

การศึกษาวิธีเพิ่มความสามารถทนไฟให้แก่แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว



นายบัณฑิต คมกริชวรากล

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0977-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF FIRE-ENDURANCE IMPROVEMENT METHODS  
FOR BONDED POST-TENSIONED CONCRETE SLABS



Mr.Bundit Komkrichwarakul

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

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0977-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาวิธีเพิ่มความสามารถทนไฟให้แก่แผ่นพื่นคอนกรีตอัดแรงดึง ภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว
โดย	นายบัณฑิต คมกริชวรากล
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพ็ชรสุสม)

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

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

สภาบัณฑิตศึกษา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัณฑิต คมกริชวรากล : การศึกษาวิธีเพิ่มความสามารถทนไฟให้แก่แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว (A STUDY OF FIRE-ENDURANCE IMPROVEMENT METHODS FOR BONDED POST-TENSIONED CONCRETE SLABS) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ชัชชาติ สิทธิพันธุ์  
142 หน้า. ISBN: 974-03-0977-1

งานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการเพิ่มความสามารถในการทนไฟให้แก่แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว ในการศึกษาใช้แผ่นพื้นตัวอย่างขนาด 2.8 x1.5 เมตร หนา 12 ซม. ทั้งสิ้น 5 ตัวอย่าง โดยในแต่ละชิ้นตัวอย่างมีการฝังท่อร้อยลวดที่มีลวดอัดแรงและวัสดุเกราที่อยู่ใน ตัวแปรที่ศึกษาในการเพิ่มความสามารถในการทนไฟในงานวิจัยนี้ ได้แก่ 1) ระยะห่างระหว่างเหล็กเสริมปกติที่ท้องพื้น 2) ความหนาของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว 3) ชนิดของวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราที่ในท่อร้อยลวด 4) การทาสารอินทุมเอสเซนส์ที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้น และ 5) การติดแผ่นยับซึมทนไฟที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้น โดยในการทดสอบทำโดยการติดตั้งชิ้นตัวอย่างที่ด้านบนของเตาเผา และ ให้ผิวด้านล่างของชิ้นตัวอย่างสัมผัสกับอุณหภูมิตามมาตรฐานASTM E119 ระหว่างการทดสอบทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิภายในเตา อุณหภูมิของคอนกรีตที่ผิวบนและที่ระดับ 3 ซม. 6 ซม. และ 9 ซม. จากผิวล่างของแผ่นพื้น อุณหภูมิของเหล็กเสริมปกติ อุณหภูมิของเหล็กเสริมอัดแรง และชนิดการหลุดร่อนของคอนกรีตที่เกิดขึ้น โดยอัตราการทนไฟของชิ้นตัวอย่างจะพิจารณาจากอุณหภูมิของลวดอัดแรงเป็นหลัก และ ใช้ข้อกำหนดตามมาตรฐานASTM E119 เป็นตัวกำหนดอัตราการทนไฟของชิ้นตัวอย่าง

ผลการศึกษาพบว่าสำหรับชิ้นตัวอย่างที่ทดสอบ การลดระยะห่างเหล็กเสริมจาก40เป็น20 ซม. ไม่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถทนไฟของแผ่นพื้น การเพิ่มความหนาของคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวเพิ่มความสามารถทนไฟได้ดีที่สุด การเปลี่ยนส่วนผสมของวัสดุเกราที่ช่วยเพิ่มความสามารถทนไฟได้เล็กน้อย การทาสารอินทุมเอสเซนส์ที่ผิวด้านล่างของแผ่นพื้นสามารถชะลอการเพิ่มอุณหภูมิของลวดอัดแรงได้ในช่วง2 ชั่วโมง และการติดแผ่นยับซึมที่ผิวล่างของแผ่นพื้นอาจมีผลทำให้เกิดการประลัยของแผ่นพื้นอย่างกระทันหันอัน เนื่องมาจากการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีตภายหลังจากการหลุดร่อนของแผ่นยับซึม นอกจากนี้ยังพบว่าทฤษฎีการนำความร้อนามีติภายใต้สภาวะแปรปรวน สามารถนำมาวิเคราะห์ลักษณะการเพิ่มอุณหภูมิของตัวอย่างที่ทดสอบได้

ภาควิชา.....วิศวกรรมโยธา.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมโยธา.....  
ปีการศึกษา.2544.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

## 4170382421: MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEY WORDS: FIRE / FIRE ENDURANCE / POST-TENSIONED / CONCRETE SLAB / FLY ASH / LIMESTONE POWDER / PERLITE / HEAT TRANSFER

BUNDIT KOMKRICHWARAKUL : A STUDY OF FIRE-ENDURANCE IMPROVEMENT METHODS FOR BONDED POST-TENSIONED CONCRETE SLABS, THESIS ADVISOR: ASST. PROF. CHADCHART SITTIPUNT, Ph.D. 142 pp. ISBN: 974-03-0977-1

This research investigates different methods used to improve fire-resistance of bonded post-tensioned concrete slabs. Five 2.8 m x 1.5 m reinforced concrete slabs with 12 cm thickness were used as the specimens of the study. Conduits with prestressing tendon and grouting cement were embedded in each specimen. Variables studied as methods for improving fire-endurance were 1) spacing of regular steel reinforcement at the bottom of the slab; 2) distance of concrete cover for conduits; 3) different materials used in grouting cement; 4) application of intumescent paint on the bottom surface of the specimen and 5) installation of fire-proof gypsum boards on the bottom surface of the specimen. Each specimen was placed over a horizontal furnace and the bottom surface was subjected to temperature in accordance with ASTM E-119. Furnace temperature, temperature at the top surface and at 3 cm, 6 cm and 9 cm from the bottom surface, temperature of the prestressing tendon, temperature of regular reinforcement, and characteristics of concrete spalling were recorded during the test. Fire-resistance of the specimen was based primarily on the temperature of the prestressing tendon. Temperature criteria given in ASTM E-119 were used as failure criteria for each specimen.

Findings from the experimental program of this study can be summarized as follows: 1) the spacing of regular steel reinforcement did not significantly affect the fire endurance of the specimens; 2) increasing concrete cover for conduits significantly increased fire endurance of the specimen; 3) different materials used in grouting cements had little effect in increasing fire endurance; 4) intumescent coating delayed the temperature increase of prestressing tendon during the first 2 hour-period and 5) installation of gypsum boards could lead to a sudden failure of the specimen caused by explosive spalling of concrete after detachment of gypsum boards. The study also showed that the theory of one dimensional transient heat transfer could be used to estimate the temperature increase of the specimens with good accuracy.

Department    Civil Engineering.....                      Student's signature.....  
 Field of study   Civil Engineering.....                      Advisor's signature.....  
 Academic year   2001.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชชาติ สิทธิพันธุ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการเสนอแนะแนวทางในการทำวิจัยที่มีประโยชน์ รวมทั้งช่วยตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาในการทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ เพียรสุดสม และรองศาสตราจารย์ ดร. บุญไชย สถิตมั่นในธรรม คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่ช่วยแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สำหรับเงินทุนและวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ผู้เขียนขอขอบคุณหน่วยงานต่าง ๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ดังนี้

เงินทุนวิจัย	จากบริษัท เชนเนอรัล เอนิเนียริง จำกัด
ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด7เส้น พร้อมท่อร้อยลวดเกลียว	จากบริษัท เชนเนอรัล เอนิเนียริง จำกัด
เถ้าลอย	จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
เพอร์ไลต์	จากบริษัท ดี. พี. ดีโอไรท์ โกลด์ จำกัด
สารลดน้ำอย่างมาก (SIKAMENT FF)	จากบริษัท ซิก้า(ประเทศไทย) จำกัด
แผ่นยิปซัมชนิดทนไฟ	จากบริษัท สยามยิปซัม จำกัด
สีทนไฟ	จากบริษัท ไบเทค โฮลดิ้ง จำกัด

ผู้เขียนขอขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อรุ่นพี่ เพื่อนๆ รุ่นน้อง และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการคอนกรีตและหน่วยทดสอบวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทำงาน และเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา โดยเฉพาะพี่วีรัตน์ มณีกาญจนสิงห์ วิศวกรผู้ควบคุมดูแลทดสอบที่อุทิสเวลาให้

ท้ายสุดนี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งคอยให้กำลังใจ สนับสนุนการทำงานเป็นอย่างดีตลอดมา ครูบาอาจารย์ทุก ๆ ท่านที่เคยสั่งสอน อบรม ให้ความรู้ในสาขาวิชาต่าง ๆ พระคุณของท่านเหล่านี้ ผู้เขียนจะระลึกถึงจนกว่าชีวิตจะหาไม่

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
บัณฑิต คมกริชวารากุล

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ทั่วไป.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 การดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2 วัสดุและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษาความสามารถทนไฟ ของพื้นคอนกรีตอัดแรง	
2.1 ทั่วไป.....	8
2.2 กราฟมาตรฐานสำหรับการทดสอบอัคคีภัย ตามมาตรฐานASTM E119.....	8
2.3 พฤติกรรมการรับแรงค้ำขององค์อาคารชนิดคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัคคีภัย.....	9
2.4 ตัวแปรและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ในแผ่นพื้นคอนกรีต.....	10
2.5 การหลุดร่อนของคอนกรีตเนื่องจากผลของอัคคีภัย.....	13
2.6 คุณสมบัติในการต้านทานอัคคีภัยของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	14
2.7 สรุป.....	19
บทที่ 3 การติดตั้งและการทดสอบ แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงค้ำภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว	
3.1 ทั่วไป.....	26
3.2 มาตรฐานสำหรับการทดสอบความสามารถทนไฟของวัสดุและองค์อาคาร.....	26
3.3 ข้อกำหนดในกฎกระทรวงฉบับที่ 48 เกี่ยวกับองค์อาคารชนิดพื้นคอนกรีตอัดแรง.....	28
3.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการต้านทานอัคคีภัย ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง.....	29
3.5 การติดตั้งอุปกรณ์และควบคุมสภาวะ ของแผ่นพื้นที่ใช้ในการทดสอบ.....	30

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.6 การทดสอบวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของแผ่นพื้น.....	33
3.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติของ เถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและเพอร์ไลต์.....	36
3.8 ผลการทดสอบหาความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดซีดเหนียว.....	36
3.9 สรุป.....	39
<b>บทที่ 4 การคำนวณอุณหภูมิขึ้นส่วนภายในของพื้นคอนกรีตอัดแรง ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ</b>	
4.1 ทั่วไป.....	72
4.2 การถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ภายใต้สภาวะไม่คงที่.....	72
4.3 การคำนวณอุณหภูมิขึ้นส่วนภายใน ของพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการทดสอบ.....	76
4.4 สรุป.....	89
<b>บทที่ 5 ช่วงเวลาที่พื้นคอนกรีตอัดแรง เกิดการวิบัติภายใต้แรงดัดเนื่องจากอค์คิภัย</b>	
5.1 ทั่วไป.....	111
5.2 กำลังอัดประลัย ขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง.....	111
5.3 รูปแบบของหน่วยแรงในคอนกรีตที่สภาวะการใช้งาน.....	115
5.4 การวิบัติของพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังภายใต้แรงดัด เนื่องจากผลของอค์คิภัย.....	115
5.5 ผลเปรียบเทียบอุณหภูมิคอนกรีตและลวดเกลียวอัดแรง ของการเพิ่มความสามารถทนไฟแต่ละวิธี....	119
5.6 ความเป็นไปได้ของการวิบัติก่อนเวลาที่กฎกระทรวงฉบับที่ 48 กำหนดของพื้นคอนกรีตอัดแรง ที่ออกแบบตามข้อกำหนดในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง.....	122
5.7 สรุป.....	123
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย</b>	
6.1 ทั่วไป.....	133
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	134
รายการอ้างอิง.....	135
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของส่วนประกอบและตำแหน่งอุปกรณ์ในเตาทดสอบ.....	138
ภาคผนวก ข. ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกรทท์.....	139
ภาคผนวก ค. มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง.....	141
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142



## สารบัญญัตราสาร

		หน้า
ตารางที่ 2.1	สารประกอบที่นิยมใช้เป็น โบลัวิ่ง เอเจ้นท์ และก๊าซที่เป็นผลิตผล.....	21
ตารางที่ 2.2	แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ของหินเพอร์ไลต์.....	21
ตารางที่ 2.3	ส่วนประกอบทางเคมี ของหินเพอร์ไลต์.....	21
ตารางที่ 2.4	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ ของเพอร์ไลต์.....	22
ตารางที่ 2.5	แสดงส่วนประกอบทางเคมี ของเพอร์ไลต์ในประเทศไทย เทียบกับของต่างประเทศ.....	22
ตารางที่ 2.6	แสดงสัดส่วนของธาตุที่เป็นส่วนประกอบ ของแร่เพอร์ไลต์ในประเทศไทย.....	23
ตารางที่ 2.7	แสดงคุณสมบัติทางกายภาพ ของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเพอร์ไลต์.....	23
ตารางที่ 2.8	เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตปกติ เทียบกับคอนกรีตผสมเพอร์ไลต์.....	24
ตารางที่ 3.1	การจำแนกองค์ค่าการตามสภาพการยี่ดั่งของฐานรองรับ ตามมาตรฐาน ASTM E119.....	41
ตารางที่ 3.2	ความหนาแน่นที่สุดของแผ่นพื้น สำหรับระยะเวลาคงทนต่อเพลิงไหม้ต่างๆ ตามมาตรฐาน สำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง(มาตรฐาน ว.ส.ท. 1009-34).....	42
ตารางที่ 3.3	ความหนาแน่นที่สุดของคอนกรีตหุ้มลวดเกลียวอัดแรงในแผ่นพื้น ตามมาตรฐาน สำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง(มาตรฐาน ว.ส.ท. 1009-34).....	42
ตารางที่ 3.4	สัดส่วนผสมของวัสดุเกราท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	42
ตารางที่ 3.5	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ ของเถ้าลอย.....	43
ตารางที่ 3.6	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ ของฝุ่นหินปูน.....	43
ตารางที่ 3.7	การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ และค่าการดูดซึ่ม ของเพอร์ไลต์.....	43
ตารางที่ 3.8	การวิเคราะห์เพอร์ไลต์ด้วยตะแกรง และค่าโมดูลัสความละเอียด.....	44
ตารางที่ 4.1	ค่ารากที่หนึ่งของสมการที่ 4.12 (ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ).....	91
ตารางที่ 4.2	แสดงผลของสมการที่ 4.10 (ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ).....	91
ตารางที่ 4.3	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ เทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	93
ตารางที่ 4.4	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1(ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	93
ตารางที่ 4.5	ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	93
ตารางที่ 4.6	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ เทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง).....	94
ตารางที่ 4.7	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2(เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวด).....	94
ตารางที่ 4.8	ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง).....	94
ตารางที่ 4.9	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ เทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3	

(ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง).....	95
ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3(ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง).....	95

### สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง).....	95
ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ เทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง).....	96
ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4(ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง).....	96
ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4(ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)...	96
ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ของแผ่นพื้นที่ 5(ปรับปรุงวัสดุเกราท).....	97
ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5(ปรับปรุงวัสดุเกราท).....	97
ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5(ปรับปรุงวัสดุเกราท)...	97
ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดกำลังต้านทานแรงอัด ของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุผสมหยาบชนิดคาร์บอนเนต เทียบกับค่าเริ่มต้น (คอนกรีตมีหน่วยแรงกระทำแต่ไม่เกิน $0.4 f_c'$ ) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....	124
ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดกำลังต้านทานแรงอัด ของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุผสมหยาบชนิดคาร์บอนเนต เทียบกับค่าเริ่มต้น (คอนกรีตไม่มีหน่วยแรงกระทำ) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....	124
ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดกำลังต้านทานแรงดึง ของลวดเกลียวอัดแรง เทียบกับค่าเริ่มต้น(ลวดเกลียวอัดแรงชนิดรีดเย็น)เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น.....	125
ตารางที่ 5.4 โอกาสที่พื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยวเกิดการวิบัติ เนื่องจากการ อัดระเบิดของคอนกรีต ตามลำดับ.....	125
ตารางที่ 5.5 แสดงค่าเวลาน้อยที่สุดของที่ตัวอย่างคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว เกิดการวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงดึง สูงกว่าหน่วยแรงประลัยของลวดเกลียวอัดแรง.....	126

## สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	กราฟมาตรฐานสำหรับทดสอบการทดสอบอค์กัถย ตามมาตรฐาน ASTM E119..... 24
รูปที่ 2.2	แสดงผลของความหนาแน่นพื้น และชนิดของวัสดุผสมที่มีต่อความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นคอนกรีต..... 24
รูปที่ 2.3	แสดงผลของหน่วยน้ำหนัก(สภาพแห้งในเตาอบ) และความหนาของแผ่นพื้น ที่มีต่อความสามารถทนไฟของคอนกรีตมวลเบา..... 25
รูปที่ 2.4	แสดงกระบวนการเกิดขึ้นสะสมความร้อน และการหลุ่ร้อนขององค์อาคารคอนกรีต..... 25
รูปที่ 2.5	คุณสมบัติของแผ่นยิปซัม (ความหนาแน่น 678 kg.m <sup>-3</sup> )..... 26
รูปที่ 3.1	แสดงวิธีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ บนลวดเกลียวอัดแรง ชนิดลวด 7 เส้น..... 45
รูปที่ 3.2	แสดงวิธีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิบนแท่งมอร์ต้า สำหรับวัดอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่างๆ... 45
รูปที่ 3.3	วิธีการติดตั้งแท่งมอร์ต้าลงในแบบหล่อ สำหรับวัดอุณหภูมิคอนกรีต ของแผ่นพื้นที่ใช้ทดสอบ ที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร..... 45
รูปที่ 3.4	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวบน ของแผ่นพื้นที่ใช้ในการทดสอบ..... 46
รูปที่ 3.5	ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ที่ติดตั้งสมบูรณ์แล้ว..... 46
รูปที่ 3.6	วิธีการเติมวัสดุเกราท์ลงใน ท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง..... 46
รูปที่ 3.7	ตำแหน่งของเหล็กเสริม และท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)..... 47
รูปที่ 3.8	แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)..... 47
รูปที่ 3.9	ตำแหน่งของเหล็กเสริม และท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง)..... 47
รูปที่ 3.10	แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว)..... 48
รูปที่ 3.11	ตำแหน่งของท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท์)..... 48
รูปที่ 3.12	แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท์)..... 48
รูปที่ 3.13	ตำแหน่งของเหล็กเสริม และท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)..... 49
รูปที่ 3.14	แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)..... 49
รูปที่ 3.15	แผ่นพื้นที่ 3 ที่ติดตั้งแผ่นยิปซัมเสร็จสมบูรณ์แล้ว..... 49
รูปที่ 3.16	ตำแหน่งของเหล็กเสริม และท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)..... 50

รูปที่ 3.17	แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น).....	50
รูปที่ 3.18	ตัวอย่างแผ่นพื้นที่ 4 ที่ทาสีทนไฟเสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	50
รูปที่ 3.19	ค่าเวลาการไหลของวัสดุเกราท ที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ.....	51
รูปที่ 3.20	กำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 3 วัน ของวัสดุเกราทที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ.....	51
รูปที่ 3.21	กำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 7 วัน ของวัสดุเกราทที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ.....	51

### สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.22	กำลังต้านทานแรงอัดที่อายุ 28 วัน ของวัสดุเกราทที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มต่าง ๆ.....	52
รูปที่ 3.23	กำลังต้านทานแรงดึงที่อายุ 3 วัน ของวัสดุเกราทที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มต่าง ๆ.....	52
รูปที่ 3.24	กำลังต้านทานแรงดึงที่อายุ 7 วัน ของวัสดุเกราทที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มต่าง ๆ.....	52
รูปที่ 3.25	กำลังต้านทานแรงดึงที่อายุ 28 วัน ของวัสดุเกราทที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มต่าง ๆ.....	53
รูปที่ 3.26	กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท ที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่ม.....	53
รูปที่ 3.27	กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท ที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่ม.....	53
รูปที่ 3.28	กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท ที่ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่ม.....	54
รูปที่ 3.29	กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท ที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม.....	54
รูปที่ 3.30	ผลของแรงบิดภายในจากการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท.....	54
รูปที่ 3.31	อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 1(ลดระยะห่างเหล็ก).....	55
รูปที่ 3.32	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	55
รูปที่ 3.33	อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง).....	55
รูปที่ 3.34	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง).....	56
รูปที่ 3.35	อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง).....	56
รูปที่ 3.36	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง).....	56
รูปที่ 3.37	อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 4(ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)....	57
รูปที่ 3.38	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง).....	57
รูปที่ 3.39	อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท).....	57
รูปที่ 3.40	อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 5	



รูปที่ 3.71	อุณหภูมิลาวคเคลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 5(ใช้เส้นลวดเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์).....	68
รูปที่ 3.72	อุณหภูมิลาวคเคลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 5(ใช้เส้นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์).....	68
รูปที่ 3.73	อุณหภูมิลาวคเคลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 5(ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์).....	69
รูปที่ 3.74	อุณหภูมิลาวคเคลียวอัดแรงเคลี่ยตามชนิดวัสดุเกราท์ ของแผ่นพื้นที่ 5(ปรับปรุงวัสดุเกราท์).....	69
รูปที่ 3.75	การหลุดร่อนของคอนกรีต หลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	69
รูปที่ 3.76	การหลุดร่อนของคอนกรีต หลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเคลียวอัดแรง).....	70

## สารบัญภาพ(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.77	การหลุดร่อนของคอนกรีต หลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นชิปซั่มที่ผิวล่าง).....	70
รูปที่ 3.78	การหลุดร่อนของคอนกรีต หลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง).....	70
รูปที่ 3.79	การหลุดร่อนของคอนกรีต หลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท์).....	71
รูปที่ 4.1	อุณหภูมิที่ผิวบน ของแผ่นพื้นที่สัมผัสเปลวไฟบริเวณผิวล่าง.....	98
รูปที่ 4.2	ท่อเหล็กขนาด 76x4.0 มม. ทาสีทนไฟหนา 1600 ไมครอน ที่ใช้ในการทดสอบ.....	98
รูปที่ 4.3	ผลการทดสอบท่อเหล็กขนาด 76x4.0 มม. ทาสีทนไฟหนา 1600 ไมครอน.....	98
รูปที่ 4.4	เส้นตรงสมมุติแทนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของสีทนไฟหนา 1600 ไมครอน....	99
รูปที่ 4.5	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	99
รูปที่ 4.6	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 6 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	99
รูปที่ 4.7	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	100
รูปที่ 4.8	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ผิวบน ของแผ่นพื้นที่ 1(ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	100
รูปที่ 4.9	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 1(ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	100
รูปที่ 4.10	ผลการคำนวณอุณหภูมิลาวคเคลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 1(ลดระยะห่างเหล็กเสริม).....	101
รูปที่ 4.11	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเคลียวอัดแรง).....	101
รูปที่ 4.12	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 6 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2	



	(ปรับปรุงวัสดุเกราะ).....	108
รูปที่ 4.32	ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ผิวบน ของแผ่นพื้นที่ 5(ปรับปรุงวัสดุเกราะ).....	108
รูปที่ 4.33	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 5(ปรับปรุงวัสดุเกราะ).....	108
รูปที่ 4.34	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 5(ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราะ).....	109
รูปที่ 4.35	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 5 (ใช้ถั่วลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราะ).....	109
รูปที่ 4.36	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 5 (ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราะ).....	109
รูปที่ 4.37	ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 5 (ใช้เฟอร์ไรท์เป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราะ).....	110
รูปที่ 5.1	การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรง ที่สถานะประลัย.....	126
รูปที่ 5.2	หน่วยแรงในคอนกรีตอัดกับตำแหน่ง ของแรงอัดลัพท์.....	127
รูปที่ 5.3	เปอร์เซ็นต์การลดกำลังด้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมหยาบ ชนิดคาร์บอนเทียบกับเวลา.....	127

### สารบัญภาพ(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 5.4	เปอร์เซ็นต์การลดกำลังด้านทานแรงดึง ของเหล็กเสริมและลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา.....	127
รูปที่ 5.5	อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1(ลดระยะห่างของเหล็กเสริม).....	128
รูปที่ 5.6	อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2(เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว).....	128
รูปที่ 5.7	อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3(ติดแผ่นยับยั้งที่ผิวล่าง).....	128
รูปที่ 5.8	อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4(ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง).....	129
รูปที่ 5.9	อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5(ปรับปรุงวัสดุเกราะ).....	129
รูปที่ 5.10	อุณหภูมิของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุผสมหยาบชนิดคาร์บอนเทียบกับเวลา.....	129
รูปที่ 5.11	อุณหภูมิคอนกรีตในแต่ละระดับ ของแผ่นพื้นที่ 1(ตำแหน่งกลางแผ่นพื้น).....	130
รูปที่ 5.12	อุณหภูมิคอนกรีตในแต่ละระดับ ของแผ่นพื้นที่ 2(ตำแหน่งกลางแผ่นพื้น).....	130
รูปที่ 5.13	อุณหภูมิคอนกรีตในแต่ละระดับ ของแผ่นพื้นที่ 3(ด้านบนซ้ายของแผ่นพื้น).....	130
รูปที่ 5.14	อุณหภูมิคอนกรีตในแต่ละระดับ ของแผ่นพื้นที่ 3(ด้านบนขวาของแผ่นพื้น).....	131
รูปที่ 5.15	อุณหภูมิคอนกรีตในแต่ละระดับ ของแผ่นพื้นที่ 4(ด้านบนซ้ายของแผ่นพื้น).....	131
รูปที่ 5.16	อุณหภูมิคอนกรีตในแต่ละระดับ ของแผ่นพื้นที่ 4(ด้านบนซ้ายของแผ่นพื้น).....	131
รูปที่ 5.17	อุณหภูมิคอนกรีตในแต่ละระดับ ของแผ่นพื้นที่ 5(ตำแหน่งกลางแผ่นพื้น).....	132
รูปที่ ก-1	รายละเอียดและตำแหน่งของอุปกรณ์ภายในเตาทดสอบ (ภาพด้านหน้า).....	138
รูปที่ ก-2	รายละเอียดและตำแหน่งของอุปกรณ์ภายในเตาทดสอบ (ภาพด้านบน).....	138



รูปที่ ก-3	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ของคอนกรีตที่ผิวบนและระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร.....	138
รูปที่ ข-1	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกราท.....	140
รูปที่ ข-2	ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกราท(ต่อ).....	141



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## คำอธิบายสัญลักษณ์

$\alpha_n$	คือ รากที่เป็นบวกของสมการที่ 4.12
$\varepsilon_U$	คือ สัมประสิทธิ์การแผ่ความร้อน(Emissivity)ของด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ
$\Delta\varepsilon_s$	คือ หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของลวดเกลียวอัดแรงที่เกิดจากการ โกงตัวของคานาน้ำหนัก บรรทุกเพิ่มเติม
$\rho$	คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง
$\rho'$	คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด
$\rho_d$	คือ ค่าความหนาแน่นของ ของแข็ง
$\rho_p$	คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง
$\sigma$	คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann
$\psi$	คือ ค่าของช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มทดสอบไปจนถึงเวลาของค่า $(T_F)_{av}$
$\omega$	คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง
$\omega'$	คือ ดัชนีเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด
$\omega_p$	คือ ดัชนีเหล็กเสริมอัดแรง
$\omega_{pw}, \omega_w, \omega'_w$	คือ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัด ขององค์อาคารที่มีปีก
$\kappa$	คือ สัมประสิทธิ์การกระจายอุณหภูมิของวัสดุ
$A_{ps}$	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง
$A_s$	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง
$A'_s$	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด
$b$	คือ ความกว้างของคาน
$C$	คือ ตำแหน่งแรงอัดลัพธ์ในหน้าตัด ขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง
$C.G.$	คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงในหน้าตัด ขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง
$C_p$	คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ ของแข็ง
$d$	คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริม ธรรมดาที่รับแรงดึง
$d_p$	คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์กลางถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง
$f_c'$	คือ หน่วยแรงอัดประลัยของคอนกรีต
$f_{ps}$	คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ณ สถานะประลัย
$f_{pu}$	คือ หน่วยแรงดึงประลัยในเหล็กเสริมอัดแรง
$f_y$	คือ กำลังคลากของเหล็กเสริมธรรมดา
$h_u$	คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
$I$	คือ โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด
$k$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน
$k_{11}, k_{12}, \dots, k_{33}$	คือ ค่าการนำความร้อน(Thermal conductivity tensor)
$k_B$	คือ ตำแหน่งจุดเคิร์นล่างในหน้าตัด ขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง

## คำอธิบายสัญลักษณ์(ต่อ)

$k_T$	คือ ตำแหน่งจุดเคิร์บนบนในหน้าตัด ขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง
$l$	คือ ความหนาของวัสดุ
$M$	คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมที่กระทำต่อพื้นหน้าตัดใดๆ
$M_n$	คือ กำลังระบุ(Nominal strength) ของโมเมนต์
$n$	คือ อัตราส่วนโมดูลัส
$Q$	คือ ความร้อนจากแหล่งกำเนิดภายใน ต่อหน่วยปริมาตร
$q_x, q_y, q_z$	คือ องค์ประกอบเวกเตอร์ของฟลักซ์ความร้อน
$r_p$	คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง
$T$	คือ อุณหภูมิ ณ เวลาใดๆ
$T_\infty$	คือ อุณหภูมิที่สภาวะคงที่
$T_0$	คือ อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้น
$T_a$	คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม หรืออุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ
$T_F$	คือ อุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลา $t$
$(T_F)_{av}$	คือ อุณหภูมิภายในเตาเผาเฉลี่ยที่เวลา $t$
$T_i$	คือ อุณหภูมิสมมุติที่ผิวของวัสดุที่ทาสีทนไฟ
$T_U$	คือ อุณหภูมิบนผิวที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ ที่จุดสิ้นสุดสภาพทนไฟขององค์อาคาร
$t$	คือ เวลา นับตั้งแต่เริ่มต้นการทดสอบความสามารถทนไฟ
$w/c$	คือ อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์
$y$	คือ ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางเหล็กเสริมอัดแรงถึงแนวแกนสะเทินหรือเท่ากับ $e$

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ทั่วไป

พื้นเป็นองค์อาคารที่มีพื้นที่ผิวมาก และเป็นชิ้นส่วนที่ชะลอการสันดาปของวัสดุเชื้อเพลิงภายในอาคาร ปัจจุบันพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยัดเหนียวเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย พื้นชนิดนี้มีข้อดีหลายประการ หากเทียบกับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ขณะเดียวกันพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลัง ชนิดยัดเหนียวจะสูญเสียกำลังรับน้ำหนักบรรทุกอย่างรวดเร็วภายใต้อัคคีภัย เนื่องจากกำลังต้านทานแรงดึงของเหล็กเสริมอัดแรงลดลงอย่างรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิสูง กฎกระทรวงฉบับที่ 48 กำหนดให้ห้องอาคารชนิดแผ่นพื้น ต้องมีความสามารถทนไฟไม่ต่ำกว่า 2 ชั่วโมง และดำเนินการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E119 โดยมาตรฐาน ASTM E119 ได้กำหนดเกณฑ์การตัดสินสภาพสิ้นสุดการทนไฟไว้ ดังนี้

1. จุดสิ้นสุดการรับน้ำหนักบรรทุก หมายถึง องค์อาคารเกิดการวิบัติภายใต้สภาวะอัคคีภัย
2. จุดสิ้นสุดการป้องกันการผ่านของเปลวไฟ หมายถึง องค์อาคารเกิดการรอยแยกที่ทำให้เปลวไฟหรือก๊าซร้อน สามารถผ่านทะลุองค์อาคารนั้นได้
3. จุดสิ้นสุดสภาพการเป็นฉนวนความร้อน หมายถึง องค์อาคารมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบนด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ สูงขึ้น 140 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่งภายในองค์อาคารสูงขึ้น 180 องศาเซลเซียส

การออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยัดเหนียว ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง(มาตรฐาน ว.ส.ท.1009-34) ด้วยระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่มีค่าน้อยสุด ยังขาดผลการวิจัยที่ตรวจสอบความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นว่าเป็นไปตามข้อกำหนดในกฎกระทรวงฉบับที่ 48 หรือไม่ และหากลวดเกลียวอัดแรงวิบัติภายในเวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมง จะมีแนวทางใดที่สามารถช่วยเพิ่มระยะเวลาดังกล่าวนอกเหนือไปจากการเพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง

### 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยเกี่ยวกับองค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัคคีภัย เริ่มทำกันอย่างแพร่หลายในต่างประเทศ ตั้งแต่คริสต์ศักราชที่ 19 ระยะเริ่มแรกของการวิจัยเป็นงานวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆ ของตัววัสดุก่อสร้างภายใต้อุณหภูมิสูง ระยะต่อมาได้ขยายผลการศึกษาวิจัยด้านพฤติกรรมขององค์อาคารภายใต้อัคคีภัย งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการศึกษาวิจัยวัสดุและองค์อาคารภายใต้อัคคีภัย มีดังนี้

ในปี ค.ศ.1966 Lionel Issen<sup>[1]</sup> ศึกษาผลของขนาดแบบจำลองที่มีต่อการวิจัยโครงสร้างคอนกรีตภายใต้อัคคีภัย โดยมีวัตถุประสงค์ในการหาแนวทางที่เหมาะสมเพื่อใช้สร้างแบบจำลองที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

และประหยัด การศึกษาวิจัยทำในลักษณะเชิงทฤษฎี โดยเน้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแบบจำลองกับผลของโครงสร้างจริงในด้านต่างๆ เช่น การโค้งตัวในช่วงพิกัดยึดหุ้้น อุณหภูมิและระยะเวลาการถ่ายเทความร้อน การกระจายตัวของอุณหภูมิ และความแตกต่างกันของการกระจายความชื้นภายในแบบจำลอง

ในปี ค.ศ.1967 Harold W. Brewer<sup>[2]</sup> ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าหน่วยน้ำหนักกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของคอนกรีตที่ระดับความชื้นต่างๆ จากการศึกษาสรุปว่า คอนกรีตที่ทำจากวัสดุผสมชนิดเดียวกันและมีน้ำหนักเท่ากันจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแตกต่างกัน เนื่องจากการกระจายความชื้นในเนื้อคอนกรีตแตกต่างกัน

ในปี ค.ศ.1968 M. S. Abrams และ A. H. Gustafsson<sup>[3]</sup> ศึกษาผลของความหนาแน่นพื้น ชนิดวัสดุผสมหยาบ และปริมาณความชื้นในคอนกรีตที่มีต่อความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีต ในการศึกษาใช้อุณหภูมิของด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟเป็นเกณฑ์ โดยทำการวัดการกระจายอุณหภูมิของคอนกรีตที่มีความหนาต่างๆกัน 6 ขนาด และใช้คอนกรีตที่ทำจากวัสดุหยาบต่างกัน 5 ชนิด ผลการทดสอบสรุปเป็นสมการอัตราการทำทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตที่มีความหนาและวัสดุผสมหยาบเป็นตัวแปร และได้เสนอวิธีอบตัวอย่างเพื่อเร่งการแห้งตัวตามธรรมชาติ อันเป็นผลให้ความสามารถทนไฟขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นสูงขึ้น

ในปี ค.ศ.1975 Tasnim Uddin และ Charles G. Culver<sup>[4]</sup> ศึกษาข้อมูลคุณสมบัติของคอนกรีตและเหล็กที่อุณหภูมิสูง สรุปเป็นผลของอุณหภูมิที่มีต่อพฤติกรรมขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ.1976 Eduardo Salse และ Tung D. Lin<sup>[5]</sup> ศึกษาผลของอค์กัถยที่มีต่อการวิบัติของค้ำอาคารชนิดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก ในการศึกษาวิจัยได้ทำการวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในหน้าตัดของคานคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธี Finite Difference แล้วนำผลอุณหภูมิที่วิเคราะห์ได้ไปทำการคำนวณหาค่าโมเมนต์ดัดด้วยวิธีงานเสมือน ผลการศึกษาสรุปว่าผลจากแรงต้านทานการยึดตัวหรือสภาพเงื่อนไขขอบเหนียวรั้ง(Restrained)ช่วยเพิ่มความสามารถทนไฟขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในปี ค.ศ.1977 Bruce Ellingwood และ James R. Shaver<sup>[6]</sup> ศึกษาความสัมพันธ์ของผลการทดสอบของค้ำอาคารชนิดคานคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทำการศึกษาจากการวิเคราะห์โครงสร้างภายใต้อค์กัถย แล้วนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของ Gustafsson<sup>[3]</sup> แล้วนำมาวิเคราะห์หาระดับความน่าเชื่อถือด้วยวิธีเชิงสถิติ ผลการศึกษาสรุปว่า การวิเคราะห์โครงสร้างมีความสอดคล้องกับข้อมูลของการทดสอบเป็นอย่างดี

ในปี ค.ศ. 1991 Bruce Ellingwood และ T. D. Lin<sup>[7]</sup> ทำการศึกษากำลังต้านทานแรงค้ำและแรงเฉือนในองค์อาคารชนิดคานคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อค์กัถย ในการศึกษาทดลองได้ออกแบบตัวอย่างเพื่อศึกษาถึงผลของ ระยะหุ้มเหล็กเสริม ชนิดของกราฟไฟ(Fire curve) โอกาสและความเป็นไปได้ที่องค์อาคารเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงเฉือนในขณะที่เกิดอค์กัถย ผลจากการทดสอบแสดงว่าคานทั้งหมดเกิดการวิบัติเนื่องจากผลของแรงค้ำค้ำทั้งสิ้น แม้ว่าคานทั้งหมดจะเกิดการแตกร้าบริเวณฐานรองรับขึ้น ก่อนที่จะเกิดการแตกร้าเนื่องจากแรงค้ำ

ที่ช่วงกลางคานก็ตาม ผลการศึกษาสรุปว่า ขณะที่อุณหภูมิของคานมีค่าสูงกำลังด้านทานแรงเฉือนของคานไม่น่าจะเป็นส่วนสำคัญที่ควบคุมการวิบัติของคาน ส่วนผลของระยะหุ้มเหล็กเสริมแบบมีผลต่อการโค้งตัวของคาน น้อยมาก และชนิดของกราฟไฟที่ใช้ในการจำลองสภาวะอค์ลิกภัยที่แตกต่างกันมีผลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชิ้นส่วนคาน

ในปี ค.ศ.1994 Dietmar Hosser, Thomas Dorn และ Osama El-Nesr<sup>[8]</sup> ศึกษาพฤติกรรมขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นภายใต้อค์ลิกภัย ในการศึกษาเน้นผลของความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นเนื่องจากผลของอุณหภูมิที่มีค่าสูง ผลการศึกษาสรุปว่าปริมาณเหล็กเสริมในแผ่นพื้นมีผลอย่างมากต่อความกว้างประสิทธิภาพของแผ่นพื้นภายใต้สภาวะอค์ลิกภัย

### 1.2.1 งานวิจัยในประเทศไทยเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิสูงที่มีต่อคุณสมบัติของวัสดุโครงสร้าง

ในปี พ.ศ.2531 บัณฑิต เกษรมาลา<sup>[9]</sup> ศึกษากำลังด้านทานแรงอัดที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของคอนกรีตภายใต้อค์ลิกภัยที่ระดับความรุนแรงปานกลาง ในการศึกษาทำการทดสอบแท่งคอนกรีตทรงกระบอกที่ให้ความร้อนด้วยเตาอบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 300 ถึง 450 องศาเซลเซียส แล้วนำตัวอย่างดังกล่าวมาทดสอบหาค่ากำลังด้านทานแรงอัด แรงยึดเหนี่ยวกับเหล็กเสริมและค่าโมดูลัสยืดหยุ่น ที่ระยะเวลาต่าง ๆ ตั้งแต่ 1 วันจนถึง 6 เดือนหลังการอบในเตา ผลการศึกษาสรุปว่าค่าคุณสมบัติทั้ง 3 ที่กล่าวมามีค่าลดลงอย่างมาก แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไปค่าทั้ง 3 กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา

ในปี พ.ศ.2542 เจษฎา เกษมเศรษฐ์ และหทัยรัตน์ มณีเทศ<sup>[10]</sup> ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังด้านทานแรงอัด ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและค่ากำลังด้านทานแรงดึงของคอนกรีต ตัวอย่างทดสอบถูกเผาไฟด้วยช่วงเวลาที่แตกต่างกันตั้งแต่ 0 ถึง 2 ชั่วโมง สำหรับการเผาแท่งคอนกรีตทรงกระบอกใช้เตาเผาขนาดเล็กใช้ถ่านเป็นเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิในการเผาอยู่ในช่วง 500 ถึง 700 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาสรุปว่าคุณสมบัติทั้ง 3 ของคอนกรีตมีค่าลดลงอย่างมากตามระยะเวลาเผาไฟ

### 1.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับชิ้นส่วนของค้ำอาคารประเภทคอนกรีตอัดแรงภายใต้อุณหภูมิสูง

ในปี ค.ศ.1964 Underwriter's Laboratories Inc.<sup>[11]</sup> ได้ดำเนินการทดสอบแผ่นพื้นสำเร็จรูปชนิดกลวง(Hollow Core)จำนวน 3 แผ่น ที่อายุของคอนกรีต 231 วันและอายุของคอนกรีตทับหน้า 223 วัน การทดสอบเน้นการศึกษาระยะโค้งตัว ลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นบนผิวด้านสัมผัสเปลวไฟและบนด้านไม่สัมผัสเปลวไฟ ผลการทดสอบสรุปว่าแผ่นพื้นยังสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้แม้เวลาจะผ่านไป 3 ชั่วโมง 5 นาที โดยแผ่นพื้นไม่เกิดการส่งผ่านความร้อนในระดับที่เกิดอันตรายในบริเวณรอยต่อระหว่างแผ่นพื้น

ในปี ค.ศ.1966 Underwriter's Laboratories Inc.<sup>[12]</sup> ศึกษาความสามารถทนไฟขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงแบบดิ่งก่อน โดยแผ่นพื้นในแต่ละหน้าจะมีโครงร่างแบบ Double-stemmed การ

ทดสอบแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ การหาความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นที่รับน้ำหนักบรรทุกภายใต้สภาวะอัคคีภัย(Full Scale Test) และการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพของวัสดุฉนวนความร้อนที่มีทำจากวัสดุต่างชนิดและต่างความหนาแน่น(Small Scale Test) การทดสอบส่วนแรกใช้แผ่นพื้นที่ขนาด 4 ฟุต ยาว 17 ฟุต จำนวน 4 แผ่น ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง จากการทดสอบพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 35 นาที แผ่นพื้นที่บริเวณ Stem เกิดการหลุดร่อนของคอนกรีต ที่เวลา 90 นาทีมีปริมาณควันที่ผ่านออกมามาก และที่เวลา 140 นาที องค์กรอาคารเกิดการโค้งตัวมากในช่วงเวลาที่สั้นมาก จึงสรุปว่าแผ่นพื้นดังกล่าวมีความสามารถทนไฟ 145 นาที การทดสอบในส่วนที่สองใช้แผ่นพื้นที่คอนกรีตขนาด 3 คูณ 3 ฟุต จำนวน 4 ชั้น วัสดุฉนวนความร้อนที่ใช้ทดสอบเป็น วัสดุฉนวนความร้อนชนิดแผ่นที่มีความหนา 2 นิ้ว ผลผลิตจากเส้นใยที่ผสมกับแร่ที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ กับตัวประสานซึ่งทำจากเพอร์ไลท์ผสมกับยางมะตอย จากการทดสอบพบว่าความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นที่ขนาด 3 คูณ 3 ฟุต มีค่า 142 นาที ผลการศึกษาสรุปว่าการทดสอบด้วยตัวอย่างขนาดเล็กจะให้ค่าที่ปลอดภัยเพียงพอสำหรับการออกแบบ

ในปี ค.ศ.1972 Abrams และ Gustafro<sup>[13]</sup> ทดสอบองค์อาคารชนิดคาน แผ่นพื้นและระบบรอยต่อโดยใช้วัสดุทนไฟชนิด Intumescent Mastic กับ Sprayed Mineral Fiber ที่มี Vermiculite ชนิด MK เป็นองค์ประกอบ ข้อมูลจากการทดสอบสรุปเป็นข้อเสนอแนะเกี่ยวกับความหนาของวัสดุทนไฟ สำหรับชิ้นส่วนขององค์อาคารที่ใช้เหล็กเสริมอัดแรงชนิดรีดเย็นเป็นส่วนประกอบ

ในปี ค.ศ.1972 Gustafro และ Selvaggio<sup>[14]</sup> ศึกษาความสามารถทนไฟขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง ตัวอย่างทดสอบเป็นพื้นคอนกรีตอัดแรงชนิดดิ่งเหล็กก่อน ทั้งสิ้นจำนวน 11 ตัวอย่าง ขนาดของแผ่นพื้นที่ใช้ในการทดสอบมีความกว้าง 27.4 นิ้ว ยาว 21 ฟุต และหนา 6.5 นิ้ว ฐานรองรับเป็นฐานรองรับอย่างง่ายชนิด Rocker-roller Bearing ตัวแปรที่แตกต่างกันในแต่ละตัวอย่างทดสอบ คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม(1, 2 และ 3 นิ้ว) ชนิดของคอนกรีต(คอนกรีตน้ำหนักปกติและน้ำหนักเบา) ขนาดของลวดเหล็กกลุ่มตีเกลียว(ขนาด ¼ และ 7/16 นิ้ว) โดยมีระดับความเข้มของน้ำหนักบรรทุก 40 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ของกำลังต้านทางโมเมนต์ดัดประลัยที่คำนวณได้ ผลการศึกษาสรุปว่าความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาของระยะหุ้มเหล็กเสริมเพิ่มขึ้นและน้ำหนักบรรทุกมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นพื้นที่ผลิตจากคอนกรีตมวลเบามีความสามารถทนไฟสูงกว่าแผ่นพื้นที่ผลิตจากคอนกรีตที่มีหน่วยน้ำหนักปกติ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อศึกษาแนวทางการปรับปรุงความสามารถทนไฟขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดิ่งภายหลังชนิดยึดเหนี่ยวให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีรายละเอียดดังนี้

1. เพื่อตรวจสอบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง ดิ่งภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว ที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่น้อยที่สุด ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง(มาตรฐาน ว.ส.ท.1009-34) ว่าสามารถทนไฟตามข้อกำหนดที่ระบุในกฎกระทรวงฉบับที่ 48 (พ.ศ.2540) หรือไม่

2. ศึกษาผลการปรับปรุงความสามารถทนไฟให้ องค์อาคารชนิดพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยวให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยพิจารณา

- (ก) การลดระยะห่างของเหล็กเสริมปกติ
- (ข) การเพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง
- (ค) การปรับปรุงวัสดุเกราท์
- (ง) การติดตั้งแผ่นยิปซัมที่ผิวล่างของแผ่นพื้น
- (จ) การทาสีทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตและเงื่อนไขของการวิจัย มีดังนี้

1. แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ทดสอบ ไม่ดึงลวดเกลียวอัดแรง
2. การติดตั้งอุปกรณ์และขั้นตอนการทดสอบ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E119
3. ปัจจัยการเพิ่มความสามารถทนไฟที่ศึกษา คือ

(ก) ระยะห่างเหล็กเสริม โดยระยะห่างเหล็กเสริมที่ใช้ คือ 40 และ 20 เซนติเมตร

(ข) ระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง โดยระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ คือ 3.2 และ 5.6 เซนติเมตร

(ค) การปรับปรุงวัสดุเกราท์ให้มีการนำความร้อนต่ำลงด้วยการเติม ถ้ำลอย เฟอร์ไลต์และฟูนิน ปูน ลงในส่วนผสมของวัสดุเกราท์

4. พิจารณาเฉพาะ การวิบัติของลวดเกลียวอัดแรงเป็นหลัก

#### 1.5 การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงวิธีการปรับปรุงความสามารถทนไฟ ขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง ดึง ภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว โดยที่รายละเอียดของการดำเนินการวิจัย มีดังนี้

##### 1.5.1 การศึกษาวิธีเพิ่มความสามารถทนไฟให้พื้นคอนกรีตอัดแรง ดึงภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว

ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ในการศึกษาการเพิ่มความสามารถทนไฟ ให้แก่องค์อาคารชนิดพื้นคอนกรีตอัดแรง ดึง ภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว แบ่งตามปัจจัยที่ศึกษาออกได้ 5 ตัวอย่าง มีรายละเอียดดังนี้



1. การศึกษาผลของระยะห่างของเหล็กเสริม ที่มีต่อความสามารถทนไฟของพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว โดยระยะของเหล็กเสริมที่ใช้ คือ 20 และ 40 เซนติเมตร

2. การศึกษาผลของระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ที่มีต่อความสามารถทนไฟของพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว โดยระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ คือ 3.2 และ 5.6 เซนติเมตร

3. การปรับปรุงวัสดุเกราท์ให้มีการนำความร้อนลดลง โดยการเติมวัสดุผสมที่มีต้นทุนต่ำและสามารถจัดหาได้ในประเทศ วัสดุผสมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ได้แก่ แก้วลอย ฟูนินหินปูน และเพอร์ไลท์

4. การคิดแผนยิปซัมทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น โดยความหนาของแผ่นยิปซัมที่ใช้ ได้แก่ 1.5 และ 3.0 เซนติเมตร

5. การทำสีทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น โดยความหนาของสีที่ใช้ ได้แก่ 1200 และ 2400 ไมครอน

### 1.5.2. การดำเนินงานทดสอบ

การดำเนินการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามจุดประสงค์ของการทดสอบ ดังนี้

#### 1.5.2.1 การทดสอบพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว

การทดสอบและควบคุมอุณหภูมิภายในเตา ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM E119 ข้อมูลที่เก็บขณะดำเนินการทดสอบ ได้แก่ อุณหภูมิบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรง อุณหภูมิเหล็กเสริม อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร จากผิวล่างของแผ่นพื้น เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบบันทึกลักษณะการหลุดร่อนที่ผิวล่างของแผ่นพื้น

#### 1.5.2.2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเกราท์

การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุเกราท์ เพื่อหาสัดส่วนของวัสดุผสมที่เหมาะสม สำหรับเติมในวัสดุเกราท์ หรือเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในงานวิจัย รายละเอียดของการทดสอบ มีดังนี้

1. ค่ากำลังต้านทานแรงอัด	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C109
2. ค่ากำลังต้านทานแรงดึง	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C190
3. ค่ากำลังต้านทานแรงคด	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C348
4. ค่ากำลังยึดเหนี่ยว ชนิดลวด 7 เส้น แทนเหล็กเสริมปกติ)	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C234 (ใช้ลวดเกลียวอัดแรง)
5. ค่าระยะเวลาการไหล	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C939
6. ค่าความถ่วงจำเพาะ	ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C128

## 7. คำสัมประสิทธิ์การนำความร้อน การทดสอบดำเนินการ โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์

### 1.5.3 การคำนวณอุณหภูมิภายในของแผ่นพื้น ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ

การคำนวณอุณหภูมิภายในของแผ่นพื้น ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติในงานวิจัย มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาความสามารถทนไฟขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง ที่แตกต่างไปจากตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ โดยนำผลที่ได้จากการคำนวณอุณหภูมิภายในแผ่นพื้นตัวอย่างไปทำการเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบเพื่อตรวจสอบว่าทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สามารถนำไปใช้ในการคำนวณ เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรง

### 1.5.4 การศึกษาเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติ เนื่องจากผลของอค์คิภย

การศึกษาเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติ มีจุดมุ่งหมายเพื่อหาเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติเนื่องจากผลของอค์คิภย ในขณะที่หน่วยแรงภายในพื้นคอนกรีตอัดแรงอยู่ที่สภาวะประลัย และสภาวะการใช้งานปกติ โดยเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติในขณะที่แผ่นพื้นมีหน่วยแรงภายในที่สภาวะการใช้งานสูงที่สุด คือค่าความสามารถทนไฟน้อยที่สุดของแผ่นพื้นนั้น

## 1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถอธิบายความต้องการเบื้องต้นสำหรับพื้นคอนกรีตอัดแรงดิ่งภายหลังชนิดชิดเหนียว เพื่อให้แผ่นพื้นสามารถทนต่อสภาวะอค์คิภยตามข้อกำหนดที่ระบุในกฎกระทรวงฉบับที่ 48 (พ.ศ.2540)

1.6.2 สามารถอธิบายหลักเกณฑ์และวิธีการปรับปรุงพื้นคอนกรีตอัดแรงดิ่งภายหลังชนิดชิดเหนียว ให้มีความสามารถทนไฟสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### วัสดุและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการศึกษาความสามารถทนไฟ ของพื้นคอนกรีตอัดแรง

#### 2.1 ทั่วไป

มาตรฐานการทดสอบความสามารถทนไฟของวัสดุและองค์อาคาร (ASTM E119) นิยามความสามารถทนไฟขององค์อาคารไว้ว่า เป็นเวลาที่องค์อาคารนั้นถึงจุดสิ้นสุดสภาพการทนไฟประเภทใดประเภทหนึ่ง โดยจุดสิ้นสุดความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นมี 3 ประเภท ดังนี้

1. องค์อาคารวิบัติภายใต้น้ำหนักบรรทุกที่กระทำ สำหรับองค์อาคารชนิดคอนกรีตอัดแรง หมายถึง ค่าอุณหภูมิเหล็กเสริมอัดแรงในหน้าตัดสูงกว่า 427 องศาเซลเซียส สำหรับองค์อาคารที่ออกแบบให้เหล็กเสริมรับน้ำหนักบรรทุกรวม ให้พิจารณาค่าเฉลี่ยอุณหภูมิเหล็กเสริมในหน้าตัดสูงกว่า 593 องศาเซลเซียส รวมด้วย
2. เกิดรอยแยกหรือโพรงในองค์อาคารที่ทำให้ก๊าซร้อนพุ่งผ่าน หรือส่งผลให้เกิดการลุกไหม้ของวัสดุเชื้อเพลิงบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ
3. อุณหภูมิบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ มีค่าเฉลี่ยสูงขึ้น 140 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิปกติ

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดให้ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouples) สำหรับองค์อาคารชนิดแผ่นพื้นเป็นจำนวน 5 ตัวบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ โดย 1 ตัวติดตั้งที่กลางแผ่นพื้นและ 4 ตัวติดตั้งตำแหน่งกึ่งกลางของพื้นที่ ที่ได้จากการแบ่งพื้นที่ของแผ่นพื้นออกเป็น 4 ส่วน สำหรับการวัดอุณหภูมิของชิ้นส่วนรับแรงดึงตามมาตรฐาน จะต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในชิ้นส่วนรับแรงดึงทั้งหมดไม่ต่ำกว่า 8 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งที่จะติดตั้งต้องเป็นตำแหน่งที่แทนจุดที่พร้อมจะเกิดอุณหภูมิวิกฤติในลำดับแรก ๆ

#### 2.2 กราฟมาตรฐานสำหรับการทดสอบอัคคีภัย ตามมาตรฐาน ASTM E119

จากการศึกษาวิจัยข้อมูลจากสภาพไฟไหม้จริงในอดีตได้นำมาพัฒนากราฟมาตรฐานการทดสอบอัคคีภัย สำหรับใช้จำลองสภาพเพลิงไหม้ในห้องปฏิบัติการ โดยกราฟมาตรฐานดังกล่าวอยู่ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ซึ่ง Ingberg<sup>[21]</sup> นักวิจัยชาวอเมริกันเสนอแนวคิดเกี่ยวกับปริมาณงานของไฟ (Fire Load Concept) สำหรับสร้างกราฟมาตรฐานการทดสอบอัคคีภัย ภายใต้สมมุติฐานที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. อัตราการทนไฟขององค์อาคารขึ้นอยู่กับความรุนแรงของอัคคีภัย (Fire Severity) เพียงอย่างเดียว โดยความรุนแรงของอัคคีภัยที่เกิดขึ้นในอาคารหรือในห้องปฏิบัติการ เทียบได้กับพื้นที่ได้กราฟความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลา

2. ความรุนแรงของอัคคีภัยขึ้นอยู่กับ ปริมาณความเข้มจากงานของไฟ(Fire Load Density)หรือ อุณหภูมิ เพียงอย่างเดียว

จากสมมุติฐานดังกล่าวเมื่อนำมาสร้างกราฟมาตรฐานการทดสอบอัคคีภัย พบว่าไม่สอดคล้องกับสภาพ ไฟไหม้จริง เนื่องจาก

