

การประเมินความสามารถใช้งานได้ของอาคารหลังถูกเพลิงไหม้โดยวิธีการคำนวณ
SERVICEABILITY EVALUATION OF FIRED BUILDING BY CALCULATION METHOD



โดย
นาย กรวิทย์ โนนรา
นาย วสันต์ ศรีพลากิจ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน... 45833
วัน, เดือน, ปี... 18 ก.พ. 2546

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีคำนำไปใช้

การประเมินความสามารถการใช้งานได้ของอาคารหลังถูกเพลิงไหม้โดยวิธีการคำนวณ
SERVICEABILITY EVALUATION OF FIRED BUILDING BY CALCULATION METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**SERVICEABILITY EVALUATION OF FIRED BUILDING
BY CALCULATION METHOD**




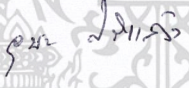
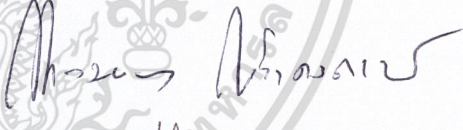

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT 'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2001

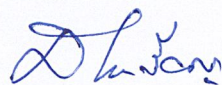
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ	การประเมินความสามารถการใช้งานได้ของอาคารโดยวิธีการคำนวณ		
นักศึกษา	นายกรวิทย์ โนรา	รหัสประจำตัว	41014560
	นายวสันต์ ศรีพลากิจ	รหัสประจำตัว	41014736
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
ภาควิชา	วิศวกรรมโยธา		
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง		

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
ผศ.อำนวยการ	พานิชกุลพงศ์	
อ.อุบะ	ศิริแก้ว	
อ.แหลมทอง	เหล่าคงถาวร	
อ.ทรงกลด	แซ่อึ้ง	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(ผศ.ดร.แดง เหริยญสุวรรณ)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 30 เดือน เมษายน พ.ศ. 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การประเมินความสามารถการใช้งานได้ของอาคารหลังถูกเพลิงไหม้โดยวิธีการ
คำนวณ

SERVICEABILITY EVALUATION OF FIRED BUILDING BY
CALCULATION METHOD

นักศึกษา นายกรวิทย์ โนรา
นายวสันต์ ศรีพลากิจ
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.ทรงกลด แซ่อึ้ง
ระดับการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา
ภาควิชา วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

เมื่อเกิดเหตุเพลิงไหม้ก็มักจะมีคำถามตามมาอยู่เสมอว่าอาคารเหล่านี้ยังสามารถใช้งาน
ได้อยู่หรือไม่ ควรทุบทิ้ง ทำการซ่อมแซมเฉพาะส่วนที่เสียหายแล้วใช้งานได้ต่อไป ซึ่งในปัจจุบันไม่มี
หลักเกณฑ์ที่แน่นอนในการประเมิน ทางผู้ประพันธ์จึงได้เสนอแนวความคิดในการประเมินโดยการ
คำนวณในเบื้องต้น

ข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องใช้คือ รูปร่างลักษณะของอาคาร, ชนิดและจำนวนของวัสดุที่อยู่ใน
อาคาร และช่องระบายอากาศที่มีอยู่ในอาคาร เพื่อนำไปหาค่าดิ่งที่ลดลงของโครงสร้างหลักส่วนต่างๆ
คือ เสา, คาน, พื้น แล้วจึงสรุปการประเมินว่าจะต้องทำอะไรกับอาคารเหล่านั้น

Title : SERVICEABILITY EVALUATION OF FIRED BUILDING BY
CALCULATION METHOD
Name : MR.GORAWIT NORA
: MR.WASAN SRIPALAKIT
Field : CIVIL ENGINEERING
Department : CIVIL ENGINEERING
Faculty : ENGINEERING
Advisor : MR.SONGLOD SAE-UENG

ABSTRACT

When a building was burn by fire a many question always occer, such as sreviceability of building, repair some damaged element and then reuse that building.At the present, no exact evaluation of serviceability of burn building was established, hence, this study had proposed a method to compute the strength of bum reinforced concrete structure

Initial data for calculation, i.e. Type and member of material that are in building, ventilation in building. After a previous data can be find, a residual strength of main structure, i.e. column, beam, slab can be solved then we already know what we must do about this building.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้จะสำเร็จมิได้หากขาดผู้หนึ่งผู้ใดที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ สองท่านแรกได้แก่อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ อาจารย์ทรงกลด แซ่อึ้ง ที่ท่านได้ให้คำแนะนำแนวทางในการศึกษาโครงการพิเศษให้เกิดประโยชน์ สามารถนำโครงการไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาจารย์แหลมทอง เหล่าคงถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาอีกท่านหนึ่ง ซึ่งท่านได้สละเวลาในการให้คำปรึกษาและดูแลโครงการอย่างใกล้ชิดทั้งในและนอกเวลาราชการ รวมทั้งดูแลความเรียบร้อยของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณนายอนันต์ วิริยะกิจชัย นายโสภณ อิงคนินันท์ นายปรเมศวร์ เหลือเทพ นายสิทธิพงษ์ บุญเต็ม นายสารรัตน์ เขาวรัตน์ นายเอก กุลตั้งเจริญ และเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ให้ความช่วยเหลือ

สุดท้ายนี้จะขาดเสียมิได้สำหรับคำขอบพระคุณแด่บุพการีของผู้จัดทำโครงการ ตั้งแต่การสั่งสอน การเลี้ยงดู ทำให้มีทุกวันนี้ได้ จนถึงความช่วยเหลือที่ท่านมีในระหว่างทำโครงการทั้งเป็นกำลังใจและกำลังทุนทรัพย์ รวมทั้งความรักที่มีให้แก่บุตรเสมอมา

นายกรวิทย์

โนรา

นายวสันต์

ศรีพลากิจ

ผู้ประพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
	ปกใน (ภาษาไทย)	ก
	ปกใน (ภาษาอังกฤษ)	ข
	หน้าอำนวยการ	ค
	บทคัดย่อภาษาไทย	ง
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
	กิตติกรรมประกาศ	ฉ
	สารบัญ	ช
	สารบัญตาราง	ฎ
	สารบัญรูป	ฏ
1	บทนำ	
	1.1. กล่าวนำ	1
	1.2. ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.3. จุดประสงค์ของการศึกษา	2
	1.4. ขอบเขตของการศึกษา	2
	1.5. วิธีการศึกษา	2
2	วรรณกรรมปริทัศน์	
	2.1. คำจำกัดความ	4
	2.2. การแผ่กระจายของไฟ	11
	2.3. คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก	14
	2.5. วิธีการทดสอบ	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
3	การกำหนดความต้านทานไฟ	
	3.1. สภาพการให้ความร้อน	16
	3.2. เกณฑ์ในการปฏิบัติ	19
4	ความต้านทานไฟและความรุนแรงของไฟ	
	4.1. การวิจัยที่ผ่านมา	21
	4.2. ปัจจัยที่มีผลกับความรุนแรงของไฟ	25
	4.2.1. ภาระของไฟ	25
	4.2.2. ช่องระบายอากาศ	26
	4.2.3. ขนาดของห้อง	26
	4.3. วิธีการออกแบบอาคารเพื่อต้านทานเพลิงไหม้	26
	ตัวอย่างที่ 4.1	31
5	คุณสมบัติของวัสดุเมื่ออุณหภูมิสูง	
	5.1. คอนกรีต	32
	5.1.1. ความหนาแน่น	32
	5.1.2. การกระเทาะ	33
	5.1.3. การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน	33
	5.1.4. กำลัง	36
	5.1.5. โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต	38
	5.1.6. การล้า	39
	5.1.7. กำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม	40
	5.1.8. ความสามารถในการนำความร้อน	40
	5.1.9. ความจุความร้อน	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาฯ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
5	คุณสมบัติของวัสดุเมื่ออุณหภูมิสูง	
	5.2. เหล็ก	45
	5.2.1. การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน	45
	5.2.2. กำลัง	45
	5.2.3. โมดูลัสความยืดหยุ่น	52
	5.2.4. การล้า	54
	5.2.5. ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและความเครียด	54
	5.2.6. กำลังที่คงเหลือ	55
6	การประเมินผลกระทบของโครงสร้างเนื่องจากเพลิงไหม้	
	6.1. ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็น	57
	6.2. การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่เป็นคอนกรีต	60
	6.3. การถ่ายเทความร้อน	60
	6.3.1. พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก	60
	6.3.2. คานคอนกรีตเสริมเหล็ก	60
	6.3.3. เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก	61
	6.4. ชิ้นส่วนรับแรงค้ำ	68
	6.4.1. วิธีการออกแบบชิ้นส่วนรับแรงค้ำ	69
	6.5. คุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิสูง	70
	6.6. ขั้นตอนการวิเคราะห์	72
	6.7. ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารห้างสรรพสินค้าสยามจัสโก้	72

สารบัญ

บทที่	เรื่อง	หน้า
7	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
	7.1. สรุป	83
	7.2. ข้อเสนอแนะ	83
	หนังสืออ้างอิง	
	บรรณานุกรม	
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิในหน้าต่าง	ผก1
	ภาคผนวก ข. กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีต	ผข1
	ภาคผนวก ค. กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีต	ผค1
	ภาคผนวก ง. กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีต	ผง1

สารบัญตาราง

ตารางที่	ชื่อตาราง	หน้า
1.1.	จำนวนอค์กั๊ภัในเขตกรุงเทพมหานครจำแนกตามปีที่เกิดเหตุ พ.ศ.2530-2541	3
2.1.	ลักษณะและสมบัติของวัสดุตีไฟบางชนิด	6
2.2.	สมบัติของเชื้อเพลิงพื้นฐานที่ให้ความร้อน	7
2.3.	ค่าความสามารถในการนำความร้อนของสารบางชนิด	12
6.1.	ตัวคูณลดกำลัง	70
6.2.	ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยืดของเหล็กที่ถูกเพลิงไหม้	73
6.3.	ตารางแสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต จากตัวอย่าง Coring Concrete	74



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
2.1.	รูปแบบการลุกลามของไฟ	6
2.2.	แผนผังแสดงประเภทของวัสดุติดไฟในอาคาร	9
2.3.	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลามาตรฐานไฟ	10
2.4.	การเปรียบเทียบพลังงานที่เท่ากันของการเกิดเพลิงไหม้จริงและกราฟมาตรฐาน	11
2.5.	รูปแบบการถ่ายเทความร้อน	11
2.6.	การเกิดเพลิงไหม้ภายในห้อง	13
2.7.	กราฟมาตรฐานการลุกลามของไฟ	14
3.1.	กราฟมาตรฐานอุณหภูมิกับเวลา	17
3.2.	สมดุลพลังงานในห้องเผา	18
3.3.	ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูปและการลดลงของกำลัง	20
4.1.	ผลกระทบความหนาแน่นของไฟและช่องระบายอากาศที่มีต่ออุณหภูมิ	22
4.2.	อุณหภูมิของไฟที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของภาระของไฟต่อช่องระบายอากาศ	22
4.3.	สมดุลความร้อนในห้องเผาไหม้	23
4.4.	กราฟอุณหภูมิ-เวลาสำหรับความหนาแน่นภาระไฟและช่องเปิดที่แตกต่างกัน	25
4.5.	วิธีการหาความต้องการความต้านทานไฟ	28
4.6.	วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ได้รับความร้อน	29
4.7.	วิธีการต่างๆ สำหรับเตรียมการป้องกันไฟของอาคาร	30
5.1.	องค์ประกอบความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ	34
5.2.	การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมต่างชนิดกัน	35
5.3.	ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำที่แตกต่างกัน	36
5.4.	กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	37
5.5.	สภาพการทดสอบที่มีผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต	38
5.6.	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	39
5.7.	การทดสอบการล้าระยะสั้นด้วยวิธี Preload	40
5.8.	การลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวสำหรับเหล็กชนิดต่างๆ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
5.9.	ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อความนำความร้อนของคอนกรีต	42
5.10.	ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อความจุความร้อนของคอนกรีต	43
5.11.	การพ่นกำลังของคอนกรีตที่ถูกไฟเผาที่อุณหภูมิต่างๆ	44
5.12.	กราฟความเค้น/ความเครียดของเหล็กกล้าละมุน (Mild Steel)	46
5.13.	กราฟความเค้น/ความเครียดของลวดเหล็กอัดแรง	47
5.14.	กำลังประลัยของเหล็กบางชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ	48
5.15.	ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อความเค้นพิสูจน์ของเหล็กรูปพรรณ	49
5.16.	การลดลงของกำลังของลวดเหล็กอัดแรง	50
5.17.	กำลังที่ลดลงของเหล็กเส้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น	51
5.18.	โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กเส้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง	52
5.19.	โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ	53
5.20.	อัตราความล้าสำหรับลวดเหล็กอัดแรงและเหล็กกล้าละมุน	54
5.21.	กราฟความเค้น/ความเครียดสำหรับเหล็กที่อุณหภูมิ 600 °C	55
5.22.	กำลังที่คงเหลือของเหล็กเส้นเมื่อได้รับความร้อน	56
5.23.	กำลังที่คงเหลือของลวดเหล็กอัดแรงเมื่อได้รับความร้อน	56
6.1.	กำลังที่ลดลงของ โครงสร้างเนื่องจากเกิดเพลิงไหม้	59
6.2.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร	61
6.3.	เส้นอุณหภูมิที่เท่ากัน(Isotherm)ของคานที่มีความกว้าง 20 เซนติเมตร	62
6.4.	การกระจายอุณหภูมิในคานกว้าง 20 เซนติเมตร(2 ด้าน)	63
6.5.	การกระจายอุณหภูมิในคานกว้าง 20 เซนติเมตร	64
6.6.	เส้นอุณหภูมิที่เท่ากัน(Isotherm)ของเสาที่มีขนาด 20×20 เซนติเมตร	65
6.7.	การกระจายอุณหภูมิในเสาขนาด 20×20 เซนติเมตร (2 ด้าน)	66
6.8.	การกระจายอุณหภูมิในเสาขนาด 20×20 เซนติเมตร	67
6.9.	ความหนาของพื้นคอนกรีตสำหรับช่วงเวลาความต้านทานไฟต่างๆ	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
6.10.	กราฟการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ	71
6.11.	กราฟการลดลงของกำลังรับแรงดึงของลวดเหล็กอัดแรงที่อุณหภูมิต่างๆ	71
6.12.	แปลนชั้น 3 ห้างสรรพสินค้าสยามจัสโก้ ถนนรัชดาภิเษก กรุงเทพมหานคร	75
6.13.	แปลนโครงสร้าง ห้างสรรพสินค้าสยามจัสโก้	76
6.14.	แปลนโครงสร้างหลังคา ห้างสรรพสินค้าสยามจัสโก้	77
ผ.ก.1.	รูปแสดงการป้อนค่าขนาดของเสาและและจำนวนองค์ประกอบย่อยในหน้าตัด	ผก2
ผ.ก.2.	รูปแสดงการแบ่งประเภทขององค์ประกอบย่อยภายในหน้าตัด	ผก3
ผ.ก.3.	รูปแสดงการป้อนค่าคุณสมบัติของวัสดุ (ในที่นี้วัสดุเป็นคอนกรีต)	ผก4
ผ.ก.4.	รูปแสดงการป้อนค่าคุณสมบัติของผิววัสดุที่ได้รับความร้อน	ผก5
ผ.ก.5.	รูปแสดงการป้อนค่าอุณหภูมิขณะเกิดเพลิงไหม้ในแต่ละช่วงเวลา	ผก6
ผ.ก.6.	รูปแสดงการป้อนข้อมูลคุณสมบัติสำหรับองค์ประกอบย่อยภายในหน้าตัด	ผก7
ผ.ก.7.	รูปแสดงการป้อนข้อมูลคุณสมบัติวัสดุบริเวณผิวที่สัมผัสกับความร้อน	ผก8
ผ.ก.8.	รูปแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์อุณหภูมิภายในหน้าตัด	ผก9
ผ.ก.9.	รูปแสดงค่าอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในหน้าตัดที่ได้จากการวิเคราะห์	ผก10
ผ.ข.1.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง20 เซนติเมตร	ผข2
ผ.ข.2.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง20เซนติเมตร(2ด้าน)	ผข3
ผ.ข.3.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 25เซนติเมตร	ผข4
ผ.ข.4.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง25เซนติเมตร(2ด้าน)	ผข5
ผ.ข.5.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง30 เซนติเมตร	ผข6
ผ.ข.6.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง30 เซนติเมตร(2ด้าน)	ผข7
ผ.ข.7.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง40 เซนติเมตร	ผข8
ผ.ข.8.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง40 เซนติเมตร(2ด้าน)	ผข9
ผ.ค.1.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด20×20เซนติเมตร	ผค2
ผ.ค.2.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด20×20เซนติเมตร(2ด้าน)	ผค3
ผ.ข.3.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด25×25เซนติเมตร	ผค4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	ชื่อรูป	หน้า
ผ.ค.4.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด25×25เซนติเมตร(2ด้าน)	ผค5
ผ.ค.5.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด30×30เซนติเมตร	ผค6
ผ.ค.6.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด30×30เซนติเมตร(2ด้าน)	ผค7
ผ.ค.7.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด40×40เซนติเมตร	ผค8
ผ.ค.8.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด40×40เซนติเมตร(2ด้าน)	ผค9
ผ.ค.9.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด50×50เซนติเมตร	ผค10
ผ.ค.10.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด50×50เซนติเมตร(2ด้าน)	ผค11
ผ.ง.1.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา10เซนติเมตร	ผง2
ผ.ง.2.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา15เซนติเมตร	ผง3
ผ.ง.3.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา20เซนติเมตร	ผง4
ผ.ง.4.	กราฟการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา25เซนติเมตร	ผง5

บทที่ 1

บทนำ

1.1 กล่าวนำ

ในอดีตจนถึงปัจจุบัน การเกิดเพลิงไหม้ในอาคารซึ่งโดยมากเป็นอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ความรุนแรงของเพลิงไหม้นั้นขึ้นอยู่กับสาเหตุหลายประการ อาทิเช่น ชนิดของเชื้อเพลิงที่อยู่ในอาคาร, พื้นที่ของช่องเปิด, ขนาดของห้อง, การนำความร้อนของโครงสร้าง ฯลฯ ซึ่งส่งผลกระทบต่อความมั่นคงและเสถียรภาพของโครงสร้าง ว่ายังใช้งานต่อไปได้หรือไม่ และมีความปลอดภัยเพียงใดเมื่อจะใช้งานในลักษณะเดิม หรือถ้าสัดส่วนความปลอดภัยไม่เพียงพอจะเปลี่ยนสภาพการใช้งานหรือทำการซ่อมบำรุงอย่างไรจึงจะสามารถใช้งานอาคารนั้นได้โดยปลอดภัย

1.2 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในการเกิดเพลิงไหม้แต่ละครั้งนั้น นำมาซึ่งความสูญเสียอย่างใหญ่หลวงแก่ระบบเศรษฐกิจของชาติ เนื่องจากต้องสูญเสียเวลาและทรัพยากรธรรมชาติ ทรัพยากรมนุษย์จำนวนมากกว่าจะได้รับบริการปลูกสร้างขึ้นมา แต่ต้องสูญเสียไปในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งสถิติจำนวนอัคคีภัยในกรุงเทพมหานคร ระหว่างปี พ.ศ. 2530-2541 แสดงในตารางที่ 1.1 ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะวิเคราะห์สภาวะการใช้งานได้ของอาคารหลังถูกเพลิงไหม้ และเนื่องจากวิธีการตรวจสอบในปัจจุบันไม่มีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนตายตัวในการเก็บตัวอย่างทดสอบว่าจะทำการเก็บตัวอย่างอย่างไรในแต่ละจุด มากน้อยเท่าไร รวมทั้งสภาวะการเกิดเพลิงไหม้จริงค่อนข้างหลากหลาย ทั้งความเข้มของปริมาณไฟ, พื้นที่ของช่องเปิด (ช่องระบายอากาศ), ชนิดและขนาดของห้อง, ตำแหน่งที่เกิดเพลิงไหม้ในอาคารแต่ละหลัง เป็นต้น ทางผู้จัดทำจึงเล็งเห็นว่า น่าจะยกตัวอย่างกรณีศึกษาขึ้นมา เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาสภาพการใช้งานได้ของอาคารทั้งหลัง ซึ่งสามารถนำผลการศึกษามาใช้ในการวิเคราะห์อาคารที่เกิดเพลิงไหม้ในลักษณะคล้ายกันได้

1.3 จุดประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อรวบรวมแนวทางการศึกษาความสามารถในการรับน้ำหนักของอาคารหลังถูกเพลิงไหม้โดยวิธีการคำนวณ โดยการพยายามสร้างมาตรฐานซึ่งมีความน่าเชื่อถือและนำไปใช้ได้ขึ้นมาและทำการตรวจสอบโดยการประยุกต์ใช้งานกับกรณีศึกษา
2. เปรียบเทียบว่าวิธีการประเมิน โดยวิธีการคำนวณ และวิธีการทดสอบ โดย Schmidt hammer, Ultrasonic, Coring, และ Static Load Test

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ประเมินสภาพการใช้งานได้ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยเฉพาะ โครงสร้างที่มีความวิกฤติว่าจะใช้งานต่อไปได้หรือไม่โดยการเปรียบเทียบระหว่างการทดสอบจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ว่าทฤษฎีดังกล่าว สามารถนำมาใช้ประเมินสภาวะนั้นๆ ได้หรือไม่ โดยการยกกรณีศึกษา
2. ในการวิจัยจะอ้างอิงถึงข้อมูลในการทดสอบที่ได้จากกรณีศึกษาที่นำมายกตัวอย่างการคำนวณเท่านั้น

1.5 วิธีการศึกษา

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลทั้งด้านกำลังวัสดุหลังจากเผาทดสอบที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆ จากผลการทดสอบที่ผ่านมา
2. ศึกษาทฤษฎีและผลการทดลองของบุคคลและสถาบันต่างๆ เพื่อใช้ประกอบการอ้างอิงความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณ
3. เลือกกรณีศึกษาของอาคารที่ถูกเพลิงไหม้ในอดีตมาคำนวณกำลังของโครงสร้างในส่วนที่มีความวิกฤติ เช่น เสา, คาน, พื้น แล้วเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์โดยวิธี Schmidt hammer, Ultrasonic, Tensile Test, และ Coring โดยอ้างอิงข้อมูลการทดสอบที่ได้ทำมาแล้ว เมื่อทราบเวลา และวัสดุเชื้อเพลิงภายในอาคาร เพราะจากการทราบข้อมูลดังกล่าวจะสามารถคำนวณหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในอาคารได้โดยอาศัยกราฟเส้นโค้งมาตรฐานอุณหภูมิกับเวลา (Standard Temperature Time Curve) ซึ่งจะกล่าวในบทต่อไป
4. สรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 1.1 จำนวนอุบัติเหตุในเขตกรุงเทพมหานคร จำแนกตามปีที่เกิดเหตุ (กองบังคับการตำรวจดับเพลิง สำนักงานตำรวจแห่งชาติ สำนักงานกฤษฎีกา)

พ.ศ.	ขนาด			สาเหตุ			ผู้ต้องหา				ความเสียหาย							
	ผู้เสียชีวิต	ผู้บาดเจ็บ	ทรัพย์สิน	ยานพาหนะ	คน	คน	คน	คน	คน	คน	ประชาชน			เจ้าหน้าที่				
											คน	คน	คน	คน	คน			
2531	554	45	509	884	128	107	0	1393	238	55	1145	300	39	19	105	1	9	14
2532	637	50	587	1662	79	166	2	2012	292	41	1926	196	34	53	23	0	9	0
2533	712	47	665	1827	82	160	0	2297	331	39	2169	522	125	134	18	0	10	13
2534	762	55	707	1781	89	143	0	530	355	39	368	248	33	38	23	0	14	9
2535	790	54	736	2739	86	114	0	590	387	28	375	191	46	19	3	0	12	12
2536	779	61	718	1534	71	108	2	598	385	26	368	400	26	20	26	0	3	11
2537	664	43	621	1552	75	97	3	489	319	28	317	230	25	33	16	0	11	9
2538	565	51	514	1727	52	81	1	431	320	17	228	406	26	20	26	0	3	11
2539	664	49	615	953	81	57	4	522	348	27	289	336	19	25	12	0	5	12
2540	616	43	573	1959	64	63	2	487	342	12	262	867	28	35	112	2	6	1
2541	514	49	465	2104	76	63	2	373	291	25	198	279	30	34	19	0	7	2

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 คำจำกัดความ

ไฟ เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างเชื้อเพลิงรวมตัวกับออกซิเจนอย่างรวดเร็วทำให้มีความร้อนเกิดขึ้น เชื้อเพลิงต้องอยู่ในรูปของก๊าซหรือไอ จึงจะผสมได้กับออกซิเจน และอุณหภูมิต้องสูงถึงระดับที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาลุกไหม้ขึ้น

เชื้อเพลิง (Fuel) เป็นสารใดๆ ที่จ่ายอิเล็กตรอนให้กับออกซิไดเซอร์ (Oxidizer) เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เชื้อเพลิงอาจมีรูปเป็นธาตุ เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน แมกนีเซียม หรืออยู่ในรูปสารประกอบที่จะปล่อยให้ฟลูออรีน ออกซิเจน หรือคลอรีนออกมาอย่างรวดเร็ว เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โพรเพนไฮโดรคาร์บอนไฮโดรคาร์บอน หรือ ตะกั่วออกไซด์ หรือกรดเข้มข้น เช่น กรดไนตริก กรดซัลฟิวริก เป็นต้น (กิตติ อินทรานนท์, 2538)

เชื้อเพลิง (ก๊าซหรือไอ) จะต้องผสมกับอากาศ (ออกซิเจน) ด้วยสัดส่วนที่เหมาะสม จึงจะลุกไหม้ขึ้นได้ ช่วงขีดจำกัดของสัดส่วนนี้เริ่มตั้งแต่ จุดลุกไหม้ล่าง (LFL = Lower Flammability Limit) จนถึง จุดลุกไหม้บน (UFL = Upper Flammability Limit) ซึ่งได้ค่ามาจากอัตราส่วนของเปอร์เซ็นต์ของเชื้อเพลิงโดยปริมาตรต่อเปอร์เซ็นต์ของอากาศโดยปริมาตร ช่วงขีดจำกัด LFL และ UFL นี้ อาจอธิบายให้เห็นได้ชัดเจน จากการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ นั่นคือสัดส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ ถ้ามีอากาศมากเกินไป ก็จะไม่มีการจุดระเบิด ถ้ามีเชื้อเพลิงมากเกินไป น้ำมันจะท่วมคาร์บูเรเตอร์ เป็นต้น

ในบางกรณี ธาตุบางตัวที่คาดว่าจะต้องเป็นเชื้อเพลิงแต่ก็อาจทำหน้าที่เป็นออกซิไดเซอร์ได้ เช่น กำมะถัน ถูกเผาไหม้ได้ในบรรยากาศของออกซิเจนเพื่อไปได้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แต่ไฮโดรเจนที่ถูกเผาพร้อมซัลเฟอร์จะได้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารประกอบตัวนี้จะเป็นเชื้อเพลิงและถูกเผาไหม้ได้ในอากาศ แม้ว่าออกซิเจนจะเป็นตัวออกซิไดเซอร์ที่มีความสำคัญและมีพลังงานมากก็ตาม แต่ก็ต้องจ่ายอิเล็กตรอนในบรรยากาศของฟลูออรีนซึ่งเป็นตัวออกซิไดเซอร์

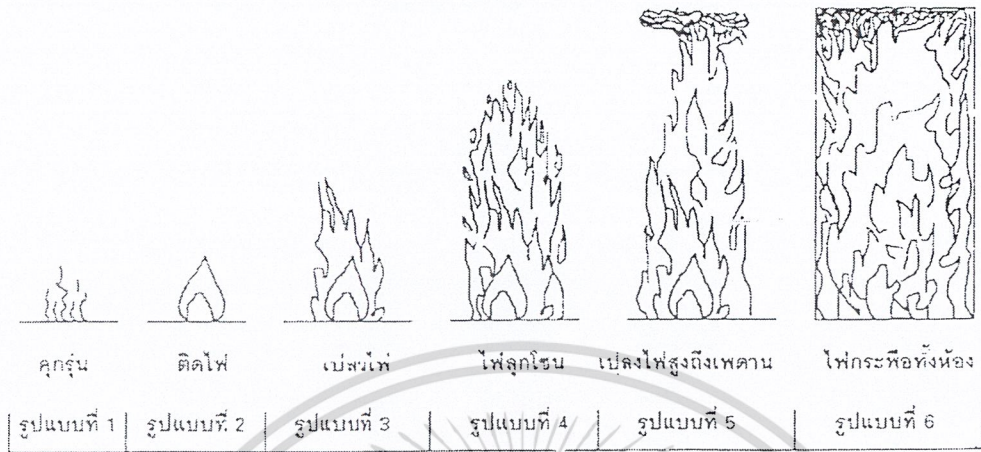
จุดวาบไฟ (Flash Point) เป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่เชื้อเพลิงเหลวจะสามารถกลายสภาพเป็นไอหรือก๊าซ เมื่อของเหลวนั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้นต่อไปจนถึงจุดวาบไฟ จะทำให้มีไอระเหยออกมาอย่างเอกซอร์มิกเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเนื่อง เมื่อมีการจุดไฟให้เกิดขึ้น (จะโดยการเกิดประกายไฟหรือจุดไฟโดยตรงก็ตาม) ก็จะทำให้มีไฟเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อุณหภูมิต่ำสุดที่ทำให้เกิดไฟขึ้นได้อย่างต่อเนื่องนี้เรียกว่า จุดติดไฟ (Fire Point) และเมื่อของเหลวนั้นได้รับความร้อนต่อไปจนเดือดและจะกลายเป็นไอ อุณหภูมิต่ำสุดที่ของเหลวนั้นเดือดเรียกว่า จุดเดือด (Boiling Point) ดังตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะและสมบัติของวัสดุติดไฟ (กิตติ อินทรานนท์, 2538)

จุดติดไฟอัตโนมัติ (Autoignition Point) เป็นค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่ส่วนผสมของไอระเหยจะติดไฟได้เอง โดยไม่อาศัยประกายไฟหรือเปลวไฟจากภายนอก และลุกไหม้ต่อไปโดยไม่ต้องมีความร้อนจากที่อื่นเพิ่มเติม (กิตติ อินทรานนท์, 2538)

การขยายตัวของไฟ ไฟทุกประเภทเริ่มตั้งแต่จุดที่มีประกายไฟเกิดขึ้น และถ้ามีองค์ประกอบครบและสมบูรณ์ ไฟจะขยายตัวเติบโตขึ้นในลักษณะที่จะสามารถทำนายได้ สมมติว่ามีไฟเกิดขึ้นภายในอาคารและมีองค์ประกอบครบและสมบูรณ์ ไฟจะขยายตัวอย่างมีรูปแบบและขั้นตอน ดังรูปที่ 2.1 ดังนี้

- รูปแบบที่ 1 เชื้อเพลิง ออกซิเจน และความร้อนมารวมกันเพื่อจุดไฟให้เกิดเปลว
- รูปแบบที่ 2 กองไฟขยายตัว มีเปลวไฟขึ้นสูงประมาณ 25 ซม.
- รูปแบบที่ 3 กองไฟขยายตัว มีเปลวไฟขึ้นสูงประมาณ 1.4 เมตร ไฟลุกลามอย่างต่อเนื่อง
- รูปแบบที่ 4 กองไฟขยายตัว มีเปลวไฟสูงขึ้นไปเพดานห้องและเริ่มขยายออกข้าง
- รูปแบบที่ 5 กองไฟขยายตัวออกทุกด้านจนทั่วห้อง
- รูปแบบที่ 6 กองไฟขยายตัวออกจากห้องที่เป็นต้นเพลิง และลุกลามไปยังห้องอื่นๆ



รูปที่ 2.1 รูปแบบการลุกลามของไฟ (กิตติ อินทรานนท์, 2538)

ตารางที่ 2.1 ลักษณะและสมบัติของวัสดุติดไฟบางชนิด (กิตติ อินทรานนท์, 2538)

ชนิดของวัสดุ	ความถ่วงจำเพาะ	จุดวาบไฟ (°C)	จุดเดือด (°C)	จุดติดไฟ (°C)	%ส่วนผสมที่จะติดไฟ	
					LFL	UFL
Acetone	0.8	-18	56	521	2.6	12.8
Benzene	0.9	-11	80	561	1.3	7.1
Gasoline 92	0.8		-43	40-200	1.4	7.6
Methyl Alcohol	0.8	12	82	399	2.0	12.0
Vinyl Acetate	0.9	-8	72	427	2.6	13.4
Parafin Was	0.9	199	370	245		
Wood	0.9			193-393		
Aluminium	2.7			500		
Magnesium	1.74			1153		
Potassium	0.86			156		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทองไฟลุลูกกลมมากขึ้นจนเปลวไฟสูงถึงเพดาน และจะเริ่มขยายตัวออกทางด้านข้าง ความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีจะมีมากขึ้น และแผ่ออกไปทุกด้าน ทำให้ฝาผนังของห้องร้อนขึ้น ซึ่งก็จะแผ่รังสีกลับมากที่ทองไฟอีก ทำให้ทองไฟร้อนขึ้นอีก กลับไปกลับมาด้วยความรวดเร็วทำให้อุณหภูมิในห้องเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ไฟเพิ่มพลังทำลายล้างอีกเป็นทวีคูณ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์สะท้อนกลับ (Feedback) ดังนั้นการควบคุมเพลิงไหม้ให้อยู่แต่ในห้องจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนไฟของ โครงสร้าง ฝาผนังกำแพง เพดาน และพื้นของอาคาร

ศักยภาพของเชื้อเพลิง (Fuel Load) เป็นปริมาณของเชื้อเพลิงที่จะมีศักยภาพให้ไฟเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องได้ในบริเวณหนึ่ง หรือในห้องหนึ่งๆ ในการออกแบบระบบป้องกันอัคคีภัยในอาคาร ความรู้เรื่องศักยภาพของเชื้อเพลิงที่มีอยู่เป็นสิ่งจำเป็น เราอาจแบ่งประเภทของเชื้อเพลิงออกเป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ ประเภทมีเส้นใย และประเภทปิโตรเคมี โดยการสมมติว่า วัสดุในกลุ่มเส้นใยมีความสามารถในการให้ความร้อนเท่ากับไม้ที่มีน้ำหนักเท่ากัน ส่วนวัสดุในกลุ่มปิโตรเคมีจะมีศักยภาพในการให้ความร้อนเป็นสองเท่าของวัสดุในกลุ่มเส้นใย

ในการวิเคราะห์ศักยภาพของเชื้อเพลิง ได้มีการกำหนดให้ใช้ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงในหน่วยที่เท่ากับน้ำหนักของไม้คิดเป็นกิโลกรัมต่อพื้นที่เป็นตารางเมตรที่เชื้อเพลิงกองสะสมอยู่

การประเมินพลังงานความร้อนที่วัสดุเชื้อเพลิงจะสร้างขึ้นมาได้ กระทำได้โดยการนำไปเทียบเคียงกับพลังงานความร้อนที่ให้ออกมาเพื่อมีไม้เป็นวัสดุเชื้อเพลิง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งเป็นค่าโดยประมาณเท่านั้น ตัวเลขเหล่านี้ใช้ประโยชน์ในการออกแบบระบบฉีดน้ำอัตโนมัติ

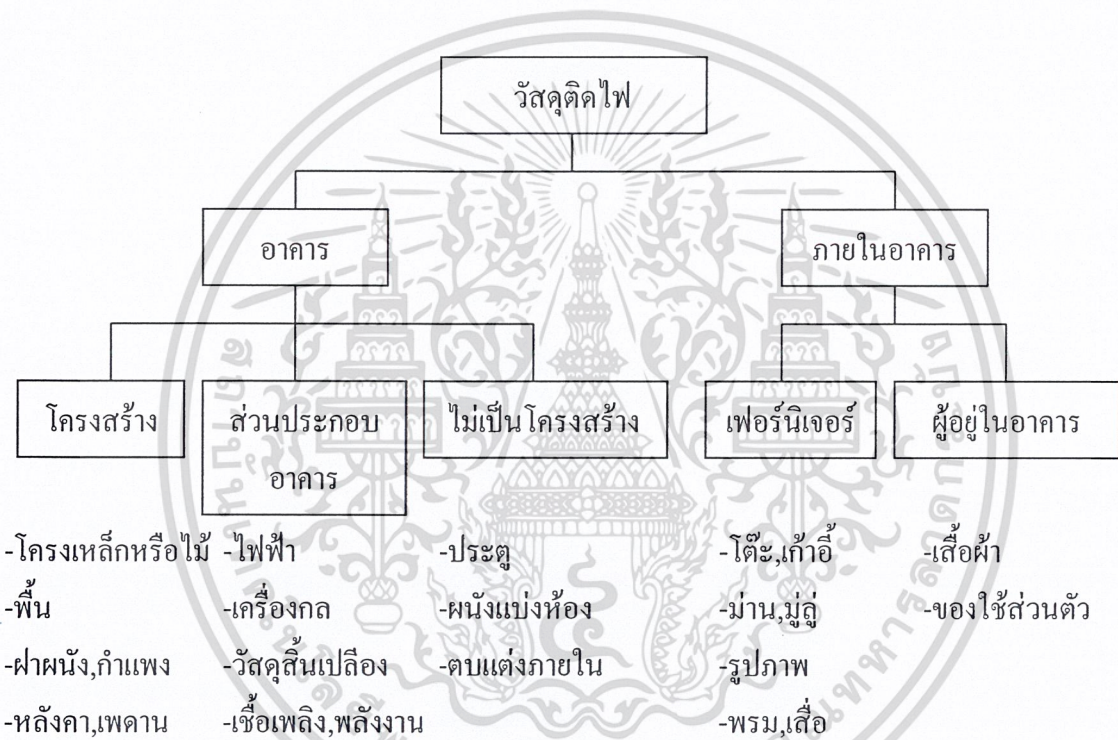
ตารางที่ 2.2 สมบัติของเชื้อเพลิงพื้นฐานที่จะให้ความร้อน (กิตติ อินทรานนท์, 2538)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิง D กิโลกรัม/ตารางเมตร	ศักยภาพที่จะให้ความร้อน $\times 10^6$ กิโลจูล/กิโลกรัม
D < 200	18.6
200 < D < 250	17.7
D > 250	16.7

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ปริมาณเชื้อเพลิงที่มีให้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่าไฟจะ
ถูกลามต่อไปไม่ได้ ถ้าไม่มีเชื้อเพลิงให้ ถ้าเชื้อเพลิงเป็นของแข็งหรือของเหลว ไฟจะไหม้เฉพาะผิวชั้น
นอก และผิวชั้นในถัดไปก็พร้อมที่จะระเหยเป็นไอสำหรับการเผาไหม้ลำดับต่อไป เป็นชั้นๆ ไป เช่นนี้
ความเร็วของการลุกไหม้ย่อมขึ้นอยู่กับความอัดแน่นของเชื้อเพลิง อธิบายว่า ถ้าเราเผากระดาษ 100
แผ่น ที่มีครวมกันอยู่หลวมๆ จะเห็นว่าการลุกไหม้จะเร็วกว่าการเผาหนังสือเย็บเล่มหนา 100 แผ่น ดังนั้น
ขยะมูลฝอยที่กระจัดกระจายอยู่ตามพื้น ย่อมไหม้ไฟหมดเร็วกว่าขยะที่กองสุ่มอัดแน่น

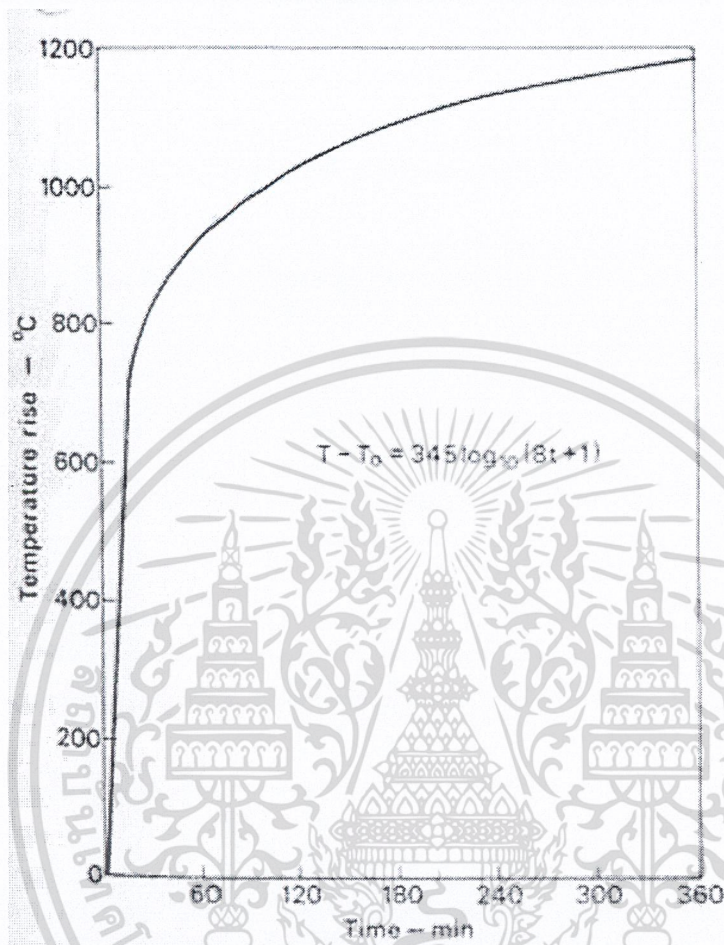
การลุกลามของไฟ ย่อมไปในทิศทางของเปลวไฟ อากาศเมื่อถูกความร้อนจะลอยตัวขึ้น
สู่เบื้องสูง และจะนำเปลวขึ้นไปในทางสูงด้วย หากมีลมแรงพัดกองไฟ จะพัดหรือจะเป่าด้วยอะไรก็ตาม
การลุกลามของเปลวไฟจะลุ่ตามลมไปด้วย ไฟที่เกิดขึ้นในท่อลมเย็นจากเครื่องปรับอากาศหรือท่อ
ระบายอากาศ ก็มักจะเกิดขึ้นโดยวิธีเช่นนี้ ดังนั้น เราจึงอาจกล่าวได้ว่าเราสามารถทำนายได้ว่าไฟจะลุ
กลามไปในทางใด ถ้าเรามีความรู้เรื่องสภาพภายในของอาคารนั้นดีพอ

รูปที่ 2.2 เป็นแผนผังแสดงถึงวัสดุติดไฟได้ในอาคาร เราจำเป็นต้องแยกวัสดุเชื้อ
เพลิงเหล่านี้ออกเป็น 2 กลุ่ม เพื่อประโยชน์ต่อการป้องกันอัคคีภัย กลุ่มแรก เป็นอาคารและส่วนประกอบ
ของอาคาร กลุ่มที่สองรวมเอาเครื่องเฟอร์นิเจอร์ต่างๆ วัสดุอุปกรณ์ของโรงงานและสำนักงาน กลุ่มแรก
จะมีลักษณะตายตัวถาวร ไม่สามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงหรือโยกย้ายได้ หรือทำได้ยากมาก ดังนั้น จึงต้อง
มีการออกแบบและสร้างอย่างถูกต้องมาตั้งแต่เริ่มแรก ซึ่งมีสถาปนิกและวิศวกรเป็นผู้รับผิดชอบ และ
กลุ่มที่สองสามารถโยกย้ายหรือปรับปรุง เปลี่ยนแปลงรูปทรงพื้นฐานได้ ซึ่งอยู่ภายใต้การควบคุมของฝ่าย
จัดการของผู้ใช้อาคาร ดังนั้นจึงเป็นความจำเป็นอย่างยิ่งที่สถาปนิก วิศวกร และฝ่ายจัดการผู้ใช้อาคาร จะ
ต้องได้รับข้อมูลและข้อเท็จจริงว่า การจัดให้มีวัสดุติดไฟอยู่รวมกันมากๆ จะทำให้อาคารนั้นมีความเป็น
ไปได้ค่อนข้างสูงที่จะถูกทำลายโดยอัคคีภัย



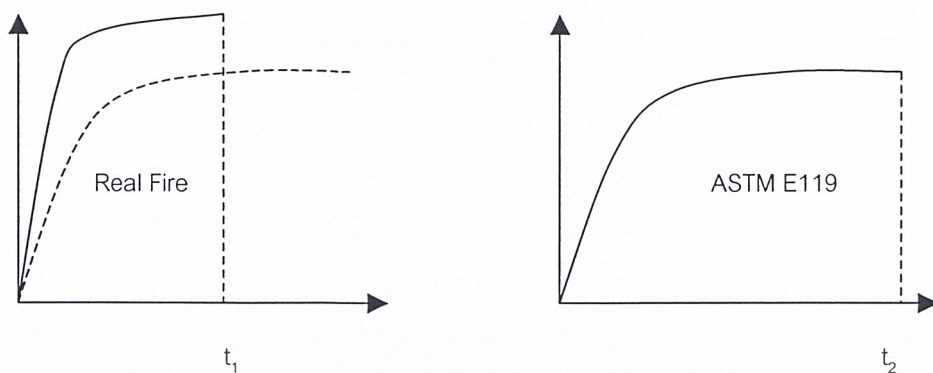
รูปที่ 2.2 แผนผังแสดงประเภทของวัสดุติดไฟได้ในอาคาร (กิตติ อินทรานนท์, 2538)

ASTM E119 ได้เสนอเส้นโค้งมาตรฐานอุณหภูมิกับเวลาที่มีความเข้มของปริมาณไฟ
ใกล้เคียงกับไฟที่เกิดขึ้นจริงในอาคาร แสดงดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลามาตรฐานไฟ (ASTM E119)

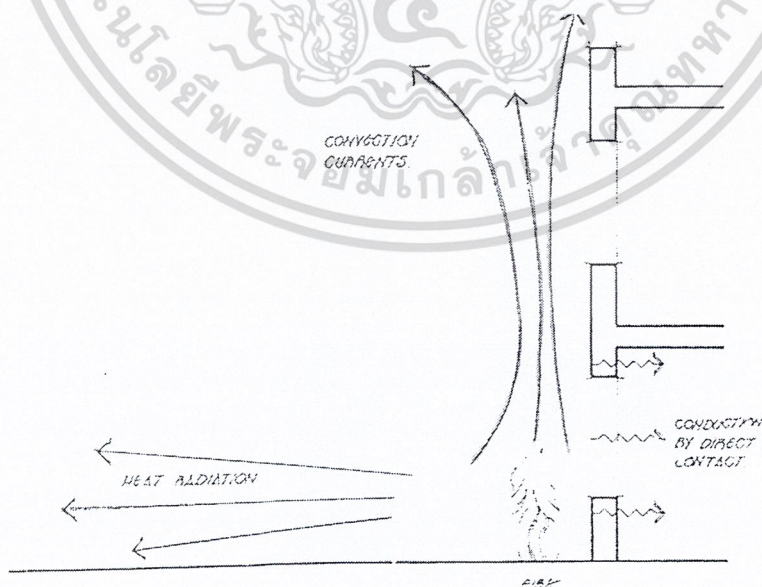
ความรุนแรงของไฟก็คือ พื้นที่ใต้เส้นโค้งอุณหภูมิกับเวลา เนื่องจากเส้นโค้งอุณหภูมิกับเวลาของไฟที่เกิดขึ้นจริงๆ นั้น จะมีลักษณะแบบหนึ่งที่แตกต่างกันจากเส้นโค้งมาตรฐานของอุณหภูมิกับเวลาของ ASTM ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปของมาตรฐานได้ โดยการกำหนดให้พื้นที่ใต้เส้นโค้งมาตรฐานมีค่าเท่ากับเส้นโค้งของไฟจริงๆ นั่นก็คือ อาศัยหลักของพลังงานนั่นเอง ยกตัวอย่างการแปลงดังรูป 2.4 ทางซ้ายมือจะแสดงถึงลักษณะไฟที่เกิดขึ้นจริงซึ่งมีช่วงเวลาการเผาไหม้เป็น t_1 และจากรูปทางขวามือจะแสดงความรุนแรงของไฟภายใต้เส้นโค้งมาตรฐาน ASTM ซึ่งจะใช้เวลาในการเผาไหม้นานกว่าเป็นเวลาเท่ากับ t_2 (พรพล ไทรทอง และ พรศักดิ์ ตั้งคำ, 2543)



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบพลังงานที่เท่ากันของการเกิดเพลิงไหม้จริงและกราฟมาตรฐาน ASTM E119 (พรพล ไทรทอง และ พรศักดิ์ ตั้งคำ, 2543)

2.2 การแผ่กระจายของไฟ

การแผ่ความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ การนำความร้อน (Conduction) , การพาความร้อน (Convection) , และ การแผ่รังสี (Radiation) โดยการแผ่ความร้อนทั้ง 3 ชนิด จะเกิดตลอดเวลาระหว่างการเกิดเพลิงไหม้ การนำความร้อน คือ ลักษณะการแผ่ความร้อนในของแข็ง การพาความร้อน คือ การแผ่ความร้อนในของเหลวและก๊าซ การแผ่รังสี คือ การแผ่ความร้อนที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการนำความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



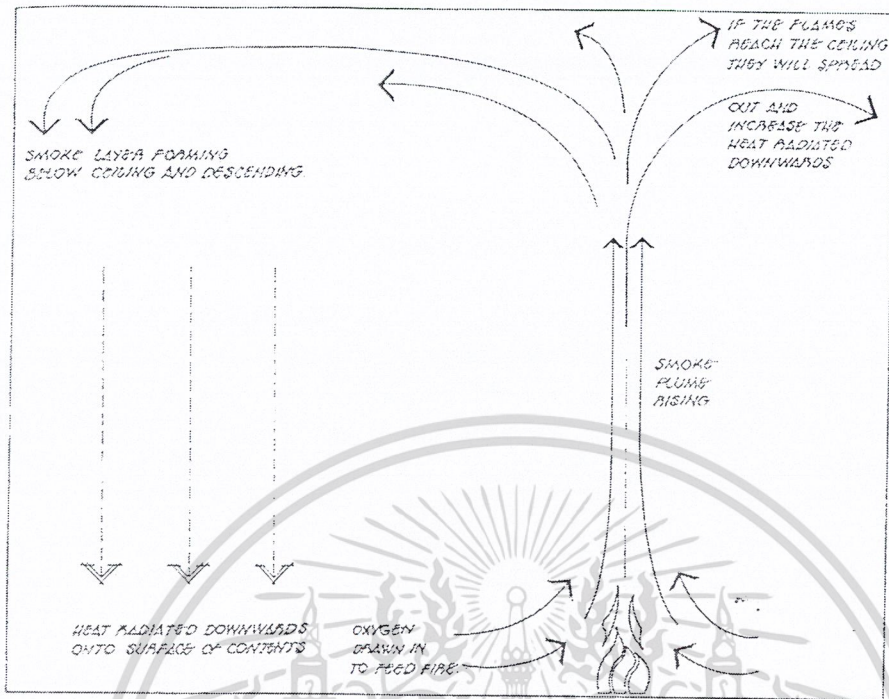
รูปที่ 2.5 รูปแบบการถ่ายเทความร้อน (Stollard and Abrahams, 1995)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงความสามารถในการนำความร้อนของสารบางชนิด (พรพล ไทรทองและพรศักดิ์ ตั้งคำ, 2543)

ชนิดวัสดุ	การนำความร้อน $J/m^{\circ}C$
ทองแดง	0.92
อลูมิเนียม	0.50
ทองเหลือง	0.26
เหล็ก	0.11
ตะกั่ว	0.80
หินทราย	0.0055
คอนกรีต	0.0022
แก้ว	0.002
อิฐ	0.0015
ซีเมนต์	0.007
กระดาษ	0.0003
ไม้	0.0003
ใยหิน	0.00019

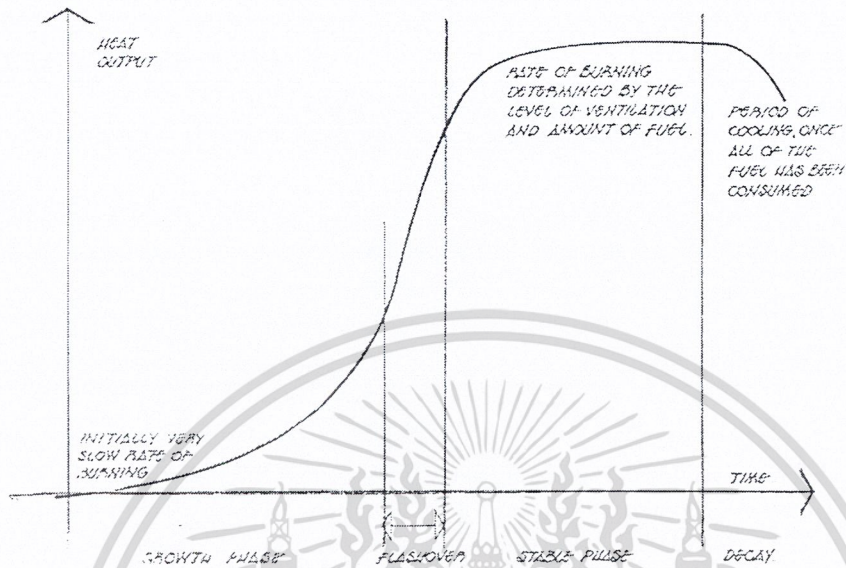
พฤติกรรมและอัตราการเผาไหม้ของไฟบริเวณที่จำกัดต่างจากอัตราการเผาไหม้ในบริเวณที่ไม่จำกัด การเกิดเพลิงไหม้ในบริเวณปิดแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเกิดเพลิงไหม้ภายในห้อง(Stollard and Abrahams,1995)

บริเวณเพดานที่อยู่เหนือบริเวณเพลิงไหม้ จะเป็นตัวสะท้อนรังสีความร้อนกลับไปยังผิวของเชื้อเพลิง และผนังก็จะส่งผลเช่นเดียวกับกำแพง เส้นโค้งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไฟกับเวลาเรียกว่า โค้งการแพร่กระจายไฟ (Fire Growth Curve) ซึ่งแสดงถึงสภาพของเพลิงไหม้

เริ่มแรกไอที่ได้จากเชื้อเพลิงจะถูกเผาไหม้ในบริเวณผิวของวัสดุที่เป็นต้นกำเนิด โดยปกติช่องลมจะให้ออกซิเจนที่เพียงพอสำหรับการเผาไหม้ และอัตราการเผาไหม้จะถูกควบคุมโดยพื้นที่ผิวของวัสดุเชื้อเพลิง ช่วงเวลาการแพร่กระจายไฟขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แต่จุดที่สำคัญที่สุดจะเกิดเมื่อไฟลามไปถึงเพดาน ซึ่งไฟจะกระจายทั่วทั้งเพดาน เป็นผลให้พื้นที่ของเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นอย่างมาก ดังนั้นความร้อนที่แผ่มาจากเชื้อเพลิงก็จะมากขึ้นด้วย สถานะเช่นนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเพดานมีค่าเท่ากับ 550°C ช่วงเวลาที่เกิดอย่างรวดเร็ว วัสดุที่สามารถติดไฟได้จะติดไฟภายในเวลา 3-4 วินาที ช่วงนี้เรียกว่า Flash Over และหลังจากช่วงเวลานี้จะเป็นช่วงที่เชื้อเพลิงอยู่ในสถานะคงที่ (Steady Phase) การแบ่งการลุกลามของไฟ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟมาตรฐานการลุกไหม้ของไฟ (Stollard and Abrahams, 1995)

2.3 คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีลักษณะเหมือนหิน ทำจากส่วนผสม ซีเมนต์, น้ำ, มวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบ เราสามารถทดสอบคอนกรีตสดที่ยังเหลืออยู่ลงในแบบ ซึ่งเมื่อคอนกรีตแข็งตัวก็จะต้องก่ออาคารในรูปแบบต่างๆ ได้ตามต้องการ คอนกรีตเมื่อแข็งตัวแล้ว จะแข็งแรงมากในการรับแรงอัด แต่จะรับแรงดึงได้น้อย ซึ่งเกิดการแตกร้าวได้ง่าย คอนกรีตที่ไม่ได้เสริมเหล็กจะเปราะ ไม่สามารถยืดหรือหดตัวได้มากภายใต้แรงกระทำ จึงวิบัติอย่างรวดเร็วโดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า การเสริมเหล็กจะช่วยลดข้อบกพร่องของคอนกรีตในเรื่องการแตกร้าวและความเปราะ แม้ว่าเหล็กจะแข็งแรงและแกร่ง แต่ก็ยังมีจุดอ่อนหลายจุดที่สามารถกำจัดหรือลดลงไปได้เมื่อถูกหุ้มด้วยเนื้อคอนกรีต คอนกรีตที่หุ้มเหล็กจะป้องกันเหล็กจากการกัดกร่อน โดยความชื้นหรือน้ำเกลือ ภายใต้อุณหภูมิที่สูงกว่า 650 °C กำลังรับแรงดึงของเหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เนื่องจากคอนกรีตเป็นฉนวนที่ดี เหล็กที่ถูกคอนกรีตหุ้มจะยังคงรับกำลังดึงได้ดี ภายใต้ความร้อนหลายชั่วโมง ดังนั้นจะกล่าวได้ว่าทั้งเหล็กและคอนกรีตช่วยกันปรับปรุงคุณสมบัติซึ่งกันและกันได้เป็นอย่างดี

เมื่อเหล็กเสริมถูกยึดเหนี่ยวอย่างแข็งแรงในเนื้อคอนกรีต เราจะได้วัสดุโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและยึดหยุ่น วัสดุเชิงประกอบนี้เรียกว่า “คอนกรีตเสริมเหล็ก” มีการใช้คอนกรีตเสริมเหล็กอย่างแพร่หลาย ข้อเสียอีกอย่างของคอนกรีตที่ยังคงอยู่แม้เสริมเหล็กแล้วก็ตาม ได้แก่ การหดตัว (Shrinkage), การคืบ (Creep) แต่ข้อเสียเหล่านี้แก้ไขได้โดยการออกแบบอย่างระมัดระวัง (ศรีกรีช หิรัญ-มาศ, 2544)

2.4 วิธีการทดสอบ

ในปัจจุบันมีวิธีการทดสอบหลายวิธีได้แก่

1. จากป็นยิงคอนกรีต (Shmidt hammer Test) สามารถทดสอบได้กับทุกโครงสร้าง ไม่ว่าจะเป็นพื้น, คาน, เสา, ฐานรากที่เป็นคอนกรีต แต่ต้องพึงระลึกเสมอว่า ค่ากำลังที่ได้จากการทดสอบนี้จะมีค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการยิงทดสอบที่ผิวคอนกรีตเท่านั้น
2. วัดความเร็วคลื่น (Ultrasonic Pulse Velocity Test) เรียกเครื่องมือที่ใช้ทดสอบว่า Pundit ใช้ในการทดสอบโครงสร้างคอนกรีต แต่เนื่องจากเครื่องมือมีราคาแพง และใช้ในหน้างานลำบาก จึงไม่นิยมใช้กันมากเท่ากับป็นยิงคอนกรีต
3. การเจาะคอนกรีตทดสอบ (Coring) โดยใช้เครื่องเจาะ เจาะบริเวณที่จะตรวจสอบโดยมากจะเป็นพื้นหรือคาน ซึ่งตัวอย่างที่ได้ต้องนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการต่อไป
4. การตัดเหล็กไปทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เพื่อหาค่ากำลังรับแรงดึงคลาก (Yield Strength) และกำลังดึงประลัย (Ultimate Strength) และค่าเปอร์เซ็นต์การยืดหดตัว (Elongation)
5. การเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปหาค่ากำลังการยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากการเก็บตัวอย่างทำได้ลำบาก

บทที่ 3

การกำหนดความต้านทานไฟ

วิธีการสำหรับกำหนดความสามารถด้านทานไฟจะได้จากการเอาตัวอย่างการก่อสร้างมาให้ความร้อนโดยมีสภาวะใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง แต่การสมมติดังกล่าวจะเป็นไปได้ยากสำหรับใช้ในการก่อสร้างจริง ช่วงเวลาของการวัดและการสังเกตจะถูกกำหนดมาเพื่อตรวจสอบการก่อสร้างให้ตรงกับลักษณะการใช้งานอาคาร มาตรฐานจะประกอบไปด้วยข้อกำหนดสำหรับความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและเวลามาตรฐาน, ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับตัวอย่าง, วิธีการตรวจสอบ ควบคุม, วิธีการวัด

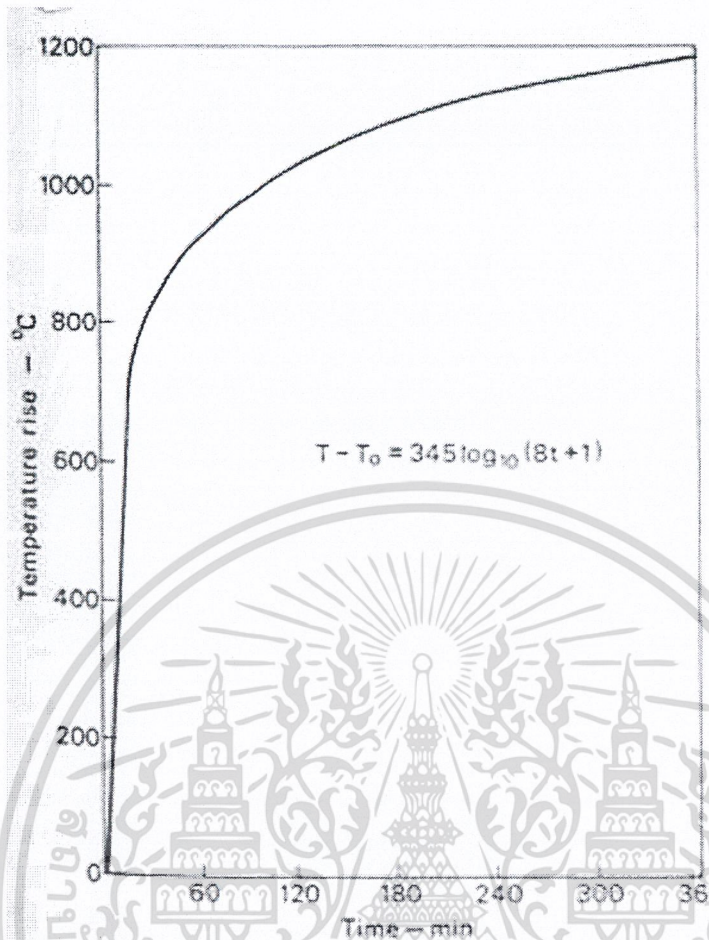
จุดประสงค์สำหรับการทดสอบการต้านทานไฟเบื้องต้นแบ่งออกเป็น 3 จุดประสงค์ คือ

1. สามารถระบุความต้านทานไฟสำหรับการก่อสร้างแต่ละลักษณะ
2. ช่วยในการพัฒนาวัสดุ
3. เพื่อกำหนดตัวแปรสำหรับทำนายพฤติกรรมโดยการควบคุมการทดสอบ

ผลการทดสอบความต้านทานไฟจะแสดงในหน่วยของเวลาและจำเป็นต้องเข้าใจว่าเวลาดังกล่าวไม่สอดคล้องกับเวลาของเพลิงไหม้จริง ซึ่งจะถูกกำหนดจากสภาพรายละเอียดของการก่อสร้าง ยกตัวอย่างเช่น จะเป็นการเข้าใจผิดหากจะสมมติว่าการก่อสร้างซึ่งมีการทดสอบความต้านทานไฟ 60 นาที จะเท่ากับเวลาเกิดเพลิงไหม้จริง เพราะสภาพของไฟไหม้จริงไม่สามารถบอกความแน่นอนได้

3.1 สภาวะการให้ความร้อน (Heating Environment)

สภาวะการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโครงสร้างจะถูกออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยการควบคุมเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเผาไหม้เพื่อที่จะสร้างสภาวะให้ตรงกับมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลา กราฟและสมการทางคณิตศาสตร์สามารถแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 3.1 แสดงกราฟมาตรฐานอุณหภูมิกับเวลาตามมาตรฐาน (BS476, Part8)

สมการคือ

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1) \tag{3.1}$$

เมื่อ

- T คือ อุณหภูมิของห้องเผาที่เวลา t (°C)
- T₀ คือ อุณหภูมิของห้องเผาขณะเริ่มต้น (นาท)
- t คือ เวลาของการทดสอบ (นาท)

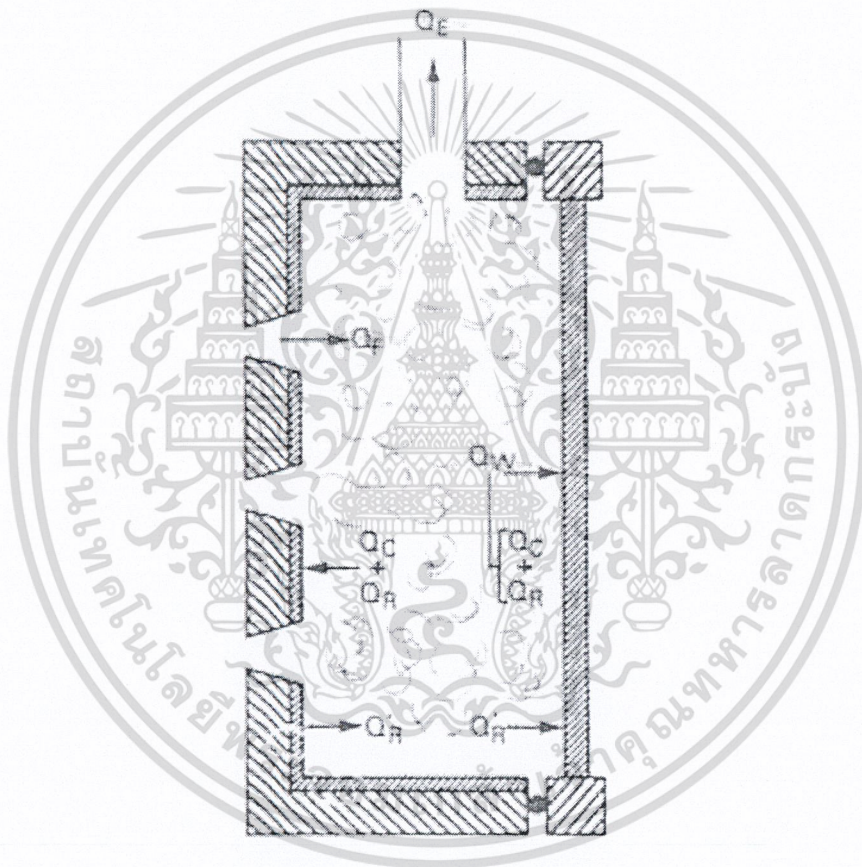
จากการศึกษาของ Castle แสดงให้เห็นว่าหากเผาตัวอย่าง 3 ตัวอย่างโดยเผาในเตาเผาละ ตัวอย่างแม้จะควบคุมอุณหภูมิในเตาเผาให้เท่ากัน แต่การรับความร้อนของตัวอย่างแตกต่างกัน เพราะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกระจายความร้อนของแต่ละเตาเผาแตกต่างกัน อาจเป็นเพราะชนิดของเชื้อเพลิง, ตำแหน่งของหัวเผา, ลักษณะผนังของเตาเผา

หากสมดุลของพลังงานความร้อนในห้องเผาสามารถแสดงออกมาในรูปอย่างง่าย (รูปที่ 3.2)จะเห็นได้ว่า

DETERMINATION OF FIRE RESISTANCE



รูปที่ 3.2 สมดุลพลังงานในห้องเผา (Malhotra, 1982)

$$Q_f = Q_E + Q_w \tag{3.2}$$

โดย

Q_f คือ พลังงานความร้อนทั้งหมดที่ได้มาจากเชื้อเพลิง

Q_E คือ พลังงานความร้อนที่สูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q_w คือ พลังงานความร้อนที่ตัวอย่างและผนังได้รับ

Q_w ประกอบด้วยการพาและการแผ่รังสีความร้อน ($Q_c + Q_r$) ถ้าผนังของห้องเผาไหม้ใช้วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนต่ำ ก็ไม่ต้องการความร้อนมากในการเพิ่มความร้อนในห้องเผาไหม้เท่ากับอุณหภูมิของก๊าซ ดังนั้นตัวอย่างจะมีอุณหภูมิมืดที่สูงเท่ากับอุณหภูมิของห้องเผา

3.2 เกณฑ์ในการปฏิบัติ (Performance Criteria)

เกณฑ์ในการตัดสินใจการทำการก่อสร้างจะเกี่ยวข้องกับพื้นฐานของการป้องกันไฟและการควบคุมการแพร่กระจายของไฟ โดยกำแพงป้องกันไฟ (Barrier) หรือการแบ่งห้อง (Compartment) ออกเป็นส่วนๆ ตัวอย่างของกำแพงป้องกันไฟได้แก่ ผนัง, ประตู ซึ่งจะช่วยป้องกันการแพร่กระจายของไฟหรือก๊าซร้อนและช่วยกักความร้อนที่จะถ่ายเทไปยังผนังด้านตรงข้าม เพื่อป้องกันการติดไฟของวัสดุในห้องดังกล่าว รูปแบบของรอยร้าวและช่องเปิดสำหรับการแพร่กระจายของก๊าซร้อนจะถูกกำหนดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของด้านตรงข้าม ลักษณะการเกิดเช่นนี้ จะมีการแบ่งเป็นเกณฑ์ต่างๆ และจะมีชื่อเรียกต่างๆ กัน ได้แก่ เสถียรภาพ (Stability), ความมั่นคง(Integrity),ความเป็นฉนวน (Insulation) ซึ่งสามารถแสดงหลักการของเกณฑ์ต่างๆ ได้ดังนี้

เสถียรภาพ (Stability) ข้อกำหนดของระดับนี้ จะสิ้นสุดสถานะนี้เมื่อตัวอย่างพังหรือเกิดการแอ่นตัวที่ไม่อาจรับได้

ความมั่นคง (Integrity) ข้อกำหนดของระดับนี้จะสิ้นสุดสถานะเมื่อเกิดรอยร้าวหรือช่องเปิดซึ่งไฟหรือก๊าซร้อนสามารถแพร่ผ่านองค์ประกอบดังกล่าวแล้วทำให้เกิดการลุกไหม้ของวัสดุในห้องถัดไป

ความเป็นฉนวน (Insulation) ข้อกำหนดของระดับนี้จะสิ้นสุดสถานะเมื่อความร้อนสามารถถ่ายเทผ่านชิ้นส่วนการก่อสร้างและทำให้อุณหภูมิของด้านตรงกันข้ามสูงจนอยู่ในขั้นที่ไม่ปลอดภัย คือสามารถทำให้วัสดุที่อยู่ติดกับกำแพงห้องถัดไปติดไฟได้

ข้อจำกัดของแต่ละสภาวะจะให้ค่าจำกัดความได้ดังนี้

1. เสถียรภาพ (Stability) ขึ้นส่วนวิบัติหรือเกิดการแอ่นตัวเกินกว่า $L/30$ เมื่อความยาวคานเท่ากับ L
2. ความมั่นคง (Integrity) เมื่อลำลีสสามารถติดไฟได้ใน 10 วินาที เมื่อวางลำลิไว้บริเวณรอยร้าว
3. ความเป็นฉนวน (Insulation) อุณหภูมิของผนังฝั่งตรงข้ามมากกว่า 140 องศาเซลเซียสโดยเฉลี่ยหรือมากกว่า 180 องศาเซลเซียส ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่งของกำแพง

จุดประสงค์ของการจำกัดการแอ่นตัวก็เพื่อป้องกันการเกิดการพังทลายอย่างแท้จริง หากการแอ่นตัวถึงข้อกำหนดนี้ โครงสร้างจะไม่สามารถใช้งานต่อได้อีก (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนรูป(Deformation) และการลดลงของกำลัง (Strength Reduction) สำหรับคานช่วงเดี่ยว (Simple Beam) (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ความสามารถในการต้านทานไฟ และความรุนแรงของไฟ (Fire Resistance and Fire Severity)

4.1 การวิจัยที่ผ่านมา (Recent Work)

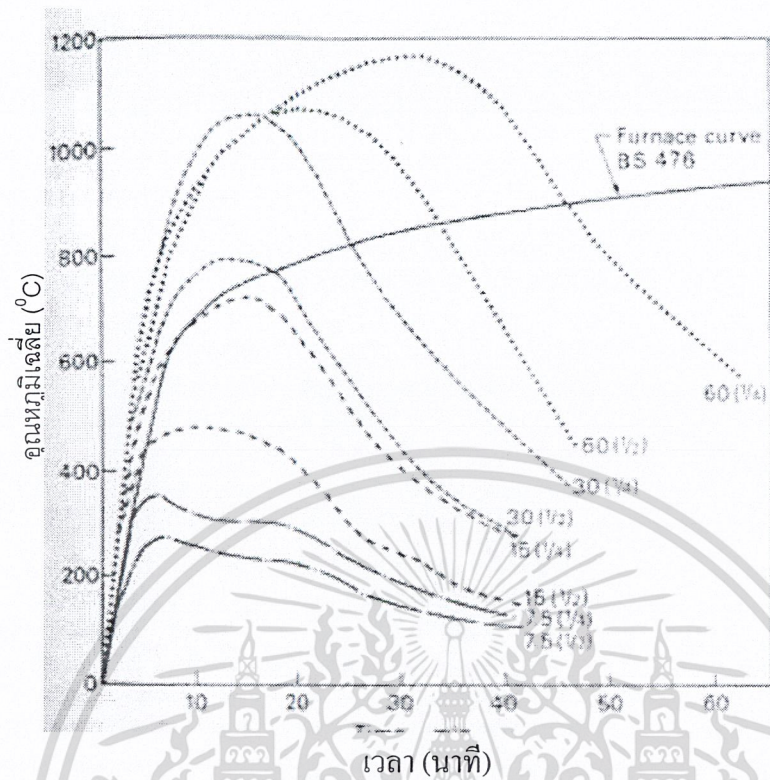
ความสนใจที่จะทราบพฤติกรรมของไฟในอาคารเริ่มขึ้นเมื่อทศวรรษที่ 50 โดยเริ่มจาก Fujita พยายามจะแสดงการจำลองสภาพความรุนแรงของไฟ ต่อมา Kawagoe และ Sekine พัฒนากระบวนการเชิงตัวเลขคำนวณ (Numerical Calculation) สำหรับสมมูลของความร้อน Kawage แสดงผลกระทบเนื่องจากช่องระบายอากาศ (Ventilation) เช่น พื้นที่และความสูงของช่องเปิด ซึ่งทำให้อากาศไหลเข้ามาเผาไหม้และทำให้กระบวนการการเผาไหม้เกิดอย่างต่อเนื่อง อัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของช่องเปิด A_v และรากที่สองของความสูงของช่องเปิด ($\sqrt{H_v}$) และแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะ $A_v \sqrt{H_v}$

จากการทดลองในทศวรรษที่ 60 ของ Butcher et al โดยการก่อกองไฟเป็นห้อง ขนาด 3.7x7.7x3 ม. ซึ่งควบคุมช่องระบายอากาศ และผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.1 แสดงผลกระทบอย่างชัดเจนของช่องระบายอากาศต่อความรุนแรงของไฟ กราฟดังกล่าวแสดงอุณหภูมิเฉลี่ยของก๊าซบริเวณเพดาน โดยจำนวนของ Fire Load 7.5, 15, 30, 60 Kg/m² และช่องระบายอากาศ 2 ช่อง โดยมีพื้นที่ 25% และ 50% ของพื้นที่ผนังด้านหนึ่ง ซึ่งช่องระบายอากาศมีความสูง 1.8 m. ซึ่งการทดลองแสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อการลุกไหม้ของไฟอย่างสมบูรณ์

Helldam และ Law แสดงให้เห็นว่าตัวแปรของอัตราการเผาไหม้และอุณหภูมิขึ้นอยู่กับช่องระบายอากาศ, ขนาดและรูปร่างของห้อง และความหนาแน่นของเชื้อเพลิง จากการศึกษาของเขาสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับขนาดของห้องและช่องเปิดได้

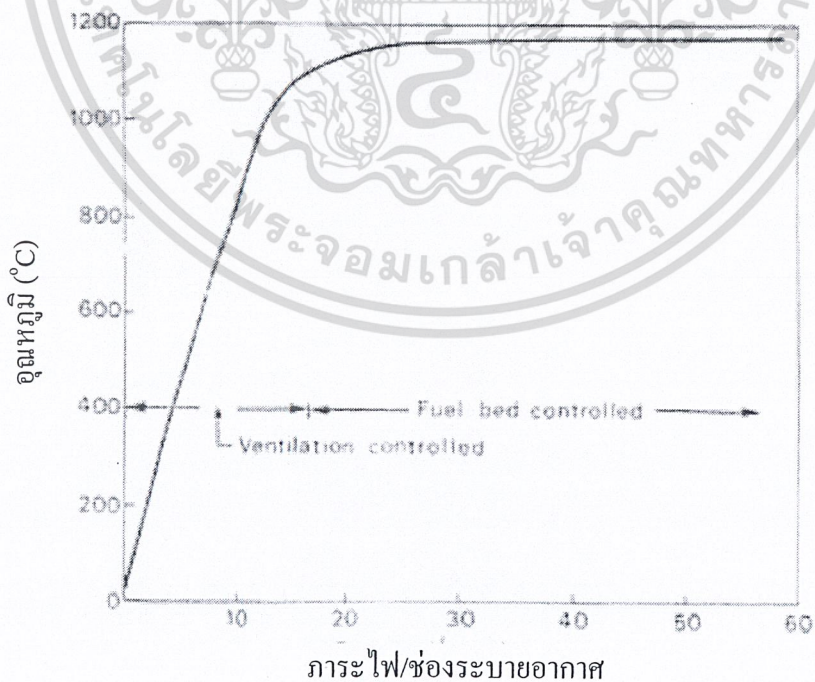
Thomas et al เป็นคนแรกที่สังเกตลักษณะของไฟมีลักษณะเป็น 2 แบบ ซึ่งอยู่ในห้อง (Compartment) คือ หากช่องระบายอากาศเล็ก อัตราการไหม้ขึ้นอยู่กับปริมาณของอากาศ หากช่องระบายอากาศขนาดใหญ่ อัตราการไหม้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 2.1 จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



60(1/2) หมายถึงภาระไฟ 60 kg/m^2 และช่องระบายอากาศ 50% ของผนังห้อง

รูปที่ 4.1 ผลกระทบความหนาแน่นของไฟและช่องระบายอากาศที่มีต่ออุณหภูมิ (Malhotra, 1982)



รูปที่ 4.2 อุณหภูมิของไฟที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของภาระไฟ/ช่องระบายอากาศ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในลักษณะของช่องระบายอากาศควบคุมอัตราการเผาไหม้ อัตราการเผาไหม้ (R) จะประมาณ $0.1A_v H_v$ kg/sec ต่อมา Law ได้ใช้ข้อมูลดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์และพัฒนามาเป็นหลักการของความต้านทานไฟที่เทียบเท่า (Equivalent fire Resistance) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการข้างล่าง

$$t_e = \frac{N}{A_F} \times \frac{A_F}{(A_V(A_t - A_V))} \quad (4.1)$$

โดยที่

t_e = ความต้านทานไฟที่เทียบเท่า (Equivalent fire Resistance) (นาที)

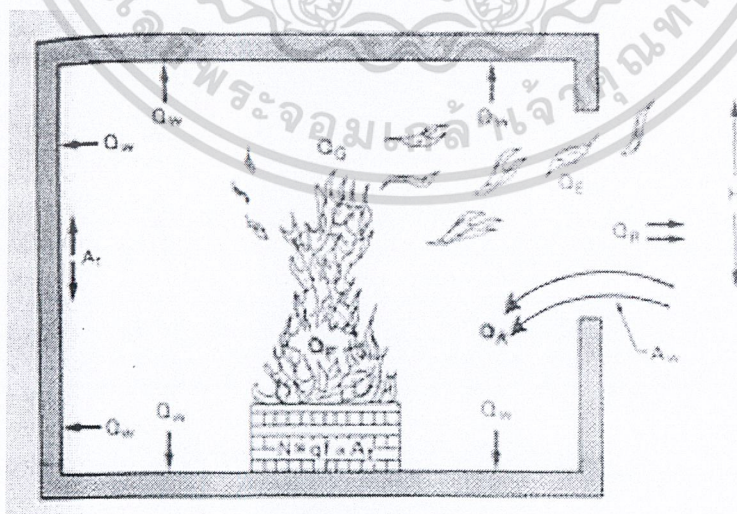
N = ความหนาแน่นของไฟ (MJ/m²)

A_v = พื้นที่ของช่องระบายอากาศ (m²)

A_t = พื้นที่ผิวของห้องปิด (m²)

A_F = พื้นที่ของห้องเปิด (m²)

ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงจะแสดงเป็นน้ำหนักของวัสดุจำพวกไม้หรือเส้นใย ซึ่งทำให้เกิดความร้อน 16-18 kJ/kg จากการทดลองได้กำหนดสมดุลของความร้อนในห้อง (Compartment) สำหรับการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ และพบว่ามีตัวแปรต่างๆ ที่สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ได้ สมดุลของความร้อนแสดงดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความร้อนจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และความร้อนที่สูญเสียไปกับผนังและควันไฟ



รูปที่ 4.3 สมดุลความร้อนในห้องเผาไหม้ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q_F + Q_A = Q_G + Q_W + Q_E + Q_R \quad (4.2)$$

โดยที่

Q_F = ความร้อนจากการเผาไหม้

Q_A = ความร้อนจากอากาศที่ผ่านเข้ามา

Q_G = ความร้อนที่สูญเสียเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศ

Q_W = ความร้อนที่ถ่ายเทสู่ผนัง, พื้น, เพดาน

Q_E = ความร้อนของควัน

Q_D = ความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสีออกทางช่องระบายอากาศ

Odeen แสดงอัตราการเผาไหม้มีความสัมพันธ์กับตัวแปรของช่องเปิด (Opening Factor) คือ

$$\frac{A_V \sqrt{H_V}}{A_t} \quad (4.3)$$

โดยที่ A_V คือ พื้นที่ของหน้าต่าง (m^2), H_V คือ ความสูงของหน้าต่าง (m), A_t คือ พื้นที่ผิวของห้อง (Compartment) (m^2)

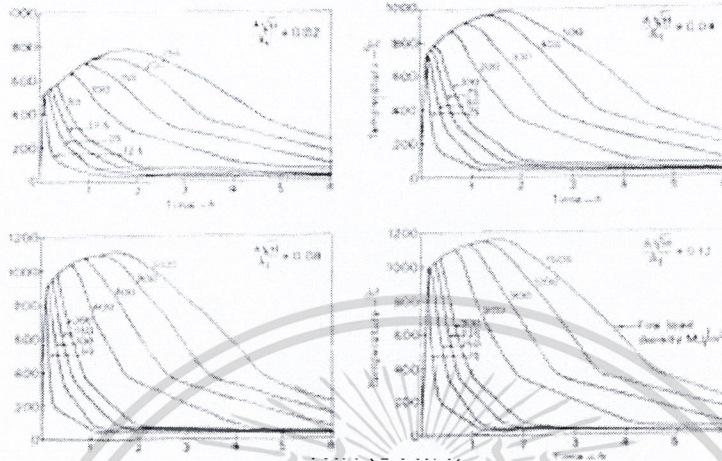
Magnesson และ Thelonderson ใช้ความสัมพันธ์ดังกล่าวสร้างกราฟอุณหภูมิ/เวลา สำหรับช่องระบายอากาศและความหนาแน่นของเชื้อเพลิงที่แตกต่างกัน แสดงในรูปที่ 4.4 Petterson ได้ใช้ความรู้ดังกล่าว และสร้างความสัมพันธ์ความต้านทานไฟที่เทียบเท่า (Equivalent Fire Resistance) โดยอาศัยความสัมพันธ์ ซึ่งเอามาพิจารณาสำหรับขอบเขตของความร้อนทั่วไป

$$t_e = \frac{0.28N}{(A_t A_V \sqrt{H_V})^{\frac{1}{2}}} \quad (4.4)$$

ภาระของไฟ (Fire Load) แสดงในรูปของความหนาแน่น $q_f = N/A_t$ ดังนั้น ความสัมพันธ์ข้างต้นจะแสดงได้ดังนี้

$$t_e = 0.067 q_f \left[\frac{A_t}{A_V \sqrt{H_V}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

$$t_e = \frac{0.057q_f A_t}{\sqrt{A_v(A_t - A_v)}} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4.4 กราฟอุณหภูมิ/เวลาสำหรับความหนาแน่นภาระไฟและช่องเปิดที่แตกต่างกัน (Malhotra, 1982)

4.2 ปัจจัยที่มีผลกับความรุนแรงของไฟ

จากการทดลองแสดงให้เห็นถึงตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวที่มีผลกระทบต่อความรุนแรงของไฟในห้อง (Compartment) คือ

1. ภาระของไฟ (Fire Load)
2. ช่องระบายอากาศ (Ventilation) ประกอบด้วย พื้นที่ช่องเปิด ความสูง และตำแหน่งของช่องเปิด
3. ห้อง (Compartment) ประกอบด้วย ขนาดของผนังและพื้น รูปร่าง และลักษณะของการนำความร้อน

4.2.1 ภาระของไฟ (Fire Load)

ภาระของไฟมีผลต่ออัตราการเผาไหม้และความสามารถในการให้ความร้อนภายในห้องที่จะถูกปล่อยออกมา การทดลองโดยส่วนมากจะใช้ไม้หรือเชื้อเพลิงจำพวกไม้เป็นวัสดุซึ่งจะกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบตลอดพื้นที่พื้น แต่ในปัจจุบันอาคารส่วนมากจะมีวัสดุสังเคราะห์แทนวัสดุจำพวกไม้ หรือพวกโรงงานเก็บพวกวัสดุดังกล่าว ซึ่งการกระจายของวัสดุเชื้อเพลิงเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของการเผาไหม้ของวัสดุสังเคราะห์จะแตกต่างจากวัสดุจำพวกไม้และยากที่จะกำหนดให้แน่นอน

4.2.2 ช่องระบายอากาศ (Ventilation)

มีการศึกษาอย่างกว้างขวางและข้อมูลจำนวนมากซึ่งแสดงให้เห็นว่าช่องระบายอากาศควรเอามาพิจารณาเกี่ยวข้องกับความรุนแรงของไฟ และอัตราการเผาไหม้ ช่องระบายอากาศส่วนมากมาจากหน้าต่าง ดังนั้น จะพิจารณาหน้าต่างเป็นส่วนหนึ่งของพื้นที่ของช่องระบายอากาศ โดยหน้าต่างจะถูกสมมติว่ากระจกจะแตกหลังจากเกิดเพลิงไหม้ ช่องเปิดของหลังคาที่สามารถนำมารวมกับช่องระบายอากาศได้ แต่บางครั้งช่องเปิดอื่นๆ ที่สามารถให้อากาศผ่านได้ ก็ควรนำมาพิจารณาด้วย เช่น ประตูก็อาจพิจารณาเช่นเดียวกับหน้าต่าง แต่ต้องพิจารณาว่าประตูดังกล่าวถูกออกแบบเป็นประตูป้องกันไฟหรือเปล่า

4.2.3 ขนาดของห้อง (Compartment size)

ถูกเอามาพิจารณาจะเอามาคำนวณหาภาระของไฟ (Fire Load) ส่วนสำคัญอีกอย่างหนึ่งของห้องคือ พื้นที่ผิว ซึ่งได้รับความร้อนจากไฟโดยตรง ในการทดลองอาจใช้พื้นที่ผิวทั้งหมดของห้องมาคำนวณหรือพื้นที่ผิวอาจหักด้วยพื้นที่หน้าต่างก่อนการคำนวณ คุณสมบัติทางด้านความร้อนของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างห้องก็มีผลต่ออุณหภูมิภายในห้อง

4.3 วิธีการออกแบบอาคารเพื่อการต้านทานเพลิงไหม้ (Design Approach)

ผู้ออกแบบสามารถเอาข้อมูลจากการทดลองมาใช้เพื่อประเมินความรุนแรงของไฟซึ่งคาดว่าจะเกิดกับลักษณะของอาคารและจะเอาไปออกแบบให้อาคารดังกล่าวมีความสามารถทนต่อไฟได้ตรงตามที่ต้องการจากการคำนวณ

รูปที่ 4.5 เป็นวิธีการ 3 วิธี แสดงความต้านทานไฟที่ต้องการและตัวแปรที่ถูกเอามาพิจารณา จากทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลา ซึ่งเป็นสภาวะอุดมคติ มีพื้นฐานมาจากการประมาณอัตราการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ในความเป็นจริงแล้ว ขณะเกิดเพลิงไหม้ อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะต่างจากทฤษฎีโดยสิ้นเชิง ความต้านทานไฟที่เทียบเท่า

(Equivalent Fire Resistance) จะใช้ทฤษฎีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาเป็นพื้นฐานในการคำนวณ ดังแสดงในตัวอย่างที่ 4.1

รูปที่ 4.6 แสดงลักษณะเบื้องต้น 3 ประการที่ทำให้แน่ใจว่าองค์อาคารได้ผ่านมาตรฐานของการป้องกันไฟ โดยวิธีทั่วไปจะอ้างอิงถึงผลการทดสอบในห้องเผา ผลการทดสอบจะเอามาใช้ทำเป็นตารางในลักษณะของ “ความพึงพอใจ” (Deem to Satisfy) ซึ่งจะใช้ในการออกแบบของอาคารส่วนมาก

โดยการจับคู่กันระหว่างวิธีประเมินความต้านทานไฟที่ต้องการกับแนวทางการปฏิบัติที่สามารถทำได้ รูปที่ 4.7 แสดงวิธีการสำหรับเตรียมการป้องกันไฟของอาคาร ซึ่งสามารถทำตามและได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ เราสามารถเลือกแต่ละวิธีซึ่งมีลักษณะของหลักการแตกต่างกัน เช่น วิธีที่ 1 แสดงวิธีการแบบทั่วไป และ วิธีที่ 4 เป็นกระบวนการวิเคราะห์ทั้งหมด

วิธีที่ 1 เป็นวิธีการที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งประเทศส่วนมากก็ยังคงใช้ได้อยู่ซึ่งความต้านทานไฟที่ต้องการ ถูกกำหนดโดยการทดสอบจากตัวอย่างหรือจากความพึงพอใจ

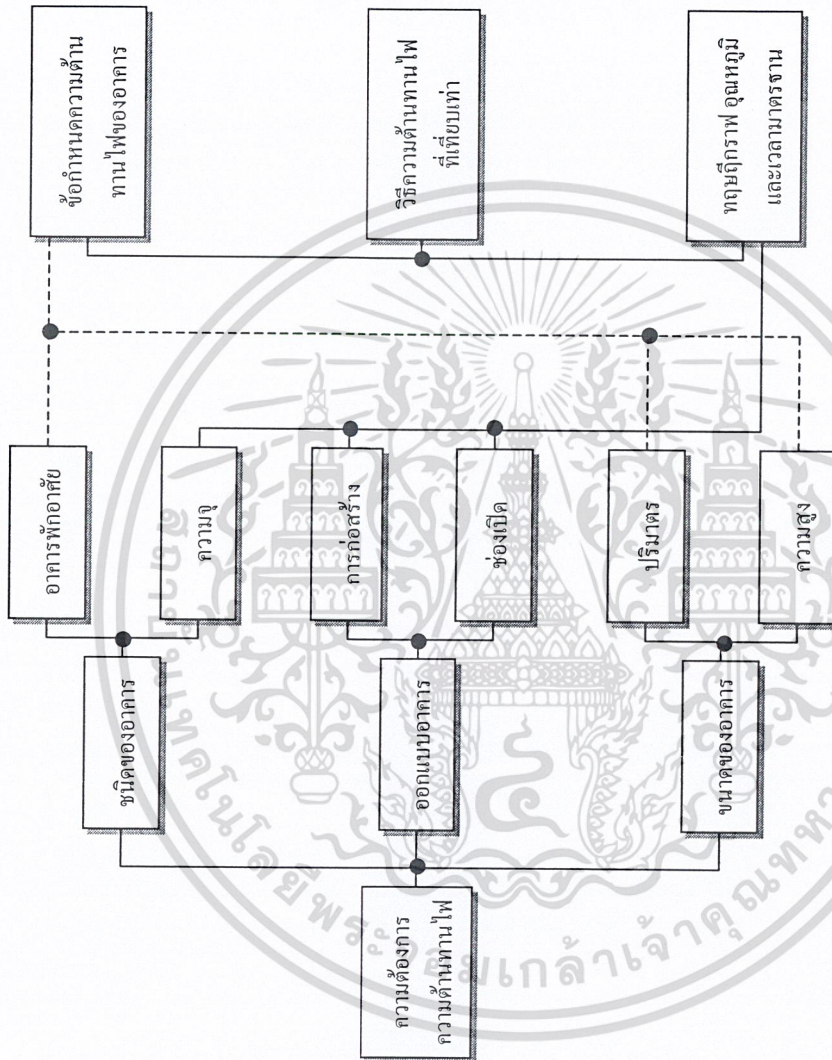
วิธีที่ 2 ข้อกำหนดสำหรับต้านทานไฟจะทำตามวิธีการที่ 1 แต่มีสองทางเลือกสำหรับปฏิบัติ(2a) จะให้เทคนิคของ Interpolation / extrapolation ขยายข้อมูลจากการทดสอบ และ (2b) แนะนำหลักการของการวิเคราะห์พฤติกรรมของแต่ละองค์ประกอบของโครงสร้าง

วิธีที่ 3 ข้อกำหนดของความต้านทานไฟจะอยู่บนพื้นฐานของความรู้เกี่ยวกับการเผาไหม้ของอาคาร ดังแสดงในตัวอย่างที่ 5.1 และมี 3 ทางเลือกสำหรับปฏิบัติ (3a) Interpolation Technique (3b) วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้าง (3c) ทดสอบโดยตรง

วิธีที่ 4 เสนอวิธีการแบบใหม่สุดที่สามารถทำให้สำเร็จและเกิดประโยชน์ได้โดยจะพิจารณาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลา เช่นเดียวกับการวิเคราะห์โครงสร้างจากข้อมูลเริ่มแรกโดยใช้ข้อมูลจากคุณสมบัติของวัสดุ และพฤติกรรมของตัวอย่าง สำหรับวัสดุและ โครงสร้าง

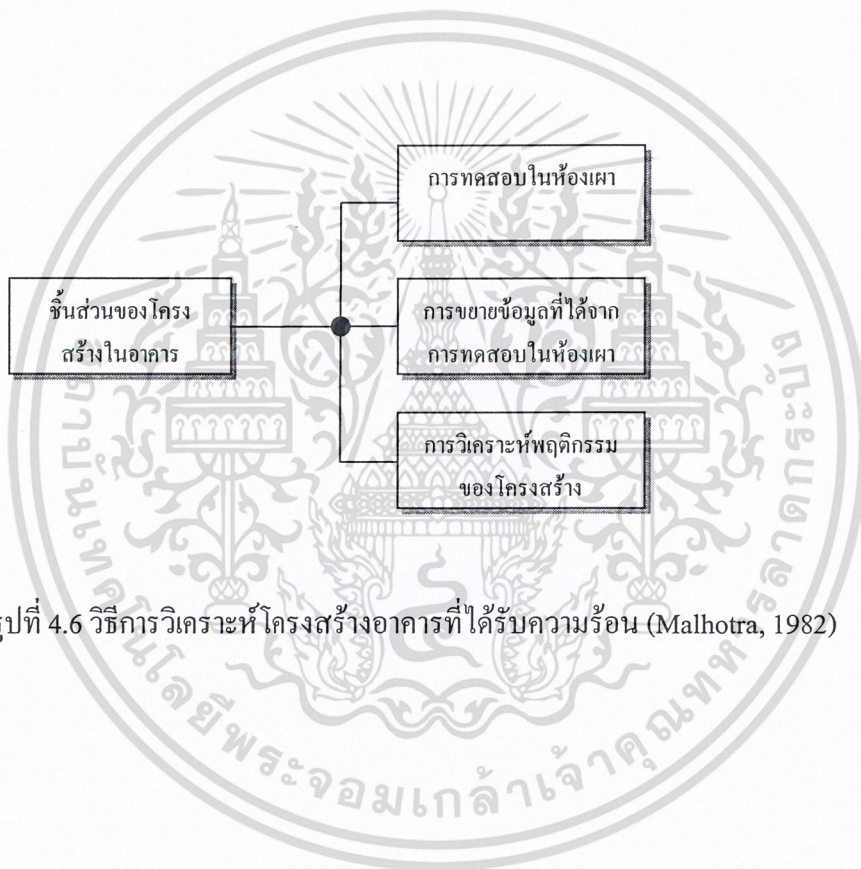
โอกาสที่จะใช้วิธีการ3a/3b มีน้อยมาก และเป็นกระบวนการใหม่สำหรับพัฒนาวิธีวิเคราะห์การป้องกันไฟของโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



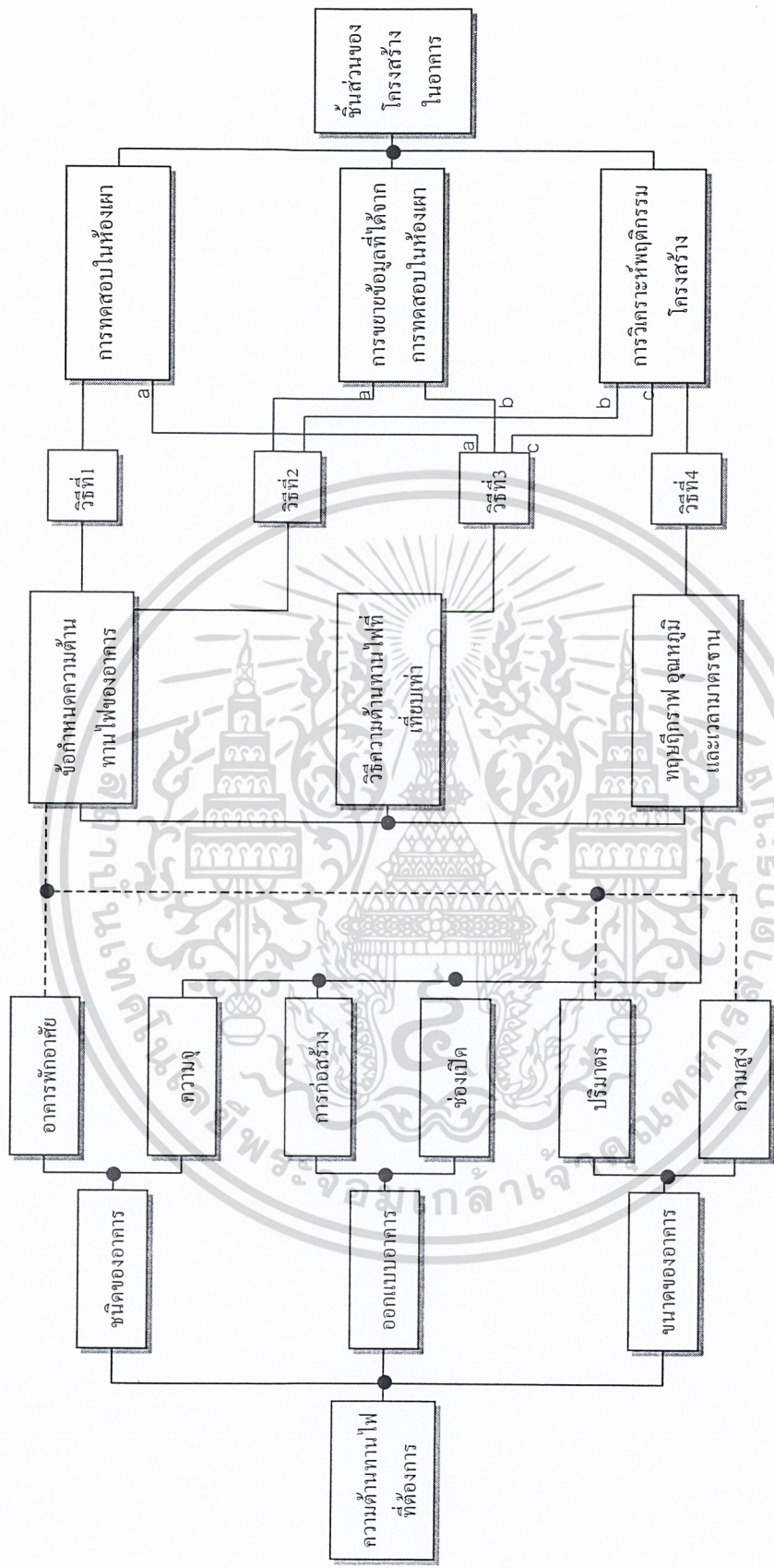
รูปที่ 4.5 วิธีการหาความความดันไฟฟ้าที่ต้องการ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 วิธีการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารที่ได้รับความร้อน (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 วิธีการต่างๆ สำหรับเตรียมการป้องกันไฟของอาคาร (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง 4.1

ให้คำนวณหาความรุนแรงของไฟภายในห้อง (Compartment) โดยใช้วิธีความต้านทานไฟที่เทียบเท่า (Equivalent Fire Resistance) โดยที่

- ขนาดของ Compartment 10×5×3 เมตร
- หน้าต่าง 4 บาน ขนาด 2×1.50 เมตร
- Fire Load Cellulosic base 50 kg/m²

$$\text{Window Area } A_v = 4 \times 2 \times 1.5 = 12 \text{ m}^2$$

$$\text{Window High } H_v = 1.50 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Surface Area } A_T &= (2 \times 5 \times 10) + (2 \times 3 \times 5) + (2 \times 5 \times 10) \\ &= 190 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

แปลงหน่วยจาก Mcal/kg เป็น MJ/kg ใช้ตัวคูณ 4.8

ความร้อนของวัสดุจำพวกเส้นใยธรรมชาติ = 17.974 MJ/kg

ความหนาแน่นของภาระไฟ / พื้นที่ผิวของห้อง

$$q_f = \frac{\text{Floor Area} \times \text{Fired Load} \times \text{ความร้อนจากวัสดุ}}{\text{พื้นที่ผิวของห้อง}}$$

$$q_f = \frac{50 \times 50 \times 17.974}{190}, \quad q_f = 236.5 \text{ MJ/m}^2$$

$$1. \quad t_e = 0.067 q_f \left[\frac{A_t}{A_v \sqrt{H_v}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

$$t_e = 0.067 \times 236.5 \left[\frac{190}{12 \times \sqrt{1.5}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

= 56.30 นาที (จากกราฟมาตรฐาน อุณหภูมิกับเวลา)

$$2. \quad t_e = \frac{0.057 q_f A_t}{\sqrt{A_v (A_t - A_v)}} \quad (4.6)$$

$$t_e = \frac{0.057 \times 236.5 \times 190}{\sqrt{12(190 - 12)}}$$

= 55.4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

คุณสมบัติของวัสดุภายใต้อุณหภูมิสูง

เพื่อที่จะเข้าใจผลกระทบของโครงสร้างเนื่องจากความร้อนจากเพลิงไหม้จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ก่อสร้างที่อุณหภูมิสูงด้วย อัตราการเสื่อมลงของคุณสมบัติของวัสดุเนื่องจากความร้อนสามารถบอกความสามารถทนไฟของโครงสร้างได้ การออกแบบทั่วไป จะใช้คุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิห้องซึ่งประมาณ 25 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของวัสดุที่จะกล่าวในบทนี้จะเป็นวัสดุพื้นฐาน ได้แก่ คอนกรีต และ เหล็ก

คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนภายในโครงสร้าง ได้แก่ ความสามารถนำความร้อน (Conductivity) และความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Specific Heat) และจากตัวแปรทั้งสองตัวสามารถแสดงในรูปของความสามารถในการแพร่ความร้อนของวัสดุ (Diffusivity)

$$\text{ความสามารถในการแพร่ความร้อนของวัสดุ} \quad \phi = \frac{k}{\rho c} \quad (5.1)$$

โดยที่

k = ความสามารถนำความร้อน ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)

ρ = ความหนาแน่น (Kg/m^3)

c = ความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$)

5.1 คอนกรีต (Concrete)

5.1.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของคอนกรีตขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมวลรวม (Aggregate) โดยปกติความหนาแน่นจะอยู่ระหว่าง 2-2.4 ตัน/ลบ.ม. ส่วนคอนกรีตมวลเบาความหนาแน่นจะอยู่ระหว่าง 1.0-1.5 ตัน/ลบ.ม. ผลกระทบอย่างหนึ่งของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีต่อคอนกรีตคือจะทำให้ความชื้นในช่องว่างระเหยออกไปเมื่ออุณหภูมิของคอนกรีตมากกว่า 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไข³² และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 การกระเทาะ (Spalling)

เป็นการเสียหายของคอนกรีตชนิดหนึ่งเกิดจากเกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างมากภายในหน้าตัด ซึ่งจะเกิดในช่วงแรกๆ ของการเกิดเพลิงไหม้ การกระเทาะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด

1. การกระเทาะของมวลรวม (Aggregate Splitting) คือการกระเทาะของ Silica ที่อยู่ในมวลรวม ซึ่งทำให้โครงสร้างทางผลึกของมวลรวมเปลี่ยนไป ผลกระทบจากการกระเทาะชนิดนี้น้อยมาก
2. การกระเทาะแบบระเบิด (Explosive Spalling) ขึ้นส่วนขนาดเล็กและใหญ่ของคอนกรีตถูกดันออกมาด้วยความรุนแรง ส่วนมากจะเกิดในช่วงแรกๆของการทดสอบมาตรฐาน หลังจากเกิดเพลิงไหม้ประมาณ 30 นาที การกระเทาะชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับมวลรวม, ความพรุนของคอนกรีต, ความชื้น และความเค็มของคอนกรีต การกระเทาะแบบระเบิดนั้นเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนเกิดจากความดันไอที่สูงขึ้นภายในเนื้อคอนกรีตเนื่องจากความร้อนและทำให้เกิดรอยแตกขนานกับผิวของโครงสร้างภายใต้ความเค้นดังกล่าวทำให้คอนกรีตบริเวณผิวหน้าระเบิดออกมา มวลรวมจำพวก Silica, ปริมาณความชื้นมากกว่า 2% ของน้ำหนัก, ความหนาของหน้าตัดน้อยกว่า 7 เซนติเมตร และการเปลี่ยนหน้าตัดอย่างทันทีก่อให้เกิดการกระเทาะแบบระเบิด
3. การกระเทาะแบบเป็นขุย (Sloughing off) เกิดจากผิวหน้าของคอนกรีตได้รับความร้อนจากเพลิงไหม้เป็นระยะเวลานาน ทำให้คอนกรีตไม่สามารถรักษาสภาพเดิมไว้ได้ ส่วนมากจะเกิดกับคอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง

5.1.3 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน (Thermal Deformation)

การขยายตัวของคอนกรีตแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มโดยการแบ่งโดยใช้มวลรวมเป็นเกณฑ์ เป็นผลที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างที่ให้ความร้อนโดยปราศจากแรงภายนอกกระทำ ความเคี้ยวของคอนกรีตเนื่องจากความร้อนประกอบด้วย 4 องค์ประกอบดังรูปที่ 5.1 และการขยายตัวของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมต่างกันเนื่องจากอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 5.2

$$\varepsilon = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_c + \varepsilon_{tr} \quad (5.2)$$

โดยที่

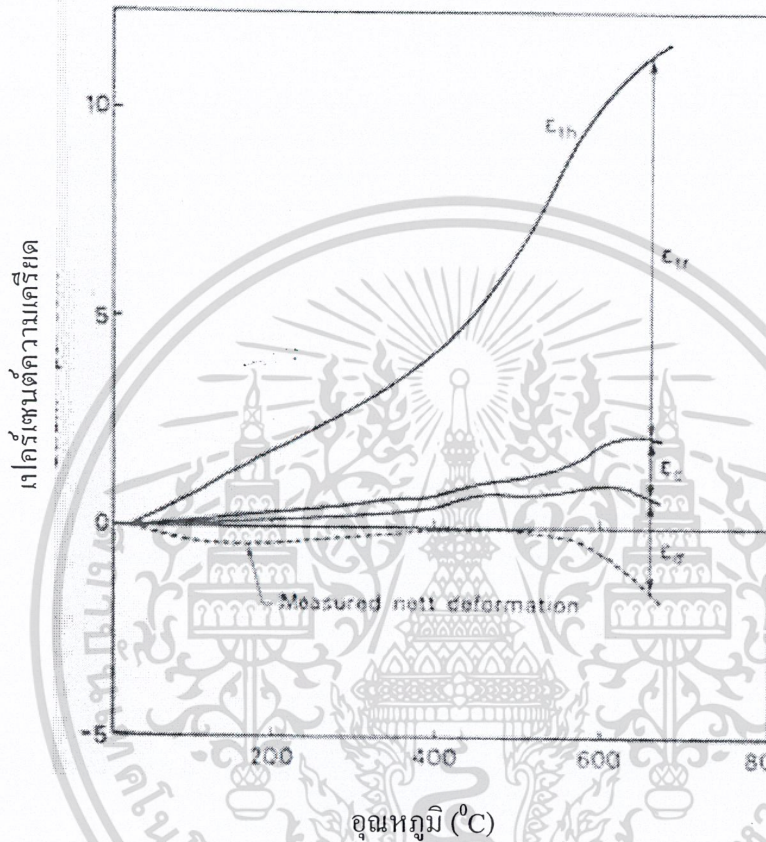
ε_{th} = การขยายตัวเนื่องจากความร้อน โดยปราศจากแรงภายนอกกระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

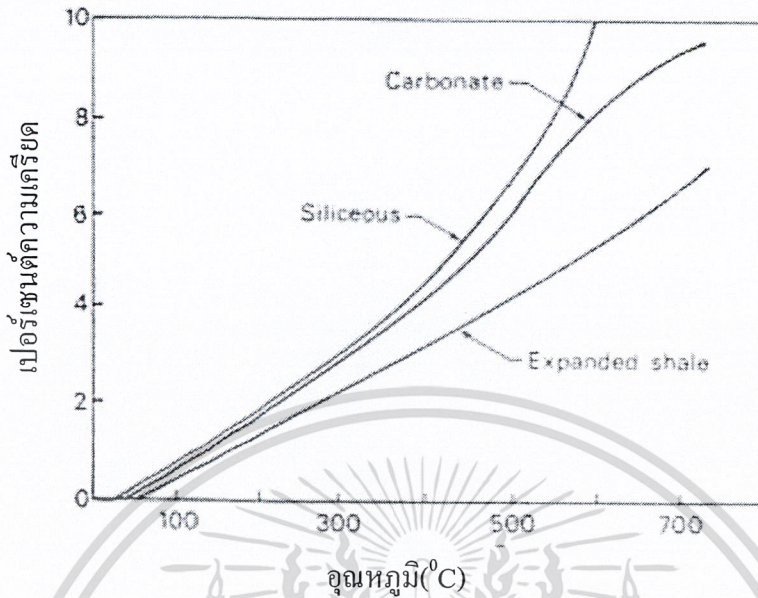
ϵ_{γ} = การเปลี่ยนรูปแบบ Elastic และ Plastic จากแรงภายนอกกระทำ

ϵ_c = ความล้าของคอนกรีตเนื่องจากอุณหภูมิ/เวลา/ความเค้น

ϵ_{μ} = ความเครียดจากการเปลี่ยนรูปทางเคมีของ Cement Paste

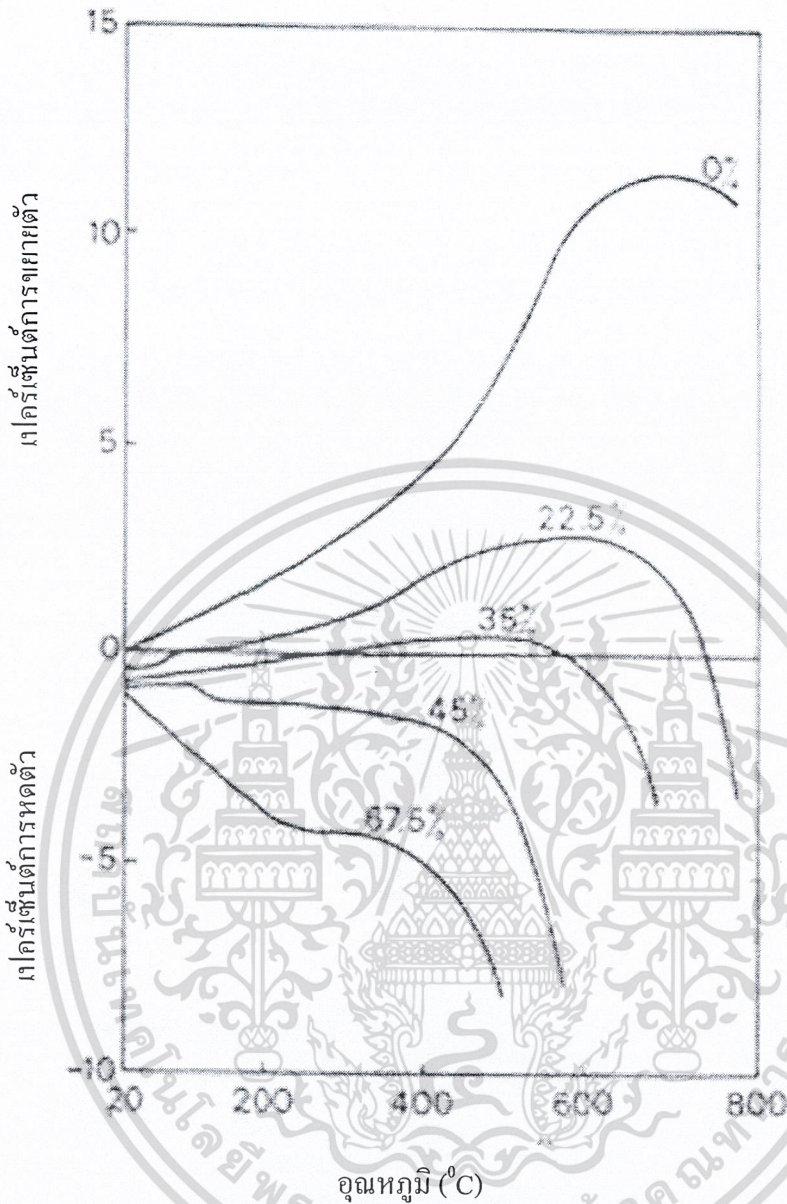


รูปที่ 5.1 องค์ประกอบความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ (Malhotra, 1982)



รูปที่ 5.2 การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมต่างชนิดกัน (Malhotra, 1982)

รูปที่ 5.3 แสดงผลจากน้ำหนักภายนอกที่มากกระทำกับคอนกรีตที่ใช้มวลรวมประเภท Silica โดยเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาทิจากรูปเห็นได้ว่าที่น้ำหนักกระทำ 35% ของกำลังของคอนกรีตการขยายตัวของคอนกรีตเท่ากับศูนย์ เมื่ออุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นคอนกรีตจะหดตัวอย่างรวดเร็ว



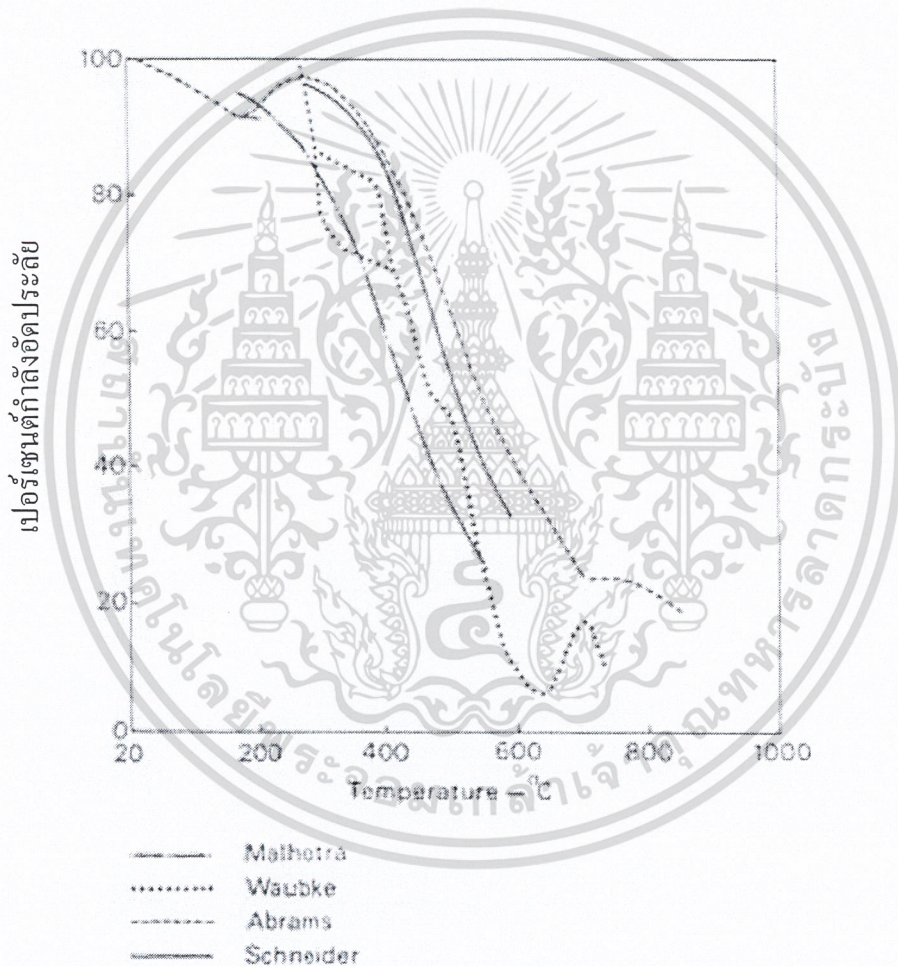
(22.5% - หมายถึงให้แรงกระทำ 22.5% ของกำลังอัดประลัย)

รูปที่ 5.3 ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิภายใต้แรงกระทำที่แตกต่างกันของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมประเภท Silica (Malhotra, 1982)

5.1.4 กำลัง (Strength)

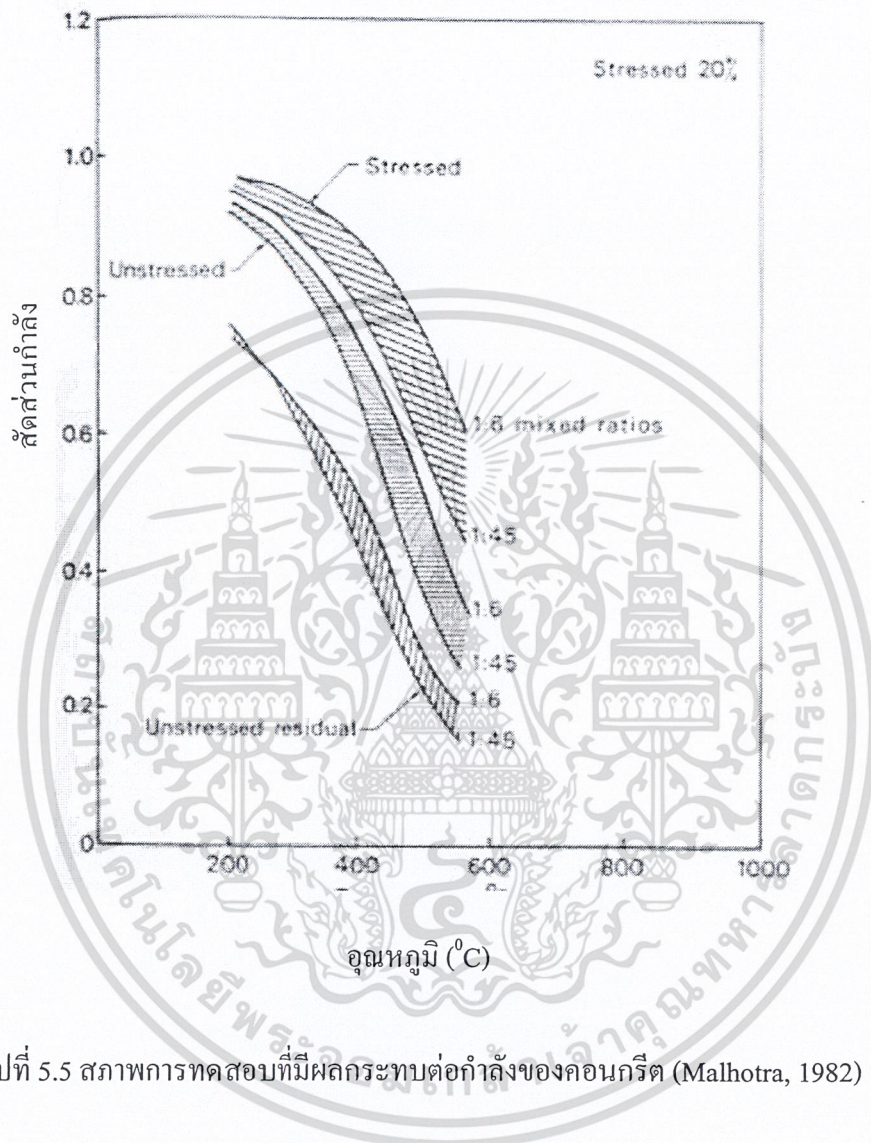
คอนกรีตในโครงสร้างจะรับแรงอัด ดังนั้นกำลังของคอนกรีตจึงเป็นคุณสมบัติที่น่าสนใจมากที่สุดภายใต้ความร้อน ได้มีการศึกษาอย่างกว้างขวาง รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวิธีการทดสอบและวัสดุที่แตกต่างกัน การทดลองจะกระทำโดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างและรักษาอุณหภูมิไว้ หลังจากนั้นค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักบรรทุกจนกระทั่งตัวอย่างพัง จะเห็นว่าการทดลองดังกล่าวไม่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริง ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบโดยให้น้ำหนักกระทำประมาณ 20% ของกำลังอัดประลัยก่อนขณะเพิ่มความร้อน ผลการทดลองดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5.5 จากผลการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่ากำลังของคอนกรีตที่มีการ Preload จะลดลงน้อยกว่าคอนกรีตที่ไม่มีการ Preload เมื่ออุณหภูมิของคอนกรีตที่เท่ากัน กำลังของคอนกรีตจะลดลงอีกในช่วงของการเย็นตัวและกำลังที่เหลือจะมีค่าประมาณ 50% ของกำลังคอนกรีตขณะร้อน



รูปที่ 5.4 กำลังอัดประลัยของคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



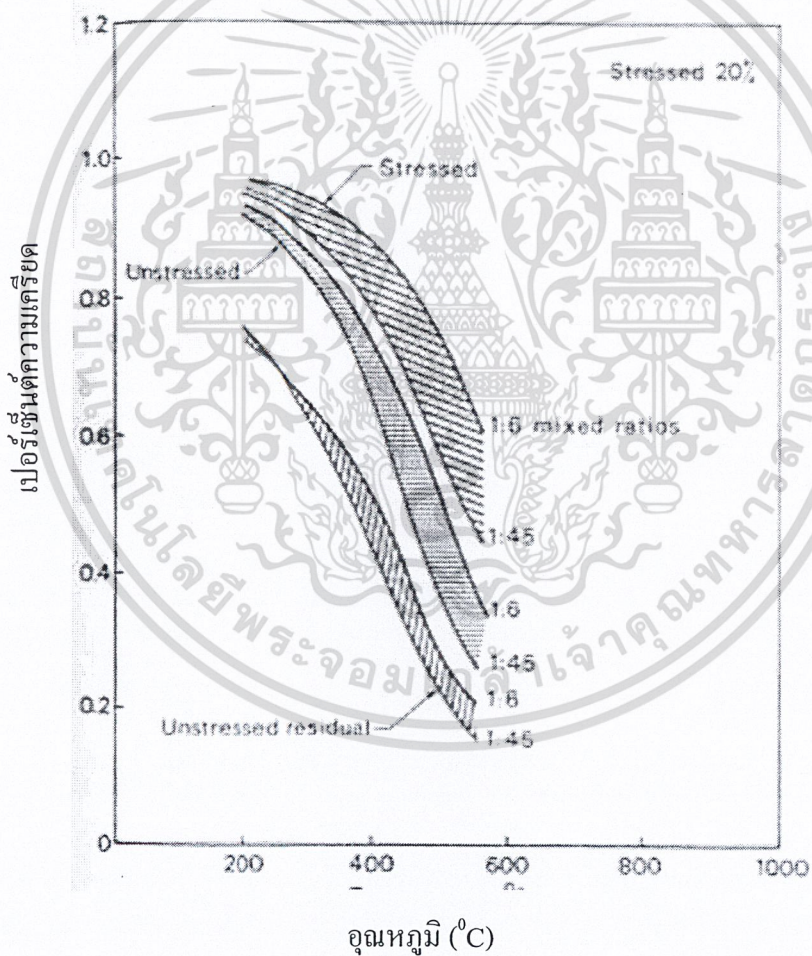
รูปที่ 5.5 สภาพการทดสอบที่มีผลกระทบต่อกำลังของคอนกรีต (Malhotra, 1982)

5.1.5 โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีต (Modulus of elasticity)

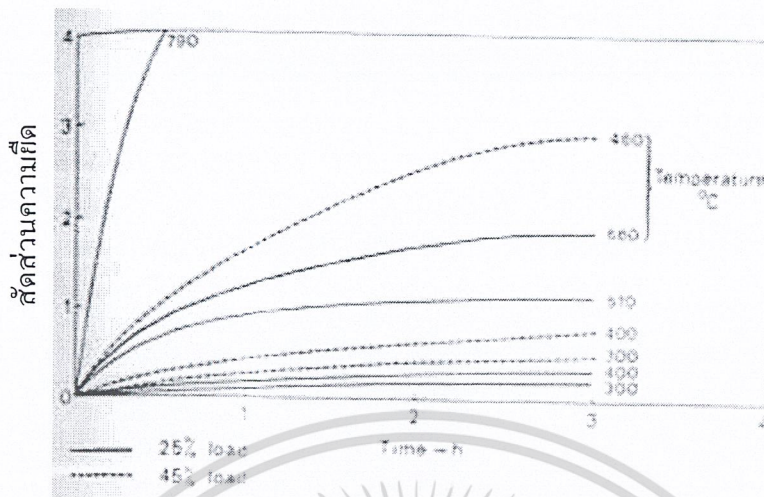
อุณหภูมิมีผลกระทบต่อ โมดูลัสความยืดหยุ่นของคอนกรีตเช่นเดียวกับกำลังของคอนกรีต จากผลการทดลองของ Cruz แสดงให้เห็นถึงการลดลงของความยืดหยุ่นของคอนกรีตทั้ง 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 5.6 ซึ่งแสดงการลดลงอย่างสม่ำเสมอของคอนกรีตทั้ง 3 ชนิด

5.1.6 การล้า (Creep)

ผลของการล้าได้จากการให้ความร้อนกับตัวอย่างและรักษาอุณหภูมิไว้ หลังจากนั้นให้น้ำหนักแก่ตัวอย่างและคงน้ำหนักนั้นไว้ประมาณ 1 วัน แล้วตรวจสอบความเครียดของตัวอย่างนั้น โครงสร้างส่วนมากจะได้รับความร้อนจากเพลิงไหม้ประมาณ 2-3 ชั่วโมง และอุณหภูมิก็ไม่คงที่ แต่การทดสอบดังกล่าวก็ได้ข้อมูลที่น่าสนใจ จากข้อมูลการทดสอบคอนกรีตที่ใช้มวลรวมเป็นกรวด (Gravel) ดังแสดงในรูปที่ 5.7 ซึ่งจะเห็นว่าหากอุณหภูมิไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส ผลของความล้านี้มีค่าน้อยมาก



รูปที่ 5.6 โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ (Malhotra, 1982)



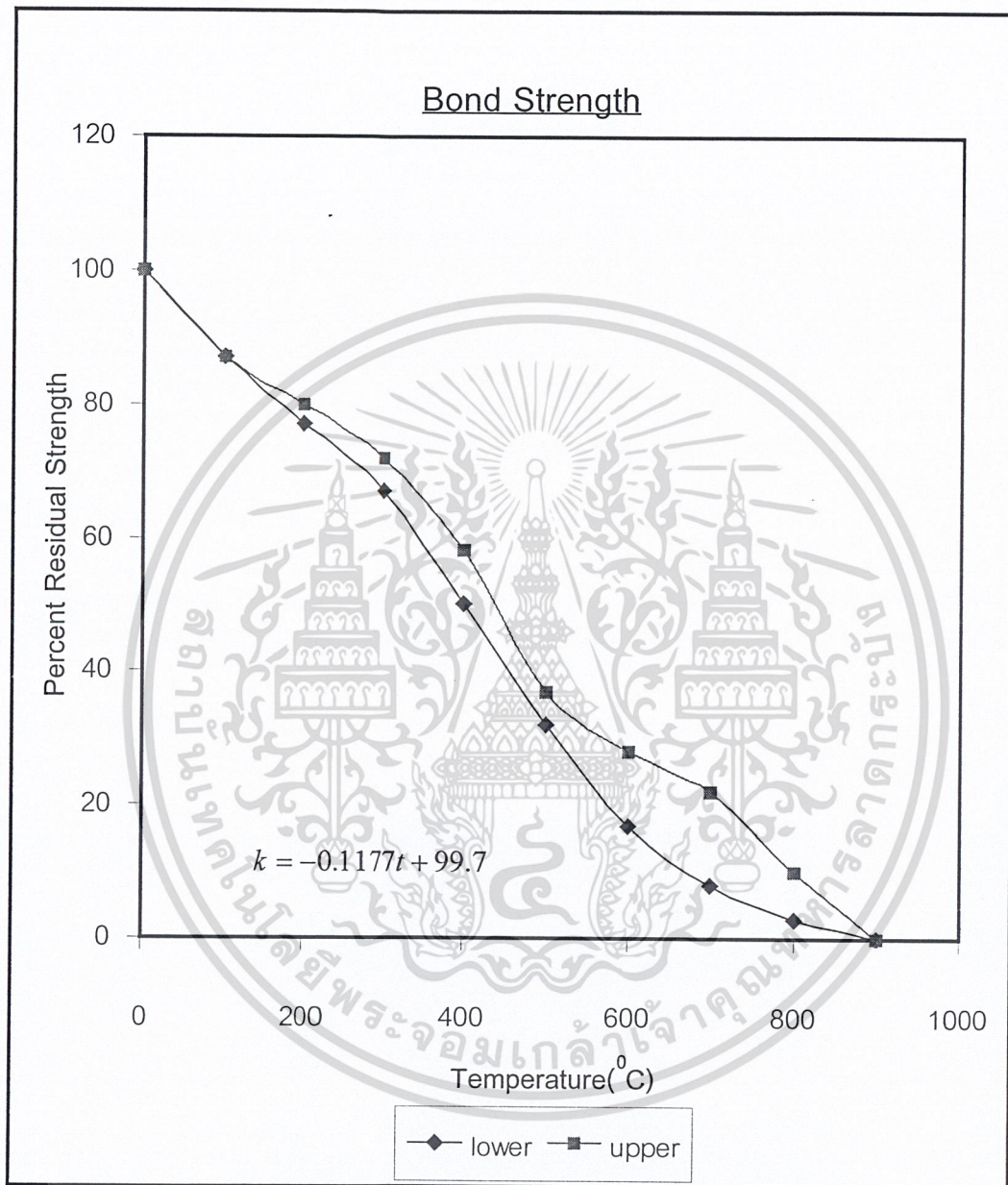
รูปที่ 5.7 การทดสอบการล้าระยะสั้นด้วยวิธี Preload (Malhotra, 1982)

5.1.7 กำลังการยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม (Bond Strength)

การทดลองเกี่ยวกับอุณหภูมิที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริมมีค่อนข้างจำกัด และไม่มีเกณฑ์การทดสอบที่เป็นมาตรฐานทำให้ผลการทดสอบมีค่าแตกต่างกัน พื้นที่ผิวของเหล็กเสริมเป็นตัวแปรหลักสำหรับรับกำลังดังกล่าวคือเหล็กข้ออ้อยหรือเหล็กที่มีสนิมผิวเล็กน้อยมีการยึดเกาะที่อุณหภูมิสูงๆ มากกว่าเหล็กที่มีผิวเรียบ ชนิดของคอนกรีตก็เป็นตัวแปรที่สำคัญ คือคอนกรีตที่มีพฤติกรรมทางความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิต่ำจะให้อายุการใช้งานที่สูง รูปที่ 5.8 แสดงผลการทดลองกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริม การลดลงของกำลังยึดเกาะมีผลเช่นเดียวกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป

5.1.8 ความสามารถในการนำความร้อน (Conductivity)

ความสามารถในการนำความร้อนของคอนกรีตขึ้นอยู่กับมวลรวม, ความพรุนของคอนกรีต, ปริมาณความชื้นของคอนกรีต Harmathy ได้ทำการทดลองจากคอนกรีตหลายชนิดและแสดงผลการทดลองในรูปที่ 5.9 จากรูปแสดงให้เห็นว่า คอนกรีตที่มีความหนาแน่นสูง ความสามารถในการนำความร้อนจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

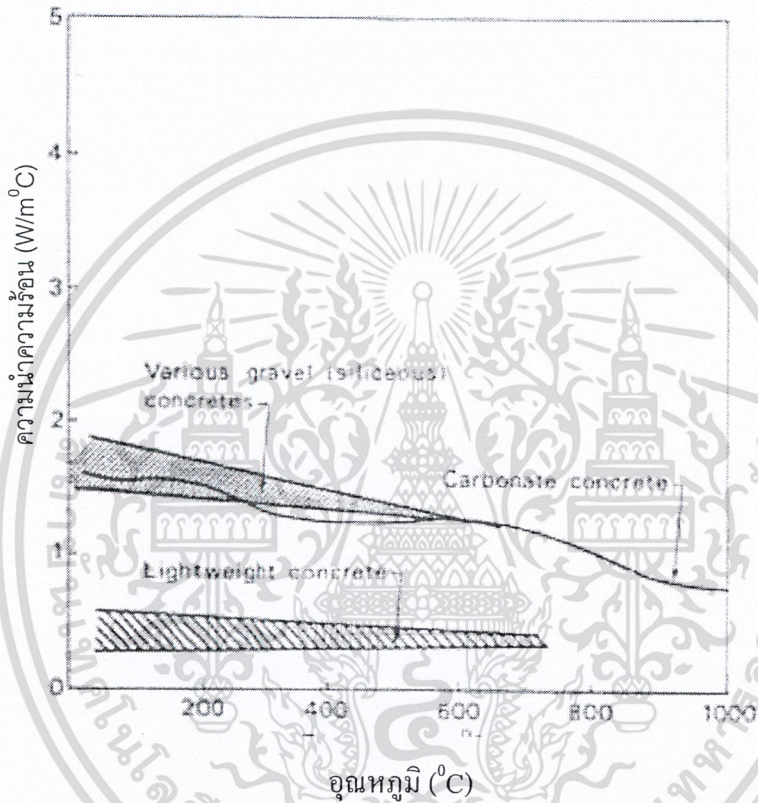


รูปที่ 5.8 การลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตสำหรับเหล็กชนิดต่างๆ (พุทธพงษ์ คำภีรานนท์ และคณะ, 2540)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

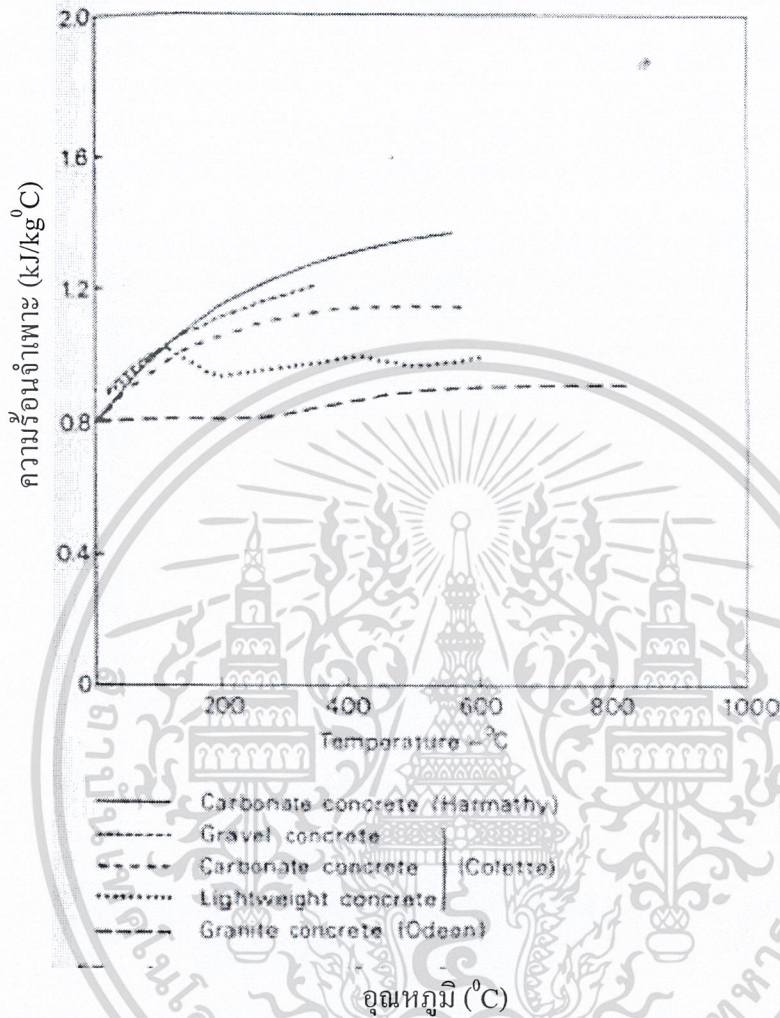
5.1.9 ความจุความร้อน (Specific Heat)

รูปที่ 5.10 แสดงผลการทดลองของ Harmathy เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Colette และ Odeen แสดงให้เห็นว่า ความจุความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



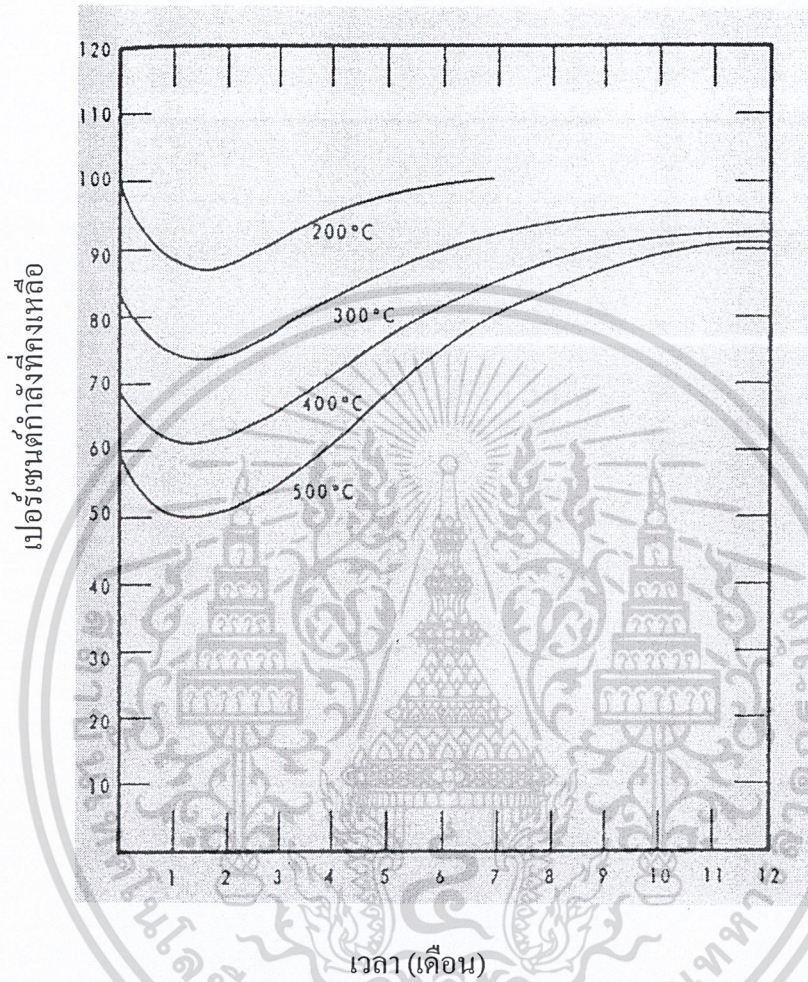
รูปที่ 5.9 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อความนำความร้อนของคอนกรีต (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อความจุความร้อนของคอนกรีต (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 การฟื้นกำลังของคอนกรีตที่ถูกไฟเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อเวลาผ่านไป พบว่า กำลังของคอนกรีตเกือบจะฟื้นคืนปกติหลังจากถูกเพลิงไหม้เมื่อปล่อยให้ทิ้งไว้ระยะนานเป็นปี แต่ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากในช่วงแรกหลังจากเกิดเพลิงไหม้ก็ต้องทำการซ่อมแซมแก้ไขโดยไม่ปล่อยให้ทิ้งไว้ เพื่อให้กำลังฟื้นคืนได้เอง (พรศักดิ์ ตั้งคำ และ พรพล ไทรทอง, 2543)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 เหล็ก (Steel)

ในการก่อสร้าง เหล็กแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการใช้งาน คือ ใช้เสริมในคอนกรีตสำหรับรับแรงดึง และใช้เป็นวัสดุสำหรับโครงสร้าง แต่เมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของเหล็กสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ เหล็กโครงสร้าง (Structure Steel), เหล็กเสริมคอนกรีต (Reinforcing bar) และลวดเหล็กอัดแรง (Prestressing Steel)

5.2.1 การเปลี่ยนรูปเนื่องจากความร้อน (Thermal Deformation)

ในการเปลี่ยนรูปของเหล็ก ความเครียดทั้งหมดประกอบด้วย ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Strain), ความเครียดเนื่องจากความเค้น และ ความเครียดเนื่องจากการด้า (Creep Strain) ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา

$$\varepsilon = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_c$$

(5.2)

เมื่อ

ε_{th} = ความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal Strain) โดยปราศจากแรง

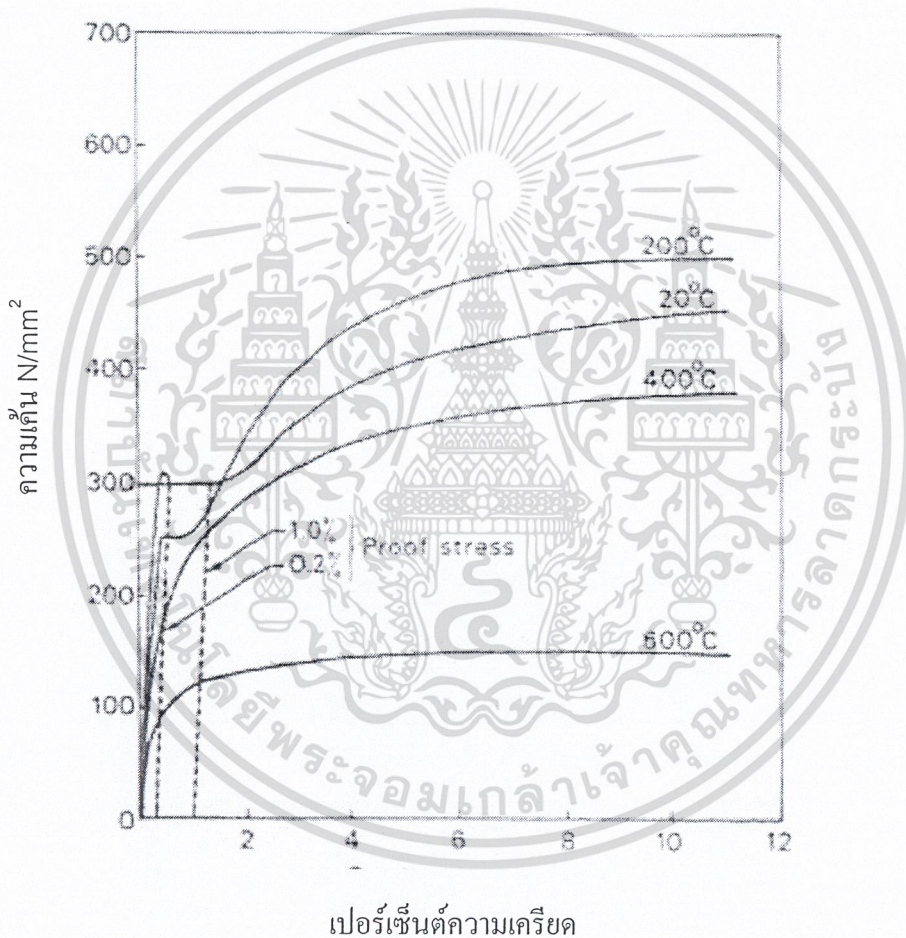
ε_{σ} = ความเครียดเนื่องจากความเค้น

ε_c = ความเครียดจากการด้าเนื่องจากเวลา

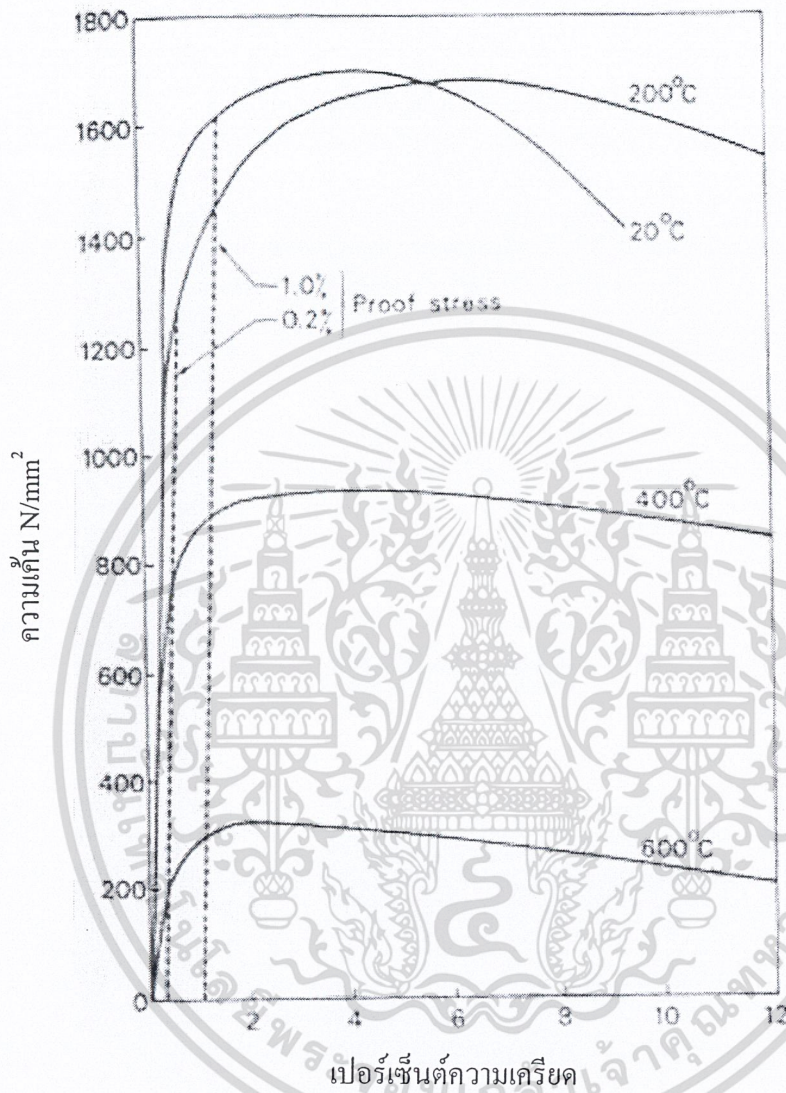
5.2.2 กำลัง (Strength)

การศึกษาด้านกำลังของคอนกรีตมีอย่างกว้างขวางแต่โดยส่วนมากจะเกิดความสับสนเนื่องมาจากการวัดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด แสดงดังรูปที่ 5.12 จากกราฟพิจารณาตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัว ได้แก่ กำลังที่จุดคลาก (คือ จุดที่ความเครียดเพิ่มแต่ความเค้นเท่าเดิม) 0.2% Proof Stress, Ultimate Strength (เมื่อเกิดการแตกร้าวของหน้าตัด) ช่วงแรกของกราฟจะเอามาหาสัดส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียด เพื่อคำนวณหาโมดูลัสความยืดหยุ่น ส่วนกราฟที่ไม่สามารถระบุจุดคลากได้เช่น กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของลวดเหล็กอัดแรงจะเอาความสัมพันธ์ของสัดส่วนในช่วง 0.2% Strain ในการหา โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ดังรูปที่ 5.13

กำลังของเหล็กเสริมจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นกำลังของเหล็กเสริมจะเริ่มลดลง Abrams แสดงการเปรียบเทียบกำลังของเหล็กมาตรฐานทั้ง 3 ชนิด ของอเมริกาแสดงดังรูปที่ 5.14 Gantvoort แสดงผลการทดลองที่สอดคล้องกัน สำหรับเหล็กทั้ง 3 ชนิด ตามมาตรฐานของยุโรป แสดงดังรูปที่ 5.15, 5.16 และ 5.17 โดยรูปที่ 5.15 แสดงกำลังความเค้นพิสูจน์ที่ ความเครียด 0.2% และ 1% ส่วนรูปที่ 5.16 และ 5.17 แสดงกำลังประลัย

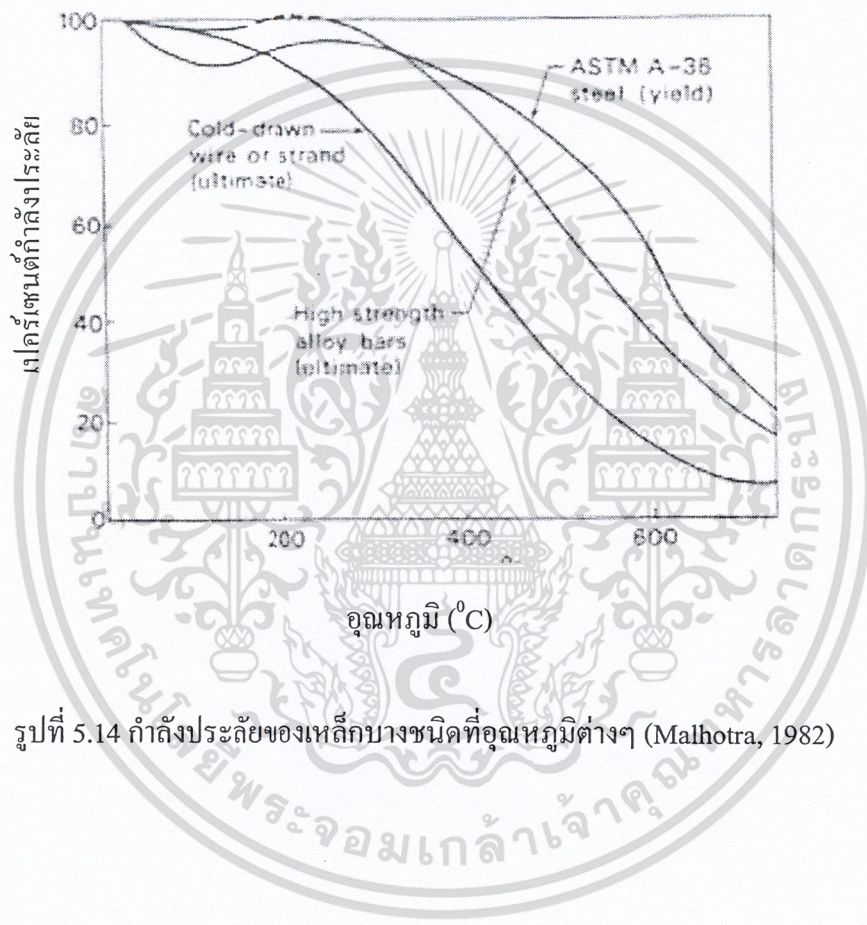


รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของเหล็กกล้าละมุน(Mild Steel) (ASTM A36)



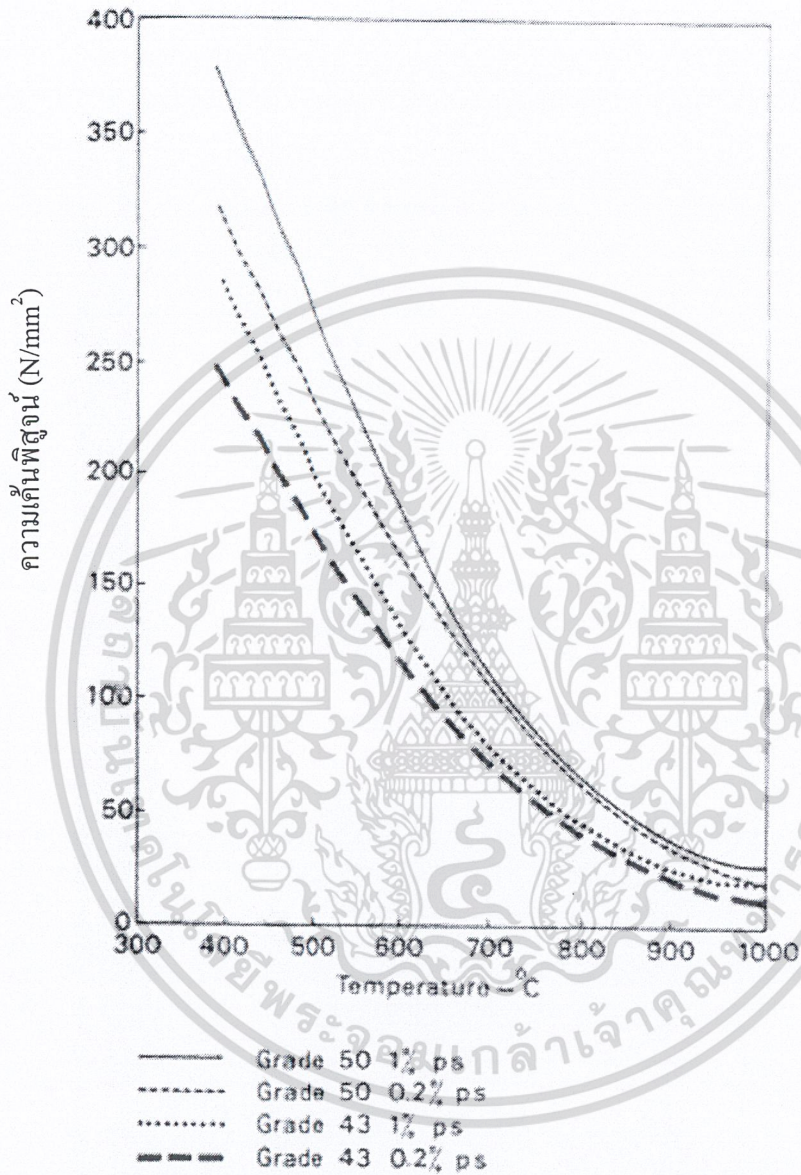
รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของลวดเหล็กอัดแรง (ASTM A421)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



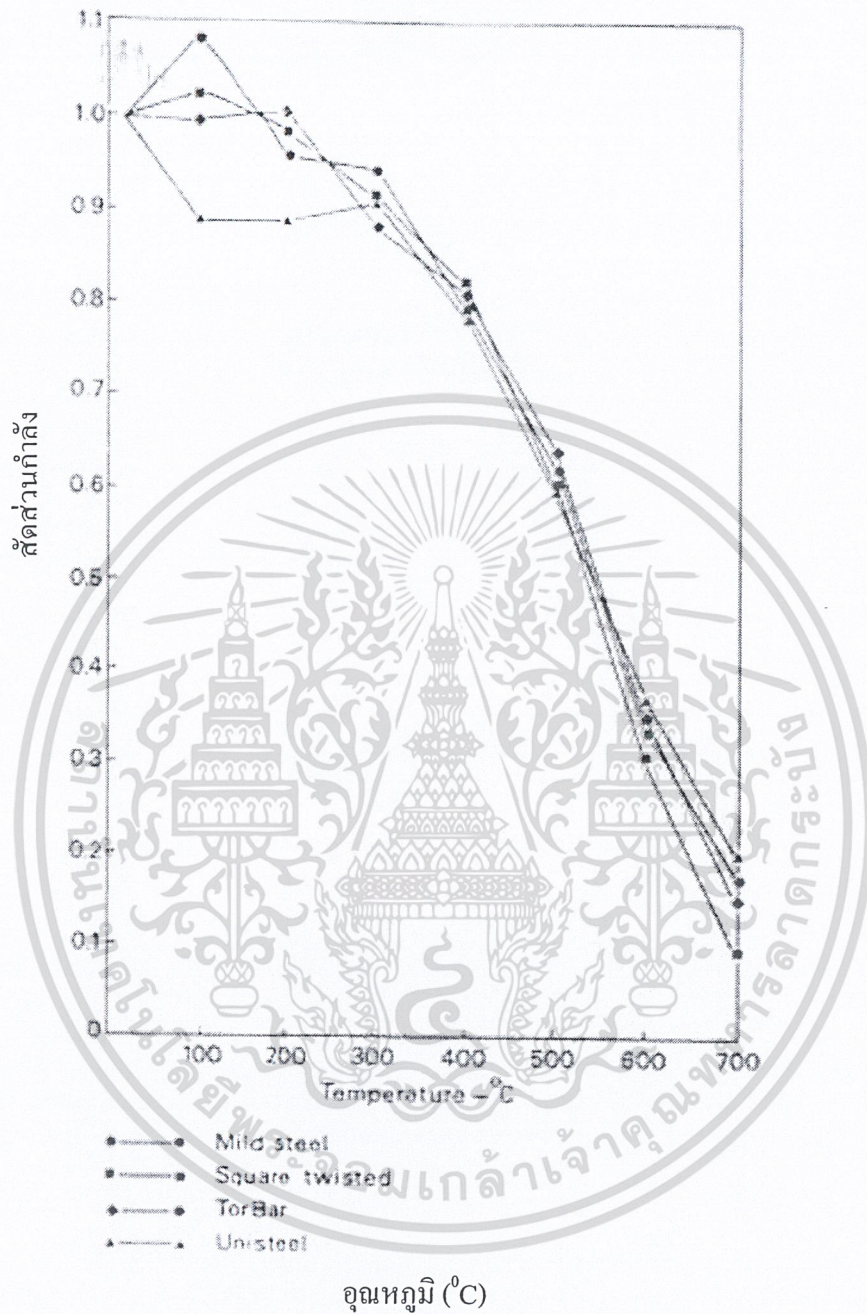
รูปที่ 5.14 กำลังประลัยของเหล็กบางชนิดที่อุณหภูมิต่างๆ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



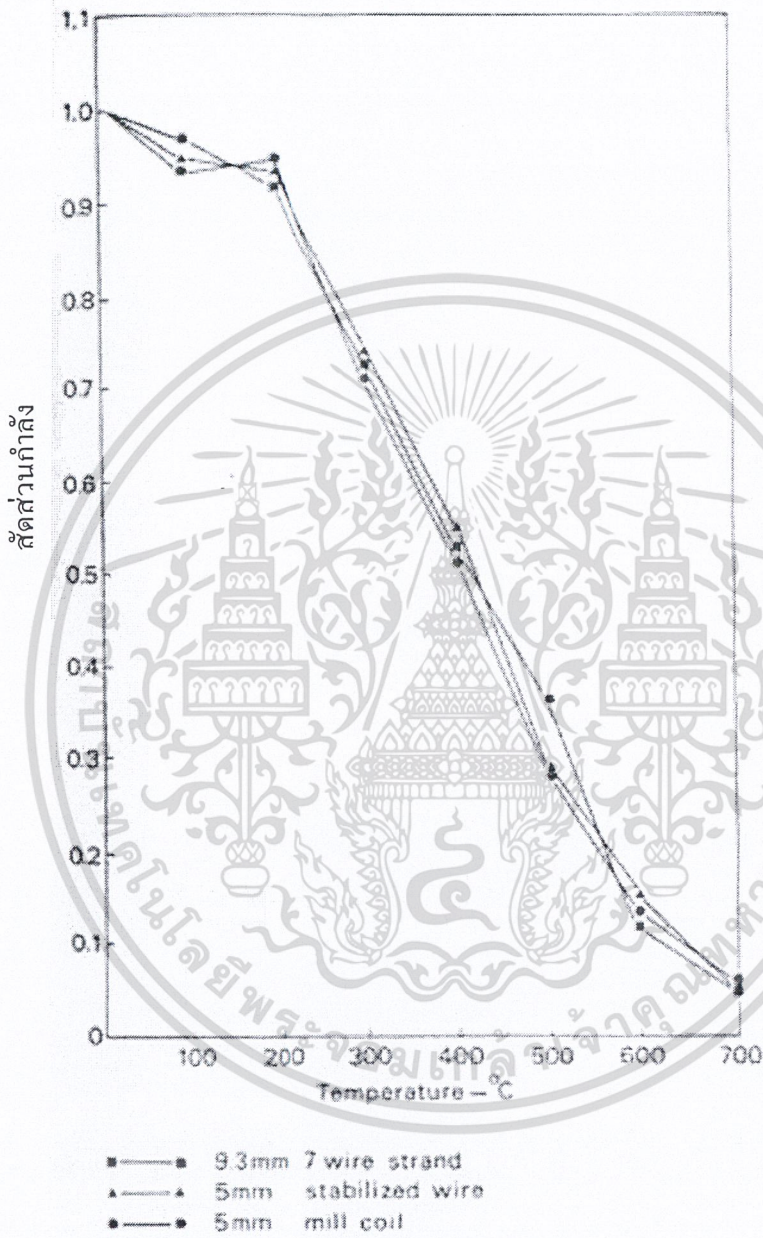
รูปที่ 5.15 ผลกระทบจากอุณหภูมิที่มีผลต่อความเค้นพิสูจน์ของเหล็กรูปพรรณ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 การลดลงของกำลังของลวดเหล็กอัดแรง (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

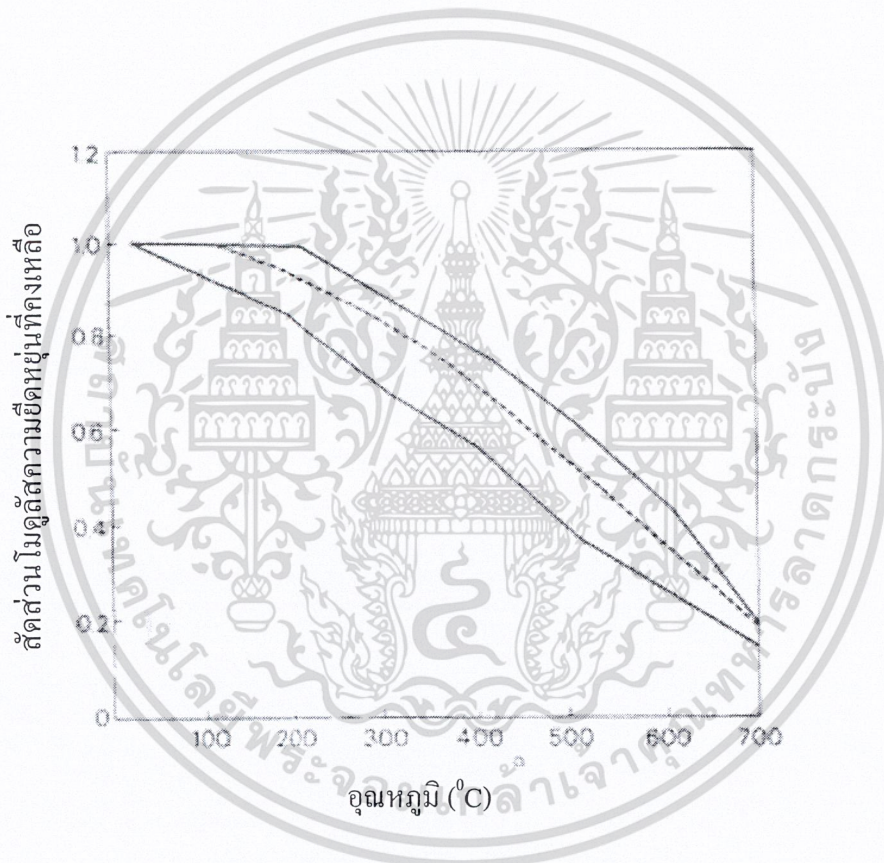


รูปที่ 5.17 กำลังที่ลดลงของเหล็กเส้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

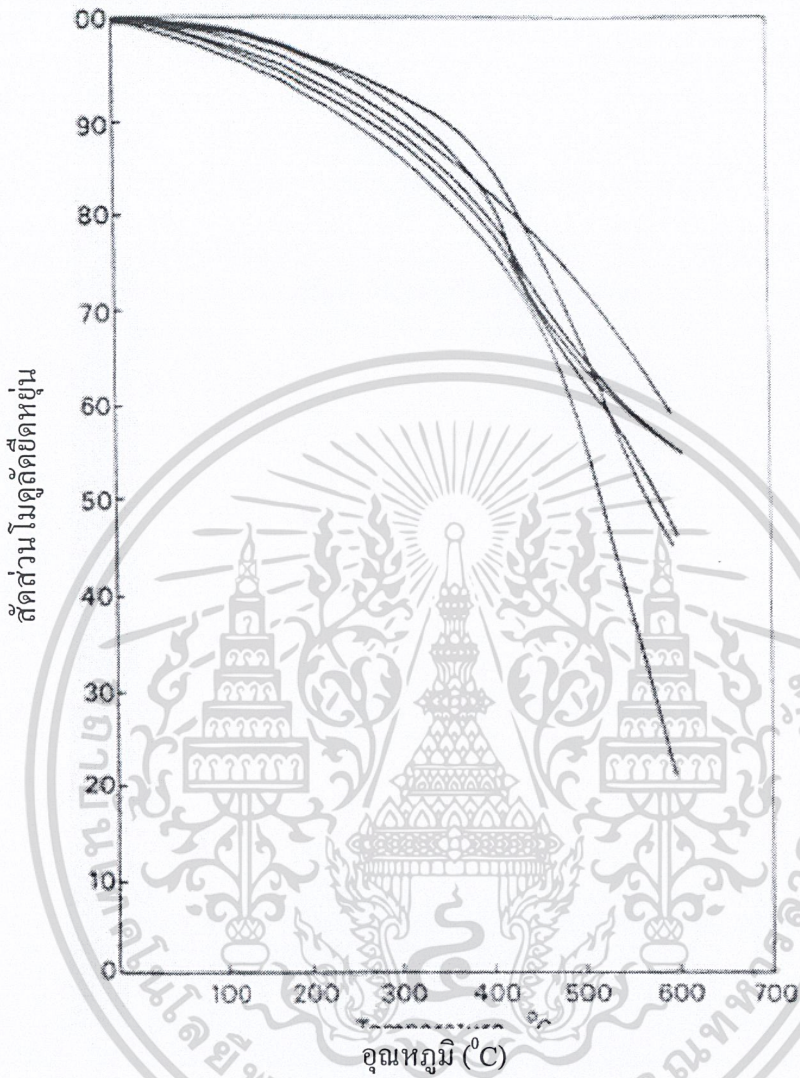
5.2.3 โมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

โมดูลัสยืดหยุ่นของเหล็กเสริมและเหล็กรูปพรรณ แสดงในรูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 ซึ่งเป็นการศึกษาโดย Anderberg และ Copler จากกราฟจะพบว่าค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คงเหลือมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจากกราฟจะแสดงเป็นค่าสูงสุด,ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยของตัวอย่างในแต่ละอุณหภูมิ



รูปที่ 5.18 โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กเส้นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

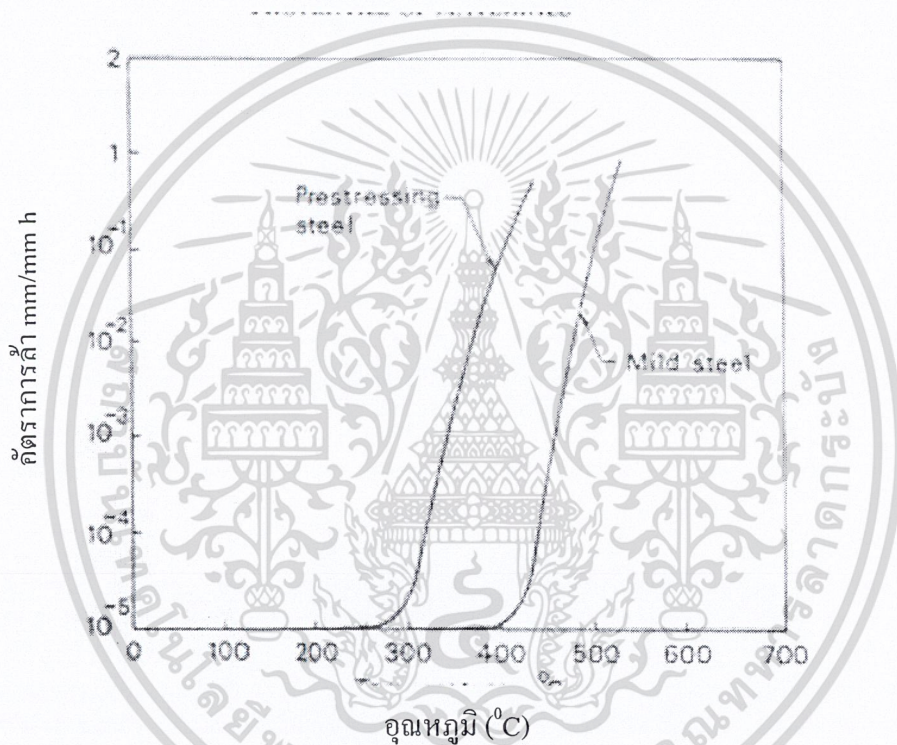


รูปที่ 5.19 โมดูลัสความยืดหยุ่นของเหล็กรูปพรรณ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 53 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 การล้า (Creep)

การล้าของเหล็กเสริมหลังจากได้รับความร้อนเพียงชั่วคราวจะไม่ใช่สำคัญนัก และการวัดการล้าจะต้องกระทำในสภาวะคงที่ (Steady State) แต่จากการศึกษาพบว่า เมื่ออุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส ความเครียดจากการล้ามีปริมาณน้อยมาก แต่หากเพิ่มอุณหภูมิของเหล็กให้สูงขึ้น ความเค้นเนื่องจากอุณหภูมิจะมีผลทำให้ความเครียดจากการล้าเพิ่มขึ้น รูปที่ 5.20 แสดงข้อมูลของความเครียดจากการล้าของเหล็กรูปพรรณและลวดอัดแรง เนื่องจากอุณหภูมิจากข้อมูลศึกษาของ Harmathy

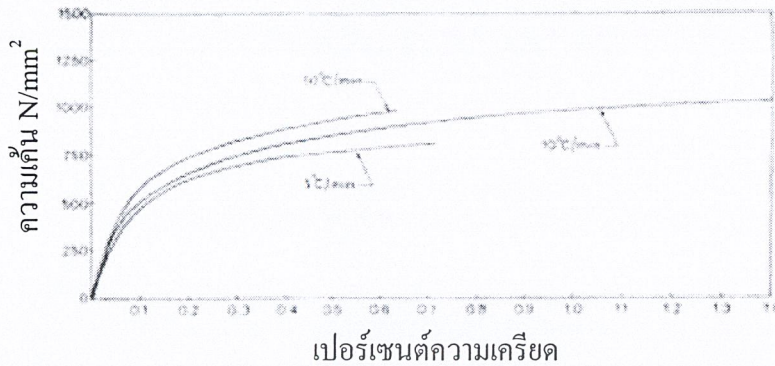


รูปที่ 5.20 อัตราการล้าสำหรับลวดเหล็กอัดแรง (ASTM A421) และเหล็กกล้าละมุน (ASTM A36)

5.2.5 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความเค้นและความเครียด (Stress / Strain Relationship)

การทดลองด้านความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด เนื่องจากอุณหภูมิเป็นเรื่องที่ไม่นิยมทำกันนัก ในการทดสอบจะทำการให้แรงภายนอกก่อนการเพิ่มอุณหภูมิ แล้วจะทำการทดสอบจนถึงจุดที่เกิดการวิบัติ ในการวัดความเครียดจะได้จากการรวมความเครียดจากการล้าและความเครียดจากน้ำหนักบรรทุกและการขยายตัวอย่างอิสระเนื่องจากอุณหภูมิ ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์แสดงดังกราฟ รูปที่ 5.21

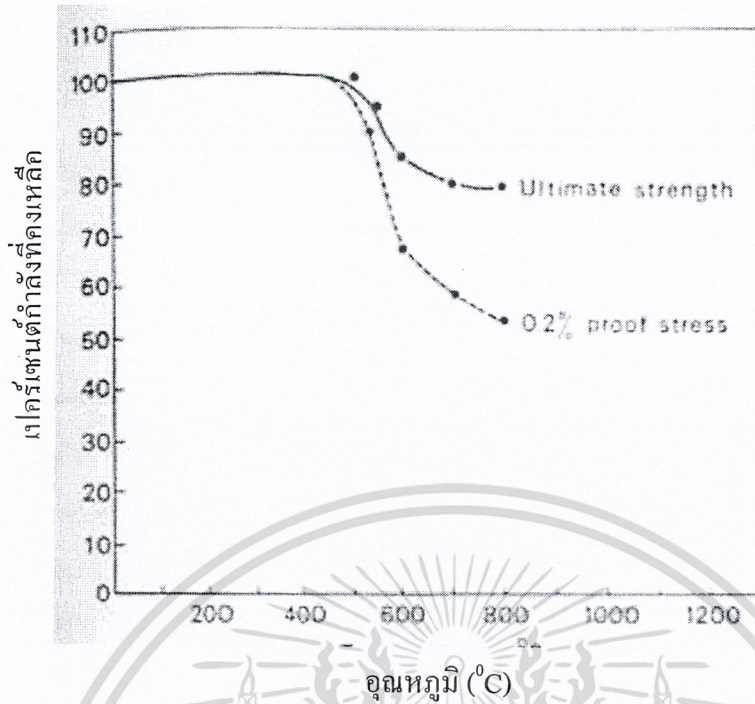
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา 54 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



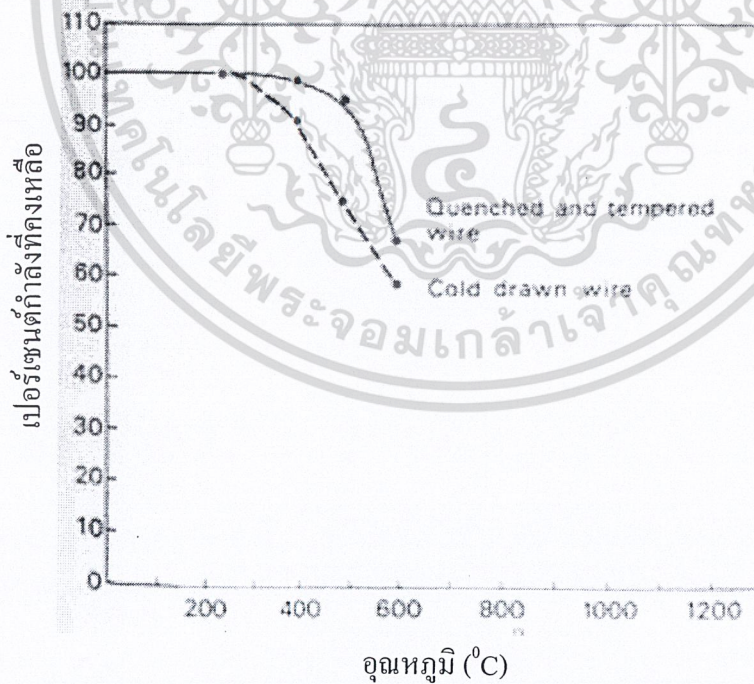
รูปที่ 5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดสำหรับเหล็กที่อุณหภูมิ 600 °C แสดงผลกระทบของอัตราการให้ความร้อน (Malhotra, 1982)

5.2.6 กำลังที่คงเหลือ (Residual Strength)

การใช้โครงสร้างหลังจากเกิดเพลิงไหม้โดยปราศจากการซ่อมแซม จำเป็นต้องมีข้อมูลของกำลังที่คงเหลือหลังจากวัสดุเย็นตัวลง รูปที่ 5.22 แสดงกำลังที่คงเหลือของเหล็กเสริม ซึ่งเป็นกำลังที่เหลืออยู่หลังจากการเย็นตัวเมื่อถูกให้ความร้อน 500 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการสูญเสียกำลังอย่างถาวรของกำลังคลากและกำลังประลัยจะมีมากขึ้น รูปที่ 5.23 แสดงกำลังที่สูญเสียอย่างถาวรของลวดเหล็กอัดแรง เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 300 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส กำลังที่เหลือจะลดลง 50%



รูปที่ 5.22 กำลังที่คงเหลือของเหล็กเส้นเมื่อได้รับความร้อน (Malhotra, 1982)



รูปที่ 5.23 กำลังที่คงเหลือของลวดเหล็กอัดแรงเมื่อได้รับความร้อน (Malhotra, 1982)

บทที่ 6

การประเมินผลกระทบของโครงสร้างเนื่องจากเพลิงไหม้

การหาความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างหลังจากถูกเพลิงไหม้โดยวิธีการคำนวณ จำเป็นต้องทราบข้อมูลเกี่ยวกับ ลักษณะของช่องเปิด (Ventilation), ชนิดและปริมาณของเชื้อเพลิง(Fuel Load), ลักษณะของห้อง(Compartment) ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อข้างต้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างกับสภาวะที่เกิดเพลิงไหม้ เมื่อชิ้นส่วนของโครงสร้างอยู่ในสภาวะถูกเพลิงไหม้ ผิวด้านนอกของโครงสร้างจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี(Radiation) การเพิ่มอุณหภูมิที่ผิวของคอนกรีตจะทำให้อุณหภูมิภายในหน้าตัดสูงขึ้น เนื่องจากการนำความร้อน (Conduction) เป็นผลให้ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุเปลี่ยนไป

6.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็น

อัตราการเพิ่มอุณหภูมิภายในชิ้นส่วนของโครงสร้าง จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านความร้อนของวัสดุ ได้แก่ การนำความร้อน (Conduction,k), ความหนาแน่น (Density, ρ) และ ความร้อนจำเพาะ (Specific Heat,c) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\varphi = \rho c \quad (6.1)$$

เมื่อ φ คือ ความสามารถในการแพร่อุณหภูมิ (Diffusivity) ของวัสดุ

ในกรณีของวัสดุที่นำความร้อน เช่น เหล็ก จะมีความสามารถในการแพร่อุณหภูมิสูง ซึ่งทำให้อุณหภูมิภายในหน้าตัดสม่ำเสมอ ขณะที่วัสดุที่มีความสามารถในการแพร่อุณหภูมิต่ำ เช่น ไม้ , คอนกรีต ความแตกต่างของอุณหภูมิภายในหน้าตัดจะเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดการขยายตัวที่แตกต่างกันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนรูปของโครงสร้าง

การนำความร้อนของโครงสร้างจากผิวเข้าสู่ภายในหน้าตัดสามารถแสดงความสัมพันธ์โดยอาศัยกฎของฟูรีเยร์ (Fourier 's Law) ซึ่งในกรณี 3 มิติ สามารถแสดงได้โดยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6.2)$$

เมื่อ

k_x, k_y, k_z คือ ค่าความนำความร้อน (Conductivity)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density)

c คือ ความจุความร้อน (Specific Heat)

T คือ อุณหภูมิ

t คือ เวลา

สมการดังกล่าวจะต้องหา Boundary Condition มาเพื่อใช้ในการคำนวณ ซึ่งอาจเป็นอุณหภูมิในห้องก่อนเกิดเพลิงไหม้ หรือ เป็นอุณหภูมิของก๊าซร้อนที่หมุนเวียนอยู่ภายในห้อง ซึ่งขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนของสภาวะเพลิงไหม้และผิวของโครงสร้างที่รับความร้อน

รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนที่มีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของ โครงสร้างมากที่สุดคือ การแผ่รังสี (Radiation) ซึ่งสามารถแสดงตามกฎของ Stefan-Boltzmann การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการพา (Convection) ในการทดสอบก่อนข้างจะคงที่และโดยปกติจะประมาณ $25 \text{ W/m}^2\text{C}$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (6.3)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับผิวที่สัมผัสกับความร้อน โดยตรง

เมื่อ

α_c คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

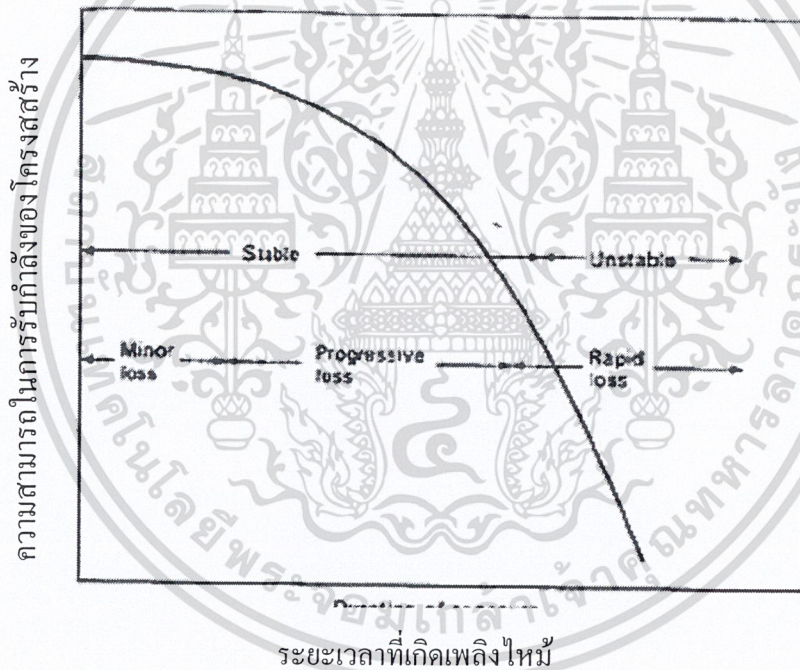
α_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสี

$$\alpha_r = \frac{5.77\varepsilon_r}{T_i - T_0} [(T_i + 273)^4 - (T_0 + 273)^4] \quad \text{W/m}^2\text{C} \quad (6.4)$$

เมื่อ

ε_r คือ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของผิวและการเผาไหม้ของก๊าซซึ่งมีค่าประมาณ 0.5

ขอบเขตของอุณหภูมิแต่ละช่วงเวลา จะสมมติให้ต่ำกว่ากราฟอุณหภูมิมาตรฐานซึ่งจะมีค่าประมาณ 0.85 T เมื่อ T คือ อุณหภูมิของกราฟมาตรฐาน ณ ช่วงเวลาต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์เกี่ยวกับอุณหภูมิจะใช้วิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการคำนวณดังกล่าวได้



รูปที่ 6.1 กำลังที่ลดลงของโครงสร้างเนื่องจากเกิดเพลิงไหม้ (Malhotra, 1982)

ผลกระทบโดยรวมของโครงสร้างเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้น คือความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างลดลง อัตราการลดลงของกำลังจะไม่ลดลงในอัตราที่คงที่ ความสามารถในการรับแรงของโครงสร้างจะค่อยๆ ลดลงในช่วงแรก จากนั้น จะลดลงในอัตราที่มากขึ้นอย่างต่อเนื่อง (รูปที่ 6.1)

6.2 การออกแบบชิ้นส่วนโครงสร้างที่เป็นคอนกรีต (Design of Concrete Element)

โดยทั่วไป วิศวกรผู้ออกแบบจะพบว่าโครงการส่วนใหญ่ นั้น การคำนวณความต้านทานไฟไม่เป็นที่ต้องการของเจ้าของโครงการ เนื่องจากเจ้าของโครงการต้องการจะประหยัดเวลา จากประสบการณ์ แสดงให้เห็นว่าความต้องการต้านทานไฟจะไม่เกิน 2 ชั่วโมง หน้าตัดคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยทั่วไปที่ออกแบบสำหรับโครงสร้างก็พอเพียงสำหรับต้านทานไฟในระยะเวลาดังกล่าว ดังนั้น สามารถจะทำการตรวจสอบความต้านทานไฟอย่างคร่าวๆ จากตาราง “ความรู้สึกรับพอใจ” (Deemed to Satisfy) แต่สำหรับโครงสร้างแบบลวดแรงดึงจำเป็นต้องมีการคำนวณเพื่อยืนยันความสามารถต้านทานต่อเพลิงไหม้ได้

6.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

กราฟการกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดโครงสร้างที่กล่าวดังต่อไปนี้ ได้มาจากการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม WinTherm ซึ่งวิธีการใช้และวิธีการสร้างกราฟด้วยโปรแกรมดังกล่าวจะกล่าวไว้ในภาคผนวก ก.

6.3.1 พื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก

ชิ้นส่วนของ โครงสร้างจะถูกเอามาวิเคราะห์หลังจากเกิดเพลิงไหม้ ขั้นตอนต่อมาคือ พิจารณาการกระจายอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของหน้าตัดหรือตำแหน่งวิกฤติของหน้าตัด เช่น บริเวณของเหล็กเสริม ความสัมพันธ์ที่กำหนดขึ้นมาเองจะถูกเอามาสร้างกราฟการกระจายอุณหภูมิภายในหน้าตัด รูปที่ 6.2 แสดงอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีต โดยความหนาของพื้นคอนกรีตเท่ากับ 10 เซนติเมตร เมื่อถูกให้ความร้อนในห้องเผา 2 ชั่วโมง

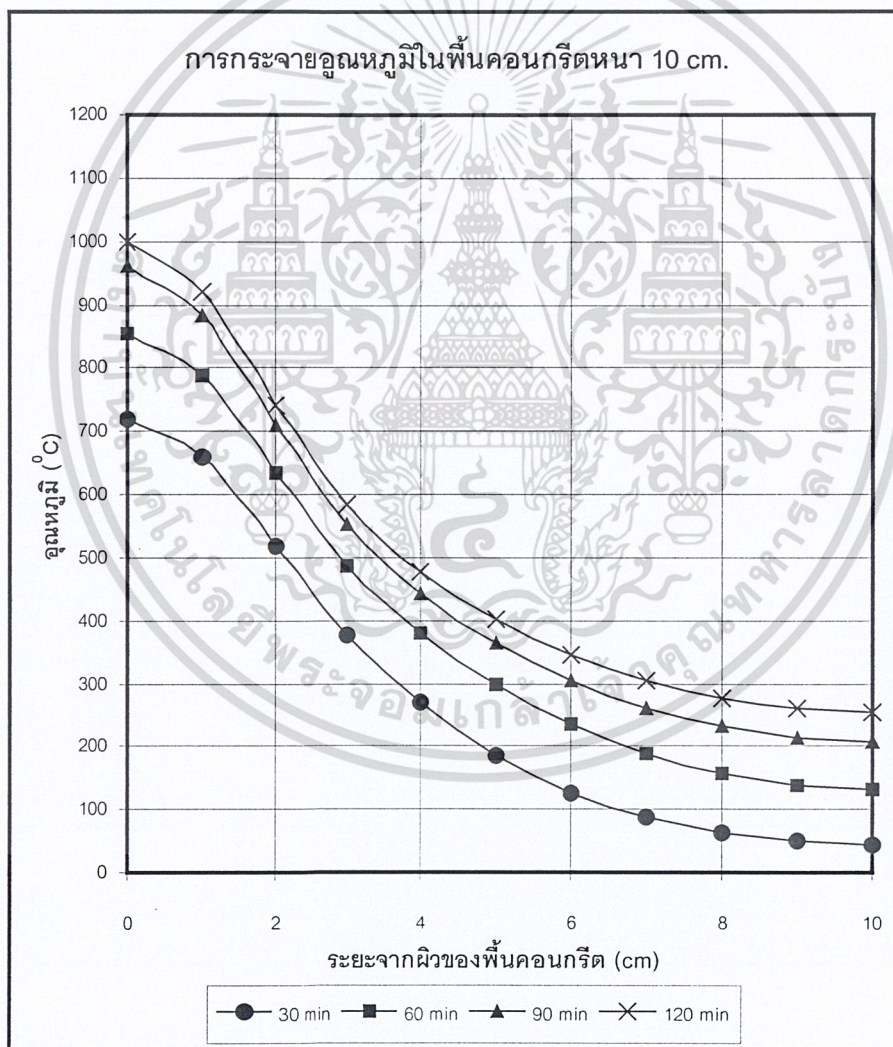
6.3.2 คานคอนกรีตเสริมเหล็ก

ในกรณีของคานที่มีผิวหน้าที่สัมผัสกับความร้อน โดยตรง 3 ด้าน อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในหน้าตัดเร็วกว่ากรณีของพื้น และเส้นแสดงอุณหภูมิที่เท่ากันภายในหน้าตัดคานมีลักษณะเป็นรูปตัวยู ดังรูปที่ 6.3 รูปที่ 6.4 และ รูปที่ 6.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิของคานคอนกรีตซึ่งมีความกว้าง 20 เซนติเมตร

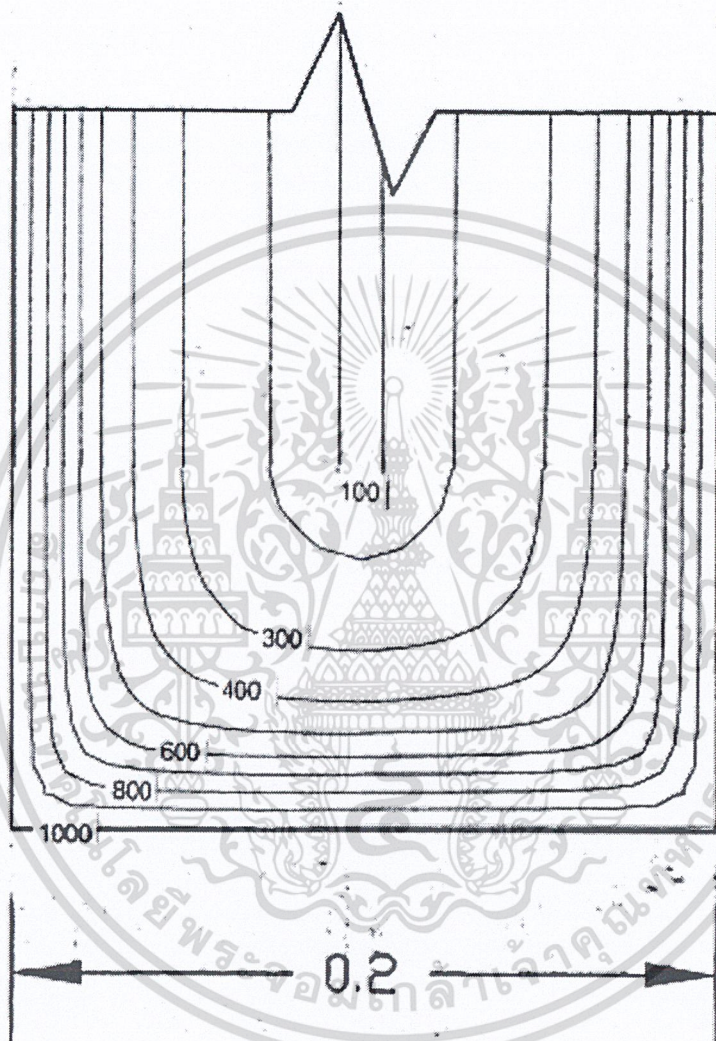
6.3.3 เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในเสามีลักษณะเหมือนคานแต่การกระจายอุณหภูมิที่มากกว่าเมื่อความกว้างเท่ากัน รูปที่ 6.6 แสดงเส้นแสดงอุณหภูมิที่เท่ากันของเสาซึ่งมีความกว้าง 20 เซนติเมตร รูปที่ 6.7 และ 6.8 แสดงการกระจายอุณหภูมิภายในเสาซึ่งกว้าง 20 เซนติเมตร

สำหรับกราฟการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่, คาน, เสาคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดต่างๆ กัน จะยกไปนำเสนอในภาคผนวก ข., ก. และ ง. ตามลำดับ

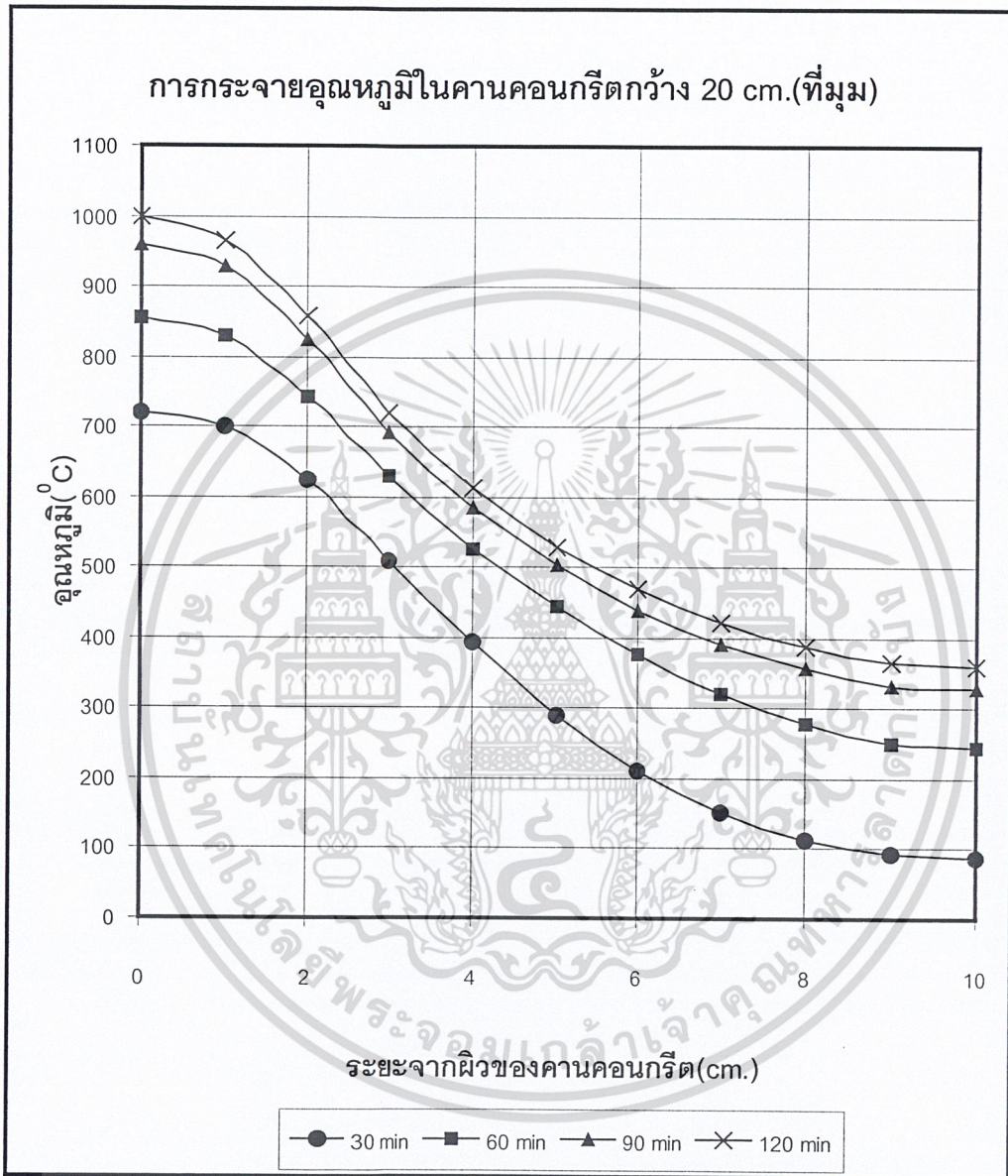


รูปที่ 6.2 กราฟการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหน้า 10 เซนติเมตร



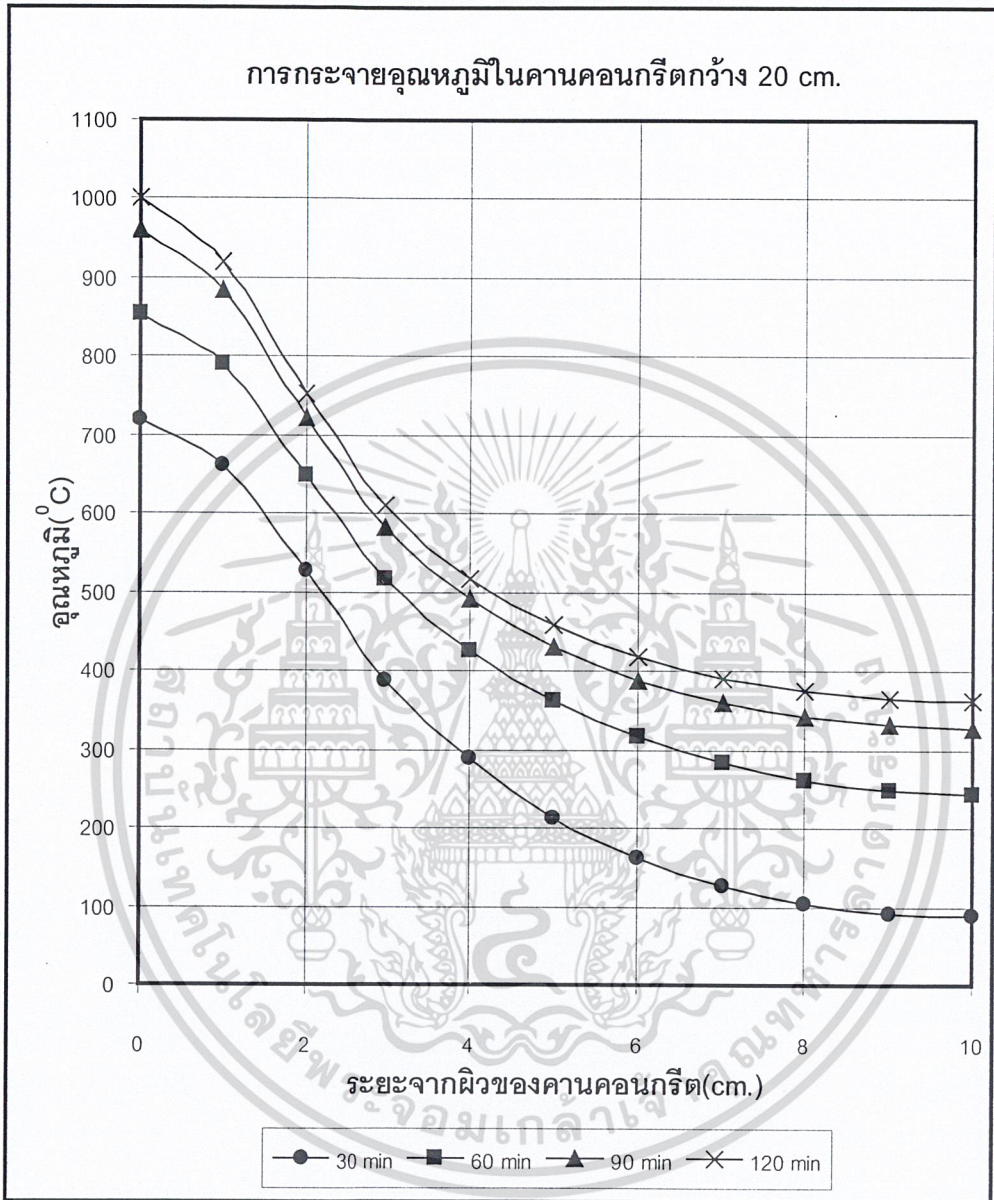
รูปที่ 6.3 เส้นอุณหภูมิที่เท่ากัน(Isotherm)ของคานที่มีความกว้าง 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



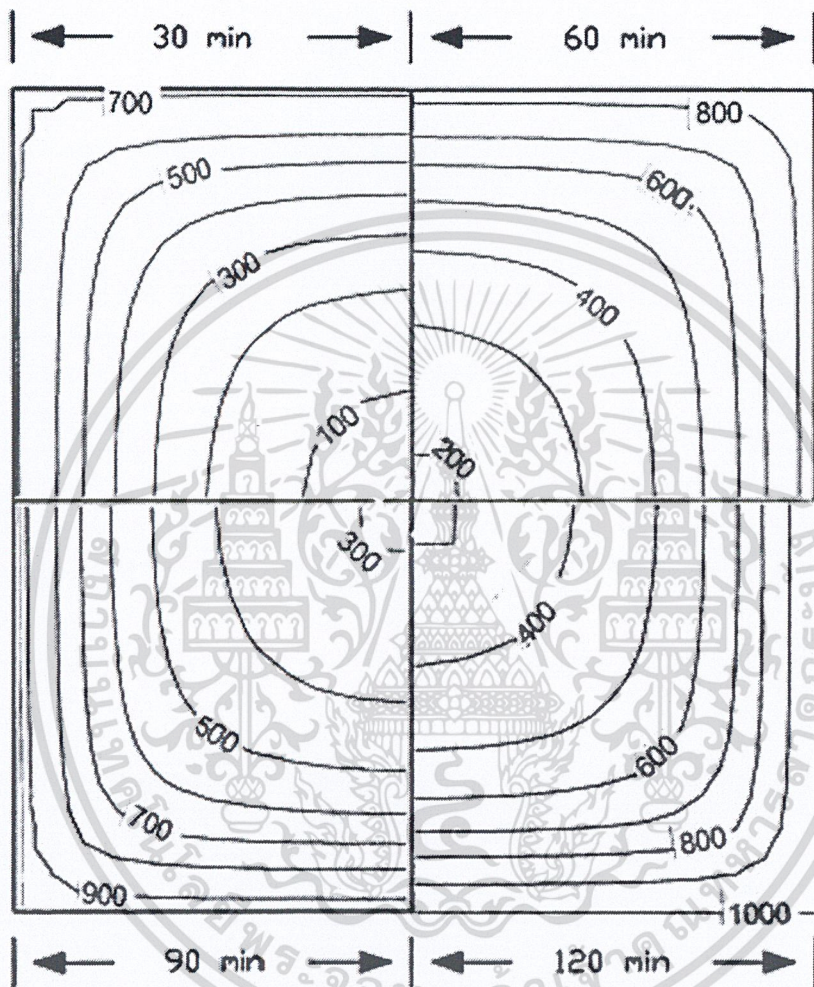
รูปที่ 6.4 การกระจายอุณหภูมิในคานกว้าง 20 เซนติเมตร(มีการถ่ายเทความร้อน 2 ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



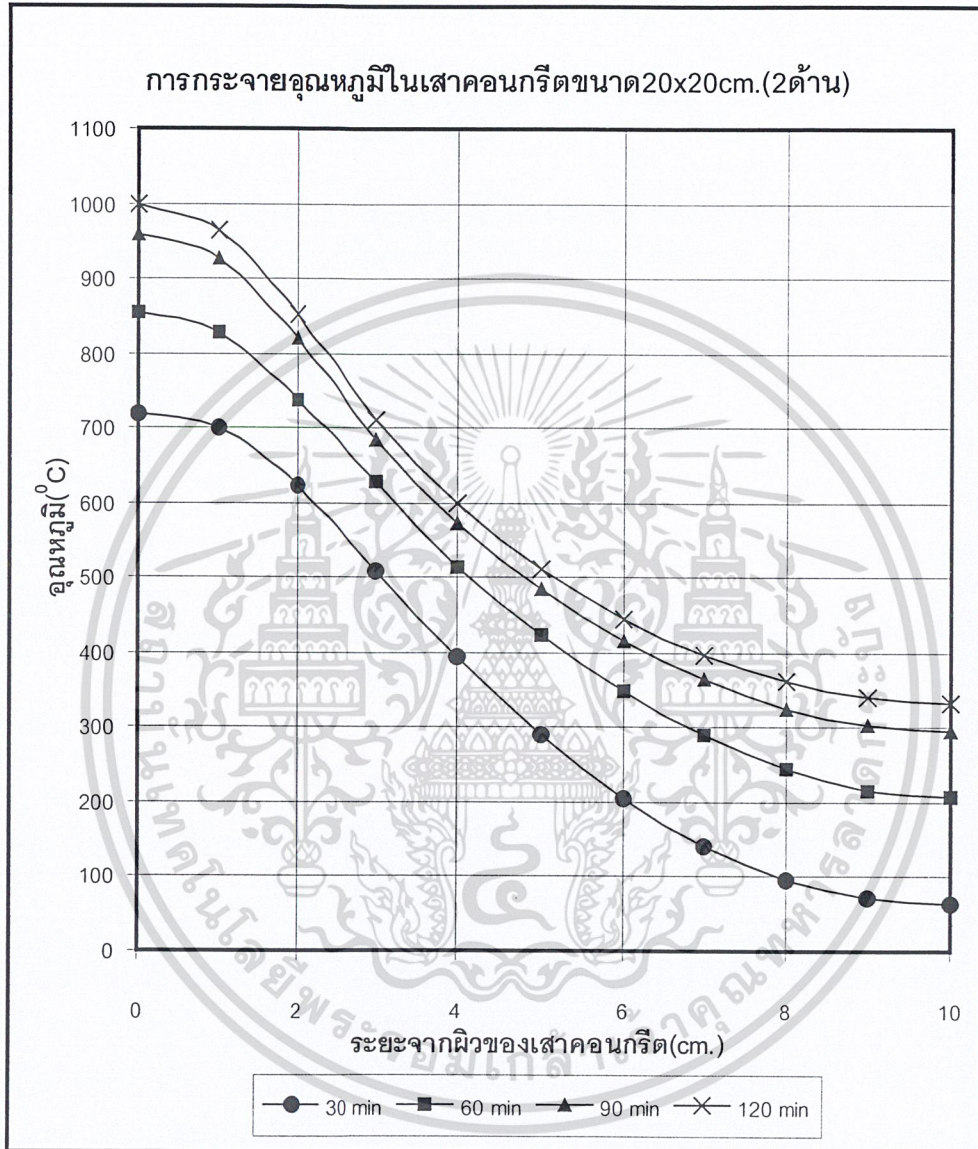
รูปที่ 6.5 แสดงการกระจายอุณหภูมิในคานกว้าง 20 เซนติเมตร (ถ่ายเทความร้อนด้านเดียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



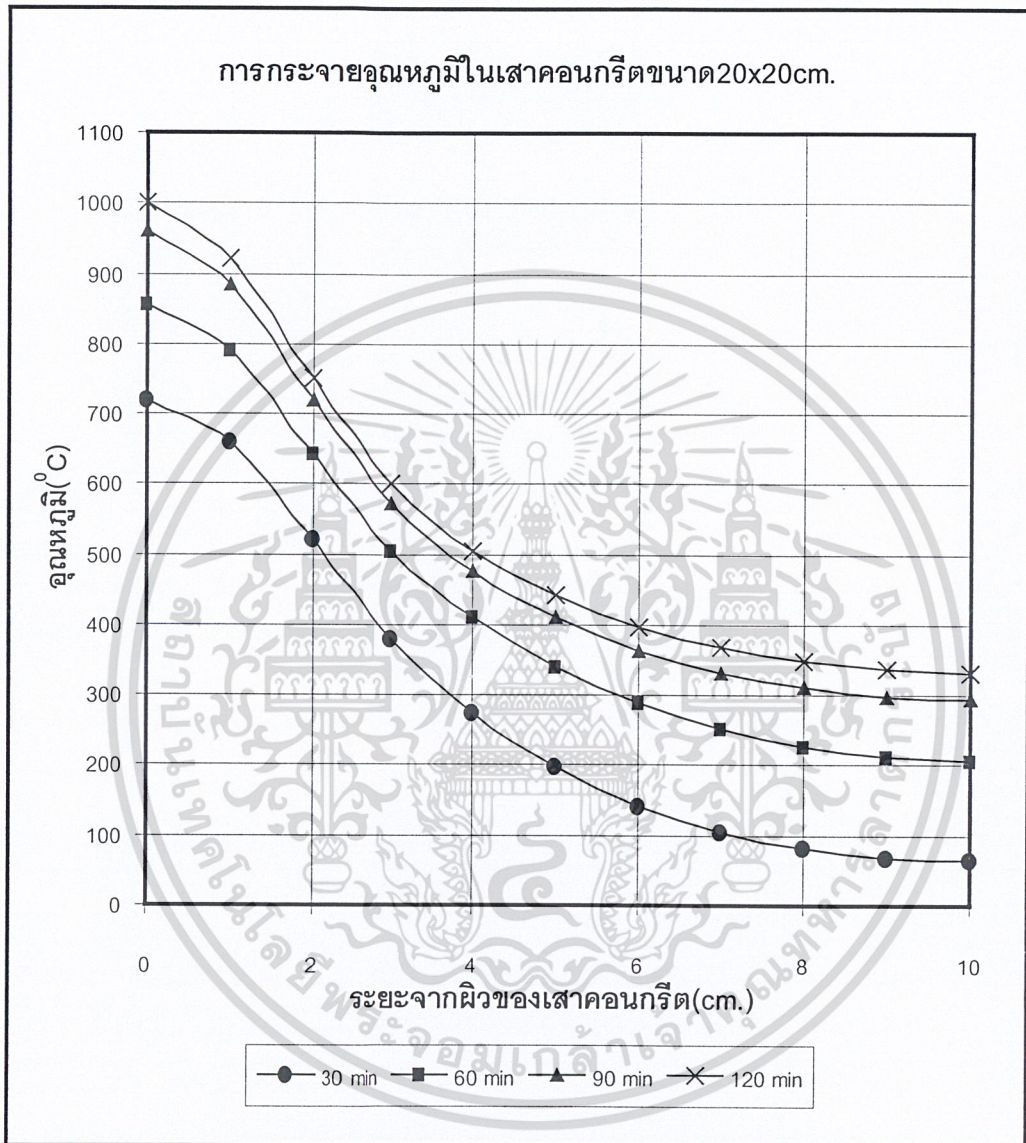
รูปที่ 6.6 เส้นอุณหภูมิที่เท่ากัน (Isotherm) ของเสาที่มีขนาด 20X20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.7 การกระจายอุณหภูมิในเสาขนาด 20×20 เซนติเมตร (ถ่ายเทความร้อน 2 ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.8 การกระจายอุณหภูมิในเสาขนาด 20×20 เซนติเมตร (ถ่ายเทความร้อนด้านเดียว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 ชั้นส่วนรับแรงดัด

ในโครงสร้างรับแรงดัด ข้อมูลการเพิ่มของอุณหภูมิมีผลต่อการประมาณอุณหภูมิของเหล็กเสริมดังนี้ สำหรับพื้นที่ที่มีเหล็กเสริมชั้นเดียวอุณหภูมิสามารถวิเคราะห์จากรูปที่ 6.2 โดยการอ่านอุณหภูมิที่ระยะเดียวกับระยะหุ้มเหล็กเสริม หากเหล็กเสริมมีการเสริมเหล็กหลายชั้น การประมาณระยะหุ้มเฉลี่ย สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$C_{av} = \frac{A_{S1}C_1 + A_{S2}C_2 + A_{S3}C_3 + \dots + A_{SN}C_N}{A_{S1} + A_{S2} + A_{S3} + \dots + A_{SN}} \quad (6.5)$$

เมื่อ

$$C_{av} = \text{ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเฉลี่ย} \quad (\text{cm})$$

$$A_{si} = \text{พื้นที่หน้าตัดเหล็กเสริมเส้นที่ } i \quad (\text{cm}^2)$$

$$C_i = \text{ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมเส้นที่ } i \quad (\text{cm})$$

สำหรับคานสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม จะวัดจากระยะที่น้อยที่สุดสำหรับคานรูปตัวไอ ระยะหุ้มคอนกรีตเฉลี่ยจะถูกลดลงเหลือ 60% จากค่าที่ได้จากสมการข้างบนเพื่อชดเชยการถ่ายเทความร้อน

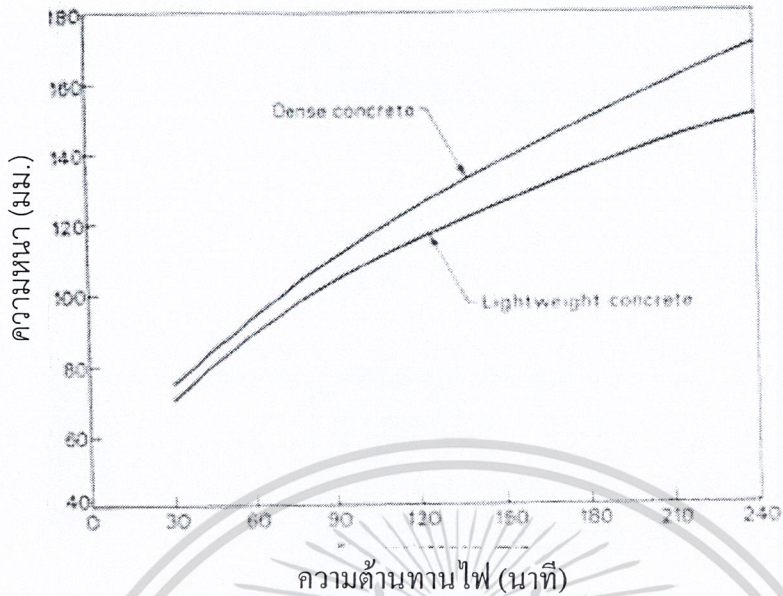
พื้นคอนกรีตเสริมเหล็กต้องมีการตรวจสอบถึงอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นบนผิวหน้าด้านที่ได้รับความร้อน รูปที่ 6.9 แสดงความหนาแน่นที่สุดของพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก เพื่อที่จะเป็นฉนวนสำหรับความต้านทานเพลิงไหม้ สำหรับคอนกรีตมวลเบาและคอนกรีตธรรมดา สำหรับพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กแบบกลวง (Hollow Slab) ความหนาประสิทธิภาพจะได้จากสมการดังนี้

$$d_{effective} = D\sqrt{S} \quad (6.6)$$

เมื่อ

S คือ อัตราส่วนของพื้นที่คอนกรีตต่อพื้นที่รูกลวง

D คือ ความหนาของพื้น (cm)



รูปที่ 6.9 ความหนาของพื้นคอนกรีตสำหรับช่วงเวลาความต้านทานไฟต่างๆ (Malhotra, 1982)

6.4.1 วิธีการออกแบบชิ้นรับแรงดัด

1. คำนวณน้ำหนักออกแบบมากที่สุด หรือน้ำหนักบรรทุกทุกใช้งานสำหรับชิ้นส่วน
2. คำนวณโมเมนต์ที่มากกระทำ
3. คำนวณหาความสามารถต้านทาน โมเมนต์รวม
4. พิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยของเหล็กเสริม
5. คำนวณหาค่าดึงรับแรงดึงของเหล็กเสริมที่ลดลง
6. พิจารณาอุณหภูมิเฉลี่ยของคอนกรีตในส่วนของคอนกรีตที่รับแรงอัด
7. คำนวณความสามารถรับแรงดัดของคอนกรีตที่ลดลง
8. แทนค่าแรงดึงในเหล็กเสริมและแรงอัดในคอนกรีตในสมการ
9. คำนวณความสามารถรับ โมเมนต์ที่ลดลงของหน้าตัด
10. เปรียบเทียบความต้านทาน โมเมนต์ที่ลดค่าแล้วกับ โมเมนต์ใช้งาน

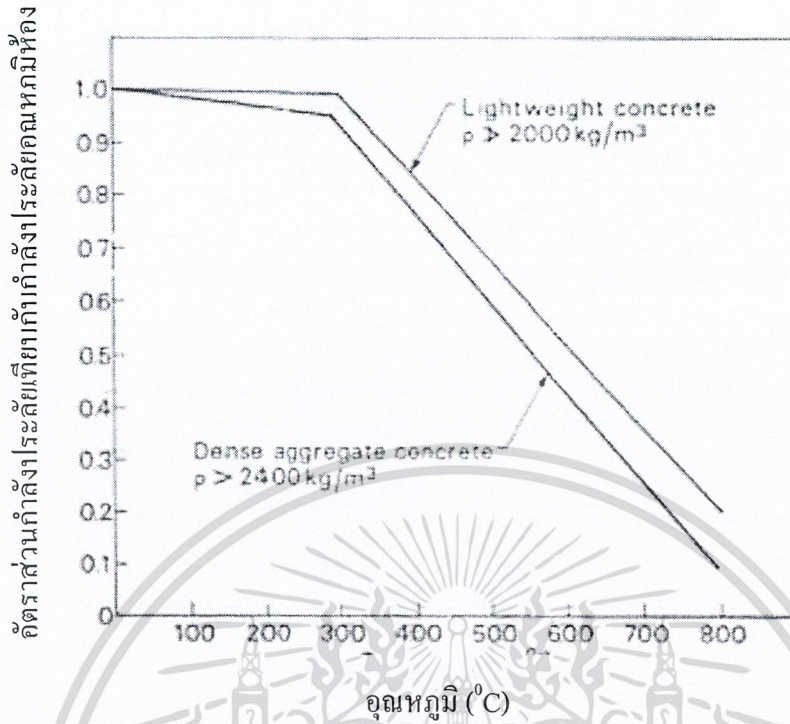
6.5 คุณสมบัติของวัสดุที่อุณหภูมิสูง (High temperature properties of Materials)

จากการออกแบบในขั้นที่ 5 และ 7 ดังแสดงข้างต้น จำเป็นต้องมีข้อมูลกำลังของวัสดุที่ลดลงของเหล็กเสริมและคอนกรีต ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.10 และ 6.11 ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ ได้แสดงในบทที่กล่าวมาข้างต้น ตารางที่ 6.1 แสดง ตัวคูณลดกำลัง (Strength Reduction Factor) ของคอนกรีต

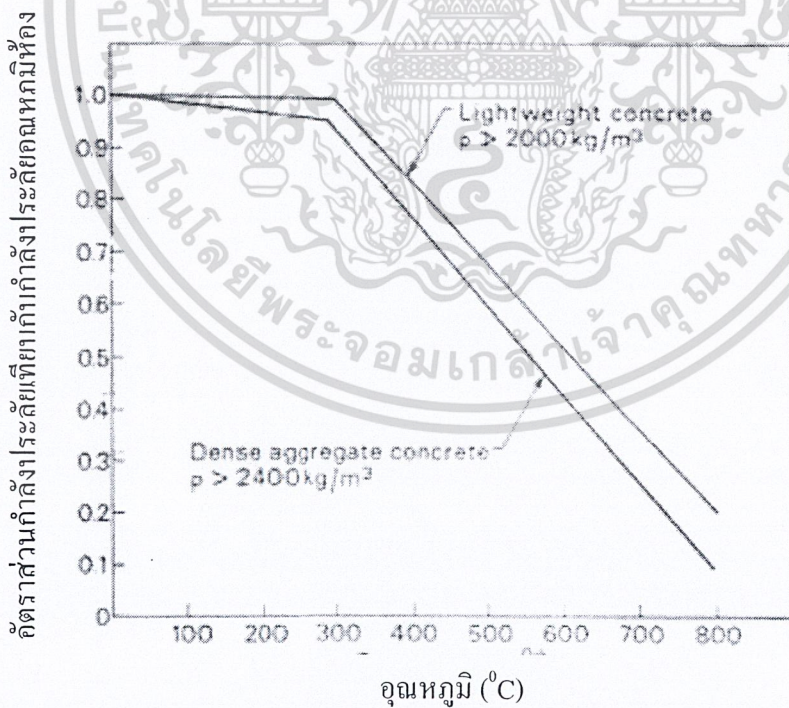
ตารางที่ 6.1 ตัวคูณลดกำลัง (σ_T) (Malhotra, 1982)

วัสดุ	ช่วงอุณหภูมิ(°C)	σ_T
คอนกรีต	20-300	$1 - \frac{T^0}{6000}$
	300-800	$0.95 - \frac{T^0 - 300}{588}$
คอนกรีตมวลเบา	20-300	1.0
	300-800	$1 - \frac{T^0 - 300}{625}$
เหล็กเสริมคอนกรีต	20-300	$1 - \frac{T^0}{6000}$
	300-800	$0.95 - \frac{T^0 - 300}{421}$
ลวดเหล็กอัดแรง	20-200	$1 - \frac{T^0}{4000}$
	200-700	$0.95 - \frac{T^0 - 200}{526}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.10 กราฟการลดลงของกำลังอัดคอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ (Malhotra, 1982)



รูปที่ 6.11 กราฟการลดลงของกำลังรับแรงดึงของมวลเหล็กอัดแรงที่อุณหภูมิต่างๆ (Malhotra, 1982)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ทราบข้อมูลเบื้องต้น ลักษณะโครงสร้างของอาคาร, วัสดุเชื่อมเหล็ก, ช่องเปิดของอาคาร, ระยะเวลาของเพลิงไหม้
2. หากำลังของวัสดุหลังจากทราบสถานะเบื้องต้นจากคุณสมบัติของวัสดุ (เอามาตรวจสอบกำลังของวัสดุระหว่างจากข้อมูลเบื้องต้นกับการสำรวจจริง)
3. วิเคราะห์ความสามารถในการใช้งานได้ของอาคารจากวิธี Finite Element และ Composite Section
4. ประเมินกำลังของโครงสร้างจากกราฟ Recovery ณ เวลาต่างๆ หลังเกิดเพลิงไหม้

6.7 ตัวอย่างการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารห้างสรรพสินค้าสยามจัสมัโก้ ถนนรัชดาภิเษก แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร

อาคารห้างสรรพสินค้า สยามจัสมัโก้ เป็นอาคาร โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก สูง 3 ชั้น รวมเนื้อที่ 25,000 ตร.ม. พื้นชั้น 1 เป็นพื้นสำเร็จรูปวางบนคาน ชั้น 2,3 และคานฟ้า เป็นพื้นระบบ Post Tension ชนิด Unbonded Tendon เนื่องจากวันที่ 1 กันยายน 2539 อาคารดังกล่าวได้ถูกเพลิงไหม้บริเวณ ชั้น 3 ต้นเพลิงเกิดที่ Zone A แล้วลามต่อไปยัง Zone B เป็นเวลา 6 ชั่วโมง (ดูแปลนในรูปที่ 6.13) จึงทำให้เกิดความเสียหายกับอาคารดังกล่าว จากการสำรวจเบื้องต้นโดยภาคีวิชาชีพวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พบว่า บริเวณ Zone A และ Zone B ของพื้นคานฟ้าชั้นบน คอนกรีตแตกร้าว และลวด Post Tension ขาด

ผลการทดสอบ

1. การตรวจสอบทางกายภาพ

- 1.1 สภาพทางกายภาพของโครงสร้างอาคารห้างสรรพสินค้า สยามจัสมัโก้ที่ถูกเพลิงไหม้ จากการสำรวจเบื้องต้นพบว่า สภาพทางกายภาพของโครงสร้างชั้น 1 และ 2 ซึ่งไม่ถูกเพลิงไหม้ มีสภาพสมบูรณ์ ส่วนโครงสร้างบริเวณชั้น 3 และชั้นคานฟ้าที่ถูกเพลิงไหม้มีสภาพดังนี้

ชั้นที่ 3

- เสาที่มีสภาพดังนี้ เสาในช่วง Grid Line 9-12, Zone C เสียหายเล็กน้อย เนื้อคอนกรีตของเสา ยังคงความแข็งแรง ไม่ผุยุ่ย และไม่แตกร้าว
- เสาในช่วง Grid Line 1-9, Zone A และ B เสียหายเล็กน้อย เนื้อคอนกรีตของเสา ยังคงความแข็งแรง ไม่ผุยุ่ย และไม่แตกร้าว
- พื้นที่มีสภาพดังนี้ พื้นชั้น 3 ผิวพื้นในช่วง Grid Line 9-12, Zone C เสียหายบ้างเล็กน้อยไม่ ถึงกับกระเทาะหรือร่อนออกมา
- พื้นชั้น 3 ในช่วง Grid Line 1-9, Zone A และ B เสียหายพอสมควร แต่ไม่ถึงกับกระเทาะ หรือร่อนออกมา
- ท้องพื้นลาดฟ้าในช่วง Grid Line 1-9, Zone A และ B เนื้อคอนกรีตบางแห่ง บริเวณท้องพื้น หลุดร่อนจนเห็นเหล็กเสริมและบางแห่งลวดเหล็กอัดแรงขาด

ชั้นลาดฟ้า

- พื้นชั้นลาดฟ้าในช่วง Grid Line 9-12, Zone C โดยทั่วไปไม่ปรากฏความเสียหายให้เห็น
- พื้นชั้นลาดฟ้าในช่วง Grid Line 1-9, Zone A และ B ระดับพื้นบางแห่งมีการทรุดตัวอย่าง ชัดเจน

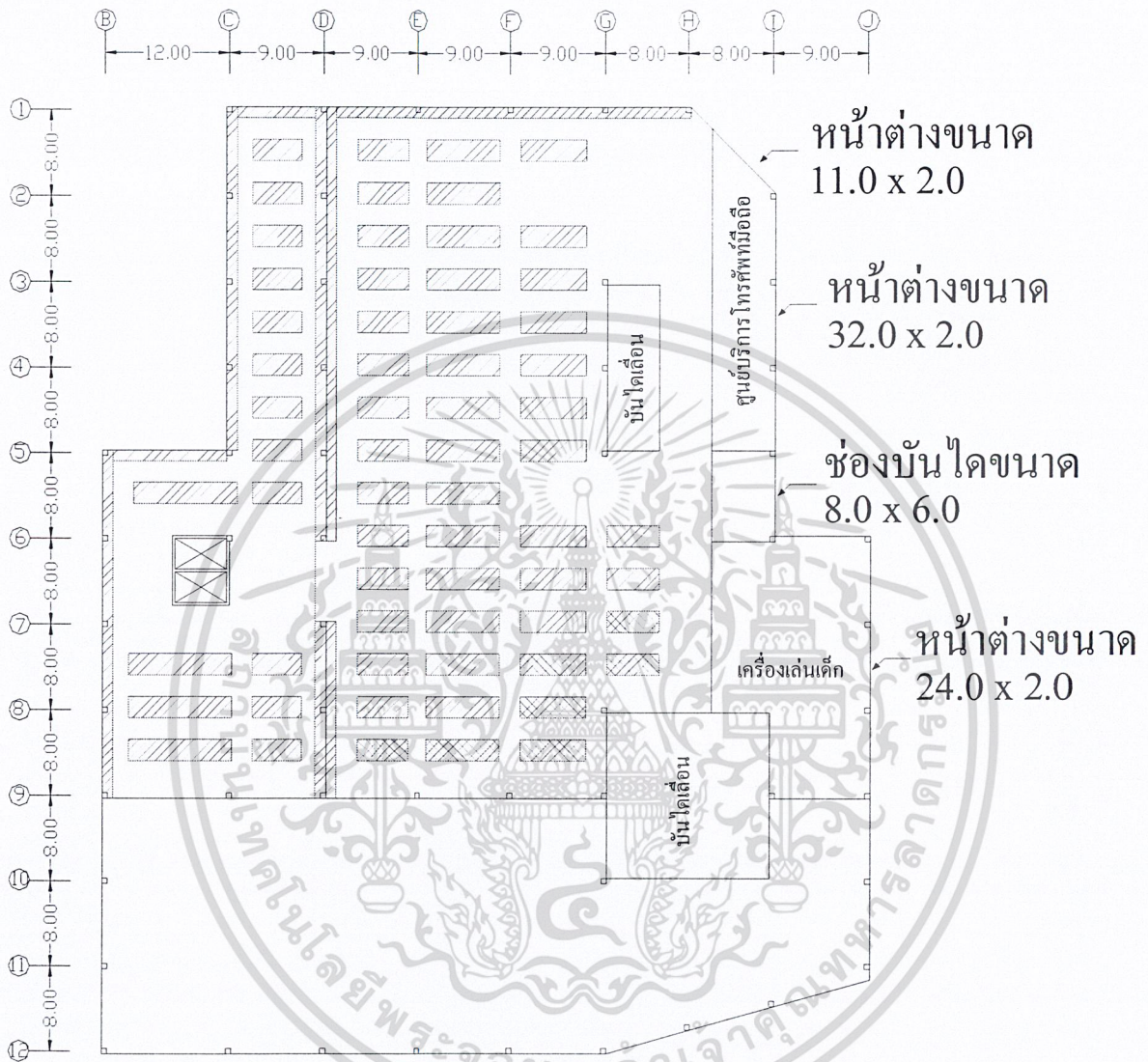
ตารางที่ 6.2 ตารางแสดงค่ากำลังรับแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การยึดของเหล็กที่ถูกเพลิงไหม้ (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจล., 2539)

ตัวอย่างที่	เส้นผ่านศูนย์กลาง (cm)	ค่ากำลังดึงของเหล็ก		%การยึดตัว	หมายเหตุ
		Yield	Ultimate		
1	DB10	4,554	6,737	18.00	
2	DB10	4,508	6,713	24.00	
3	DB10	4,680	6,833	26.00	
4	DB12	4,007	6,115	26.67	
5	DB12	4,102	6,133	23.33	
6	DB12	4,088	6,158	28.33	

ตารางที่ 6.3 ตารางแสดงค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีต จากตัวอย่าง Coring Concrete(ภาควิชา วิศวกรรมโยธา สจล.,2539)

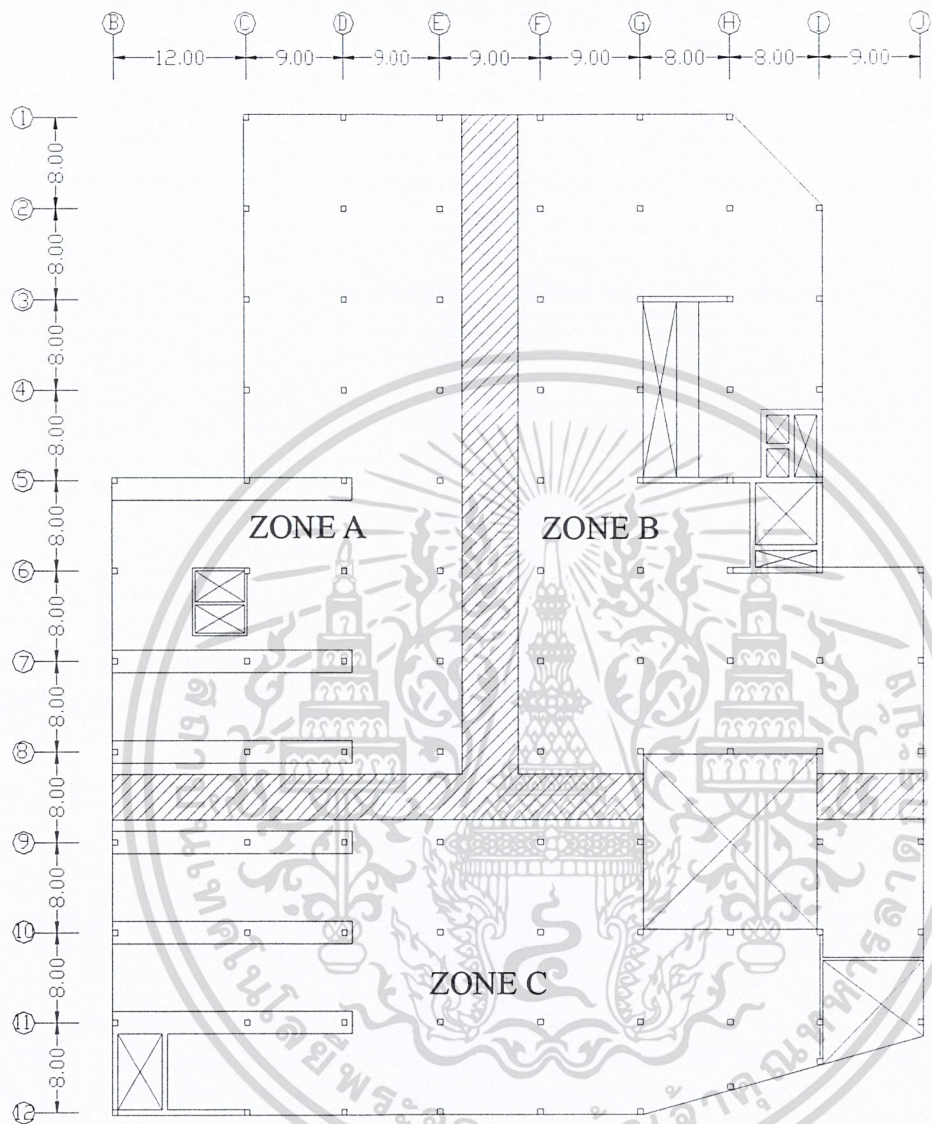
ตัวอย่างที่	ตำแหน่ง Grid Line	Strength Correction Factor	กำลังอัดประลัยของคอนกรีต (ksc.)		หมายเหตุ Zone/Floor
			พื้นที่ชั้นที่ 3	พื้นที่ชั้นคานฟ้า	
1	3-4,D-E	0.964	291.13		A/3
2	4-5,C-D	0.965	259.45		A/3
3	7-8,C-D	0.977	254.90		A/3
4	2-3,G-H	0.930	254.00		B/3
5	4-5,F-6	0.960	243.31		B/3
6	5-6,G-H	0.965	252.62		B/3
7	9-10,D-E	0.970	342.56		B/3
8	9-10,F-G	0.970	296.56		C/คานฟ้า
9	10-11,E-F	0.956	277.05		C/คานฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.12 แพลนชั้น 3 ห้างสรรพสินค้าสยามจัสโก้ ถนนรัชดาภิเษก เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร แสดงชนิดและตำแหน่งของเชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ๗๕ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3 rd. FLOOR PLAN

รูปที่ 6.13 แพลนโครงสร้าง ห้างสรรพสินค้าสยามจัสโก้ ถนนรัชดาภิเษก เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทา Equivalent Fire Resistance

จากสมการที่ (4.5)

$$t_e = 0.067(598) \left[\frac{8663}{374\sqrt{2}} \right]^{\frac{1}{2}}$$
$$= 162 \text{ นาที}$$

4. เปิดกราฟการกระจายอุณหภูมิของพื้นคอนกรีตหนา 25 เซนติเมตร(รูปที่ ผ.ค.4.) และเสาขนาด50 × 50 เซนติเมตร (รูปที่ ผ.ข.9.) เพื่อหาค่าตั้งของเหล็กเสริมที่ระยะ Covering ต่างๆ

จากกราฟ(รูปที่ ผ.ค.4.) อ่านค่าอุณหภูมิที่ระยะ Covering 3 cm ของพื้นซึ่งเป็นตำแหน่งวางเหล็กกันร้าว DB 10 และลดเหล็กอัดแรงมีค่า 590 °C และจากการอ่านค่า proportional strength จากกราฟของเหล็กเสริมและลดเหล็กอัดแรง(รูปที่ 6.11)มีค่าเท่ากับ 0.39 และ 0.21 ตามลำดับ ดังนั้นกำลังประลัยของเหล็กกันร้าวDB10ลดเหล็กอัดแรงขณะถูกเพลิงไหม้มีค่าเท่ากับ 2,223 ksc. และ 3,990 ksc. ตามลำดับ ส่วนกำลังที่เหลือขณะเย็นตัวของเหล็กกันร้าว DB 10 และลดเหล็กอัดแรงจากกราฟ (รูปที่ 5.21และ 5.22) มีค่าเท่ากับ 0.86 และ 0.60 ดังนั้นกำลังที่เหลือมีค่าเท่ากับ 4,902 ksc. และ 11400 ksc. ตามลำดับ

จากกราฟ(รูปที่ ผ.ข.9.) อ่านค่าอุณหภูมิที่ผิวนอกและที่ระยะ 7.6cm. จากผิวเสาคอนกรีต มีค่า 1050 °Cและ 300°C ตามลำดับ และจากการอ่านค่า proportional strength จากกราฟของคอนกรีตที่อุณหภูมิดังกล่าว (รูปที่ 6.10) มีค่าเท่ากับ 0.0 และ 1.0 ตามลำดับ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับ 0 ksc. ที่ผิวนอกและ 300ksc. ที่ระยะ 7.6cm. จากผิวเสาคอนกรีต

5. คำนวณสัดส่วนกำลังที่เหลือของโครงสร้างขณะถูกเพลิงไหม้และหลังจากการเย็นตัวของโครงสร้าง

สัดส่วนกำลังเสา

$$\text{กำลังที่ยอมให้ของเสาปลอกเดี่ยว} \quad P = 0.85 \times (0.25A_g f'_c + A_s f_s)$$

P = กำลังรับน้ำหนักโดยปลอกค้ำตามแนวแกนของเสา

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต

A_s = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กยื่น

จากการสำรวจบริเวณส่วนแสดงสินค้าพบว่าพื้นที่ทั้งหมดและพื้นที่แสดงสินค้าเท่ากับ 2,968 และ 655 ตารางเมตรตามลำดับและบริเวณส่วนเก็บสินค้าพบว่าพื้นที่ทั้งหมดและพื้นที่แสดงสินค้าเท่ากับ 960 และ 321 ตารางเมตรตามลำดับน้ำหนักบรรทุกของห้างสรรพสินค้ามีค่าเท่ากับ 400 kg/m² หากคิดว่าสินค้าบริเวณดังกล่าวทำหน้าที่เป็นเชื้อเพลิงขณะเกิดเพลิงไหม้ จะมีน้ำหนักเฉลี่ยต่อตารางเมตรเท่ากับ $\frac{400(665 + 321)}{(2968 + 960)} = 99.4 \text{ kg/m}^2 \approx 100 \text{ kg/m}^2$

(หมายเหตุ พื้นที่ที่แสดงได้จากการสำรวจการจัดวางสินค้าในปัจจุบัน โดยมีสมมติฐานว่ามีการจัดวางใกล้เคียงกับที่เกิดเพลิงไหม้เนื่องจากกรณีศึกษาที่ผ่านมาเป็นเวลานานแล้วจึงไม่สามารถหาข้อมูลที่แท้จริงได้)

จากการสำรวจเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพลาสติกในเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทสามารถสรุปได้ดังนี้ ตารางที่ 6.4 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักของพลาสติกในเครื่องใช้ไฟฟ้า

ชนิดเครื่องใช้	เปอร์เซ็นต์พลาสติกโดยน้ำหนัก
โทรทัศน์	17
ตู้เย็น	35
เครื่องเสียง	30
เครื่องซักผ้า	32
เครื่องเล่นวีดีโอ	20
พัดลมตั้งโต๊ะ	33
เฉลี่ย	27.8

(หมายเหตุ ข้อมูลเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพลาสติกในเครื่องใช้ไฟฟ้าแต่ละประเภทได้จากการสำรวจอย่างคร่าวๆ เนื่องจากมีเวลาจำกัด การคำนวณในตัวอย่างซึ่งได้แสดงต่อไปนี้จึงอาจมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงบ้าง ดังนั้น จึงควรที่จะหาข้อมูลที่ถูกต้องเพื่อที่จะนำมาใช้งานจริง)

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. หาพื้นที่ผิวทั้งหมดที่รับความร้อนและพื้นที่ของช่องเปิด

$$\begin{aligned}\text{พื้นที่ผิวทั้งหมด } (A_s) &= (\text{พื้นที่บริเวณที่เกิดเพลิงไหม้} \times 2) + (\text{ความยาวผนัง} \times \text{ความสูงผนัง}) \\ A_s &= (3,928 \times 2) + (269 \times 3) = 8,663 \text{ ตารางเมตร}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{พื้นที่ช่องเปิด } (A_v) &= \text{ขนาดหน้าต่าง} + \text{ขนาดช่องบันไดเลื่อนและบันได} \\ &= (67 \times 2) + (48 + 64 + 128) = 374 \text{ ตารางเมตร}\end{aligned}$$

2. หา Fire Load ที่มีอยู่ในอาคาร

$$\begin{aligned}\text{น้ำหนักของเชื้อเพลิงทั้งหมด} &= \text{น้ำหนักต่อตารางเมตรของเชื้อเพลิง} \times \text{พื้นที่ Zone A และ B} \\ &= 100 \times 3928 = 392800 \text{ kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Fire Load} &= \frac{\text{น้ำหนักเชื้อเพลิงทั้งหมด}}{\text{พื้นที่ผิวทั้งหมด}} \\ &= \frac{392,800}{8,663} = 45.34 \text{ kg/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Plastic Fire Load} &= \text{Fire Load} \times \text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักพลาสติกเทียบกับเชื้อเพลิงทั้งหมด} \\ &\quad \times \text{เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของพลาสติกในเครื่องใช้ไฟฟ้า} \\ &= 45.34 \times 0.875 \times 0.278 = 11.03 \text{ kg/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Cellulosic Fire Load} &= \text{Fire Load} \times \text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักเส้นใยและไม้เทียบกับเชื้อเพลิงทั้งหมด} \\ &= 45.34 \times 0.125 = 5.67 \text{ kg/m}^2\end{aligned}$$

$$\text{Fire Load Density } (q_p) = ((11.03 \times 2.875) + 5.67) \times 16 = 598 \text{ MJ/m}^2$$

3. ท1 Equivalent Fire Resistance

จากสมการที่ (4.5)

$$t_e = 0.067(598) \left[\frac{8663}{374\sqrt{2}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 162 \text{ นาที}$$

4. เปิดกราฟการกระจายอุณหภูมิของพื้นคอนกรีตหนา 25 เซนติเมตร(รูปที่ ผ.ค.4.) และเสาขนาด50 ×50 เซนติเมตร (รูปที่ ผ.ข.9.) เพื่อหาค่ากำลังของเหล็กเสริมที่ระยะ Covering ต่างๆ

จากกราฟ(รูปที่ ผ.ค.4.) อ่านค่าอุณหภูมิที่ระยะ Covering 3 cm ของพื้นซึ่งเป็นตำแหน่งวางเหล็กกันร้าว DB 10 และลดเหล็กอัดแรงมีค่า 590 °C และจากการอ่านค่า proportional strength จากกราฟของเหล็กเสริมและลดเหล็กอัดแรง(รูปที่ 6.11)มีค่าเท่ากับ 0.39 และ 0.21 ตามลำดับ ดังนั้นกำลังประลัยของเหล็กกันร้าวDB10ลดเหล็กอัดแรงขณะถูกเพลิงไหม้มีค่าเท่ากับ 2,223 ksc. และ 3,990 ksc. ตามลำดับ ส่วนกำลังที่เหลือขณะเย็นตัวของเหล็กกันร้าว DB 10 และลดเหล็กอัดแรงจากกราฟ (รูปที่ 5.21และ 5.22) มีค่าเท่ากับ 0.86 และ 0.60 ดังนั้นกำลังที่เหลือมีค่าเท่ากับ 4,902 ksc. และ 11400 ksc. ตามลำดับ

จากกราฟ(รูปที่ ผ.ข.9.) อ่านค่าอุณหภูมิที่ผิวนอกและที่ระยะ 7.6cm. จากผิวเสาคอนกรีต มีค่า 1050 °Cและ 300°C ตามลำดับ และจากการอ่านค่า proportional strength จากกราฟของคอนกรีตที่อุณหภูมิดังกล่าว (รูปที่ 6.10) มีค่าเท่ากับ 0.0 และ 1.0 ตามลำดับ ดังนั้นกำลังอัดของคอนกรีตจะมีค่าเท่ากับ 0 ksc. ที่ผิวนอกและ 300ksc. ที่ระยะ 7.6cm. จากผิวเสาคอนกรีต

5. คำนวณสัดส่วนกำลังที่เหลือของโครงสร้างขณะถูกเพลิงไหม้และหลังจากการเย็นตัวของโครงสร้าง

สัดส่วนกำลังเสา

$$\text{กำลังที่ยอมให้ของเสาปลอกเดี่ยว} \quad P = 0.85 \times (0.25A_g f'_c + A_s f_s)$$

P = กำลังรับน้ำหนักโดยปลอดภัยตามแนวแกนของเสา

A_g = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของคอนกรีต

A_s = เนื้อที่หน้าตัดทั้งหมดของเหล็กยื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

f_s = หน่วยแรงอัดที่ยอมให้ของเหล็กเสริม

= $0.4F_y$ แต่ไม่เกิน 2,100 ksc.

f'_c = กำลังอัดประลัยของคอนกรีต

กำลังที่ยอมให้ของเสาก่อนถูกเพลิงไหม้

$$P = 0.85 \times (2500 \times 300 + 69.08 \times 1600)$$

$$= 253323 \text{ kg}$$

กำลังที่ยอมให้ของเสาหลังถูกเพลิงไหม้

$$P = 0.85(1,211 \times 0.25 \times 300 + 1,289 \times 0.25 \times$$

$$150 + 69.08 \times 1600)$$

$$= 212,235 \text{ kg}$$

สัดส่วนกำลังของเสาที่ยอมให้ก่อนและหลังถูกเพลิงไหม้

$$= \frac{212,235}{253,323}$$

$$= 0.84$$

สรุปได้ว่า หลังจากเกิดเพลิงไหม้ เสาจะมีกำลังที่ยอมให้เหลือเพียง 84% ของกำลังที่ยอมให้ก่อนถูกเพลิงไหม้

6. ตรวจสอบพฤติกรรมของพื้น Post Tension ขณะถูกเพลิงไหม้

f_{pu} คือ หน่วยแรงดึงประลัยของลวดเหล็กอัดแรง (ksc.)

f_{pi} คือ หน่วยแรงดึงเบื้องต้นจากการอัดแรงก่อนการเสื่อมลด (ksc.)

f_{pe} คือ หน่วยแรงดึงประลัยที่ผลหลังจากการเสื่อมลดของการอัดแรง (ksc.)

f_{pt} คือ หน่วยแรงดึงประลัยของลวดเหล็กอัดแรงที่อุณหภูมิต่างๆ (ksc.)

$$f_{pu} = 19,000 \text{ ksc.}$$

$$f_{pi} = 0.7f_{pu} = 0.7 \times 19,000 = 13,300 \text{ ksc.}$$

$$f_{pe} = 0.8f_{pi} = 0.8 \times 13,300 = 10,640 \text{ ksc.}$$

$$f_{pt} = 3,990 \text{ ksc.}$$

ตรวจสอบแรงการรับแรงของลวดเหล็กอัดแรง

สำหรับบริเวณส่วนที่ไม่เกิดการวิบัติของพื้น Post Tension อาจเป็นผลเนื่องมาจากกำลังของลวดเหล็กอัดแรงขณะถูกเพลิงไหม้เท่ากับแรงดึงประสิทธิผลหลังจากการเสื่อมลดของการอัดแรง ซึ่งจะได้ว่า $f_{pt} = 10,640$ ksc และ Proportional Strength = 0.56 จากกราฟ (รูปที่ 6.11) จะได้ว่าอุณหภูมิที่ Proportional Stress ดังกล่าวของลวดเหล็กอัดแรงขณะถูกเพลิงไหม้มีค่าเท่ากับ 400°C ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าว จากกราฟ (รูปที่ 5.21 และ 5.22) อ่านค่าสัดส่วนกำลังที่เหลือของเหล็กเสริมและลวดเหล็กอัดแรงได้เท่ากับ 1.00 และ 0.88 ตามลำดับ

สรุปได้ว่าบริเวณที่พื้น Post-Tension กำลังของเหล็กกันรั่ว DB10 จากวิธีการคำนวณให้ผลสอดคล้องกับกำลังจากการดึงทดสอบจากตัวอย่างที่เก็บจากหน้างาน

จากค่าหน่วยแรงต่างๆ ข้างต้น จะเห็นได้ว่าหน่วยแรงดึงประสิทธิผลหลังจากการเสื่อมลดของการอัดแรง ($f_{pe} = 10,640$ ksc) มีค่ามากกว่าแรงดึงประลัยของลวดอัดแรงขณะถูกเพลิงไหม้ ($f_{pt} = 3,990$ ksc) เป็นผลให้เกิดการวิบัติของลวดเหล็กอัดแรง ซึ่งตรงกับสภาพจริงจากการสำรวจหน้างาน (รูปที่ 6.15)



รูปที่ 6.15 การวิบัติของลวดเหล็กอัดแรงชั้นคานฝ้าของอาคารห้างสรรพสินค้าสยามจัสมังโก้ (ภาควิชาวิศวกรรมโยธา สจล., 2539)

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

1. การวิเคราะห์โครงสร้างของอาคารหลังถูกเพลิงไหม้โดยการคำนวณจะใช้เป็นแนวทางในการประเมินกำลังอย่างคร่าวๆ ของอาคาร ซึ่งเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่เข้าไปตรวจสอบอาคารว่าอาคารดังกล่าวเหมาะสมที่จะส่งทีมสำรวจเข้าไปหรือไม่
2. การวิเคราะห์จำเป็นต้องทราบข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ ได้แก่ ชนิดและปริมาณเชื้อเพลิงในอาคาร พื้นที่และความสูงของช่องระบายอากาศ, พื้นที่ผิวของบริเวณที่ถูกเพลิงไหม้ ซึ่งจำเป็นต้องขอความร่วมมือจากเจ้าของอาคารหรือพนักงานในอาคารดังกล่าวและข้อมูลเหล่านี้จะมีความถูกต้องค่อนข้างสูง ภายหลังจากการเกิดเพลิงไหม้ไม่นานนัก เนื่องจากสามารถสอบถามได้จากพยานบุคคลต่างๆ

7.2 ข้อเสนอแนะ

1. สามารถเอาการวิเคราะห์ดังกล่าวไปออกแบบโครงสร้างให้มีความสามารถต้านทานไฟได้ในช่วงเวลาที่ต้องการ
2. ควรมีการทำการสำรวจชนิดและปริมาณ Fire Load ในแต่ละประเภทของอาคารเพื่อใช้เป็นข้อกำหนดในการคำนวณหากำลังที่ลดลงของโครงสร้าง เพื่อความสะดวกในการใช้วิธีวิเคราะห์ดังกล่าว

หนังสืออ้างอิง

- กองบังคับการตำรวจดับเพลิง สำนักงานตำรวจแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรี้, 2542 สถิติการเกิดเพลิงไหม้ในกรุงเทพมหานครและปริมณฑล. กรุงเทพฯ
- กิตติ อินทรานนท์, 2538. วิศวกรรมความปลอดภัยพื้นฐานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรพล ไทรทอง และ พรศักดิ์ ตั้งคำ, 2543. การประเมินความสามารถการใช้งานได้ของอาคารหลังถูกเพลิงไหม้. ปรินญาณิพนธ์ปรินญาบัณฑิต. โครงการงานพิเศษสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศิริพงศ์ อุทัยวงศ์แก้ว และ อาวุธ เจริญวัฒนานันท์, 2532. การเปลี่ยนแปลงการรับกำลังคอนกรีตหลังการเผา. ปรินญาณิพนธ์ปรินญาบัณฑิต. โครงการงานพิเศษสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- American Society for Testing and Materials, 1980. Fire Test of Building Construction and Materials. ASTM E 199.: ASTM
- Malhotra, H.L., 1982. Design of Fire-Resisting Structures. 1st Edition. New York : Surrey University Press, London.
- Stallard, P., and Abrahams, J., 1995. Fire from First Principles. 2nd Edition. England : E&FNSPON.

บรรณานุกรม

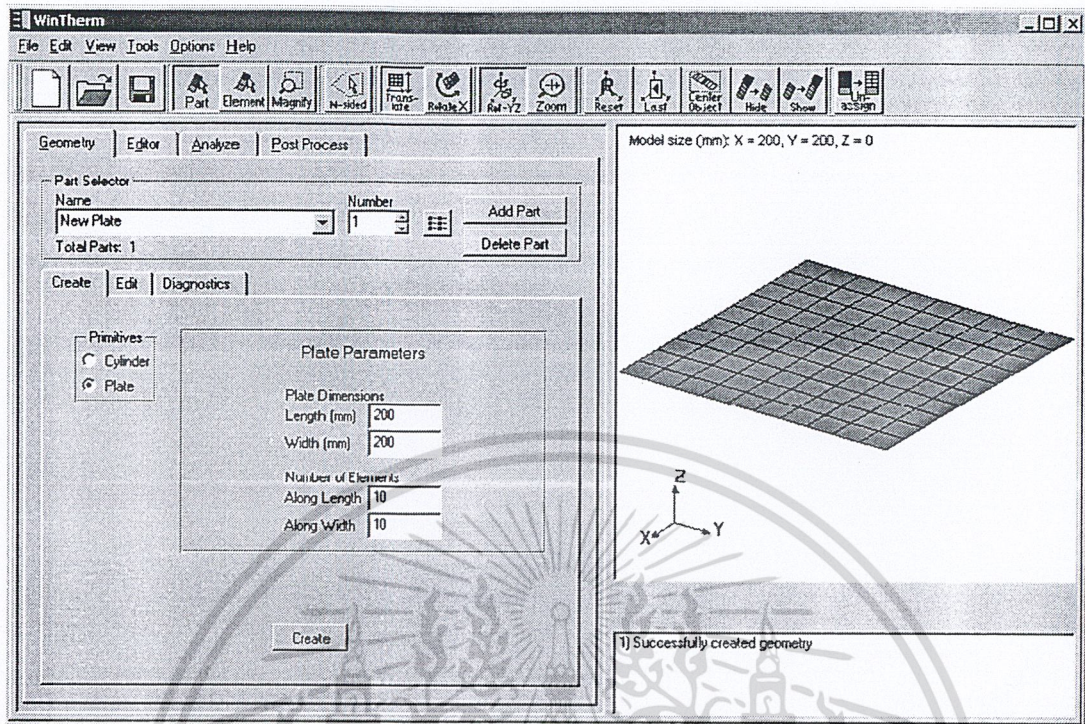
- ดนัย ชนามี, เทิดพงศ์ สมภักดี และ ศิริชัย มาลีพัตร, 2540. การศึกษากำลังของคอนกรีตหลังถูกเพลิงไหม้. ปรินญาณีพนธ์ปรินญาบัณฑิต. โครงการพิเศษสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- พุทธพงศ์ คำภิรานนท์, มหรรณพ กรรณสูตร และ สัมพันธ์ ชนะบูรณาศักดิ์, 2540. การศึกษาแนวโน้มของค่าแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตหลังถูกเพลิงไหม้. ปรินญาณีพนธ์ปรินญาบัณฑิต. โครงการพิเศษสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ทินกร แพทย์รักษ์, นันทวิทย์ พานิชย์พงศ์ และ อรรถนพ อุชชิน, 2543. วิเคราะห์กำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กหลังถูกเพลิงไหม้. ปรินญาณีพนธ์ปรินญาบัณฑิต. โครงการพิเศษสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- American Society for Testing and Materials, 1980. Fire Test of Building Construction and Materials. ASTM E 199. USA.: ASTM
- American Society for Testing and Materials, 1991. Standard Test Method For Rebound Number of Hardened Concrete. ASTM C805-85. USA.: ASTM
- American Society for Testing and Materials, 1991. Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete. ASTM C597-83. USA.: ASTM
- American Society for Testing and Materials, 1991. Standard Test for Obtaining and Testing Drills Cores and Sawed Beam of Concrete. ASTM C42-87. USA.: ASTM
- Malhotra, H.L., 1982. Design of Fire Resisting Structure. 1st Edition. British : Surrey University Press.

ภาคผนวก ก

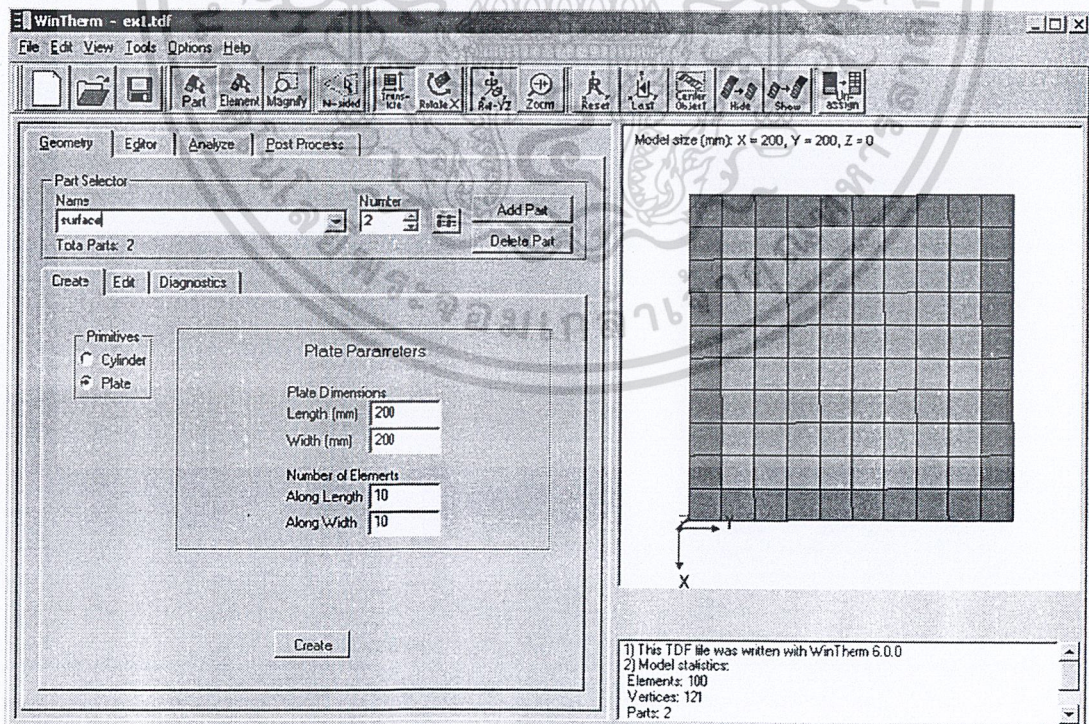
ขั้นตอนการใช้โปรแกรมวิเคราะห์การกระจายอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

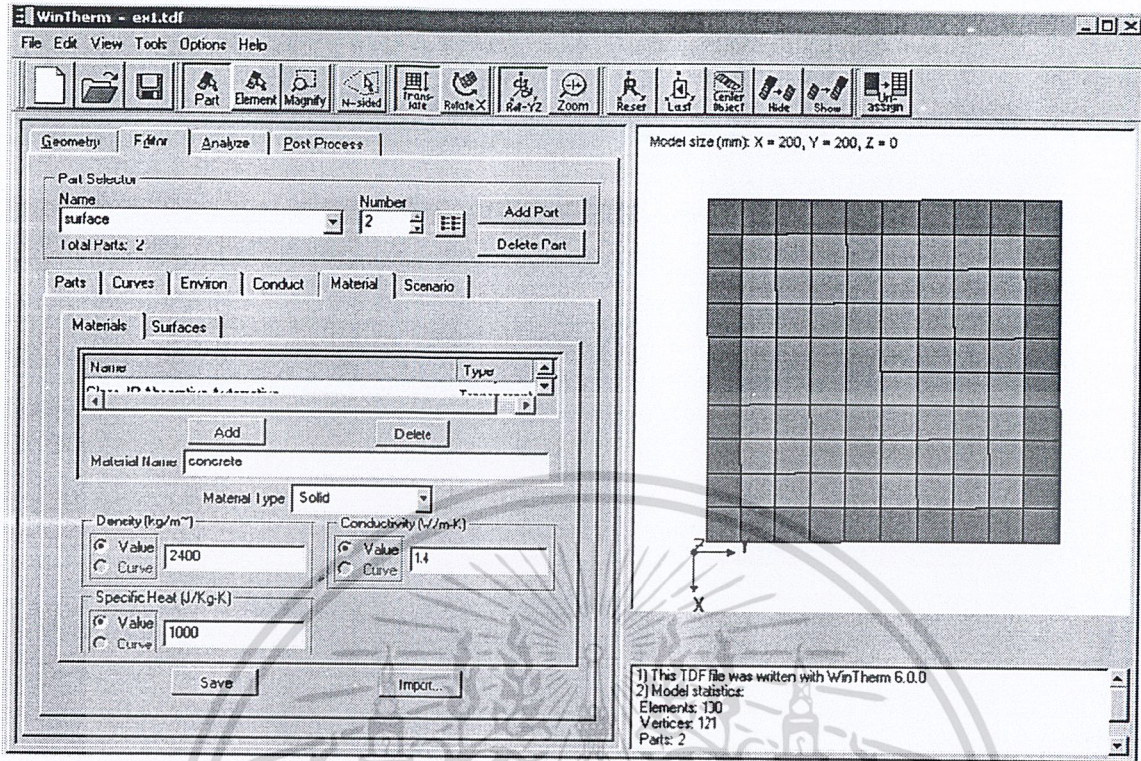


รูปที่ ผ.ก.1. รูปแสดงการป้อนค่าขนาดของเสาและและจำนวนองค์ประกอบย่อยในหน้าตัด

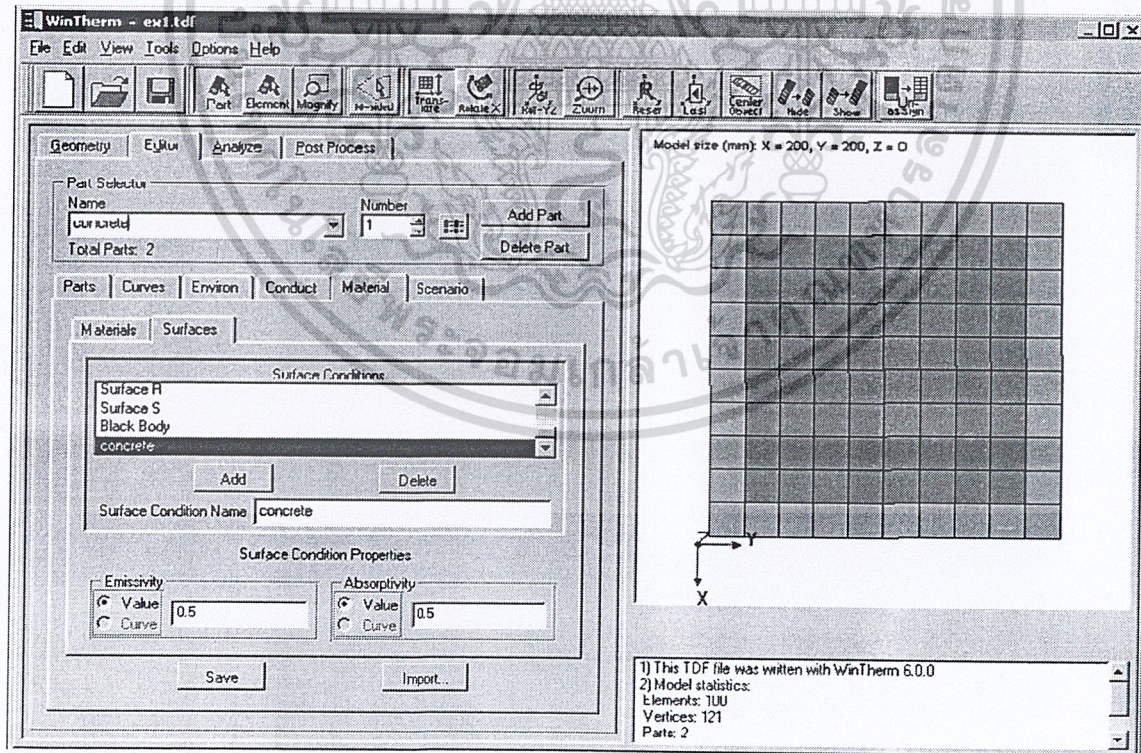


รูปที่ ผ.ก.2. รูปแสดงการแบ่งประเภทขององค์ประกอบย่อยภายในหน้าตัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.3. รูปแสดงการป้อนค่าคุณสมบัติของวัสดุ (ในที่นี้วัสดุเป็นคอนกรีต)



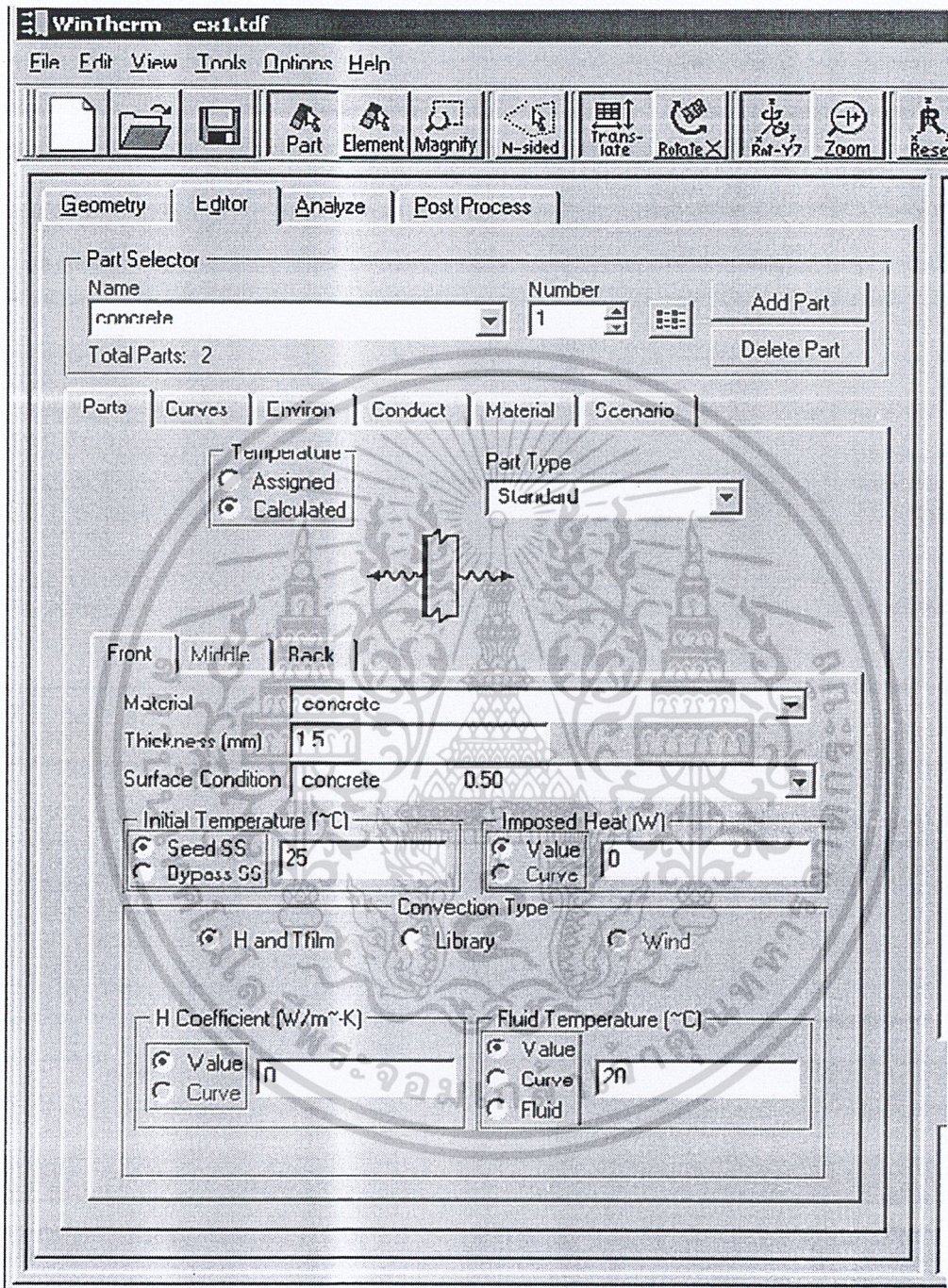
รูปที่ ผ.ก.4. รูปแสดงการป้อนค่าคุณสมบัติของผิววัสดุที่ได้รับความร้อน (ในที่นี้เป็นผิวรอบนอก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผก3 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



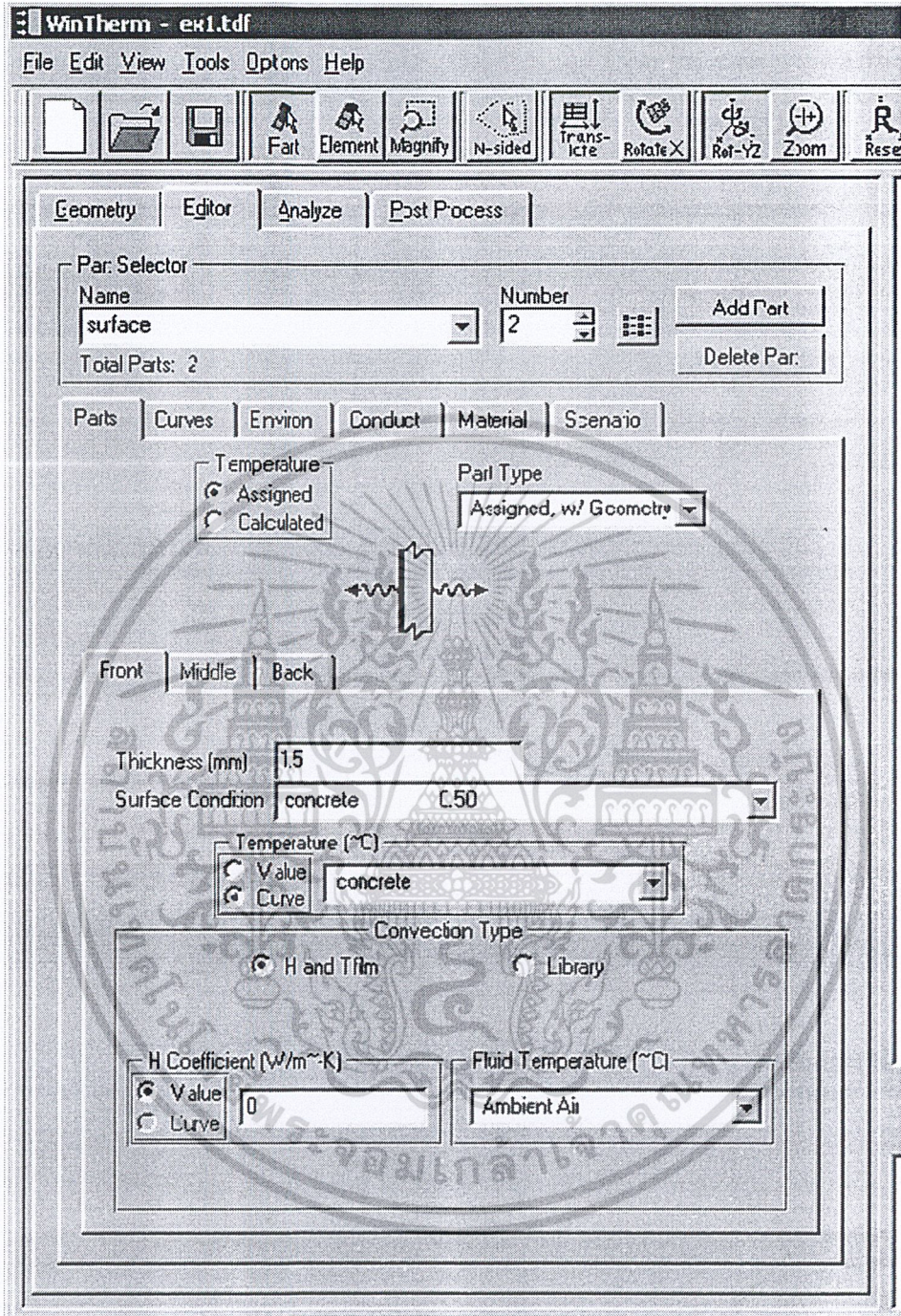
รูปที่ ผ.ก.5. รูปแสดงการป้อนค่าอุณหภูมิขณะเกิดเพลิงไหม้ในแต่ละช่วงเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผก4 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



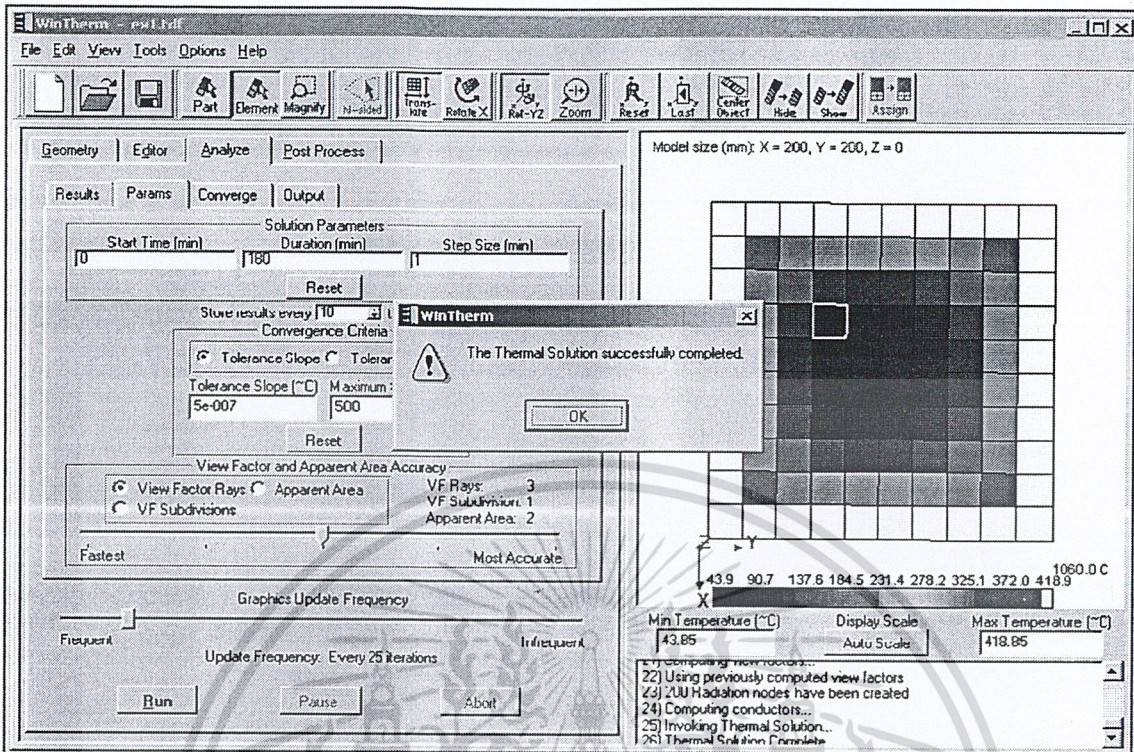
รูปที่ ผ.ก.6. รูปแสดงการป้อนข้อมูลคุณสมบัติสำหรับองค์ประกอบย่อยภายในหน้าต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

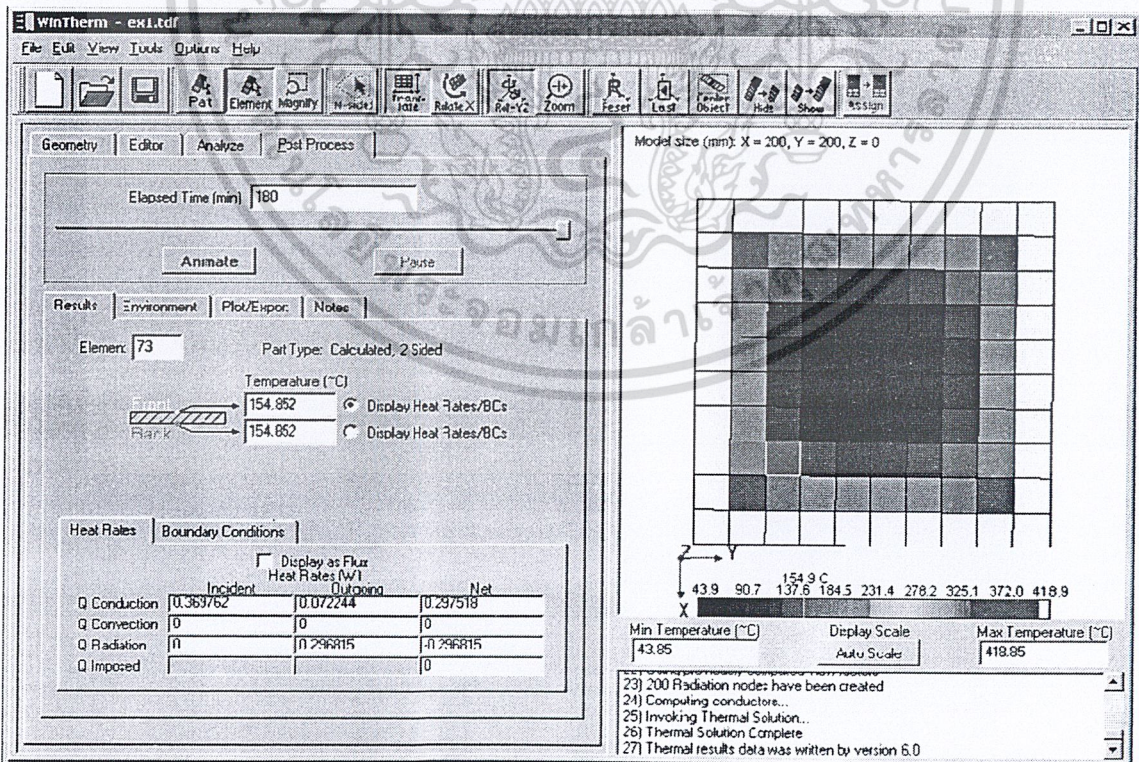


รูปที่ ผ.ก.7 รูปแสดงการป้อนข้อมูลคุณสมบัติสำหรับองค์ประกอบย่อยบริเวณผิวที่สัมผัสกับความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.8. รูปแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ห่ออุณหภูมิภายในหน้าต่าง



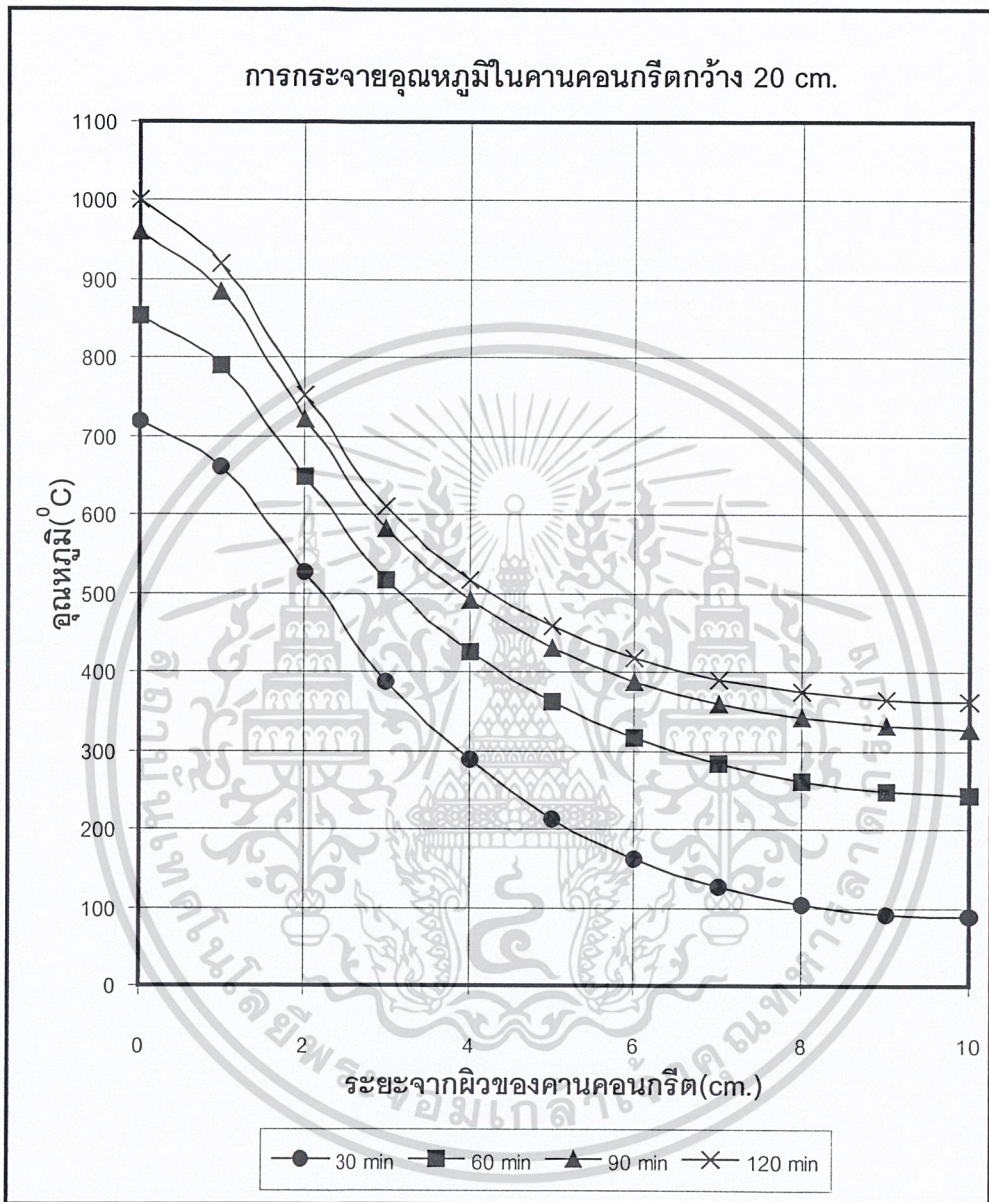
รูปที่ ผ.ก.9. รูปแสดงค่าอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในหน้าต่างที่ได้จากการวิเคราะห์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีต

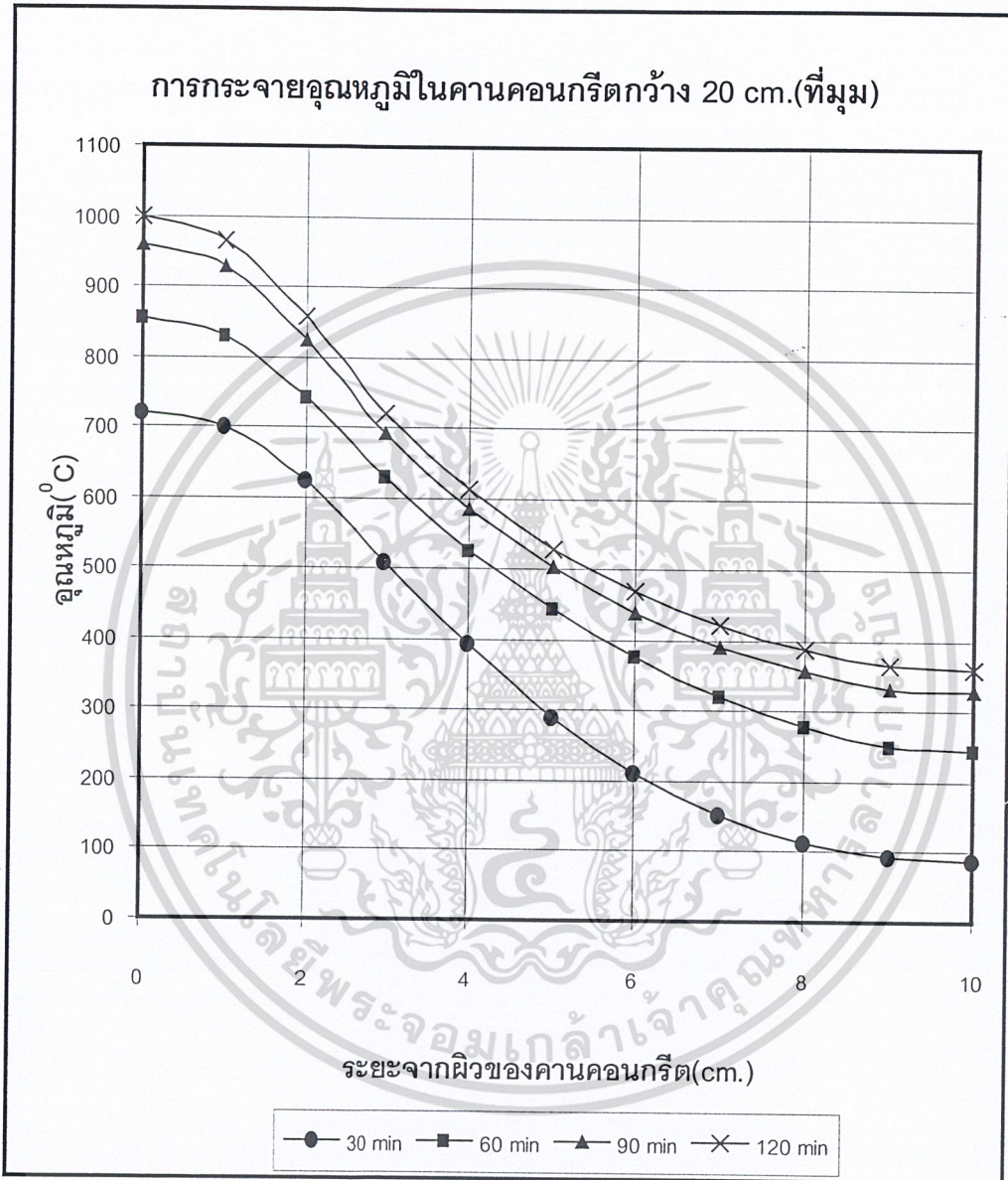


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา พจนานุกรม ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



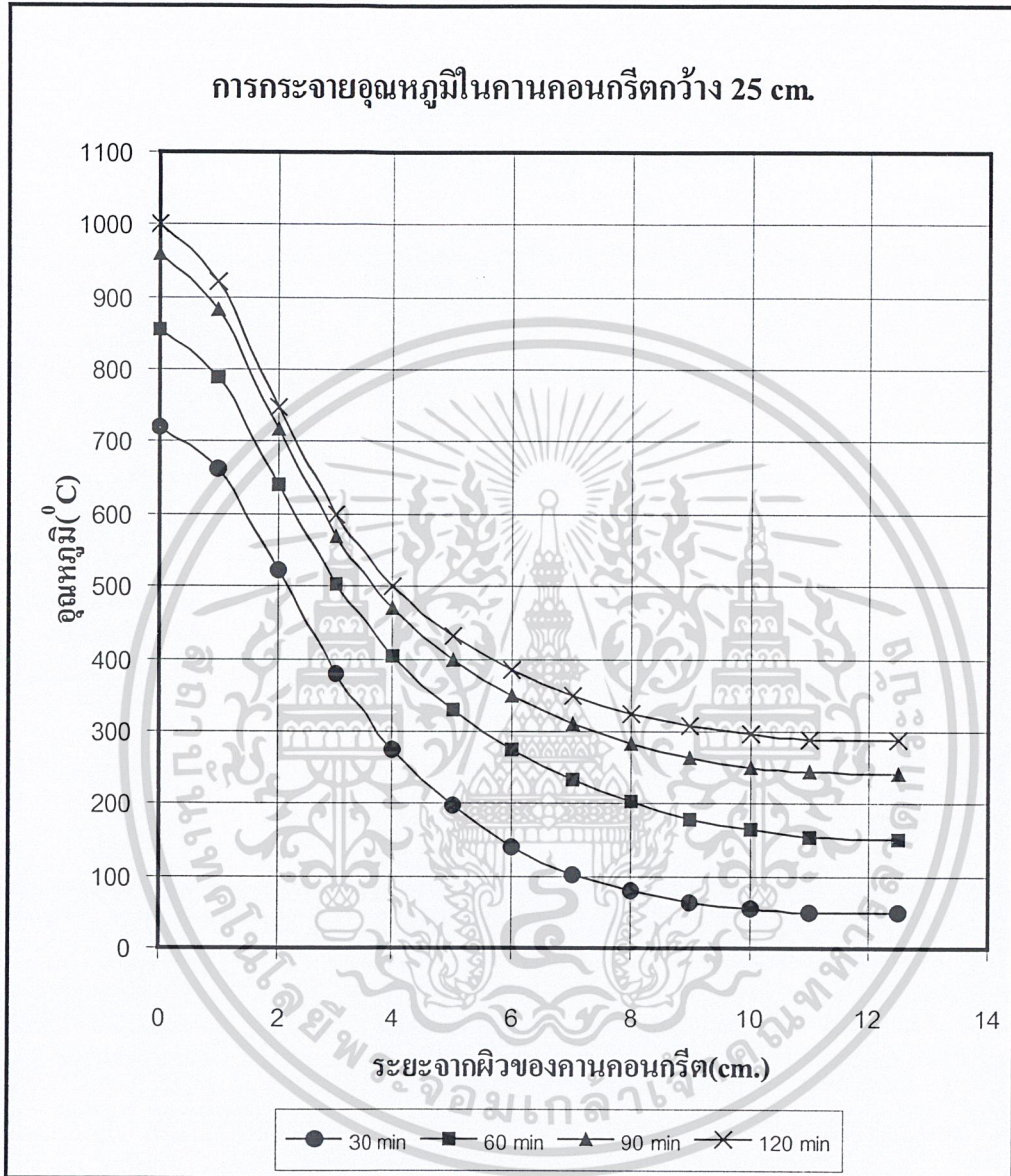
รูปที่ ผ.ก.1 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผข2 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



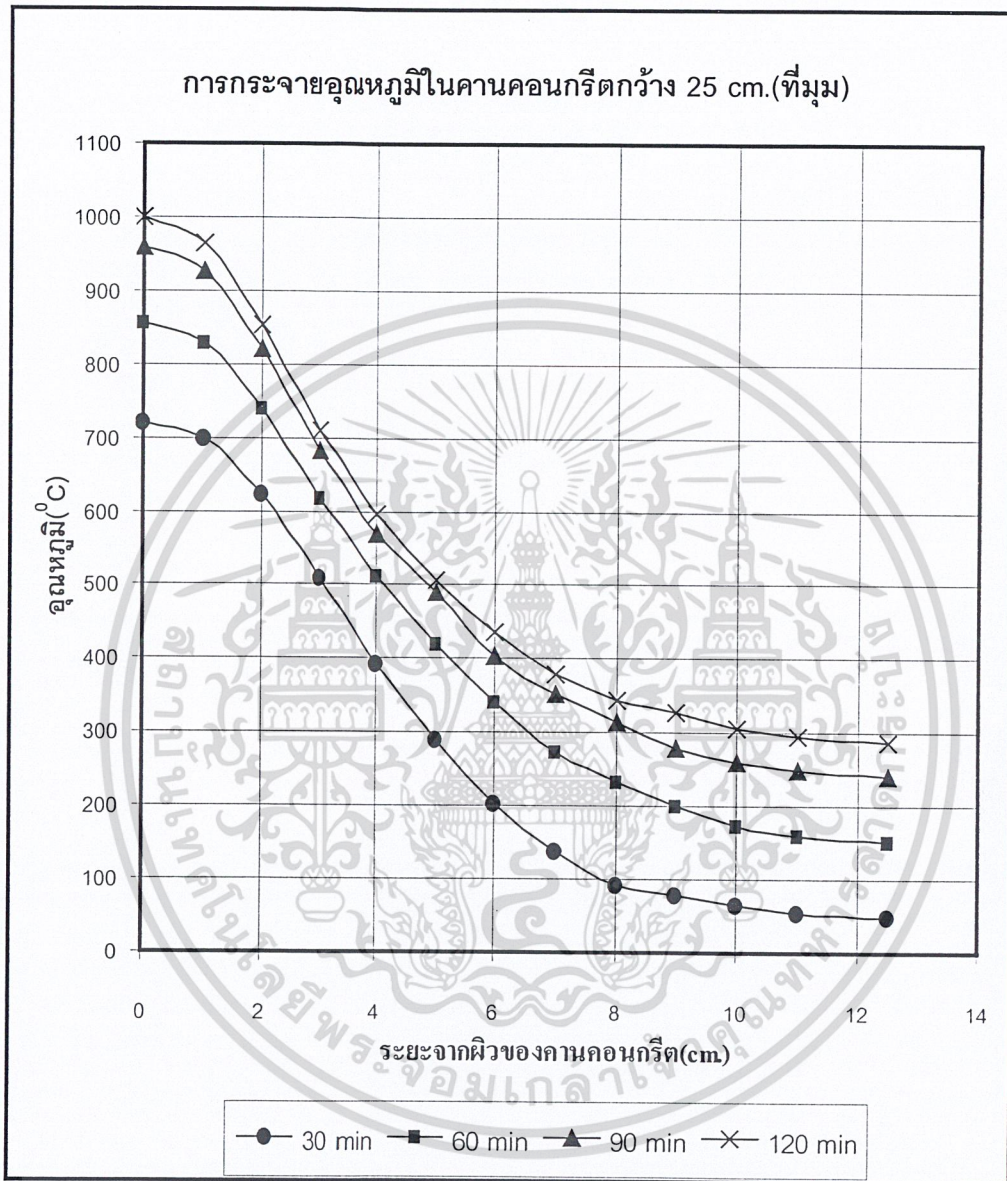
รูปที่ ผ.ก.2 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 20 เซนติเมตร (ถ่ายเทความร้อน 2 ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผช3 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



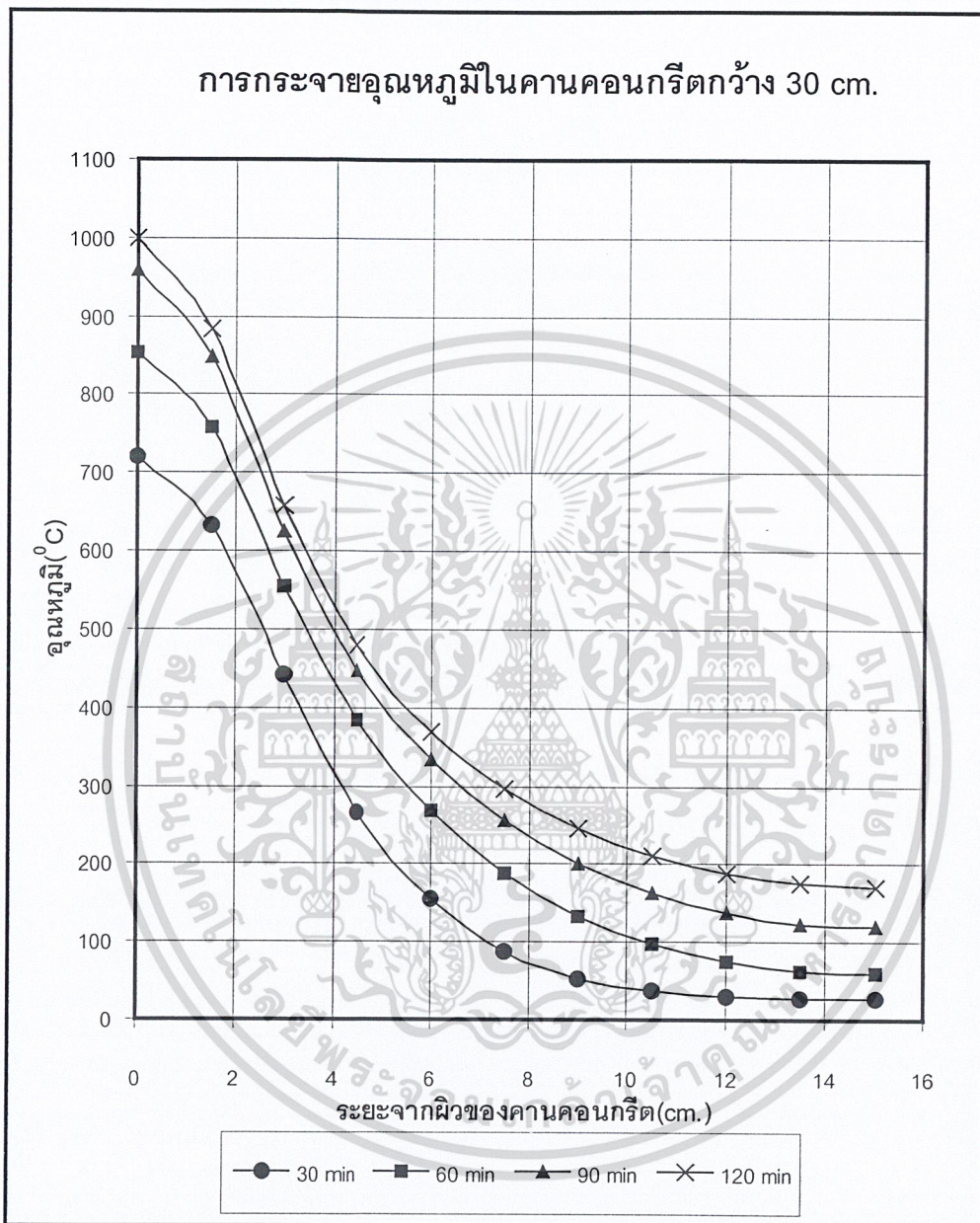
รูปที่ ผ.ก.3 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาผข4 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



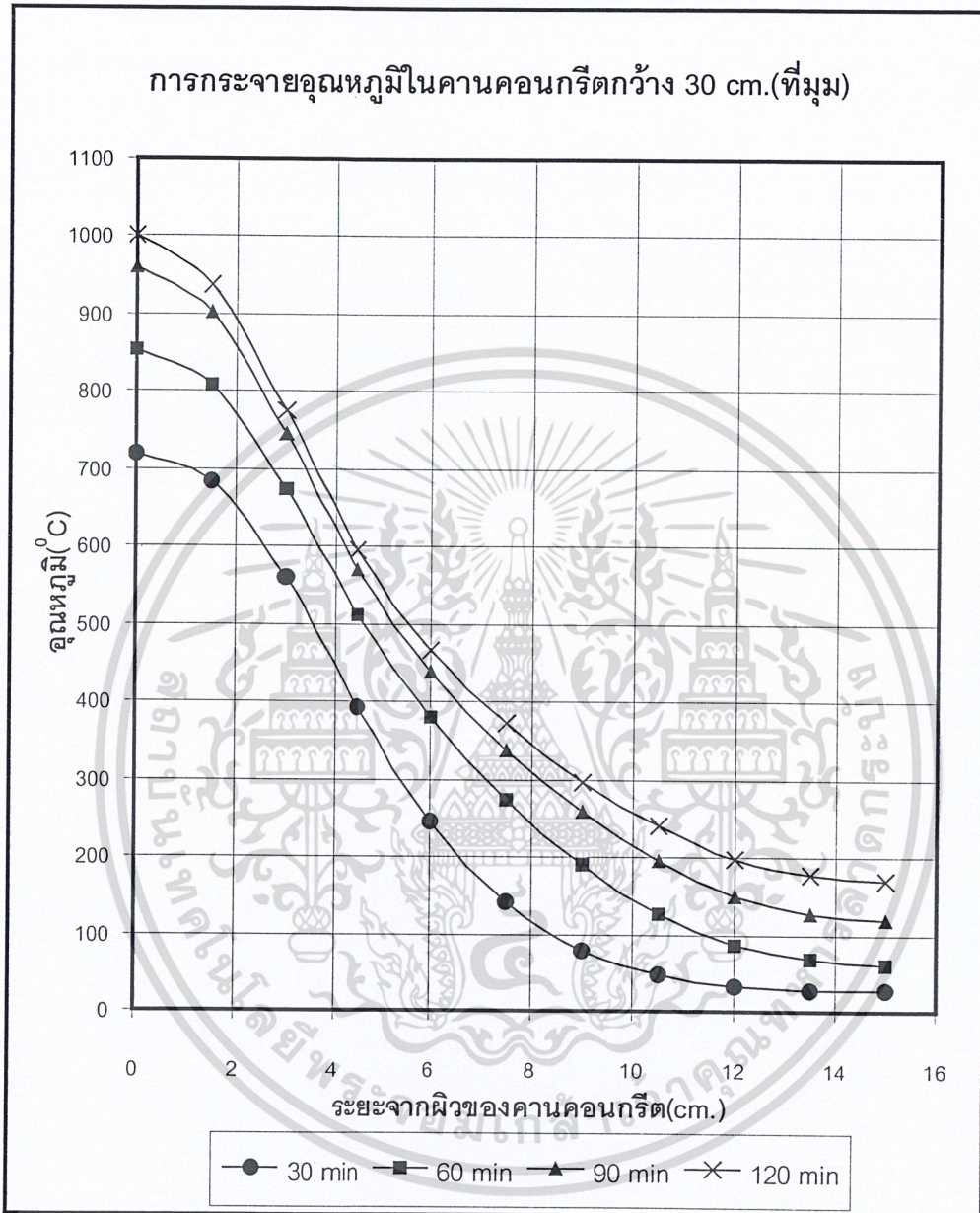
รูปที่ ผ.ก.4 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง25เซนติเมตร (ถ่ายเทความร้อน2ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผข5 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



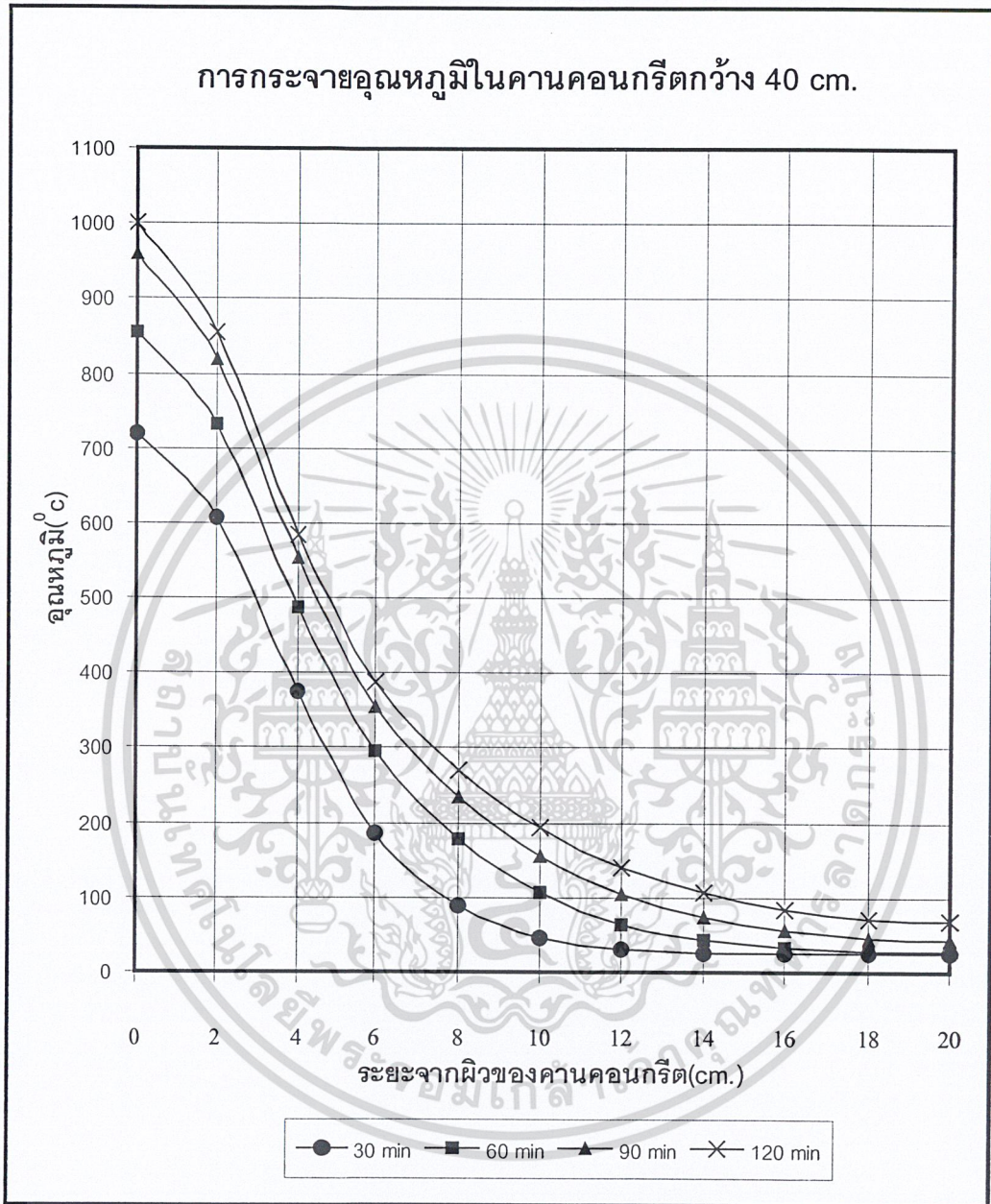
รูปที่ ผ.ก.5 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 30 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผข6 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



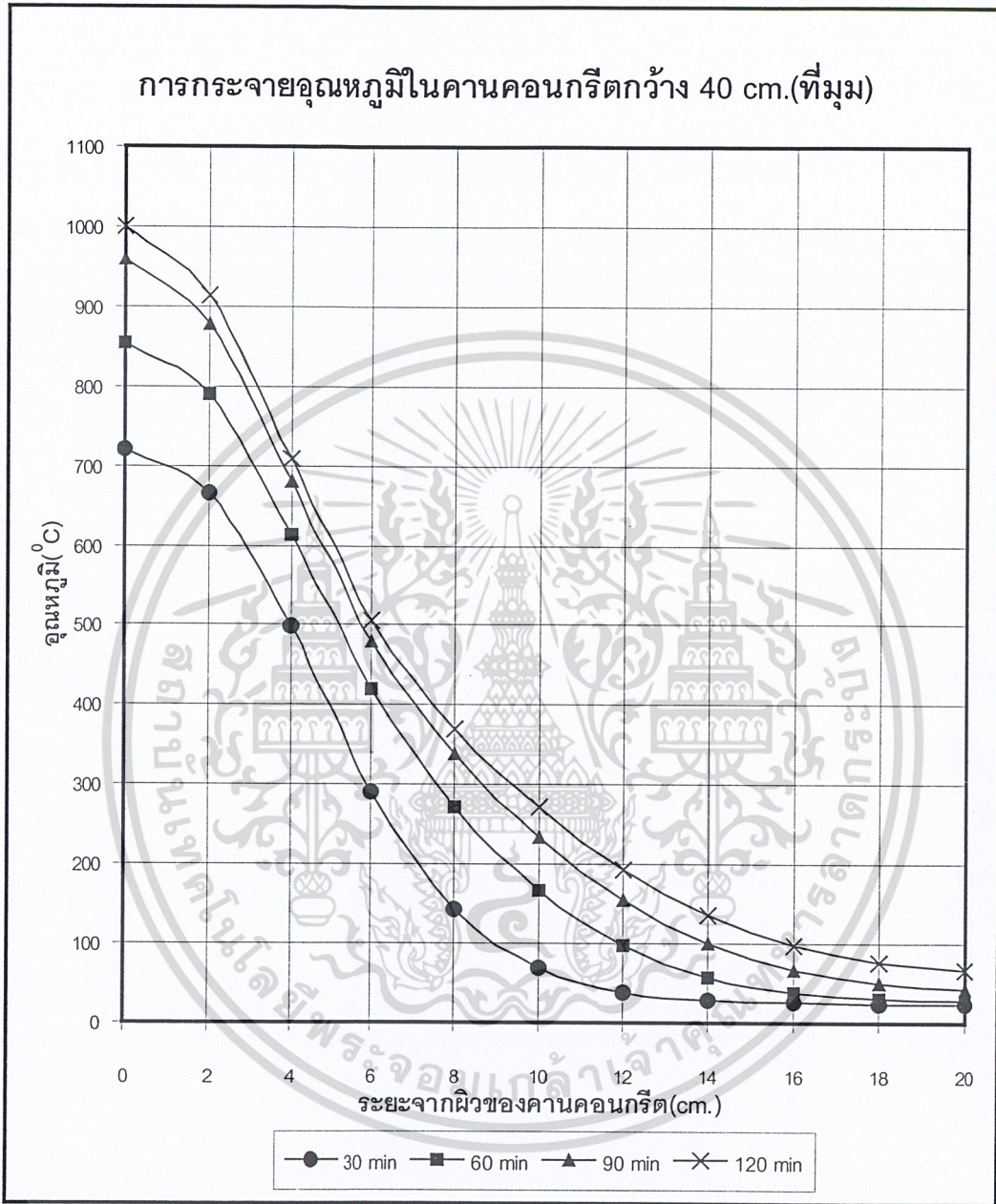
รูปที่ ผ.ก.6 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 30 เซนติเมตร (ถ่ายเทความร้อน 2 ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผข7 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ก.7 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 40 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



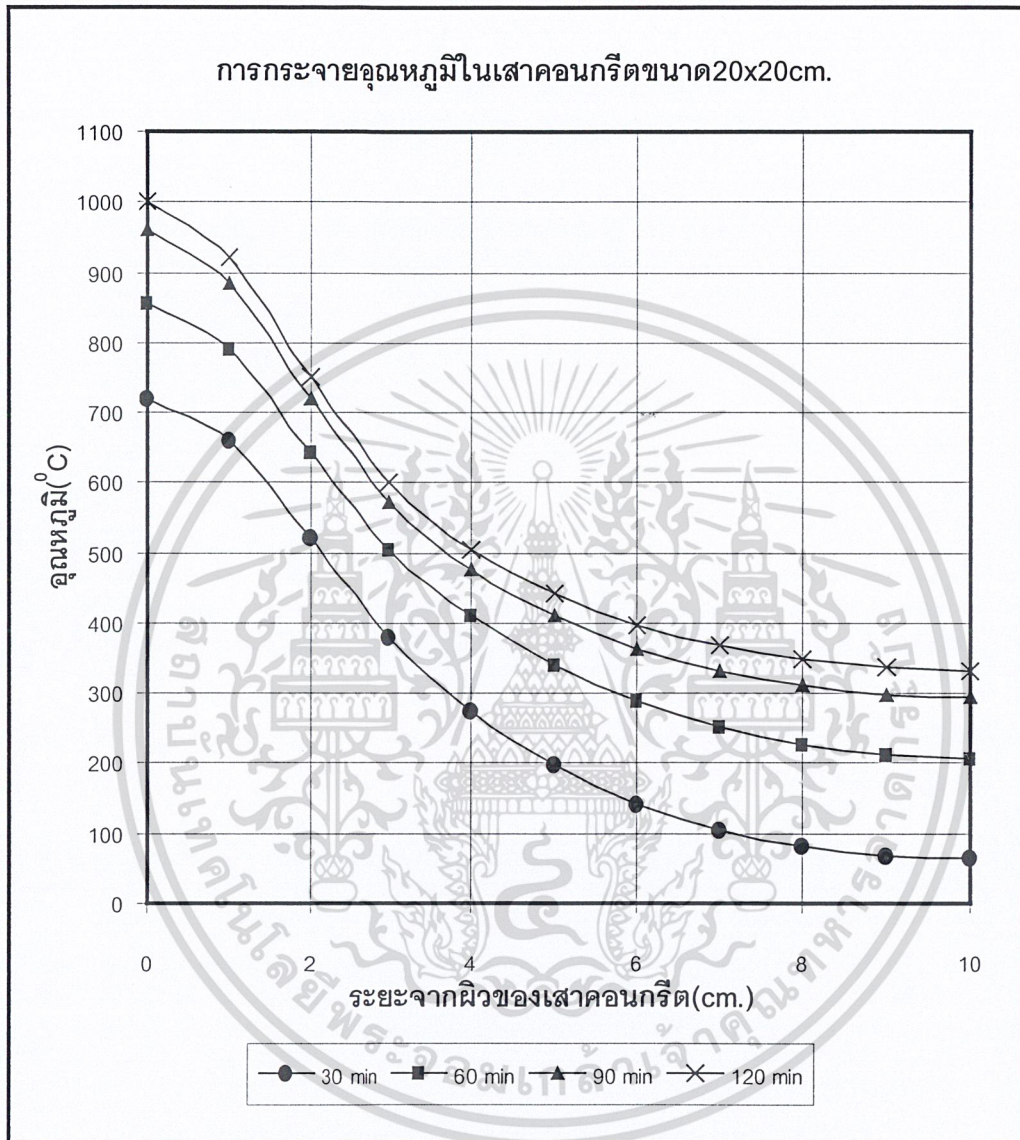
รูปที่ ผ.ก.8 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในคานคอนกรีตกว้าง 40 เซนติเมตร (ถ่ายเทความร้อน 2 ด้าน)

ภาคผนวก ค

กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีต

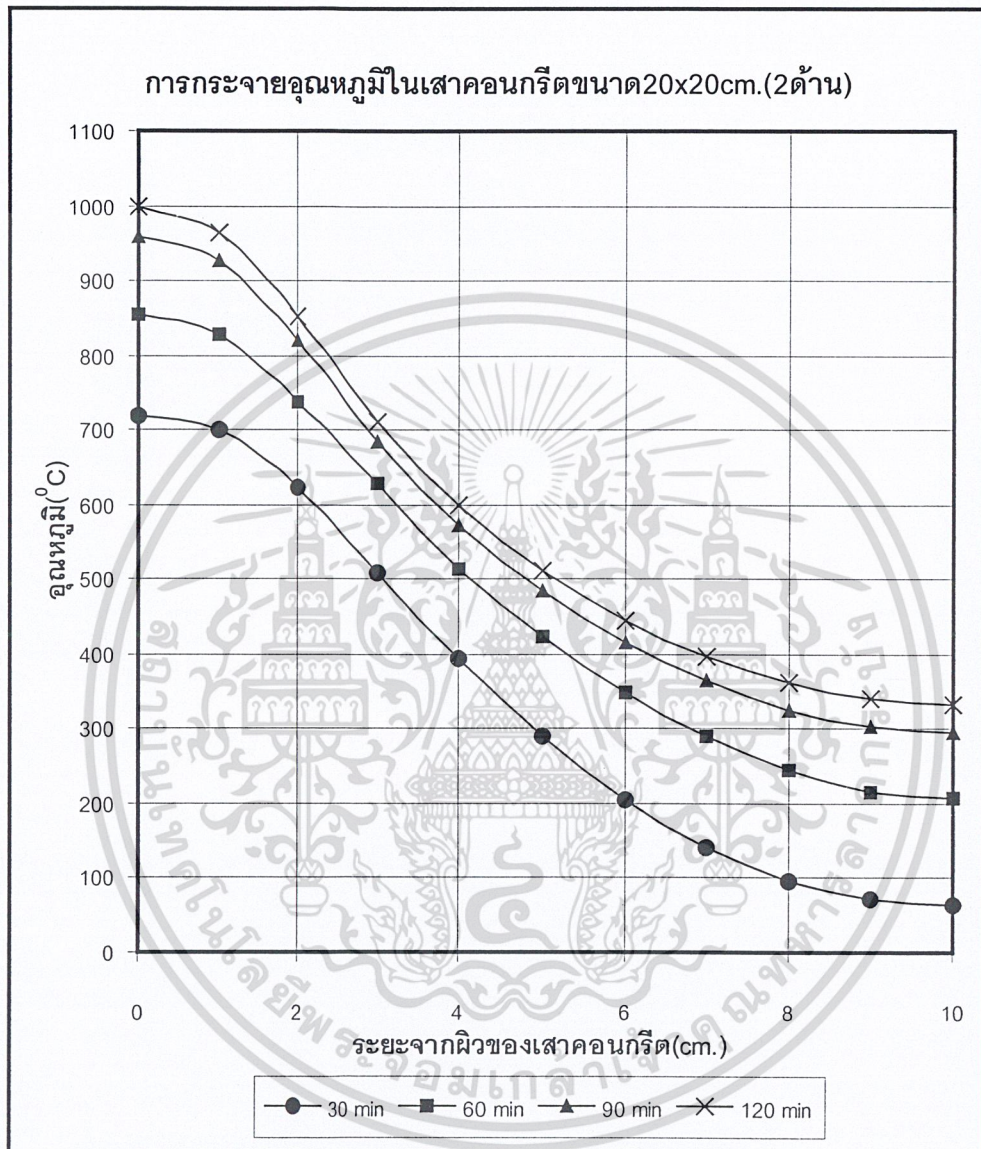


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



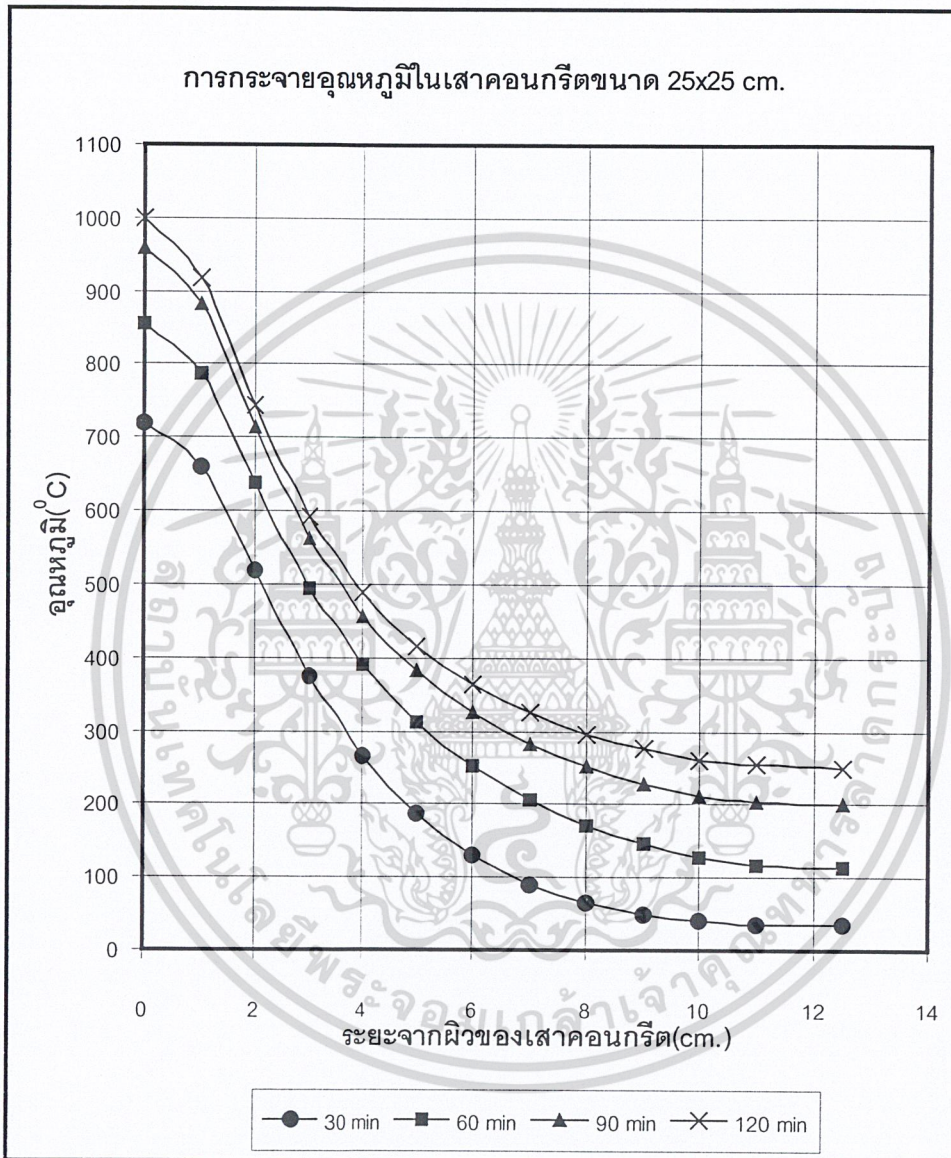
รูปที่ ผ.ข.1 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด20x20เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผศ2 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



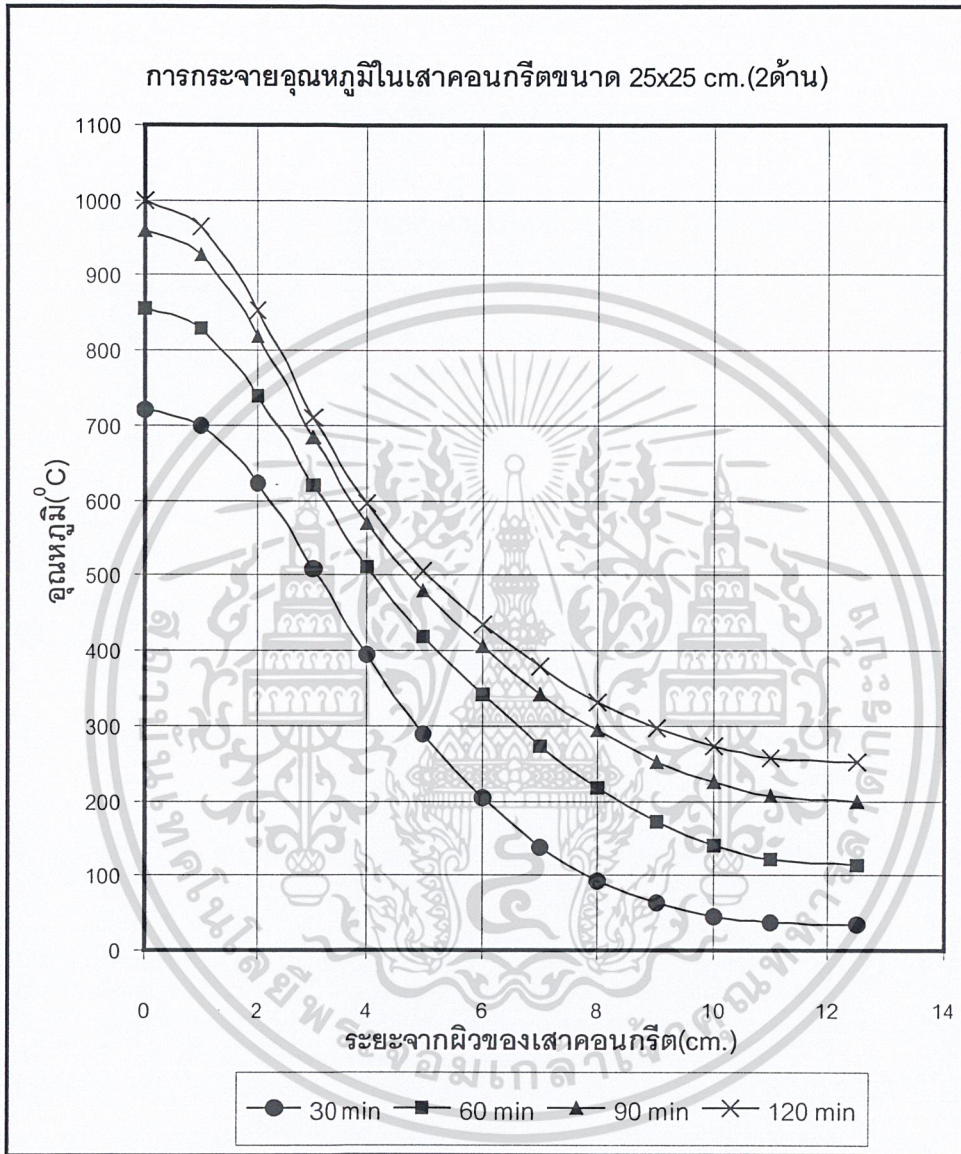
รูปที่ ผ.ข.2 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด20x20เซนติเมตร(ถ่ายเทความร้อน2ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผศ3 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



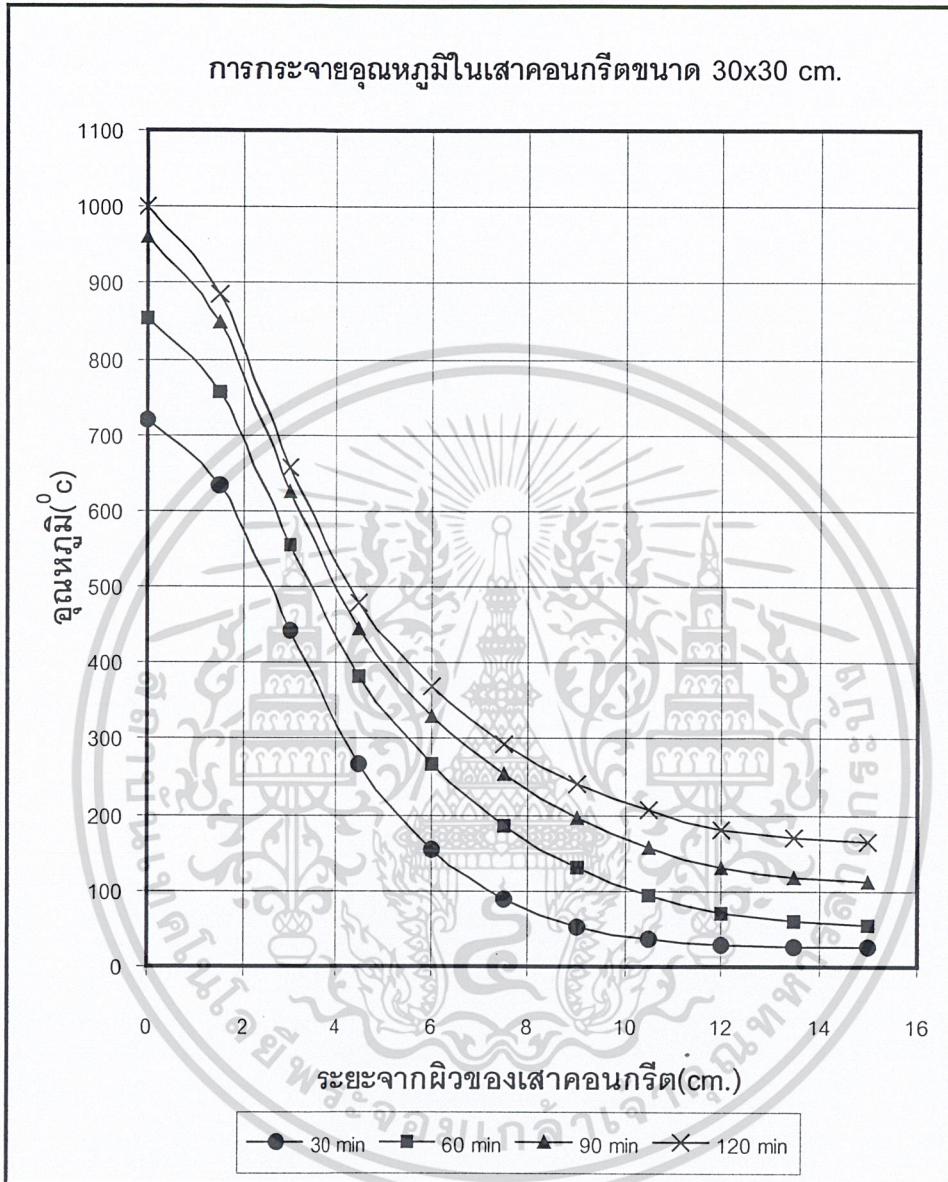
รูปที่ ผ.ข.3 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด 25×25 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผศ4 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



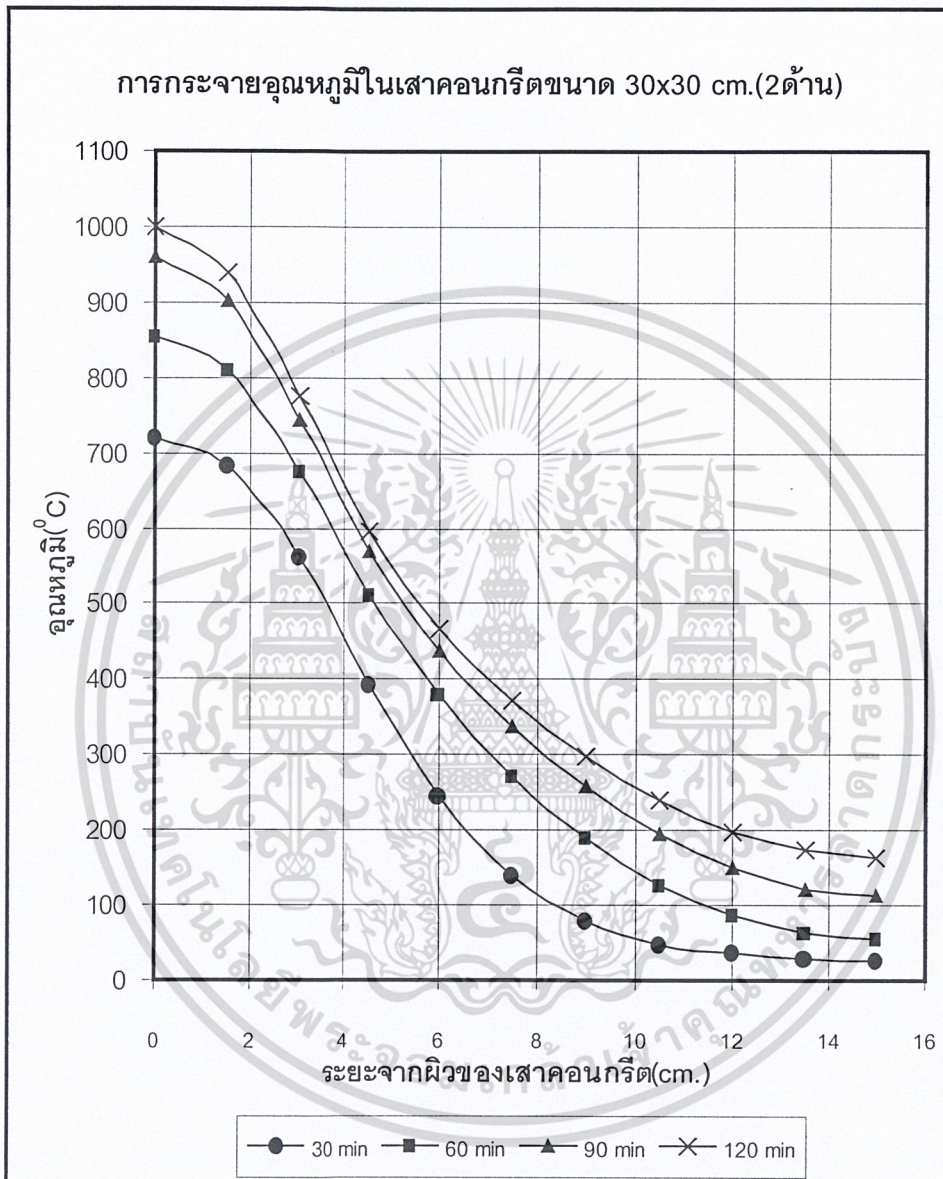
รูปที่ ผ.ข.4 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด25×25เซนติเมตร(ถ่ายเทความร้อน2ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ผศ5 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



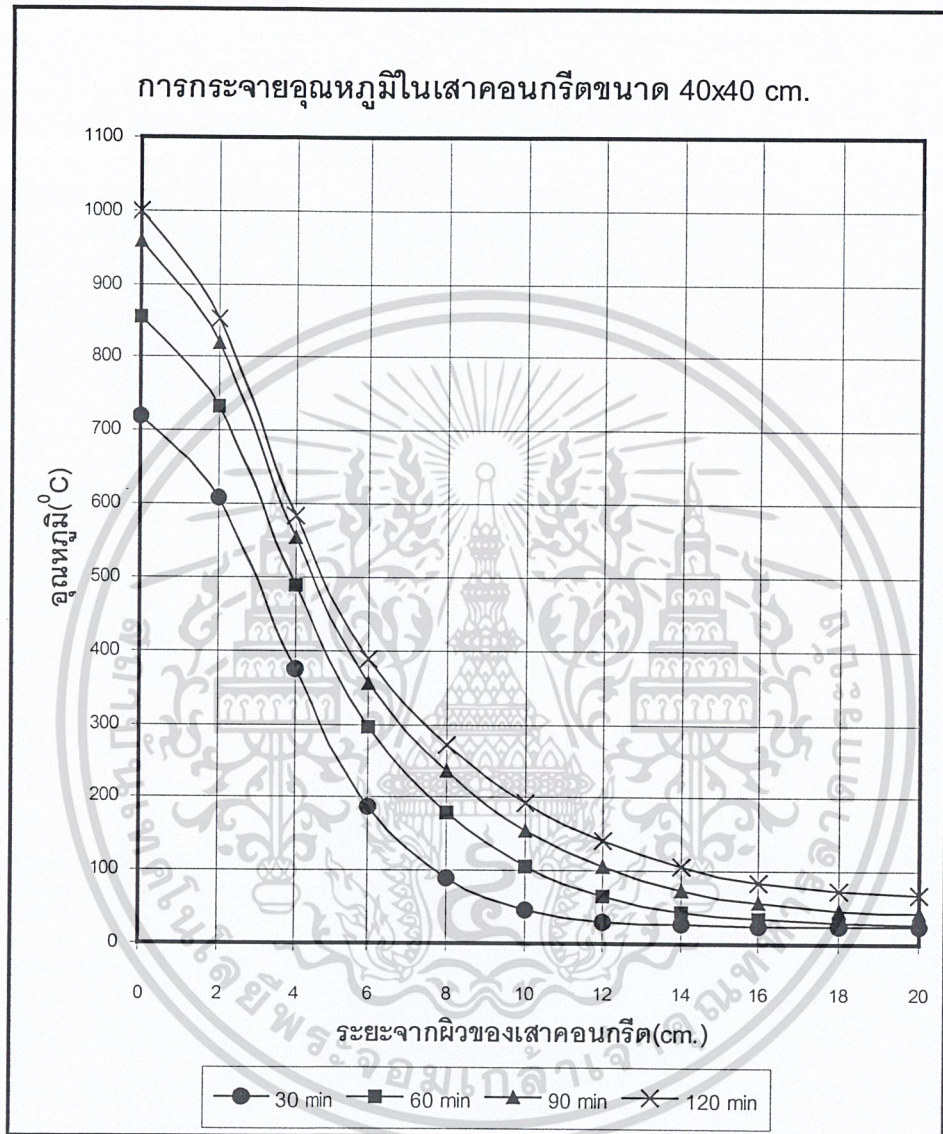
รูปที่ ผ.ข.5 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด30x30เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผศ6 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



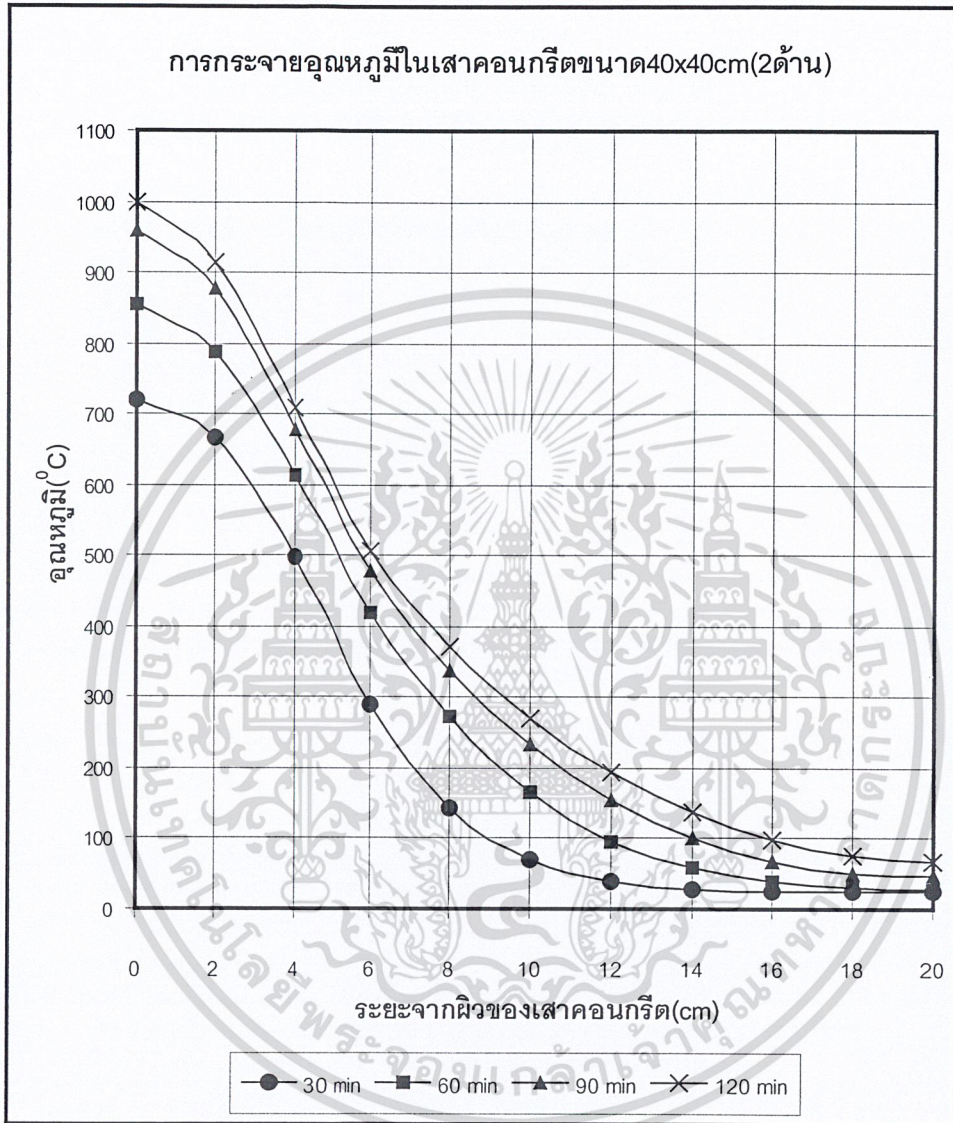
รูปที่ ผ.ข.6 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด30×30เซนติเมตร(ถ่ายเทความร้อน2ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผศ7 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



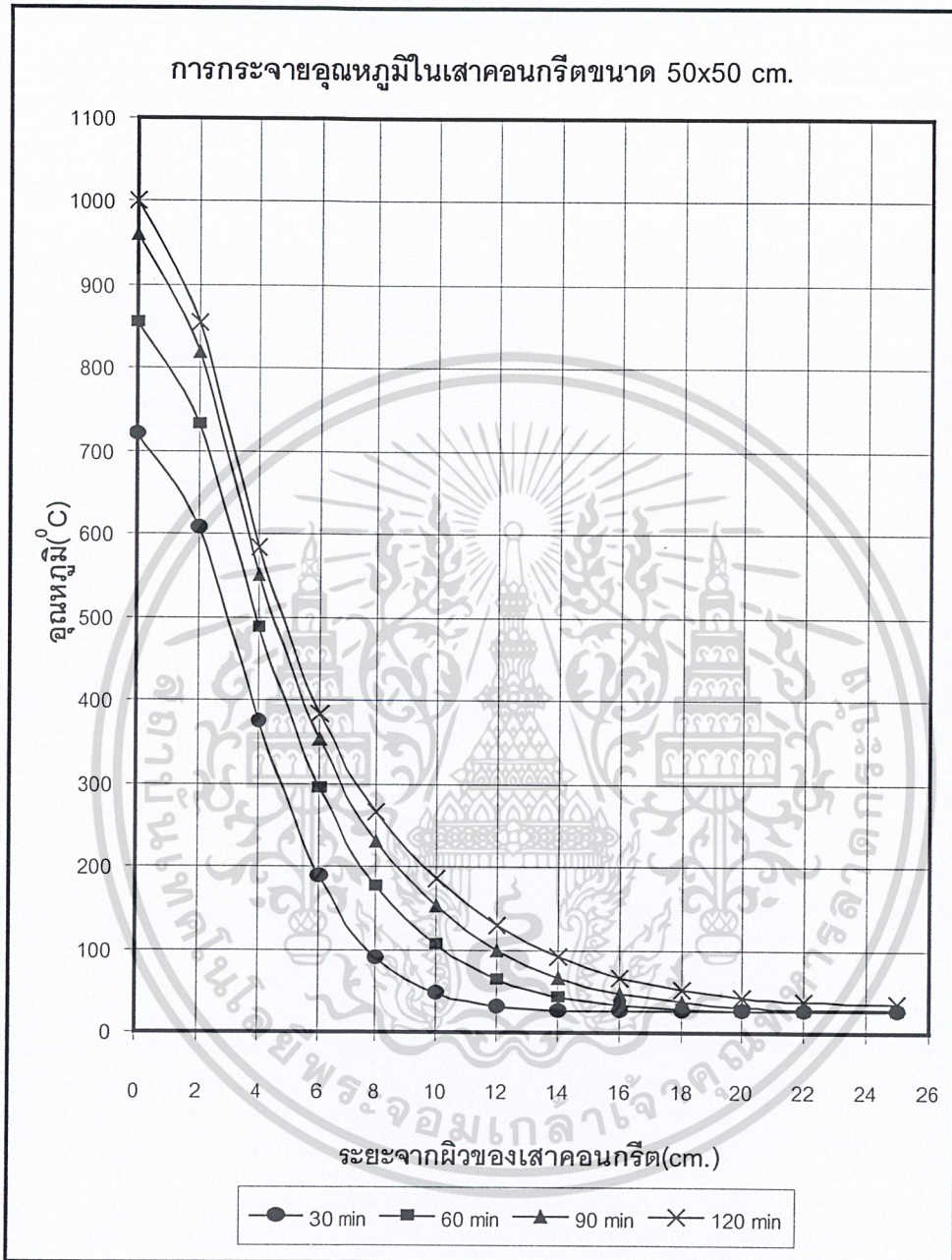
รูปที่ ผ.ข.7 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด40x40เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ผศ8 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



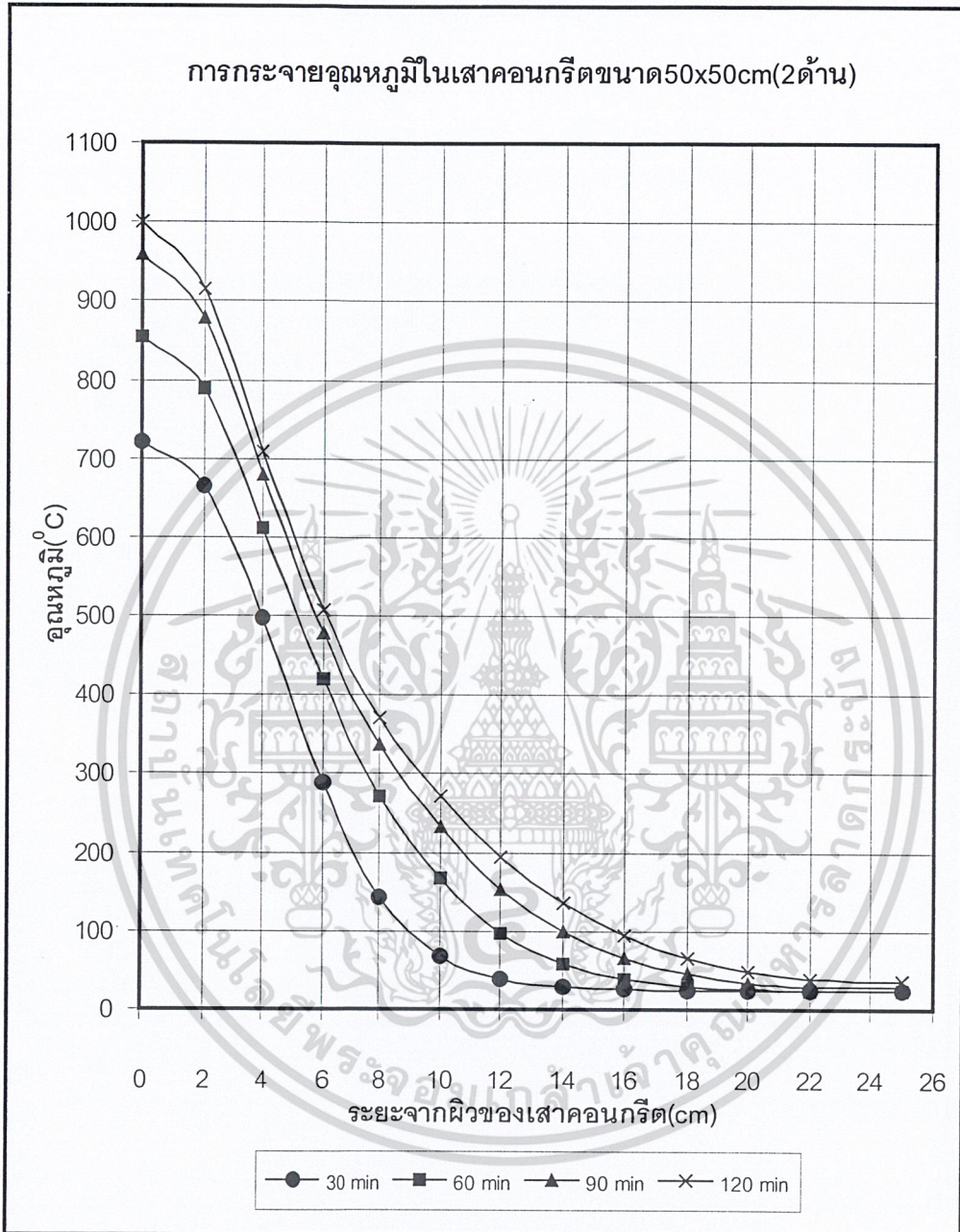
รูปที่ ผ.ข.8 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด40x40เซนติเมตร(ถ่ายเทความร้อน2ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผศ9 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ข.9 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด50×50เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา ผล10 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



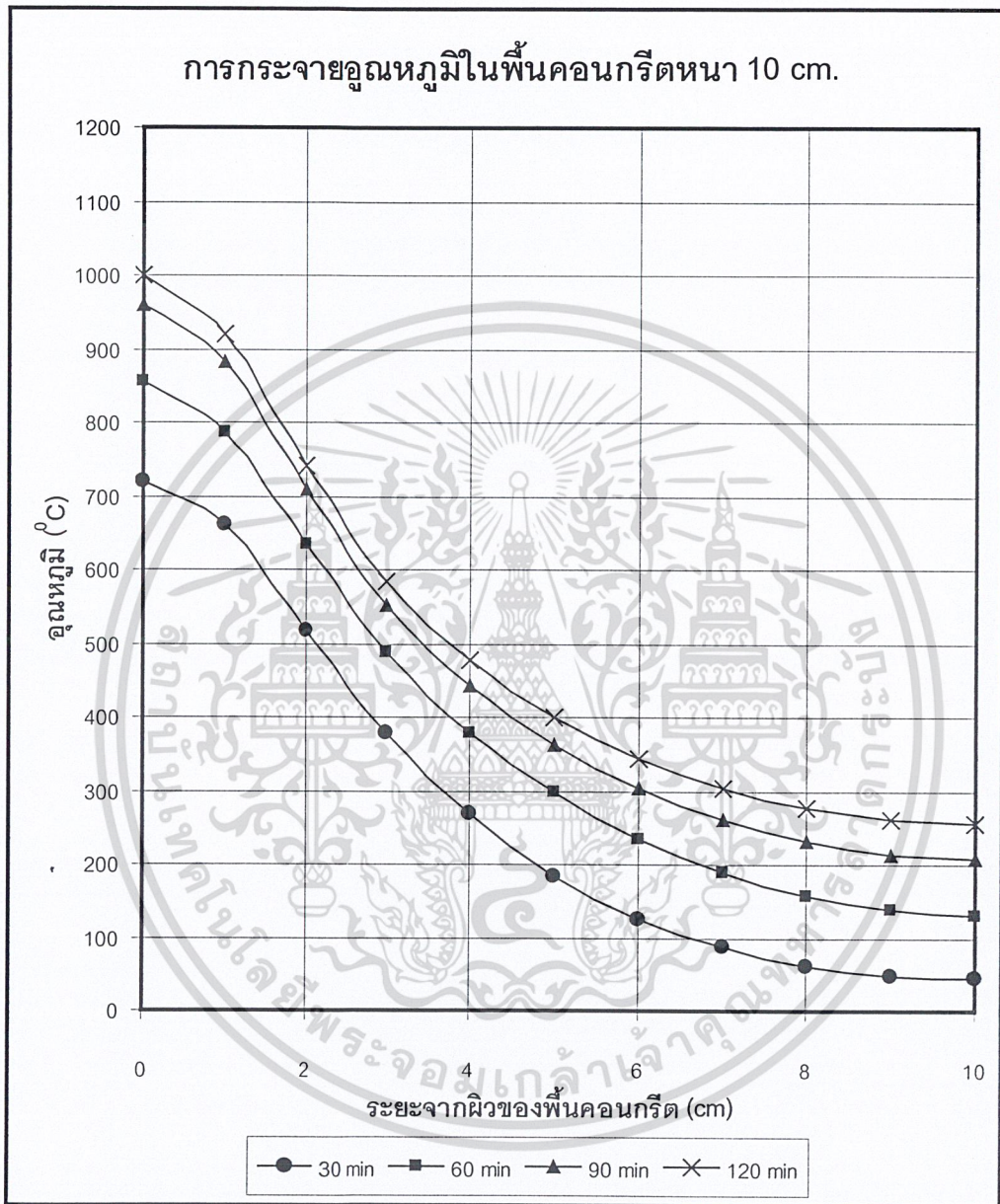
รูปที่ ผ.ข.10 กราฟการกระจายอุณหภูมิในเสาคอนกรีตขนาด50x50เซนติเมตร(ถ่ายเทความร้อน2ด้าน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา **ผศ.11** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

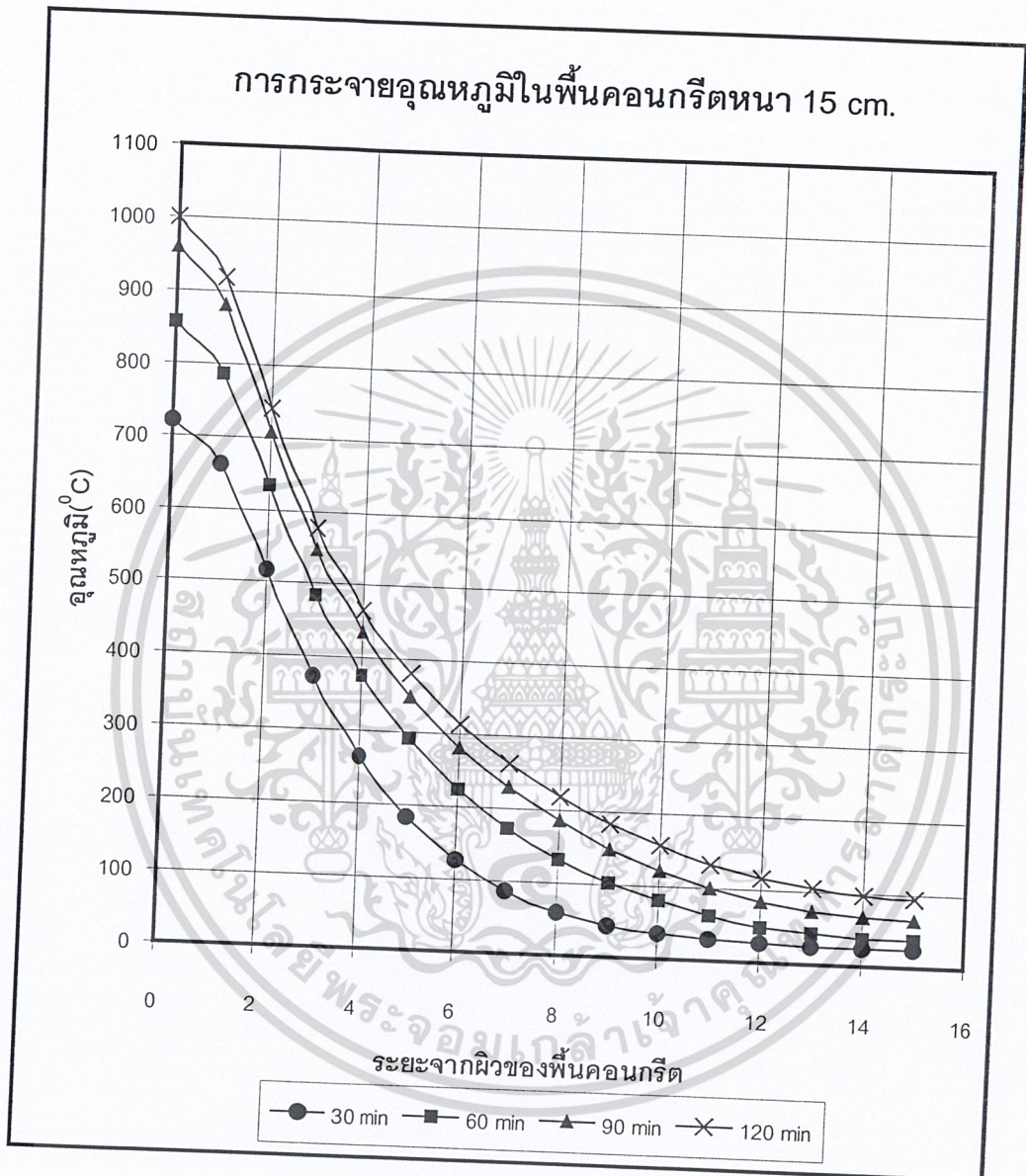
กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีต





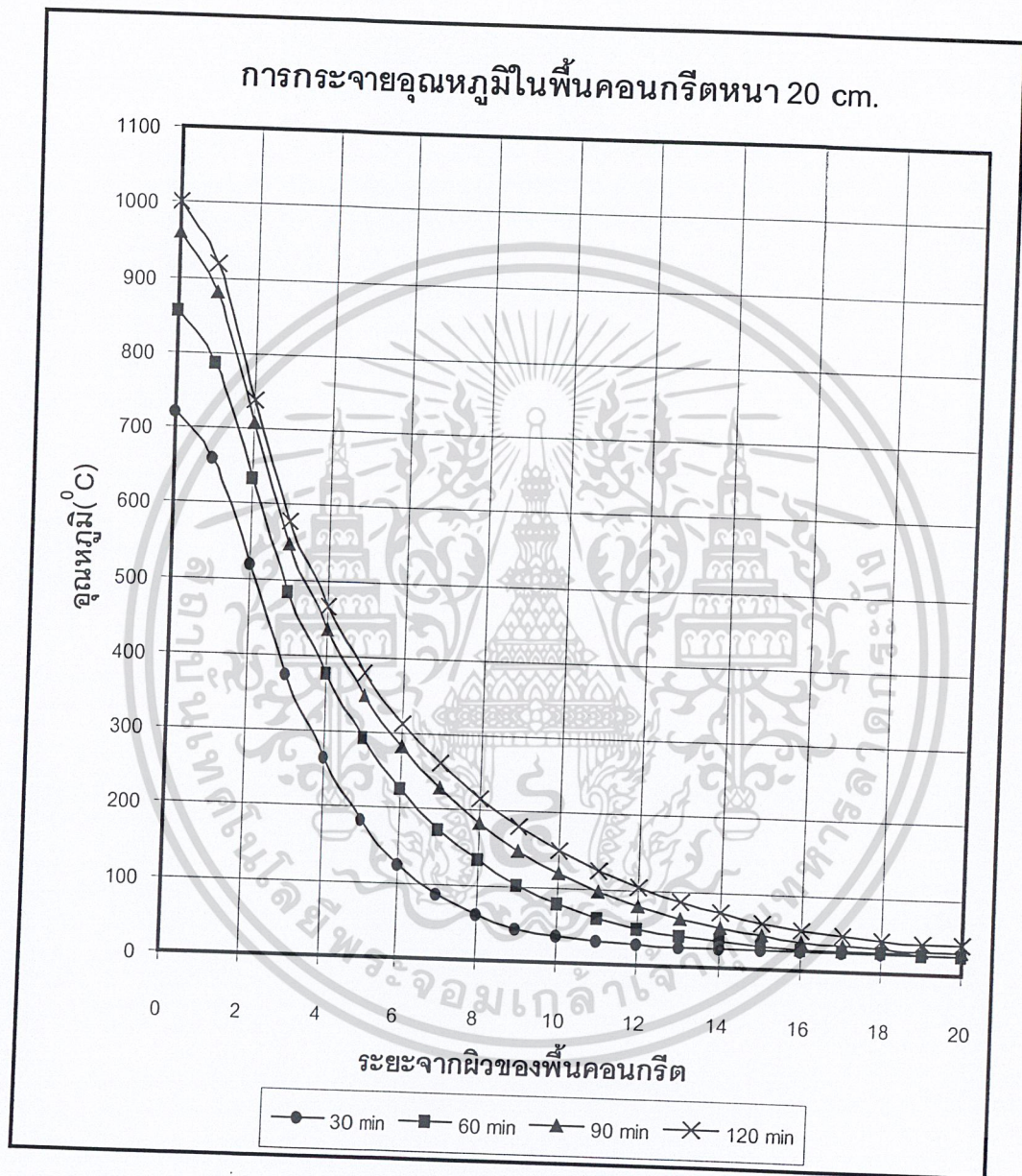
รูปที่ ผ.ค.1 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา 10 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



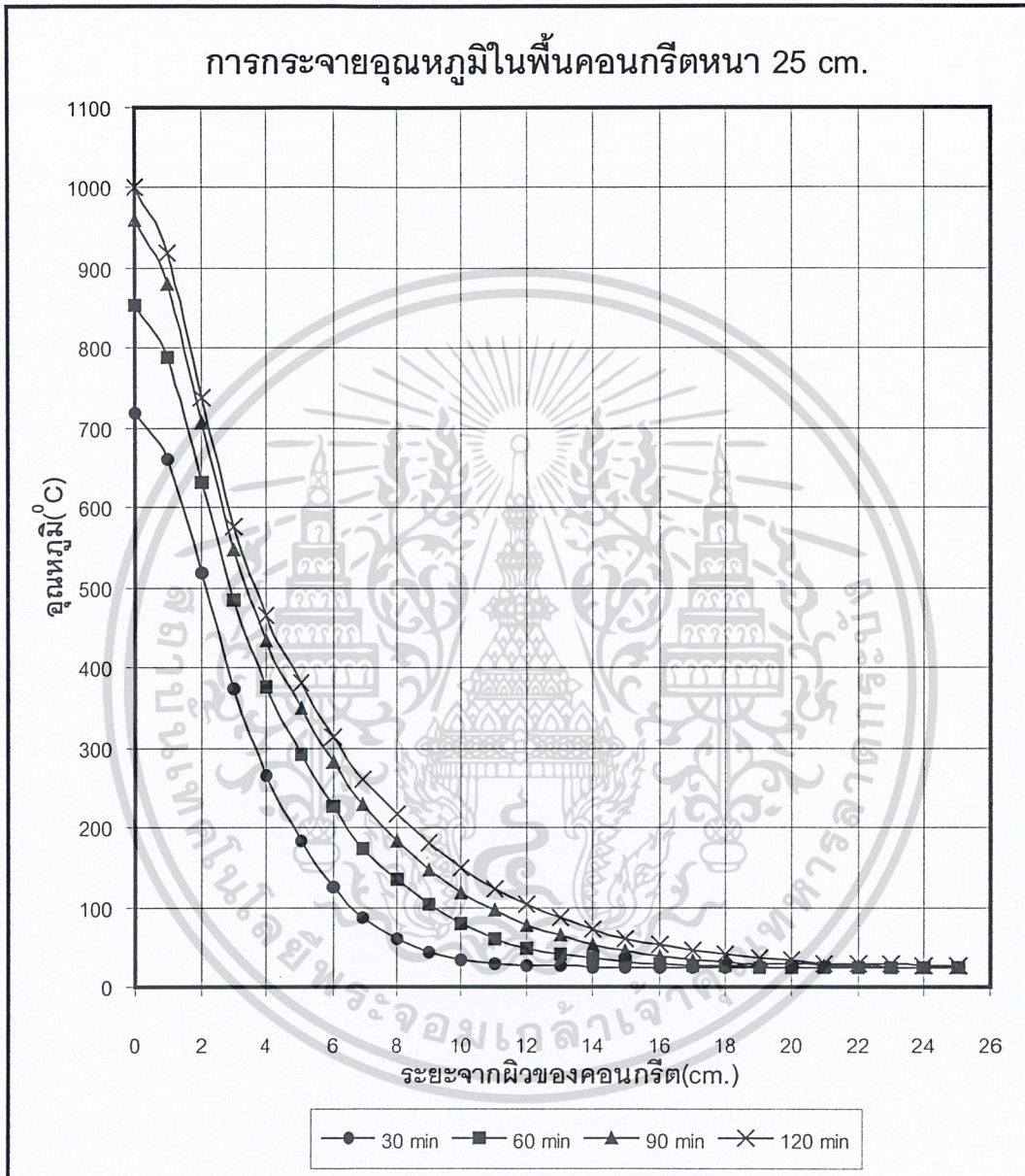
รูปที่ ผ.ค.2 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา 15 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ค.3 กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา 20 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ผ.ค.4. กราฟแสดงการกระจายอุณหภูมิในพื้นที่คอนกรีตหนา 25 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้