมการที่ (4.40) :

$$\sum F_c + F_{s1} - F_{s2} - F_p = 0$$

$$150.227 + 98.187 - 226.523 - 21.891 = 0$$

ดังนั้นแรงภายในหน้าตัดอยู่ในสมดุล สามารถนำแรงไปคำนวณโมเมนต์ตัดในหน้าตัดได้

4. คำนวณโมเมนต์ตัดในหน้าตัดรอบแกนสะเทิน (Neutral Axis, N.A.) ซึ่งเกิดจากผลรวมแรงภายในคอนกรีตหรือเหล็กเสริมที่ระดับต่างๆในหน้าตัดคูณกับระยะห่างระหว่างคอนกรีตหรือเหล็กเสริมที่ระดับต่างๆถึงแกนสะเทิน จากสมการที่ (4.42) ดังแสดงในตารางที่ ค.1

ดังนั้น

$$M = M_c + M_{s1} + M_{s2} + M_p$$

$$= 8.779 + 7.110 + 36.604 + 4.260 = 56.753 \text{ กิโลนิวตัน.เมตร}$$

ตารางที่ ค.1 ผลรวมของแรงภายในของคอนกรีตและเหล็กเสริมที่ระดับต่างๆ และผลการคำนวณโมเมนต์ดัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายหลังเผาไฟ 60 นาทีที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

| y (มิลลิ เมตร) | $\sum F_c$ (กิโลนิวตัน) | $ y-c $ (มิลลิ เมตร) | F_{s1} (กิโลนิว ตัน) | F_{s2} (กิโลนิว ตัน) | F_p (กิโลนิว ตัน) | M_c (กิโลนิวตัน เมตร) | M_{s1} (กิโลนิวตัน เมตร) | M_{s2} (กิโลนิวตัน เมตร) | M_p (กิโลนิว ตันเมตร) |
|----------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 0 | 5.039 | 105.049 | - | - | - | 0.560 | - | - | - |
| 11 | 15.391 | 94.049 | - | - | - | 1.453 | - | - | - |
| 22 | 18.295 | 83.049 | - | - | - | 1.526 | - | - | - |
| 33 | 21.517 | 72.049 | 98.187 | - | - | 1.558 | 7.110 | - | - |
| 46 | 25.947 | 59.049 | - | - | - | 1.541 | - | - | - |
| 59 | 24.740 | 46.049 | - | - | - | 1.148 | - | - | - |
| 72 | 20.245 | 33.049 | - | - | - | 0.676 | - | - | - |
| 85 | 13.631 | 20.049 | - | - | - | 0.278 | - | - | - |
| 98 | 5.153 | 7.049 | - | - | - | 0.038 | - | - | - |
| 111 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 124 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 137 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 150 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 163 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 176 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 189 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 202 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 215 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 228 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 241 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 254 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 267 | 0 | 0 | - | 226.523 | - | 0 | - | 36.604 | - |
| 278 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 289 | 0 | 0 | - | - | - | 0 | - | - | - |
| 300 | 0 | 0 | - | - | 21.891 | 0 | - | - | 4.260 |
| \sum | 150.227 | - | 98.187 | 226.523 | 21.891 | 8.779 | 7.110 | 36.604 | 4.260 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเศกสิทธิ์ เทียนทองนุกูล เกิดเมื่อวันที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2534 ที่กรุงเทพฯ เป็นบุตรคนที่ 2 จากทั้งหมด 2 คนของคุณพ่อโกศล เทียนทองนุกูล และคุณแม่สุพิศ เทียนทองนุกูล เข้ารับการศึกษาในระดับอนุบาลและประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลนนทบุรี ส่วนระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนโยธินบูรณะ และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา(โครงสร้าง) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 จนถึงปัจจุบัน

