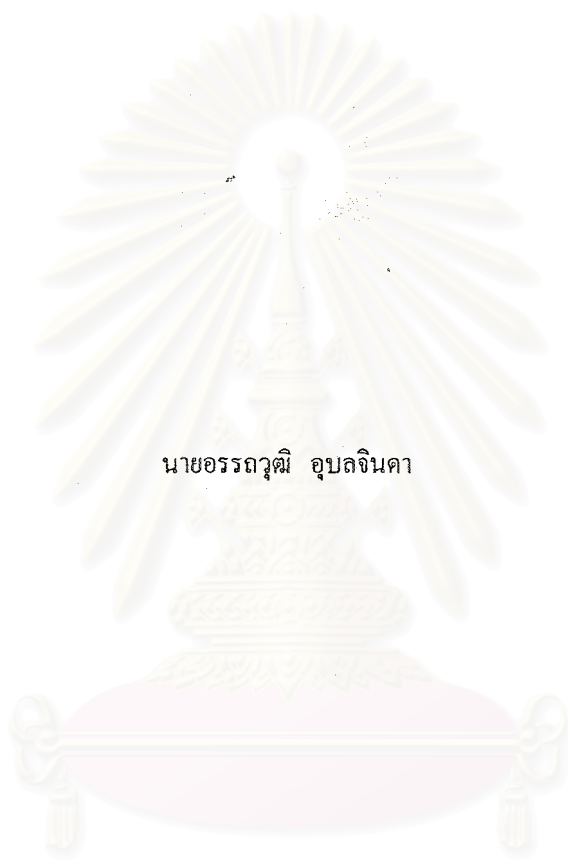


การทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันและมีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูง



นายอรรถวุฒิ อุบลจินดา

# สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดำเนินการตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

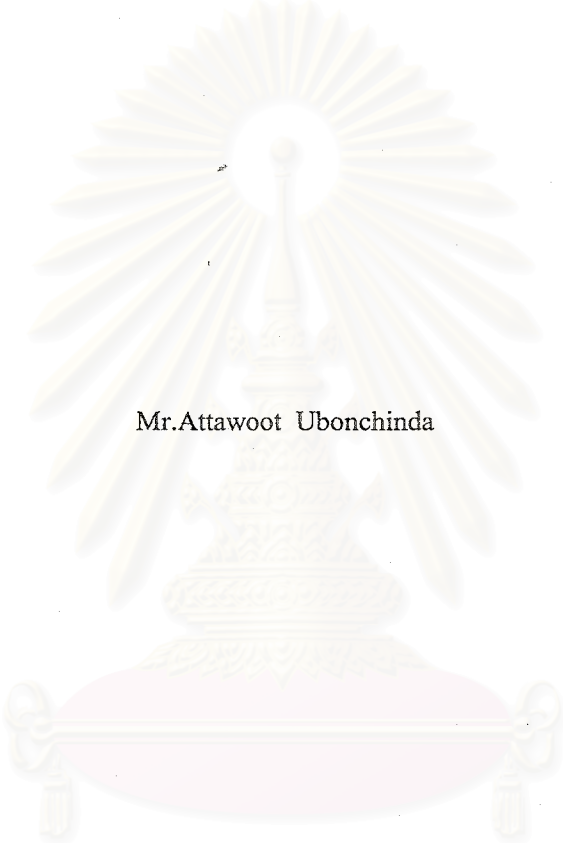
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1308-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 20469810

FIRE RESISTANCE OF PROTECTED STRUCTURAL STEEL MEMBERS WITH LARGE  
SECTION FACTORS



Mr.Attawoot Ubonchinda

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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-1308-8

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันและมี  
ค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูง

โดย

นายอรรถวุฒิ อุบลจินดา


สาขาวิชา

วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษา

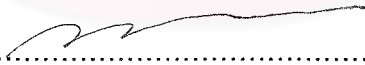
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปิญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่นในธรรม)

อรรถวุฒิ อุบลจินดา : การทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันและมีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูง (FIRE RESISTANCE OF PROTECTED STRUCTURAL STEEL MEMBERS WITH LARGE SECTION FACTORS) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ 162 หน้า ISBN: 974-17-1308-8

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาผลของรูปร่างและขนาดขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟในรูปของค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้าง โดยทำการทดสอบการทนไฟตัวอย่างทดสอบเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีรูปร่างหน้าตัดต่างกันสามแบบคือเหล็กโวลด์แฟลนจ์(WF) เหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวงที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดโดยประมาณ 200 ม<sup>1</sup> ขึ้นไป วัสดุกันไฟที่ใช้มีสองประเภทคือประเภทซีเมนต์เชิซที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมและประเภทสีกันไฟ หนึ่งค่าองค์ประกอบหน้าตัดสำหรับเหล็กโวลด์มีค่าเท่ากับความยาวรอบรูปพื้นผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนต่อค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก

ผลการทดสอบแสดงอย่างชัดเจนว่า สำหรับเหล็กที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิซที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม ค่าความสามารถทนไฟของเหล็กจะขึ้นกับทั้งค่าองค์ประกอบหน้าตัดและรูปร่างของเหล็ก จากการทดสอบพบว่าสำหรับเหล็กที่มีรูปร่างเดียวกันค่าความสามารถทนไฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลง แต่สำหรับเหล็กที่มีรูปร่างต่างกันเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดและความหนาของวัสดุกันไฟเท่ากันเหล็กโวลด์แฟลนจ์จะมีความสามารถทนไฟที่สูงกว่าเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ และความแตกต่างดังกล่าวจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่และพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีและยังได้เสนอสมการสำหรับคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กซึ่งให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน โดยมีความคลาดเคลื่อนที่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

สำหรับเหล็กที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุประเภทสีกันไฟ ผลการทดสอบแสดงว่าค่าความสามารถทนไฟของเหล็กมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลงแต่ผลเนื่องจากรูปร่างหน้าตัดเหล็กที่ต่างกันไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนเนื่องจากความไม่แน่นอนซึ่งเป็นผลจากการขยายตัวของสีกันไฟเมื่อสัมผัสความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอ โดยรอบตัวอย่างทดสอบ โดยเฉพาะบริเวณที่เป็นเหลี่ยมมุมการขยายตัวจะน้อยกว่าบริเวณอื่น

งานวิจัยครั้งนี้ยังได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความรุนแรงของไฟที่ต่างกันที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างเหล็กโดยการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน และพบว่า ความรุนแรงของไฟจะขึ้นกับอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยกับค่าพื้นที่ได้กราฟไฟ และความรุนแรงไฟที่เท่ากันจะเกิดขึ้นเมื่อค่าผลคูณของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยกับค่ากำลัง 2.85 ของพื้นที่ได้กราฟไฟ ณ เวลาวิกฤติมีค่าเท่ากัน

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....  
 สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา.....  
 ปีการศึกษา 2545.....

ลายมือชื่อนิสิต..... อรรถวุฒิ อุบลจินดา.....  
 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4270653621: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: STEEL / FIRE / FIRE RESISTANCE / FIRE PROTECTION / FIRE INSULATION / SECTION FACTOR / FIRE SEVERITY

ATTAWOOT UBONCHINDA, MR: FIRE RESISTANCE OF PROTECTED STRUCTURAL STEEL MEMBERS WITH LARGE SECTION FACTORS, THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHADCHART SITTIPUNT, Ph.D., 162 pp., ISBN: 974-17-1308-8

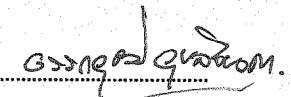

The objective of this research is to study effects of shapes and section factors of protected structural steel members to the fire resistance of the members. Section factor is the ratio of heated perimeter to cross-sectional area of the steel member. Three types of steel sections tested in this study include wide-flange, angle and circular-hollow sections. The specimens tested in this study had section factors of more than  $200 \text{ m}^{-1}$ . Two types of fire protection material used in this study were cementitious material containing perlite and intumescent coating.

For steel members protected with cementitious material, test results indicated that fire resistance of steel members depended on both section factor and shape of the members. For members with the same shape, fire resistance increased as the section factor decreased. For the same section factor and the same thickness of protection, fire resistance of wide-flange section was the greatest followed by angle and circular-hollow, respectively. The effect of different shapes became more evident as thickness of protection increased. Test results also agreed well with results from 2-D unsteady state heat transfer finite element analysis. The model for calculating the rise in temperature of protected steel members was also proposed.

For steel members protected with intumescent coating, test results indicated that fire resistance increased as the section factor decreased. However, the effect of different shapes on fire resistance was not clearly observed from the test results. It was observed that the intumescent coating used in the test did not uniformly expand around the specimens especially at the corner where expansion of the coating was less than those in other areas. Due to inconsistency in the expansion, the accurate analytical model for this coating was not developed in the study.

The research also investigated the relationships between varied fire severities on fire resistance of steel structures. Analytical results indicated that fire severity depended on both the average rate of fire temperature and the area under the fire curve. The study proposed that, for comparison purpose, fire severity could be estimated by the product of an average rate of the fire temperature and the power of 2.85 of the area under fire curve at critical time. This proposed formula enabled comparisons of fire severity among fire incidents with different temperature curves.

Department     Civil Engineering  
 .....  
 Field of study   Civil Engineering  
 .....  
 Academic year   2002  
 .....

Student's signature.....   
 Advisor's signature..... 

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยในครั้งนี้ รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำการวิจัย ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาตรี และรองศาสตราจารย์ ดร.บุญไชย สถิตมั่น ในธรรม คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สำหรับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ผู้เขียนขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เซิซที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม	จากหจก. ดี.พี. ดีโอไรท์ โค้ท
วัสดุกันไฟประเภทลิกันไฟ	จากบริษัท แมททีเรียล ซัพพลาย อินเตอร์เนชั่นแนล จำกัด

ผู้เขียนขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อ รุ่นพี่ เพื่อน ๆ รุ่นน้องและเจ้าหน้าที่ที่ห้องปฏิบัติการทดสอบการทนไฟและห้องปฏิบัติการคอนกรีตและหน่วยทดสอบวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกๆท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจและสนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดี ตลอดจนครูบาอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่เคยสั่งสอน อบรม และให้ความรู้ในสาขาวิชาต่าง ๆ พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

อรรณวุฒิ อุบลจินดา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ท
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ทัวไป.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 การดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	
2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน.....	7
2.2 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบบัลล์พ์.....	11
2.3 คุณสมบัติของเหล็กที่อุณหภูมิสูง.....	14
2.4 ประเภทของวัสดุกันไฟ.....	16
2.5 วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีมีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม.....	16
2.6 วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ.....	17
บทที่ 3 ความรุนแรงของไฟ	
3.1 ทัวไป.....	22
3.2 ความรุนแรงของไฟ.....	22
3.3 การวิเคราะห์ความรุนแรงของไฟ.....	25
3.4 ผลการวิเคราะห์.....	26
3.5 สรุป.....	28

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทดสอบ ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	
4.1 ทัวไป.....	36
4.2 มาตรฐานการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารและวัสดุ (ASTM E119) .....	36
4.3 มาตรฐานการทดสอบค่าความหนาและความหนาแน่นของวัสดุพ่นกันไฟ (ASTM E605).....	38
4.4 มาตรฐานการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุ (ASTM C177) .....	38
4.5 ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบการทนไฟ.....	38
4.6 ผลการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอส.....	43
4.7 ผลการทดสอบการทนไฟ.....	43
4.8 การปรับแก้ผลการทดสอบ.....	45
4.9 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	47
4.10 สรุป.....	49
บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน	
5.1 ทัวไป.....	66
5.2 การวิเคราะห์ค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่ใช้ในการทดสอบ.....	66
5.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่.....	68
5.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบลัมพ์ที่เสนอ โดย Malhotra.....	71
5.5 แบบจำลองสำหรับคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เสนอในงานวิจัยนี้.....	72
5.6 สรุป.....	75
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	95
รายการอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก. รายละเอียดและส่วนประกอบของเตาที่ใช้ในการทดสอบ.....	98
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอส.....	99
ภาคผนวก ค. ผลการวัดค่าความหนาของวัสดุกันไฟ.....	101
ภาคผนวก ง. ผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบ.....	107
ภาคผนวก จ. ผลการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟ.....	134



## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ฉ. ผลการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความหนาของวัสดุกันไฟ.....	142
ภาคผนวก ช. ตัวอย่างการคำนวณค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเหล็กตามสมการที่เสนอโดย Malhotra.....	153
ภาคผนวก ซ. ตัวอย่างการคำนวณค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของเหล็กตามสมการที่เสนอในงานวิจัยนี้.....	158
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	162



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	ผลการวิเคราะห์และคำนวณระยะเวลาทนไฟ อุณหภูมิไฟ พื้นที่ได้กราฟไฟและพื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส.....	29
ตารางที่ 3.2	ผลการคำนวณระยะเวลาทนไฟ อุณหภูมิไฟ พื้นที่ได้กราฟไฟและพื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส.....	29
ตารางที่ 3.3	ผลการทำนายค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 โดยใช้สมการที่ 3.10 เปรียบเทียบกับผลการทำนายโดยวิธี Equal Area เมื่อใช้ผลการวิเคราะห์การทนไฟที่ได้จากกราฟไฟ F1 และเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....	30
ตารางที่ 3.4	ผลการทำนายค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 โดยใช้สมการที่ 3.10 เปรียบเทียบกับผลการทำนายโดยวิธี Equal Area เมื่อใช้ผลการวิเคราะห์การทนไฟที่ได้จากกราฟไฟ F1 และเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส.....	30
ตารางที่ 4.1	ขนาดตัวอย่างทดสอบเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
ตารางที่ 4.2	ขนาดระบุและขนาดที่วัดได้จริงของท่อเหล็กกลมกลวงที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
ตารางที่ 4.3	สรุปผลการวัดค่าความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
ตารางที่ 4.4	ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เซียสที่ใช้ในงานวิจัย.....	51
ตารางที่ 4.5	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส.....	52
ตารางที่ 4.6	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส.....	53
ตารางที่ 4.7	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของกราฟไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส.....	54
ตารางที่ 4.8	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของกราฟไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส.....	55
ตารางที่ 4.9	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ ที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส.....	56
ตารางที่ 4.10	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความหนาของ วัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ ที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส.....	57
ตารางที่ 5.1	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส.....	76
ตารางที่ 5.2	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสามมิติที่เสนอโดย Malhotra เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส.....	77
ตารางที่ 5.3	สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสมการที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส.....	78
ตารางที่ 5.4	ค่าองค์ประกอบหน้าตัดและค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลสำหรับตัวอย่างทดสอบต่างๆ.....	79

## สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ ค-1	ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชียสสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม W-P....	101
ตารางที่ ค-2	ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชียสสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม L-P.....	102
ตารางที่ ค-3	ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชียสสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม CHS-P.....	103
ตารางที่ ค-4	ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม W-I.....	104
ตารางที่ ค-5	แสดงผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม L-I....	105
ตารางที่ ค-6	ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม CHS-I.....	106
ตารางที่ จ-1	วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตาม มาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....	134
ตารางที่ จ-2	วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตาม มาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส.....	138
ตารางที่ ช-1	การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-B ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่เสนอโดย Malhotra.....	153
ตารางที่ ช-2	การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่เสนอโดย Malhotra.....	154
ตารางที่ ช-1	การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้.....	158

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ระบบหรือปริมาตรควบคุมสำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์.....19

รูปที่ 2.2 ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ.....19

รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ.....19

รูปที่ 2.4 แผนภาพหน่วยแรง-หน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเกรด A36 ที่อุณหภูมิต่างๆ.....20

รูปที่ 2.5 การลดลงของกำลังรับแรงของเหล็กที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ.....20

รูปที่ 2.6 การขยายตามอุณหภูมิของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ.....20

รูปที่ 2.7 อัตราการคืบตัวของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ.....21

รูปที่ 3.1 อุณหภูมิไฟ-เวลา หรือกราฟไฟตามมาตรฐานการทดสอบการทนไฟต่างๆ.....31

รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของพื้นที่ได้กราฟไฟตามทฤษฎีของ Ingberg.....31

รูปที่ 3.3 กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ความรุนแรงของไฟ.....32

รูปที่ 3.4 อุณหภูมิของตัวอย่าง SP1 กับเวลาจากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยกราฟไฟแบบต่างๆ.....32

รูปที่ 3.5 อุณหภูมิของตัวอย่าง SP2 กับเวลาจากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยกราฟไฟแบบต่างๆ.....33

รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ได้กราฟไฟกับผลต่างของพื้นที่ได้กราฟไฟกับพื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์กับเวลา.....33

รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟกับค่าพื้นที่ได้กราฟไฟสำหรับตัวอย่าง SP1 และ SP2.....34

รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log(AT)$  กับ  $\log(T_f/t_f)$  ของตัวอย่าง SP1.....34

รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log(AT)$  กับ  $\log(T_f/t_f)$  ของตัวอย่าง SP2.....35

รูปที่ 4.1 กราฟอุณหภูมิไฟ-เวลา หรือกราฟไฟตามมาตรฐาน ASTM E119.....58

รูปที่ 4.2 ตำแหน่งสำหรับวัดความหนาของวัสดุกันไฟบนตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E605 และที่ใช้จริงในงานวิจัยนี้.....58

รูปที่ 4.3 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าการนำความร้อนในสถานะคงที่ตามมาตรฐาน ASTM C177.....58

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย.....59

รูปที่ 4.5 ตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนตัวอย่างทดสอบ.....59

รูปที่ 4.6 ภาพตัวอย่างทดสอบก่อนที่จะทำการพ่นหรือทาด้วยวัสดุกันไฟ.....60

รูปที่ 4.7 ภาพขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซิเมนต์ซีเอสทีมีแรมเปอร์ไลต์เป็นส่วนผสม.....60

รูปที่ 4.8 ภาพขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ.....61

รูปที่ 4.9 แสดงการวัดความหนาของสีกันไฟด้วยเครื่องมือวัดความหนาแบบดิจิตอล.....61

รูปที่ 4.10 ภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบกับฝาเตาก่อนการทดสอบ.....62

รูปที่ 4.11 ภาพตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซิเมนต์ซีเอสทีภายหลังการทดสอบ.....62

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.12 ภาพตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟภายหลังการทดสอบ.....63

รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....64

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส.....64

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....65

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส.....65

รูปที่ 5.1 แบบจำลองค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่ใช้ในการวิเคราะห์.....80

รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างทดสอบ W1-P1.....80

รูปที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างทดสอบ W5-P1.....81

รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างทดสอบ CHS1-P1.....81

รูปที่ 5.5 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่.....82

รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ สำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กไวต์แฟรงค์.....82

รูปที่ 5.7 กราฟแสดงผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ สำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กฉาก.....83

รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ สำหรับตัวอย่างทดสอบท่อเหล็กกลมกลวง.....83

รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....84

รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส.....84

รูปที่ 5.11 เส้นวงรอบของการกระจายของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ.....85

รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพท์ที่เสนอ โดย Malhotra สำหรับเหล็กไวต์แฟรงค์.....85

รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพท์ที่เสนอ โดย Malhotra สำหรับเหล็กฉาก.....86

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพ์ที่เสนอโดย Malhotra สำหรับท่อเหล็กกลมกลวง.....86

รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพ์ที่เสนอโดย Malhotra เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....87

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพ์ที่เสนอโดย Malhotra เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส.....87

รูปที่ 5.17 การคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของวัสดุกันไฟและค่าความยาวเส้นรอบรูปส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผล.....88

รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ สำหรับเหล็กหน้าตัดไอค์แฟรงค์.....89

รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ สำหรับเหล็กฉาก.....89

รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ สำหรับท่อเหล็กกลมกลวง.....90

รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....90

รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส.....91

รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....91

รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....92

รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลที่ได้จากการผลการทดสอบการทนไฟ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส.....92

รูปที่ ก-1 ภาพด้านบนของเตาที่ใช้ในการทดสอบการทนไฟ.....98

รูปที่ ก-2 ภาพด้านข้างของเตาที่ใช้ในการทดสอบการทนไฟ.....98

รูปที่ ข-1 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย.....99











## สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ ฉ-24 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L3-I1, L3-I2.....	149
รูปที่ ฉ-25 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L4-I1, L4-I2.....	150
รูปที่ ฉ-26 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L5-I1, L5-I2.....	150
รูปที่ ฉ-27 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L6-I1, L6-I2.....	150
รูปที่ ฉ-28 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS1-I1,CHS1-I2.....	151
รูปที่ ฉ-29 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS2-I1,CHS2-I2.....	151
รูปที่ ฉ-30 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS3-I1,CHS3-I2.....	151
รูปที่ ฉ-31 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS4-I1,CHS4-I2.....	152
รูปที่ ฉ-32 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS5-I1,CHS5-I2.....	152

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$\varepsilon$	คือ	ค่าการเปล่งรังสีความร้อน
$\varepsilon_{th,s}$	คือ	หน่วยการขีดหัดตัวเนื่องจากอุณหภูมิของเหล็ก
$\phi$	คือ	สัดส่วนปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ได้ของวัสดุกันไฟเทียบกับเหล็ก ตามสมการที่ 2.17
$\phi'$	คือ	สัดส่วนปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ได้ของวัสดุกันไฟเทียบกับเหล็ก ตามสมการที่ 5.3
$\rho$	คือ	ความหนาแน่นของวัตถุ
$\rho_p$	คือ	ความหนาแน่นของวัสดุกันไฟ
$\rho_s$	คือ	ความหนาแน่นของเหล็ก
$\sigma$	คือ	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์ซมานน์
$A_n$	คือ	พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนในทิศทาง n
$A_p, A_s$	คือ	พื้นที่หน้าตัดของวัสดุกันไฟและเหล็ก ตามลำดับ
$A_i$	คือ	พื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อน
$AT_f$	คือ	พื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของไฟกับเวลา
$AT_s$	คือ	พื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของเหล็กกับเวลา
$c$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะ
$c_s, c_p$	คือ	ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กและวัสดุกันไฟ ตามลำดับ
$C$	คือ	ค่าปรับแก้ระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบ
$d_p$	คือ	ความหนาของวัสดุกันไฟ
$E_{in}$	คือ	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ระบบ
$E_{out}$	คือ	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทออกจากระบบ
$E_{st}$	คือ	พลังงานความร้อนที่ระบบสะสมไว้ภายใน
$g'''$	คือ	อัตราพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในระบบ
$h$	คือ	สปส.การถ่ายเทความร้อนรวม
$h_c$	คือ	สปส.การพาความร้อน
$h_r$	คือ	สปส.การแผ่รังสีความร้อน
$H_p$	คือ	เส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อน
$H_{pe}$	คือ	เส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนประสิทธิภาพ
$H_{pp}$	คือ	เส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนวัสดุกันไฟ
$H_{ps}$	คือ	เส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนของเหล็ก
$I$	คือ	ระยะเวลาทนไฟที่ทดสอบได้จริง
$k$	คือ	ค่าการนำความร้อน
$k_s, k_p$	คือ	ค่าการนำความร้อนของเหล็กและวัสดุกันไฟ ตามลำดับ
$L$	คือ	ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของความล่าช้าของเทอร์โมคัปเปิลในช่วงแรกของการทดสอบ
$n$	คือ	ทิศทางการไหลของความร้อน

## คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

$Q$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน
$Q_{cond.}$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน
$Q_{conv.}$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน
$Q_{rad.}$	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน
$t$	คือ	ระยะเวลา
$t_c$	คือ	ระยะเวลาทนไฟ
$T$	คือ	อุณหภูมิ
$T_{\infty}$	คือ	อุณหภูมิของของไหล หรือ สิ่งแวดล้อม
$T_f, T_s, T_p$	คือ	อุณหภูมิของไฟ เหล็กและวัสดุกันไฟ ตามลำดับ
$T_{s0}$	คือ	อุณหภูมิเริ่มต้นของเหล็ก
$T_{sf}$	คือ	อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุแข็ง
$x$	คือ	ระยะในทิศทางแกน x
$y$	คือ	ระยะในทิศทางแกน y
$z$	คือ	ระยะในทิศทางแกน z

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ทัวไป

เหตุการณ์เพลิงไหม้และการพังทลายของอาคารโรงงานบริษัทเคเคอร์ อินดัสเตรียล (ไทยแลนด์) จำกัด ซึ่งเป็นอาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณเมื่อกลางปี พ.ศ.2536 ก่อให้เกิดความตื่นตัวและตระหนักถึงภัยจากเพลิงไหม้ซึ่งถึงแม้ยากที่จะคาดเดาแต่ก็ไม่สามารถที่จะละเลยได้ ภายหลังจากเหตุการณ์ดังกล่าวได้มีการออกกฎหมายกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 48 พ.ศ.2540 ว่าด้วยการก่อสร้างอาคารด้านทานอัคคีภัยเพื่อใช้ควบคุมการก่อสร้างอาคารหรือสิ่งก่อสร้างให้ต้องมีความสามารถทนไฟได้อย่างเพียงพอ กฎกระทรวงฉบับดังกล่าวได้กำหนดให้โครงสร้างหลักในตัวอาคารต้องมีความสามารถทนไฟได้ไม่ต่ำกว่า 3 ชั่วโมง

ในสภาวะปกติเหล็กโครงสร้างรูปพรรณเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกล่าวคือมีค่ากำลังและความยืดหยุ่นสูงเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นคุณสมบัติดังกล่าวจะลดลงอย่างมากเป็นผลให้โครงสร้างรับน้ำหนักได้น้อยลงและเมื่อถึงอุณหภูมิขณะหนึ่งโครงสร้างจะวิบัติเนื่องจากไม่สามารถรับน้ำหนักได้อีกต่อไป โดยทั่วไปองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มีการป้องกันไฟจะมีความสามารถทนไฟได้ไม่เกิน 10 ถึง 30 นาทีเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้มีระยะเวลาทนไฟที่เพิ่มขึ้นจึงต้องมีการป้องกันโดยการหุ้มหรือพันด้วยวัสดุที่เป็นฉนวนกันไฟ อย่างไรก็ตามการป้องกันไฟควรจะทำเท่าที่จำเป็นเนื่องจากจะเป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกและค่าใช้จ่ายที่มากเกินไป

ความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างได้แก่น้ำหนักบรรทุกที่โครงสร้างรับอยู่จริงขณะนั้น ความรุนแรงของไฟ ลักษณะและขนาดของโครงสร้างตลอดจนประเภทและคุณสมบัติของฉนวนกันไฟที่ใช้ งานวิจัยที่ผ่านมาได้เสนอว่าขนาดและรูปร่างขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณมีผลต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างกล่าวคือเหล็กที่มีค่าสัดส่วนระหว่างเส้นรอบรูปส่วนที่สัมผัสความร้อนต่อพื้นที่หน้าตัด หรือเรียกว่า ค่าองค์ประกอบหน้าตัด (Section Factor) สูงกว่าจะมีความสามารถทนไฟต่ำกว่า และเหล็กที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดเท่ากันจะมีความสามารถทนไฟเท่ากันไม่ว่าจะมีขนาดหรือรูปร่างเป็นอย่างไร ซึ่งทำให้เกิดข้อสงสัยเนื่องจากเหล็กที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดเท่ากันอาจมีขนาดและรูปร่างต่างกันได้มากดังนั้นค่าความสามารถทนไฟจำเป็นต้องเท่ากันหรือไม่ งานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาถึงผลของขนาดและรูปร่างขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้าง โดยเฉพาะเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลุ่มที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูงซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีความหนาแน่นสูงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานก่อสร้าง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถออกแบบวิธีการเพิ่มความสามารถในการทนไฟให้แก่โครงสร้างเหล็กได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าอุณหภูมิวิกฤติขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ

Kruppa<sup>(1)</sup> ได้ทำการศึกษาเรื่องค่าอุณหภูมิวิกฤติหรือวิบัติของโครงสร้างเหล็กประเภทต่างๆ ได้แก่ คานคันทอร์มีเนททางสถิติ, คานอินดีทอร์มีเนททางสถิติ, เสาและโครงสร้างประเภทคาน-เสา โดยอาศัยหลักการการเสื่อมลดของกำลังรับแรงและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กที่อุณหภูมิสูงทำให้ค่าน้ำหนักประลัยที่โครงสร้างจะรับได้ลดลงและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่ง โครงสร้างจะเกิดการวิบัติเนื่องจากค่าน้ำหนักประลัยที่รับได้ในขณะนั้นจะไปเท่ากับค่าน้ำหนักที่โครงสร้างกำลังรับอยู่พอดีหรือเท่ากับค่าน้ำหนักที่ได้ออกแบบไว้ โครงสร้างที่มีค่าน้ำหนักบรรทุกขณะใช้งานต่อค่าน้ำหนักบรรทุกประลัยสูงกว่าจะวิบัติที่อุณหภูมิวิกฤติต่ำกว่า Kruppa ได้ทำการศึกษาทั้งในกรณีที่อุณหภูมิบนหน้าตัดเหล็กมีความสม่ำเสมอและในกรณีที่อุณหภูมิมีการกระจายตามความลึกของหน้าตัดและตามความยาวของโครงสร้าง เขาได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีกับผลการทดสอบการทนไฟจริงของโครงสร้างประเภทต่างๆ และพบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

Ottens<sup>(2)</sup> ได้ทำการทดสอบการทนไฟของคานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณช่วงเดียวที่มีความยาว 4.75 ม. จำนวน 14 ตัวอย่างและมีการป้องกันไฟด้วยวิธีการต่างๆ คือ หุ้มด้วยแผ่นเวอร์มิคิวไลท์, ฉีดพ่นด้วยสเปรย์เวอร์มิคิวไลท์-พลาสติก และฉีดพ่นด้วยสเปรย์เอสเบสต่อส-พลาสติก โดยตัวอย่างจะมีด้านที่สัมผัสกับเปลวไฟโดยตรงสามด้าน ส่วนด้านบนจะติดกับพื้นคอนกรีตเพื่อให้เป็นไปตามสภาพการใช้งานจริงและทำการทดสอบการเผาไฟในขณะที่มีการให้น้ำหนักบรรทุกออกแบบในช่วงใช้งาน Ottens ใช้เกณฑ์การสิ้นสุดการทดสอบตามมาตรฐาน DIN 4120 ซึ่งกำหนดไว้สองข้อคือเมื่อโครงสร้างเกิดการวิบัติในการรับแรงและเมื่ออัตราการโก่งตัวของคานเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ ผลการทดสอบที่ได้พบว่าค่าอุณหภูมิที่ปีกคานด้านบนจะต่ำกว่าด้านล่างประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  ตลอดช่วงการทดสอบและโครงสร้างจะเกิดการวิบัติในเวลาใกล้เคียงกับที่อัตราการโก่งตัวของคานถึงค่าที่ยอมรับและเกิดขึ้นในขณะที่ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโครงสร้างอยู่ภายในช่วง  $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$

Neves<sup>(3)</sup> ได้ทำการวิเคราะห์ผลของค่าสตีเฟนส ค่าอัตราส่วนความชะลูด และค่าการเยื้องศูนย์ของแรงที่มีต่อค่าอุณหภูมิวิกฤติของเสาเหล็กที่มีการยึดครั้งแรกยึดตัวตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าเมื่อค่าอัตราส่วนความชะลูดของเสาเพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัดส่วนความปลอดภัยในกรณีของเสาที่มีค่าอัตราส่วนความชะลูดมากกว่าจะมีค่ามากกว่าซึ่งทำให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกใช้งานที่น้อยกว่า ในกรณีของเสาที่รับแรงตามแนวแกนเสาเหล็กที่มีค่าสตีเฟนสการยึดครั้งแรกเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างลดลงซึ่งหมายถึงการวิบัติของโครงสร้างที่เร็วขึ้น แต่เมื่อค่าการเยื้องศูนย์ของแรงเพิ่มมากขึ้นการลดลงของค่าอุณหภูมิวิกฤติดังกล่าวจะมีค่าน้อยลง

Rodrigues, Neves และ Valente<sup>(4)</sup> ได้ทำการทดสอบเพื่อศึกษาผลของผลของค่าสตีเฟนส ค่าอัตราส่วนความชะลูด และค่าการเยื้องศูนย์ของแรงที่มีต่อค่าอุณหภูมิวิกฤติขององค์อาคารเหล็กที่รับแรงอัดที่มีการยึดครั้งแรกยึด

ตัวตามแนวแกน การทดสอบทำโดยการให้น้ำหนักบรรทุกออกแบบแก็ดตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นแผ่นเหล็กที่มีความกว้าง 5 ซม.และยาว 46 ซม. ที่อยู่ในเตาอบซึ่งมีการให้ความร้อนในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยตัวอย่างทดสอบจะวางอยู่บนคานเหล็กซึ่งสามารถปรับค่าสติฟเนสได้ ผลการทดสอบสรุปได้ว่า สำหรับองค์อาคารที่รับแรงตามแนวแกนและมีค่าอัตราส่วนความชะลูดสูงกว่า 80 ระดับการยึดรั้งตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างลดลงได้สูงสุดถึง 200 °C แต่ถ้าวัดองค์อาคารมีการรับแรงเยื้องศูนย์มากๆ การยึดรั้งตามแนวแกนจะไม่ทำให้อุณหภูมิวิกฤติของ โครงสร้างเปลี่ยนไปมากนัก

### 1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ

Stanzak และ Lee<sup>(5)</sup> ได้ทำการศึกษาเรื่องการทนไฟของเสาเหล็กแบบสี่เหลี่ยมตันที่ไม่มีเกรงป้องกันไฟใดๆ โดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในสองมิติจากไฟไปยังเสาเหล็ก ซึ่งพบว่าสำหรับเสาเหล็กที่มีขนาดเล็กหรือความหนาแน่นๆ อุณหภูมิที่แต่ละตำแหน่งภายในหน้าตัดจะแตกต่างกันน้อยมากและอาจใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่ระยะทางครึ่งหนึ่งจากผิวเหล็ก ไปยังจุดกึ่งกลางเป็นค่าอุณหภูมิตัวแทนของทั้งหน้าตัดได้ ผลจากการทดสอบการทนไฟพวกเขาพบว่าค่าระยะเวลาในการทนไฟจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของน้ำหนักต่อความยาวต่อค่าเส้นรอบรูปพื้นผิวที่สัมผัสความร้อนในลักษณะสมการกำลัง

Lee<sup>(6)</sup> ได้ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกัน โดยพิจารณาให้เกิดการนำความร้อนในหนึ่งมิติภายในฉนวนทนไฟผ่านเข้าไปยังผิวเหล็กด้านในและพิจารณาให้เหล็กมีค่าอุณหภูมิเท่ากันตลอดผิวสัมผัส ความร้อนภายในเตาเป็นตามกราฟไฟมามาตรฐานตามมาตรฐาน ISO-TC/92 ค่าอุณหภูมิของเหล็กที่ได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ตามสมมติฐานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาของฉนวนทนไฟที่ใช้และค่าน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนของเหล็ก Lee ได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและจากการทดสอบการทนไฟจริงของเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการฉีกพันด้วยสเปรย์แอสเบสคอสที่ความหนาต่างๆกันพบว่าผลการคำนวณที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบเป็นอย่างดี

Lee และ Harmathy<sup>(7)</sup> ได้อาศัยข้อมูลจากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการสร้างสมการแบบเอมไพริคัลสำหรับทำนายค่าระยะเวลาทนไฟสำหรับเสาเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยการหุ้มด้วยแผ่นคอนกรีตแบบกล่องโดยรอบทั้งสี่ด้านและเปรียบเทียบผลกับผลการทดสอบการทนไฟของเสาเหล็กรูปพรรณจริง พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกันโดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในระดับที่ไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ได้จะพบว่าค่าระยะเวลาในการทนไฟของ โครงสร้างจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กต่อเส้นรอบรูปพื้นผิวที่สัมผัสความร้อน, ความหนาของฉนวนทนไฟ และอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ได้ของเหล็กต่อคอนกรีต



ตัวตามแนวแกน การทดสอบทำโดยการให้น้ำหนักบรรทุกออกแบบแก็ดตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นแผ่นเหล็กที่มีความกว้าง 5 ซม.และยาว 46 ซม. ที่อยู่ภายในเตาอบซึ่งมีการให้ความร้อนในอัตรา 5 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยตัวอย่างทดสอบจะวางอยู่บนคานเหล็กซึ่งสามารถปรับค่าสติเฟนส์ได้ ผลการทดสอบสรุปได้ว่า สำหรับองค์อาคารที่รับแรงตามแนวแกนและมีค่าอัตราส่วนความชะลูดสูงกว่า 80 ระดับการยัดรีดตามแนวแกนที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าอุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างลดลงได้สูงสุดถึง 200 °C แต่ถ้าวัดองค์อาคารมีการรับแรงเชิงศูนย์กลางมากๆ การยัดรีดตามแนวแกนจะไม่ทำให้อุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปมากนัก

### 1.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ

Stanzak และ Lee<sup>(5)</sup> ได้ทำการศึกษาเรื่องการทนไฟของเสาเหล็กแบบสี่เหลี่ยมตันที่ไม่มีกำบังป้องกันไฟใดๆ โดยทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในสองมิติจากไฟไปยังเสาเหล็ก ซึ่งพบว่าสำหรับเสาเหล็กที่มีขนาดเล็กหรือความหนาแน่นของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งภายในหน้าตัดจะแตกต่างกันน้อยมากและอาจใช้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวกับอุณหภูมิที่ระยะทางครึ่งหนึ่งจากผิวเหล็ก ไปยังจุดกึ่งกลางเป็นค่าอุณหภูมิตัวแทนของทั้งหน้าตัดได้ ผลจากการทดสอบการทนไฟพวกเขาพบว่าค่าระยะเวลาในการทนไฟจะมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนของน้ำหนักต่อความยาวต่อค่าเส้นรอบรูปพื้นผิวที่สัมผัสความร้อนในลักษณะสมการกำลัง

Lee<sup>(6)</sup> ได้ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกัน โดยพิจารณาให้เกิดการนำความร้อนในหนึ่งมิติภายในฉนวนทนไฟผ่านเข้าไปยังผิวเหล็กด้านในและพิจารณาให้เหล็กมีค่าอุณหภูมิเท่ากันตลอดผิวสัมผัส ความร้อนภายในเตาเป็นตามกราฟไฟมาตรฐานตามมาตรฐาน ISO-TC/92 ค่าอุณหภูมิของเหล็กที่ได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ตามสมมติฐานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาของฉนวนทนไฟที่ใช้และค่าน้ำหนักต่อพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนของเหล็ก Lee ได้ทำการเปรียบเทียบผลระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและจากการทดสอบการทนไฟจริงของเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการฉนวนด้วยสเปรย์เอสเบสตอสที่ความหนาต่างๆกันพบว่าผลการคำนวณที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดสอบเป็นอย่างดี

Lee และ Harmathy<sup>(7)</sup> ได้อาศัยข้อมูลจากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการสร้างสมการแบบเอมไพริคัลสำหรับทำนายค่าระยะเวลาทนไฟสำหรับเสาเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยการหุ้มด้วยแผ่นคอนกรีตแบบกล่อง โดยรอบทั้งสี่ด้านและเปรียบเทียบผลกับผลการทดสอบการทนไฟของเสาเหล็กรูปพรรณจริง พบว่าผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในระดับที่ไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ จากสมการที่ได้จะพบว่าค่าระยะเวลาในการทนไฟของโครงสร้างจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดของเหล็กต่อเส้นรอบรูปพื้นผิวที่สัมผัสความร้อน, ความหนาของฉนวนทนไฟ และอัตราส่วนของปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ได้ของเหล็กต่อคอนกรีต

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงพฤติกรรมการทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1 ศึกษาถึงผลของขนาดและรูปร่างขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณทั้งที่มีและไม่มี การป้องกันไฟ ในรูปของค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้าง
- 2 ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของความรุนแรงของไฟที่ต่างกันที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณ ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความสามารถทนไฟที่แท้จริงของโครงสร้าง จากความรุนแรงของไฟที่เกิดขึ้นจริงใดๆเทียบกับความรุนแรงของไฟตามมาตรฐานทดสอบ
- 3 สามารถออกแบบวิธีการเพิ่มความสามารถทนไฟให้แก่องค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณได้อย่างเหมาะสม

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตและข้อจำกัดของงานวิจัยมีดังนี้

- 1 ตัวอย่างเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กโวลด์แฟลนจ์ เหล็กฉาก และท่อเหล็กกลม กลวงที่มีขนาดหน้าตัดในรูปของค่าองค์ประกอบหน้าตัดโดยประมาณ  $200 \text{ m}^2$  ขึ้นไป
- 2 ศึกษาพฤติกรรมการทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟแบบป้องกันโดยรอบขอบหน้าตัดทั้งสี่ด้าน ( 4-Side Profiled Protection )
- 3 วัสดุกันไฟที่ใช้ศึกษาเป็นแบบซีเมนต์เชิซที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมและแบบสีกันไฟซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวนกันความร้อนเท่านั้น ไม่มีส่วนในการรับน้ำหนักบรรทุกของโครงสร้างแต่อย่างใด
- 4 การทดสอบการทนไฟเป็นแบบที่ไม่มี การให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างทดสอบในระหว่างการเผาไฟซึ่งเป็นวิธีการทดสอบอย่างหนึ่งตามมาตรฐาน ASTM E119
- 5 พิจารณาการวิบัติของ โครงสร้างจากค่าความสามารถทนไฟในรูปของระยะเวลาก่อนที่โครงสร้างจะถึงค่า อุณหภูมิวิกฤติโดยไม่พิจารณาผลของลักษณะของโครงสร้างทั้งในแง่ของการรับแรง ลักษณะของที่รองรับตลอดจนลักษณะการยึดรั้งที่ปลายโครงสร้าง

## 1.5 การดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้การวิจัยบรรลุผลตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้จึงได้มีขั้นตอนการดำเนินงานดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

### 1.5.1 การทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิจัยเป็นเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีรูปร่างหน้าตัดเป็นแบบไวต์แพลนจ์ เหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวงทั้งแบบที่ไม่มีและมีการป้องกันไฟ ตัวอย่างแต่ละท่อนมีความยาว 1 เมตร ขนาดของตัวอย่างเหล็กแต่ละรูปร่างหน้าตัดเลือกจากค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่แตกต่างกันเพื่อดูผลของค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้าง วัสดุกันไฟที่ใช้ทดสอบมีสองระบบด้วยกันกล่าวคือระบบแพสซีฟซึ่งได้แก่ วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีมีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมและระบบรีแอคทีฟซึ่งได้แก่สีกันไฟทั้งนี้เพื่อดูผลของประเภทวัสดุกันไฟที่แตกต่างกันว่ามีผลต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างอย่างไร ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิซึ่งได้แก่เทอร์โมคัปเปิลเปิดที่ตัวอย่างทดสอบเป็นสองระดับ โดยให้มีระยะห่างกันระดับละ 30 ซม. แต่ละระดับติดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิจำนวน 2 ถึง 3 จุดขึ้นกับรูปร่างหน้าตัดเหล็ก

ดำเนินการทดสอบการทนไฟตามมาตรฐาน ASTM E119 โดยควบคุมอุณหภูมิของไฟให้เป็นไปตามกราฟไฟมาตรฐาน บันทึกค่าอุณหภูมิของไฟและของตัวอย่างทดสอบที่เวลาต่างๆจนถึงค่าอุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้าง บันทึกลักษณะของตัวอย่างทดสอบภายหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ

### 1.5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟ

เนื่องจากคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากไฟเข้าไปยังเหล็กและยังใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้าง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบเพื่อหาค่าคุณสมบัติต่างๆดังต่อไปนี้

- |                      |                            |
|----------------------|----------------------------|
| 1. ค่าความหนาแน่น    | ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E605  |
| 2. ค่าการนำความร้อน  | ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C177  |
| 3. ค่าความร้อนจำเพาะ | ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E1269 |

เนื่องจากในการหาค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุกันไฟจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือโดยเฉพาะ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ส่งชิ้นตัวอย่างทดสอบขนาดตามมาตรฐานดังกล่าวไปทดสอบที่กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม

อนึ่งคุณสมบัติทางความร้อนดังกล่าวสามารถทดสอบได้เฉพาะกับวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีมีแร้เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสมเท่านั้นไม่สามารถใช้ได้กับวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟทั้งนี้เนื่องจากสีกันไฟเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อนทางโครงสร้างกล่าวคือในขณะที่อุณหภูมิปกติจะมีลักษณะเป็นของแข็งเหมือนสีทาบ้านทั่วไปแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและเคมีโดยเกิดการขยายตัวเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโฟมคาร์บอนที่มีโพรงอากาศอยู่ภายในจึงยากแก่การทำชิ้นตัวอย่างเพื่อทดสอบค่าคุณสมบัติต่างๆ ดังนั้นจึงไม่สามารถหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนใดๆได้

### 1.5.3 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังเหล็กมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องระหว่างผลการทดสอบการทนไฟกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและยังใช้เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กได้อีกด้วย

### 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถอธิบายถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณได้อย่างถูกต้อง
- 2) หาแนวทางในการเพิ่มความสามารถทนไฟให้แก่องค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

#### 2.1 ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยการถ่ายเทพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างระบบสองระบบ หรือระหว่างระบบหนึ่งกับสิ่งแวดล้อมเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิ ใช้ประโยชน์ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของระบบว่าเกิดขึ้นได้รวดเร็วเพียงใดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด กระบวนการถ่ายเทความร้อนแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีด้วยกันคือ 1) การนำความร้อน 2) การพาความร้อน และ 3) การแผ่รังสีความร้อน การถ่ายเทความร้อนแต่ละวิธีจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อนซึ่งกลไกของการเคลื่อนที่ของความร้อนในแต่ละวิธีจะมีความแตกต่างกัน

ในขณะที่เกิดเพลิงไหม้ โครงสร้างจะได้รับพลังงานความร้อนผ่านกระบวนการถ่ายเทความร้อนทั้งสามวิธีพร้อมกันคือความร้อนจากไฟจะถ่ายเทสู่ผิวขององค์อาคารด้วยกระบวนการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนและความร้อนที่ผิวนอกจะเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณภายในโดยกระบวนการนำความร้อน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบกลไกการถ่ายเทความร้อนทั้งสามแบบดังกล่าวเพื่อสามารถอธิบายถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของโครงสร้างได้อย่างถูกต้อง

##### 2.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งหรือจากส่วนหนึ่งไปยังส่วนอื่นๆของวัตถุเดียวกัน การแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนโดยกลไกนี้เกิดจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกันหรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่วัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ โดยทั่วไปการนำความร้อนจะเกิดได้ดีในวัตถุที่เป็นของแข็งมากกว่าของเหลวและแก๊ส ตามลำดับ สมการการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) ซึ่งกล่าวว่าอัตราการไหลของความร้อนโดยการนำในทิศทางที่กำหนดจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับระยะทาง และพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน ดังสมการที่ 2.1

$$Q_{cond.} = -kA_n \frac{dT}{dn} \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$Q_{cond.} = \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน, W}$$

$$\begin{aligned}
 A_n &= \text{พื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนในทิศทาง } n, \text{ m}^2 \\
 \frac{dT}{dn} &= \text{เกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางการไหลของความร้อน, } ^\circ\text{C/m} \\
 k &= \text{ค่าคงที่การนำความร้อน หรือ ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), W/m}^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

ค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัตถุหนึ่งๆ มีค่าขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมี โครงสร้างและสถานะของสาร อุณหภูมิและความดัน สำหรับวัตถุหรือสารอย่างหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าการนำความร้อนมากที่สุด ได้แก่ อุณหภูมิ จากการศึกษาและทดลองพบว่าค่าการนำความร้อนของโลหะจะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับอุณหภูมิสัมบูรณ์และ Mean Free Path ของโมเลกุล Mean Free Path นี้จะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นโลหะบริสุทธิ์จึงมีค่าการนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ถ้าโลหะมีสิ่งเจือปนหรือเป็นโลหะผสมก็อาจทำให้ค่าการนำความร้อนเปลี่ยนแปลงไป

### 2.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน เป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างผิวของวัตถุแข็งกับของเหลวหรือแก๊ส อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนไม่ได้ขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุเพียงอย่างเดียว แต่มีองค์ประกอบอื่นๆอีกที่เกี่ยวข้อง เช่น ลักษณะการเคลื่อนที่ของของเหลวหรือแก๊ส เป็นต้น การคาดคะเนอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากของไหลเข้าสู่ผิวของวัตถุแข็งเป็นสิ่งที่ยุ่งยากมาก เนื่องจากต้องใช้หลักการต่างๆมากมาย ได้แก่ หลักการของการนำความร้อน พลศาสตร์ของไหลและทฤษฎีของชั้นบางนิวตัน ได้อาศัยหลักการต่างๆดังกล่าวและรวมเข้าไว้เป็นพารามิเตอร์ตัวเดียวดังนี้

$$Q_{conv.} = h_c A_t (T_\infty - T_{sf}) \quad (2.2)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 Q_{conv.} &= \text{อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน, W} \\
 A_t &= \text{พื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อน, m}^2 \\
 T_\infty &= \text{อุณหภูมิของของไหล, } ^\circ\text{C} \\
 T_{sf} &= \text{อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุของแข็ง, } ^\circ\text{C} \\
 h_c &= \text{สปส.การพาความร้อน (Convection Heat Transfer Coefficient), W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

สมการที่ 2.2 เรียกว่า กฎการเย็นตัวของนิวตัน ค่าสปส.การพาความร้อนสำหรับระบบใดๆขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกันคือรูปแบบของการไหล รูปทรงทางเรขาคณิตของวัตถุ คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของอุณหภูมิ ตำแหน่งตามผิวของวัตถุ และกลไกของการพาความร้อน

### 2.1.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะเปล่งพลังงานออกมาเนื่องจากอุณหภูมิของวัตถุ พลังงานที่เปล่งออกมาโดยวัตถุเนื่องจากอุณหภูมิมี่ชื่อเรียกว่า รังสีความร้อน รังสีความร้อนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจากวัตถุ กลไกการถ่ายเทความร้อนจึงแตกต่างจากการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนและการพาความร้อน คือความร้อนอาจเคลื่อนที่จากวัตถุหนึ่งไปสู่อีกวัตถุหนึ่งได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางระหว่างวัตถุทั้งสองเลย อัตราการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัตถุสองอันที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะเป็นไปตามกฎของสเตฟาน-โบลท์ซมานน์ (Stefan-Boltzmann 's Law) ดังนี้

$$Q_{rad.} = \epsilon \sigma A_r (T_{\infty}^4 - T_{sf}^4) \quad (2.3)$$

เมื่อ

$Q_{rad.}$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน , W

$A_r$  = พื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อน ,  $m^2$

$T_{\infty}$  = อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ,  $^{\circ}C$

$T_{sf}$  = อุณหภูมิที่ผิวของวัตถุ ,  $^{\circ}C$

$\epsilon$  = ค่าการเปล่งรังสีความร้อน

$\sigma$  = ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์ซมานน์ =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{C}^4$

ในทางปฏิบัติเพื่อความสะดวกมักจะแสดงอัตราการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนตามสมการที่ 2.3 ในรูปของ

$$Q_{rad.} = h_r A_r (T_{\infty} - T_{sf}) \quad (2.4)$$

$$h_r = \epsilon \sigma (T_{\infty} - T_{sf})(T_{\infty}^2 + T_{sf}^2) \quad (2.5)$$

เมื่อ

$h_r$  = สปส.การแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer Coefficient) ,  $\text{W/m}^2\text{C}$

การถ่ายเทความร้อนที่ผิวของวัตถุของแข็งจะเกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนรวมกัน ดังนั้นอัตราการการถ่ายเทความร้อนที่ผิวทั้งหมดสามารถเขียนได้เป็น

$$Q = Q_{conv.} + Q_{rad.} = h A_r (T_{\infty} - T_{sf}) \quad (2.6)$$

$$h = h_c + h_r \quad (2.7)$$

เมื่อ

$h$  = สปต.การถ่ายเทความร้อนรวม (Total Heat Transfer Coefficient) ,  $W/m^2\text{ }^{\circ}C$

#### 2.1.4 สมการควบคุมการนำความร้อน

โดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิก พิจารณาปริมาตรควบคุมของแท่งวัตถุรูปทรงลูกบาศก์ขนาดเล็กจะได้สมการควบคุมการนำความร้อนในสามมิติดังสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + g''' = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

เมื่อ

- $T$  = อุณหภูมิของวัตถุ ,  $^{\circ}C$
- $\rho$  = ความหนาแน่นของวัตถุ ,  $kg/m^3$
- $c$  = ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุ ,  $J/kg \text{ } ^{\circ}C$
- $g'''$  = อัตราพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นภายในระบบ ,  $W/m^3$
- $x, y, z$  = ระยะทางในแนวแกน  $x$ ,  $y$  และ  $z$  ตามลำดับ ,  $m$
- $t$  = ระยะเวลา ,  $sec.$

สมการที่ 2.8 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า สมการการแพร่กระจายความร้อน (Heat Diffusion Equation) จากสมการที่ 2.8 อุณหภูมิของวัตถุ ณ ตำแหน่งใดๆจะเป็นฟังก์ชันของทั้งระยะทางและระยะเวลา  $T(x, y, z, t)$  ค่าความร้อนจำเพาะของวัตถุที่ปรากฏในสมการที่ 2.8 จะแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนที่สะสมอยู่ในวัตถุ วัตถุที่มีค่าความร้อนจำเพาะมากกว่าจะสามารถสะสมพลังงานความร้อนไว้ภายในได้มากกว่า

สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังองค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟ ซึ่งเป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่จะมีสมการควบคุมการถ่ายเทความร้อนซึ่งลดรูปจากสมการที่ 2.8 ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.9)$$



## 2.2 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์ (Lumped System Analysis)

การแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังองค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟโดยการแก้สมการควบคุมตามสมการที่ 2.9 โดยตรงไม่สามารถจะทำได้เนื่องจากสาเหตุหลายประการ ได้แก่ 1) รูปร่างหน้าตัดมีความซับซ้อน 2) คุณสมบัติทางความร้อนของเหล็กและวัสดุกันไฟเปลี่ยนแปลงได้ตามอุณหภูมิ และ 3) อุณหภูมิของไฟเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะเวลา ดังนั้นในการแก้ปัญหาคงกล่าวจะต้องใช้วิธีการเชิงตัวเลขซึ่งได้แก่วิธีไฟไนต์เฟอเรนซ์หรือวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีการแก้ปัญหาคือการถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงที่อีกวิธีหนึ่งซึ่งเป็นวิธีการโดยประมาณคือวิธีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์ การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยวิธีนี้จะใช้ได้กับระบบที่มีความต้านทานความร้อนภายในต่ำเนื่องจากจะพิจารณาให้ระบบหรือวัตถุมีอุณหภูมิเท่ากันในทุกตำแหน่งและมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาเท่านั้น นั่นคือ  $T(t)$  ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังองค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์แบบนี้ได้เนื่องจากสาเหตุสองประการกล่าวคือ

- 1) เหล็กเป็นวัตถุที่มีค่าการแพร่กระจายความร้อนสูงมากดังนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากผิวด้านที่สัมผัสความร้อนไปยังบริเวณต่างๆภายในได้อย่างรวดเร็ว
- 2) เนื่องจากเหล็กโครงสร้างรูปพรรณเป็นวัสดุก่อสร้างที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางๆประกอบกันดังนั้นความร้อนจะเคลื่อนที่จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งได้อย่างรวดเร็ว

Malhotra<sup>(8)</sup> ได้อาศัยวิธีการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังองค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณทั้งในกรณีที่ไม่มีการป้องกันไฟโดยมีหลักการดังนี้ พิจารณาระบบหรือปริมาตรควบคุมคือพื้นที่ส่วนของเหล็กที่มีความยาวหนึ่งหน่วยดังรูปที่ 2.1

ถ้าให้  $E_{in}$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ระบบ

$E_{out}$  = พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทออกจากระบบ = 0

$E_{st}$  = พลังงานความร้อนที่ระบบสะสมไว้ภายใน

ดังนั้น

$$E_{in} = hH_p(T_f - T_s) - c_p \rho_p A_p \frac{\Delta T_p}{\Delta t} \quad (2.10)$$

$$E_{st} = c_s \rho_s A_s \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$h$  = สป.ส.การถ่ายเทความร้อนรวม ,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$H_p$  = เส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อน , m

$A_p, A_s$  = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุกันไฟและเหล็ก ตามลำดับ ,  $m^2$

$c_p, c_s$  = ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุกันไฟและเหล็ก ตามลำดับ ,  $J/kg \cdot ^\circ C$

$\rho_p, \rho_s$  = ค่าความหนาแน่นของวัสดุกันไฟและเหล็ก ตามลำดับ ,  $\text{kg/m}^3$

$T_f, T_s, T_p$  = อุณหภูมิของไฟ เหล็ก และวัสดุกันไฟ ตามลำดับ ,  $^{\circ}\text{C}$

Malhotra มีสมมติฐานว่าอุณหภูมิของวัสดุกันไฟจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของไฟกับอุณหภูมิของเหล็ก ดังนี้

$$T_p = \frac{T_f + T_s}{2} \quad (2.12)$$

Malhotra กำหนดให้ใช้ค่า  $h$ ,  $H_p$  และ  $A_p$  ในสมการที่ 2.10 และ 2.11 ดังนี้

$$h = \frac{1}{\frac{1}{h_c + h_r} + \frac{d_p}{k_p}} \quad (2.13)$$

$$H_p = H_{ps} \quad (2.14)$$

$$A_p = H_{ps} d_p \quad (2.15)$$

เมื่อ

$d_p$  = ความหนาของวัสดุกันไฟ , m

$k_p$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟ ,  $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$

$H_{ps}$  = เส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนของเหล็ก , m

จากหลักการทรงพลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะได้ว่า

$$E_{in} = E_{out} + E_{st} \quad (2.16)$$

$$hH_p(T_f - T_s) - c_p \rho_p A_p \frac{\Delta T_p}{\Delta t} = 0 + c_s \rho_s A_s \frac{\Delta T_s}{\Delta t}$$

แทนค่า  $h$ ,  $H_p$ ,  $A_p$  และ  $T_p$  จากสมการที่ 2.12 ถึง 2.15 จะได้ดังนี้

$$hH_{ps}(T_f - T_s) - c_p \rho_p H_{ps} d_p \frac{\Delta T_f + \Delta T_s}{2\Delta t} = c_s \rho_s A_s \frac{\Delta T_s}{\Delta t}$$

$$c_s \rho_s A_s \frac{\Delta T_s}{\Delta t} + c_p \rho_p H_{ps} d_p \frac{\Delta T_s}{2\Delta t} = hH_{ps}(T_f - T_s) - c_p \rho_p H_{ps} d_p \frac{\Delta T_f}{2\Delta t}$$

$$\left( c_s \rho_s A_s + \frac{c_p \rho_p H_{ps} d_p}{2} \right) \frac{\Delta T_s}{\Delta t} = hH_{ps}(T_f - T_s) - c_p \rho_p H_{ps} d_p \frac{\Delta T_f}{2\Delta t}$$

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta t} = \frac{1}{\left(c_s \rho_s A_s + \frac{c_p \rho_p H_{ps} d_p}{2}\right)} h H_{ps} (T_f - T_s) - \frac{c_p \rho_p H_{ps} d_p}{\left(c_s \rho_s A_s + \frac{c_p \rho_p H_{ps} d_p}{2}\right)} \frac{\Delta T_f}{2 \Delta t}$$

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta t} = \frac{1}{c_s \rho_s A_s \left(1 + \frac{c_p \rho_p H_{ps} d_p}{2 c_s \rho_s A_s}\right)} h H_{ps} (T_f - T_s) - \frac{1}{\left(\frac{2 c_s \rho_s A_s}{c_p \rho_p H_{ps} d_p} + 1\right)} \frac{\Delta T_f}{\Delta t}$$

ถ้ากำหนดให้

$$\phi = \frac{c_p \rho_p H_{ps} d_p}{c_s \rho_s A_s} = \left(\frac{c_p \rho_p}{c_s \rho_s}\right) d_p \left(\frac{H_{ps}}{A_s}\right) \quad (2.17)$$

เมื่อ  $\phi$  หมายถึง สัดส่วนปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ได้ของวัสดุกันไฟเทียบกับเหล็ก

ดังนั้นจะได้

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta t} = \frac{1}{c_s \rho_s A_s \left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} h H_{ps} (T_f - T_s) - \frac{1}{\left(\frac{2}{\phi} + 1\right)} \frac{\Delta T_f}{\Delta t}$$

หรือ

$$\Delta T_s = \frac{h}{c_s \rho_s} \frac{H_{ps}}{A_s} \frac{1}{\left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} (T_f - T_s) \Delta t - \frac{1}{\left(\frac{2}{\phi} + 1\right)} \Delta T_f$$

$$\Delta T_s = \frac{1}{\frac{1}{h_c + h_r} + \frac{d_p}{k_p}} \frac{1}{c_s \rho_s} \frac{H_{ps}}{A_s} \frac{1}{\left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} (T_f - T_s) \Delta t - \frac{1}{\left(\frac{2}{\phi} + 1\right)} \Delta T_f \quad (2.18)$$