1. สมมุติฐานข้อที่ 1 ไม่สอดคล้องกับอัคคีภัยจริง หากอัคคีภัยนั้นมีปริมาณความเข้มจากงานของไฟ มากในระยะเวลาสั้น ๆ หรือกรณีที่มีอัคคีภัยที่มีปริมาณความเข้มจากงานของไฟน้อยในระแวกนานๆ จะมีพื้นที่ ได้กราฟความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลาเท่ากันซึ่งพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่แตกต่างกัน เนื่องจากความรุนแรงของ อัคคีภัยเท่ากัน แต่ในความเป็นจริงการเพิ่มอุณหภูมิกระทันหันสามารถทำให้องค์อาคารเกิดการวิบัติในเวลาอันสั้น ในขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆจะทำให้องค์อาคารเกิดการวิบัติช้ากว่ามาก

2. สมมุติฐานข้อที่ 2 ไม่ครอบคลุมทุกตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความรุนแรงของอัคคีภัย เนื่องจากในความเป็นจริงความรุนแรงของอัคคีภัยไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มจากงานของไฟเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับพื้นที่ ของช่องเปิด ชนิดและปริมาณของเชื้อเพลิง อัตราการเผาไหม้ คุณสมบัติการนำความร้อน และปริมาณวัสดุที่ไม่ ติดไฟขององค์ประกอบแวดล้อมขององค์อาคารด้วย

แม้ว่าสมมุติฐานทั้งสองจะไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง แต่กราฟมาตรฐานสำหรับการทดสอบอัคคีภัย ที่สร้างจากหลักการดังกล่าวก็เป็นที่ยอมรับ โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของกราฟมาตรฐานการ ทดสอบอัคคีภัย ดังสมการที่ 2.1 หรือในรูปที่ 2.1

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

โดยที่

- $T_F$  คือ อุณหภูมิภายในเตาเผาที่เวลา  $t$  มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส  
 $T_0$  คือ อุณหภูมิ ณ เวลาเริ่มต้น มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส  
 $t$  คือ เวลานั้นนับตั้งแต่เริ่มการทดสอบ มีหน่วยเป็น นาที

## 2.3 พฤติกรรมการรับแรงดัดขององค์อาคารชนิดคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัคคีภัย

ACI<sup>[16]</sup> จำแนกพฤติกรรมการรับแรงดัดขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กภายใต้อัคคีภัย ตามสภาพ เงื่อนไขของฐานรองรับไว้ 3 ประเภท ดังนี้

### 2.3.1 ฐานรองรับแบบง่าย

แผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่สัมผัสเปลวไฟบริเวณผิวล่าง และมีปลายของแผ่นพื้นสามารถหมุนได้อย่างอิสระและยึดออกได้โดยไม่มีคามฝืด เมื่อเปลวไฟสัมผัสกับผิวล่างของแผ่นพื้นจะทำให้บริเวณผิวดังกล่าวขยายตัวออก การขยายตัวส่งผลให้แผ่นพื้นเกิดการโก่งตัวมากขึ้น ขณะเดียวกันกำลังของเหล็กเสริมและคอนกรีตบริเวณผิวล่างของแผ่นพื้นจะลดลงตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น เมื่อกำลังของเหล็กเสริมลดต่ำลงจนต่ำกว่าหน่วยแรงในเหล็กเสริมจะทำให้ห้องค้ำอาคารเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดัดขึ้น พฤติกรรมของพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยวก็มีลักษณะเดียวกัน จากการที่การวิบัติของค้ำอาคารเกิดขึ้นเนื่องจากกำลังที่ต่ำลงของเหล็กเสริมหรือเหล็กเสริมอัดแรงเป็นสำคัญ ดังนั้นจึงควรที่จะลดน้ำหนักบรรทุกเพื่อให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในชิ้นส่วนรับแรงดึงลดลงจึงเป็นสิ่งสำคัญ

### 2.3.2 แผ่นพื้นต่อเนื่อง

พฤติกรรมของแผ่นพื้นต่อเนื่องต่างจากแผ่นพื้นที่มีฐานรองรับอย่างง่าย เนื่องจากแผ่นพื้นต่อเนื่องมีโมเมนต์ดัดภายในซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขณะเผชิญสภาวะอัคคีภัย พิจารณาแผ่นพื้นต่อเนื่อง 2 ช่วงที่ใช้ฐานรองรับแบบ Rocker-rollers เมื่อให้เปลวไฟสัมผัสกับผิวล่างของแผ่นพื้นจะทำให้ผิวด้านดังกล่าวขยายตัวออกมากกว่าผิวด้านบนของแผ่นพื้น ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านเป็นสาเหตุให้ปลายแผ่นพื้นพยายามยกตัวขึ้นที่ฐานรองรับด้านนอก ก่อให้เกิดแรงปฏิกิริยาที่ฐานรองรับภายในมากขึ้น ผลของแรงปฏิกิริยาที่เปลี่ยนไปนี้จะทำให้แผ่นพื้นเกิดการกระจายโมเมนต์ซ้ำ โดยค่าโมเมนต์ลบที่ฐานรองรับด้านในจะสูงขึ้นในขณะที่โมเมนต์บวกมีค่าลดลง การลดลงของโมเมนต์บวกทำให้เหล็กเสริมที่รับโมเมนต์บวกมีความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้อุณหภูมิสูงได้ยาวนานขึ้น จากเหตุผลข้างต้นสรุปได้ว่าความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นต่อเนื่องสูงกว่าแผ่นพื้นที่ใช้ฐานรองรับอย่างง่าย โดยที่ระยะหุ้มเหล็กเสริมและน้ำหนักบรรทุกเท่าเทียมกัน

### 2.3.3 ชิ้นส่วนโครงสร้างที่มีสภาพเงื่อนไขการยึดรั้งแบบขบเหนี่ยวรั้ง (Restrained Condition)

มาตรฐาน ASTM E119 นิยามสภาพขบเหนี่ยวรั้งว่า การขยายตัวขององค์อาคารภายใต้อุณหภูมิสูงถูกบังคับไว้ เมื่อให้เปลวไฟสัมผัสกับพื้นผิวบริเวณกลางแผ่นพื้นเพียงเล็กน้อย บริเวณที่ร้อนขึ้นจะพยายามขยายตัวและดันบริเวณส่วนรอบข้างออก ในขณะที่ส่วนที่ไม่สัมผัสความร้อนจะก่อให้เกิดหน่วยแรงอัดสูงขึ้นในส่วนที่สัมผัสความร้อน ดังนั้นขณะที่บริเวณผิวล่างของแผ่นพื้นสัมผัสเปลวไฟจะมีหน่วยแรงอัดเกิดขึ้นด้วย ถ้าแผ่นพื้นมีระยะหุ้มเหล็กเสริมที่หนาและมีการเสริมเหล็กหนาแน่น หน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจะมีขนาดมากตามไปด้วย แต่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นนี้มีค่าน้อยกว่า หน่วยแรงที่คำนวณจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนของเหล็กและคอนกรีตประกอบกัน เนื่องจากผลของความคืบและการคลายตัวของหน่วยแรงในเหล็กเสริมเข้ามามีบทบาทมากภายใต้อุณหภูมิสูง

## 2.4 ตัวแปรและปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิในแผ่นพื้น

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดให้อุณหภูมิเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟของแผ่นพื้นไม่เกิน 140 องศาเซลเซียส อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นบนผิวของแผ่นพื้นขึ้นกับ ค่าความหนา หน่วยน้ำหนัก ปริมาณความชื้น และชนิดมวลรวมของคอนกรีต ส่วนตัวแปรอื่นนอกเหนือจากนี้ จะมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้อยมาก ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ ได้แก่ ปริมาณฟองอากาศ ความชื้นในวัสดุผสม(ขณะดำเนินการผสม) ขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสม อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ และค่าการยุบตัว

#### 2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้น

ACI<sup>[16]</sup> ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ ซึ่งสามารถสรุปพอสังเขป ได้ดังนี้

##### 2.4.1.1 ความหนาของแผ่นพื้นและชนิดของวัสดุมวลรวม

ในรูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นพื้น กับความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นที่ผลิตจากวัสดุผสมต่างชนิดกัน คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีความชื้นตามมาตรฐานและวัสดุผสมที่ใช้อุณหภูมิในสภาพแห้งในอากาศขณะทำการผสม ขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสมหยาบ คือ  $\frac{3}{4}$  นิ้ว วัสดุผสมมวลเบาที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ หินเชลล์ หินชนวน(Slate) และถั่วลอย หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตที่ได้จากการผสมวัสดุผสมมวลเบามีค่าระหว่าง 1520 ถึง 1680 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

##### 2.4.1.2 หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต

ปกติความสามารถทนไฟของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นเมื่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีตลดลง ซึ่งชนิดของวัสดุผสมจะมีผลโดยตรงต่อหน่วยน้ำหนักของคอนกรีต สำหรับคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมมวลเบาจะมีความหนาแน่นต่ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยน้ำหนักที่สภาพแห้งในเตาอบ กับความสามารถทนไฟแสดงในรูปที่ 2.3

##### 2.4.1.3 สภาพความชื้น

ปริมาณความชื้นของคอนกรีตในขณะทำการทดสอบ จะมีผลต่อความสามารถทนไฟของคอนกรีต โดยทั่วไปคอนกรีตที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะมีความสามารถทนไฟต่ำ เนื่องจากความชื้นจะดูดซับพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ เป็นผลให้พลังงานความร้อนภายในคอนกรีตมีค่าลดลง

##### 2.4.1.4 ปริมาณฟองอากาศ

อากาศเป็นสสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนต่ำ ( $0.0251 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) เมื่อเทียบกับคอนกรีต ( $1.37 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) ดังนั้นความสามารถทนไฟของคอนกรีตจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณอากาศในคอนกรีต

#### 2.4.1.5 ปริมาณทรายที่ถูกแทนที่ด้วยวัสดุผสมมวลเบา

ในรูปที่ 2.2 แสดงผลการใช้วัสดุผสมมวลเบาแทนที่ทราย พบว่าความสามารถทนไฟของคอนกรีตที่มีส่วนผสมของทรายน้อยจะมีค่าสูงขึ้น

#### 2.4.1.6 ความชื้นของวัสดุผสม

ความชื้นของวัสดุผสมก่อนนำไปผสม จะมีผลต่อความสามารถทนไฟของคอนกรีตปกติน้อยกว่าคอนกรีตมวลเบา โดยความชื้นในวัสดุผสมเพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถทนไฟของคอนกรีตสูงขึ้น ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.4.1.3

#### 2.4.1.7 อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ปริมาณปูนซีเมนต์ และค่าการยุบตัว

ทั้ง 3 ปัจจัย มีผลต่อความสามารถทนไฟของคอนกรีต เช่นเดียวกับความชื้นในวัสดุผสม

#### 2.4.1.8 ขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสม

สำหรับคอนกรีตปกติจะมีความสามารถทนไฟสูงขึ้น เมื่อขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสมเล็กลง

### 2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถทนไฟ ขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

Gustaferro<sup>[14]</sup> ได้ทำการศึกษาความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงที่มีฐานรองรับแบบง่าย และได้สรุปปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถทนไฟของพื้นคอนกรีตไว้ ดังนี้

#### 2.4.2.1 คุณสมบัติทางความร้อนของคอนกรีต

ปัจจัยที่มีผลต่อการนำความร้อนในองค์อาคารคอนกรีต ได้แก่ ชนิดของวัสดุผสม ปริมาณความชื้น และความหนาของคอนกรีต ในกรณีที่ต้องการให้พื้นคอนกรีตอัดแรงมีอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวด้านไม่สัมผัสสเปคไฟสูงขึ้นไม่เกิน 140 องศาเซลเซียส ในเวลา 4 ชั่วโมง ภายใต้อัคคีภัย ต้องใช้คอนกรีตที่มีความหนาน้อยอย่างน้อย 6-3/4 นิ้ว หากต้องการไม่ให้พื้นคอนกรีตอัดแรงถึงจุดสิ้นสุดสภาพการทนไฟทั้ง 3 ประเภท ภายในช่วงเวลา 4 ชั่วโมง ต้องใช้ฉนวนความร้อนร่วมด้วย

#### 2.4.2.2 ปริมาณความชื้นในคอนกรีต

ความชื้นในคอนกรีตขณะทำการทดสอบ มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิบนผิวด้านไม่สัมผัสเปลวไฟ ถ้าปริมาณความชื้นในคอนกรีตมีค่าสูง จะช่วยขยายระยะเวลาที่ทำให้ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวด้านไม่สัมผัสเปลวไฟ สูงขึ้น 140 องศาเซลเซียสจากอุณหภูมิเริ่มต้น เนื่องจากความชื้นในคอนกรีตจะดูดซับพลังงานความร้อนที่แผ่พื้น ได้รับเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นไอน้ำ นอกจากนี้ความชื้นในคอนกรีตจะมีส่วนต่อความสามารถทนไฟของคอนกรีตโดยตรงแล้ว ความชื้นในคอนกรีตยังมีผลต่อการหลุดร่อนของคอนกรีตด้วย

#### 2.4.2.3 คุณสมบัติทางกลของวัสดุโครงสร้าง

กำลังต้านทานแรงอัดขององค์อาคารคอนกรีตถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญทางโครงสร้าง กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยการลดลงของกำลังต้านทานแรงอัดภายใต้อุณหภูมิสูงจะขึ้นกับชนิดของวัสดุผสมที่ใช้ โดยปกติกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาจะคงที่ที่จะกระทั่งอุณหภูมิสูงถึง 260 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นกำลังต้านทานแรงอัดจะลดลง สำหรับคอนกรีตที่ผสมขึ้นจากวัสดุผสมประเภทคาร์บอนจะสูญเสียกำลังต้านทานแรงอัดที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส แต่ขณะที่อุณหภูมิคอนกรีตอยู่ระหว่าง 430 ถึง 540 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดมีค่าสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมประเภทซิลิเกต ทั้งนี้เนื่องจากขณะที่อุณหภูมิของคอนกรีตสูงถึง 430 องศาเซลเซียส สารประกอบซิลิเกตจะเปลี่ยนเป็นผลึกควอทซ์ซึ่งมีกำลังต้านทานแรงอัดต่ำ

### 2.5 การหลุดร่อนของคอนกรีต เนื่องจากผลของอັคทีฟ

การหลุดร่อนของคอนกรีต เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตอยู่ภายใต้อุณหภูมิสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิในภายในหน้าตัดมีค่าต่างแตกต่างกัน ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในหน้าตัดเป็นสาเหตุสำคัญของการหลุดร่อน ACI<sup>[16]</sup> ได้แบ่งการหลุดร่อนของคอนกรีตไว้ 3 ชนิด ดังนี้

#### 2.5.1 การปริของวัสดุผสมหยาบ(Aggregate splitting)

การหลุดร่อนชนิดนี้พบที่ผิวคอนกรีตในบางบริเวณและมีปริมาณไม่มากนัก มักเกิดกับคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมหยาบที่มีซิลิเกตเป็นองค์ประกอบ โดยวัสดุผสมดังกล่าวจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกภายใต้ อุณหภูมิสูง เป็นเหตุให้วัสดุผสมหยาบบริเวณดังกล่าวหลุดหรือปริออก ผลกระทบต่อความสามารถทนไฟของ องค์อาคารคอนกรีตจากการหลุดร่อนชนิดนี้ไม่รุนแรงนัก

#### 2.5.2 การระเบิดออกของผิวคอนกรีต(Explosive spalling)



การหลุดร้อนชนิดนี้จะมีเสียงดังเกิดขึ้น เนื่องจากชิ้นส่วนบริเวณผิวของคอนกรีตระเบิดออกอย่างรุนแรง โดยปกติความชื้นในเนื้อคอนกรีตเมื่อดูดซับพลังงานความร้อนจากเปลวไฟ จะพยายามเคลื่อนตัวออกสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การเคลื่อนตัวดังกล่าวอยู่ในรูปไอน้ำเมื่อเคลื่อนตัวผ่านรอยแยกในเนื้อคอนกรีต และอยู่ในรูปของเหลวเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเนื้อคอนกรีตในลักษณะการซึมผ่าน การเคลื่อนตัวของความชื้นประเภทหลังเมื่อเคลื่อนผ่านช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีต เช่น ฟองอากาศ จะกลายเป็นไอน้ำขังในช่องว่างดังกล่าว หากคอนกรีตได้รับพลังงานความร้อนอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องจะทำให้การเคลื่อนตัวในลักษณะของเหลว ซึมออกสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำมีน้อย ทำให้ความชื้นส่วนใหญ่ถูกขังอยู่บริเวณช่องว่างและฟองอากาศในเนื้อคอนกรีต เมื่อพลังงานความร้อนที่คอนกรีตได้รับมีความต่อเนื่องจะทำให้ความชื้นที่ถูกขังในช่องว่างเกิดแรงดันไอน้ำเพิ่มขึ้นอย่างมาก เป็นผลให้คอนกรีตบริเวณดังกล่าวเกิดการระเบิดออกอย่างรุนแรง ซึ่งสามารถอธิบายกระบวนการเกิดได้ดังนี้

ในรูปที่ 2.4 เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความชื้นที่สะสมในเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวด้านที่สัมผัสเปลวไฟจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่เย็นกว่า เมื่อเวลาผ่านไปบริเวณที่แห้งจะขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ความชื้นจะเคลื่อนที่ไปยังส่วนที่เย็นกว่าและสะสมจนเกิดชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว (CDEF) เมื่อความร้อนเพิ่มขึ้นทำให้ความชื้นที่สะสมบริเวณผิวหน้าของชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว (CD) ระเหยกลายเป็นไอเคลื่อนที่ไปยังผิวด้านที่สัมผัสเปลวไฟผ่านชั้น ABCD แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว (CDEF) ไปได้ หากคอนกรีตนั้นมีคุณสมบัติการซึมน้ำสูงจะทำให้ความชื้นที่สะสมอยู่ในชั้น CDEF สามารถระเหยออกไปได้และความดันไอลดลง แต่หากคอนกรีตมีคุณสมบัติการซึมน้ำต่ำจะทำให้เกิดความดันสูงที่ผิวหน้าของชั้นที่มีความชื้นอิ่มตัว (CD) และเมื่อความดันไอดังกล่าวมีค่าเกินกว่าค่ากำลังต้านทานแรงดึงของคอนกรีตจะทำให้คอนกรีตบริเวณดังกล่าวระเบิดออก โดยกระบวนการนี้จะเริ่มเกิดขึ้นอีก และเกิดต่อเนื่องเป็นผลให้การหลุดร้อนชนิดนี้มีผลต่อความสามารถทนไฟขององค์อาคารอย่างมาก โดยปกติความหนาของรอยแตกจะมีค่าประมาณ 25 มิลลิเมตรจากผิวด้านที่สัมผัสเปลวไฟ

### 2.5.3 การหลุดลอกบริเวณผิวของคอนกรีต (Sloughing off)

การหลุดร้อนชนิดนี้เกิดขึ้นเนื่องจากผิวชั้นนอกของคอนกรีตด้านที่สัมผัสเปลวไฟอ่อนแอลง ภายหลังจากการสัมผัสอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ที่บริเวณผิวของคอนกรีตจะเกิดรอยร้าวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามเวลาที่สัมผัสอุณหภูมิสูง เมื่อคอนกรีตเย็นตัวลงทำให้คอนกรีตบริเวณที่สัมผัสเปลวไฟหดตัว ผิวคอนกรีตบริเวณรอยร้าวที่เกิดขึ้นก็จะหลุดลอกออก การหลุดร้อนชนิดนี้จะเกิดมากในคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง การหลุดร้อนชนิดนี้จะมีบทบาทมากในองค์อาคารประเภทคานและเสา เนื่องจากทำให้ผิวชั้นนอกหลุดร้อนออก

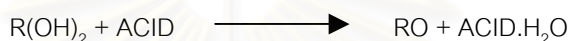
## 2.6 คุณสมบัติในการต้านทานอัคคีภัย ของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.6.1 คุณสมบัติของสีทนไฟ (Intumescent Coating) ในการต้านทานอัคคีภัย

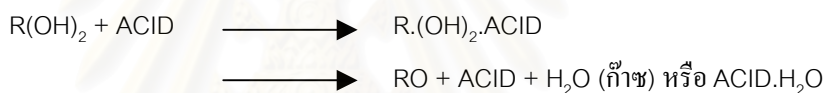
สีทนไฟเมื่อได้รับความร้อนจากเปลวไฟจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ได้ผลิตผลจากปฏิกิริยาเคมีเป็น ก๊าซและโฟมที่เป็นฉนวนความร้อน โดยโครงสร้างของโฟมที่เกิดขึ้นจะมีโพรงอากาศอยู่ภายใน(Cellular Foam) ซึ่งเป็นผลจากการขยายตัว ลักษณะของโครงสร้างดังกล่าวทำให้โฟม มีคุณสมบัติในการยึดเกาะผิวของอาคารที่ดี

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

กระบวนการที่ 1 (Simple Dehydration) :



กระบวนการที่ 2 :



ทั้งสองกระบวนการแตกต่างกันในเชิงทฤษฎี กระบวนการแรกเกิดขึ้นเมื่อสารตั้งต้นสัมผัสกับตัวกระทำ(Reagents)ซึ่งต้องใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามาก ดังนั้นกระบวนการที่พบมักเป็นกระบวนการที่สองซึ่งมีโอกาสเกิดได้มากกว่า

กรดที่พบในกระบวนการทั้งสองเป็นกรดฟอสฟอริก(Phosphoric Acid) กรดดังกล่าวจะแยกสลายเป็นเกลือ หรือเอสเตอร์(Ester)เมื่อได้รับพลังงานความร้อน ในบางครั้งจะพบว่ากรดฟอสฟอริกจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากในปฏิกิริยาทางเคมีจะมีกรดเกิดขึ้นช้า ๆ และเพียงพอสำหรับการเข้าสู่ปฏิกิริยาในรอบต่อไป เนื่องจากกรดที่เกิดขึ้นช้า ๆ นี้ไม่ได้ผสมกับส่วนผสมเดิมอย่างทั่วถึง จึงจำเป็นต้องนำกรดจากภายนอกมาเติมเพื่อให้เกิดการก่อตัวของโฟมภายใต้สภาวะออคซิเจนเป็นเนื้อเดียวกัน

สารเคมีที่ทำให้โฟมที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยาเคมีของสีทนไฟเกิดการขยายตัว เรียกว่า โบลว้อ๊อิง เอเจ้นท์(Blowing Agents) สารเคมีดังกล่าวมีคุณสมบัติที่สลายตัวง่ายในอุณหภูมิที่ค่อนข้างแน่นอน โดยทั่วไปจะสลายตัวให้ก๊าซและของแข็งเมื่อได้รับพลังงานความร้อนในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งก๊าซที่ปล่อยออกมาจะเกิดขึ้นก่อนการก่อตัวของโฟม และปล่อยออกมาอย่างต่อเนื่องในระยะเวลาพอสมควร เป็นผลให้อุณหภูมิที่ผิวของโฟมลดลง ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างสารเคมีที่นิยมนำมาใช้เป็น โบลว้อ๊อิง เอเจ้นท์

ความคงทนของโฟมคาร์บอน ขึ้นกับสารเคมียึดเหนี่ยว (Binder Agent) เช่น อะมิโนพลาสติก (Amino Plast) โดยปกติสารยึดเหนี่ยวจะเป็นสารประกอบยูเรีย (Urea) หรือ เมลามีน ฟอรั่มัลดีไฮด์ เรซิน (Melamine-formaldehyde resins) ซึ่งจะทำให้ได้โฟมเนื้อแข็งที่มีลักษณะเป็นโพรงภายใน (Cellular Foam)

การผลิตโฟมโฟมมีสูตรเฉพาะแตกต่างกันไป โดยส่วนประกอบหลัก ได้แก่ โบลวิ่ง เอเจนต์ และ ไฮเดรตติ้ง เอเจนต์ (Hydrating Agent) การหาสูตรผลิตโฟมเป็นเรื่องยุ่งยาก เนื่องจากต้องให้สามารถต้านทานการเพิ่มอุณหภูมิจากความร้อนของเปลวไฟ และต้องทนทานต่อสภาพแวดล้อม

## 2.6.2 คุณสมบัติของแผ่นยิปซัม ในการต้านทานอัคคีภัย

ยิปซัมจัดเป็นวัสดุที่อยู่ในกลุ่มฉนวนความร้อน วัสดุที่ใช้ผลิตแผ่นยิปซัมในงานอุตสาหกรรม คือ แคลเซียมซัลเฟต แอนไฮไดรต ( $\text{CaSO}_4$ )<sup>3</sup> และแคลเซียมซัลเฟต เฮมิไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) วัสดุทั้งสองได้จากการนำหินยิปซัม ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) มาผ่านความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 180 องศาเซลเซียส จากนั้นเติมสารเคมีที่เรียกว่า ปลายเตอร์แห่งปารีส (Plaster of Paris,  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ ) และซีเมนต์ของกิน (Keene's cement,  $\text{CaSO}_4$ ) ลงในหินยิปซัมที่ร้อน จะเกิดกระบวนการตกตะกอนของแคลเซียม (Calcination Residues) เมื่อนำตะกอนที่เกิดขึ้นผสมกับน้ำจะได้แคลเซียมซัลเฟต ไดไฮเดรต ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) อีกครั้ง แต่มีคุณสมบัติการขึ้นรูปจะดีขึ้น เนื่องจากเกิดการยึดเหนี่ยว (Interlocking) ระหว่างผลึกยิปซัมดีขึ้น

ผลิตภัณฑ์จากยิปซัมถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในงานก่อสร้างอาคาร โดยเฉพาะผนังอาคาร ซึ่งนิยมเติมวัสดุผสม เช่น ทราย เฟอร์ไลท์ เวอร์มิคูไลท์ และเส้นใยจากเนื้อไม้ ลงในส่วนผสม เนื่องการออกแบบของอาคารไม่ต้องการกำลังจากผลิตภัณฑ์ยิปซัม แม้ว่ายิปซัมในรูปของไดไฮเดรตจะมีกำลังต้านทานแรงอัดถึง 13 MPa ก็ตาม ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ยิปซัมที่โคเคนอยู่ในรูปแผ่นกระดาน ซึ่งแกนกลางทำจากแผ่นยิปลาสเตอร์แห่งปารีสที่ใส่สารเคมีผสมเพิ่มแล้ว ในการผลิตยิปซัมตามกระบวนการดังกล่าว จึงมีความจำเป็นต้องใช้กระดาษหุ้มที่ขอบและผิวทั้งสองด้านของแผ่นกระดาน

แกนกลางแผ่นกระดานยิปซัมมีความพรุนสูง ทั้งนี้เนื่องจากค่าความหนาแน่นที่ถูกต้องของยิปซัม คือ  $2320 \text{ kg.m}^{-3}$  ในขณะที่ค่าความหนาแน่นแผ่นกระดานยิปซัมมีค่าระหว่าง 650 ถึง  $800 \text{ kg.m}^{-3}$  เท่านั้น และในทางกลับกันค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific Surface) ที่วัดจากโครงสร้างผลึก (Crystalline Microstructure) กลับมีค่าต่ำ นอกจากนี้ความชื้นที่ยิปซัมดูดซับไว้ในช่องว่างภายในถือว่ามีความสำคัญน้อยมากในสภาพแวดล้อมปกติ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน (Coefficient of Thermal Expansion) ของยิปซัม มีค่าระหว่าง  $11.0 \times 10^{-6}$  ถึง  $17.0 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ที่อุณหภูมิห้อง โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนขึ้นกับชนิดและปริมาณของวัสดุผสมที่เติมเข้าไป สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผลิตภัณฑ์ยิปซัมมีค่าหลากหลายขึ้นกับชนิดและคุณสมบัติของวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ ปกติแผ่นกระดานยิปซัมมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนประมาณ  $0.25 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  และมีค่าความหนาแน่นประมาณ  $700 \text{ kg.m}^{-3}$

ความร้อนที่ได้จากกระบวนการไฮเดรชันสมบูรณ์แบบ จะมีค่า  $0.61 \times 10^6$  จูล ต่อยิปซัม 1 กิโลกรัม เมื่ออุณหภูมิของยิปซัมอยู่ในช่วง 125 ถึง 200 องศาเซลเซียส ค่าความร้อนจำเพาะของยิปซัมมีค่า  $1137 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ 282 ถึง 393 เคลวิน ดังนั้นยิปซัมสามารถดูดซับพลังงานความร้อนจากกระบวนการไฮเดรชันภายในและยังสามารถดูดซับพลังงานความร้อนจากสภาพแวดล้อมได้อีก จากค่าความร้อนจำเพาะนี้จึงมีการนำยิปซัมมาทำเป็นชั้นบาง ๆ ในคอนกรีต เพื่อหน่วงการซึมผ่านของความร้อนจากกระบวนการไฮเดรชันเข้าสู่บริเวณรับแรงขององค์อาคาร หลักการดังกล่าวภายหลังถูกนำมาประยุกต์เป็นวัสดุป้องกันไฟ

กราฟ Dilatometric และ Thermogravimetric รวมกันเรียกว่า ความต้านทานไฟ (Fire-resistant) ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ก) และ (ข) โดยความหนาแน่นแผ่นกระดานยิปซัมมีค่า  $678 \text{ kg.m}^{-3}$  ในรูปที่ 2.5(ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะปรากฏกับอุณหภูมิของยิปซัม ในรูปที่ 2.5(ง) ให้ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เทียบกับ อุณหภูมิ ของ แผ่น กระดาน ยิป ซัม เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (Physicochemical) และ โครงสร้างผลึก (Microstructure) ของยิปซัมมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิยิปซัม ในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนจึงใช้วิธีเพิ่มอุณหภูมิไปที่ละชั้น และปล่อยให้เย็นที่ละชั้นเช่นเดียวกัน ในรูปที่ 2.5(ง) วงกลมสีขาวแสดงค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนขณะให้อุณหภูมิ ส่วนสีดำเป็นค่าระหว่างการเย็นตัว

### 2.6.3 การประยุกต์ใช้เพอร์ไลต์ ในงานต้านทานอัคคีภัย

หินเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว มีลักษณะรอยแตกเป็นวง ๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม เมื่อถูกเผาภายใต้อุณหภูมิเหมาะสมในเวลาทีรวดเร็วจะเกิดขยายตัวทันที และเปลี่ยนสภาพเป็นสารที่มีน้ำหนักเบา มีความพรุนสูงและมีลักษณะคล้ายหินพัมมิส ผลึกภัณฑ์ที่ได้จากการขยายตัวของหินเพอร์ไลต์นี้เรียกว่า เพอร์ไลต์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดี คือ มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ ไม่เป็นตัวนำความร้อน เป็นสารทนไฟ ป้องกันเสียง มีความสามารถดูดซึมน้ำ เป็นสารที่มีความเป็นกลาง และเป็นสารเฉื่อย จากคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัวเหล่านี้จึงมีการนำเพอร์ไลต์มาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรม เช่น ใช้เป็นฉนวนความร้อน ใช้เป็นเครื่องกรองทำความสะอาด ใช้ในการรักษาและปรับสภาพของดินทางการเกษตร แหล่งหินเพอร์ไลต์ในประเทศไทยพบอยู่ในบริเวณกลุ่มหินภูเขาไฟด้านรายณ์ ในบริเวณพื้นที่จังหวัดเพชรบูรณ์และลพบุรี

#### 2.6.3.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์ส่วนใหญ่เนื้อหินมีลักษณะเป็นแก้ว มักจะมีรอยแตกเป็นวงๆ ซ้อนกันคล้ายกลีบหัวหอม รอยแตกนี้อาจจะมองเห็นด้วยตา หรืออาจต้องอาศัยดูด้วยแว่นขยายหรือกล้องจุลทรรศน์ โดยทั่วไปมีสีเทาอ่อนแต่อาจจะพบสีดำ สีน้ำตาล หรือสีเขียวได้ และในเนื้อหินมักจะมีผลึกแร่ควอตซ์ แร่เฟลด์สปาร์ แร่ไบโอไทต์ แร่ฮอร์นเบลนด์ และเศษหินชนิดอื่นฝังตัวอยู่ ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์

#### 2.6.3.2 คุณสมบัติทางเคมีของหินเพอร์ไลต์

หินเพอร์ไลต์เป็นหินภูเขาไฟเนื้อแก้ว มีส่วนประกอบเป็นออกไซด์ของธาตุซิลิกาค่อนข้างสูง คือประมาณร้อยละ 70 หรือมากกว่า มีน้ำเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 2 ถึง 5 ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารเคมีอื่น ๆ ง่ายนัก จัดอยู่ในจำพวกสารเฉื่อยต่อปฏิกิริยาทางเคมี

เนื้อแก้วของหินเพอร์ไลต์จะเปลี่ยนสภาพจากแก้วเป็นผลึก(Devitrification) เมื่อระยะเวลาของหินเพอร์ไลต์มากขึ้น หินเพอร์ไลต์ที่มีคุณภาพดีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้นั้น เนื้อแก้วจะต้องไม่เปลี่ยนสภาพแก้วเป็นผลึก ซึ่งพบได้ในหินภูเขาไฟยุคใหม่ประมาณยุคเทอร์เชียรีขึ้นมา หรือน้อยกว่า 65 ล้านปี ส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์ในรูปออกไซด์ของธาตุต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3 ซึ่งเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์ระหว่างประเทศไทยกับทั่วโลก

### 2.6.3.3 คุณสมบัติของเพอร์ไลต์

คุณสมบัติของเพอร์ไลต์ ที่จะนำไปใช้ให้เป็นประโยชน์ในงานด้านต่างๆ ได้นั้น ขึ้นกับคุณสมบัติทั้งทางฟิสิกส์และทางเคมีของเพอร์ไลต์ ดังนี้

1. มีน้ำหนักเบา มีความหนาแน่นต่ำ ปกติเพอร์ไลต์มีความหนาแน่นประมาณ 30 ถึง 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
2. เป็นสารที่ไม่นำความร้อน มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน(k)ต่ำ โดยเพอร์ไลต์ที่ยังไม่ถูกอัดแน่นที่มีความหนาแน่นประมาณ 70 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเพียง 0.265 W/m-K ส่วนเพอร์ไลต์ที่มีการอัดแน่น มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 1.25 W/m-K
3. เป็นสารทนไฟ จะไม่หลอมละลายเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 1200 องศาเซลเซียส
4. มีคุณสมบัติที่ดีในการป้องกันเสียง เนื่องจากคลื่นเสียงผ่านทะลุไปได้น้อย
5. เป็นสารที่มีความเป็นกลาง มีค่า pH = 7
6. เป็นสารเฉื่อย ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีง่ายนัก

ในตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเพอร์ไลต์ ตารางที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ในประเทศไทยเทียบกับของต่างประเทศ โดยคิดเป็นสัดส่วนของธาตุในแร่เพอร์ไลต์ในประเทศไทยได้ดังตารางที่ 2.6

### 2.6.3.4 ประโยชน์ของเพอร์ไลต์ในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

คุณสมบัติของเพอร์ไลต์ที่ไม่เป็นตัวนำความร้อน คลื่นเสียงผ่านทะลุไม่ได้ ความหนาแน่นต่ำ และเป็นวัสดุทนไฟ เมื่อนำเพอร์ไลต์ผสมกับปูนซีเมนต์ จะทำให้ได้คุณภาพดีกว่าปูนซีเมนต์ที่ผสมแบบธรรมดา เมื่อนำไปฉาบผนังอาคารเพดานจะทำให้ปูนซีเมนต์มีความสามารถยึดติดผนังดี แข็งเร็วและไม่เกิดรอยร้าว เนื่องจาก

มีความยืดหยุ่นสูงและยังเป็นฉนวนป้องกันความร้อนที่ดีอีกด้วย คุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากเพอร์ไลต์สรุปได้ดังตารางที่ 2.7

นอกจากนี้เมื่อนำเพอร์ไลต์ไปผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อผลิตคอนกรีตสำหรับใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ จะทำให้ลดน้ำหนักของสิ่งก่อสร้างนั้นลงได้ และยังเป็นตัวฉนวนป้องกันความร้อนและป้องกันการสะท้อนของเสียงได้เป็นอย่างดี คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์มีความหนาแน่นต่ำถึง 320 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่ความหนาประมาณ 2 นิ้ว จะมีประสิทธิภาพในการเป็นฉนวนความร้อน เท่ากับแผ่นฉนวนความร้อนมาตรฐาน แต่มีความแข็งแรงและคงทนกว่าแผ่นฉนวนความร้อนมาตรฐานมาก ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตที่ผสมด้วยเพอร์ไลต์กับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สรุปได้ดังตารางที่ 2.8

จากเหตุผลข้างต้น ได้มีการนำเพอร์ไลต์ไปใช้งานด้านอุตสาหกรรมก่อสร้างกันมาก เช่น ใช้ทำคอนกรีตบนชั้นดาดฟ้า ทำหลังคาหรือพื้นชั้นต่าง ๆ ของอาคารที่มีความสูงมาก ๆ และใช้ผสมปูนซีเมนต์สำหรับฉาบผนังอาคาร เนื่องจากเมื่อใช้คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการทำฐานรากของอาคารลดลงและช่วยประหยัดเหล็กเสริมที่ใช้ทำโครงสร้างได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่จะนำไปใช้กับเครื่องปรับอากาศภายในอาคารที่สร้างด้วยคอนกรีตผสมเพอร์ไลต์ เพราะเป็นฉนวนป้องกันความร้อนไปในตัวอยู่แล้ว

จะเห็นได้ว่าเพอร์ไลต์มีประโยชน์อย่างยิ่งในอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทย ซึ่งตั้งอยู่ในบริเวณที่มีภูมิอากาศร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปใช้ในการก่อสร้างอาคารที่สูงมาก ๆ ในกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีปัญหาเกี่ยวกับการอ่อนตัวของพื้นดิน และช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการทำฐานรากของอาคารได้มาก

## 2.7 สรุป

จากการศึกษาวัสดุและปัจจัยในการด้านทานอัคคีภัย สรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1. สมมุติฐานทั้งสองข้อของกราฟมาตรฐานการทดสอบอัคคีภัย ไม่สอดคล้องกับสภาวะอัคคีภัยที่เกิดขึ้นในบางกรณี
2. ความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตเมื่อพิจารณาจากสภาพเงื่อนไขฐานรองรับ พบว่าแผ่นพื้นต่อเนื่องจะมีความสามารถทนไฟสูงกว่าแผ่นพื้นที่มีฐานรองรับแบบง่าย
3. องค์อาคารคอนกรีตที่มีสภาพเงื่อนไขการยึดรั้ง แบบขอบเหนียวรั้ง จะมีความสามารถทนไฟสูงกว่าองค์อาคารคอนกรีตที่มีสภาพเงื่อนไขการยึดรั้งแบบขอบไม่เหนียวรั้ง
4. การหลุ่ก่อนแบบการระเบิดออกของผิวคอนกรีต จะมีผลอย่างมากต่อการวิบัติขององค์อาคารภายใต้อัคคีภัย
5. สีทนไฟจะเปลี่ยนสภาพเป็นโฟมคาร์บอน เมื่อได้รับพลังงานความร้อนจากเปลวไฟ ซึ่งโฟมดังกล่าวมีฟองอากาศขนาดเล็กอยู่ภายใน ทำให้พลังงานความร้อนซึมผ่านโฟมได้น้อยลง

6. น้ำผลึกในยิปซัมเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยดูดซับพลังงานความร้อนจากเปลวไฟ ดังนั้นยิปซัมจึงจัดเป็นวัสดุที่ดูดซับพลังงานความร้อนจากอัคคีภัยได้ดี

7. เพอร์ไลต์เป็นวัสดุคิบที่สามารถจัดหาได้ภายในประเทศ และมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนความร้อนที่ดีและมีความหนาแน่นต่ำ จึงเหมาะสำหรับผสมในคอนกรีตเพื่อเพิ่มความสามารถทนไฟให้อาคารคอนกรีต



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 สารประกอบที่นิยมใช้เป็น โบลวิ่ง เอเจ้นท์ และก๊าซที่เป็นผลิตภัณฑ์<sup>[13]</sup>

ชนิดสาร	ก๊าซที่เป็นผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิที่เกิดการสลายตัว (องศาเซลเซียส)
ไอโซอินไดเอไมด์(Dicyandiamide)	NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	210
เมลามีน(Melamine)	NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	250
กูเออนินิดีน(Guanidine)	NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	160
ไกลซีน(Glycine)	NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	233
ยูเรีย(Urea)	NH <sub>3</sub> , CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	130
คลอรีเนต พาราฟิน(70% Cl)	NCl, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	190

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของหินเพอร์ไลต์<sup>[18]</sup>

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	ลักษณะที่ปรากฏ
1. ความแข็ง(Moh 's Scale)	5.5-7.0
2. ความถ่วงจำเพาะ	2.3-2.8
3. จุดหลอมตัว	760-1300 องศาเซลเซียส
4. ค่าดัชนีหักเหแสง	1.490-1.610

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบทางเคมีของหินเพอร์ไลต์<sup>[18]</sup>

สารประกอบ	ค่าเฉลี่ยทั่วโลก	ประเทศไทย
SiO <sub>2</sub>	71.0 - 75.0	71.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.5 - 18.0	16.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5 - 1.5	0.71
FeO	0.0 - 0.1	0.73
MgO	0.1 - 0.5	0.41
CaO	0.5 - 2.0	0.58
Na <sub>2</sub> O	2.9 - 4.0	0.90
K <sub>2</sub> O	4.0 - 5.0	5.59
H <sub>2</sub> O	3.0 - 5.0	3.57



ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของเพอร์ไลต์<sup>[18]</sup>

คุณสมบัติ	ลักษณะที่ปรากฏ
1. สี	ขาว
2. ดัชนีหักเหของแสง	1.5
3. ปริมาณความชื้นอิสระสูงสุด	0.50 เปอร์เซ็นต์
4. ความเป็นกรดหรือด่างของเพอร์ไลต์เหลว	6.5-8.0
5. ความถ่วงจำเพาะ	2.2-2.4
7. ความหนาแน่นเนื้อแท้	32-400 kg/m <sup>3</sup>
8. ขนาดอนุภาค	ขนาดตะแกรงเบอร์ 4-8 หรือละเอียดกว่า
9. ค่าอุณหภูมิที่ทำให้อ่อนตัว(Softening point)	871-1093 องศาเซลเซียส
10. จุดหลอมเหลว(Fusion point)	1260-1343 องศาเซลเซียส
11. ความจุความร้อนจำเพาะ(Specific heat)	0.2 Btu/lb-F หรือ 387 J/kg-K
12. ค่าการนำความร้อนที่ 24 องศาเซลเซียส	0.27-0.41Btu-in/h-ft -F หรือ 0.04-0.06W/m-K
13. ความสามารถในการละลาย	ละลายในด่างเข้มข้น

ตารางที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเพอร์ไลต์ในประเทศไทยเทียบกับของต่างประเทศ<sup>[18]</sup>

สารประกอบทางเคมี	ปริมาณคิดเป็นร้อยละ						
	ไทย	สหรัฐอเมริกา		กรีก เมืองไมโลส	อิตาลี เมืองซามโคเรีย	อังกฤษ	บัลแกเรีย
		รัฐโอริโซนา	รัฐนิวเม็กซิโก				
SiO <sub>2</sub>	71.02	73.60	74.10	73-74	72.80	73.50	72-75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.09	12.70	13.30	12-15	13.80	13.00	13-15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	0.70	1.80	0.7-1.2	2.10	1.80	1.50
CaO	0.73	0.60	1.50	0.7	0.90	1.50	1.00
MgO	0.41	0.20	0.40	0.3	0.40	0.40	0.60
K <sub>2</sub> O	5.59	5.00	3.80	3.0-4.8	5.60	3.80	4.80
Na <sub>2</sub> O	0.90	3.20	3.50	3.4-4.1	3.30	3.50	2.70
TiO <sub>2</sub>	0.58	0.10	0.05	0.006	0.30	-	-
H <sub>2</sub> O	3.57	3.80	3.00	2.50	-	3.00	3.0-6.0

ตารางที่ 2.6 แสดงสัดส่วนของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของแร่เพอร์ไลต์ในประเทศไทย<sup>[18]</sup>

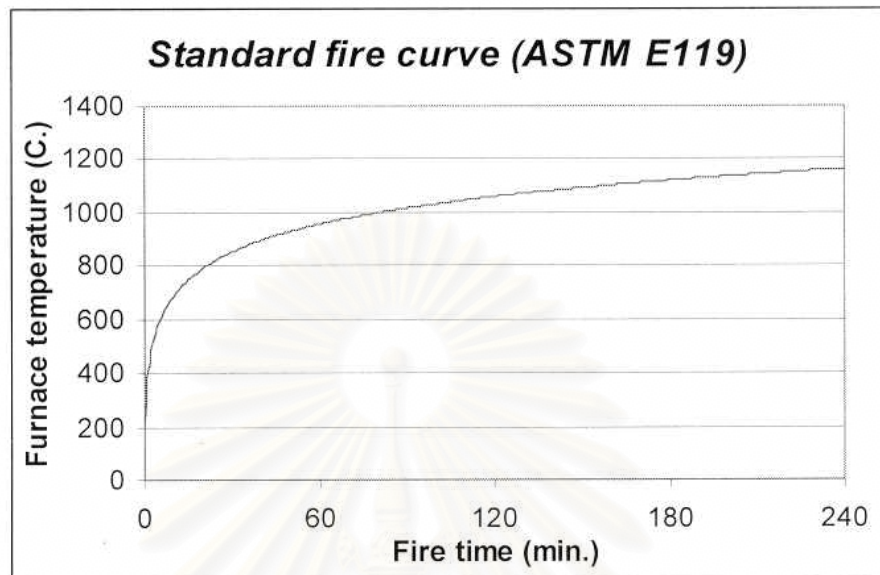
ธาตุ	ปริมาณคิดเป็นร้อยละ
Silicon	33.80
Aluminum	7.20
Potassium	3.50
Sodium	3.40
Iron	0.60
Calcium	0.60
Magnesium	0.20
Trace	0.20
Oxygen	47.50
Bound water	3.00

ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากเพอร์ไลต์<sup>[18]</sup>

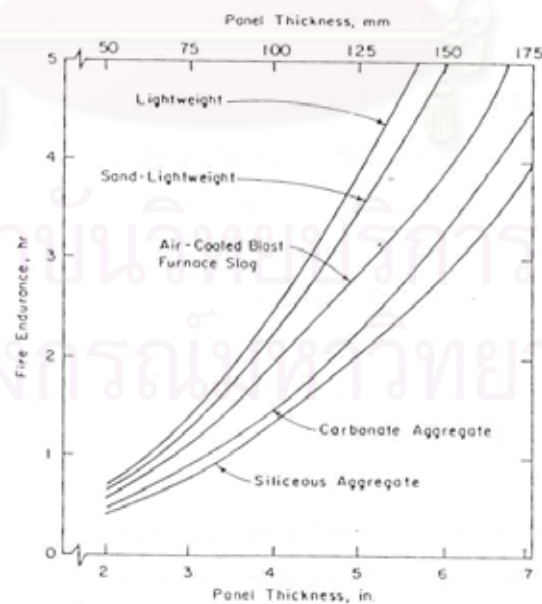
คุณสมบัติทางกายภาพ	ลักษณะที่ปรากฏ
รูปร่างและลักษณะ	มีรูปร่างไม่แน่นอน เป็นหินภูเขาไฟ (Al-Silicate)
สี	ขาว
ความสว่าง(G.E. Brightness), %	80-85
ดัชนีการหักเหแสง	1.47
ความถ่วงจำเพาะ	2.34
ความหนาแน่นปรากฏ	2.5-10.5 lb./ft. <sup>3</sup> (40-170kg/m <sup>3</sup> )
การดูดซึมน้ำ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	200-600%
การดูดซับน้ำมัน, gms.	50-100
ความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	น้อยกว่า 1
การสลายตัวที่อุณหภูมิ 1800°F	สูงสุด 2 เปอร์เซ็นต์ (ที่ 1 ชั่วโมง)
ความหนาแน่น (ที่สภาพอิ่มตัว)	5.0-20.0 lb./ft. <sup>3</sup> (80-320kg/m <sup>3</sup> )
ขนาดอนุภาค	0.074-0.8 มิลลิเมตร
ความเป็นกรดหรือด่าง	เป็นกลาง
ความสามารถในการละลาย	ละลายน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ในกรดธรรมชาติ

ตารางที่ 2.8 เปรียบเทียบคุณสมบัติของคอนกรีตปกติเทียบกับคอนกรีตผสมเพอร์ไลต์<sup>[18]</sup>

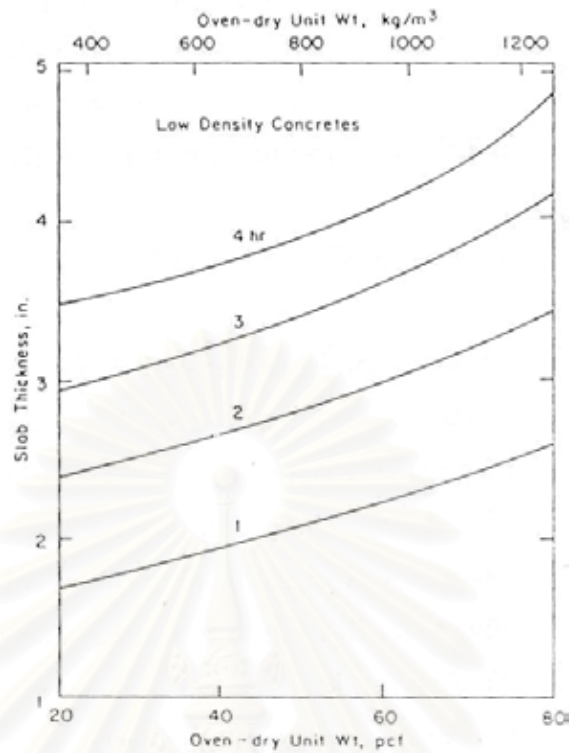
	หน่วยน้ำหนักแห้งในอากาศ(kg/l)	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Kcal/m.h°C)
คอนกรีตผสมเพอร์ไลต์	1.20 – 1.60	0.27 – 0.36
ปูนผสมทราย	2.01	1.24



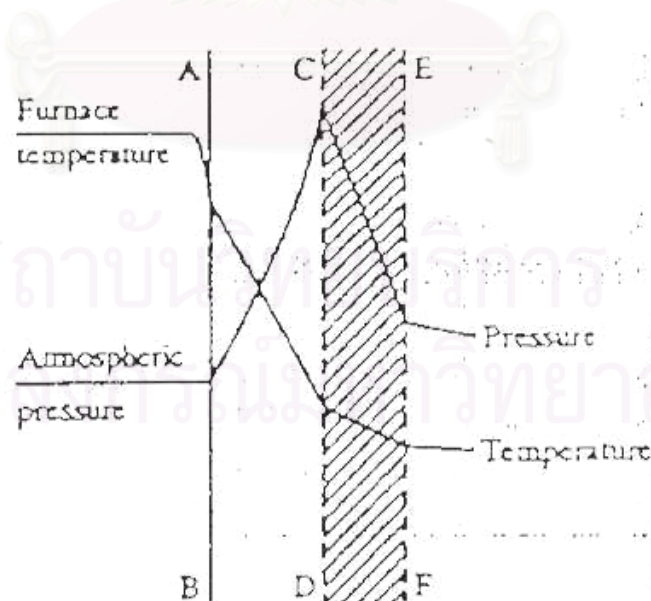
รูปที่ 2.1 กราฟมาตรฐานสำหรับทดสอบการทดสอบอัคคีภัย ตามมาตรฐาน ASTM E119<sup>[19]</sup>



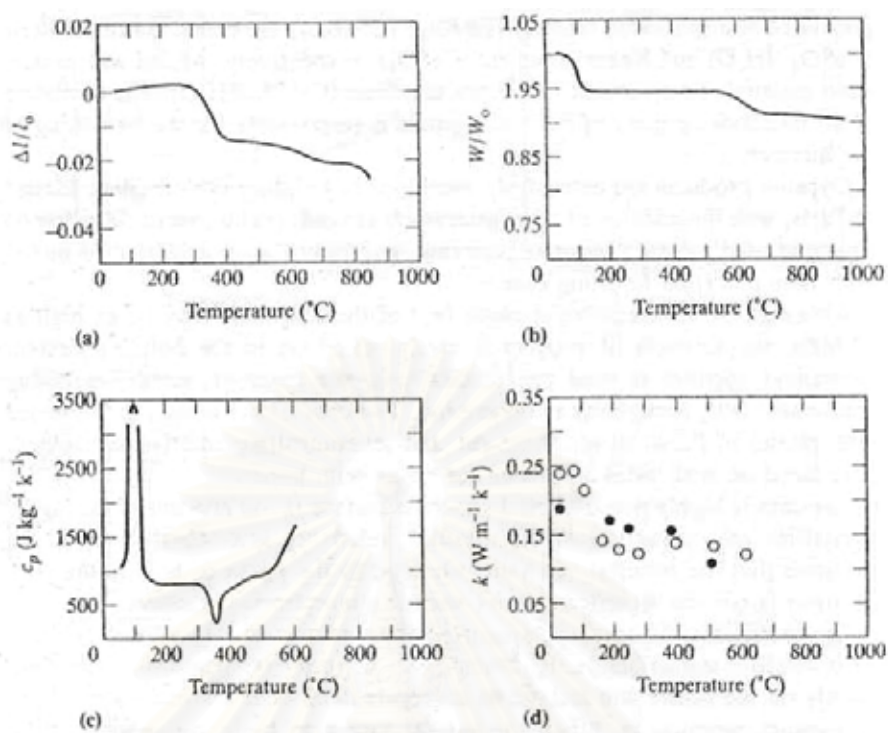
รูปที่ 2.2 แสดงผลของความหนาแผ่นพื้นและชนิดวัสดุผสมที่มีต่อความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีต<sup>[16]</sup>



รูปที่ 2.3 แสดงผลของหน่วยน้ำหนัก(สภาพแห้งในเตาอบ)และความหนาของแผ่นพื้น ที่มีต่อความสามารถทนไฟของคอนกรีตมวลเบา<sup>[18]</sup>



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการเกิดขึ้นสะสมความชื้น และการหลุดร่อนในองค์อาคารคอนกรีต<sup>[15]</sup>



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของแผ่นอีพ็อกซี (ความหนาแน่น 678 kg.m<sup>-3</sup>) (a) Dilatometric curve (b) Thermogravimetric curve (c) ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (d) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน<sup>[15]</sup>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### การติดตั้งและการทดสอบ แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง ดึงภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว

#### 3.1 ทั่วไป

มาตรฐานสำหรับการทดสอบความสามารถทนไฟขององค์อาคารและวัสดุก่อสร้าง ถูกกำหนดเพื่อใช้เป็นตัวกลางในการทดสอบที่มีพื้นฐานแตกต่างกัน ในมาตรฐานการทดสอบความสามารถทนไฟได้ระบุถึงวิธีการควบคุมอุณหภูมิ การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ เกณฑ์ตัดสินสภาพสิ้นสุดการทนไฟ และข้อกำหนดอื่นๆ ตามชนิดขององค์อาคาร

การดำเนินงานวิจัยนี้ยึดวิธีทดสอบ การติดตั้งอุปกรณ์และเกณฑ์การตัดสินสภาพสิ้นสุดการทนไฟ ตามข้อกำหนดในมาตรฐาน ASTM E119-95a และความสามารถทนไฟขององค์อาคารที่ต้องการตามข้อกำหนดตามกฎกระทรวงฉบับที่ 48(พ.ศ.2540)

#### 3.2 มาตรฐานสำหรับการทดสอบความสามารถทนไฟ ของวัสดุและองค์อาคาร (ASTM E119-95a)

##### 3.2.1 การควบคุมอุณหภูมิภายในเตา

มาตรฐานASTM E119 กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเพื่อจำลองอุณหภูมิภายในเตาให้คล้ายกับสภาพอัคคีภัย ความเป็นมาและสมมุติฐานของกราฟมาตรฐานสำหรับการทดสอบอัคคีภัยกล่าวในหัวข้อที่2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาแสดงได้ดังรูปที่2.1 โดยความคลาดเคลื่อนในการทดสอบที่มาตรฐานขอมให้ มีดังนี้

0 ถึง 1 ชั่วโมง	มีพื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิ-เวลา ผิดไปไม่เกิน	10%
1 ถึง 2 ชั่วโมง	มีพื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิ-เวลา ผิดไปไม่เกิน	7.5%
2 ชั่วโมง ขึ้นไป	มีพื้นที่ใต้กราฟอุณหภูมิ-เวลา ผิดไปไม่เกิน	5%

การบันทึกอุณหภูมิจะต้องทำการบันทึกทุก 1 นาที ในช่วง 2 ชั่วโมงแรกและทุก 10 นาที หลังจากนั้น

##### 3.2.2 การวัดอุณหภูมิบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดจำนวนและตำแหน่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวด้าน ไม่สัมผัสเปลวไฟขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้นไว้ ดังนี้

การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิต้องใช้อุปกรณ์ 5 ตัว ติดตั้งที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังนี้ ที่กึ่งกลางแผ่นพื้น 1 ตัว และกึ่งกลางของพื้นที่ ที่ได้จากการแบ่งแผ่นพื้นออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กันจำนวน 4 ตัว สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเพื่อตรวจสอบความสามารถทนไฟของแผ่นพื้น ควรติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิไม่น้อยกว่า 4 ตำแหน่ง ขณะดำเนินการทดสอบ เมื่อพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของตำแหน่งที่สิ้นสุดสภาพการทนไฟ มีค่าสูงขึ้นเกินกว่าร้อยละ 30 ของอุณหภูมิเริ่มต้น ต้องหยุดการทดสอบทันที

### 3.2.3 การวัดอุณหภูมิชิ้นส่วนรับแรงดึง ในองค์อาคารชนิดพื้นคอนกรีตอัดแรง

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดให้วัดอุณหภูมิชิ้นส่วนรับแรงดึงในองค์อาคาร ทำได้ 2 กรณี ดังนี้

1. ติดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ชิ้นส่วนรับแรงดึงทั้งหมด เมื่อต้องการตรวจสอบประสิทธิภาพของชิ้นส่วนรับแรงดึงโดยละเอียด หรือ
2. ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวแทนซึ่งเป็นตัวแทนของชิ้นส่วนรับแรงดึงทั้งหมด การติดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิตัวแทนชิ้นส่วนรับแรงดึงที่เป็นตัวแทนของอุณหภูมิชิ้นส่วนรับแรงดึงทั้งหมด ไม่ต่ำกว่า 8 แห่ง

### 3.2.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับเงื่อนไขสภาพการยึดรั้งที่ฐานรองรับ ขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้น

ในปี ค.ศ. 1970 มาตรฐาน ASTM E119 ได้ริเริ่มแนวทางการจัดหมวดหมู่องค์อาคารสำหรับการทดสอบหาความสามารถทนไฟ แนวทางการจัดหมวดหมู่นี้พิจารณาจาก สภาพเงื่อนไขการยึดรั้งที่ฐานรองรับ เป็นเกณฑ์ โดยแบ่งสภาพเงื่อนไขที่ฐานรองรับออกเป็น 2 พวก คือ

1. สภาพเงื่อนไขฐานรองรับแบบยึดรั้ง (Restrained Conditions) การขยายตัวที่ฐานรองรับขององค์อาคารรับน้ำหนักบรรทุกเนื่องจากผลของอค์คัย จะถูกต้านทานด้วยแรงกระทำจากภายนอก
2. สภาพเงื่อนไขฐานรองรับแบบไม่ยึดรั้ง (Unrestrained Conditions) องค์อาคารที่รับน้ำหนักบรรทุกทุกสามารถขยายตัวและหมุนที่ฐานรองรับได้อย่างอิสระ

การพิจารณาสภาพเงื่อนไขการยึดรั้งที่ฐานรองรับ จำเป็นต้องรู้ค่าการขยายตัวทางความขององค์อาคาร และความต้านทานต่อแรงกระทำด้านข้าง (Lateral Stiffness) ที่ฐานรองรับ ซึ่งในการพิจารณาค่าดังกล่าวจะยุ่งยากหากมีระบบคานที่ซับซ้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นมาตรฐาน ASTM E119 จึงให้แนวทางในการจำแนกองค์อาคาร โดยสังเขปดังตารางที่ 3.1

จากตารางที่ 3.1 พบว่าแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว เป็นองค์อาคารที่หล่อในที่ จึงจัดเป็นองค์อาคารที่มีสภาพเงื่อนไขการยึดรั้งที่ฐานรองรับเป็นแบบยึดรั้ง

### 3.2.5 ความต้องการเบื้องต้นสำหรับ พิจารณาความสามารถทนไฟ ขององค์อาคารชนิดแผ่นพื้น

มาตรฐาน ASTM E119 ได้ระบุความต้องการเบื้องต้นสำหรับการพิจารณาความสามารถทนไฟ ภายใต้เงื่อนไขสภาพการยี่ดิ่งที่ฐานรองรับ ไว้ดังนี้

#### 3.2.5.1 สภาพเงื่อนไขฐานรองรับแบบยี่ดิ่ง

สิ่งที่ต้องพิจารณา คือ การถ่ายเทความร้อนภายในของตัวอย่างทดสอบตลอดระยะเวลาการทดสอบ ต้องทำให้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิบนด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟสูงกว่า 140 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิเริ่มต้น

#### 3.2.5.2 สภาพเงื่อนไขฐานรองรับแบบไม่ยี่ดิ่ง

พิจารณาเช่นเดียวกับสภาพเงื่อนไขฐานรองรับแบบยี่ดิ่ง และต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นส่วนรับแรงดึงภายในตัวอย่างทดสอบไม่ให้เกินค่าอุณหภูมิวิกฤติ โดยที่เหล็กเสริมต้องมีอุณหภูมิไม่เกิน 593 องศาเซลเซียส และเหล็กเสริมอัดแรงต้องมีอุณหภูมิไม่เกิน 427 องศาเซลเซียส

### 3.3 ข้อกำหนดในกฎกระทรวงฉบับที่ 48(พ.ศ. 2540) เกี่ยวกับองค์อาคารชนิดพื้นคอนกรีตอัดแรง

โครงสร้างพื้นคอนกรีตอัดแรงของอาคาร ดังต่อไปนี้

1. อาคารสำหรับใช้เป็นคลังสินค้า โรงมหรสพ โรงแรม อาคารชุดหรือสถานพยาบาล
2. อาคารสำหรับใช้เพื่อกิจการพาณิชยกรรม การอุตสาหกรรม การศึกษา สำนักงาน หรือการสาธารณสุข หรือที่ทำการที่มีความสูงตั้งแต่ 3 ชั้นขึ้นไป และมีพื้นที่รวมกันทุกชั้นหรือชั้นใดในอาคารหลังเดียวกันเกิน 1000 ตารางเมตร
3. อาคารสูง อาคารใหญ่พิเศษ อาคารขนาดใหญ่ หรืออาคารหรือส่วนหนึ่งส่วนใดของอาคารที่ใช้เป็นหอประชุม

จะต้องมีความหนาของพื้นชนิดดิ่งลดทอนภายหลังไม่ต่ำกว่า 115 มิลลิเมตร และมีระยะหุ้มเหล็กเสริมไม่น้อยกว่า

40 มิลลิเมตร สำหรับฐานรองรับแบบไม่ยี่ดิ่ง

20 มิลลิเมตร สำหรับฐานรองรับแบบยี่ดิ่ง



ในกรณีโครงสร้างหลักก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก หรือคอนกรีตอัดแรงที่มีขนาดหรือความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมน้อยกว่าที่กำหนด จะต้องใช้วัสดุอื่นหุ้มเพิ่มเติมหรือต้องป้องกันโดยวิธีอื่นเพื่อให้แผ่นพื้นมีอัตราทรานไฟได้ไม่น้อยกว่า 2 ชั่วโมง โดยต้องมีเอกสารรับรองอัตราทรานไฟจากสถาบันที่เชื่อถือได้ประกอบการอนุมัติ โดยวิธีการทดสอบอัตราทรานไฟให้เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E119

### 3.4 ข้อกำหนดเกี่ยวกับการต้านทานอัคคีภัย ในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง

(มาตรฐาน ว.ส.ท. 1009-34)

#### 3.4.1 ข้อกำหนดทั่วไป สำหรับองค์อาคารคอนกรีตในการต้านทานอัคคีภัย

องค์อาคารคอนกรีตเมื่อถูกเพลิงไหม้จะค่อยๆสูญเสียกำลังและสติเฟโนส ในการป้องกันสถานะสิ้นสุด องค์อาคารจะต้องสามารถคงกำลังไว้ได้เพียงพอ และสามารถจำกัดการส่งถ่ายความร้อนไปยังผิวด้านที่ไม่ถูกไฟไหม้ไม่ให้สูงเกิน 120 องศาเซลเซียสได้ ระยะเวลาคงทนต่อเพลิงไหม้จะถูกกำหนดโดยเวลาที่ผ่านไปในช่วงการทดสอบเผาองค์อาคารตามมาตรฐานที่เหมาะสม จนกระทั่งเหล็กเสริมอัดแรงมีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิวิกฤติ โดยเหล็กเสริมอัดแรงรีดเย็นจะมีค่าอุณหภูมิวิกฤติเท่ากับ 425 องศาเซลเซียส ในกรณีที่มีการเหนี่ยวรั้งของอาคาร ระยะเวลาคงทนต่อเพลิงไหม้จะเพิ่มมากขึ้น ในทางปฏิบัติอาจใช้ค่าระยะเวลาเป็นสองเท่าขององค์อาคารไร้การเหนี่ยวรั้งที่มีหน้าตัดและช่วงยาวเหมือนกัน

จากข้อกำหนดดังกล่าวพบว่า ในด้านการส่งถ่ายความร้อนไปยังผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟให้ความปลอดภัยสูงกว่ามาตรฐาน ASTM E119 มาก การกำหนดให้องค์อาคารมีเงื่อนไขฐานรองรับแบบขอบเหนี่ยวรั้งมีความสามารถทนไฟสูงเป็นสองเท่าจากปกติ อาจทำให้ความปลอดภัยต่ำเกินไป เนื่องจากผิวล่างขององค์อาคารรับแรงคดเมื่อรับความร้อนจะเปลวไฟแล้วไม่สามารถขยายตัวออกได้ จะทำให้เกิดหน่วยแรงอัดขึ้นจึงเป็นผลให้หน่วยแรงดึงที่ผิวล่างขององค์อาคารลดลงตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3 แต่ในกรณีที่ตำแหน่งของเหล็กเสริมอัดแรงอยู่ใกล้ผิวล่างขององค์อาคารมาก และหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงมีค่ามากกว่าหน่วยแรงอัดที่เกิดจากสภาพเงื่อนไขขอบเหนี่ยวรั้ง เมื่อให้ความสามารถทนไฟสูงเป็นสองเท่าอาจทำให้เหล็กเสริมอัดแรงขาดได้

#### 3.4.2 ข้อกำหนดสำหรับองค์อาคาร ชนิดแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง

ความต้านทานต่ออัคคีภัยของแผ่นพื้น ขึ้นอยู่กับค่าความหนาน้อยที่สุดของพื้นคอนกรีต และความหนาเฉลี่ยของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอัดแรงในส่วนที่รับแรงดึง ในการประมาณค่าความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีต อาจพิจารณาผลของวัสดุตกแต่งพื้นที่ไม่ไหม้ไฟได้ ตารางที่ 3.2 และ 3.3 ให้ค่าความหนาของแผ่นพื้น และความหนาเฉลี่ยของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมอัดแรงตามลำดับสำหรับระยะเวลาคงทนต่อเพลิงไหม้ต่าง ๆ ความหนาของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอัดแรงเส้นใดก็ตาม ต้องไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความหนาที่ระบุไว้และไม่น้อยกว่าค่าที่ให้สำหรับช่วงเวลาที่ให้สำหรับช่วงเวลาทนไฟ 1 ชั่วโมง

สำหรับแผ่นพื้นไร้คานคอนกรีตอัดแรงชนิดไม่ยึดเหนี่ยว ควรเสริมเหล็กกรรมดาชนิดยึดเหนี่ยวปริมาณอย่างน้อย 0.001 ของพื้นที่หน้าตัด ใกล้เคียงผิวล่างของแผ่นพื้นในบริเวณโมเมนต์บวก เพื่อป้องกันการกระเทาะออกของคอนกรีตที่หุ้มเหล็กเสริมอัดแรงเมื่อเกิดอัคคีภัย

ในงานวิจัยนี้ใช้ความหนาของแผ่นพื้น สำหรับระยะเวลาทางทนต่อเพลิงไหม้ 2 ชั่วโมง คือ 12 เซนติเมตร และความหนาอย่างน้อยที่สุดของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมอัดแรงในแผ่นพื้น โดยให้ท่อร้อยเหล็กเสริมอัดแรงวางบนเหล็กเสริมที่มีระยะหุ้ม 2.0 เซนติเมตร

### 3.5 การติดตั้งอุปกรณ์และการควบคุมสถานะ ของพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.5.1 วัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบ ของพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการทดสอบ

1. เหล็กเสริม ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 12 มิลลิเมตร เกรด SD40 กำลังครากเฉลี่ย 4,253 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ค่าโมดูลัสยืดหยุ่น  $2.04 \times 10^6$  กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และกำลังดึงประลัยเฉลี่ย 5,718 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

2. เหล็กเสริมอัดแรง ใช้ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น ชนิดคลายแรงดึงต่ำ เกรด 270 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $\frac{1}{2}$  นิ้ว ค่าแรงดึงที่จุดประลัยเฉลี่ย 18,730 กิโลกรัม และค่าแรงดึงที่จุดคลาก (ที่ 1 เปอร์เซนต์ของหน่วยการยืดตัว) 16,850 กิโลกรัม

3. ท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ใช้ท่อร้อยลวดที่ทำจากกัวลาไนท์ชนิดที่ใช้ในงานแผ่นพื้น (รุ่น S5-2 ของบริษัท วี.เอส.แอล ประเทศไทย จำกัด) สามารถบรรจุลวดเกลียวอัดแรงได้ 2 เส้น

4. ก้อนมอร์ต้าสำหรับหุ้มเหล็กเสริม ทำจากมอร์ต้ามาตรฐาน (สัดส่วนทรายต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 2.75 และน้ำต่อปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.485) ความหนาของก้อนมอร์ต้าใช้ตามระยะหุ้มเหล็ก คือ 2.0 เซนติเมตร และ 4.4 เซนติเมตร โดยความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ คือ  $\pm 2$  มิลลิเมตร

5. แท่งมอร์ต้ามาตรฐานสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ มีความกว้างและยาว 1.5 เซนติเมตร และสูง 12.0 เซนติเมตร สัดส่วนผสมเป็นเช่นเดียวกับก้อนมอร์ต้าสำหรับหุ้มเหล็กเสริม

6. แผ่นยิปซัม เป็นแผ่นยิปซัมชนิดทนไฟของบริษัท สยามยิปซัม จำกัด โดยความหนาของแผ่นยิปซัมที่ใช้ คือ 15 มิลลิเมตร

7. สีทนไฟ เป็นสีทนไฟรุ่น Firecut FM 900 ของบริษัท ไบเทค โฮลดิ้ง จำกัด โดยมีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญ คือ สารประกอบคาร์บอนชนิด Xylene ( $C_8H_{10}$ ) Blowing agent ชนิด PCA ( $C_6H_{12}O_3$ ) และ Binder agent ชนิด MIBK ( $C_6H_{12}O$ )

#### 3.5.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

##### 3.5.2.1 การเตรียมและการตรวจสอบคุณภาพอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิในการวิจัย คือ เทอร์โมคัปเปิล ซึ่งทำจากลวดโลหะผสมต่างชนิดกันแล้วเชื่อมปลายลวดข้างหนึ่งให้หลอมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นชนิด K โดยลวดเส้นหนึ่งเป็น Chromel (โลหะผสมนิกเกิลกับโครเมียม) และอีกเส้นหนึ่งเป็น Alumel (โลหะผสมนิกเกิลกับบอลูมิเนียม) เชื่อมปลายให้ติดกันด้วยวิธีการหลอมด้วยเครื่องเชื่อมแบบแก๊ส(ใช้ก๊าซออกซิเจนและอะเซทิลีน) เมื่อจุดต่อที่ปลายลวดประสานเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว ทำการทดสอบความแข็งแรงที่จุดต่อด้วยการใช้มือดึงแยกออกจากกัน

เทอร์โมคัปเปิลที่ผ่านการทดสอบความแข็งแรง จะถูกตรวจสอบความแม่นยำของการวัดอุณหภูมิ ด้วยการนำมาวัดค่าอุณหภูมิน้ำแข็งที่เริ่มละลาย(ศูนย์องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิน้ำเดือด(100 องศาเซลเซียส) ความคลาดเคลื่อนของค่าอุณหภูมิที่ยอมรับได้ คือ  $\pm 1$  องศาเซลเซียส เทอร์โมคัปเปิลที่ผ่านการคัดเลือกมาแล้วจะนำมาแยกสายออกจากกันให้มีระยะห่างพอสมควร โดยการใช้กระดาษกาวติดเป็นระยะเพื่อป้องกันการลัดวงจรเมื่อฉนวนไฟฟ้าละลาย

### 3.5.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวเหล็กเสริมและลวดเกลียวอัดแรง

การติดตั้งอุปกรณ์เริ่มจากการทำเครื่องหมายในตำแหน่งที่จะวัดอุณหภูมิ สำหรับเหล็กเสริมและลวดเกลียวอัดแรงในงานวิจัยนี้วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งกึ่งกลางความยาว การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทำโดยการนำเทอร์โมคัปเปิลที่เตรียมไว้วางทับเซรามิกไฟเบอร์ (Ceramic Fiber) โดยให้จุดปลายของเทอร์โมคัปเปิล(Node)ตรงกับตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ พันเทอร์โมคัปเปิลและเซรามิกไฟเบอร์ด้วยกระดาษกาวดังรูปที่ 3.1 จากนั้นยึดจุดปลายของสายเทอร์โมคัปเปิลติดกับผิวเหล็กด้วยกาวแรงยึดเหนี่ยวสูง แล้วพันบริเวณปลายเทอร์โมคัปเปิลด้วยกระดาษกาวอีกครั้ง

### 3.5.2.3 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่แท่งมอร์ต้ามาตรฐาน

การติดตั้งอุปกรณ์เริ่มจากการทำเครื่องหมายในตำแหน่งที่จะวัดอุณหภูมิบนแท่งมอร์ต้า ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิคือ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้น ดังรูปที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเริ่มจากการนำเทอร์โมคัปเปิลที่เตรียมไว้วางบนแท่งมอร์ต้า โดยให้ตำแหน่งจุดปลายของสายเทอร์โมคัปเปิลอยู่ตรงตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้ ยึดสายเทอร์โมคัปเปิลให้ติดกับแท่งมอร์ต้าด้วยกาวแรงยึดเหนี่ยวสูง เมื่อติดเทอร์โมคัปเปิลครบทั้ง 3 ตำแหน่ง พันทับเทอร์โมคัปเปิลด้วยเทปกาวอีกครั้ง เพื่อป้องกันการกระทบกระเทือนจากการเทและทำให้คอนกรีตสดแน่น ส่วนตำแหน่งวางแท่งมอร์ต้าแสดงดังรูปที่ 3.3

### 3.5.2.4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้น

การติดตั้งอุปกรณ์เริ่มจากการทำเครื่องหมายในตำแหน่งที่จะวัดอุณหภูมิ ตำแหน่งวัดอุณหภูมิตามมาตรฐาน ASTM E119 กำหนดให้ติดเทอร์โมคัปเปิล 1 ตัว ที่กึ่งกลางแผ่นพื้น และ 4 ตัว ที่กึ่งกลางพื้นที่ ที่ได้จากการแบ่งแผ่นพื้นออกเป็น 4 ส่วน ดังรูปที่ 3.4 การติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิเริ่มด้วยการนำเทอร์โมคัปเปิลที่

เตรียมไว้มาสอดเข้าในกระดวยแข็งที่เจาะรูไว้แล้ว จากนั้นทากาวอีพ็อกซีลงบนกระดวยแข็งแล้วติดลงบนแผ่นพื้น โดยให้ตำแหน่งจุดปลายของสายเทอร์โมคัปเปิลตรงกับตำแหน่งที่ทำเครื่องหมายไว้

### 3.5.3 การเตรียม และการทดสอบการเข้าสู่ท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง

การผสมวัสดุเกราท์เริ่มด้วยการตวงปูนซีเมนต์ น้ำ และวัสดุผสมตามน้ำหนักที่กำหนดไว้ โดยความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ คือ  $\pm 0.1$  กรัม การผสมดำเนินการตามวิธีที่มาตรฐาน ASTM C305 กำหนด

ท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ เป็นท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงสำหรับงานแผ่นพื้น โดยท่อจะถูกเปิดออกบริเวณกลางท่อเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 4 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร แล้วนำลวดอัดแรงที่ติดเทอร์โมคัปเปิลแล้วมาร้อยเข้าสู่ท่อ และดึงลวดให้ลอยขึ้นจากแผ่นพื้นด้วยเชือก ส่วนปลายท่อทั้งสองข้างปิดทับด้วยถุงพลาสติก ดังรูปที่ 3.5

การทดสอบการที่ผสมเสร็จเข้าสู่ท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง เริ่มด้วยการนำท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่เตรียมเสร็จมาวางท่ามุม 45 องศากับแนวตั้ง จากนั้นเทวัสดุเกราท์ลงช่องเปิดกลางท่อและทำการเขย่าเป็นระยะจนวัสดุเกราท์ล้นออกจากช่องเปิดดังรูปที่ 3.6 ทิ้งให้วัสดุเกราท์ก่อตัวเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วทำการพลิกท่อสลับด้านหัวกับท้าย แล้วทำการเทวัสดุเกราท์พร้อมเขย่าจนกระทั่งวัสดุเกราท์ล้นออกจากช่องเปิด ทิ้งให้วัสดุเกราท์ก่อตัวเป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้วนำท่อมาวางในแนวราบ จากนั้นตัดเชือกที่ใช้ดึงลวดให้ลอยออกพร้อมทั้งแกะถุงพลาสติกที่ปลายทั้ง 2 ข้างทิ้ง เดิมวัสดุเกราท์ที่ช่องเปิดกลางท่อจนเต็มพร้อมกับเขย่าไล่ฟองอากาศ จากนั้นปิดปลายท่อและช่องเปิดกลางท่อด้วยผ้าพลาสติกจนกระทั่งนำไปใช้งาน

### 3.5.4 แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ

การศึกษาวิธีเพิ่มความสามารถนไฟ ให้พื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบ มีดังนี้

1. ตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาผลของระยะห่างของเหล็กเสริมที่มีต่อการหลุดร่อนของคอนกรีต ระยะห่างเหล็กเสริมที่ใช้ คือ 20 และ 40 เซนติเมตร รายละเอียดของการเสริมเหล็กและการจัดวางแนวท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงแสดงดังรูปที่ 3.7 ในรูปที่ 3.8 แสดงแบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้

2. ตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาผลของระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ที่มีต่ออัตราการเพิ่มอุณหภูมิ ลวดเกลียวอัดแรง ระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ คือ 3.2 และ 5.6 เซนติเมตร รายละเอียดของการเสริมเหล็กและแนวท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงแสดงดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 แสดงแบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้

3. ตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาผลจากการเพิ่มความสามารถนไฟ ของวัสดุผสมที่นำมาเติมในวัสดุเกราท์ วัสดุผสมที่ใช้ศึกษา ได้แก่ เถ้าลอย ฟูนหินปูนและเพอร์ไลท์ โดยใช้วัสดุผสมเพิ่มในสัดส่วนร้อยละ 50 โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ และใช้ซีเมนต์เฟลส์ที่ไม่ผสมวัสดุผสมเพิ่มเป็นเกณฑ์สำหรับเปรียบเทียบ ภายในตัวอย่าง

แผ่นพื้นประกอบด้วยท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงทั้งสิ้น 12 ท่อ(3 ท่อต่อวัสดุผสม 1 ชนิด และ 3 ท่อสำหรับซีเมนต์ เพลสท์ที่ไม่ผสมวัสดุผสมเพิ่ม) รายละเอียดของการเสริมเหล็ก และการวางแนวท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง แสดง ดังรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 แสดงแบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้

4. ตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาความเหมาะสมในการเพิ่มความสามารถทนไฟให้พื้นคอนกรีตอัดแรง ด้วย แผ่นยิปซัม ความหนาของแผ่นยิปซัมที่ใช้ในการทดสอบ คือ 1.5 และ 3 เซนติเมตร โดยรายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.13 ในรูปที่ 3.14 แสดงแบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และรูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่างทดสอบที่ติดตั้งแผ่นยิปซัมเสร็จสมบูรณ์แล้ว

5. ตัวอย่างทดสอบเพื่อศึกษาความเหมาะสมในการเพิ่มความสามารถทนไฟให้พื้นคอนกรีตอัดแรง ด้วย สีทนไฟ ความหนาของสีที่ใช้ คือ 1200 และ 2400 ไมครอน รายละเอียดของตัวอย่างทดสอบแสดงดังรูปที่ 3.16 ในรูปที่ 3.17 แสดงแบบหล่อตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และรูปที่ 3.18 แสดงตัวอย่างทดสอบที่ทำสีทนไฟเสร็จสมบูรณ์แล้ว

### 3.5.5 การควบคุมสถานะของตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบทั้ง 5 กรณี ในหัวข้อที่ 3.5.4 ต้องนำข้อมูลอุณหภูมิมาทำการเปรียบเทียบกัน จึงจำเป็นต้องที่จะต้องควบคุมปัจจัยบางประการของตัวอย่างทดสอบให้เหมือนกัน โดยรายละเอียดของปัจจัยที่ควบคุม มีดังนี้

1. ความหนาของแผ่นพื้น ใช้ความหนาน้อยที่สุดตามข้อกำหนดในมาตรฐานอาคารคอนกรีตอัดแรง (มาตรฐาน ว.ส.ท.1009-34 ข้อ 9.2) คือ 12 เซนติเมตร
2. ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต ออกแบบตามวิธีของ ACI โดยออกแบบให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน ไม่ต่ำกว่า 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และขนาดใหญ่สุดของวัสดุผสมหยาบ คือ 2 นิ้ว
3. ความชื้นของทรายและเพอร์ไลต์ ควบคุมไว้ที่สถานะอิ่มตัวผิวแห้ง(SSD)
4. การบ่มคอนกรีตใช้วิธีลดการสูญเสียความชื้น โดยคลุมตัวอย่างด้วยกระดาษเปียกเป็นเวลา 28 วัน จากนั้นทิ้งตัวอย่างให้แห้งในสภาพแวดล้อมปกติจนกระทั่งทดสอบ

### 3.6 ผลทดสอบวัสดุที่ใช้เป็นองค์ประกอบของแผ่นพื้น

#### 3.6.1 ค่าหน่วยแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก( $f_c'$ )

ผลการทดสอบค่าหน่วยแรงอัดประลัยของแท่งคอนกรีตทรงกระบอก สำหรับแต่ละตัวอย่างแผ่นพื้น มีรายละเอียด ดังนี้

- |  |                |
|--|----------------|
| หน่วยแรงอัดประลัยเฉลี่ย ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)          | มีค่า 522 ksc. |
| หน่วยแรงอัดประลัยเฉลี่ย ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว) | มีค่า 483 ksc. |

หน่วยแรงอัดประลัยเฉลี่ย ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นอิปซัมที่ผิวล่าง)	มีค่า 467 ksc.
หน่วยแรงอัดประลัยเฉลี่ย ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)	มีค่า 532 ksc.
หน่วยแรงอัดประลัยเฉลี่ย ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)	มีค่า 507 ksc.

### 3.6.2 ค่าเวลาการไหลของวัสดุเกราท (มาตรฐาน ASTM C939)

ผลทดสอบค่าเวลาการไหลของวัสดุเกราทด้วยกรวยการไหล แสดงดังรูปที่ 3.19 โดยสัดส่วนของวัสดุที่ใช้ผสมเป็นไปตามตารางที่ 3.4 จากผลการทดสอบพบว่าวัสดุเกราทที่ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่ม จะมีค่าเวลาการไหลสูงที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมอื่นที่สัดส่วนเดียวกัน ค่าเวลาการไหลที่สูงนี้เป็นผลจากรูปร่างของอนุภาคฝุ่นหินปูนที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม ซึ่งส่งผลให้อัตราการเพิ่มค่าเวลาการไหลตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่มที่เพิ่มขึ้นของวัสดุเกราทที่ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่ม จะมีค่าสูงกว่าวัสดุเกราทที่ใช้เถ้าลอยและเพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ส่วนวัสดุเกราทที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่ม มีค่าเวลาการไหลต่ำสุดเนื่องจากอนุภาคของเถ้าลอยมีลักษณะใกล้เคียงกับทรงกลม จึงมีแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคน้อยกว่าอนุภาคที่มีลักษณะเหลี่ยม

สำหรับวัสดุเกราทที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มค่าระยะเวลาการไหลที่วัดได้จะไม่ถูกต้อง เนื่องมาจากภายหลังการทดสอบมีเพอร์ไลต์บางส่วนติดอยู่ภายในกรวยการไหลพอสมควร สาเหตุของการแยกตัวดังกล่าวเกิดจากความหนาแน่นของเพอร์ไลต์เบากว่าส่วนผสมของปูนซีเมนต์กับน้ำ ดังนั้นการนำวัสดุเกราทที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มไปใช้กับท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่มีช่องว่างขนาดเล็ก อาจทำให้เพอร์ไลต์แยกตัวและอุดตันภายในท่อได้ การลดปัญหาการแยกตัวสามารถแก้ไข ด้วยการลดขนาดใหญ่สุดของเพอร์ไลต์และทั้งวัสดุเกราทที่ผสมเสร็จแล้วให้สูญเสียค่าการยุบตัวเล็กน้อย ก่อนนำวัสดุเกราทไปใช้งาน

### 3.6.3 กำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุเกราท (มาตรฐาน ASTM C109)

ผลการทดสอบวัสดุเกราทที่ใช้เถ้าลอย ฝุ่นหินปูนและเพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ที่อายุ 3 วัน แสดงดังรูปที่ 3.20 ที่อายุ 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3.21 และที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 3.22 จากการทดสอบพบว่าวัสดุเกราทที่ใช้เถ้าลอยและฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มจะทำให้กำลังต้านทานแรงอัดสูงขึ้นตามปริมาณวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ เนื่องจากสัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์และวัสดุผสมเพิ่มมีค่าลดลง โดยวัสดุเกราทที่ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มจะมีกำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่า เนื่องจากฝุ่นหินปูนมีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าเถ้าลอย ทำให้ที่สัดส่วนผสมเดียวกันวัสดุเกราทที่ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่ม มีปริมาณปูนซีเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรสูงกว่าจึงมีกำลังต้านทานแรงอัดที่สูงกว่า สำหรับวัสดุเกราทที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม พบว่ากำลังต้านทานแรงอัดมีค่าลดลงเมื่อปริมาณวัสดุผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคเพอร์ไลต์มีความพรุนภายในสูงทำให้วัสดุเกราทสามารถยุบตัวตามแนวแรงอัดได้มาก ดังนั้นวัสดุเกราทที่มีปริมาณเพอร์ไลต์ต่อหน่วยปริมาตรสูง ค่ากำลังต้านทานแรงอัดจะยิ่งน้อยลง

กำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุเกราทของวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงขึ้นตามอายุ และที่อายุ 28 วันพบว่าวัสดุเกราทที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่ม เริ่มมีค่ากำลังต้านทานแรงอัดสูงกว่าวัสดุเกราทที่ใช้ฝุ่นหินปูน

เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ทั้งนี้เนื่องจากผลของปฏิกิริยาปอซโซลานิก ซึ่งโดยทั่วไปสามารถเกิดได้ตั้งแต่วัสดุเกราที่อายุ 7 วัน และกำลังต้านทานแรงอัดมีแนวโน้มที่สูงขึ้นหลังอายุ 28 วันไปแล้ว

### 3.6.4 กำลังต้านทานแรงดึงของวัสดุเกราที่ (มาตรฐาน ASTM C190)

ผลการทดสอบวัสดุเกราที่ใช้เถ้าลอย ฟูนหินปูนและเพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่อายุ 3 วันแสดงดังรูปที่ 3.23 ที่อายุ 7 วัน แสดงดังรูปที่ 3.24 และที่อายุ 28 วัน แสดงดังรูปที่ 3.25 จากการทดสอบพบว่าแนวโน้มของกำลังต้านทานแรงดึงเป็นไปในลักษณะเดียวกับกำลังต้านทานแรงอัด และผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.6.3 สำหรับวัสดุเกราที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม ค่ากำลังต้านทานแรงดึงจะลดลงเมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของเพอร์ไลต์ต่อปูนซีเมนต์เพิ่มขึ้น เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของเพอร์ไลต์มีค่าต่ำกว่าปูนซีเมนต์มาก เมื่อใช้เพอร์ไลต์เป็นสัดส่วนโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์ จะทำให้ปริมาณปูนซีเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรของวัสดุเกราที่ลดลงมาก

### 3.6.5 กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราที่ กับลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น

วิธีการทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C234 ตัวอย่างทดสอบที่ใช้ทำจากวัสดุเกราที่ทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ขนาดความกว้าง 20 เซนติเมตร และฝังลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้นแทนเหล็กเสริมปกติ ผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่มในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนไถล แสดงดังรูปที่ 3.26 พบว่าถ้าใช้แรงดึงลวดเกลียวอัดแรงในมาตราส่วนที่ขยายเกินไปจะได้ค่าแรงดึงสูงสุดมากเกินไป และระยะเลื่อนไถลสูงสุดสั้นลง ในรูปที่ 3.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนไถลของวัสดุเกราที่ใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดแปรผันตามปริมาณเถ้าลอยที่ใช้ รูปที่ 3.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนไถลของวัสดุเกราที่ใช้ฟูนหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าความชันของกราฟความสัมพันธ์มีค่าใกล้เคียงกับวัสดุเกราที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่ม ทั้งนี้เนื่องจากความถ่วงจำเพาะของฟูนหินปูนและปูนซีเมนต์มีค่าต่างกันไม่มาก ทำให้วัสดุเกราที่ใช้ฟูนหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มมีปริมาณปูนซีเมนต์มากกว่าวัสดุเกราที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มชนิดอื่น ๆ ประกอบกับลักษณะอนุภาคของฟูนหินปูนที่เป็นเหลี่ยม ทำให้แรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างวัสดุเกรากับลวดเกลียวอัดแรงสูงขึ้น ในรูปที่ 3.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวกับระยะเลื่อนไถลของวัสดุเกราที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ลดลงตามปริมาณของเพอร์ไลต์ที่ใช้ ซึ่งเป็นผลจากการที่อนุภาคเพอร์ไลต์มีความสามารถยวบตัวสูง กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มจึงขึ้นกับปริมาณปูนซีเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรเป็นหลัก

การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกรากับลวดเกลียวอัดแรง พบว่าเมื่อสัดส่วนของเถ้าลอยและฟูนหินปูนสูงขึ้น จะทำให้วัสดุเกราที่แตกออกในระหว่างการทดสอบดังรูปที่ 3.30 เนื่องจากผลของแรงบิดที่เกิดจากเกลียวของลวดเกลียวอัดแรง

### 3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกรท

การทดสอบใช้ตัวอย่างทดสอบที่ทำจากวัสดุเกรท รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความกว้าง 1 ฟุต หนา 1 นิ้ว ตัวอย่างทดสอบที่ส่งไปทดสอบยังกรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์ ประกอบไปด้วย

1. CC - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.45
2. FF - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.45 สัดส่วนเถ้าลอยต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.50
3. LL - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.45 สัดส่วนฝุ่นหินปูนต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.50
4. PP - ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.45 สัดส่วนเพอร์ไลต์ต่อปูนซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 0.50

ผลการทดสอบได้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนแสดงในภาคผนวก ข. โดยสรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกรท CC	มีค่า $0.224 Wm^{-1}K^{-1}$
2. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกรท FF	มีค่า $0.339 Wm^{-1}K^{-1}$
3. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกรท LL	มีค่า $0.195 Wm^{-1}K^{-1}$
4. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกรท PP	มีค่า $0.116 Wm^{-1}K^{-1}$

### 3.7 ผลการทดสอบคุณสมบัติของ เถ้าลอย ฝุ่นหินปูน และเพอร์ไลต์

ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยแสดงดังตารางที่ 3.5 ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของเถ้าลอยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.99 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะฝุ่นหินปูนแสดงดังตารางที่ 3.6 โดยความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของฝุ่นหินปูนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.73

ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะและการดูดซึมน้ำของเพอร์ไลต์แสดงดังตารางที่ 3.7 พบว่าค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้(แห้งด้วยเตาอบ)ของเพอร์ไลต์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.53 ปกติเพอร์ไลต์จะมีค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้(แห้งด้วยเตาอบ)อยู่ระหว่าง 2.2 ถึง 2.4 ทั้งนี้เนื่องจากเพอร์ไลต์ที่ใช้ในงานด้านอค์คิย์จำเป็นต้องมีความถ่วงจำเพาะต่ำเพื่อลดน้ำหนักขององค์อาคาร ค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้(อิมตัวผิวแห้ง)ของเพอร์ไลต์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.87 ความถ่วงจำเพาะปรากฏ(แห้งด้วยเตาอบ)ของเพอร์ไลต์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 ค่าการดูดซึมน้ำของเพอร์ไลต์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 63.26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ปกติเพอร์ไลต์ที่พบทั่วไปจะมีการดูดซึมน้ำอยู่ระหว่าง 200 ถึง 600 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

ผลการวิเคราะห์ขนาดผลของเพอร์ไลต์ด้วยตะแกรง และค่าโมดูลัสความละเอียดแสดงดังตารางที่ 3.8 พบว่าเพอร์ไลต์มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 2.83 โดยขนาดใหญ่มากที่สุดของเพอร์ไลต์สามารถติดค้างบนตะแกรงเบอร์ 8



### 3.8 ผลการทดสอบหาความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว

#### 3.8.1 การควบคุมอุณหภูมิภายในเตา

งานวิจัยนี้ดำเนินการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา ตามกราฟมาตรฐานสำหรับการทดสอบอัคคีภัยที่ระบุในมาตรฐาน ASTM E119 จากข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม) เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.31 และรูปที่ 3.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในเตากับเวลา ความคลาดเคลื่อนพิจารณาจากพื้นที่ได้กราฟในรูปที่ 3.32 พบว่าอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

จากข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว) เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในเตากับเวลา ความคลาดเคลื่อนพิจารณาจากพื้นที่ได้กราฟในรูปที่ 3.34 พบว่าอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

จากข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง) เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในเตากับเวลา ความคลาดเคลื่อนพิจารณาจากพื้นที่ได้กราฟในรูปที่ 3.36 พบว่าอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด ที่เวลา 78 นาที อุณหภูมิภายในเตาตกลงเล็กน้อย เนื่องจากแผ่นยิปซัมเริ่มหลุดออกจากแผ่นพื้น เป็นผลให้ความร้อนภายในเตาถ่ายเทเข้าสู่แผ่นพื้นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ระยะเวลาการทดสอบแผ่นพื้นที่ 3 สั้นกว่าช่วงเวลาที่อุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงถึงค่าวิกฤติ โดยสาเหตุของการยุติการทดสอบในช่วงเวลาอันสั้น มีดังนี้

1. ภายหลังจากที่ 78 เกิดเสียงปะทุภายในเตา ภายหลังจากจึงทราบว่าเป็นการระเบิดออกของผิวคอนกรีต ซึ่งสาเหตุการเกิดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2
2. ภายหลังจากที่ 78 พบการหลุดร่อนของแผ่นยิปซัมผ่านทางช่องสังเกตุการณ์ภายในเตา แผ่นยิปซัมที่หลุดออกมีขนาดใหญ่พอที่จะบังหัวตะเกียง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เปลวไฟวิ่งย้อนกลับสู่แหล่งจ่ายเชื้อเพลิงเหลวได้

จากข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง) เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.37 และรูปที่ 3.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในเตากับเวลา ความคลาดเคลื่อนพิจารณาจากพื้นที่ได้กราฟในรูปที่ 3.38 พบว่าอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

จากข้อมูลอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท์) เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.39 และรูปที่ 3.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิภายในเตากับเวลา ความคลาดเคลื่อนพิจารณาจากพื้นที่ได้กราฟในรูปที่ 3.40 พบว่าอุณหภูมิภายในเตาขณะทำการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

### 3.8.2 อุณหภูมิบนผิว ด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟของแผ่นพื้น

มาตรฐาน ASTM E119 กำหนดให้ติดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ที่ผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟไว้ 5 ตำแหน่งตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2.2 จากข้อมูลอุณหภูมิผิวบนของแผ่นพื้นที่ขณะทำการทดสอบของแผ่นพื้นที่ 1 ถึง 5 เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.41 ถึง 3.45 ตามลำดับ

จากการทดสอบพบว่าที่เวลา 180 นาที ที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นพื้นมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่า 170 องศาเซลเซียส และที่เวลา 240 นาที พบว่าอุณหภูมิสูงสุดบนแผ่นพื้นมีค่าต่ำกว่า 210 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาจากข้อกำหนดเกี่ยวกับจุดสิ้นสุดสภาพการเป็นฉนวนความร้อนตามมาตรฐาน ASTM E119 ซึ่งกำหนดให้อุณหภูมิของผิวสัมผัสด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟสูงขึ้น 140 องศาเซลเซียส หรืออุณหภูมิที่จุดใดจุดหนึ่งภายในองค์อาคารสูงขึ้น 180 องศาเซลเซียส สามารถสรุปได้ว่า แผ่นพื้นคอนกรีตที่มีความหนา 12 เซนติเมตร มีจุดสิ้นสุดสภาพการเป็นฉนวนความร้อนที่เวลาประมาณ 3 ชั่วโมงหลังจากเริ่มสัมผัสเปลวไฟ

### 3.8.3 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ในแผ่นพื้น

อุณหภูมิคอนกรีตภายในแผ่นพื้นทำการวัดที่ระดับความสูง 3,6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้น โดยตำแหน่งที่วัดใช้ตามตำแหน่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ จากข้อมูลอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 1 แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.46 ถึง 3.48 ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิมิบริเวณขอบล่างของแผ่นพื้นมีค่าต่ำกว่าบริเวณอื่น ทั้งนี้เนื่องจากตำแหน่งของหัวตะเกียงที่ขอบด้านดังกล่าวอยู่ต่ำกว่าหัวตะเกียงที่ขอบบน ดังแสดงในรูปที่ ก-1

จากข้อมูลอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.49 ถึง 3.51 ตามลำดับ พบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิมิมีความใกล้เคียงกับข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 1 ข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 3 แสดงดังรูปที่ 3.52 ถึง 3.54 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิมิบริเวณด้านซ้ายของแผ่นพื้นมีค่าสูงกว่าด้านขวา เนื่องจากที่ผิวล่างของแผ่นพื้นด้านซ้ายเสริมแผ่นยิปซัมหนา 15 มิลลิเมตร ซึ่งน้อยกว่าด้านขวาครึ่งหนึ่ง ข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 4 แสดงดังรูปที่ 3.55 ถึง 3.57 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอุณหภูมิมิบริเวณด้านซ้ายของแผ่นพื้นมีค่าสูงกว่าด้านขวา เนื่องจากที่ผิวล่างของแผ่นพื้นด้านซ้ายทาสีทนไฟหนา 1200 ไมครอน ซึ่งน้อยกว่าด้านขวาครึ่งหนึ่ง ข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 5 แสดงดังรูปที่ 3.58 ถึง 3.60 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าแนวโน้มของอุณหภูมิมิมีความใกล้เคียงกับข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 1

### 3.8.4 อุณหภูมิของเหล็กเสริม

ตำแหน่งของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของเหล็กเสริม คือ บริเวณกึ่งกลางความยาวของเหล็กเสริมที่ขนานกับท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ติดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่เหล็กเสริมที่วางเรียงกัน 5 เส้นในบริเวณกลางแผ่นพื้น จากข้อมูลอุณหภูมิเหล็กเสริมทั้ง 5 เส้นของแผ่นพื้นที่ 1 ถึง 5 เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ได้ดังรูปที่ 3.61 ถึง 3.65 ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิเหล็กเสริมเส้นที่ 5 ของแผ่นพื้นที่ 2 พบว่าอุณหภูมิมีค่าต่ำ เนื่องจากผลของระยะหุ้มเหล็กเสริมที่มากกว่า อุณหภูมิเหล็กเสริมเส้นที่ 1 และ 2 ของแผ่นพื้นที่ 3 และ 4 มีค่าสูงกว่าตำแหน่งอื่น เนื่องจากผลของความหนาแผ่นยิปซัมและสีทนไฟตามลำดับ

### 3.8.5 อุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรง ชนิดลวด 7 เส้น

ตำแหน่งและวิธีติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรง ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.5.2.2 และ 3.5.3 จากข้อมูลอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงทั้ง 4 เส้น ของแผ่นพื้นที่ 1 เขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาได้ดังรูปที่ 3.66 พบว่าอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงทั้ง 4 เส้นมีค่าใกล้เคียงกัน ข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 2 แสดงดังรูปที่ 3.67 พบว่าลวดเกลียวอัดแรงเส้นที่ 3 และ 4 มีค่าต่ำกว่ามาก ซึ่งเป็นผลจากระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่มากกว่า ข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 3 แสดงดังรูปที่ 3.68 พบว่าลวดเกลียวอัดแรงเส้นที่ 3 และ 4 มีค่าต่ำกว่าเส้นที่ 1 และ 2 ทั้งนี้เป็นผลจากแผ่นยิปซัมที่หนากว่า ข้อมูลของแผ่นพื้นที่ 4 แสดงไว้ในรูปที่ 3.69 พบว่าลวดเกลียวอัดแรงเส้นที่ 3 และ 4 มีค่าต่ำกว่าเส้นที่ 1 และ 2 ทั้งนี้เป็นผลจากสีทนไฟที่หนากว่า

ข้อมูลอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงภายในท่อร้อยลวดที่ใช้วัสดุเกราท์ที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่ม ของแผ่นพื้นที่ 5 แสดงดังรูปที่ 3.70 ส่วนข้อมูลอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงภายในท่อร้อยลวดที่ใช้ถ้ำลอย ฝุ่นหินปูน และเพอร์ไลต์ เป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์แสดงดังรูปที่ 3.71 ถึง 3.73 ตามลำดับ โดยวัสดุผสมเพิ่มแต่ละชนิดมีปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ รูปที่ 3.74 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิเฉลี่ยของลวดเกลียวอัดแรงภายในท่อร้อยลวดที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มต่างชนิดกันให้ผลต่างกันไม่มาก เนื่องจากท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงที่ใช้ในงานพื้นคอนกรีตอัดแรงมีลักษณะหน้าตัดที่แบน ทำให้ความหนาของชั้นวัสดุเกราท์ที่อยู่ใต้ลวดเกลียวอัดแรงมีค่าน้อย รูปที่ 3.74 พบว่าเพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่ให้ค่าอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงต่ำที่สุด

### 3.8.6 การหลุดร่อนของคอนกรีต ภายหลังจากทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้น

ภายหลังจากทดสอบหาความสามารถทนไฟของแผ่นพื้น พบว่าแผ่นพื้นที่ 3 (เสริมแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง) เกิดการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีต การหลุดร่อนพบมากบริเวณขอบของแผ่นพื้นและในบางบริเวณที่เกิดการหลุดร่อนสามารถมองเห็นเหล็กเสริม สาเหตุการเกิดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.2 ส่วนแผ่นพื้นที่ที่เหลือเกิดการหลุดร่อนชนิดการหลุดลอกบริเวณผิวของคอนกรีต ซึ่งจะเกิดมากในช่วงการเย็นตัวของคอนกรีต

สาเหตุการเกิดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.5.3 รูปที่ 3.75 ถึง 3.79 แสดงการหลุดร่อนของแผ่นพื้น 1 ถึง 5 ภาย หลังการทดสอบหาความสามารถทนไฟตามลำดับ

### 3.9 สรุป

จากการทดสอบแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงคิงภายหลังชนิดยัดเหนียว สรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1. การลดระยะห่างเหล็กเสริมจาก 40 เป็น 20 เซนติเมตร ให้ผลการหลุดร่อนของคอนกรีตไม่แตกต่างกัน
2. การเพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงจาก 3.2 เป็น 5.6 เซนติเมตร พบว่าอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงมีค่าลดลงอย่างมาก โดยลวดเกลียวอัดแรงที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว 5.6 เซนติเมตร จะมีอุณหภูมिन้อยกว่าค่าวิกฤติตลอดช่วงการทดสอบ 4 ชั่วโมง
3. การติดแผ่นยิปซัมโดยตรงที่ผิวล่างของแผ่นพื้น ทำให้เกิดการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีต
4. สีทนไฟที่ใช้ในการทดสอบ ช่วยลดอุณหภูมิของแผ่นพื้นได้ดีในช่วง 2 ชั่วโมงแรก ของการทดสอบ โดยอุณหภูมิของแผ่นพื้นจะลดลงเมื่อความหนาของสีทนไฟเพิ่มขึ้น
5. การเติมวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์ สามารถลดอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงได้เพียงเล็กน้อย โดยเพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่ทำให้อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมเพิ่มตัวอื่น แต่กำลังต้านทานแรงต่าง ๆ ของวัสดุเกราท์ที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม จะลดลงตามปริมาณเพอร์ไลต์ที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 3.1 การจำแนกองค์อาคารตามสภาพการยึดรั้ง ที่ของฐานรองรับตามมาตรฐาน ASTM E119

Type of Building element	Classification
<p>1. Wall bearing:</p> <p>Single span and simply supported end spans of multiple bays:</p> <p>(1) Open-web steel joists or steel beams, supporting concrete slab, precast units, or metal decking</p> <p>(2) Concrete slabs, precast units or metal decking</p> <p>Interior spans of multiple bays:</p> <p>(1) Open-web steel joists, steel beams or metal decking, supporting continuous concrete slab</p> <p>(2) Open-web steel joists or steel beams, supporting precast units or metal decking</p> <p>(3) Cast-in place concrete slab systems</p> <p>(4) Precast concrete where the potential thermal expansion is resisted by adjacent construction</p>	<p>Unrestrained</p> <p>Unrestrained</p> <p>Restrained</p> <p>Unrestrained</p> <p>Restrained</p> <p>Restrained</p>
<p>2. Steel framing:</p> <p>(1) Steel beams welded, riveted, or bolted to the framing members</p> <p>(2) All types of cast-in-place floor and roof systems (such as beam-and-slabs, flat slabs, pan joists, and waffle slabs) where the floor or roof system is secured to the framing members</p> <p>(3) All type of prefabricated floor or roof systems where the structural members are secured to the framing members and the potential thermal expansion of the floor or roof system is resisted by the framing system or the adjoining floor or roof construction</p>	<p>Restrained</p> <p>Restrained</p> <p>Restrained</p>
<p>3. Concrete framing:</p> <p>(1) Beams securely fastened to the framing members</p> <p>(2) All types of cast-in-place floor or roof systems (such as beam-and-slabs, flat slabs, pan joists, and waffle slabs) where the floor system is cast with the framing members</p> <p>(3) Interior and exterior spans of precast systems with cast-in-place joints resulting in restraint equivalent to that which would exist in condition 3(1)</p> <p>(4) All types of prefabricated floor or roof systems where the structural members are secured to such systems and the potential thermal expansion of the floor or roof systems is resisted by the framing system or the adjoining floor or roof construction</p>	<p>Restrained</p> <p>Restrained</p> <p>Restrained</p> <p>Restrained</p>

4. Wood construction: All types	Unrestrained
------------------------------------	--------------

ตารางที่ 3.2 ความหนาแน่นที่สุคของแผ่นพื้นสำหรับระยะเวลาคงทนต่อเพลิงไหม้ต่าง ๆ ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1009-34)

ชนิดวัสดุผสมหยาบ	ความหนาของแผ่นพื้น(มม.) สำหรับระยะเวลาคงทนต่อเพลิงไหม้				
	1 ชม.	1-1/2 ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
คาร์บอเนต(Carbonate)	85	100	115	150	165
ซิลิเซียส(Siliceous)	90	110	125	155	175

ตารางที่ 3.3 ระยะหุ้มเหล็กเสริมอัดแรงน้อยที่สุด ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง (มาตรฐาน ว.ส.ท. 1009-34)

สภาพการเห็นขรุ้ง	ชนิดวัสดุผสมหยาบ	ความหนาของคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมอัดแรง(มม.) สำหรับระยะเวลาคงทนต่อเพลิงไหม้				
		1 ชม.	1-1/2ชม.	2 ชม.	3 ชม.	4 ชม.
ไม่เห็นขรุ้ง	คาร์บอเนต	20	25	35	45	-
ไม่เห็นขรุ้ง	ซิลิเซียส	20	30	40	55	-
มีการเห็นขรุ้ง	คาร์บอเนต	20	20	20	25	30
มีการเห็นขรุ้ง	ซิลิเซียส	20	20	20	25	30

ตารางที่ 3.4 สัดส่วนผสมของวัสดุเกร้าท์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

	ชนิดของวัสดุเกร้าท์															
	CC	F1	F2	F3	F4	FF	L1	L2	L3	L4	LL	P1	P2	P3	P4	PP
1.ชนิดปูนซีเมนต์ที่ใช้	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่1 ตามASTM C150															
2.ชนิดวัสดุผสมเพิ่ม	-	เถ้าลอย					ฝุ่นหินปูน					เพอร์ไลท์				
3.ปริมาณวัสดุผสมเพิ่ม (ร้อยละโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์)	-	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
4.สัดส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ โดยน้ำหนัก	0.45					0.45					0.45					
5.ชนิดสารลดน้ำอย่างมาก	ตามASTM C494ชนิดF มีสารเคมีพื้นฐานเป็นเมลามีนฟอร์มาลดีไฮด์คอนเดนเสท															
6.ปริมาณสารลดน้ำอย่างมาก (ร้อยละโดยน้ำหนักปูนซีเมนต์)	2					2					2					

ตารางที่ 3.5 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของเถ้าลอย

รายละเอียด	ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2
ปริมาตรตั้งต้น ขวดชมพู (มิลลิลิตร)	0.4	0.4
น้ำหนัก เถ้าลอยรวมภาชนะ (กรัม)	153.27	160.21
ปริมาตรสุดท้าย ขวดชมพู (มิลลิลิตร)	19.2	19.1
น้ำหนักสุดท้าย เถ้าลอยรวมภาชนะ (กรัม)	115.57	123.28
น้ำหนัก เถ้าลอยที่ใช้ (กรัม)	37.70	36.93
ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (มิลลิลิตร)	18.8	18.7
ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้	2.0	1.97
เฉลี่ย	1.99	

ตารางที่ 3.6 การหาค่าความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ของฝุ่นหินปูน

รายละเอียด	ตัวอย่างที่1	ตัวอย่างที่2	ตัวอย่างที่3
ปริมาตรตั้งต้น ขวดชมพู (มิลลิลิตร)	0.7	0.6	0.4
น้ำหนัก ฝุ่นหินปูนรวมภาชนะ (กรัม)	180.08	189.69	249.8
ปริมาตรสุดท้าย ขวดชมพู (มิลลิลิตร)	20.6	21.7	21.2
น้ำหนักสุดท้าย ฝุ่นหินปูนรวมภาชนะ (กรัม)	125.68	131.71	193.22
น้ำหนัก ฝุ่นหินปูนที่ใช้ (กรัม)	54.4	57.98	56.58
ปริมาตรที่ถูกแทนที่ (มิลลิลิตร)	19.9	21.1	20.8
ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้	2.73	2.75	2.72
เฉลี่ย	2.73		

ตารางที่ 3.7 การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะและค่าการดูดซึมน้ำของเพอร์ไลต์

ตัวอย่างที่	1	2	3	ค่าเฉลี่ย
น้ำหนักภาชนะ (กรัม)	63.33	60.49	60.90	
น้ำหนักภาชนะกับเพอร์ไลต์ (กรัม)	164.26	163.91	162.10	
น้ำหนักเพอร์ไลต์ที่สภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (กรัม)	100.93	103.42	101.20	
น้ำหนักขวดชมพู (กรัม)	159.45	159.45	159.90	
น้ำหนักขวดชมพูใส่เพอร์ไลต์และน้ำ (กรัม)	645.50	652.40	604.90	
น้ำหนักขวดชมพูใส่น้ำ (กรัม)	656.60	656.80	656.80	
น้ำหนักภาชนะใส่เพอร์ไลต์ที่อบแห้ง (กรัม)	123.20	124.20	124.60	
น้ำหนักเพอร์ไลต์แห้ง (กรัม)	59.87	63.71	63.70	
การดูดซึมน้ำ (%AC)	68.58	62.33	58.87	63.26
ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ (แห้งด้วยเตาอบ)	0.58	0.59	0.42	0.53
ความถ่วงจำเพาะเนื้อแท้ (ที่อิ่มตัวผิวแห้ง)	0.98	0.96	0.66	0.87
ความถ่วงจำเพาะปรากฏ (แห้งด้วยเตาอบ)	0.97	0.94	0.55	0.82

ตารางที่ 3.8 การวิเคราะห์เพอร์ไลต์ด้วยตะแกรง และค่าโมดูลัสความละเอียด

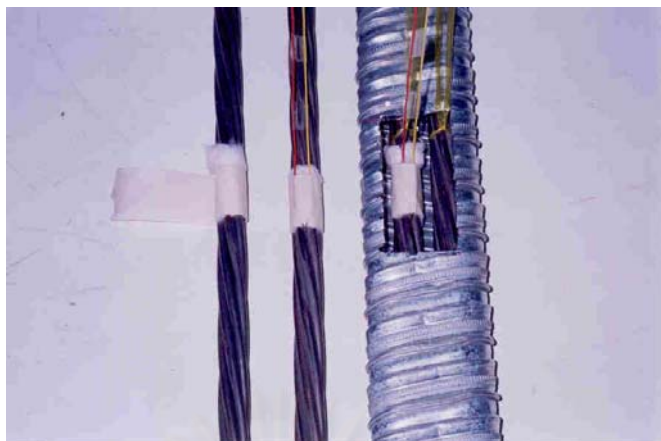
น้ำหนักตะแกรงเปล่า 61.6 กรัม

เบอร์ตะแกรง	น้ำหนักตะแกรง (กรัม)	น้ำหนักเพอร์ไลต์ (กรัม)	ร้อยละที่ค้างบน ตะแกรงแต่ละขนาด	ร้อยละสะสมบน ตะแกรงแต่ละขนาด
8	69.0	7.4	6.19	6.19
16	81.0	19.4	16.22	22.41
20	80.4	18.8	15.72	38.13
30	85.4	23.8	19.90	58.03
40	80.4	18.8	15.72	73.75
50	74.9	13.3	11.12	84.87
ถัด	79.7	18.1	15.13	-
รวม		119.6	100	283.36

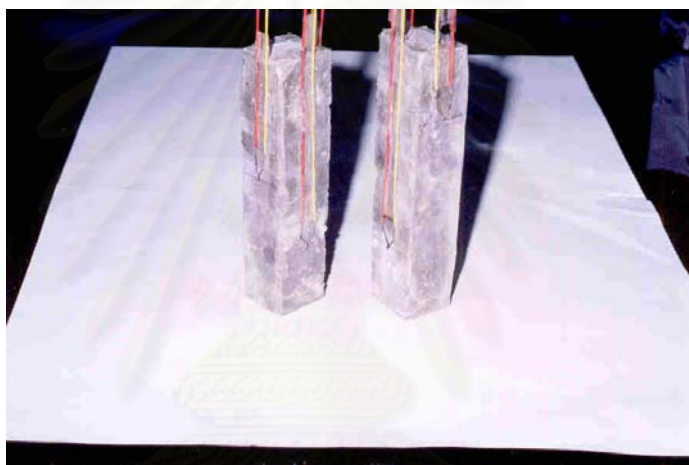
ค่าโมดูลัสความละเอียด =  $283.36/100 = 2.83$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

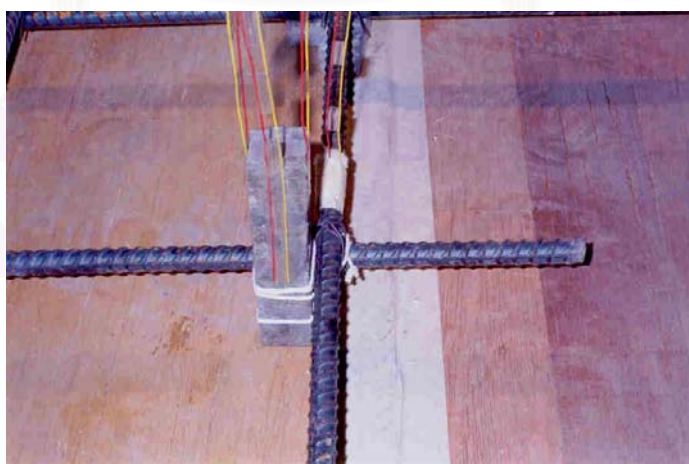




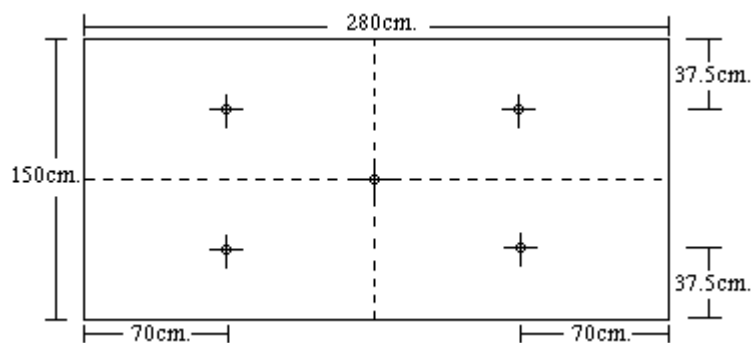
รูปที่ 3.1 แสดงวิธีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล บนลวดเกลียวอัดแรง ชนิดลวด 7 เส้น



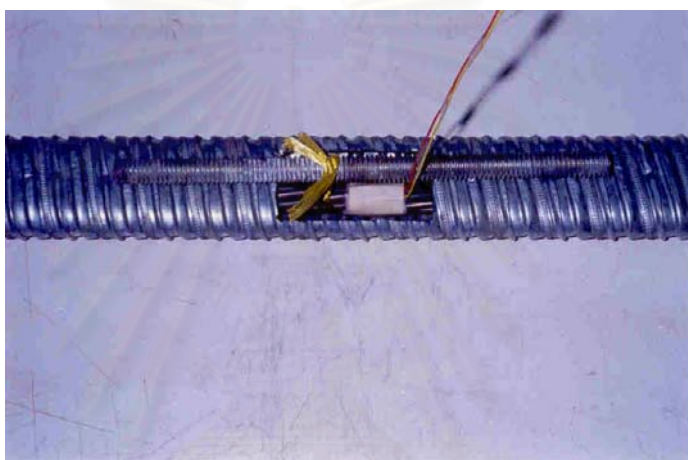
รูปที่ 3.2 แสดงวิธีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนแท่งมอร์ต้า สำหรับวัดอุณหภูมิภายในตัวอย่างแผ่นพื้น



รูปที่ 3.3 วิธีการติดตั้งแท่งมอร์ต้าสำหรับวัดอุณหภูมิคอนกรีตของตัวอย่างแผ่นพื้นที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร



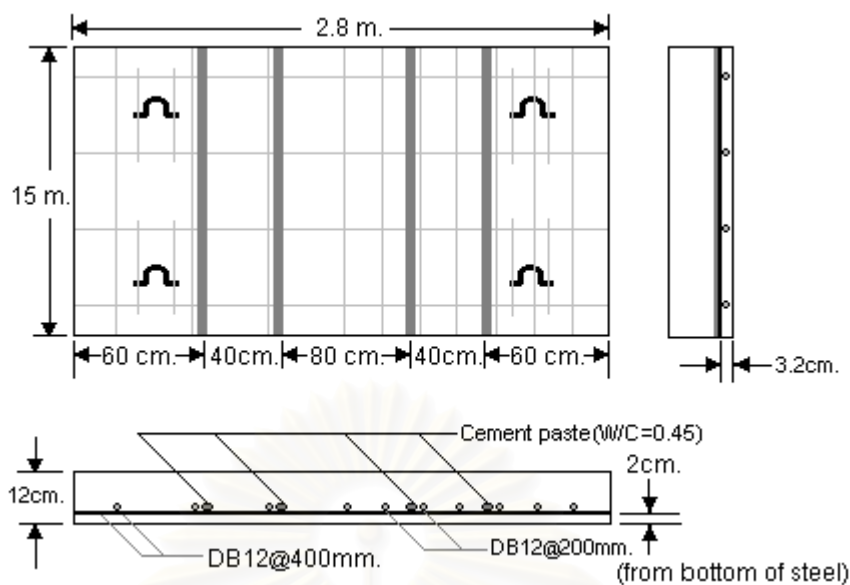
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ผิวบน ของพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ที่ติดตั้งสมบูรณ์แล้ว



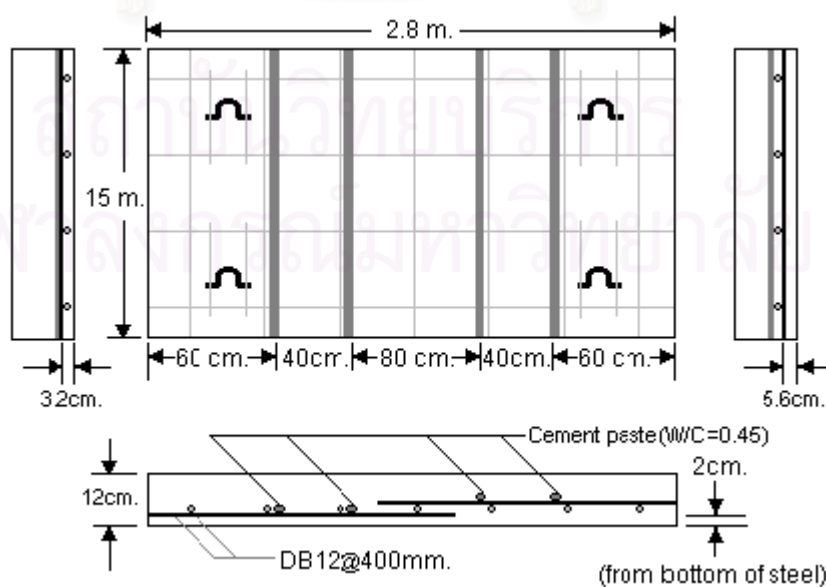
รูปที่ 3.6 วิธีการเติมวัสดุเกราที่ลงในท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งของเหล็กเสริมและท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลระยะห่างเหล็กเสริม)



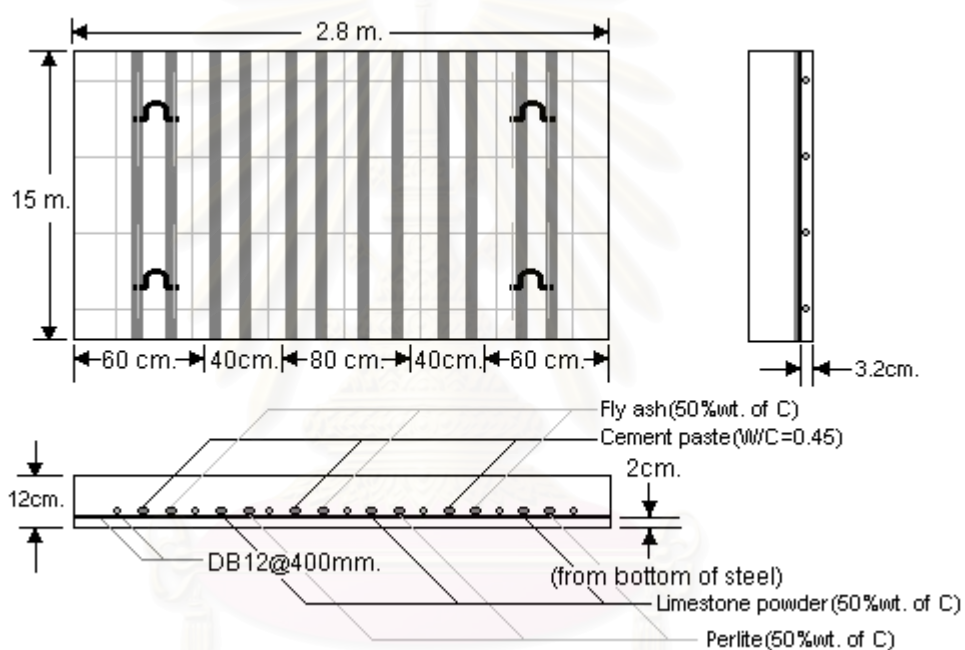
รูปที่ 3.8 แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 1 (ลระยะห่างเหล็กเสริม)



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของเหล็กเสริมและท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว)



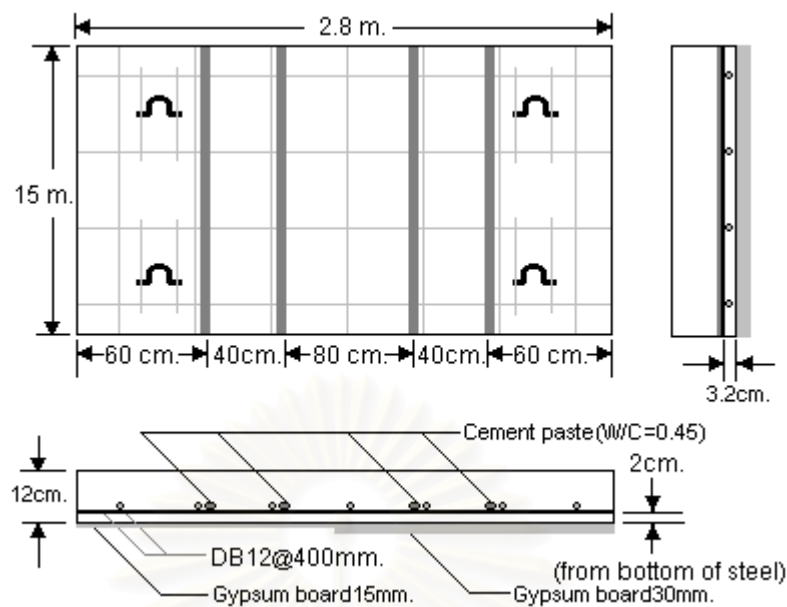
รูปที่ 3.10 แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเหล็กยัดแรง)



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งของท่อร้อยลวดเหล็กยัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรทท์)



รูปที่ 3.12 แบบหล่อคอนกรีตสำหรับตัวอย่างแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรทท์)



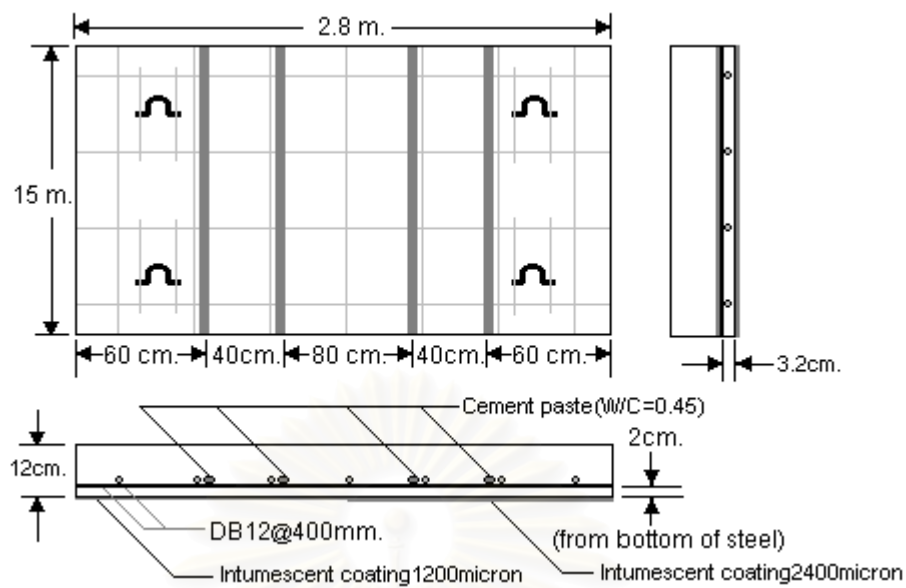
รูปที่ 3.13 ตำแหน่งของเหล็กเสริมและท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)



รูปที่ 3.14 แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่างของแผ่นพื้นที่)



รูปที่ 3.15 แผ่นพื้นที่ 3 ที่ติดตั้งแผ่นยิปซัมเสร็จสมบูรณ์แล้ว



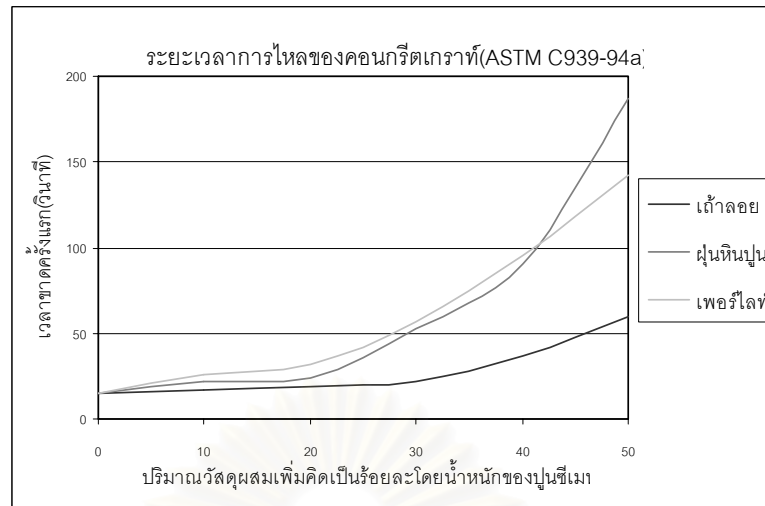
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งของเหล็กเสริมและท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



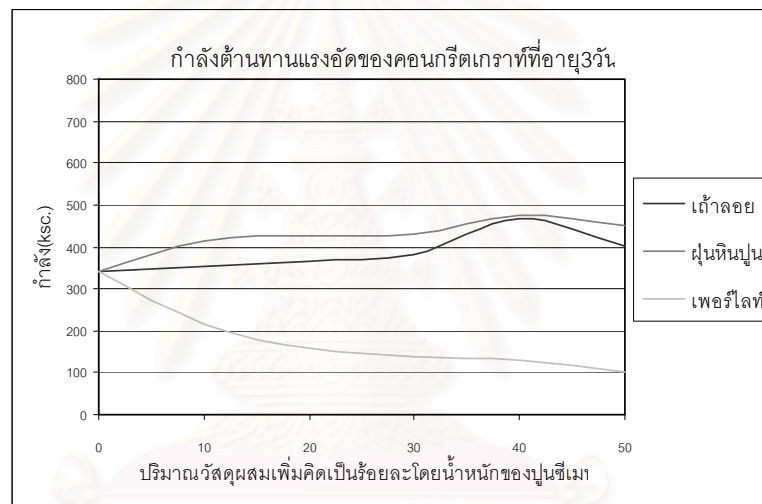
รูปที่ 3.17 แบบหล่อคอนกรีตสำหรับแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น)



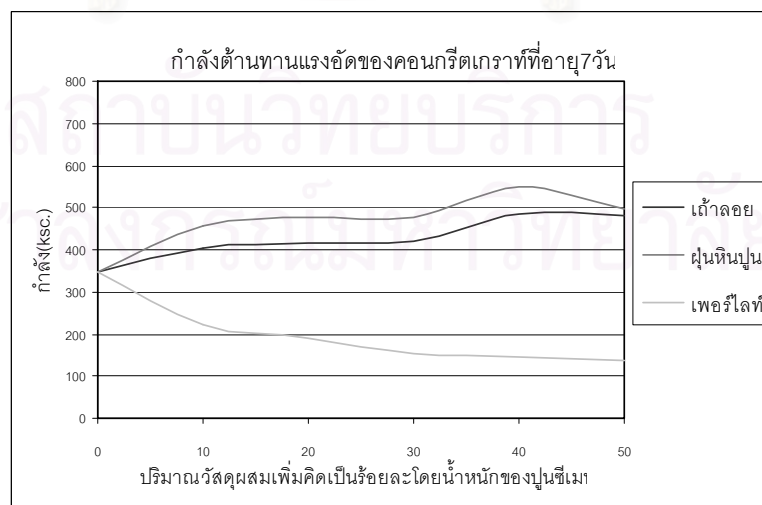
รูปที่ 3.18 แผ่นพื้นที่ 4 ที่ทาสีทนไฟเสร็จสมบูรณ์แล้ว



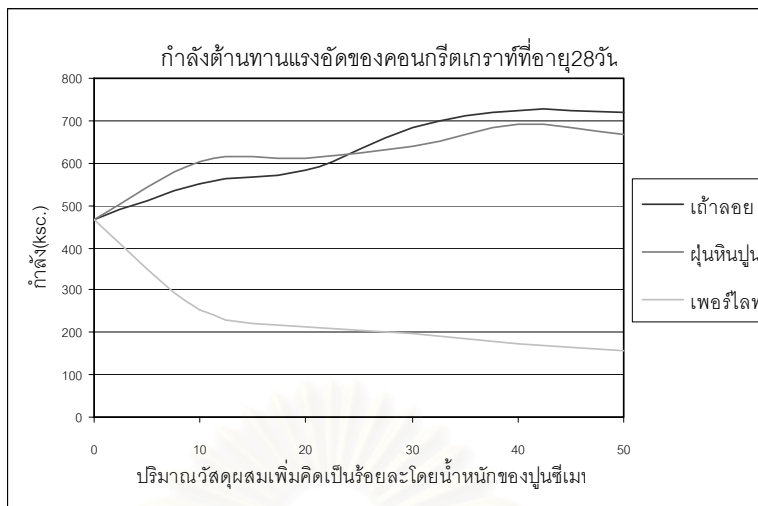
รูปที่ 3.19 ค่าเวลาการไหลของวัสดุเกรทท์ ที่ใช้วัสดุผสมเพิ่มชนิดต่าง ๆ



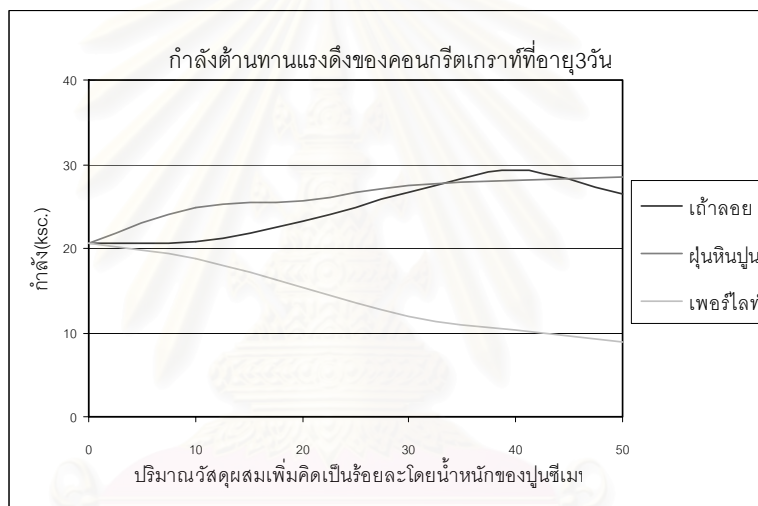
รูปที่ 3.20 กำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุเกรทท์ที่อายุ 3 วัน



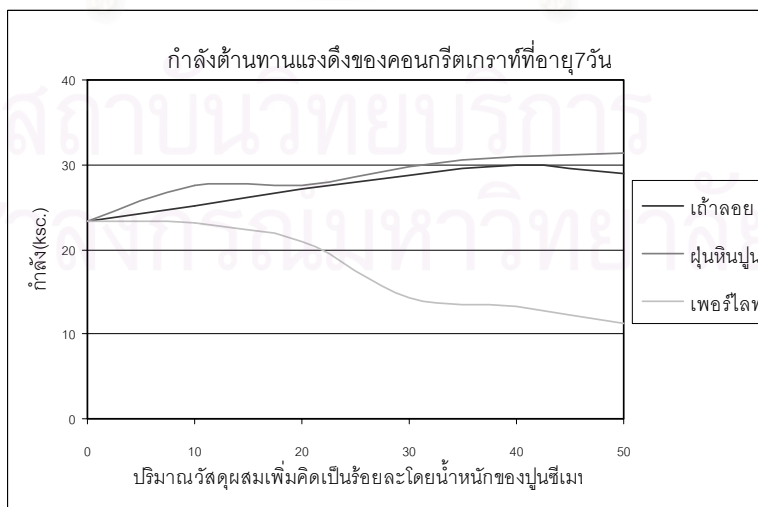
รูปที่ 3.21 กำลังต้านทานแรงอัดของวัสดุเกรทท์ที่อายุ 7 วัน



รูปที่ 3.22 กําลังต้านทานแรงอัดของวัสดุเกราท์ที่อายุ 28 วัน

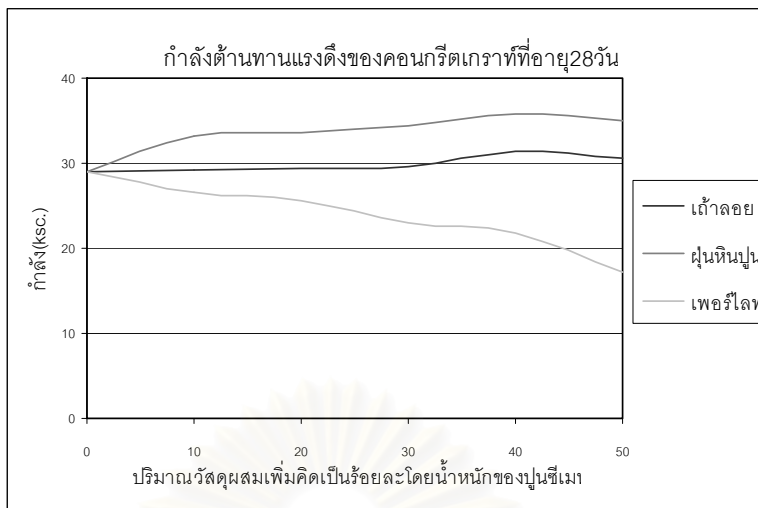


รูปที่ 3.23 กําลังต้านทานแรงดึงของวัสดุเกราท์ที่อายุ 3 วัน

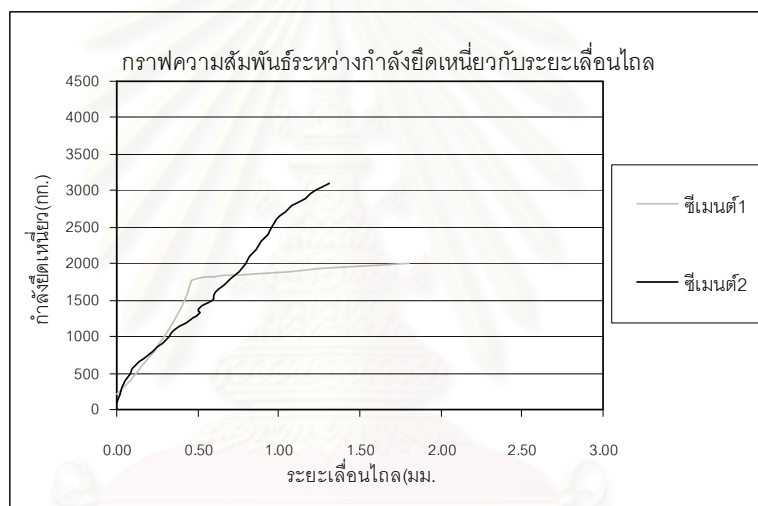


รูปที่ 3.24 กําลังต้านทานแรงดึงของวัสดุเกราท์ที่อายุ 7 วัน

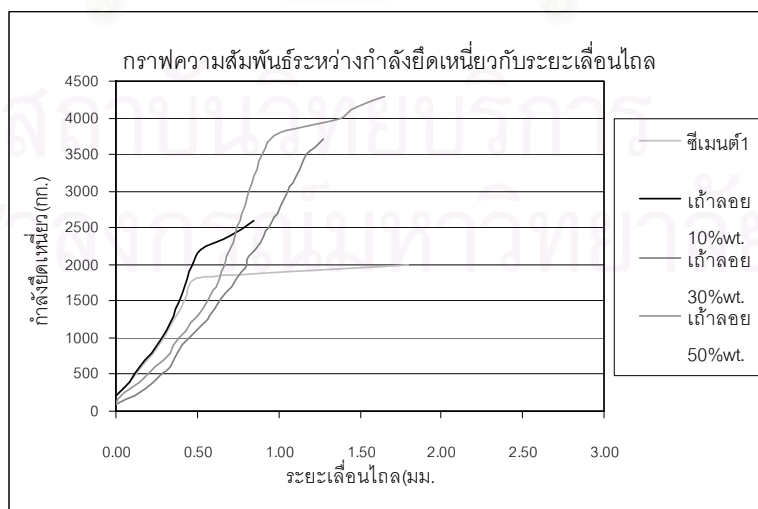




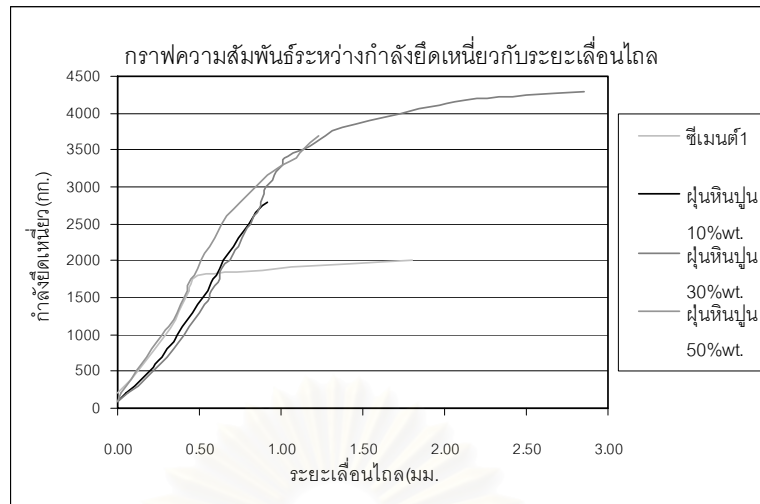
รูปที่ 3.25 กำลังต้านทานแรงดึงของวัสดุเกราท์ที่อายุ 28 วัน



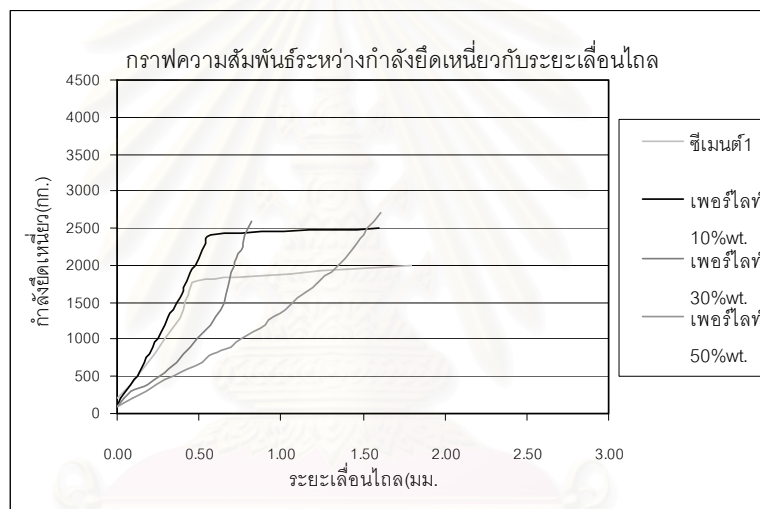
รูปที่ 3.26 กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท์ ที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่ม



รูปที่ 3.27 กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท์ ที่ใช้เต้าลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่ม



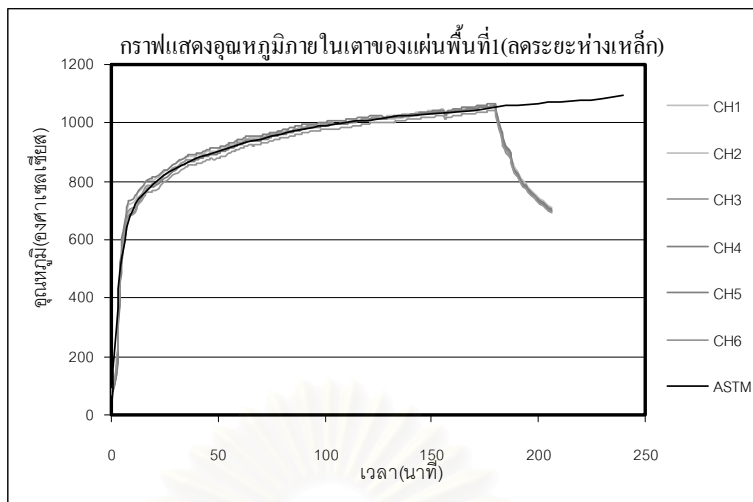
รูปที่ 3.28 กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท ที่ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่ม



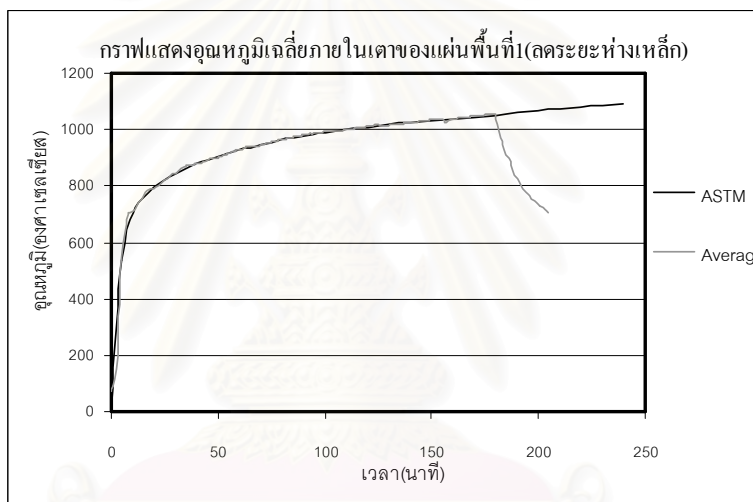
รูปที่ 3.29 กำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท ที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม



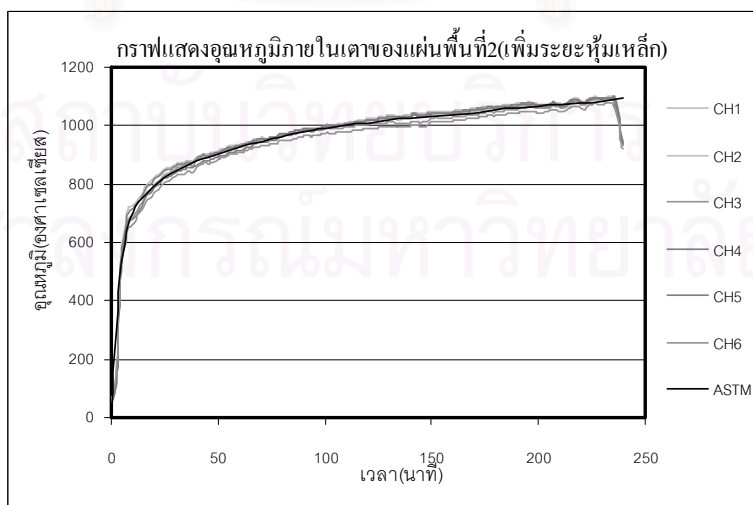
รูปที่ 3.30 ผลของแรงบิดภายในที่เกิดขึ้น ขณะทำการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุเกราท



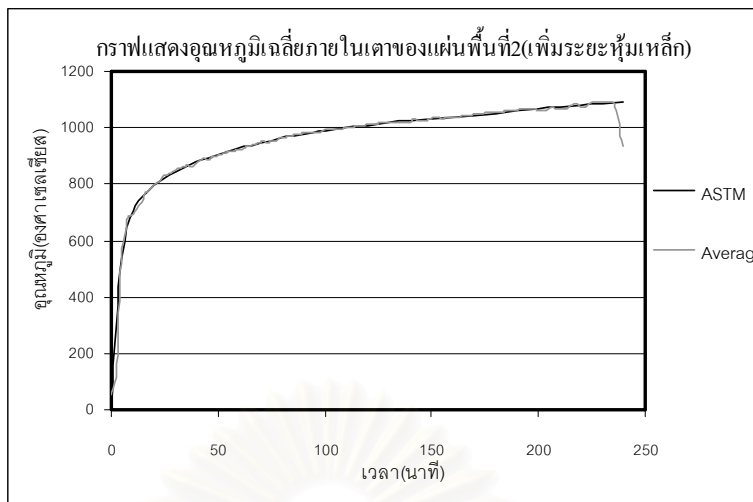
รูปที่ 3.31 อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็ก)



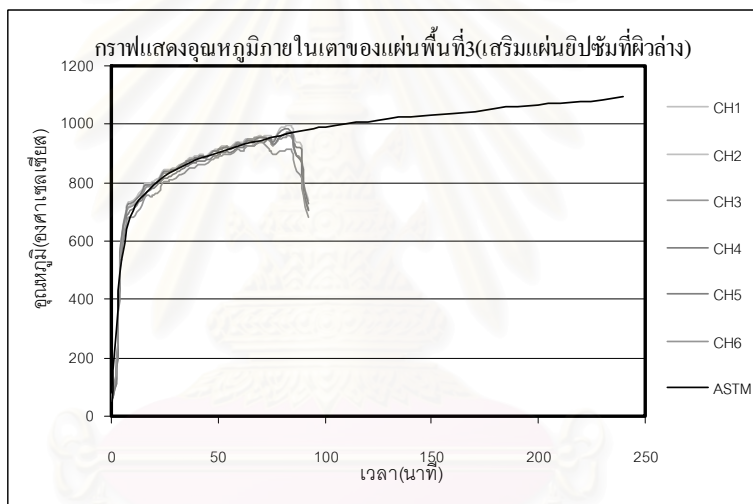
รูปที่ 3.32 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็ก)



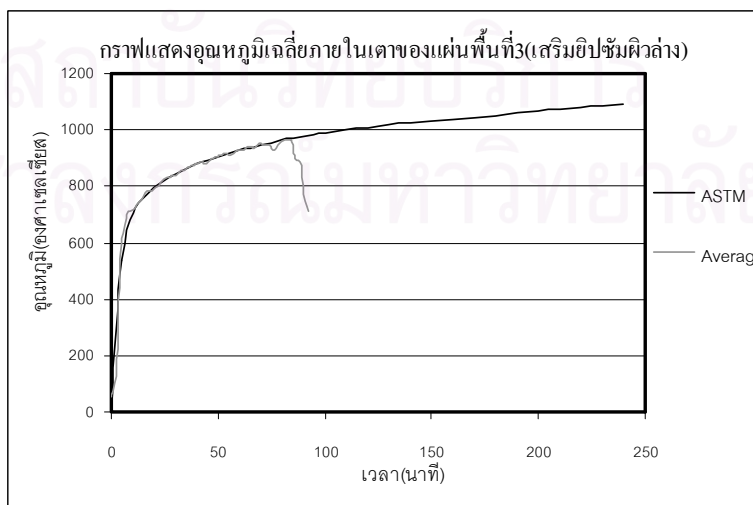
รูปที่ 3.33 อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวด)



รูปที่ 3.34 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นที่2(เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อย ลวด)

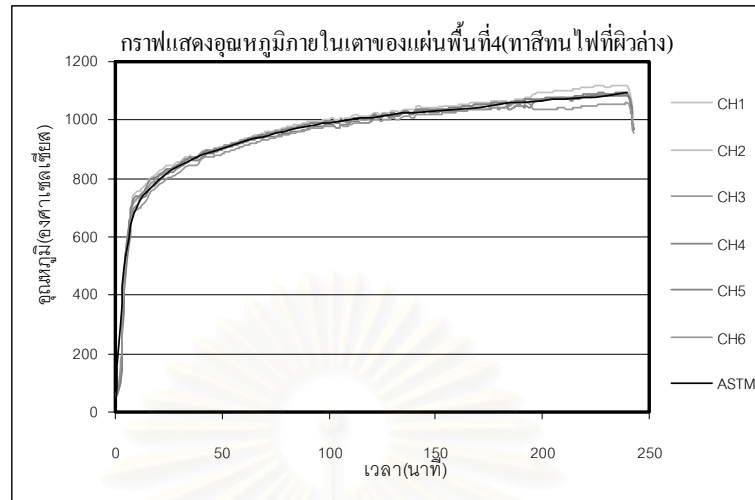


รูปที่ 3.35 อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)

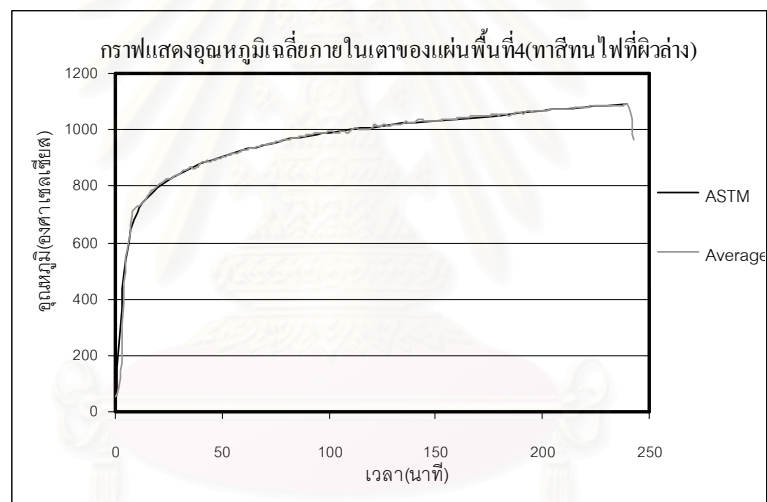


รูปที่ 3.36 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิว

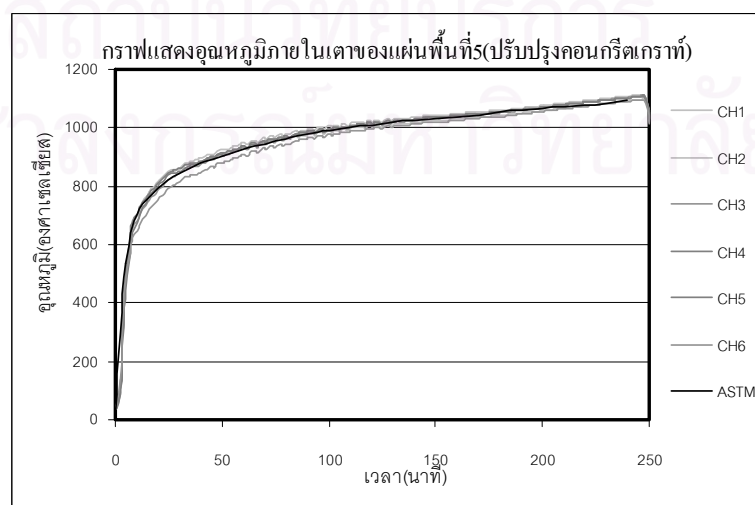
ล่าง)



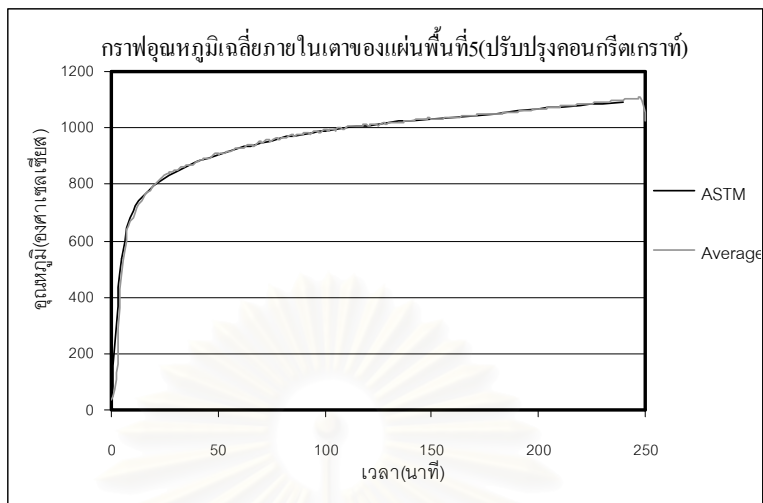
รูปที่ 3.37 อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



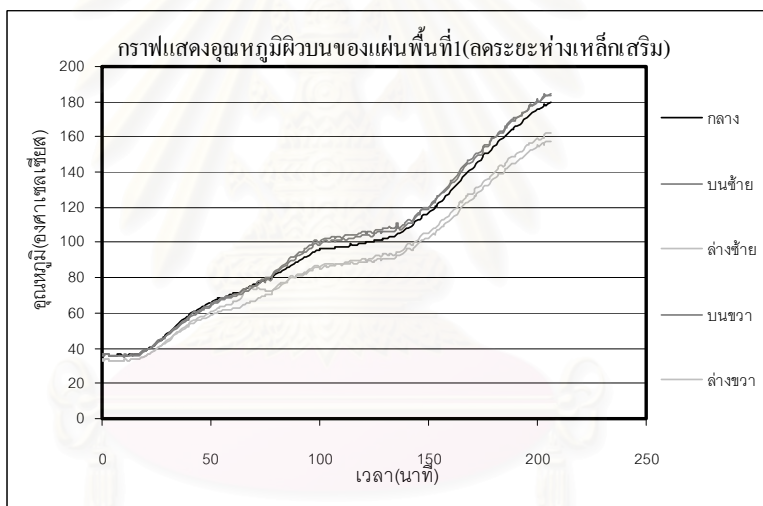
รูปที่ 3.38 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



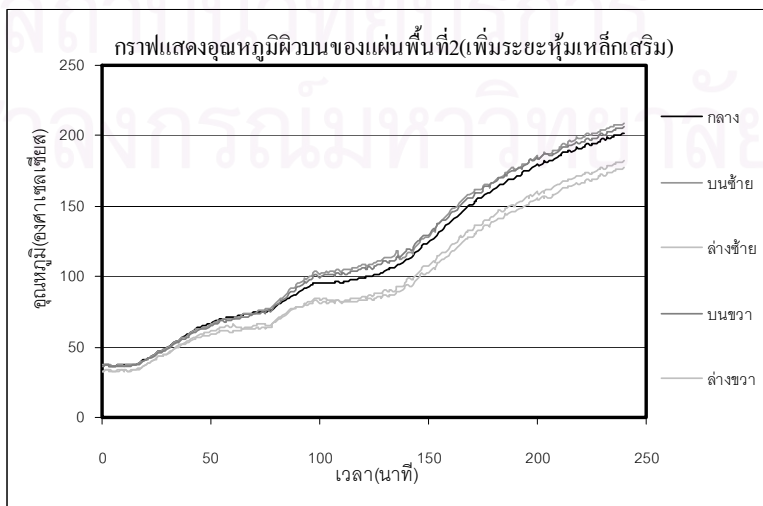
รูปที่ 3.39 อุณหภูมิภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรทท์)



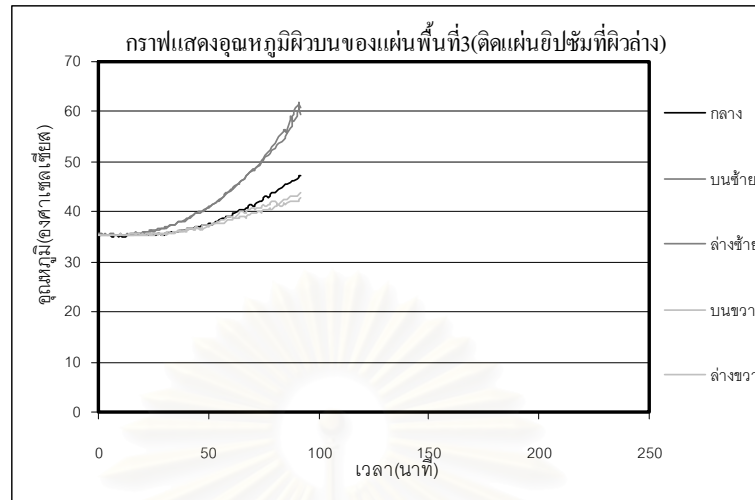
รูปที่ 3.40 อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาของการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรทท์)



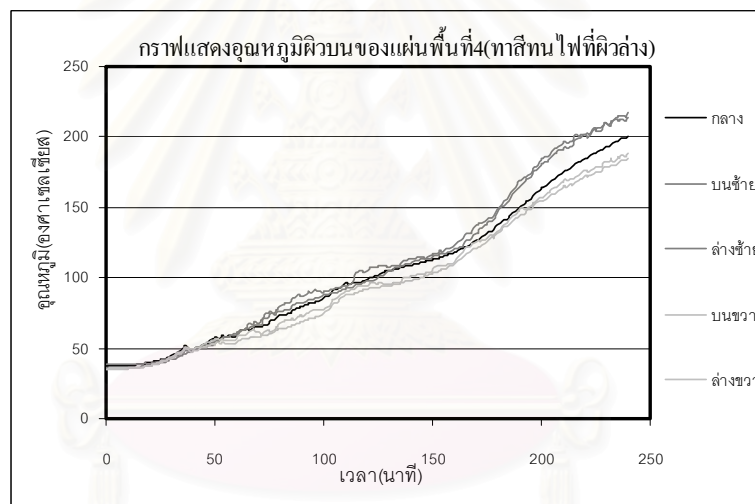
รูปที่ 3.41 อุณหภูมิผิวบนในการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)



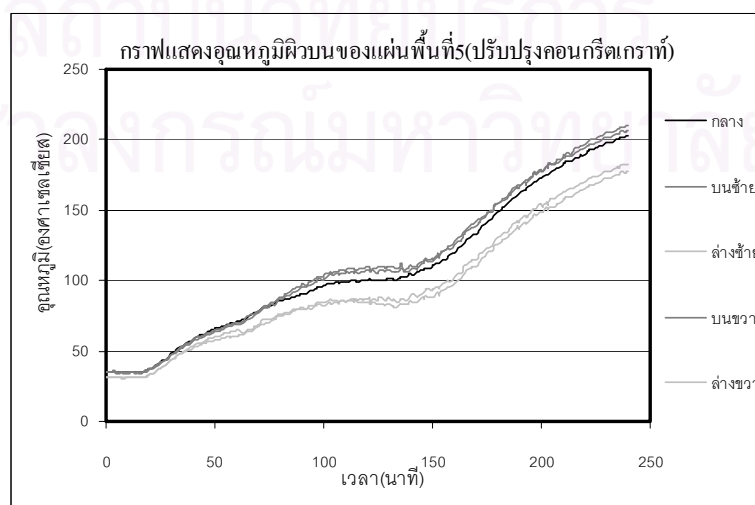
รูปที่ 3.42 อุณหภูมิผิวบนในการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว)



รูปที่ 3.43 อุณหภูมิผิวบนในการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)



รูปที่ 3.44 อุณหภูมิผิวบนในการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)

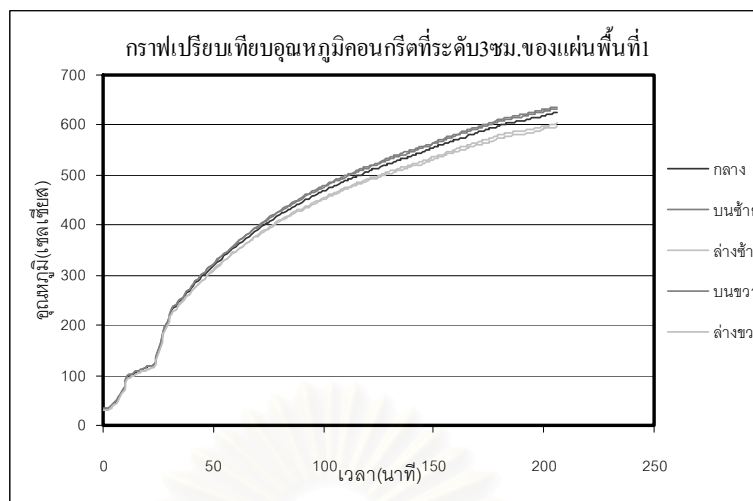


รูปที่ 3.45 อุณหภูมิควมบในการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราะ)

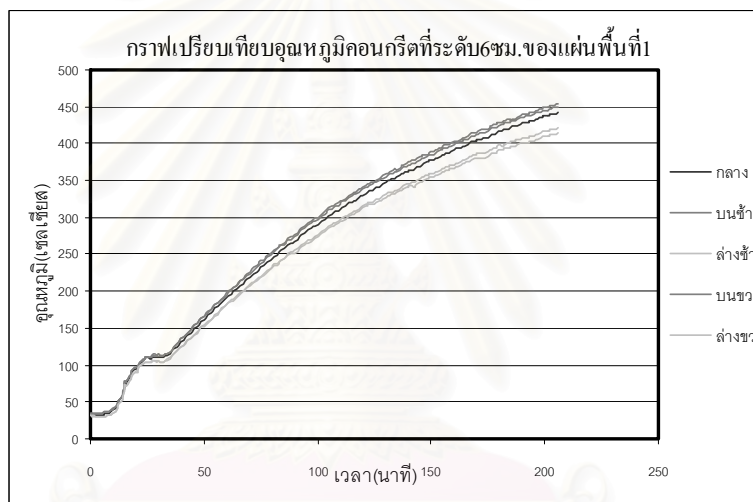


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

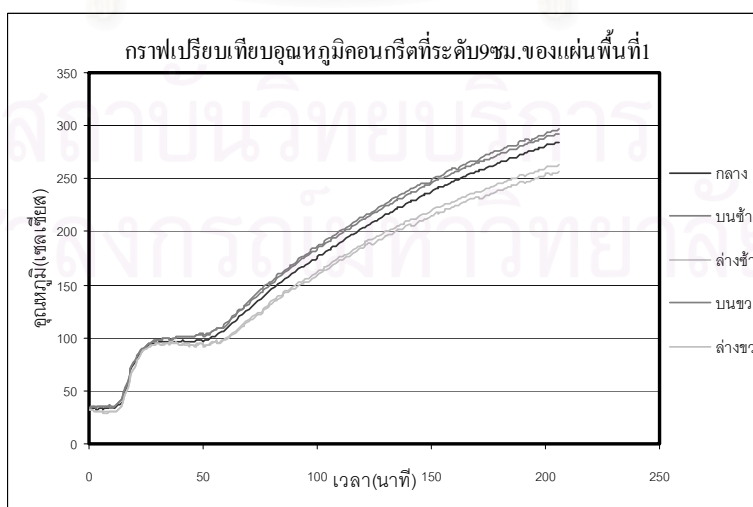




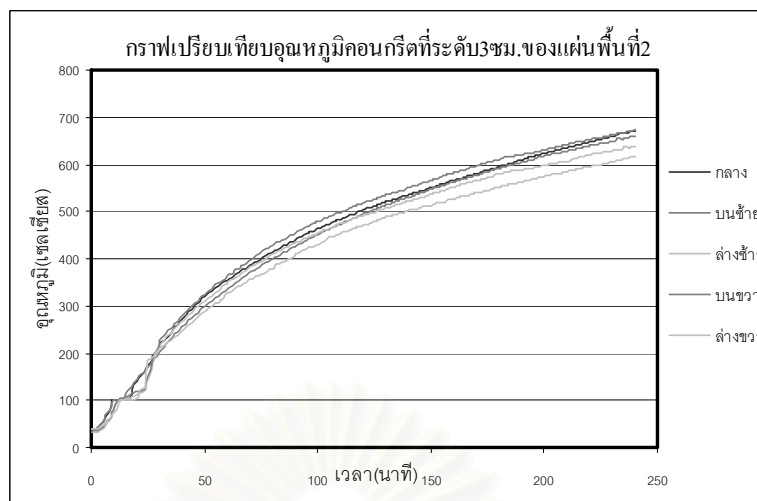
รูปที่ 3.46 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)



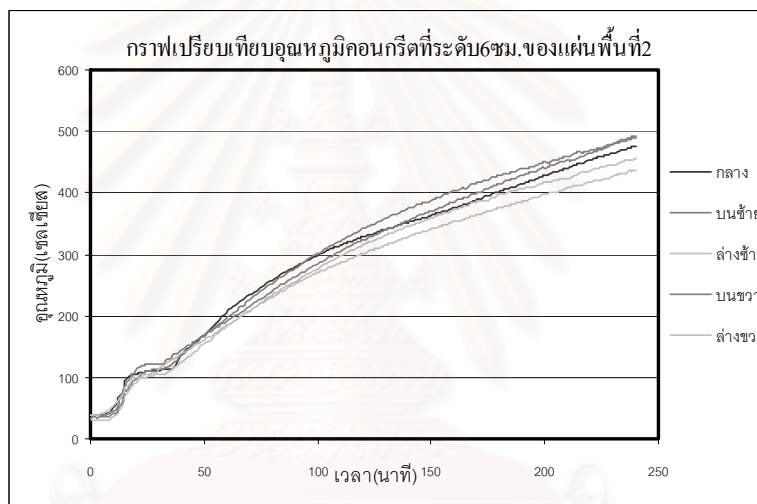
รูปที่ 3.47 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 6 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)



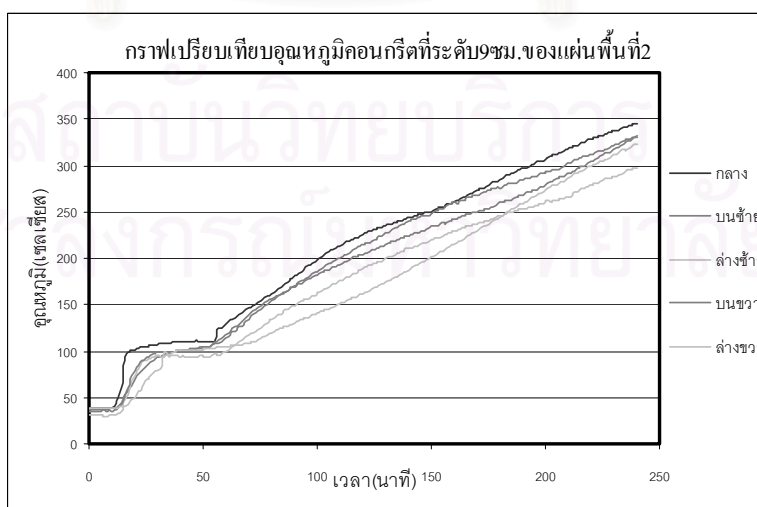
รูปที่ 3.48 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)



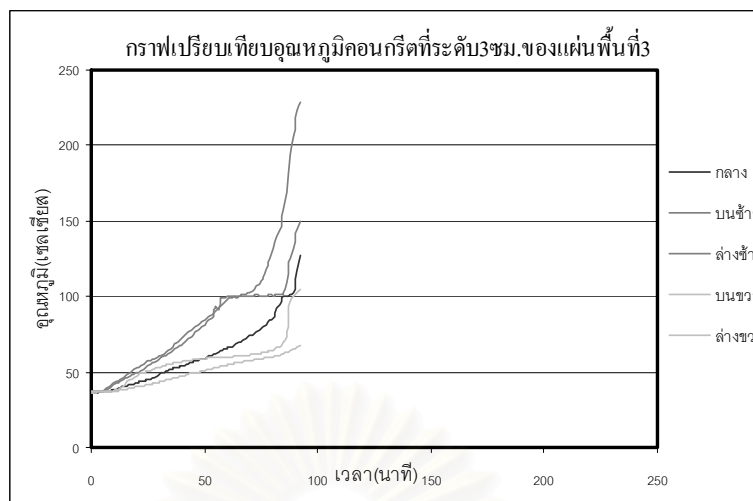
รูปที่ 3.49 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง)



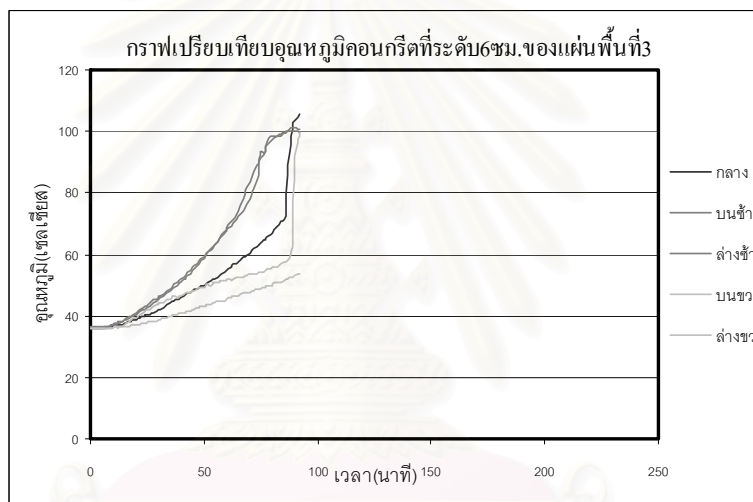
รูปที่ 3.50 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 6 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง)



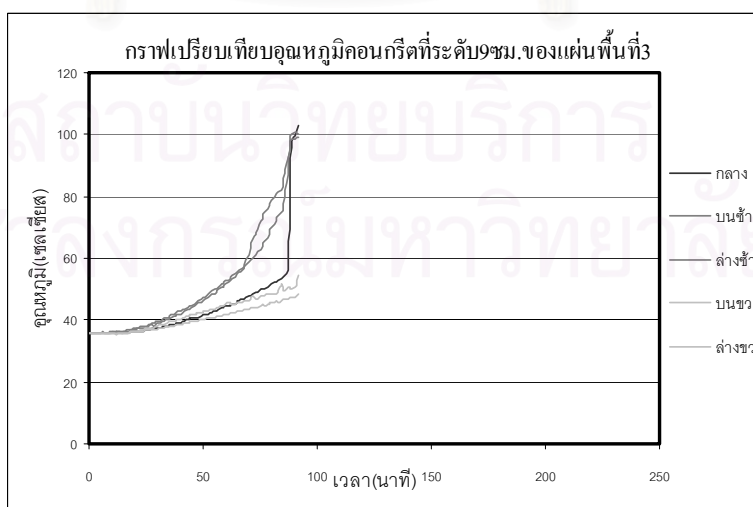
รูปที่ 3.51 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง)



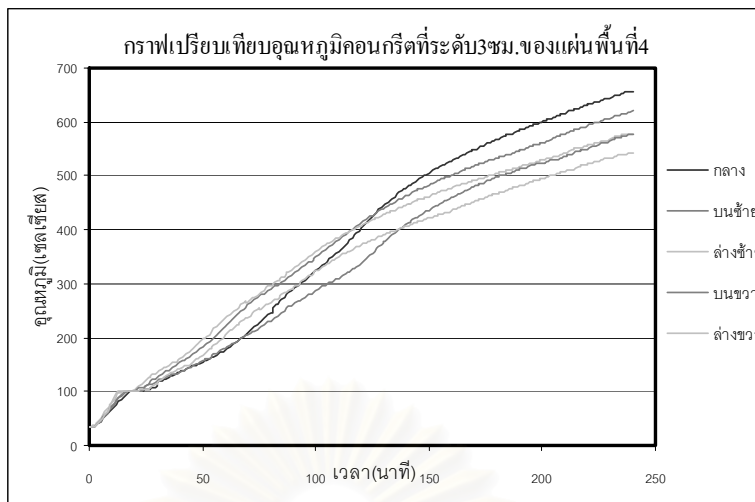
รูปที่ 3.52 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยึดที่ผิวล่าง)



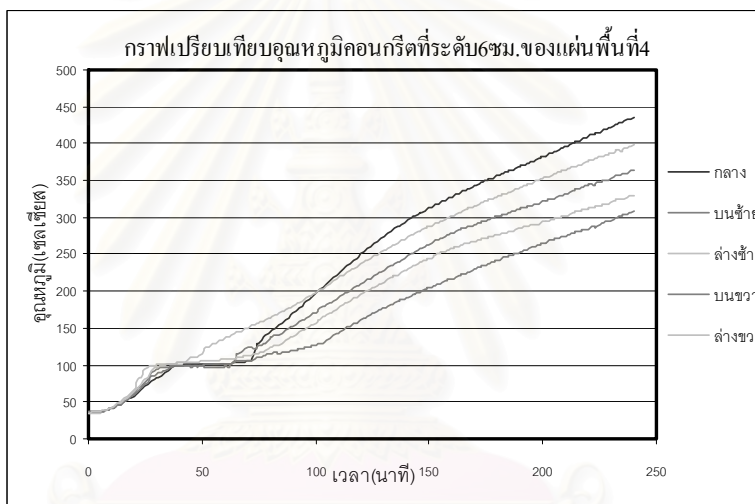
รูปที่ 3.53 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 6 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยึดที่ผิวล่าง)



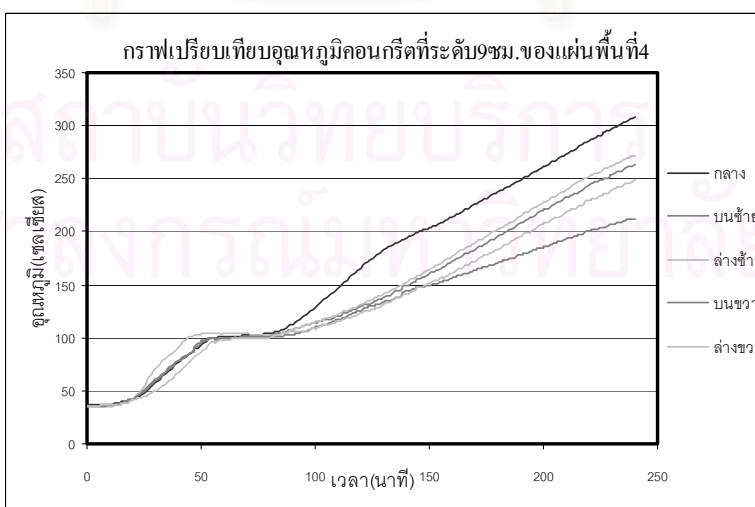
รูปที่ 3.54 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยึดที่ผิวล่าง)



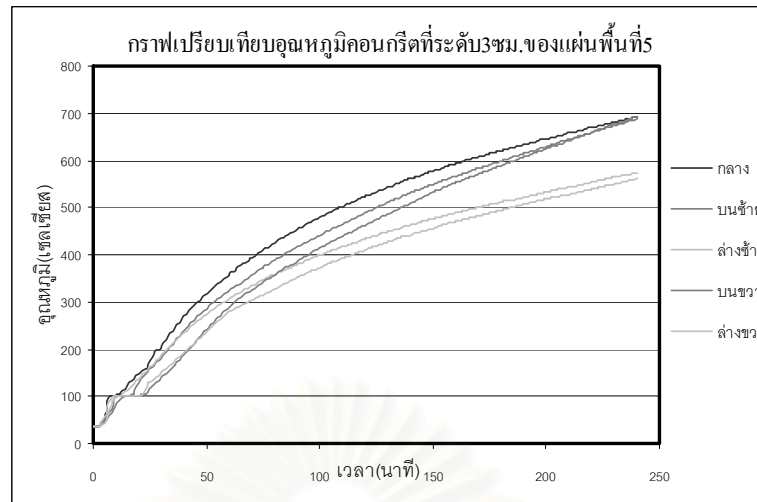
รูปที่ 3.55 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



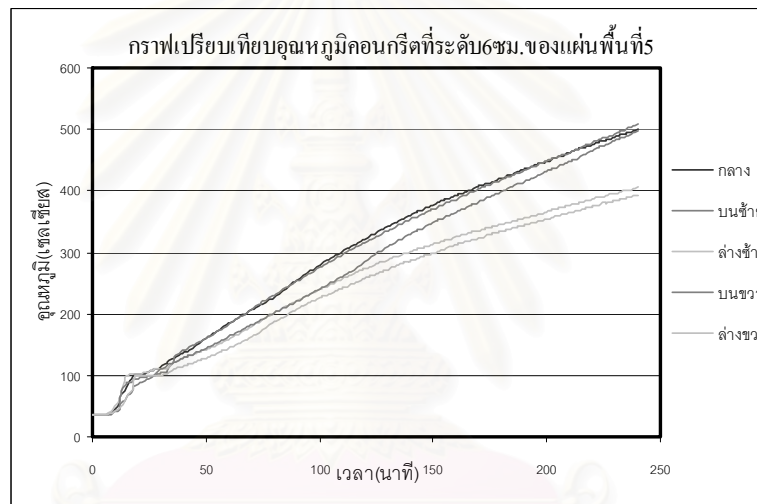
รูปที่ 3.56 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 6 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



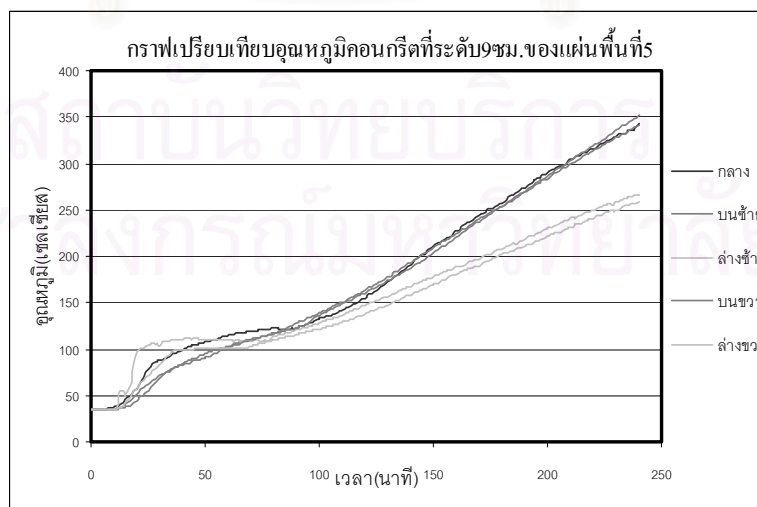
รูปที่ 3.57 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



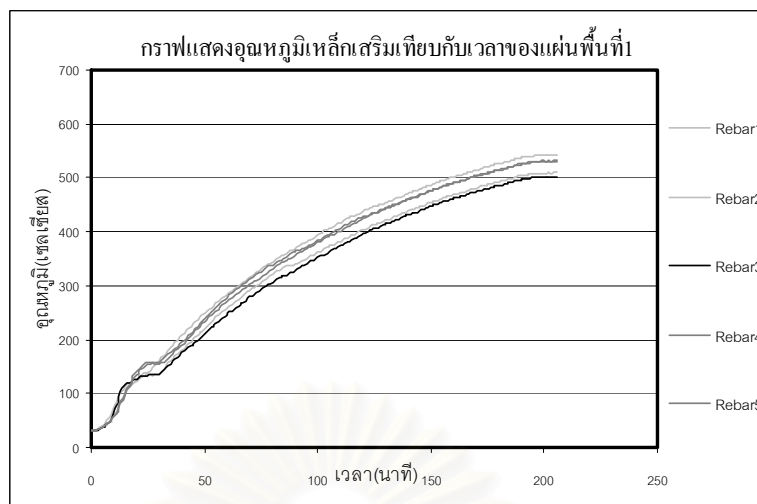
รูปที่ 3.58 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)



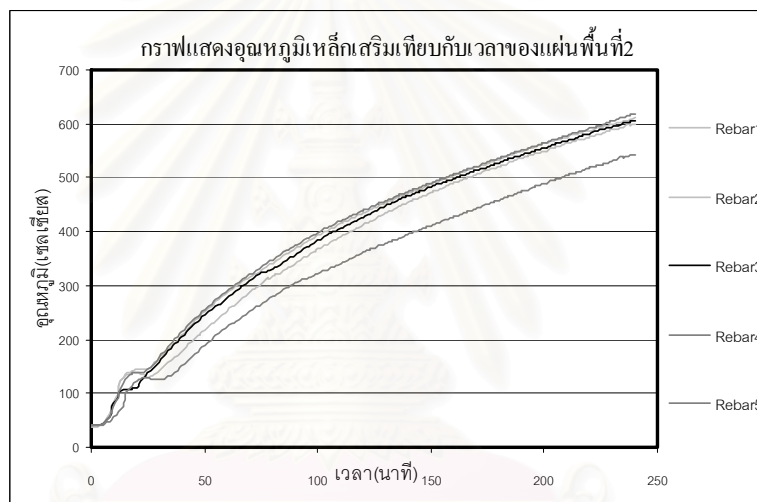
รูปที่ 3.59 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 6 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)



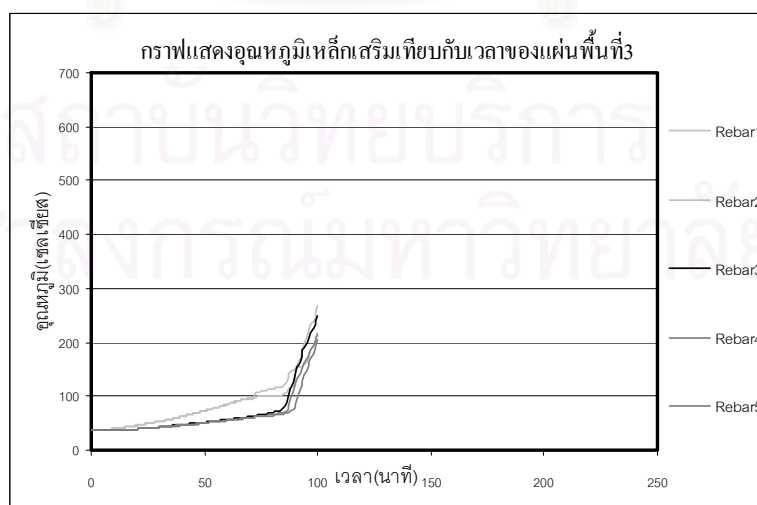
รูปที่ 3.60 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 ซม. จากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)



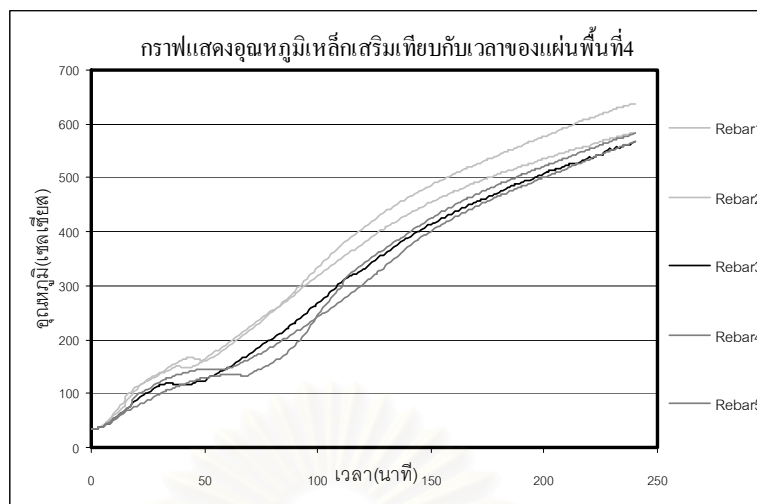
รูปที่ 3.61 อุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลกระยะห่างเหล็กเสริม)



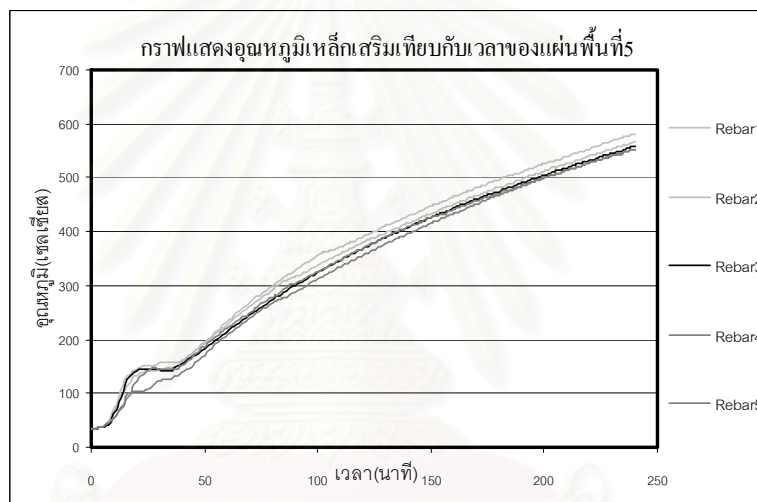
รูปที่ 3.62 อุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง)



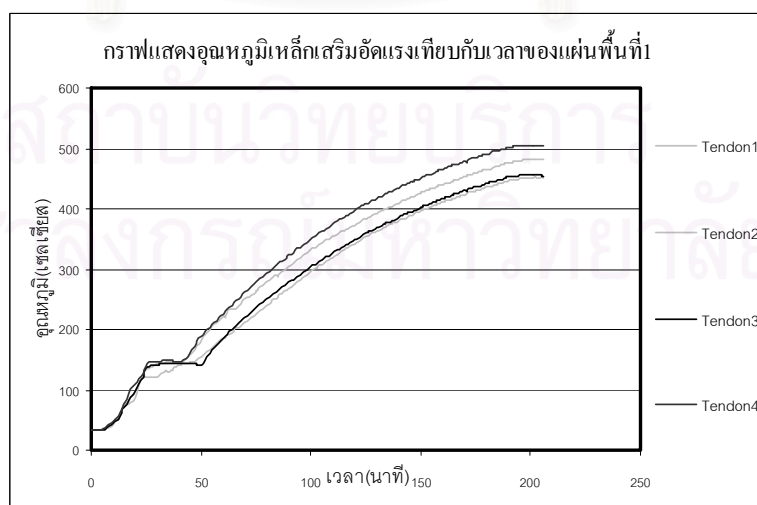
รูปที่ 3.63 อุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยับซั้มที่ผิวล่าง)



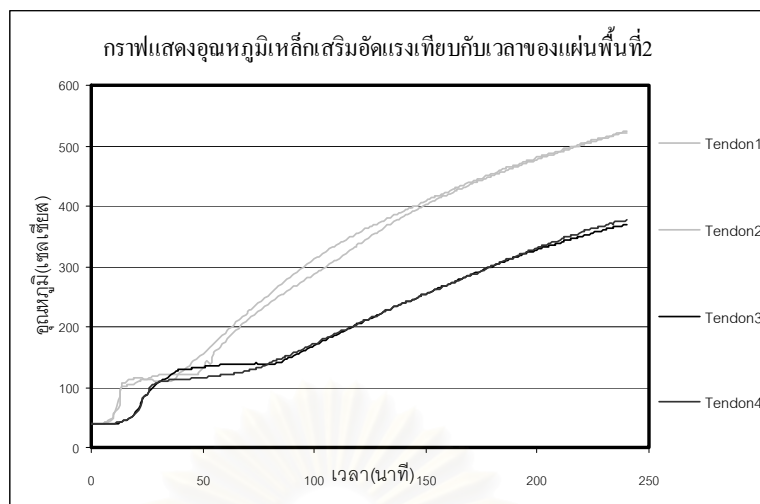
รูปที่ 3.64 อุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



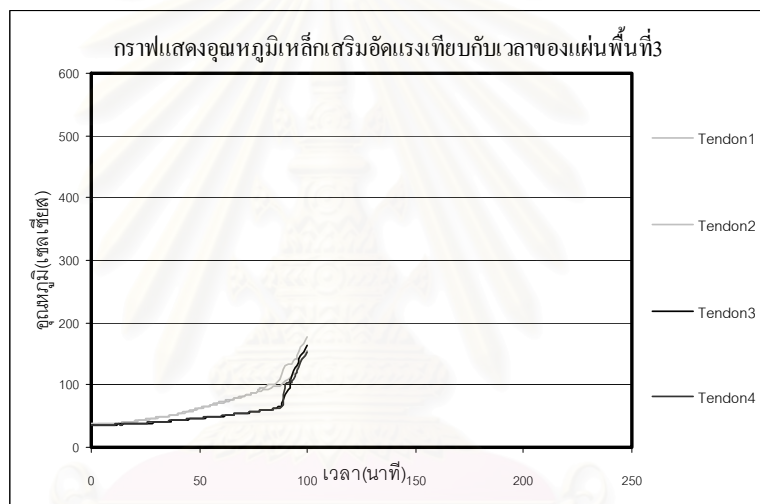
รูปที่ 3.65 อุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรทท์)



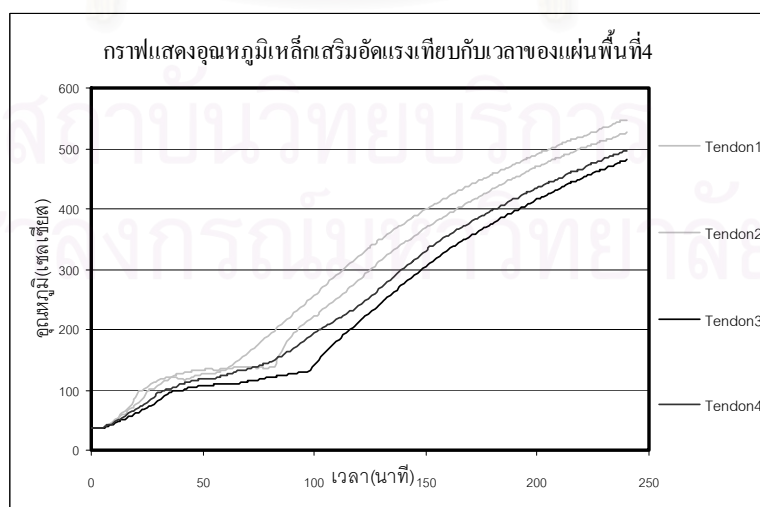
รูปที่ 3.66 อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)



รูปที่ 3.67 อุณหภูมิหลอดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยหลอดเกลียวอัดแรง)

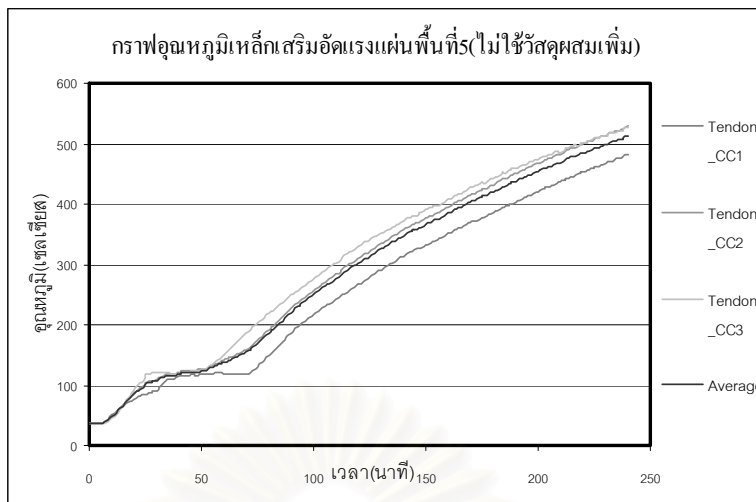


รูปที่ 3.68 อุณหภูมิหลอดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยับยั้งที่ผิวล่าง)

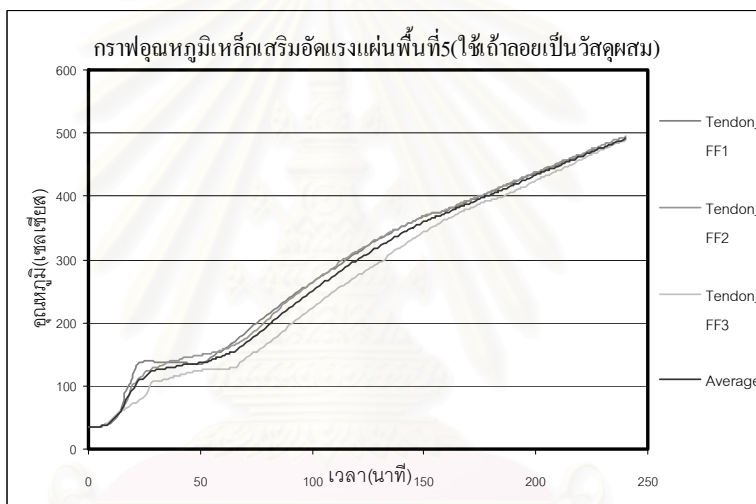


รูปที่ 3.69 อุณหภูมิหลอดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)

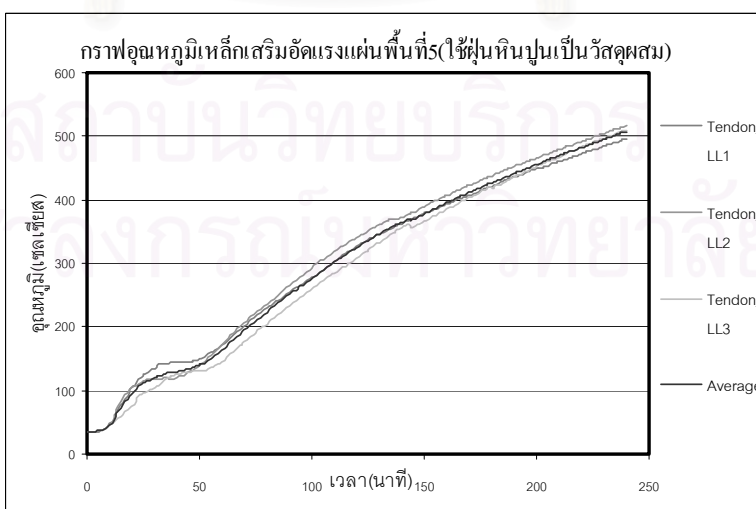




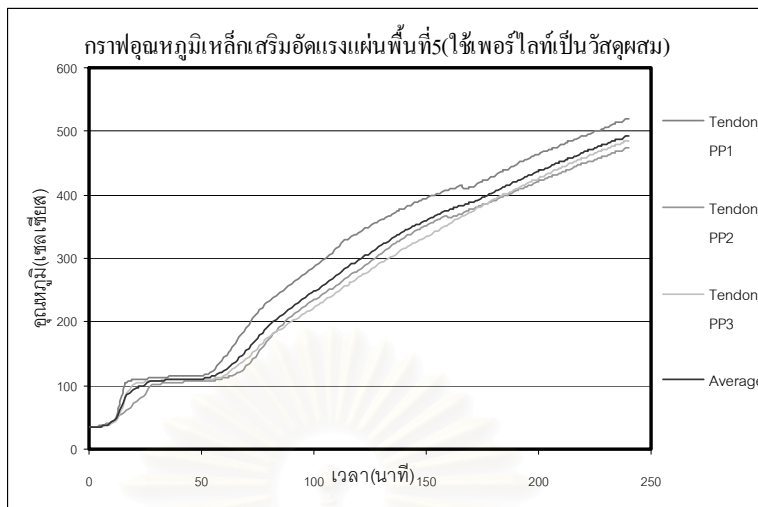
รูปที่ 3.70 อุณหภูมิลวดเหล็กอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์)



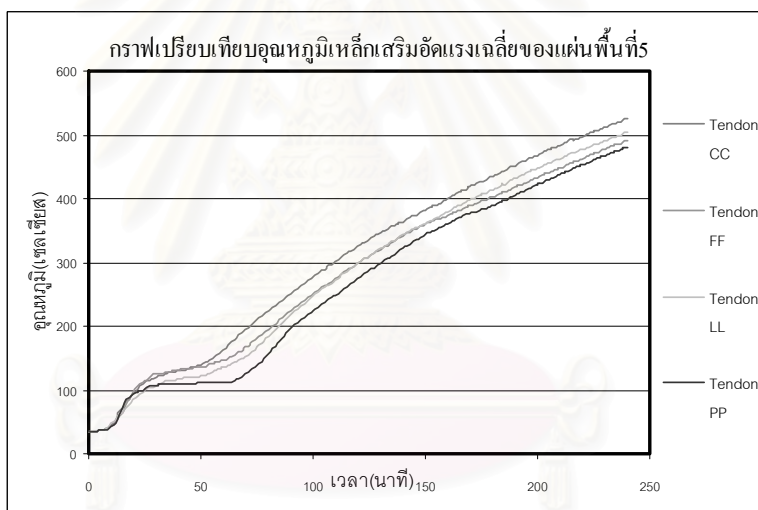
รูปที่ 3.71 อุณหภูมิลวดเหล็กอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ใช้ถ้ำลอยเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์)



รูปที่ 3.72 อุณหภูมิลวดเหล็กอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์)



รูปที่ 3.73 อุณหภูมิลดลงของเส้นลวดเสริมอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นชั้นที่ 5 (ใช้เพอร์ไลท์เป็นวัสดุผสมเสริมในวัสดุคอนกรีต)



รูปที่ 3.74 อุณหภูมิลดลงของเส้นลวดเสริมอัดแรงเฉลี่ยเทียบกับเวลาของวัสดุคอนกรีตแต่ละชนิด ของแผ่นพื้นชั้นที่ 5



รูปที่ 3.75 การหลุดร้อนหลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นชั้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)



รูปที่ 3.76 การหลุดร่อนหลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว)



รูปที่ 3.77 การหลุดร่อนหลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)



รูปที่ 3.78 การหลุดร่อนหลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



รูปที่ 3.79 การหลุ่ร่อนหลังการทดสอบความสามารถทนไฟ ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท์)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การคำนวณอุณหภูมิขึ้นส่วนภายในของ แผ่นพื้นด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ

#### 4.1 ทั่วไป

ความร้อนเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่ง สามารถถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ การถ่ายเทความร้อนมีอยู่ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน กลไกการถ่ายเทความร้อนในแต่ละรูปแบบมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ

การนำความร้อน เป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นจากการส่งถ่ายพลังงานจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่อง โดยที่มวลของตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่

การพาความร้อน เป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนที่อาศัยการเคลื่อนที่ของมวลตัวกลาง และการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นระหว่างตัวกลางที่เป็นของไหลกับผิวของตัวกลางที่เป็นของแข็ง โดยอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ผิวตัวกลางที่เป็นของแข็ง

การแผ่รังสีความร้อน เป็นกลไกการถ่ายเทความร้อนจากผิวตัวกลางหนึ่งไปสู่ผิวของอีกตัวกลางหนึ่ง ภายใต้กฎของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

#### 4.2 การถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ภายใต้สภาวะไม่คงที่

ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ภายใต้สภาวะไม่คงที่และปราศจากแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนภายในตัวกลาง สามารถพิสูจน์สมการในเชิงระบบพิกัดฉากได้ ดังนี้

กฎการอนุรักษ์พลังงานในระบบพิกัดฉาก(x, y, z) เขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) + Q = \rho_d C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

โดยที่

$Q$  คือ ความร้อนจากแหล่งกำเนิดภายใน ต่อหน่วยปริมาตร มีหน่วยเป็น  $W.m^{-3}$

$\rho_d$  คือ ความหนาแน่นของ ของแข็ง มีหน่วยเป็น  $kg.m^{-3}$

$C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของ ของแข็ง มีหน่วยเป็น  $J.kg^{-1}.K^{-1}$

$T$	คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น เคลวิน
$t$	คือ เวลา มีหน่วยเป็น วินาที
$q_x, q_y, q_z$	คือ องค์ประกอบเวกเตอร์ของฟลักซ์ความร้อน(Heat flux vector) มีค่าเท่ากับการไหลของความร้อนในแต่ละทิศทางต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น $W.m^{-2}$

สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติทางความร้อนในแต่ละทิศทางแตกต่างกัน(Anisotropic solid)

$$q_x = - \left( k_{11} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{12} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{13} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.2.1)$$

$$q_y = - \left( k_{21} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{22} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{23} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.2.2)$$

$$q_z = - \left( k_{31} \frac{\partial T}{\partial x} + k_{32} \frac{\partial T}{\partial y} + k_{33} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.2.3)$$

โดยที่

$k_{11}, k_{12}, \dots, k_{33}$  คือ ค่าการนำความร้อน(Thermal conductivity tensor) มีหน่วยเป็น  $(W.m^{-1}.K^{-1})$  ซึ่งคุณสมบัตินี้จะแปรผันตามอุณหภูมิและมีค่าต่างกันในแต่ละทิศทาง

จากสมการที่ 4.1 พบว่าค่าคงที่  $\rho, C_p$  จะเป็นค่าคงที่เฉพาะของวัสดุแต่ละชนิด ซึ่งนิยามเป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะ ด้านซ้ายของสมการแทนผลรวมอัตราการเพิ่มพลังงานจากการนำความร้อน และแหล่งกำเนิดพลังงานภายใน ด้านขวาของสมการแทนอัตราการสะสมพลังงาน

ในการวิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน ด้วยสมการที่ 4.1 และ 4.2 จะทำได้ก็ต่อเมื่อ

1. วัสดุมีรูปร่างเป็นแบบเรขาคณิตพื้นฐาน
2. คุณสมบัติของวัสดุมีค่าคงที่
3. เงื่อนไขขอบเขต ไม่ซับซ้อน

จากเงื่อนไข 2 ข้อยหลัง พบว่าไม่สอดคล้องกับอภิศักดิ์ที่เกิดขึ้นในอาคาร อย่างไรก็ตามผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยสมการข้างต้น เมื่อนำมาประกอบกับผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการแล้ว สามารถอธิบายปัญหาอภิศักดิ์ขององค์อาคารที่ไม่ซับซ้อนได้

อุณหภูมิภายในอาคารตามมาตรฐานสำหรับทดสอบความสามารถทนไฟขององค์อาคาร พบว่าอุณหภูมิของก๊าซภายในเตาจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะลดลงในช่วงถัดมา ผลของการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วงแรก ทำให้วัสดุเกิดการแผ่รังสีความร้อนอย่างมากที่ผิวด้านที่สัมผัสเปลวไฟ ซึ่งทำให้ความร้อนถูกกักอยู่บริเวณผิวของวัสดุ ดังนั้นในช่วงแรกของการทดสอบค่าอุณหภูมิที่ผิวของวัสดุ( $T_E$ )จึง

ถือได้ว่าเท่ากับอุณหภูมิของก๊าซภายในเตา ( $T_F$ ) ที่เวลานั้น ๆ โดยขณะเริ่มการทดสอบถือว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของตัวอย่างทดสอบเท่ากับอุณหภูมิห้อง ( $T_a$ ) และมีค่าเดียวกันตลอดทั้งตัวอย่างทดสอบ

สำหรับการนำความร้อนใน 1 มิติ ของวัสดุที่ปราศจากแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน เมื่อนำสมการที่ 4.2 แทนค่ากลับในสมการที่ 4.1 และกำจัดมิติอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องทิ้งจะได้

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

โดยที่

$\kappa$  คือ สัมประสิทธิ์การกระจายอุณหภูมิของวัสดุ (Thermal diffusibility) เท่ากับ  $\frac{k}{\rho_d C_p}$  มีหน่วยเป็น ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เพื่อความสะดวกในการจัดรูปสมการ จึงมีการกำหนดกลุ่มตัวแปรไร้มิติขึ้น ซึ่งมี 3 กลุ่ม ได้แก่

$$\begin{aligned} - \frac{\kappa t}{l^2} & \text{ เรียกว่า เลขฟูเรียร์ (Fourier number)} \\ - \frac{hl}{k} & \text{ เรียกว่า เลขนัสเซล (Nusselt number)} \\ - \frac{x}{l}, \frac{y}{l} & \text{ เป็นตัวแปรทางด้านพิกัดที่ไร้มิติ} \end{aligned}$$

การวิเคราะห์การนำความร้อนของแผ่นพื้นใน 1 มิติ พบว่าสภาพเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการแก้ปัญหาของระบบสมการ

จากสมการที่ 4.3

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\kappa} \frac{\partial T}{\partial t}; 0 < x < l \quad (4.4)$$

$$T = T_a \quad \text{เมื่อ } t = 0; 0 \leq x \leq l \quad (4.5)$$

$$T = T_F \quad \text{ที่ } x = 0; t > 0 \quad (4.6)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h_u (T - T_a) \quad \text{ที่ } x = l; t > 0 \quad (4.7)$$

โดยที่

$h_u$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Coefficient of heat transfer) ระหว่างผิววัสดุด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟกับอากาศ

โดยค่า  $h_u$  เป็นตัวแทนของการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบ การพาความร้อนผสมผสานกับการแผ่รังสี ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามทิศทาง การจัดวางขององค์อาคาร มีรายละเอียดดังนี้

- สำหรับองค์อาคารที่จัดวางในแนวตั้ง เช่น กำแพง ผนัง

$$h_u = 1.313(T_U - T_a)^{1/3} + \sigma \varepsilon_U \frac{T_U^4 - T_a^4}{T_U - T_a} \quad (4.8)$$

- สำหรับองค์อาคารที่จัดวางในแนวราบ เช่น ฝ้า หลังคา

$$h_u = 1.521(T_U - T_a)^{1/3} + \sigma \varepsilon_U \frac{T_U^4 - T_a^4}{T_U - T_a} \quad (4.9)$$

โดยที่

$T_a$  คือ อุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยเป็น เคลวิน

$\varepsilon_U$  คือ สัมประสิทธิ์การแผ่ความร้อนของด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ เป็นตัวแปรไร้มิติ

$T_U$  คือ อุณหภูมิของด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ มีหน่วยเป็น เคลวิน

จากสมการที่ 4.4 ถึง 4.7 สามารถแก้สมการแล้วจัดในรูปของ T-group จะได้

$$\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a} = 2 \frac{T_F - T_a}{T_\infty - T_a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left[ \alpha_n^2 + \left( \frac{h_U l}{k} \right)^2 \right] \sin \left( \alpha_n \frac{x}{l} \right)}{\alpha_n \left[ \alpha_n^2 + \frac{h_U l}{k} + \left( \frac{h_U l}{k} \right)^2 \right]} \exp \left( -\alpha_n^2 \frac{\kappa t}{l^2} \right) \quad (4.10)$$

โดยที่

$T_\infty$  เป็นอุณหภูมิที่สภาวะคงที่ ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับ  $x$  และมีค่าดังสมการที่ 4.11

$$T_\infty = T_a + (T_F - T_a) \frac{1 + \frac{h_U l}{k} \left( 1 - \frac{x}{l} \right)}{1 + \frac{h_U l}{k}} \quad (4.11)$$



และค่า  $\alpha_n$  คือ รากที่เป็นบวกของสมการที่ 4.12

$$\alpha \cot \alpha + \frac{h_v l}{k} = 0 \quad (4.12)$$

โดยที่ค่า  $\frac{h_v l}{k}$  อยู่ระหว่าง 0 ถึง  $\infty$  และค่ารากที่หนึ่ง  $\alpha_1$  ของสมการที่ 4.10 อยู่ระหว่างค่า  $\pi/2$  ถึง  $\pi$  ดังตารางที่ 4.1 ค่ารากที่สอง  $\alpha_2$  อยู่ระหว่าง  $3\pi/2$  ถึง  $2\pi$  ค่ารากที่สาม  $\alpha_3$  อยู่ระหว่าง  $5\pi/2$  ถึง  $3\pi$  และค่ารากที่ลำดับอื่น ๆ มีความสัมพันธ์ในลักษณะเดียวกัน

พิจารณาเทอมเอ็กซ์โปเนนเชียลที่ปรากฏในสมการที่ 4.10 พบว่าเทอมแรกของสมการภายใต้เครื่องหมายผลรวมจะมีความสำคัญก็ต่อเมื่อ  $\frac{kt}{l^2} > 0.3$  และเทอมดังกล่าวสามารถคำนวณโดยอาศัยค่า  $\alpha_1$  และตารางที่ 4.1 และสามารถแก้สมการที่ 4.10 ให้อยู่ในรูปแบบของตาราง ได้ดังตารางที่ 4.2

ในช่วงแรกของการทดสอบภายใต้สภาวะอค์คิถัย ค่า  $\frac{kt}{l^2}$  จะมีค่าน้อยมาก(ประมาณ 0.05) การแทรกซึมของความร้อนจะถูกจำกัดอยู่ในบริเวณใกล้ๆกับพื้นผิวด้านที่สัมผัสเปลวไฟ สภาวะของวัสดุในขณะนั้น เรียกว่า วัสดุกึ่งอนันต์(Semi-infinite solid)

ค่าความต้านทานต่อสภาวะอค์คิถัย  $\tau$  (Fire resistance) เป็นค่าของอุณหภูมิบนด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟหรืออุณหภูมิที่  $x=l$  โดยอาศัยสมการที่ 4.10 สามารถแก้อุณหภูมิบนผิวด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ ได้ดังรูปที่

4.1 ซึ่งอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ  $\left( \frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a} \right)$  เทียบกับ  $\frac{kt}{l^2}$

ในการคำนวณค่าความสามารถทนไฟขององค์อาคาร Harmathy<sup>[15]</sup> ได้แนะนำให้เฉลี่ยค่าอุณหภูมิของก๊าซภายในเตาเทียบกับเวลา หรือ  $(T_F)_{av}$  แทนค่าอุณหภูมิภายในเตา ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนสามารถถ่ายเทออกสู่ภายนอกเตาได้ทางปล่องระบายควัน โดยค่า  $(T_F)_{av}$  มีค่าดังนี้

$$(T_F)_{av} = \frac{1}{\psi} \int_0^\psi T_F dt \quad (4.13)$$

โดยที่

$\psi$  คือ ค่าของช่วงเวลาดั้งแต่เริ่มทดสอบไปจนถึงเวลาของค่า  $(T_F)_{av}$  นั้น

#### 4.3 การคำนวณอุณหภูมิชิ้นส่วนภายใน ของพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ในการทดสอบ

การคำนวณหาค่าอุณหภูมิขึ้นสวนภายในของแผ่นพื้น ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ภายใต้สภาวะไม่คงที่ โดยปราศจากแหล่งกำเนิดพลังงานความร้อนภายในตัวกลาง รายละเอียดและผลการคำนวณ มีดังนี้

● คุณสมบัติของคอนกรีต มีรายละเอียด ดังนี้

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| 1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน  | $k = 1.37 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  |
| ค่าความหนาแน่น                   | $\rho_d = 2,360 \text{ kg m}^{-3}$   |
| ค่าความร้อนจำเพาะ                | $C_p = 1,100 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$                                   |
| 2. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ       | $\rho_d C_p = 2.60 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$                   |
| 3. สัมประสิทธิ์การกระจายอุณหภูมิ | $\kappa = \frac{k}{\rho_d C_p} = 5.27 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ |
| 4. ความหนาของแผ่นพื้น            | $l = 0.12 \text{ m}$   |
| 5. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน |  |

สำหรับชิ้นส่วน โครงสร้างอาคารแนวราบ จากสมการที่ 4.9

$$h_U = 1.521(T_U - T_a)^{1/3} + \sigma \varepsilon_U \left( \frac{T_U^4 - T_a^4}{T_U - T_a} \right)$$

โดยที่

- $\sigma$  คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
- $\varepsilon_U$  คือ สัมประสิทธิ์การแผ่ความร้อน (Emissivity) ของด้านที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ สำหรับวัสดุโครงสร้างอาคารที่ไม่ใช่โลหะใช้ 0.9
- $T_U$  คือ อุณหภูมิบนผิวที่ไม่สัมผัสเปลวไฟ ที่จุดสิ้นสุดสภาพทันทไฟของวัสดุ มีค่าเท่ากับ  $273 + (140 + 30) = 443$  เคลวิน
- $T_a$  คือ อุณหภูมิของอากาศหรืออุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ มีค่าเท่ากับ  $273 + 30 = 303$  เคลวิน

ดังนั้น

$$h_U = 1.521(443 - 303)^{1/3} + \left[ 5.67 \times 10^{-8} \times 0.9 \times \left( \frac{443^4 - 303^4}{443 - 303} \right) \right]$$

$$h_U = 18.864 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

- |                             |                       |
|-----------------------------|-----------------------|
| 6. อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ | $T_a = 303 \text{ K}$ |
| 7. อุณหภูมิเปลวไฟอุคมคติ    |                       |

โดยปกติอุณหภูมิบนผิวด้านสัมผัสเปลวไฟจะมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนภายในเตา เนื่องจากจากอุณหภูมิของก๊าซร้อนสามารถถ่ายเทออกสู่ภายนอกเตาได้จากปล่องระบายควัน ดังนั้นค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านสัมผัสเปลวไฟของตัวอย่างทดสอบจึงเรียกว่า อุณหภูมิเปลวไฟอุคมคติ ซึ่งนิยามไว้ดังนี้

ค่าอุณหภูมิเปลวไฟอุดมคติ คือ ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการเฉลี่ยค่าพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา จากเวลาเริ่มต้นไปถึงเวลาที่ต้องการ โดยที่อุณหภูมิภายในเตาตามมาตรฐาน ASTM E119 มีค่า  $T = 293 + 345 \log_{10}(1 + 0.133t)$  เคลวิน

$$T_F = \frac{1}{\psi} \int_0^{\psi} 239 + 345 \log_{10}(1 + 0.133t) dt$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการอินทิเกรต และเปลี่ยนสัญลักษณ์  $\psi$  เป็น  $t$  มีค่าดังนี้

$$T_F = 273 + \frac{345}{t} [-22.556 - 4t + 7.519 \log_{10}(1000 + 133t) + t \log_{10}(1000 + 133t)] \quad (4.14)$$

- คุณสมบัติของเหล็กเสริม มีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$$k = 35 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

ค่าความหนาแน่น

$$\rho_d = 7,871 \text{ kg m}^{-3}$$

ค่าความร้อนจำเพาะ ของเหล็กที่สถานะ Ferrite มีค่าดังนี้

$$C_p = 252.5 + 0.532T + \frac{3.22 \times 10^6}{T^2} \text{ โดยที่ } 298\text{K} \leq T \leq 1185\text{K}$$

เมื่อ  $T = 900\text{K}$  จะได้

$$C_p = 735.3 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

2. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

$$\rho C_p = 5.79 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$$

3. สัมประสิทธิ์การกระจายอุณหภูมิ

$$\kappa = \frac{k}{\rho C_p} = 6.05 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

4. ความหนาของเหล็กเสริม

$$l = 0.012 \text{ m}$$

- คุณสมบัติของวัสดุเกราท มีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (W/C=0.45)

CC

$$k = 0.224 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย 50%wt.

FF

$$k = 0.339 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมฝุ่นหินปูน 50%wt.

LL

$$k = 0.195 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเพอร์ไลต์ 50%wt.

PP

$$k = 0.116 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

## 2. ค่าความหนาแน่น

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (W/C=0.45)	CC	$\rho_d = 2,067 \text{ kg m}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย 50%wt.	FF	$\rho_d = 2,028 \text{ kg m}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมฝุ่นหินปูน 50%wt.	LL	$\rho_d = 2,210 \text{ kg m}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเพอร์ไลท์ 50%wt.	PP	$\rho_d = 1,470 \text{ kg m}^{-1}$

## 3. ค่าความร้อนจำเพาะ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (W/C=0.45)	CC	$C_p = 1,110 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย 50%wt.	FF	$C_p = 1,209 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมฝุ่นหินปูน 50%wt.	LL	$C_p = 920 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเพอร์ไลท์ 50%wt.	PP	$C_p = 387 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

## 4. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (W/C=0.45)	CC	$\rho_d C_p = 2.29 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย 50%wt.	FF	$\rho_d C_p = 2.45 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมฝุ่นหินปูน 50%wt.	LL	$\rho_d C_p = 2.03 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเพอร์ไลท์ 50%wt.	PP	$\rho_d C_p = 5.69 \times 10^5 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$

## 5. สัมประสิทธิ์การกระจายอุณหภูมิ

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (W/C=0.45)	CC	$\kappa = \frac{k}{\rho_d C_p} = 9.78 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเถ้าลอย 50%wt.	FF	$\kappa = \frac{k}{\rho_d C_p} = 1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมฝุ่นหินปูน 50%wt.	LL	$\kappa = \frac{k}{\rho_d C_p} = 9.61 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ผสมเพอร์ไลท์ 50%wt.	PP	$\kappa = \frac{k}{\rho_d C_p} = 2.04 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

## 6. ความหนาของวัสดุเกรทท์

$$l = 0.0073 \text{ m}$$

- คุณสมบัติของลวดเกลียวอัดแรง ชนิดลวดเกลียว 7 เส้น มีรายละเอียดดังนี้

## 1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$$k = 38 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

ค่าความหนาแน่น

$$\rho_d = 7,850 \text{ kg m}^{-1}$$

ค่าความร้อนจำเพาะ ของเหล็กที่สถานะ Ferrite มีค่าดังนี้

$$C_p = 252.5 + 0.532T + \frac{3.22 \times 10^6}{T^2} \text{ โดยที่ } 298\text{K} \leq T \leq 1185\text{K}$$

เมื่อ  $T = 673K$  จะได้

$$C_p = 617.6 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

2. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

$$\rho_d C_p = 4.85 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$$

3. สัมประสิทธิ์การกระจายอุณหภูมิ

$$\kappa = \frac{k}{\rho_d C_p} = 7.84 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

4. ความหนาของเหล็กเสริม

$$l = 0.0127 \text{ m}$$

• คุณสมบัติของแผ่นยิปซัมทนไฟ มีรายละเอียดดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน

$$k = 0.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

ค่าความหนาแน่น

$$\rho_d = 885 \text{ kg m}^{-3}$$

ค่าความร้อนจำเพาะ

$$C_p = 1088 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$$

2. ค่าความจุความร้อนจำเพาะ

$$\rho_d C_p = 9.63 \times 10^5 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$$

3. สัมประสิทธิ์การกระจายอุณหภูมิ

$$\kappa = \frac{k}{\rho_d C_p} = 4.15 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$$

4. ความหนาของแผ่นยิปซัม

$$l = 0.015 \text{ m} \text{ และ } 0.030 \text{ m}$$

4.3.1 ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิชั้นส่วนภายใน ของพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ทดสอบ

ในหัวข้อนี้แสดงตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิชั้นส่วนภายในของตัวอย่างทดสอบ โดยอาศัยคุณสมบัติของวัสดุและทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติที่กล่าวไว้ข้างต้น เนื่องจากรายละเอียดของชั้นส่วนภายในของแผ่นพื้นที่ใช้ในการทดสอบแต่ละตัวอย่างมีมาก ในที่นี้จะแสดงเฉพาะตัวอย่างการคำนวณที่สำคัญ

• แผ่นพื้นที่ 1 (เพิ่มระยะห่างเหล็กเสริม)

ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตระดับ 3 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่เวลา 30 นาที

1.  $x = 0.03 \text{ m}$

2.  $t = 30 \times 60 = 1800 \text{ s}$

3. เลขนัสเซล (Nusselt number)  $\frac{h_U l}{k} = \frac{18.864 \times 0.12}{1.37} = 1.65$

4.  $\frac{x}{l} = \frac{0.03}{0.12} = 0.25$

5. เลขฟูเรียร์ (Fourier number)  $\frac{\kappa t}{l^2} = \frac{5.27 \times 10^{-7} \times 1800}{0.12^2} = 0.065$

จากตารางที่ 4.2 สามารถหาค่า  $\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a}$  ได้ดังนี้

$\frac{h_U l}{k} = 1$	$\frac{x}{l} = 0.2$	$\kappa t / l^2 = 0.05$	0.4143
		$\kappa t / l^2 = 0.1$	0.2724

	$\frac{x}{l} = 0.4$	$\kappa t / l^2 = 0.05$	0.7425
		$\kappa t / l^2 = 0.1$	0.5357
$\frac{h_v l}{k} = 2$	$\frac{x}{l} = 0.2$	$\kappa t / l^2 = 0.05$	0.3918
		$\kappa t / l^2 = 0.1$	0.2445
	$\frac{x}{l} = 0.4$	$\kappa t / l^2 = 0.05$	0.7193
		$\kappa t / l^2 = 0.1$	0.4937

จากการเทียบบัญชีดิโรยงค์ครั้งที่หนึ่ง จะได้

$\frac{h_v l}{k} = 1$	$x/l = 0.2$	$\kappa t / l^2 = 0.065$	0.3717
	$x/l = 0.4$	$\kappa t / l^2 = 0.065$	0.6800
$\frac{h_v l}{k} = 2$	$x/l = 0.2$	$\kappa t / l^2 = 0.065$	0.3476
	$x/l = 0.4$	$\kappa t / l^2 = 0.065$	0.6516

จากการเทียบบัญชีดิโรยงค์ครั้งที่สอง จะได้

$h_v l / k = 1$	$x/l = 0.25$	$\kappa t / l^2 = 0.065$	0.4488
$h_v l / k = 2$	$x/l = 0.25$	$\kappa t / l^2 = 0.065$	0.4236

จากการเทียบบัญชีดิโรยงค์ครั้งที่สาม จะได้

$h_v l / k = 1.65$	$x/l = 0.25$	$\kappa t / l^2 = 0.065$	0.4324
--------------------	--------------	--------------------------	--------

ดังนั้น

$$\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a} = 0.4324$$

จากสมการที่ 4.11

$$T_\infty = T_a + (T_F - T_a) \frac{1 + \frac{h_v l}{k} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{1 + \frac{h_v l}{k}}$$

โดยที่

$$T_F = 273 + \frac{345}{1800} \left[ -22.556 - (4 \times 1800) + 7.519 \log_{10}(1000 + 133 \times 1800) + \dots \right. \\ \left. + 1800 \log_{10}(1000 + 133 \times 1800) \right] = 752.9 \text{ เคลวิน}$$

เพราะฉะนั้น

$$T_\infty = 303 + (752.9 - 303) \frac{1 + 1.65(1 - 0.25)}{1 + 1.65} = 683.18 \text{ เคลวิน}$$

ดังนั้น

$$\frac{683.18 - T}{683.18 - 303} = 0.4324$$

จะได้  $T = 519.7$  เคลวิน หรือ 246.7 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ที่เวลา 30 นาที

1. ค่า  $T_F$  จากอุณหภูมิคอนกรีต 3.2 ซม. จากผิวล่างของแผ่นพื้น ที่เวลาเดียวกัน = 507.3 เคลวิน

2.  $x = 0.012$  m

3.  $t = 30 \times 60 = 1800$  s

4. เลขนัสเซล(Nusselt number)  $\frac{h_V l}{k} = \frac{18.864 \times 0.012}{35} = 0.01$

5.  $\frac{x}{l} = \frac{0.012}{0.012} = 1.0$

6. เลขฟูเรียร์(Fourier number)  $\frac{\kappa t}{l^2} = \frac{6.05 \times 10^{-6} \times 1800}{0.012^2} = 75.6$

จากตารางที่ 4.2 สามารถหาค่า  $\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a}$  ได้ดังนี้

$h_V l / k = 0$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 75.6$	0.0246
$h_V l / k = 0.5$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 75.6$	0.0063

จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ครั้งที่หนึ่ง จะได้

$h_V l / k = 0.01$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 75.6$	0.0242
--------------------	---------------	-------------------------	--------

ดังนั้น

$$\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a} = 0.0242$$

จากสมการที่ 4.11

$$T_\infty = T_a + (T_F - T_a) \frac{1 + \frac{h_V l}{k} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{1 + \frac{h_V l}{k}}$$

โดยที่

$$T_F = 507.3 \text{ เคลวิน}$$

เพราะฉะนั้น

$$T_\infty = 303 + (507.3 - 303) \frac{1 + 0.01(1-1)}{1 + 0.01} = 506.0 \text{ เคลวิน}$$

ดังนั้น

$$\frac{506.0 - T}{506.0 - 303} = 0.0242$$

จะได้  $T = 501.1$  เคลวิน หรือ  $228.1$  องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิผิวดวงเคลือบผิวอัดแรง ที่เวลา 30 นาที

ขั้นที่ 1 อุณหภูมิที่ผิวบนของวัสดุเกรทท์(ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ W/C=0.45)

1. ค่า  $T_F$  จากอุณหภูมิคอนกรีต 3.2 ซม. จากผิวล่างของแผ่นพื้น ที่เวลาเดียวกัน = 507.3 เคลวิน

2.  $x = 0.0073$  m

3.  $t = 30 \times 60 = 1800$  s

4. เลขนัสเซล(Nusselt number)  $\frac{h_v l}{k} = \frac{18.864 \times 0.0073}{0.224} = 0.61$

5.  $\frac{x}{l} = \frac{0.0073}{0.0073} = 1.0$

6. เลขฟูเรียร์(Fourier number)  $\frac{\kappa t}{l^2} = \frac{9.78 \times 10^{-8} \times 1800}{0.0073^2} = 3.3$

จากตารางที่ 4.2 สามารถหาค่า  $\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a}$  ได้ดังนี้

$h_v l / k = 0.5$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 3.3$	0.0063
$h_v l / k = 1$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 3.3$	0.0020

จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ครั้งที่หนึ่ง จะได้

$h_v l / k = 0.61$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 3.3$	0.0053
--------------------	---------------	------------------------	--------



ดังนั้น

$$\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a} = 0.0053$$

จากสมการที่ 4.11

$$T_\infty = T_a + (T_F - T_a) \frac{1 + \frac{h_V l}{k} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{1 + \frac{h_V l}{k}}$$

โดยที่

$$T_F = 507.3 \text{ เคลวิน}$$

เพราะฉะนั้น

$$T_\infty = 303 + (507.3 - 303) \frac{1 + 0.61(1-1)}{1 + 0.61} = 430.3 \text{ เคลวิน}$$

ดังนั้น

$$\frac{430.3 - T}{430.3 - 303} = 0.0053$$

จะได้  $T = 429.6$  เคลวิน หรือ  $156.6$  องศาเซลเซียส

ขั้นที่ 2 อณุมหุมีที่ผิวบนของลวดเกิดยวอดแรง

1. ค่า  $T_F$  จากอณุมหุมีวัสดุเกราท์ ที่เวลาเดียวกัน = 429.6 เคลวิน

2.  $x = 0.0127$  m

3.  $t = 30 \times 60 = 1800$  s

4. เลขนัสเซล(Nusselt number)  $\frac{h_V l}{k} = \frac{18.864 \times 0.0127}{38} = 0.01$

5.  $\frac{x}{l} = \frac{0.0127}{0.0127} = 1.0$

6. เลขฟูเรียร์(Fourier number)  $\frac{\kappa t}{l^2} = \frac{7.84 \times 10^{-6} \times 1800}{0.0127^2} = 87.5$

จากตารางที่ 4.2 สามารถหาค่า  $\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a}$  ได้ดังนี้

$h_V l / k = 0$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 87.5$	0.0246
$h_V l / k = 0.5$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 87.5$	0.0063

จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ครั้งที่หนึ่ง จะได้

$h_U l / k = 0.01$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 87.5$	0.0242
--------------------	---------------	-------------------------	--------

ดังนั้น

$$\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a} = 0.0242$$

จากสมการที่ 4.11

$$T_\infty = T_a + (T_F - T_a) \frac{1 + \frac{h_U l}{k} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{1 + \frac{h_U l}{k}}$$

โดยที่

$$T_F = 429.6 \text{ เคลวิน}$$

เพราะฉะนั้น

$$T_\infty = 303 + (429.6 - 303) \frac{1 + 0.01(1-1)}{1 + 0.01} = 428.8 \text{ เคลวิน}$$

ดังนั้น

$$\frac{428.8 - T}{428.8 - 303} = 0.0242$$

จะได้  $T = 425.8$  เคลวิน หรือ  $152.8$  องศาเซลเซียส

- แผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่างของแผ่นพื้น)

ตัวอย่างการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นยิปซัมหนา 15 มิลลิเมตร ที่เวลา 30 นาที

1.  $x = 0.015 \text{ m}$

2.  $t = 30 \times 60 = 1800 \text{ s}$

3. เลขนัสเซิล (Nusselt number)  $\frac{h_U l}{k} = \frac{18.864 \times 0.015}{0.4} = 0.7$

4.  $\frac{x}{l} = \frac{0.015}{0.015} = 1.0$

5. เลขฟูเรียร์ (Fourier number)  $\frac{\kappa t}{l^2} = \frac{4.15 \times 10^{-7} \times 1800}{0.015^2} = 3.32$

จากตารางที่ 4.2 สามารถหาค่า  $\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a}$  ได้ดังนี้

$h_U l / k = 0.5$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 3.32$	0.0063
$h_U l / k = 1$	$x / l = 1.0$	$\kappa t / l^2 = 3.32$	0.0020

จากการเทียบบัญญัติไตรยางค์ครั้งที่หนึ่ง จะได้

$h_U l / k = 0.7$	$x / l = 1.0$	$kt / l^2 = 3.32$	0.0045
-------------------	---------------	-------------------	--------

ดังนั้น

$$\frac{T_\infty - T}{T_\infty - T_a} = 0.0045$$

จากสมการที่ 4.11

$$T_\infty = T_a + (T_F - T_a) \frac{1 + \frac{h_U l}{k} \left(1 - \frac{x}{l}\right)}{1 + \frac{h_U l}{k}}$$

โดยที่

$$T_F = 273 + \frac{345}{1800} [-22.556 - (4 \times 1800) + 7.519 \log_{10}(1000 + 133 \times 1800) + \dots + 1800 \log_{10}(1000 + 133 \times 1800)] = 752.9 \text{ เคลวิน}$$

เพราะฉะนั้น

$$T_\infty = 303 + (752.9 - 303) \frac{1 + 0.7(1-1)}{1 + 0.7} = 567.3 \text{ เคลวิน}$$

ดังนั้น

$$\frac{567.3 - T}{567.3 - 303} = 0.0045$$

จะได้  $T = 566.1$  เคลวิน หรือ  $293.1$  องศาเซลเซียส

- แผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น)

จากคุณสมบัติของสีทนไฟในการต้านทานอัคคีภัยที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6.1 พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อสีทนไฟได้รับความร้อนจากเปลวไฟ ดังนั้นการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและค่าความร้อนจำเพาะของสีทนไฟในทางปฏิบัติจึงมีความยุ่งยาก เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในของแผ่นพื้น จึงใช้อุณหภูมิที่ผิวเหล็กจากผลการทดสอบชิ้นส่วนเหล็กโครงสร้างที่ทาสีทนไฟแทนการคำนวณด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ โดยการทดสอบใช้ท่อเหล็กขนาด 76x4.0 มม. ทาสีทนไฟหนา 1.6 มม. (1600 ไมครอน) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 รูปที่ 4.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของท่อเหล็กดังกล่าว จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาสามารถสร้างเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ ได้ดังนี้

$$T_i = 10.24t + 27 \quad (4.15)$$

โดยที่

$T_i$  คือ อุณหภูมิสมมุติที่ผิวของวัสดุที่ทาสีทนไฟ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส  
 $t$  คือ เวลา มีหน่วยเป็น นาที

รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของเส้นตรงความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.15 และค่าอุณหภูมิเปลวไฟอุดมคติ (Idealize fire temperature) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าเส้นตรงความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.15 ใช้เป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านไม่สัมผัสเปลวไฟของแผ่นพื้น ( $T_F$ ) ได้เพียง 50 นาทีแรกเท่านั้น หลังจาก 50 นาทีไปแล้ว การคำนวณค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ภายในแผ่นพื้นให้ใช้ค่าอุณหภูมิเปลวไฟอุดมคติ เป็นค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านไม่สัมผัสเปลวไฟของแผ่นพื้น ( $T_F$ )

#### 4.3.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิของชิ้นส่วนภายใน ของพื้นคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ทดสอบ

##### 4.3.2.1 ผลการคำนวณอุณหภูมิชิ้นส่วนภายใน ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)

ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร และอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สรุปได้ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 ถึง 4.8 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.5 ถึง 4.7 พบว่าผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบมาก จากรูปที่ 4.8 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นมีค่ามากกว่าผลจากการทดสอบ ซึ่งเป็นผลจากการพาความร้อนด้วยลมและไอน้ำที่ถูกขับออกมาจากคอนกรีต

ผลการคำนวณอุณหภูมิลูกเหล็กเสริม สรุปได้ดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.9 จากรูปที่ 4.9 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิลูกเหล็กเสริมมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากสมมุติฐานของทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สมมุติให้เหล็กเสริมมีลักษณะเป็นแผ่นเหล็กที่มีความกว้างและยาวเท่ากับแผ่นพื้นและมีความหนาเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเสริม แต่สภาพที่แท้จริงของเหล็กเสริมมีความแตกต่างออกไป เพราะพื้นที่ผิวของเหล็กเสริมสำหรับรับพลังงานความร้อนมีค่าน้อยกว่าที่คำนวณมาก จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้อุณหภูมิของเหล็กเสริมที่วัดได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าการคำนวณด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ

ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรง สรุปได้ดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.10 จากรูปที่ 4.10 พบว่า ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบพอสมควร โดยเหตุผลเป็นเช่นเดียวกับการคำนวณอุณหภูมิลูกเหล็กเสริม

##### 4.3.2.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิชิ้นส่วนภายใน ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว)

ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร และอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สรุปได้ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.11 ถึง 4.14 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 พบว่าผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบมาก จากรูปที่ 4.14 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบ โดยเหตุผลเป็นเช่นเดียวกับผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตในหัวข้อที่ 4.3.2.1

ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม สรุปได้ดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.15 จากรูปที่ 4.15 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมมีค่ามากกว่าผลจากการทดสอบพอสมควร เหตุผลเป็นเช่นเดียวกับผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมในหัวข้อที่ 4.3.2.1

ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรง สรุปได้ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.16 จากรูปที่ 4.16 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงมีค่ามากกว่าผลจากการทดสอบพอสมควร เหตุผลเป็นเช่นเดียวกับการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงในหัวข้อที่ 4.3.2.1

#### 4.3.2.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิจนส่วนภายใน ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)

การคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับต่างๆ อุณหภูมิเหล็กเสริม และอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรง ทำเช่นเดียวกับแผ่นพื้นที่ 1 โดยการแทนค่า  $T_F$  ด้วยค่าอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นยิปซัมที่เวลาเดียวกัน ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร และอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สรุปได้ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.17 ถึง 4.20 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.17 ถึง 4.19 พบว่าผลการคำนวณในช่วงก่อนนาที่ที่ 72 มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ แต่ภายหลังจากนาที่ที่ 72 แผ่นยิปซัมเริ่มหลุดออกจากแผ่นพื้นทำให้อุณหภูมิจากการทดสอบมีค่าสูงกว่าการคำนวณ โดยการคำนวณสมมุติให้แผ่นยิปซัมคงสภาพเดิมตลอดช่วงเวลาของการทดสอบ จากรูปที่ 4.20 พบว่าการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดสอบ เนื่องจากผลของความหนาของแผ่นพื้นทำให้อุณหภูมิภายหลังจากนาที่ที่ 72 ไม่แตกต่างจากผลการคำนวณอย่างเห็นได้ชัด

ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม สรุปได้ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.21 จากรูปที่ 4.21 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมในช่วงก่อนนาที่ที่ 72 มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ แต่ภายหลังจากนาที่ที่ 72 แผ่นยิปซัมเริ่มหลุดออกจากแผ่นพื้นทำให้อุณหภูมิเหล็กเสริมที่วัดได้จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าการคำนวณ และอุณหภูมิของเหล็กเสริมจากการทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากผลของการหลุดร่อนแบบการระเบิดออกของผิวคอนกรีตมีระยะความลึก ของการหลุดร่อนสูงสุดประมาณ 3 เซนติเมตร ซึ่งเหล็กเสริมจะสัมผัสเปลวไฟโดยตรง

ผลการคำนวณอุณหภูมิแวดล้อมกึ่งยวอัดแรง สรุปได้ดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.22 จากรูปที่ 4.22 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทดสอบ แต่ภายหลังนาทีที่ 72 แผ่นยิปซัมเริ่มหลุดออกจากแผ่นพื้นทำให้อุณหภูมิแวดล้อมกึ่งยวอัดแรง จากการทดสอบมีค่าสูงกว่าการคำนวณ

#### 4.3.2.4 ผลการคำนวณอุณหภูมิชิ้นส่วนภายใน ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)

ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร และอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สรุปได้ดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.23 ถึง 4.26 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.23 ถึง 4.26 พบว่าผลการคำนวณมีค่ามากกว่าผลจากการทดสอบพอสมควร โดยมีสาเหตุของความแตกต่างดังนี้

1. สีทนไฟมีการยึดเกาะผิวคอนกรีตดีกว่าท่อเหล็ก ดังนั้นการหลุดร่อนของโพลีคาร์บอนจะค่อยๆ หลุดออกจากผิวแผ่นพื้นและใช้เวลาในการหลุดออกนานกว่าท่อเหล็ก

2. การทดสอบท่อเหล็กที่ทาสีทนไฟ ท่อเหล็กจะสัมผัสเปลวไฟทุกทิศทาง

ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม สรุปได้ดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.27 จากรูปที่ 4.27 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมมีค่ามากกว่าผลจากการทดสอบพอสมควร เหตุผลเป็นเช่นเดียวกับผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ

ผลการคำนวณอุณหภูมิแวดล้อมกึ่งยวอัดแรง สรุปได้ดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.28 จากรูปที่ 4.28 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิแวดล้อมกึ่งยวอัดแรงมีค่ามากกว่าผลจากการทดสอบพอสมควร เหตุผลเป็นเช่นเดียวกับการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับต่างๆ

#### 4.3.2.5 ผลการคำนวณอุณหภูมิชิ้นส่วนภายใน ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรท)

ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร และอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สรุปได้ดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.29 ถึง 4.32 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.11 ถึง 4.31 พบว่าผลการคำนวณจะแตกต่างจากผลจากการทดสอบมากขึ้น เมื่อระยะห่างจากผิวล่างของแผ่นพื้นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากระยะห่างของท่อร้อยลวดกึ่งยวอัดแรงมีค่าน้อยเกินไป จึงเกิดเป็นชั้นที่มีเหล็กในปริมาณมาก ความร้อนจากผิวล่างของแผ่นพื้นจึงระบายออกทางบริเวณด้านข้างของแผ่นพื้นผ่านทางลวดกึ่งยวอัดแรง จากรูปที่ 4.32 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบ โดยเหตุผลเป็นเช่นเดียวกับผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตในหัวข้อที่ 4.3.2.1

ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม สรุปได้ดังตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.33 จากรูปที่ 4.33 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมมีค่ามากกว่าผลการจากทดสอบพอสมควร เหตุผลเป็นเช่นเดียวกับผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมในหัวข้อที่ 4.3.2.1

ผลการคำนวณอุณหภูมิหลอดเกลิยวอดแรงภายในท่อร้อยหลอดเกลิยวอดแรง ที่ใช้วัสดุเกรดที่ชนิดต่างๆสรุปได้ดังตารางที่ 4.17 ในรูปที่ 4.34 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิหลอดเกลิยวอดแรงภายในท่อร้อยหลอดเกลิยวที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกรดที่ รูปที่ 4.35 ถึง 4.37 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิหลอดเกลิยวอดแรงภายในท่อร้อยหลอดเกลิยวที่ใช้ เถ้าลอย ผุ่นหินปูนและเพอร์ไลท์ เป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกรดที่ตามลำดับ จากรูปที่ 4.34 ถึง 4.37 พบว่าผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมมีค่าแตกต่างจากผลการทดสอบพอสมควร ทั้งนี้เป็นผลจากระยะห่างระหว่างท่อร้อยหลอดเกลิยวอดแรงตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกรดที่ใช้เป็นค่าคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

#### 4.4 สรุป

จากการคำนวณอุณหภูมิตฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ สรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1. การคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่าง ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ให้ค่าอุณหภูมิใกล้เคียงกับผลการทดสอบ
2. การคำนวณอุณหภูมิตที่ผิวบนของแผ่นพื้น เหล็กเสริมและหลอดเกลิยวอดแรง ให้ค่ามากกว่าผลจากการทดสอบ ดังนั้นการคำนวณอุณหภูมิตด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ให้ผลลัพธ์ที่ปลอดภัยในการใช้งาน
3. ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ไม่สามารถศึกษาผลของระยะห่างเหล็กเสริม การหาระยะเวลาที่แผ่นยิปซัมหลุคร้อน เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ค่ารากที่หนึ่งของสมการที่ 4.12<sup>[15]</sup>

$\frac{h_U l}{k}$	$\alpha_1$	$\frac{h_U l}{k}$	$\alpha_1$	$\frac{h_U l}{k}$	$\alpha_1$
0	1.5708				
0.1	1.6320	1.0	2.0288	10	2.8628
0.2	1.6887	2.0	2.2889	20	2.9930
0.3	1.7414	3.0	2.4557	30	3.0406
0.4	1.7906	4.0	2.5704	40	3.0651
0.5	1.8366	5.0	2.6537	50	3.0801
0.6	1.8798	6.0	2.7165	60	3.0901
0.7	1.9203	7.0	2.7654	80	3.1028
0.8	1.9586	8.0	2.8044	100	3.1105
0.9	1.9947	9.0	2.8363	$\infty$	3.1416

ตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์จากสมการที่ 4.10<sup>[15]</sup>

$(T_\infty - T)/(T_\infty - T_a)$								
$\frac{h_U l}{k}$	$\frac{x}{l}$	$kt/l^2$						
		0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6
0	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	1.0	0.4729	0.3452	0.2443	0.1467	0.0547	0.0076
	0.4	1.0	0.7941	0.6286	0.4616	0.2790	0.1040	0.0144
	0.6	1.0	0.9422	0.8185	0.6304	0.3839	0.1431	0.0199
	0.8	1.0	0.9884	0.9191	0.7363	0.4513	0.1682	0.0234
	1.0	1.0	0.9969	0.9493	0.7723	0.4745	0.1769	0.0246
0.5	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	1.0	0.4353	0.2985	0.1910	0.0956	0.0248	0.0017
	0.4	1.0	0.7624	0.5714	0.3812	0.1921	0.0498	0.0034
	0.6	1.0	0.9277	0.7734	0.5447	0.2768	0.0718	0.0048
	0.8	1.0	0.9842	0.8909	0.6577	0.3368	0.0874	0.0059
	1.0	1.0	0.9955	0.9295	0.6996	0.3593	0.0932	0.0063



ตารางที่ 4.2(ต่อ) แสดงผลลัพธ์จากสมการที่ 4.10<sup>[15]</sup>

$(T_\infty - T)/(T_\infty - T_a)$								
$\frac{h_c l}{k}$	$\frac{x}{l}$	$\kappa t / l^2$						
		0	0.05	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6
1	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	1.0	0.4143	0.2724	0.1616	0.0697	0.0134	0.0003
	0.4	1.0	0.7425	0.5357	0.3318	0.1441	0.0278	0.0010
	0.6	1.0	0.9174	0.7412	0.4860	0.2130	0.0411	0.0015
	0.8	1.0	0.9807	0.8680	0.5988	0.2645	0.0510	0.0019
	1.0	1.0	0.9941	0.9123	0.6433	0.2851	0.0550	0.0020
2	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	1.0	0.3918	0.2445	0.1305	0.0451	0.0055	0.0001
	0.4	1.0	0.7193	0.4937	0.2749	0.0955	0.0117	0.0002
	0.6	1.0	0.9037	0.6988	0.4120	0.1444	0.0178	0.0003
	0.8	1.0	0.9754	0.8335	0.5181	0.1829	0.0225	0.0003
	1.0	1.0	0.9921	0.8846	0.5633	0.1996	0.0245	0.0004
5	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	1.0	0.3675	0.2143	0.0978	0.0237	0.0014	0
	0.4	1.0	0.6911	0.4432	0.2098	0.0511	0.0031	0
	0.6	1.0	0.8844	0.6398	0.3185	0.0779	0.0047	0
	0.8	1.0	0.9655	0.7753	0.4047	0.0996	0.0060	0
	1.0	1.0	0.9869	0.8319	0.4445	0.1096	0.0066	0
$\infty$	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0.2	1.0	0.3411	0.1817	0.0651	0.0090	0.0002	0
	0.4	1.0	0.6568	0.3821	0.1403	0.0195	0.0004	0
	0.6	1.0	0.8556	0.5551	0.2101	0.0292	0.0006	0
	0.8	1.0	0.9437	0.6683	0.2593	0.0361	0.0007	0
	1.0	1.0	0.9660	0.7071	0.2771	0.0386	0.0007	0

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่างๆเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)

เวลา (นาที)	3ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	6ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	9ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	ผิวบน (องศาเซลเซียส)
30	246.7	107.1	52.0	38.2
45	320.5	164.0	80.5	51.2
60	367.8	206.9	112.5	72.6
90	450.6	292.6	183.2	122.3
120	502.3	347.0	232.2	159.1
180	589.3	448.1	309.2	214.0
240	637.6	497.9	365.4	268.1

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)

เวลา (นาที)	คอนกรีต3.2ชม. (องศาเซลเซียส)	ผิวบนเหล็กเสริม (องศาเซลเซียส)
30	234.3	228.1
45	307.9	299.5
60	355.1	345.2
90	438.8	426.4
120	490.9	476.9
180	579.3	562.6
240	627.9	609.7

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)

เวลา (นาที)	คอนกรีต3.2ชม. (องศาเซลเซียส)	วัสดุเกราะที่ (องศาเซลเซียส)	ลวดเกลียวอัดแรง (องศาเซลเซียส)
30	234.3	156.6	152.8
45	307.9	239.1	234.3
60	355.1	292.1	286.3
90	438.8	386.7	378.9
120	490.9	446.3	436.5
180	579.3	547.9	534.1
240	627.9	605.7	587.9

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่างๆเทียบกับเวลาของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวด)

เวลา (นาท)	3ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	6ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	9ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	ผิวบน (องศาเซลเซียส)
30	246.7	107.1	52.0	38.2
45	320.5	164.0	80.5	51.2
60	367.8	206.9	112.5	72.6
90	450.6	292.6	183.2	122.3
120	502.3	347.0	232.2	159.1
180	589.3	448.1	309.2	214.0
240	637.6	497.9	365.4	268.1

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว)

เวลา (นาท)	ระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว 3.2 เซนติเมตร		ระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว 5.6 เซนติเมตร	
	คอนกรีต 3.2 ชม. (องศาเซลเซียส)	ผิวบนเหล็กเสริม (องศาเซลเซียส)	คอนกรีต 5.6 ชม. (องศาเซลเซียส)	ผิวบนเหล็กเสริม (องศาเซลเซียส)
30	234.3	228.1	116.3	113.8
45	307.9	299.5	207.1	202.6
60	355.1	345.2	252.4	245.9
90	438.8	426.4	339.3	330.9
120	490.9	476.9	403.5	393.3
180	579.3	562.6	498.7	486.3
240	627.9	609.7	569.1	554.5

ตารางที่ 4.8 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวด)

เวลา (นาท)	ระยะหุ้มท่อร้อยลวด 3.2 ชม. (องศาเซลเซียส)			ระยะหุ้มท่อร้อยลวด 5.6 ชม. (องศาเซลเซียส)		
	คอนกรีต 3.2 ชม.	วัสดุเกราะ	เหล็กเสริม อัดแรง	คอนกรีต 5.6 ชม.	วัสดุเกราะ	เหล็กเสริม อัดแรง
30	234.3	156.6	152.8	116.3	83.9	82.3
45	307.9	239.1	234.3	207.1	122.0	119.3
60	355.1	292.1	286.3	225.4	150.8	147.2
90	438.8	386.7	378.9	339.3	214.1	209.5
120	490.9	446.3	436.5	403.5	267.4	261.8
180	579.3	547.9	534.1	498.7	350.6	344.0
240	627.9	605.7	587.9	569.1	408.3	400.5

ตารางที่ 4.9 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่างๆเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3 (คิดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)

เวลา (นาที)	ยิปซัม 15มม.	อุณหภูมิคอนกรีต(องศาเซลเซียส)				ยิปซัม 30มม.	อุณหภูมิคอนกรีต(องศาเซลเซียส)			
		3ชม.	6ชม.	9ชม.	ผิวบน		3ชม.	6ชม.	9ชม.	ผิวบน
30	293.1	36.0	36.0	36.0	36.0	215.9	36.0	36.0	36.0	36.0
60	358.6	67.1	53.1	45.0	41.5	265.4	36.0	36.0	36.0	36.0
90	393.7	94.8	73.3	58.5	50.2	290.3	36.0	36.0	36.0	36.0
120	418.6	115.5	89.9	71.0	59.0	308.0	37.4	37.1	36.0	36.0
180	453.8	149.6	121.3	97.5	78.4	332.9	55.1	50.8	47.1	44.2
240	478.8	172.4	141.4	114.0	90.4	350.7	69.8	62.5	56.0	50.4

ตารางที่ 4.10 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3 (คิดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)

เวลา (นาที)	คิดแผ่นยิปซัม 15 มม. (องศาเซลเซียส)			คิดแผ่นยิปซัม 30 มม. (องศาเซลเซียส)		
	ยิปซัม15มม.	คอนกรีต 3.2ชม	ผิวบน เหล็กเสริม	ยิปซัม30มม.	คอนกรีต 3.2ชม	ผิวบน เหล็กเสริม
30	293.1	36.0	36.0	215.9	36.0	36.0
60	358.6	66.0	65.2	265.4	36.0	36.0
90	393.7	87.1	85.6	290.3	36.0	36.0
120	418.6	113.6	111.4	308.0	37.3	36.0
180	453.8	147.6	114.3	332.9	54.8	54.3
240	478.8	170.3	116.4	350.7	69.3	68.1

ตารางที่ 4.11 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3 (คิดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง)

เวลา (นาที)	คิดแผ่นยิปซัม 15 มม. (องศาเซลเซียส)				คิดแผ่นยิปซัม 30 มม. (องศาเซลเซียส)			
	ยิปซัม 15มม.	คอนกรีต 3.2ชม	วัสดุ เกร้าท์	ลวด เกลียวอัด แรง	ยิปซัม 30มม.	คอนกรีต 3.2ชม	วัสดุ เกร้าท์	ลวด เกลียวอัด แรง
30	293.1	36.0	36.0	36.0	215.9	36.0	36.0	36.0
60	358.6	66.0	55.3	54.8	265.4	36.0	36.0	36.0
90	393.7	87.1	68.3	67.4	290.3	36.0	36.0	36.0
120	418.6	113.6	84.6	83.2	308.0	37.3	36.0	36.0
180	453.8	147.6	103.5	101.5	332.9	54.8	48.4	48.1
240	478.8	170.3	116.4	114.4	350.7	69.3	57.3	56.7

ตารางที่ 4.12 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ เทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)

เวลา (นาท)	3ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	6ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	9ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	ผิวบน (องศาเซลเซียส)
30	176.7	82.7	49.5	36.2
45	291.1	150.6	75.6	49.3
60	367.8	206.9	112.5	72.6
90	450.6	292.6	183.2	122.3
120	502.3	347.0	232.2	159.1
180	589.3	448.1	309.2	214.0
240	637.6	497.9	365.4	268.1

ตารางที่ 4.13 ผลการคำนวณเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)

เวลา (นาท)	คอนกรีต3.2ชม. (องศาเซลเซียส)	ผิวบนเหล็กเสริม (องศาเซลเซียส)
30	168.5	164.3
45	279.8	272.2
60	355.1	345.2
90	438.8	426.4
120	490.9	476.9
180	579.3	562.6
240	627.9	609.7

ตารางที่ 4.14 ผลการคำนวณลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)

เวลา (นาท)	คอนกรีต3.2ชม. (องศาเซลเซียส)	วัสดุเกราะที่ (องศาเซลเซียส)	ลวดเกลียวอัดแรง (องศาเซลเซียส)
30	168.5	116.1	113.5
45	279.8	184.6	180.0
60	355.1	292.1	286.3
90	438.8	386.7	378.9
120	490.9	446.3	436.5
180	579.3	547.9	534.1
240	627.9	605.7	587.9

ตารางที่ 4.15 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ เทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)

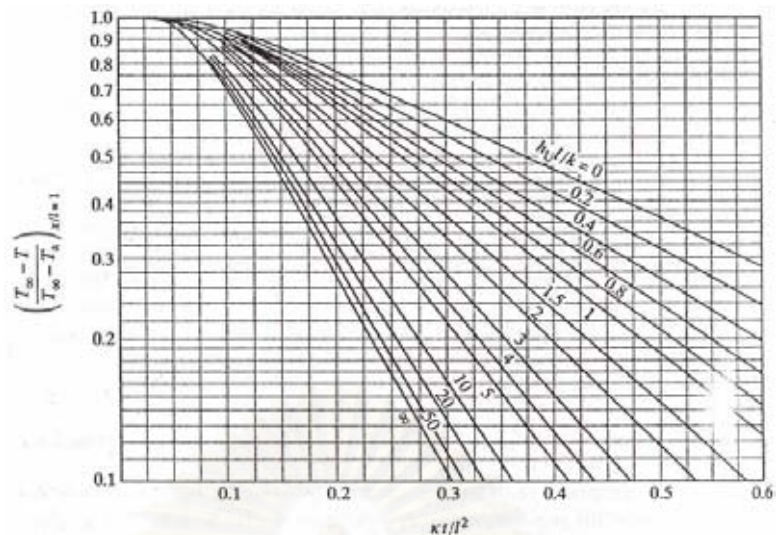
เวลา (นาท)	3ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	6ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	9ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	ผิวบน (องศาเซลเซียส)
30	246.7	107.1	52.0	38.2
45	320.5	164.0	80.5	51.2
60	367.8	206.9	112.5	72.6
90	450.6	292.6	183.2	122.3
120	502.3	347.0	232.2	159.1
180	589.3	448.1	309.2	214.0
240	637.6	497.9	365.4	268.1

ตารางที่ 4.16 ผลการคำนวณเหล็กเสริมเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)

เวลา (นาท)	คอนกรีต3.2ชม. (องศาเซลเซียส)	ผิวบนเหล็กเสริม (องศาเซลเซียส)
30	234.3	228.1
45	307.9	299.5
60	355.1	345.2
90	438.8	426.4
120	490.9	476.9
180	579.3	562.6
240	627.9	609.7

ตารางที่ 4.17 ผลการคำนวณลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)

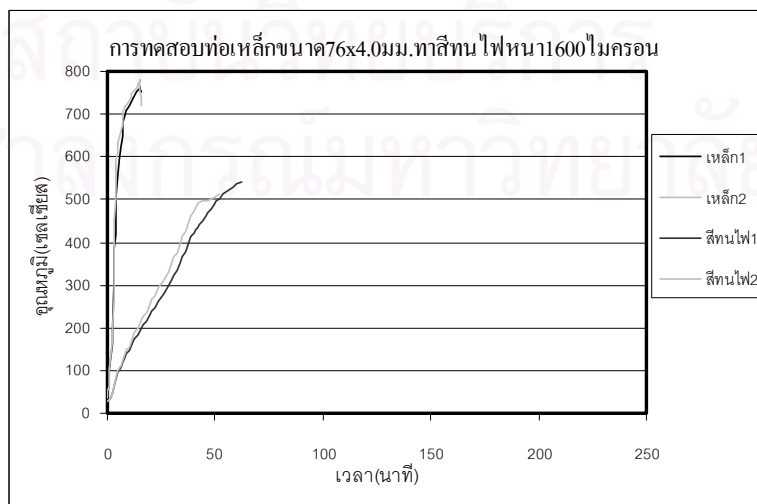
เวลา (นาท)	คอนกรีต3.2 ชม.จากผิวล่าง (องศาเซลเซียส)	วัสดุเกราท (องศาเซลเซียส)				ลวดเกลียวอัดแรง (องศาเซลเซียส)			
		CC	FF	LL	PP	CC	FF	LL	PP
30	234.3	156.6	174.5	150.0	124.3	152.8	170.2	146.4	121.5
45	307.9	239.1	230.2	204.3	176.7	234.3	225.4	199.5	171.9
60	355.1	292.1	268.4	243.4	216.5	286.3	262.6	237.6	210.7
90	438.8	386.7	337.6	315.7	291.3	378.9	329.8	307.9	283.5
120	490.9	446.3	385.1	369.9	352.1	436.5	375.3	360.1	342.3
180	579.3	547.9	469.4	469.7	466.6	534.1	455.6	455.9	452.8
240	627.9	605.7	526.6	547.0	563.6	587.9	508.8	529.2	545.8



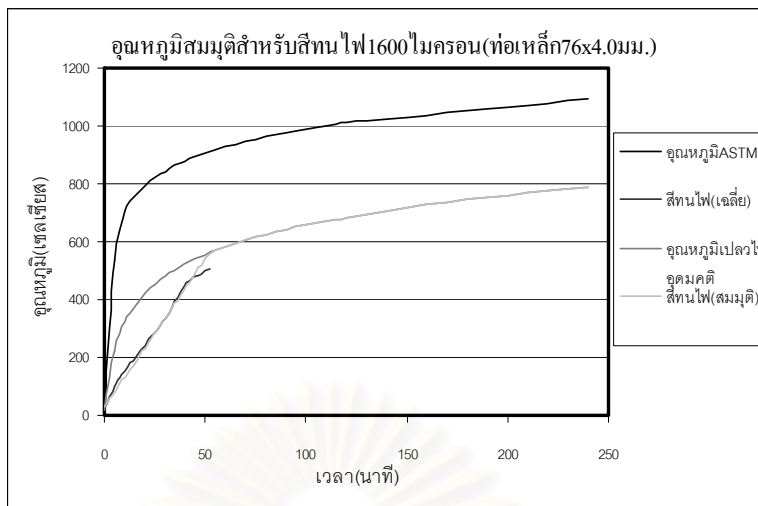
รูปที่ 4.1 อุณหภูมิที่ผิวบน ( $x/l = 1$ ) ของแผ่นพื้นที่สัมผัสเปลวบริเวณผิวล่าง



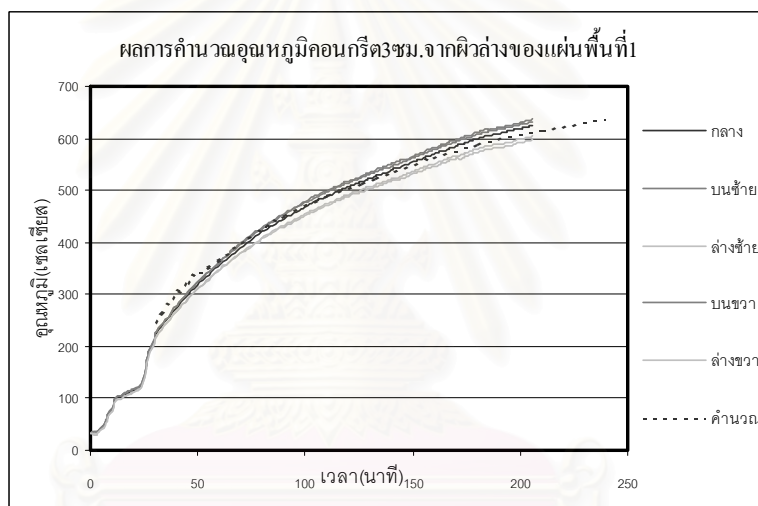
รูปที่ 4.2 การทดสอบต่อเหล็กขนาด 76x4.0 มม. ทาสีทนไฟหนา 1600 ไมครอน



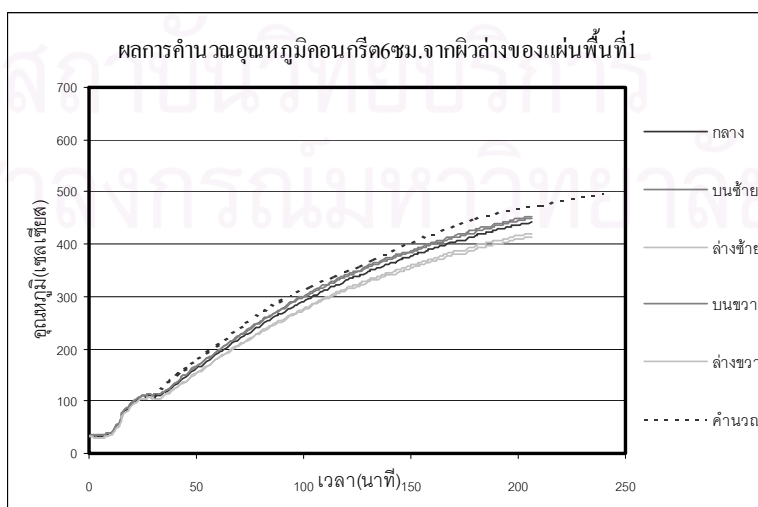
รูปที่ 4.3 ผลการทดสอบต่อเหล็กขนาด 76x4.0 มม. ทาสีทนไฟหนา 1600 ไมครอน



รูปที่ 4.4 เส้นตรงสมมุติที่ใช้แทนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของสัทนไฟหนา 1600 ไมครอน

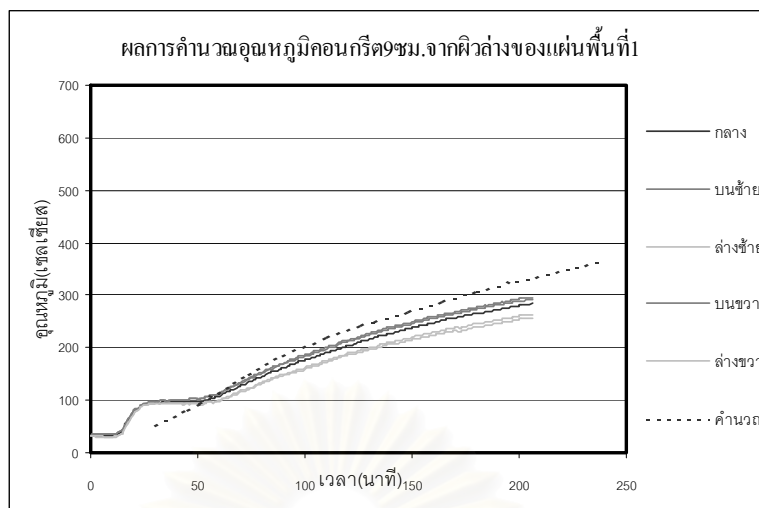


รูปที่ 4.5 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ3เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่1(ลดระยะห่างเหล็กเสริม)

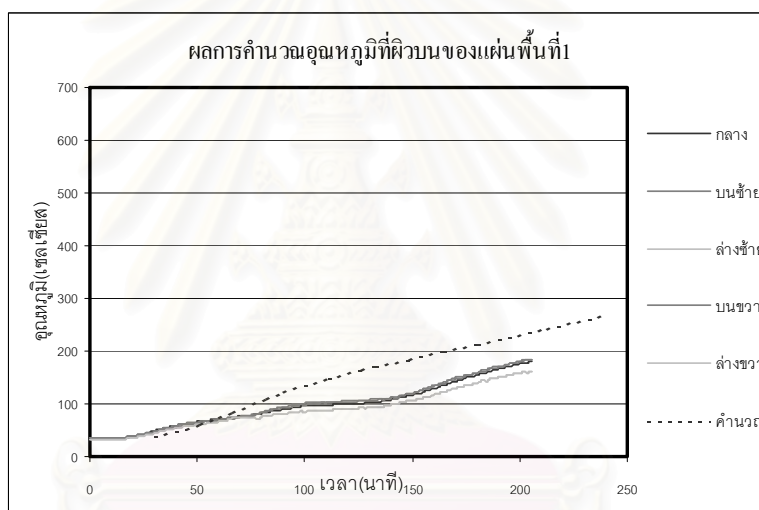


รูปที่ 4.6 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ6เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่1(ลดระยะห่างเหล็กเสริม)

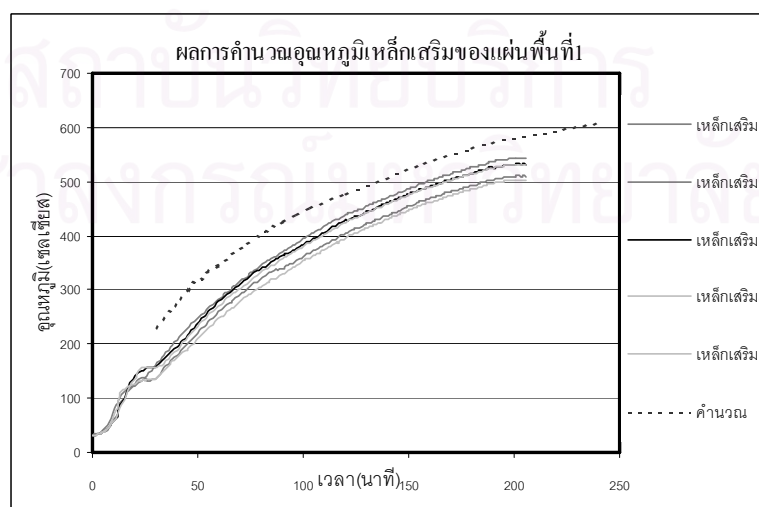




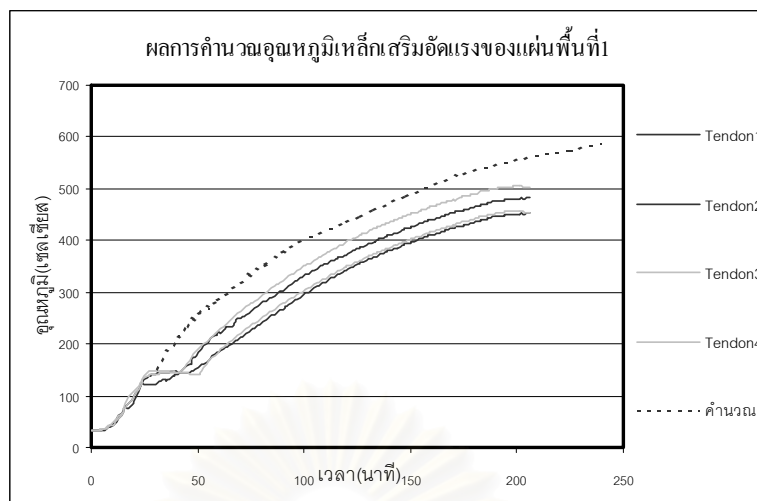
รูปที่ 4.7 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 1 (ลระยะห่างเหล็กเสริม)



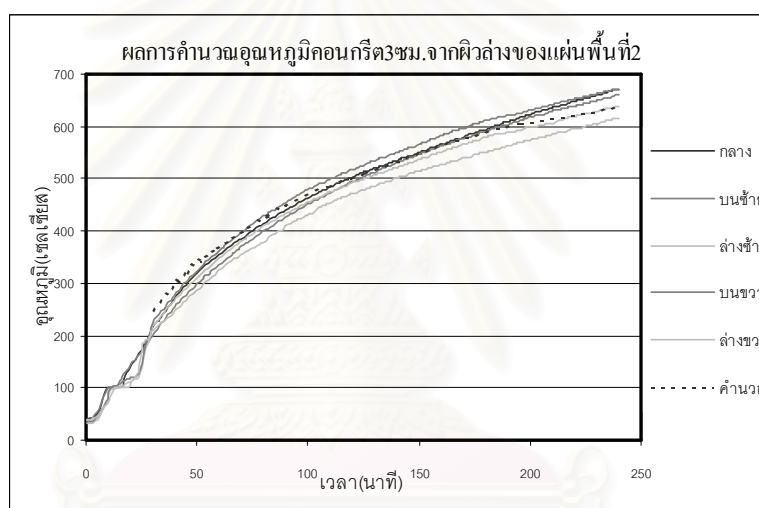
รูปที่ 4.8 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นพื้นที่ 1 (ลระยะห่างเหล็กเสริม)



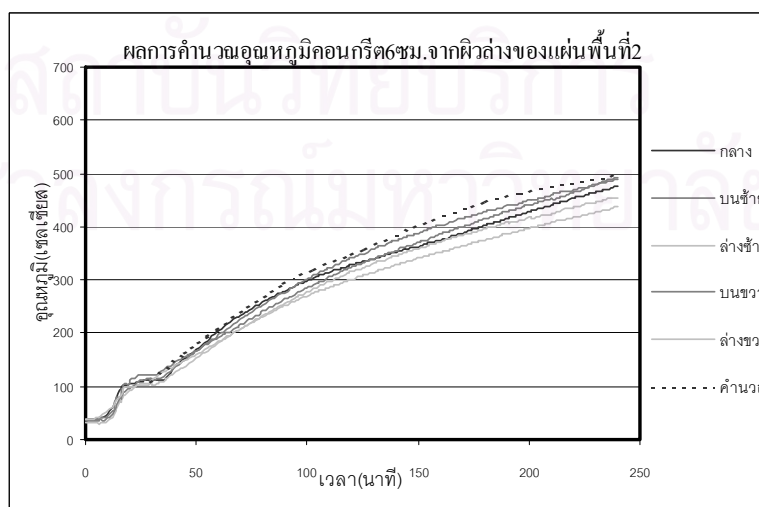
รูปที่ 4.9 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมของแผ่นพื้นที่ 1 (ลระยะห่างเหล็กเสริม)



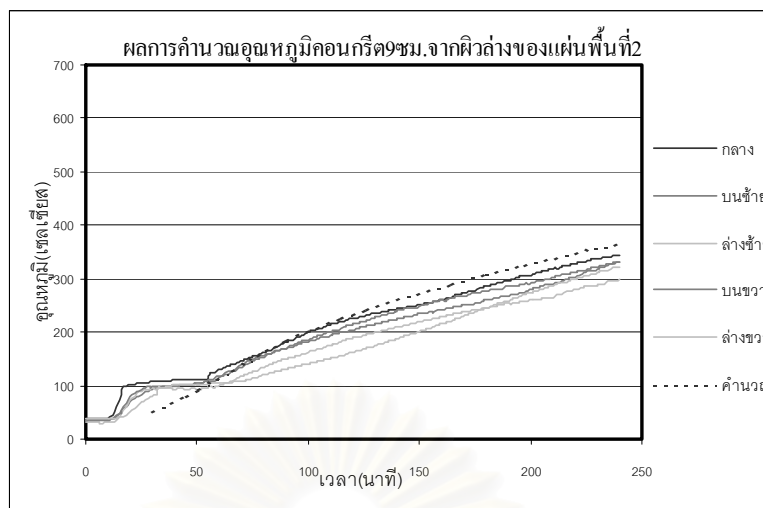
รูปที่ 4.10 ผลการคำนวณอุณหภูมิลูกเหล็กเสริมอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างเหล็กเสริม)



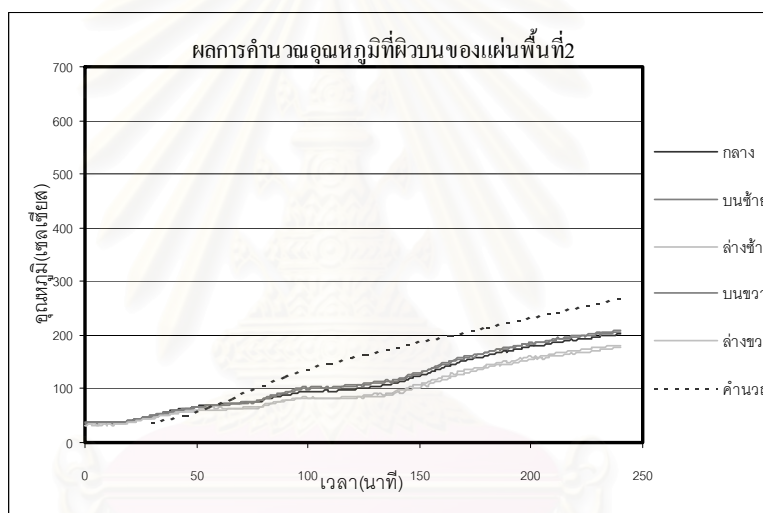
รูปที่ 4.11 ผลการคำนวณอุณหภูมิลูกคอนกรีตที่ระดับ 3 เซนติเมตรจากคิ้วล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อ)



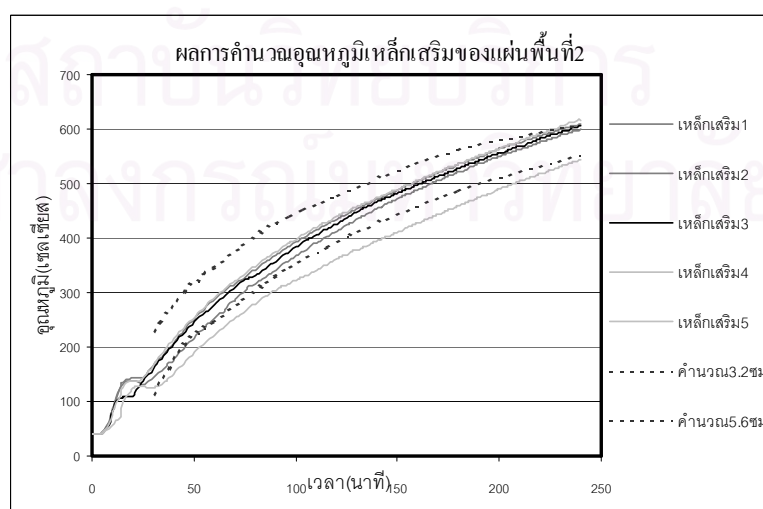
รูปที่ 4.12 ผลการคำนวณอุณหภูมิลูกคอนกรีตที่ระดับ 6 เซนติเมตรจากคิ้วล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อ)



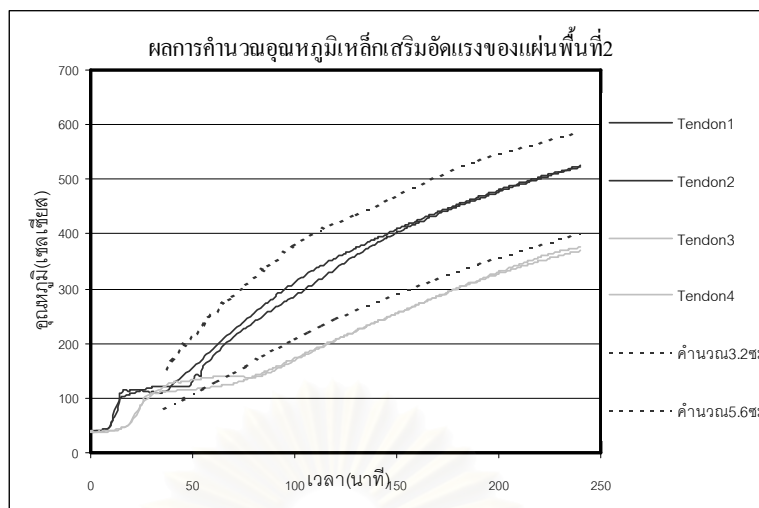
รูปที่ 4.13 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกริตที่ระดับ 9 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อ)



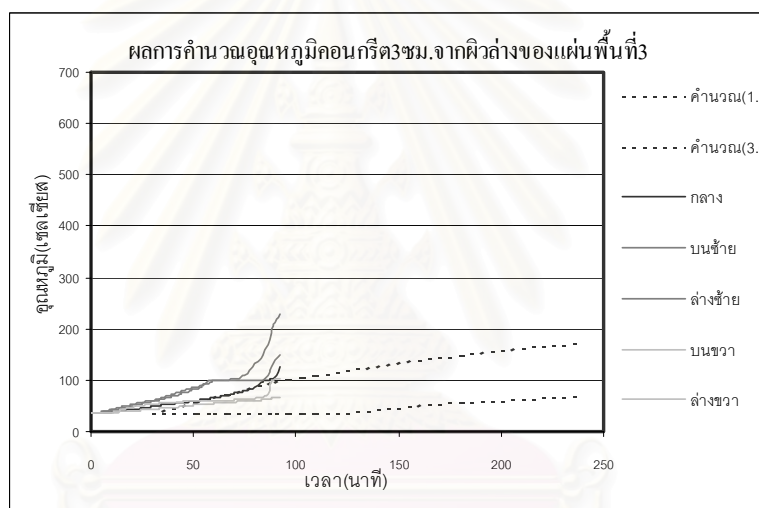
รูปที่ 4.14 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกริตที่ผิวบน ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อหรือลดเกลียว)



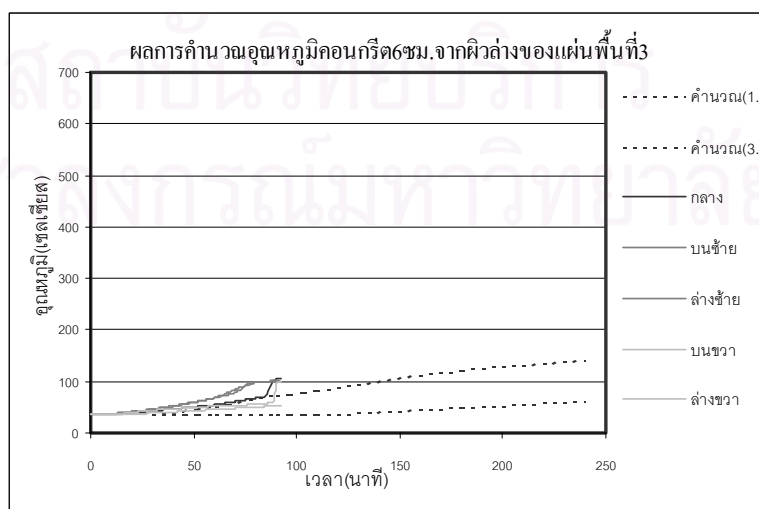
รูปที่ 4.15 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกริตเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อหรือลดเกลียว)



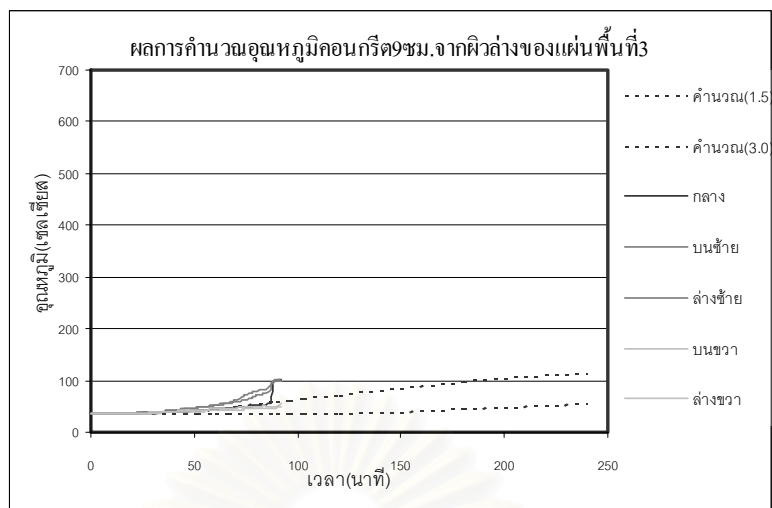
รูปที่ 4.16 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเหล็กอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเหล็ก)



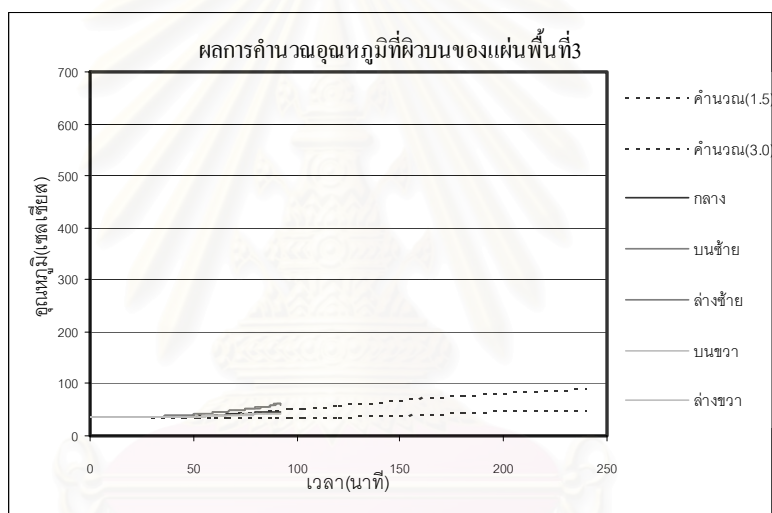
รูปที่ 4.17 ผลการคำนวณอุณหภูมิลูกกรีดที่ระดับ 3 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดยิปซัมที่ผิวล่าง)



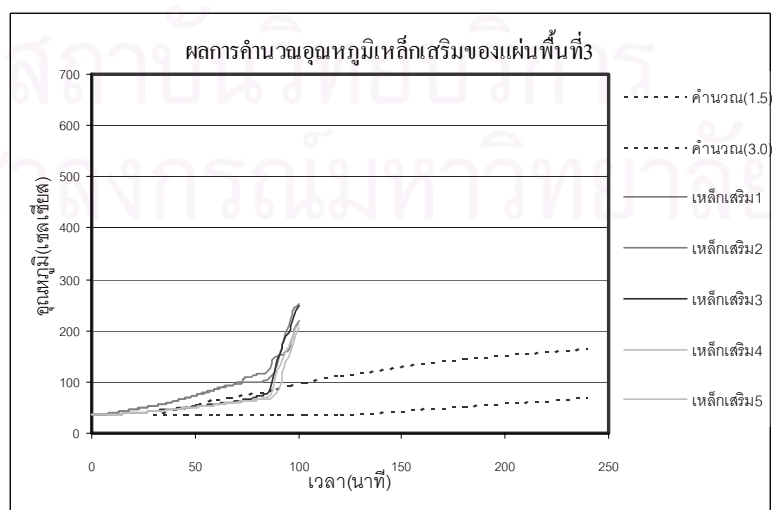
รูปที่ 4.18 ผลการคำนวณอุณหภูมิลูกกรีดที่ระดับ 6 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดยิปซัมที่ผิวล่าง)



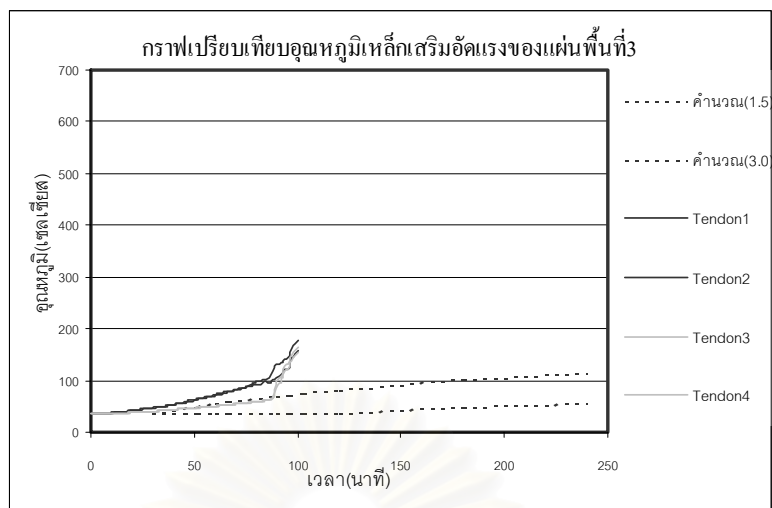
รูปที่ 4.19 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ตัดยิปซัมที่ผิวล่าง)



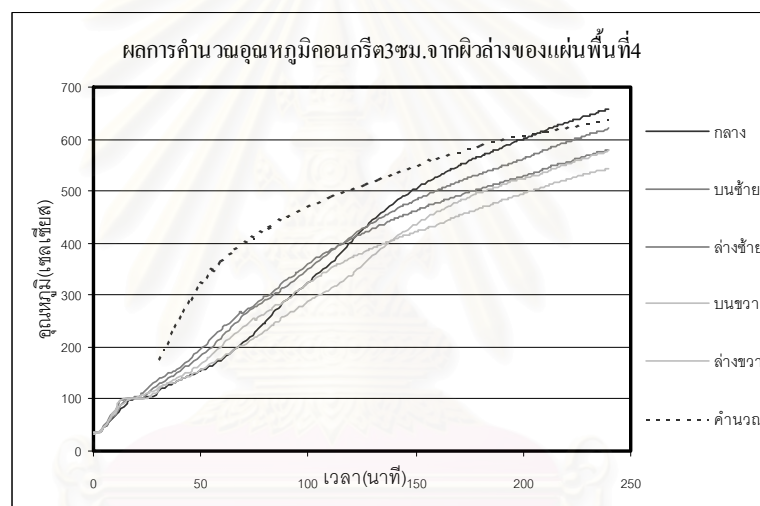
รูปที่ 4.20 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ผิวบน ของแผ่นพื้นที่ 3 (ตัดยิปซัมที่ผิวล่าง)



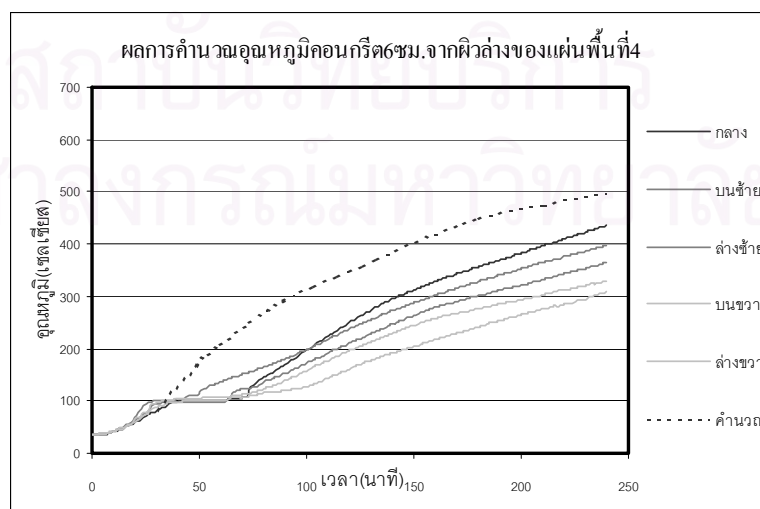
รูปที่ 4.21 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 3 (ตัดยิปซัมที่ผิวล่าง)



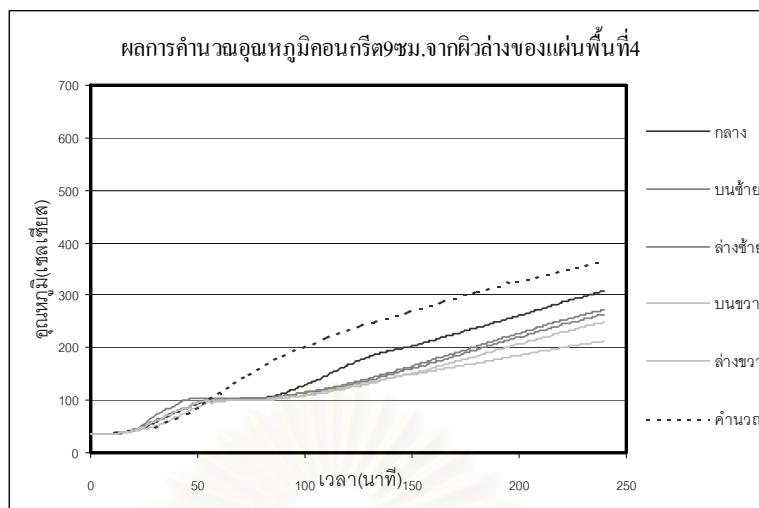
รูปที่ 4.22 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเหล็กอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 3 (ตึกยิปซัมที่ฝิวล่าง)



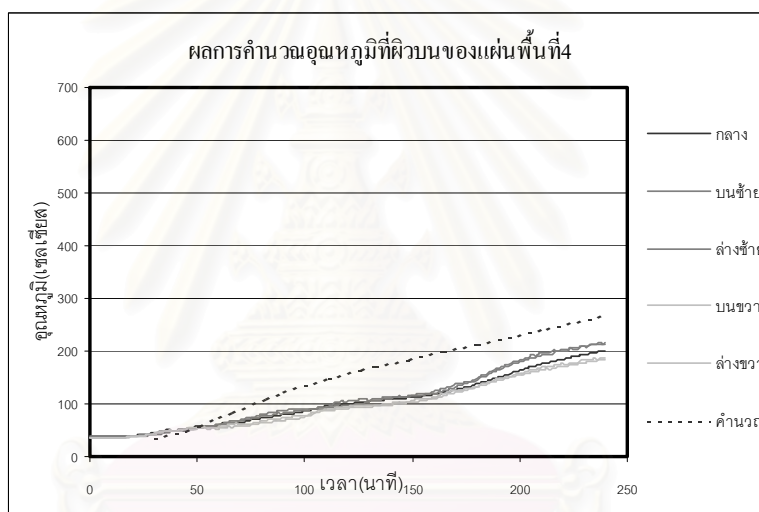
รูปที่ 4.23 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ3 เซนติเมตรจากฝิวล่างของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ฝิวล่าง)



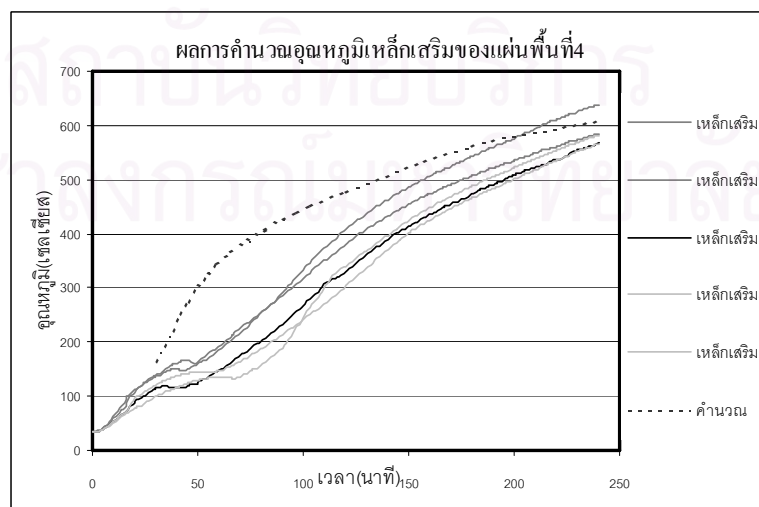
รูปที่ 4.24 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ6เซนติเมตรจากฝิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ฝิวล่าง)



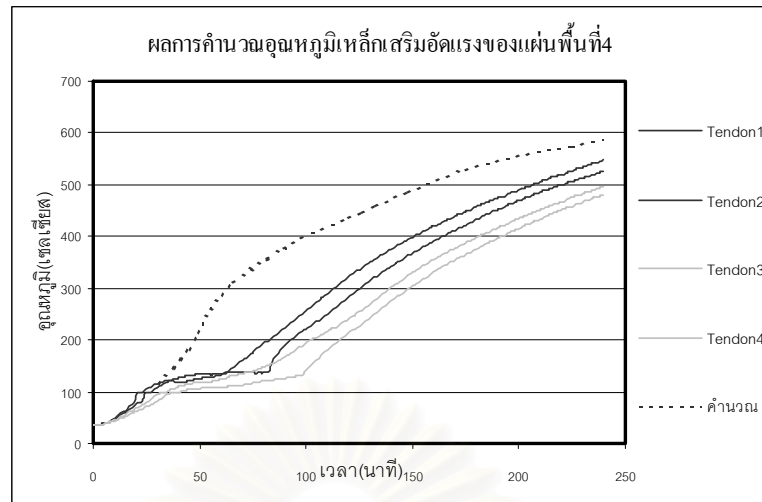
รูปที่ 4.25 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ระดับ9เซนติเมตรจากผิวล่าง ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



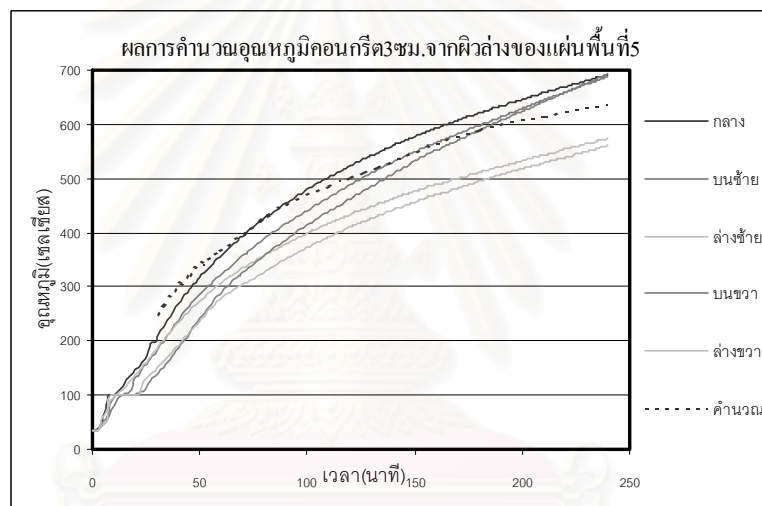
รูปที่ 4.26 ผลการคำนวณอุณหภูมิกอนกรีตที่ผิวบน ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



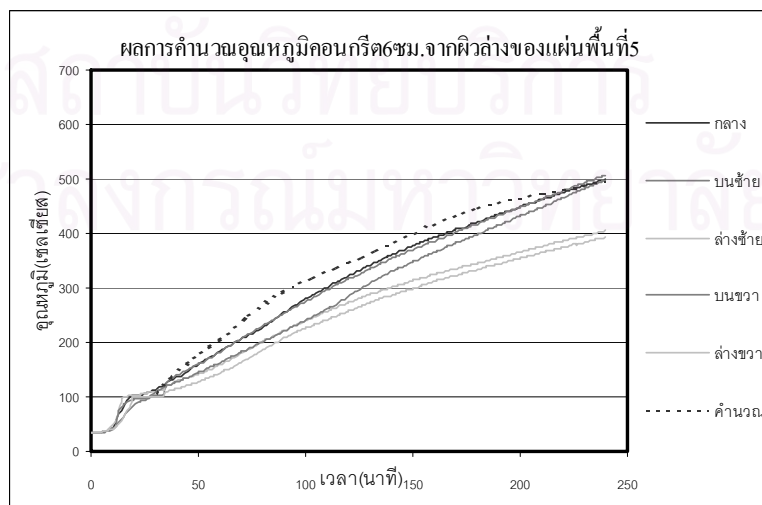
รูปที่ 4.27 ผลการคำนวณอุณหภูมิกเหล็กเสริม ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



รูปที่ 4.28 ผลการคำนวณอุณหภูมิลดลงของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)

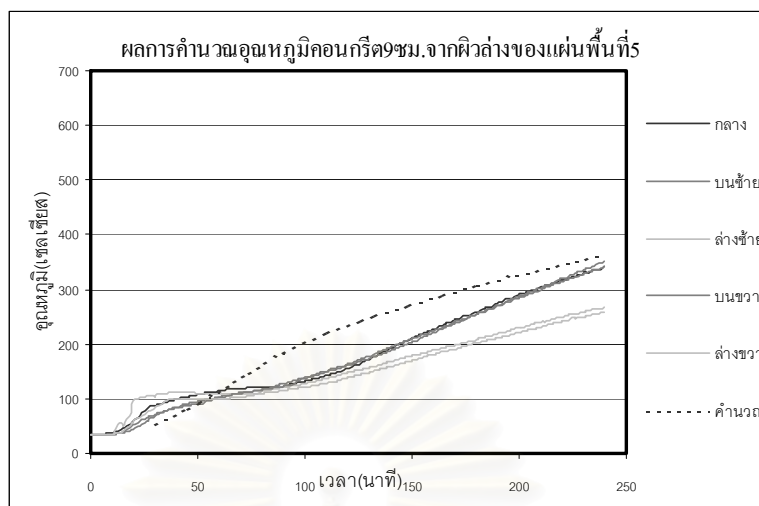


รูปที่ 4.29 ผลการคำนวณอุณหภูมิลดลงของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรท)

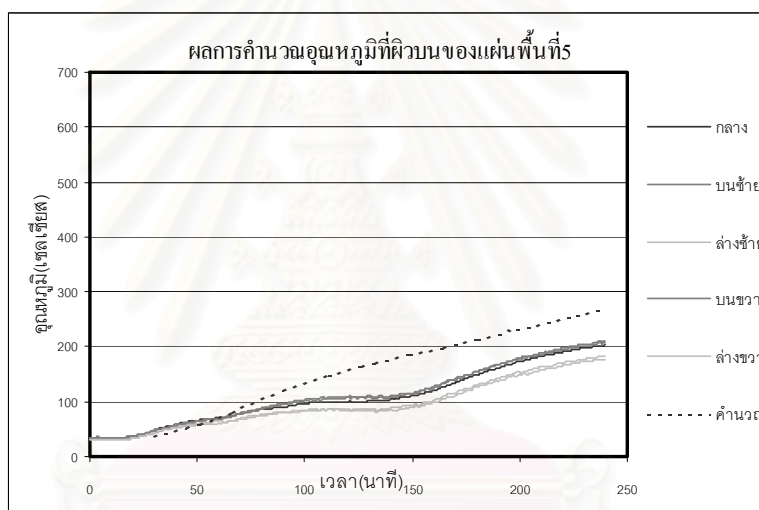


รูปที่ 4.30 ผลการคำนวณอุณหภูมิลดลงของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกรท)

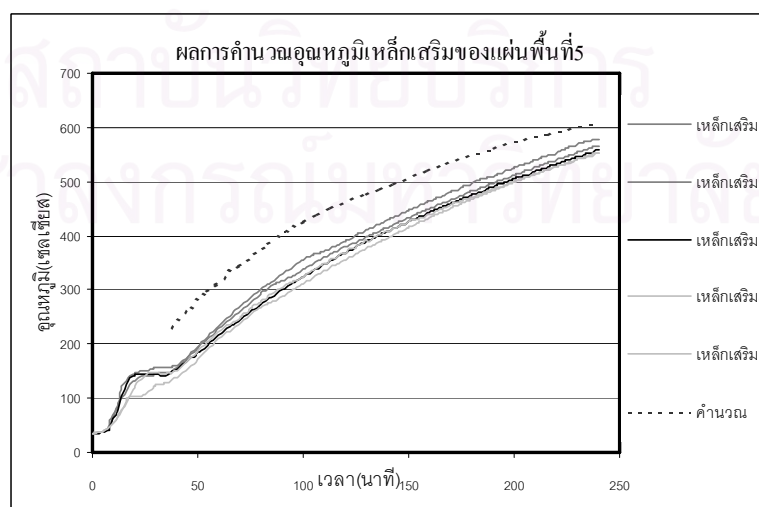




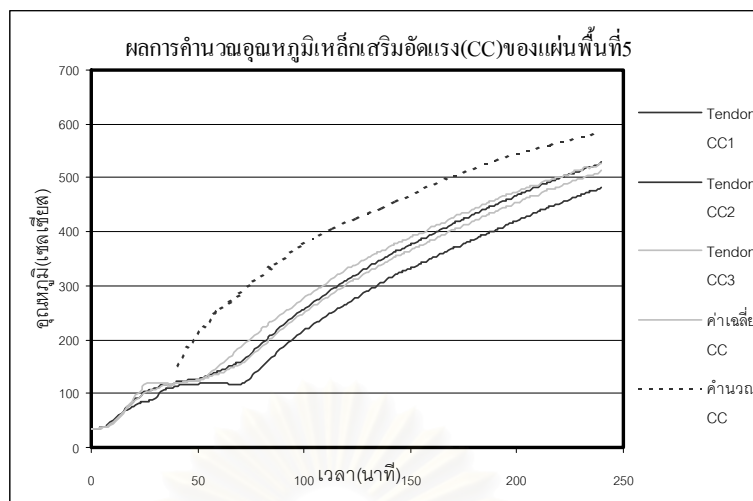
รูปที่ 4.31 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)



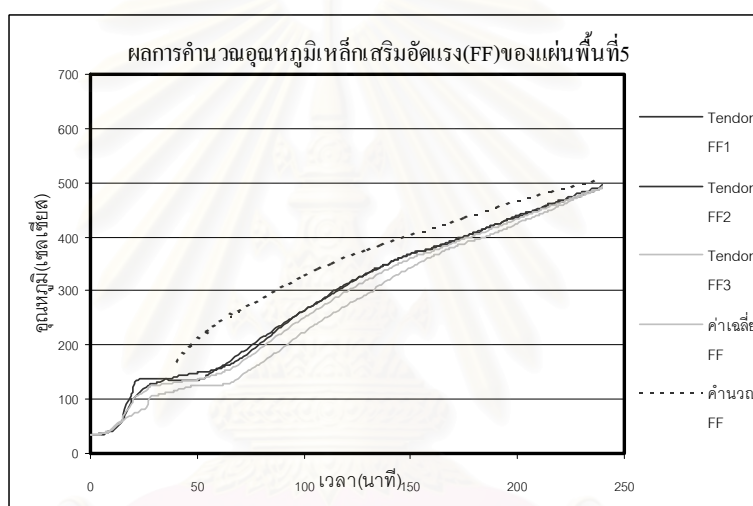
รูปที่ 4.32 ผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ผิวบนของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)



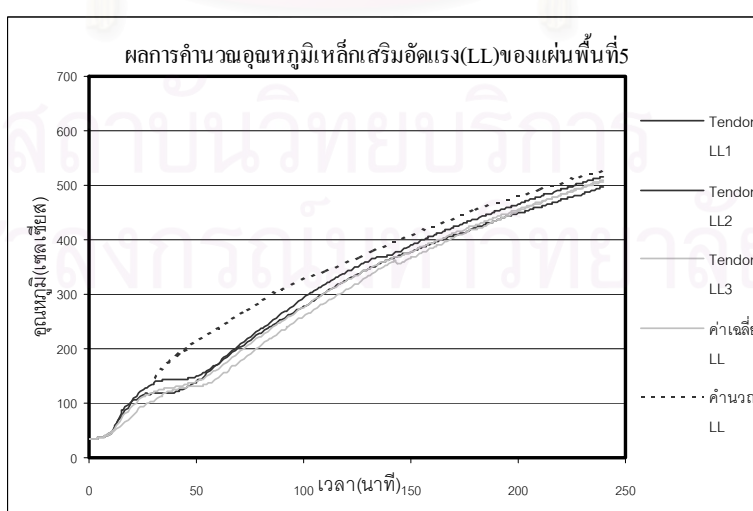
รูปที่ 4.33 ผลการคำนวณอุณหภูมิเหล็กเสริมของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท)



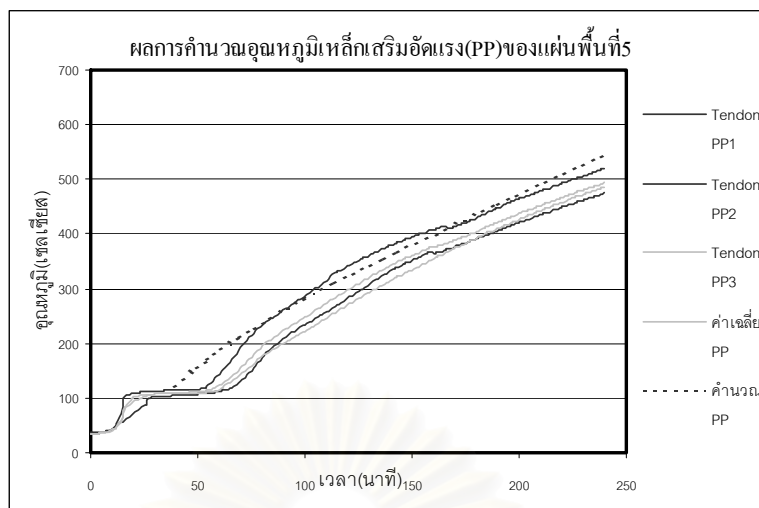
รูปที่ 4.34 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 5 (ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท)



รูปที่ 4.35 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่ 5 (ใช้ถั่วลอายเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท)



รูปที่ 4.36 ผลการคำนวณอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงของแผ่นพื้นที่ 5 (ใช้ฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท)



รูปที่ 4.37 ผลการคำนวณอุณหภูมิวดเหล็กเสริมอัดแรงของแผ่นพื้นที่5(ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกร้าท์)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### ช่วงเวลาที่พื้นคอนกรีตอัดแรง เกิดการวิบัติภายใต้แรงคดเนื่องจากอัคคีภัย

#### 5.1 ทั่วไป

การออกแบบของค้ำอาคารคอนกรีตอัดแรงเพื่อรับแรงคดจากน้ำหนักบรรทุก จะต้องออกแบบให้เกิดการวิบัติในลักษณะแรงคดเป็นหลัก การออกแบบลักษณะนี้ทำให้เกิดความปลอดภัยในการใช้งานปกติ ดังนั้นการวิบัติขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงเมื่อเผชิญอัคคีภัยจะขึ้นอยู่กับเหล็กเสริมอัดแรงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากอัคคีภัย จะส่งผลให้กำลังต้านทานแรงคดในเหล็กเสริมอัดแรงลดลงอย่างรวดเร็ว ในบทนี้จะพิจารณาถึงช่วงเวลาที่ทำให้ห้องค้ำอาคารคอนกรีตอัดแรงเกิดการวิบัติภายใต้แรงคดเนื่องจากผลของอัคคีภัย และการขยายช่วงเวลาดังกล่าวด้วยวิธีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 และ 4

#### 5.2 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตอัดแรง

สิ่งสำคัญที่สุดในการออกแบบ คือ กำลังที่องค์อาคารสามารถรับได้ต้องได้รับการออกแบบให้เพียงพอ เพราะถ้าองค์อาคารเกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอ ผลเสียหายที่ตามมาจะรุนแรงและมูลค่าของความเสียหายสูงมาก ดังนั้นความน่าจะเป็นที่องค์อาคารเกิดวิบัติเนื่องจากกำลังที่ไม่เพียงพอต้องทำให้มีโอกาสน้อยที่สุด แต่ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกัน ไปด้วยกับค่าใช้จ่ายที่เหมาะสมด้วย เพราะกำลังที่เพิ่มขึ้นย่อมหมายถึงค่าใช้จ่ายจะสูงขึ้นด้วย

การออกแบบให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในคอนกรีตและเหล็ก น้อยกว่าหน่วยแรงที่ยอมให้ที่กำหนดไว้ในสถานะการใช้งานไม่ได้หมายถึง ความปลอดภัยอย่างเพียงพอที่แท้จริงขององค์อาคารต่อการรับกำลัง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องตรวจสอบกำลังที่สถานะประลัย เพื่อให้แน่ใจว่าโครงสร้างมีความสามารถในการรับกำลังได้อย่างเหมาะสม

##### 5.2.1 สมมติฐานการวิเคราะห์โมเมนต์คดประลัย

สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณหาโมเมนต์คดประลัยขององค์อาคารที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีดังนี้

1. การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริมเป็นเส้นตรง กล่าวคือ หน่วยการยึดหดตัวในคอนกรีตและเหล็กเสริม เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทิน
2. คอนกรีตไม่รับแรงคด
3. ที่สถานะประลัย หน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003

พฤติกรรมของคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัยคล้ายกับคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป หลักการที่นำมาใช้วิเคราะห์กำลังอัดประลัยขององค์อาคารรับแรงคด คือ หลักการของแรงคู่ควบภายใน ในช่วงสถานะการใช้งานก่อนที่คอนกรีตเกิดการแตกร้าว คอนกรีตอัดแรงจะต่างจากคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไปตรงที่ในคอนกรีตอัดแรงจะมีแรงคู่ควบ C-T คงที่ แม้ว่าโมเมนต์ภายนอกจะเพิ่มขึ้นแต่แกนของโมเมนต์คู่ควบมีค่ามากขึ้นตามโมเมนต์ภายนอกที่เพิ่มขึ้น เมื่อองค์อาคารรับแรงคดได้รับน้ำหนักภายนอกเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆจนเลยช่วงสถานะการใช้งานจะเกิดการแตกร้าวของคอนกรีตขึ้น และขณะนี้แกนของโมเมนต์คู่ควบจะมีค่าค่อนข้างคงที่เหมือนคอนกรีตเสริมเหล็กทั่วไป ดังนั้นเมื่อโมเมนต์ภายนอกเพิ่มขึ้นต่อไปอีกจะส่งผลให้แรงคู่ควบ C-T จะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงจะเพิ่มขึ้นและหน่วยแรงอัดในคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นจนความสัมพันธ์ของหน่วยแรงอัดกับหน่วยการหดตัวของคอนกรีตไม่เป็นเส้นตรงอีกต่อไป จนกระทั่งโมเมนต์ภายนอกมีค่าเท่ากับโมเมนต์คดประลัยขององค์อาคารนั้นก็ถึงจุดวิบัติ

การวิบัติจะเกิดขึ้นเมื่อคอนกรีตเกิดการอัดระเบิด ในมาตรฐาน ว.ส.ท. ได้กำหนดหน่วยการหดตัวของคอนกรีตที่ผิวด้านรับแรงอัดมีค่าเท่ากับ 0.003 ที่สถานะประลัย การวิบัติขององค์อาคารแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การวิบัติขององค์อาคารเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักและการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลัก การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก เริ่มต้นด้วยการที่ระยะยึดตัวของเหล็กเสริมมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมาก(เหล็กเสริมมีการคลายเกิดขึ้น)และถึงจุดวิบัติเมื่อคอนกรีตอัดระเบิด ( $\epsilon_c = 0.003$ ) การวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักนี้เกิดขึ้นเมื่อปริมาณเหล็กเสริม น้อยกว่าเกณฑ์สมดุล ส่วนการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักคอนกรีตจะอัดระเบิด ( $\epsilon_c = 0.003$ ) ขณะที่เหล็กเสริมยังไม่ถึงจุดคลาย ดังนั้นการวิบัติเนื่องจากแรงอัดเป็นหลักนี้ องค์อาคารจะวิบัติขณะที่การโก่งตัวยังมีน้อยเพราะเหล็กเสริมยังยึดไม่มาก การวิบัติชนิดนี้จึงมีลักษณะเปราะและเกิดขึ้นเมื่อเหล็กเสริมมากกว่าเกณฑ์สมดุล

### 5.2.2 การกระจายหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยม

การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวและหน่วยแรงในคอนกรีตที่สถานะประลัยแสดงดังรูปที่ 5.1 พบว่าที่สถานะประลัยความสัมพันธ์ของหน่วยแรงกับหน่วยการยึดหดตัวไม่เป็นเส้นตรง ดังจะเห็นได้ว่าในขณะที่การกระจายของหน่วยการยึดหดตัวเป็นเส้นตรง และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแนวแกนสะเทินดังแสดงในรูปที่ 5.1(ข) การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่อยู่เหนือแนวแกนสะเทินจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 5.1(ค) เพื่อให้การคำนวณกระทำได้ง่ายขึ้นจึงกำหนดให้ การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตที่มีลักษณะเป็นเส้นโค้ง แทนที่ด้วยการกระจายของหน่วยแรงอัดเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 5.1(ง) รูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่านี้ใช้หลักการของการที่แรงอัดลัพธ์ C ต้องอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ดังนั้นพื้นที่ภายในรูปสี่เหลี่ยมของรูปที่ 5.1(ง) ต้องมีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ภายในรูปโค้งของรูปที่ 5.1(ค) และตำแหน่งของเส้นทรอยด์ของพื้นที่ทั้งสองต้องอยู่ระดับเดียวกัน ตามมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 กำหนดให้ความกว้างของหน่วยแรงอัดรูปสี่เหลี่ยมเทียบเท่ามีค่าเท่ากับ  $0.85 f_c'$  และความสูงของรูปสี่เหลี่ยม  $a$  มีค่าเท่ากับ  $\beta_1 c$  ดังรูปที่ 5.1(ง) โดยที่  $c$  เป็นระยะตั้งฉากจากแกนสะเทินถึงผิวของคอนกรีตที่รับแรงอัดและค่า  $\beta_1$  เป็นตัวแปรที่หาได้จาก

$$\beta_1 = 0.85 \text{ เมื่อ } f_c' \leq 300 \text{ ksc.}$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.0008(f_c' - 300) \geq 0.65 \text{ เมื่อ } f_c' > 300 \text{ ksc.} \quad (5.1)$$

### 5.2.3 หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ที่สถานะประลัย

การออกแบบคอนกรีตอัดแรงที่สถานะประลัย ต้องออกแบบให้การวิบัติที่เกิดขึ้นในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก เพราะการวิบัติชนิดนี้จะเกิดขึ้นหลังจากเหล็กมีการยืดตัวเกินจุดคานงไปแล้ว องค์กรอาคารจะมีการโค้งตัวมาก่อนเกิดการวิบัติซึ่งการวิบัติลักษณะเช่นนี้มีความเหนียว การออกแบบให้เกิดการวิบัติชนิดแรงดึงเป็นหลักได้ปริมาณเหล็กเสริมอัดแรงจะต้องมีค่าน้อยกว่าเกณฑ์สมมูล การคำนวณหาปริมาณเหล็กพอดีเกณฑ์สมมูลไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะไม่สามารถกำหนดจุดคานงที่แน่นอนของเหล็กเสริมอัดแรงได้

มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ได้กำหนดพิกัดของเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรง เพื่อที่จะให้แน่ใจว่าปริมาณเหล็กเสริมในคอนกรีตอัดแรงน้อยกว่าเกณฑ์สมมูลไว้ ดังนี้

$$\omega_p$$

$$\omega_p + (\omega - \omega') \leq 0.36\beta_1$$

$$\omega_{pw} + (\omega_w - \omega'_w) \frac{d}{d_p} \quad (5.2)$$

โดยที่

$\omega_p$	คือ คัดนี้เหล็กเสริมอัดแรง = $\rho_p f_{ps} / f_c'$
$\omega$	คือ คัดนี้เหล็กเสริมธรรมดารับแรงดึง = $\rho f_y / f_c'$
$\omega'$	คือ คัดนี้เหล็กเสริมธรรมดารับแรงอัด = $\rho' f_y / f_c'$
$\rho_p$	คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมอัดแรง = $A_{ps} / bd_p$
$\rho$	คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง = $A_s / bd$
$\rho'$	คือ อัตราส่วนของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด = $A_s' / bd$
$d_p$	คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริมอัดแรง
$d$	คือ ระยะจากผิวที่เกิดหน่วยแรงอัดมากที่สุด ถึงจุดศูนย์ถ่วงของเหล็กเสริม ธรรมดาที่รับแรงดึง
$b$	คือ ความกว้างของคาน
$A_{ps}$	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมอัดแรง
$A_s$	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงดึง
$A_s'$	คือ พื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมธรรมดาที่รับแรงอัด
$f_{ps}$	คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรงที่สภาวะวิบัติ
$f_y$	คือ กำลังคานของเหล็กเสริมธรรมดา

$\omega_{pw}, \omega_w, \omega'_w$  คือ ดัชนีเหล็กเสริมสำหรับหน้าตัดชิ้นส่วนที่มีปีก เช่น หน้าตัดรูปตัว  $T$  และตัว  $I$  จำนวนเช่นเดียวกับ  $\omega_p, \omega$  และ  $\omega'$  ตามลำดับ แต่ความกว้าง  $b$  ที่ใช้ เป็นความกว้างของตัวแกน และปริมาณเหล็กเสริมต้องเป็นส่วนที่ทำให้เกิดหน่วยแรงอัดในตัวแกนเท่านั้น

สำหรับค่า  $f_{ps}$  คือ หน่วยแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง ณ สถานะประลัย โดยค่า  $f_{ps}$  สามารถคำนวณได้โดยใช้พื้นฐานของความสอดคล้องของหน่วยการยืดหดตัว ในกรณีที่หน่วยแรงดึงประลัยมีค่าไม่น้อยกว่า  $0.5f_{pu}$  สามารถใช้ค่า  $f_{ps}$  โดยประมาณดังต่อไปนี้

สำหรับองค์อาคารที่เสริมเหล็กอัดแรงชนิดยึดเหนี่ยว

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{r_p}{\beta_1} \left[ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} + \frac{d}{d_p} (\omega - \omega') \right] \right\} \quad (5.3)$$

โดยที่

$r_p$  คือ ตัวคูณที่คำนึงถึงระดับกำลังคลากของเหล็กเสริมอัดแรง มีค่าดังนี้

$$0.40 \text{ เมื่อ } 0.85 \leq f_{py} / f_{pu} < 0.90$$

$$0.28 \text{ เมื่อ } f_{py} / f_{pu} \geq 0.90$$

$f_{pu}$  คือ หน่วยแรงดึงประลัยในเหล็กเสริมอัดแรง

#### 5.2.4 โมเมนต์ตัดประลัย

โมเมนต์ตัดประลัยขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงหาได้จากโมเมนต์คู่ควบ C-T ที่สถานะประลัย และที่สถานะประลัยนี้แรงอัดลัพท์ในคอนกรีต C หาได้จาก การกระจายของหน่วยแรงอัดในคอนกรีตเทียบเท่าเป็นรูปสี่เหลี่ยมและแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T หาได้จาก  $T = A_{ps} f_{ps}$  โดยที่  $f_{ps}$  หาได้จากสมการที่เสนอโดยมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ซึ่งได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.2.3 และปริมาณเหล็กเสริมจะต้องน้อยกว่าเกณฑ์สมดุล กล่าวคือ จะต้องสอดคล้องกับสมการที่ 5.2

จากรูปที่ 5.1 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} C &= 0.85 f'_c 'ab \\ T &= A_{ps} f_{ps} \end{aligned} \quad (5.4)$$

เนื่องจากแรงลัพท์ในคอนกรีต C จะต้องเท่ากับแรงดึงในเหล็กเสริมอัดแรง T ดังนั้น

$$C = T$$

$$0.85 f'_c 'ab = A_{ps} f_{ps}$$

จะได้ว่า

$$a = \frac{A_{ps} f_{ps}}{0.85 f_c 'b} \quad (5.5)$$

โมเมนต์ค้ำประลัยของหน้าตัด หรือกำลังระบุของโมเมนต์(Nominal strength)  $M_n$  สามารถหาได้จาก

$$M_n = C \cdot Z = T \cdot Z = C(d - \frac{a}{2}) = T(d_p - \frac{a}{2}) \quad (5.6)$$

### 5.3 รูปแบบของหน่วยแรงในคอนกรีต ที่สภาวะการใช้งาน

รูปแบบของหน่วยแรงในคอนกรีตที่สภาวะการใช้งาน สามารถแบ่งตามตำแหน่งของแรงอัดลัพท์เทียบกับตำแหน่งของ จุดเคิร์นนบนและล่าง ซึ่งนิยามของจุดดังกล่าวเป็น ดังนี้

1. จุดเคิร์นนบน คือ ตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ในคอนกรีตที่ทำให้หน่วยแรงบนหน้าตัดคอนกรีตเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวล่างเป็นศูนย์
2. จุดเคิร์นนล่าง คือ ตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ในคอนกรีตที่ทำให้หน่วยแรงบนหน้าตัดคอนกรีตเป็นรูปสามเหลี่ยม โดยหน่วยแรงในคอนกรีตที่ผิวบนเป็นศูนย์

จากนิยามของจุดเคิร์นนบนและจุดเคิร์นนล่างสามารถอธิบายได้ในอีกความหมายหนึ่ง กล่าวคือ จุดเคิร์นนบนและล่างเป็นขอบเขตบนและล่างตามลำดับของแรงอัดลัพท์  $C$  ถ้าแรงอัดลัพท์  $C$  ยังอยู่ภายในขอบเขตนี้จะทำให้หน่วยแรงที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดคอนกรีตจะไม่มีส่วนที่เกิดหน่วยแรงดึงขึ้นเลย ถ้าแรงอัดลัพท์  $C$  อยู่สูงกว่าจุดเคิร์นนบนก็จะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในคอนกรีตที่ผิวล่าง และถ้าแรงอัดลัพท์  $C$  อยู่ต่ำกว่าจุดเคิร์นนล่างก็จะเกิดหน่วยแรงดึงขึ้นในคอนกรีตที่ผิวบนดังแสดงในรูปที่ 5.2

### 5.4 การวิบัติของพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายใต้งแรงดัด เนื่องจากผลของอค์กัถย

#### 5.4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกำลังของคอนกรีตและลวดเกลียวอัดแรง

ACI 216R-89<sup>[16]</sup> ได้ให้อัตราการลดลงของกำลังคอนกรีต เหล็กเสริมและลวดเกลียวอัดแรงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ถึง 5.3 ตามลำดับ ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 5.3 ถึง 5.4

จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า อุณหภูมิที่ทำให้กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมหยาบชนิดคาร์บอนเนต จะเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ทำให้กำลังต้านทานแรงดึงของลวด



เกลียวอัดแรงเริ่มลดลงคือ 100 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าการวิบัติขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงมีแนวโน้มที่จะเกิดจากการวิบัติของลวดเกลียวอัดแรงเป็นส่วนใหญ่

#### 5.4.2 ความเป็นไปได้ของการวิบัติ เนื่องจากอัตราเบิดของคอนกรีตที่ผิวล่าง

เนื่องจากการออกแบบขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงนิยมให้เกิดการวิบัติในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก ดังนั้นความเป็นไปได้ของการวิบัติเนื่องจากการวิบัติของเหล็กเสริมอัดแรง จึงมีมากกว่าการวิบัติเนื่องจากการอัตราเบิดของคอนกรีต อย่างไรก็ตามที่สภาวะใช้งานขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงพบว่ามีความเครียดอัดในหน้าตัดที่อยู่ใต้แกนสะเทิน เพราะฉะนั้นโอกาสที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงอัดในหน้าตัดก็ยังมีอยู่ ซึ่งโอกาสที่จะวิบัติเนื่องจากการอัตราเบิดของคอนกรีตจะมีค่ามาก เมื่อตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ C อยู่ใกล้ผิวที่สัมผัสเปลวไฟ

จากข้อมูลการทดสอบในบทที่ 3 และผลการคำนวณอุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ในหน้าตัดแผ่นพื้นพบว่าที่ระดับ 3 เซนติเมตรจากผิวล่างจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสที่เวลา 120 นาที และที่ระดับสูงกว่า 6 เซนติเมตรจากผิวล่างในช่วงเวลา 240 นาทีอุณหภูมิจะน้อยกว่า 600 องศาเซลเซียส จากข้อมูลในหัวข้อที่ 5.6.1 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมชนิดคาร์บอนจะเริ่มลดลง

ในรูปที่ 5.2 แสดงลักษณะหน่วยแรงอัดในหน้าตัดขององค์อาคารคอนกรีตอัดแรงภายใต้แรงคดที่สภาวะใช้งาน ซึ่งแบ่งตามตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ C เทียบกับจุดเคิร์นบนและล่าง ได้ดังนี้

1. แรงอัดลัพท์อยู่ที่ตำแหน่งเคิร์นบน ( $C = k_T$ )
2. แรงอัดลัพท์อยู่ที่ตำแหน่งเคิร์นล่าง ( $C = k_B$ )
3. แรงอัดลัพท์อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัด ( $C = C.G.$ )
4. แรงอัดลัพท์อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งเคิร์นบนแต่เหนือศูนย์กลางหน้าตัด ( $k_T > C > C.G.$ )
5. แรงอัดลัพท์อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งศูนย์กลางหน้าตัดแต่เหนือเคิร์นล่าง ( $C.G. > C > k_B$ )
6. แรงอัดลัพท์อยู่เหนือตำแหน่งเคิร์นบน ( $C > k_T$ )
7. แรงอัดลัพท์อยู่ต่ำกว่าตำแหน่งเคิร์นล่าง ( $C < k_B$ )

จากตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ C ทั้ง 7 กรณี พบว่ากรณีที่ 2 ( $C = k_B$ ) กรณีที่ 5 ( $C.G. > C > k_B$ ) และกรณีที่ 7 ( $C < k_B$ ) มีโอกาสที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากการอัตราเบิดของคอนกรีตสูง เนื่องจากตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ C อยู่ใกล้บริเวณผิวล่างซึ่งกำลังต้านทานแรงอัดจะลดลงมากกว่าบริเวณอื่น นอกจากนี้โอกาสที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากการอัตราเบิดของคอนกรีตจะสูงขึ้นเมื่อความหนาของแผ่นพื้นมีค่าน้อย เนื่องจากในช่วงเวลา

240 นาที กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตจะลดลง เมื่อระดับต่ำกว่า 6 เซนติเมตรจากผิวล่าง และมีอัตราการลดลงของกำลังที่สูงขึ้นเมื่อใกล้กับผิวที่สัมผัสเปลวไฟ ประกอบกับแผ่นพื้นที่มีความหนาแน่นจะมีตำแหน่งเสริมลางต่ำ จึงมีโอกาสที่ตำแหน่งแรงลัพท์ C อยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 6 เซนติเมตรจากผิวล่าง โอกาสที่จะเกิดการวิบัติจากการอัดระเบิดของคอนกรีตเรียงตามลำดับไว้ในตารางที่ 5.4

#### 5.4.3 ช่วงเวลาเกิดการวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงดึง เกินหน่วยแรงประลัยของลวดเกลียวอัดแรง

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นถึงเรื่องการออกแบบให้เกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลัก ประกอบกับข้อมูลจากหัวข้อที่ 5.6.1 ที่ว่ากำลังของลวดเกลียวอัดแรงจะเริ่มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส สามารถสรุปเป็นช่วงเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงจะวิบัติเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกทุกภายใต้้อคสิทธิ์ได้ โดยค่าเวลาน้อยที่สุดคือเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติภายใต้โมเมนต์คัตประลัย และค่าเวลาน้อยที่สุดภายใต้สภาวะใช้งานปกติ คือ เวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงทันทีที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร ( $0.70 f_{pu}$ )

##### 5.4.3.1 การหาค่าเวลาน้อยที่สุดของช่วงเวลาเกิดการวิบัติเนื่องจากอค์สิทธิ์

ค่าเวลาน้อยที่สุดคือ ช่วงเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติภายใต้โมเมนต์คัตประลัย จากหัวข้อที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าการกระจายของหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในคอนกรีตจะอยู่เหนือแนวแกนสะเทินเท่านั้น จากความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังที่น้อยที่สุด 115 มิลลิเมตร ตามข้อกำหนดในกฎกระทรวงฉบับที่ 48(พ.ศ. 2540) สรุปได้ว่าการกระจายหน่วยแรงอัดที่สถานะประลัยจะไม่ได้รับผลจากอุณหภูมิเลย ดังนั้นการวิบัติที่สถานะประลัยจึงขึ้นกับหน่วยแรงดึงประลัยของลวดเกลียวอัดแรง ( $f_{pu}$ ) เท่านั้น ค่าเวลาน้อยที่สุดสำหรับแผ่นพื้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้หาได้ดังต่อไปนี้

คุณสมบัติของคอนกรีตและลวดเกลียวอัดแรงมีดังนี้

1. กำลังต้านทานแรงอัดประลัยของคอนกรีต  $f_c' = 350$  ksc.
2. ลวดเกลียวอัดแรงชนิดลวด 7 เส้น คลายแรงดึงต่ำ เกรด 270 (ASTM A416) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.70 มิลลิเมตร มีพื้นที่หน้าตัด 98.71 มม.<sup>2</sup> แรงดึงที่จุดประลัย 18,730 กิโลกรัม และแรงดึงที่จุดคลาก (ที่ 1% หน่วยการยืดตัว) เท่ากับ 16,857 กิโลกรัม

$$f_{pu} = \frac{F_{pu}}{A_{ps}} = \frac{18730}{0.9871} = 18975 \text{ ksc.}$$

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = \frac{16857}{18730} = 0.9 \text{ เพราะฉะนั้น } r_p = 0.28$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.0008(f_c' - 300) = 0.81$$

ให้เหล็กเสริมไม่รับแรง ดังนั้น  $\omega = \omega' = 0$

$$f_{ps} = 18975 \left[ 1 - \frac{0.28}{0.81} \times \left[ \rho_p \frac{18975}{350} \right] \right]$$

$$= 18975(1 - 18.74\rho_p)$$

จะเห็นว่าค่า  $f_{ps}$  จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ  $\rho_p$  มีค่าต่ำสุด สำหรับตัวอย่างแผ่นพื้นที่ใช้ทดสอบ ให้ ลวดเกลียวอัดแรง 2 เส้นต่อความกว้างแผ่นพื้น 1 เมตร และ  $d_p = 7.44$  เซนติเมตร

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d_p} = \frac{2 \times 0.9871}{100 \times 7.44} = 0.00266$$

$$\therefore f_{ps} = 18975 [1 - (18.74 \times 0.00266)]$$

$$= 18975 \times 0.95 \text{ หรือ } 95\% \text{ ของ } f_{pu}$$

จากรูปที่ 5.4 พบว่ากำลังต้านแรงดึงประลัยจะเหลือ 95 เปอร์เซ็นต์ของค่าเริ่มต้น ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ดังนั้นเวลาที่ทำให้ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติภายใต้โมเมนต์คดประลัยคือเวลาที่อุณหภูมิเฉลี่ยของลวดเกลียวอัดแรงมีค่า 150 องศาเซลเซียส รูปที่ 5.5 ถึง 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของลวดเกลียวอัดแรงของแต่ละแผ่นพื้นเทียบกับเวลา ค่าเวลาที่ทำให้ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติภายใต้โมเมนต์คดประลัยของแต่ละแผ่นพื้นสรุปได้ดังตารางที่ 5.5

#### 5.4.3.2 การหาค่าเวลาน้อยที่สุดของเกิดการวิบัติเนื่องจากอค์คิภย ที่สภาวะใช้งาน

ค่าเวลาน้อยที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ กำหนดให้เป็นเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงตันที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคาร ทั้งนี้เพื่อความง่ายในการคำนวณจึงใช้ค่าสูงสุดตามที่มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรงของ ว.ส.ท. ปี 2537 ขอมให้ คือ ค่าหน่วยแรงดึงที่ยอมให้ตันที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคารมีค่าเท่ากับ  $0.70 f_{pu}$  ซึ่งปกติหน่วยแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงจะมีค่าน้อยกว่านี้

ในความเป็นจริงค่าเวลานี้เป็นเพียงค่าในอุดมคติ กล่าวคือ หน่วยแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงตันที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคารจะมีค่าต่างไปจากนี้ และเมื่อระยะเวลาผ่านไปเกิดการสูญเสียแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงตามกาลเวลา ได้แก่ การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการหดตัวของคอนกรีต การสูญเสียแรงดึงเนื่องจากการคืบของคอนกรีต และการคลายแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรง

หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในลวดเกลียวอัดแรงที่หักการสูญเสียแรงดึงต่าง ๆ แล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงอีกเล็กน้อยจากการโก่งตัวขององค์อาคารนั้น ๆ ซึ่งเป็นผลจากน้ำหนักบรรทุกที่มากกระทำเพิ่มเติม ในสภาวะการใช้

งาน โดยที่คอนกรีตไม่เกิดการแตกร้าวของคอนกรีตอัดแรงระบบมีการยึดเหนี่ยว ลวดเกลียวอัดแรงและคอนกรีตที่อยู่โดยรอบจะมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างผิวเกิดขึ้น ทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวที่เกิดขึ้นบนลวดเกลียวอัดแรง  $\Delta \varepsilon_s$  และค่าการเปลี่ยนแปลงหน่วยการยึดหดตัวของคอนกรีต  $\Delta \varepsilon_c$  ที่อยู่โดยรอบเท่ากัน การคำนวณหน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของลวดเกลียวอัดแรงเนื่องจากการโก่งตัวสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีอิลาสติกดังนี้

$$\Delta \varepsilon_s = \Delta \varepsilon_c \quad (5.1)$$

$$\frac{\Delta \sigma_s}{E_s} = \frac{\Delta \sigma_c}{E_c} \quad (5.2)$$

$$\Delta \sigma_s = \frac{E_s}{E_c} \Delta \sigma_c = n \Delta \sigma_c = n \frac{My}{I} \quad (5.3)$$

โดยที่

$\Delta \varepsilon_s$  คือ หน่วยแรงที่เปลี่ยนไปของลวดเกลียวอัดแรงที่เกิดจากการโก่งตัวของคานจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติม

$M$  คือ โมเมนต์เนื่องจากน้ำหนักบรรทุกเพิ่มเติมที่กระทำต่อพื้นหน้าตัดใดๆ

$n, I$  คือ อัตราส่วนโมดูลัส และ โมเมนต์เฉื่อยของหน้าตัด ตามลำดับ

$y$  คือ ระยะห่างจากตำแหน่งศูนย์กลางลวดเกลียวอัดแรงถึงแนวแกนสะเทินหรือเท่ากับ  $e$

จากสมการที่ 5.3 พบว่าหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของลวดเกลียวอัดแรงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าโมเมนต์  $M$  สำหรับแผ่นพื้นค่าโมเมนต์ที่กึ่งกลางช่วงจะมีค่ามาก ดังนั้นหน่วยแรงดึงที่เปลี่ยนไปของลวดเกลียวอัดแรงจะมากที่สุดบริเวณกลางแผ่นพื้นและจะน้อยลงเมื่อใกล้ฐานรองรับ

จากรูปที่ 5.4 พบว่ากำลังต้านแรงดึงเฉลี่ยจะเหลือ 70 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ดังนั้นเวลาที่ทำให้ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติภายใต้โมเมนต์ดัดเฉลี่ยคือเวลาที่อุณหภูมิเฉลี่ยของลวดเกลียวอัดแรงมีค่า 350 องศาเซลเซียส ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของลวดเกลียวอัดแรงของแต่ละแผ่นพื้นเทียบกับเวลาแสดงในรูปที่ 5.5 ถึง 5.9 ค่าเวลาที่ทำให้ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติเนื่องจากหน่วยแรงเท่ากับหน่วยแรงทันทีที่ถ่ายแรงเข้าสู่องค์อาคารของแต่ละแผ่นพื้น สรุปได้ดังตารางที่ 5.5

## 5.5 ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของคอนกรีตและลวดเกลียวอัดแรง ระหว่างการเพิ่มความสามารถทนไฟในแต่ละวิธี

### 5.5.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิคอนกรีต ของแผ่นพื้นที่เพิ่มความสามารถทนไฟด้วยวิธีต่าง ๆ

การเปรียบเทียบใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ จากการทดสอบของGustafarro<sup>[17]</sup> เป็นความสัมพันธ์อ้างอิง โดยการทดสอบของGustafarroใช้ตัวอย่างทดสอบขนาด 3x3 ฟุตหนา 7 นิ้ว การวัดอุณหภูมิกระทำที่ทุก  $\frac{1}{4}$  นิ้วตลอดความหนา สัดส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ คือ ทรายต่อปูน

ซีเมนต์โดยน้ำหนักเท่ากับ 3.7 วัสดุผสมหยาบชนิดคาร์บอนตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 4.8 อัตราส่วนน้ำตอปูนซีเมนต์เท่ากับ 0.63 และกำลังต้านทานแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 270 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ระดับต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.10

รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลา ของคอนกรีตบริเวณกลางแผ่นพื้นที่ผิวบน และที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 1 (ลระยะห่างเหล็กเสริม) เทียบกับผลการทดสอบของ Gustafarro จากรูปดังกล่าวพบว่าอุณหภูมิของคอนกรีตของแผ่นพื้นที่ 1 ใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ Gustafarro มากยกเว้นที่ผิวบนของแผ่นพื้นที่ เนื่องจากที่ผิวบนของแผ่นพื้นที่สัมผัสอากาศ ในขณะที่ผลการทดสอบของ Gustafarro เป็นอุณหภูมิของคอนกรีตที่ระดับ 12 เซนติเมตรของแผ่นพื้นที่ที่มีความหนา 7 นิ้ว นอกจากนี้ยังพบว่าระยะห่างระหว่างเหล็กเสริม 40 และ 20 เซนติเมตร มีการหลุดร่อนของคอนกรีตไม่ต่างกัน

รูปที่ 5.12 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลา ของคอนกรีตบริเวณกลางแผ่นพื้นที่ผิวบนและที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวด) เทียบกับผลการทดสอบของ Gustafarro จากรูปดังกล่าวพบว่าอุณหภูมิของคอนกรีตของแผ่นพื้นที่ 2 มีผลการเปรียบเทียบคล้ายแผ่นพื้นที่ 1 กล่าวคือ อุณหภูมิของคอนกรีตของแผ่นพื้นที่ 2 ใกล้เคียงกับผลการทดสอบของ Gustafarro มากยกเว้นที่ผิวบนของพื้นที่ โดยเหตุผลความแตกต่างของอุณหภูมิเป็นเช่นเดียวกับแผ่นพื้นที่ 1

รูปที่ 5.13 และ 5.14 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลา ของคอนกรีตที่ตำแหน่งบนซ้าย และบนขวาของแผ่นพื้นที่ผิวบนและที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่าง) เทียบกับผลการทดสอบของ Gustafarro ตามลำดับ จากรูปทั้งสองพบว่าอุณหภูมิของคอนกรีตที่ตำแหน่งบนซ้าย และบนขวาของแผ่นพื้นที่ 3 มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบของ Gustafarro มาก โดยตำแหน่งบนซ้ายของแผ่นพื้นที่มีอุณหภูมิคอนกรีตทุกระดับสูงกว่าตำแหน่งบนขวา ซึ่งติดแผ่นยิปซัมหนาเป็นสองเท่าของตำแหน่งบนซ้าย การหลุดร่อนของคอนกรีตภายหลังการทดสอบเป็นแบบการระเบิดออกของผิวคอนกรีต พบว่าระยะลึกของการหลุดร่อนของคอนกรีตชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นยิปซัม

รูปที่ 5.15 และ 5.16 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลา ของคอนกรีตที่ตำแหน่งบนซ้าย และบนขวาของแผ่นพื้นที่ผิวบนและที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง) เทียบกับผลการทดสอบของ Gustafarro ตามลำดับ จากรูปทั้งสองพบว่าอุณหภูมิของคอนกรีตที่ตำแหน่งบนซ้ายและบนขวาของแผ่นพื้นที่ 4 มีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบของ Gustafarro มาก โดยในช่วง 2 ชั่วโมงแรก อุณหภูมิคอนกรีตในทุกระดับของแผ่นพื้นที่ 4 จะมีค่าต่ำกว่าผลการทดสอบของ Gustafarro มาก และหลังจาก 2 ชั่วโมงอัตราการเพิ่มอุณหภูมิจะค่อย ๆ สูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดที่ตำแหน่งบนขวาซึ่งมีความหนาของสีทนไฟเป็นสองเท่าของตำแหน่งบนซ้าย จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิของคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ พบว่าอุณหภูมิของคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ จะลดลงตามระยะห่างจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่เพิ่มขึ้น สีทนไฟที่ใช้ในการทดสอบให้ผลการลดอุณหภูมิในคอนกรีตในช่วง 2 ชั่วโมงแรกดีที่สุด

รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์อุณหภูมิกับเวลา ของคอนกรีตบริเวณกลางแผ่นพื้นที่ผิวบน และที่ระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราท์) เทียบกับผลการทดสอบของ Gustafero จากรูปดังกล่าวพบว่าอุณหภูมิของคอนกรีตที่ระดับ 3 และ 6 เซนติเมตรจากผิวล่างของแผ่นพื้นที่ 5 มีผลการเปรียบเทียบคล้ายกับแผ่นพื้นที่ 1 แต่อุณหภูมิคอนกรีตที่ผิวบนและที่ระดับ 9 เซนติเมตร กลับมีค่าต่ำกว่า การทดสอบของ Gustafero ซึ่งอาจเป็นผลจากระยะห่างระหว่างท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงมีค่าน้อยเกินไป จึงเกิดเป็นชั้นที่มีเหล็กในปริมาณมาก ความร้อนจากผิวล่างของแผ่นพื้นจึงระบายออกสู่ด้านข้างของแผ่นพื้นผ่านทางเหล็ก ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2.5

จากการเปรียบเทียบรูปที่ 5.11 ถึง 5.17 พบว่าการใช้สีทนไฟทาที่ผิวล่าง ของแผ่นพื้นเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการลดอุณหภูมิของคอนกรีต และจะให้ผลที่ดีในช่วง 2 ชั่วโมงหลังสัมผัสเปลวไฟ โดยอุณหภูมิของคอนกรีตจะลดลงเมื่อความหนาของสีทนไฟเพิ่มขึ้น การติดแผ่นยิปซัมโดยตรงที่ผิวล่างของแผ่นพื้นเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากแผ่นพื้นจะเกิดการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีตหลังจากแผ่นยิปซัมหลุดออก อย่างไรก็ตามยิปซัมเป็นวัสดุที่ช่วยลดอุณหภูมิคอนกรีตได้ดี จึงควรมีการศึกษาวิธีการติดตั้งและใช้งานแผ่นยิปซัมที่เหมาะสมต่อไป

#### 5.5.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรง ของแผ่นพื้นที่เพิ่มความสามารถทนไฟด้วยวิธีต่าง ๆ

จากรูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรงในแผ่นพื้นที่ 1 พบว่าการลดระยะห่างเหล็กเสริม 40 เป็น 20 เซนติเมตร ไม่มีผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรง ดังนั้นจึงถือว่าค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเกลียวอัดแรงในแผ่นพื้นที่ 1 เป็นความสัมพันธ์อ้างอิง สำหรับการเปรียบเทียบอุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงระหว่างแผ่นพื้น

รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรงในแผ่นพื้นที่ 2 พบว่าที่ระยะคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว 3.2 เซนติเมตร มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรงใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของแผ่นพื้นที่ 1 และที่ระยะคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียว 5.6 เซนติเมตร มีค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรงต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของแผ่นพื้นที่ 1 มาก

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรงในแผ่นพื้นที่ 3 พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรงที่ติดแผ่นยิปซัมหนา 15 และ 30 มิลลิเมตร ก่อนการหลุดออกของแผ่นยิปซัมมีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของแผ่นพื้นที่ 1 มาก โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเกลียวอัดแรงที่ติดแผ่นยิปซัมหนา 30 มิลลิเมตร จะมีค่าต่ำกว่าและหลังจากที่แผ่นยิปซัมหลุดออก อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงจะสูงขึ้นใกล้เคียงกับลวดเกลียวอัดแรงที่ติดแผ่นยิปซัมหนา 15 มิลลิเมตร ทั้งนี้เป็นผลจากระยะลึกของการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีตมีค่าสูงกว่า จากนั้นค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเกลียวอัดแรงที่ติดแผ่นยิปซัมจะสูงขึ้นจนสัมผัสกับค่าเฉลี่ย ของแผ่นพื้นที่ 1

รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเก็ลลิวอัดแรงในแผ่นพื้นที่ 4 พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ทาสิทนไฟหนา 1200 และ 2400 ไมครอน มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของแผ่นพื้นที่ 1 ในช่วง 2 ชั่วโมงแรกและจะมีค่าใกล้เคียงกันตามเวลา โดยความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ทาสิทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้นที่หนา 2400 ไมครอนจะมีค่าต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ทาสิทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้นที่หนา 2400 ไมครอน ให้ความสามารถทนไฟสูงกว่าลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ทาสิทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้นที่หนา 1200 ไมครอน ประมาณ 20 นาที

รูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเก็ลลิวอัดแรงในแผ่นพื้นที่ 5 พบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์ มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของแผ่นพื้นที่ 1 เล็กน้อย ทั้งนี้เป็นผลจากระยะห่างระหว่างท่อร้อยลวดเก็ลลิวอัดแรงมีค่าน้อยเกินไปดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3.2.5 สำหรับลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ใช้ เถ้าลอย และฝุ่นหินปูนเป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเก็ลลิวอัดแรงใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ไม่ใช้วัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์ จากรูปดังกล่าวยังพบว่าลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเก็ลลิวอัดแรงต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามระยะห่างระหว่างท่อร้อยลวดเก็ลลิวอัดแรงที่น้อยเกินไป มีผลทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของลวดเก็ลลิวอัดแรงต่ำลง ดังนั้นการปรับปรุงวัสดุเกราท์ด้วยการเติมวัสดุผสมเพิ่ม ช่วยเพิ่มความสามารถทนไฟให้ลวดเก็ลลิวอัดแรงได้ไม่มากนัก

จากการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเก็ลลิวอัดแรงในรูปที่ 5.5 ถึง 5.9 พบว่าวิธีที่เหมาะสมสำหรับการลดค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ของลวดเก็ลลิวอัดแรง คือ การเพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเก็ลลิว การทาสิทนไฟที่ผิวล่าง และการปรับปรุงวัสดุเกราท์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าถ้าระยะหุ้มท่อร้อยลวดเก็ลลิวอัดแรงมากกว่า 5.6 เซนติเมตรแล้ว อุณหภูมิของลวดเก็ลลิวอัดแรงจะมีค่าต่ำกว่าค่าอุณหภูมิวิกฤติของลวดเก็ลลิวอัดแรง (425 องศาเซลเซียส) ตลอดช่วงเวลาของการทดสอบ ส่วนการติดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่างของแผ่นพื้นที่ โดยตรง ต้องได้รับการปรับปรุงวิธีใช้งานดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.5.1

### 5.5.3 วิธีที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความสามารถทนไฟให้ แก่แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยัดเหนียว

จากผลสรุปในหัวข้อที่ 5.5.1 และ 5.5.2 พบว่าวิธีที่เหมาะสมสำหรับการลดอุณหภูมิในคอนกรีต คือ การทาสิทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น และวิธีที่เหมาะสมสำหรับการลดอุณหภูมิในลวดเก็ลลิวอัดแรง คือ การเพิ่มระยะคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเก็ลลิว โดยแผ่นพื้นที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเก็ลลิวมากกว่า 5.6 เซนติเมตร ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงความสามารถทนไฟ สำหรับแผ่นพื้นที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเก็ลลิวน้อยกว่า 5.6 เซนติเมตร ควรได้รับการปรับปรุงความสามารถทนไฟ เช่น การทาสิทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น โดยความหนาของสิทนไฟที่จะเพิ่มขึ้นตามระยะหุ้มท่อร้อยลวดเก็ลลิวอัดแรงที่ลดลง

## 5.6 ความเป็นไปได้ของการวิบัติก่อนเวลาที่ถูกระหวงฉบับที่ 48 กำหนด ของพื้นคอนกรีตอัดแรง ที่ออกแบบ ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง

จากข้อกำหนดในมาตรฐาน ว.ส.ท.1009-34 ที่กำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นต้องไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงต้องไม่เกิน 425 องศาเซลเซียส จากข้อมูลการทดสอบแผ่นพื้นที่ 1 ในรูปที่ 5.5 และ 5.11 พบว่าอุณหภูมิที่ผิวบนของแผ่นพื้นหนา 12 เซนติเมตรมีค่า 120 องศาเซลเซียส ที่เวลา 150 นาที ลวดเกลียวอัดแรงมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเท่ากับ 425 องศาเซลเซียสที่เวลา 154 นาที ดังนั้นจากข้อกำหนดดังกล่าวแสดงว่าความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นที่มีค่าเท่ากับ 150 นาที ซึ่งมีค่าความสามารถทนไฟมากกว่า 2 ชั่วโมงตามที่ถูกระหวงฉบับที่ 48 (พ.ศ.2540) ระบุไว้ แต่จากตารางที่ 5.5 พบว่าลวดเกลียวอัดแรงของแผ่นพื้นที่ 1 มีโอกาสที่จะวิบัติภายใน 2 ชั่วโมงหลังการสัมผัสเปลวไฟ ถ้าหน่วยดึงแรงในลวดเกลียวอัดแรงขณะใช้งานมีค่าเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ของหน่วยแรงดึงประลัย ดังนั้นการกำหนดความสามารถทนไฟของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงจะยึดตามเวลาที่ให้อุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงถึงค่าวิกฤติจึงไม่ถูกต้อง ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถทนไฟของคอนกรีตอัดแรงขึ้นกับหน่วยแรงดึงในลวดเกลียวอัดแรงที่สภาวะใช้งานเป็นสำคัญ

## 5.7 สรุป

จากการวิเคราะห์เกี่ยวกับช่วงเวลา และ โอกาสที่จะเกิดการวิบัติของแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดังภายหลัง ชนิดชนิดหนึ่ง สรุปพอสังเขปได้ดังนี้

1. พื้นคอนกรีตอัดแรงดังภายหลังที่มีระยะคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงต่ำสุด ตามที่มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง (ว.ส.ท.1009-34) ยอมให้ มีโอกาสที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติที่สภาวะการใช้งานปกติภายใต้ข้อคิด เนื่องจากเวลาเวลาที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติที่สภาวะการใช้งานมีค่าใกล้เคียงกับที่ถูกระหวงฉบับที่ 48 (พ.ศ.2540) กำหนด ดังนั้นพื้นคอนกรีตอัดแรงดังภายหลังที่มีระยะคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงในระยะดังกล่าว ควรได้รับการปรับปรุงความสามารถทนไฟเพื่อให้มีความปลอดภัยเพียงพอ ในกรณีที่มีการก่อสร้างที่มีคุณภาพต่ำ

2. การเพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการลดอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรง จากการศึกษาพบว่า แผ่นพื้นที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง 5.6 เซนติเมตร มีความสามารถทนไฟสูงกว่า 3 ชั่วโมงที่สภาวะการใช้งาน

3. การทาสีทนไฟที่ผิวล่างของพื้นคอนกรีตอัดแรงดังภายหลังชนิดชนิดหนึ่ง เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความสามารถทนไฟให้แก่แผ่นพื้นที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงต่ำกว่า 5.6 เซนติเมตร เนื่องจากที่ทนไฟที่ใช้ในการทดสอบ สามารถลดอุณหภูมิของคอนกรีตและลวดเกลียวอัดแรงได้ดีใน 2 ชั่วโมงแรก โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับตัวแผ่นพื้น



ตารางที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุผสมหยาบ ชนิดคาร์บอนตเทียบกับค่าเริ่มต้น(คอนกรีตมีหน่วยแรงกระทำไม่เกิน  $0.4 f_c'$ ) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น<sup>[16]</sup>

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	กำลัง (%ของค่าเริ่มต้น)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	กำลัง (%ของค่าเริ่มต้น)
0	0	500	0
50	0	550	99
100	0	600	98
150	0	650	96
200	0	700	91
250	0	750	83
300	0	800	63
350	0	850	29
400	0	900	0
450	0		

ตารางที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดกำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีต ที่ใช้วัสดุผสมหยาบ ชนิดคาร์บอนตเทียบกับค่าเริ่มต้น(คอนกรีตไม่มีหน่วยแรงกระทำ) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น<sup>[16]</sup>

อุณหภูมิ (เซลเซียส)	กำลัง (%ของค่าเริ่มต้น)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	กำลัง (%ของค่าเริ่มต้น)
0	0	500	82
50	99	550	81
100	97	600	78
150	94	650	74
200	91	700	68
250	90	750	57
300	88	800	40
350	86	850	16
400	84	880	0
450	83		

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การลดกำลังด้านทานแรงดึงของลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับค่าเริ่มต้น (ลวดเกลียวอัดแรงชนิดรีดเย็น) เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น<sup>[16]</sup>

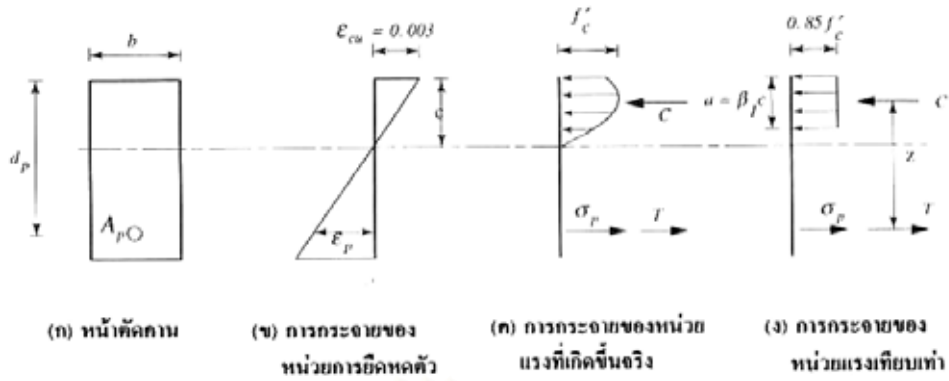
อุณหภูมิ (เซลเซียส)	กำลัง (%ของค่าเริ่มต้น)	อุณหภูมิ (เซลเซียส)	กำลัง (%ของค่าเริ่มต้น)
0	0	500	32
50	98	550	22
100	97	600	14
150	95	650	10
200	92	700	7
250	86	750	6
300	78	800	6
350	68	850	6
400	52	900	5
450	45		

ตารางที่ 5.4 โอกาสที่พื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยี่เหี้ยวเกิดการวิบัติ เนื่องจากการอัดระเบิดของคอนกรีต ตามลำดับ

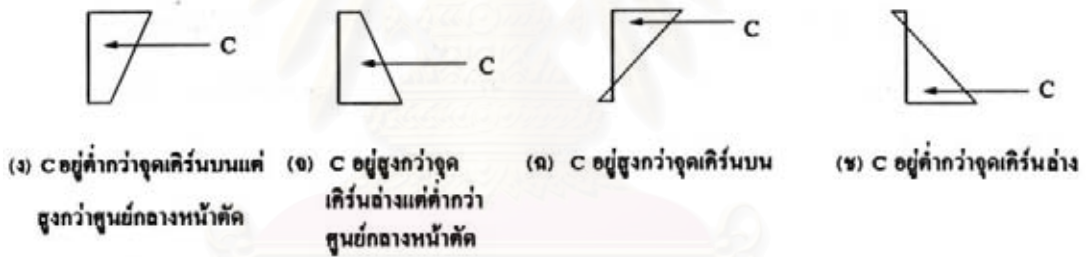
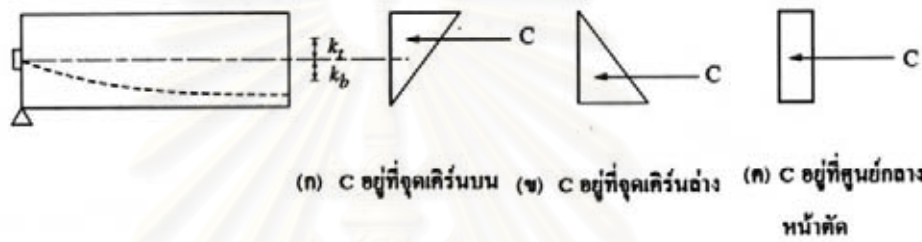
ลำดับที่	กรณี	ตำแหน่งของแรงอัดลัพท์ C
1(น้อย)	6	$(C > k_T)$
2	1	$(C = k_T)$
3	4	$(k_T > C > C.G.)$
4	3	$(C = C.G.)$
5	5	$(C.G. > C > k_B)$
6	2	$(C = k_B)$
7(มาก)	7	$(C < k_B)$

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าเวลาน้อยที่สุดที่ลวดเกลียวอัดแรงวิบัติ ที่สภาวะประลัย และสภาวะการใช้งานปกติ

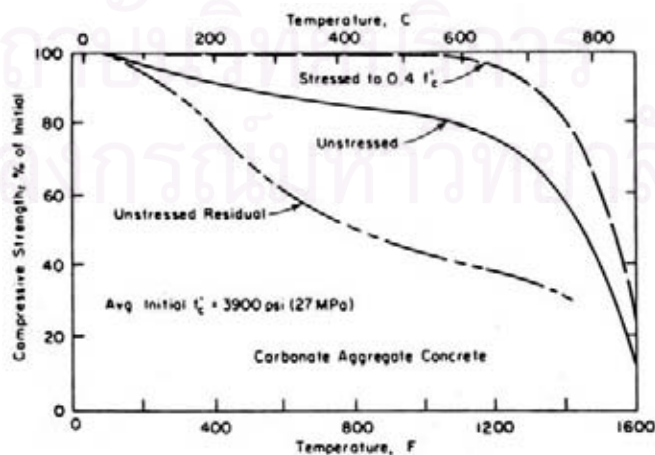
แผ่นพื้นที่ 1 ศึกษาผลของระยะห่างเหล็กเสริมที่มีต่อการหลุดร่อน				
ระยะห่างเหล็กเสริม	20 เซนติเมตร	40 เซนติเมตร		
สภาวะประลัย (150 องศาเซลเซียส)	45 นาที	44 นาที		
สภาวะการใช้งาน (350 องศาเซลเซียส)	116 นาที	110 นาที		
แผ่นพื้นที่ 2 ศึกษาผลของระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง				
ระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง	3.2 เซนติเมตร	5.6 เซนติเมตร		
สภาวะประลัย (150 องศาเซลเซียส)	52 นาที	88 นาที		
สภาวะการใช้งาน (350 องศาเซลเซียส)	122 นาที	217 นาที		
แผ่นพื้นที่ 3 ดัดแผ่นยิปซัมทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น				
ความหนาของแผ่นยิปซัม	15 มิลลิเมตร	30 มิลลิเมตร		
สภาวะประลัย (150 องศาเซลเซียส)	97 นาที	99 นาที		
แผ่นพื้นที่ 4 ทาสีทนไฟที่ผิวล่างของแผ่นพื้น				
ความหนาของสีทนไฟ	1200 ไมครอน	2400 ไมครอน		
สภาวะประลัย (150 องศาเซลเซียส)	71 นาที	94 นาที		
สภาวะการใช้งาน (350 องศาเซลเซียส)	137 นาที	163 นาที		
แผ่นพื้นที่ 5 ศึกษาการปรับปรุงวัสดุเกราะ				
ชนิดของวัสดุเกราะ	CC	FF	LL	PP
สภาวะประลัย (150 องศาเซลเซียส)	55 นาที	62 นาที	69 นาที	79 นาที
สภาวะการใช้งาน (350 องศาเซลเซียส)	132 นาที	144 นาที	143 นาที	153 นาที



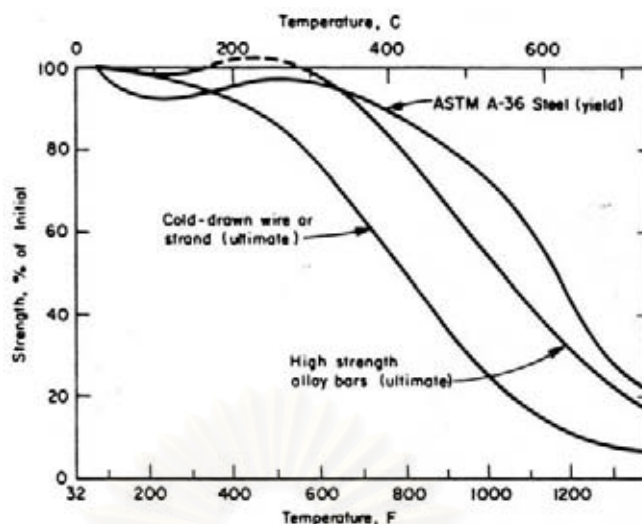
รูปที่ 5.1 การกระจายหน่วยการยืดหดตัวและหน่วยแรงภายใน ของพื้นคอนกรีตอัดแรง ที่สถานะประลัย



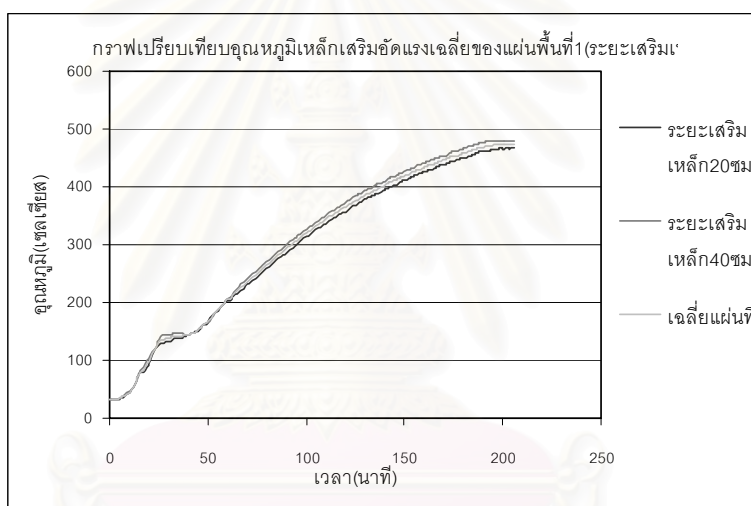
รูปที่ 5.2 การกระจายหน่วยแรงอัดในคอนกรีต ของแรงอัดลัพท์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในหน้าตัด



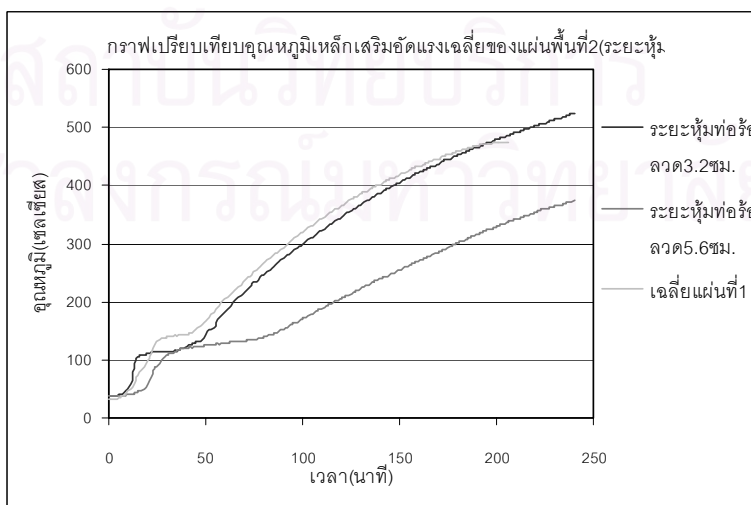
รูปที่ 5.3 อัตราการลดกำลังต้านทานแรงอัดประลัย ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมหยาบชนิดคาร์บอนเนต<sup>[16]</sup>



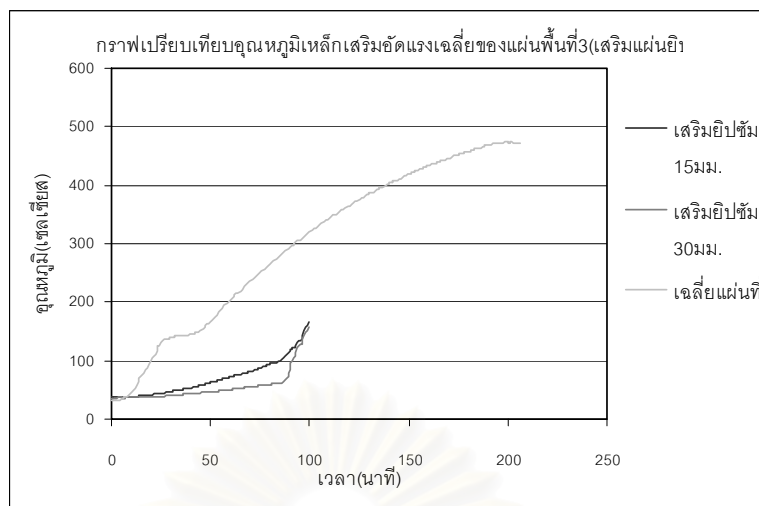
รูปที่ 5.4 อัตราการลดกำลังต้านทานแรงดึงประลัย ของเหล็กเสริมและเหล็กเสริมอัดแรง<sup>[16]</sup>



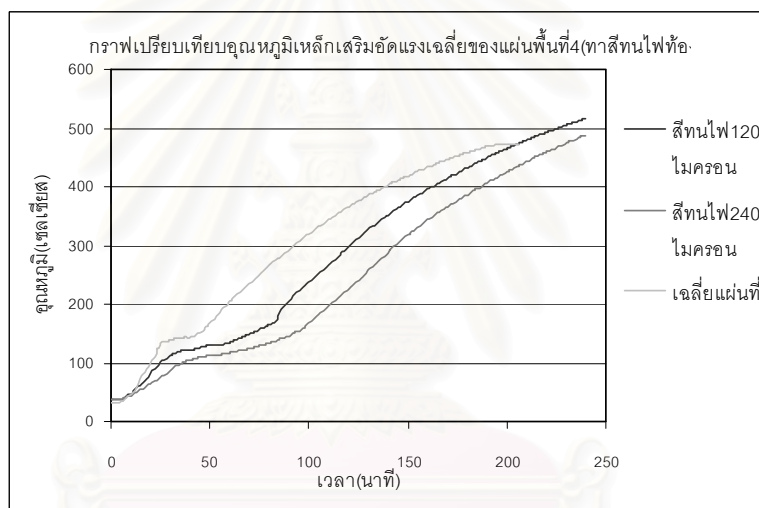
รูปที่ 5.5 อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 1 (ลดระยะห่างของเหล็กเสริม)



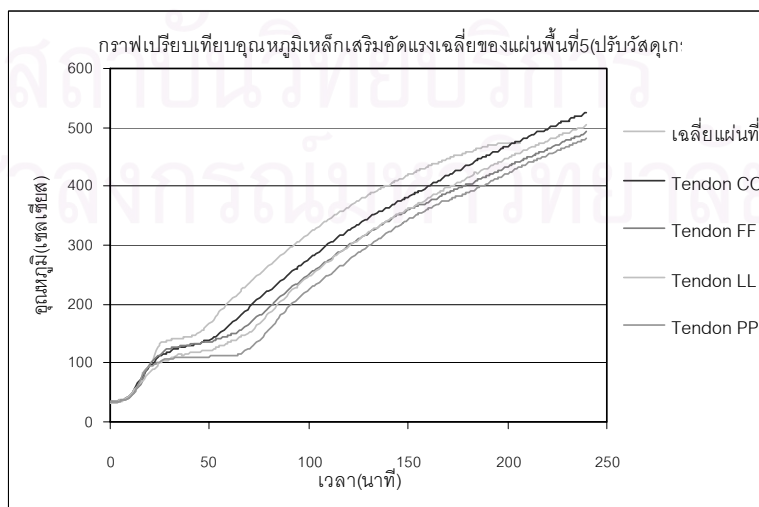
รูปที่ 5.6 อุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 2 (เพิ่มระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง)



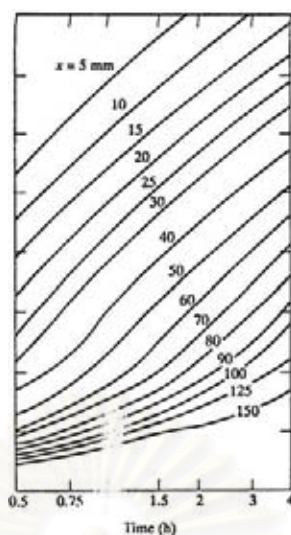
รูปที่ 5.7 อุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 3 (ติดแผ่นยิปซั่มที่ผิวล่าง)



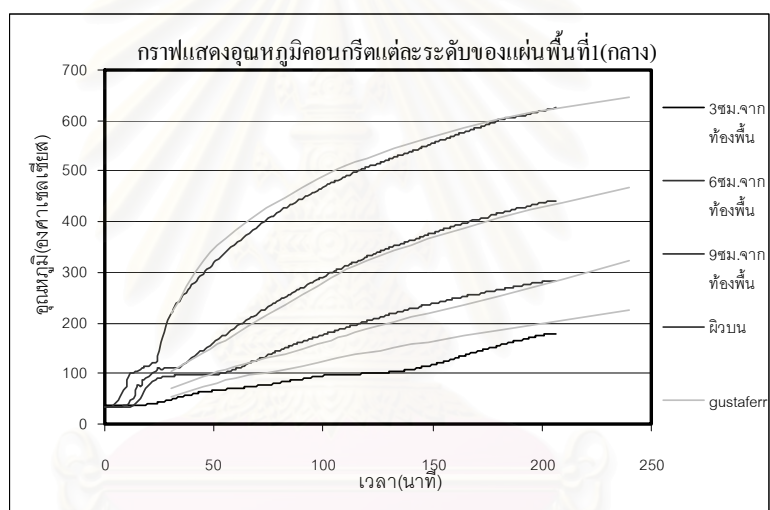
รูปที่ 5.8 อุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 4 (ทาสีทนไฟที่ผิวล่าง)



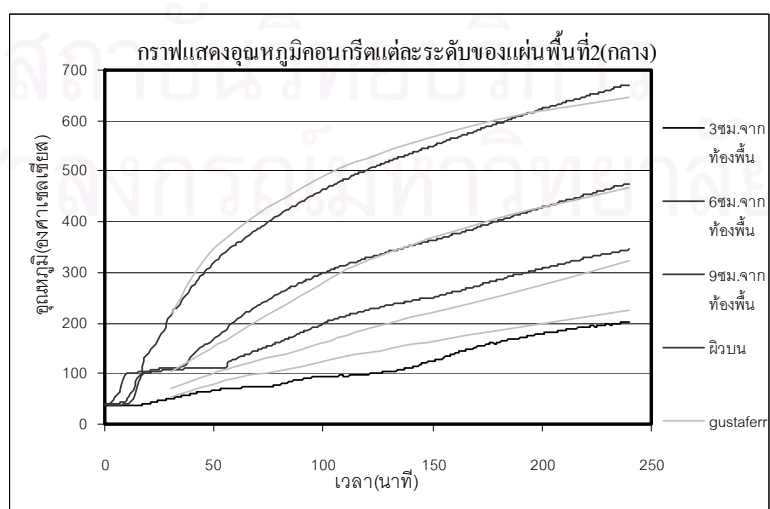
รูปที่ 5.9 อุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงเทียบกับเวลา ของแผ่นพื้นที่ 5 (ปรับปรุงวัสดุเกราะ)



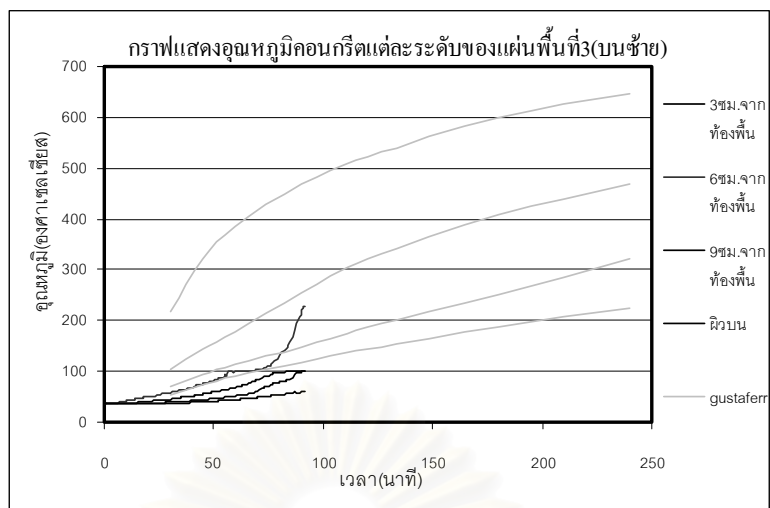
รูปที่ 5.10 อุณหภูมิที่ระดับต่างๆ ของคอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมหยาบชนิดคาร์บอนेट<sup>[3]</sup>



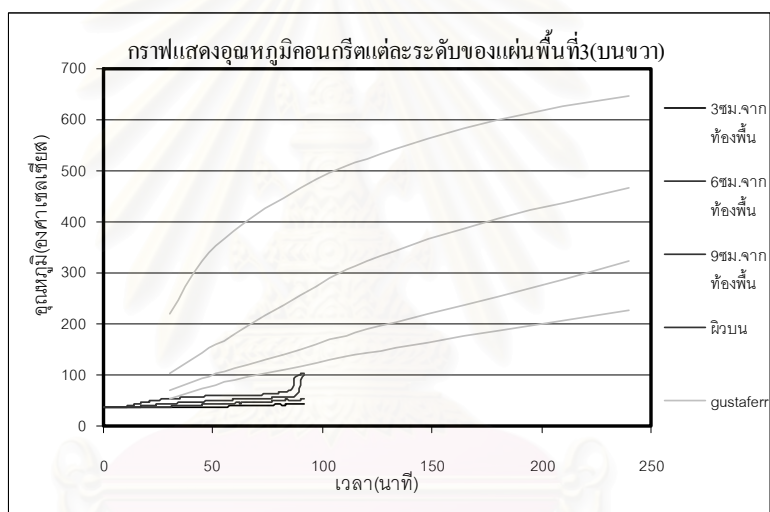
รูปที่ 5.11 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่างๆ ของแผ่นพื้นที่ 1 (ตำแหน่งกลางแผ่นพื้น)



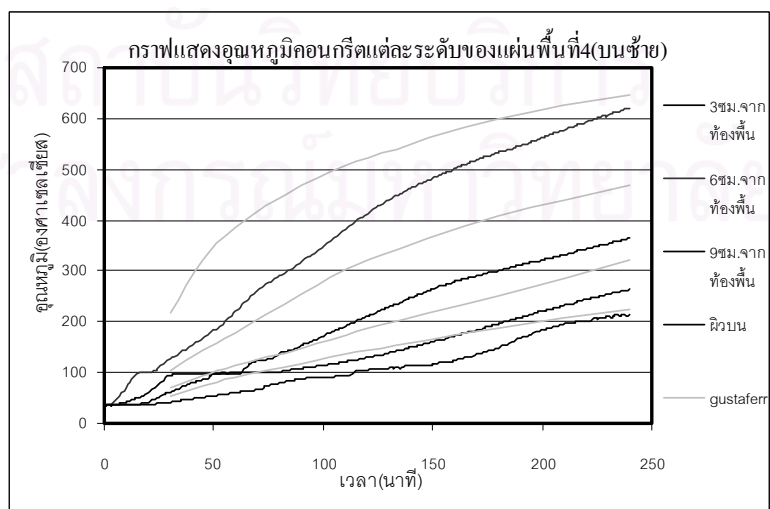
รูปที่ 5.12 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่างๆ ของแผ่นพื้นที่ 2 (ตำแหน่งกลางแผ่นพื้น)



รูปที่ 5.13 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ด้านบนซ้ายของแผ่นพื้น)

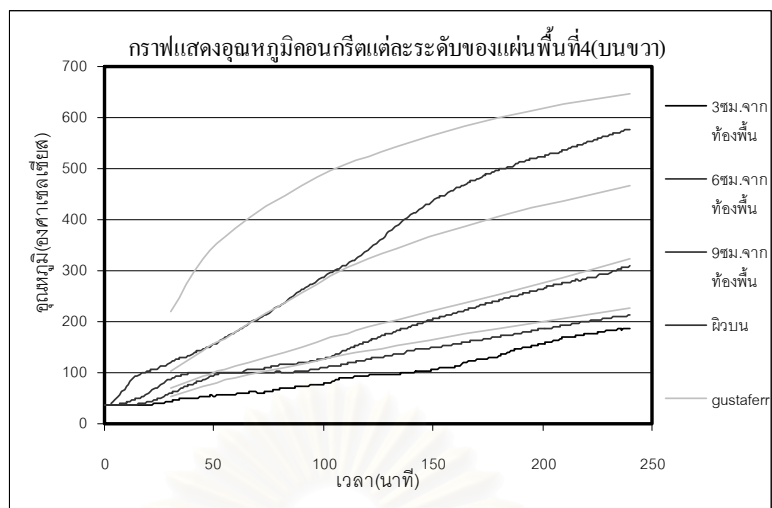


รูปที่ 5.14 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ของแผ่นพื้นที่ 3 (ด้านบนขวาของแผ่นพื้น)

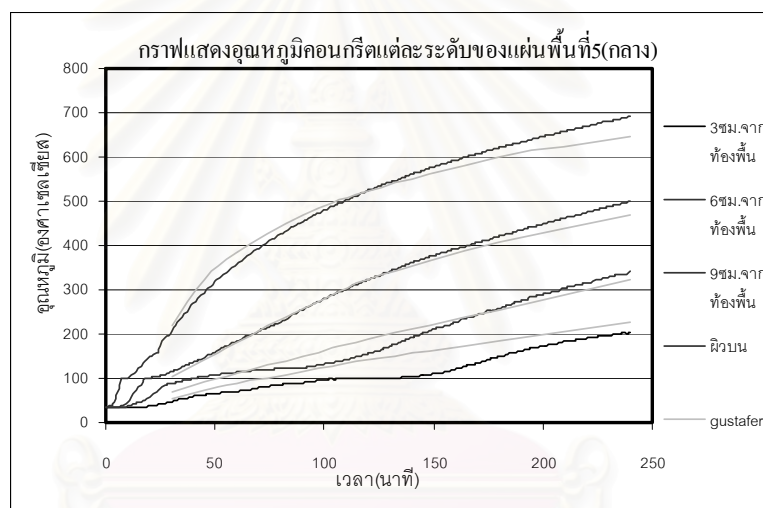


รูปที่ 5.15 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ด้านบนซ้ายของแผ่นพื้น)





รูปที่ 5.16 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ของแผ่นพื้นที่ 4 (ด้านบนซ้ายของแผ่นพื้น)



รูปที่ 5.17 อุณหภูมิคอนกรีตที่ระดับต่าง ๆ ของแผ่นพื้นที่ 5 (ตำแหน่งกลางแผ่นพื้น)

## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัย

#### 6.1 ทั่วไป

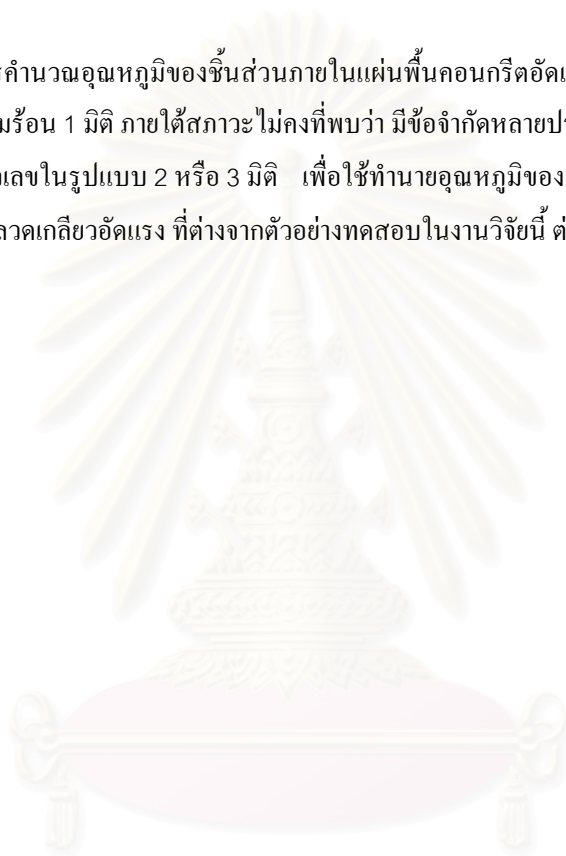
การออกแบบพื้นคอนกรีตอัดแรง ดึงภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว ต้องออกแบบให้เกิดการวิบัติในลักษณะแรงดึงเป็นหลัก ดังนั้นพื้นคอนกรีตอัดแรงมีโอกาที่จะเกิดการวิบัติเนื่องจากแรงดึงเป็นหลักเมื่อเผชิญอค์กัถย ซึ่งพื้นคอนกรีตอัดแรงที่มีระยะคอนกรีตหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงน้อย จะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรงภายหลังการสัมผัสเปลวไฟในช่วงเวลาอันสั้น งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงวิธีที่ช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้นกับพื้นคอนกรีตอัดแรง ดึงภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยวที่เผชิญอค์กัถย สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. พื้นคอนกรีตอัดแรง ดึงภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว ที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงน้อยที่สุด (3.2 เซนติเมตร) ตามข้อกำหนดในมาตรฐานมาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง (ว.ส.ท.1009-34) มีโอกาสที่ลวดเกลียวอัดแรง วิบัติในเวลาน้อยกว่า 2 ชั่วโมงตามที่กฎกระทรวงฉบับที่ 48 (พ.ศ.2540) กำหนด หากการควบคุมคุณภาพงานก่อสร้างไม่ดีพอ
2. พื้นคอนกรีตอัดแรง ดึงภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว ที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง 5.6 เซนติเมตรขึ้นไป จะมีความสามารถทนไฟสูงกว่า 3 ชั่วโมง สำหรับแผ่นพื้นที่มีระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรงระหว่าง 3.2 ถึง 5.6 เซนติเมตร ควรได้รับการปรับปรุงความสามารถทนไฟ เพื่อให้มีระดับความปลอดภัยที่สูงขึ้น
3. พื้นคอนกรีตอัดแรง ดึงภายหลัง ชนิดยึดเหนี่ยว ที่มีระยะห่างของเหล็กเสริมมากกว่า 20 เซนติเมตร จะมีการหลุดร่อนของคอนกรีตไม่แตกต่างกัน
4. การคิดแผ่นยิปซัมที่ผิวล่างของพื้นคอนกรีตอัดแรงโดยตรง ทำให้ผิวล่างของแผ่นพื้นเกิดการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีต
5. การใช้สีทนไฟทาที่ผิวล่างของพื้นคอนกรีตอัดแรง สามารถลดอุณหภูมิของคอนกรีตและลวดเกลียวอัดแรงได้ โดยที่อุณหภูมิของแผ่นพื้นจะลดลงตามความหนาของสีทนไฟที่เพิ่มขึ้น
6. การเติมวัสดุผสมเพิ่มในวัสดุเกราท์ สามารถลดอุณหภูมิของลวดเกลียวอัดแรงได้เพียงเล็กน้อย โดยเพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มที่ทำให้อุณหภูมิลวดเกลียวอัดแรงลดลงมากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุผสมเพิ่มตัวอื่น แต่กำลังต้านทานแรงต่าง ๆ ของวัสดุเกราท์ที่ใช้เพอร์ไลต์เป็นวัสดุผสมเพิ่ม จะลดลงตามปริมาณเพอร์ไลต์ที่เพิ่มขึ้น
7. ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ภายใต้อุณหภูมิคงที่ ให้ความถูกต้องเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงดึงภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว แต่ทฤษฎีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในการใช้งาน ได้แก่ การที่ไม่สามารถคำนวณหาช่วงเวลาแผ่นยิปซัมหลุดร่อน และไม่สามารถศึกษาผลของระยะห่างเหล็กเสริม เป็นต้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการใช้แผ่นยิปซัมในการเพิ่มความสามารถทนไฟให้แผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรง พบว่ายิปซัมเป็นวัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานความร้อนได้ดี แต่การติดตั้งแผ่นยิปซัมที่ผิวล่างของแผ่นพื้นโดยตรง ทำให้เกิดการหลุดร่อนชนิดการระเบิดออกของผิวคอนกรีต ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิธีการติดตั้งและใช้แผ่นยิปซัมสำหรับองค์อาคารคอนกรีตที่มีความเหมาะสมต่อไป

สำหรับการคำนวณอุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในแผ่นพื้นคอนกรีตอัดแรงตั้งภายหลังชนิดยึดเหนี่ยว ด้วยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อน 1 มิติ ภายใต้สภาวะไม่คงที่พบว่า มีข้อจำกัดหลายประการ จึงควรมีการศึกษาวิธีการคำนวณด้วยวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบ 2 หรือ 3 มิติ เพื่อใช้ทำนายอุณหภูมิของพื้นคอนกรีตอัดแรง ที่มีความหนาและระยะหุ้มท่อร้อยลวดเกลียวอัดแรง ที่ต่างจากตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยนี้ ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Lionel Issen. Scaled Models in Fire Research on Concrete Structure. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 8 (September 1966):1249-1253.
2. Harold W. Brewer. General Relation of Heat Flow Factors to the Unit Weight of Concrete. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 9 (January 1967): 48-60.
3. M. S. Abrams and A. H. Gustafarro. Fire Endurance of Concrete Slabs As Influenced by Thickness, Aggregate Type ,and Moisture. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 10 (May 1968) : 9-74.
4. Tasnim Uddin and Charles G. Culver. Effects of Elevates Temperature on Structural Members. ACSE : Journal of Structural Division 101 (July 1975): 1531-1549.
5. Eduardo Salse and Tung D. Lin. Structural Fire Resistance of Concrete. ACSE : Journal of Structural Division 102 (January 1976): 51-63.
6. Bruce Ellingwood and James R. Shaver. Reliability of RC Beams Subjected to Fire. ACSE : Journal of Structural Division 103 (May 1977): 1047-1059.
7. Bruce Ellingwood and T.D. Lin. Flexure and Shear Behavior of Concrete Beams during Fires. ACSE : Journal of Structural Division 117 (February 1991): 440-458.
8. Dietmar Hosser, Thomas Dorn and Osama El-Nesr. Experimental and Nunerical Studies of Composite Beams Exposed to Fires. Journal of Structural Engineering 120 (October 1994): 2871-2892.
9. บัณฑิต เกษรมาลา. การศึกษากำลังที่แปรเปลี่ยนตามเวลาของคอนกรีตหลังจากการถูกไฟไหม้ที่ระดับความรุนแรงปานกลาง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2531.
10. เจษฎา เกษมเศรษฐ์ และ ททัษรัตน์ มณีเทศ. การศึกษาเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตก่อนและหลังการเผาไหม้. เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 6 1 (วันที่ 10-12 พฤษภาคม2543): MAT93 - MAT99.
11. Underwriter's Laboratories Inc. Report on Precast-prestressed Concrete Hollow core Flat slabs, Forming A Floor and Ceiling Assembly. PCI Journal 5 (April 1964): 94-107.
12. Underwriter's Laboratories Inc. Fire Test Report on Roof and Ceiling Construction Consisting of Prestressed Pretensioned Concrete Doubled-stemmed Units and Various Insulation Materials. PCI Journal 9 (October 1966): 16-35.
13. Gustafarro A.H. and Selvaggio S.L. Fire Endurance of Prestressed Concrete Units Coated with Spray-applied Insulation. PCI Journal 17 (February 1972): 82-103.
14. Gustafarro A.H. and Selvaggio S.L. Fire Endurance of Simply Supported Prestressed Concrete Slab. PCI Journal 8 (February 1967): 37-52.

15. Harmathy T. Z. Fire Safety Design and Concrete. 1<sup>st</sup> Ed. Essex : Longman Scientific & Technical ,1993.
16. ACI Committee Report 216R-89. Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements. American Concrete Institute ,1997.
17. Gustaferro A.H. Fire Resistance of Post-tensioned Structured. PCI Journal18 (April 1973): 38-63.
18. นิคม จิ่งอยู่สุข. ประโยชน์ของหินภูเขาไฟเนื้อแก้วเพอร์ไลต์ในงานอุตสาหกรรม. เอกสารประกอบการประชุมเหมืองแร่ประจำปี2531 6 (วันที่ 17-19 สิงหาคม 2531): 133-138.
19. Ingberg S.H. Test of Suverity of Building fires. NFPA Quarterly 11 (July 1928): 23-43.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

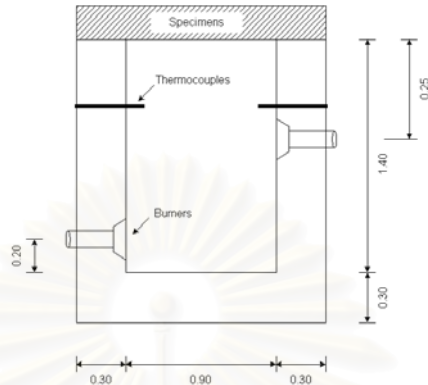


ภาคผนวก

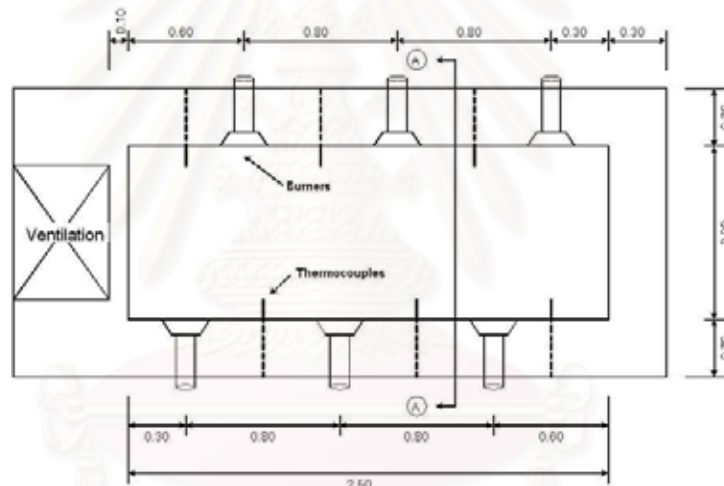
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

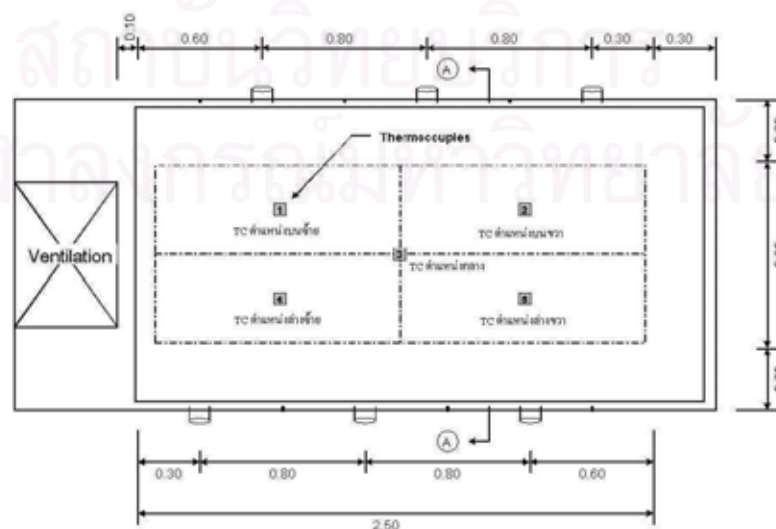
รายละเอียดของส่วนประกอบและตำแหน่งอุปกรณ์ในเตาทดสอบ



รูปที่ ก-1 รายละเอียดและตำแหน่งของอุปกรณ์ ภายในเตาทดสอบ (ภาพด้านหน้า)



รูปที่ ก-2 รายละเอียดและตำแหน่งของอุปกรณ์ ภายในเตาทดสอบ (ภาพด้านบน)



รูปที่ ก-3 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิของคอนกรีตที่ผิวบนและระดับ 3, 6 และ 9 เซนติเมตร

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุเกราท์

แบบ วศ. 1



ที่ วร 0505/8900  
ถึง นายบัณฑิต ทนวิชาวราวุธ

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ วัสดุตัวอย่าง ตาม คำร้อง  
ลงวันที่ 22 พฤษภาคม 2544 เลขรับ 2812 วันที่ 22 พฤษภาคม 2544  
ซึ่งกรมวิทยาศาสตร์ฯ ได้รับเมื่อวันที่ 22 พฤษภาคม 2544

กอง พิสิกส์และวิศวกรรม โทร. 2017130

  
25 กรกฎาคม 2544

รายงานการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ

ชื่อวัสดุตัวอย่าง	เครื่องหมาย	หมายเลข	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/m.K)
ตามชื่อผู้ส่งเรียก	ที่ระบุตัวอย่าง	ปฏิทินการ	

พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ชนิดที่ 1 (W/C=0.45) (สัญลักษณ์ CC)	VH.170	0.224
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ชนิดที่ 1 ผสมเถ้าลอย 50% โดยน้ำหนักซีเมนต์ [FF]	VH.171	0.339
พอร์ตแลนด์ซีเมนต์ ชนิดที่ 1 ผสมปูน 50% โดยน้ำหนักซีเมนต์ [L.L.]	VH.172	0.195

/พอร์ตแลนด์ ...

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัสดุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น  
- ไม่รับรองวัสดุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รูปที่ ข-1 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ของวัสดุเกราท์



- 2 -

ชื่อวัตถุตัวอย่าง	เครื่องหมาย	หมายเลข	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ (W/m.K)
	ตรา ฯลฯ		
ตามที่อยู่ตั้งเรียก	ที่ระบุตัวอย่าง	ปฏิบัติการ	

ปอร์ตแลนดีซีเมนต์  
ชนิดที่ ๑  
ผสมเพชรไลท์ 50%  
โดยน้ำหนักซีเมนต์  
[PP]

VH.173

0.116



*(Handwritten Signature)*  
(นายภักดิ์ ทองดีพร)  
นักวิทยาศาสตร์ ๗ ข

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายงานนี้ : - รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ เท่านั้น  
- ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง

รูปที่ ข-2 ผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ของวัสดุเกราท(ต่อ)

## ภาคผนวก ค.

### มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

#### มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

มอก. 15-2532	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
มอก. 733-2530	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับทำคอนกรีต
มอก. 985-2533	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมว่าด้วย สารเคมีผสมเพิ่มสำหรับทำคอนกรีตไหล

#### มาตรฐาน ว.ส.ท. ที่เกี่ยวข้อง

ว.ส.ท. 1009-34	มาตรฐานสำหรับอาคารคอนกรีตอัดแรง
----------------	---------------------------------

#### มาตรฐาน ASTM ที่เกี่ยวข้อง

ASTM C109/C109M-95	Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar (Using 2 in. or [50 mm] Cube Specimens)
ASTM C128-93	Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate
ASTM C150-95a	Specification for Portland Cement
ASTM C190-95	Test Method for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars
ASTM C204-96	Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus
ASTM C234-94	Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel
ASTM C305-94	Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency
ASTM C494-92	Specification for Chemical Admixture for Concrete
ASTM C939-94a	Test Method for Flow of Grout for Preplaced – Aggregate Concrete (Flow Cone Method)
ASTM C1017-92	Specification for Chemical Admixtures for Use in Producing Flowing Concrete
ASTM E119-95a	Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายบัณฑิต คมกริชวรากล เกิดเมื่อวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2519 ที่กรุงเทพมหานคร ได้รับการศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาและมัธยมศึกษาที่โรงเรียน กรุงเทพคริสเตียน วิทยาลัย สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2541 หลังจากนั้นได้เข้ารับการศึกษาระดับปริญญาโท ที่สาขาวิศวกรรมโครงสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย