

เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง



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 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

STRENGTH INTERACTION CURVES OF CONCRETE-ENCASED STEEL COLUMNS AT
ELEVATED TEMPERATURES

Mr. Nipun Loedpattanapan



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่

อุณหภูมิสูง

โดย

นายนิปุล เลิศพัฒนพันธุ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์)

..... กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ชีรพงศ์ เสนจันทร์ไชย)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิจพัฒน์ ภู่วรรณ)

นิปุลน เลิศพัฒนพันธ์ : เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง (STRENGTH INTERACTION CURVES OF CONCRETE-ENCASED STEEL COLUMNS AT ELEVATED TEMPERATURES) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อัครวัชร เล่นวาริ , 87 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำตรงศูนย์และแรงกระทำเยื้องศูนย์ที่อุณหภูมิสูง งานวิจัยนี้เริ่มจากพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิเสาวัดคุณสมบัติที่สภาวะอุณหภูมิสูง โดยตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในอดีต จากนั้นพัฒนาแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาวัดคุณสมบัติหลังจากได้รับความร้อนรับแรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ โดยตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบเสาวัดคุณสมบัติไฟรับแรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ในอดีต แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ได้ใช้ในการสร้างเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังรับแรงตามแนวแกนและแรงดัดร่วมกันของเสาวัดคุณสมบัติที่อุณหภูมิสูง พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของ ระยะเวลาเผาไฟ ด้านที่ได้รับการเผาไฟ และระยะหุ้มคอนกรีตต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่อระยะหุ้มของคอนกรีตน้อยลง จะส่งผลให้ความร้อนเข้าถึงภายในได้เร็วขึ้นทำให้สูญเสียกำลังของวัสดุมากขึ้น เป็นผลให้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตลดลง และเมื่อเพิ่มระยะเวลาเผาไฟมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มมากขึ้น ทำให้สูญเสียกำลังของวัสดุมากขึ้น เป็นผลให้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตลดลง นอกจากนี้ พบว่า ด้านที่ถูกเผาไฟมีผลต่อพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เมื่อลดด้านที่ถูกเผาไฟลงจะส่งผลให้วัสดุมีความร้อนน้อยลงในด้านนั้นๆที่ไม่ถูกเผาไฟ ทำให้สูญเสียกำลังของวัสดุน้อยลงเป็นผลให้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการสัมผัสไฟทุกด้าน

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5670261921 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: INTERACTION CURVES / CONCRETE-ENCASED STEEL COLUMNS / FINITE ELEMENT ANALYSIS / ELEVATED TEMPERATURES / SHORT COLUMN

NIPUN LOEDPATTANAPAN: STRENGTH INTERACTION CURVES OF CONCRETE-ENCASED STEEL COLUMNS AT ELEVATED TEMPERATURES. ADVISOR: ASSOC. PROF. AKHRAWAT LENWARI, Ph.D., 87 pp.

This research presents the finite element analysis of concrete-encased steel columns subjected to concentric and eccentric loadings at elevated temperatures. The research first developed the finite element model for analyzing the temperature distribution in the concrete-encased steel columns at elevated temperatures. The results were validated with previous test data. Then, the finite element models of heated columns subjected to both concentric and eccentric loadings were developed. The finite element models were validated with previous test data and then used to construct the interaction curves of concrete-encased steel columns at elevated temperatures. The effects of the period of fire exposure, side exposure condition and concrete covering thickness on the strength interaction curves of concrete-encased steel columns at elevated temperatures were studied. The analysis results showed that when concrete covering thickness was decreased or the period of fire exposure was increased, the heat penetrated the column faster and consequently decreased the strength of concrete-encased steel columns. Moreover, it was found that side exposure condition also influenced the strength of concrete-encased steel columns. If the number of side exposure condition was reduced the strength of concrete-encased steel column increased.

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นวารีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำต่างๆในการทำวิจัย จนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร. ทักษิณ เทพชาครี, ศาสตราจารย์ ดร. อธิพงศ์ เสนจันทร์ฉิไชย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิจพัฒน์ ภู่วรรณ ที่ให้ความรู้ให้ข้อเสนอแนะ และคำแนะนำต่างๆ เพื่อใช้ในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้สมบูรณ์

ขอขอบคุณพี่น้องและผองเพื่อนทุกคน ได้แก่ ทศพล ประเสริฐศรี, ชนะชัย ทองโถม, อภิชาติ วงศ์ดี, สิริรัตน์ เกี่ยวการค้า, ณัฐดนัย อมรปฎิเวธ และคนอื่นๆ ที่ให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำต่างๆในระหว่างระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณนาย วิชัย เลิศพัฒนพันธุ์ นางณัฏฐา เลิศพัฒนพันธุ์ ที่ให้ความอุปการะ และเป็นกำลังใจแก่ข้าพเจ้าเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	4
2.1 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ.....	4
2.1.1 พฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง.....	4
2.1.2 พฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปตัวไอที่อุณหภูมิสูง.....	5
2.1.3 ศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปตัวไอเฉพาะส่วนที่อุณหภูมิสูง.....	10
2.2 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์.....	14
2.2.1 การกระจายอุณหภูมิของเสาด้วยวิธี 2 มิติ.....	14
2.2.2 ประสิทธิภาพของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งตามแนวแกนภายใต้สภาวะ อุณหภูมิสูง.....	23
บทที่ 3 การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต.....	28
3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต.....	28
3.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริม.....	30

3.3 กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ.....	32
3.4 สมการควบคุมสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ.....	33
3.5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ.....	34
3.6 การตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต... 35	
3.6.1 ผลการทดสอบของ Huang และคณะ [11]	35
3.6.2 ผลการทดสอบของ Mao และ Kodur [1].....	37
บทที่ 4 การวิเคราะห์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	40
4.1 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิสูง	40
4.1.1 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง.....	40
4.1.2 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่อุณหภูมิสูง.....	42
4.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์กำลังที่อุณหภูมิสูง.....	43
4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต... 44	
4.3.1 ผลการทดสอบของ Huang และคณะ [11]	44
4.3.2 ผลการทดสอบของ Mao และ Kodur [1].....	45
บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	48
5.1 การวิเคราะห์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง	48
5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	54
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย.....	65
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
6.2 ข้อจำกัดการวิเคราะห์.....	67
6.3 ข้อเสนอแนะ	67
รายการอ้างอิง	68

ภาคผนวก ก	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายใน หน้าตัดด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 3 มิติ	71
ภาคผนวก ข	ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วย คอนกรีตด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 3 มิติ	81
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์		87



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ [8]	6
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [1].....	7
ตารางที่ 2.3 เวลาที่ตัวอย่างเกิดการกะเทาะ [1].....	9
ตารางที่ 2.4 รายละเอียดของตัวอย่างการทดสอบและผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบและ การวิเคราะห์ [12].....	24
ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต	41
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรูปพรรณ	43
ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต บางส่วน	55

สารบัญรูป

รูปที่ 1-1 รูปแบบของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [3] 2

รูปที่ 2-1 หน้าตัดเสาและตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล [7]..... 4

รูปที่ 2-2 อุณหภูมิภายในหน้าตัดตามที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล [7] 5

รูปที่ 2-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อเวลา [8] 6

รูปที่ 2-4 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในหน้าตัดของตัวอย่างการทดลอง [8]..... 7

รูปที่ 2-5 การหัดตัวตามแนวแกนของตัวอย่างที่โดนเผาไฟทั้ง 3 ด้านและ 4 ด้าน [1]..... 8

รูปที่ 2-6 การกะเทาะของคอนกรีต [1] 9

รูปที่ 2-7 รายละเอียดของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน [10] 10

รูปที่ 2-8 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในตัวอย่างการทดสอบ [10]..... 11

รูปที่ 2-9 กราฟความสัมพันธ์อุณหภูมิต่อเวลาของหน้ากึ่งกลางเสาและเตาเผา [10]..... 12

รูปที่ 2-10 การโก่งตัวทางด้านข้างของ CSS160-K128-L0.3 และ CSS200-K128-L0.3 [10]..... 12

รูปที่ 2-11 การหัดตัวตามแนวแกนของเสาที่ค่าสตีเฟนสเท่ากับ 128 kN/mm [10]..... 13

รูปที่ 2-12 การหัดตัวตามแนวแกนของเสาที่ค่าสตีเฟนสเท่ากับ 45 kN/mm [10]..... 13

รูปที่ 2-13 การหัดตัวตามแนวแกนของเสาที่ค่าสตีเฟนสเท่ากับ 13 kN/mm [10]..... 14

รูปที่ 2-14 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ในตำแหน่งที่ 1 [7] 15

รูปที่ 2-15 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ในตำแหน่งที่ 5 [7] 16

รูปที่ 2-16 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อแรงของคอนกรีตโดยการทดสอบและการวิเคราะห์
ของตัวอย่าง SRC1.4-0 [7]..... 16

รูปที่ 2-17 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อแรงของเหล็กgrupพรรณจากแรงอัดโดยการทดสอบและ
การวิเคราะห์ของตัวอย่าง SRC1.8-80 [7]..... 17

รูปที่ 2-18 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อแรงของเหล็กgrupพรรณจากแรงดึงโดยการทดสอบและ
การวิเคราะห์ของตัวอย่าง SRC1.8-80 [7]..... 17

รูปที่ 2-19 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อเวลาของเหล็กรูปพรรณโดยการทดสอบ และการวิเคราะห์ของตัวอย่าง SRC1.4-0 [7]	18
รูปที่ 2-20 กราฟอุณหภูมิกับเวลาของวัสดุแต่ละชนิดภายในตัวอย่างที่ 3 [8]	19
รูปที่ 2-21 การวบัติของตัวอย่างและการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง [8]	20
รูปที่ 2-22 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง ISO834 กับ เตาเผาที่ใช้งาน [11]	21
รูปที่ 2-23 ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลในหน้าตัดขนาดต่างๆ [11]	21
รูปที่ 2-24 การโค้งตัวทางด้านข้างตัวอย่าง [11].....	22
รูปที่ 2-25 รายละเอียดภายในหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [3].....	24
รูปที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของตัวอย่างที่สามจากเหล็กเสริมตามแนวแกนเหล็กรูปพรรณและคอนกรีต [12].....	25
รูปที่ 2-27 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ตามแนวแกนกับเวลา ของตัวอย่างการทดสอบที่ 4 [12].....	26
รูปที่ 3-1 สภาพการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้จะเป็นช่วงขีดจำกัดบนในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	29
รูปที่ 3-2 ความร้อนจำเพาะของคอนกรีตที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]	30
รูปที่ 3-3 สภาพการนำความร้อนของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	31
รูปที่ 3-4 ความร้อนจำเพาะของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]	32
รูปที่ 3-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิต่อเวลาของมาตรฐาน ISO 834 [4].....	33
รูปที่ 3-6 ลักษณะของเอลิเมนต์ SOLID 70 และ Link 33 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ.....	34
รูปที่ 3-7 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัด [11].....	35
รูปที่ 3-8 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์ ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในส่วนของคอนกรีต.....	36
รูปที่ 3-9 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์ ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในส่วนของเหล็กรูปพรรณ.....	36

รูปที่ 3-10 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์ ของ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในส่วนของเหล็กเสริม	36
รูปที่ 3-11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบอุณหภูมิ จากโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	37
รูปที่ 3-12 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล [1]	38
รูปที่ 3-13 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์ของ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในตำแหน่งของปีกเหล็กรูปพรรณ	38
รูปที่ 3-14 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์	39
รูปที่ 3-15 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์	39
รูปที่ 3-16 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์	39
รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆตาม EN 1994-1.2 [9]	40
รูปที่ 4-2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตตาม EN 1994- 1.2 [9]	41
รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่อุณหภูมิต่างๆตาม EN 1994-1.2 [9]..	42
รูปที่ 4-4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรูปพรรณตาม	42
รูปที่ 4-5 ลักษณะของเอลิเมนต์ SOLID 185 และ Link 180 ที่ใช้ใน การวิเคราะห์กำลังของเสา	44
รูปที่ 4-6 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบของเสาเหล็กหุ้มด้วย คอนกรีต SZCC03	45
รูปที่ 4-7 เส้นแสดงขอบเขตความร้อนภายในหน้าตัด FR4S38 ที่เวลา 30 นาที	46
รูปที่ 4-8 เส้นแสดงขอบเขตความร้อนภายในหน้าตัด FR3S37 ที่เวลา 56 นาที	46
รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบของเสาเหล็กหุ้มด้วย คอนกรีต FR4S38	47
รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบของเสาเหล็กหุ้มด้วย คอนกรีต FR3S37	47

รูปที่ 5-1 ชิ้นส่วนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่อุณหภูมิห้อง ในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	49
รูปที่ 5-2 ชิ้นส่วนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่อุณหภูมิสูง 180 นาที ในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	49
รูปที่ 5-3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบแรงอัดกับระดับของแรงในระยยะเยื้องศูนย์ 0.05 เมตร.....	50
รูปที่ 5-4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบการเสีรูปตามแนวแกนกับระดับของการเสีรูปในระยยะเยื้องศูนย์ 0.05 เมตร.....	50
รูปที่ 5-5 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบแรงอัดกับระดับของแรงในระยยะเยื้องศูนย์ 0.96 เมตร.....	51
รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบการเสีรูปตามแนวแกนกับระดับของการเสีรูปในระยยะเยื้องศูนย์ 0.96 เมตร.....	51
รูปที่ 5-7 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนกรณีสัมผัสไฟ 4 ด้าน.....	52
รูปที่ 5-8 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดกรณีสัมผัสไฟ 4 ด้าน.....	53
รูปที่ 5-9 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนกรณีสัมผัสไฟ 3 ด้าน.....	53
รูปที่ 5-10 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดกรณีสัมผัสไฟ 3 ด้าน.....	54
รูปที่ 5-11 หน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	55
รูปที่ 5-12 หน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดแบบที่ 2 ที่อุณหภูมิห้อง ในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	56
รูปที่ 5-13 หน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่อุณหภูมิห้องในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	56

รูปที่ 5-14 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่เผาไฟในเวลา 120 นาที ในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	57
รูปที่ 5-15 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดแบบที่ 2 เผาไฟในเวลา 120 นาที ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]	57
รูปที่ 5-16 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟในเวลา 120 นาที ในโปรแกรม ANSYS [5, 6].....	58
รูปที่ 5-17 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมที่เผาไฟที่เวลาต่างๆ.....	59
รูปที่ 5-18 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมแบบที่ 2 ที่เผาไฟที่เวลาต่างๆ.....	59
รูปที่ 5-19 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมบางส่วนที่เผาไฟที่เวลาต่างๆ	60
รูปที่ 5-20 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมรูปแบบต่างๆที่อุณหภูมิห้อง	60
รูปที่ 5-21 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมรูปแบบต่างๆเผาไฟที่เวลา 120 นาที กรณีที่เผาไฟทั้ง 4 ด้าน.....	61
รูปที่ 5-22 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมรูปแบบต่างๆเผาไฟที่เวลา 180 นาที กรณีที่เผาไฟทั้ง 4 ด้าน.....	61
รูปที่ 5-23 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมเผาไฟที่เวลา 120 นาที กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน.....	62
รูปที่ 5-24 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมแบบที่ 2 เผาไฟที่เวลา 120 นาที กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน	62
รูปที่ 5-25 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมบางส่วนเผาไฟที่เวลา 120 นาที กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน	63
รูปที่ 5-26 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมเผาไฟที่เวลา 180 นาที กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน.....	63
รูปที่ 5-27 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมแบบที่ 2 เผาไฟที่เวลา 180 นาที.....	64
รูปที่ 5-28 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมบางส่วนเผาไฟที่เวลา 180 นาที	64
รูปที่ ก-1 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ	71

รูปที่ ก-2 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ	72
รูปที่ ก-3 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าอุณหภูมิ	72
รูปที่ ก-4 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์อุณหภูมิ	73
รูปที่ ก-5 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการสร้างโมเดลในการวิเคราะห์	74
รูปที่ ก-6 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการสร้างโมเดลในการวิเคราะห์	74
รูปที่ ก-7 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการสร้างเอลิเมนต์ย่อย	75
รูปที่ ก-8 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าจุด (node) ให้เกิดการเชื่อมต่อกัน	75
รูปที่ ก-9 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์	76
รูปที่ ก-10 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้น	77
รูปที่ ก-11 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าสำหรับการให้แรง	78
รูปที่ ก-12 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์	79
รูปที่ ก-13 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการเรียกผลวิเคราะห์	79
รูปที่ ก-14 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการกำหนดผลการวิเคราะห์ในรูปแบบ element	80
รูปที่ ก-15 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการแสดงผลวิเคราะห์ในรูปแบบ element	80
รูปที่ ข-1 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์กำลังของโครงสร้าง	81
รูปที่ ข-2 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการเปลี่ยนการวิเคราะห์จากอุณหภูมิเป็นโครงสร้าง	82
รูปที่ ข-3 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์กำลังของโครงสร้าง	82
รูปที่ ข-4 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์กำลังของโครงสร้าง	83
รูปที่ ข-5 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าสำหรับการให้แรง	83
รูปที่ ข-6 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์	84
รูปที่ ข-7 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการเรียกผลวิเคราะห์	85
รูปที่ ข-8 การแสดงตำแหน่งการแสดงผลวิเคราะห์	86
รูปที่ ข-9 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการเรียกผลวิเคราะห์แต่ละส่วน	86



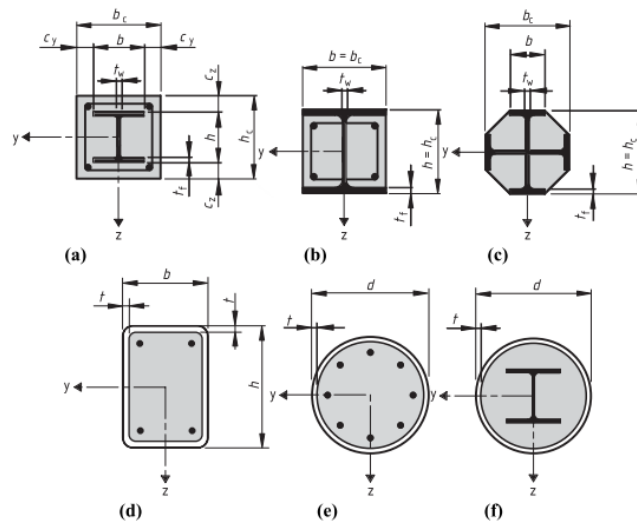
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตได้รับความนิยมในการก่อสร้างมากขึ้น เนื่องจากมีขนาดหน้าตัดที่เล็กลงเมื่อเทียบกับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปจึงเหมาะสมกับปัจจุบันที่ต้องการพื้นที่ใช้สอยมากขึ้น และความรวดเร็วในการก่อสร้างเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย นอกจากนี้เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตยังมีความต้านทานไฟได้สูงกว่าเสาเหล็กทั่วไป เนื่องจากมีคอนกรีตช่วยเป็นฉนวนกันไฟให้กับเสาเหล็กและคุณสมบัติเฉพาะตัวของเสาเหล็กที่หุ้มด้วยคอนกรีตจะมี ความเหนียวที่เพิ่มมากขึ้นเหมาะสำหรับรับแรงแผ่นดินไหว [1] โดยการจำแนกของ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ได้รับความนิยมสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบในปัจจุบัน ได้แก่ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมด เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน และเสาเหล็กที่เติมด้วยคอนกรีตภายในท่อเหล็ก ดังแสดงใน รูปที่ 1-1 ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันการเกิดอัคคีภัยมีแนวโน้มสูงขึ้น อาจเกิดจากตัวบุคคลหรืออุปกรณ์ล้าวนแต่ทำให้เกิดความเสียหายต่อทรัพย์สินและการดำเนินชีวิตของผู้ใช้อาคาร โดยปกติไฟเกิดจากการประกอบดังต่อไปนี้คือ เชื้อเพลิง ความร้อน ออกซิเจน ซึ่งจะเกิดเป็นไฟได้นั้นต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม นอกจากนี้พฤติกรรมการเผาไหม้แบ่งออกเป็น 5 ช่วง ได้แก่ จุดไฟให้ลุกไหม้ ไฟลาม ลูกโชน ลูกโชนเต็มที และไฟมอด [2] ซึ่งวัสดุทุกชนิดอาจสูญเสียกำลังเมื่อได้รับความร้อน สำหรับประเทศไทย กฎกระทรวงฉบับที่ 60 พ.ศ. 2549 ออกตาม พรบ. ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 ได้กำหนดอัตราการทนไฟสรุปได้ดังต่อไปนี้ เสาและคานจะต้องมีความสามารถในการทนไฟได้ไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง



รูปที่ 1-1 รูปแบบของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [3]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1. ศึกษาการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิและการเสียรูปของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง
2. พัฒนาเส้นความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแรงอัดและแรงดัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิสูง
3. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ประกอบด้วย รูปแบบหน้าตัด ระยะเวลาเผาไฟ และด้านที่ถูกเผาไฟต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตการวิจัยมีดังนี้

1. การศึกษาจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะเวลาที่ทำการเผาไฟของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตอ้างอิง ISO 834 [4]
2. รูปแบบของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต คือ เสาเหล็กรูปพรรณรูปตัวไอหุ้มด้วยคอนกรีต

1.4 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

แนวทางการดำเนินงานวิจัยมีดังนี้

1. ศึกษางานวิจัยในอดีตเกี่ยวกับการทำนายการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตขณะเผาไฟที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ต่างๆ
2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับคุณสมบัติของคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริมตามแนวแกนภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง
3. ศึกษาการวิเคราะห์กระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตขณะเผาไฟที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ต่างๆ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [5, 6] และตรวจสอบความถูกต้องโดยการเทียบกับผลการทดสอบในอดีต
4. ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต
5. พัฒนาคความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับแรงตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต
6. ศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่อเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต
7. สรุปผลการวิจัย เขียนบทความวิจัยและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

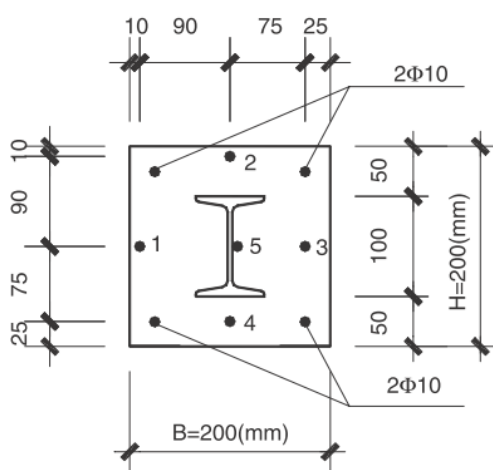
บทที่ 2

งานวิจัยที่ผ่านมา

2.1 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

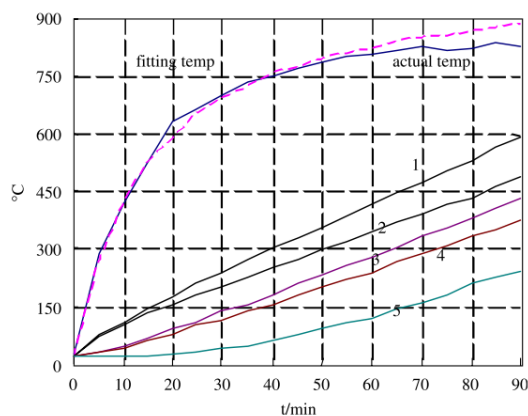
2.1.1 พฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

Yu และคณะ [7] ทำการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เพื่อศึกษาพฤติกรรมภายใต้ไฟ โดยได้สร้างตัวอย่างเพื่อการทดสอบทั้งหมด 12 ตัว ซึ่งทำการทดสอบทั้งอุณหภูมิปกติและอุณหภูมิสูง เพื่อเป็นการพัฒนาการทำนายการกระจายอุณหภูมิและกำลังรับแรงอัดสูงสุด โดยรายละเอียดหน้าตัด โดยวัสดุที่ใช้กัน ได้แก่ เหล็กรูปพรรณ เหล็กเสริมตามยาว และคอนกรีตที่เวลา 28 วัน เป็นการออกแบบตามมาตรฐานจีน GBJ81-85 ซึ่งเผาไฟตามมาตรฐาน GB9978-88 ใกล้เคียงกับ มาตรฐาน ISO-834 [4] โดยที่แบ่งออกเป็นกรทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิปกติ 6 ตัวอย่างและภายใต้สภาวะการเผาไฟที่อุณหภูมิสูง 6 ตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่ทดสอบภายใต้สภาวะอุณหภูมิปกติจะทำการเพิ่มการรับน้ำหนักของเสาตัวอย่างตลอดเวลาด้วยแรงเท่ากับ 1.5 kN/s จนกระทั่งตัวอย่างที่ทดสอบเกิดการวิบัติ ส่วนตัวอย่างการทดสอบภายใต้สภาวะการเผาไฟที่อุณหภูมิสูงนั้นจะเป็นการรับน้ำหนักคงที่มีค่าอยู่ที่ 300 kN จากผลการวิเคราะห์การกระจายตัวให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ความเครียดและการเสียรูปใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง รูปที่ 2-1 แสดงหน้าตัดภายในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต



รูปที่ 2-1 หน้าตัดเสาและตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล [7]

การทดสอบได้ทำให้ทราบอุณหภูมิภายในหน้าตัดที่ได้ทำการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลดังแสดงในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 อุณหภูมิภายในหน้าตัดตามที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล [7]

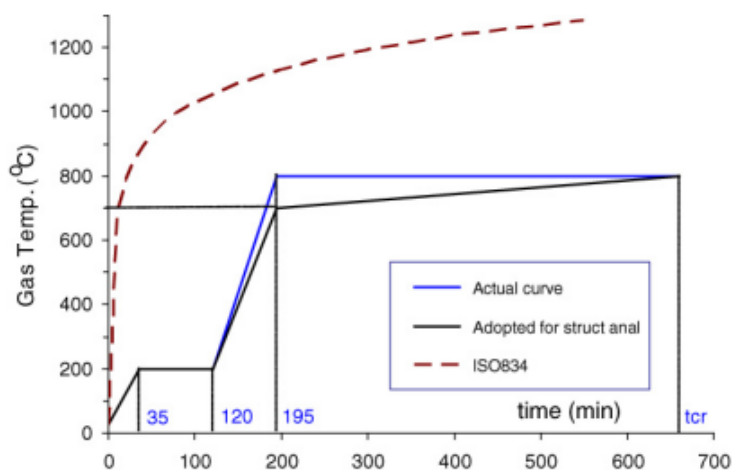
2.1.2 พฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปตัวไอที่อุณหภูมิสูง

Huang และคณะ [8] ทำการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปตัวไอขณะทดสอบเผาไฟ โดยมีการยึดรั้งแรงตามแนวแกนซึ่งมีอัตราส่วนของแรงอัดกระทำอยู่ที่ 0.7 ของกำลังการรับแรงจากสภาวะอุณหภูมิปกติที่ออกแบบตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] ซึ่งเสียหายจนวิบัติด้วยการโก่งตัว โดยการวิเคราะห์นั้นได้ทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและการตอบสนองของโครงสร้างภายใต้สภาวะเผาไฟ ซึ่งได้ผลสรุปที่คล้ายกันของการวิเคราะห์กับผลของการทดสอบคือ ตัวอย่างจะมีการรับแรงลดลงขณะโดนเผาไฟ นอกจากนั้นตัวอย่างการทดสอบระหว่างโดนเผาไฟได้มีการกะเทาะของคอนกรีตที่กึ่งกลางตัวอย่างซึ่งเป็นผลให้การต้านทานไฟลดลงอย่างชัดเจน เวลาวิฤตของตัวอย่างทดสอบได้อ้างอิงมาตรฐาน Eurocode 4 Part 1.2 [9] ซึ่งได้ค่าน้อยกว่าค่าจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่ได้ทำนายไว้ โดยการทดสอบมีทั้งหมด 4 ตัวอย่าง ซึ่งจะได้รับการยึดรั้งแรงตามแนวแกนที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ [8]

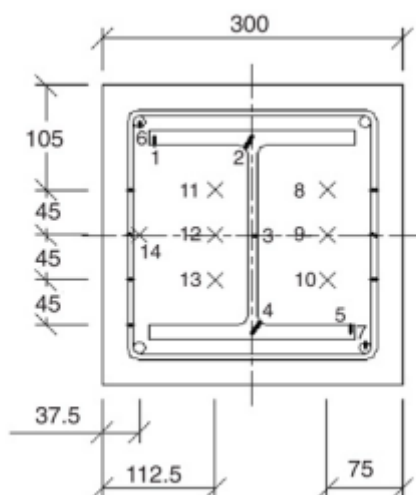
Column	k_c (MN/m)	Restraint beam	k_1 (MN/m)	β_1	t_{cr}^{test} (min)	t_{cr}^{EC4} (min)	t_{cr}^{FEA} (min)	$\frac{t_{cr}^{FEA}}{t_{cr}^{test}}$
RCC01	304.17	-	0.00	0.0000	414	389	431	1.04
RCC02	304.17	W8x8x5.25x 27	30.61	0.1006	417	332	381	0.91
RCC03	304.17	UC203x203x 60	27.95	0.0919	422	334	384	0.91
RCC04	304.17	W10x10x10x 88.9	52.45	0.1724	366	304	352	0.96
							Mean	0.96
							COV	0.06

รูปที่ 2-3 แสดงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบเมื่อเทียบกับเวลาเทียบกับอุณหภูมิในมาตรฐาน ISO-834 [4]



รูปที่ 2-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อเวลา [8]

รายละเอียดของตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิของคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริมตามแนวแกน แสดงในรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในหน้าตัดของตัวอย่างการทดลอง [8]

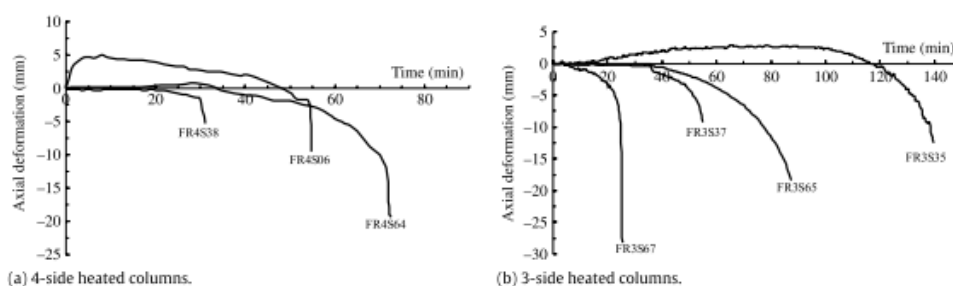
Mao และ Kodur [1] ทำการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้มาตรฐาน Eurocode 4 [3] โดยที่ผลการทดสอบตัวอย่างที่ได้รับการเผาไฟ 3 ด้านมีการต้านทานไฟได้ดีกว่าตัวอย่างที่ได้รับการเผาไฟทั้ง 4 ด้าน นอกจากนี้ ผลของแรงกระทำเอียงศูนย์ทำให้คอนกรีตเกิดการกะเทาะ โดยส่งผลให้การต้านทานไฟต่ำลง

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [1]

Column	Column size (mm)	Profile steel dimensions (mm)	Factored resistance (Pr)(kN)	Test load (Pt)(kN)	Load ratio (Pt/Pr)	Load eccentricity (2e/h)	Fire resistance (min)
FR4S38	350x350	200x150x6x9	1756	1500	0.85	0.3	30
FR4S64	350x350	200x150x6x9	1438	610	0.42	0.6	70
FR4S06	300x300	175x175x7.5x11	2110	3460	0.61	0.0	54
FR3S35	350x250	200x150x6x9	1756	1232	0.50	0.3	141
FR3S37	350x250	200x150x6x9	1756	878	0.70	0.3	56
FR3S65	350x250	200x150x6x9	1438	719	0.50	0.6	89
FR3S67	350x250	200x150x6x9	1438	1006	0.70	0.6	25

ตารางที่ 2.2 พบว่าในการทดสอบได้มีการแบ่งตัวอย่างออกเป็น 2 กลุ่ม คือตัวอย่างที่ได้รับไฟทั้ง 3 ด้านและ 4 ด้าน นอกจากนี้ยังบอกถึงการเอียงศูนย์ของแรงและอัตราส่วนแรงที่กระทำกับตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในด้านการออกแบบตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตได้ทำตามมาตรฐานของจีน JGJ 138-2001 อัตราส่วนความขรุขระของตัวอย่างทดสอบอยู่ที่ 30 ยกเว้นกรณีตัวอย่าง FR4S06 ที่อัตราส่วนความขรุขระอยู่ที่ 35 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจะอยู่ที่กึ่งกลางของตัวอย่างและจุดที่เหนือกว่ากึ่งกลางตัวอย่างเป็นระยะ 1000 มิลลิเมตรและจุดที่ต่ำกว่ากึ่งกลางตัวอย่างเป็นระยะ 1000 มิลลิเมตร

การทดสอบตัวอย่างทั้งหมดอัตราส่วนแรงที่กระทำสำหรับการต้านทานของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตได้ทำการคำนวณมาจากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของโปรแกรม ANSYS [5, 6] ซึ่งอัตราส่วนแรงที่กระทำสูงถึง 0.85 กระทำกับตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต FR4S38 เป็นการจำลองสถานการณ์ที่น้ำหนักตายตัวมีค่ามากกว่าน้ำหนักบรรทุกจร ตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจะหยุดการทดสอบเมื่อเกิดการวิบัติและไม่สามารถรักษาแรงที่กระทำกับตัวอย่างหรือการยุบตัวตามแนวแกนมากถึง 9 มิลลิเมตรต่อนาที่หรือการยุบตัวตามแนวแกนมากถึง 30 มิลลิเมตร อุณหภูมิในเตาเผาขึ้นก่อนข้างเป็นไปตามมาตรฐาน ISO834 [4] การที่ให้แรงเอียงศูนย์นั้นมีผลต่ออุณหภูมิของตัวอย่างการทดสอบเนื่องจากการให้แรงเอียงศูนย์นั้นจะทำให้เกิดรอยแยกได้เร็วกว่าทำให้การแผ่ความร้อนเข้าถึงเนื้อในได้เร็วกว่าปกติ โดยรวมแล้วผลอุณหภูมิของเหล็กรูปพรรณนั้นจะไม่เกินกว่า 200°C ตลอดระยะเวลาที่ถูกเผาไฟแต่ในทางตรงกันข้ามเหล็กเสริมกลับมีอุณหภูมิสูงถึง 550°C ภายใน 20 นาที ดังนั้นคอนกรีตจะเป็นฉนวนกันไฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานไฟแก่เหล็กรูปพรรณ ในกรณีของการให้แรงเอียงศูนย์นั้นยิ่งแรงเอียงศูนย์มากก็จะเป็นการลดความแข็งแรงและสติเฟโนสที่สภาวะอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 2-5

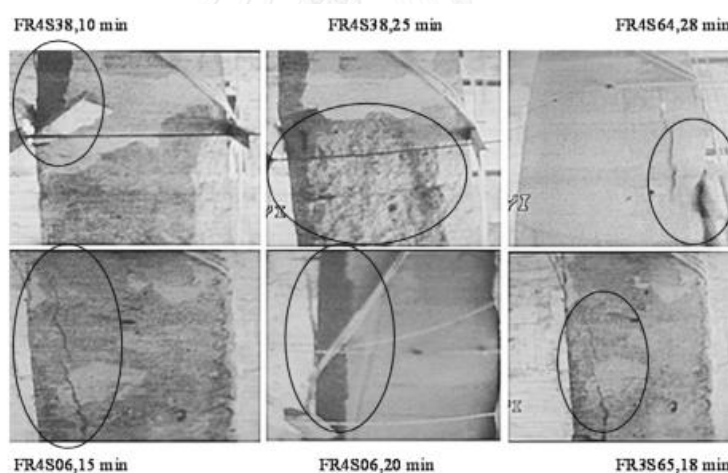


รูปที่ 2-5 การหดตัวตามแนวแกนของตัวอย่างที่โดนเผาไฟทั้ง 3 ด้านและ 4 ด้าน [1]

การกะเทาะของคอนกรีตนั้นได้ทำการสำรวจตั้งแต่เริ่มการทดสอบและมีการบันทึกเวลาและจากการสำรวจได้มี 2 ตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ไม่เกิดการกะเทาะ โดยการกะเทาะนั้นจะทำให้เสียพื้นที่หน้าตัดและแรงอัดจะเข้าสู่ เหล็กกับคอนกรีตภายในทำให้เป็นการเร่งให้ตัวอย่างเกิดการวิบัติ การกะเทาะจะเกิดจากแรงเฉือนศูนย์กลางมากกว่าแรงตามแนวแกน เพราะว่าการเกิดแรงดึงขึ้นที่คอนกรีตทำให้ตัวคอนกรีตเกิดการแตกและได้มีการแบ่งขอบเขตการวิบัติออกเป็น 2 ขอบเขตได้แก่ วิบัติด้วยแรงอัดและแรงดึงและการที่ตัวอย่างได้รับการเผาไฟจะทำให้ขนาดของแรงและการดัดลดลงเท่านั้น ดังแสดงในตารางที่ 2.3 และรูปที่ 2-6

ตารางที่ 2.3 เวลาที่ตัวอย่างเกิดการกะเทาะ [1]

Column	FR4S06	FR4S38	FR3S65	FR3S35	FR3S37	FR3S65	FR3S67
Spalling time (min)	15	10	28	-	-	18	24



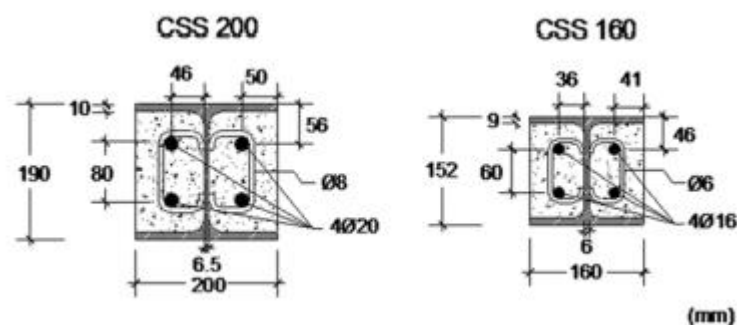
รูปที่ 2-6 การกะเทาะของคอนกรีต [1]

การเปรียบเทียบตัวอย่างทดสอบกับมาตรฐาน Eurocode 4 [3] และ ASCE 29 และ Zheng และ Han ซึ่งผลการเปรียบเทียบการทดสอบกับมาตรฐาน Eurocode 4 [3] จะได้ว่าการออกแบบตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] นั้นค่อนข้างปลอดภัยทั้งด้านแรงเยื้องศูนย์และแรงไม่เยื้องศูนย์ ในกรณีที่อัตราส่วนของแรงมากมีข้อผิดพลาดเนื่องจากเกินขอบเขตของมาตรฐาน ในส่วนของการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน ASCE 29 ค่อนข้างไม่ปลอดภัยในทุกตัวอย่างเนื่องจากมาตรฐานนี้ใช้กับเสาปกติ และส่วนของการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับ Zheng และ Han ค่อนข้างปลอดภัยสำหรับการให้แรงที่ไม่เยื้องศูนย์และเยื้องศูนย์เล็กน้อยกรณีที่การให้แรงเป็นแบบเยื้องศูนย์มากค่อนข้างไม่ปลอดภัยซึ่งอาจเกิดจากการที่ไม่ได้พิจารณาผลของการกะเทาะ

ดังนั้นควรพิจารณาผลของการกะเทาะของคอนกรีตและการให้แรงเยื้องศูนย์ ควรกำหนดการป้องกันในขอบเขตแรงดึงของคอนกรีตในการต้านทานไฟ ในปัจจุบันมาตรฐานนั้นครอบคลุมแค่เฉพาะการต้านทานไฟทั้ง 4 ด้านซึ่งขาดด้านกรต้านทานไฟทั้ง 1 2 และ 3 ด้านตามลำดับกับผลจากการกะเทาะ

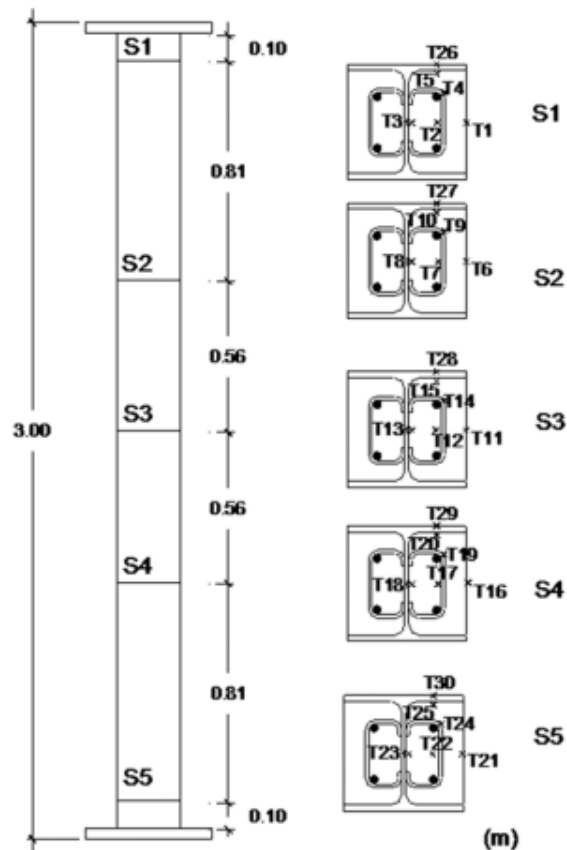
2.1.3 ศึกษาพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปตัวไอเฉพาะส่วนที่อุณหภูมิสูง

Moura Correia และ Rodrigues [10] ศึกษาผลของการยึดรั้งตามแนวแกนและการหมุนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่ถูกเผาไฟ โดยในการทดสอบนี้ศึกษา ระดับการให้แรงอัตราส่วนการยึดรั้งตามแนวแกนและการหมุนและความชะลูดของเสารายละเอียดหน้าตัดเสาแสดงดังรูปที่ 2-7 และรูปที่ 2-8



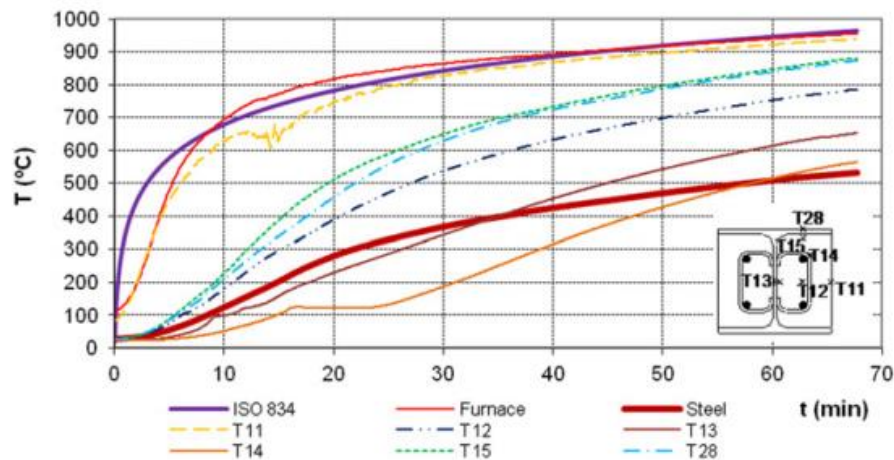
รูปที่ 2-7 รายละเอียดของหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน [10]

ในการทดสอบนี้ได้ให้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาเป็นไปตามมาตรฐาน ISO-834 [4] โดยที่เสาจะได้รับแรงอัดอย่างต่อเนื่องเพื่อเป็นการจำลองการให้แรงในสภาวะใช้งาน โดยจะกำหนดแรงเป็นอัตราส่วน 0.3 และ 0.7 ของแรงอัดประลัยที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EN1994-1-1 [3]



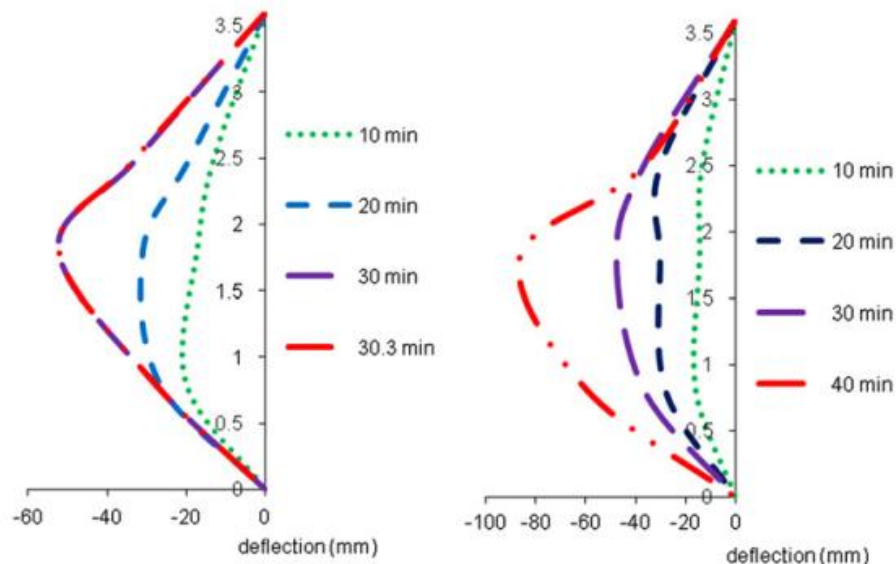
รูปที่ 2-8 การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในตัวอย่างการทดสอบ [10]

ในการทดสอบได้ทำการอุ่นเตาเผาก่อนการทดสอบทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของเตาเผาเท่ากับ 120°C ในการเริ่มต้นจึงเป็นการทำให้ค่าอุณหภูมิเทียบเท่า ISO 834 โดยได้เทียบผลของอุณหภูมิของหน้าตัด S3 นั่นคือจุดกึ่งกลางเสา ของตัวอย่าง CSS160-K13-L30 เป็นไปดังรูปที่ 2-9



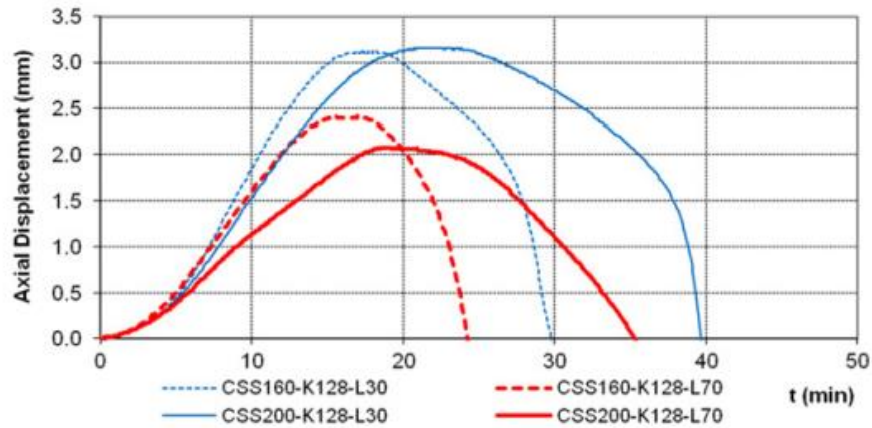
รูปที่ 2-9 กราฟความสัมพันธ์อุณหภูมิต่อเวลาของหน้ากึ่งกลางเสาและเตาเผา [10]

ในการทดสอบได้ทำการตรวจวัดการโก่งตัวทางด้านข้างของเสาในทิศทางแกนรองของ CSS160-K128-L0.3 และ CSS200-K128-L0.3 ซึ่งมีอัตราส่วนความขะลุดเป็นดังนี้ 1.09 และ 0.87 แต่ผลของการวัดได้ว่าการโก่งตัวทางด้านข้างของ CSS160-K128-L0.3 นั้นมีค่ามากกว่า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากค่าของการยึดรั้งการหมุนของของตัวอย่าง ซึ่งอัตราส่วนการยึดรั้งการหมุนเป็นดังนี้ 2.437 และ 1.048 ดังแสดงในรูปที่ 2-10

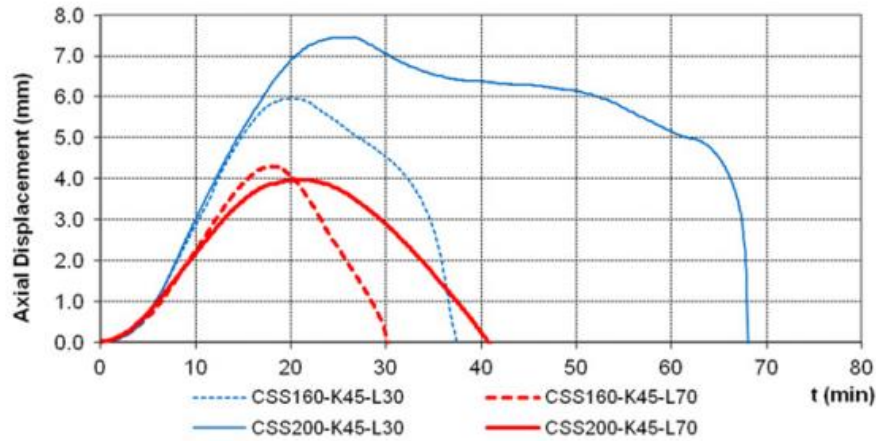


รูปที่ 2-10 การโก่งตัวทางด้านข้างของ CSS160-K128-L0.3 และ CSS200-K128-L0.3 [10]

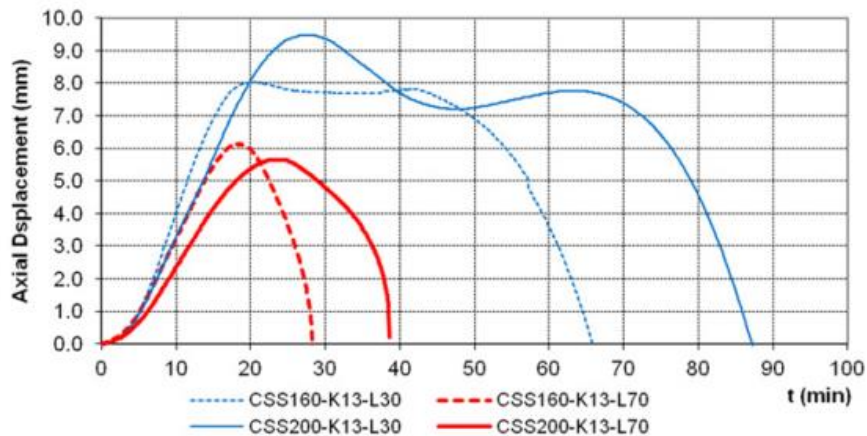
ทางด้าน การหดตัวตามแนวแกน แสดงอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ตามแนวแกนกับเวลา โดยจะแบ่งตามค่าสติฟเนสของคอนกรีต ตั้งแต่ 128 45 และ 13 kN/mm และระดับการให้แรง ซึ่งยิ่งความแข็งแกร่ง (stiffness) ของคอนกรีตที่มากก็มีแนวโน้มที่ทำให้การหดตัวตามแนวแกนลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 2-11 ถึง รูปที่ 2-13



รูปที่ 2-11 การหดตัวตามแนวแกนของเสาที่ค่าสติฟเนสเท่ากับ 128 kN/mm [10]



รูปที่ 2-12 การหดตัวตามแนวแกนของเสาที่ค่าสติฟเนสเท่ากับ 45 kN/mm [10]



รูปที่ 2-13 การหดตัวตามแนวแกนของเสาที่ค่าสตีเฟนสเท่ากับ 13 kN/mm [10]

การยึดรั้งแรงตามแนวแกนได้ถูกศึกษาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับระยะเวลา โดยเริ่มที่ $P/P_0 = 1$ ซึ่งจากการศึกษาทำให้พบว่า การวิบัติของเสาขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความขรุขระ และระดับของแรงที่กระทำต่อเสา

2.2 งานวิจัยในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์

2.2.1 การกระจายอุณหภูมิของเสาด้วยวิธี 2 มิติ

Yu และคณะ [7] ได้ทำการทำนายการกระจายตัวของอุณหภูมิและพฤติกรรมความเสียหาย โดยการพัฒนาสัมประสิทธิ์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อน โดยมีสมมติฐานว่า อุณหภูมิของเสานั้นคงที่ตลอดความยาว การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดเสานั้นพิจารณาเป็นแบบปัญหา 2 มิติ โดยความหนาแน่นของเหล็กและคอนกรีตไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ ความร้อนจำเพาะและการนำความร้อน

ในการศึกษาได้มีสมมติฐานว่า ไม่พิจารณาการเกาะเกาะของคอนกรีต ไม่คิดผลจากความร้อนภายในเสา จากผลการทดสอบอุณหภูมิภายในเหล็กรูปพรรณนั้นมีอุณหภูมิไม่เกิน 400°C ในการวิเคราะห์นั้นจะใช้วิธีแบบไฟไนต์เอลิเมนต์กับไฟไนต์ดิฟเฟอเรนเชียลรวมเข้าด้วยกัน

การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นมีการสมมติฐานว่า ถ้าเกิดรอยแยกและหลังจากนั้นที่อุณหภูมิสูงจะไม่ มีผลต่อการกระจายความเครียดของตัวอย่างเสาและจะไม่เกิดการลื่นไถลระหว่างคอนกรีตกับเหล็ก รูปพรรณ การวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นกำลังสูงสุดของเสาเหล็กรูปพรรณหุ้มด้วยคอนกรีตนั้นประกอบจากการศึกษากำลังสูงสุดของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง และหาความสัมพันธ์ของกำลังสูงสุดของตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติกับกำลังสูงสุดของตัวอย่างที่อุณหภูมิสูง โดยสมมติฐานในการวิเคราะห์ไม่เชิงเส้นได้แก่

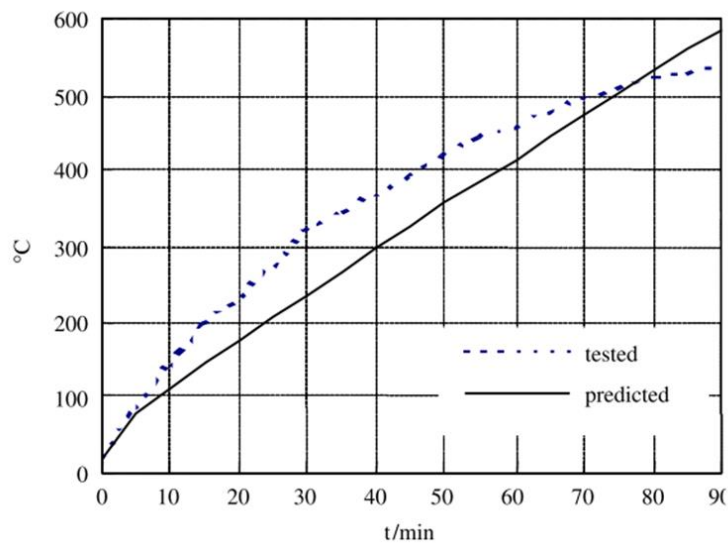
หลังจากที่เกิดรอยแยก อุณหภูมิสูงจะไม่เกิดผลกับการกระจายกำลังของตัวอย่างเสา เพราะยากต่อการทำนายผลให้แม่นยำโดยวิธีการเชิงตัวเลข จึงได้ไม่สนใจผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการกระจายกำลังในการวิเคราะห์และไม่เกิดการกะเทาะระหว่างเหล็กรูปพรรณ เหล็กเสริมตามแนวแรง และคอนกรีต นอกจากนี้ยังกำหนดให้หน้าตัดยังคงเหมือนเดิมแม้จะเกิดการเสีรูป

สมมติว่าการคืบที่อุณหภูมิสูงนั้นมีผลโดยตรงจากความเครียดจากในช่วงก่อนหน้านี้ถ้าระยะเวลาสั้นเล็กน้อยเพียงพอและการจำลองวิธีการของแรงกระทำภายใต้อุณหภูมิที่คง เป็นการคาดการณ์ได้ว่าความล้าจะลดลงตามค่าของความเครียดถ้าการเพิ่มแรงกำลังนั้นเล็กน้อยเพียงพอ

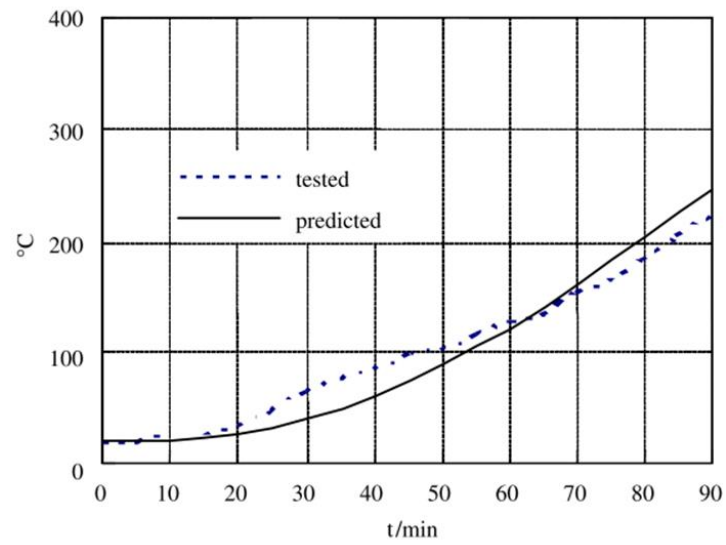
การเสีรูปของตัวอย่างเสานั้นเป็นไปตามสมการที่ (2.1) นำมาจำลองการเสีรูปภายใต้อุณหภูมิสูงโดยไม่คิดผลของการบิดจากแรงเยื้องศูนย์

$$f = \frac{(kL)^2 \times 1}{12 \times \theta} \quad (2.1)$$

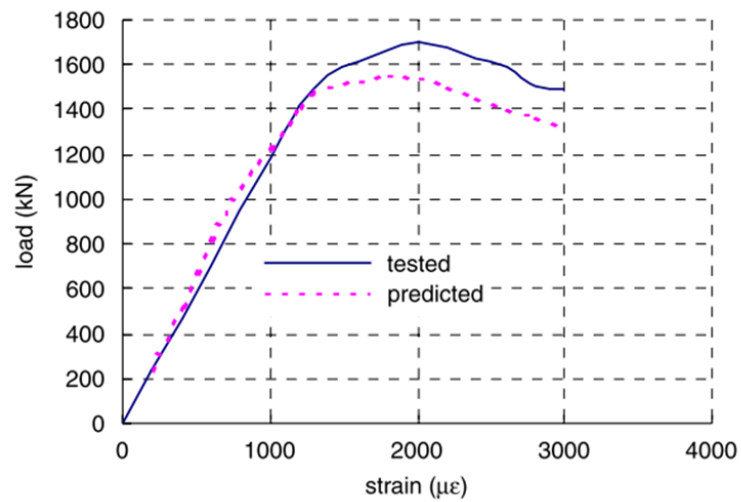
ซึ่งต่อจากนี้จะเป็นการแสดงผลการทดสอบเทียบกับผลการวิเคราะห์โดยจะแสดงอยู่ในรูปของกราฟแสดงถึงความสัมพันธ์ต่างๆดังรูปที่ 2-14 ถึง รูปที่ 2-19



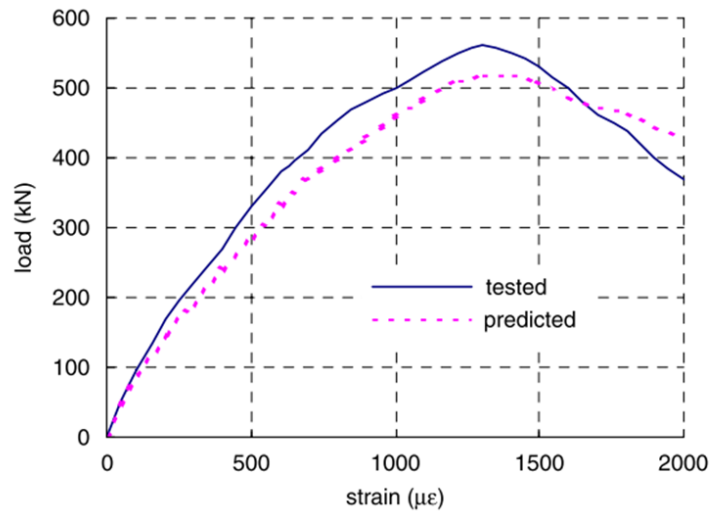
รูปที่ 2-14 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ในตำแหน่งที่ 1 [7]



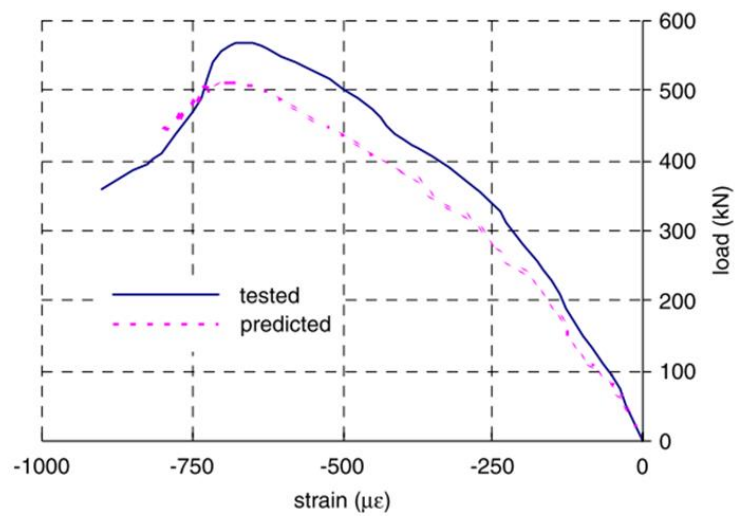
รูปที่ 2-15 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ในตำแหน่งที่ 5 [7]



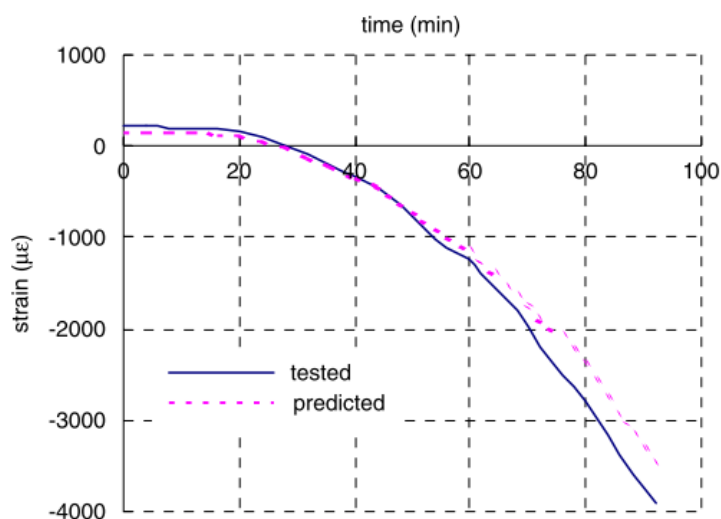
รูปที่ 2-16 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อแรงของคอนกรีตโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ของตัวอย่าง SRC1.4-0 [7]



รูปที่ 2-17 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อแรงของเหล็กรูปพรรณจากแรงอัดโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ของตัวอย่าง SRC1.8-80 [7]



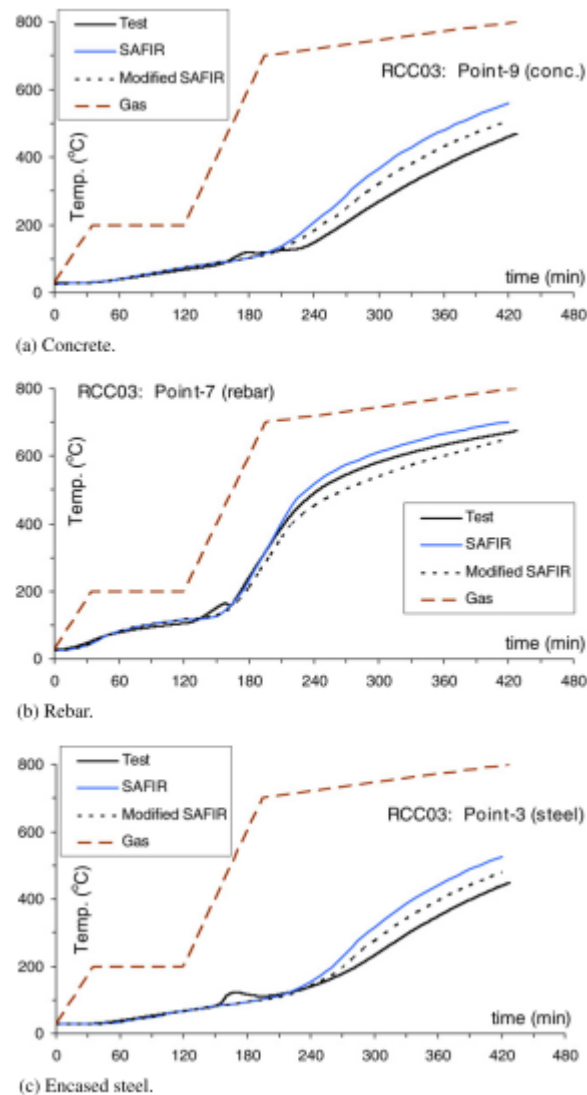
รูปที่ 2-18 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อแรงของเหล็กรูปพรรณจากแรงดึงโดยการทดสอบและการวิเคราะห์ของตัวอย่าง SRC1.8-80 [7]



รูปที่ 2-19 กราฟเปรียบเทียบหน่วยแรงต่อเวลาของเหล็กรูปพรรณโดยการทดสอบ และการวิเคราะห์ของตัวอย่าง SRC1.4-0 [7]

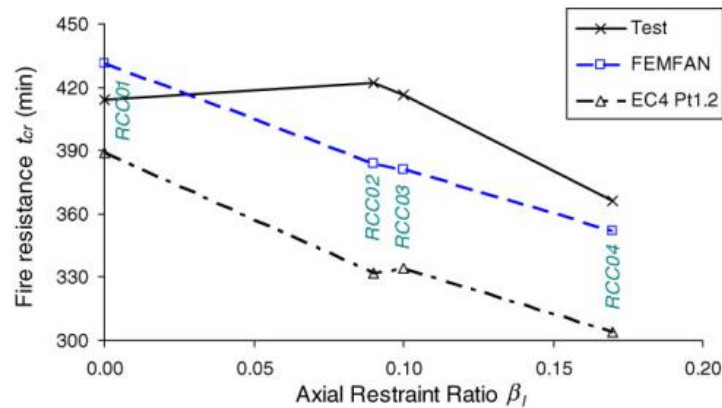
รูปข้างต้นเป็นการสรุปผลจากการทดสอบและการพัฒนาสมการการทำนายซึ่งได้ผลออกมาได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบทั้งภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิปกติและภายใต้สภาวะเผาไฟที่อุณหภูมิสูง โดยผลที่ได้นั้นมาจากพื้นฐานของการวิเคราะห์ความถดถอยและอยู่ในเงื่อนไขที่กำหนดที่ได้ระบุไว้ใน การทดสอบนี้ และได้ทราบถึงสัมประสิทธิ์ระหว่างกำลังสูงสุดของตัวอย่างเสาภายใต้อุณหภูมิปกติกับ กำลังสูงสุดของตัวอย่างเสาภายใต้อุณหภูมิสูง

Huang และคณะ [8] ได้ใช้โปรแกรม SAFIR (version2001) ในการหาการส่งผ่านความร้อน และวิเคราะห์โครงสร้าง การนำความร้อน ความร้อนเฉพาะ ความหนาแน่นของคอนกรีต นั้นอ้างอิง ตามมาตรฐาน Eurocode 2 ความชื้นของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความเย็น เท่ากับ 25 W/m²K และ 9 W/m²K ตามลำดับ การวิเคราะห์โครงสร้างได้ใช้โปรแกรม FEMFAM-3D ได้สมมติว่า คอนกรีต เหล็กเสริมตามแนวแกน เหล็ก รูปพรรณ สมบูรณ์แบบไม่เกิดการลื่นไถลและส่วนการกะเทาะกับรอยแตกของคอนกรีตไม่ถูกนำมาคิด ในโปรแกรม FEMFAM-3D โดยในรูปที่ 2-20 แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิ คอนกรีต เหล็กเสริมรับ แรงตามแนวแกน เหล็กรูปพรรณ จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรมและจากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2-20 กราฟอุณหภูมิกับเวลาของวัสดุแต่ละชนิดภายในตัวอย่างที่ 3 [8]

การเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ในแนวแกนกับเวลาจากการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม FEMFAN-3D ของตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่าง จากการวิเคราะห์ได้ค่าที่ดีใกล้เคียงกับมาตรฐาน Eurocode 4 [3] เนื่องจากในการทดสอบเกิดการกะเทาะแต่ในการวิเคราะห์ไม่มีการคำนวณถึงการกะเทาะของคอนกรีต และหน่วยแรงและความเครียดของวัสดุกำหนดตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] โดยที่ทุกตัวอย่างการทดสอบได้วิบัติด้วยคอนกรีตแตกและการโก่งตัวและการวิบัติเกิดจากการเสียดกำลังมากกว่าความไม่เสถียรภาพของตัวอย่าง มีการเปรียบเทียบระยะเวลาการทนต่อการถูกเผาไฟของ 4 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2-21

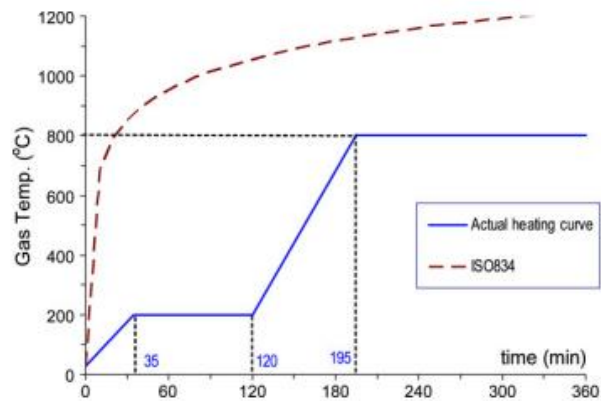


รูปที่ 2-21 การวัดของตัวอย่างและการเปรียบเทียบระหว่างตัวอย่าง [8]

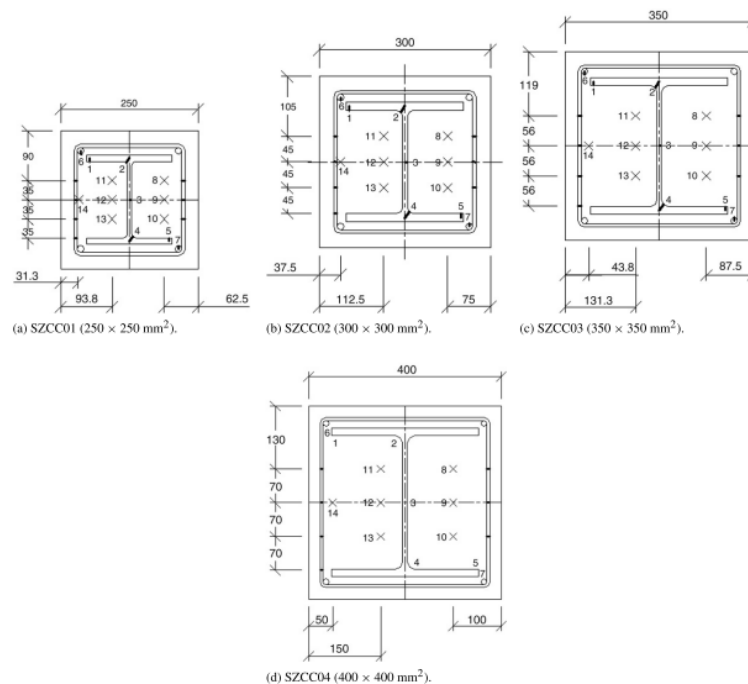
การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SAFIR และ FEMFAN-3D ได้ค่าที่ยอมรับได้แต่ในส่วน of หน้าตัดตัวอย่างเกิดความผิดพลาดของการทำนายอุณหภูมิเนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงส่วนของความชื้นในการวิเคราะห์เชิงตัวเลข และการกะเทาะของคอนกรีตไม่ได้รับการคำนึงถึงในโปรแกรม FEMFAN-3D และการคำนวณระยะเวลาวิกฤติของมาตรฐาน Eurocode 4 [3] ให้ค่ามากกว่าการวิเคราะห์ บ่งบอกว่าการออกแบบตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] นั้นค่อนข้างปลอดภัย

Huang และคณะ [11] ศึกษาไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายในมีเหล็ก รูปพรรณตัวไอตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] โดยพิจารณาผลจากการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดกับระดับการให้แรงกระทำ ซึ่งได้แบ่งออก 4 กลุ่มในการทดสอบเป็นหน้าตัดจัตุรัสได้แก่ 250x250 ถึง 400x400 ตารางมิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งแรงที่กระทำเป็นแรงอัดและเฉดไฟทั้ง 4 ด้าน ในแต่ละกลุ่มระดับการให้แรงจะเป็น 0.2 ถึง 0.5 จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทำให้ทราบว่าที่หน่วยแรงสูงที่กระทำกับตัวอย่างเสาหน้าตัดเล็กนั้นจะไม่สามารถต้านทานไฟได้ตามที่ Eurocode 4 [3] แนะนำได้ ในการตรวจสอบและพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทำโดยการทดสอบตัวอย่างเสา 4 ต้นด้วยความร้อนชั่วคราว จากการทดสอบตรวจสอบเทียบกับผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขได้ค่าออกมาตามการทดสอบทั้ง การกระจายอุณหภูมิและการตอบสนองของโครงสร้าง การทำนายการวิบัติทำตามคำแนะนำของ Eurocode 4 [3] ซึ่งได้ค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เป็นที่น่าสนใจว่าการต้านทานไฟนั้นไม่ได้อยู่ที่การให้แรงเพียงอย่างเดียว การต้านทานไฟนั้นยังต้องคำนึงถึงผลของขนาดหน้าตัดด้วยเพราะจะมีผลต่อการนำความร้อนเข้าสู่ภายในของเสา

รูปแบบความร้อนที่นำมาใช้จะมีด้วยกัน 2 ลักษณะซึ่งลักษณะแรกนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 5 °C ต่อนาทีและลักษณะสองนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น 8°C ต่อนาที การรักษาอุณหภูมิที่ 200°C เป็นเวลา 85 นาทีนั้นเพื่อเป็นการขับไล่ไอน้ำในหน้าตัดของคอนกรีตและมีข้อจำกัดของเตาเผาเนื่องจากที่มีความสามารถในการเพิ่มอุณหภูมิได้เพียง 12°C ต่อนาทีซึ่งไม่สามารถทำตามมาตรฐาน ISO834 [4] ได้ และการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล ดังแสดงในรูปที่ 2-22 และรูปที่ 2-23

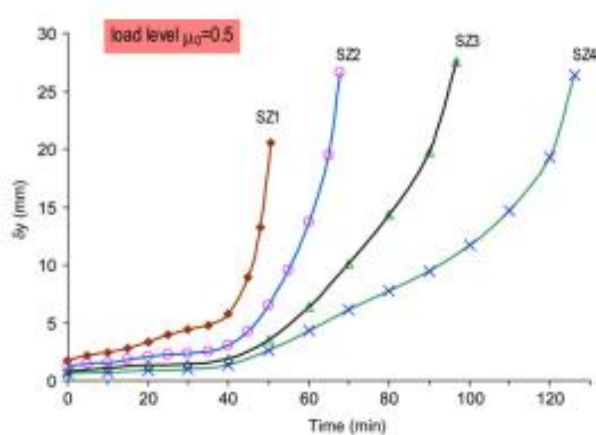


รูปที่ 2-22 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่าง ISO834 กับ เตาเผาที่ใช้งาน [11]



รูปที่ 2-23 ตำแหน่งของเทอร์โมคัปเปิลในหน้าตัดขนาดต่างๆ [11]

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการสร้างแบบจำลองทางตัวเลขของขนาดหน้าตัดต่างๆและแรงกระทำต่างๆ และทำการทดลองเพื่อตรวจสอบกับผลจากแบบจำลองเชิงตัวเลข เพื่อตรวจสอบว่าความต้องการขั้นต่ำของมาตรฐานนั้นเพียงพอต่อการต้านทานไฟภายในแรงกระทำสูงหรือไม่ ในส่วนแรกเป็นการศึกษาเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจากโปรแกรม FEMFAN-3D โดยแบ่งตัวอย่างออกเป็น 4 กลุ่ม เพื่อตรวจสอบผลจากการเปลี่ยนแปลงขนาดหน้าตัดและแรงกระทำ ตัวอย่างทั้งหมดยาว 3 เมตร ซึ่งทุกตัวอย่างจะได้รับการเผาไฟทั้ง 4 ด้านตามมาตรฐาน ISO 834 [4] ตลอดความยาว โดยใช้โปรแกรม SAFIR ในการวิเคราะห์การส่งผ่านความร้อนในรูปแบบ 2 มิติ อุณหภูมิ คุณสมบัติวัสดุนั้นใช้ตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] ความชื้นของคอนกรีตอยู่ที่ 130 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่าความชื้นสูงเป็นธรรมชาติของสังคโปร์ โดยที่การวิเคราะห์นั้นสมมุติให้อุณหภูมิของผิวคอนกรีตเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซ ซึ่งตัวอย่างทั้ง 4 ตัวอย่างนั้นพังกที่ระดับแรงที่ 0.5 ตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] yield strength ของเหล็กจะไม่ลดลงจนกว่าอุณหภูมิจะสูงเกินกว่า 400°C และ elastic modulus ของเหล็กจะเริ่มลดลงเมื่อความร้อนเกิน 100°C และที่ 500°C จะลดลง 40 % ซึ่งหมายความว่าเวลาที่เสาวิบัติ กำลังสูงสุดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตนั้นจะคงที่และกำลังรับแรงอัดลดลง 50 % ($\mu_0 = 0.5$) เป็นเหตุผลหลักของการเสื่อมสภาพของเหล็กเสริมตามแนวแกน ซึ่งในโปรแกรม FEMAFN-3D นั้นได้สมมุติว่าการยึดติดของตัววัสดุเป็นแบบสมบูรณ์แบบโดยไม่พิจารณาการลื่นไถลและการร้าว นอกจากนี้โปรแกรมไม่พิจารณาจากกะเทาะ การออกแบบโครงสร้างในโปรแกรมได้ทำการออกแบบเป็น จุดหมุนและจุดหมุนบนล้อ การเคลื่อนที่ทางด้านข้างของตัวอย่างนั้นอยู่ภายใต้อัตราส่วนของแรงที่ $\mu_0 = 0$ และตัวอย่างที่มีผลมากที่สุดคือ SZ1 ในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2-24

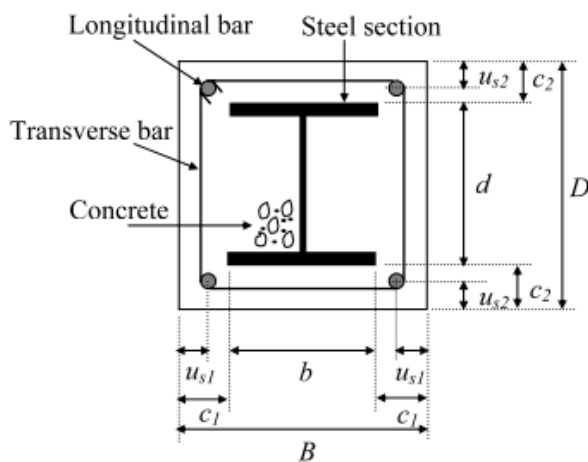


รูปที่ 2-24 การโก่งตัวทางด้านข้างตัวอย่าง [11]

การวิเคราะห์ตาม Eurocode 4 [3] และการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้ผลที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันแต่ไม่ค่อยสอดคล้องกับผลจากทดสอบเนื่องจาก ในการทดสอบจริงได้เกิดการกะเทาะของคอนกรีตซึ่งในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นไม่สามารถทำนายพฤติกรรมของการกะเทาะได้เหมือนอย่างการทดสอบ ซึ่งจากการวิจัยการเพิ่มขนาดหน้าตัดสุทธิจะทำให้การต้านทานไฟไหม้ได้มากขึ้น

2.2.2 ประสิทธิภาพของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ถูกยึดรั้งตามแนวแกนภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง

Young และ Ellobody [12] ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการโดยยึดรั้งแรงในแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง โดยเป็นการวิเคราะห์รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้น 3 มิติของจุดยึดรั้งแบบหมุนรับแรงตามแนวแกน การยึดรั้งแรงในแนวแกนมีอัตราส่วนอยู่ที่ตั้งแต่ 20%-100% ของสติเฟนสแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่สภาวะอุณหภูมิปกติ การวิเคราะห์รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นนั้นได้เปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่มีการยึดรั้งแรงในแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้สภาวะเผาไฟที่อุณหภูมิสูง ในการวิเคราะห์นั้นจะทำการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของเหล็กรูปพรรณและเปลี่ยนขนาดของมวลรวมหยาบและอัตราส่วนของแรงที่กระทำขณะโดนเผาไฟ โดยหน้าสัมผัสของคอนกรีตและเหล็กนั้นถูกออกแบบในการวิเคราะห์และส่วนประกอบต่างๆระหว่างการเสีรูปร่างของเสาและความไม่สมบูรณ์แบบของวัสดุ โดยหาผลของความสัมพันธ์ของเวลาต่ออุณหภูมิ รูปแบบการเสีรูปร่าง ความสัมพันธ์ของเวลาต่อการระเหยการเคลื่อนที่ในแนวแกน รูปแบบการวิบัติ การต้านทานการเผาไฟของเสา และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบนอกจากนี้ยังได้พิจารณาสัมประสิทธิ์ที่มีผลต่อการต้านทานไฟและพฤติกรรมของการยึดรั้งแรงตามแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ประกอบด้วย ความแตกต่างของอัตราส่วนการยึดรั้งแรงตามแนวแกน ความแตกต่างอัตราส่วนแรงที่กระทำกับเสาขณะเผาไฟ ความแตกต่างของมวลรวมหยาบ ความแตกต่างของอัตราส่วนความชะลุดของเสา การต้านทานไฟของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตนั้นได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับการออกแบบโดยมาตรฐาน Eurocode 4 [3] ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้สภาวะเผาไฟที่อุณหภูมิสูง โดยรวมการออกแบบโดย Eurocode 4 [3] นั้นค่อนข้างปลอดภัยสำหรับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตแต่มียกเว้นระดับของแรงที่สูงและอัตราส่วนความชะลุดมาก หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตแสดงดังรูปที่ 2-25



รูปที่ 2-25 รายละเอียดภายในหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต [3]

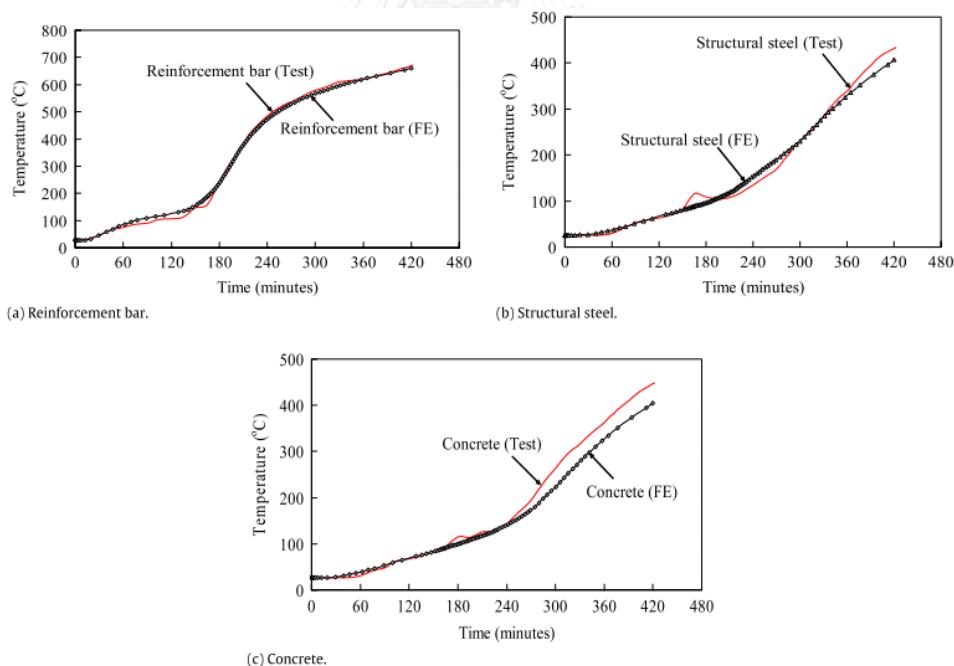
การวิเคราะห์ได้กำหนดให้สมบัติคอนกรีตเป็นพลาสติกซีดี โดยที่แรงดึงนั้นเป็นแบบสม่ำเสมอ และแรงอัดเป็นแบบพลาสติกซีดี แสดงในพฤติกรรมไม่ยืดหยุ่นของคอนกรีต ในการโมเดล สมมุติฐานให้การรับแรงดึงในแกนเดียวกับแรงอัดเป็นลักษณะของความเสียหายทางพลาสติกซีดี การวิบัติโดยแรงดึงนั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.1 ของแรงอัด การทำนายการกระจายอุณหภูมิของเสาจากการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นฐานของการทดสอบและมาตรฐานไฟ ผลการเปรียบเทียบเป็นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดของตัวอย่างการทดสอบและผลการเปรียบเทียบจากการทดสอบและการวิเคราะห์ [12]

Test	Restraint condition	Test period (min)	FE period (min)	FEperiod/Testperiod
RCC02	Restrained	417	367	0.88
RCC03	Restrained	422	368	0.87
RCC04	Restrained	366	376	1.03
RCC01	Unrestrained	414	372	0.90
SZCC02	Unrestrained	229	232	1.01
			Mean	0.94
			COV	0.081

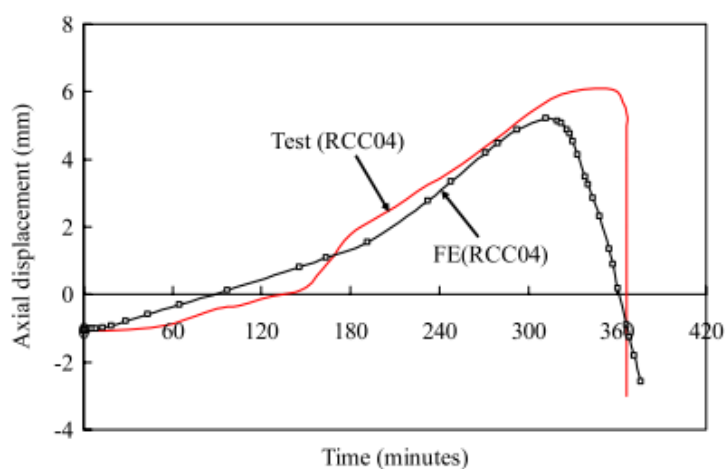
การจำลองรูปแบบผิวสัมผัสหลักคือคอนกรีตรอบๆ เหล็กรูปพรรณและผิวสัมผัสรองคือเหล็กเสริม ซึ่งสัมพันธ์กับความเสียหายของทั้งสองผิวสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.25 การถ่ายแรงสู่สองพื้นผิวนั้นเป็นไปตามปกติแต่ถ้าทั้งสองพื้นผิวจะแยกออกจากกันการถ่ายแรงจะไม่ส่งต่อกันแต่ความสัมพันธ์ด้านการเคลื่อนที่นั้นยังคงเหมือนเดิม หน่วยแรง ความเครียด เส้นโค้งอุณหภูมิ ของคอนกรีตภายใต้แรงอัดและแรงดึงใช้สัมพันธ์ปรับแก้จากมาตรฐาน Eurocode 4 [3] ความร้อนจำเพาะและการนำความร้อนของคอนกรีตคำนวณตามมาตรฐาน Eurocode 2 การกะเทาะของคอนกรีตไม่ถูกพิจารณาในการทดสอบนี้ ความสัมพันธ์หน่วยแรงกับความเครียดของเหล็กและความร้อนจำเพาะกับการนำความร้อนนั้นคำนวณตามมาตรฐาน Eurocode 4 [3] ผลการทดสอบการยึดรั้งแรงตามแนวแกนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงจาก Huang และคณะ [8] ใช้ในการตรวจสอบการจำลองรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม ABAQUS

รูปที่ 2-26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลานั้นได้นำเสนอในตัวอย่างการทดสอบที่สามซึ่งได้แบ่งออกเป็น เหล็กเสริมตามแนวแกน เหล็กรูปพรรณ คอนกรีต ที่จุดกึ่งกลางของเสาตัวอย่างซึ่งจะทำให้เห็นว่าการทำนายจากไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 2-26 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของตัวอย่างที่สามจากเหล็กเสริมตามแนวแกน เหล็กรูปพรรณและคอนกรีต [12]

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเคลื่อนที่ตามแนวแกนกับเวลานั้นเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบจากตัวอย่างที่ 4 ซึ่งเป็นตัวอย่างที่มีการเสียรูปตอนต้นตามแนวแกนจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้ทำนายค่าการเสียรูปเท่ากับ 1.03 มิลลิเมตรและจากผลการทดสอบได้ค่าการหดตัวเท่ากับ 1.07 มิลลิเมตร การยืดขยายออกจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นได้ทำนายไว้เท่ากับ 5.21 มิลลิเมตรและจากผลการทดสอบเท่ากับ 6.09 มิลลิเมตร และการโก่งตัวเนื่องจากแรงตัดของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ 376 นาทีเทียบผลการทดสอบ 366 นาที ดังแสดงในรูปที่ 2-27



รูปที่ 2-27 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ตามแนวแกนกับเวลา
ของตัวอย่างการทดสอบที่ 4 [12]

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้จำลองคุณสมบัติวัสดุเป็นแบบไม่เชิงเส้นทั้ง คอนกรีต เหล็กเสริมตามแนวแกน เหล็กปลอกและเหล็กรูปพรรณและได้ศึกษาพฤติกรรมของผลสัมพัทธ์ระหว่างคอนกรีตกับเหล็กรูปพรรณ คอนกรีตกับเหล็กเสริม ในการทำแบบจำลองและส่วนประกอบต่างระหว่างการยุบตัวของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ความไม่สมบูรณ์แบบของตัวอย่างก็ได้ทำการจำลองได้จำลองการยึดรั้งตามแนวแกนในแบบต่างๆตั้งแต่ 20%ถึง100% ของสติฟเนสตามแนวแกนของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในสภาวะอุณหภูมิปกติ จากการทดสอบที่นี้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่โดยยึดรั้งตามแนวแกนในสภาวะโดนเผาไฟมีความแตกต่างตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ไม่มีการยึดรั้งตามแนวแกน รูปแบบการวิบัติแบบ runaway ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่มีการยึดรั้งตามแนวแกน การขยายตัวของตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเป็นแกรนิตมีการขยายตัวมากกว่าในกรณีที่มีอัตราส่วนของแรงที่กระทำเล็กน้อย ในการทดสอบได้ทำการเทียบค่าการ

ต้านทานไฟของการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์กับมาตรฐาน Eurocode 4 [3] ซึ่งการวิเคราะห์เป็นไปอย่างละเอียดจึงทำให้ค่าที่ได้จากมาตรฐาน Eurocode 4 [3] มีความปลอดภัยสูงกว่าการวิเคราะห์แต่ในบางกรณีไม่ได้ปลอดภัยกว่าในช่วงที่ตัวอย่างเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตนั้นรับอัตราส่วนของแรงมากและอัตราส่วนความชะลูด



บทที่ 3

การวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

การวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจะพิจารณาอุณหภูมิในสถานะชั่วคราวแบบไร้เชิงเส้น 3 มิติ (3-D nonlinear transient thermal analysis) เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ จะให้ผลที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยการเผาไฟในสภาพแวดล้อมจริง การกระจายอุณหภูมิภายในเสาไม่ได้เท่ากันตลอดความยาวเสา โดยที่ส่วนบนและล่างของเสาจะให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าส่วนกลางของเสา โดยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเชิงความร้อนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (thermal properties) ไฟออกแบบ (design fire) สำหรับวิเคราะห์อุณหภูมิ สมการควบคุมสำหรับวิเคราะห์ (governing equation) และวิธีการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ซึ่งอธิบายรายละเอียดในบทนี้

3.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีต

คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปกติ จะแปรผันตามชนิดของมวลรวมและอุณหภูมิ โดยสามารถแบ่งชนิดของมวลรวมเป็น 2 กลุ่มได้แก่ มวลรวมเนื้อปูน และ มวลรวมเนื้อซิลิกา สำหรับการวิเคราะห์นี้จะอ้างอิงคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตจากมาตรฐาน EN1994-1-2 [9] ได้แก่ สภาพการนำความร้อน (thermal conductivity) ความร้อนจำเพาะ (specific heat) และความหนาแน่น (density)

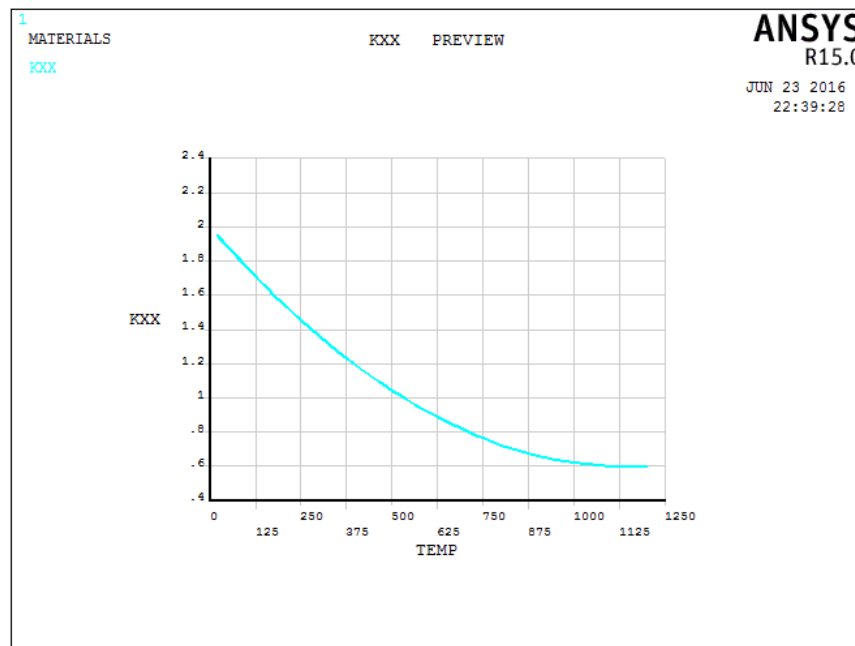
สภาพการนำความร้อนของคอนกรีตปกติได้ให้ใช้ค่าอยู่ในช่วงขีดจำกัดบน (upper limit) และขีดจำกัดล่าง (lower limit) ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-1200°C โดยมีหน่วยเป็น W/mK ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยตามที่มาตราฐานแนะนำ ขอบเขตบนใช้สำหรับโครงสร้างเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต (composite structural elements) โดยการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้จะเป็นช่วงขีดจำกัดบนในโปรแกรม ANSYS [5, 6] ดังแสดงในรูปที่ 3-1

$$\lambda_c = 2 - 0.2451\left(\theta_c/100\right) + 0.0107\left(\theta_c/100\right)^2 \quad (3.1)$$

$$\lambda_c = 1.3 - 0.136\left(\theta_c/100\right) + 0.0057\left(\theta_c/100\right)^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ λ_c คือ สภาพนำความร้อนของคอนกรีต (w/mK)

θ_c คือ อุณหภูมิของคอนกรีต (°C)



รูปที่ 3-1 สภาพการนำความร้อนของคอนกรีตที่ใช้จะเป็นช่วงขีดจำกัดบนในโปรแกรม ANSYS [5, 6]

ความร้อนจำเพาะของคอนกรีตปกติจะแปรผันตามความชื้นในคอนกรีตและอุณหภูมิ เนื่องจากไม่มีข้อมูลความชื้นจากการทดสอบ จึงสมมุติให้คอนกรีตอยู่ในสภาวะแห้ง (ความชื้น 0%) ในช่วงอุณหภูมิ 20-1200°C โดยมีหน่วยเป็น J/kgK ซึ่งจะให้ผลการวิเคราะห์เป็นค่าเชิงอนุรักษ์ ดังสมการที่ (3.3-3.6) โดยความร้อนจำเพาะของคอนกรีตที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6] ดังแสดงในรูปที่ 3-2

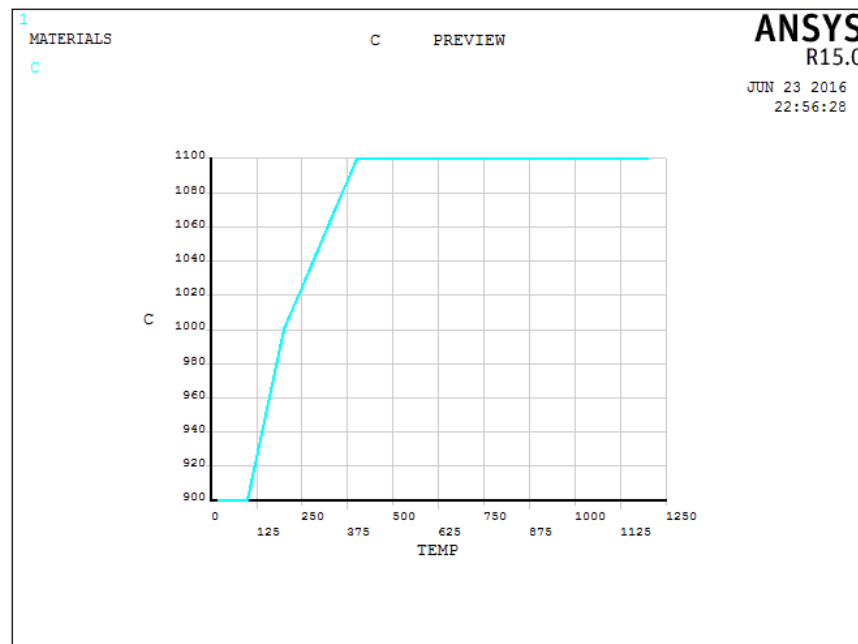
$$C_c = 900 \quad \text{สำหรับ } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C} \quad (3.3)$$

$$C_c = 900 + (\theta_c - 100) \quad \text{สำหรับ } 100^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 200^\circ\text{C} \quad (3.4)$$

$$C_c = 1000 + (\theta_c - 200)/2 \quad \text{สำหรับ } 200^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

$$C_c = 1100 \quad \text{สำหรับ } 400^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

โดยที่ θ_c คือ อุณหภูมิของคอนกรีต



รูปที่ 3-2 ความร้อนจำเพาะของคอนกรีตที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]

ความหนาแน่นของคอนกรีตนั้นถูกพิจารณาให้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของคอนกรีต ซึ่งค่าความหนาแน่นมีค่าดังต่อไปนี้ โดยมีหน่วยเป็น kg/m^3

$$\rho_{c,NC} = 2300 \quad (3.7)$$

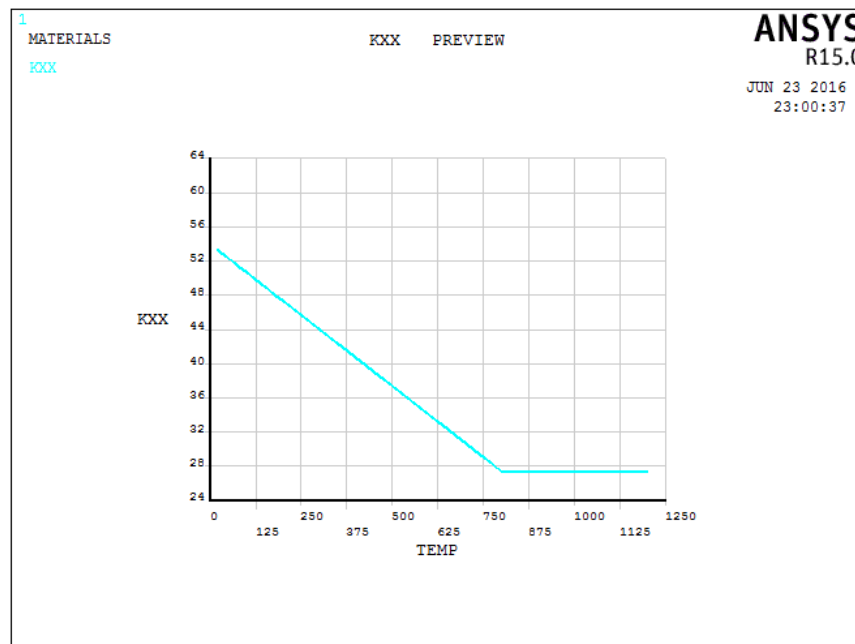
3.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริม

สภาพการนำความร้อนของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมสามารถพิจารณาเป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้ โดยมีหน่วยเป็น W/mK ซึ่งการนำความร้อนของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6] ดังแสดงในรูปที่ 3-3

$$\lambda_o = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_o \quad \text{สำหรับ } 20^\circ \text{C} \leq \theta_o \leq 800^\circ \text{C} \quad (3.8)$$

$$\lambda_o = 27.3 \quad \text{สำหรับ } 800^\circ \text{C} \leq \theta_o \leq 1200^\circ \text{C} \quad (3.9)$$

โดยที่ θ_o คือ อุณหภูมิของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริม



รูปที่ 3-3 สภาพการนำความร้อนของเหล็กgrupพรรณและเหล็กเสริมที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]

ความร้อนจำเพาะของเหล็กgrupพรรณและเหล็กเสริมสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้ โดยมีหน่วยเป็น J/kgK ซึ่งความร้อนจำเพาะของเหล็กgrupพรรณและเหล็กเสริมที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6] ดังแสดงในรูปที่ 3-4

$$C_c = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_c - 1.69 \times 10^{-3} \theta_c^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_c^3 \quad (3.10)$$

$$\text{สำหรับ } 20^\circ C \leq \theta_c \leq 600^\circ C$$

$$C_c = 666 - \left(\frac{13002}{\theta_c - 738} \right) \quad (3.11)$$

$$\text{สำหรับ } 600^\circ C \leq \theta_c \leq 735^\circ C$$

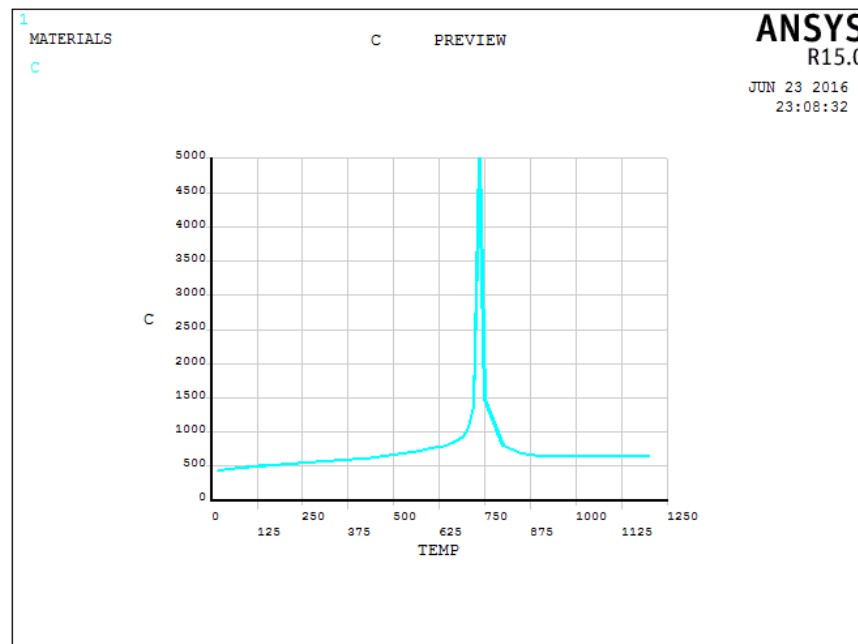
$$C_c = 545 + \left(\frac{17820}{\theta_c - 731} \right) \quad (3.12)$$

$$\text{สำหรับ } 735^\circ C \leq \theta_c \leq 900^\circ C$$

$$C_c = 650 \quad (3.13)$$

$$\text{สำหรับ } 900^\circ C \leq \theta_c \leq 1200^\circ C$$

โดยที่ θ_c คือ อุณหภูมิของเหล็กgrupพรรณและเหล็กเสริม



รูปที่ 3-4 ความร้อนจำเพาะของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมที่ใช้ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]

ความหนาแน่นของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมถูกพิจารณาให้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริม ซึ่งค่าความหนาแน่นมีค่าดังต่อไปนี้ โดยมีหน่วยเป็น kg/m^3

$$\rho_a = 7850 \quad (3.14)$$

3.3 กราฟไฟสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

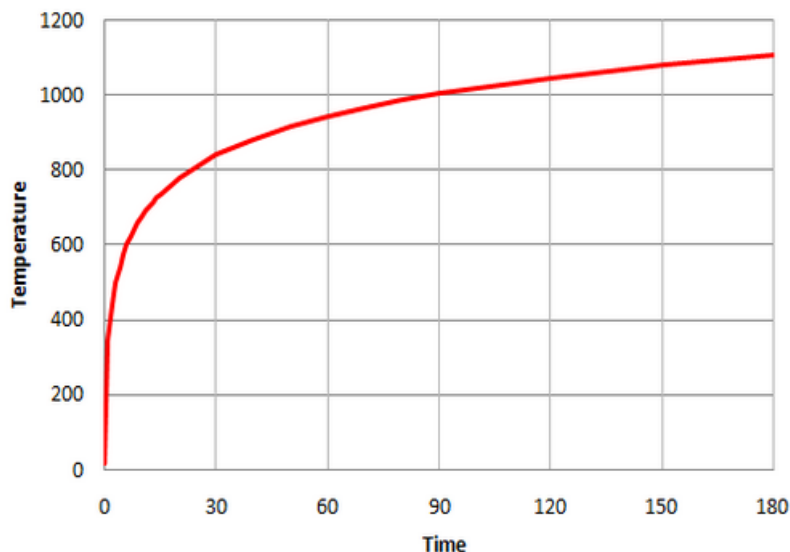
การสร้างแบบจำลองการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาที่รับความร้อนจากการเผาไฟ จะต้องทราบความร้อนที่ส่งผ่านเข้าสู่หน้าตัดคอนกรีต โดยในงานวิจัยจะใช้เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเผาไฟที่อ้างอิงจากเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 [4] และมีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการและดังรูปที่ 3-5

$$T_g = 345 \log(8t + 1) + T_0 \quad (3.15)$$

โดยที่ T_g คือ อุณหภูมิของเตาเผา(องศาเซลเซียส)

T_0 คือ อุณหภูมิโดยรอบ(องศาเซลเซียส) ซึ่งอุณหภูมิโดยรอบจะมีค่า 20°C

t คือ เวลา(นาที)



รูปที่ 3-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิต่อเวลาของมาตรฐาน ISO 834 [4]

3.4 สมการควบคุมสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

จากแนวคิดการส่งผ่านความร้อน ความร้อนจะถูกส่งผ่านจากกราฟไฟฟู่พื้นผิวของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตด้วยวิธีพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน และจากพื้นผิวของคอนกรีตเข้าสู่ชั้นข้างในด้วยวิธีการนำความร้อน ซึ่งการนำความร้อนชั่วคราว (transient heat conduction) ได้ในปริภูมิ 2 มิติ และ 3 มิติ ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} = \left(\frac{\lambda_m}{\rho_m c_{p,m}} \right) \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} = \left(\frac{\lambda_m}{\rho_m c_{p,m}} \right) \frac{\partial T_m}{\partial t} \quad (3.17)$$

โดยที่ T_m คืออุณหภูมิของวัสดุที่เวลา t และ $\frac{\lambda_m}{\rho_m c_{p,m}}$ คือสภาพแพร่ความร้อน (thermal diffusivity)

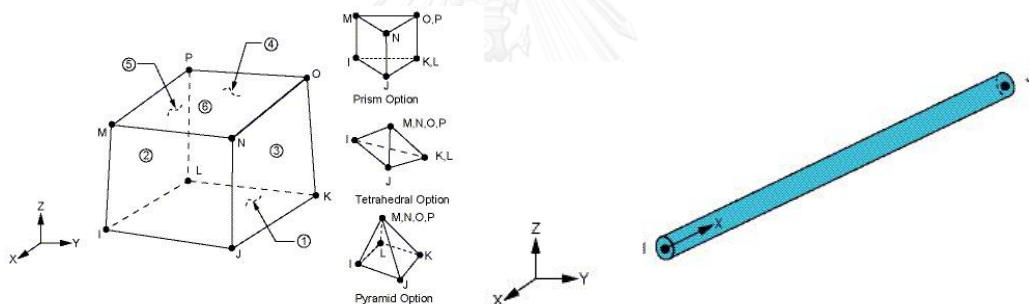
λ_m คือสภาพนำความร้อน ρ_m คือความหนาแน่น (density)

$c_{p,m}$ คือความร้อนจำเพาะ (specific heat) ซึ่งคุณสมบัติเชิงความร้อนทั้ง 3 ค่าของทั้งคอนกรีตและเหล็กจะพิจารณาค่าที่อุณหภูมิสูงตามมาตรฐาน EN1992-1-2

3.5 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิ

เนื่องจากสมการควบคุมที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นแบบไร้เชิงเส้นและในสภาพวะชั่วคราว จึงวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [5, 6] เป็นอุปกรณ์ในการแก้ไขปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความซับซ้อนและเนื่องจากผลการวิเคราะห์เป็นผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดจากการทำซ้ำ โดยความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับจำนวนความละเอียดของไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งมีความจำเป็นในการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบเพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิจะใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [5, 6] แบบ 3 มิติ โดยเลือกใช้เอลิเมนต์ (element) ของคอนกรีตและเหล็ก รูปพรรณ เป็น SOLID 70 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มี 8 จุดต่อ (node) และมีระดับความเสรีคือ อุณหภูมิ ที่แต่ละจุดต่อ นอกจากนี้เลือกใช้เอลิเมนต์ ของเหล็กเสริมตามแนวยาว (rebar) เป็น LINK 33 เป็นเอลิเมนต์ที่มี 2 จุดต่อ และมีระดับความเสรีคือ อุณหภูมิ ที่แต่ละจุดต่อดังแสดงในรูปที่ 3-6



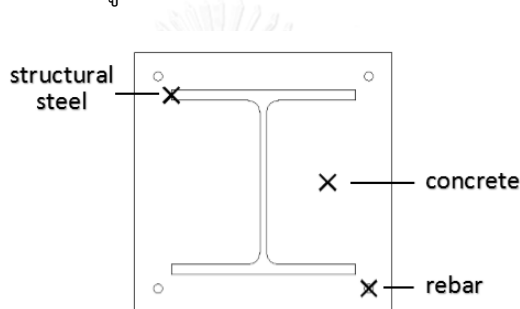
รูปที่ 3-6 ลักษณะของเอลิเมนต์ SOLID 70 และ Link 33 ที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ

คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 การให้ความร้อนแก่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจะกำหนดให้หน้าสัมผัสคอนกรีตมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (uniform temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิห้อง 20 องศา ต่อมากำหนดให้ส่งผ่านความร้อนจากกราฟไฟ สู่เอลิเมนต์ ในรูปแบบของการนำความร้อนที่ขอบพื้นผิว สำหรับพื้นผิวที่ได้รับความร้อนและไม่ได้รับความร้อนและกำหนดให้มีสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และ $9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ตามลำดับซึ่งในที่นี้ไม่พิจารณาถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากในการวิเคราะห์ให้ความร้อนรอบๆผิวสัมผัสของเนื้อคอนกรีต

3.6 การตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต

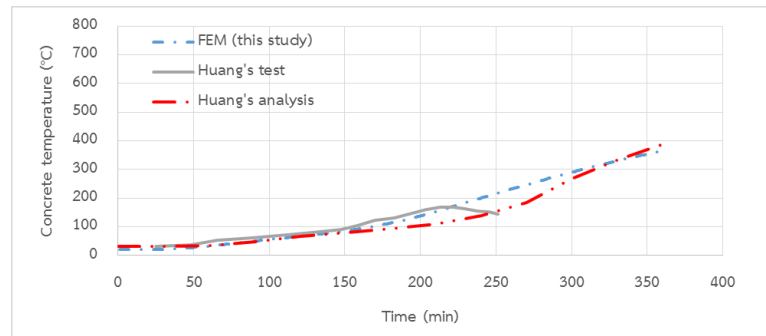
3.6.1 ผลการทดสอบของ Huang และคณะ [11]

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิที่นำเสนอซึ่งได้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบการเผาไฟของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ได้เผาไฟตามเตาเผาไฟฟ้า ของ Huang และคณะ [11] พบว่าผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัดมีความสอดคล้องกับผลการวัดอุณหภูมิจากการทดสอบเพราะฉะนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตขณะเผาไหม้ จากรูปที่ 3-7 แสดงตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตของ Huang และคณะ [11] ได้แก่ ตำแหน่งเหล็กรูปพรรณ เหล็กเส้นตามแนวแกน และคอนกรีต

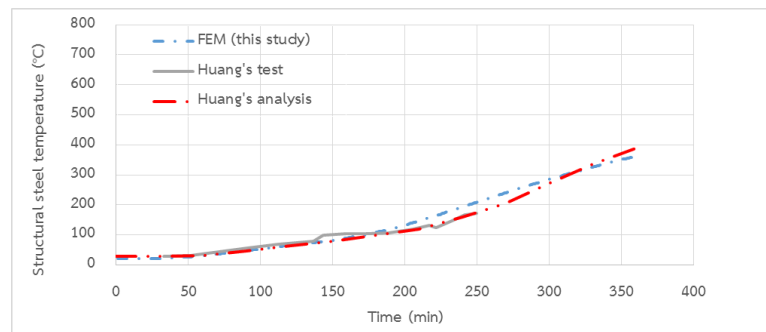


รูปที่ 3-7 ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัด [11]

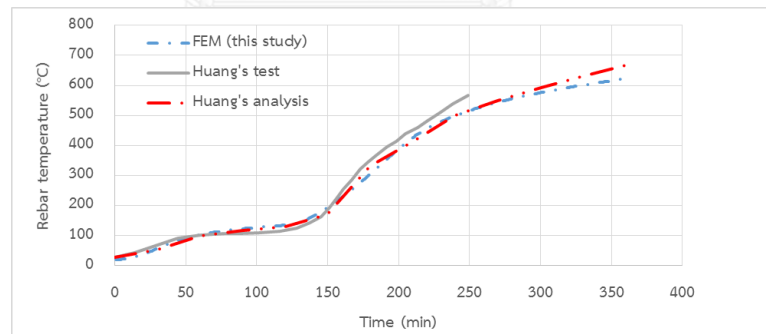
จากรูปที่ 3-8 ถึง รูปที่ 3-10 การตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเปรียบเทียบการวัดอุณหภูมิของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในส่วนของคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริม ตามที่มีตำแหน่งตัววัดอุณหภูมิติดตั้งแสดงในรูปที่ 3-7 โดยในทดสอบของ Huang และคณะ มีการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม SAFIR 2007 ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผา



รูปที่ 3-8 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์
ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในส่วนของคอนกรีต

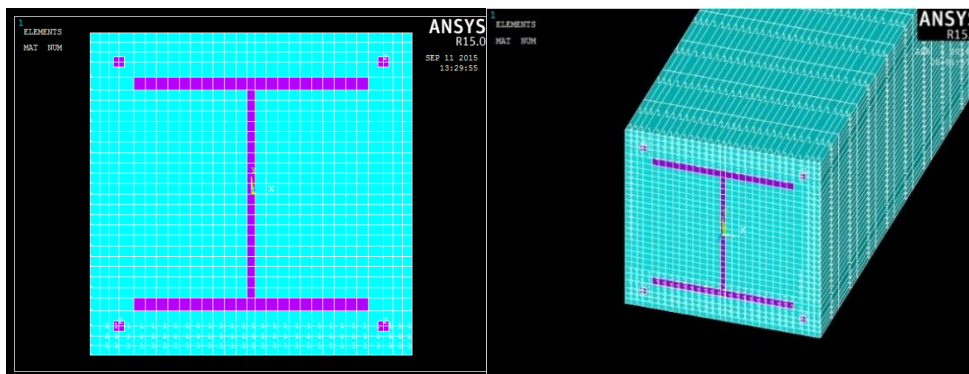


รูปที่ 3-9 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์
ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในส่วนของเหล็กรูปพรรณ



รูปที่ 3-10 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์
ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในส่วนของเหล็กเสริม

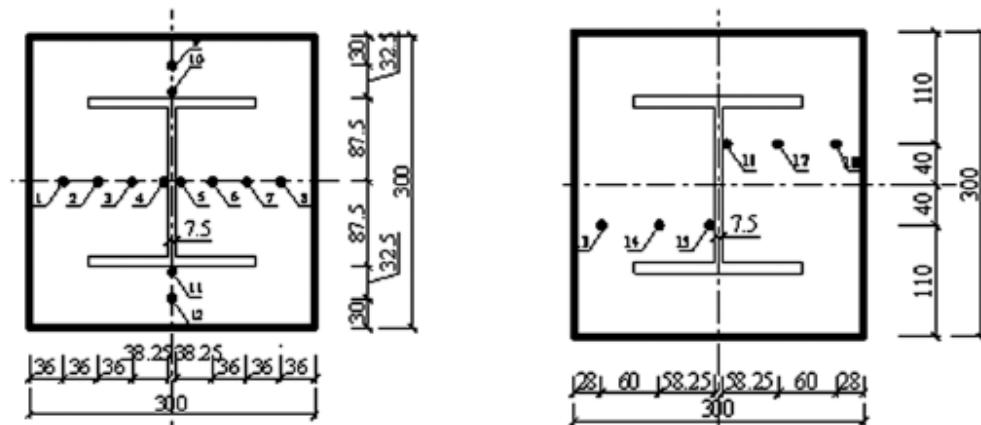
การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิเปรียบเทียบกับ Huang และคณะ [11] แสดงดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบอุณหภูมิ จากโปรแกรม ANSYS [5, 6]

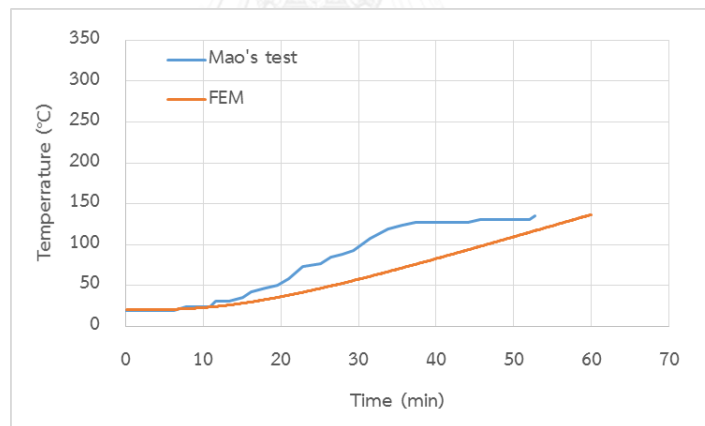
3.6.2 ผลการทดสอบของ Mao และ Kodur [1]

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิที่นำเสนออย่างได้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์กับผลการทดสอบการเผาไหม้ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ได้เผาไปตามมาตรฐาน ISO834 [4] ของ Mao และ Kodur [1] พบว่าผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัดมีความสอดคล้องกับผลการวัดอุณหภูมิจากการทดสอบแต่ในส่วนของคุณสมบัติทางความร้อนนั้นทาง Mao และ Kodur [1] ไม่ได้กำหนดให้จึงทำให้ทางผู้ทำวิจัยกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนเป็นไปตาม EN 1994-1.2 [9] เพราะฉะนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตขณะเผาไหม้ ตำแหน่งการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตของ Mao และ Kodur [1] จากตัวอย่าง FR4S06 ได้แก่ ตำแหน่งเหล็กรูปพรรณ และระยะความลึกต่างๆ โดยจากรูปที่ 3-12 แสดงตำแหน่งติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

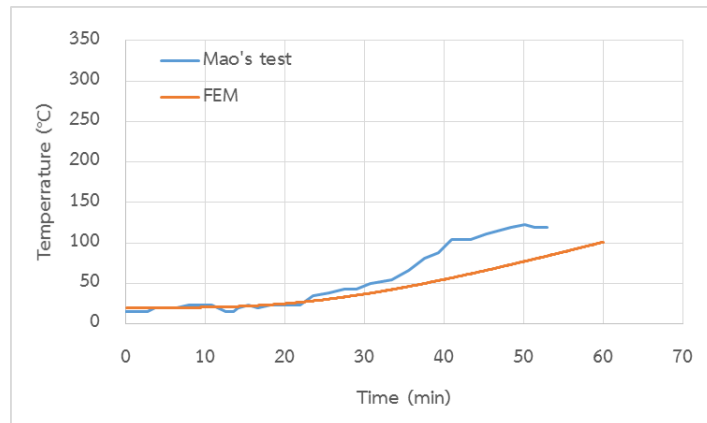


รูปที่ 3-12 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล [1]

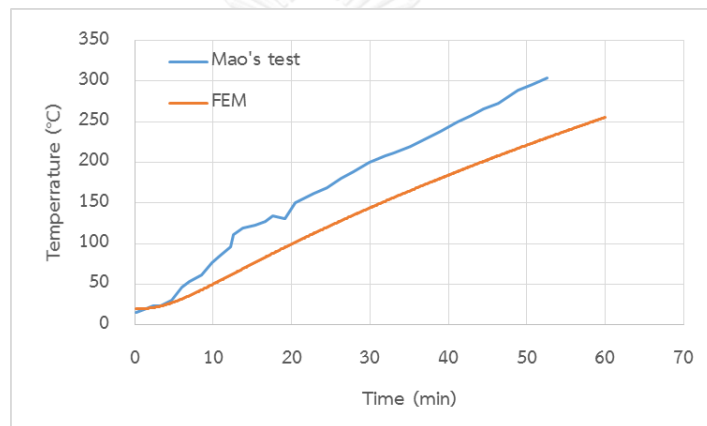
รูปที่ 3-13 ถึง รูปที่ 3-16 แสดงการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จากการเปรียบเทียบการวัดอุณหภูมิของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในตำแหน่งของคอนกรีตเหล็กรูปพรรณ ตามตำแหน่งตัววัดอุณหภูมิ



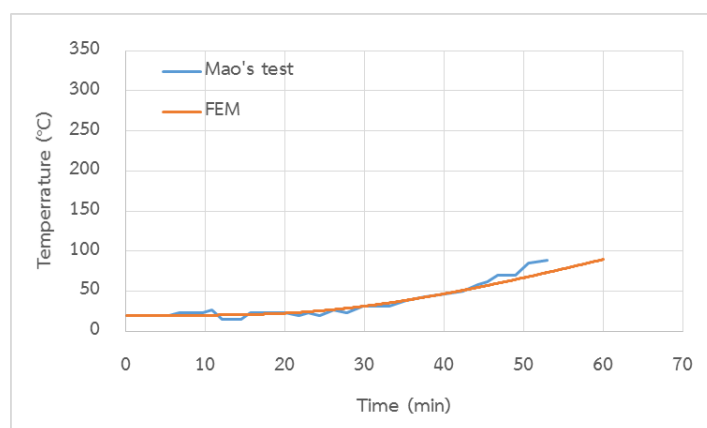
รูปที่ 3-13 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในตำแหน่งของปีกเหล็กรูปพรรณ



รูปที่ 3-14 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์
ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในตำแหน่งของเอวเหล็กรูปพรรณ



รูปที่ 3-15 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์
ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในตำแหน่งของคอนกรีตที่มีความลึก 28 มิลลิเมตร



รูปที่ 3-16 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบและการวิเคราะห์
ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในตำแหน่งของคอนกรีตที่มีความลึก 108 มิลลิเมตร

บทที่ 4

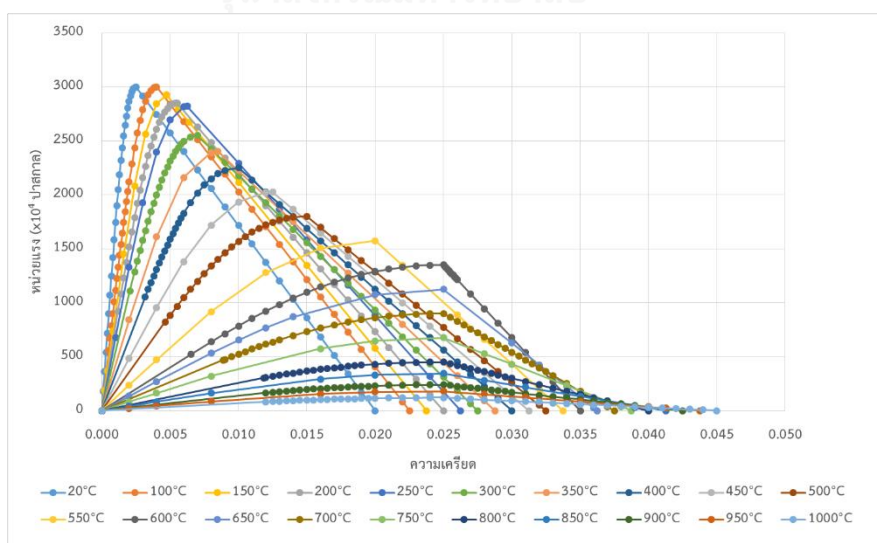
การวิเคราะห์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูงด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การรับกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในขณะเผาไฟ ได้จากการนำผลการวิเคราะห์อุณหภูมิในรูปแบบการกระจายอุณหภูมิภายในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่กล่าวข้างต้นในบทที่ 3 โดยแบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และ เหล็กเสริม อ้างอิงจาก EN 1994-1.2 [9] ถูกนำมาวิเคราะห์การรับกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [5, 6] ในการวิเคราะห์ โดยแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับแรงอัดตามแนวแกน

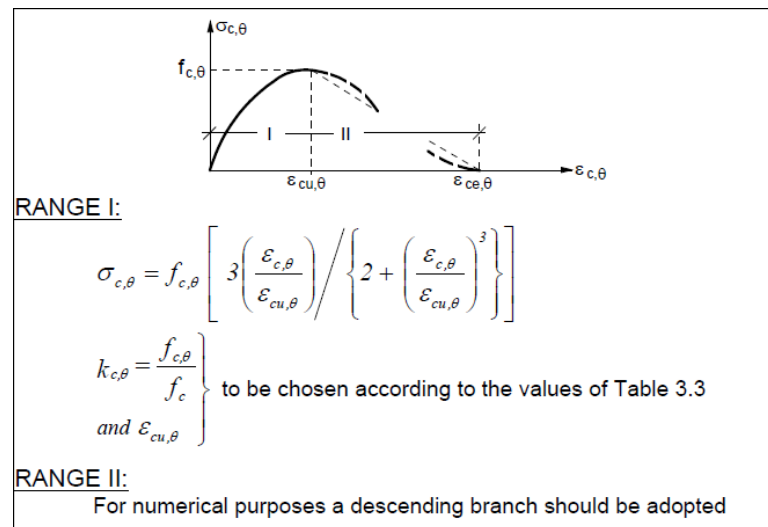
4.1 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลที่อุณหภูมิสูง

4.1.1 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตจาก EN 1994-1.2 [9] ในการประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์หน้าตัด โดยแบบจำลองนี้คอนกรีตที่อุณหภูมิห้องจะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นซึ่งอุณหภูมิจะอยู่ในช่วงระหว่าง 20°C ถึง 1000°C จากรูปที่ 4-1 และ รูปที่ 4-2 และตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของคอนกรีตโดยในรูปจะแสดงถึงหน่วยแรงที่ลดลงและความเครียดที่เพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิของคอนกรีตที่มีกำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง 30 เมกะปาสกาล อัตราส่วนปัวซองของคอนกรีตอยู่ที่ 0.2 ซึ่งการใส่ข้อมูลในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [5, 6] เป็นแบบคู่ลำดับ



รูปที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆตาม EN 1994-1.2 [9]



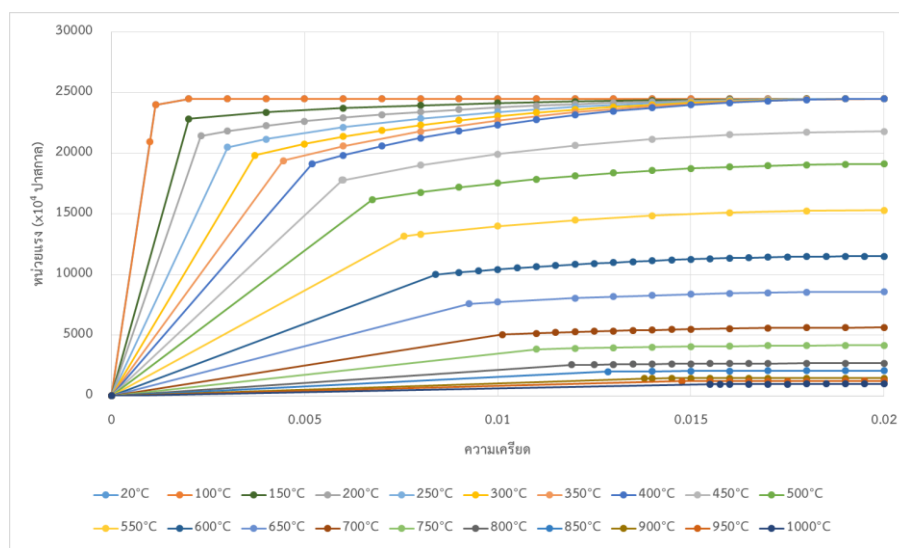
รูปที่ 4-2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีตตาม EN 1994-1.2 [9]

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต

Concrete Temperature θ_c (°C)	$k_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_c}$		$\epsilon_{cu,\theta} \cdot 10^3$
	NC	LC	NC
20	1.00	1.00	2.5
100	1.00	1.00	4.0
200	0.95	1.00	5.5
300	0.85	1.00	7.0
400	0.75	0.88	10.0
500	0.60	0.76	15.0
600	0.45	0.64	25.0
700	0.30	0.52	25.0
800	0.15	0.40	25.0
900	0.08	0.28	25.0
1000	0.04	0.16	25.0

4.1.2 แบบจำลองคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กรูปพรรณที่อุณหภูมิสูง

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรูปพรรณจาก EN 1994-1.2 [9] ในการประยุกต์ใช้สำหรับวิเคราะห์หน้าตัด โดยแบบจำลองนี้เหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมที่อุณหภูมิห้องจะได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นซึ่งอุณหภูมิจะอยู่ในช่วงระหว่าง 20°C-1000°C จากรูปที่ 4-3 และ รูปที่ 4-4 และตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงกับความเครียดของเหล็กรูปพรรณ โดยในรูปจะแสดงถึงหน่วยแรงที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมที่มีกำลังอัดที่อุณหภูมิห้อง 335 เมกะปาสกาล



รูปที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดที่อุณหภูมิต่างๆตาม EN 1994-1.2 [9]

Strain Range	Stress σ	Tangent modulus
I / elastic $\varepsilon \leq \varepsilon_{ap,\theta}$	$E_{a,\theta} \varepsilon_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
II / transit elliptical $\varepsilon_{ap,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{ay,\theta}$	$(f_{\sigma,\theta} - c) + \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2}$ with $a^2 = (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta} + c/E_{a,\theta})$ $b^2 = E_{a,\theta} (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta})c + c^2$ $c = \frac{(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})^2}{E_{a,\theta}(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{ap,\theta}) - 2(f_{ay,\theta} - f_{ap,\theta})}$	$\frac{b(\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})}{a \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{ay,\theta} - \varepsilon_{a,\theta})^2}}$
III / plastic $\varepsilon_{ay,\theta} \leq \varepsilon$ $\varepsilon \leq \varepsilon_{au,\theta}$	$f_{ay,\theta}$	0

รูปที่ 4-4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรูปพรรณตาม

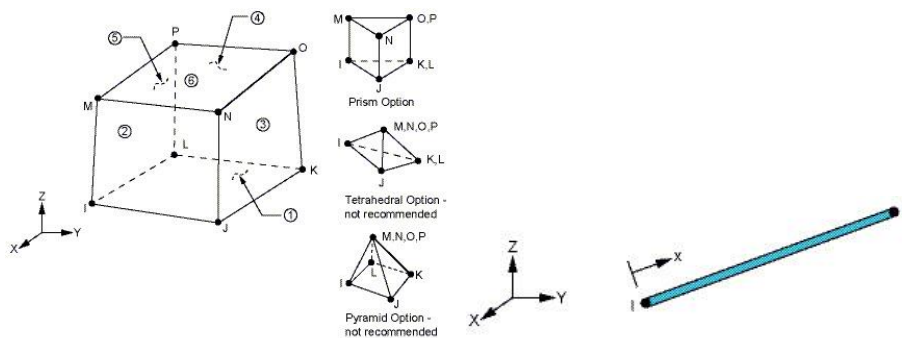
EN 1994-1.2 [9]

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของเหล็กรูปพรรณ

Steel Temperature θ_a (°C)	$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{ap,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{ay,\theta}}{f_{ay}}$	$k_{u,\theta} = \frac{f_{au,\theta}}{f_{ay}}$
20	1.00	1.00	1.00	1.25
100	1.00	1.00	1.00	1.25
200	0.90	0.807	1.00	1.25
300	0.80	0.613	1.00	1.25
400	0.70	0.420	1.00	1.00
500	0.60	0.360	0.78	0.78
600	0.31	0.180	0.47	0.47
700	0.12	0.075	0.23	0.23
800	0.09	0.050	0.11	0.11
900	0.0675	0.0375	0.06	0.06
1000	0.0450	0.0250	0.04	0.04

4.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์กำลังที่อุณหภูมิสูง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์กำลังของเสาจะใช้การวิเคราะห์จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS [5, 6] แบบ 3 มิติ โดยเลือกใช้เอลิเมนต์ของคอนกรีตและเหล็ก รูปพรรณ เป็น SOLID 185 ซึ่งเป็นเอลิเมนต์ที่มี 8 จุดต่อ และมีระดับความเสรีคือ การเคลื่อนตัวในแต่ละระนาบและในตัวเอลิเมนต์นี้มีแรงจากน้ำหนักตัวเอลิเมนต์ โดยที่มีผลของอุณหภูมิแต่ละจุดต่อ นอกจากนี้เลือกใช้เอลิเมนต์ของเหล็กเสริมตามแนวแกนเป็น LINK 180 เป็นเอลิเมนต์ที่มี 2 จุดต่อ และมีระดับความเสรีคือ การเคลื่อนตัวในแต่ละระนาบและในตัวเอลิเมนต์นี้มีแรงจากน้ำหนักตัวเอลิเมนต์ โดยที่มีผลของอุณหภูมิแต่ละจุดต่อดังแสดงในรูปที่ 4-5



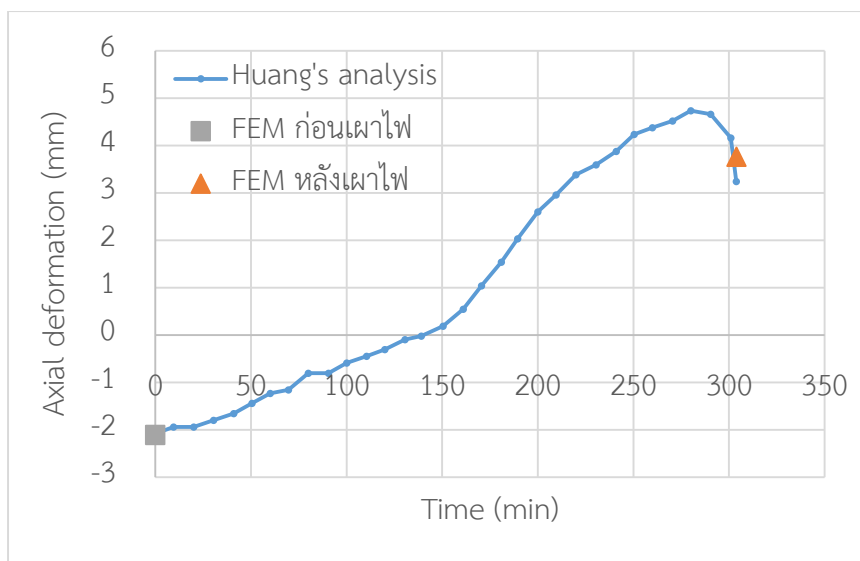
รูปที่ 4-5 ลักษณะของเอลิเมนต์ SOLID 185 และ Link 180 ที่ใช้ในการวิเคราะห์กำลังของเสา

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์กำลังของเสาที่นำเสนอซึ่งได้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์กำลังของเสาแบบตรงศูนย์ (centric load) ในขณะที่กำลังเฉาไฟจาก Huang และคณะ [11] พบว่าผลการวิเคราะห์กำลังของเสาที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัดมีความสอดคล้องกับผลกำลังของเสาในขณะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง

4.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในอดีต

4.3.1 ผลการทดสอบของ Huang และคณะ [11]

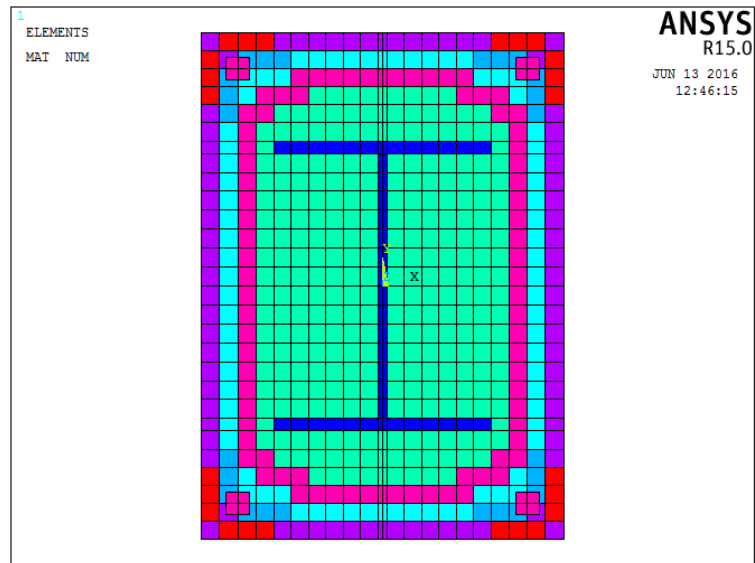
การเปรียบเทียบกับตัวอย่างการทดสอบของ Huang และคณะ [11] ได้แก่ ตัวอย่าง SZCC03 ซึ่งเป็นการวัดการเสียรูปของเสาตามแนวแกนในขณะอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงโดยความสัมพันธ์ของการเสียรูปตามแนวกับเวลาจะเห็นได้ว่าก่อนเฉาไฟผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการวิเคราะห์ของ Huang และคณะ [11] โดยแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในสัญญาลักษณ์ สีเหลือง มีค่าความใกล้เคียงกันประมาณ 99% นอกจากนี้ขณะเฉาไฟผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์เทียบกับผลการวิเคราะห์ของ Huang และคณะ [11] โดยแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ในสัญญาลักษณ์ สามเหลี่ยม มีค่าความใกล้เคียงกันประมาณ 86% ดังแสดงในรูปที่ 4-6



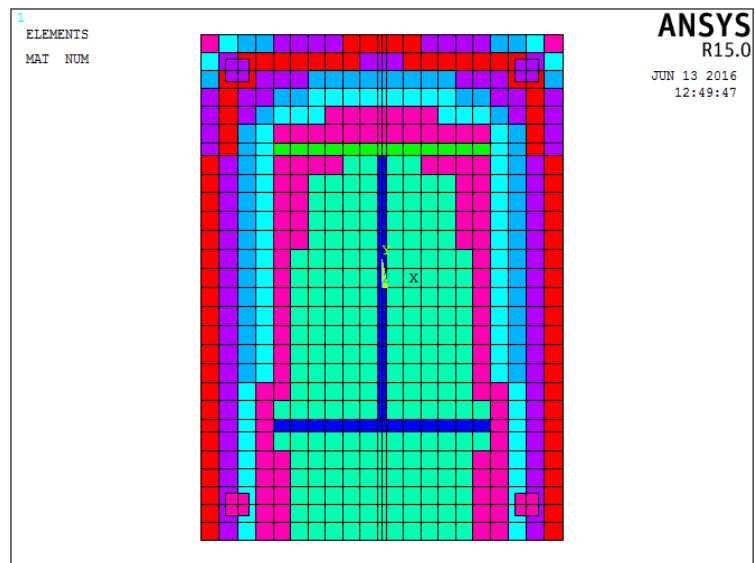
รูปที่ 4-6 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต SZCC03

4.3.2 ผลการทดสอบของ Mao และ Kodur [1]

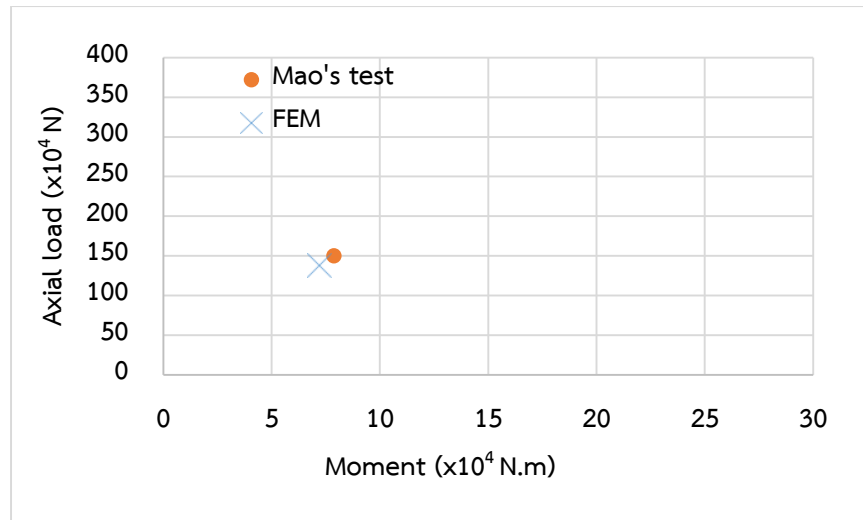
แบบจำลองไฟไนต์เอิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์กำลังของเสาที่นำเสนอซึ่งได้ตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์กับผลการวิเคราะห์กำลังของเสาแบบเยื้องศูนย์กลาง (eccentric load) ในขณะที่กำลังเผาไฟจาก Mao และ Kodur [1] พบว่าผลการวิเคราะห์อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในหน้าตัดมีความสอดคล้องกับผลการวัดอุณหภูมิจากการทดสอบเพราะฉะนั้นแบบจำลองไฟไนต์เอิเมนต์สามารถทำนายกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตขณะเผาไหม้ โดยได้เปรียบเทียบกับตัวอย่างการทดสอบของ Mao และ Kodur [1] 2 ตัวอย่าง ได้แก่ตัวอย่าง FR4S38 และ FR3S37 จากตัวอย่างทั้ง 2 มีอัตราการใช้แรงเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.3 (Load eccentricity ratio) และมีการให้แรงเท่ากับ 1500 และ 1232 กิโลนิวตัน นอกจากนี้การให้ความร้อนมีทั้ง 4 และ 3 ด้าน โดยที่ระยะเวลาเผาไฟเท่ากับ 30 และ 56 นาที ซึ่งเส้นแสดงขอบเขตความร้อนภายในหน้าตัดและผลการเปรียบเทียบแสดงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-7 ถึง รูปที่ 4-10



รูปที่ 4-7 เส้นแสดงขอบเขตความร้อนภายในหน้าตัด FR4S38 ที่เวลา 30 นาที

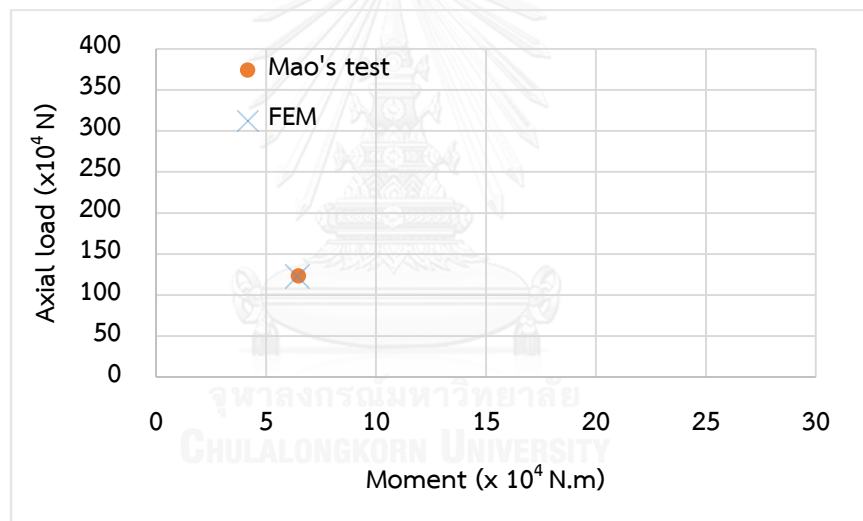


รูปที่ 4-8 เส้นแสดงขอบเขตความร้อนภายในหน้าตัด FR3S37 ที่เวลา 56 นาที



รูปที่ 4-9 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

FR4S38



รูปที่ 4-10 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองกับการทดสอบของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต

FR3S37

จากรูปที่ 4-9 กล่าวถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับตัวอย่างการทดสอบ FR4S38 โดยเปรียบเทียบค่าของแรงอัดตามแนวแกนกับแรงดัด มีความใกล้เคียง 91% ส่วนรูปที่ 4-10 กล่าวถึงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์กับตัวอย่างการทดสอบ FR3S37 โดยเปรียบเทียบค่าของแรงอัดตามแนวแกนกับแรงดัด มีความใกล้เคียง 99%

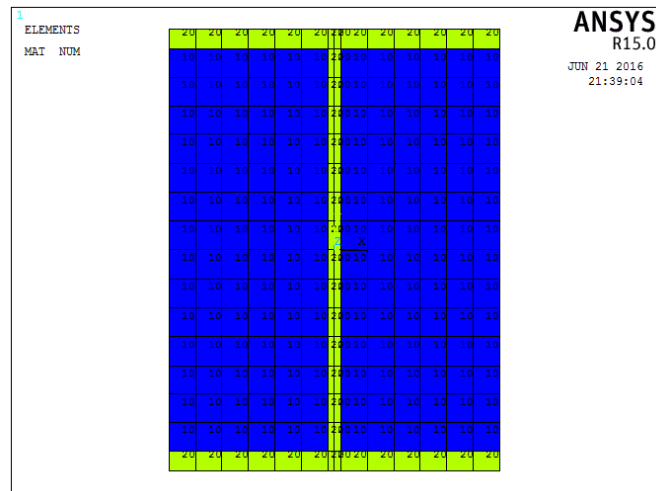
บทที่ 5

ผลการวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิสูง ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

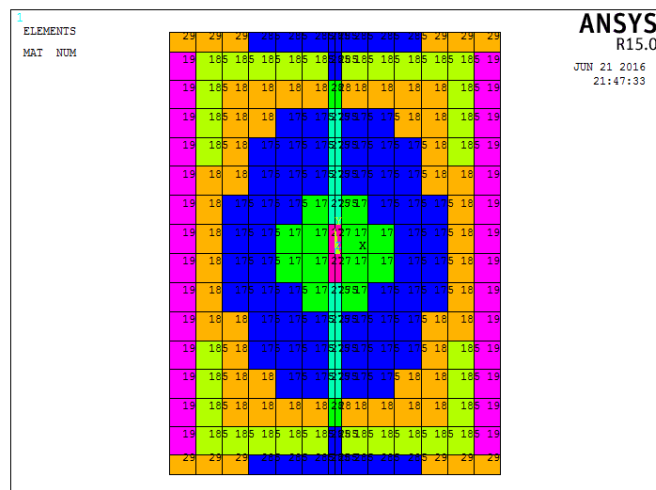
5.1 การวิเคราะห์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง

สมมติฐานในการวิเคราะห์

1. หน้าตัดยังคงเป็นระนาบ หรือการกระจายความเครียดในหน้าตัดเป็นแบบเชิงเส้น
2. การตัดของเสาเกิดขึ้นรอบแกนหลักของหน้าตัด
3. ความเครียดในเหล็กgrupพรรณและเหล็กเสริมเท่ากับความเครียดในคอนกรีตที่ระดับเดียวกัน
4. หน่วยแรงในคอนกรีต เหล็กgrupพรรณ และเหล็กเสริม สามารถคำนวณได้จากความเครียดแต่ละอุณหภูมิ โดยมาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดของคอนกรีต เหล็กgrupพรรณ และเหล็กเสริมตามแนวแกนที่อุณหภูมิสูง
5. ไม่พิจารณากำลังรับแรงดึงของคอนกรีตและการกะเทาะของคอนกรีตในขณะอุณหภูมิสูง
6. จุดรองรับเป็นแบบจุดยึดหมุน (pin-pin condition)
7. สำหรับการวิเคราะห์กำลังที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิจะเท่ากันทั้งหมดในหน้าตัดนั้น ส่วนการวิเคราะห์หน้าตัดภายในอุณหภูมิสูงผลการวิเคราะห์อุณหภูมิจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำให้ทราบการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆในหน้าตัด โดยแต่ละตำแหน่งพิกัดจะทราบค่าของอุณหภูมิดังรูปที่ 5-1 และ รูปที่ 5-2 โดยจะทำให้ทราบค่าของความเครียด ซึ่งสามารถนำไปหาหน่วยแรงได้จากแบบจำลองจะทำให้ได้หน่วยแรงในคอนกรีตที่ขึ้นส่วนต่างๆในหน้าตัด รวมถึงหน่วยแรงที่ตำแหน่งเหล็กgrupพรรณ และเหล็กเสริมตามแนวแกน ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน EN 1994-1.2 [9] ที่ได้กล่าวข้างต้นในบทที่ 3



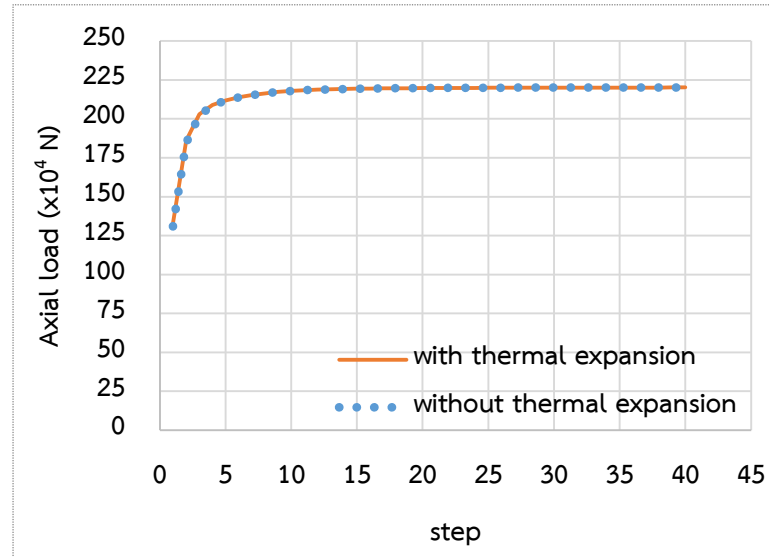
รูปที่ 5-1 ชั้นส่วนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่อุณหภูมิห้อง ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]



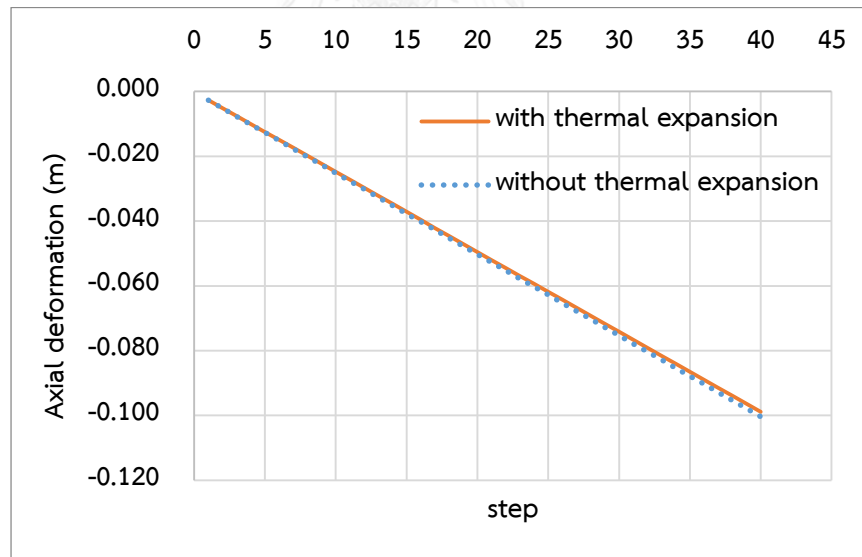
รูปที่ 5-2 ชั้นส่วนของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่อุณหภูมิสูง 180 นาที
ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]

8. สำหรับการยึดหดตัวเนื่องจากความร้อน (thermal expansion) ของ คอนกรีต เหล็กรูปพรรณ และเหล็กเสริม โดยคอนกรีตมีค่าการยึดหดตัวเท่ากับ $10.8 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ และของเหล็กรูปพรรณและเหล็กเสริมมีค่าการหดตัวเท่ากับ $12 \times 10^{-6} \text{ m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ จะไม่คำนึงถึงผลของการยึดหดตัวเนื่องจากความร้อน โดยได้ทำการวิเคราะห์ถึงการยึดหดตัวเนื่องจากความร้อน ไม่มีผลต่อกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในระยะเยื้องศูนย์เล็กน้อย และไม่มีผลต่อการยึดหดตัวของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในระยะเยื้องศูนย์เล็กน้อย แต่มีผลต่อการยึดหดตัวของเสาเหล็กหุ้มด้วย

คอนกรีตในระยะเยื้องศูนย์ที่มากโดยที่ไม่มีผลต่อกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตในระยะเยื้องศูนย์มาก

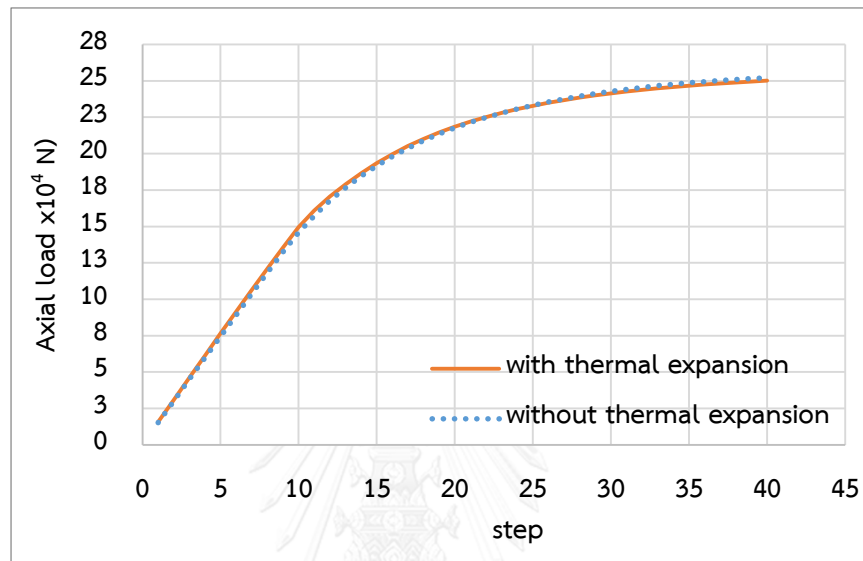


รูปที่ 5-3 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบแรงอัดกับระดับของแรงในระยะเยื้องศูนย์ 0.05 เมตร

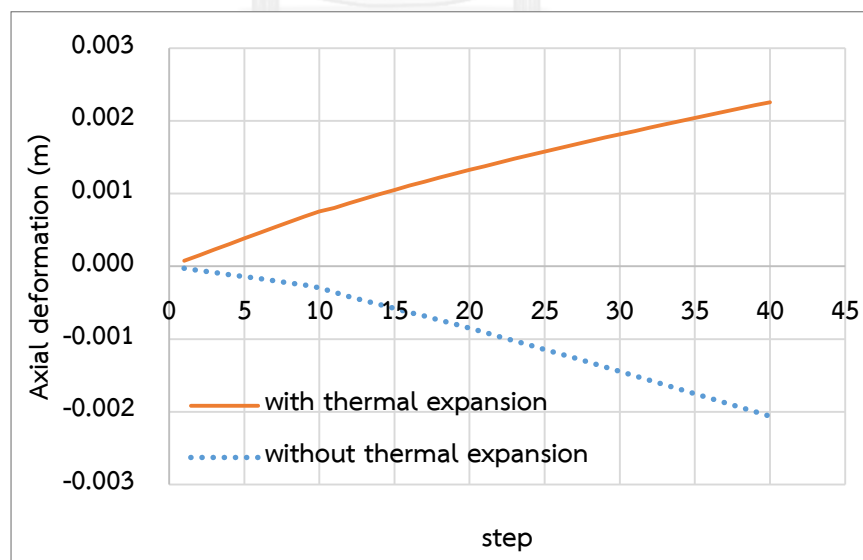


รูปที่ 5-4 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบการเสยรูปตามแนวแกนกับระดับของการเสยรูปในระยะเยื้องศูนย์ 0.05 เมตร

รูปที่ 5-3 และ รูปที่ 5-4 แสดงผลของสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวเนื่องจากความร้อน โดยให้ ระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 0.05 เมตร หรือ 0.3 เท่าของครึ่งหน้าตัดทางด้านแกนรองและตัวอย่างได้รับการ เผาไฟตามมาตรฐาน ISO 834 [4] เป็นเวลา 120 นาที จะพบได้ว่าสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวเนื่องจาก ความร้อนไม่มีผลต่อแรงอัดและการเสียรูปตามแนวแกนของตัวอย่างจากการให้แรงกระทำที่เยื้องศูนย์กลาง เล็กน้อยทำให้ผลของการยึดหดตัวเนื่องจากความร้อนไม่มีผลระยะการเสียรูปตามแนวแกน



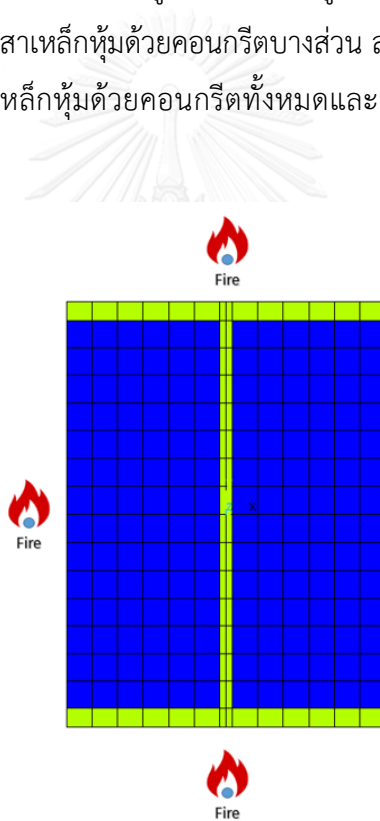
รูปที่ 5-5 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบแรงอัดกับระดับของแรงในระยะเยื้อง ศูนย์ 0.96 เมตร



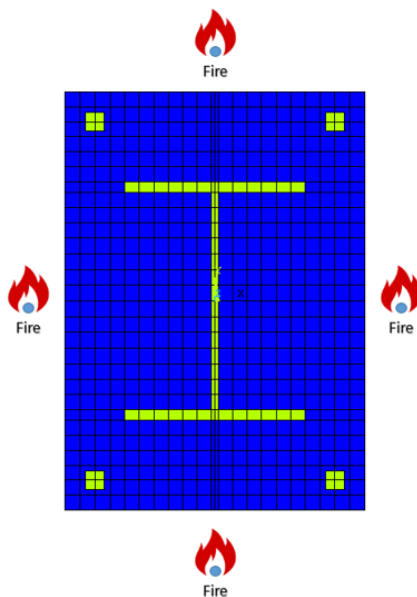
รูปที่ 5-6 การเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวในรูปแบบการเสียรูปตามแนวแกนกับระดับของ การเสียรูปในระยะเยื้องศูนย์กลาง 0.96 เมตร

รูปที่ 5-5 และ รูปที่ 5-6 แสดงผลของสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวเนื่องจากความร้อน โดยให้ ระยะเยื้องศูนย์กลางเป็น 0.96 เมตร หรือ 3.2 เท่าของครึ่งหน้าตัดทางด้านแกนรองและตัวอย่างได้รับการ เผาไฟตามมาตรฐาน ISO 834 [4] เป็นเวลา 120 นาที จะพบได้ว่าสัมประสิทธิ์การยึดหดตัวเนื่องจาก ความร้อนไม่มีผลต่อแรงอัดแต่ส่งผลต่อการเสียรูปตามแนวแกนของตัวอย่างจากการให้แรงกระทำที่ เยื้องศูนย์กลางมากทำให้ผลของการยึดตัวเนื่องจากความร้อน

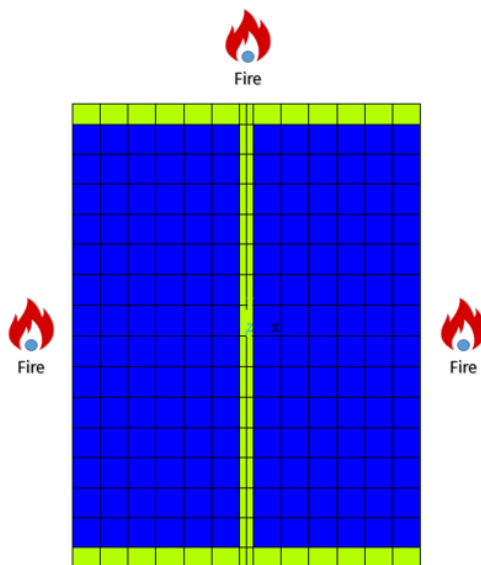
9. รูปแบบของการดันทันที่ได้รับไฟ มีทั้งหมด 2 รูปแบบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ด้านและ 4 ด้าน กระทำในเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มคอนกรีตบางส่วน ซึ่งแต่ละด้านจะ ได้รับไฟตามมาตรฐาน ISO 834 [4] ในส่วนรูปที่ 5-7 และ รูปที่ 5-8 แสดงการเผาไฟทั้ง 4 ด้านของ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน ส่วนรูปที่ 5-9 และ รูปที่ 5-10 แสดง การเผาไฟทั้ง 3 ด้านของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน ตามลำดับ



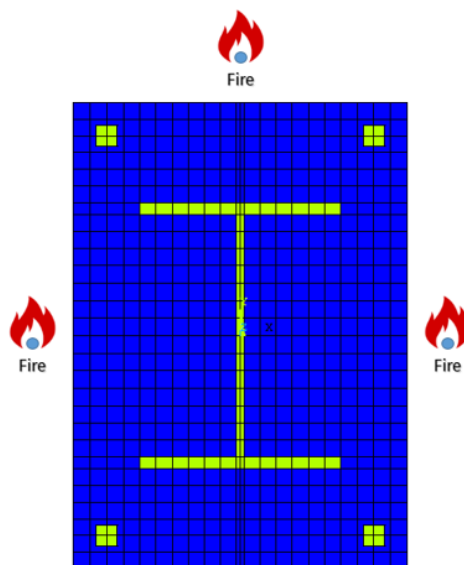
รูปที่ 5-7 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนกรณีสัมผัสไฟ 4 ด้าน



รูปที่ 5-8 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดกรณีสัมผัสไฟ 4 ด้าน



รูปที่ 5-9 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนกรณีสัมผัสไฟ 3 ด้าน



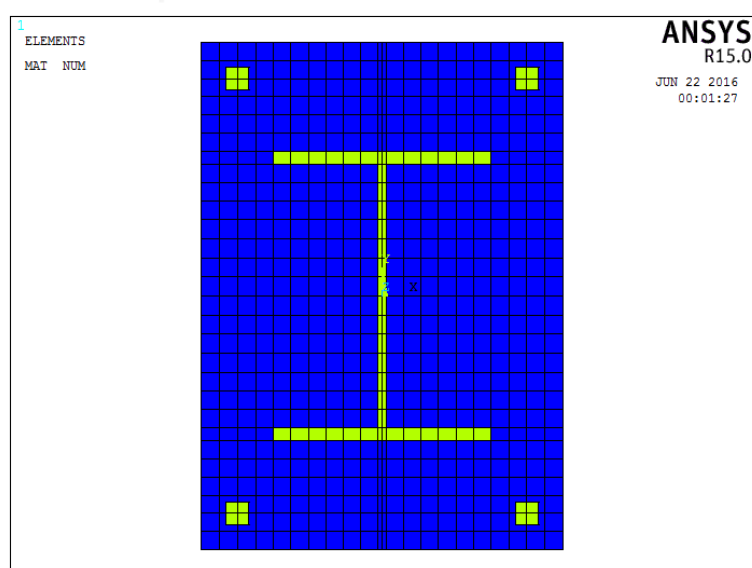
รูปที่ 5-10 หน้าตัดแสดงตำแหน่งด้านที่ไฟเข้าสู่เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดกรณีสัมผัสไฟ 3 ด้าน

5.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

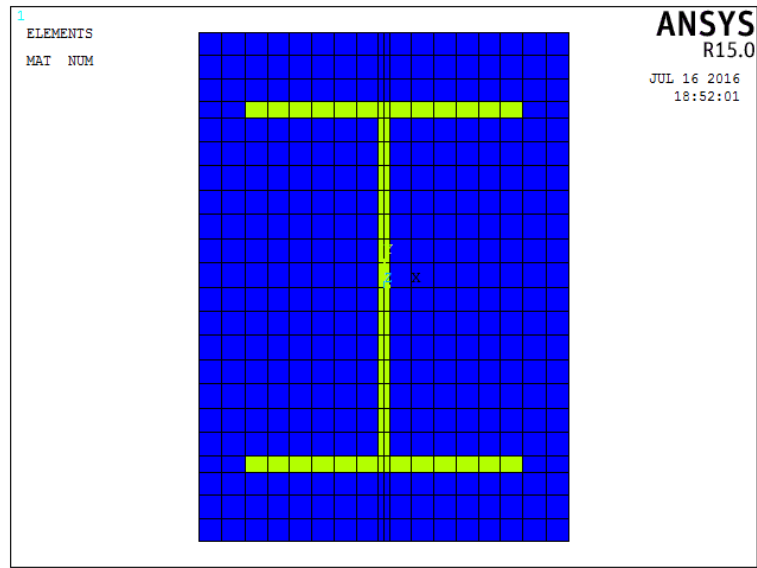
การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ได้จำลองเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต 2 รูปแบบได้แก่ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมด (fully encased steel composite column) และเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน (partially encased steel composite column) ได้กำหนดความสูงของเสาเท่ากับ 1200 มิลลิเมตร ขนาดหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน เท่ากับ 350×250 มิลลิเมตร และ 200×150 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้ กำลังอัดของคอนกรีตเท่ากับ 35 เมกะปาสกาล และกำลังที่จุดครากของเหล็กเท่ากับ 245 เมกะปาสกาล ซึ่งได้รับความร้อนตามมาตรฐาน ISO 834 [4] เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 0 120 180 นาทีตามลำดับ และด้านที่ได้รับผลจากไฟทั้ง 3 และ 4 ด้าน ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และจากรูปที่ 5-11 ถึง รูปที่ 5-13 แสดงหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนในอุณหภูมิห้อง รูปที่ 5-14 ถึง รูปที่ 5-16 แสดงหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟในเวลา 120 นาที

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน

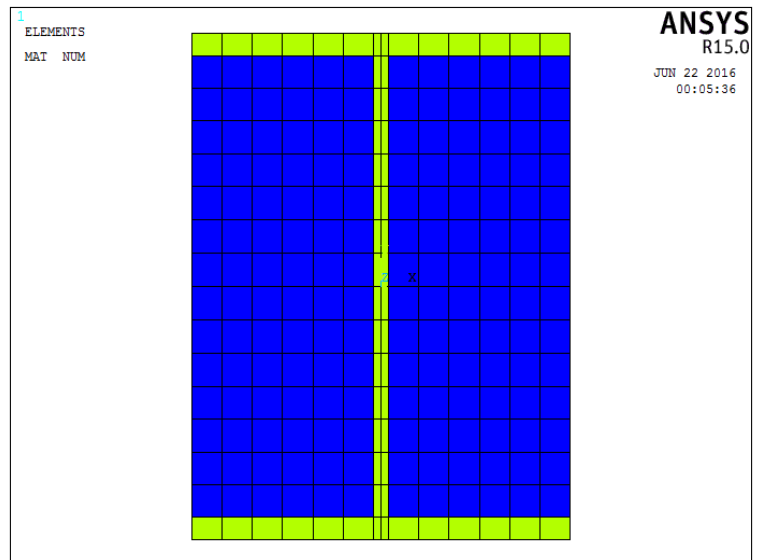
เสา	ความสูง ของเสา (mm)	ขนาดหน้าตัด ของเสา (mm)	ขนาดของเหล็ก รูปพรรณ (mm)	พื้นที่หน้าตัด ของเหล็กเสริม (mm ²)	ระยะเวลา เผาไฟ (min)	ด้านที่ เผาไฟ
เสาเหล็ก หุ้มด้วย คอนกรีต ทั้งหมด	1200	350×250	200×150×6×9	254.5	0	3
					120	4
					180	
เสาเหล็ก หุ้มด้วย คอนกรีต ทั้งหมด แบบที่ 2	1200	275×200	200×150×6×9	254.5	0	3
					120	4
					180	
เสาเหล็ก หุ้มด้วย คอนกรีต บางส่วน	1200	200×150	200×150×6×9	254.5	0	3
					120	4
					180	



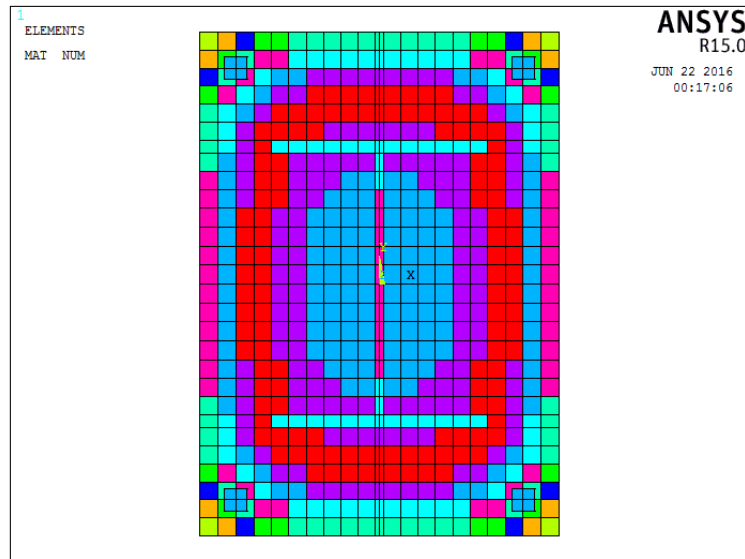
รูปที่ 5-11 หน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องในโปรแกรม ANSYS [5, 6]



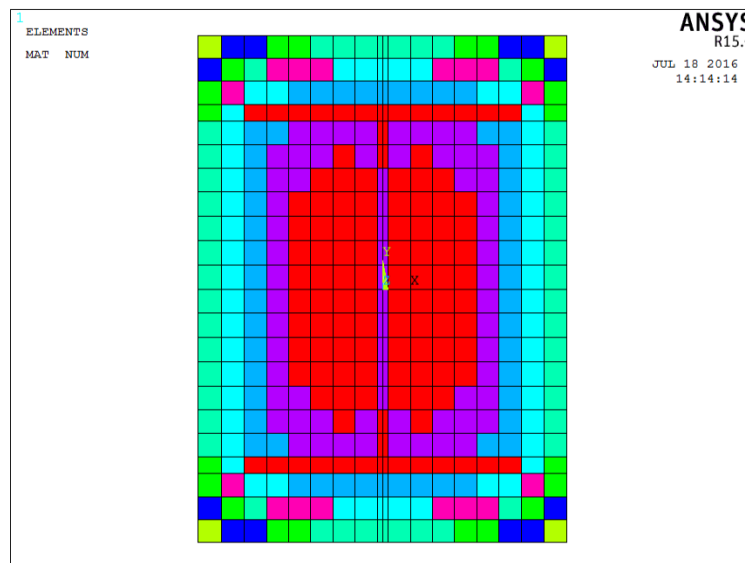
รูปที่ 5-12 หน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดแบบที่ 2 ที่อุณหภูมิต้อง
ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]



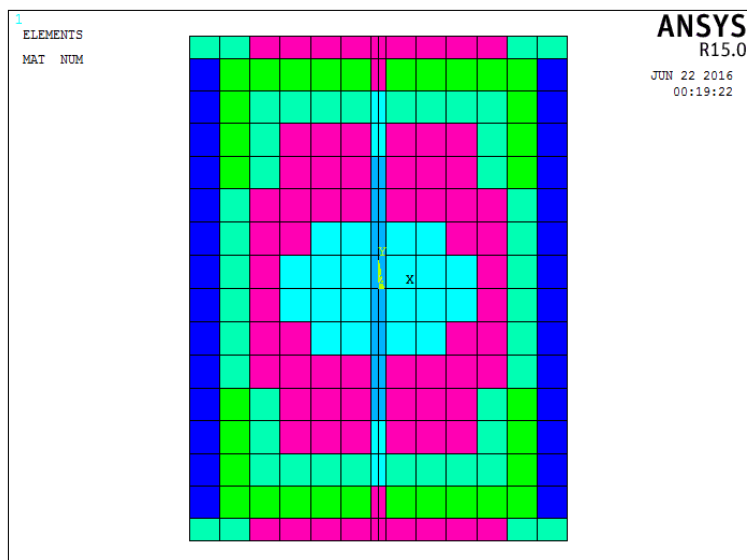
รูปที่ 5-13 หน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่อุณหภูมิต้องในโปรแกรม ANSYS [5, 6]



รูปที่ 5-14 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่เผาไฟในเวลา 120 นาที
ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]



รูปที่ 5-15 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดแบบที่ 2 เผาไฟในเวลา 120 นาที
ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]



รูปที่ 5-16 หน้าตัดเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟในเวลา 120 นาที
ในโปรแกรม ANSYS [5, 6]

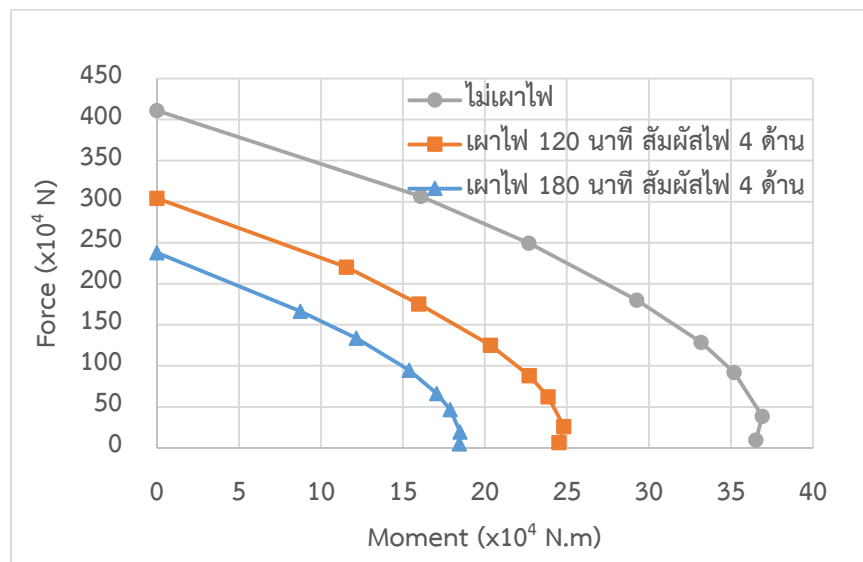
การวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ได้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมด กับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน โดยในแต่ละกลุ่มจะได้แบ่งเวลาได้รับไฟดังต่อไปนี้ 0 120 180 นาที ซึ่งมีทั้งได้รับไฟทั้ง 4 ด้านและเพียง 3 ด้าน จากรูปที่ 5-17 ถึง รูปที่ 5-19 แสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปแบบต่างๆ ที่อุณหภูมิต่างๆ ในกรณีที่ได้รับไฟทั้ง 4 ด้าน โดยมีช่วงเวลาที่ไม่เผาไฟกับช่วงเวลาที่เผาไฟตามมาตรฐาน ISO 834 [4] ซึ่งแบ่งเป็น 120 นาทีกับ 180 นาที เมื่อระยะเวลาเผาไฟเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กำลังของเสาลดลงตามลำดับและรูปที่ 5-20 แสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปแบบต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง รูปที่ 5-21 และ รูปที่ 5-22 แสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปแบบต่างๆ ที่เผาไฟในเวลา 120 นาทีกับ 180 นาทีในกรณีที่ได้รับไฟทั้ง 4 ด้าน จากการวิเคราะห์จะเห็นว่ารูปแบบขนาดหน้าตัดมีผลต่อกำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต นอกจากนี้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตยังขึ้นอยู่กับด้านที่ถูกเผาไฟ ดังแสดงในรูปที่ 5-23 ถึง รูปที่ 5-28 ซึ่งจะเห็นว่าด้านที่ถูกเผาไฟจะเห็นผลมากเมื่อระยะหุ้มของคอนกรีตน้อยลง โดยกำลังของเสาจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความร้อนสัมผัสกับเหล็กโดยตรงเป็นผลให้กำลังของเหล็กรูปพรรณลดลงอย่างรวดเร็ว รูปที่ 5-22 แสดงเส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟในเวลา 180 นาที เป็นการพิจารณาถึงผลการระยะหุ้มของคอนกรีตที่มีผลต่อกำลังของเสา จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ระยะน้ำหนักรรทุกเยื้องศูนย์ตำแหน่งต่างๆ กันพบว่า เมื่อระยะเยื้องศูนย์ของ

น้ำหนักบรรทุกทุกเพิ่มขึ้นน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาจะมีค่าน้อยลงทั้งเสารับแรงอัดและเสารับแรงดึง แต่โมเมนต์ที่เกิดขึ้นภายในเสาจะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยโมเมนต์ที่เกิดขึ้นคำนวณจากน้ำหนักบรรทุกสูงสุดในแนวแกนคูณกับระยะเยื้องศูนย์

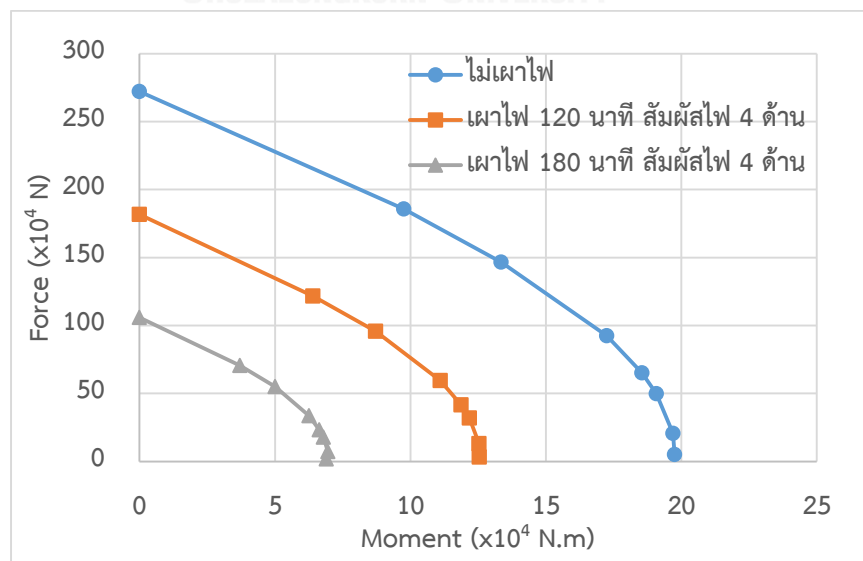
โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึง เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมด ว่า เสาวัสดุผสม

เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดแบบที่ 2 ว่า เสาวัสดุผสมแบบที่ 2

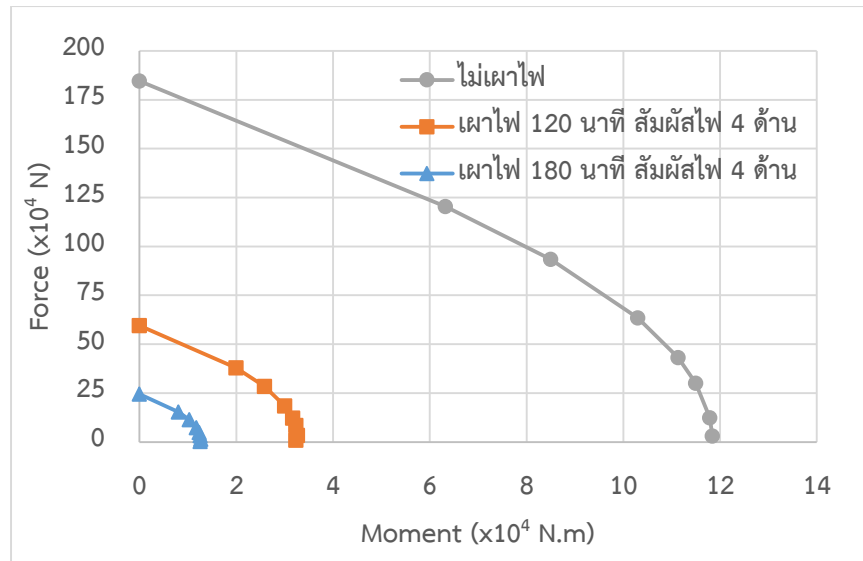
เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วน ว่า เสาวัสดุผสมบางส่วน



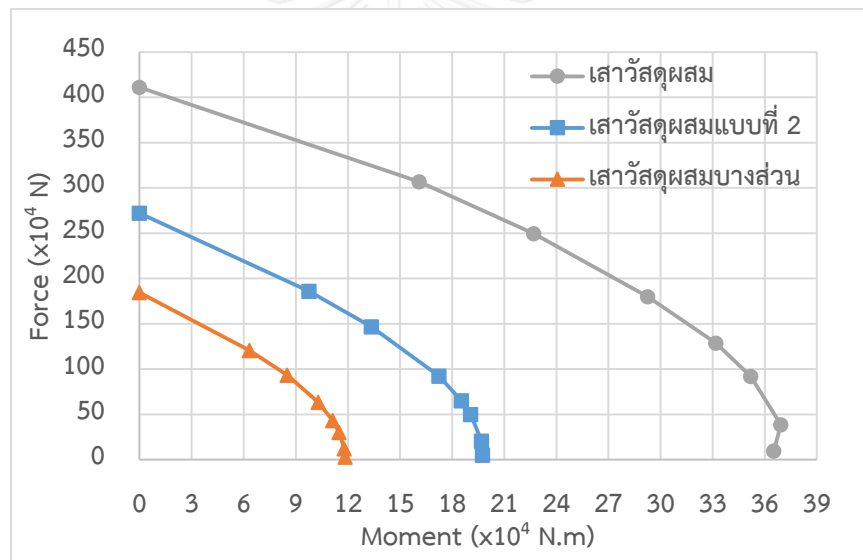
รูปที่ 5-17 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมที่เผาไฟที่เวลาต่างๆ



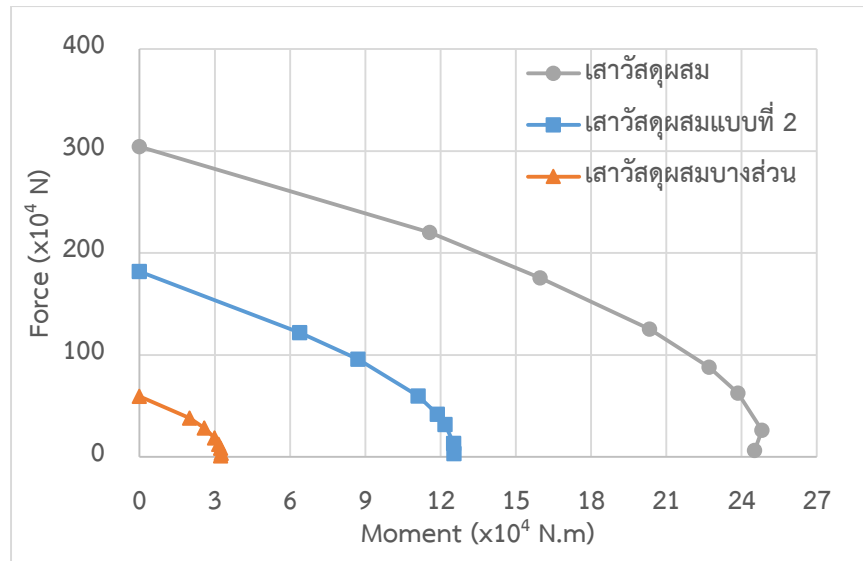
รูปที่ 5-18 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมแบบที่ 2 ที่เผาไฟที่เวลาต่างๆ



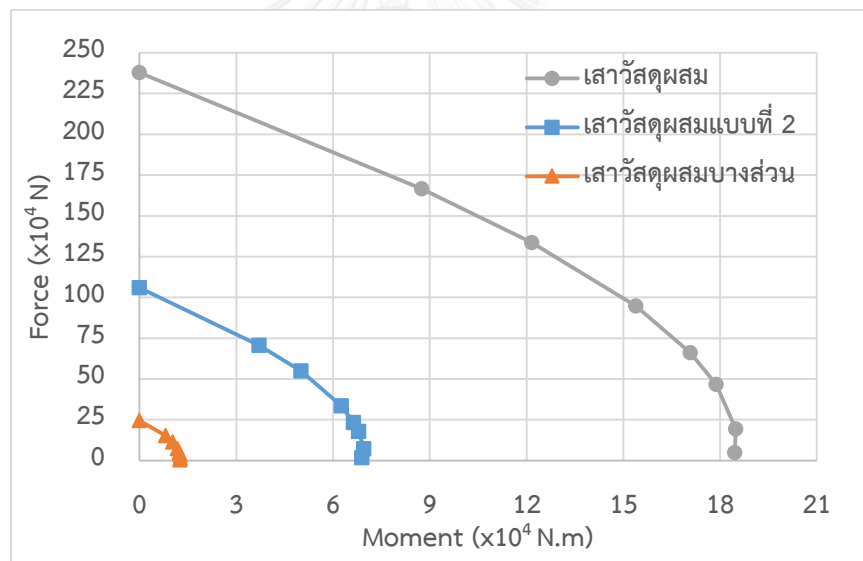
รูปที่ 5-19 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมบางส่วนที่เผาไฟที่เวลาต่างๆ



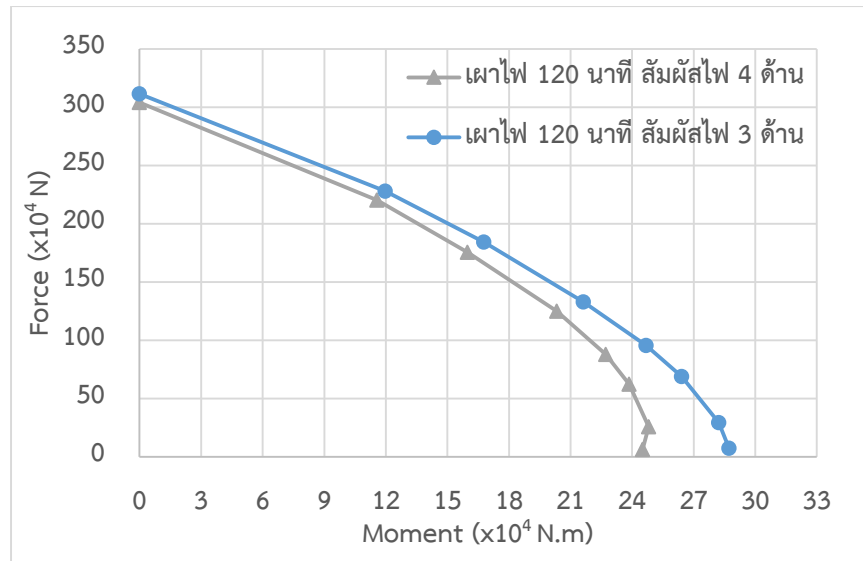
รูปที่ 5-20 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมรูปแบบต่างๆที่อุณหภูมิห้อง



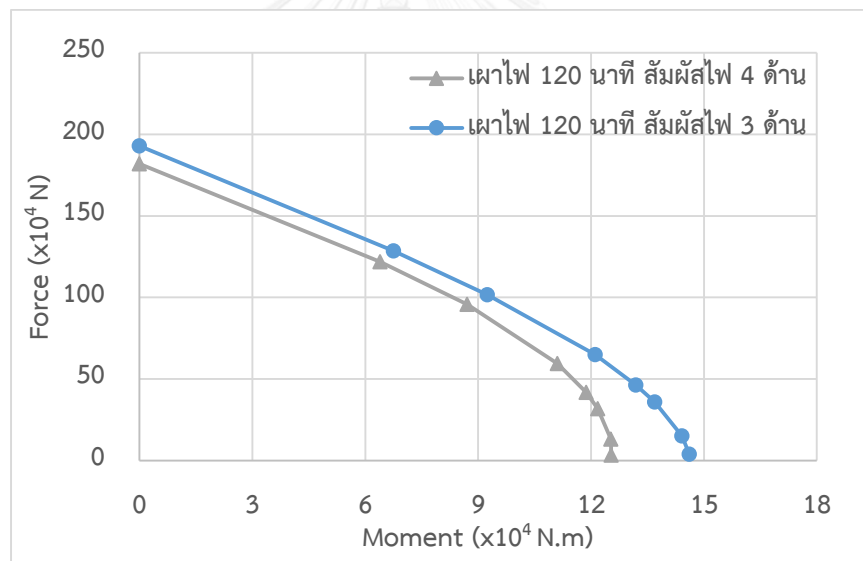
รูปที่ 5-21 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาว์สดผสมรูปแบบต่างๆเผาไฟที่เวลา 120 นาที
กรณีเผาไฟทั้ง 4 ด้าน



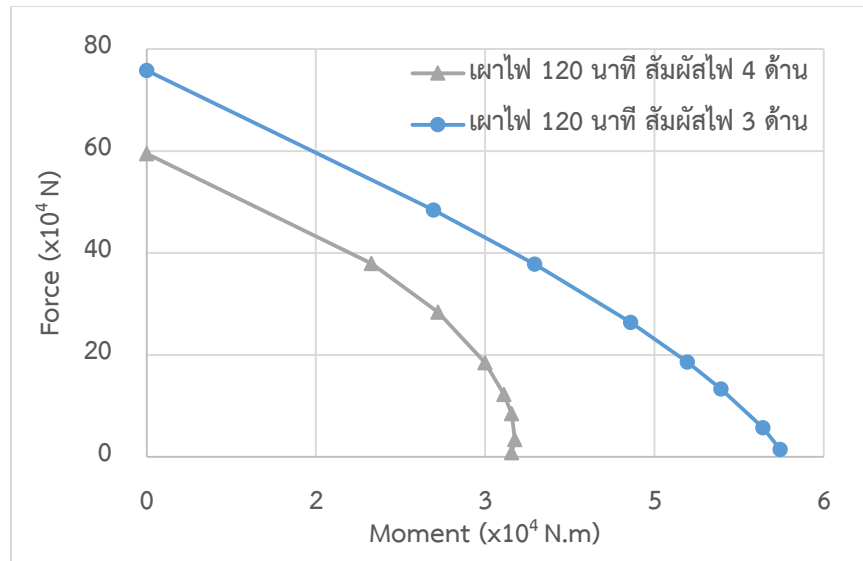
รูปที่ 5-22 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาว์สดผสมรูปแบบต่างๆเผาไฟที่เวลา 180 นาที
กรณีเผาไฟทั้ง 4 ด้าน



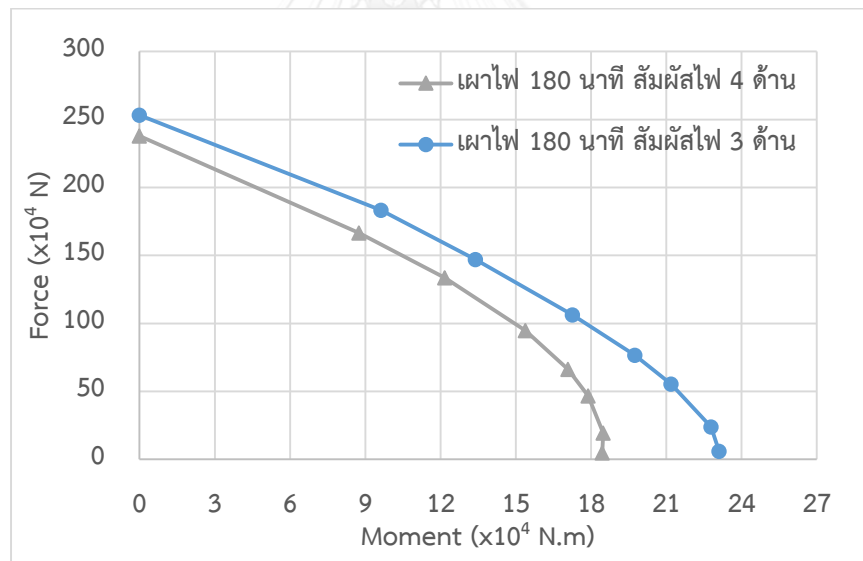
รูปที่ 5-23 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมเผาไฟที่เวลา 120 นาที
กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน



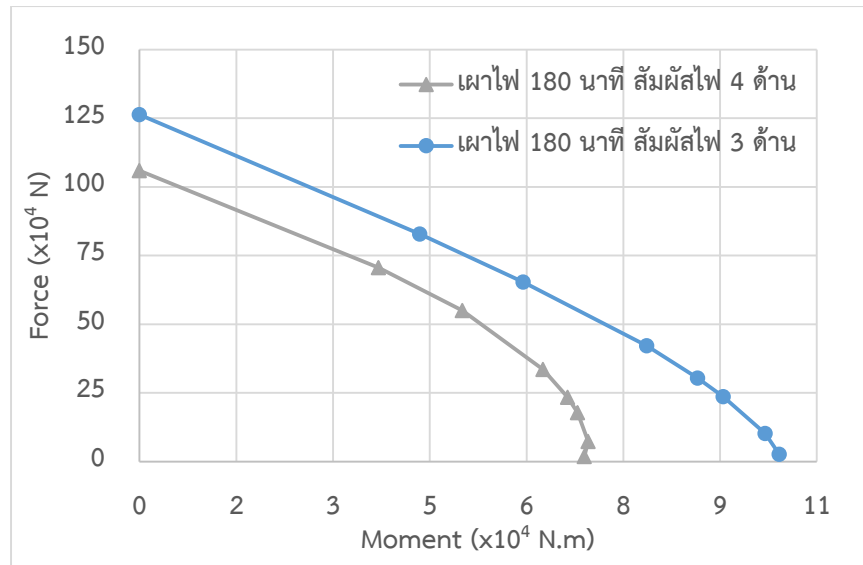
รูปที่ 5-24 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมแบบที่ 2 เผาไฟที่เวลา 120 นาที
กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน



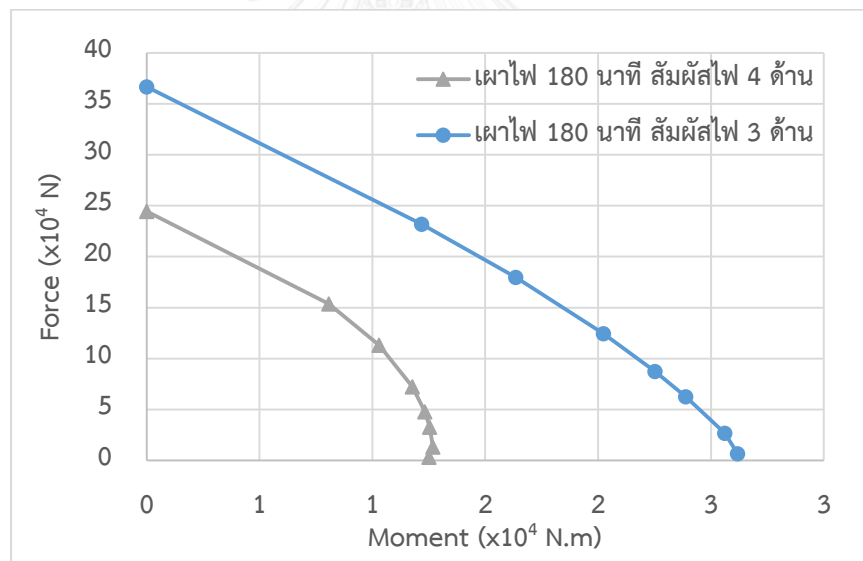
รูปที่ 5-25 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมบางส่วนเผาไฟที่เวลา 120 นาที
กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน



รูปที่ 5-26 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมเผาไฟที่เวลา 180 นาที
กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน



รูปที่ 5-27 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมแบบที่ 2 เผาไฟที่เวลา 180 นาที
กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน



รูปที่ 5-28 เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์ของเสาวัสดุผสมบางส่วนเผาไฟที่เวลา 180 นาที
กรณีได้รับไฟ 3 และ 4 ด้าน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ส่วนที่หนึ่งได้พิจารณาผลจากการเผาไฟด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตโดยเป็นการรับไฟที่ผิวสัมผัสของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตโดยไม่พิจารณาถึงผลการแผ่รังสี และตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ถูกเผาไฟในอดีตของ Huang และคณะ [11] กับ Mao และ Kodur [1] ผลการตรวจสอบความถูกต้องทำโดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของวัสดุกับเวลา จากการตรวจสอบพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอดีต ส่วนที่สองได้พิจารณาผลแรงกระทำตรงศูนย์ที่อุณหภูมิสูงด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตโดยไม่พิจารณาถึงผลของการอวบน้ำ ซึ่งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำตรงศูนย์ที่อุณหภูมิสูงในอดีตของ Huang และคณะ [11] ผลการตรวจสอบความถูกต้องทำโดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเสียรูปตามแนวแกนกับเวลาที่ไมเผาไฟและเผาไฟ จากการตรวจสอบความถูกต้องในกรณีก่อนเผาไฟและหลังเผาไฟพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอดีตโดยมีอัตราส่วนผลการทดสอบในอดีตกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 0.99 และ 0.86 ตามลำดับ นอกจากนี้ได้พิจารณาแรงกระทำเยื้องศูนย์ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลการทดสอบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำเยื้องศูนย์ที่อุณหภูมิสูงในอดีตของ Mao และ Kodur [1] ผลการตรวจสอบความถูกต้องทำโดยการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำตรงศูนย์กับโมเมนต์ที่เผาไฟ จากการตรวจสอบความถูกต้องใน 2 กรณีซึ่งกรณีที่หนึ่งให้แรงกระทำ 1500 กิโลนิวตัน เผาไฟทั้ง 4 ด้าน เป็นระยะเวลา 30 นาที และกรณีที่สองให้แรงกระทำ 1232 กิโลนิวตัน เผาไฟทั้ง 3 ด้าน เป็นระยะเวลา 56 นาที พบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดสอบในอดีตโดยมีอัตราส่วนผลการทดสอบในอดีตกับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เท่ากับ 0.91 และ 0.99 ตามลำดับ

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเผาไฟและรับแรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์ จึงได้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่อพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่เผาไฟและรับแรงกระทำตรงศูนย์และเยื้องศูนย์จากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ขนาดหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต ระยะเวลาเผาไฟ และด้านที่ถูกเผาไฟ จากการศึกษพบว่าขนาดหน้าตัดของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตมีผลต่อ

พฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยเมื่อระยะเวลาหุ้มของคอนกรีตน้อยลง จะส่งผลให้ความร้อนเข้าถึงภายในได้เร็วขึ้นทำให้สูญเสียกำลังของวัสดุมากขึ้น เป็นผลให้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตลดลง โดยการเปรียบเทียบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดและเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดแบบที่ 2 และเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟในเวลา 180 นาที กรณีเผาไฟ 4 ด้าน จะมีสัดส่วนเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่เผาไฟเวลา 180 นาที กรณีเผาไฟ 4 ด้าน เท่ากับร้อยละ 45 และร้อยละ 10 จากการศึกษาพบว่าระยะเวลาเผาไฟมีผลต่อพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยเมื่อเพิ่มระยะเวลาเผาไฟมากขึ้น ส่งผลให้วัสดุมีความร้อนเพิ่มมากขึ้น ทำให้สูญเสียกำลังของวัสดุมากขึ้น เป็นผลให้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตลดลง โดยเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่เผาไฟในเวลา 120 180 นาที กรณีเผาไฟ 4 ด้านจะมีสัดส่วนเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่อุณหภูมิห้องเท่ากับร้อยละ 74 และร้อยละ 58 และเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตแบบที่ 2 เผาไฟในเวลา 120 180 นาที กรณีเผาไฟ 4 ด้านจะมีสัดส่วนเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตแบบที่ 2 ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับร้อยละ 67 และร้อยละ 39 นอกจากนี้เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟในเวลา 120 180 นาที จะมีสัดส่วนเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่อุณหภูมิห้องเท่ากับร้อยละ 32 และร้อยละ 13 เป็นต้น จากการศึกษาพบว่าด้านที่ถูกเผาไฟมีผลต่อพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต โดยการเปรียบเทียบเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตทั้งหมดที่เผาไฟ 3 ด้านและ 4 ด้านในเวลา 180 นาที จะมีสัดส่วนเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่เผาไฟ 3 ด้านเวลา 180 นาที เท่ากับร้อยละ 94 และเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตแบบที่ 2 เผาไฟ 3 ด้านและ 4 ด้านในเวลา 180 นาที จะมีสัดส่วนเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตแบบที่ 2 เผาไฟ 3 ด้านเวลา 180 นาที เท่ากับร้อยละ 84 นอกจากนี้ เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟ 3 ด้านและ 4 ด้านในเวลา 180 นาที จะมีสัดส่วนเมื่อเทียบกับเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตบางส่วนที่เผาไฟ 3 ด้านเวลา 180 นาที เท่ากับร้อยละ 67 เมื่อลดด้านที่ถูกเผาไฟลงจะส่งผลให้วัสดุมีความร้อนน้อยลงในด้านนั้นๆที่ไม่ถูกเผาไฟ ทำให้สูญเสียกำลังของวัสดุน้อยลง เป็นผลให้กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการถูกเผาไฟทุกด้าน

6.2 ข้อจำกัดการวิเคราะห์

การวิเคราะห์เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตพบว่าในช่วงที่กำลังของเสาถูกกำหนดโดยแรงดึง เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตยังคงรับแรงดัดได้เพิ่มขึ้นในขณะที่ระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มขึ้น โดยตามที่ทฤษฎีกล่าวคือ ระยะเยื้องศูนย์กลางเพิ่มมากขึ้น แรงอัดตามแนวแกนลดลง โมเมนต์ดัดจะลดลงเนื่องจากคอนกรีตไม่สามารถรับแรงดึงได้แต่ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ โปรแกรม ANSYS [5, 6] จากการใช้ วัสดุแบบ SOLID 185 ส่งผลให้คอนกรีตสามารถรับแรงดึง เป็นสาเหตุให้เส้นโค้งปฏิสัมพันธ์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตที่ถูกกำหนดโดยแรงดึงไม่ลดลงตามที่ทฤษฎีกล่าวไว้

6.3 ข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ สามารถทำนายพฤติกรรมของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรับแรงกระทำตรงศูนย์กลางและเยื้องศูนย์กลางในขณะเผาไฟ โดยไม่ต้องพิจารณาผลของการแผ่รังสีความร้อนในคอนกรีตแบบจำลองทำให้มีความสามารถในการนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาอื่นๆ ดังนี้

1. นำไปประยุกต์ใช้ศึกษาผลการกระจายอุณหภูมิภายในเสาและคานารูปแบบอื่นๆ
2. นำไปประยุกต์ใช้ศึกษาผลกระทบของตัวแปรอื่นๆต่อพฤติกรรมกำลังรับแรงอัดและแรงดัดร่วมกันของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีต เช่น รูปแบบต่างๆของหน้าตัดเหล็กรูปพรรณ กำลังรับแรงอัดที่จุดครากของเหล็ก กำลังรับแรงอัดประลัยของคอนกรีต ด้านที่ถูกเผาไฟ อุณหภูมิที่เข้าสู่วัสดุระยะเวลาที่ถูกเผาไฟ
3. นำไปประยุกต์ใช้ศึกษาวิเคราะห์พฤติกรรมกำลังของเสาขณะเผาไฟรูปแบบอื่นๆ เช่น เสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตรูปแบบอื่น เสาเหล็ก เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก เป็นต้น

รายการอ้างอิง

1. Mao X, Kodur VKR: **Fire resistance of concrete encased steel columns under 3- and 4-side standard heating.** *Journal of Constructional Steel Research* 2011, 67:270-280.
2. โปธิศิริ ฐ: การออกแบบโครงสร้างเพื่อความปลอดภัยด้านอัคคีภัย. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2556, 325.
3. Standards B: **Eurocode 4 — Design of composite steel and concrete structures.** In *Part 1-1: General rules and rules for buildings*. BSI 389 Chiswick High Road London: BSI 2004.
4. Standardization tIOf: **Fire resistance test-elements of building construction.** Geneva; 1975.
5. (PA)Canonsburg: **ANSYS (2013a). Mechanical APDL Theory Reference. V. 15.0.** 2013.
6. (PA)Canonsburg: **ANSYS (2013b).Mechanical APDL Element Reference. V. 15.0.** 2013.
7. Yu J-T, Lu Z-D, Xie Q: **Nonlinear analysis of SRC columns subjected to fire.** *Fire Safety Journal* 2007, 42:1-10.
8. Huang Z-F, Tan K-H, Phng G-H: **Axial restraint effects on the fire resistance of composite columns encasing I-section steel.** *Journal of Constructional Steel Research* 2007, 63:437-447.
9. Standards B: **Eurocode 4 — Design of composite steel and concrete structures.** In *Part 1-2: General rules — Structural fire design*. BSI 389 Chiswick High Road London: BSI; 2005.
10. Moura Correia AJP, Rodrigues JPC: **Fire resistance of partially encased steel columns with restrained thermal elongation.** *Journal of Constructional Steel Research* 2011, 67:593-601.
11. Huang Z-F, Tan K-H, Toh W-S, Phng G-H: **Fire resistance of composite columns with embedded I-section steel — Effects of section size and load level.** *Journal of Constructional Steel Research* 2008, 64:312-325.

12. Young B, Ellobody E: **Performance of axially restrained concrete encased steel composite columns at elevated temperatures.** *Engineering Structures* 2011, 33:245-254.



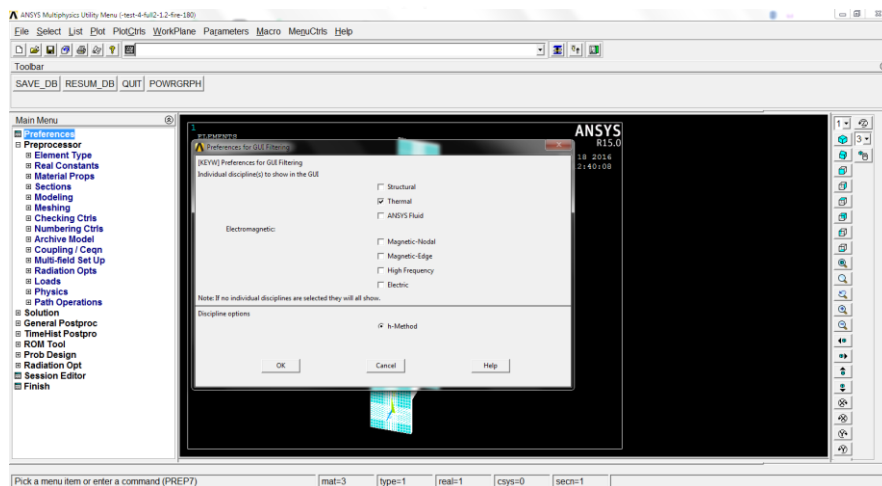


ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าต่างด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 3 มิติ

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิภายในหน้าต่างด้วย โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 3 มิติ มีดังต่อไปนี้

1. Preferences>Thermal>OK



รูปที่ ก-1 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. Preprocessor

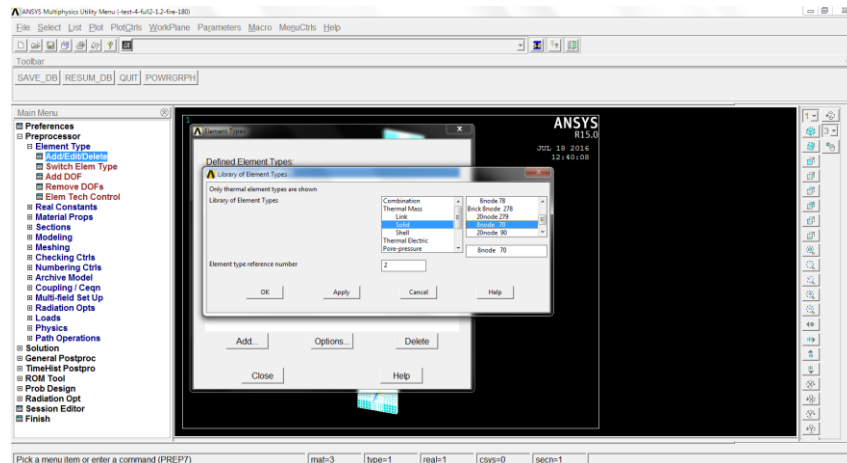
2.1. Element Type>Add/Edit/Delete>Add...>

2.1.1.Solid>Solid 70 >OK

Solid 70 ใช้สำหรับโมเดลของคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณในการวิเคราะห์ด้านความร้อน

2.1.2.Link>Link 33 >OK

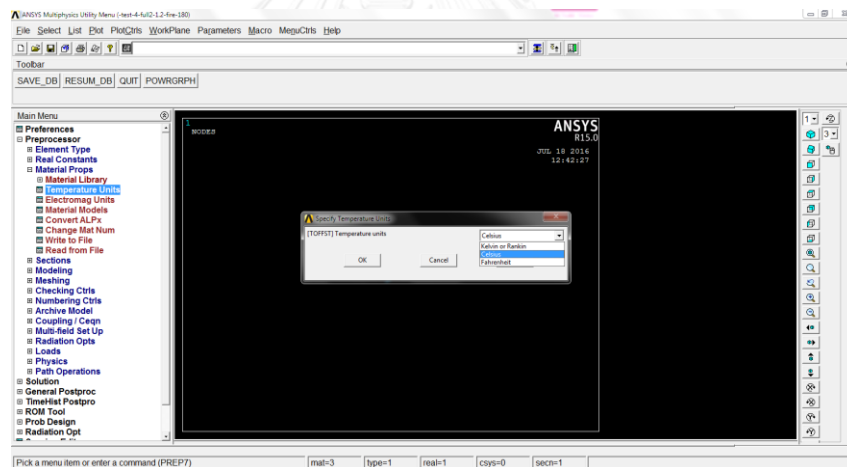
Link 33 ใช้สำหรับโมเดลของเหล็กเสริม (Rebar) ในการวิเคราะห์ด้านความร้อน



รูปที่ ก-2 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าโมเดลที่ใช้ในการวิเคราะห์อุณหภูมิ

2.2. Material Props>

2.2.1. Temperature Units>Celsius>OK



รูปที่ ก-3 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าอุณหภูมิ

2.2.2. Material Props>Material Models>Thermal

2.2.2.1. Conductivity>Isotropic>Input

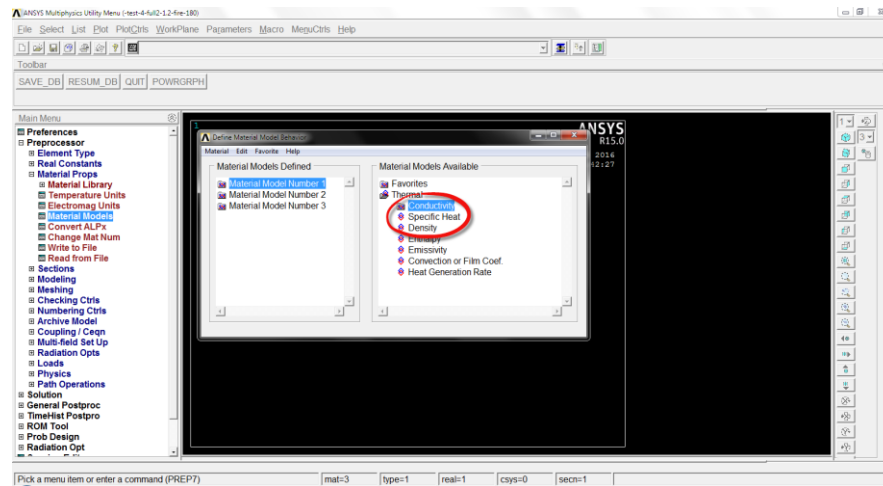
ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำความร้อนและอุณหภูมิในรูปแบบตาราง

2.2.2.2. Specific heat>Input

ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะและอุณหภูมิในรูปแบบตาราง

2.2.2.3. Density>Input

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นและอุณหภูมิในรูปแบบตาราง



รูปที่ ก-4 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าคุณสมบัติของวัสดุในการวิเคราะห์อุณหภูมิ

2.3. Modeling>

2.3.1.Create

2.3.1.1. Keypoints>In Active CS

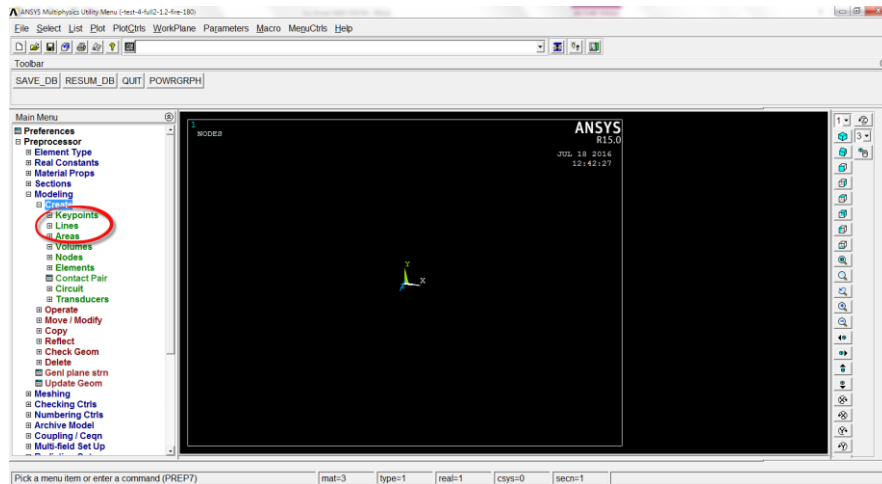
การสร้างจุดด้วยคู่อันดับ

2.3.1.2. Lines>Lines>Straight Line

การสร้างเส้นจากจุด

2.3.1.3. Areas>Arbitrary>By Lines

การสร้างพื้นที่จากเส้น



รูปที่ ก-5 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการสร้างโมเดลในการวิเคราะห์

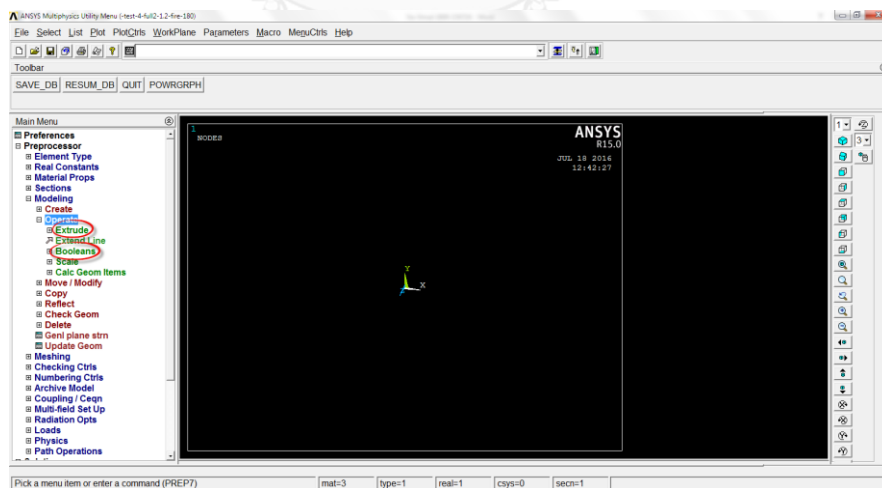
2.3.2. Operate

2.3.2.1. Extrude>Areas>Along Lines

เป็นการขยายพื้นที่ออกให้เกิดเป็นปริมาตร

2.3.2.2. Booleans>Glue>Volumes

ทำให้ปริมาตรเชื่อมต่อกัน

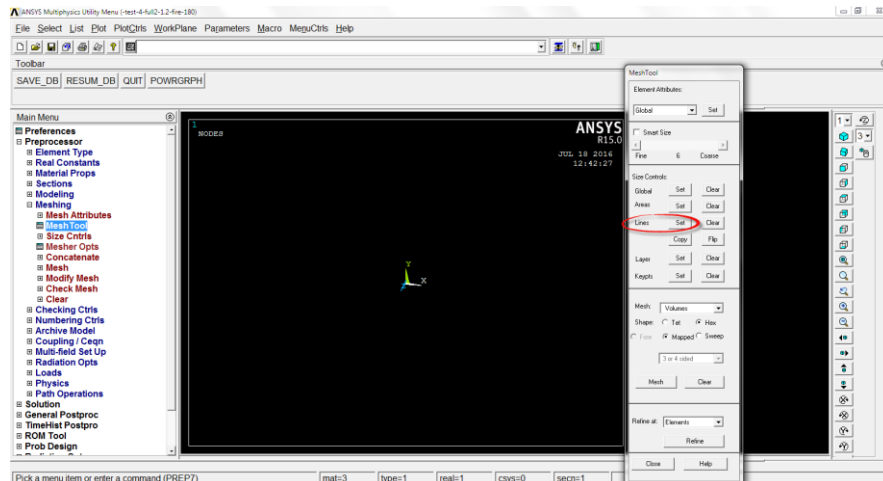


รูปที่ ก-6 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการสร้างโมเดลในการวิเคราะห์

2.4. Meshing

2.4.1. Mesh Tool > Size Controls > Lines > set > Click Line > OK > NDV > Input

จำนวนเส้นที่จะแบ่งที่ขอบเขตของพื้นที่สี่เหลี่ยมด้านที่พิจารณา

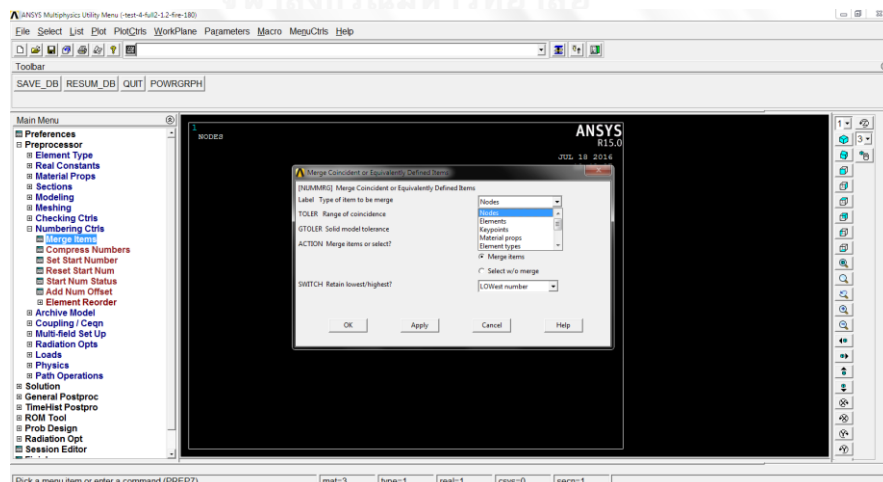


รูปที่ ก-7 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการสร้างเอลิเมนต์ย่อย

2.5. Numbering Ctrl

2.5.1. Merge Items > Nodes > OK

รวมจุดต่อให้เป็นจุดต่อเดียวกันทั้งโครงสร้าง



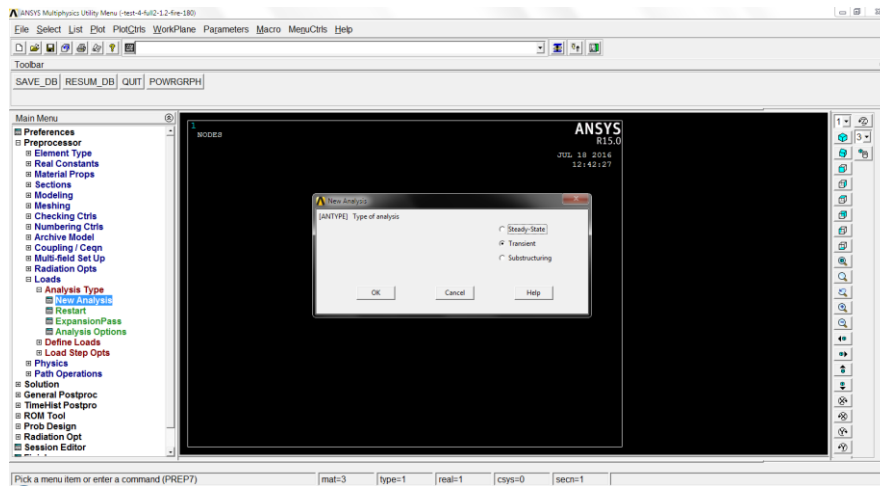
รูปที่ ก-8 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าจุด (node) ให้เกิดการเชื่อมต่อกัน

2.6. Loads

2.6.1. Analysis Type

2.6.1.1. New Analysis>Transient>OK>Full>OK

การวิเคราะห์อุณหภูมิในสถานะชั่วครู่



รูปที่ ก-9 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์

2.6.2. Define Loads

2.6.2.1. Setting>Uniform Temp

อุณหภูมิเริ่มต้น

2.6.2.2. Setting>Reference Temp

อุณหภูมิอ้างอิง



รูปที่ ก-10 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าอุณหภูมิเริ่มต้น

2.6.2.3. Apply

2.6.2.4. Functions>Define/Edit

สมการความร้อนของกราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์

2.6.2.5. Functions>Read File

อ่าน Function ที่เป็นสมการของกราฟความร้อน

2.6.2.6. Thermal>Convection>On Areas>Click

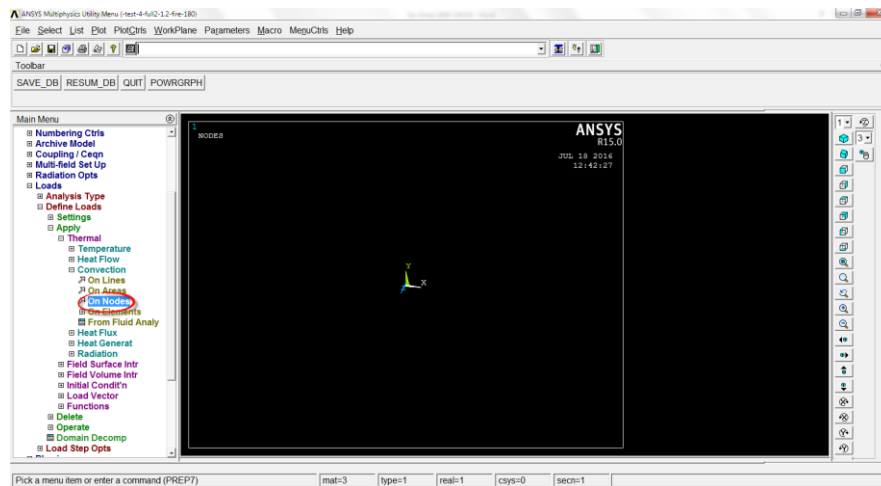
พื้นที่ที่จะได้รับความร้อน

2.6.2.6.1. Film coefficient>Input

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

2.6.2.6.2. Apply Bulk Temp on Areas>Existing table>

เลือก file ที่ต้องการ>OK



รูปที่ ก-11 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าสำหรับการให้แรง

3. Solution

3.1. Analysis Type

3.1.1. Sol'n Controls>Basic>

3.1.1.1. Time Control>Time at end of loadstep>Input

เวลาสิ้นสุดการวิเคราะห์หน่วยวินาที

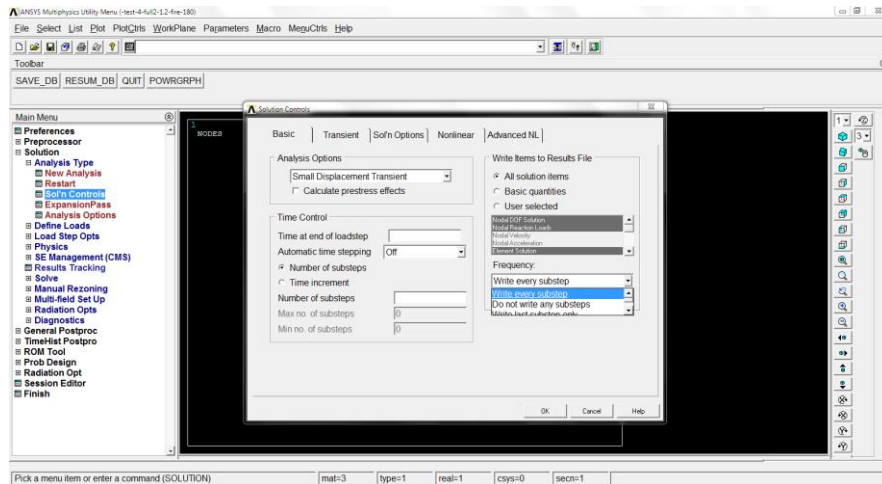
3.1.1.2. Automatic time stepping>Off

3.1.1.3. Number of substeps>Input

จำนวนขั้นตอนในการวิเคราะห์

3.1.1.4. Frequency>Write every substep>OK

3.1.1.5. เป็นการบันทึกข้อมูลทุก substep



รูปที่ ก-12 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์

3.2. Solve>Current LS>OK

4. General Postproc

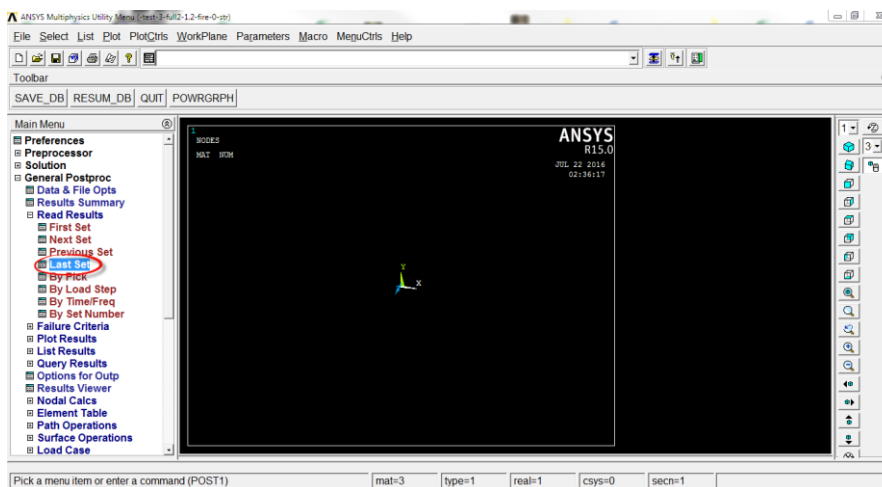
4.1. Read Results

4.1.1. Last Set

การกำหนดให้โปรแกรมแสดงผลในช่วง substep สุดท้าย

4.1.2. By Time/Freq

กำหนดให้โปรแกรมแสดงผลในช่วง substep ที่ต้องการ

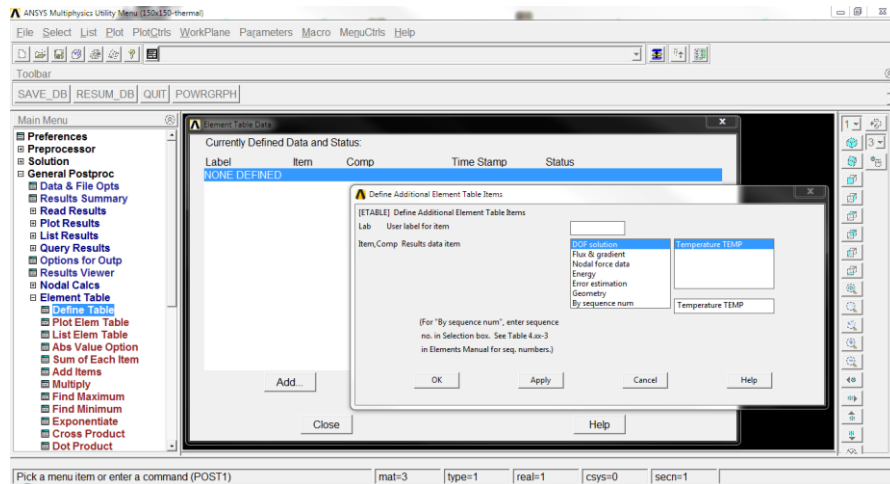


รูปที่ ก-13 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการเรียกผลวิเคราะห์

4.2. Element Table

4.2.1. Define Table

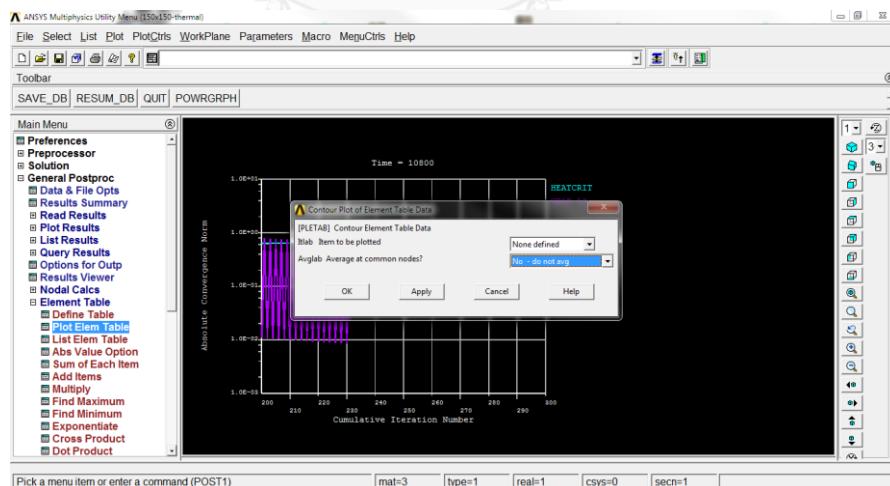
การกำหนดให้ผลการวิเคราะห์อยู่ในรูปแบบ element



รูปที่ ก-14 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการกำหนดผลการวิเคราะห์ในรูปแบบ element

4.2.2. Plot Elem Table

การแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบของ element



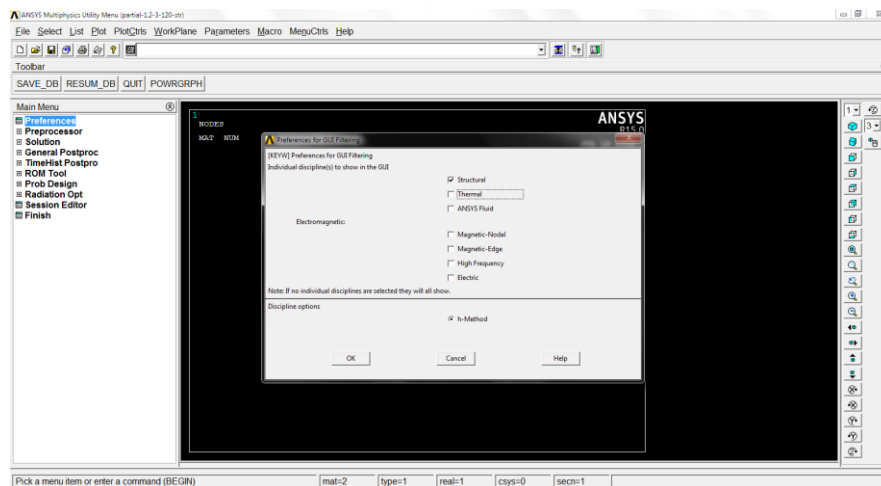
รูปที่ ก-15 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการแสดงผลวิเคราะห์ในรูปแบบ element

ภาคผนวก ข

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์กำลังของเสาเหล็กหุ้มด้วยคอนกรีตด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 3 มิติ

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเพื่อวิเคราะห์กำลังของเสาอัดผสมด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 3 มิติ มีดังต่อไปนี้

1. Preferences>Structural>OK



รูปที่ ข-1 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์กำลังของโครงสร้าง

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2. Preprocessor

2.1. Element Type>Switch Elem Type>Thermal to struc

2.1.1.Solid 70>Solid 185Solid 185

ใช้สำหรับจำลองคอนกรีตและเหล็กรูปพรรณในการวิเคราะห์กำลังของเสา

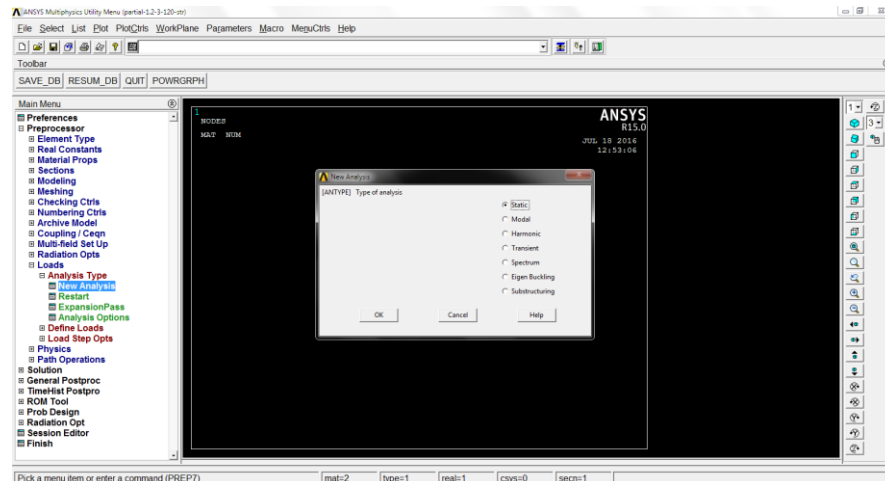
2.1.2.Link 33>Link 180Link 180

ใช้สำหรับจำลองเหล็กเสริมตามแนวแกน (Rebar) ในการวิเคราะห์กำลังของเสา

2.3. Loads

2.3.1. Analysis Type>New Analysis>Static>OK

การวิเคราะห์กำลังของโครงสร้าง



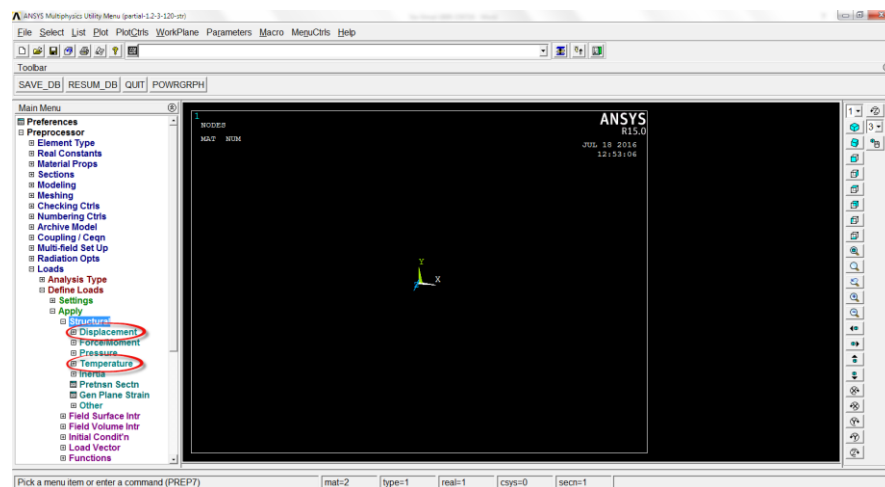
รูปที่ ข-4 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าการวิเคราะห์กำลังของโครงสร้าง

2.3.2. Define Loads>Apply>structural>Displacement>On nodes

การกำหนดจุดรองรับและระยะการเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทาง

2.3.3. Define Loads>Apply>structural>temperature>From Therm Analy

การนำความร้อนที่ได้จากการวิเคราะห์ในช่วงแรกมาใช้ในส่วนของการวิเคราะห์กำลังของเสา



รูปที่ ข-5 การแสดงตำแหน่งตั้งค่าสำหรับการให้แรง

3. Solution

3.1. Analysis Type

3.1.1.Sol'n Controls>Basic>

3.1.2.Time Control>Time at end of loadstep>Input

เวลาสิ้นสุดการวิเคราะห์หน่วยวินาที

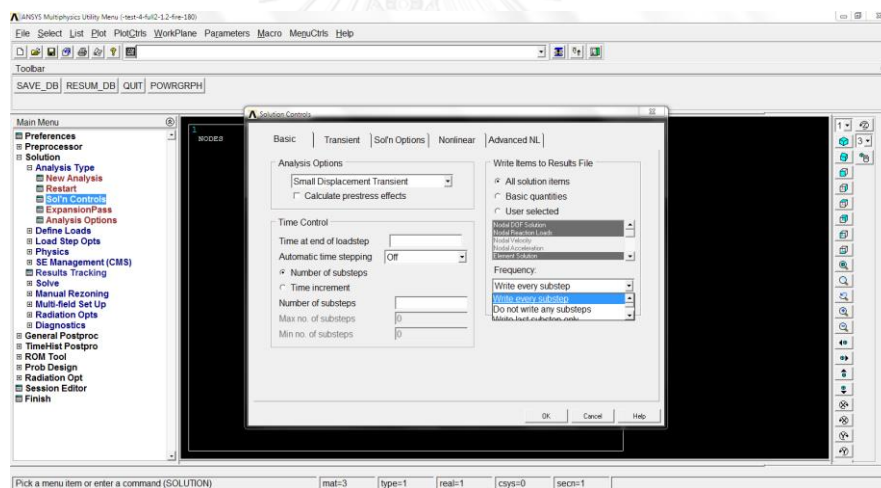
3.1.3Automatic time stepping>Off

3.1.4.Number of substeps>Input

จำนวนขั้นตอนในการวิเคราะห์

3.1.5.Frequency>Write every substep>OK

เป็นการบันทึกข้อมูลทุก substep



รูปที่ ข-6 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการคำนวณก่อนการวิเคราะห์

3.2. Solve>Current LS>OK

4. General Postproc

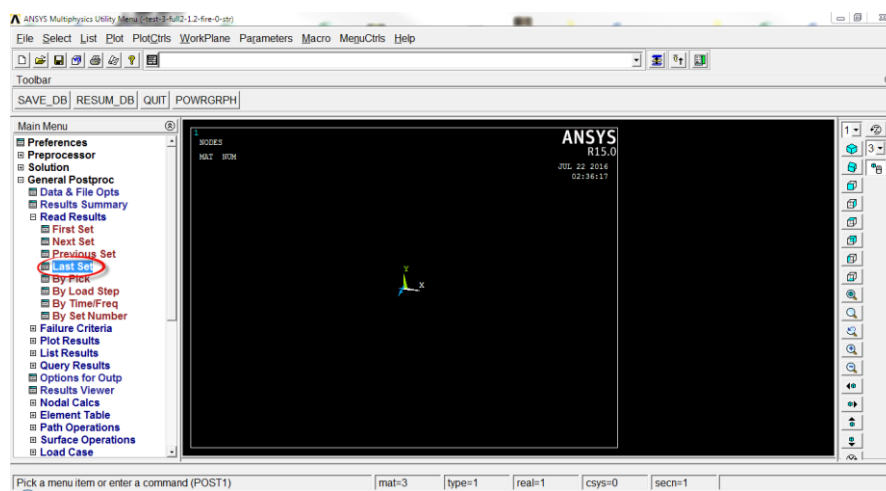
4.1. Read Results

4.1.1. Last Set

การกำหนดให้โปรแกรมแสดงผลในช่วง substep สุดท้าย

4.1.2. By Time/Freq

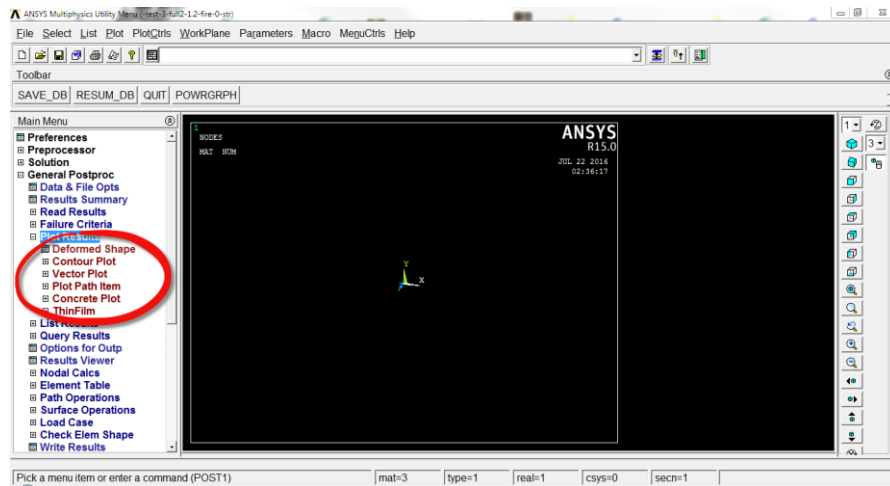
กำหนดให้โปรแกรมแสดงผลในช่วง substep ที่ต้องการ



รูปที่ ข-7 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการเรียกผลวิเคราะห์

4.2. Plot Results

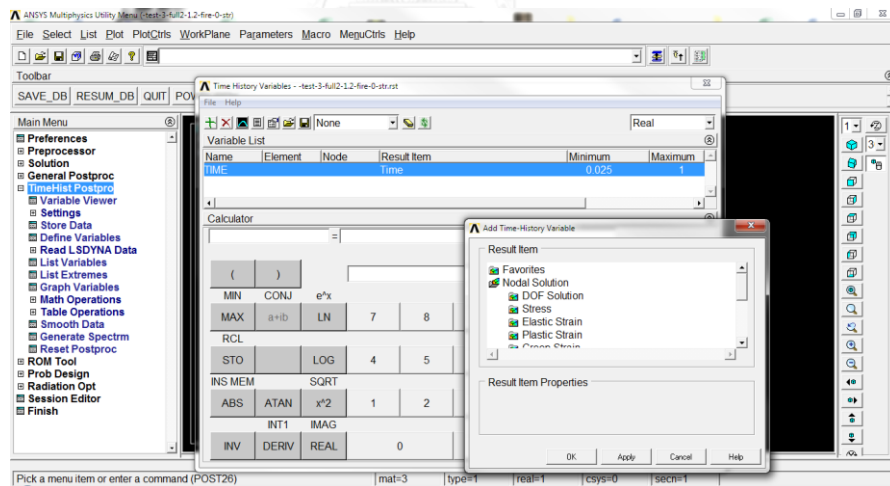
การแสดงผลวิเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ ข-8 การแสดงตำแหน่งการแสดงผลวิเคราะห์

5. TimeHist Postproc

การแสดงผลวิเคราะห์แต่ละส่วนในรูปแบบของตารางหรือกราฟ



รูปที่ ข-9 การแสดงตำแหน่งขั้นตอนการเรียกผลวิเคราะห์แต่ละส่วน

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนิปุล เลิศพัฒนพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 สิงหาคม พ.ศ. 2534 ที่กรุงเทพมหานคร เป็น บุตรคนที่ 1 จากจำนวนทั้งหมด 2 คนของคุณพ่อ วิชัย เลิศพัฒนพันธุ์ และคุณแม่ณัฐธา เลิศพัฒนพันธุ์ ได้เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนวัดพลับพลาชัย ส่วนในระดับมัธยมศึกษา ได้เข้ารับการศึกษที่โรงเรียนไตรมิตรวิทยาลัย และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และได้เข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญา มหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา(โครงสร้าง) คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556 จนถึงปัจจุบัน