สมการที่ 2.18 เป็นสมการควบคุมที่ใช้ในการคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณในกรณีที่มีการป้องกันไฟ โดยทั่วไปเทอม  $\frac{1}{h_c + h_r}$  จะมีค่าน้อยกว่าเทอม  $\frac{d_p}{k_p}$  มากดังนั้นอาจตัดทิ้งได้ และสมการจะที่ 2.18 จะเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{c_s \rho_s d_p} \frac{H_{ps}}{A_s} \frac{1}{\left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} (T_f - T_s) \Delta t - \frac{1}{\left(\frac{2}{\phi} + 1\right)} \Delta T_f \quad (2.19)$$

ในกรณีขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มี การป้องกันไฟเทอมที่สองทางขวามือของสมการที่ 2.18 จะหายไป และค่า  $d_p$  และ  $\phi$  จะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในกรณีนี้สมการควบคุมจะเป็นดังนี้

$$\Delta T_s = \frac{h_c + h_r}{c_s \rho_s} \frac{H_{ps}}{A_s} (T_f - T_s) \Delta t \quad (2.20)$$

จากการพิจารณาสมการที่ 2.19 และ 2.20 สามารถสรุปได้ว่า ในกรณีที่ความหนาของวัสดุกันไฟเท่ากันหรือมีค่าเป็นศูนย์ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน  $H_{ps}/A_s$  ซึ่งมีค่าเท่ากับความยาวเส้นรอบรูปเหล็กส่วนที่สัมผัสความร้อนต่อค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก หรือเรียกว่า ค่าองค์ประกอบหน้าตัด (Section Factor) เท่านั้นไม่ว่าเหล็กจะมีขนาดหรือรูปร่างอย่างไร โดยเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเหล็กที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูงกว่าจะมีความสามารถทนไฟต่ำกว่าเสมอ

## 2.3 คุณสมบัติของเหล็กที่อุณหภูมิสูง

คุณสมบัติของเหล็กที่อุณหภูมิสูงที่ควรทราบประกอบด้วยคุณสมบัติทางความร้อนและคุณสมบัติเชิงกลซึ่งคุณสมบัติต่างๆดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงไปได้จากค่าที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 2.3.1 คุณสมบัติทางความร้อน

#### 2.3.1.1 ความหนาแน่น (Density, $\rho$ )

ความหนาแน่นของเหล็กที่อุณหภูมิสูงจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจากค่าที่อุณหภูมิปกติและมีค่าเท่ากับ 7.85 ตัน/ม<sup>3</sup>

#### 2.3.1.2 ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific Heat, $c$ )

ค่าความร้อนจำเพาะ หมายถึงอัตราความร้อนที่วัตถุเก็บสะสมไว้ได้ Malhotra<sup>(8)</sup> ได้เสนอว่าค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก,  $c_s$  (J/kg°C) จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิต่างๆ ดังนี้

$$c_s = 475 + 6.01 \times 10^{-4} T_s^2 + 9.46 \times 10^{-2} T_s \quad (2.21)$$

Malhotra ใช้สมการที่ 2.21 และข้อมูลที่ได้จากการทดสอบของ Pettersson, Magnusson และ Thor<sup>(9)</sup> และ Stirling<sup>(10)</sup> เขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.2 จากกราฟจะพบว่ามีความไม่ต่อเนื่องของค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กที่อุณหภูมิประมาณ 750 °C ดังนั้นสมการที่ 2.21 จึงใช้ได้จนถึงที่อุณหภูมินี้เท่านั้น

### 2.3.1.3 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, $k$ )

ค่าการนำความร้อนเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการส่งผ่านความร้อนจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งภายในวัสดุ จากการทดลองของ Pettersson, Magnusson และ Thor<sup>(9)</sup> และ Malhotra<sup>(8)</sup> พบว่าค่าการนำความร้อนของเหล็กจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นตามรูปที่ 2.3

ENV 1993-1-2 ได้ให้สมการที่ใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของเหล็ก,  $k_s$  (W/m°C) ไว้ดังนี้

$$\left. \begin{array}{l} \text{เมื่อ } T_s \leq 800^\circ\text{C} , \\ \text{เมื่อ } T_s \geq 800^\circ\text{C} , \end{array} \right\} \begin{array}{l} k_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_s \\ k_s = 27.3 \end{array} \quad (2.22)$$

### 2.3.2 คุณสมบัติเชิงกล

#### 2.3.2.1 กำลังและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น (Strength and Elastic Modulus)

Harmathy และ Stanzak<sup>(11)</sup> ได้ทำการทดลองหาค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กโครงสร้างเกรด A36 ที่อุณหภูมิต่างๆ และได้ผลการทดลองตามรูปที่ 2.4 จากรูปจะพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงแรกๆ ประมาณ 300°C ค่ากำลังรับแรงดึงของเหล็กจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น จุดครากและจุดพิกกัดสัดส่วนจะไม่ปรากฏอย่างชัดเจนเหมือนช่วงอุณหภูมิปกติดังนั้นค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณได้ในช่วงนี้จะเป็นค่าเซแคนท์โมดูลัส รูปที่ 2.5 แสดงปริมาณการลดลงของค่ากำลังรับแรงดึงครากและค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

#### 2.3.2.2 การขยายตัวตามอุณหภูมิ (Thermal Expansion)

รูปที่ 2.6 แสดงการขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ จากการทดลองของ Anderberg<sup>(12)</sup> จากรูปจะสังเกตว่าปริมาณการขยายตัวของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆจะขึ้นกับชนิดของเหล็กน้อยมาก Anderberg ได้ให้สมการที่ใช้ในการคำนวณหน่วยการยืดหดตัวเนื่องจากอุณหภูมิของเหล็ก,  $\varepsilon_{th,s}$  (m/m) ไว้ดังนี้

$$\varepsilon_{th,s} = 0.4 \times 10^{-8} T_s^2 + 1.2 \times 10^{-5} T_s - 3 \times 10^{-4} \quad (2.23)$$

### 2.3.2.3 การคืบตัวตามอุณหภูมิ (Thermal Creep)

รูปที่ 2.7 แสดงปริมาณการการคืบตัวของเหล็กตามอุณหภูมิจากการทดลองของ Anderberg<sup>(13)</sup> จากรูปจะพบว่าปริมาณการคืบตัวจะมีค่าน้อยมากในขณะที่ค่าอุณหภูมิของเหล็กยังไม่ถึง 450°C แต่เมื่อเลยจากอุณหภูมินี้ไป จะเกิดการคืบตัวในอัตราที่สูงมาก

## 2.4 ประเภทของวัสดุกันไฟ

วัสดุกันไฟที่ใช้ในการป้องกันไฟให้กัของอาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณสามารถแบ่งออกได้เป็นสองระบบตามกลไกการทำงานของวัสดุกันไฟดังนี้

### 2.4.1 วัสดุกันไฟระบบแพสซีฟ (Passive Fire Protection Materials)

หมายถึงวัสดุกันไฟที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเมื่อสัมผัสความร้อน กลไกการป้องกันไฟมาจากคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟชนิดนั้นๆ และยักรวมถึงวัสดุกันไฟชนิดที่ใช้กลไกของน้ำในการทำให้เกิดการเย็นตัวแก่โครงสร้าง วัสดุกันไฟประเภทนี้ ได้แก่ วัสดุพ่นกันไฟประเภทซีเมนต์เชียส แผ่นยิปซัมชนิดกันไฟ และแผ่นใยหินกันความร้อน เป็นต้น

### 2.4.2 วัสดุกันไฟระบบรีแอคทีฟ (Reactive Fire Protection Materials)

หมายถึงวัสดุกันไฟที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและทางเคมีเมื่อสัมผัสความร้อน กลไกการป้องกันไฟมาจากคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟชนิดนั้นๆ และกลไกการเย็นตัวของวัสดุ วัสดุกันไฟประเภทนี้ได้แก่ สึกันไฟหรืออินทูเมสเซนซ์ (Intumescent)

## 2.5 วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชียสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม

วัสดุกันไฟระบบแพสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชียสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม วัสดุกันไฟประเภทนี้ประกอบด้วยองค์ประกอบสามส่วนด้วยกันกล่าวคือ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน
- 2) มวลรวม ซึ่งในที่นี้ได้แก่ แร่เพอร์ไลต์ มีคุณสมบัติในการเป็นฉนวนกันความร้อน ได้ดีกว่ามวลรวมที่ใช้ในงานก่อสร้างชนิดต่างๆ ไป เช่น ทรายหรือหิน เป็นต้น อีกทั้งยังมีค่าความถ่วงจำเพาะต่ำมากจึงไม่เป็นการเพิ่มน้ำหนักบรรทุกที่มากเกินไปให้แก่โครงสร้าง และ

- 3) สารผสมเพิ่ม ซึ่งทำหน้าที่ปรับปรุงคุณสมบัติด้านอื่นๆ ให้แก่วัสดุผสมที่ได้จากสองส่วนแรก ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติการยึดเกาะกับผิวเหล็ก คุณสมบัติด้านการไหล และการลดการแตกร้าวของวัสดุกันไฟ เป็นต้น

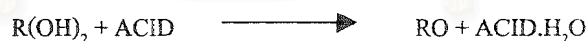
วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีมีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นผลิตภัณฑ์ของห้างหุ้นส่วนจำกัด ดี.พี.ดี.โอโรท์ โค้ท ซึ่งมีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมโดยประมาณ 100 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักของซีเมนต์พอร์ตแลนด์ และ น้ำโดยประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักส่วนผสมแห้ง คุณสมบัติต่างๆของวัสดุกันไฟชนิดนี้จะได้กล่าวถึงในลำดับถัดไป

## 2.6 วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ

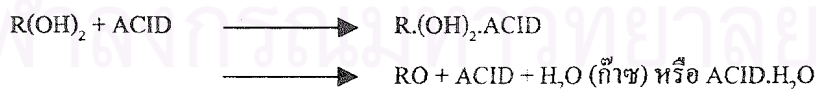
วัสดุกันไฟระบบรีแอคทีฟที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้แก่วัสดุสีกันไฟ สีกันไฟเมื่อได้รับความร้อนจากเปลวไฟจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจะเป็นก๊าซและโฟมที่เป็นฉนวนความร้อน โดยโครงสร้างของโฟมที่เกิดขึ้นจะมีโครงอากาศอยู่ภายใน(Cellular Foam) ซึ่งเป็นผลจากการขยายตัว ลักษณะของโครงสร้างดังกล่าวทำให้โฟมมีคุณสมบัติในการยึดเกาะผิวองค์อาคารที่ดี

สารประกอบภายในโฟมจะมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งก่อตัวขึ้นในกระบวนการไฮเดรชันของสารจำพวกโพลีไฮดริก(Polyhydric Substance) เช่น โพลีอัลกอฮอล์(Polyalcohol หรือ Polyol) โดยสารจำพวกโพลีไฮดริกจะพบได้ในกระบวนการ Dehydration Reaction ของกรด ซึ่งกรดดังกล่าวก่อตัวจากการสลายตัวตามกระบวนการทางเคมีภายในสีทนไฟ ซึ่งมี 2 กระบวนการ คือ

กระบวนการที่1 (Simple Dehydration) :



กระบวนการที่2 :



ทั้งสองกระบวนการแตกต่างกันในเชิงทฤษฎี กระบวนการแรกเกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นสัมผัสกับตัวกระทำ (Reagents)ซึ่งต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามาก ดังนั้นกระบวนการที่พบมักเป็นกระบวนการที่สองซึ่งมีโอกาสดังกล่าวได้มากกว่า

กรดที่พบในกระบวนการทั้งสองเป็นกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid) กรดดังกล่าวจะแยกสลายเป็นเกลือหรือเอสเตอร์ (Ester) เมื่อได้รับพลังงานความร้อน ในบางครั้งจะพบว่ากรดฟอสฟอริกจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเนื่องจากในปฏิกิริยาทางเคมีจะมีกรดเกิดขึ้นซ้ำ ๆ และเพียงพอสำหรับการเข้าสู่ปฏิกิริยาในรอบต่อไป เนื่องจากกรดที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ นี้ไม่ได้ผสมกับส่วนผสมเดิมอย่างทั่วถึง จึงจำเป็นต้องนำกรดจากภายนอกมาเติมเพื่อให้เกิดการก่อตัวของโพลีเมอร์ภายใต้สภาวะออคซิเจนเพื่อให้เป็นเนื้อเดียวกัน

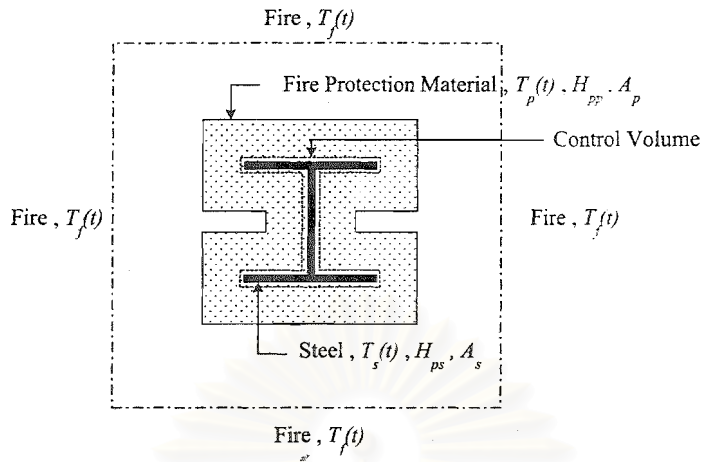
สารเคมีที่ทำให้โพลีเมอร์ที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีของสียทนไฟเกิดการขยายตัว เรียกว่า โบลว้อจ เอเจนต์ (Blowing Agents) สารเคมีดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สลายตัวภายในอุณหภูมิที่ค่อนข้างแน่นอน โดยทั่วไปจะสลายตัวให้ก๊าซและของแข็งเมื่อได้รับพลังงานความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งก๊าซที่ปล่อยออกมาจะเกิดขึ้นก่อนการก่อตัวของโพลีเมอร์ และปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องในระยะเวลาพอสมควร เป็นผลให้อุณหภูมิที่ผิวของโพลีเมอร์ลดลง

ความคงทนของโพลีเมอร์ขึ้นกับสารเคมียึดเหนี่ยว (Binder Agent) เช่น อะมิโนพลาสติก (Amino Plast) โดยปกติสารยึดเหนี่ยวจะเป็นสารประกอบยูเรีย (Urea) หรือ เมลามีน ฟอร์มัลดีไฮด์ เรซิน (Melamine-formaldehyde resins) ซึ่งจะช่วยให้ได้โพลีเมอร์เนื้อแข็งที่มีลักษณะเป็นโพร่งภายใน

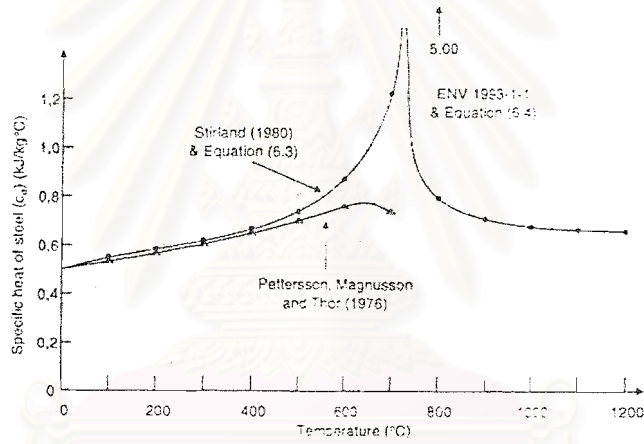
การผลิตสียทนไฟมีสูตรเฉพาะแตกต่างกันไป โดยส่วนประกอบหลัก ได้แก่ โบลว้อจ เอเจนต์ และ ไฮเดรตติ้ง เอเจนต์ (Hydrating Agent) การหาสูตรผลิตสียทนไฟเป็นเรื่องยุ่งยาก เนื่องจากต้องให้สามารถต้านทานการเพิ่มอุณหภูมิจากความร้อนของเปลวไฟ และต้องทนทานต่อสภาพแวดล้อม

สียทนไฟที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท เมททีเรียล ซัพพลาย อินเตอร์เนชันแนล จำกัด ซึ่งเป็นสียทนไฟรุ่น FIRENOX FX-901 จากการทดสอบพบว่าสียทนไฟชนิดนี้จะเริ่มทำปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 200 องศาเซลเซียสและจะพองตัวเกิดเป็นโพลีเมอร์ของคาร์บอนเป็นชั้นๆ โดยเริ่มจากชั้นนอกสุดก่อนจนถึงชั้นในสุด ก่อนที่จะทำการทาสียทนไฟชนิดนี้จะต้องมีการเตรียมผิวเหล็กก่อนด้วยการขัดผิวด้วยทรายเพื่อขจัดสนิมและคราบน้ำมันที่ติดอยู่บนผิวเหล็กซึ่งจะทำให้การยึดเกาะของสียทนไฟกับผิวเหล็กไม่ดีเท่าที่ควร หลังจากนั้นจึงทาสีรองพื้นรุ่น FIRENOX AP80 ที่ความหนาประมาณ 50 ถึง 100 ไมครอน หลังจากทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 8 ชั่วโมงที่อุณหภูมิปกติและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์จึงเริ่มทำการทาสียทนไฟโดยการทาเป็นชั้นๆ ประมาณชั้นละ 150 ถึง 200 ไมครอนแล้วทิ้งไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงก่อนที่จะทาสีชั้นต่อไป

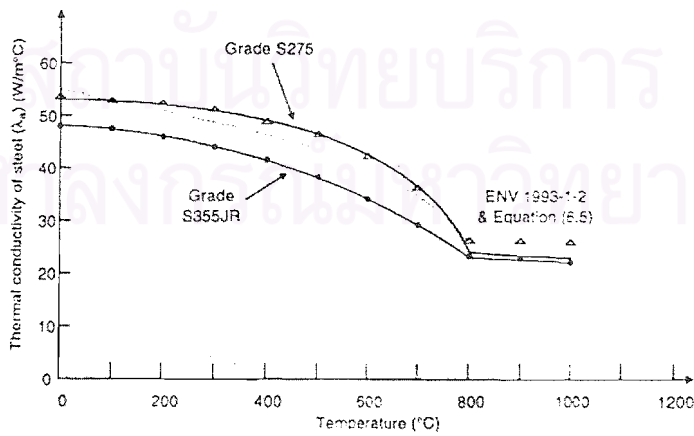




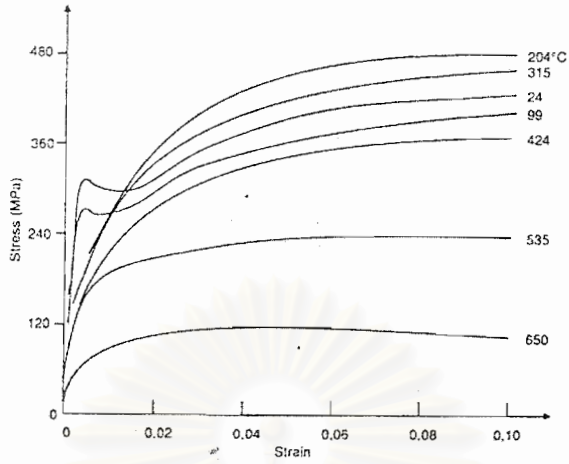
รูปที่ 2.1 ระบบหรือปริมาตรควบคุมสำหรับวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์



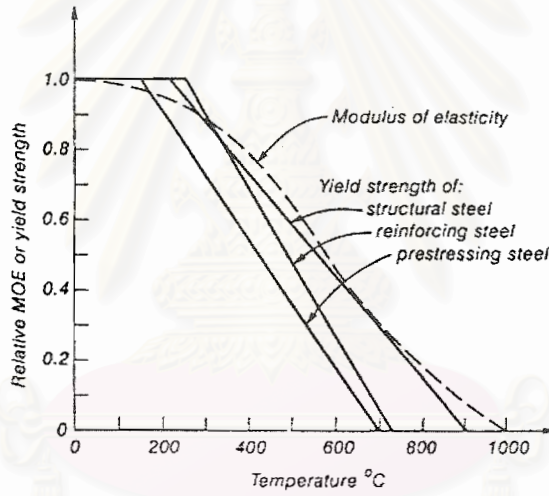
รูปที่ 2.2 ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ



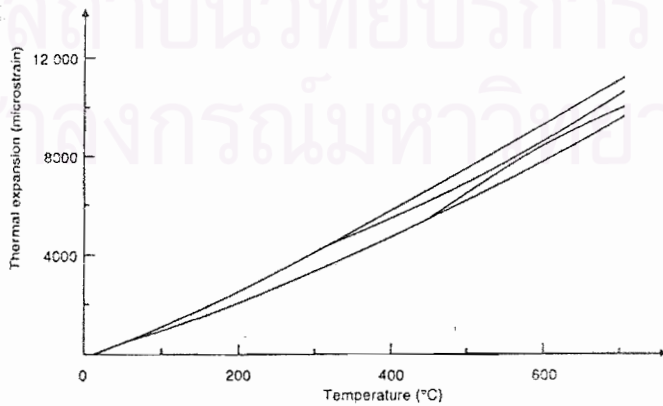
รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อนของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ



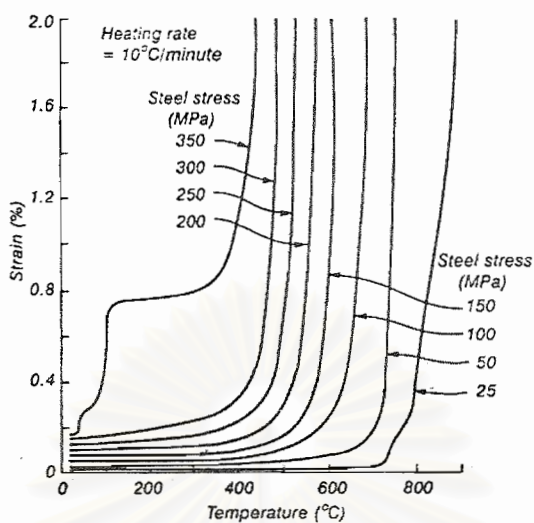
รูปที่ 2.4 แผนภาพหน่วยแรง-หน่วยการยืดหดตัวของเหล็กเกรด A36 ที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.5 การลดลงของกำลังรับแรงของเหล็กที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.6 การขยายตามอุณหภูมิของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 2.7 อัตราการคืบตัวของเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ความรุนแรงของไฟ

#### 3.1 ทัวไป

มาตรฐานการทดสอบการทนไฟของวัสดุและองค์อาคารที่เป็นสากลโดยทั่วไปจะกำหนดให้การทดสอบการทนไฟใดๆจะต้องควบคุมความรุนแรงของไฟในรูปของอุณหภูมิของไฟที่ให้แก่ตัวอย่างทดสอบให้เป็นไปตามที่กำหนด ความรุนแรงของไฟนี้เปรียบได้กับน้ำหนักบรรทุกอย่างหนึ่งให้แก่โครงสร้าง กราฟไฟมาตรฐานสำหรับมาตรฐานการทดสอบการทนไฟต่างๆได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 จากรูปจะพบว่ากราฟไฟมาตรฐานดังกล่าวไม่ว่าจะเป็น ASTM E119 , BS476 หรือ ISO 834 จะมีความคล้ายคลึงกันมาก กราฟไฟดังกล่าวถูกกำหนดให้ใช้กับการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารในทุกสภาวะโดยไม่คำนึงถึงว่าองค์อาคารนั้นๆอยู่ในสภาพใดมีโอกาสจะเผชิญกับความรุนแรงของไฟมากน้อยแค่ไหน แต่ในสภาพเป็นจริงแล้วความรุนแรงของไฟอาจจะแตกต่างไปจากที่มาตรฐานกำหนดได้ทั้งในกรณีที่รุนแรงน้อยกว่าหรือมากกว่าทั้งนี้วัดจากระยะเวลาที่โครงสร้างสามารถต้านทานไฟได้ ความรุนแรงของไฟขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน กล่าวคือ ส่วนประกอบของโครงสร้าง ตำแหน่ง ช่องเปิดภายในอาคาร เชื้อเพลิง ตลอดจนปริมาณอากาศ ยกตัวอย่างเช่น โครงสร้างที่อยู่ภายในตัวอาคารหรือห้องเดี่ยวๆจะมีโอกาสเผชิญกับความรุนแรงของไฟได้มากกว่าโครงสร้างหรือองค์อาคารที่อยู่ในห้องโล่งกว้าง ดังนั้นการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารจึงควรคำนึงถึงผลของความรุนแรงของไฟที่ต่างกันนี้ด้วยเพราะอาจทำให้ความต้องการการป้องกันไฟลดปริมาณลงได้ แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ไม่มีข้อมูลที่ชัดเจนการทดสอบการทนไฟโดยใช้กราฟไฟมาตรฐานดังกล่าวจะให้ผลการทดสอบที่ค่อนข้างปลอดภัย

วัตถุประสงค์หนึ่งของงานวิจัยในครั้งนี้คือต้องการหาความสัมพันธ์ของความรุนแรงของไฟจากกราฟไฟที่ต่างกันที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้าง ทั้งนี้เพื่อใช้ในการประเมินค่าความสามารถทนไฟที่แท้จริงขององค์อาคารจากค่าความสามารถทนไฟที่ได้จากการทดสอบการทนไฟด้วยมาตรฐานการทดสอบต่างๆ เช่น มาตรฐาน ASTM E119 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 48 กำหนดให้ใช้ในการทดสอบการทนไฟ และยังเป็นประโยชน์ในการพิจารณาปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของข้อมูลการทดสอบการทนไฟอื่นเนื่องจากการไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิไฟให้เป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดได้

#### 3.2 ความรุนแรงของไฟ

ความรุนแรงของไฟ หมายถึง ความสามารถในการทำลายของไฟต่อโครงสร้างซึ่งมักจะพิจารณาในรูปของระยะเวลาที่โครงสร้างสามารถต้านทานต่อไฟได้ Ingberg<sup>(14)</sup> เป็นบุคคลแรกที่ได้เสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรง

ไฟโดยอาศัยข้อมูลการทดสอบการทนไฟที่ผ่านมา และเสนอว่า ความรุนแรงไฟจะเท่ากันเมื่อพื้นที่ได้กราฟไฟเหนือเส้นฐานที่อุณหภูมิอ้างอิงค่าหนึ่งมีค่าเท่ากัน รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ได้กราฟไฟตามทฤษฎีของ Ingberg แต่เนื่องจากข้อเสนอนี้ยังขาดเหตุผลทางทฤษฎีมาอธิบายว่าพื้นที่ได้กราฟไฟมีความหมายทางทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนอย่างไรอีกทั้งเส้นอุณหภูมิอ้างอิงดังกล่าวก็ไม่มีค่านอนจึงทำให้ไม่เป็นที่ยอมรับ แต่อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ถือเป็นพื้นฐานที่มาตรฐาน ASTM E119 ใช้ในการพิจารณาปรับแก้ข้อมูลการทดสอบการทนไฟที่คลาดเคลื่อนไปเนื่องจากการไม่สามารถควบคุมให้อุณหภูมิไฟเป็นไปตามที่มาตรฐานกำหนดได้

ในกรณีขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณอาจพิจารณาความสัมพันธ์ของพื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิไฟกับเวลากับความรุนแรงของไฟที่เท่ากันได้โดยอาศัยสมการที่ 2.19 ดังนี้

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{k_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{H_{ps}}{A_s} \frac{(T_f - T_s)}{\left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} - \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\phi}\right)} \frac{dT_f}{dt} \quad (2.19)$$

โดยทั่วไปเทอมที่สองทางขวามือของสมการที่ 2.15 จะมีค่าน้อยกว่าเทอมแรกมากสามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้น

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{k_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{H_{ps}}{A_s} \frac{(T_f - T_s)}{\left(1 + \frac{\phi}{2}\right)} \quad (3.1)$$

ถ้าสมมติให้คุณสมบัติต่างๆของวัสดุมีค่าคงที่ดังนั้นจะสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{dT_s}{dt} = F(T_f - T_s) \quad (3.2)$$

เมื่อ

$$F = \frac{k_p}{d_p c_s \rho_s} \frac{H_{ps}}{A_s} \frac{1}{\left(1 + \frac{\phi}{2}\right)}$$

อินทิเกรตสมการที่ 3.1 เทียบกับเวลาได้ผลดังนี้

$$\int_0^t \frac{dT_s}{dt} dt = \int_0^t F(T_f - T_s) dt$$

$$T_s(t) - T_{s,0} = F \int_0^t T_f dt - F \int_0^t T_s dt$$

ดังนั้น

$$T_s(t) = T_{s,0} + F \cdot AT_f(t) - F \cdot AT_s(t) \quad (3.3)$$

เมื่อ

$AT_f$  = พื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของไฟกับเวลา

$AT_s$  = พื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของเหล็กกับเวลา

$T_{s0}$  = อุณหภูมิเริ่มต้นของเหล็ก

สำหรับตัวอย่างทดสอบเดียวกันใดๆเมื่อนำมาทดสอบการทนไฟด้วยกราฟไฟที่ต่างกันจะได้ว่าความรุนแรงของไฟจะเท่ากันเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่เหล็กมีค่าเท่ากัน ดังนี้

$$T_{s1}(t_1) = T_{s2}(t_2)$$

$$T_{s0} + F \cdot AT_{f1}(t_1) - F \cdot AT_{s1}(t_1) = T_{s0} + F \cdot AT_{f2}(t_2) - F \cdot AT_{s2}(t_2)$$

ดังนั้น 
$$AT_{f1}(t_1) - AT_{s1}(t_1) = AT_{f2}(t_2) - AT_{s2}(t_2) \quad (3.4)$$

หรือ 
$$AT_{f2}(t_2) = AT_{f1}(t_1) + (AT_{s2}(t_2) - AT_{s1}(t_1)) \quad (3.5)$$

นั่นคือ ความรุนแรงไฟจะมีค่าเท่ากันเมื่อผลต่างของพื้นที่ของกราฟอุณหภูมิไฟ-เวลากับกราฟอุณหภูมิขึ้นงาน-เวลามีค่าเท่ากัน อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ดังกล่าวอาจมีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุโดยทั่วไปจะไม่เป็นค่าคงที่ตามที่สมมติอีกทั้งที่มาของสมการที่ 2.19 มาจากการตั้งสมมติฐานต่าง ๆ มากมายซึ่งอาจไม่เป็นจริง แต่จากการพิจารณาดังกล่าวทำให้พอจะสรุปได้ว่า พื้นที่ใต้กราฟไฟมีความสัมพันธ์กับความรุนแรงจริงอย่างที่ Ingberg ได้เสนอไว้แต่พื้นที่ใต้กราฟไฟที่เท่ากันอาจไม่ได้หมายถึงความรุนแรงของไฟที่เท่ากัน

ผลที่ได้จากสมการที่ 3.4 และ 3.5 ยังไม่สามารถตอบคำถามที่ว่าถ้ามีผลการทดสอบการทนไฟโดยใช้กราฟไฟอย่างหนึ่งแล้วจะสามารถแปลงเป็นค่าความสามารถทนไฟที่ได้จากกราฟไฟที่แตกต่างกันได้อย่างไรเนื่องจากในกรณีที่ทราบค่า  $AT_{f1}(t_1)$  และ  $AT_{s1}(t_1)$  จากการทดสอบจริงแล้วดังนั้นเราต้องการหาค่า  $AT_{f2}(t_2)$  หรือ  $AT_{s2}(t_2)$  อย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ปรากฏว่าค่า  $AT_{f2}(t_2)$  และ  $AT_{s2}(t_2)$  จะปรากฏพร้อมกันในสมการที่ 3.5 ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวหาสิ่งที่ต้องการได้

งานวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้กราฟไฟที่ต่างกันที่ทำให้เกิดความรุนแรงไฟที่เท่ากัน โดยกำหนดให้ความรุนแรงของไฟจะเท่ากันเมื่ออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่โครงสร้างมีค่าเท่ากัน การศึกษาจะใช้วิธีวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟภายใต้กราฟไฟที่มีลักษณะแตกต่างกัน 5 แบบ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟไฟที่ได้จากกราฟไฟแต่ละแบบดังกล่าว โดยควบคุมตัวแปรอย่างอื่นได้แก่รูปทรงทางเรขาคณิตและคุณสมบัติของวัสดุให้เหมือนกันทุกประการ การวิเคราะห์ผลจะใช้การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติโดยการใช้โปรแกรมไฟไนติเม้นท์ ทั้งนี้เพราะสามารถจำลองแบบให้ตัวอย่างทดสอบมีความเหมือนกันได้ทุกอย่างดังกล่าว

### 3.3 การวิเคราะห์ความรุนแรงของไฟ

#### 3.3.1 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างทดสอบ 2 ตัวอย่างที่เป็นองค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีหน้าตัดเป็นเหล็ก วัตต์แพลนจ์และมีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอส คังนี่คือ

ตัวอย่างที่	สัญลักษณ์	ขนาดเหล็ก	ความหนาของวัสดุกันไฟ (มม.)
1	SP1	W 150 x 14.0	20
2	SP2	W 175 x 40.2	20

ในที่นี้จะใช้สัญลักษณ์ SP1 และ SP2 แทนตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทั้งตัวอย่างที่ 1 และ 2 จะสมมติให้มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟชนิดเดียวกันและสมมติให้มีค่าคุณสมบัติทางความร้อนเช่นเดียวกับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ กล่าวคือ ค่าความหนาแน่น  $890.5 \text{ kg/m}^3$  ค่าความร้อนจำเพาะ  $970.5 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  และค่าการนำความร้อนจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิตามสมการที่ 5.1

#### 3.3.2 กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ความรุนแรงของไฟจะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบด้วยกราฟไฟที่แตกต่างกัน 5 แบบด้วยกันกล่าวคือ

กราฟไฟที่	สัญลักษณ์	รายละเอียด
1	F1	เหมือนกับกราฟไฟของมาตรฐาน ASTM E119
2	F2	สูงกว่ากราฟไฟของมาตรฐาน ASTM E119 อยู่ 150 องศาเซลเซียส
3	F3	ต่ำกว่ากราฟไฟของมาตรฐาน ASTM E119 อยู่ 150 องศาเซลเซียส
4	F4	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงแรกช้ากว่ากราฟไฟแบบอื่นๆทั้งหมด แต่อุณหภูมิสูงสุดจะสูงกว่า F1 และ F2
5	F5	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงแรกและค่าอุณหภูมิสูงสุดจะสูงกว่ากราฟไฟแบบอื่นๆทั้งหมดแต่หลังจากนั้นอุณหภูมิจะลดลงอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 3.3 แสดงกราฟอุณหภูมิไฟกับเวลาหรือกราฟไฟแบบต่างๆที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.3.2 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

ทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากไฟไปยังตัวอย่างทดสอบโดยใช้กราฟไฟแบบต่างๆดังที่ได้กล่าวมาแล้วโดยใช้โปรแกรมไฟในอิลิเมนทีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติโดยกำหนดให้ตัวแปรทางด้านกายภาพและและการแผ่รังสีความร้อนเป็นดังนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $25 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  ค่าการเปล่งรังสีความร้อน 0.56 ค่าองค์ประกอบรูปร่าง 1.00 และค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนเป็นไปตามสมการที่ 2.5 และได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 สำหรับตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 ตามลำดับ

### 3.4 ผลการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.1 และ 3.2 แสดงผลการคำนวณระยะเวลาทนไฟ อุณหภูมิไฟ พื้นที่ได้กราฟไฟและพื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างสองค่าคือ 538 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับรูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ได้กราฟไฟกับผลต่างของพื้นที่ได้กราฟไฟกับพื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิตัวอย่างทดสอบกับเวลาสำหรับตัวอย่างทดสอบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.6 จะพบว่าผลต่างของพื้นที่ได้กราฟไฟกับพื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบกับเวลาสำหรับกราฟไฟแบบต่างๆจะมีค่าไม่เท่ากันแต่จะเพิ่มขึ้นตามค่าพื้นที่ได้กราฟไฟที่เพิ่มขึ้นซึ่งไม่เป็นไปตามสมการที่ 3.4 ที่ค่าดังกล่าวจะต้องคงที่ ทั้งนี้เป็นเพราะค่าคงที่ของวัสดุและการถ่ายเทความร้อนหลายอย่างไม่คงที่แต่มีค่าเปลี่ยนแปลงไปได้ตามค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปดังนั้นจึงผิดกับสมมติฐานที่ได้ตั้งไว้

จากตารางที่ 3.1 จะพบว่าสำหรับตัวอย่างเดียวกันและที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติเดียวกันค่าพื้นที่ได้กราฟไฟสำหรับกราฟไฟแต่ละแบบจะมีค่าไม่เท่ากัน จากการสังเกตจะพบว่ากราฟไฟที่ทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบถึงค่าอุณหภูมิวิกฤติก่อนจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สูงกว่ากราฟไฟแบบอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น สำหรับตัวอย่างทดสอบ SP1 ค่าระยะเวลาทนไฟที่อุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียสที่ได้จากกราฟไฟแบบต่างๆจะเรียงลำดับจากน้อยไปหามากดังนี้คือ F5 , F2 , F1 , F4 และ F3 ตามลำดับ เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนจากไฟเข้าไปยังตัวอย่างทดสอบจะมาจากสองส่วนด้วยกันคือ การพาความร้อน และ การแผ่รังสีความร้อน สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าคงที่แต่สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อนจะแปรเปลี่ยนตามค่าอุณหภูมิของไฟ ในช่วงแรกๆของไฟอัตราการพาความร้อนจะมีผลมากเนื่องจากอุณหภูมิของไฟยังต่ำอยู่แต่เมื่อเวลาผ่านไปสักระยะอัตราการแผ่รังสีความร้อนจะมีผลมากกว่าเนื่องจากอุณหภูมิของไฟมีค่ามากขึ้น ดังนั้นกราฟไฟที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าจะมีอัตราการแผ่รังสีความร้อนที่สูงกว่าด้วยซึ่งเป็นผลให้ตัวอย่างทดสอบหรือ โครงสร้างจริงใดๆจะได้รับอัตราพลังงานความร้อนที่สูงกว่า

เนื่องจากอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของไฟสำหรับกราฟไฟหนึ่งๆจะไม่คงที่แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามเวลาดังนั้นในที่นี้จะพิจารณาอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของไฟแบบเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับค่าอุณหภูมิของไฟในขณะ



อุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบถึงค่าอุณหภูมิวิกฤติหารด้วยระยะเวลาทนไฟ รูปที่ 3.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟที่ได้จากตารางที่ 3.1 กับค่าพื้นที่ได้กราฟไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 จากรูปจะพบว่าเมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยสูงขึ้นพื้นที่ได้กราฟไฟจะมีค่าลดลงซึ่งเป็นไปตามเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะอยู่ในลักษณะสมการไฮเพอร์โบล่าแบบมูมดาคังนี้

$$\left(\frac{T_f}{t_c}\right)^m (AT_f)^n = k(\text{const.}) \quad (3.6)$$

เมื่อ  $m, n$  และ  $k$  เป็นค่าคงที่ใดๆ

จากสมการที่ 3.6 ค่าคงที่  $k$  จะเท่ากันสำหรับตัวอย่างทดสอบเดียวกันไม่ว่ากราฟไฟจะต่างกันอย่างไรแต่จะมีค่าเปลี่ยนไปได้เมื่อเป็นตัวอย่างต่างชนิดกัน จุดประสงค์ในขณะนี้คือต้องการหาค่าคงที่  $m$  และ  $n$  สำหรับแต่ละตัวอย่างทดสอบที่ทำให้สมการดังกล่าวเป็นจริง เนื่องจากสมการดังกล่าวอยู่ในรูปของสมการไม่เชิงเส้นดังนั้นจะทำการแปลงให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น โดยการใส่ลอการิทึมฐานสิบเข้าไปทั้งสองข้างของสมการดังนี้

$$m \log\left(\frac{T_f}{t_c}\right) + n \log(AT_f) = \log k \quad (3.7)$$

หรือ

$$\log(AT_f) = -\frac{m}{n} \log\left(\frac{T_f}{t_c}\right) + \frac{\log k}{n} \quad (3.8)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log(AT_f)$  และ  $\log(T_f/t_c)$  สำหรับตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 ได้ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นตรงสำหรับทุกตัวอย่างทดสอบซึ่งแสดงว่าความสัมพันธ์ในสมการที่ 3.6 สามารถแทนความสัมพันธ์ของค่าพื้นที่ได้กราฟไฟกับค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยได้อย่างถูกต้อง จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นของความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.8 และ 3.9 จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์และค่าอัตราส่วน  $m/n$  (ค่าลบของความชันของกราฟเส้นตรง) ดังนี้

ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ, °C	สมการความสัมพันธ์	$m/n$
SP1	538	$\log(AT_f) = -0.2973 \log\left(\frac{T_f}{t_c}\right) + 5.0165$	0.2973
	650	$\log(AT_f) = -0.4028 \log\left(\frac{T_f}{t_c}\right) + 5.2348$	0.4028
SP2	538	$\log(AT_f) = -0.3326 \log\left(\frac{T_f}{t_c}\right) + 5.1407$	0.3326
	650	$\log(AT_f) = -0.3929 \log\left(\frac{T_f}{t_c}\right) + 5.3041$	0.3929

สมการเส้นตรงแต่ละเส้นในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ก่อนข้างขนานกันทำให้ได้ค่าอัตราส่วน  $m/n$  ที่มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นในที่นี้จะใช้ค่า  $m/n$  เฉลี่ยค่าหนึ่งเพื่อเป็นตัวแทนของสมการเส้นตรงทั้งสี่เส้นดังนี้

$$(m/n)_{\text{เฉลี่ย}} = (0.2973 + 0.4028 + 0.3326 + 0.3929) / 4 = 0.3564$$

ถ้ากำหนดให้ค่า  $m$  ในสมการที่ 3.6 มีค่าเป็น 1 จะได้ค่า  $n$  มีค่าเป็นดังนี้

$$n = 1 / 0.3564 = 2.850$$

แทนค่า  $m$  และ  $n$  ลงในสมการที่ 3.6 ได้ดังนี้

$$\left(\frac{T_f}{t_c}\right)(AT_f)^{2.85} = k \quad (3.9)$$

หรือ

$$\left(\frac{T_{f1}}{t_{c1}}\right)(AT_{f1})^{2.85} = \left(\frac{T_{f2}}{t_{c2}}\right)(AT_{f2})^{2.85} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.9 และ 3.10 สรุปได้ว่าความรุนแรงของไฟจะเท่ากันเมื่อผลคูณของค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยกับค่ากำลัง 2.85 ของพื้นที่ได้กราฟไฟมีค่าเท่ากัน ในขั้นต่อไปจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของสมการที่ 3.9 หรือ 3.10 นี้ด้วยการทำนายค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 ภายใต้กราฟไฟ F2, F3, F4 และ F5 โดยใช้ผลการวิเคราะห์การทนไฟที่ได้จากกราฟไฟ F1 และเปรียบเทียบผลที่ได้กับในกรณีที่ทำนายค่าระยะเวลาทนไฟโดยคำนวณจากพื้นที่ได้กราฟไฟที่เท่ากันอย่างเดียว ตารางที่ 3.3 และ 3.4 จะแสดงผลการทำนายค่าระยะเวลาทนไฟที่อุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างที่ 538 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากตารางจะพบว่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบที่คำนวณโดยใช้สมการที่ 3.10 จะให้คำตอบที่มีความถูกต้องกว่าการใช้วิธีพื้นที่ได้กราฟไฟที่เท่ากันโดยมีความผิดพลาดสูงสุดที่ไม่เกิน 10%

### 3.5 สรุป

- 1 ความรุนแรงของไฟขึ้นกับปัจจัยหลายประการด้วยกัน กล่าวคือ ส่วนประกอบของโครงสร้าง ตำแหน่งช่องเปิดภายในอาคาร เชื้อเพลิง ตลอดจนปริมาณอากาศ
- 2 เมื่อพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิของไฟเพียงอย่างเดียว ความรุนแรงของไฟจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ได้กราฟไฟและอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ย
- 3 ความรุนแรงของไฟที่จะเท่ากันเมื่อผลคูณของค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยกับค่ากำลัง 2.85 ของพื้นที่ได้กราฟไฟมีค่าเท่ากัน กราฟไฟที่มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยสูงกว่าจะมีพื้นที่ได้กราฟไฟขณะที่โครงสร้างเกิดการวิบัติต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟที่สูงกว่าจะทำให้อัตราการแผ่รังสีความร้อนที่ผิวของโครงสร้างเกิดขึ้นได้มากกว่าด้วยนั่นคือ โครงสร้างจะรับพลังงานความร้อนที่มากกว่า

ตารางที่ 3.1 ผลการวิเคราะห์และคำนวณระยะเวลาทนไฟ อุณหภูมิไฟ พื้นที่ใต้กราฟไฟและพื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ		ระยะเวลาทนไฟ, $t_c$ (min)	$T_f$ (C)	$AT_f$ (C.min)	$AT_s$ (C.min)	$AT_f - AT_s$ (C.min)	$T_f / t_c$ (C/min)
SP1	F1	58.4	923	45,467	14,959	30,508	15.81
	F2	46.3	1,045	41,038	11,404	29,634	22.57
	F3	77.5	809	52,230	20,785	31,445	10.44
	F4	66.1	1,039	45,416	13,889	31,527	15.73
	F5	35.1	1,188	36,700	8,024	28,676	33.81
SP2	F1	72.5	951	58,699	19,168	39,532	13.11
	F2	57.6	1,072	52,977	14,756	38,222	18.61
	F3	95.8	836	67,223	26,256	40,966	8.73
	F4	77.1	1,083	57,128	16,800	40,328	14.05
	F5	44.7	1,082	47,535	11,096	36,439	24.24

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณระยะเวลาทนไฟ อุณหภูมิไฟ พื้นที่ใต้กราฟไฟและพื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบกับเวลาที่อุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ		ระยะเวลาทนไฟ, $t_c$ (min)	$T_f$ (C)	$AT_f$ (C.min)	$AT_s$ (C.min)	$AT_f - AT_s$ (C.min)	$T_f / t_c$ (C/min)
SP1	F1	75.7	956	61,706	25,276	36,429	12.63
	F2	58.5	1,074	53,997	18,703	35,295	18.34
	F3	104.2	845	74,362	36,760	37,603	8.11
	F4	78.4	1,086	58,523	21,231	37,291	13.86
	F5	44.5	1,084	47,348	13,623	33,725	24.38
SP2	F1	94.7	985	80,168	32,414	47,754	10.40
	F2	73.7	1,103	70,517	24,382	46,135	14.96
	F3	129.4	867	95,923	46,388	49,535	6.70
	F4	92.8	1,120	74,431	26,167	48,264	12.07
	F5	64.1	851	66,286	22,853	43,432	13.27

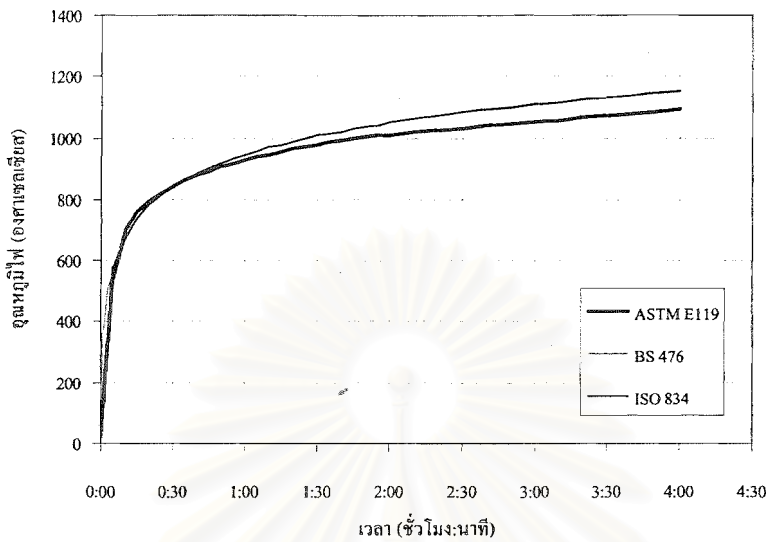
ตารางที่ 3.3 ผลการทำนายค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 โดยใช้สมการที่ 3.10 เปรียบเทียบกับผลการทำนายโดยวิธี Equal Area เมื่อใช้ผลการวิเคราะห์การทนไฟที่ได้จากกราฟไฟ F1 และเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ		ระยะเวลาทนไฟจริง (นาที)	ระยะเวลาทนไฟที่คำนวณได้ (นาที)		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	
			จากสมการที่ 3.10	วิธี Equal Area	จากสมการที่ 3.10	วิธี Equal Area
SP1	F1	58.4	58.3	58.4	-0.1	0.0
	F2	46.3	45.1	50.5	-2.5	9.1
	F3	77.5	78.1	69.1	0.7	-10.9
	F4	66.1	66.1	66.1	0.1	0.1
	F5	35.1	32.6	42.8	-7.1	21.8
SP2	F1	72.5	72.5	72.5	-0.1	0.0
	F2	57.6	56.2	62.9	-2.4	9.2
	F3	95.8	96.5	85.5	0.8	-10.7
	F4	77.1	77.2	78.5	0.1	1.9
	F5	44.7	44.2	55.7	-0.9	24.7

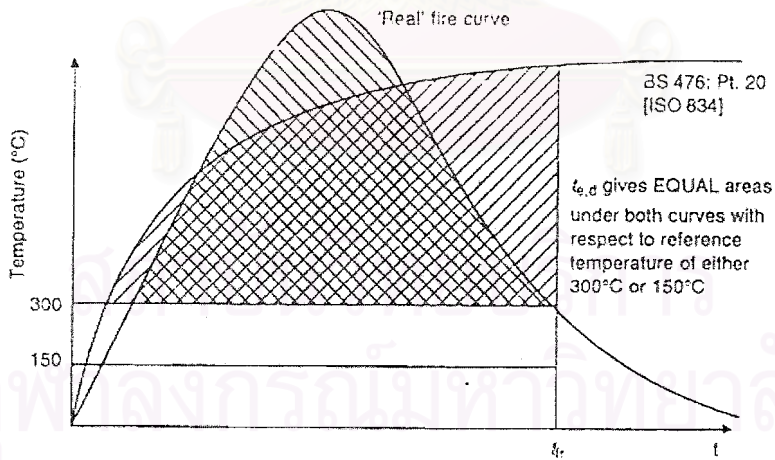
ตารางที่ 3.4 ผลการทำนายค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบ SP1 และ SP2 โดยใช้สมการที่ 3.10 เปรียบเทียบกับผลการทำนายโดยวิธี Equal Area เมื่อใช้ผลการวิเคราะห์การทนไฟที่ได้จากกราฟไฟ F1 และเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ		ระยะเวลาทนไฟจริง (นาที)	ระยะเวลาทนไฟที่คำนวณได้ (นาที)		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด	
			จากสมการที่ 3.10	วิธี Equal Area	จากสมการที่ 3.10	วิธี Equal Area
SP1	F1	75.7	75.7	75.7	0.0	0.0
	F2	58.5	58.7	65.7	0.2	12.2
	F3	104.2	100.6	89.1	-3.5	-14.5
	F4	78.4	79.8	81.3	1.8	3.7
	F5	44.5	48.0	58.9	7.9	32.4
SP2	F1	94.7	94.7	94.7	0.0	0.0
	F2	73.7	73.7	82.4	0.0	11.8
	F3	129.4	125.5	111.1	-3.0	-14.2
	F4	92.8	94.6	97.9	2.0	5.5
	F5	64.1	-	82.4	-	28.5

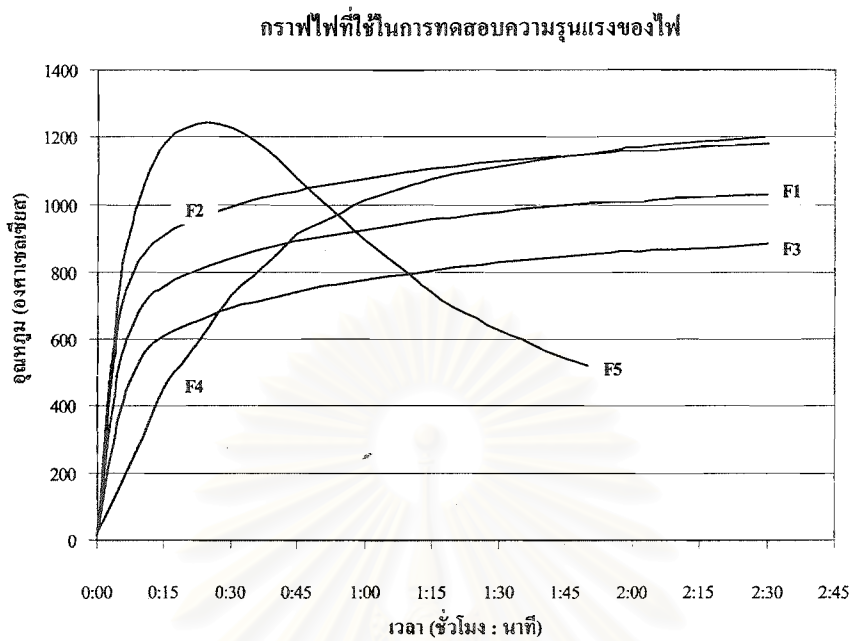
กราฟอุณหภูมิไฟ-เวลา หรือ กราฟไฟตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ



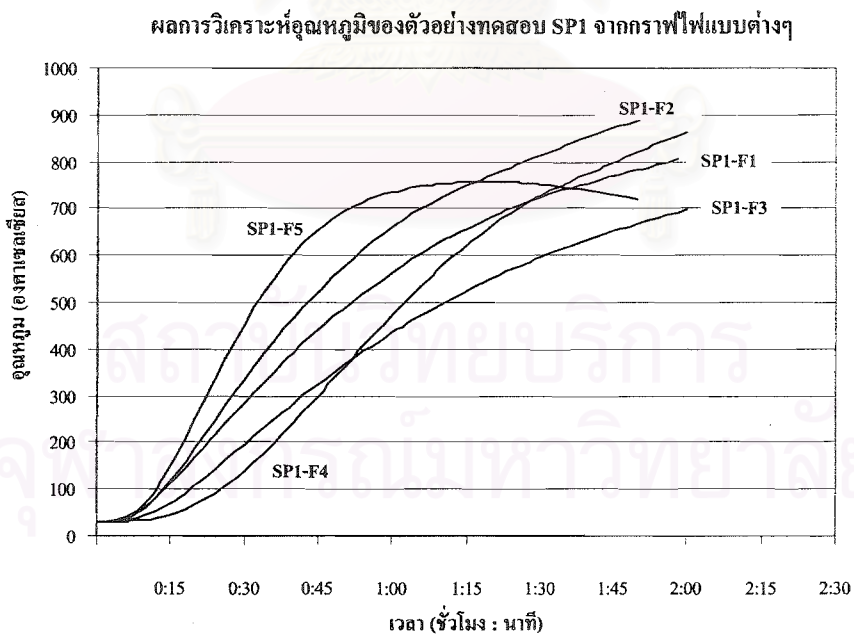
รูปที่ 3.1 อุณหภูมิไฟ-เวลา หรือกราฟไฟตามมาตรฐานการทดสอบการทนไฟต่างๆ



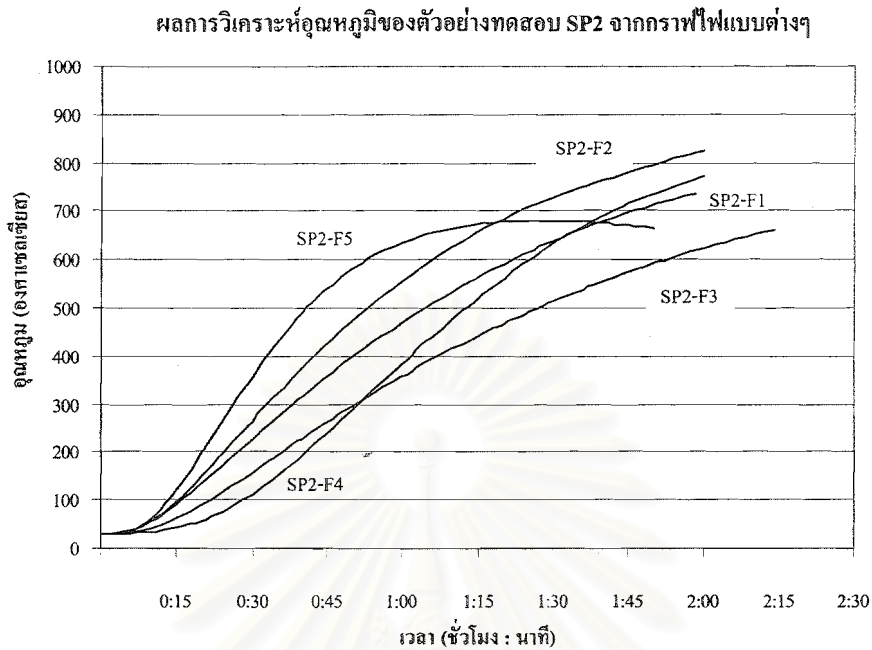
รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของพื้นที่ใต้กราฟไฟตามทฤษฎีของ Ingberg



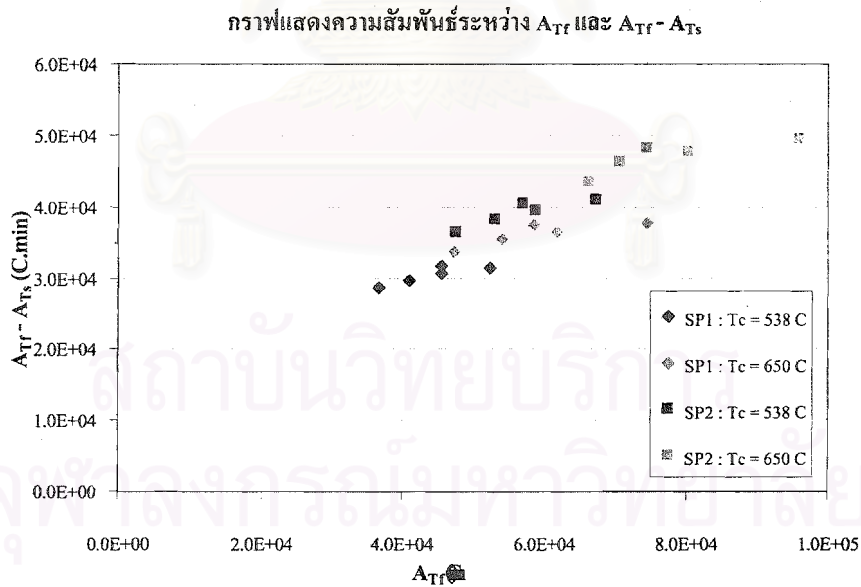
รูปที่ 3.3 กราฟไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ความรุนแรงของไฟ



รูปที่ 3.4 อุณหภูมิของตัวอย่าง SP1 กับเวลาจากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยกราฟไฟแบบต่างๆ

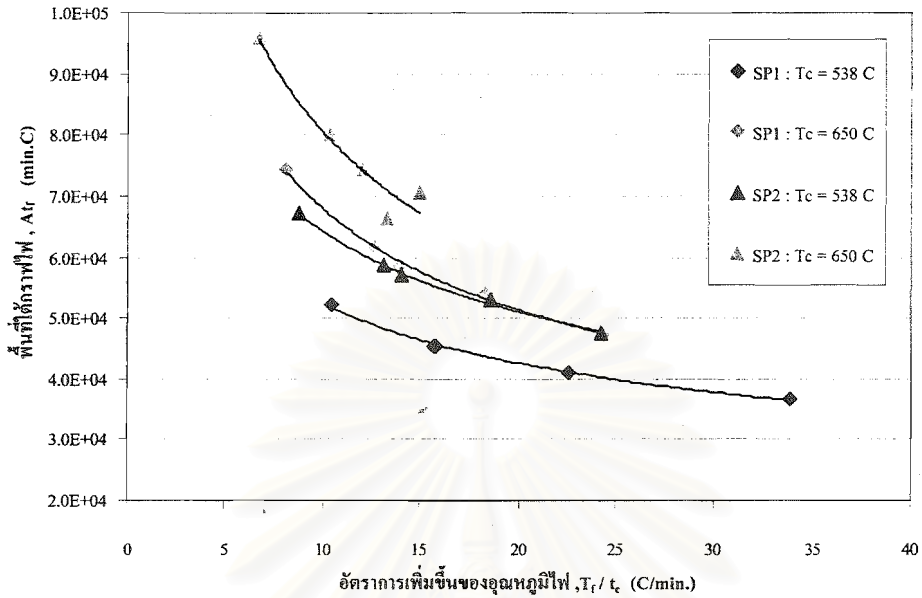


รูปที่ 3.5 อุณหภูมิของตัวอย่าง SP2 กับเวลาจากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยกราฟไฟแบบต่างๆ



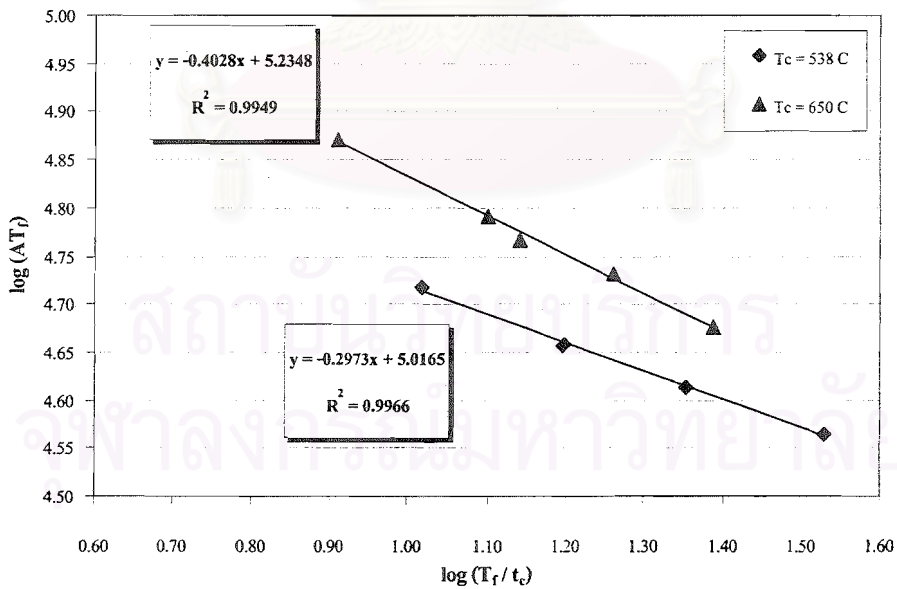
รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟไฟกับผลต่างของพื้นที่ใต้กราฟไฟกับพื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์กับเวลา

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟกับค่าพื้นที่ได้กราฟไฟ



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟกับค่าพื้นที่ได้กราฟไฟสำหรับตัวอย่าง SP1 และ SP2

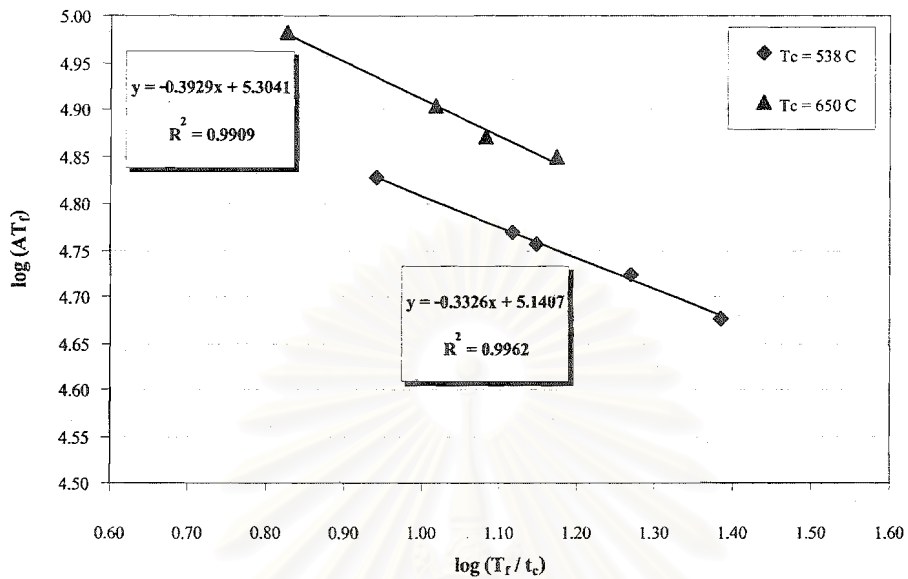
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log(AT_p)$  กับ  $\log(T_r/t_c)$  ของตัวอย่างทดสอบ SP1



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log(AT_p)$  กับ  $\log(T_r/t_c)$  ของตัวอย่าง SP1



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log(AT)$  กับ  $\log(T_r/t_c)$  ของตัวอย่างทดสอบ SP2



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\log(AT)$  กับ  $\log(T_r/t_c)$  ของตัวอย่าง SP2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การทดสอบ ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ทัวไป

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันทั้งที่มีและไม่มีการป้องกันไฟไฟภายใต้การจำลองสภาวะไฟไหม้ตามกราฟไฟตามมาตรฐาน ASTM E119 เนื้อหาในบทนี้โดยทั่วไปจะกล่าวถึงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบ การติดตั้งชิ้นตัวอย่าง มาตรฐานวิธีการหรือเกณฑ์ที่ใช้ควบคุมการทดสอบตลอดจนผลการทดสอบที่ได้ การทดสอบการทนไฟในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกได้เป็นสามส่วนตามลักษณะการป้องกันไฟที่ใช้กล่าวคือ 1)การทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มี การป้องกันไฟใดๆ 2)การทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีมีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม และ 3)การทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ ซึ่งจะได้อธิบายถึงรายละเอียดในลำดับถัดไป

#### 4.2 มาตรฐานการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารและวัสดุ (ASTM E119)

กฎกระทรวงมหาดไทยฉบับที่ 48 พ.ศ.2540 กำหนดให้การทดสอบการทนไฟขององค์อาคารใดๆต้องเป็นไปตามมาตรฐานสากลที่เป็นที่ยอมรับซึ่งได้ระบุไว้ว่าเป็นมาตรฐานการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารและวัสดุตามมาตรฐาน ASTM E119 ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ยึดเอามาตรฐานการทดสอบนี้เป็นแนวทางในการทดสอบการทนไฟแต่ได้มีการเปลี่ยนแปลงในบางส่วนเพื่อความเหมาะสม มาตรฐาน ASTM E119 แบ่งการทดสอบการทนไฟสำหรับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกันกล่าวคือการทดสอบการทนไฟแบบที่มีและไม่มี การให้น้ำหนักบรรทุกแก่ตัวอย่างทดสอบ ในระหว่างทดสอบซึ่งขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของผู้ทดสอบเป็นหลัก ในกรณีขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟซึ่งไม่ได้ถูกกำหนดให้ต้องทำหน้าที่รับน้ำหนักบรรทุกด้วยนั้นอาจเลือกใช้วิธีการทดสอบแบบที่ไม่มี การให้น้ำหนักบรรทุกนี้ได้เนื่องจากต้องการดูผลของการส่งถ่ายความร้อนจากไฟผ่านวัสดุกันไฟเข้าไปยังเหล็กเท่านั้น และงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้วิธีการทดสอบแบบนี้ตลอดการทดสอบทั้งหมดเนื่องจากถือว่าวัสดุกันไฟที่ใช้ทดสอบทำหน้าที่เป็นตัวฉนวนกันไฟเพียงอย่างเดียวเท่านั้น

##### 4.2.1 การควบคุมอุณหภูมิไฟ

มาตรฐาน ASTM E119 มีข้อกำหนดให้การทดสอบการทนไฟจะต้องควบคุมอุณหภูมิของไฟให้เป็นไปตามกราฟอุณหภูมิไฟ-เวลามาตรฐานหรือกราฟไฟมาตรฐานดังรูปที่ 4.1 โดยยอมให้มีความคลาดเคลื่อนได้ดังนี้

- |                                  |                              |       |
|----------------------------------|------------------------------|-------|
| 1) ช่วงเวลาทดสอบ 0 ถึง 1 ชั่วโมง | พื้นที่ได้กราฟไฟผิได้ไม่เกิน | 10 %  |
| 2) ช่วงเวลาทดสอบ 1 ถึง 2 ชั่วโมง | พื้นที่ได้กราฟไฟผิได้ไม่เกิน | 7.5 % |
| 3) ช่วงเวลาทดสอบ 2 ชั่วโมงขึ้นไป | พื้นที่ได้กราฟไฟผิได้ไม่เกิน | 5 %   |

ในกรณีที่มีความคลาดเคลื่อนเกินกว่าที่กำหนด ASTM E119 กำหนดให้ต้องมีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบโดยบวกเพิ่มข้อมูลทดสอบที่ได้ด้วยค่าปรับแก้ดังต่อไปนี้

$$C = \frac{2(A - A_s)}{3(A_s + L)} I \quad (4.1)$$

เมื่อ

- $C$  = ค่าปรับแก้ระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบ  
 $I$  = ระยะเวลาทนไฟที่ทดสอบได้จริง  
 $A$  = พื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิไฟ-เวลาจากการทดสอบจริงภายในเวลาสามในสี่ของระยะเวลาทนไฟที่ทดสอบได้จริง  
 $A_s$  = พื้นที่ได้กราฟอุณหภูมิไฟ-เวลาของกราฟไฟมาตรฐานในเวลาสามในสี่ของระยะเวลาทนไฟที่ทดสอบได้จริง  
 $L$  = ค่าปรับแก้เนื่องจากผลของความล่าช้าของเทอร์โมคัปเปิลในช่วงแรกของการทดสอบ = 1800 °C.min.

#### 4.2.2 ตัวอย่างทดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดความยาวขั้นต่ำของตัวอย่างทดสอบเป็น 2.40 และ 3.70 ม. สำหรับโครงสร้างประเภทเสาและคานตามลำดับ บริเวณส่วนหัวและท้ายของตัวอย่างทดสอบจะต้องจัดให้มีการต้านทานความร้อนอย่างเพียงพอเพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนโดยตรงจากไฟเข้าที่ปลายตัวอย่างทดสอบ ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิหรือเทอร์โมคัปเปิลบนตัวอย่างทดสอบเป็น 4 ระดับหรือหน้าตัดแต่ละระดับมีระยะห่างเท่าๆกัน โดยให้ระดับหัวและท้ายอยู่ห่างจากปลายเป็นระยะ 0.6 ม. แต่ละระดับหรือหน้าตัดติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลอย่างน้อย 3 หรือ 4 ตำแหน่ง

#### 4.3.3 เกณฑ์สิ้นสุดความสามารถทนไฟของโครงสร้าง

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดเกณฑ์สิ้นสุดความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณไว้ดังนี้คือ

- 1) เมื่อค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับหรือหน้าตัดใดๆ ถึง 538 องศาเซลเซียส (1,000 องศาฟาเรนไฮท์) หรือ
- 2) เมื่อค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆ ถึง 649 องศาเซลเซียส (1,200 องศาฟาเรนไฮท์)

### 4.3 มาตรฐานการทดสอบค่าความหนาและความหนาแน่นของวัสดุพ่นกันไฟ (ASTM E605)

มาตรฐานการทดสอบนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาค่าความหนาและความหนาแน่นของวัสดุพ่นกันไฟทั้งงานในห้องทดสอบและงานสนาม มาตรฐาน ASTM E605 กำหนดให้ทำการวัดความหนาของวัสดุกันไฟที่ระดับต่าง ๆ กัน โดยแต่ละระดับห่างกัน 30 ซม. แต่ละระดับจะวัดความหนาของวัสดุกันไฟที่ตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.2

### 4.4 มาตรฐานการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุในสถานะคงที่ (ASTM C177)

การทดสอบนี้เป็นการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุในสถานะคงที่ ตัวอย่างที่ใช้ทดสอบเป็นแผ่นตัวอย่างของวัสดุที่ต้องการหาค่าการนำความร้อนขนาด  $1 \times 12 \times 12$  นิ้ว จำนวน 2 แผ่น นำมาวางไว้ในอุปกรณ์ทดสอบดังรูปที่ 4.3 ซึ่งประกอบด้วยตัวทำความร้อน (Heater) แผ่นความร้อน (Hot Plate) และแผ่นความเย็น (Cold Plate) นำตัวอย่างทดสอบมาวางไว้ระหว่างแผ่นความร้อนและแผ่นความเย็นนี้แล้วให้ความร้อนจากตัวทำความร้อนผ่านทางแผ่นความร้อนเข้าไปยังตัวอย่างทดสอบและออกสู่แผ่นความเย็นทั้งสองข้าง ปล่อยให้ระบบอยู่ในสถานะสมดุลเป็นเวลาประมาณ 6 ถึง 7 ชั่วโมง วัดปริมาณความร้อนและอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านของตัวอย่างทดสอบนำมาคำนวณเป็นค่าการนำความร้อนได้ดังสมการที่ 4.2

$$k = \frac{Q}{A} \left( \frac{L}{T_2 - T_1} \right) \quad (4.2)$$

เมื่อ

$k$  = ค่าการนำความร้อน ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$  หรือ  $\text{W/m.K}$ )

$Q$  = อัตราพลังงานความร้อนที่ให้แกตัวอย่างทดสอบ (W)

$L$  = ความหนาของตัวอย่างทดสอบ (m)

$T_1, T_2$  = อุณหภูมิที่ผิวตัวอย่างทดสอบด้านแผ่นความเย็นและแผ่นความร้อน ตามลำดับ ( $^{\circ}\text{C}$  หรือ K)

### 4.5 ตัวอย่างทดสอบและการทดสอบการทนไฟ

งานวิจัยครั้งนี้แบ่งตัวอย่างทดสอบการทนไฟออกเป็น 3 กลุ่มด้วยกัน กล่าวคือ

- 1) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มีกรป้องกันไฟใดๆ จำนวน 16 ตัวอย่าง
- 2) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิซที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม จำนวน 32 ตัวอย่าง และ
- 3) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ จำนวน 32 ตัวอย่าง

โดยจะใช้สัญลักษณ์ B , P และ I แทนการทดสอบการทนไฟทั้งสามกลุ่มดังกล่าว ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบกลุ่มที่สองและสามจะทำการทดสอบกลุ่มละสองครั้งโดยเปลี่ยนความหนาของวัสดุกันไฟที่ใช้ให้มีความแตกต่างกัน เพื่อดูผลของความหนาของวัสดุกันไฟที่มีต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างและจะใช้สัญลักษณ์เพิ่มเติมเป็น P1, P2, I1 และ I2 ตัวเลข 1 และ 2 หมายถึงความหนาของวัสดุกันไฟครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง ตามลำดับ ตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีรายละเอียดและวิธีการเตรียมตัวอย่างดังต่อไปนี้

#### 4.5.1 เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ

งานวิจัยครั้งนี้ทำการทดสอบการทนไฟของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีรูปร่างหน้าตัด 3 แบบด้วยกัน คือ

- 1) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณหน้าตัดไวด์แฟลนจ์ (Wide-Flange Section Steels) จำนวน 5 ขนาด
- 2) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณหน้าตัดฉาก (Angle Section Steels) จำนวน 6 ขนาด และ
- 3) ท่อเหล็กกลมกลวง (Circular Hollow Section Steels) จำนวน 5 ขนาด

รูปที่ 4.4 แสดงภาพตัวอย่างเหล็กที่ใช้ในงานวิจัย ตัวอย่างทดสอบแต่ละท่อนมีความยาว 1 เมตรและมีขนาดในรูปของค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่แตกต่างกันตามตารางที่ 4.1 สำหรับเหล็กไวด์แฟลนจ์และเหล็กฉากที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กที่ได้มาตรฐานตาม มอก.1227:2539 ซึ่งต่างกับท่อเหล็กกลมกลวงที่ยังไม่มีมาตรฐานกำหนดภายในประเทศดังนั้นขนาดเหล็กตามตารางที่ 4.1 จึงเป็นเพียงขนาดระบุที่ใช้ในท้องตลาดเท่านั้น ตารางที่ 4.2 จะแสดงขนาดระบุและขนาดที่วัดได้จริงของท่อเหล็กกลมกลวงที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้

อนึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์ W , L และ CHS แทนตัวอย่างทดสอบเหล็กโครงสร้างรูปพรรณหน้าตัดไวด์แฟลนจ์ เหล็กฉาก และท่อเหล็กกลมกลวงตามลำดับ เมื่อได้ตัวอย่างเหล็กแล้วนำมาเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางครึ่งนิ้วที่ปลายตัวอย่างทั้งสองข้างโดยให้ห่างจากปลายด้านละ 10 ซม. ไว้สำหรับประกอบติดกับเหล็กสตัดเพื่อใช้แขวนขึ้นตัวอย่างติดกับฝาเตาทดสอบ สำหรับขึ้นตัวอย่างท่อเหล็กกลมกลวงก่อนที่จะพ่นหรือทาวีวัสดุกันไฟให้ปิดปลายท่อด้วยซีเมนต์เพสต์หนาประมาณ  $\frac{3}{4}$  นิ้วเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนผ่านเข้าไปได้โดยตรง

#### 4.5.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือเทอร์โมคัปเปิลซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิชนิดหนึ่งซึ่งประกอบด้วยลวดโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกันสองเส้นนำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิต่างกันจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเส้นลวดทั้งสองนี้และปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสอง ดังนั้นเมื่อทราบค่าอุณหภูมิที่จุดต่อหนึ่งซึ่งเป็นจุดอ้างอิงเราจะสามารถคำนวณค่าอุณหภูมิที่อีกจุดหนึ่งได้โดยการวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า

ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในวงจร หนึ่งจากหลักการของเทอร์โมคัปเปิลจะพบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อทั้งสองเท่านั้น อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งอื่นๆบนเส้นลวดจะไม่มีผลต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใดๆเลย เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานมีหลายชนิดด้วยกันขึ้นกับชนิดของลวดตัวนำที่ใช้ซึ่งจะมีความแตกต่างกันที่ช่วงของอุณหภูมิที่วัดได้ งานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้เทอร์โมคัปเปิลแบบเค (Type K Thermocouple) ซึ่งสายบวกทำจากโลหะผสมโครเมิล(โครเมียม + นิกเกิล) และสายลบทำจากโลหะผสมอลูเมล(อลูมิเนียม + แมงกานีส + ซิลิกอน + นิกเกิล) และสามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งครอบคลุมค่าอุณหภูมิที่ต้องการวัดในครั้งนี้

การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจะใช้แนวทางตามมาตรฐาน ASTM E119 แต่มีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างเพื่อความเหมาะสมกับตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ กล่าวคือ เนื่องจากความยาวของตัวอย่างทดสอบที่ใช้เป็น 1 เมตรดังนั้นจะติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนตัวอย่างทดสอบเป็น 2 ระดับแต่ละระดับห่างกัน 30 ซม.ให้อยู่บริเวณกลางของตัวอย่างทดสอบ แต่ระดับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 2 หรือ 3 จุดขึ้นกับรูปร่างหน้าตัดของเหล็ก โดยเลือกตำแหน่งที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของค่าอุณหภูมิสำหรับแต่ละด้านของหน้าตัด รูปที่ 4.5 แสดงตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนตัวอย่างทดสอบที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน

การติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลจะใช้วิธีการเชื่อมปลายของสายเทอร์โมคัปเปิลทั้งสายบวกและสายลบซึ่งได้ผูกติดกันไว้บนผิวเหล็ก ณ ตำแหน่งต่างๆตามที่ต้องการ การเชื่อมจะใช้วิธีการเชื่อมแบบอาร์คไฟฟ้าโดยใช้ลวดเชื่อมชนิดสแตนเลส เมื่อทดสอบให้เทอร์โมคัปเปิลติดกับเนื้อเหล็กดีแล้วจึงใช้กาวชนิดอีพ็อกซีทาปิดบริเวณรอยเชื่อมเพื่อป้องกันการหลุดออกในขณะเคลื่อนย้าย หลังจากนั้นจึงประกอบติดกับเหล็กस्टัดก่อนที่จะทำการพ่นหรือทาด้วยวัสดุกันไฟต่อไป รูปที่ 4.6 แสดงภาพตัวอย่างทดสอบก่อนที่จะทำการพ่นหรือทาด้วยวัสดุกันไฟ

#### 4.5.3 วัสดุกันไฟ

เพื่อต้องการศึกษาว่าชนิดของวัสดุกันไฟที่ต่างกันจะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณต่างกันอย่างไร งานวิจัยในครั้งนี้จึงได้เลือกชนิดของวัสดุกันไฟที่มีกลไกการทำงานต่างกันดังนี้คือ

##### 4.5.3.1 วัสดุกันไฟระบบแพสซีฟ ได้แก่ วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เซียสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม

วัสดุกันไฟระบบแพสซีฟที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เซียสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม (กลุ่ม P1 และ P2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของห้างหุ้นส่วนจำกัด ดี.พี.ดี.โอ.ไรท์ โค้ท วัสดุกันไฟประเภทนี้ไม่จำเป็นต้องมีการเตรียมผิวเหล็กก่อนการใช้งานมากนักเนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีความสามารถยึดเกาะกับผิวเหล็กได้ดีอยู่แล้ว ภายหลังจากติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลและเหล็กस्टัดเรียบร้อยแล้วทำการเตรียมวัสดุกันไฟโดยผสมกับน้ำในอัตราส่วนตามที่ต้องการ พ่นวัสดุกันไฟที่ได้ให้รอบชิ้นตัวอย่างเป็นชั้นๆโดยไม่ควรให้หนาเกินชั้นละ 0.5 ถึง 1 ซม.เพราะอาจทำให้หลุดร่วงลงมาได้ หลังจากทำการพ่นแต่ละชั้นให้ทิ้งไว้ให้เย็นตัวสักระยะก่อนที่จะทำการพ่นครั้งใหม่ เมื่อพ่นวัสดุกันไฟจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้ทิ้งชิ้นตัวอย่างไว้ในอากาศเพื่อให้เย็นตัวก่อนที่จะทำการทดสอบ ตัวอย่าง

ทดสอบกลุ่ม P1 และ P2 นี้ให้พันวัสดุกันไฟประเภทซีเมนติเซียสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมให้มีความหนาโดยประมาณ 20 และ 40 มม. ตามลำดับ รูปที่ 4.7 แสดงภาพขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนติเซียสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม

#### 4.5.3.2 วัสดุกันไฟระบบรีแอกทีฟ ได้แก่ วัสดุสีกันไฟ

วัสดุกันไฟระบบรีแอกทีฟที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ วัสดุสีกันไฟ (กลุ่ม I1 และ I2) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท แมททีเรียล ซัพพลาย อินเทอร์เน็ตชั้นนำ จำกัด วัสดุกันไฟชนิดนี้จำเป็นต้องมีการเตรียมผิวเหล็กก่อนการใช้งานกล่าวคือจะต้องมีการขัดผิวเหล็กด้วยทรายเพื่อเอาสนิมหรือน้ำมันที่ผิวเหล็กออกให้หมดเนื่องจากสนิมหรือน้ำมันจะทำให้การยึดเกาะระหว่างสีรองพื้นกับผิวเหล็กไม่ดีเท่าที่ควร หลังจากนั้นจึงทำการทาสีรองพื้นให้หนาประมาณ 50 ไมครอน สีรองพื้นนี้จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างสีกันไฟกับเหล็กช่วยให้สีกันไฟยึดเกาะกับเหล็กได้ดียิ่งขึ้น ภายหลังทิ้งให้สีรองพื้นแห้งสนิทแล้วจึงทำการทาสีกันไฟเป็นชั้นๆ ชั้นละ ไม่เกิน 50 ถึง 100 ไมครอนแล้วทิ้งไว้ให้แห้งจึงค่อยทาชั้นต่อไป ทาสีกันไฟจนได้ความหนาตามที่ต้องการซึ่งโดยทั่วไปจะต้องเผื่อให้มีความหนามากกว่าที่ต้องการไว้เล็กน้อยเนื่องจากสีอาจยุบตัวลงได้อีกเมื่อแห้งสนิท ตัวอย่างทดสอบกลุ่ม I1 และ I2 นี้ให้ทาสีกันไฟให้มีความหนาเฉพาะสีกันไฟโดยประมาณ 1,500 และ 2,000 ไมครอน ตามลำดับ รูปที่ 4.8 แสดงภาพขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ

#### 4.5.4 การวัดความหนาของวัสดุกันไฟ

วัดความหนาของวัสดุกันไฟที่ใช้ในงานวิจัยตามมาตรฐาน ASTM E605 ตัวอย่างทดสอบหนึ่งชิ้นจะวัดความหนาเป็น 3 ระดับ คือ ณ ระดับที่ห่างจากปลายของตัวอย่างทดสอบข้างละ 25 ซม. และอีกหนึ่งระดับที่ตรงกลาง ตัวอย่างทดสอบ ตำแหน่งและจำนวนจุดที่ใช้วัดความหนาจะแตกต่างกันตามรูปร่างของเหล็กที่ต่างกัน รูปที่ 4.2 แสดงตำแหน่งที่ใช้วัดความหนาของวัสดุกันไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กที่มีรูปร่างต่างๆ

##### 4.5.4.1 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนติเซียสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม

เนื่องจากวัสดุกันไฟที่ใช้ทดสอบนี้มีความแข็งเกินกว่าจะใช้สวัดหรือเข็มวัดแทงลงไปตรงๆ ได้ดังนั้นจึงใช้วิธีเจาะด้วยดอกสว่านขนาดเล็กลงไปตรงๆ จนสัมผัสเนื้อเหล็กแล้วจึงใช้สวัดเหล็กสอดลงไปเพื่อวัดความหนา รูเจาะที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กมากจึงไม่มีผลกระทบต่อทดสอบการทนไฟ ผลการวัดความหนาโดยวิธีดังกล่าวจะเป็นไปตามตารางที่ ค-1 , ค-2 และ ค-3 สำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม W-P , L-P และ CHS-P ตามลำดับ

#### 4.5.4.2 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ

เนื่องจากวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟมีความหนาแน่นมากดังนั้นจึงต้องใช้เครื่องมือเฉพาะสำหรับวัดความหนา การวัดความหนาของสีรองพื้นและสีกันไฟในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือวัดความหนาแบบดิจิตอลซึ่งใช้หลักการการสะท้อนกลับของรังสีอินฟราเรดที่ผิวเหล็กและสามารถวัดได้ละเอียดถึง 1 ไมครอน รูปที่ 4.9 แสดงการวัดความหนาของสีกันไฟด้วยเครื่องมือวัดความหนาแบบดิจิตอล ผลการวัดความหนาของตัวอย่างทดสอบจริงได้ผลดังตารางที่ ค-4, ค-5 และ ค-6 ในภาคผนวก ก สำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม W-I, L-I และ CHS-I ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 จะสรุปผลการวัดค่าความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่าง

#### 4.5.5 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบจะถูกแขวนไว้กับฝาเตาในลักษณะแนวนอนโดยสอดปลายทั้งสองข้างของเหล็กสตัดของตัวอย่างทดสอบผ่านรูบนฝาเตาโดยเว้นให้มีระยะห่างระหว่างตัวอย่างทดสอบกับฝาเตาประมาณ 10 ซม. จากนั้นขันด้วยน็อตด้านบนฝาเตาให้แน่น เหล็กสตัดส่วนที่อยู่ในเตาจะถูกป้องกันการสัมผัสไฟโดยการใช้อีก่อนคอนกรีตมวลเบาขนาด 7.5 x 7.5 x 7.5 ซม. ที่มีรูเจาะตรงกลางสำหรับสอดกับแกนของเหล็กสตัด ปลายของตัวอย่างทดสอบทั้งสองด้านจะถูกหุ้มด้วยแผ่นเซรามิกไฟเบอร์ซึ่งมีความทนไฟสูงเพื่อป้องกันการส่งถ่ายความร้อนจากไฟเข้าสู่ส่วนปลายโดยตรงซึ่งจะทำให้ผิดไปจากสมมติฐานที่ให้มีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติตามแนวขวางเท่านั้น จากนั้นร้อยสายเทอร์โมคัปเปิลจากตัวอย่างทดสอบผ่านรูบนฝาเตาออกมาภายนอกโดยพยายามป้องกันไม่ให้สายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกันได้เพราะจะทำให้เกิดการลัดวงจรและอ่านค่าอุณหภูมิผิดไปได้ ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลไว้ที่ด้านข้างของตัวอย่างทดสอบทั้งสองด้านสำหรับวัดค่าอุณหภูมิของไฟบริเวณใกล้ๆ ชิ้นงาน การทดสอบเผาไฟหนึ่งครั้งสามารถบรรจุตัวอย่างทดสอบได้ไม่เกิน 6 ตัวอย่างขึ้นกับขนาดของเตาและตัวอย่างทดสอบ รูปที่ 4.10 แสดงภาพตัวอย่างการติดตั้งตัวอย่างทดสอบกับฝาเตาก่อนการทดสอบสำหรับวัสดุกันไฟทั้งสองประเภท

#### 4.5.6 การทดสอบการทนไฟ

ดำเนินการทดสอบการทนไฟโดยพยายามควบคุมให้อุณหภูมิของไฟที่เวลาต่างๆเป็นไปตามกราฟไฟตามมาตรฐาน ASTM E119 บันทึกค่าอุณหภูมิของไฟจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้บริเวณด้านข้างของตัวอย่างทดสอบ และบันทึกค่าอุณหภูมิของเหล็กจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้แล้วที่ตัวอย่างทดสอบ ดำเนินการทดสอบจนกระทั่งอุณหภูมิเฉลี่ยที่ระดับใดๆของตัวอย่างทดสอบถึงค่าอุณหภูมิวิกฤติซึ่งหมายถึงค่าอุณหภูมิที่ทำให้โครงสร้างเสื่อมลงกำลังลงจนเกิดการวิบัติ งานวิจัยในครั้งนี้จะกำหนดค่าอุณหภูมิวิกฤติของโครงสร้างเหล็กไว้สองค่าดังนี้คือ 538 และ 650 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิวิกฤติเมื่อให้โครงสร้างรับน้ำหนักโดยประมาณเท่ากับ 100% และ 75% ของน้ำหนักบรรทุกทุกออกแบบใช้งาน ตามลำดับ อนึ่งค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียสเป็นค่าอุณหภูมิวิกฤติเดียวกับ



ที่มาตรฐาน ASTM E119 ใช้เป็นเกณฑ์สิ้นสุดความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณ ภาคผนวก ก. จะแสดงภาพจำลองเตาที่ใช้ในการทดสอบการทนไฟในงานวิจัยนี้

#### 4.6 ผลการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอส

คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟที่สำคัญ ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ค่าการนำความร้อน และค่าความร้อนจำเพาะ ค่าความหนาแน่นของวัสดุกันไฟจะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E605 โดยหล่อขึ้นตัวอย่างทดสอบขนาด  $1 \times 12 \times 12$  นิ้วจำนวน 3 ชิ้นตัวอย่างแล้วทิ้งไว้ในเย็นตัวในอากาศเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน นำออกมาชั่งน้ำหนักและวัดปริมาตรของชิ้นตัวอย่างเพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นต่อไป ผลการทดลองเพื่อหาค่าความหนาแน่นของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่ใช้ในงานวิจัยเป็นไปตามตารางที่ 4.4 ค่าการนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสจะดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C177 และ ASTM E1269 ตามลำดับ โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมซึ่งผลการทดสอบปรากฏอยู่ในภาคผนวก ข. ผลการทดสอบค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่ใช้ในงานวิจัยโดยสรุปเป็นดังนี้

1) ค่าความหนาแน่นขณะแห้ง	890.5 kg/m <sup>3</sup>	
2) ค่าการนำความร้อน	0.104 W/m°C	ที่ 100 °C
3) ค่าความร้อนจำเพาะ	970.5 J/kg°C	ที่ 100 °C

#### 4.7 ผลการทดสอบการทนไฟ

##### 4.7.1 ผลการวัดอุณหภูมิไฟรอบชิ้นงานและอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบ

ผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบทั้ง 80 ตัวอย่างจะแสดงดังรูปที่ ง-1 ถึง ง-80 ในภาคผนวก ง. ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิไฟตามมาตรฐาน ASTM E119 อุณหภูมิไฟรอบชิ้นงานและอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบโดยเฉลี่ยที่ระดับที่ 1 และระดับที่ 2 กับระยะเวลาที่ทำการทดสอบ จากรูปแสดงผลการทดสอบดังกล่าวจะพบว่าอุณหภูมิไฟรอบชิ้นงานที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากอุณหภูมิไฟตามมาตรฐาน ASTM E119 ทั้งในลักษณะที่สูงกว่าและต่ำกว่าซึ่งเป็นผลจากความไม่สม่ำเสมอของอุณหภูมิไฟที่ตำแหน่งต่างๆภายในเตา โดยทั่วไปตัวอย่างทดสอบที่อยู่บริเวณล่างซ้ายของเตาตามรูปที่ ก-1 จะมีอุณหภูมิไฟที่สูงกว่าชิ้นงานที่อยู่ในบริเวณบนขวา ดังนั้นผลการทดสอบการทนไฟที่ได้จึงยังไม่สามารถเปรียบเทียบหรือวิเคราะห์ผลได้ทันทีที่ต้องมีการปรับแก้โดยพิจารณาผลของความคลาดเคลื่อนดังกล่าวก่อน ดังจะได้กล่าวถึงในลำดับถัดไป อย่างไรก็ตาม ในที่นี้จะสรุปผลค่าความสามารถทนไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 และ 650 องศาเซลเซียสซึ่งได้จากการทดสอบจริงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

#### 4.7.2 ลักษณะของตัวอย่างทดสอบภายหลังการทดสอบการทนไฟ

##### 4.7.2.1 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีมีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม

ภายหลังการทดสอบการทนไฟตรวจพบว่ามีรอยแตกร้าวเกิดขึ้นทั้งในแนวขวางและแนวยาวกับชิ้นงาน และตัวอย่างทดสอบบางชิ้นตรวจพบว่าวัสดุกันไฟที่อยู่บริเวณด้านล่างหลุดออกเป็นบางส่วนแต่บางส่วนยังคงค้างติดอยู่กับชิ้นงานแต่เนื่องจากไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพของตัวอย่างทดสอบในขณะที่กำลังเผาไฟได้จึงไม่ทราบว่าการหลุดออกดังกล่าวเกิดขึ้นในขณะใด รอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นอาจเกิดได้จากสาเหตุสองประการคือ

1) มีรอยแตกร้าวเนื่องจากการหดตัวของตัวอย่างทดสอบอยู่ก่อนแล้วและเมื่อทำการเผาไฟน้ำหรือความชื้นที่มีอยู่ในชิ้นงานจะระเหยกลายเป็นไอน้ำและขยายตัวดันออกมาทางรอยแตกนี้ทำให้รอยแตกเดิมมีขนาดใหญ่ขึ้น พร้อมกับมีรอยแตกใหม่เกิดขึ้นเช่นกัน

2) เนื่องจากเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการขยายตัว การขยายตัวของเหล็กจะเกิดขึ้นในแนวแกนได้มากกว่าแนวขวางและจะดันให้วัสดุกันไฟขยายตัวออกตามไปด้วยแต่เนื่องวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีเป็นวัสดุที่มีความเปราะมากดังนั้นในขณะที่เหล็กเย็นตัวกลับวัสดุกันไฟจะหดกลับได้น้อยและปรากฏเป็นรอยแตกและรอยแยกขึ้น

รูปที่ 4.11 แสดงภาพตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีมีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสม ภายหลังเสร็จสิ้นการทดสอบการทนไฟ

##### 4.7.2.2 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ

สีกันไฟเป็นวัสดุกันไฟประเภทที่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพและเคมีเมื่อสัมผัสความร้อน โดยจะมีการพองตัวออกเป็นโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายโฟมของคาร์บอน จากการตรวจสอบตัวอย่างทดสอบชนิดนี้ภายหลังเสร็จสิ้นการทดสอบพบว่าสีกันไฟมีการพองตัวออกโดยความหนาขณะพองตัววัดได้ประมาณ 20 - 40 เท่าของความหนาขณะแห้ง อย่างไรก็ตามการพองตัวของสีกันไฟนี้จะไม่ค่อยสม่ำเสมอคือบางตำแหน่งจะขยายตัวมากแต่บางตำแหน่งจะน้อย บริเวณที่เป็นขอบมุมการพองตัวจะน้อยกว่าบริเวณกลางแผ่นซึ่งอาจทำให้ความร้อนผ่านเข้าไปบริเวณนี้ได้มาก การพองตัวจะไม่ค่อยราบเรียบมีลักษณะสูงๆต่ำๆอาจเนื่องจากความหนาของสีกันไฟไม่สม่ำเสมอเท่ากันดี จากการตรวจสอบพบว่าสีกันไฟบางส่วนหลุดออกจากตัวอย่างทดสอบซึ่งมักจะเป็นด้านล่างของตัวอย่างทดสอบ เนื่องจากมีโอกาสสัมผัสกับอากาศร้อนภายในเตาได้มาก รูปที่ 4.12 แสดงภาพตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟภายหลังเสร็จสิ้นการทดสอบ

#### 4.8 การปรับแก้ผลการทดสอบ

ข้อมูลทดสอบที่ได้ยังไม่สามารถวิเคราะห์หรือเปรียบเทียบกันได้โดยตรงเนื่องจากยังมีความคลาดเคลื่อนสองประการด้วยกันคือ 1) ความหนาของวัสดุกันไฟที่วัดได้จริงมีความคลาดเคลื่อนไปจากความหนาที่ต้องการในข้อ 4.6.3 และ 2) กราฟไฟที่ได้จากการทดสอบจริงมีความคลาดเคลื่อนไปจากกราฟไฟที่มาตรฐาน ASTM E119 กำหนด จากเหตุผลดังกล่าวจึงต้องมีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบที่ได้ก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบต่อไปทั้งนี้เพื่อความน่าเชื่อถือของผลการวิจัย

##### 4.8.1 การปรับแก้ผลการทดสอบจากความคลาดเคลื่อนของกราฟไฟที่ไม่เป็นไปตามกราฟไฟที่มาตรฐาน ASTM E119 กำหนด

เนื่องจากอุณหภูมิของไฟภายในเตาทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงได้มากที่ตำแหน่งต่างๆทั้งในแนวราบและแนวตั้ง ดังนั้นกราฟไฟที่วัดได้จริงจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้ข้างๆชิ้นงานจึงอาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากกราฟไฟตามมาตรฐาน ASTM E119 ทั้งในลักษณะที่รุนแรงมากกว่าหรือน้อยกว่า อย่างไรก็ตามมาตรฐาน ASTM E119 ได้มีข้อกำหนดสำหรับวิธีในการปรับแก้ผลการทดสอบซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 ขั้นตอนและวิธีการปรับแก้ข้อมูลดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ จ-1 และ จ-2 ของภาคผนวก จ ในที่นี้จะยกตัวอย่างวิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบสำหรับตัวอย่างทดสอบหมายเลข W2-P1 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียสดังนี้

ระยะเวลาทนไฟที่ทดสอบได้จริง, I	47.7	นาที
พื้นที่ได้กราฟไฟที่วัดได้จริงในช่วง 0 ถึง 1 ชั่วโมง	40,509.2	min °C
พื้นที่ได้กราฟไฟที่วัดได้จริงในช่วง 1 ถึง 2 ชั่วโมง	-	min °C
พื้นที่ได้กราฟไฟที่วัดได้จริงตั้งแต่ 2 ชั่วโมง ขึ้นไป	-	min °C
พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ในช่วง 0 ถึง 1 ชั่วโมง	35,738.0	min °C
พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ในช่วง 1 ถึง 2 ชั่วโมง	-	min °C
พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ตั้งแต่ 2 ชั่วโมง ขึ้นไป	-	min °C
ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ได้กราฟไฟในช่วง 0 ถึง 1 ชั่วโมง	13.35	%
ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ได้กราฟไฟในช่วง 1 ถึง 2 ชั่วโมง	-	%
ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ได้กราฟไฟตั้งแต่ 2 ชั่วโมง ขึ้นไป	-	%

ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ได้กราฟไฟในช่วง 0 ถึง 1 ชั่วโมงเกินกว่าที่มาตรฐานกำหนดคือ 10 % ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบดังนี้

พื้นที่ใต้กราฟไฟจริงในช่วงเวลา $\frac{3}{4}$ ของระยะเวลาทนไฟที่วัดได้ , A	29,128.66	min °C
พื้นที่ใต้กราฟไฟมาตรฐาน ASTM E119 ในช่วงเวลา $\frac{3}{4}$ ของระยะเวลาทนไฟที่ทดสอบได้จริง , A <sub>s</sub>	25,203.88	min °C
ค่าปรับแก้ตามสมการที่ 4.1 , C	4.62	นาที
ระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้แล้ว	52.35	นาที

การปรับแก้ข้อมูลทดสอบสำหรับตัวอย่างทดสอบอื่นๆได้แสดงไว้ในตารางที่ จ-1 และ จ-2 ของภาคผนวก จ ตารางที่ 4.7 และ 4.8 จะสรุปผลการปรับแก้ค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้ทำไว้

#### 4.8.2 การปรับแก้ผลการทดสอบจากความคลาดเคลื่อนของความหนาของวัสดุกันไฟที่ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้

ความหนาของวัสดุกันไฟเป็นตัวแปรที่ต้องควบคุมให้คงที่เนื่องจากการเปรียบเทียบผลของค่าองค์ประกอบหน้าตัดของเหล็กว่ามีผลต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างอย่างไรจะต้องควบคุมตัวแปรอื่นๆทั้งหมดไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งกลุ่มตัวอย่างทดสอบออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆกล่าวคือ

1) กลุ่ม B เป็นการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มีการป้องกันไฟใดๆ ตัวอย่างทดสอบที่ใช้เป็นเหล็กปลั่งเปลือยดังนั้นถือว่าความหนาของวัสดุกันไฟมีค่าเป็นศูนย์

2) กลุ่ม P เป็นการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิซที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม และแบ่งเป็นกลุ่มย่อยคือ กลุ่ม P1 และ P2 โดยให้ความหนาของวัสดุกันไฟคงที่เป็น 20 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3) กลุ่ม I เป็นการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ และแบ่งเป็นกลุ่มย่อยคือ กลุ่ม I1 และ I2 โดยให้ความหนาของวัสดุกันไฟคงที่เป็น 1,500 และ 2,000 ไมครอน (1.5 และ 2.0 มิลลิเมตร) ตามลำดับ

แต่เนื่องจากในวิธีและขั้นตอนการทำงานไม่สามารถควบคุมให้ความหนาของวัสดุกันไฟทั้งในกลุ่ม P และ I ให้มีความคงที่ได้ดังนั้นความหนาที่วัดได้ในตารางที่ 4.3 จึงเป็นเพียงความหนาเฉลี่ยเท่านั้นซึ่งอาจคลาดเคลื่อนไปจากความหนาที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแก้ข้อมูลการทดสอบเพื่อให้ได้ผลตามที่ต้องการ ในการปรับแก้ผลการทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความหนาของวัสดุกันไฟนี้จะใช้วิธีสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของวัสดุกันไฟกับค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากผลการทดสอบการทนไฟของเหล็กที่มีขนาดเดียวกันซึ่งจะมีข้อมูลทดสอบ 3 จุดข้อมูลด้วยกันกล่าวคือ จากผลการทดสอบของเหล็กกลุ่ม B หนึ่งจุด และอีกสองจุดจากผลการทดสอบของเหล็กกลุ่ม P1 และ P2 หรือ I1 และ I2 อย่างใดอย่างหนึ่ง จากข้อมูลทั้งสามจุดข้อมูลดังกล่าวนำมาสร้างสม

การความสัมพันธ์ในลักษณะสมการพหุนามกำลังสองและจากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสามารถคำนวณเป็นค่าระยะเวลาทนไฟที่ความหนาตามที่ต้องการได้ จากข้อมูลความหนาของวัสดุกันไฟในตารางที่ 4.3 และข้อมูลค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบที่มีการปรับแก้แล้วในตารางที่ 4.7 และ 4.8 นำมาสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ ฉ-1 ถึง ฉ-32 ในภาคผนวก ฉ. จากสมการความสัมพันธ์ดังกล่าวจะสามารถนำมาคำนวณได้ว่าที่ความหนาตามที่ต้องการตัวอย่างทดสอบจะมีระยะเวลาทนไฟเป็นเท่าไร ตารางที่ 4.9 และ 4.10 จะแสดงค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบทั้ง 80 ตัวอย่างเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และได้มีการปรับแก้ข้อมูลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความหนาดังกล่าวแล้ว ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างวิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W1-B, W1-P1 และ W1-P2 ที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส ดังนี้

ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟ (นาที)
0.0	8.5
19.4	55.9
63.5	239.4

จากสมการความสัมพันธ์ในรูปที่ ฉ-1 
$$FR = 0.0271d_p^2 + 1.9185d_p + 8.5$$

ดังนั้นที่ความหนาที่ต้องการคือ  $d_p = 20$  และ  $40$  มม. จะได้ค่าระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้วเป็นดังนี้

ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟ (นาที)
0	8.48
20	57.69
40	128.52

#### 4.9 วิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากผลการทดสอบที่ได้และเมื่อได้ทำการปรับแก้ข้อมูลทดสอบอันเนื่องจากความคลาดเคลื่อนดังที่ได้กล่าวมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟที่อุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียสได้ดังรูปที่ 4.13 และ 4.14 สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เรียดและรูปที่ 4.15 และ 4.16 สำหรับตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ

#### 4.9.1 ตัวอย่างทดสอบที่ไม่มีการป้องกันไฟ

อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มีการป้องกันไฟจะสูงมากและลื้อไปกับเส้นกราฟของอุณหภูมิไฟภายนอกเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นเส้นกราฟจะแนบชิดกับเส้นกราฟของอุณหภูมิไฟมากขึ้น ซึ่งเป็นผลของการแผ่รังสีความร้อนซึ่งจะมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิไฟมากขึ้น

จากการพิจารณาในรูปที่ 4.13 ถึง 4.16 จะได้ว่าค่าความสามารถทนไฟของเหล็กที่ไม่มีการป้องกันไฟจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลง รูปร่างของเหล็กที่ต่างกันจะมีผลน้อยมากต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้าง ความสามารถทนไฟสูงสุดที่ทดสอบได้คือไม่เกิน 20 นาที

#### 4.9.2 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิยสที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม

ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิยส ในช่วงแรกอุณหภูมิของเหล็กจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนเมื่อถึงอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียสเส้นกราฟจะคงที่ในระยะหนึ่งซึ่งเป็นผลเนื่องจากการระเหยของน้ำหรือความชื้นภายในวัสดุกันไฟ หลังจากนั้นอุณหภูมิของเหล็กจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอีกครั้งจนถึงจุดวิบัติ

จากการพิจารณาในรูปที่ 4.13 ถึง 4.14 จะได้ว่า ในกรณีของเหล็กที่มีการป้องกันไฟด้วยความหนาที่เท่ากันจะพบว่าเส้นกราฟของเหล็กแต่ละรูปร่างหน้าตัดจะแยกห่างจากกันอย่างเห็นได้ชัดและจะห่างมากขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟเพิ่มขึ้นแสดงว่าค่าองค์ประกอบหน้าตัดจะไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่มีผลต่อค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างแต่รูปร่างของเหล็กก็มีผลด้วยเช่นกันกล่าวคือเหล็กโวลด์เพลนจ์จะมีความสามารถทนไฟสูงกว่าเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวงตามลำดับ แต่สำหรับเหล็กที่มีรูปร่างเดียวกันความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะมีแนวโน้มตามค่าองค์ประกอบหน้าตัดกล่าวคือถ้าค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูงขึ้นค่าความสามารถทนไฟจะลดลง

#### 4.9.2 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทลิกันไฟ

ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทลิกันไฟ ในช่วงแรกอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเหล็กจะสูงมากและมีลักษณะเป็นเส้นตรงแต่เมื่อมาถึงขณะหนึ่งอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดจนทำให้เกิดเป็นเส้นตรงสองเส้นทำมุมต่อกัน อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ลดลงนี้เป็นผลเนื่องจากการปกปิดตัวของลิกันไฟเริ่มทำงานเต็มที่ จากการสังเกตจากกราฟดังกล่าวจะพบว่าการลดลงของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กจะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ 600 ถึง 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นเวลาประมาณ 5 ถึง 10 นาที แต่อย่างไรก็ตามการปกปิดตัวของลิกันไฟอาจจะเริ่มขึ้นก่อนเวลานี้ได้ แต่เนื่องจากไม่สามารถสังเกตตัวอย่างทดสอบขณะที่กำลังทดสอบได้เนื่องจากช่วงเริ่มต้นของการทดสอบความร้อนและความสว่างภายในเตายังน้อยอยู่จึงเห็นตัวอย่างทดสอบได้เพียงลางๆเท่านั้น

จากการพิจารณาในรูปที่ 4.15 ถึง 4.16 จะได้ว่า สำหรับเหล็กที่มีรูปร่างเดียวกันค่าความสามารถทนไฟของเหล็กมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลง แต่ผลของรูปร่างของเหล็กที่ต่างกันจะสังเกตได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากลักษณะของเส้นกราฟไม่มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตามจะสังเกตว่าเหล็กโวลด์แพลนจ์จะมีค่าความสามารถทนไฟที่สูงกว่าเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวงเสมอ ความไม่ชัดเจนของผลการทดสอบดังกล่าวอาจเกิดจากสาเหตุดังนี้

1) การพองตัวของสีกันไฟไม่สม่ำเสมอ ตัวอย่างบางชิ้นจะพบว่ามีการพองตัวออกโดยรอบตัวอย่างเหล็ก แต่บางตัวอย่างการพองตัวจะน้อยและอาจหลุดร่วงจากผิวเหล็กได้ทั้งในขณะกำลังทำการทดสอบและหลังสิ้นสุดการทดสอบซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้อย่างชัดเจน

2) ตำแหน่งที่ติดตั้งชิ้นงานอาจมีผลต่อการพองตัวและการหลุดร่วงของสีกันไฟเนื่องจากตัวอย่างทดสอบบางตำแหน่งในเตาเผามีโอกาสสัมผัสกับอากาศร้อนหรือเปลวไฟได้มากกว่าตัวอื่นๆจึงอาจทำให้การพองตัวของสีกันไฟไม่ดีเท่าที่ควรและอาจเกิดการหลุดร่วงได้มากซึ่งเป็นให้ผลการทดสอบที่ได้มีความผิดพลาดไป

#### 4.10 สรุป

จากผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบเหล็กโครงสร้างรูปพรรณทั้งที่ไม่มีและมีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทต่างๆสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สำหรับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มีมีการป้องกันไฟ ค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะขึ้นกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดของเหล็กแต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่ขึ้นกับรูปร่างของเหล็กแต่อย่างใด
2. ในกรณีที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอส ค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะขึ้นกับทั้งค่าองค์ประกอบหน้าตัดและรูปร่างของเหล็กด้วย จากการทดสอบพบว่าสำหรับเหล็กที่มีรูปร่างเดียวกันค่าความสามารถทนไฟของเหล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลง และเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟและค่าองค์ประกอบหน้าตัดเท่ากันเหล็กโวลด์แพลนจ์จะมีค่าความสามารถทนไฟที่สูงกว่าเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ และผลของรูปร่างเหล็กที่ต่างกันจะมีมากขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟเพิ่มขึ้น
3. ในกรณีที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ สำหรับเหล็กที่มีรูปร่างเดียวกันค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลง แต่ผลของรูปร่างเหล็กที่ต่างกันไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.1 ขนาดตัวอย่างทดสอบเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ใช้ในงานวิจัย

หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเหล็กระบุ	น้ำหนัก กก/ม.	พื้นที่หน้าตัด ซม. <sup>2</sup>	เส้นรอบรูป ซม.	ค่าองค์ประกอบหน้าตัด ม. <sup>-1</sup>
W1	W 150 x 14.0	14	17.85	59	331
W2	W 200 x 21.3	21.3	27.16	78.9	291
W3	W 100 x 17.2	17.2	21.9	58.8	268
W4	W 125 x 23.8	23.8	30.31	73.7	243
W5	W 175 x 40.2	40.2	51.21	103.5	202
L1	L 75 x 75 x 6	6.9	8.73	30	344
L2	L 90 x 90 x 7	9.6	12.22	36	295
L3	L 65 x 65 x 8	7.7	9.76	26	266
L4	L 75 x 75 x 9	10	12.69	30	236
L5	L 90 x 90 x 10	13.3	17	36	212
L6	L 75 x 75 x 12	13	16.56	30	181
CHS1	φ 2" x 2.0 มม.	2.78	3.58	18.5	518
CHS2	φ 2" x 2.8 มม.	3.87	4.96	18.6	375
CHS3	φ 3 1/2" x 3.0 มม.	7.77	9.28	31.9	343
CHS4	φ 3" x 4.0 มม.	7.83	10.63	27.8	262
CHS5	φ 4" x 4.5 มม.	12.2	15.28	35.4	231

ตารางที่ 4.2 ขนาดระบุและขนาดที่วัดได้จริงของท่อเหล็กกลมกลวงที่ใช้ในงานวิจัย

หมายเลขตัวอย่าง	ขนาดเหล็กระบุ	น้ำหนัก กก/ม.	เส้นผ่านศูนย์กลาง มม.	ความหนา มม.
CHS1	φ 2" x 2.0 มม.	2.78	59.2	2.0
CHS2	φ 2" x 2.8 มม.	3.87	60	2.8
CHS3	φ 3 1/2" x 3.0 มม.	7.77	101.8	3.0
CHS4	φ 3" x 4.0 มม.	7.83	88.7	4.0
CHS5	φ 4" x 4.5 มม.	12.2	114.3	4.5



ตารางที่ 4.3 สรุปผลการวัดค่าความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่าง	ความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม				
	B	P1	P2	I1	I2
W1	0	19.4	63.5	1.52	2.02
W2	0	18.7	61.9	1.53	2.01
W3	0	24.3	55.4	1.53	2.02
W4	0	20.1	61.7	1.52	2.02
W5	0	19.0	56.5	1.52	2.02
L1	0	26.1	38.7	1.54	2.02
L2	0	23.1	41.0	1.54	2.02
L3	0	26.7	40.3	1.53	2.01
L4	0	23.5	38.2	1.55	2.02
L5	0	23.8	40.8	1.53	2.01
L6	0	24.6	39.7	1.56	2.02
CHS1	0	23.5	41.9	1.54	2.02
CHS2	0	21.8	42.3	1.54	2.02
CHS3	0	23.1	40.1	1.55	2.02
CHS4	0	21.4	38.9	1.55	2.02
CHS5	0	20.3	43.3	1.53	2.01

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่ใช้ในงานวิจัย

ตัวอย่างที่	น้ำหนัก (กรัม)		ปริมาตร ( $\text{cm}^3$ )	ความหนาแน่น (กรัม/ $\text{cm}^3$ )	
	ก่อนอบ	หลังอบ		ก่อนอบ	หลังอบ
1	2380.2	2119.0	2359.74	1.009	0.898
2	2364.1	2106.1	2359.74	1.002	0.893
3	2332.5	2078.9	2359.74	0.988	0.881

เฉลี่ย

1.000

0.891

ตารางที่ 4.5 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)				
	B	P1	P2	I1	I2
W1	7.1	55.9	239.4	24.7	56.6
W2	8.4	47.7	-	29.3	65.9
W3	9.4	67.2	201.4	30.9	60.2
W4	12.0	65.9	235.0	40.1	66.0
W5	14.9	62.0 <sup>a</sup>	236.0	50.5	73.7
L1	6.4	67.4	102.5	16.7	31.1
L2	8.4	69.4	117.2	20.9	40.4
L3	9.6	69.3	109.8	23.1	45.3
L4	11.3	70.8	115.8	29.3	55.3
L5	11.0	64.0	123.0	26.1	51.6
L6	15.3	75.3	133.1	34.7	56.6
CHS1	3.9	48.7	81.9	12.1	22.0
CHS2	5.5	46.7	93.6	17.5	24.7
CHS3	4.8	53.9	98.0	15.3	55.9
CHS4	6.9	53.2	95.5	22.7	52.1
CHS5	6.8	51.9	124.3	36.7	63.5

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.6 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)				
	B	P1	P2	I1	I2
W1	10.6	72.9	-	34.3	74.4
W2	12.4	63.3	-	40.2	88.6
W3	13.9	89.8	-	43.1	81.6
W4	17.0	85.9	-	55.2	85.8
W5	20.5	81.3	-	72.0	106.3
L1	9.7	84.4	124.8	23.0	40.6
L2	13.6	86.5	142.9	29.5	50.4
L3	14.0	86.6	135.4	32.4	56.4
L4	17.3	89.3	142.2	40.9	67.9
L5	15.5	82.0	151.9	36.3	64.0
L6	21.2	95.4	164.5	47.7	69.9
CHS1	5.8	59.8	97.2	16.5	25.9
CHS2	7.2	59.5	109.8	22.9	30.3
CHS3	6.2	67.0	117.5	20.9	68.9
CHS4	11.2	67.2	110.8	30.3	63.7
CHS5	9.4	65.7	149.5	48.1	79.1

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของกราฟไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)				
	B	P1	P2	I1	I2
W1	8.5	55.9	239.4	26.7	56.6
W2	9.8	52.4	-	29.3	65.9
W3	9.4	67.2	201.4	33.4	60.2
W4	12.0	65.9	235.0	40.2	66.0
W5	14.3	62.0	236.0	50.5	68.6
L1	7.9	67.4	102.5	20.1	35.6
L2	9.9	69.4	117.2	23.4	44.1
L3	11.0	69.4	109.8	26.1	45.3
L4	12.4	70.8	115.8	29.3	55.3
L5	12.3	68.8	123.0	28.5	51.6
L6	15.3	75.3	133.1	34.7	56.6
CHS1	4.3	48.7	84.8	14.5	24.9
CHS2	6.5	46.7	97.0	19.3	27.3
CHS3	5.5	53.9	98.0	18.0	55.9
CHS4	7.9	53.2	95.5	22.7	52.1
CHS5	8.2	56.6	120.6	36.8	63.5

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของกราฟไฟของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)				
	B	P1	P2	I1	I2
W1	12.3	72.9	-	34.3	74.4
W2	14.0	68.7	-	40.2	88.6
W3	13.9	89.8	-	43.1	81.6
W4	17.0	86.0	-	55.2	85.8
W5	19.2	81.3	-	68.1	100.3
L1	11.6	84.4	124.8	26.8	45.5
L2	15.3	86.5	142.9	32.1	50.4
L3	15.6	86.6	135.4	35.7	56.4
L4	17.3	89.3	142.2	40.9	68.0
L5	16.8	87.5	151.9	36.3	64.0
L6	21.2	95.4	164.5	47.7	69.9
CHS1	6.9	59.8	100.2	18.9	29.0
CHS2	8.9	59.5	113.4	24.7	32.9
CHS3	7.6	69.7	117.5	23.7	68.9
CHS4	12.4	69.1	110.9	30.3	63.7
CHS5	11.1	70.9	145.1	48.1	79.1

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความหนาของวัสดุกันไฟ  
ของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 538 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	$H_{ps}/A_s$ (ม <sup>-1</sup> )	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)				
		B	P1	P2	I1	I2
W1	331	8.5	57.7	128.5	25.7	55.4
W2	291	9.8	55.4	-	27.7	64.9
W3	268	9.4	54.0	126.5	32.1	58.8
W4	243	12.0	65.6	137.1	39.3	64.7
W5	202	14.3	65.3	146.4	49.9	67.9
L1	344	7.9	51.9	106.4	19.1	34.9
L2	295	9.9	61.3	114.5	21.9	43.3
L3	266	11.0	52.1	108.8	25.0	44.9
L4	236	12.4	61.1	121.8	27.3	53.8
L5	212	12.3	58.3	120.2	27.2	51.0
L6	181	15.3	60.9	134.4	32.6	55.6
CHS1	518	4.3	42.0	81.0	13.9	24.4
CHS2	375	6.4	42.9	90.8	18.7	27.0
CHS3	343	5.5	46.6	97.7	15.3	53.7
CHS4	262	7.9	50.0	98.3	20.4	50.8
CHS5	231	8.2	55.8	110.8	35.4	62.9

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

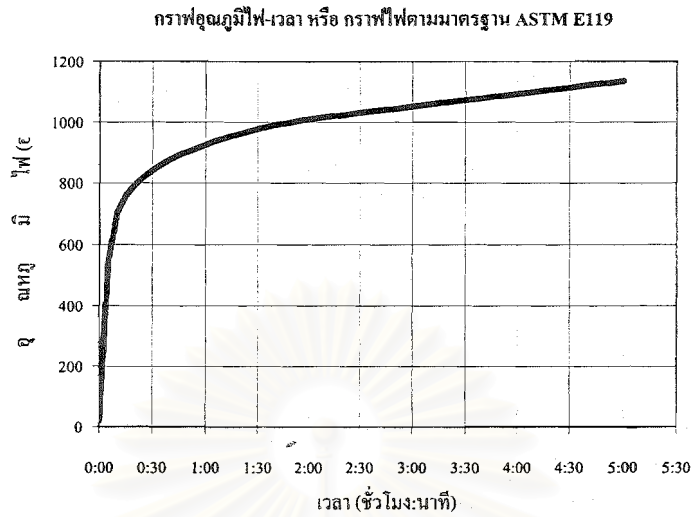
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่มีการปรับแก้ผลเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของความหนาของวัสดุกันไฟ  
ของตัวอย่างทดสอบที่ค่าอุณหภูมิวิกฤติ 650 องศาเซลเซียส

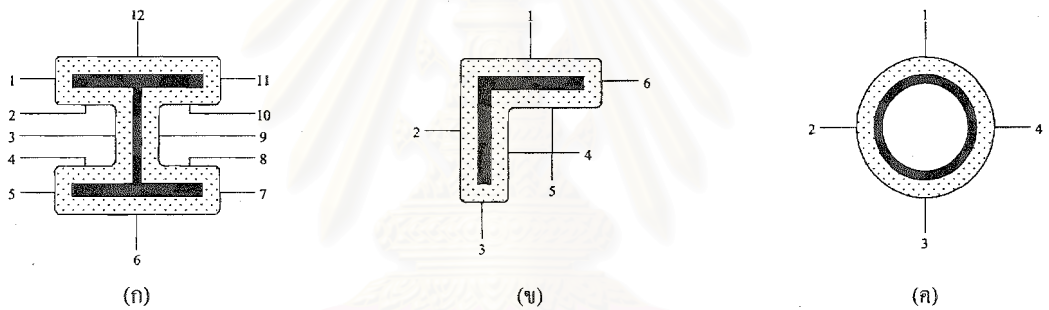
ตัวอย่างทดสอบ	$H_{ps}/A_s$ (ม <sup>-1</sup> )	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)				
		B	P1	P2	I1	I2
W1	331	12.3	74.8	-	33.0	72.7
W2	291	14.0	72.5	-	38.1	87.3
W3	268	13.9	76.4	-	41.3	79.6
W4	243	17.0	85.7	-	54.1	84.3
W5	202	19.2	84.6	-	67.1	99.1
L1	344	11.6	66.1	129.2	25.6	44.7
L2	295	15.3	76.8	139.7	30.8	49.7
L3	266	15.5	65.7	134.2	34.5	55.9
L4	236	17.2	77.6	149.1	38.7	66.5
L5	212	16.8	74.7	148.6	34.8	63.3
L6	181	21.2	77.9	166.1	45.5	68.9
CHS1	518	6.9	52.0	96.1	18.3	28.5
CHS2	375	8.9	55.1	107.1	24.1	32.6
CHS3	343	7.6	61.2	117.2	20.4	66.3
CHS4	262	12.4	65.6	113.4	27.7	62.3
CHS5	231	11.1	70.0	134.0	46.5	78.4

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

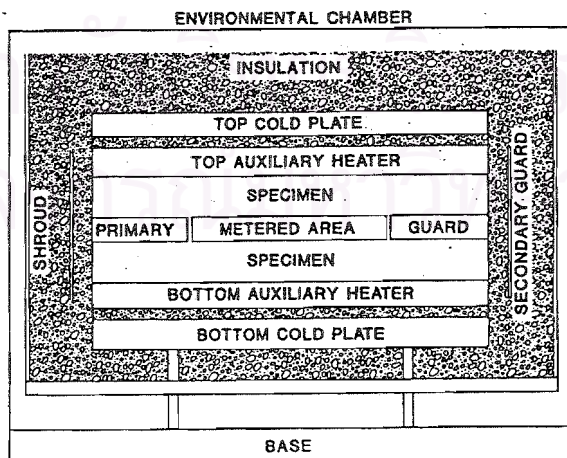
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 กราฟอุณหภูมิไฟ-เวลา หรือกราฟไฟตามมาตรฐาน ASTM E119

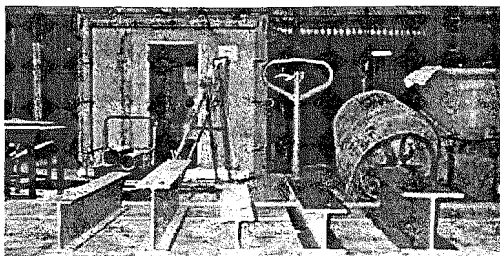


รูปที่ 4.2 ตำแหน่งสำหรับวัดความหนาของวัสดุกันไฟบนตัวอย่างทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E605 และที่ใช้จริงในงานวิจัยนี้ (ก) เหล็กไวต์แพลนจ์ (ข) เหล็กฉาก (ค) ท่อเหล็กกลมกลวง

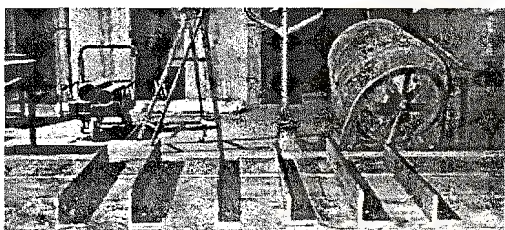


รูปที่ 4.3 อุปกรณ์สำหรับวัดค่าการนำความร้อนในสภาวะคงที่ตามมาตรฐาน ASTM C177

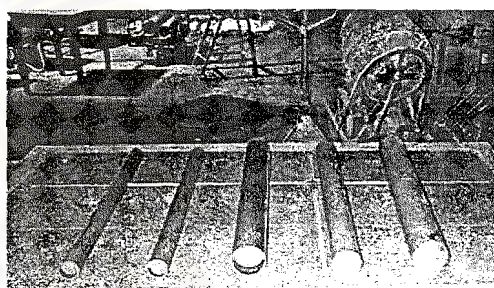




(ก)

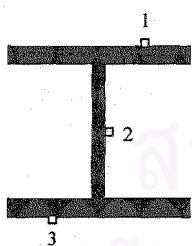


(ข)

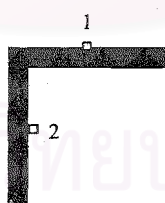


(ค)

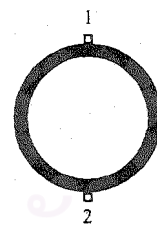
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายขนาดและรูปร่างของตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย (ก) เหล็กไวด์แฟลนจ์ (ข) เหล็กฉาก (ค) ท่อเหล็กกลมกลวง



(ก)



(ข)



(ค)

□ ตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล

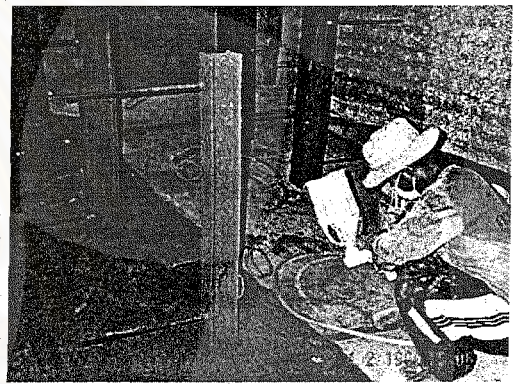
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งสำหรับติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนตัวอย่างทดสอบ (ก) เหล็กไวด์แฟลนจ์ (ข) เหล็กฉาก (ค) ท่อเหล็กกลมกลวง



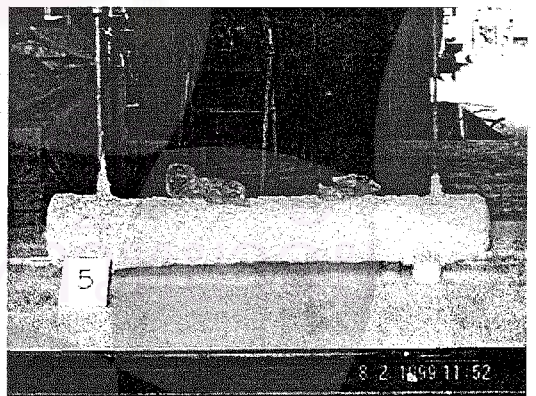
รูปที่ 4.6 ภาพตัวอย่างทดสอบก่อนที่จะทำการพ่นหรือทาด้วยวัสดุกันไฟ



(ก) การผสมวัสดุกันไฟกับน้ำก่อนพ่น



(ข) ขณะกำลังพ่นโดยใช้เครื่องพ่นแบบปั๊มแรงดัน

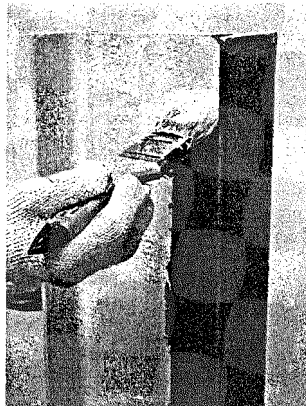


(ค) ตัวอย่างทดสอบที่พ่นวัสดุกันไฟเสร็จเรียบร้อยแล้ว

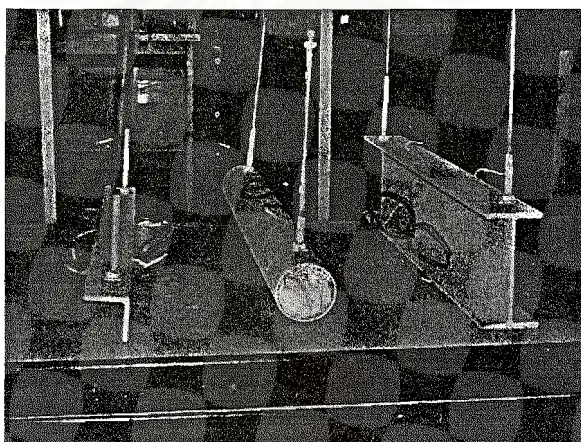
รูปที่ 4.7 ภาพขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิซที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม



(ก) การขัดผิวเหล็กด้วยการพ่นทราย

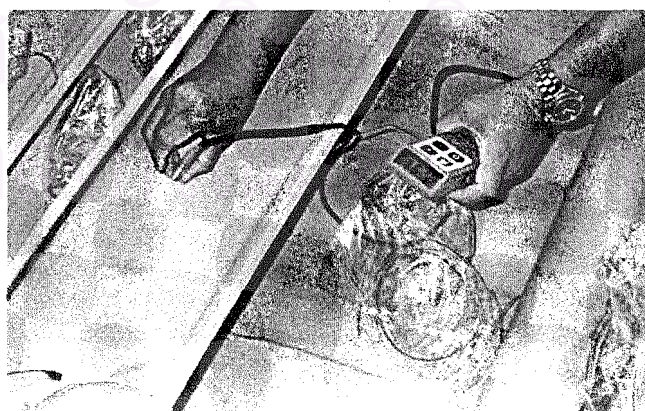


(ข) การทาสีกันไฟ

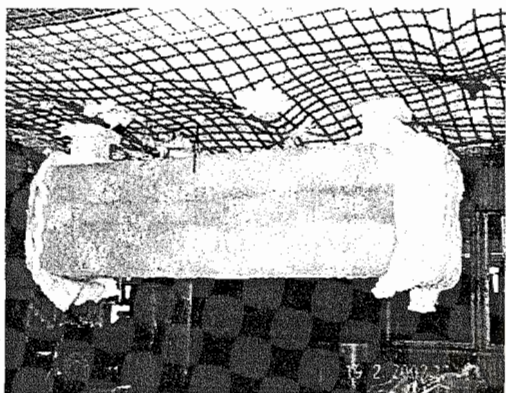


(ค) ตัวอย่างทดสอบที่พื้นวัสดุกันไฟเสร็จเรียบร้อยแล้ว

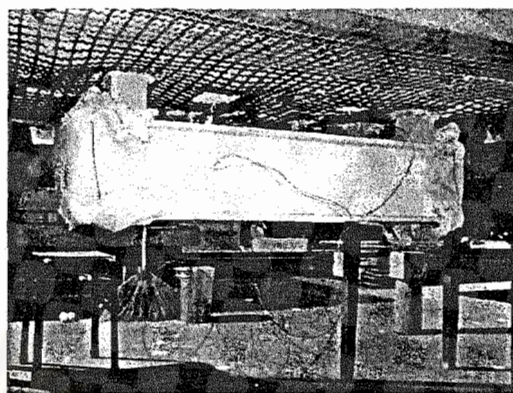
รูปที่ 4.8 ภาพขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ



รูปที่ 4.9 แสดงการวัดความหนาของสีกันไฟด้วยเครื่องมือวัดความหนาแบบดิจิตอล

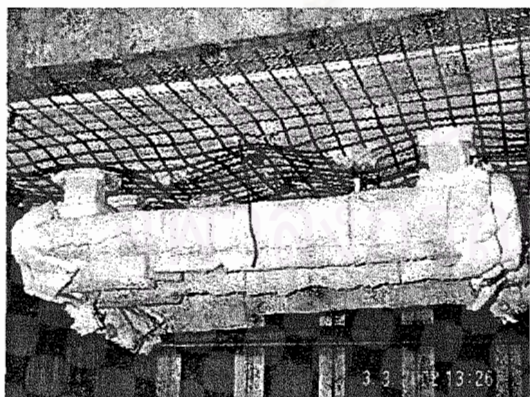
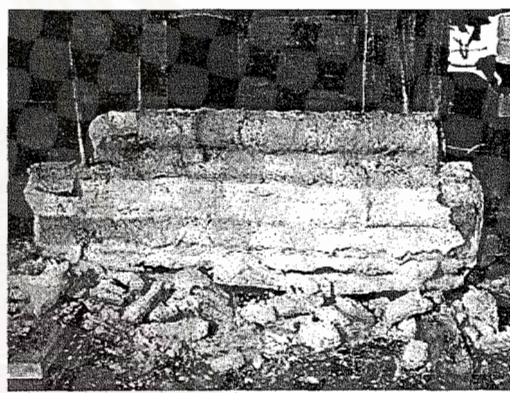
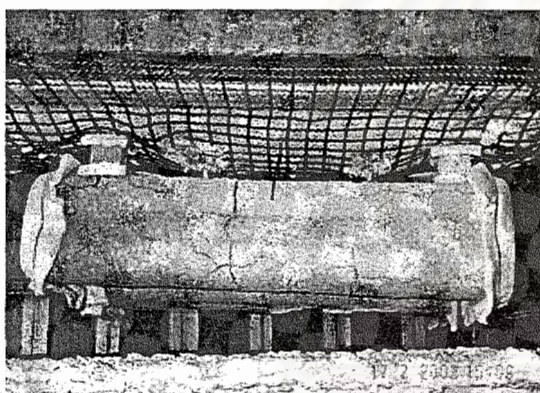


(ก)

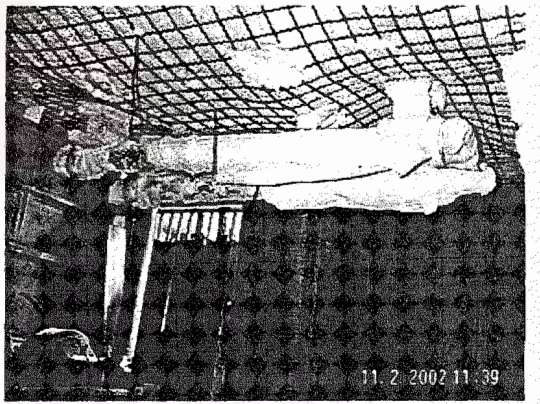
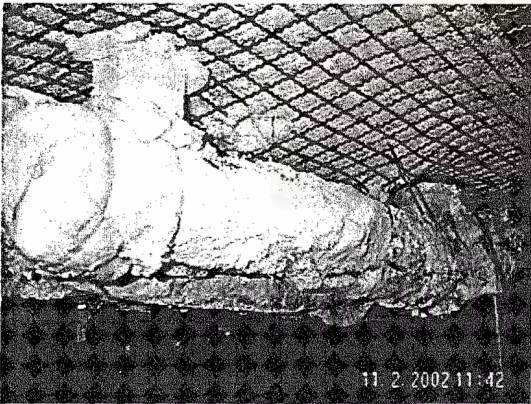
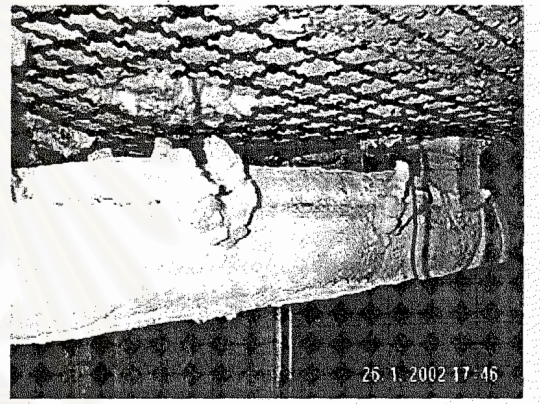
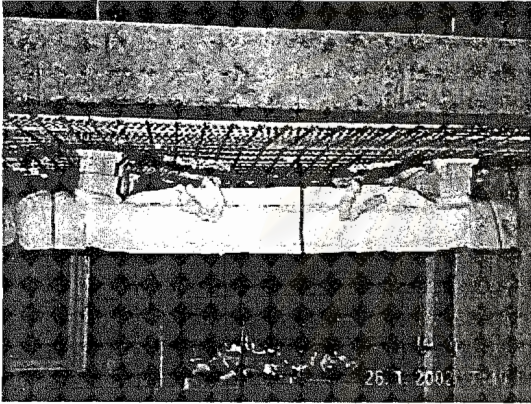
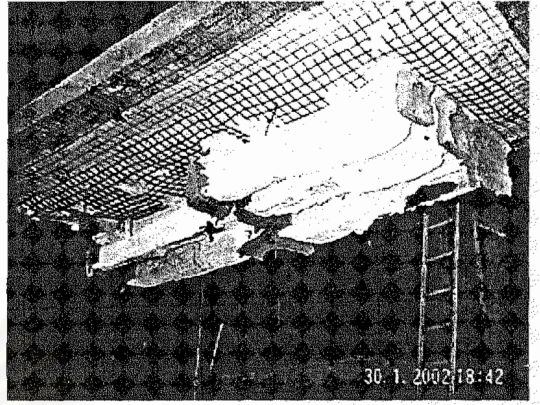


(ข)

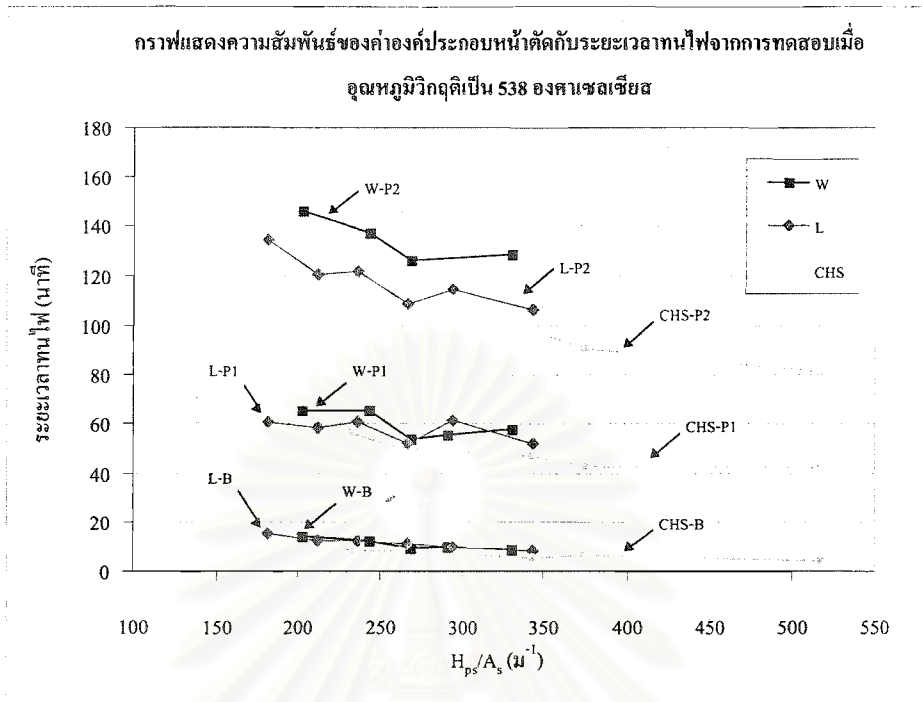
รูปที่ 4.10 ภาพการติดตั้งตัวอย่างทดสอบกับฝาเดาก่อนการทดสอบ (ก) ตัวอย่างทดสอบวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์  
เชิซที่มีแร่เพอร์ไลท์เป็นส่วนผสม (ข) ตัวอย่างทดสอบวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ



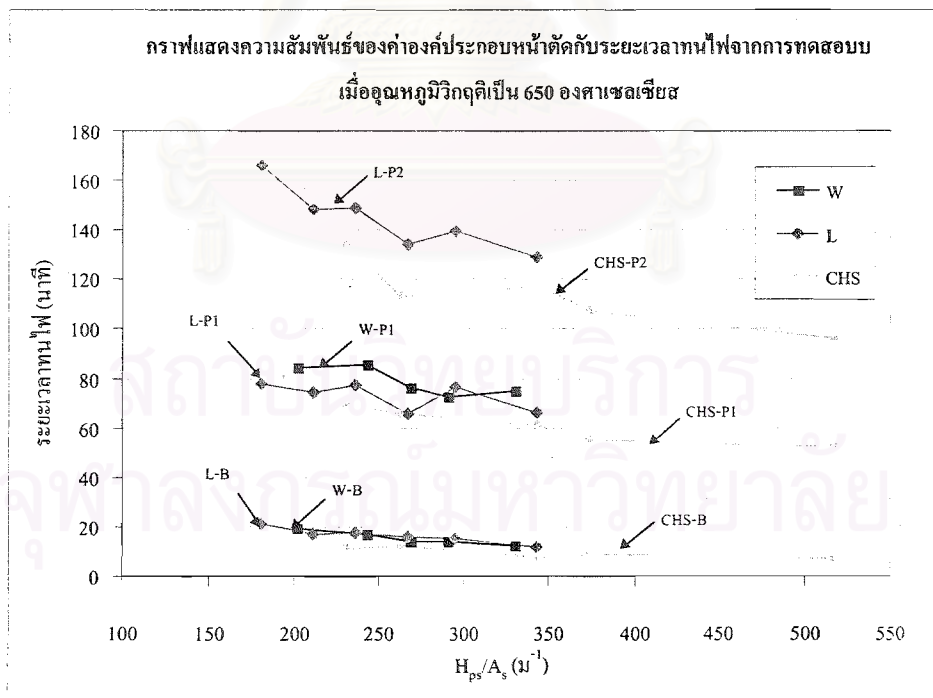
รูปที่ 4.11 ภาพตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิซภายหลังการทดสอบ



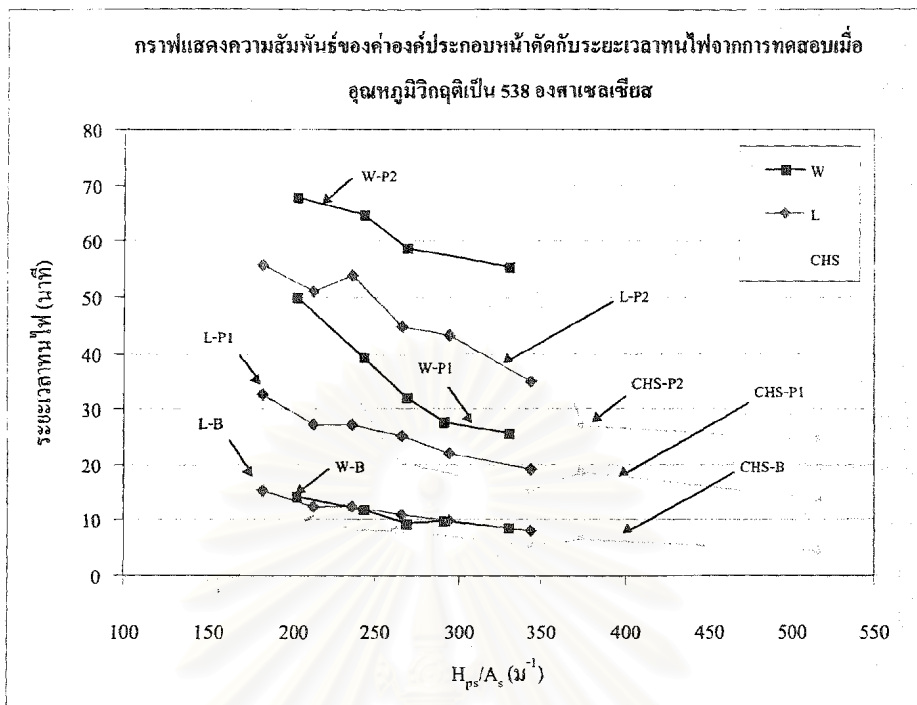
รูปที่ 4.12 ภาพตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟภายหลังการทดสอบ



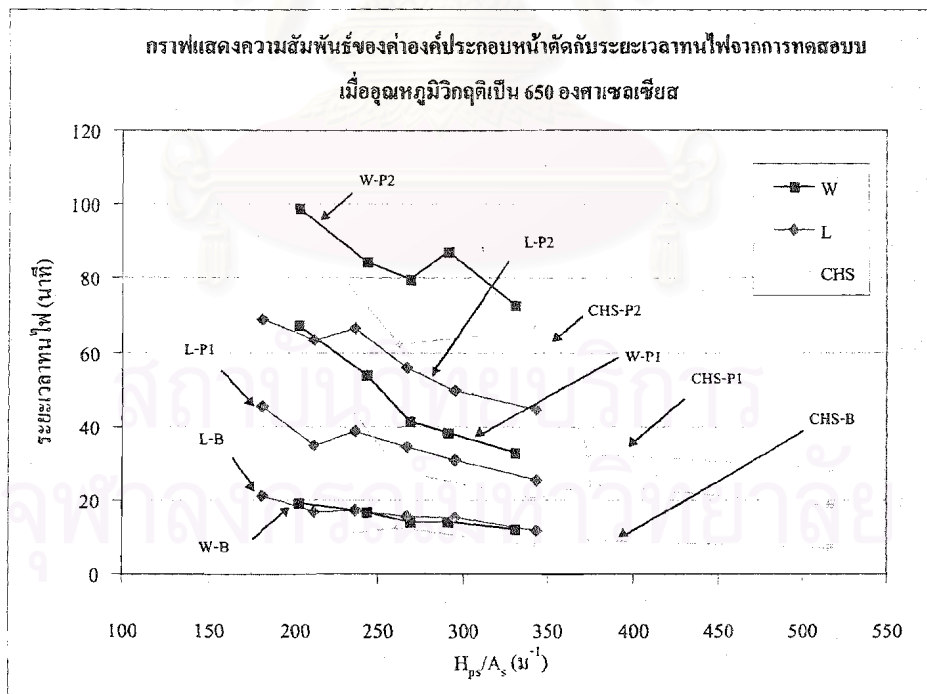
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุ  
กันไฟประเภทซีเมนต์เซ็สเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุ  
กันไฟประเภทซีเมนต์เซ็สเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุ  
กันไฟประเภทสีกันไฟเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่ใช้วัสดุ  
กันไฟประเภทสีกันไฟเมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### การวิเคราะห์ผลการทดสอบด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน

#### 5.1 ทัวไป

ผลการทดสอบที่ได้จากบทก่อนหน้าจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน ปัญหาที่ทำการศึกษานี้สำหรับงานวิจัยนี้เป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่เนื่องจากความร้อนหรืออุณหภูมิของวัตถุจะแปรเปลี่ยนไปได้ตามแต่ละตำแหน่งและเวลา แต่เนื่องจากความยุ่งยากของรูปทรงทางเรขาคณิตทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลด้วยการแก้ออกมาเป็นสมการคำตอบได้จึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการหาคำตอบ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีการวิเคราะห์ผลด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนอีกลักษณะหนึ่งซึ่งเป็นวิธีการโดยประมาณแต่สามารถหาคำตอบได้อย่างง่ายดายกว่าวิธีการแก้ปัญหาคำตอบแบบสองมิติดังกล่าวอีกทั้งยังทำให้ทราบถึงปัจจัยที่จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี วิธีการนี้เรียกว่า วิธีการวิเคราะห์ระบบแบบลัมป์ ซึ่งจะได้อธิบายถึงในลำดับถัดไป

จุดประสงค์ในส่วนนี้ นอกจากต้องการเปรียบเทียบผลการทดสอบการทนไฟจริงกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแล้ว ยังต้องการศึกษาด้วยว่ามีองค์ประกอบใดบ้างที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขององค์อาคารเหล็กซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณออกแบบวิธีการป้องกันไฟให้โครงสร้างเหล็กได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมต่อไป อย่างไรก็ตาม วิธีการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนไม่สามารถวิเคราะห์กับปัญหาขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟได้ เนื่องจากสีกันไฟเมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ทั้งทางกายภาพและเคมีซึ่งยังไม่มีแบบจำลองหรือสมการใดๆที่อธิบายถึงคุณสมบัติทางด้านความร้อนและการเปลี่ยนแปลงความหนาของสีกันไฟในขณะที่สัมผัสไฟได้ อีกทั้งจากการทดสอบจริงพบว่าการขยายตัวของสีกันไฟไม่มีความสม่ำเสมอตลอดชิ้นงานทำให้การสร้างแบบจำลองมีความยุ่งยากมากและซับซ้อนมากกว่าขอบเขตของงานวิจัยครั้งนี้

#### 5.2 การวิเคราะห์หาค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสทีใช้ในการทดสอบ

คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุกันไฟที่สำคัญมีสามประการด้วยกันคือ ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อน คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุใดๆจะแปรเปลี่ยนได้ตามค่าอุณหภูมิซึ่งจะสังเกตว่าเมื่อบอกถึงค่าของคุณสมบัติดังกล่าวจะต้องมีการระบุถึงอุณหภูมิที่ทำการวัดหรือทดสอบด้วยเสมอ แต่สำหรับวัสดุประเภทฉนวนกันไฟแล้วค่าความหนาแน่นและค่าความร้อนจำเพาะจะเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไปดังนั้นสามารถใช้เป็นค่าคงที่ได้โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดที่มีความสำคัญ แต่ค่าการนำความร้อนของวัสดุประเภท



ฉนวนกันไฟมักจะมามีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เซียมที่ใช้ในงานวิจัยที่ปรากฏในหัวข้อที่ 4.7 เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบในสภาวะคงที่กล่าวคือจะวัดค่าการนำความร้อนของวัสดุในขณะที่ระบบอยู่ในสภาวะสมดุลในขณะที่มีอุณหภูมิเป็น 80 ถึง 100 องศาเซลเซียส แต่ปัญหาที่ทำการศึกษานี้อุณหภูมิของวัสดุกันไฟสามารถสูงได้ถึง 1,000 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟที่ใช้ที่ค่าอุณหภูมิอื่นๆด้วย ทั้งนี้เพื่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี

วิธีการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือการทดลองสุ่มค่าการนำความร้อนแบบเชิงเส้นโดยให้มีค่าการนำความร้อนที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นไปตามค่าที่ได้จากการทดสอบจริงซึ่งในที่นี้คือ 0.104 W/m°C และเปลี่ยนความชันเส้นกราฟไปเรื่อยๆ นำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์เทียบกับผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบในบทก่อนหน้าจนผลการวิเคราะห์นี้กับผลการทดสอบจริงมีความสอดคล้องกันมากที่สุด วิธีที่ใช้วิเคราะห์ในครั้งนี้คือการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ไฟในอิลิเมนต์ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมดังกล่าวจะกล่าวถึงอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไปแต่ในขั้นนี้จะแสดงเฉพาะผลของการวิเคราะห์เท่านั้น ตัวอย่างทดสอบที่เลือกใช้ในการหาค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟมี 3 ตัวอย่างด้วยกันคือ ตัวอย่างทดสอบหมายเลข W1-P1 , W5-P1 และ CHS1-P1 ซึ่งมีรายละเอียดเป็นดังนี้

ตัวอย่างทดสอบ	ขนาดเหล็ก	ความหนาวัสดุกันไฟเฉลี่ย (มม.)
W1-P1	W 150 x 14.0	19.4
W5-P1	W 175 x 40.2	19.0
CHS1-P1	φ 2" x 2.0 มม.	23.5

เริ่มต้นจะทำการวิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ก่อน โดยใช้แบบจำลองของค่าการนำความร้อน 3 แบบดังรูปที่ 5.1 โดยเริ่มที่แบบจำลอง K1 ซึ่งให้ค่าการนำความร้อนมีค่าคงที่เป็น 0.104 W/m°C ซึ่งพบว่าค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวอย่างทดสอบจริงค่อนข้างมาก รูปที่ 5.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอุณหภูมิกับเวลาของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่ได้จากการทดสอบเทียบกับที่ได้จากการวิเคราะห์ เพิ่มความชันของเส้นตรงแบบจำลองค่าการนำความร้อนขึ้นเป็นแบบ K2 และ K3 และจากรูปที่ 5.2 จะได้ว่าผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองค่าการนำความร้อน K3 ดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบได้ดีที่สุด แบบจำลองค่าการนำความร้อนแบบ K3 มีสมการความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$k_p = 1.065 \times 10^{-4} T_p + 9.35 \times 10^{-2} \quad (5.1)$$

เมื่อ  $k_p$  = ค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟ (W.m°C)

$T_p$  = อุณหภูมิของวัสดุกันไฟ (°C)

ตรวจสอบแบบจำลองค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟจากสมการที่ 5.1 กับตัวอย่างทดสอบ W5-P1 และ CHS1-P1 ได้ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบการทนไฟจริงได้ดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวจะเห็นว่าค่าการนำความร้อนแบบ K3 ยังให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบ CHS1-P1 มาก แต่ในกรณีของตัวอย่างทดสอบ W5-P1 ค่าอุณหภูมิที่วิเคราะห์ได้จะต่ำกว่าผลการทดสอบจริงอยู่ประมาณ 50 องศาเซลเซียส แต่อย่างไรก็ตาม จุดประสงค์ของการวิเคราะห์หาค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟนี้ไม่ได้ต้องการให้ได้ค่าการนำความร้อนที่ถูกต้องสำหรับทุกตัวอย่างทดสอบเนื่องจากวัสดุกันไฟที่ใช้เป็นวัสดุที่ไม่มีความเป็นเนื้อเดียวกันคุณสมบัติต่างๆอาจเปลี่ยนแปลงไปได้ อีกทั้งยังมีปัจจัยต่างๆมากมายที่ไม่สอดคล้องกับสมมติฐานของการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะคงที่ อันได้แก่ ผลของความชื้นในช่วงต้นของการทดสอบ และของรอยแตกร้าวของชิ้นตัวอย่างทั้งก่อนและในขณะที่ทำการทดสอบการทนไฟ เป็นต้น แต่จุดประสงค์ในส่วนนี้เพื่อให้ได้ค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เรียบที่ใช้ที่มีความถูกต้องมากกว่าการใช้ค่าคงที่สำหรับทุกขณะอุณหภูมิ ดังนั้นในการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในส่วนต่อไปจะใช้แบบจำลอง K3 นี้แทนค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟที่ใช้ที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 0 – 1000 องศาเซลเซียส

### 5.3 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่

#### 5.3.1 วิธีการในการแก้ปัญหา

ปัญหาที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนจากไฟเข้าไปยังเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่อยู่ภายในวัสดุกันไฟซึ่งเป็นปัญหาการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติเนื่องจากถือว่าเหล็กมีความยาวมากดังนั้นการถ่ายเทความร้อนในระนาบหน้าตัดจะมีผลมากกว่าการถ่ายเทความร้อนในแนวแกนและเป็นปัญหาในสถานะไม่คงที่เนื่องจากอุณหภูมิไฟที่ให้แก่ตัวอย่างทดสอบไม่คงที่และจะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่เผาไฟซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหาคำตอบได้โดยการวิเคราะห์แบบธรรมดา วิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาในงานวิจัยนี้คือการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมไฟในอิลิเมนต์คอมพิวเตอร์ซึ่งมีรายละเอียดและวิธีการดังนี้

##### 5.3.1.1 แบบจำลองหน้าตัดตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบที่จะทำการวิเคราะห์คือตัวอย่างชุดเดียวกับที่ทำการทดสอบการทนไฟคือเป็นเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีหน้าตัดเป็นเหล็กไวต์แพลนจ์ เหล็กฉาก และท่อเหล็กกลมกลวงทั้งที่ไม่มีกรงป้องกันไฟและการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เรียบ และจะใช้สัญลักษณ์เดียวกับที่ใช้ในการทดสอบการทนไฟ ในการสร้างแบบจำลองของตัวอย่างทดสอบอาจไม่จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองเต็มทั้งหมดเนื่องจากเป็นรูปทรงทางเรขาคณิตที่มีความสมมาตรกันดังนั้นจึงสร้างแบบจำลองสำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กที่มีหน้าตัดต่างๆกันได้ดังรูปที่ 5.5 ความหนาของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม B, P1 และ P2 เป็น 0, 20 และ 40 มิลลิเมตร ตามลำดับ หนึ่งในกรณีของแบบจำลองสำหรับท่อเหล็กกลมกลวงจะสมมติให้อุณหภูมิของอากาศภายในท่อมีค่าเท่ากับอุณหภูมิที่ผิวภายในของท่อเหล็กทั้งนี้เพื่อความง่ายของการวิเคราะห์

### 5.3.1.2 ค่าคงที่ทางด้านความร้อน

ค่าคงที่ทางด้านความร้อนของเหล็กและวัสดุกันไฟที่ใช้เป็นดังนี้

#### เหล็ก

ความหนาแน่น, $\rho_s$	7,850 kg/m <sup>3</sup>
ความร้อนจำเพาะ, $c_s$	$c_s = 475 + 6.01 \times 10^{-4} T_s^2 + 9.46 \times 10^{-2} T_s$ J/kg°C
ค่าการนำความร้อน, $k_s$	$k_s = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_s$ W/m°C

#### วัสดุกันไฟ

ความหนาแน่น, $\rho_p$	890 kg/m <sup>3</sup>
ความร้อนจำเพาะ, $c_p$	970.1 J/kg°C
ค่าการนำความร้อน, $k_p$	$k_p = 1.065 \times 10^{-4} T_p + 9.35 \times 10^{-2}$ W/m°C

### 5.3.1.3 ค่าคงที่เกี่ยวกับการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

สปส.การพาความร้อน, $h_c$	25 W/m <sup>2</sup> °C
ค่าการเปล่งรังสีความร้อน, $\varepsilon$	0.56
ค่าตัวแปรรูปร่าง, $\phi$	1.00
ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzmann, $\sigma$	$5.67 \times 10^{-8}$ W/m <sup>2</sup> °C <sup>4</sup>

### 5.3.1.4 ความรุนแรงไฟ

ความรุนแรงไฟใช้ตามกราฟไฟตามมาตรฐาน ASTM E119

### 5.3.1.5 ชั้นคอนกรีตและรายละเอียดในการวิเคราะห์

ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์ในรูปของอุณหภูมิตามกราฟไฟตามมาตรฐาน ASTM E119 ความร้อนจากไฟดังกล่าวจะถ่ายเทเข้าสู่ผิวของตัวอย่างทดสอบโดยกระบวนการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจากนั้นความร้อนจะถ่ายเทจากผิวด้านนอกของวัสดุกันไฟเข้าสู่ผิวด้านนอกของเหล็กด้วยกระบวนการนำความร้อน วิเคราะห์ตัวอย่างทดสอบจนถึงจุดวิบัติของโครงสร้างซึ่งในที่นี้จะวัดเป็นค่าอุณหภูมิวิกฤติที่ 538 และ 650 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิวิกฤติเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบการทนไฟ

### 5.3.2 ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ดังกล่าวจะแสดงในรูปที่ 5.6 ถึง 5.8 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเผาไฟกับค่าอุณหภูมิที่ผิวของเหล็กสำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กที่หน้าตัดเป็นแบบเหล็กไวค์แพลนซ์ เหล็กฉาก และท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ ตารางที่ 5.1 จะสรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างทดสอบต่างๆเมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส รูปที่ 5.9 และ 5.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส ตามลำดับ รูปที่ 5.11 จะแสดงเส้นวงรอบของการกระจายของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ พิจารณารูปที่ 5.9 และ 5.10 จะพบว่าผลการวิเคราะห์โดยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนโดยใช้โปรแกรมไฟในอิลิเมนต์ให้คำตอบที่สอดคล้องกับผลการทดสอบการทนไฟที่ผ่านมา กล่าวคือสำหรับเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มีกรงป้องกันไฟเส้นกราฟของตัวอย่างทดสอบทั้งสามรูปร่างหน้าตัดจะทับกันสนิทเป็นเส้นเดียวกัน ค่าความสามารถทนไฟจะขึ้นกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดเท่านั้นโดยไม่ขึ้นกับรูปร่างของหน้าตัดแต่อย่างใด โดยเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดเพิ่มขึ้นความสามารถทนไฟของโครงสร้างเหล็กจะลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างกันนักเนื่องจากความชันของเส้นกราฟน้อยมาก

แต่ในกรณีที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เรียบค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะไม่ขึ้นกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดแต่เพียงอย่างเดียวเนื่องจากจะสังเกตว่าที่ความหนาของวัสดุกันไฟเท่ากันเส้นกราฟของเหล็กทั้งสามรูปร่างหน้าตัดจะแยกกันอย่างชัดเจนและจากแยกจากกันมากขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสำหรับเหล็กรูปร่างหน้าตัดเดียวกันค่าความสามารถทนไฟจะขึ้นกับค่าองค์ประกอบหน้าตัด โดยเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดเพิ่มขึ้นความสามารถทนไฟของโครงสร้างเหล็กจะลดลงและเห็นชัดเจนขึ้นกว่าในกรณีที่ไม่มีการป้องกันไฟ เปรียบเทียบระหว่างผลการทดสอบการทนไฟจริงกับผลการวิเคราะห์จะสังเกตว่าค่าความสามารถทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์จะสูงกว่าผลที่ได้จากการทดสอบจริง ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอาจมาได้จากสาเหตุหลายประการด้วยกัน คือ

1) วัสดุกันไฟที่ใช้ในการทดสอบจริงเป็นวัสดุที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันดังนั้นค่าคุณสมบัติต่างๆอาจแตกต่างกันได้สำหรับตัวอย่างทดสอบหนึ่งๆ แต่ในการวิเคราะห์จะสมมติให้ตัวอย่างทดสอบทุกตัวอย่างมีคุณสมบัติต่างๆเหมือนกัน ดังนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการวิเคราะห์ที่ได้

2) ในการวิเคราะห์มีการสมมติให้ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุกันไฟมีค่าที่ซึ่งจริงๆแล้วอาจมีค่าเปลี่ยนแปลงได้บ้างตามค่าอุณหภูมิ

3) ค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มาจากการทำการวิเคราะห์ย้อนกลับตัวอย่างทดสอบที่ได้มีการทดสอบการทนไฟจริงโดยการสุ่มมาเพียงบางตัวอย่างเท่านั้น ซึ่งอาจไม่ใช่ตัวแทนของตัวอย่างโดยส่วนใหญ่จริงๆ

4) ผลของความชื้นในตัวอย่างทดสอบการทนไฟจริงซึ่งจะส่งผลในการหน่วงอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กในช่วงแรกของการทดสอบ แต่ในการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนไม่สามารถพิจารณาผลกระทบของความชื้นนี้ได้

5) ความหนาที่วัดได้จริงจากตัวอย่างทดสอบการทนไฟเป็นเพียงความหนาเฉลี่ยเท่านั้น บางตำแหน่งบนตัวอย่างทดสอบอาจมีความหนาน้อยกว่านี้ได้มากเช่นบริเวณขอบมุมของเหล็ก ไรด์เพลนจ์และเหล็กฉากซึ่งเป็นผลมาจากการใช้วิธีการพ่นทำให้บริเวณนี้มีลักษณะโค้งมนไม่เป็นเหลี่ยมมุมเหมือนแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

6) ค่าคงที่เกี่ยวกับการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้มาจากข้อแนะนำในหนังสือหรือตำราที่เกี่ยวข้องเท่านั้นซึ่งอาจไม่ถูกต้องกับค่าที่ใช้ทดสอบจริงและอาจทำให้ผลการวิเคราะห์ผิดไปได้

ถึงแม้สาเหตุดังกล่าวอาจทำให้ผลการทดสอบจริงกับผลการวิเคราะห์ไม่ตรงกันทีเดียว แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มและความสัมพันธ์ที่ตรงกันถือว่ามีความสำคัญมากกว่ากับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้

#### 5.4 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพท์ที่เสนอโดย Malhotra

จากสมการที่ 2.19 และ 2.20 ที่ใช้ในการคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่เสนอโดย Malhotra นำมาวิเคราะห์ผลโดยใช้คุณสมบัติของวัสดุและค่าคงที่ต่างๆเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา ตารางที่ 5-1 และ 5-2 ในภาคผนวก ข. จะแสดงตัวอย่างการคำนวณสำหรับตัวอย่างทดสอบ W1-B และ W1-P1 โดยใช้สมการดังกล่าว และจะได้ผลการวิเคราะห์ทั้งหมดดังรูปที่ 5.12 ถึง 5.14 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิของเหล็กที่ระยะเวลาการเผาไฟต่างๆ สำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็ก ไรด์เพลนจ์ เหล็กฉาก และท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ ตารางที่ 5.2 จะสรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างทดสอบต่างๆเมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างเหล็กได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.15 และ 5.16 จากรูปดังกล่าวจะพบว่าเมื่อความหนาของวัสดุทนไฟเท่ากันค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างเหล็กจะขึ้นกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดเพียงอย่างเดียวเท่านั้นโดยไม่ขึ้นกับว่าเหล็กจะมีรูปร่างเป็นอย่างไร ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบจริงและผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่อย่างไรก็ตามเส้นกราฟในกรณีที่ไม่มีการป้องกันไฟและในกรณีของเหล็ก ไรด์เพลนจ์จะมีความใกล้เคียงกับเส้นกราฟในกรณีเดียวกันในรูปที่ 5.9 และ 5.10 ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่เป็นอย่างมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% แต่สำหรับเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวงการคำนวณโดยใช้วิธีนี้จะให้ค่าความสามารถทนไฟที่สูงกว่าผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่เสมอ โดยอาจเกิดความคลาดเคลื่อนสูงถึง 50%

## 5.5 แบบจำลองสำหรับการคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เสนอในงานวิจัยนี้

จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์ระบบแบบลัมพ์ที่เสนอโดย Malhotra ในหัวข้อก่อนหน้านี้จะพบว่าผลการวิเคราะห์สำหรับกรณีที่ไม่มีการป้องกันไฟและในกรณีของเหล็กไวต์ไฟแลนจ์มีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติอย่างมาก นั่นคือสมการและวิธีการในการคำนวณดังกล่าวยังมีความถูกต้องอยู่บ้างเพียงแต่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบบางอย่างเพื่อให้ถูกต้องมากขึ้นกว่าเดิม ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เสนอวิธีการปรับปรุงสมการสำหรับคำนวณการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กดังต่อไปนี้

### 5.5.1 พื้นที่หน้าตัดของวัสดุกันไฟ

จากสมการที่ 2.15 Malhotra เสนอให้ใช้ค่า  $H_{ps} d_p$  แทนค่าพื้นที่หน้าตัดของวัสดุกันไฟทั้งหมดซึ่งอาจไม่ถูกต้องเนื่องจากจะยังขาดพื้นที่ไปบางส่วน พื้นที่ดังกล่าวอาจมีความสำคัญน้อยถ้าความหนาของวัสดุกันไฟน้อยๆ แต่ถ้ามีความหนามากขึ้นพื้นที่ส่วนดังกล่าวจะมีความสำคัญขึ้นได้ ค่าพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของวัสดุกันไฟที่ถูกต้องจะแสดงไว้ในรูปที่ 5.17 แต่อย่างไรก็ตามการใช้ค่าดังกล่าวตามที่เสนอโดย Malhotra จะให้ค่าตอบในด้านที่ปลอดภัยในแง่ของการออกแบบเนื่องจากพื้นที่หน้าของวัสดุกันไฟจะเกี่ยวข้องกับปริมาณความร้อนที่วัสดุกันไฟเก็บกักไว้ได้ซึ่งถ้ามีค่าน้อยลงจะทำให้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กมีค่าสูงขึ้น

### 5.5.2 เส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนประสิทธิภาพ

จากสมการที่ 2.17 Malhotra ใช้ค่า  $H_{ps}$  ซึ่งเป็นค่าเส้นรอบรูปพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนของเหล็กเพียงอย่างเดียวใช้แทนค่าพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนทั้งในกรณีขององค์อาคารเหล็กที่ไม่มีการป้องกันไฟและมีการป้องกันไฟ ซึ่งอาจไม่ถูกต้องเนื่องจากในกรณีที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟค่าเส้นรอบรูปพื้นที่ผิวดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าค่า  $H_{ps}$  ซึ่งอาจพิจารณาได้ดังรูปที่ 5.11 ซึ่งแสดงเส้นวงรอบของการกระจายของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ จากรูปที่ 5.11 (ก) และ (ข) จะสังเกตว่าความร้อนจะถ่ายเทโดยกระบวนการนำความร้อนจากผิวด้านนอกของวัสดุกันไฟเข้าไปยังเหล็กโครงสร้างรูปพรรณในสองลักษณะด้วยกันคือ

- 1) บริเวณส่วนกลางของแต่ละด้านหรือแผ่นของเหล็ก ความร้อนจะเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับความกว้างของแผ่นซึ่งสังเกตจากเส้นระดับชั้นของอุณหภูมิที่มีลักษณะขนานกับความกว้างของแผ่น ดังนั้นความยาวพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนในส่วนนี้จะเท่ากับความกว้างของแผ่นทั้งหมดรวมกัน
- 2) บริเวณมุมทั้งภายในและภายนอกของเหล็ก ความร้อนจะเคลื่อนที่ในสองทิศทางด้วยกันคือในทิศทางแนวราบและแนวตั้งเข้าหามุมซึ่งสังเกตจากเส้นระดับชั้นของอุณหภูมิที่มีลักษณะโค้งเข้าหามุม ดังนั้นความยาวพื้นที่ผิวที่สัมผัสความร้อนในส่วนนี้จะเท่ากับความยาวของเส้นโค้งดังกล่าว ในกรณีของมุมภายนอกจะประมาณความยาว

ส่วนโค้งนี้ให้เท่ากับเส้นตรงที่ตัดผ่านมุมๆนั้นในแนว 45 องศา ในกรณีมุมภายในซึ่งเป็นมุมอับเหล็กบริเวณนี้จะได้รับปริมาณความร้อนน้อยกว่าบริเวณอื่นดังนั้นจะสมมติให้ความยาวพื้นผิวที่สัมผัสความร้อนบริเวณนี้วางอยู่นอกแนวเส้นขอบของวัสดุกันไฟในทิศทาง 45 องศาทั้งนี้เพื่อเป็นการชดเชยผลของความร้อนที่เหล็กบริเวณนี้ได้รับน้อยกว่าบริเวณอื่นและเพื่อให้ถูกต้องกับสมมติฐานของทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์ซึ่งพิจารณาให้ทุกตำแหน่งภายในระบบมีอุณหภูมิเท่ากัน

ในกรณีของท่อเหล็กกลมกลวง เส้นระดับชั้นของอุณหภูมิในรูปที่ 5.11 (ค) จะเป็นเส้นโค้งตามความโค้งของท่อ ดังนั้นความยาวพื้นผิวที่สัมผัสความร้อนจะเท่ากับความยาวของเส้นโค้งภายนอก

รูปที่ 5.17 จะแสดงการคำนวณค่าความยาวพื้นผิวที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผลที่เสนอในงานวิจัยนี้ ค่าความยาวพื้นผิวดังกล่าวจะสมมติให้เท่ากับความยาวรอบรูปส่วนที่แรเงา ค่าความยาวพื้นผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนสุทธินี้จะเกี่ยวข้องกับปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทที่ผิวภายนอกของวัสดุกันไฟโดยกระบวนการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากค่าความยาวพื้นผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผลที่คำนวณได้ในรูปที่ 5.17 จะมีค่ามากกว่าค่าความยาวพื้นผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนของเหล็กแต่เพียงอย่างเดียวตามที่เสนอโดย Malhotra เสนอ ดังนั้นการใช้ค่าที่เสนอโดย Malhotra ดังกล่าวจะให้คำตอบที่ไม่ปลอดภัย

### 5.5.3 สมการสำหรับการคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กที่เสนอในงานวิจัยนี้

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{c_s \rho_s d_p} \left( \frac{H_{pe}}{A_s} \right) \left( \frac{T_f - T_s}{1 + \frac{\phi'}{2}} \right) \Delta t - \frac{\Delta T_f}{\left( 1 + \frac{2}{\phi'} \right)} \quad (5.2)$$

$$\phi' = \left( \frac{c_p \rho_p A_p}{c_s \rho_s A_s} \right) \quad (5.3)$$

เมื่อ  $H_{pe}$  = ความยาวพื้นผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผล ตามรูปที่ 5.17

$A_p$  = พื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของวัสดุกันไฟ ตามรูปที่ 5.17

$\phi'$  = สัดส่วนปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ได้ของวัสดุกันไฟเทียบกับเหล็ก

สมการที่ 5.2 และ 5.3 เป็นสมการที่พิสูจน์ได้ด้วยวิธีเดียวกับที่พิสูจน์สมการที่ 2.19 เพียงแต่เปลี่ยนมาใช้ค่าพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของวัสดุกันไฟและค่าความยาวพื้นผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผลตามที่ได้พิจารณามาก่อนหน้านี้

### 5.5.4 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้

ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน โดยใช้สมการที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้และใช้คุณสมบัติของวัสดุ และค่าคงที่ต่างๆเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา ตารางที่ ๕-1 ในภาคผนวก ๕. จะแสดงตัวอย่างการคำนวณสำหรับตัวอย่างทดสอบ WI-P1 โดยใช้สมการที่เสนอไว้ดังกล่าว และจะได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 5.18 ถึง 5.20 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาเผาไฟกับค่าอุณหภูมิที่ผิวของเหล็กสำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กไวด์แพลนจ์ เหล็กฉาก และท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ ตารางที่ 5.3 จะสรุปผลการระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์สำหรับตัวอย่างทดสอบต่างๆเมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบหน้าตัดกับค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างเหล็กได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.21 และ 5.22 จากรูปดังกล่าว จะพบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยสมการที่เสนอไว้นี้ให้คำตอบที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน โดยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่เป็นอย่างมากโดยมีความคลาดเคลื่อนที่ไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

### 5.5.5 การใช้ประโยชน์ในการออกแบบการป้องกันไฟให้แก่โครงสร้างเหล็ก

พิจารณาสมการที่ 5.3 ในกรณีที่ไม่มีพิจารณาผลของการดูดซับพลังงานความร้อนไว้ภายในของวัสดุกันไฟซึ่งจะให้คำตอบในด้านที่ปลอดภัยเสมอ สมการที่ 5.2 จะเปลี่ยนเป็นดังนี้

$$\Delta T_s = \frac{k_p}{c_s \rho_s d_p} \left( \frac{H_{pe}}{A_s} \right) (T_f - T_s) \Delta t \quad (5.4)$$

จากสมการที่ 5.4 จะพิจารณาได้ว่าสำหรับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยความหนาเท่ากันแล้ว องค์อาคารที่มีค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่ผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผลต่อค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็ก  $H_{pe}/A_s$  หรือเรียกว่า ค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผล มากกว่าจะมีความสามารถทนไฟน้อยกว่าเสมอซึ่งต่างจากข้อสรุปที่ได้จากสมการที่เสนอโดย Malhotra ตารางที่ 5.4 แสดงค่าองค์ประกอบหน้าตัดและค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลสำหรับตัวอย่างทดสอบต่างๆ รูปที่ 5.23 ถึง 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลกับค่าความสามารถทนไฟของเหล็กที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ และจากผลการทดสอบการทนไฟที่ได้จากบทที่ 4 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.23 และ 5.25 จะพบว่าสำหรับเหล็กที่มีความหนาของวัสดุกันไฟเท่ากันเหล็กที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลใกล้เคียงกันจะมีระยะเวลาทนไฟที่ใกล้เคียงกันด้วยไม่ว่าจะมีรูปร่างเป็นอย่างไร ดังนั้นในแง่ของการออกแบบการป้องกันไฟให้แก่โครงสร้างเหล็กการใช้ค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลดังกล่าวเป็นพื้นฐานในการออกแบบความหนาของวัสดุกันไฟจะให้คำตอบที่ถูกต้องและปลอดภัยกว่าการใช้ค่าองค์ประกอบหน้าตัดแต่เพียงอย่างเดียว



## 5.6 สรุป

จากผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนที่ผ่านมาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

- 1) ผลการทดสอบการทนไฟกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่ให้คำตอบที่สอดคล้องกันคือเมื่อไม่มีการป้องกันไฟความสามารถทนไฟของโครงสร้างเหล็กจะขึ้นกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดแต่เพียงอย่างเดียว แต่ในกรณีที่มีการป้องกันไฟจะขึ้นกับทั้งรูปร่างและค่าองค์ประกอบหน้าตัดของเหล็กด้วย
- 2) การคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กโดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอโดย Malhotra จะให้คำตอบที่ไม่สอดคล้องกับทั้งผลการทดสอบการทนไฟและผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่
- 3) สมการแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กที่เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่เป็นอย่างมาก โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์
- 4) จากสมการแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กที่เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้สรุปได้ว่าเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟเท่ากันค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณจะขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นรอบรูปพื้นผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผลต่อค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็กหรือเรียกว่า ค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผล ถ้าองค์อาคารใดมีค่าดังกล่าวมากกว่าจะมีความสามารถทนไฟที่ดีกว่า
- 5) เมื่อความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิสมเท่ากันเหล็กไวด์แพลนจ์จะมีความสามารถทนไฟสูงกว่าเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กไวด์แพลนจ์จะมีค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลต่ำกว่าของเหล็กฉาก และท่อเหล็กกลมกลวงจะมีค่าดังกล่าวสูงกว่าเหล็กรูปร่างอื่นๆ
- 6) จากการพิจารณาที่มาของค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผล ทำให้สรุปได้ว่าสำหรับเหล็กที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดเท่ากันเหล็กที่มีรูปร่างซึ่งมีจำนวนเหลี่ยมมุมมากกว่าจะมีความสามารถทนไฟที่สูงกว่า ยกตัวอย่างเช่น เหล็กไวด์แพลนจ์ เหล็กรางน้ำ และเหล็กฉากจะมีจำนวนเหลี่ยมมุมเป็น 12, 8 และ 6 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการแบบจำลองที่เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้จะได้ว่า เหล็กไวด์แพลนจ์จะมีความสามารถทนไฟสูงกว่าเหล็กรางน้ำและเหล็กฉาก ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	$H_{ps}/A_s$ ( $m^{-1}$ )	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)					
		อุณหภูมิวิกฤติ = 538 องศาเซลเซียส			อุณหภูมิวิกฤติ = 650 องศาเซลเซียส		
		B	P1	P2	B	P1	P2
W1	331	9.0	58.4	136.4	11.8	75.7	170.1
W2	291	9.4	60.7	139.9	12.3	78.8	175.4
W3	268	9.7	64.3	150.4	12.7	83.6	188.8
W4	243	10.0	67.0	153.0	13.2	87.3	192.7
W5	202	10.7	72.5	160.4	14.1	94.7	203.1
L1	344	9.1	53.6	118.2	11.9	69.4	146.7
L2	295	9.6	57.7	125.2	12.6	75.0	156.2
L3	266	10.0	59.6	126.6	13.1	77.5	157.9
L4	236	10.5	63.5	133.4	13.7	82.8	167.4
L5	212	10.9	67.7	140.1	14.4	88.5	176.6
L6	181	11.7	72.6	147.5	15.4	95.1	186.6
CHS1	518	8.0	40.4	86.3	10.5	51.9	106.0
CHS2	375	8.8	45.5	93.7	11.6	58.9	115.6
CHS3	343	9.1	50.0	103.8	11.9	64.8	128.8
CHS4	262	10.0	55.6	111.1	13.1	72.5	138.8
CHS5	231	10.5	60.5	120.4	13.7	79.0	151.0

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.2 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์ที่เสนอโดย Malhotra เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	$H_{ps}/A_s$ ( $m^{-1}$ )	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)					
		อุณหภูมิวิกฤติ = 538 องศาเซลเซียส			อุณหภูมิวิกฤติ = 650 องศาเซลเซียส		
		B	P1	P2	B	P1	P2
W1	331	8.7	61.0	142.7	10.9	78.5	179.2
W2	291	9.1	64.4	148.4	11.5	82.9	186.9
W3	268	9.4	66.6	152.2	11.9	85.9	192.0
W4	243	9.8	69.6	157.4	12.4	89.9	199.0
W5	202	10.6	76.0	168.4	13.5	98.3	213.8
L1	344	8.5	60.1	141.2	10.8	77.3	177.0
L2	295	9.1	64.0	147.7	11.4	82.4	186.0
L3	266	9.5	66.8	152.6	11.9	86.2	192.5
L4	236	9.9	70.5	158.9	12.6	91.1	201.1
L5	212	10.4	74.2	165.5	13.2	96.1	209.8
L6	181	11.2	80.2	176.0	14.2	104.0	223.8
CHS1	518	7.2	52.1	127.9	9.6	66.5	158.7
CHS2	375	8.2	58.1	137.9	10.5	74.6	172.5
CHS3	343	8.5	60.1	141.2	10.8	77.3	177.0
CHS4	262	9.5	67.3	153.4	12.0	86.8	193.6
CHS5	231	10.0	71.2	160.2	12.7	92.0	202.7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.3 สรุปผลค่าระยะเวลาทนไฟที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองสมการที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อ อุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 และ 650 องศาเซลเซียส

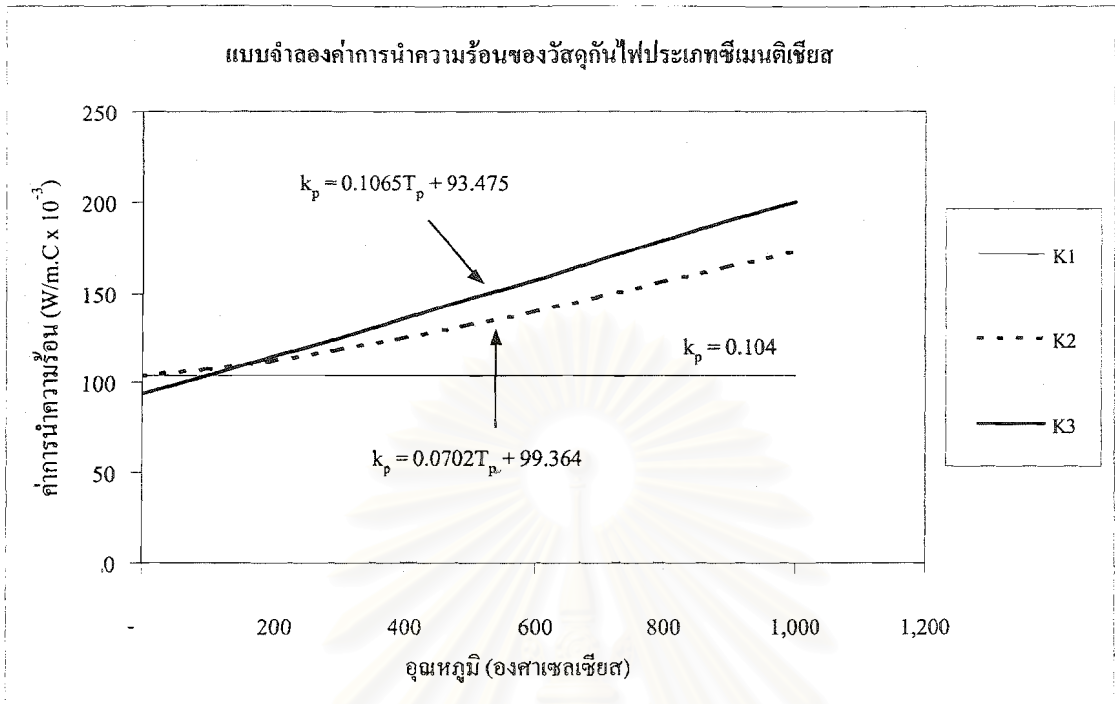
ตัวอย่างทดสอบ	$H_{ps} A_s$ ( $m^{-1}$ )	ระยะเวลาทนไฟของตัวอย่างทดสอบกลุ่ม (นาที)					
		อุณหภูมิวิกฤติ = 538 องศาเซลเซียส			อุณหภูมิวิกฤติ = 650 องศาเซลเซียส		
		B	P1	P2	B	P1	P2
W1	331	8.7	59.0	138.0	10.9	75.8	172.3
W2	291	9.1	62.6	143.9	11.5	80.5	180.4
W3	268	9.4	64.1	145.8	11.9	82.5	182.9
W4	243	9.8	67.3	151.3	12.4	86.8	190.5
W5	202	10.6	74.0	162.8	13.5	95.7	205.9
L1	344	8.5	54.1	123.3	10.8	69.2	152.8
L2	295	9.1	58.1	129.7	11.4	74.6	161.7
L3	266	9.5	58.6	128.5	11.9	75.2	160.1
L4	236	9.9	62.4	134.6	12.6	80.3	168.4
L5	212	10.4	66.6	141.8	13.2	85.9	178.2
L6	181	11.2	70.1	145.5	14.2	90.7	183.4
CHS1	518	7.2	40.6	89.6	9.6	51.7	110.5
CHS2	375	8.2	44.6	94.4	10.5	57.0	116.8
CHS3	343	8.5	50.2	106.8	10.8	64.4	132.5
CHS4	262	9.5	54.4	110.9	12.0	70.1	138.1
CHS5	231	10.0	59.5	120.4	12.7	76.9	150.9

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

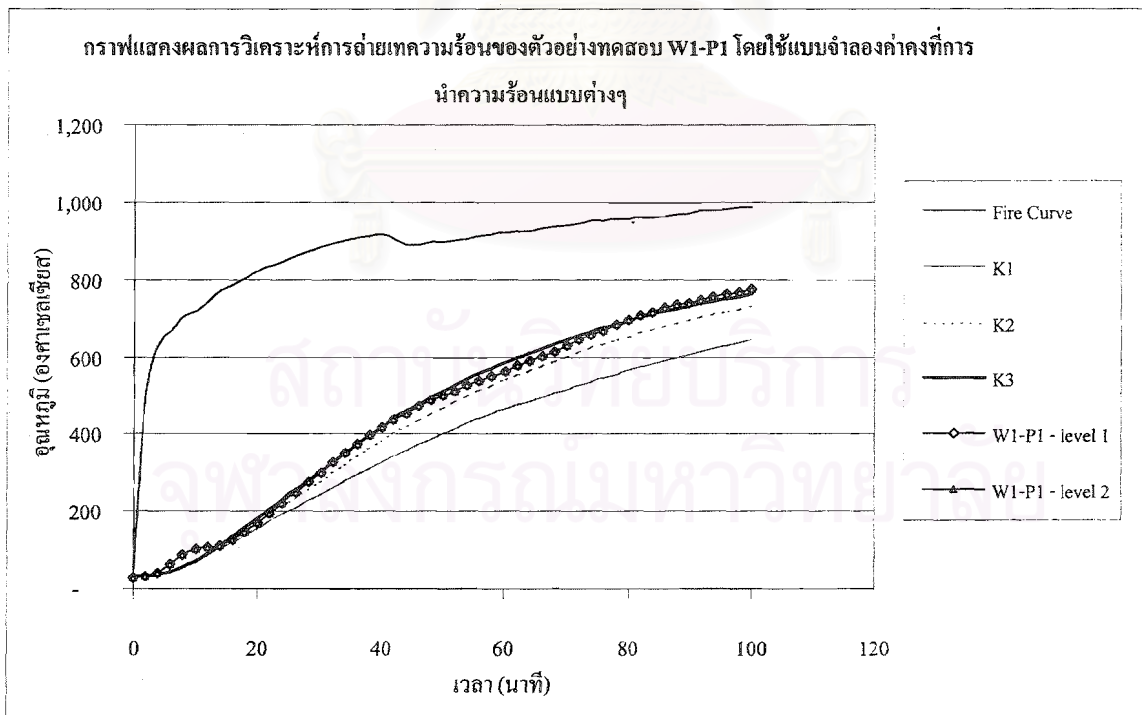
ตารางที่ 5.4 ค่าองค์ประกอบหน้าตัดและค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิภาพสำหรับตัวอย่างทดสอบต่างๆ

หมายเลข ตัวอย่าง	ขนาดเหลี่ยมระบุ	พื้นที่หน้าตัด ซม. <sup>2</sup>	เส้นรอบรูป ซม.	ค่าองค์ประกอบหน้าตัด ม. <sup>-1</sup>	ค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิภาพ (ม. <sup>-1</sup> )	
					d <sub>p</sub> = 20 มม.	d <sub>p</sub> = 40 มม.
W1	W 150 x 14.0	17.85	59	331	341	352
W2	W 200 x 21.3	27.16	78.9	291	298	305
W3	W 100 x 17.2	21.9	58.8	268	277	286
W4	W 125 x 23.8	30.31	73.7	243	250	256
W5	W 175 x 40.2	51.21	103.5	202	206	210
L1	L 75 x 75 x 6	8.73	30	344	446	549
L2	L 90 x 90 x 7	12.22	36	295	368	441
L3	L 65 x 65 x 8	9.76	26	266	358	450
L4	L 75 x 75 x 9	12.69	30	236	307	378
L5	L 90 x 90 x 10	17	36	212	265	317
L6	L 75 x 75 x 12	16.56	30	181	235	290
CHS1	φ 2" x 2.0 มม.	3.58	18.5	518	869	1219
CHS2	φ 2" x 2.8 มม.	4.96	18.6	375	628	882
CHS3	φ 3 1/2" x 3.0 มม.	9.28	31.9	343	479	614
CHS4	φ 3" x 4.0 มม.	10.63	27.8	262	380	498
CHS5	φ 4" x 4.5 มม.	15.28	35.4	231	314	396

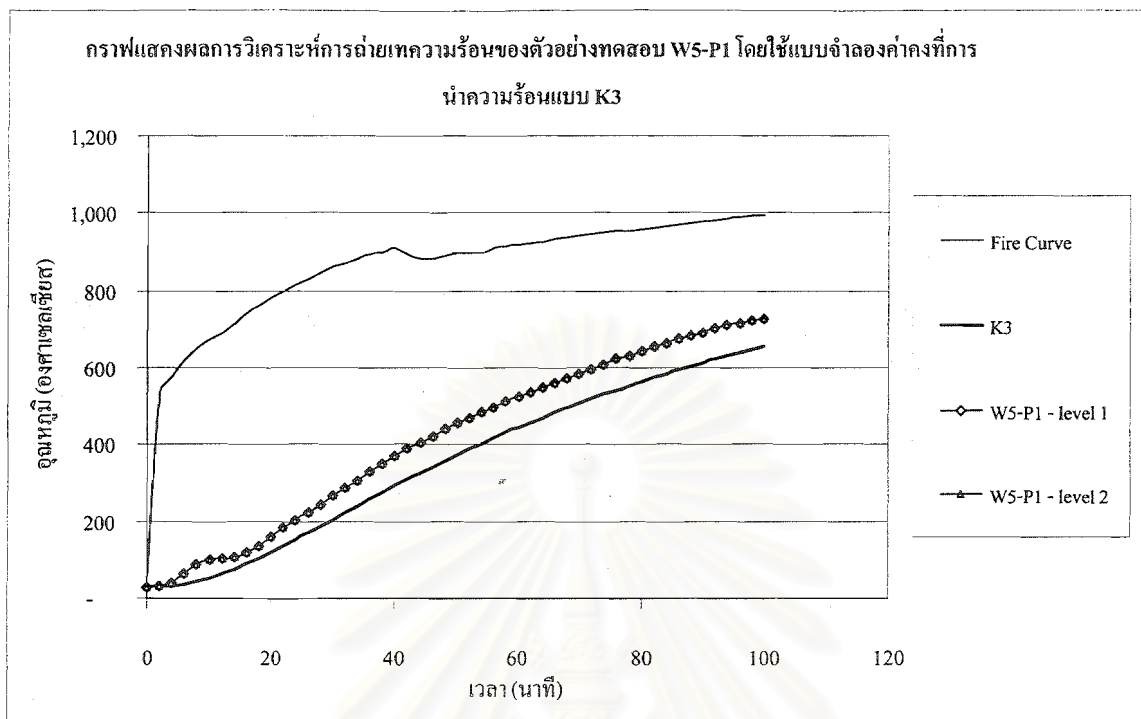
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



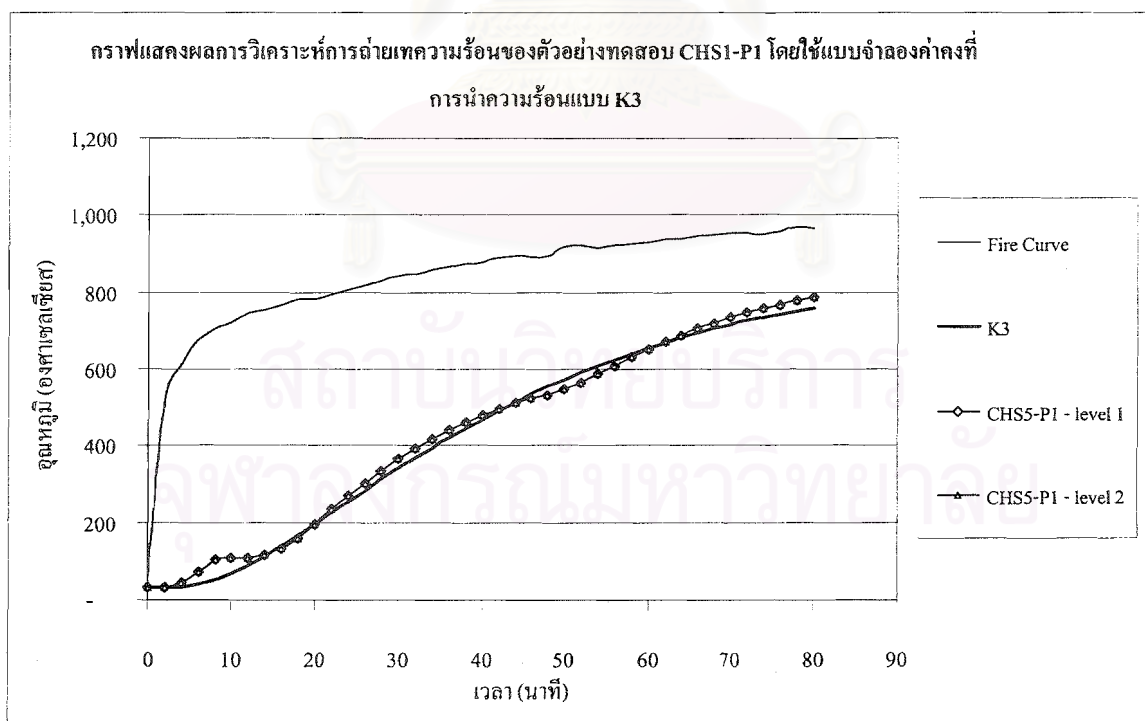
รูปที่ 5.1 แบบจำลองค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่ใช้ในการวิเคราะห์



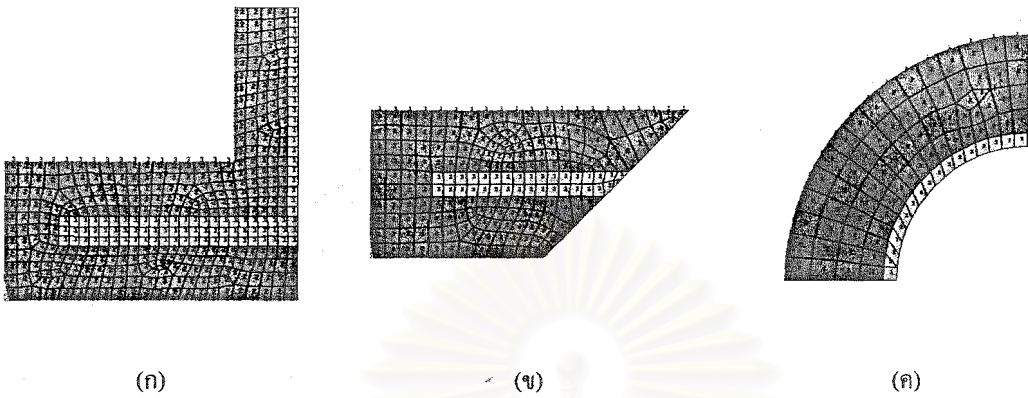
รูปที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างทดสอบ W1-P1



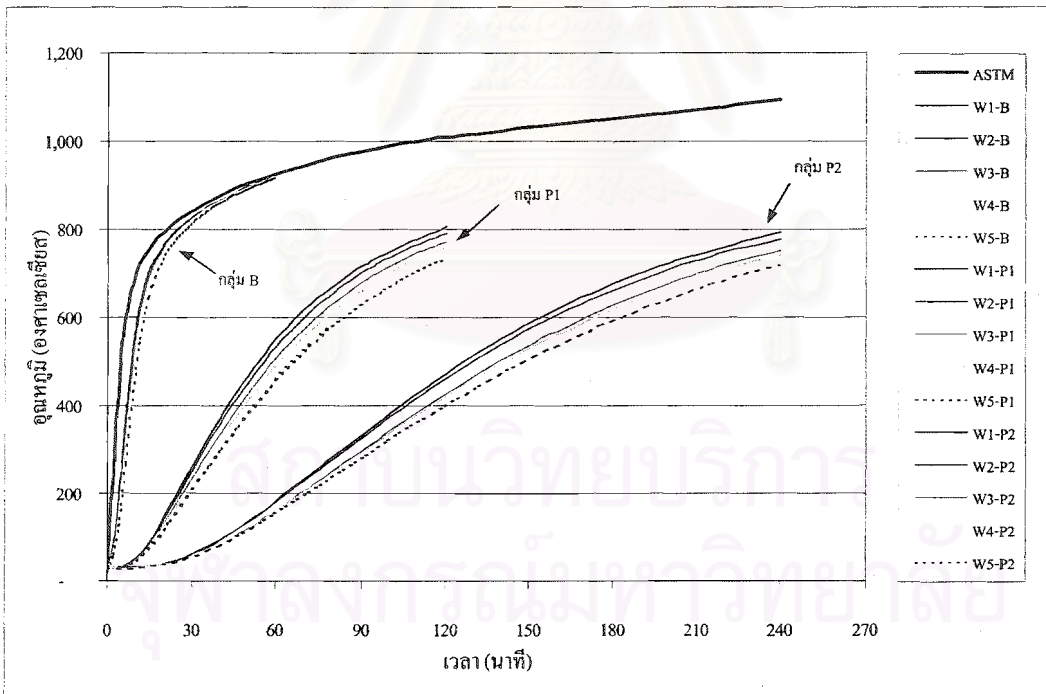
รูปที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างทดสอบ W5-P1



รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของตัวอย่างทดสอบ CHS1-P1

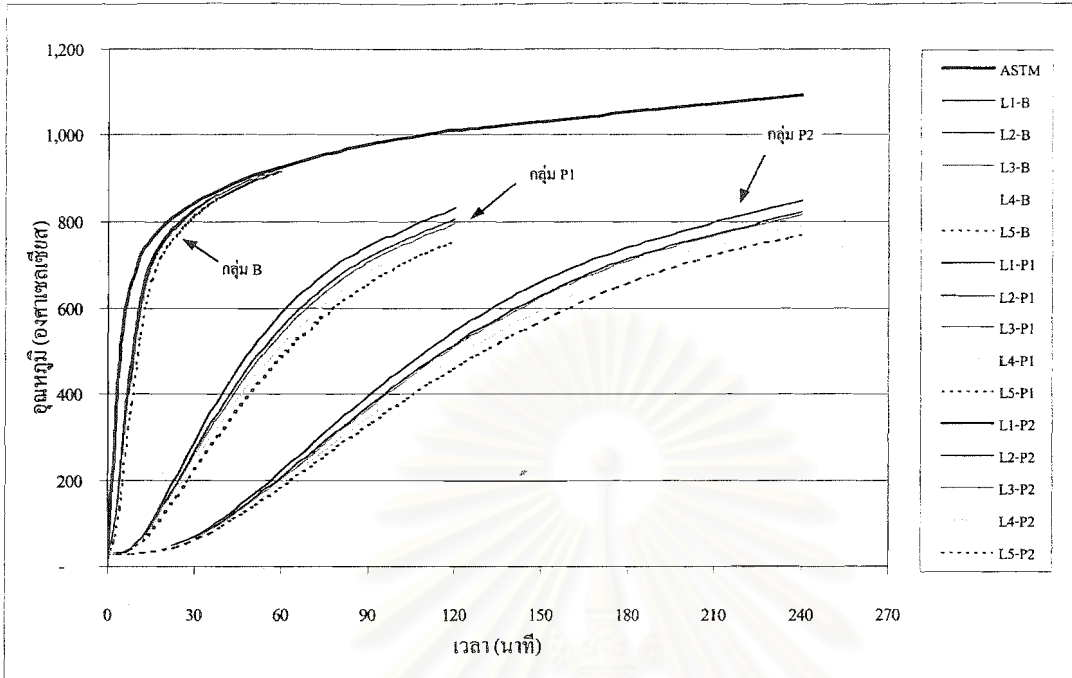


รูปที่ 5.5 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ (ก) เหล็กไวต์แพลนจ์ (ข) เหล็กฉาก และ (ค) ท่อเหล็กกลมกลวง

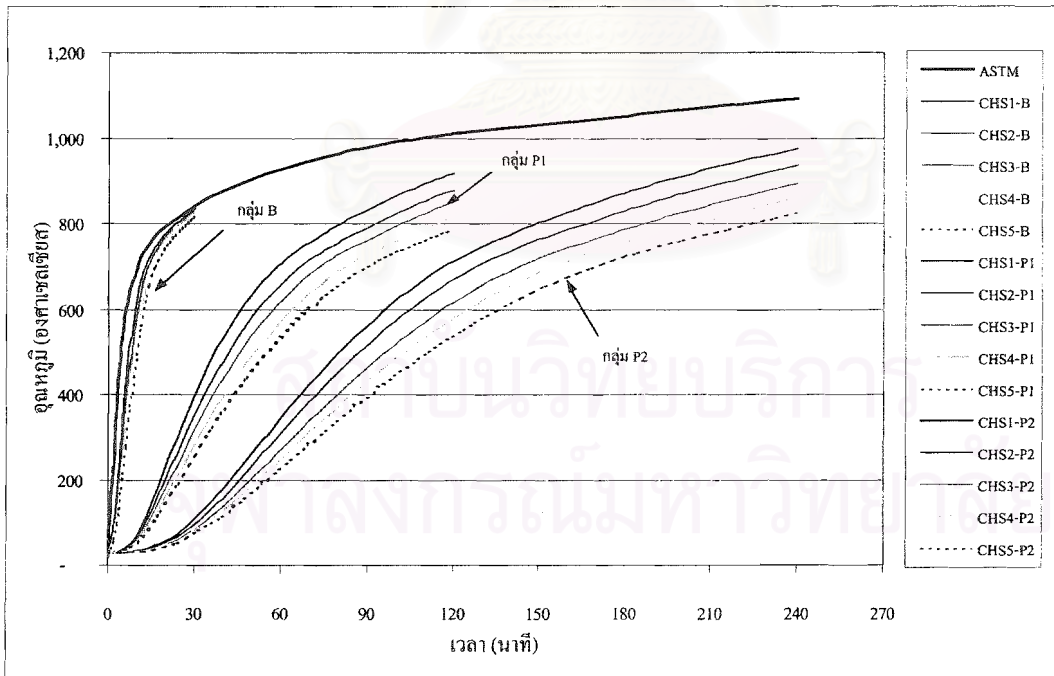


รูปที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่สำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กไวต์แพลนจ์

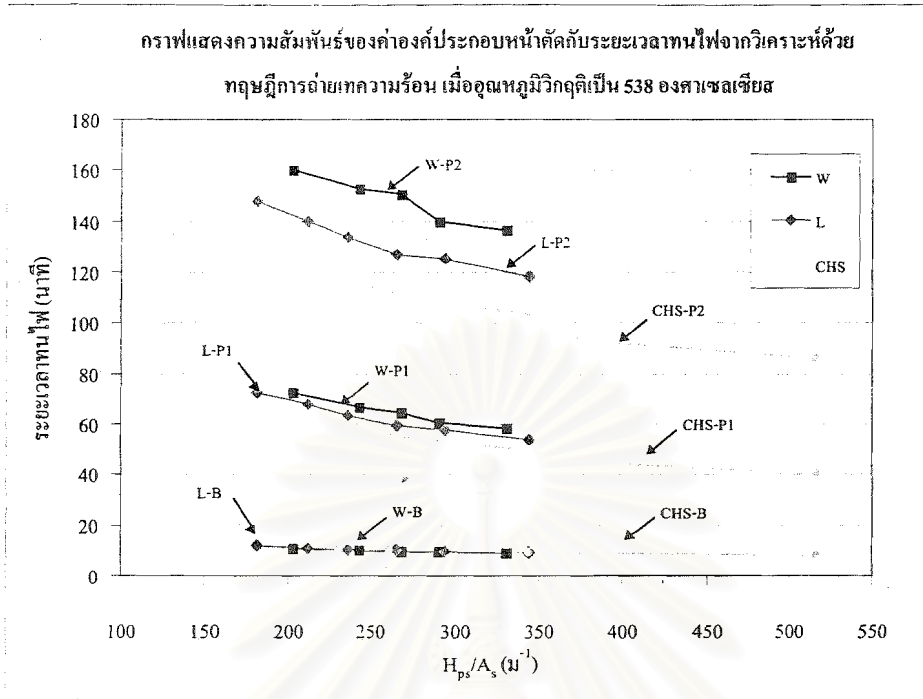




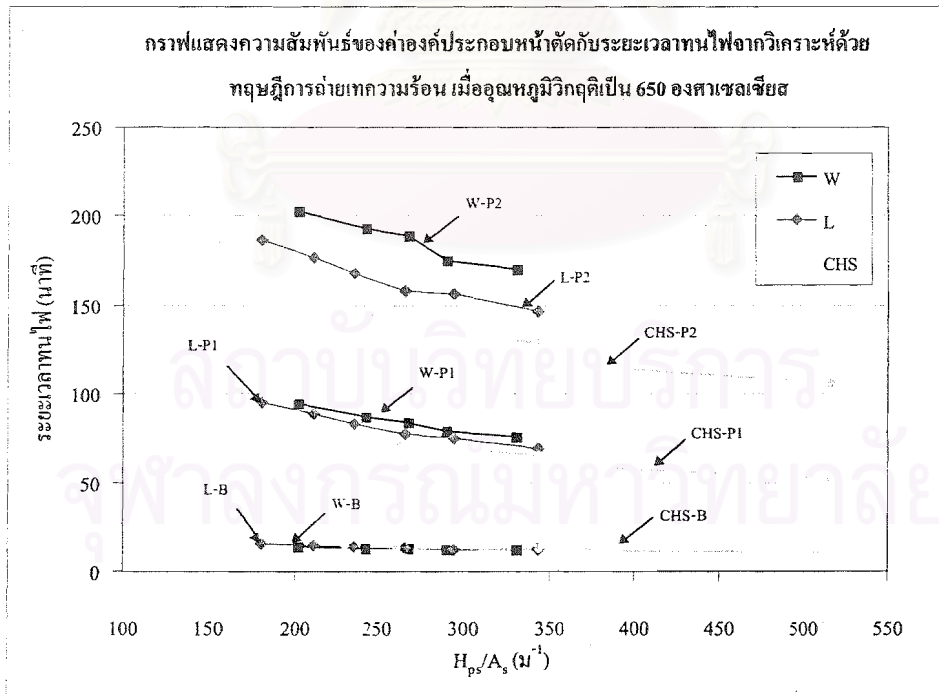
รูปที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ สำหรับตัวอย่างทดสอบเหล็กฉาก



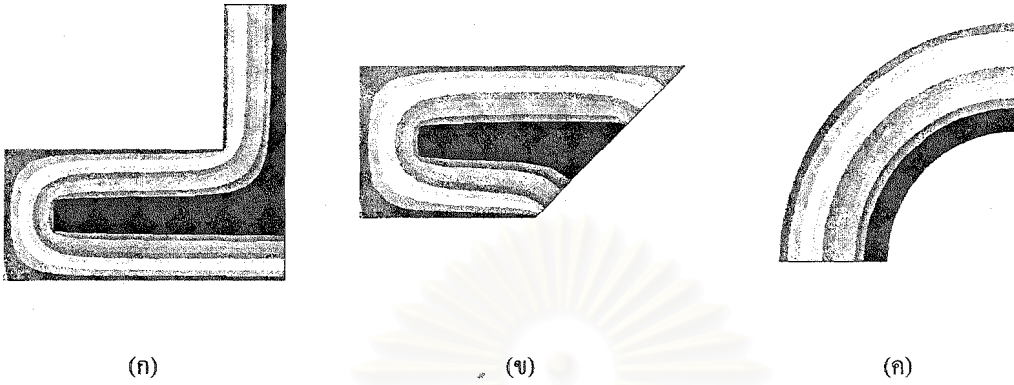
รูปที่ 5.8 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่ สำหรับตัวอย่างทดสอบท่อเหล็กกลมกลวง



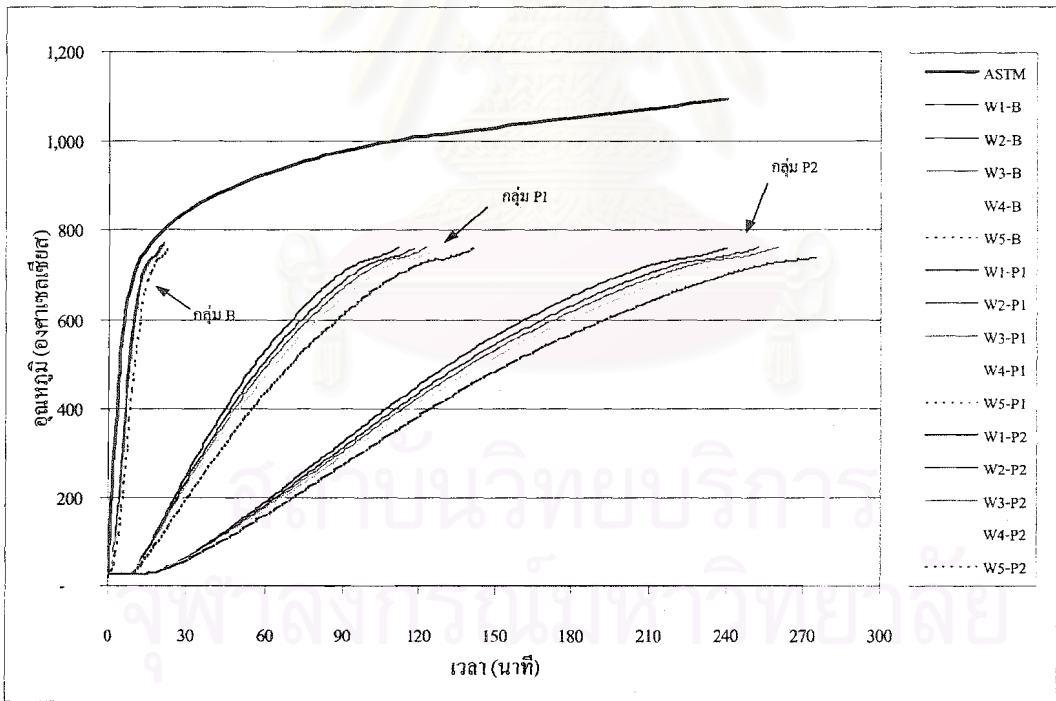
รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส



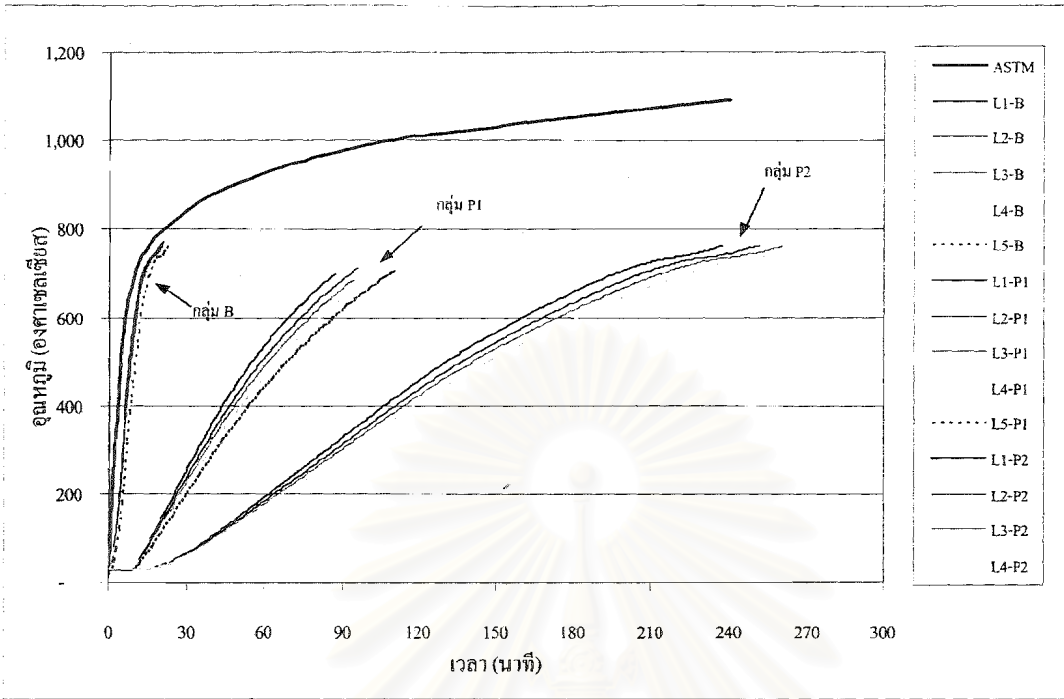
รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส



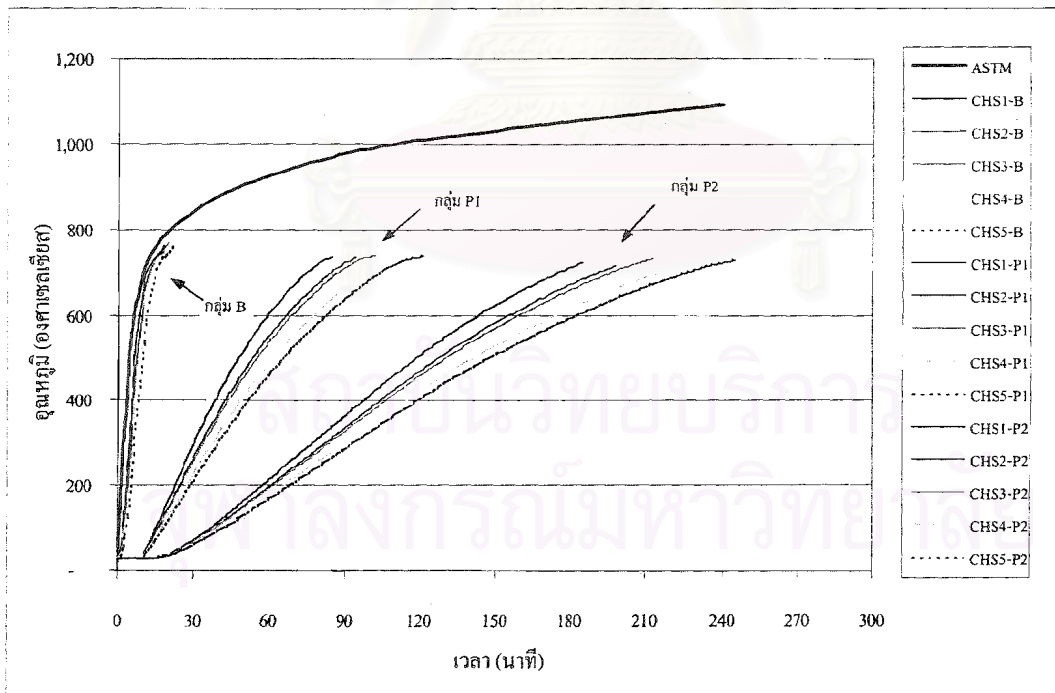
รูปที่ 5.11 เส้นวงรอบของการกระจายของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆบนหน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ (ก) เหล็ก ไรค์เฟลนจ์ (ข) เหล็กฉาก และ (ค) ท่อเหล็กกลมกลวง



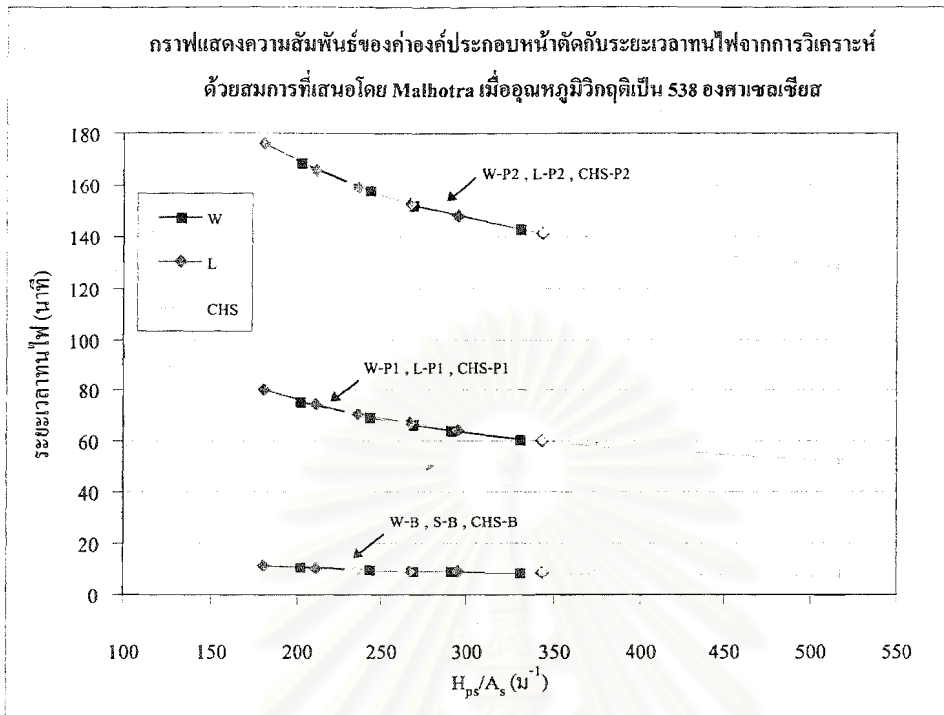
รูปที่ 5.12 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลิมป์ที่เสนอโดย Malhotra สำหรับเหล็ก ไรค์เฟลนจ์



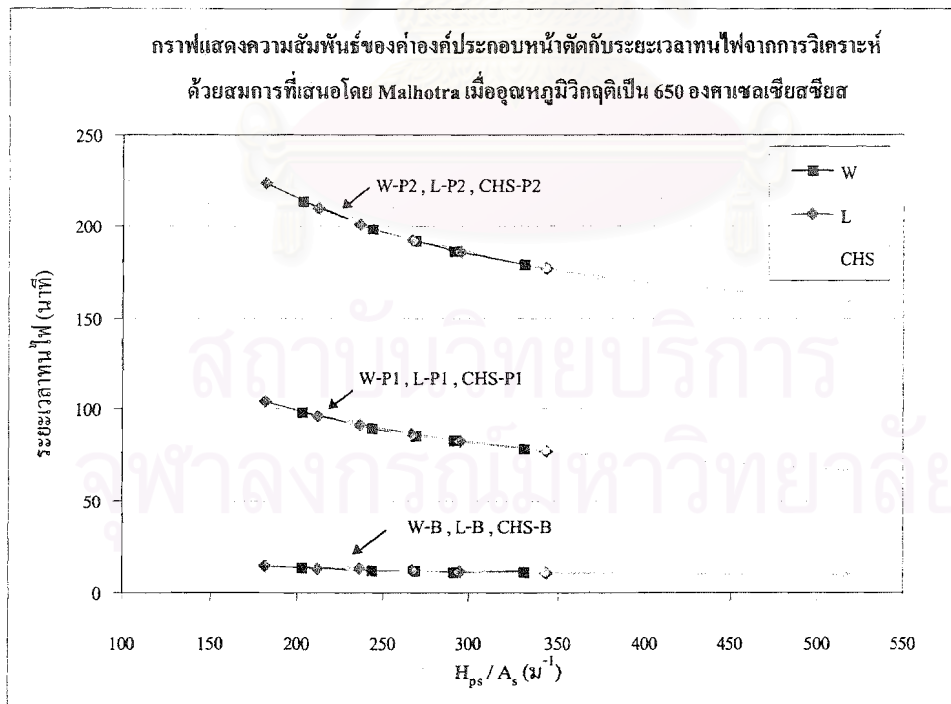
รูปที่ 5.13 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพท์ที่เสนอโดย Malhotra สำหรับเหล็กฉาก



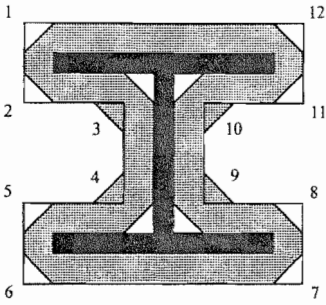
รูปที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการวิเคราะห์แบบลัมพท์ที่เสนอโดย Malhotra สำหรับอิฐกลวง



รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์ที่เสนอโดย Malhotra เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบลัมพ์ที่เสนอโดย Malhotra เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส



(ก) เหล็กไวค์แฟลนจ์

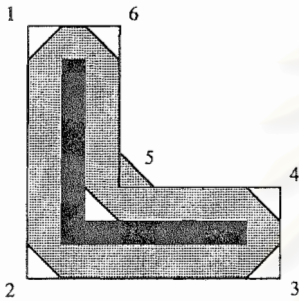
$$H_{pp} = H_{ps} + 8d_p$$

$$H_{pe} = H_{pp} - 12(2 - \sqrt{2})d_p$$

$$H_{pe} = H_{ps} + 8d_p - 12(2 - \sqrt{2})d_p$$

$$H_{pe} = H_{ps} + 0.9706d_p$$

$$A_p = H_{ps}d_p + 4d_p^2$$



(ข) เหล็กฉาก

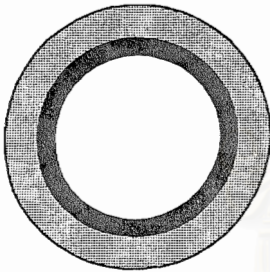
$$H_{pp} = H_{ps} + 8d_p$$

$$H_{pe} = H_{pp} - 6(2 - \sqrt{2})d_p$$

$$H_{pe} = H_{ps} + 8d_p - 6(2 - \sqrt{2})d_p$$

$$H_{pe} = H_{ps} + 4.4853d_p$$

$$A_p = H_{ps}d_p + 4d_p^2$$



$$H_{ps} = \pi D$$

(ค) ท่อเหล็กกลมกลวง

$$H_{pp} = \pi(D + 2d_p) = \pi D + 2\pi d_p$$

$$H_{pp} = H_{ps} + 2\pi d_p$$

$$H_{pe} = H_{pp} = H_{ps} + 2\pi d_p$$

$$A_p = \frac{\pi}{4} \left( (D + 2d_p)^2 - D^2 \right)$$

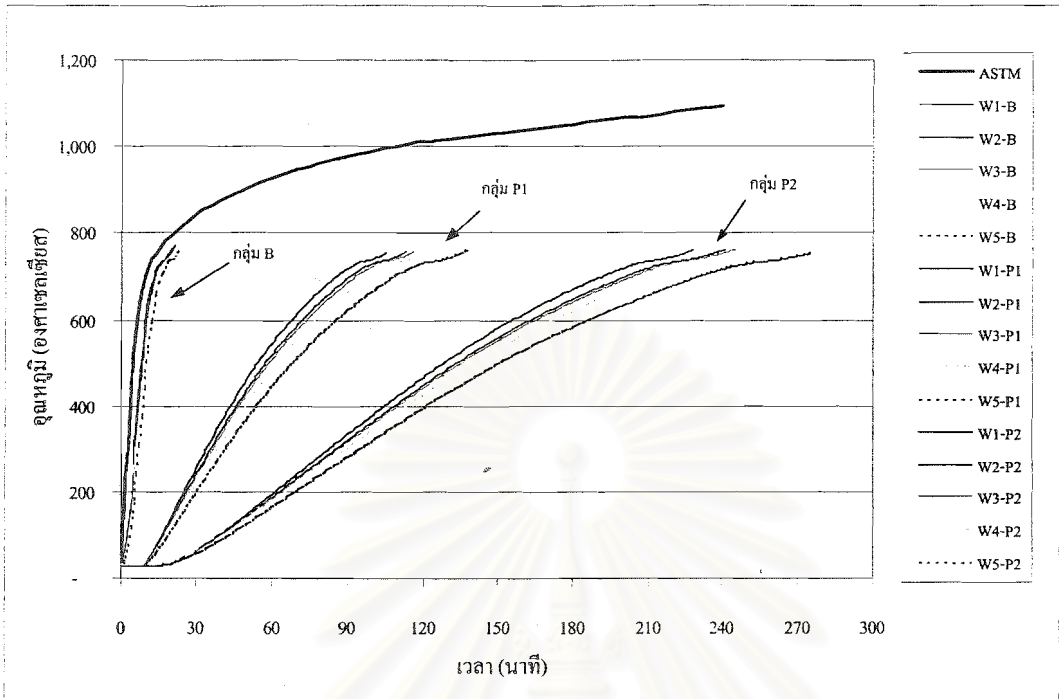
$$A_p = \pi D d_p + \pi d_p^2$$

$$A_p = H_{ps}d_p + \pi d_p^2$$

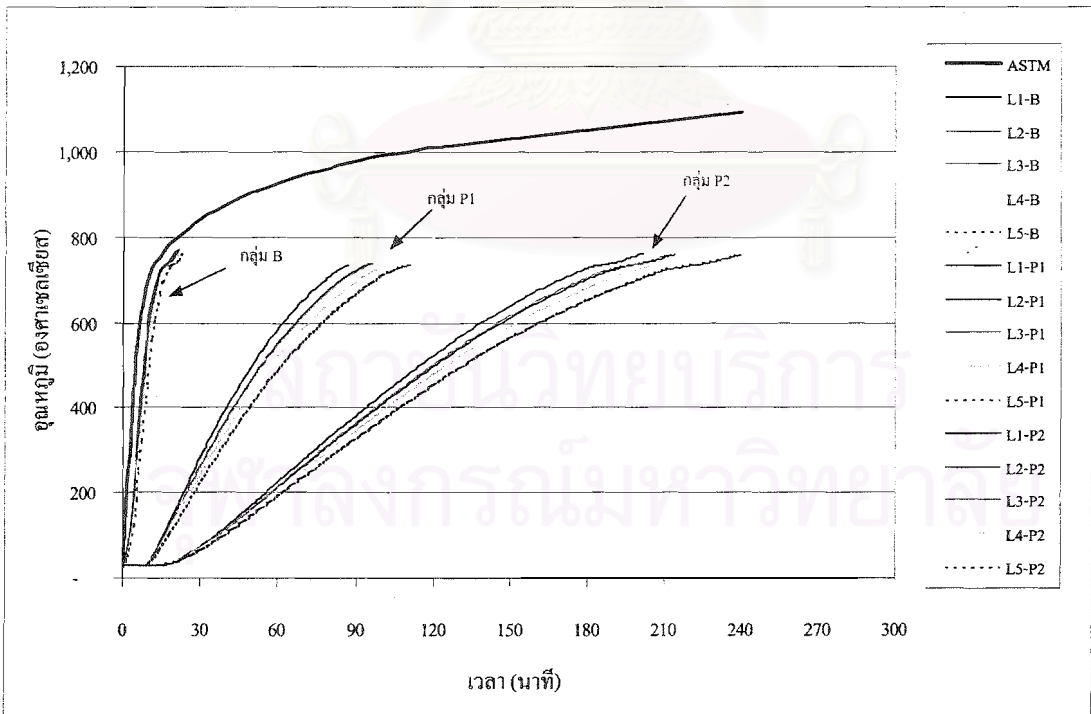
- เมื่อ
- $H_{ps}$  = ความยาวรอบรูปส่วนที่สัมผัสความร้อนของเหล็ก
  - $H_{pp}$  = ความยาวรอบรูปส่วนที่สัมผัสความร้อนของวัสดุกันไฟ
  - $H_{pe}$  = ความยาวรอบรูปส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผล
  - $A_p$  = พื้นที่หน้าตัดของวัสดุกันไฟ
  - $d_p$  = ความหนาของวัสดุกันไฟ
  - $D$  = ความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเหล็กกลมกลวง

รูปที่ 5.17 การคำนวณค่าพื้นที่หน้าตัดของวัสดุกันไฟและความยาวเส้นรอบรูปส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผล

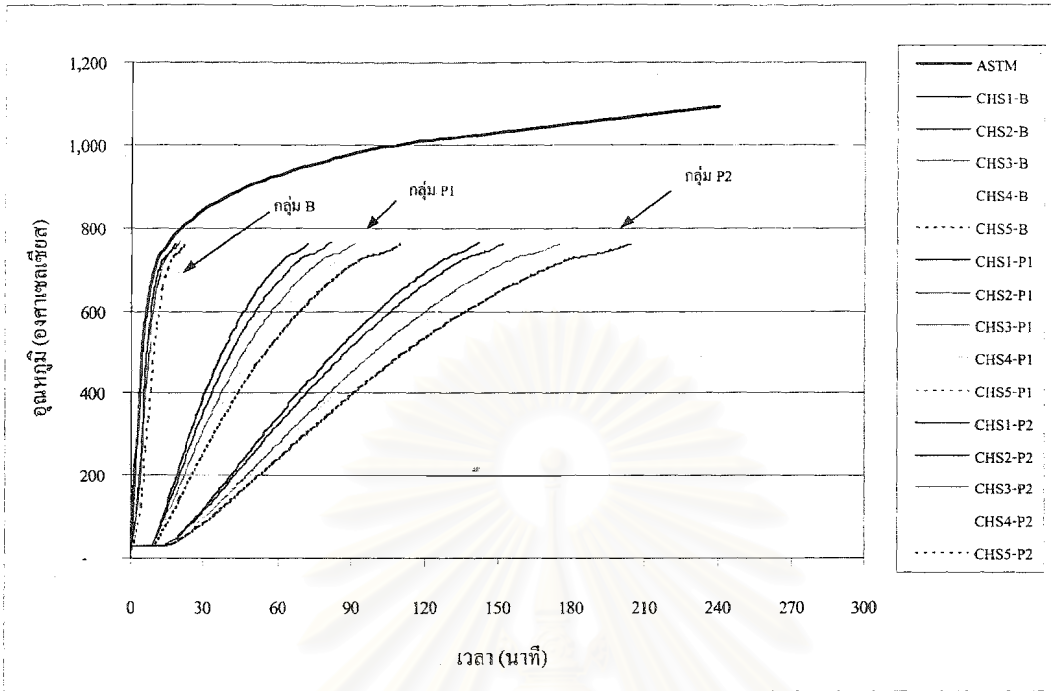
(ก) เหล็กไวค์แฟลนจ์ (ข) เหล็กฉาก และ (ค) ท่อเหล็กกลมกลวง



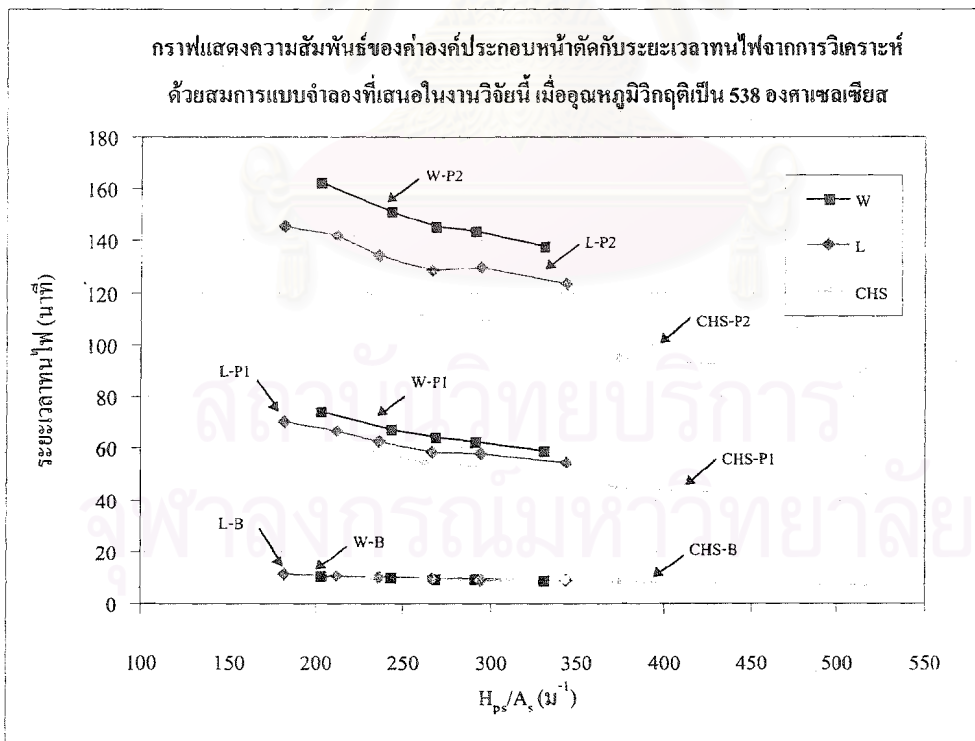
รูปที่ 5.18 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ สำหรับเหล็กไวต์แพลนจ์



รูปที่ 5.19 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ สำหรับเหล็กฉาก

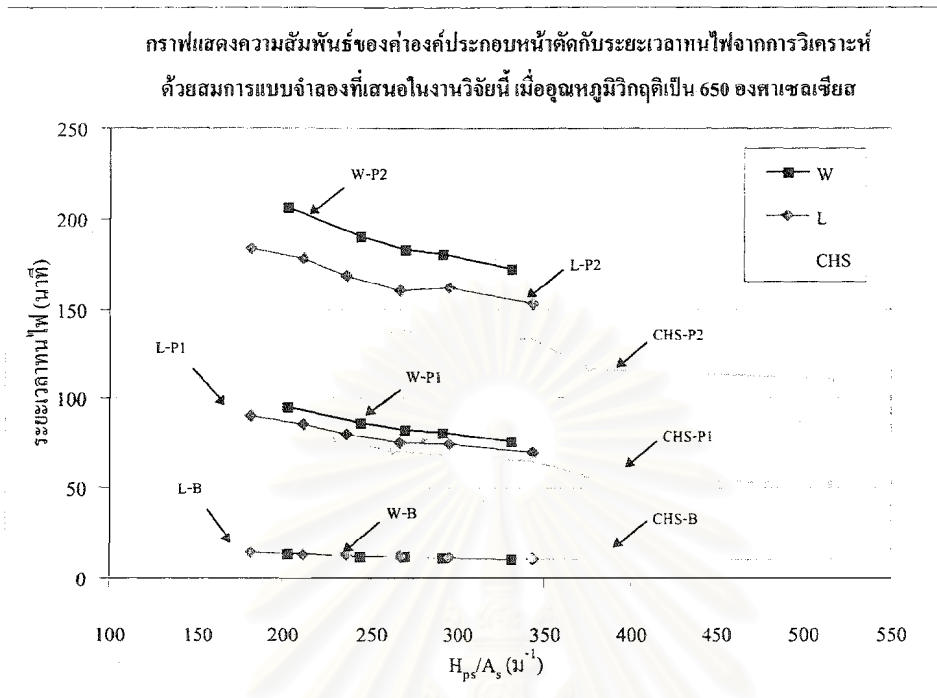


รูปที่ 5.20 ผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ สำหรับท่อเหล็กกลม กลวง

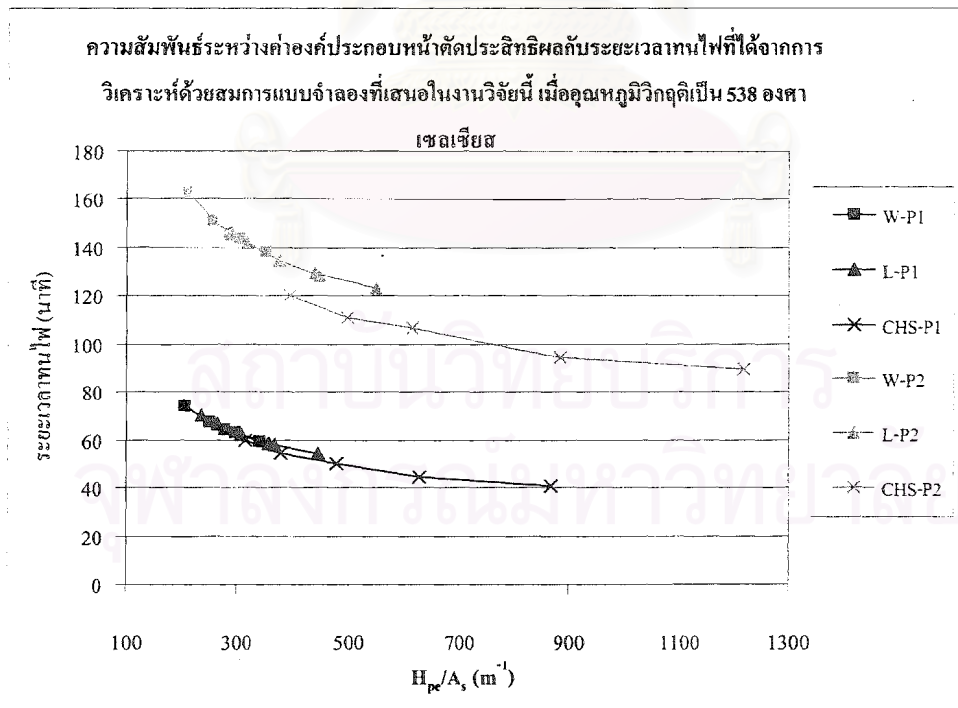


รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทานไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส

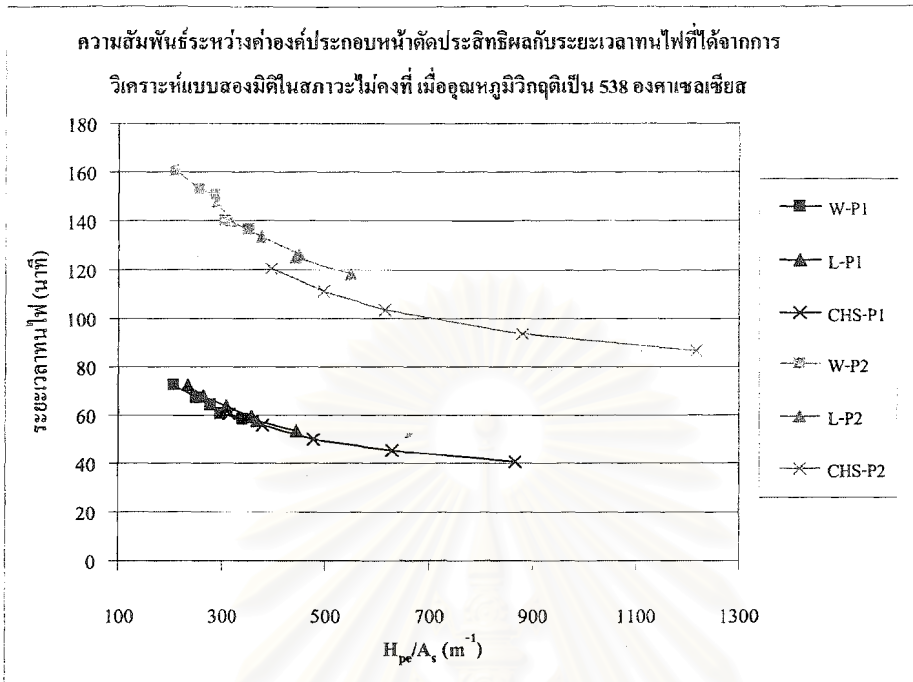




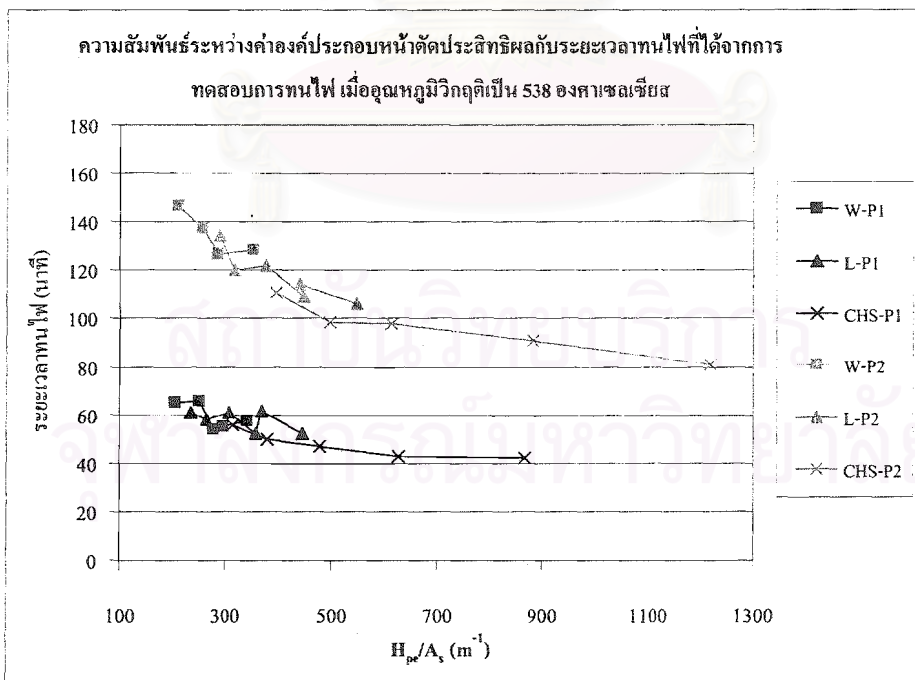
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาทนไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะเวลาไฟกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิภาพที่ได้จากการผลการทดสอบการทนไฟ เมื่อค่าอุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบเหล็กโครงสร้างรูปพรรณทั้งที่ไม่มีและมีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟในงานวิจัยครั้งนี้พร้อมทั้งผลการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. ความรุนแรงของไฟขึ้นอยู่กับอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยกับค่าพื้นที่ได้กราฟไฟ โดยความรุนแรงของไฟที่เท่ากันจะเกิดขึ้นเมื่อค่าผลคูณของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไฟโดยเฉลี่ยกับค่ากำลัง 2.85 ของค่าพื้นที่ได้กราฟไฟ ณ เวลาที่โครงสร้างเกิดการวิบัติที่มีค่าเท่ากัน
2. สำหรับองค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่ไม่มีมีการป้องกันไฟ ค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะขึ้นกับค่าองค์ประกอบหน้าตัดของเหล็กแต่เพียงอย่างเดียว โดยไม่ขึ้นกับรูปร่างของเหล็กแต่อย่างไร
3. ในกรณีที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเรียส ค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะขึ้นกับทั้งค่าองค์ประกอบหน้าตัดและรูปร่างของเหล็กด้วย จากการทดสอบพบว่าสำหรับเหล็กที่มีรูปร่างเดียวกันค่าความสามารถทนไฟของเหล็กมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลง และเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟและค่าองค์ประกอบหน้าตัดเท่ากันเหล็กไวด์แฟรงจ์จะมีค่าความสามารถทนไฟที่สูงกว่าเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ และผลของรูปร่างเหล็กที่ต่างกันจะมีมากขึ้นเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟเพิ่มขึ้น
4. ในกรณีที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟ สำหรับเหล็กที่มีรูปร่างเดียวกันค่าความสามารถทนไฟของโครงสร้างจะมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อค่าองค์ประกอบหน้าตัดลดลง แต่ผลของรูปร่างเหล็กที่ต่างกันไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจน
5. การคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กโดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอโดย Malhotra จะให้คำตอบที่ไม่สอดคล้องกับทั้งผลการทดสอบการทนไฟและผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสถานะไม่คงที่

6. สมการแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กที่เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนแบบสองมิติในสภาวะไม่คงที่เป็นอย่างมากโดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์
7. จากสมการแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของเหล็กที่เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้สรุปได้ว่าเมื่อความหนาของวัสดุกันไฟเท่ากับค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณจะขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่ผิวส่วนที่สัมผัสความร้อนประสิทธิผลต่อค่าพื้นที่หน้าตัดของเหล็กหรือเรียกว่า ค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผล ถ้าองค์อาคารใดมีค่าดังกล่าวมากกว่าจะมีความสามารถทนไฟที่ต่ำกว่า
8. เมื่อความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เชิยสเท่ากับเหล็กไวด์แพลนจ์จะมีค่าความสามารถทนไฟสูงกว่าเหล็กฉากและท่อเหล็กกลมกลวง ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กไวด์แพลนจ์จะมีค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลต่ำกว่าของเหล็กฉาก และท่อเหล็กกลมกลวงจะมีค่าดังกล่าวสูงกว่าเหล็กรูปร่างอื่นๆ
9. จากการพิจารณาที่มาของค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผล ทำให้สรุปได้ว่าสำหรับเหล็กที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดเท่ากันเหล็กที่มีรูปร่างซึ่งมีจำนวนเหลี่ยมมุมมากกว่าจะมีความสามารถทนไฟที่สูงกว่า ยกตัวอย่างเช่น เหล็กไวด์แพลนจ์ เหล็กรางน้ำ และเหล็กฉากจะมีจำนวนเหลี่ยมมุมเป็น 12, 8 และ 6 ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากสมการแบบจำลองที่เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้จะได้ว่า เหล็กไวด์แพลนจ์จะมีความสามารถทนไฟสูงกว่าเหล็กรางน้ำและเหล็กฉาก ตามลำดับ
10. การออกแบบวิธีการป้องกันไฟให้แก่องค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูง โดยการพิจารณาจากค่าองค์ประกอบหน้าตัดเหล็กแต่เพียงอย่างเดียวจะไม่ถูกต้องเนื่องจากค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคารเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณจะขึ้นกับรูปร่างของเหล็กด้วย ยิ่งความหนาของวัสดุกันไฟเพิ่มขึ้นผลของรูปร่างของเหล็กจะมีความสำคัญมากขึ้น โดยเฉพาะกรณีของเหล็ก โครงสร้างรูปพรรณที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูงนี้ซึ่งจะมีความสามารถทนไฟที่ต่ำอยู่แล้วดังนั้นจะต้องใช้ความหนาของวัสดุกันไฟที่ค่อนข้างมากดังนั้นสำหรับเหล็กที่มีรูปร่างต่างกันแต่มีความหนาของวัสดุกันไฟและค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่เท่ากันอาจจะมีความสามารถทนไฟที่แตกต่างกันได้มาก
11. การออกแบบวิธีการป้องกันไฟโดยทั่วไปมักจะใช้ผลการทดสอบการทนไฟของเหล็กไวด์แพลนจ์เป็นเกณฑ์แล้วเทียบให้มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดที่เท่ากันสำหรับเหล็กที่มีรูปร่างหน้าตัดแบบอื่นๆซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้มากในกรณีที่เป็นเหล็กที่มีค่าองค์ประกอบหน้าตัดสูงและความหนาของวัสดุกันไฟมาก ดังนั้นการจะเทียบให้มีความสามารถทนไฟที่เท่ากันควรจะเทียบจากค่าองค์ประกอบหน้าตัดประสิทธิผลที่เท่ากันจึงจะให้คำตอบที่มีความถูกต้องมากกว่า

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาถึงพฤติกรรมการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีรูปร่างหน้าตัดแบบอื่นๆเพิ่มเติม เช่น เหล็กรูปรางน้ำหรือเหล็กกล่อง เพื่อใช้ตรวจสอบและยืนยันความถูกต้องของสมการแบบจำลองที่เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้
2. ควรทำการทดสอบการทนไฟขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณเพื่อศึกษาถึงผลของความรุนแรงของไฟที่เท่ากันว่าเป็นไปตามสมการที่ได้เสนอไว้ในงานวิจัยครั้งนี้หรือไม่ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทดสอบการทนไฟหรือการประเมินค่าความสามารถทนไฟที่แท้จริงของโครงสร้างได้อย่างเป็นรูปธรรม
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมทั้งในแง่ของการทดสอบและการวิเคราะห์ผลทางทฤษฎีในส่วนขององค์อาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณที่มีการป้องกันไฟด้วยวัสดุฉนวนไฟ เนื่องจากในปัจจุบันมีการใช้งานวัสดุกันไฟประเภทนี้เป็นจำนวนมากแต่ยังมีข้อมูลการทดสอบและงานวิจัยที่น้อยมาก โดยเฉพาะในประเทศไทย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

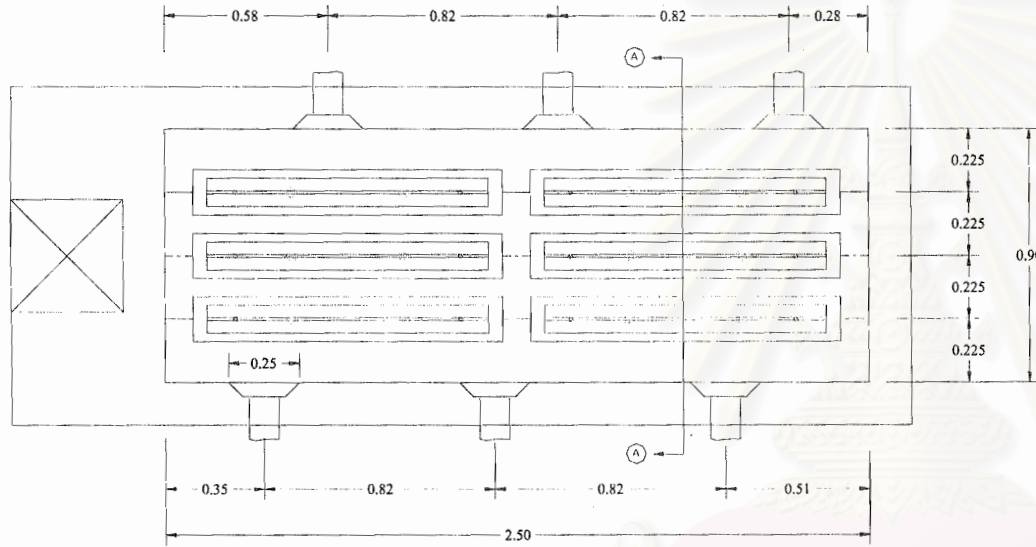
- 1.Kruppa,J., Collapse Temperature of Steel Structures, Journal of the Structural Division, Proceeding of The ASCE, 105(1979) : 1769-1788.
- 2.Ottens,C.M., Fire Test on Protected Steel-Girders, Proceedings of the Symposium Held at the Fire Research Station, London, January 1967 : 118-122.
- 3.Neves,I.C., The Critical Temperature of Steel Columns with Restrained Thermal Elongation, Fire Safety Journal, 24(1995) : 211-227.
- 4.Rodrigues,J.P.C., Neves,I.C., and Valente,J.C., Experimental Research on the Critical Temperature of Compressed Steel Elements with Restrained Thermal Elongation, Fire Safety Journal, 35(2000) : 77-98.
- 5.Stanzak,W.W., and Lee,T.T., Fire Resistance of Unprotected Steel Columns, Journal of the Structural Division, Proceeding of The ASCE, 99(1973) : 837-852.
- 6.Lee,T.T., Temperature of Protected Steel in Fire, Proceedings of the Symposium Held at the Fire Research Station, London, January 1967 : 100-110.
- 7.Lee,T.T., and Harmathy,T.Z., Fire Endurance of Concrete-Protected Steel Columns, ACI Journal, 71(1974) : 29-32.
- 8.Malhotra,H.L., Design of Fire-Resisting Structures, Surrey University Press, Glasgow, 1982.
- 9.Pettersson,O., Magnusson,S.E., and Thor,J., Fire Engineering Design of Steel Structures, Publication No. 50, Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- 10.Stirland,C., Steel Properties at Elevated Temperatures for Use in Fire Engineering Calculations, Report No. T/RS/11/80C Teesside Laboratory, British Steel Technical, Middlesborough, 1980.
- 11.Harmathy,T.Z., and Stanzak,W.W., Elevated Temperature Tensile and Creep Properties of Some Structural and Prestressing Steels, Symposium on Fire Test Performance, American Society of Testing and Materials, 1970 : 186-208.
- 12.Anderberg,Y., Properties of Materials at High Temperatures-Steel, RILEM Report, University of Lund, Sweden, 1983.
- 13.Anderberg,Y., Modelling Steel Behaviour, Fire Safety Journal, 13(1988) : 17-26.
14. Ingberg,S.H., Test of the Severity of Building Fires. US National Fire Protection Quarterly, July 1928 : 23-43.
- 15.Purkiss,J.A., Fire Safety Engineering Design of Structures, Butterworth Heinemann, Oxford, 1996.
- 16.สมศรี จรุงเรือง, ระเบียบวิธีวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.



ภาคผนวก

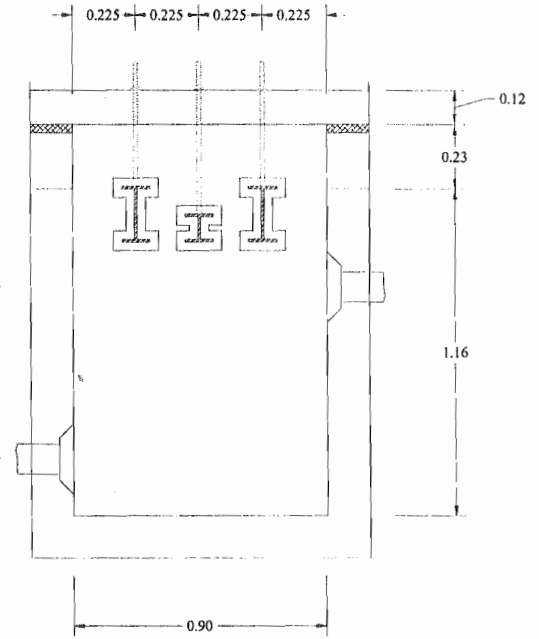
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.



Top View

รูปที่ ก-1 ภาพด้านบนของเตาที่ใช้ในการทดสอบการทนไฟ



Section A-A

รูปที่ ก-2 ภาพด้านข้างของเตาที่ใช้ในการทดสอบการทนไฟ



ภาคผนวก ข.

แบบ ข. ๑



ที่ ขว 0505/ 4250

ถึง หัวหน้าส่วนจังกัล ดิ.พี. สิโอโรโร โสโก

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัดอุณหภูมิอย่าง ตาม คำร้อง

ลงวันที่ 11 มีนาคม 2545 เลขที่ 1767 วันที่ 11 มีนาคม 2545

ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2545

กอง พิสูจน์และวิเคราะห์

โทร. 0 2201 7130

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

20 มีนาคม 2545

รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง เครื่องหมาย หมายเลข

ตรา เลข

ตามผู้ส่งเรียก ที่ระบุตัวอย่าง ปฏิบัติที่ สถานที่นำความร้อน ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

การกินไฟประเภท - VV.296 0.104

ซีเมนต์ซีเอส

หมายเลขทดสอบตาม ASTM C-177

ผู้ตรวจ

[Signature]

นายสมชาย สิริโรโรโร

หัวหน้ากลุ่มพิสูจน์และวิเคราะห์ทั่วไป

ผู้ส่งตรวจ

[Signature]

นายศักดิ์ชัย ทองแก้ว

นักวิทยาศาสตร์

สภามหาวิทยาลัย  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารราชการ  
การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการผิดวินัย

รูปที่ ข-1 ผลการทดสอบค่าการนำความร้อนของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย



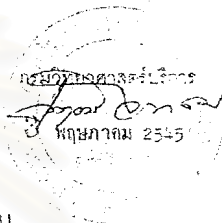
ที่ วค. 0505/ 57716

ถึง หัวหน้าส่วนจำกัด ศี พี ดี โอโรท์ จำกัด

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ ชนิดตัวอย่าง ตาม คำร้อง ลงวันที่ 2 เมษายน 2545 เลขรับ 2329 วันที่ 2 เมษายน 2545

จึงกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 2 เมษายน 2545

กอง พิสูจน์และวิเคราะห์  
โทร. 0 2201 7130



รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัสดุตัวอย่าง	เครื่องหมาย	หมายเลข	ความเข้มข้นจำเพาะ (จุล/กรัม, เซนต์เจมส์)
	ตรา		
ตามที่ผู้ส่งเรียก	วิธีตรวจตัวอย่าง	ปฏิบัติการ	
สารกันไฟ	VW.423	0.9705	
ประเภทซีเมนต์ซีเอส			

ผู้รับรอง  
  
(นายทรงธรรม จิรวินัยธรรม)  
หัวหน้ากลุ่มพิสูจน์และวิเคราะห์กรมทั่วไป

ผู้ทดสอบ  
  
(นายทัศนัย หลงวิไล)  
นักวิทยาศาสตร์

# สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ส่งตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รูปที่ ข-2 ผลการทดสอบค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสที่มีแร่เพอร์ไลต์เป็นส่วนผสมที่ใช้ในงานวิจัย

ภาคผนวก ค.

ตารางที่ ค-1 ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีเอสสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม W-P

ตัวอย่างทดสอบ	ระดับ ที่	ความหนาของวัสดุกันไฟตำแหน่งที่ ( มม.)													ความหนาเฉลี่ย ( มม.)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	เฉลี่ย	
W1-P1	1	22	16	21	16	21	24	21	21	16	13	22	23	19.3	19.4
	2	21	16	22	15	20	23	20	19	19	15	21	21	18.8	
	3	23	18	24	14	20	25	20	20	20	18	23	20	20.0	
W2-P1	1	19	17	20	23	19	18	19	19	17	19	19	21	18.8	18.7
	2	19	18	19	20	18	19	18	19	18	20	19	21	18.6	
	3	18	18	19	22	18	19	18	20	20	18	18	23	18.8	
W3-P1	1	23	28	28	27	28	20	28	24	26	26	23	18	24.5	24.3
	2	27	29	28	28	26	18	26	22	24	24	27	19	24.4	
	3	24	31	28	28	27	17	27	24	23	23	24	17	24.0	
W4-P1	1	19	18	20	15	19	20	19	22	22	25	19	19	19.4	20.1
	2	20	20	20	21	20	15	20	25	24	23	20	21	20.3	
	3	20	19	18	24	21	15	21	26	25	19	20	24	20.6	
W5-P1	1	18	20	20	24	16	20	16	20	19	25	18	16	18.9	19.0
	2	19	21	17	24	17	19	17	21	21	24	19	15	19.2	
	3	19	16	19	24	16	20	16	17	22	20	19	17	19.0	
W1-P2	1	65	-	63	-	68	48	68	-	66	-	65	48	61.1	63.5
	2	71	-	66	-	69	50	69	-	75	-	71	41	63.9	
	3	70	-	60	-	73	59	73	-	80	-	70	41	65.5	
W2-P2	1	65	-	71	-	65	40	65	-	67	-	65	47	60.6	61.9
	2	68	-	72	-	65	45	65	-	62	-	68	49	61.6	
	3	66	-	71	-	67	45	67	-	67	-	66	58	63.4	
W3-P2	1	49	-	66	-	49	48	49	-	75	-	49	45	53.8	55.4
	2	50	-	74	-	52	56	52	-	65	-	50	48	55.8	
	3	50	-	73	-	52	57	52	-	64	-	50	55	56.6	
W4-P2	1	61	-	85	-	56	51	56	-	80	-	61	46	62.0	61.7
	2	60	-	85	-	56	47	56	-	80	-	60	45	61.1	
	3	62	-	86	-	56	46	56	-	80	-	62	50	62.0	
W5-P2	1	47	-	78	-	44	54	44	-	71	-	47	54	54.5	56.5
	2	46	-	78	-	48	58	48	-	72	-	46	54	56.0	
	3	52	-	88	-	48	54	48	-	75	-	52	58	58.9	

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางที่ ค-2 ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์ซีซสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม L-P

ตัวอย่างทดสอบ	ระดับ ที่	ความหนาของวัสดุกันไฟตำแหน่งที่ ( มม.)							ความหนาเฉลี่ย ( มม.)
		1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย	
L1-P1	1	29	25	21	31	25	32	27.3	26.1
	2	26	25	18	31	28	22	25.1	
	3	25	26	20	31	30	24	26.0	
L2-P1	1	24	28	21	22	26	22	24.0	23.1
	2	23	24	19	23	24	23	22.8	
	3	25	23	15	23	23	26	22.6	
L3-P1	1	25	23	29	27	25	32	27.0	26.7
	2	25	27	30	24	24	24	25.8	
	3	28	26	27	28	21	33	27.3	
L4-P1	1	16	25	25	23	27	20	22.8	23.5
	2	18	25	25	24	26	23	23.6	
	3	21	26	27	25	25	19	24.0	
L5-P1	1	22	19	26	29	26	27	25.0	23.8
	2	19	19	24	26	27	24	23.3	
	3	20	20	24	30	23	21	23.1	
L6-P1	1	21	24	24	23	24	29	24.3	24.6
	2	23	22	22	28	26	28	25.0	
	3	23	24	24	25	25	26	24.6	
L1-P2	1	42	39	34	45	41	33	39.0	38.7
	2	40	39	32	44	41	31	37.8	
	3	41	39	32	42	45	37	39.3	
L2-P2	1	43	46	36	51	47	27	41.3	41.0
	2	47	43	30	46	53	31	41.3	
	3	45	43	29	46	52	31	40.6	
L3-P2	1	39	40	43	40	39	46	41.2	40.3
	2	40	41	41	40	38	42	40.3	
	3	43	44	37	40	38	34	39.3	
L4-P2	1	40	41	25	40	43	38	37.8	38.2
	2	39	40	22	42	44	42	38.2	
	3	41	39	24	40	46	42	38.7	
L5-P2	1	41	36	41	45	48	42	42.2	40.8
	2	39	41	34	48	46	33	40.2	
	3	41	40	31	48	46	35	40.2	
L6-P2	1	40	44	35	40	42	27	38.0	39.7
	2	44	40	31	44	44	36	39.8	
	3	41	39	38	43	44	43	41.3	

ตารางที่ ก-3 ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทซีเมนต์เรียบสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม CHS-P

ตัวอย่างทดสอบ	ระดับ ที่	ความหนาของวัสดุกันไฟตำแหน่งที่ ( มม.)					ความหนาเฉลี่ย ( มม.)
		1	2	3	4	เฉลี่ย	
CHS1-P1	1	25	23	28	24	24.8	23.5
	2	21	24	25	24	23.4	
	3	21	22	24	23	22.3	
CHS2-P1	1	17	26	22	17	20.6	21.8
	2	21	21	20	17	19.7	
	3	28	27	28	19	25.3	
CHS3-P1	1	22	24	23	22	22.8	23.1
	2	23	21	21	23	21.9	
	3	26	26	21	25	24.6	
CHS4-P1	1	24	24	22	18	21.8	21.4
	2	23	19	20	19	20.1	
	3	24	25	21	20	22.3	
CHS5-P1	1	22	20	21	19	20.3	20.3
	2	23	19	20	19	20.1	
	3	21	19	20	23	20.6	
CHS1-P2	1	44	39	40	40	40.8	41.9
	2	45	41	40	40	41.5	
	3	46	41	43	44	43.5	
CHS2-P2	1	41	41	45	42	42.3	42.3
	2	41	39	45	42	41.8	
	3	45	42	45	40	43.0	
CHS3-P2	1	40	40	41	39	40.0	40.1
	2	39	44	38	39	40.0	
	3	44	40	38	39	40.3	
CHS4-P2	1	37	36	45	37	38.8	38.9
	2	38	35	41	39	38.3	
	3	44	38	37	40	39.8	
CHS5-P2	1	47	43	43	41	43.5	43.3
	2	43	42	40	43	42.0	
	3	48	40	43	46	44.3	

ตารางที่ ค-4 ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม W-I

ตัวอย่างทดสอบ	ระดับ ที่	ความหนาของสีกันไฟ + สีรองพื้นค่าเฉลี่ย (ไมครอน)												ความหนารวม เฉลี่ย (ไมครอน)	ความหนาสีรองพื้น เฉลี่ย (ไมครอน)	ความหนาสีกันไฟ เฉลี่ย (ไมครอน)	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				เฉลี่ย
W1-I1	1	-	1700	1605	1675	-	1584	-	1610	1676	1570	-	1625	1630.6	1610	89	1521
	2	-	1570	1605	1584	-	1650	-	1585	1579	1590	-	1615	1597.3			
	3	-	1604	1675	1600	-	1585	-	1594	1574	1572	-	1601	1600.6			
W2-I1	1	-	1621	1580	1578	-	1605	-	1584	1578	1642	-	1583	1596.4	1613	87	1526
	2	-	1575	1648	1605	-	1586	-	1584	1576	1635	-	1642	1606.4			
	3	-	1624	1625	1654	-	1615	-	1620	1675	1689	-	1580	1635.3			
W3-I1	1	-	1687	1590	1615	-	1604	-	1589	1596	1595	-	1580	1607.0	1614	85	1529
	2	-	1596	1576	1625	-	1632	-	1602	1584	1645	-	1666	1615.8			
	3	-	1652	1587	1596	-	1656	-	1632	1641	1600	-	1587	1618.9			
W4-I1	1	-	1588	1594	1642	-	1696	-	1615	1632	1622	-	1634	1627.9	1610	88	1522
	2	-	1588	1654	1623	-	1600	-	1642	1586	1584	-	1594	1608.9			
	3	-	1578	1593	1584	-	1588	-	1579	1603	1622	-	1600	1593.4			
W5-I1	1	-	1656	1642	1623	-	1622	-	1591	1583	1592	-	1656	1620.6	1606	87	1518
	2	-	1598	1576	1596	-	1602	-	1593	1587	1586	-	1624	1595.3			
	3	-	1597	1586	1588	-	1584	-	1620	1632	1596	-	1604	1600.9			
W1-I2	1	-	2110	2110	2130	-	2100	-	2080	2090	2120	-	2100	2105.0	2107	89	2017
	2	-	2120	2080	2120	-	2120	-	2120	2120	2130	-	2090	2112.5			
	3	-	2110	2090	2080	-	2090	-	2110	2130	2100	-	2110	2102.5			
W2-I2	1	-	2120	2100	2090	-	2110	-	2110	2120	2120	-	2120	2111.3	2103	92	2011
	2	-	2110	2110	2100	-	2100	-	2100	2100	2090	-	2110	2102.5			
	3	-	2120	2090	2070	-	2100	-	2100	2080	2100	-	2100	2095.0			
W3-I2	1	-	2100	2100	2120	-	2120	-	2090	2120	2100	-	2130	2110.0	2111	89	2022
	2	-	2100	2120	2160	-	2080	-	2100	2090	2130	-	2110	2111.3			
	3	-	2110	2130	2120	-	2070	-	2110	2130	2110	-	2120	2112.5			
W4-I2	1	-	2120	2120	2110	-	2100	-	2100	2110	2110	-	2110	2110.0	2111	89	2022
	2	-	2130	2100	2100	-	2110	-	2100	2100	2130	-	2110	2110.0			
	3	-	2130	2100	2100	-	2130	-	2080	2120	2130	-	2110	2112.5			
W5-I2	1	-	2110	2080	2130	-	2100	-	2090	2090	2110	-	2120	2103.8	2104	87	2017
	2	-	2100	2070	2120	-	2090	-	2110	2130	2090	-	2100	2101.3			
	3	-	2090	2100	2110	-	2130	-	2120	2090	2100	-	2120	2107.5			

- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม L-I

ตัวอย่างทดสอบ	ระดับ ที่	ความหนาของสีกันไฟ + สีรองพื้นตำแหน่งที่ (ไมครอน)							ความหนารวม เฉลี่ย (ไมครอน)	ความหนาสีรองพื้น เฉลี่ย (ไมครอน)	ความหนาสีกันไฟ เฉลี่ย (ไมครอน)
		1	2	3	4	5	6	เฉลี่ย			
L1-I1	1	1654	1630	-	1687	1607	-	1644.5	1621	82	1539
	2	1589	1652	-	1624	1641	-	1626.5			
	3	1587	1580	-	1604	1599	-	1592.5			
L2-I1	1	1654	1623	-	1589	1633	-	1624.8	1625	83	1542
	2	1624	1600	-	1640	1632	-	1624.0			
	3	1624	1633	-	1605	1642	-	1626.0			
L3-I1	1	1589	1594	-	1588	1623	-	1598.5	1615	81	1534
	2	1622	1615	-	1641	1638	-	1629.0			
	3	1617	1624	-	1623	1601	-	1616.3			
L4-I1	1	1670	1624	-	1650	1610	-	1638.5	1627	80	1547
	2	1589	1598	-	1570	1645	-	1600.5			
	3	1652	1643	-	1624	1651	-	1642.5			
L5-I1	1	1590	1604	-	1595	1621	-	1602.5	1621	88	1533
	2	1589	1598	-	1632	1644	-	1615.8			
	3	1651	1623	-	1641	1660	-	1643.8			
L6-I1	1	1678	1680	-	1600	1681	-	1659.8	1639	83	1556
	2	1624	1623	-	1651	1608	-	1626.5			
	3	1645	1650	-	1588	1640	-	1630.8			
L1-I2	1	2100	2130	-	2120	2120	-	2117.5	2105	87	2018
	2	2090	2120	-	2100	2100	-	2102.5			
	3	2080	2110	-	2100	2090	-	2095.0			
L2-I2	1	2100	2100	-	2130	2090	-	2105.0	2103	87	2016
	2	2120	2090	-	2110	2100	-	2105.0			
	3	2110	2090	-	2110	2090	-	2100.0			
L3-I2	1	2120	2080	-	2090	2100	-	2097.5	2096	87	2009
	2	2100	2100	-	2090	2090	-	2095.0			
	3	2100	2110	-	2090	2080	-	2095.0			
L4-I2	1	2130	2100	-	2100	2100	-	2107.5	2109	86	2023
	2	2100	2110	-	2110	2110	-	2107.5			
	3	2090	2120	-	2120	2120	-	2112.5			
L5-I2	1	2080	2100	-	2100	2090	-	2092.5	2097	86	2011
	2	2090	2080	-	2100	2090	-	2090.0			
	3	2120	2100	-	2120	2090	-	2107.5			
L6-I2	1	2100	2090	-	2100	2100	-	2097.5	2103	85	2018
	2	2110	2100	-	2090	2120	-	2105.0			
	3	2100	2120	-	2100	2110	-	2107.5			

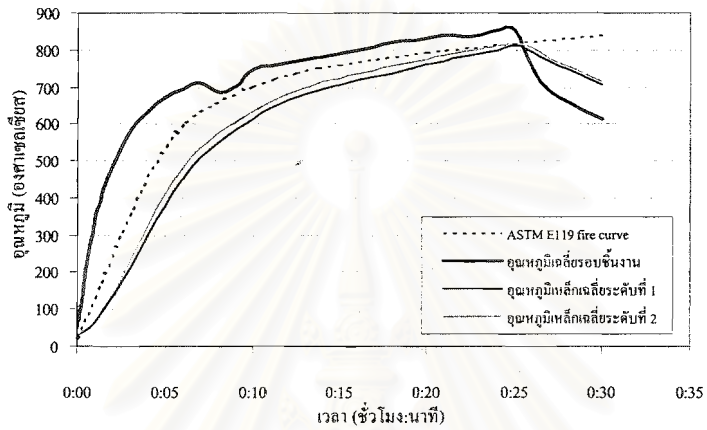
- หมายถึงไม่สามารถวัดค่าได้

ตารางที่ ค-6 ผลการวัดความหนาของวัสดุกันไฟประเภทสีกันไฟสำหรับตัวอย่างทดสอบกลุ่ม CHS-I

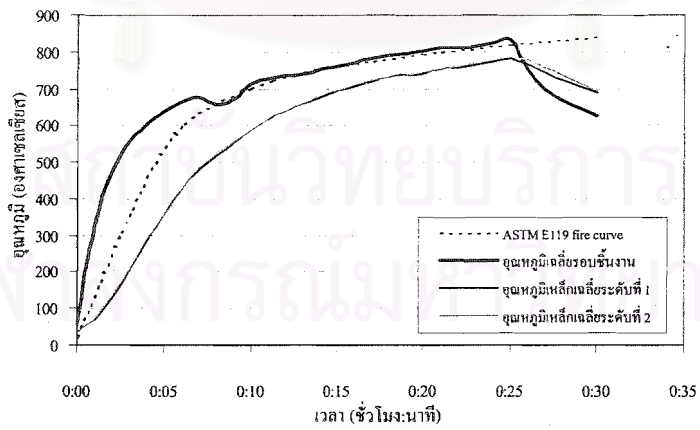
ตัวอย่างทดสอบ	ระดับ ที่	ความหนาของสีกันไฟ + สีรองพื้นตำแหน่งที่ (ไมครอน)					ความหนารวม เฉลี่ย (ไมครอน)	ความหนาสีรองพื้น เฉลี่ย (ไมครอน)	ความหนาสีกันไฟ เฉลี่ย (ไมครอน)
		1	2	3	4	เฉลี่ย			
CHS1-I1	1	1589	1652	1642	1642	1631.3	1622	85	1537
	2	1643	1659	1587	1596	1621.3			
	3	1588	1607	1631	1623	1612.3			
CHS2-I1	1	1622	1635	1647	1456	1590.0	1622	82	1540
	2	1596	1594	1896	1601	1671.8			
	3	1608	1615	1588	1600	1602.8			
CHS3-I1	1	1680	1640	1678	1640	1659.5	1629	84	1545
	2	1594	1620	1589	1621	1606.0			
	3	1623	1622	1640	1599	1621.0			
CHS4-I1	1	1602	1633	1641	1635	1627.8	1629	82	1547
	2	1607	1627	1641	1620	1623.8			
	3	1655	1634	1621	1630	1635.0			
CHS5-I1	1	1589	1596	1608	1587	1595.0	1612	82	1530
	2	1632	1587	1633	1612	1616.0			
	3	1598	1637	1615	1647	1624.3			
CHS1-I2	1	2120	2090	2130	2130	2117.5	2108	86	2021
	2	2110	2070	2120	2110	2102.5			
	3	2100	2100	2090	2120	2102.5			
CHS2-I2	1	2110	2100	2100	2110	2105.0	2107	88	2019
	2	2110	2090	2080	2130	2102.5			
	3	2100	2130	2120	2100	2112.5			
CHS3-I2	1	2120	2100	2100	2120	2110.0	2108	85	2023
	2	2130	2110	2070	2100	2102.5			
	3	2130	2090	2110	2110	2110.0			
CHS4-I2	1	2100	2080	2100	2090	2092.5	2104	87	2017
	2	2110	2100	2130	2120	2115.0			
	3	2090	2120	2100	2110	2105.0			
CHS5-I2	1	2130	2100	2110	2000	2085.0	2097	88	2009
	2	2120	2090	2100	2130	2110.0			
	3	2100	2080	2090	2110	2095.0			



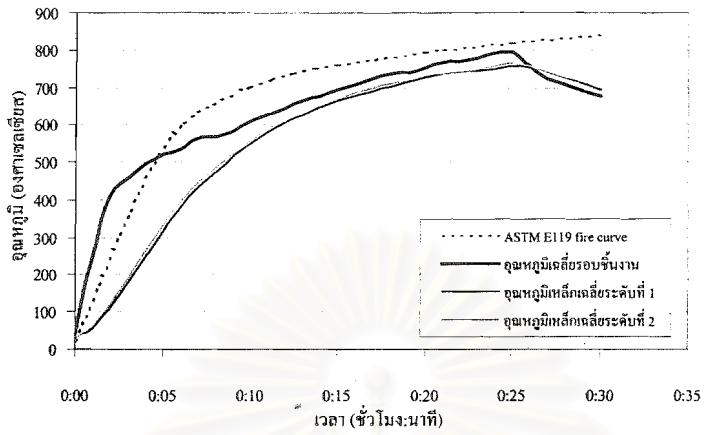
ภาคผนวก ง.



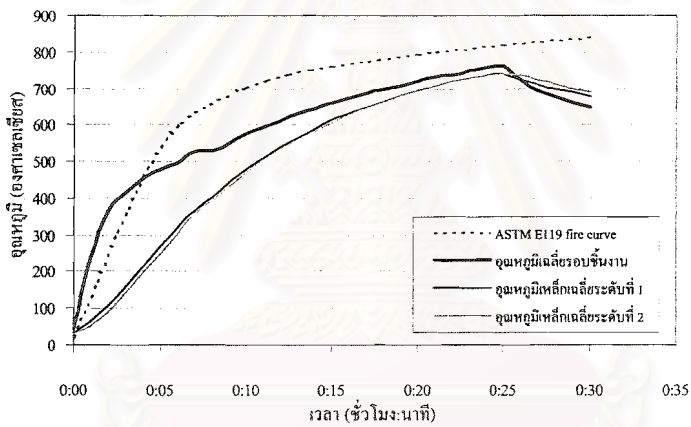
รูปที่ ง-1 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W1-B



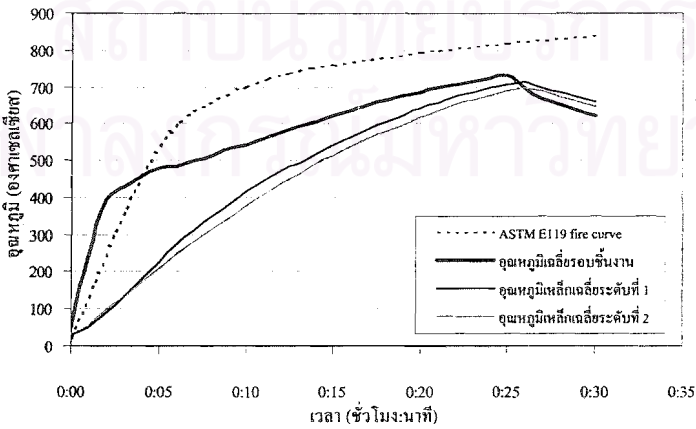
รูปที่ ง-2 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W2-B



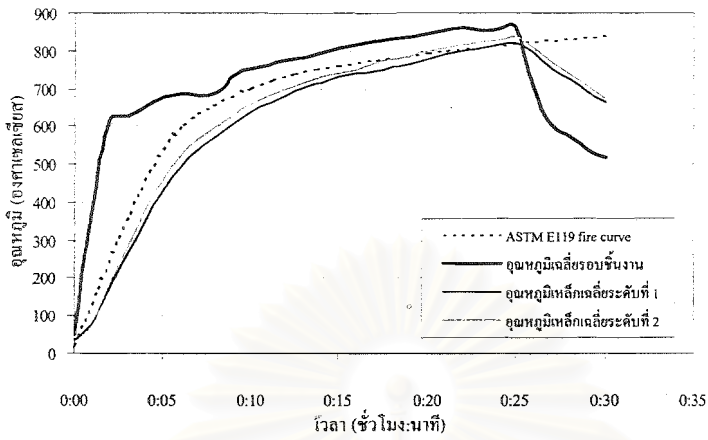
รูปที่ ง-3 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W3-B



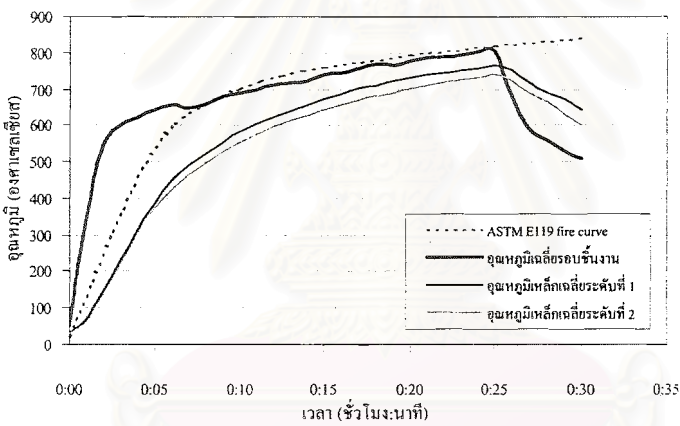
รูปที่ ง-4 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W4-B



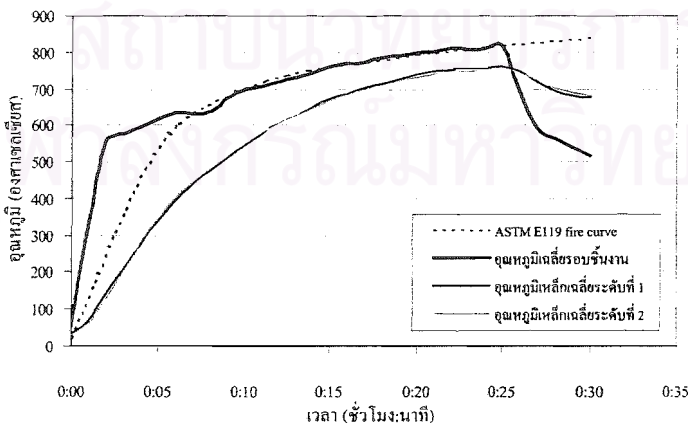
รูปที่ ง-5 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W5-B



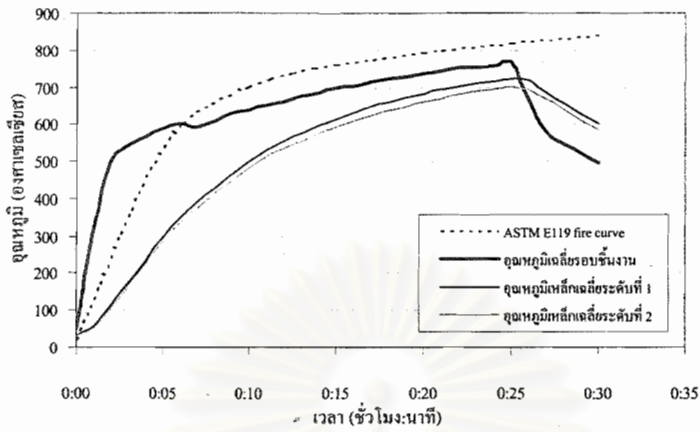
รูปที่ ง-6 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L1-B



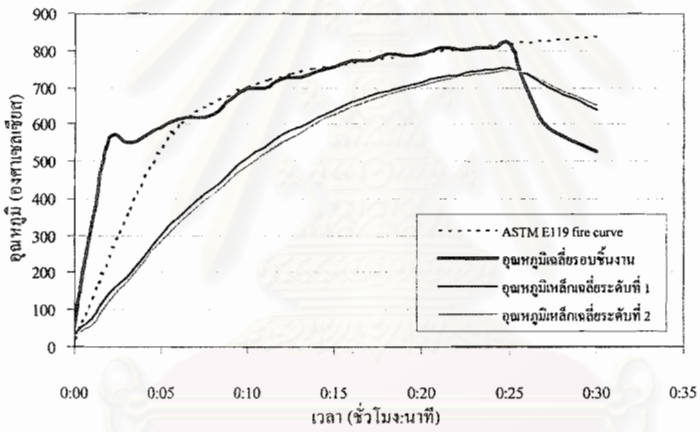
รูปที่ ง-7 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L2-B



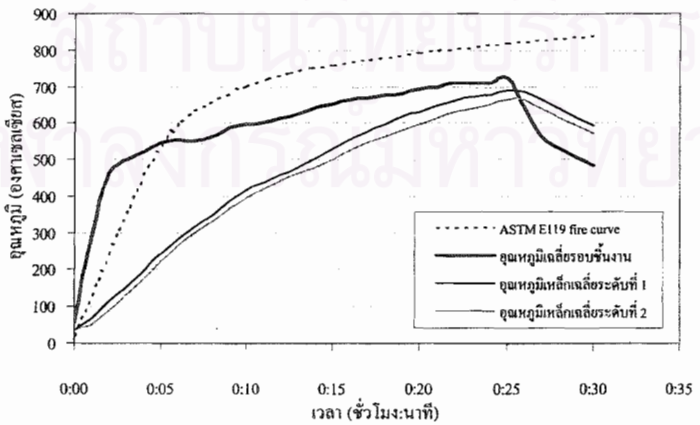
รูปที่ ง-8 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L3-B



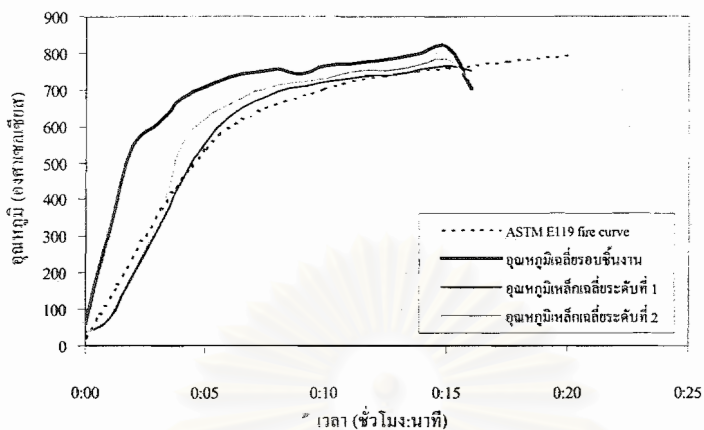
รูปที่ ง-9 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L4-B



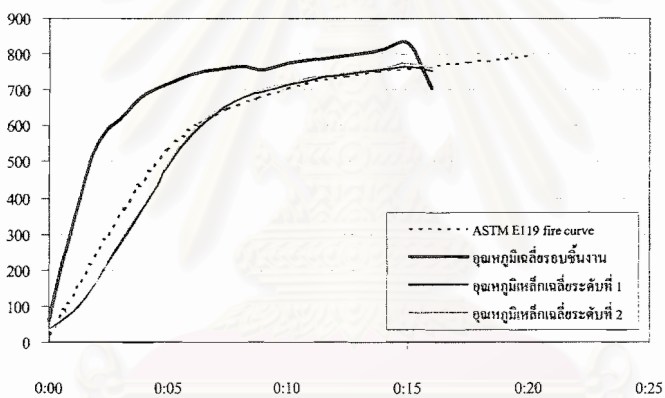
รูปที่ ง-10 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L5-B



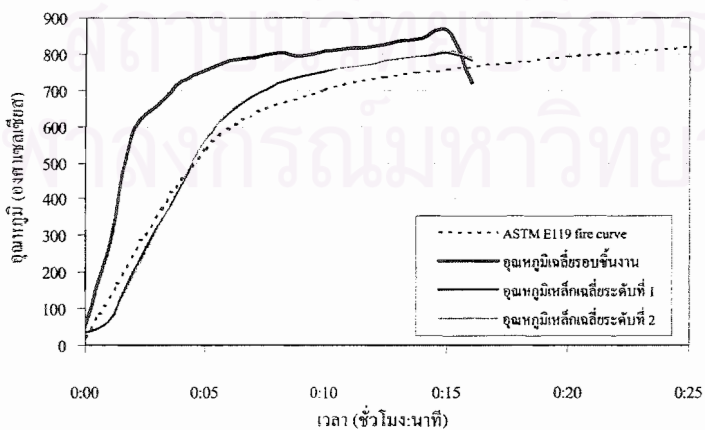
รูปที่ ง-11 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L6-B



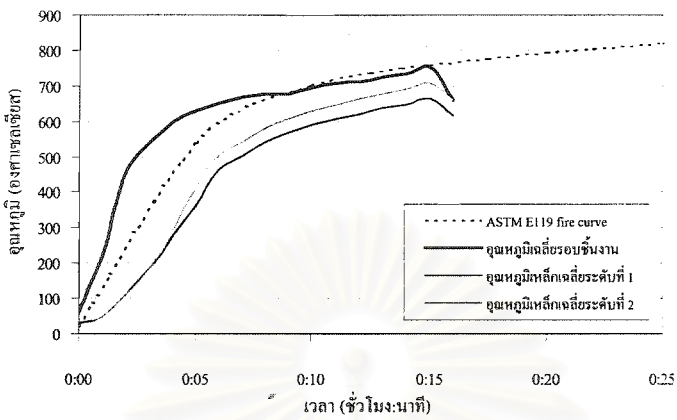
รูปที่ ง-12 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS1-B



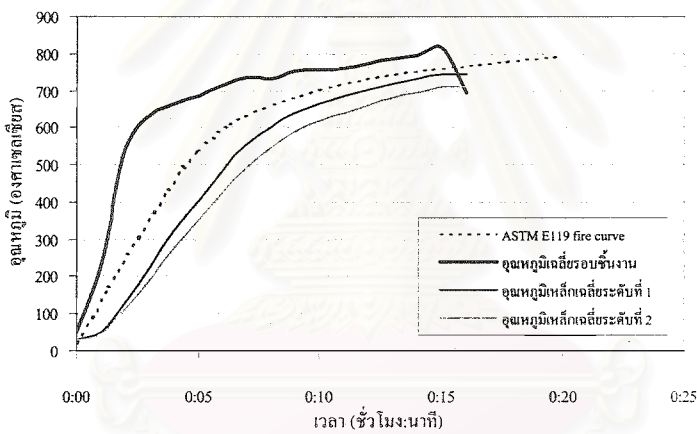
รูปที่ ง-13 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS2-B



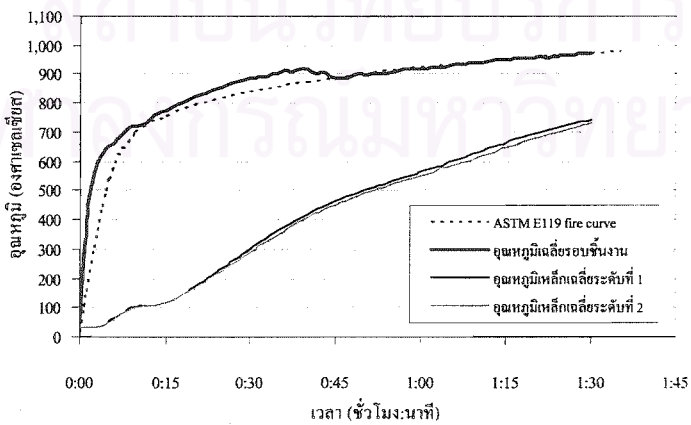
รูปที่ ง-14 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS3-B



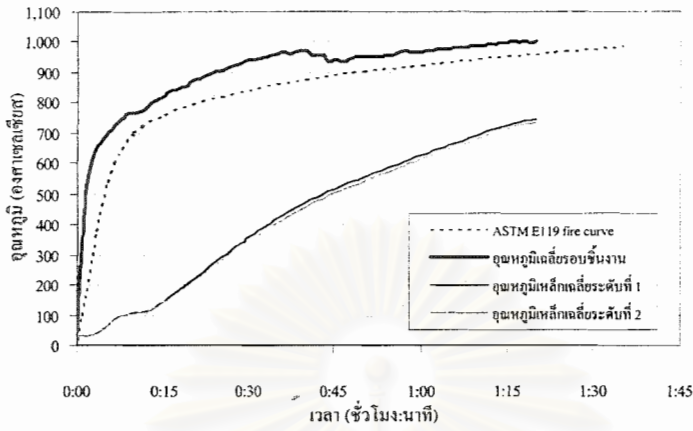
รูปที่ ง-15 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS4-B



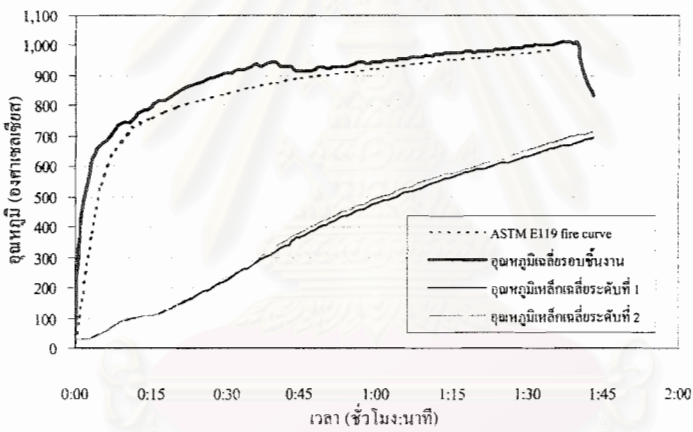
รูปที่ ง-16 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS5-B



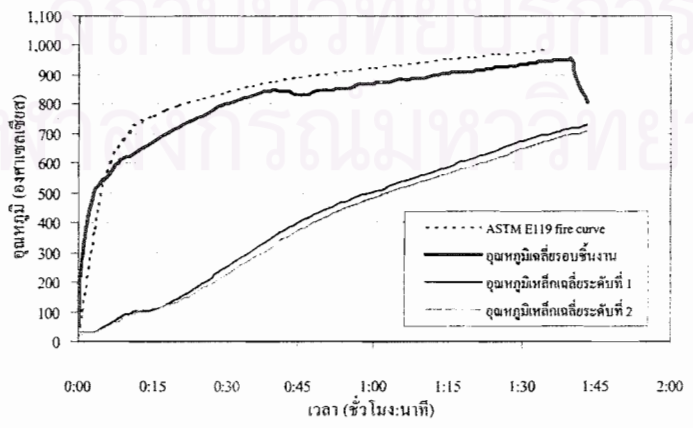
รูปที่ ง-17 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W1-P1



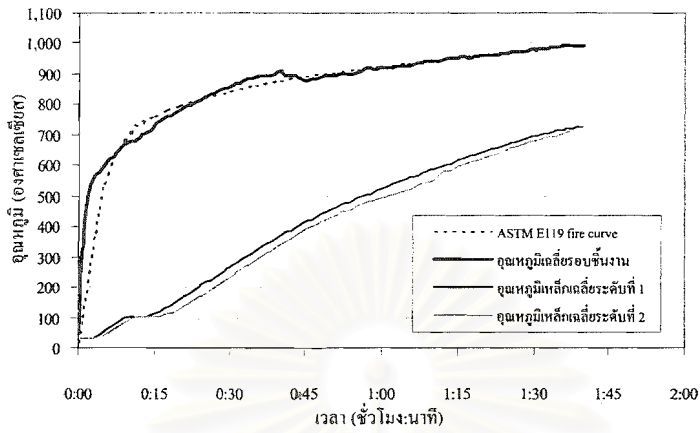
รูปที่ ง-18 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W2-P1



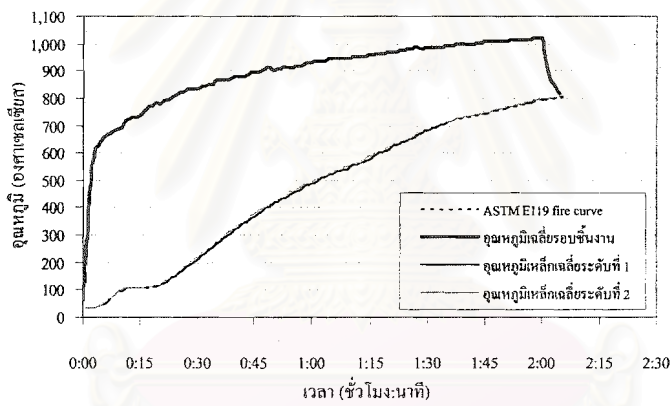
รูปที่ ง-19 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W3-P1



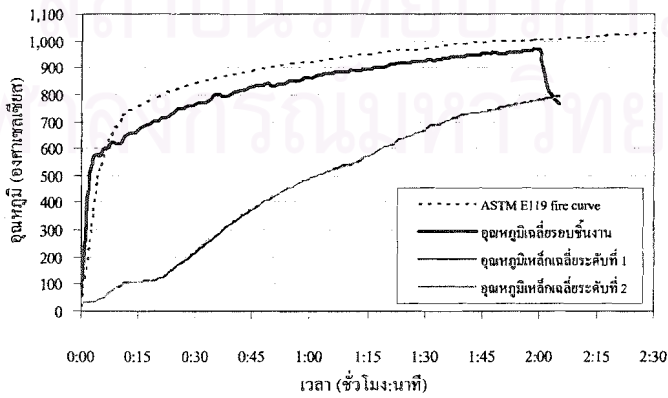
รูปที่ ง-20 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W4-P1



รูปที่ ง-21 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W5-P1

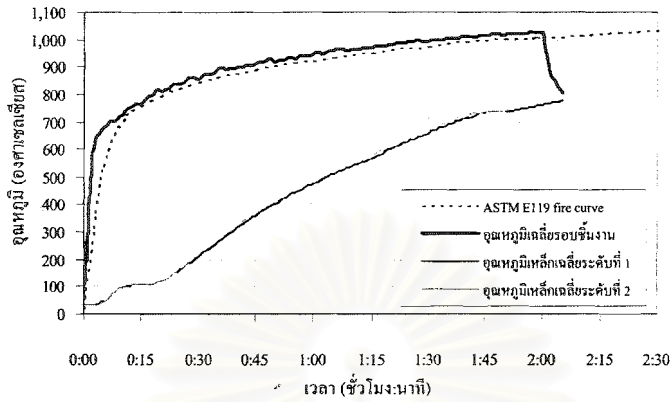


รูปที่ ง-22 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L1-P1

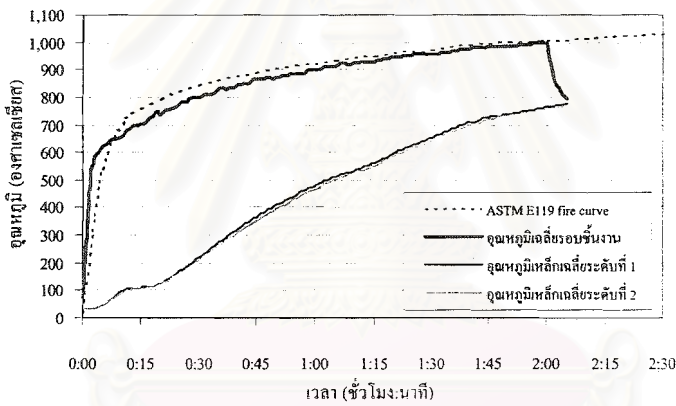


รูปที่ ง-23 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L2-P1

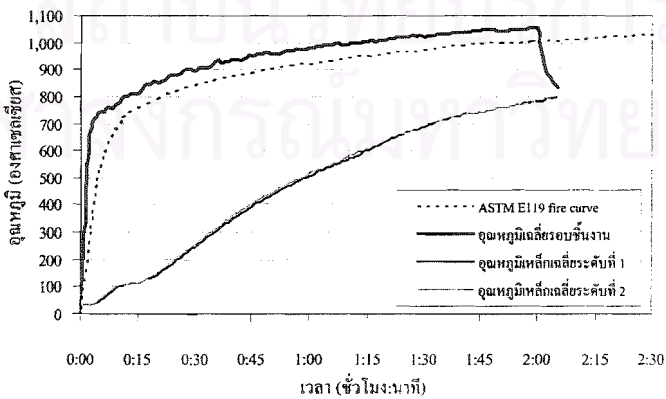




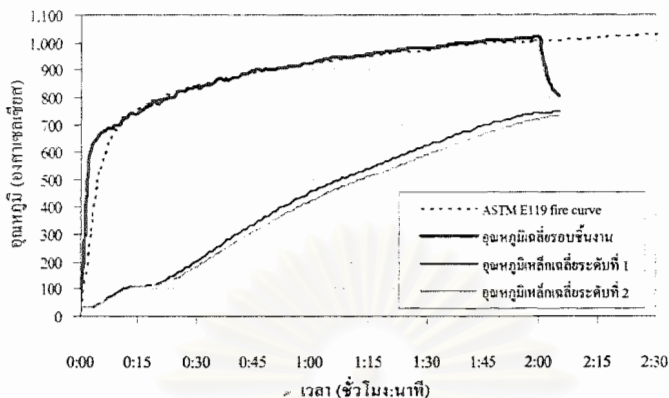
รูปที่ ง-24 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L3-P1



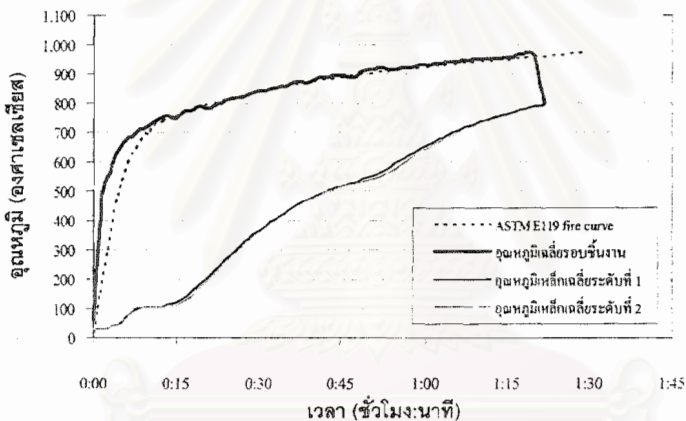
รูปที่ ง-25 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L4-P1



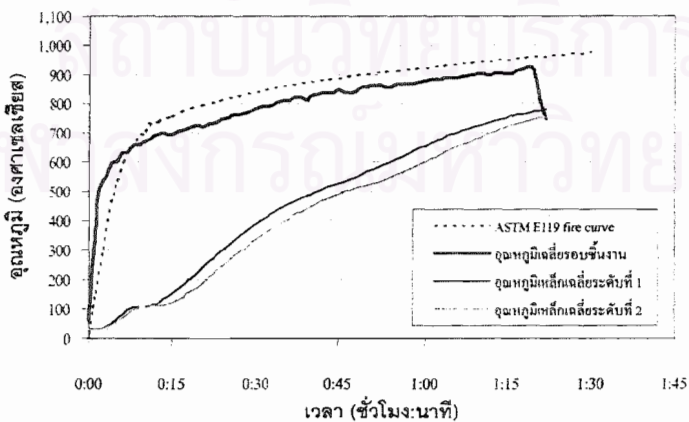
รูปที่ ง-26 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L5-P1



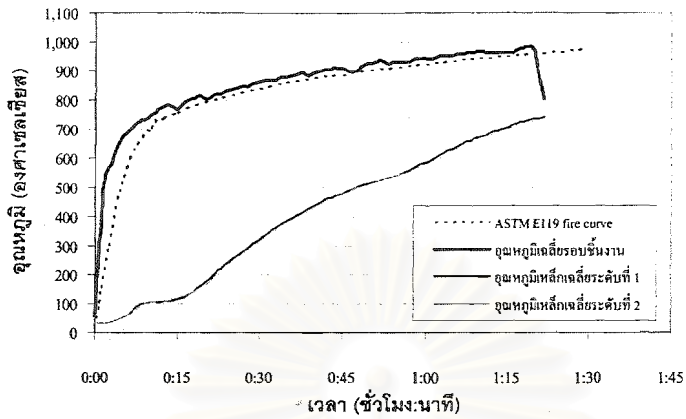
รูปที่ ง-27 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L6-P1



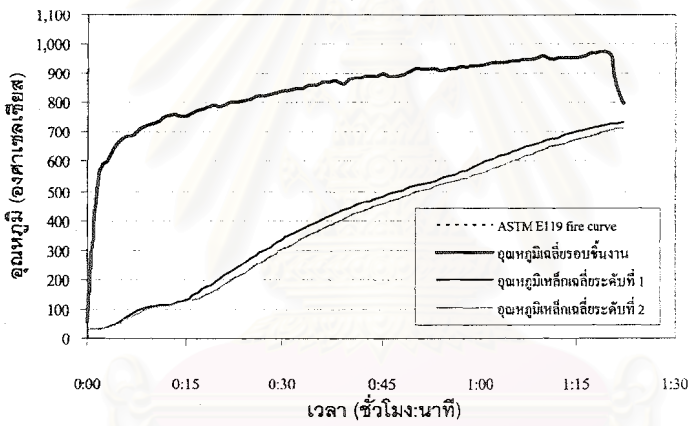
รูปที่ ง-28 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS1-P1



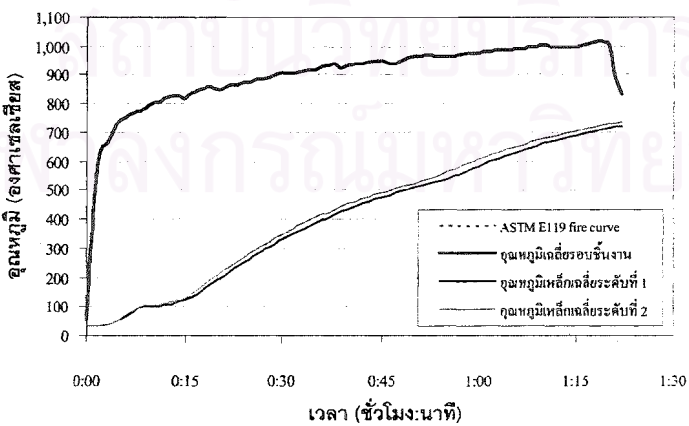
รูปที่ ง-29 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS2-P1



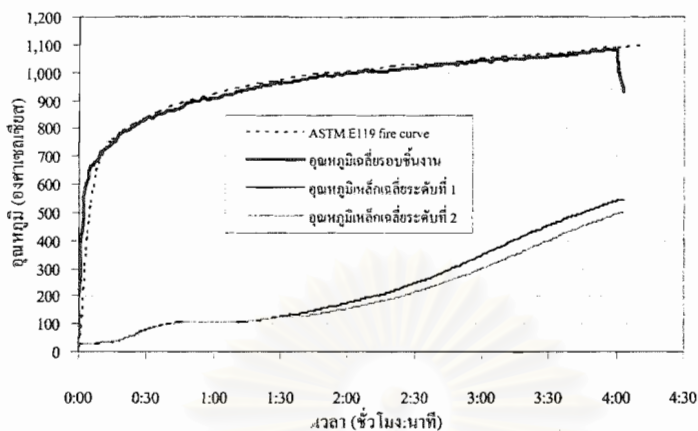
รูปที่ ง-30 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS3-P1



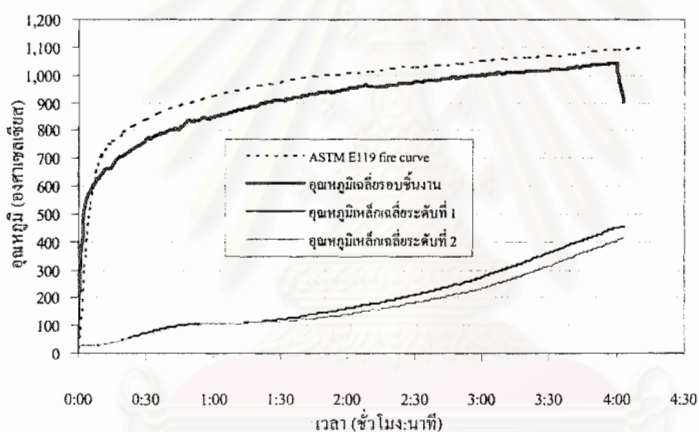
รูปที่ ง-31 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS4-P1



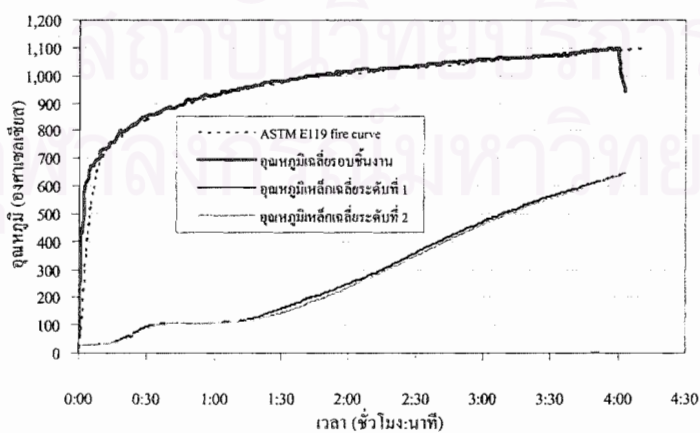
รูปที่ ง-32 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS5-P1



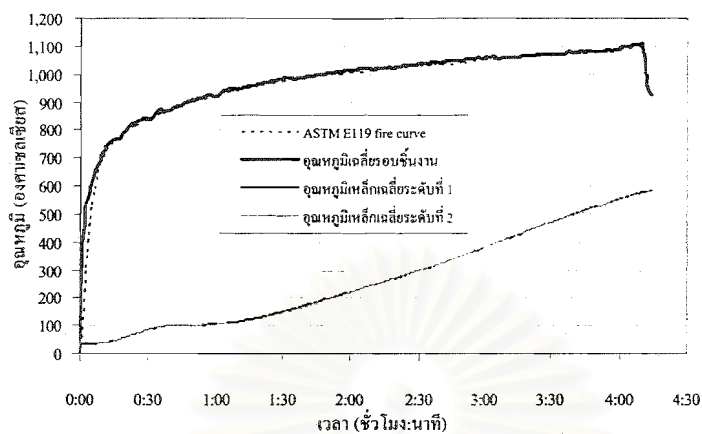
รูปที่ ง-33 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W1-P2



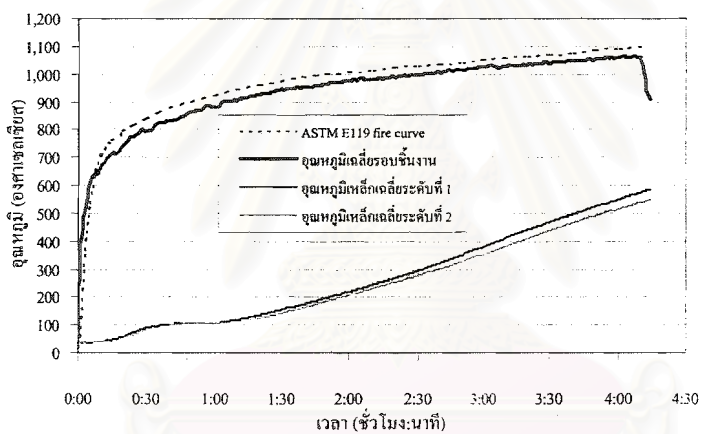
รูปที่ ง-34 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W2-P2



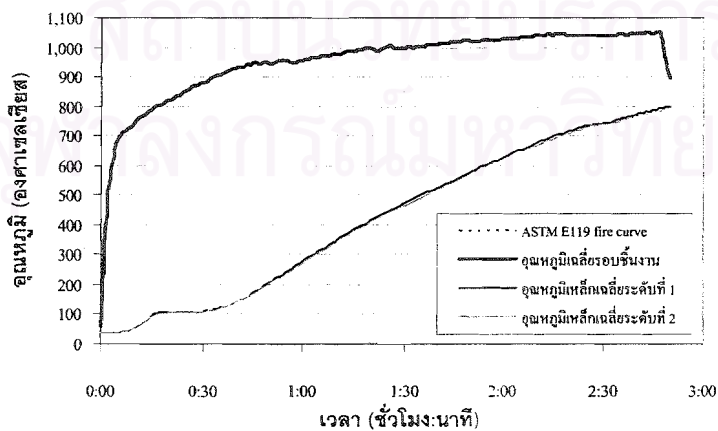
รูปที่ ง-35 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W3-P2



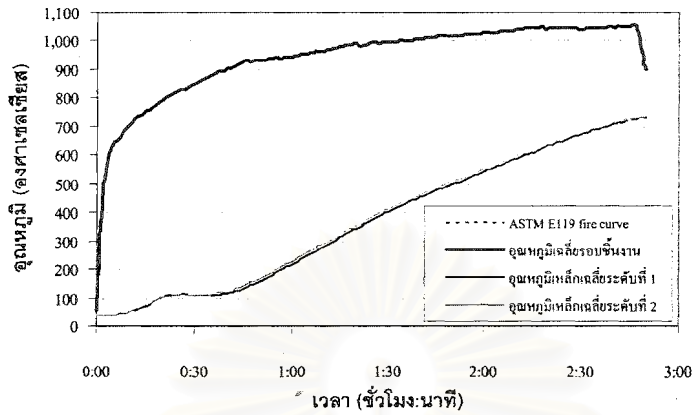
รูปที่ ง-36 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของค้ำอย่างทดสอบหมายเลข W4-P2



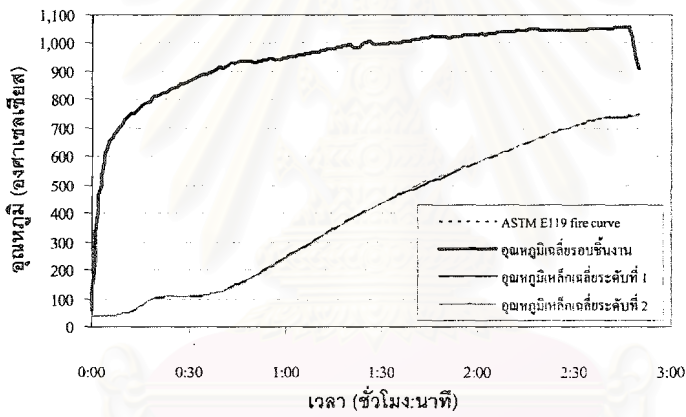
รูปที่ ง-37 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของค้ำอย่างทดสอบหมายเลข W5-P2



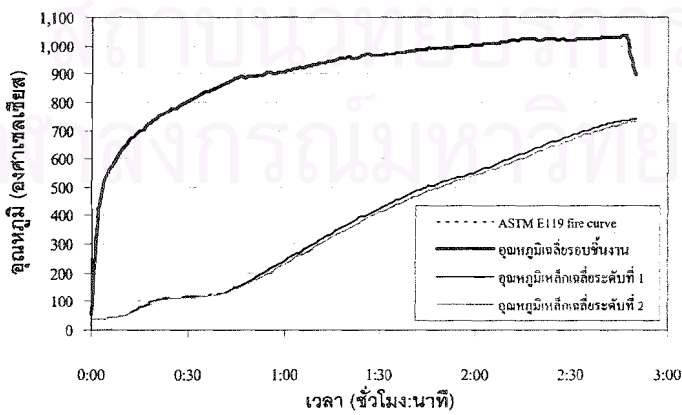
รูปที่ ง-38 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของค้ำอย่างทดสอบหมายเลข L1-P2



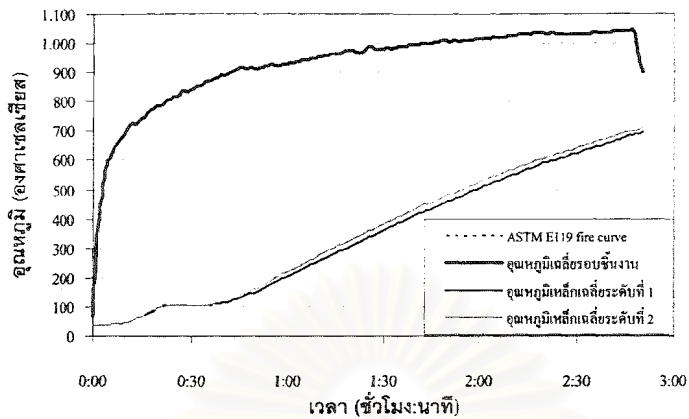
รูปที่ ง-39 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L2-P2



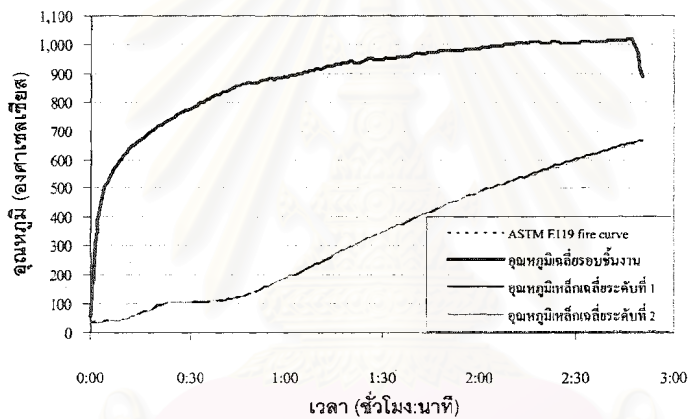
รูปที่ ง-40 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L3-P2



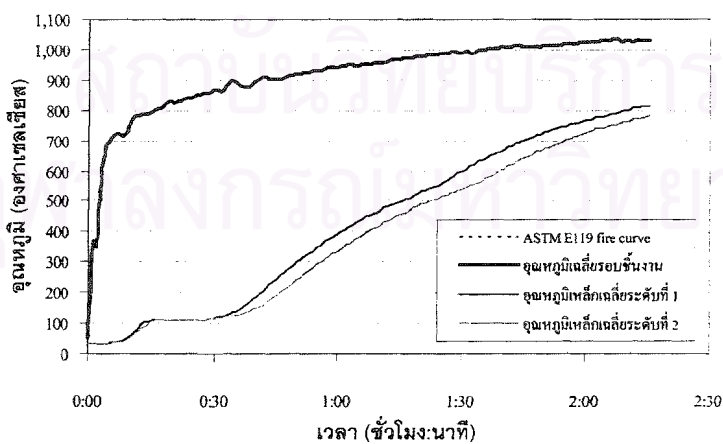
รูปที่ ง-41 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L4-P2



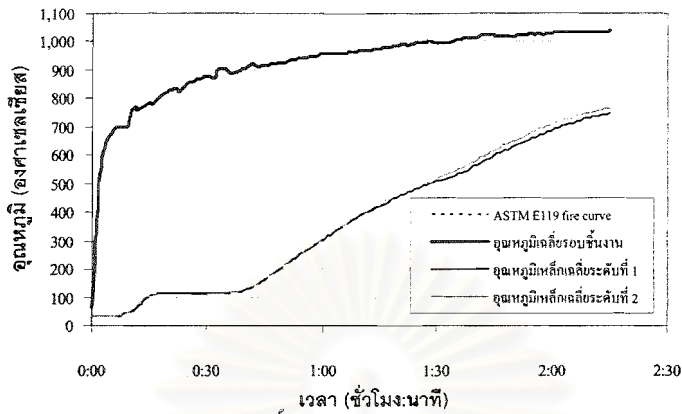
รูปที่ ๔-๔๒ กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L5-P2



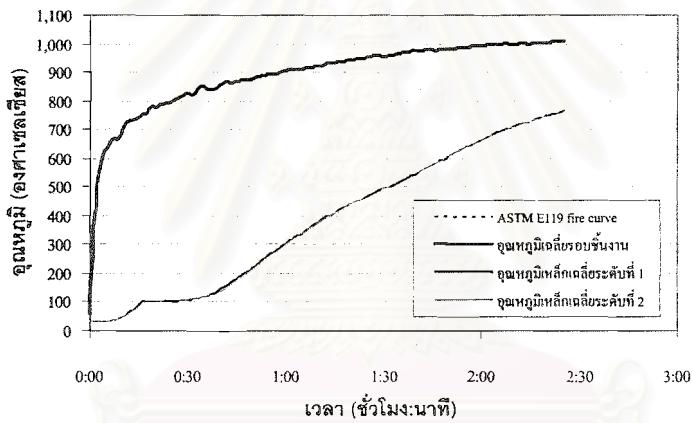
รูปที่ ๔-๔๓ กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L6-P2



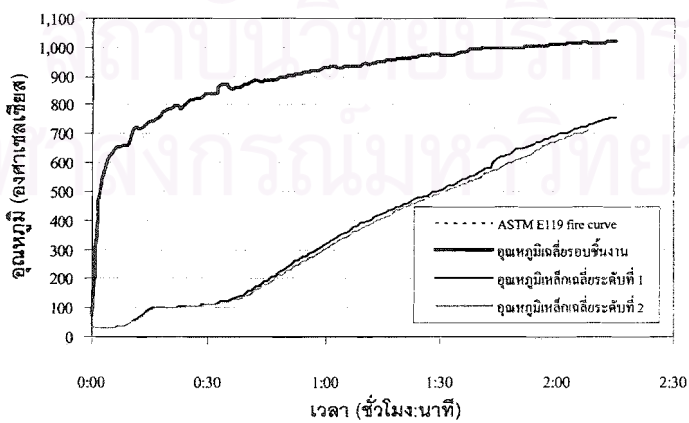
รูปที่ ๔-๔๔ กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS1-P2



รูปที่ ง-45 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS2-P2

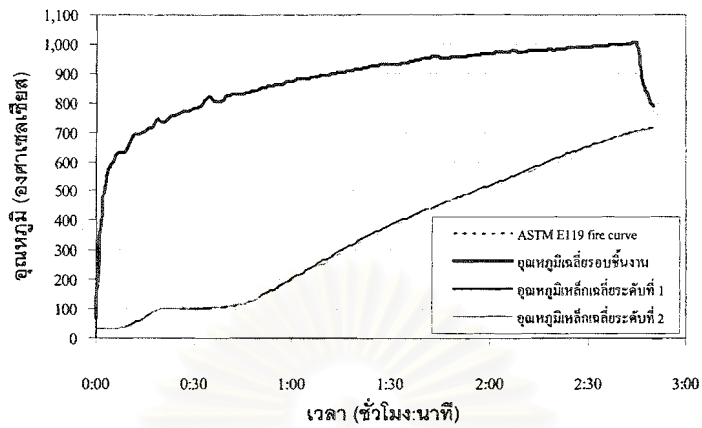


รูปที่ ง-46 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS3-P2

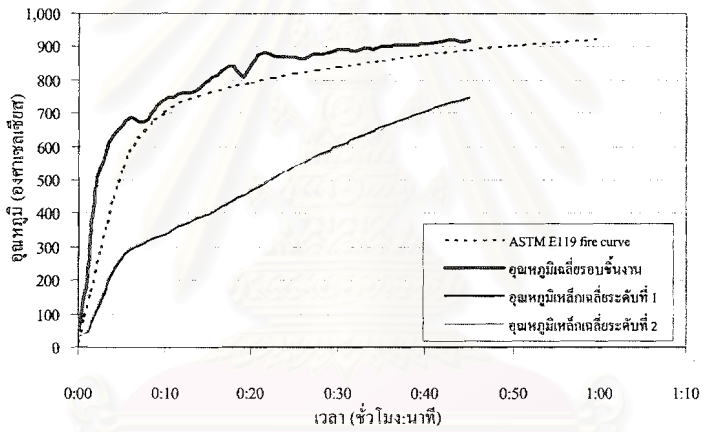


รูปที่ ง-47 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS4-P2

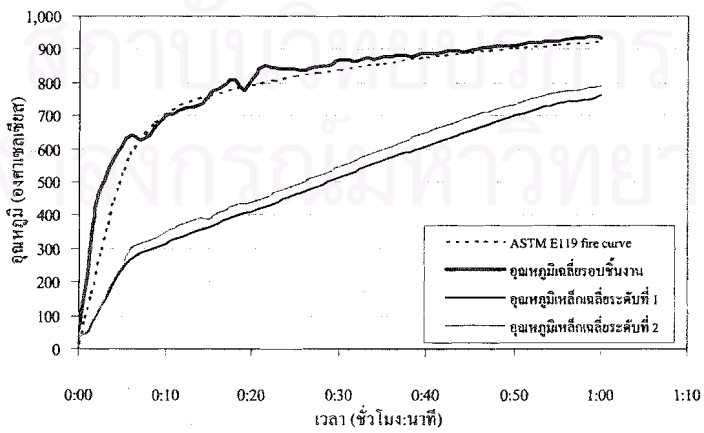




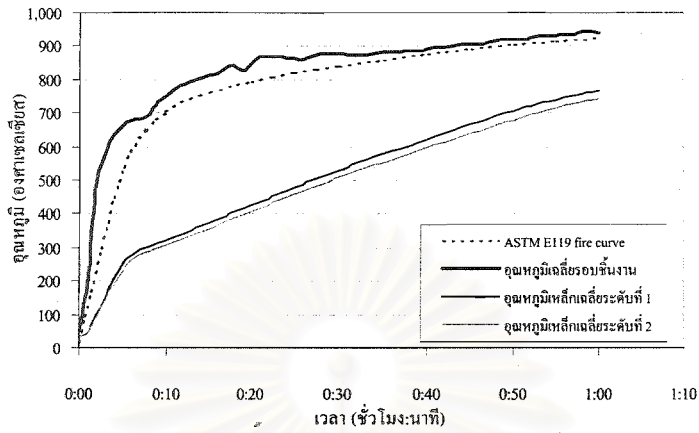
รูปที่ ง-48 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS5-P2



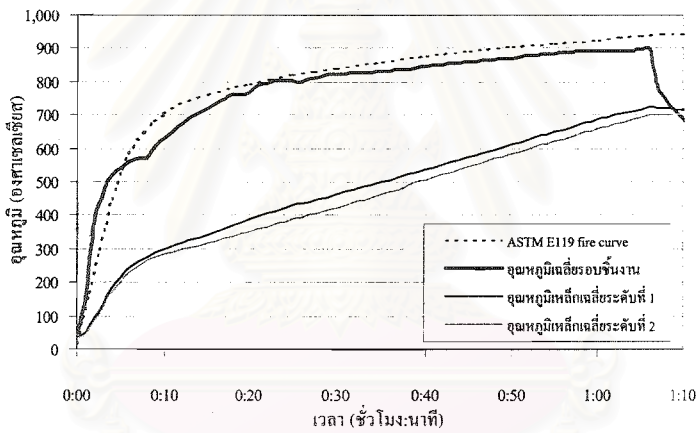
รูปที่ ง-49 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W1-I1



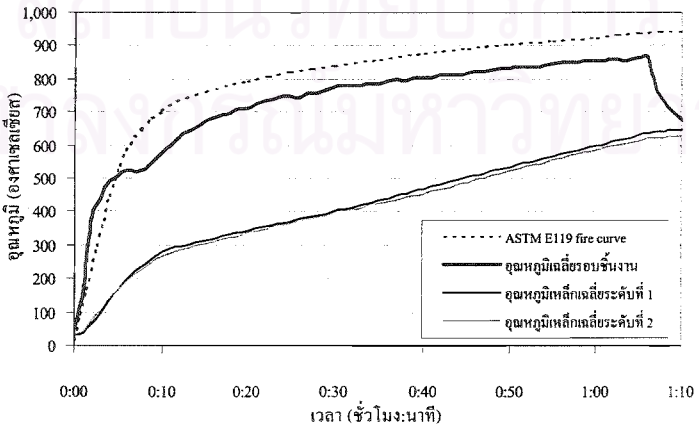
รูปที่ ง-50 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W2-I1



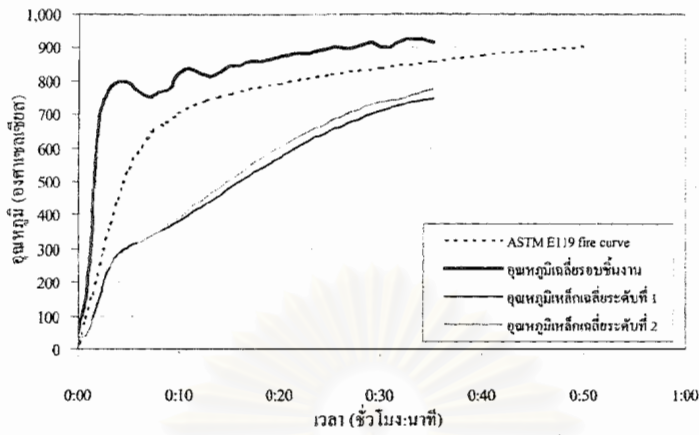
รูปที่ ง-51 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W3-II



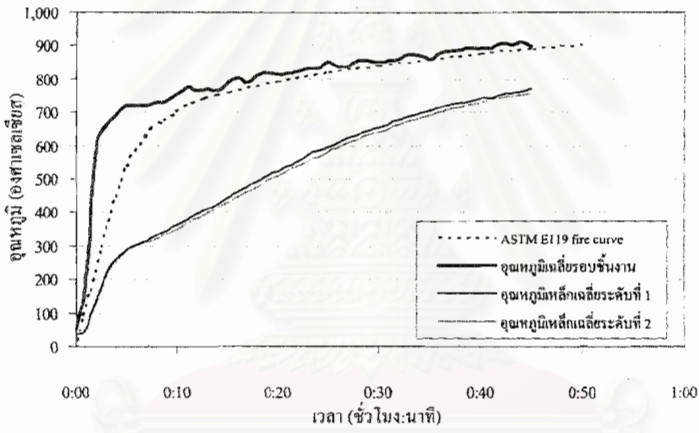
รูปที่ ง-52 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W4-I1



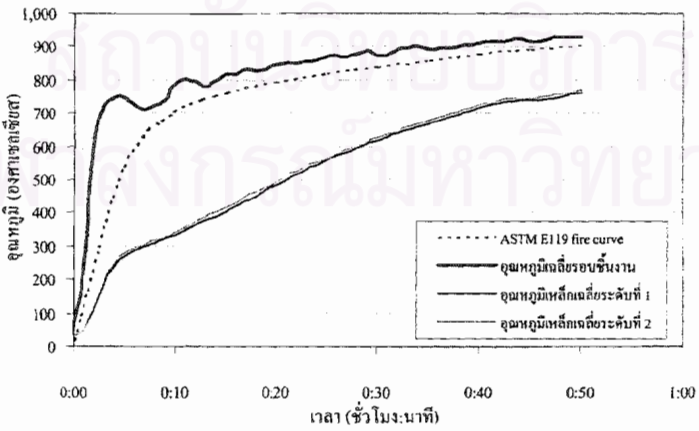
รูปที่ ง-53 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W5-I1



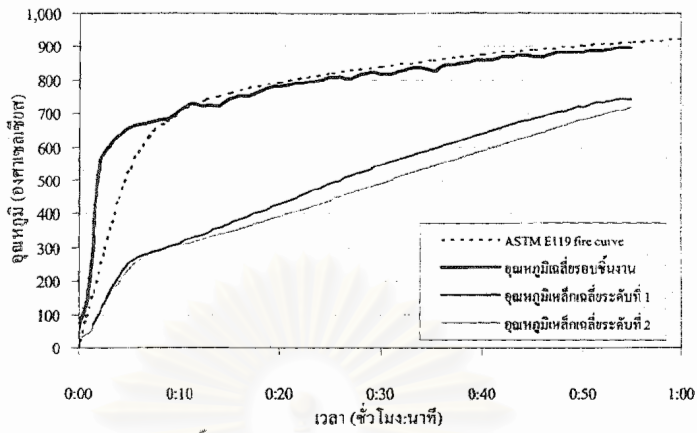
รูปที่ 54 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L1-I1



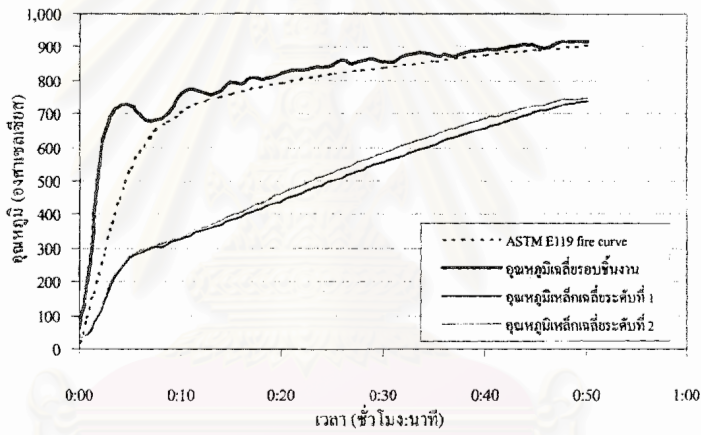
รูปที่ 55 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L2-I1



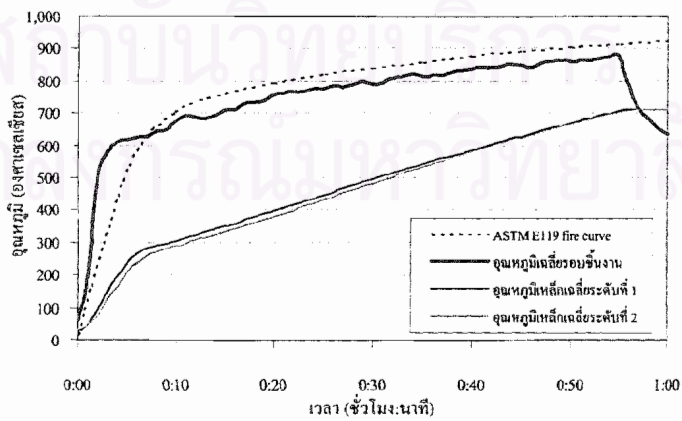
รูปที่ 56 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L3-I1



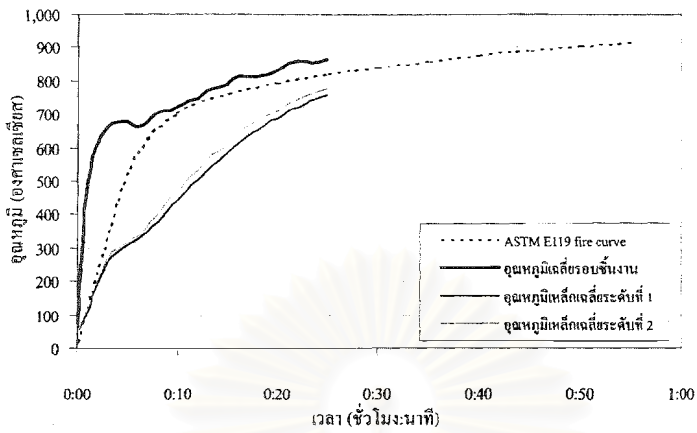
รูปที่ ง-57 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L4-II



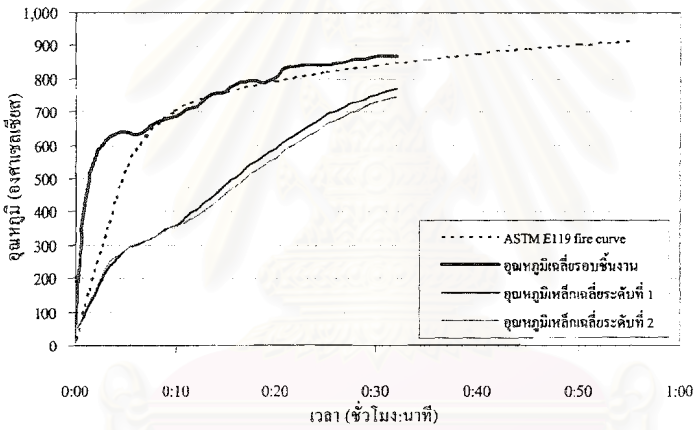
รูปที่ ง-58 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L5-II



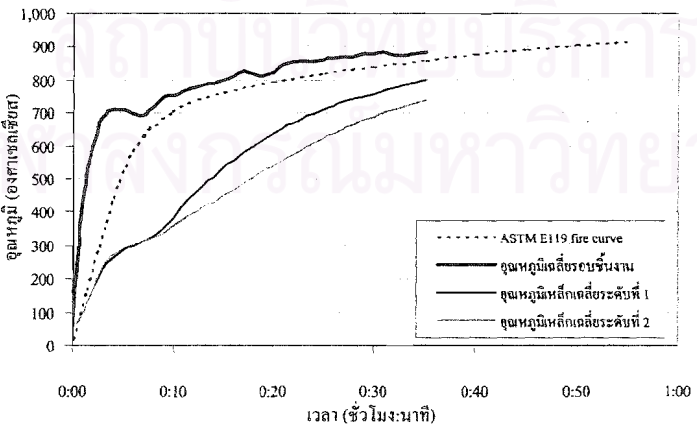
รูปที่ ง-59 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L6-II



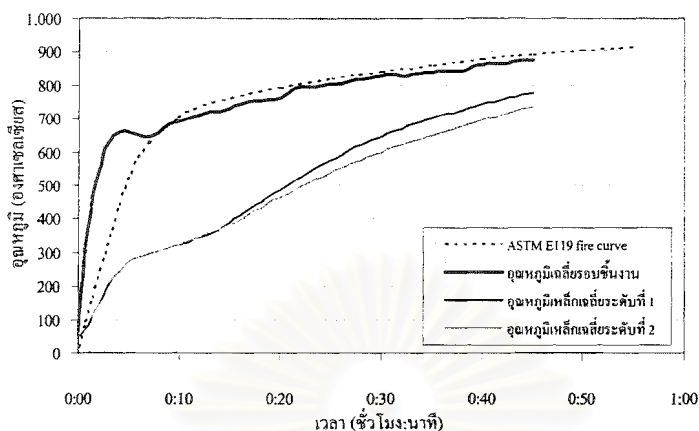
รูปที่ ง-60 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS1-II



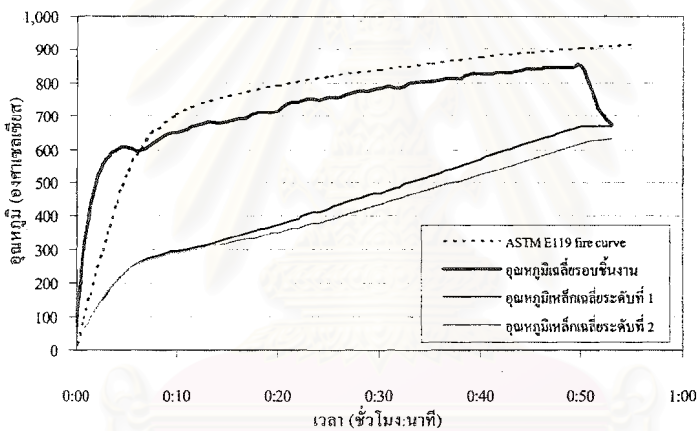
รูปที่ ง-61 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS2-II



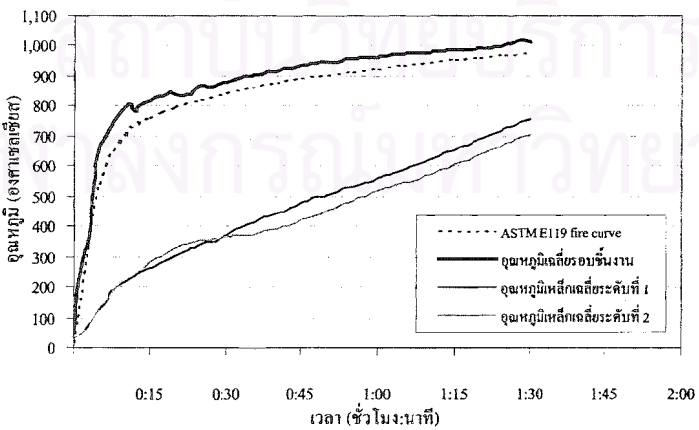
รูปที่ ง-62 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS3-II



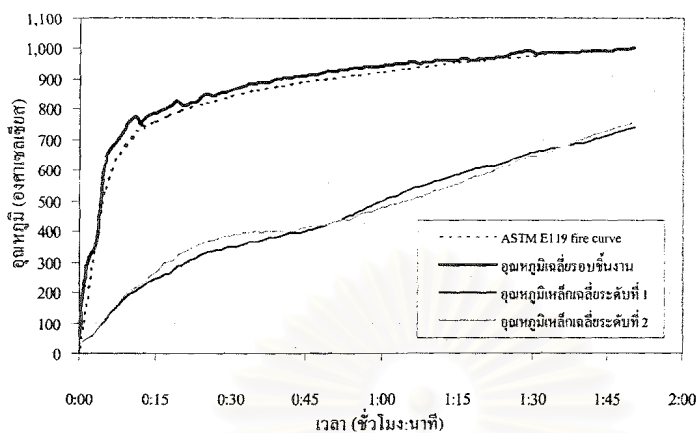
รูปที่ ง-63 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS4-II



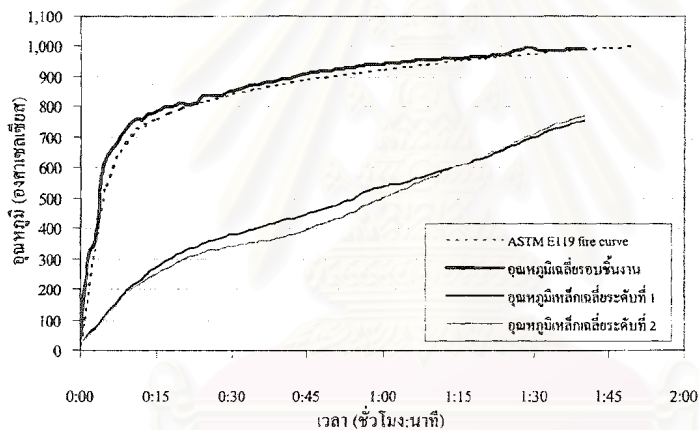
รูปที่ ง-64 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS5-II



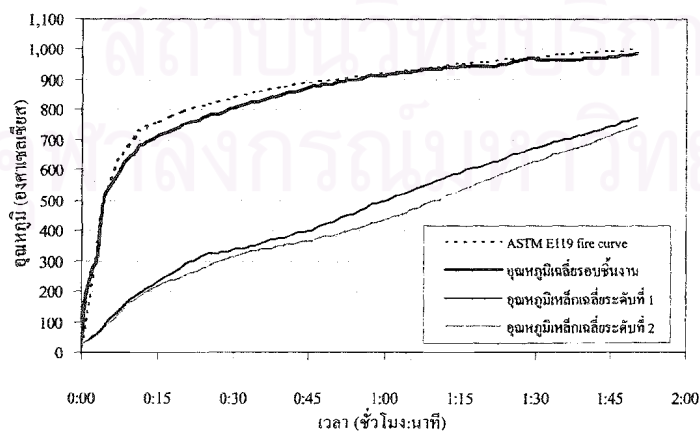
รูปที่ ง-65 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W1-12



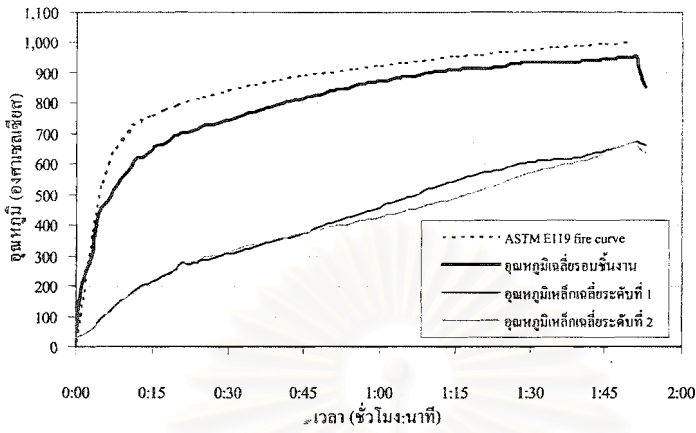
รูปที่ ง-66 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W2-I2



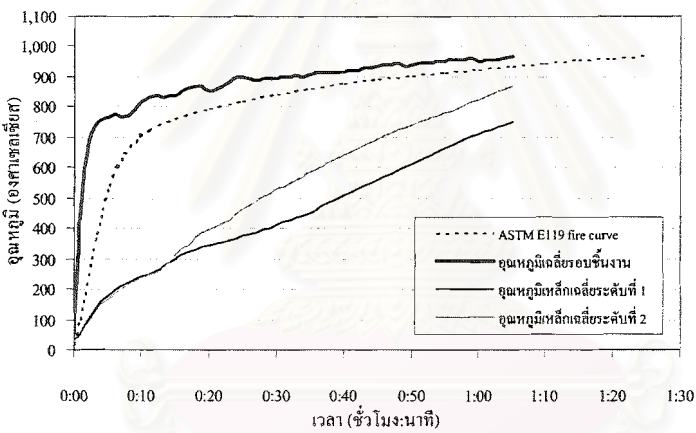
รูปที่ ง-67 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W3-I2



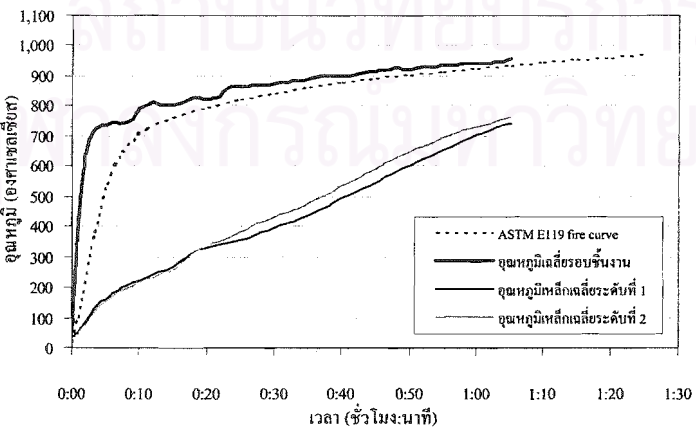
รูปที่ ง-68 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข W4-I2



รูปที่ ง-69 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข WS-I2

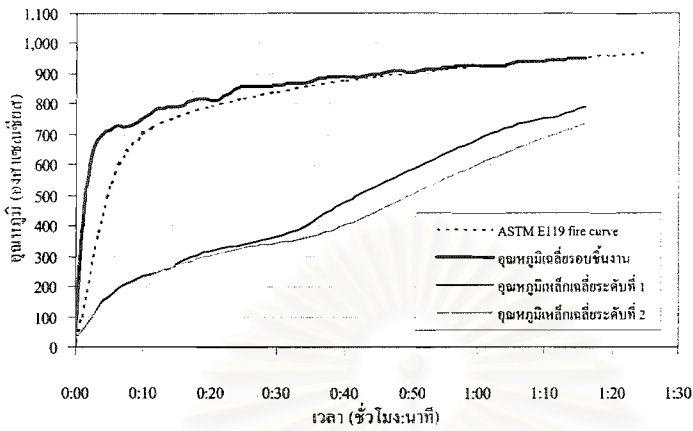


รูปที่ ง-70 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L1-I2

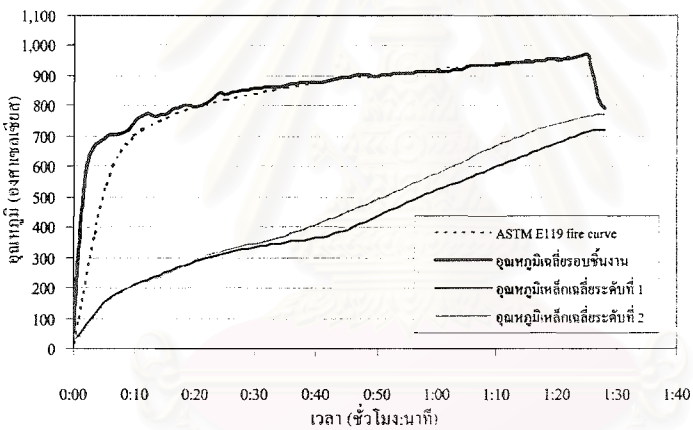


รูปที่ ง-71 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L2-I2

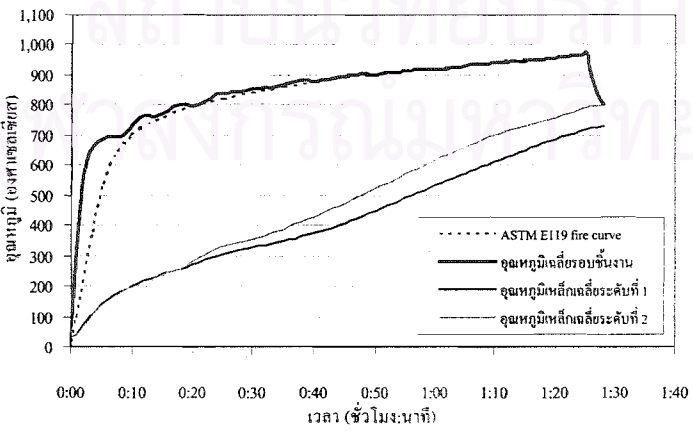




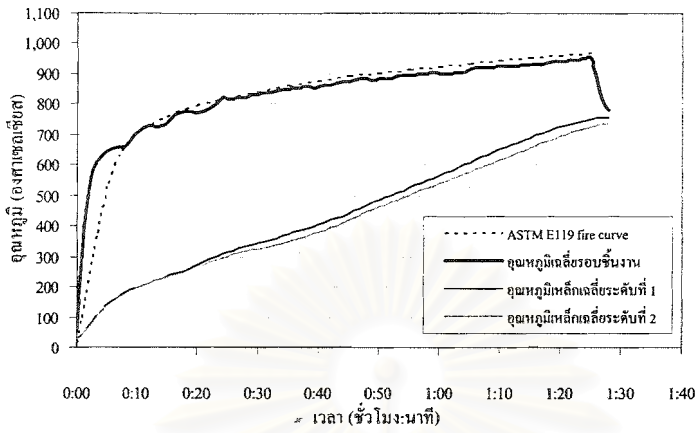
รูปที่ ง-72 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L3-I2



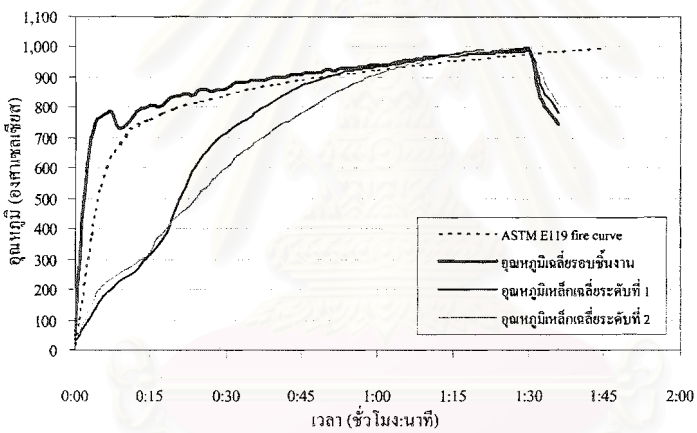
รูปที่ ง-73 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L4-I2



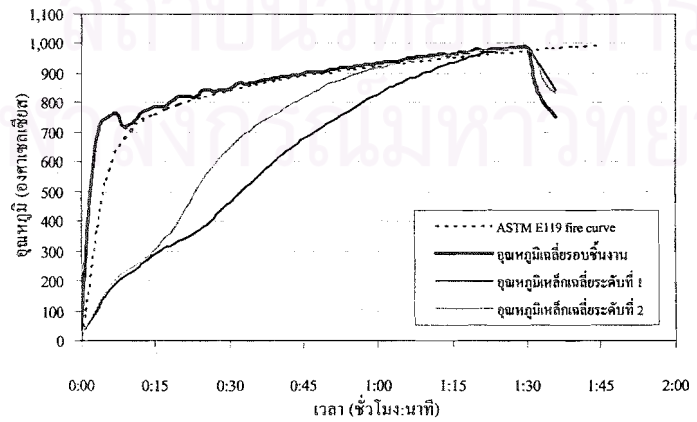
รูปที่ ง-74 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L5-I2



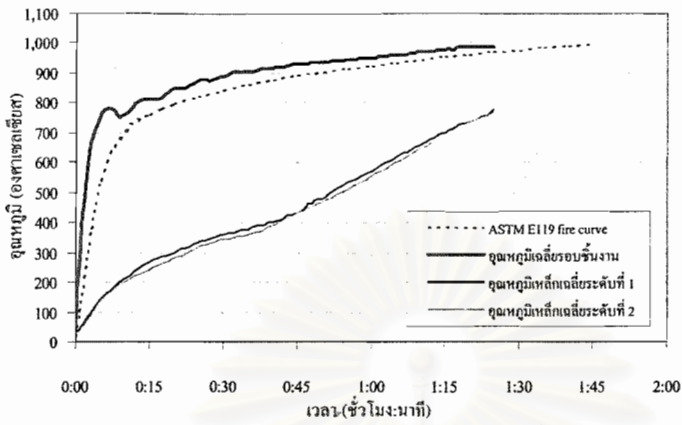
รูปที่ ง-75 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข L6-I2



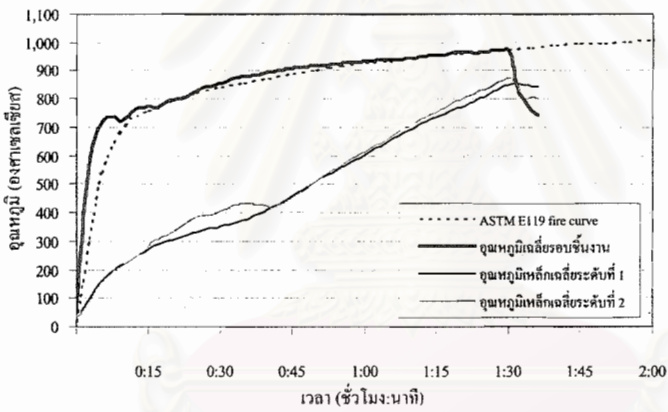
รูปที่ ง-76 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS1-I2



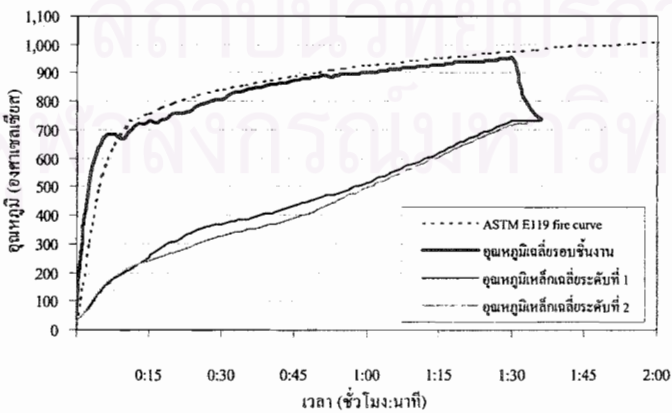
รูปที่ ง-77 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS2-I2



รูปที่ ง-78 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS3-I2



รูปที่ ง-79 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS4-I2



รูปที่ ง-80 กราฟแสดงผลการทดสอบการทนไฟของตัวอย่างทดสอบหมายเลข CHS5-I2

ภาคผนวก จ.

ตารางที่ จ-1 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป				
W1-B	0	7.1	3,827	-	-	2,667	-	-	43.5	-	-	2,602	1,573	1.43	8.5
W2-B	0	8.4	4,580	-	-	3,524	-	-	30.0	-	-	3,175	2,216	1.34	9.8
W3-B	0	9.4	4,350	-	-	4,130	-	-	5.3	-	-	-	-	-	9.4
W4-B	0	12.0	5,532	-	-	5,954	-	-	-7.1	-	-	-	-	-	12.0
W5-B	0	14.9	7,150	-	-	8,047	-	-	-11.2	-	-	4,956	5,330	-0.52	14.3
L1-B	0	6.4	3,568	-	-	2,251	-	-	58.5	-	-	2,484	1,335	1.56	7.9
L2-B	0	8.4	4,675	-	-	3,496	-	-	33.7	-	-	3,300	2,195	1.55	9.9
L3-B	0	9.6	5,356	-	-	4,253	-	-	25.9	-	-	3,775	2,762	1.42	11.0
L4-B	0	11.3	6,152	-	-	5,457	-	-	12.7	-	-	4,349	3,557	1.12	12.4
L5-B	0	11.0	6,217	-	-	5,242	-	-	18.6	-	-	4,348	3,420	1.31	12.3
L6-B	0	15.3	8,222	-	-	8,401	-	-	-2.1	-	-	-	-	-	15.3
CHS1-B	0	3.9	1,794	-	-	1,099	-	-	63.3	-	-	1,166	824	0.34	4.3
CHS2-B	0	5.5	2,908	-	-	1,684	-	-	72.7	-	-	1,935	1,144	0.98	6.5
CHS3-B	0	4.8	2,477	-	-	1,334	-	-	85.7	-	-	1,613	1,000	0.70	5.5
CHS4-B	0	6.9	3,376	-	-	2,557	-	-	32.0	-	-	2,260	1,490	1.07	7.9
CHS5-B	0	6.8	3,699	-	-	2,489	-	-	48.6	-	-	2,497	1,439	1.47	8.2
W1-P1	19.4	55.9	45,546	-	-	43,161	-	-	5.5	-	-	-	-	-	55.9
W2-P1	18.7	47.7	40,509	-	-	35,738	-	-	13.4	-	-	29,129	25,204	4.62	52.4
W3-P1	24.3	67.2	50,717	6,834	-	46,938	6,705	-	8.1	1.9	-	-	-	-	67.2
W4-P1	20.1	65.9	44,613	5,156	-	46,938	5,493	-	-5.0	-6.1	-	-	-	-	65.9
W5-P1	19	62.0	47,906	1,865	-	46,938	1,892	-	2.1	-1.4	-	-	-	-	62.0

ตารางที่ จ-1 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ ไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟจาก การทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป				
L1-P1	26.1	67.4	47,939	6,922	-	46,938	6,885	-	2.1	0.5	-	-	-	-	67.4
L2-P1	23.1	69.4	43,833	8,222	-	46,938	8,780	-	-6.6	-6.4	-	-	-	-	69.4
L3-P1	26.7	69.4	49,408	8,940	-	46,938	8,753	-	5.3	2.1	-	-	-	-	69.4
L4-P1	23.5	70.8	45,937	9,851	-	46,938	10,090	-	-2.1	-2.4	-	-	-	-	70.8
L5-P1	23.8	64.0	51,858	3,931	-	46,938	3,720	-	10.5	5.7	-	40,253	35,975	4.83	68.8
L6-P1	24.6	75.3	48,049	14,425	-	46,938	14,376	-	2.4	0.3	-	-	-	-	75.3
CHS1-P1	23.5	48.7	37,974	-	-	36,575	-	-	3.8	-	-	-	-	-	48.7
CHS2-P1	21.8	46.7	33,702	-	-	34,783	-	-	-3.1	-	-	-	-	-	46.7
CHS3-P1	23.1	53.9	43,771	-	-	41,308	-	-	6.0	-	-	-	-	-	53.9
CHS4-P1	21.4	53.2	42,324	-	-	40,697	-	-	4.0	-	-	-	-	-	53.2
CHS5-P1	20.3	51.9	44,236	-	-	39,464	-	-	12.1	-	-	31,933	27,893	4.70	56.6
W1-P2	63.5	239.4	47,742	105,275	123,986	46,938	105,425	125,499	1.7	-0.1	-1.2	-	-	-	239.4
W2-P2	61.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W3-P2	55.4	201.4	48,748	107,445	84,958	46,938	105,425	84,549	3.9	1.9	0.5	-	-	-	201.4
W4-P2	61.7	235.0	48,221	106,816	120,899	46,938	105,425	120,721	2.7	1.3	0.2	-	-	-	235.0
W5-P2	56.5	236.0	45,633	101,852	118,190	46,938	105,425	121,833	-2.8	-3.4	-3.0	-	-	-	236.0
L1-P2	38.7	102.5	50,344	42,076	-	46,938	40,939	-	7.3	2.8	-	-	-	-	102.5
L2-P2	37.4	117.2	48,712	56,841	-	46,938	55,710	-	3.8	2.0	-	-	-	-	117.2
L3-P2	40.3	109.8	49,430	49,423	-	46,938	48,225	-	5.3	2.5	-	-	-	-	109.8
L4-P2	38.2	115.8	45,778	53,738	-	46,938	54,288	-	-2.5	-1.0	-	-	-	-	115.8
L5-P2	40.8	123.0	48,111	106,959	3,041	46,938	105,425	3,030	2.5	1.5	0.3	-	-	-	123.0
L6-P2	39.7	133.1	44,220	101,020	13,026	46,938	105,425	13,283	-5.8	-4.2	-1.9	-	-	-	133.1
CHS1-P2	41.9	81.9	49,622	21,041	-	46,938	18,065	-	5.7	16.5	-	50,966	48,263	2.95	84.8
CHS2-P2	42.3	93.6	49,914	32,899	-	46,938	29,152	-	6.3	12.9	-	59,696	56,476	3.45	97.0

ตารางที่ จ-1 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟจาก การทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป				
CHS3-P2	40.1	98.0	47,110	35,743	-	46,938	36,352	-	0.4	-1.7	-	-	-	-	98.0
CHS4-P2	38.9	95.5	47,779	33,916	-	46,938	33,168	-	1.8	2.3	-	-	-	-	95.5
CHS5-P2	43.3	124.3	44,992	100,681	4,182	46,938	105,425	9,106	-4.2	-4.5	-54.1	75,134	78,728	-3.70	120.6
W1-I1	1.52	24.7	17,746	-	-	15,818	-	-	12.2	-	-	12,447	10,881	2.03	26.7
W2-I1	1.53	29.3	20,715	-	-	19,650	-	-	5.4	-	-	-	-	-	29.3
W3-I1	1.53	30.9	23,329	-	-	20,989	-	-	11.2	-	-	16,610	14,595	2.53	33.4
W4-I1	1.52	40.2	28,361	-	-	28,991	-	-	-2.2	-	-	-	-	-	40.2
W5-I1	1.52	50.5	35,012	-	-	38,236	-	-	-8.4	-	-	-	-	-	50.5
L1-I1	1.54	16.7	12,303	-	-	9,461	-	-	30.0	-	-	8,818	6,334	3.39	20.1
L2-I1	1.54	20.9	14,799	-	-	12,776	-	-	15.8	-	-	10,575	8,686	2.51	23.4
L3-I1	1.53	23.1	17,157	-	-	14,573	-	-	17.7	-	-	12,280	9,982	3.01	26.1
L4-I1	1.55	29.3	20,642	-	-	19,697	-	-	4.8	-	-	-	-	-	29.3
L5-I1	1.53	26.1	19,057	-	-	16,985	-	-	12.2	-	-	13,611	11,704	2.45	28.5
L6-I1	1.56	34.7	24,064	-	-	24,247	-	-	-0.8	-	-	-	-	-	34.7
CHS1-I1	1.54	12.1	7,811	-	-	6,039	-	-	29.3	-	-	5,601	3,927	2.36	14.5
CHS2-I1	1.54	17.5	11,457	-	-	10,085	-	-	13.6	-	-	8,094	6,774	1.79	19.3
CHS3-I1	1.55	15.3	10,501	-	-	8,375	-	-	25.4	-	-	7,502	5,567	2.67	18.0
CHS4-I1	1.55	22.7	15,296	-	-	14,220	-	-	7.6	-	-	-	-	-	22.7
CHS5-I1	1.53	36.8	25,257	-	-	26,029	-	-	-3.0	-	-	-	-	-	36.8
W1-I2	2.02	56.6	46,772	-	-	43,768	-	-	6.9	-	-	-	-	-	56.6
W2-I2	2.01	65.9	48,769	5,624	-	46,938	5,534	-	3.9	1.6	-	-	-	-	65.9
W3-I2	2.02	60.2	48,560	219	-	46,938	217	-	3.5	1.4	-	-	-	-	60.2
W4-I2	2.02	66.0	45,481	5,533	-	46,938	5,589	-	-3.1	-1.0	-	-	-	-	66.0
W5-I2	2.02	73.7	42,128	12,169	-	46,938	12,842	-	-10.3	-5.3	-	38,007	42,553	-5.03	68.6

ตารางที่ จ-1 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 538 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟออกการทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป				
L1-I2	2.02	31.1	25,258	-	-	21,200	-	-	19.1	-	-	18,297	14,744	4.45	35.6
L2-I2	2.02	40.4	32,595	-	-	29,254	-	-	11.4	-	-	23,587	20,532	3.69	44.1
L3-I2	2.01	45.3	36,295	-	-	33,543	-	-	8.2	-	-	-	-	-	45.3
L4-I2	2.02	55.3	44,851	-	-	42,630	-	-	5.2	-	-	-	-	-	55.3
L5-I2	2.01	51.6	41,237	-	-	39,202	-	-	5.2	-	-	-	-	-	51.6
L6-I2	2.02	56.6	44,485	-	-	43,839	-	-	1.5	-	-	-	-	-	56.6
CHS1-I2	2.02	22.0	16,081	-	-	13,627	-	-	18.0	-	-	11,540	9,300	2.95	24.9
CHS2-I2	2.02	24.7	17,967	-	-	15,858	-	-	13.3	-	-	12,890	10,910	2.57	27.3
CHS3-I2	2.02	55.9	47,044	-	-	43,141	-	-	9.1	-	-	-	-	-	55.9
CHS4-I2	2.02	52.1	41,785	-	-	39,657	-	-	5.4	-	-	-	-	-	52.1
CHS5-I2	2.01	63.5	46,699	3,182	-	46,938	3,277	-	-0.5	-2.9	-	-	-	-	63.5

ตารางที่ จ-2 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟจาก การทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป				
W1-B	0	10.6	6,365	-	-	4,943	-	-	28.8	-	-	4,458	3,229	1.73	12.3
W2-B	0	12.4	7,419	-	-	6,276	-	-	18.2	-	-	5,181	4,078	1.55	14.0
W3-B	0	13.9	7,226	-	-	7,365	-	-	-1.9	-	-	-	-	-	13.9
W4-B	0	17.0	8,811	-	-	9,734	-	-	-9.5	-	-	-	-	-	17.0
W5-B	0	20.5	10,881	-	-	12,460	-	-	-12.7	-	-	7,486	8,457	-1.30	19.2
L1-B	0	9.7	5,883	-	-	4,290	-	-	37.2	-	-	4,162	2,790	1.93	11.6
L2-B	0	13.6	8,292	-	-	7,102	-	-	16.8	-	-	5,890	4,621	1.79	15.3
L3-B	0	14.0	8,496	-	-	7,418	-	-	14.5	-	-	5,973	4,859	1.56	15.6
L4-B	0	17.3	10,233	-	-	9,906	-	-	3.3	-	-	-	-	-	17.3
L5-B	0	15.5	9,507	-	-	8,547	-	-	11.2	-	-	6,649	5,688	1.33	16.8
L6-B	0	21.2	12,204	-	-	13,000	-	-	-6.1	-	-	-	-	-	21.2
CHS1-B	0	5.8	3,083	-	-	1,874	-	-	64.6	-	-	2,061	1,208	1.09	6.9
CHS2-B	0	7.2	4,198	-	-	2,757	-	-	52.2	-	-	2,856	1,641	1.69	8.9
CHS3-B	0	6.2	3,549	-	-	2,127	-	-	66.9	-	-	2,369	1,293	1.43	7.6
CHS4-B	0	11.2	6,300	-	-	5,338	-	-	18.0	-	-	4,377	3,481	1.26	12.4
CHS5-B	0	9.4	5,643	-	-	4,122	-	-	36.9	-	-	3,903	2,664	1.74	11.1
W1-P1	19.4	72.9	49,307	12,060	-	46,938	12,146	-	5.1	-0.7	-	-	-	-	72.9
W2-P1	18.7	63.3	52,256	3,180	-	46,938	3,052	-	11.3	4.2	-	40,251	35,492	5.38	68.7
W3-P1	24.3	89.8	50,717	28,997	-	46,938	28,439	-	8.1	2.0	-	-	-	-	89.8
W4-P1	20.1	86.0	44,613	23,318	-	46,938	24,676	-	-5.0	-5.5	-	-	-	-	86.0
W5-P1	19	81.3	47,906	20,044	-	46,938	20,176	-	2.1	-0.7	-	-	-	-	81.3



ตารางที่ จ-2 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟจาก การทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป				
L1-P1	26.1	84.4	47,939	23,290	-	46,938	23,176	-	2.1	0.5	-	-	-	-	84.4
L2-P1	23.1	86.5	43,833	23,701	-	46,938	25,223	-	-6.6	-6.0	-	-	-	-	86.5
L3-P1	26.7	86.6	49,408	25,778	-	46,938	25,296	-	5.3	1.9	-	-	-	-	86.6
L4-P1	23.5	89.3	45,937	27,338	-	46,938	27,937	-	-2.1	-2.2	-	-	-	-	89.3
L5-P1	23.8	82.1	51,858	22,007	-	46,938	20,896	-	10.5	5.3	-	53,368	48,369	5.45	87.5
L6-P1	24.6	95.4	48,049	34,050	-	46,938	33,903	-	2.4	0.4	-	-	-	-	95.4
CHS1-P1	23.5	59.8	48,246	-	-	46,791	-	-	3.1	-	-	-	-	-	59.8
CHS2-P1	21.8	59.5	44,770	-	-	46,500	-	-	-3.7	-	-	-	-	-	59.5
CHS3-P1	23.1	67.0	49,495	6,646	-	46,938	3,979	-	5.5	67.0	-	40,393	38,001	2.68	69.7
CHS4-P1	21.4	67.2	48,579	6,798	-	46,938	5,129	-	3.5	32.5	-	39,782	38,170	1.81	69.1
CHS5-P1	20.3	65.7	52,148	5,598	-	46,938	88	-	11.1	6238.4	-	41,727	37,112	5.19	70.9
W1-P2	63.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W2-P2	61.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W3-P2	55.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W4-P2	61.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
W5-P2	56.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L1-P2	38.7	124.8	50,344	110,319	4,970	46,938	105,425	4,892	7.3	4.6	1.6	-	-	-	124.8
L2-P2	37.4	142.9	48,712	108,380	23,850	46,938	105,425	23,362	3.8	2.8	2.1	-	-	-	142.9
L3-P2	40.3	135.4	49,430	109,320	15,956	46,938	105,425	15,596	5.3	3.7	2.3	-	-	-	135.4
L4-P2	38.2	142.2	45,778	103,685	22,560	46,938	105,425	22,608	-2.5	-1.7	-0.2	-	-	-	142.2
L5-P2	40.8	151.9	48,111	106,959	32,774	46,938	105,425	32,536	2.5	1.5	0.7	-	-	-	151.9
L6-P2	39.7	164.5	44,220	101,020	44,771	46,938	105,425	45,686	-5.8	-4.2	-2.0	-	-	-	164.5
CHS1-P2	41.9	97.2	49,622	36,188	-	46,938	32,986	-	5.7	9.7	-	61,884	59,038	3.03	100.2
CHS2-P2	42.3	109.8	49,914	49,353	-	46,938	45,219	-	6.3	9.1	-	71,592	68,100	3.66	113.4

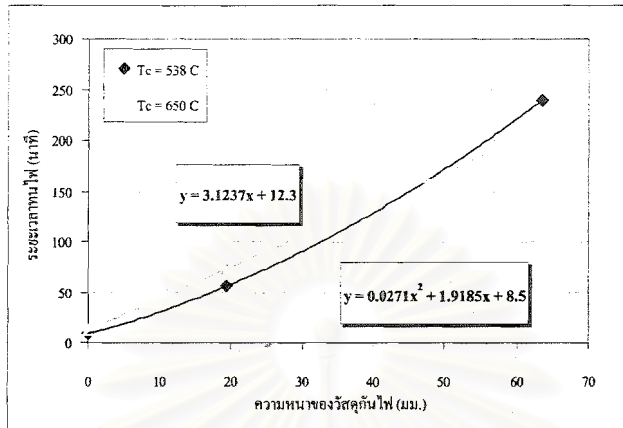
ตารางที่ จ-2 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุ กันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟจาก การทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม.ขึ้นไป				
CHS3-P2	40.1	117.5	47,110	54,851	-	46,938	55,795	-	0.4	-1.7	-	-	-	-	117.5
CHS4-P2	38.9	110.9	47,779	49,211	-	46,938	48,440	-	1.8	1.6	-	-	-	-	110.9
CHS5-P2	43.3	149.5	44,992	100,681	28,880	46,938	105,425	34,838	-4.2	-4.5	-17.1	93,087	97,494	-4.42	145.1
W1-I1	1.52	34.3	26,259	-	-	23,912	-	-	9.8	-	-	-	-	-	34.3
W2-I1	1.53	40.2	30,261	-	-	29,038	-	-	4.2	-	-	-	-	-	40.2
W3-I1	1.53	43.1	34,179	-	-	31,622	-	-	8.1	-	-	-	-	-	43.1
W4-I1	1.52	55.2	41,398	-	-	42,529	-	-	-2.7	-	-	-	-	-	55.2
W5-I1	1.52	72.0	43,036	9,422	-	46,938	11,225	-	-8.3	-16.1	-	37,907	41,388	-3.87	68.1
L1-I1	1.54	23.0	17,807	-	-	14,464	-	-	23.1	-	-	12,790	9,904	3.78	26.8
L2-I1	1.54	29.5	22,029	-	-	19,850	-	-	11.0	-	-	15,818	13,778	2.58	32.1
L3-I1	1.53	32.4	25,232	-	-	22,253	-	-	13.4	-	-	18,138	15,493	3.30	35.7
L4-I1	1.55	40.9	30,377	-	-	29,689	-	-	2.3	-	-	-	-	-	40.9
L5-I1	1.53	36.3	27,889	-	-	25,617	-	-	8.9	-	-	-	-	-	36.3
L6-I1	1.56	47.7	34,905	-	-	35,674	-	-	-2.2	-	-	-	-	-	47.7
CHS1-I1	1.54	16.5	11,239	-	-	9,309	-	-	20.7	-	-	8,005	6,226	2.43	18.9
CHS2-I1	1.54	22.9	15,873	-	-	14,396	-	-	10.3	-	-	11,223	9,855	1.79	24.7
CHS3-I1	1.55	20.9	15,094	-	-	12,759	-	-	18.3	-	-	10,810	8,673	2.84	23.7
CHS4-I1	1.55	30.3	21,455	-	-	20,498	-	-	4.7	-	-	-	-	-	30.3
CHS5-I1	1.53	48.1	34,680	-	-	36,056	-	-	-3.8	-	-	-	-	-	48.1
W1-I2	2.02	74.4	50,080	14,005	-	46,938	13,503	-	6.7	3.7	-	-	-	-	74.4
W2-I2	2.01	88.6	48,769	27,506	-	46,938	27,243	-	3.9	1.0	-	-	-	-	88.6
W3-I2	2.02	81.6	48,560	20,702	-	46,938	20,483	-	3.5	1.1	-	-	-	-	81.6
W4-I2	2.02	85.8	45,481	24,193	-	46,938	24,510	-	-3.1	-1.3	-	-	-	-	85.8
W5-I2	2.02	106.3	42,128	42,501	-	46,938	44,743	-	-10.3	-5.0	-	59,836	65,594	-6.06	100.3

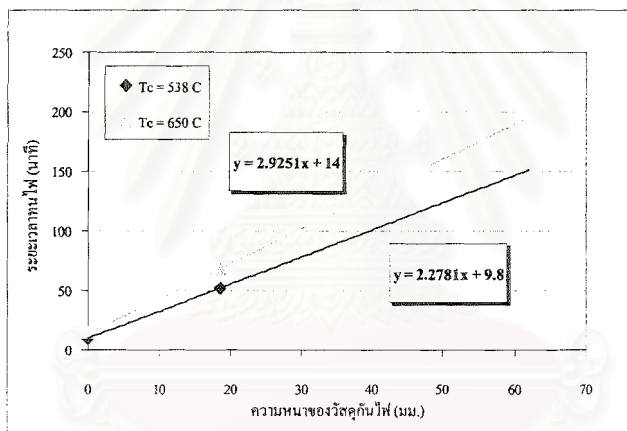
ตารางที่ จ-2 วิธีการปรับแก้ข้อมูลทดสอบเนื่องจากความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิไฟที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119 เมื่ออุณหภูมิวิกฤติเป็น 650 องศาเซลเซียส (ต่อ)

ตัวอย่างทดสอบ	ความหนาวัสดุกันไฟ (มม.)	ระยะเวลาทนไฟจากการทดสอบ (นาที)	พื้นที่ได้กราฟไฟจริง (min.C)			พื้นที่ได้กราฟไฟมาตรฐาน (min.C)			ความคลาดเคลื่อนของพื้นที่ (%)			A (min.C)	A <sub>s</sub> (min.C)	ค่าปรับแก้, C นาที	ระยะเวลาทนไฟที่ปรับแก้แล้ว (นาที)
			0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม. ขึ้นไป	0 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม. ขึ้นไป	1 - 1 ชม.	1 - 2 ชม.	2 ชม. ขึ้นไป				
L1-I2	2.02	40.6	33,881	-	-	29,388	-	-	15.3	-	-	24,657	20,629	4.86	45.5
L2-I2	2.02	50.4	41,697	-	-	38,136	-	-	9.3	-	-	-	-	-	50.4
L3-I2	2.01	56.4	46,407	-	-	43,600	-	-	6.4	-	-	-	-	-	56.4
L4-I2	2.02	68.0	49,127	7,352	-	46,938	7,437	-	4.7	-1.2	-	-	-	-	68.0
L5-I2	2.01	64.0	48,961	3,650	-	46,938	3,689	-	4.3	-1.1	-	-	-	-	64.0
L6-I2	2.02	69.9	47,513	9,041	-	46,938	9,289	-	1.2	-2.7	-	-	-	-	69.9
CHS1-I2	2.02	25.9	19,461	-	-	16,873	-	-	15.3	-	-	13,990	11,626	3.04	29.0
CHS2-I2	2.02	30.3	22,647	-	-	20,474	-	-	10.6	-	-	16,299	14,228	2.61	32.9
CHS3-I2	2.02	68.9	50,952	8,524	-	46,938	8,322	-	8.6	2.4	-	-	-	-	68.9
CHS4-I2	2.02	63.7	49,145	3,474	-	46,938	3,462	-	4.7	0.4	-	-	-	-	63.7
CHS5-I2	2.01	79.1	46,699	17,583	-	46,938	18,082	-	-0.5	-2.8	-	-	-	-	79.1

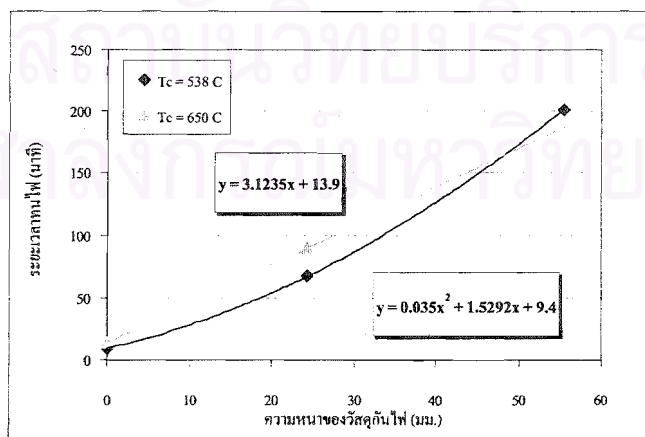
ภาคผนวก ฉ.



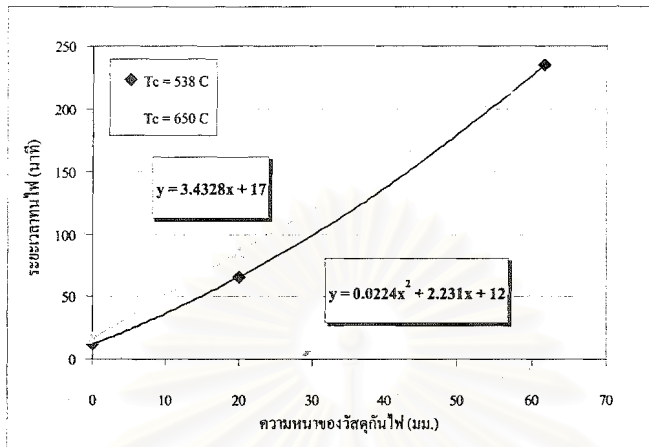
รูปที่ ฉ-1 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W1-P1,W1-P2



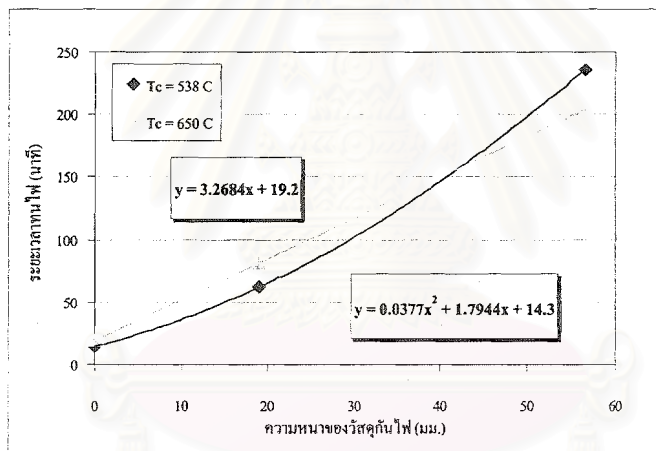
รูปที่ ฉ-2 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W2-P1,W2-P2



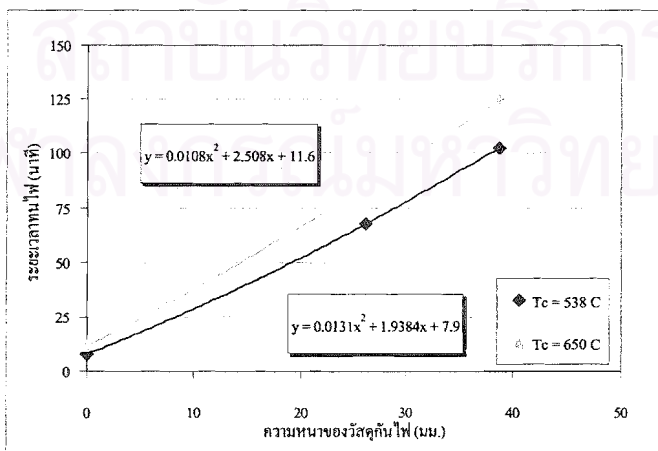
รูปที่ ฉ-3 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W3-P1,W3-P2



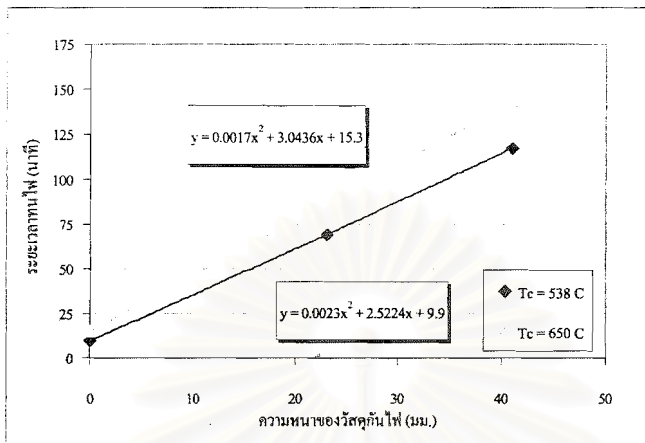
รูปที่ ฉ-4 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W4-P1,W4-P2



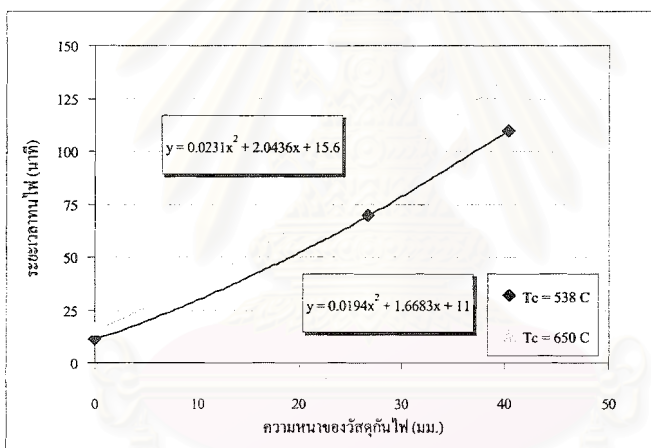
รูปที่ ฉ-5 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W5-P1,W5-P2



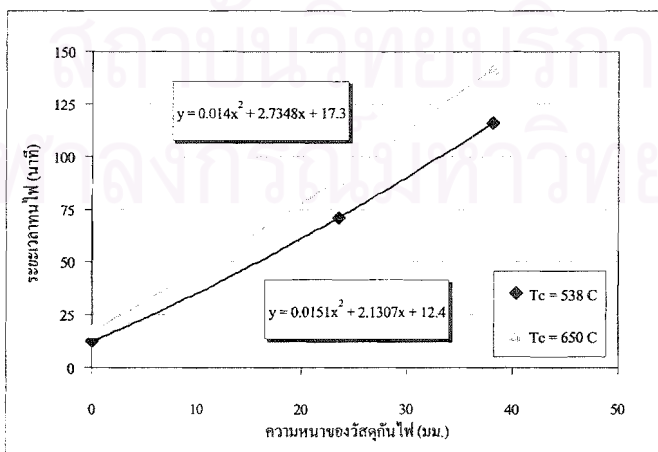
รูปที่ ฉ-6 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L1-P1,L1-P2



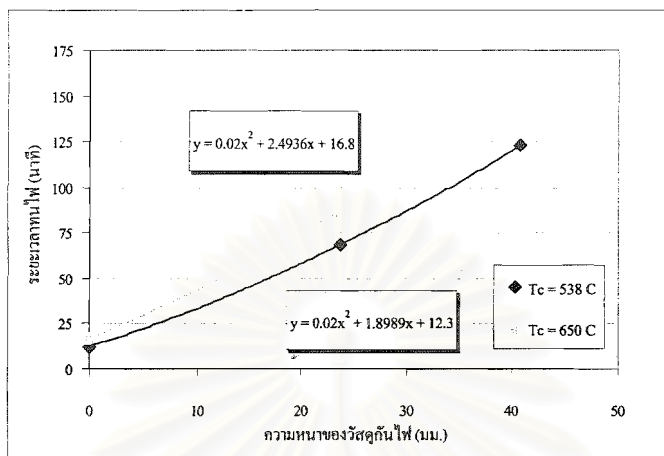
รูปที่ ฉ-7 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L2-P1,L2-P2



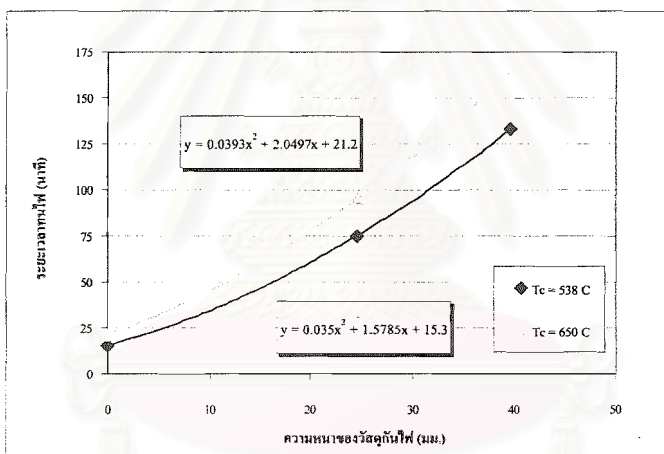
รูปที่ ฉ-8 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L3-P1,L3-P2



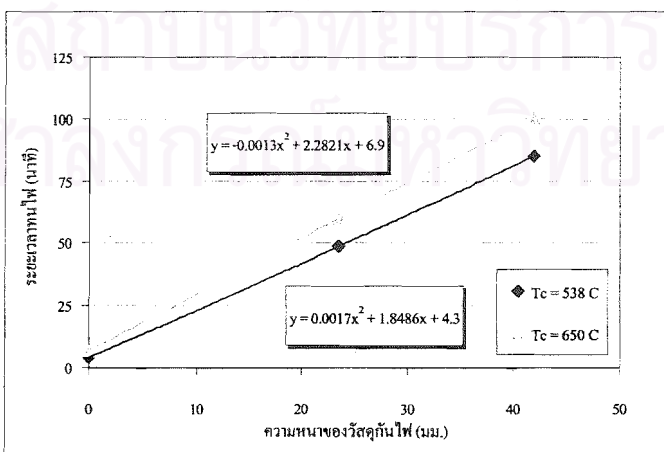
รูปที่ ฉ-9 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L4-P1,L4-P2



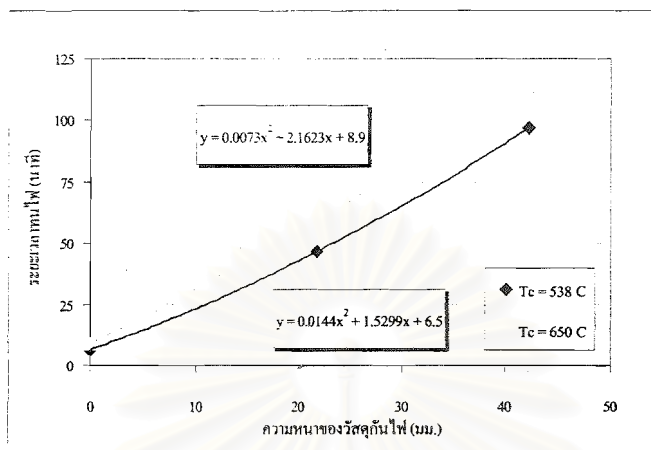
รูปที่ ฉ-10 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L5-P1,L5-P2



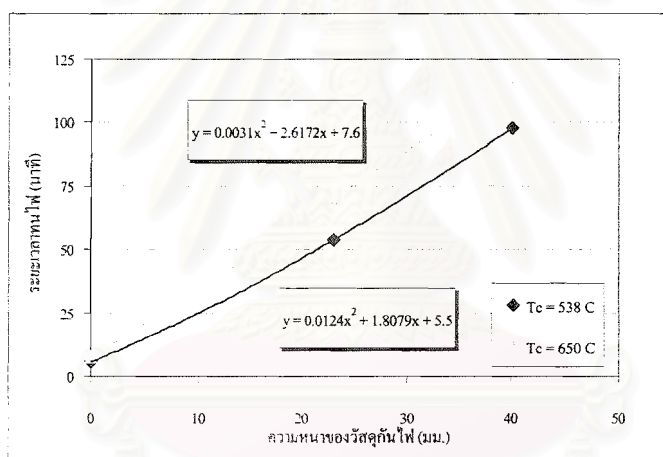
รูปที่ ฉ-11 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L6-P1,L6-P2



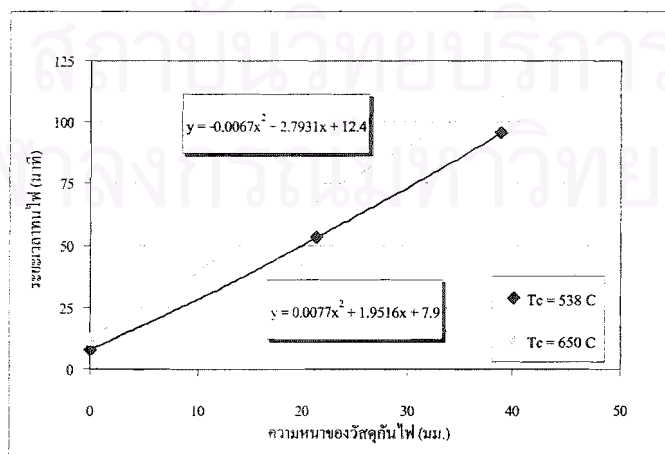
รูปที่ ฉ-12 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS1-P1,CHS1-P2



รูปที่ จ-13 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS2-P1,CHS2-P2

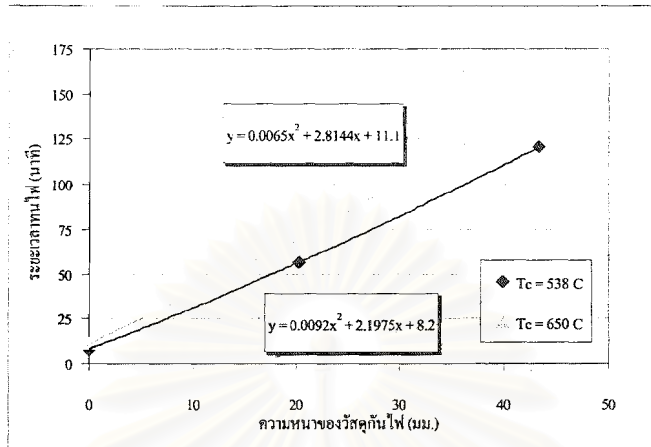


รูปที่ จ-14 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS3-P1,CHS3-P2

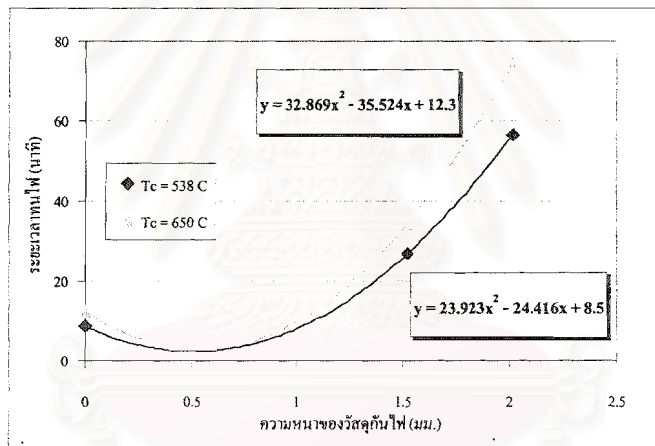


รูปที่ จ-15 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS4-P1,CHS4-P2

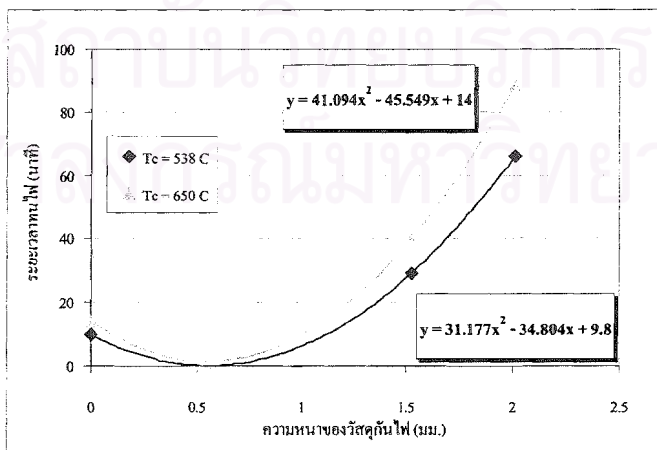




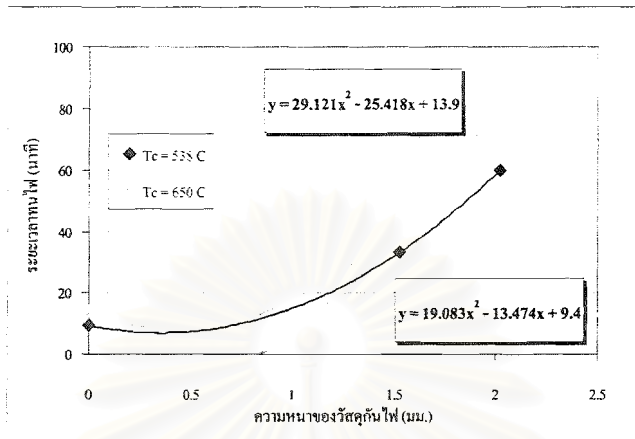
รูปที่ จ-16 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS5-P1,CHS5-P2



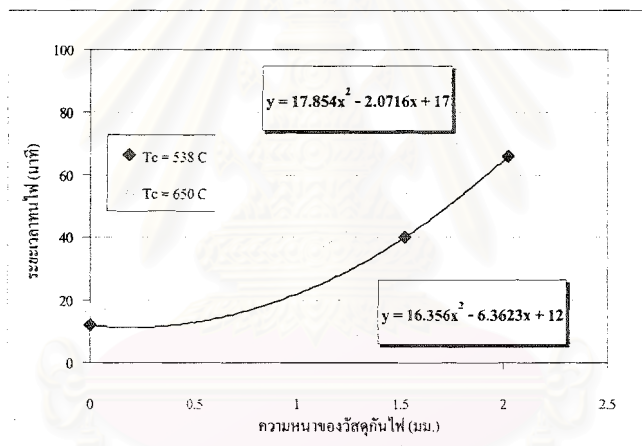
รูปที่ จ-17 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W1-I1,W1-I2



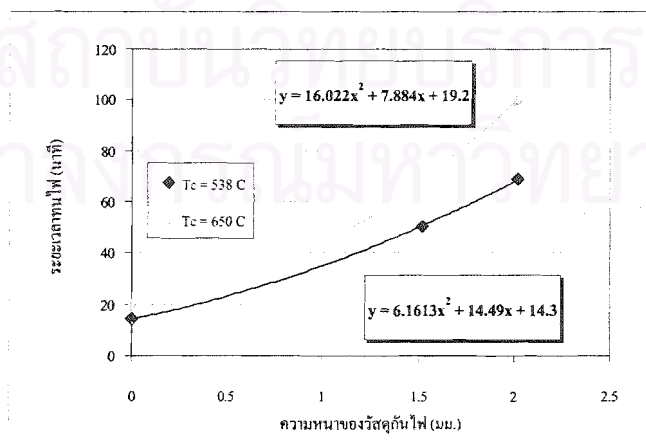
รูปที่ จ-18 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W2-I1,W2-I2



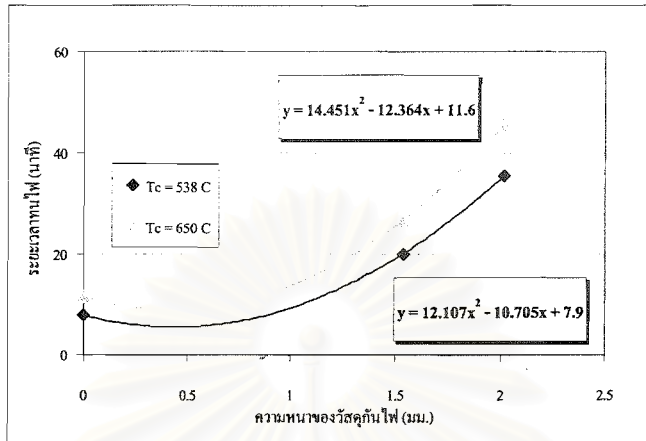
รูปที่ จ-19 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W3-I1, W3-I2



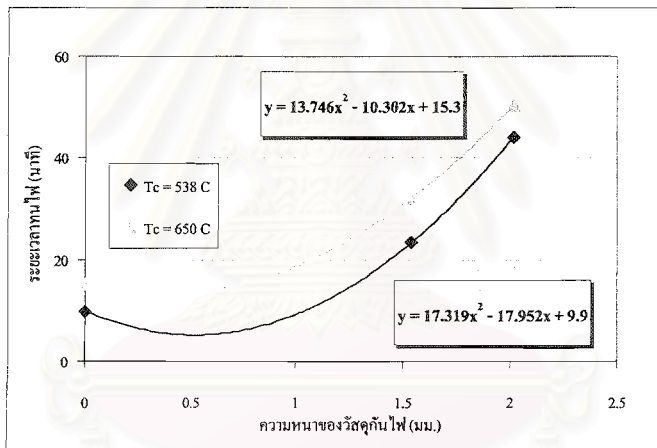
รูปที่ จ-20 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W4-I1, W4-I2



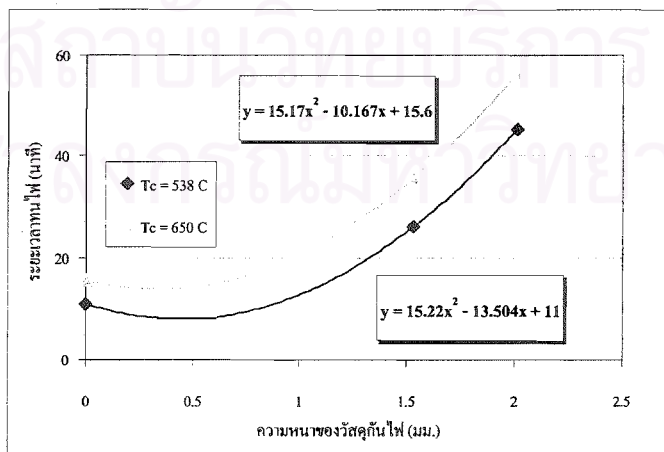
รูปที่ จ-21 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ W5-I1, W5-I2



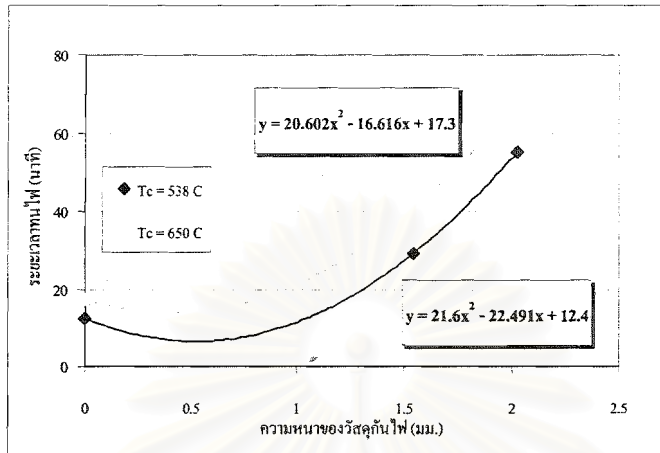
รูปที่ ฉ-22 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L1-I1,L1-I2



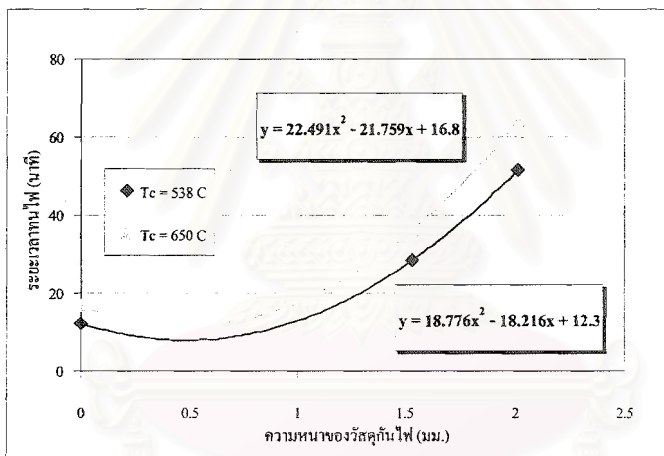
รูปที่ ฉ-23 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L2-I1,L2-I2



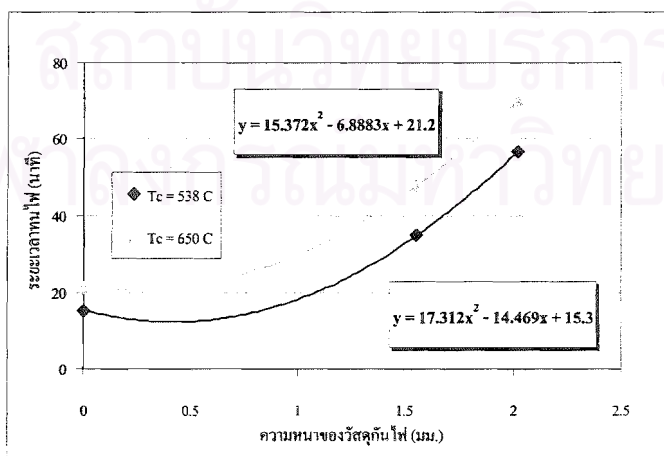
รูปที่ ฉ-24 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L3-I1,L3-I2



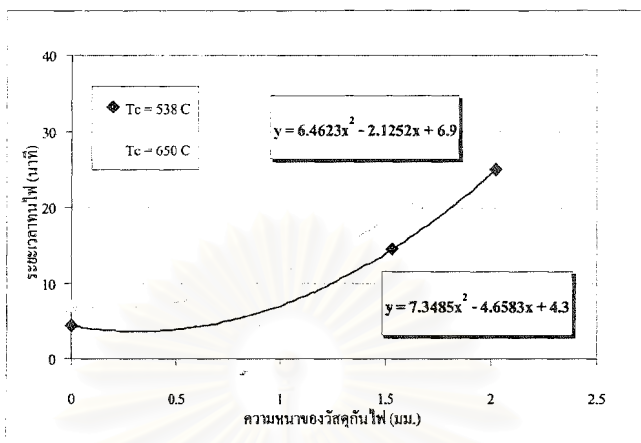
รูปที่ ฉ-25 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L4-I1,L4-I2



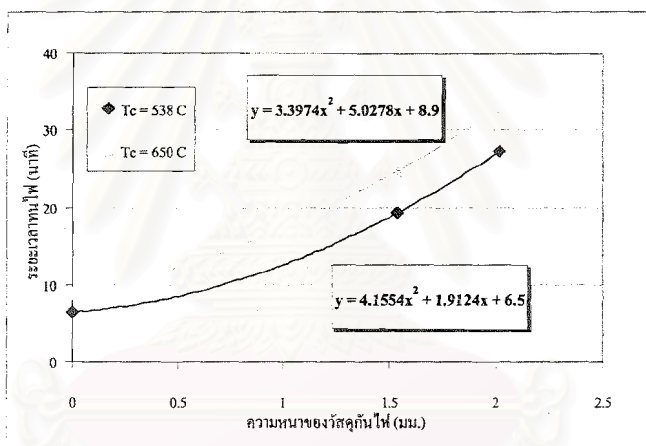
รูปที่ ฉ-26 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L5-I1,L5-I2



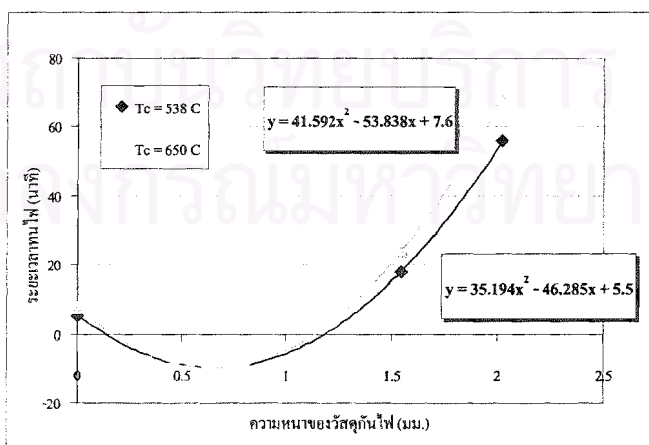
รูปที่ ฉ-27 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ L6-I1,L6-I2



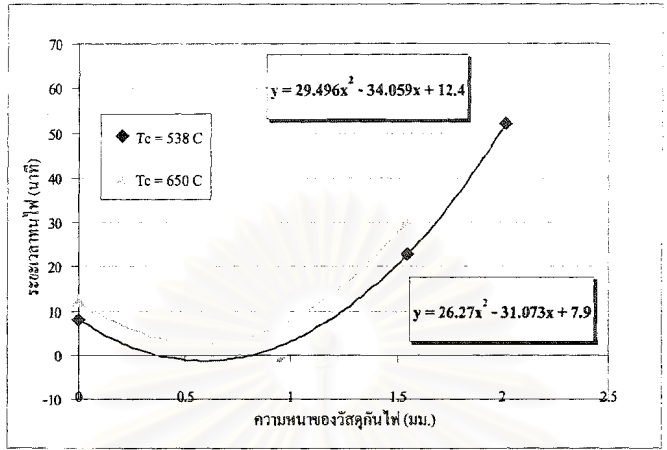
รูปที่ ฉ-28 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS1-I1,CHS1-I2



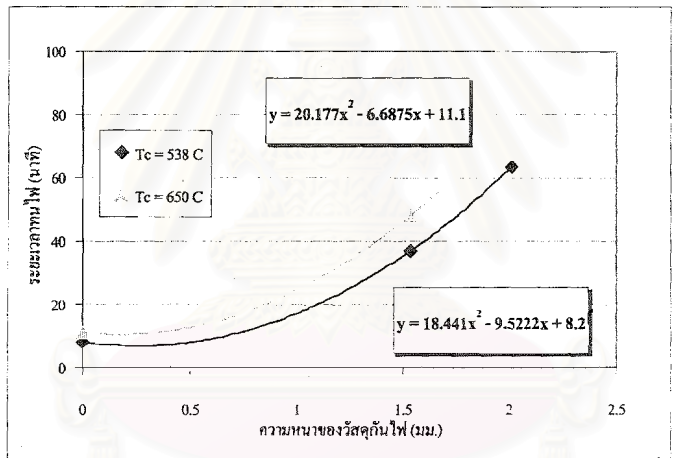
รูปที่ ฉ-29 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS2-I1,CHS2-I2



รูปที่ ฉ-30 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุกันไฟของตัวอย่างทดสอบ CHS3-I1,CHS3-I2



รูปที่ จ-31 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ของตัวอย่างทดสอบ CHS4-I1, CHS4-I2



รูปที่ จ-32 การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความหนาของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ของตัวอย่างทดสอบ CHS5-I1, CHS5-I2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ตารางที่ ข-1 การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-B ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่เสนอโดย Malhotra

หมายเลขตัวอย่าง **W1-B**  
ขนาดเหล็กกระบอก **W 150 x 14.0**

$H_{ps}$  59 cm  $d_p$  0.0 mm  
 $A_s$  17.85 cm<sup>2</sup>  $\Delta t$  1 min.  
 $H_{ps}/A_s$  331 m<sup>-1</sup>

Time min.	$T_s$ C	Time + $\Delta t/2$ min.	$T_f$ C	$h = h_c + h_r$ W/m <sup>2</sup> C	$c_s$ J/kgC	$T_f - T_s$ C	$\Delta T_s$ C
0	30	0.5	71.8	29.33	446.7	41.8	6.93
1	36.9	1.5	175.4	32.15	451.4	138.5	24.92
2	61.9	2.5	279	36.74	466.9	217.1	43.17
3	105	3.5	382.6	43.8	490.1	277.6	62.66
4	167.7	4.5	486.2	54.36	517.6	318.5	84.51
5	252.2	5.5	554.6	66.27	548.1	302.4	92.37
6	344.6	6.5	587.8	77.69	581.5	243.2	82.09
7	426.7	7.5	621	90.21	619.6	194.3	71.49
8	498.1	8.5	654.2	103.43	665.1	156.1	61.31
9	559.5	9.5	687.4	116.96	717.2	127.9	52.71
10	612.2	10.5	709.6	128.73	769.3	97.4	41.19
11	653.4	11.5	720.8	137.53	819.6	67.4	28.59
12	681.9	12.5	732	144.61	898	50.1	20.36
13	702.3	13.5	743.2	150.45	1030.3	40.9	15.08
14	717.4	14.5	754.4	155.47	1297	37	11.21
15	728.6	15.5	763.5	159.45	2049.4	34.9	6.86
16	735.5	16.5	770.5	162.21	4539.8	35	3.16
17	738.6	17.5	777.5	164.26	2882.4	38.9	5.6
18	744.2	18.5	784.5	166.84	1892.9	40.3	8.97
19	753.2	19.5	791.5	170.13	1348.1	38.3	12.21
20	765.4						

ตารางที่ ช-2 การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่เสนอโดย Malhotra

หมายเลขตัวอย่าง W1-P1

ขนาดเหล็กกระปุก W 150 x 14.0

$H_{ps}$  59 cm  $d_p$  20 mm

$A_s$  17.85 cm<sup>2</sup>  $\Delta t$  1 min.

$H_{ps}/A_s$  331 m<sup>-1</sup>  $\phi = (c_p \rho_p / c_s \rho_s) d_p (H_{ps}/A_s)$

Time min.	$T_s$ C	Time + $\Delta t/2$ min.	$T_f$ C	$h = k_p / d_p$ W/m <sup>2</sup> C	$c_s$ J/kgC	$k_p$ W/mC	$\phi$	$T_f - T_s$ C	$\Delta T_f$ C	$\Delta T_s$ C
0	30	0.5	71.8	4.95	446.7	0.099	1.628	41.8	103.6	-45.85
1	30	1.5	175.4	5.21	446.7	0.104	1.628	145.4	103.6	-44.13
2	30	2.5	279	5.49	446.7	0.11	1.628	249	103.6	-42.23
3	30	3.5	382.6	5.77	446.7	0.115	1.628	352.6	103.6	-40.15
4	30	4.5	486.2	6.04	446.7	0.121	1.628	456.2	68.4	-22.1
5	30	5.5	554.6	6.23	446.7	0.125	1.628	524.6	33.2	-4.72
6	30	6.5	587.8	6.31	446.7	0.126	1.628	557.8	33.2	-3.92
7	30	7.5	621	6.4	446.7	0.128	1.628	591	33.2	-3.1
8	30	8.5	654.2	6.49	446.7	0.13	1.628	624.2	33.2	-2.27
9	30	9.5	687.4	6.58	446.7	0.132	1.628	657.4	22.2	3.52
10	33.5	10.5	709.6	6.65	449.1	0.133	1.62	676.1	11.2	8.96
11	42.5	11.5	720.8	6.7	455	0.134	1.599	678.3	11.2	9.05
12	51.5	12.5	732	6.76	460.7	0.135	1.579	680.5	11.2	9.15
13	60.7	13.5	743.2	6.81	466.2	0.136	1.56	682.5	11.2	9.24
14	69.9	14.5	754.4	6.86	471.5	0.137	1.543	684.5	9.1	10.25
15	80.2	15.5	763.5	6.92	477.3	0.138	1.524	683.3	7	11.17
16	91.3	16.5	770.5	6.96	483.2	0.139	1.505	679.2	7	11.1
17	102.5	17.5	777.5	7.01	488.8	0.14	1.488	675	7	11.04
18	113.5	18.5	784.5	7.06	494.2	0.141	1.472	671	7	10.99
19	124.5	19.5	791.5	7.11	499.3	0.142	1.457	667	6.1	11.31
20	135.8	20.5	797.6	7.16	504.4	0.143	1.442	661.8	5.2	11.6
21	147.4	21.5	802.8	7.2	509.3	0.144	1.428	655.4	5.2	11.49
22	158.9	22.5	808	7.25	514.1	0.145	1.415	649.1	5.2	11.38
23	170.3	23.5	813.2	7.29	518.6	0.146	1.403	642.9	5.2	11.28
24	181.5	24.5	818.4	7.33	522.9	0.147	1.391	636.9	4.8	11.34
25	192.9	25.5	823.2	7.38	527.2	0.148	1.38	630.3	4.4	11.39



ตารางที่ ข-2 การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการ  
ที่เสนอ โดย Malhotra (ต่อ)

Time min.	$T_s$ C	Time + $\Delta t/2$ min.	$T_f$ C	$h = k_p / d_p$ $W/m^2 C$	$c_s$ J/kgC	$k_p$ W/mC	$\phi$	$T_f - T_s$ C	$\Delta T_f$ C	$\Delta T_s$ C
26	204.3	26.5	827.6	7.42	531.3	0.148	1.369	623.3	4.4	11.26
27	215.5	27.5	832	7.46	535.3	0.149	1.359	616.5	4.4	11.14
28	226.7	28.5	836.4	7.5	539.2	0.15	1.349	609.7	4.4	11.03
29	237.7	29.5	840.8	7.54	543.1	0.151	1.339	603.1	4.1	11.03
30	248.7	30.5	844.9	7.58	546.9	0.152	1.33	596.2	3.8	11.03
31	259.8	31.5	848.7	7.62	550.7	0.152	1.321	588.9	3.8	10.89
32	270.7	32.5	852.5	7.66	554.4	0.153	1.312	581.8	3.8	10.76
33	281.4	33.5	856.3	7.7	558.2	0.154	1.303	574.9	3.8	10.63
34	292	34.5	860.1	7.74	561.9	0.155	1.294	568.1	3.5	10.62
35	302.7	35.5	863.6	7.78	565.7	0.156	1.286	560.9	3.2	10.61
36	313.3	36.5	866.8	7.81	569.6	0.156	1.277	553.5	3.2	10.46
37	323.7	37.5	870	7.85	573.5	0.157	1.268	546.3	3.2	10.32
38	334.1	38.5	873.2	7.89	577.4	0.158	1.26	539.1	3.2	10.18
39	344.2	39.5	876.4	7.92	581.4	0.158	1.251	532.2	3	10.11
40	354.3	40.5	879.4	7.96	585.5	0.159	1.242	525.1	2.8	10.05
41	364.4	41.5	882.2	7.99	589.7	0.16	1.233	517.8	2.8	9.9
42	374.3	42.5	885	8.02	594	0.16	1.225	510.7	2.8	9.75
43	384	43.5	887.8	8.06	598.4	0.161	1.216	503.8	2.8	9.6
44	393.6	44.5	890.6	8.09	602.8	0.162	1.207	497	2.7	9.49
45	403.1	45.5	893.3	8.12	607.4	0.162	1.197	490.2	2.6	9.39
46	412.5	46.5	895.9	8.16	612.1	0.163	1.188	483.4	2.6	9.24
47	421.8	47.5	898.5	8.19	617	0.164	1.179	476.7	2.6	9.09
48	430.8	48.5	901.1	8.22	621.9	0.164	1.17	470.3	2.6	8.95
49	439.8	49.5	903.7	8.25	626.9	0.165	1.16	463.9	2.4	8.88
50	448.7	50.5	906.1	8.28	632.1	0.166	1.151	457.4	2.2	8.8
51	457.5	51.5	908.3	8.31	637.5	0.166	1.141	450.8	2.2	8.65
52	466.1	52.5	910.5	8.34	643	0.167	1.131	444.4	2.2	8.5
53	474.6	53.5	912.7	8.37	648.5	0.167	1.122	438.1	2.2	8.36
54	483	54.5	914.9	8.39	654.2	0.168	1.112	431.9	2.2	8.21
55	491.2	55.5	917.1	8.42	660	0.168	1.102	425.9	2.2	8.07

ตารางที่ ข-2 การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ WI-P1 ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการที่เสนอโดย Malhotra (ต่อ)

Time min.	$T_s$ C	Time + $\Delta t/2$ min.	$T_f$ C	$h = k_p / d_p$ $W/m^2C$	$c_s$ J/kgC	$k_p$ W/mC	$\phi$	$T_f - T_s$ C	$\Delta T_f$ C	$\Delta T_s$ C
56	499.3	56.5	919.3	8.45	666	0.169	1.092	420	2.2	7.93
57	507.2	57.5	921.5	8.48	672	0.17	1.082	414.3	2.2	7.79
58	515	58.5	923.7	8.5	678.1	0.17	1.073	408.7	2.2	7.66
59	522.7	59.5	925.9	8.53	684.3	0.171	1.063	403.2	2.1	7.56
60	530.2	60.5	928	8.56	690.7	0.171	1.053	397.8	2	7.46
61	537.7	61.5	930	8.58	697.1	0.172	1.043	392.3	2	7.33
62	545	62.5	932	8.61	703.7	0.172	1.034	387	2	7.2
63	552.2	63.5	934	8.63	710.3	0.173	1.024	381.8	2	7.07
64	559.3	64.5	936	8.65	717.1	0.173	1.014	376.7	1.9	6.98
65	566.3	65.5	937.9	8.68	723.9	0.174	1.005	371.6	1.8	6.89
66	573.2	66.5	939.7	8.7	730.9	0.174	0.995	366.5	1.8	6.76
67	579.9	67.5	941.5	8.72	737.9	0.174	0.986	361.6	1.8	6.64
68	586.6	68.5	943.3	8.75	745	0.175	0.976	356.7	1.8	6.52
69	593.1	69.5	945.1	8.77	752.1	0.175	0.967	352	1.8	6.4
70	599.5	70.5	946.9	8.79	759.3	0.176	0.958	347.4	1.8	6.29
71	605.8	71.5	948.7	8.81	764.3	0.176	0.952	342.9	1.8	6.19
72	612	72.5	950.5	8.83	769.2	0.177	0.946	338.5	1.8	6.09
73	618.1	73.5	952.3	8.85	774.4	0.177	0.939	334.2	1.8	5.99
74	624	74.5	954.1	8.88	780.1	0.178	0.932	330.1	1.7	5.93
75	630	75.5	955.8	8.9	786.4	0.178	0.925	325.8	1.6	5.86
76	635.8	76.5	957.4	8.92	793.3	0.178	0.917	321.6	1.6	5.76
77	641.6	77.5	959	8.93	800.9	0.179	0.908	317.4	1.6	5.65
78	647.2	78.5	960.6	8.95	809.3	0.179	0.899	313.4	1.6	5.55
79	652.8	79.5	962.2	8.97	818.6	0.179	0.889	309.4	1.6	5.44
80	658.2	80.5	963.8	8.99	829	0.18	0.877	305.6	1.6	5.33
81	663.6	81.5	965.4	9.01	840.7	0.18	0.865	301.8	1.6	5.22
82	668.8	82.5	967	9.03	853.9	0.181	0.852	298.2	1.6	5.11
83	673.9	83.5	968.6	9.05	868.8	0.181	0.837	294.7	1.6	4.99
84	678.9	84.5	970.2	9.06	886	0.181	0.821	291.3	1.5	4.9
85	683.8	85.5	971.7	9.08	905.8	0.182	0.803	287.9	1.4	4.8



ภาคผนวก ซ.

ตารางที่ ซ-1 การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่เวลาต่างๆ โดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้

หมายเลขตัวอย่าง W1-P1

ขนาดเหล็กทรงรูป W 150 x 14.0

$H_{ps}$	59	cm	$H_{pc} = H_{ps} + 0.9706d_p$	=	60.94	cm
$A_s$	17.85	cm <sup>2</sup>	$A_p = H_{ps}d_p + 4d_p^2$	=	134.0	cm <sup>2</sup>
$H_{ps}/A_s$	331	m <sup>-1</sup>	$H_{pc}/A_s$	=	341	m <sup>-1</sup>
$d_p$	20	mm				
$\Delta t$	1	min.	$\phi' = (c_p \rho_p A_p / c_s \rho_s A_s)$			

Time min.	$T_s$ C	Time + $\Delta t/2$ min.	$T_f$ C	$h = k_p / d_p$ W/m <sup>2</sup> C	$c_s$ J/kgC	$k_p$ W/mC	$\phi$	$T_f - T_s$ C	$\Delta T_f$ C	$\Delta T_s$ C
0	30	0.5	71.8	4.95	446.7	0.099	1.849	41.8	103.6	-49.09
1	30	1.5	175.4	5.21	446.7	0.104	1.849	145.4	103.6	-47.29
2	30	2.5	279	5.49	446.7	0.11	1.849	249	103.6	-45.3
3	30	3.5	382.6	5.77	446.7	0.115	1.849	352.6	103.6	-43.12
4	30	4.5	486.2	6.04	446.7	0.121	1.849	456.2	68.4	-23.85
5	30	5.5	554.6	6.23	446.7	0.125	1.849	524.6	33.2	-5.27
6	30	6.5	587.8	6.31	446.7	0.126	1.849	557.8	33.2	-4.44
7	30	7.5	621	6.4	446.7	0.128	1.849	591	33.2	-3.58
8	30	8.5	654.2	6.49	446.7	0.13	1.849	624.2	33.2	-2.7
9	30	9.5	687.4	6.58	446.7	0.132	1.849	657.4	22.2	3.47
10	33.5	10.5	709.6	6.65	449.1	0.133	1.839	676.1	11.2	9.29
11	42.8	11.5	720.8	6.7	455.1	0.134	1.815	678	11.2	9.38
12	52.1	12.5	732	6.76	461	0.135	1.792	679.9	11.2	9.48
13	61.6	13.5	743.2	6.81	466.7	0.136	1.77	681.6	11.2	9.57
14	71.2	14.5	754.4	6.87	472.3	0.137	1.749	683.2	9.1	10.65
15	81.8	15.5	763.5	6.92	478.2	0.138	1.727	681.7	7	11.63
16	93.5	16.5	770.5	6.97	484.3	0.139	1.706	677	7	11.56
17	105	17.5	777.5	7.02	490.1	0.14	1.685	672.5	7	11.49
18	116.5	18.5	784.5	7.07	495.6	0.141	1.667	668	7	11.42
19	127.9	19.5	791.5	7.12	500.9	0.142	1.649	663.6	6.1	11.77
20	139.7	20.5	797.6	7.17	506.1	0.143	1.632	657.9	5.2	12.08

ตารางที่ ซ-1 การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่เวลาต่างๆโดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

Time min.	$T_s$ C	Time + $\Delta t/2$ min.	$T_f$ C	$h = k_p / d_p$ $W/m^2C$	$c_s$ J/kgC	$k_p$ W/mC	$\phi$	$T_f - T_s$ C	$\Delta T_f$ C	$\Delta T_s$ C
21	151.8	21.5	802.8	7.21	511.2	0.144	1.616	651	5.2	11.95
22	163.7	22.5	808	7.26	516	0.145	1.601	644.3	5.2	11.83
23	175.6	23.5	813.2	7.3	520.6	0.146	1.587	637.6	5.2	11.72
24	187.3	24.5	818.4	7.35	525.1	0.147	1.573	631.1	4.8	11.78
25	199.1	25.5	823.2	7.39	529.4	0.148	1.56	624.1	4.4	11.83
26	210.9	26.5	827.6	7.44	533.7	0.149	1.548	616.7	4.4	11.69
27	222.6	27.5	832	7.48	537.8	0.15	1.536	609.4	4.4	11.56
28	234.2	28.5	836.4	7.52	541.8	0.15	1.524	602.2	4.4	11.43
29	245.6	29.5	840.8	7.56	545.8	0.151	1.513	595.2	4.1	11.43
30	257	30.5	844.9	7.61	549.7	0.152	1.503	587.9	3.8	11.42
31	268.4	31.5	848.7	7.65	553.7	0.153	1.492	580.3	3.8	11.27
32	279.7	32.5	852.5	7.69	557.6	0.154	1.481	572.8	3.8	11.13
33	290.8	33.5	856.3	7.73	561.5	0.155	1.471	565.5	3.8	10.99
34	301.8	34.5	860.1	7.77	565.4	0.155	1.461	558.3	3.5	10.97
35	312.8	35.5	863.6	7.8	569.4	0.156	1.451	550.8	3.2	10.95
36	323.7	36.5	866.8	7.84	573.5	0.157	1.44	543.1	3.2	10.79
37	334.5	37.5	870	7.88	577.6	0.158	1.43	535.5	3.2	10.63
38	345.2	38.5	873.2	7.92	581.8	0.158	1.42	528	3.2	10.48
39	355.7	39.5	876.4	7.95	586	0.159	1.41	520.7	3	10.41
40	366.1	40.5	879.4	7.99	590.4	0.16	1.399	513.3	2.8	10.33
41	376.4	41.5	882.2	8.02	594.9	0.16	1.388	505.8	2.8	10.17
42	386.6	42.5	885	8.06	599.5	0.161	1.378	498.4	2.8	10
43	396.6	43.5	887.8	8.09	604.2	0.162	1.367	491.2	2.8	9.84
44	406.4	44.5	890.6	8.13	609	0.163	1.356	484.2	2.7	9.73
45	416.1	45.5	893.3	8.16	614	0.163	1.345	477.2	2.6	9.61
46	425.7	46.5	895.9	8.19	619.1	0.164	1.334	470.2	2.6	9.45
47	435.2	47.5	898.5	8.22	624.3	0.164	1.323	463.3	2.6	9.29
48	444.5	48.5	901.1	8.25	629.6	0.165	1.312	456.6	2.6	9.13
49	453.6	49.5	903.7	8.29	635.1	0.166	1.301	450.1	2.4	9.05
50	462.7	50.5	906.1	8.32	640.7	0.166	1.289	443.4	2.2	8.97

ตารางที่ ๗-1 การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เหล็กของตัวอย่างทดสอบ W1-P1 ที่เวลาต่างๆโดยใช้สมการแบบจำลองที่เสนอในงานวิจัยนี้ (ต่อ)

Time min.	$T_s$ C	Time + $\Delta t/2$ min.	$T_f$ C	$h = k_p / d_p$ $W/m^2 C$	$c_s$ J/kgC	$k_p$ W/mC	$\phi$	$T_f - T_s$ C	$\Delta T_f$ C	$\Delta T_s$ C
51	471.6	51.5	908.3	8.35	646.5	0.167	1.278	436.7	2.2	8.81
52	480.4	52.5	910.5	8.38	652.5	0.168	1.266	430.1	2.2	8.65
53	489.1	53.5	912.7	8.4	658.5	0.168	1.254	423.6	2.2	8.49
54	497.6	54.5	914.9	8.43	664.7	0.169	1.243	417.3	2.2	8.33
55	505.9	55.5	917.1	8.46	671	0.169	1.231	411.2	2.2	8.18
56	514.1	56.5	919.3	8.49	677.4	0.17	1.219	405.2	2.2	8.03
57	522.1	57.5	921.5	8.52	683.9	0.17	1.208	399.4	2.2	7.89
58	530	58.5	923.7	8.54	690.5	0.171	1.196	393.7	2.2	7.74
59	537.7	59.5	925.9	8.57	697.2	0.171	1.185	388.2	2.1	7.64
60	545.4	60.5	928	8.6	704	0.172	1.173	382.6	2	7.53
61	552.9	61.5	930	8.62	711	0.172	1.162	377.1	2	7.39
62	560.3	62.5	932	8.65	718.1	0.173	1.15	371.7	2	7.25
63	567.6	63.5	934	8.67	725.2	0.173	1.139	366.4	2	7.12
64	574.7	64.5	936	8.7	732.4	0.174	1.128	361.3	1.9	7.02
65	581.7	65.5	937.9	8.72	739.8	0.174	1.117	356.2	1.8	6.93
66	588.6	66.5	939.7	8.74	747.2	0.175	1.105	351.1	1.8	6.79
67	595.4	67.5	941.5	8.77	754.7	0.175	1.094	346.1	1.8	6.66
68	602.1	68.5	943.3	8.79	761.7	0.176	1.084	341.2	1.8	6.54
69	608.6	69.5	945.1	8.81	766.5	0.176	1.078	336.5	1.8	6.43
70	615.1	70.5	946.9	8.83	771.8	0.177	1.07	331.8	1.8	6.32
71	621.4	71.5	948.7	8.85	777.5	0.177	1.062	327.3	1.8	6.22
72	627.6	72.5	950.5	8.87	783.8	0.177	1.054	322.9	1.8	6.11
73	633.7	73.5	952.3	8.9	790.7	0.178	1.045	318.6	1.8	6
74	639.7	74.5	954.1	8.92	798.3	0.178	1.035	314.4	1.7	5.92
75	645.6	75.5	955.8	8.94	806.8	0.179	1.024	310.2	1.6	5.84
76	651.5	76.5	957.4	8.96	816.3	0.179	1.012	305.9	1.6	5.73
77	657.2	77.5	959	8.98	826.9	0.18	0.999	301.8	1.6	5.61
78	662.8	78.5	960.6	9	838.9	0.18	0.985	297.8	1.6	5.49
79	668.3	79.5	962.2	9.01	852.5	0.18	0.969	293.9	1.6	5.36
80	673.7	80.5	963.8	9.03	868.1	0.181	0.952	290.1	1.6	5.23



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อรรถวุฒิ อุบลจินดา เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม พ.ศ.2519 ที่จังหวัดสงขลา ได้รับการศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลสงขลา และระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนมหาวิชราวุธ จังหวัดสงขลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย