

ความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมยึดด้วยอีพอกซีเรซิน  
บริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2559  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Pull-out resistance of epoxy resin bonded steel rebar  
for concrete slab-to-wall connections under fire

Mr. Prakrit Phornwiriatham



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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมยึดด้วยอิพอกซีเรซินบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้
โดย	นายประกิต พรวิริยะธรรม
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ แสนจันทร์ชัย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติ)

ประกิต พรวิริยะธรรม : ความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมยึดด้วยอีพอกซีเรซินบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ (Pull-out resistance of epoxy resin bonded steel rebar for concrete slab-to-wall connections under fire) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล, 118 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมยึดด้วยอีพอกซีเรซินบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ โดยประยุกต์ใช้ผลการทดสอบการดึงออกจากงานวิจัยที่ผ่านมาควบคู่กับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตซึ่งสัมผัสความร้อนจากเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนออาศัยการทดสอบชิ้นตัวอย่างขนาดจริงซึ่งใช้เหล็กเสริมข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ภายใต้ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 และ 120 นาที

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถประมาณค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบขนาดจริงสำหรับเหล็กเสริมทุกขนาด โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงสุดของอุณหภูมิบริเวณผิวของผนังคอนกรีต และค่าคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิสำหรับกรณีระยะเวลาการให้ความร้อน 120 นาทีสูงกว่ากรณีระยะเวลาการให้ความร้อน 60 นาที นอกจากนี้ วิธีการที่นำเสนอยังสามารถประมาณค่าความต้านทานการดึงออกได้ใกล้เคียงกับผลการทดสอบขนาดจริงสำหรับเหล็กเสริมทุกขนาดที่ทำการศึกษา โดยมีค่าคลาดเคลื่อนสูงขึ้นสำหรับกรณีเหล็กเสริมที่มีระยะฝังลึกเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินได้รับผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิลดลง

จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ พบว่า ระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมลดลง นอกจากนี้ ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริมบริเวณแผ่นพื้นที่น้อยลงส่งผลให้ความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 5870188021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: EPOXY RESIN, PULL-OUT RESISTANCE, FIRE

PRAKIT PHORNWIRIYATHAM: Pull-out resistance of epoxy resin bonded steel rebar for concrete slab-to-wall connections under fire. ADVISOR: ASSOC. PROF. THANYAWAT POTHISIRI, Ph.D., CO-ADVISOR: ASST. PROF. PITCHA JONGVIVATSAKUL, Ph.D., 118 pp.

This research presents a method for assessing the pull-out resistance of steel rebar bonded with epoxy resin at the concrete slab-to-wall connection exposed to fire. The pull-out test results are employed in conjunction with the heat transfer analysis of the slab-to-wall connections exposed to ISO 834 standard fire by using the finite element method. The efficacy of the proposed method is verified by a series of tests of full-scale specimens using SD40 grade steel deformed bars with varying diameters of 12 mm, 16 mm, 20 mm and 25 mm subjected to the heating durations of 60 and 120 min.

The results show that the epoxy resin temperatures predicted by the proposed method match well with those measured from the tests for all rebar sizes. The largest discrepancies between the calculated and the measured temperatures are observed at the surface of the concrete wall while the heating duration of 120 min yields larger temperature differences compared with the heating duration of 60 min. Furthermore, the pull-out resistances as estimated by the presented method are close to the test results for all diameters of the steel rebars investigated, subject to increasing errors in case of larger embedment depths in which the temperature has lesser effect on the bond strength of epoxy resin.

The parametric study of the pull-out resistance of steel rebar at the slab-to-wall connection exposed to fire reveals that the pull-out resistance generally decreases with the increasing heating duration. In addition, reducing the concrete cover of the steel rebar within the slab significantly lowers the pull-out resistance of the steel rebar at the connection.

Department: Civil Engineering

Field of Study: Civil Engineering

Academic Year: 2016

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า นายประกิต พรวิริยะธรรม ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉัญวัฒน์ โปธิศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ทั้งสองท่านได้สละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และคำแนะนำต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์นี้ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ธีรพงศ์ เสนงจันทร์ดิไชย ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ศาสตราจารย์ ดร.ทักษิณ เทพชาติ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำที่ดีในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ โครงการแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาฯ สร้างเสริมพลัง จุฬาฯ ก้าวสู่ศตวรรษที่ 2 ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนเงินทุน สำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย และเจ้าหน้าที่ ที่ได้ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทดสอบ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณนายเรืองยศ พรวิริยะธรรม และนางประไพพร พรวิริยะธรรม ผู้เป็นบิดาและมารดาของข้าพเจ้า ที่สั่งสอนและให้กำลังใจข้าพเจ้าตลอดมา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 แบบจำลองการยืดเหนียวของอีพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในภาวะ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น.....	7
บทที่ 3 การทดสอบขนาดจริง.....	18
3.1 รายละเอียดการทดสอบ.....	19
3.2 ชิ้นตัวอย่างทดสอบ.....	20
3.3 การติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ.....	22
3.4 วิธีการทดสอบ.....	32
3.5 ผลการทดสอบขนาดจริง.....	33
บทที่ 4 การประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม.....	38
4.1 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต.....	38
4.2 สมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม.....	45

4.3 การตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอ .....	47
บทที่ 5 การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานการดึงออก ของเหล็กเสริมในภาวะเพลิงไหม้ .....	57
5.1 ระยะเวลาการให้ความร้อน .....	57
5.2 ระยะคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม .....	62
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	92
6.1 สรุปผลการวิจัย .....	92
6.2 ข้อเสนอแนะ .....	93
รายการอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก ก .....	96
ภาคผนวก ข .....	98
ภาคผนวก ค .....	102
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	118



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1	รายละเอียดการทดสอบ.....	19
ตารางที่ 3.2	สมบัติเชิงกลของคอนกรีต.....	21
ตารางที่ 3.3	สมบัติเชิงกลของเหล็กเสริม .....	21
ตารางที่ 3.4	แรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซิน และ ลักษณะการวิบัติจากการทดสอบขนาดจริง .....	37
ตารางที่ 4.1	ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน.....	50
ตารางที่ 4.2	ค่าความแม่นยำของวิธีการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม .	56
ตารางที่ 5.1	ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm .....	68
ตารางที่ 5.2	ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm .....	70
ตารางที่ 5.3	ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm .....	73
ตารางที่ 5.4	ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm .....	76
ตารางที่ 5.5	ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้น และผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm .....	80
ตารางที่ 5.6	ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้น และผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm .....	82
ตารางที่ 5.7	ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้น และผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm .....	85
ตารางที่ 5.8	ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้น และผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm .....	88

## สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างของการเจาะเสียบเหล็กบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต.....	1
รูปที่ 1.2 รอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต .....	2
รูปที่ 1.3 รอยต่อโครงสร้างในงานวิจัยนี้ : (ก) รูปแบบรอยต่อที่ทำการศึกษา (ข) รูปแบบการจำลองรอยต่อ .....	4
รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834-1 .....	5
รูปที่ 1.5 กรอบแนวคิดวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	6
รูปที่ 2.1 ชั้นตัวอย่างการดึงออก.....	8
รูปที่ 2.2 แผนภาพวัตถุอิสระของชั้นตัวอย่างการดึงออก : (ก) การกระจัดและความเครียดเฉือนของอิพอกซีเรซิน (ข) หน่วยแรงในเหล็กเสริมและอิพอกซีเรซิน (ค) หน่วยแรงดึงภายในเหล็กเสริมและอิพอกซีเรซิน .....	8
รูปที่ 2.3 การแปรผันของค่ามอดุลัสของสภาพยึดหยุ่นของอิพอกซีเรซินตามอุณหภูมิ .....	12
รูปที่ 2.4 การแปรผันของอัตราส่วนของบัวของของอิพอกซีเรซินในช่วงอุณหภูมิ 30 °C - 325 °C [10].....	13
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสเฉือนของอิพอกซีเรซินและอุณหภูมิ .....	14
รูปที่ 2.6 การทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิสูง : (ก) รายละเอียดชั้นตัวอย่าง (ข) การติดตั้งชั้นตัวอย่างทดสอบ [7] .....	15
รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm .....	16
รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm .....	16
รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm .....	17
รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบและแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm .....	17

รูปที่ 3.1	พื้นที่ปิดล้อมที่เกิดเพลิงไหม้.....	18
รูปที่ 3.2	รายละเอียดการเสริมเหล็ก : (ก) พื้นคอนกรีต (ข) ผนังคอนกรีต .....	20
รูปที่ 3.3	การติดตั้งการทดสอบ : (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพด้านหน้า.....	22
รูปที่ 3.4	รูปตัด ก-ก ตำแหน่งการติดตั้งชิ้นตัวอย่างและอุปกรณ์วัดค่าการกระจัด.....	23
รูปที่ 3.5	การติดตั้งจริงสำหรับการทดสอบขนาดจริง .....	23
รูปที่ 3.6	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณพื้นคอนกรีต : (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพตัด ก-ก .....	25
รูปที่ 3.7	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณผนังคอนกรีต : (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพด้านหน้า.....	26
รูปที่ 3.8	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง : (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพตัด ก-ก เสริม.....	27
รูปที่ 3.9	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง : (ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 12 mm.....	28
รูปที่ 3.10	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง : (ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 16 mm.....	29
รูปที่ 3.11	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง : (ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 20 mm.....	30
รูปที่ 3.12	ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง : (ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 25 mm.....	31
รูปที่ 3.13	การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F60 และ SW-DB12-F120.....	34
รูปที่ 3.14	การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F60 และ SW-DB16-F120.....	35
รูปที่ 3.15	การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F60 และ SW-DB20-F120.....	35

รูปที่ 3.16 การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F60 และ SW-DB25-F120.....	36
รูปที่ 4.1 รายละเอียดแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้น และผนังคอนกรีต .....	38
รูปที่ 4.2 เงื่อนไขบริเวณขอบเขตแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้น และผนังคอนกรีต.....	39
รูปที่ 4.3 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในโปรแกรม ANSYS .....	39
รูปที่ 4.4 ลักษณะของชิ้นส่วน : (ก) LINK33 สำหรับเหล็กเสริม (ข) SOLID70 สำหรับคอนกรีต [7].....	40
รูปที่ 4.5 การแบ่งชิ้นส่วนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ : (ก) ชิ้นส่วนพื้น (ข) ชิ้นส่วนผนัง.....	41
รูปที่ 4.6 การแปรผันของความหนาแน่นของคอนกรีตตามอุณหภูมิ [11].....	42
รูปที่ 4.7 การแปรผันของสภาพนำความร้อนของคอนกรีตตามอุณหภูมิ [11].....	42
รูปที่ 4.8 การแปรผันของความร้อนจำเพาะของคอนกรีตตามอุณหภูมิ [11].....	43
รูปที่ 4.9 การแปรผันของสภาพนำความร้อนของเหล็กตามอุณหภูมิ [12].....	43
รูปที่ 4.10 การแปรผันของความร้อนจำเพาะของเหล็กตามอุณหภูมิ [12] .....	44
รูปที่ 4.11 การกระจายค่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต .....	44
รูปที่ 4.12 แนวทางการประมาณความต้านทานการดึงออก [7].....	46
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอน ความร้อนกับการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm.....	48
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอน ความร้อนกับการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm.....	48
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอน ความร้อนกับการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm.....	49





<b>รูปที่ ก.1</b> แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบริเวณด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างของเหล็กเสริม.....	97
<b>รูปที่ ก.2</b> การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบริเวณด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างของเหล็กเสริม.....	98
<b>รูปที่ ข.1</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 60 min .....	99
<b>รูปที่ ข.2</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 120 min .....	99
<b>รูปที่ ข.3</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 60 min .....	100
<b>รูปที่ ข.4</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 120 min .....	100
<b>รูปที่ ข.5</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 60 min .....	101
<b>รูปที่ ข.6</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 120 min .....	101
<b>รูปที่ ข.7</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 60 min .....	102
<b>รูปที่ ข.8</b> การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 120 min .....	102
<b>รูปที่ ค.1</b> การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F060 บริเวณตำแหน่ง $T_{s1} - T_{s4}$ .....	103
<b>รูปที่ ค.2</b> การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F060 บริเวณตำแหน่ง $T_{s5} - T_{s8}$ .....	103
<b>รูปที่ ค.3</b> การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F060 บริเวณตำแหน่ง $T_{w1} T_{w3} T_{w5} T_{w7} T_{w9}$ และ $T_{w11}$ .....	104







- รูปที่ ค.30** การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min  
สำหรับชั้นตัวอย่าง SW-DB25-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$  .....117
- รูปที่ ค.31** การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min  
สำหรับชั้นตัวอย่าง SW-DB25-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w1} T_{w3} T_{w5} T_{w7} T_{w9}$  และ  $T_{w11}$  .....118
- รูปที่ ค.32** การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min  
สำหรับชั้นตัวอย่าง SW-DB25-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w2} T_{w4} T_{w6} T_{w8} T_{w10}$  และ  $T_{w12}$  .....118



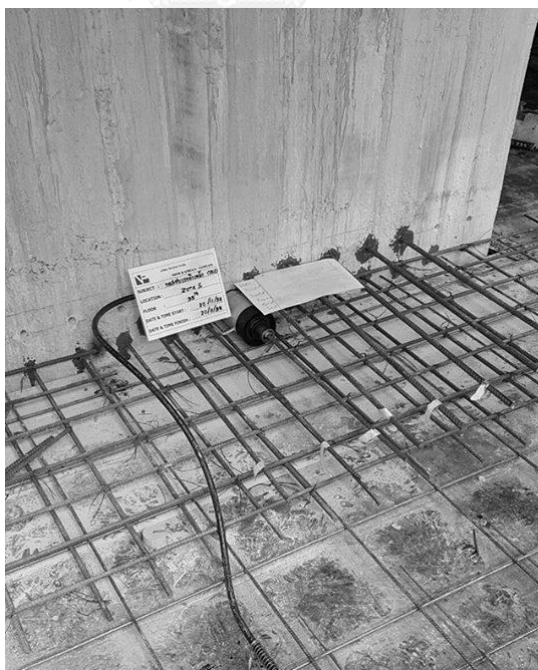
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเจาะเสียบเหล็กในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นเทคนิคการก่อสร้างที่นิยมใช้มากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากความสะดวกและรวดเร็วในการทำงาน ตัวอย่างของการเจาะเสียบเหล็กที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายได้แก่ บริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1.1

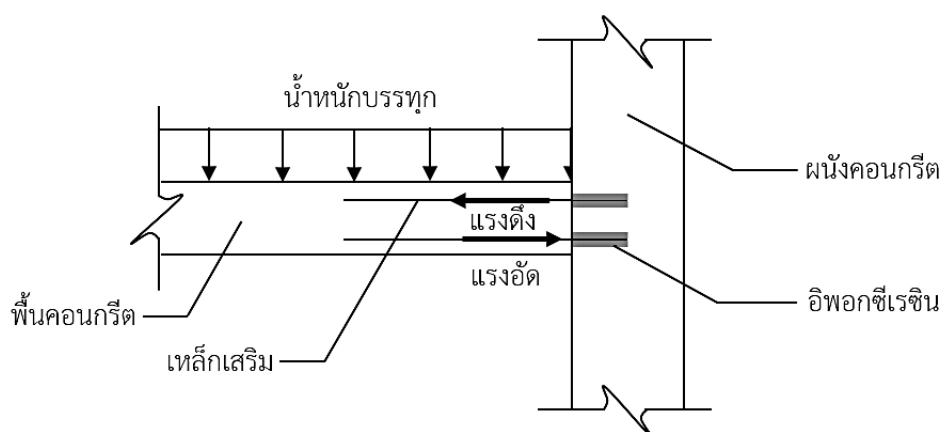
การเจาะเสียบเหล็กในปัจจุบันใช้อีพอกซีเรซิน (epoxy resin) เป็นองค์ประกอบหลักที่ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีต เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลต้านกำลังยึดเหนี่ยวที่ดี [1] และความทนทานต่อสภาพแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุประเภทอื่น [2] โดยที่อุณหภูมิปรกติเหล็กเสริมที่มีอีพอกซีเรซินยึดเหนี่ยวกับคอนกรีตมีความต้านทานการดึงออกสูงกว่าเหล็กเสริมที่หล่อในคอนกรีตโดยตรง [3]



รูปที่ 1.1 ตัวอย่างของการเจาะเสียบเหล็กบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต

อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4] พบว่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้น โดยจากการทดสอบการดึงออกของเหล็กเสริมที่ยึดด้วยอิพอกซีเรซินในตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก พบว่าสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลง โดยที่ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้ในการประเมินความต้านทานการดึงออกและความต้านทานโมเมนต์ดัดบริเวณรอยต่อระหว่างคานยื่นกับผนังคอนกรีตเสริมเหล็กได้ [5] ทั้งนี้ ผลการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาดังกล่าวอ้างอิงผลการทดสอบการดึงออกของเหล็กเสริม ขนาด 12 mm เท่านั้น ในขณะที่งานวิจัยของ Horsangchai และ Pothisiri [6] ชี้ให้เห็นว่าขนาดของเหล็กเสริมที่แตกต่างกันส่งผลต่อการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวตามอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นแสดงให้เห็นถึงความเสี่ยงต่อการวิบัติของรอยต่อโครงสร้างที่ใช้การเจาะเสียบเหล็กในกรณีที่เกิดเพลิงไหม้ รวมทั้งแสดงให้เห็นว่างานวิจัยเรื่องดังกล่าวยังคงค้างงำกั ด ด้วยเหตุนี้ การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่มีต่อความต้านทานการดึงออกของรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต (ดูรูปที่ 1.2 ประกอบ) ซึ่งเป็นรอยต่อประเภทหนึ่งที่ยิยมใช้การเจาะเสียบเหล็กในการก่อสร้าง โดยอาศัยสมการทำนายการยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7] ควบคู่กับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อของโครงสร้างซึ่งสัมผัสความร้อนจากเพลิงไหม้มาตรฐาน โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้ งานวิจัยนี้จะดำเนินการทดสอบขนาดจริงเพื่อตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนออีกด้วย



รูปที่ 1.2 รอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

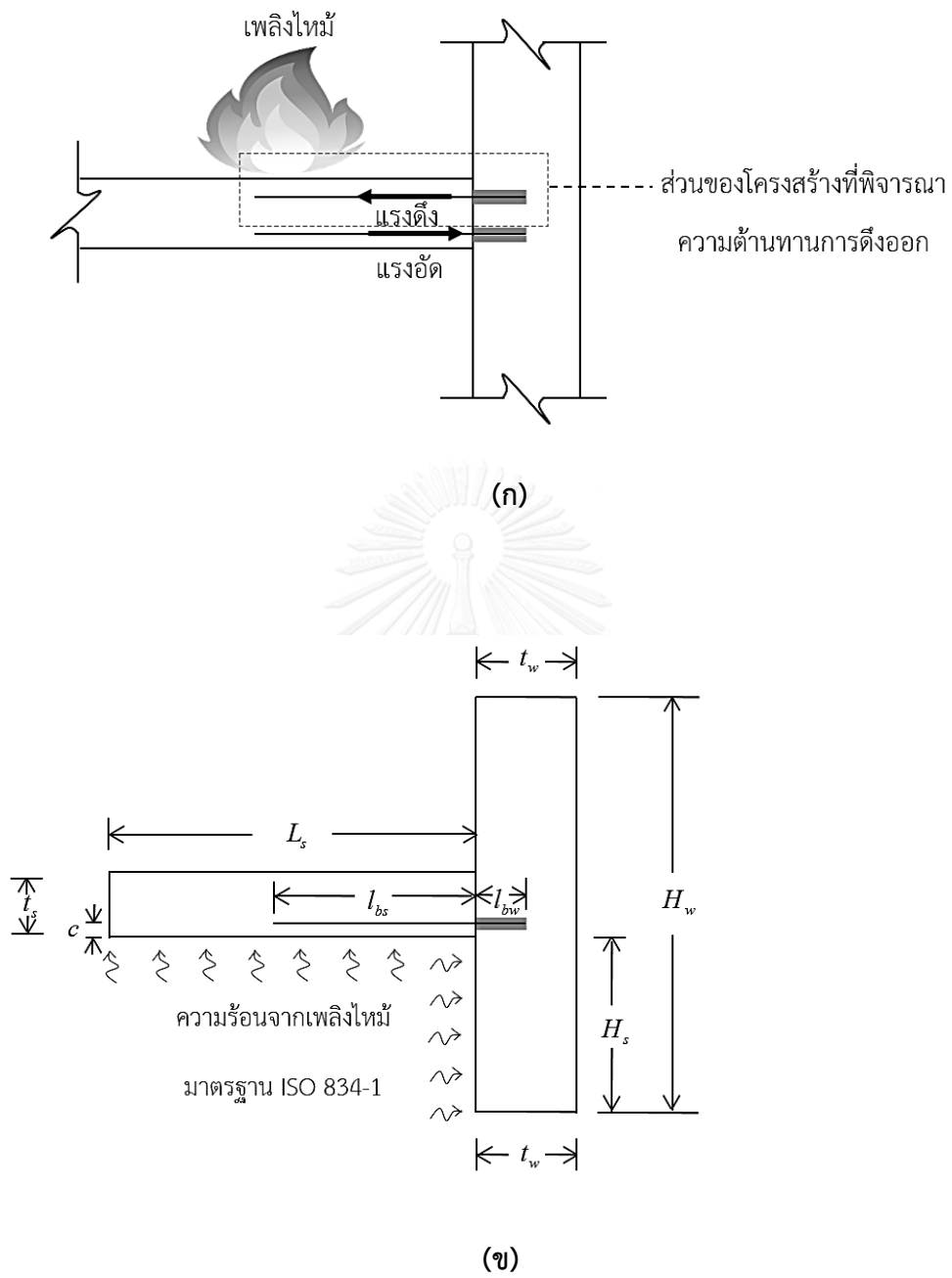
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาวิธีการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมยึดด้วยอีพอกซีเรซินบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้

## 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

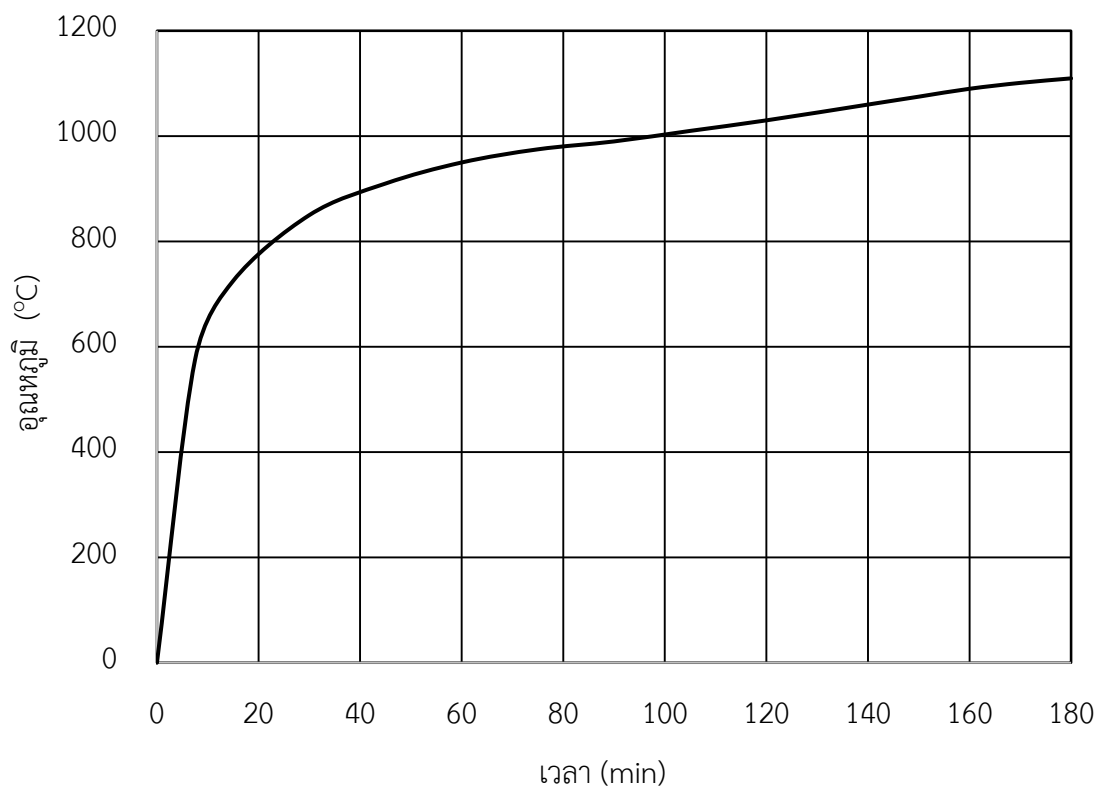
1. แบบจำลองสำหรับอธิบายพฤติกรรมการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น
2. แนวทางการประเมินความเสี่ยงของรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตที่ใช้การเจาะเสียบเหล็กในภาวะเพลิงไหม้ โดยอาศัยการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อดังกล่าว โดยอาศัยสมการทำนายการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7]

## 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

การศึกษานี้พิจารณารูปแบบรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ก) โดยเน้นเฉพาะการพิจารณาความต้านทานการดึงออกเป็นหลัก และทำการจำลองรูปแบบรอยต่อ เพื่อสามารถติดตั้งขึ้นตัวอย่างทดสอบกับเตาเผาทดสอบแนวราบที่ใช้ในการทดสอบขนาดจริงดังแสดงในรูปที่ 1.3 (ข) รูปแบบของรอยต่อที่พิจารณาประกอบด้วยพื้นคอนกรีตซึ่งมีความยาว  $L_s$  และความหนา  $t_s$  ผนังคอนกรีตซึ่งมีความสูง  $H_w$  และความหนา  $t_w$  โดยที่พื้นเชื่อมต่อกับผนังคอนกรีตที่ตำแหน่งความสูง  $H_s$  กำหนดระยะคอนกรีตหุ้ม  $c$  ระยะฝังของเหล็กเสริมในพื้นที่คอนกรีต  $I_{bs}$  และระยะฝังของเหล็กเสริมในผนังคอนกรีต  $I_{bw}$  ตามลำดับ สำหรับวัสดุที่พิจารณาประกอบด้วยคอนกรีตปรกติมวลรวมเนื้อปูน ที่มีกำลังอัด (รูปทรงกระบอก) ที่อายุ 28 day เท่ากับ 30 MPa เหล็กเสริมข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm และอีพอกซีเรซินที่มีสมบัติเชิงกลดังแสดงรายละเอียดในบทที่ 2 ทั้งนี้พิจารณาให้รอยต่อสัมผัสเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834-1 [8] ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โดยกำหนดให้ระยะเวลาสัมผัสเพลิงไหม้สูงสุด 120 min สำหรับการทดสอบขนาดจริง และ 180 min สำหรับการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในบทที่ 5 ตามลำดับ



รูปที่ 1.3 รอยต่อโครงสร้างในงานวิจัยนี้ : (ก) รูปแบบรอยต่อที่ทำการศึกษา  
(ข) รูปแบบการจำลองรอยต่อ

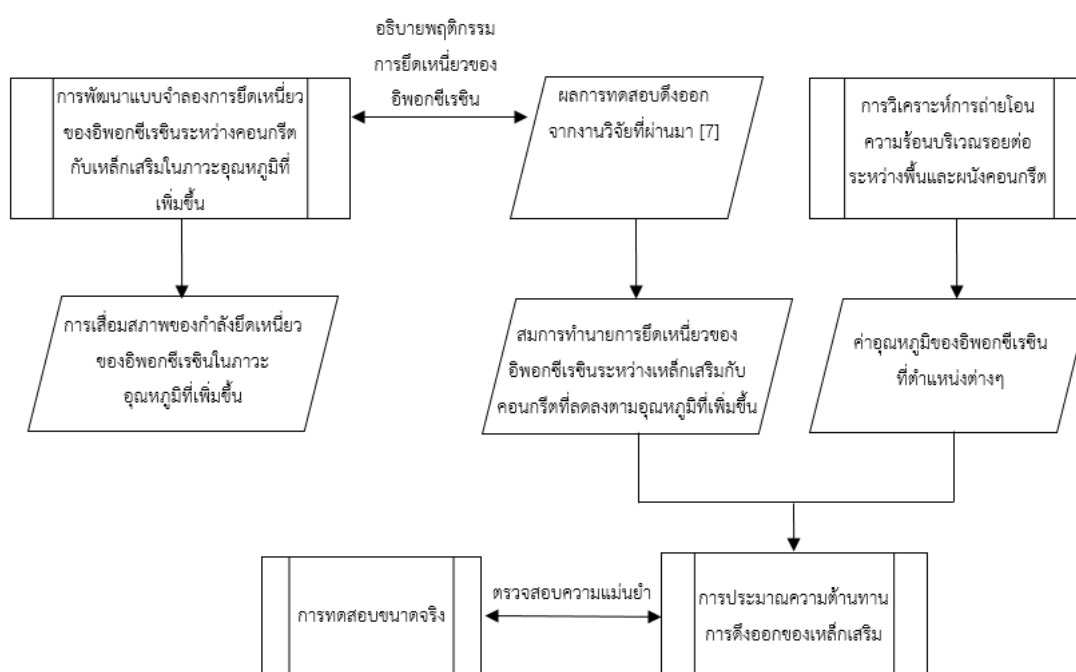


รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834-1



## 1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ประกอบด้วยการทำงาน 4 ส่วนหลัก ได้แก่ การพัฒนาแบบจำลองการยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต การประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม และการทดสอบขนาดจริง โดยแผนผังกรอบแนวคิดวิธีการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 1.5 ทั้งนี้ รายละเอียดการดำเนินงานของแต่ละหัวข้อจะนำเสนอในบทที่ 2 - 5 ตามลำดับ



รูปที่ 1.5 กรอบแนวคิดวิธีการดำเนินงานวิจัย

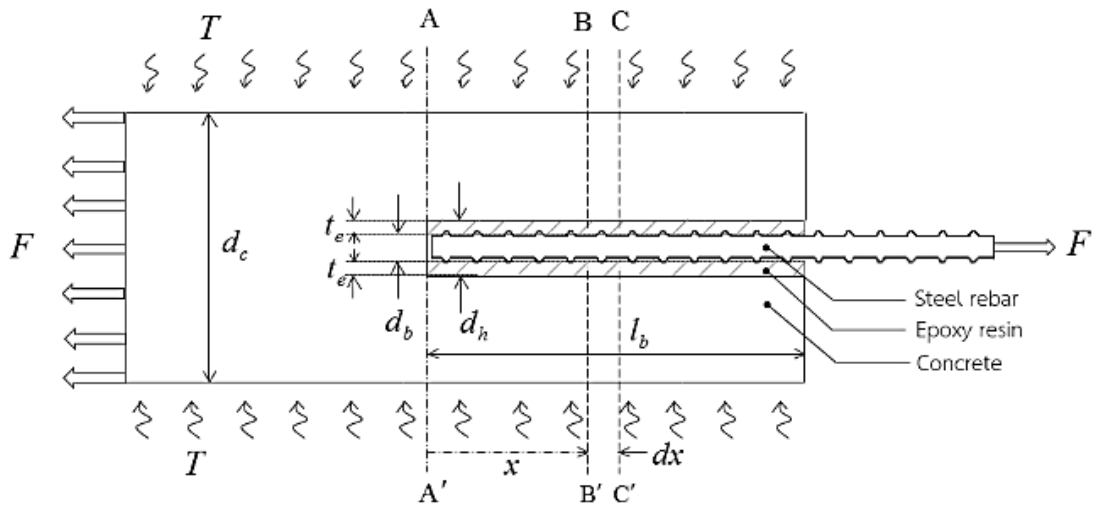


## บทที่ 2

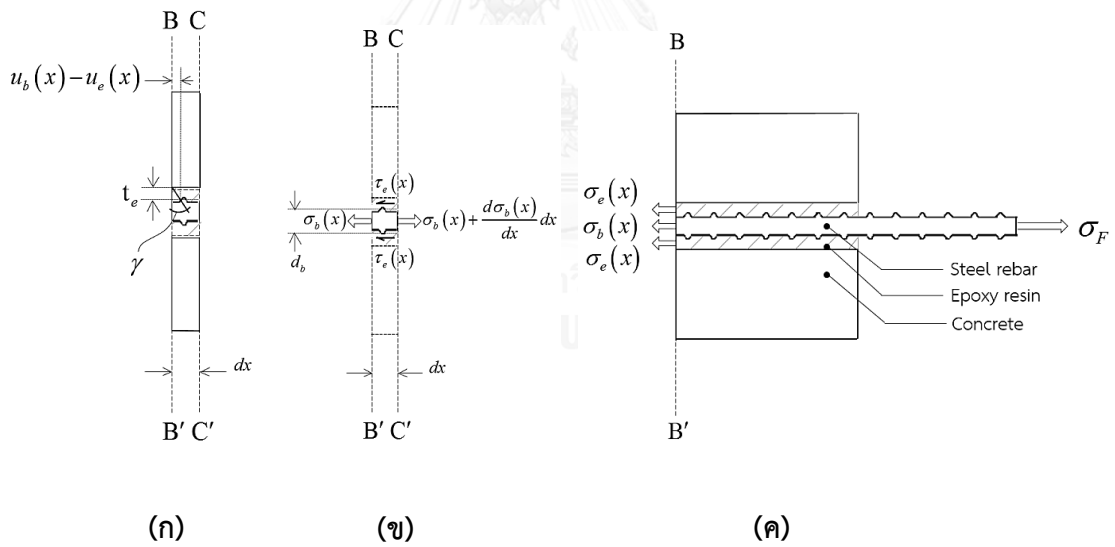
### แบบจำลองการยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับ เหล็กเสริมในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เนื้อหาในบทนี้นำเสนอแบบจำลองการยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งพัฒนาจากแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยของ Bouazaoui และ Li [3] โดยพิจารณาสมบัติเชิงกลของอิพอกซีเรซิน ได้แก่ โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่นและโมดูลัสเฉือนที่แปรผันตามอุณหภูมิ ทั้งนี้ แบบจำลองที่นำเสนอตั้งกล่าวมีวัตถุประสงค์หลักเพื่ออธิบายพฤติกรรมการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินตามอุณหภูมิ ซึ่งแปรผันตามขนาดของเหล็กเสริมจากผลการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา [7]

แบบจำลองที่นำเสนอนี้พิจารณาขึ้นตัวอย่างการดึงออก ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตรูปทรงกระบอก เหล็กเสริมข้ออ้อย และอิพอกซีเรซินระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตในภาวะอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยกำหนดให้ เหล็กข้ออ้อยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ  $d_b$  ยึดด้วยอิพอกซีเรซินที่มีความหนา  $t_e$  ฝังในคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d_c$  โดยมีระยะฝังของเหล็กเสริม  $l_b$  ทั้งนี้ สมมติให้ที่อุณหภูมิสูง เหล็กเสริม อิพอกซีเรซิน และคอนกรีตยังคงสภาพยืดหยุ่น โดยที่อุณหภูมิของคอนกรีตแทนด้วยสัญลักษณ์  $T_c$  อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินแทนด้วยสัญลักษณ์  $T_e$  และอุณหภูมิของเหล็กเสริมแทนด้วยสัญลักษณ์  $T_b$  ตามลำดับ ทั้งนี้ ผลการทดสอบจากงานวิจัยที่ผ่านมา [7] แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดการวิบัติแบบดึงออกที่สามารถวัดค่าได้บริเวณผิวระหว่างอิพอกซีเรซินกับเหล็กเสริม มีค่าไม่เกิน  $325\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $T_e \leq 325\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) โดยที่อุณหภูมิดังกล่าวสมบัติเชิงกลของคอนกรีตและเหล็กเสริมไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่อิพอกซีเรซินมีค่าโมดูลัสลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 2.1 ชิ้นตัวอย่างการดึงออก



รูปที่ 2.2 แผนภาพวัตถุอิสระของชิ้นตัวอย่างการดึงออก :

(ก) การกระจัดและความเครียดเฉือนของอีพอกซีเรซิน

(ข) หน่วยแรงในเหล็กเสริมและอีพอกซีเรซิน (ค) หน่วยแรงดึงภายในเหล็กเสริมและอีพอกซีเรซิน

ในการวิเคราะห์แบบจำลองพิจารณาแรงดึงออก  $F$  ในรูปของหน่วยแรงภายนอกคงที่  $\sigma_F$  ในทิศทางตามแนวแกนของเหล็กเสริม โดยที่ภายใต้หน่วยแรงดึงออกดังกล่าว เหล็กเสริมและอิพอกซีเรซินเกิดการกระจัด ในขณะที่คอนกรีตไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทั้งนี้ สมมติฐานดังกล่าวอ้างอิงจากลักษณะการเกิดการวิบัติเฉือนบริเวณชั้นของอิพอกซีเรซิน โดยที่คอนกรีตไม่เกิดการแตกร้าวในชั้นตัวอย่างทดสอบการดึงออกในงานวิจัยที่ผ่านมา [7]

สำหรับชั้นส่วน  $dx$  ของชั้นตัวอย่างทดสอบ (รูปที่ 2.2 (ก)) สามารถคำนวณความเครียดเฉือนบริเวณชั้นของอิพอกซีเรซิน ได้ดังสมการ

$$\gamma_e(x) = \frac{u_b(x) - u_e(x)}{t_e} \quad (1)$$

โดยที่  $u_b(x)$  และ  $u_e(x)$  แทนการกระจัดของเหล็กเสริมและอิพอกซีเรซินที่ระยะ  $x$  จากปลายของเหล็กเสริม ในขณะที่  $t_e$  แทนความหนาของชั้นอิพอกซีเรซิน ทั้งนี้ ระบายเฉือนที่พิจารณาในสมการข้างต้นกำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุงของเหล็กข้ออ้อย  $d_b$  สมการที่ (1) สามารถเขียนใหม่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนี้

$$\frac{d\gamma_e(x)}{dx} = \frac{1}{t_e} \left( \frac{du_b(x)}{dx} - \frac{du_e(x)}{dx} \right) = \frac{1}{t_e} (\varepsilon_b(x) - \varepsilon_e(x)) \quad (2)$$

โดยเมื่อประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงและความเครียดในรูป  $\sigma = E\varepsilon$  และ  $\tau = G\gamma$  สามารถจัดรูปสมการที่ (2) ใหม่ได้ดังสมการ

$$\frac{d\tau_e(x)}{dx} = \frac{G_{e,T_e}}{t_e} \left( \frac{\sigma_b(x)}{E_b} - \frac{\sigma_e(x)}{E_{e,T_e}} \right) \quad (3)$$

โดยที่  $G_{e,T_e}$  และ  $E_{e,T_e}$  แทนมอดุลัสเฉือนและมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของอิพอกซีเรซิน ซึ่งแปรผันตามอุณหภูมิ  $T_e$  โดย  $\sigma_b(x)$  และ  $\sigma_e(x)$  แทนหน่วยแรงภายในเหล็กเสริมและอิพอกซีเรซินตามลำดับ และ  $E_b$  แทนมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ซึ่งพิจารณาให้ไม่ได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยในการศึกษานี้ใช้ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของเหล็กเสริมเฉลี่ยจากผลการทดสอบคุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กเสริมทั้ง 4 ขนาด ตามมาตรฐาน ASTM C370 [9] เท่ากับ 199,910 MPa

สำหรับชิ้นส่วน  $dx$  ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) สามารถเขียนสมการระหว่างหน่วยแรงเฉือน  $\tau_e(x)$  กับหน่วยแรงตามแนวแกนของเหล็กเสริม  $\sigma_b(x)$  ดังสมการ

$$\tau_e(x) \cdot \pi d_b dx = \left( \frac{d\sigma_b(x)}{dx} \right) \frac{\pi d_b^2}{4} dx \quad (4)$$

และ

$$\frac{d\sigma_b(x)}{dx} = \frac{4\tau_e(x)}{d_b} \quad (5)$$

นอกจากนี้ จากรูปที่ 2.2 (ค) สามารถแสดงสมการสมดุลระหว่างหน่วยแรงภายนอก  $\sigma_F$  กับหน่วยแรงตามแนวแกนของเหล็กเสริม  $\sigma_b(x)$  และหน่วยแรงดึงภายในอ็อกซีเรซิน  $\sigma_e(x)$  ดังนี้

$$A_b \sigma_F = A_b \sigma_b(x) + A_e \sigma_e(x) \quad (6)$$

โดยที่  $A_b$  และ  $A_e$  แทนพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริมและอ็อกซีเรซิน ตามลำดับ ดังนั้น จึงสามารถคำนวณหน่วยแรงดึงออกภายในอ็อกซีเรซิน ตามสมการ

$$\sigma_e(x) = (\sigma_b(x) - \sigma_F) \frac{A_b}{A_e} = (\sigma_b(x) - \sigma_F) \left( \frac{d_b^2}{d_h^2 - d_b^2} \right) \quad (7)$$

โดยที่  $d_h = d_b + 2t_e$  แทนเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะภายในชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก จากสมการที่ (3) (5) และ (7) สามารถเขียนสมการใหม่ในรูปเชิงอนุพันธ์ ดังนี้

$$\frac{d^2\sigma_b(x)}{dx^2} = \frac{4G_{e,T_e}}{d_b t_e} \left( \left( \frac{1}{E_b} + \frac{d_b^2}{E_{e,T_e}(d_h^2 - d_b^2)} \right) \sigma_b(x) - \frac{d_b^2}{E_{e,T_e}(d_h^2 - d_b^2)} \sigma_F \right) \quad (8)$$

สมการด้านบนสามารถเขียนในรูปสมการ

$$\sigma_b''(x) - \beta_1^2 \sigma_b(x) + \beta_2 \sigma_F = 0 \quad (9)$$

โดยที่

$$\beta_1^2 = \frac{4G_{e,T_e}}{d_b t_e} \left( \frac{1}{E_b} + \frac{d_b^2}{E_{e,T_e} (d_h^2 - d_b^2)} \right) \quad \text{และ} \quad \beta_2 = \frac{4G_{e,T_e} d_b}{E_{e,T_e} (d_h^2 - d_b^2)} \quad (10)$$

คำตอบของสมการที่ (10) สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$\sigma_b(x) = C_1 \cosh(\beta_1 x) + C_2 \sinh(\beta_1 x) + \sigma_F \frac{\beta_2}{\beta_1^2} \quad (11)$$

โดยที่  $C_1$  และ  $C_2$  คำนวณได้จากการพิจารณาเงื่อนไข  $\sigma_b(0) = 0$  สำหรับ  $x = 0$  และ  $\sigma_b(l_b) = \sigma_F$  สำหรับ  $x = l_b$

$$C_1 = -\sigma_F \frac{\beta_2}{\beta_1^2} \quad \text{และ} \quad C_2 = \frac{\sigma_F}{\sinh(\beta_1 l_b)} \left( 1 - \frac{\beta_2}{\beta_1^2} (1 - \cosh(\beta_1 l_b)) \right) \quad (12)$$

แทนค่า  $C_1$  และ  $C_2$  จากสมการที่ (12) ลงในสมการที่ (11) จะสามารถคำนวณการกระจายหน่วยแรงตามแนวแกนของเหล็กเสริมตามสมการ

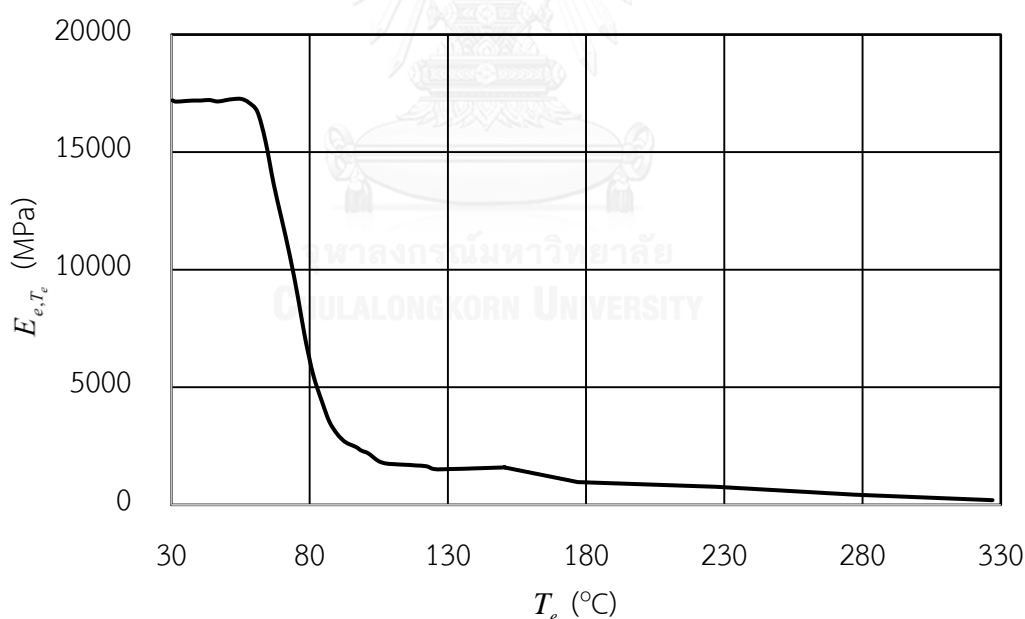
$$\sigma_b(x) = \sigma_F \left[ \frac{\beta_2}{\beta_1^2} (1 - \cosh(\beta_1 x)) + \frac{\sinh(\beta_1 x)}{\sinh(\beta_1 l_b)} \left( 1 - \frac{\beta_2}{\beta_1^2} (1 - \cosh(\beta_1 l_b)) \right) \right] \quad (13)$$

จากสมการที่ (5) และ (13) สามารถประมาณค่าการกระจายหน่วยแรงเฉือนภายในอิพอกซีเรซิน ได้ดังสมการ

$$\tau_e(x) = \frac{d_b \sigma_F}{4} \left[ -\frac{\beta_2}{\beta_1} \sinh(\beta_1 x) + \frac{\beta_1 \cosh(\beta_1 x)}{\sinh(\beta_1 l_b)} \left( 1 - \frac{\beta_2}{\beta_1^2} (1 - \cosh(\beta_1 l_b)) \right) \right] \quad (14)$$

ทั้งนี้ การประมาณค่าการกระจายหน่วยแรงเฉือนภายในอีพอกซีเรซินในภาวะอุณหภูมิสูงตามสมการข้างต้น จำเป็นต้องทราบสมบัติเชิงกลของอีพอกซีเรซินที่ผันแปรตามอุณหภูมิ ได้แก่ ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของ อีพอกซีเรซิน  $E_{e,T_e}$  และค่ามอดุลัสเฉือนของอีพอกซีเรซิน  $G_{e,T_e}$

สำหรับค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซิน  $E_{e,T_e}$  ที่ใช้ในการศึกษานี้อ้างอิงจากผลการทดสอบโดยวิธีการวิเคราะห์สมบัติทางกลเชิงพลศาสตร์ (Dynamic Mechanical Analysis : DMA) ที่ห้องปฏิบัติการทดสอบวัสดุพอลิเมอร์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งสามารถทดสอบได้เฉพาะในช่วงอุณหภูมิ 30 °C – 150 °C เท่านั้น แต่เนื่องจากอุณหภูมิสูงสุดของอีพอกซีเรซินที่พิจารณาในการศึกษานี้เท่ากับ 325 °C ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประมาณค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินในช่วงอุณหภูมิ 150 °C -325 °C โดยเทียบสัดส่วนจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ได้จากแบบจำลองที่นำเสนอในงานวิจัยที่ผ่านมา [10] รูปที่ 2.3 แสดงค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินในช่วงอุณหภูมิ 30 °C – 325 °C ที่ใช้ในการศึกษานี้



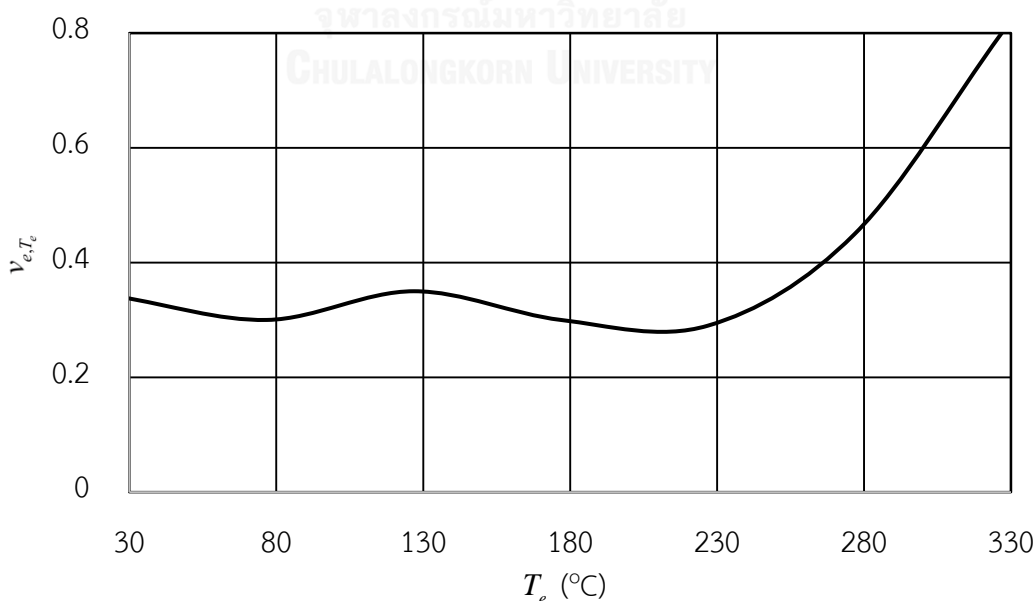
รูปที่ 2.3 การแปรผันของค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของอีพอกซีเรซินตามอุณหภูมิ

ในส่วนของค่ามอดุลัสเฉือนของอิพอกซีเรซิน  $G_{e,T_e}$  นั้น เนื่องจากไม่สามารถดำเนินการทดสอบได้ อีกทั้งยังไม่พบข้อมูลดังกล่าวจากการค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมา ดังนั้นจึงอาศัยการประมาณค่าโดยสมการความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นและมอดุลัสเฉือนสำหรับวัสดุยืดหยุ่น

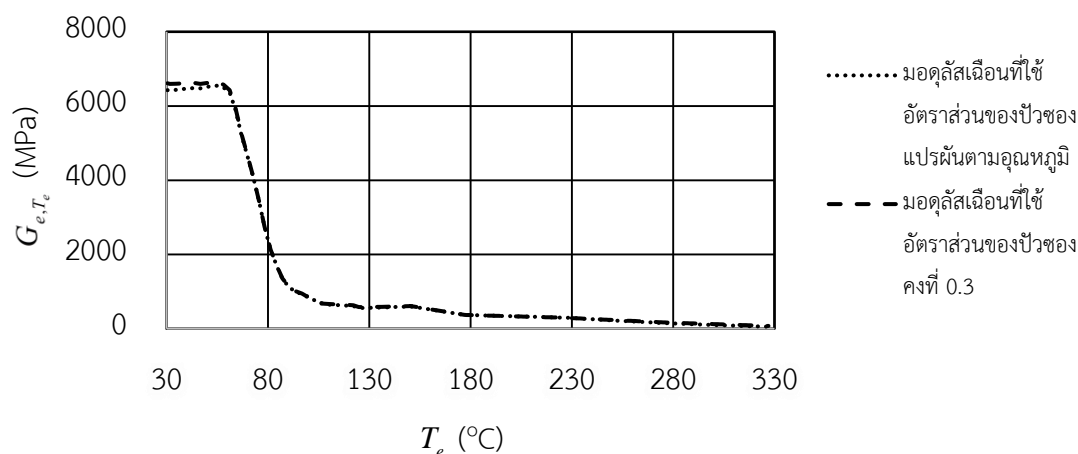
$$G_{e,T_e} = \frac{E_{e,T_e}}{2(1+\nu_{e,T_e})} \quad (15)$$

โดยที่  $\nu_{e,T_e}$  คืออัตราส่วนของปัวซองของอิพอกซีเรซินที่อุณหภูมิ  $T_e$

การประมาณค่าโดยสมการดังกล่าวประยุกต์ใช้ค่ามอดุลัสของสภาพยืดหยุ่นของอิพอกซีเรซิน  $E_{e,T_e}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในขณะที่พิจารณาอัตราส่วนของปัวซอง 2 รูปแบบ โดยที่แบบแรกพิจารณาให้อัตราส่วนของปัวซองแปรผันตามอุณหภูมิโดยอ้างอิงงานวิจัยที่ผ่านมา [10] ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และแบบที่สองพิจารณาให้อัตราส่วนของปัวซองมีค่าคงที่เท่ากับ 0.3 ตลอดช่วงอุณหภูมิที่พิจารณา รูปที่ 2.5 แสดงค่ามอดุลัสเฉือนที่ได้จากสมการที่ (15) โดยแทนค่าอัตราส่วนของปัวซองทั้ง 2 รูปแบบ โดยจากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยตลอดช่วงอุณหภูมิ 30 °C – 325 °C โดยมีค่าแตกต่างกันสูงสุด 3 % ที่อุณหภูมิปกติ 30 °C ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงพิจารณาใช้ค่าอัตราส่วนของปัวซองคงที่เท่ากับ 0.3



รูปที่ 2.4 การแปรผันของอัตราส่วนของปัวซองของอิพอกซีเรซินในช่วงอุณหภูมิ 30 °C - 325 °C

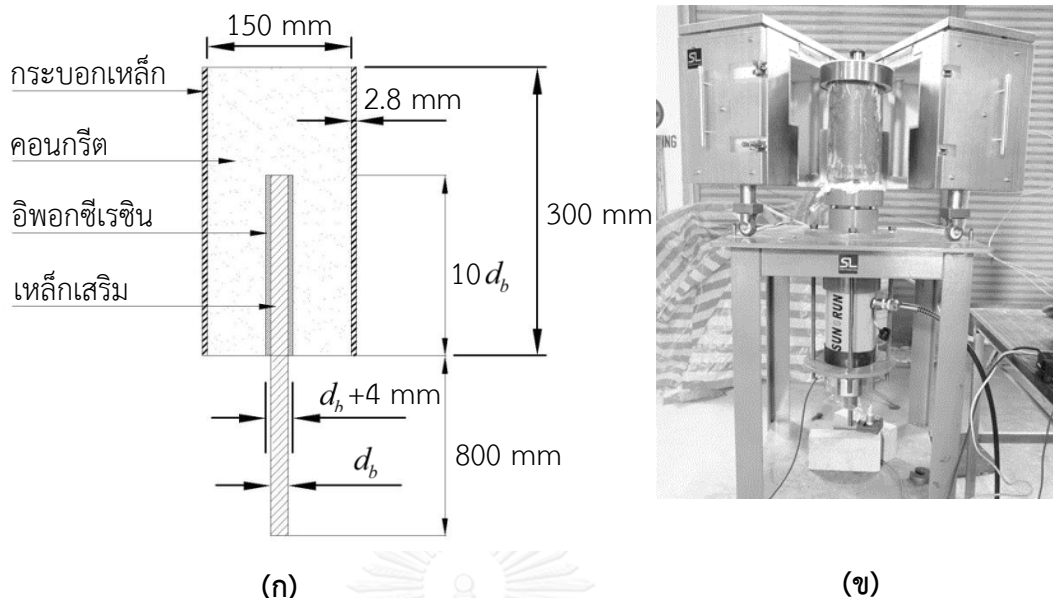


รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสเฉือนของอีพอกซีเรซินและอุนหนุมิ

เนื่องจากการศึกษานี้ จำเป็นต้องอ้างอิงผลการทดสอบการดึงออกจางานวิจัยของ ภูวิศร อ้อแสงชัย [7] เพื่อใช้ในการประเมินการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินในภาวะอุนหนุมิสูง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องสามารถอธิบายพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบดังกล่าว โดยอาศัยแบบจำลองเชิงกลที่นำเสนอ เพื่อยืนยันความแม่นยำของผลการทดสอบก่อนนำไปประยุกต์ใช้

ชิ้นตัวอย่างทดสอบการดึงออกในงานวิจัยที่ผ่านมา [7] แสดงดังรูปที่ 2.6 (ก) ซึ่งประกอบด้วย คอนกรีตรูปทรงกระบอกซึ่งมีการเจาะรูบริเวณจุดศูนย์กลางเพื่อติดตั้งเหล็กเสริมข้ออ้อย โดยมีอีพอกซีเรซินยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม เหล็กข้ออ้อยเป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40 มีค่ามอดุลัสของสภาพยึดหยุ่นเท่ากับ 199,910 MPa และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ ระยะฝังของเหล็กเสริมในคอนกรีตเท่ากับ 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม และความหนาของอีพอกซีเรซินเท่ากับ 2 mm รูปที่ 2.6 (ข) แสดงการติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบการดึงออกภายใต้อุนหนุมิสูง



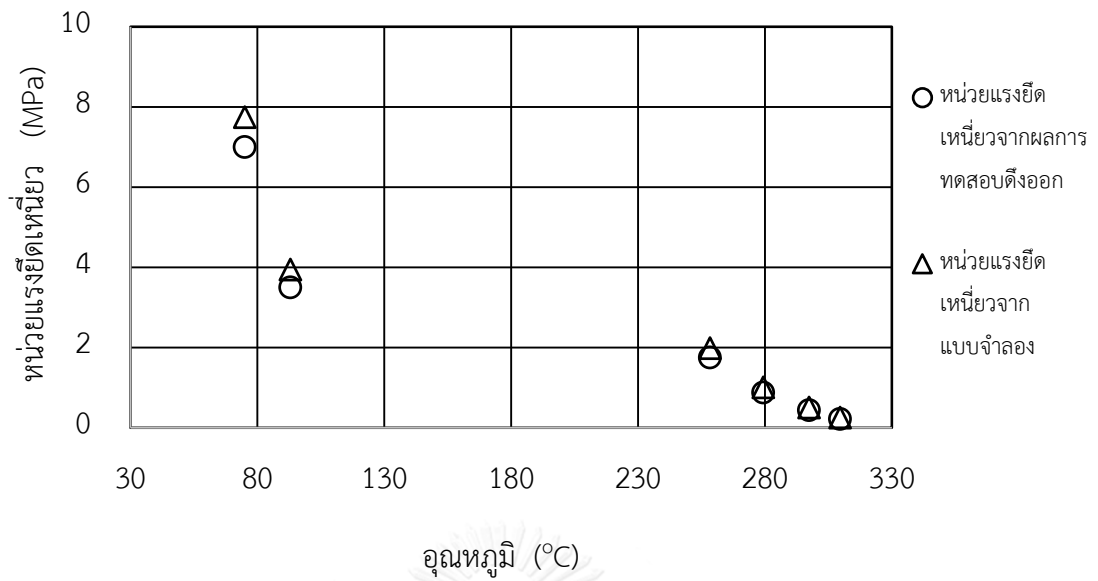


รูปที่ 2.6 การทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิสูง : (ก) รายละเอียดชิ้นตัวอย่าง  
(ข) การติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ [7]

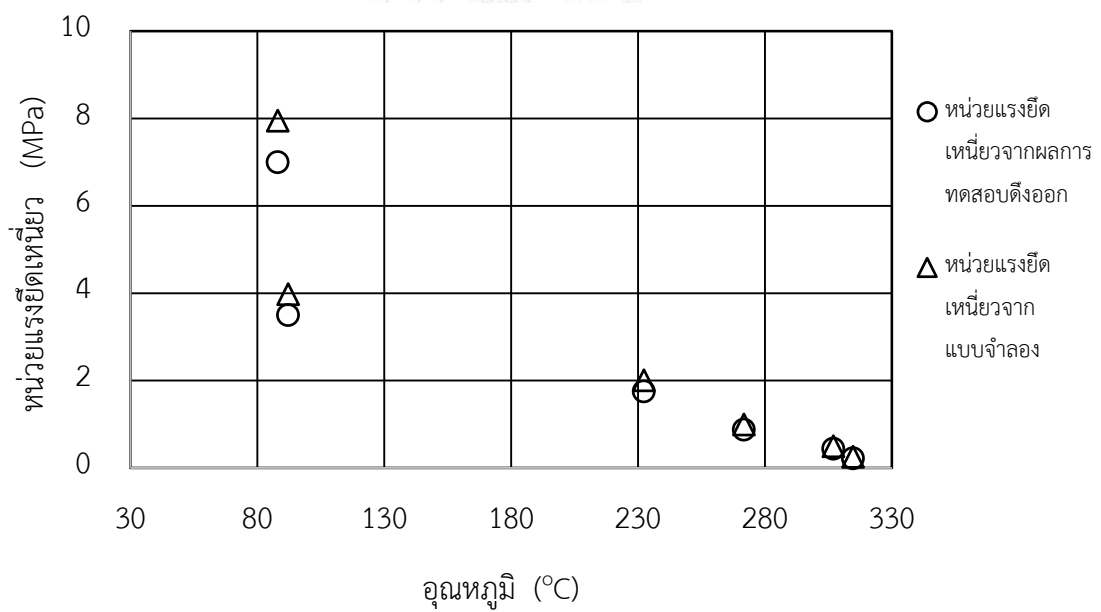
การประยุกต์ใช้แบบจำลองยึดเหนี่ยวเชิงกลของอิพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในภาวะอุณหภูมิสูง พิจารณาค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวภายในอิพอกซีเรซินที่คำนวณจากการกระจายหน่วยแรงในสมการที่ (14) โดยแทนค่าตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ มอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของเหล็กเสริม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ระยะฝังของเหล็กเสริมในคอนกรีต ความหนาของชั้นอิพอกซีเรซิน หน่วยแรงดึงออก รวมทั้งค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นและมอดูลัสเฉือนของอิพอกซีเรซินที่อุณหภูมิวิกฤติซึ่งอิพอกซีเรซินเกิดการวิบัติเฉือน เพื่อเปรียบเทียบกับค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ได้จากการทดสอบ

รูปที่ 2.7 – 2.10 แสดงผลการเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่อุณหภูมิวิกฤติซึ่งได้จากการทดสอบและแบบจำลอง สำหรับเหล็กขนาด 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ จากรูปดังกล่าว จะเห็นได้ว่าค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ได้จากแบบจำลองเชิงกลใกล้เคียงกับผลการทดสอบมาก โดยมีค่าแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 17% สำหรับเหล็กเสริมทุกขนาดที่พิจารณา

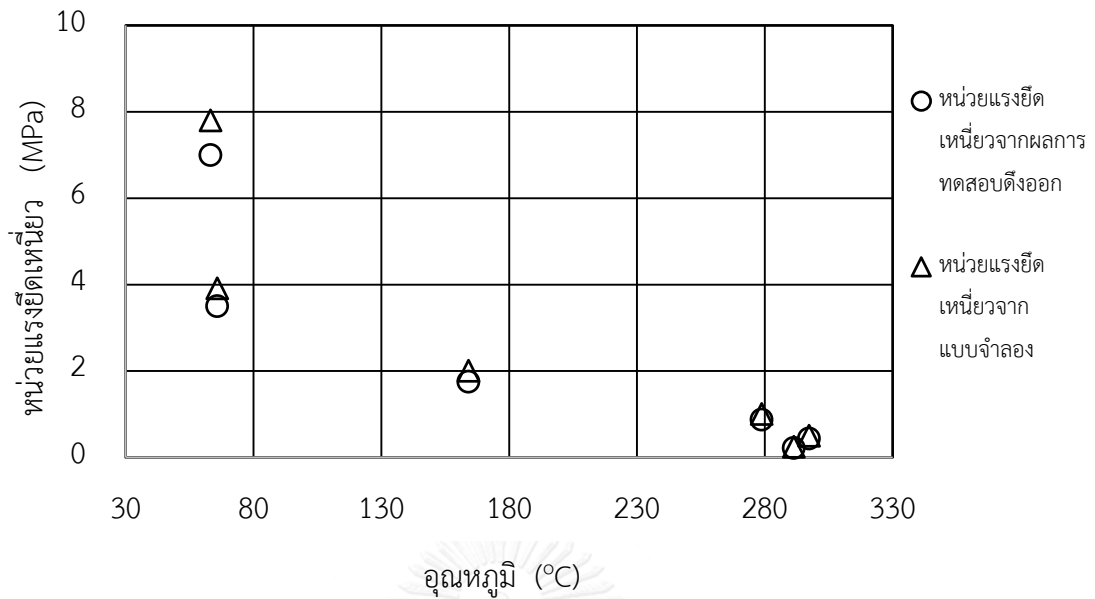
นอกจากนี้ แบบจำลองยังแสดงแนวโน้มการลดค่าที่รวดเร็วกว่าของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสำหรับเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบ จึงเป็นการยืนยันความแม่นยำของผลการทดสอบการดึงออกสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในบทที่ 4 ต่อไป



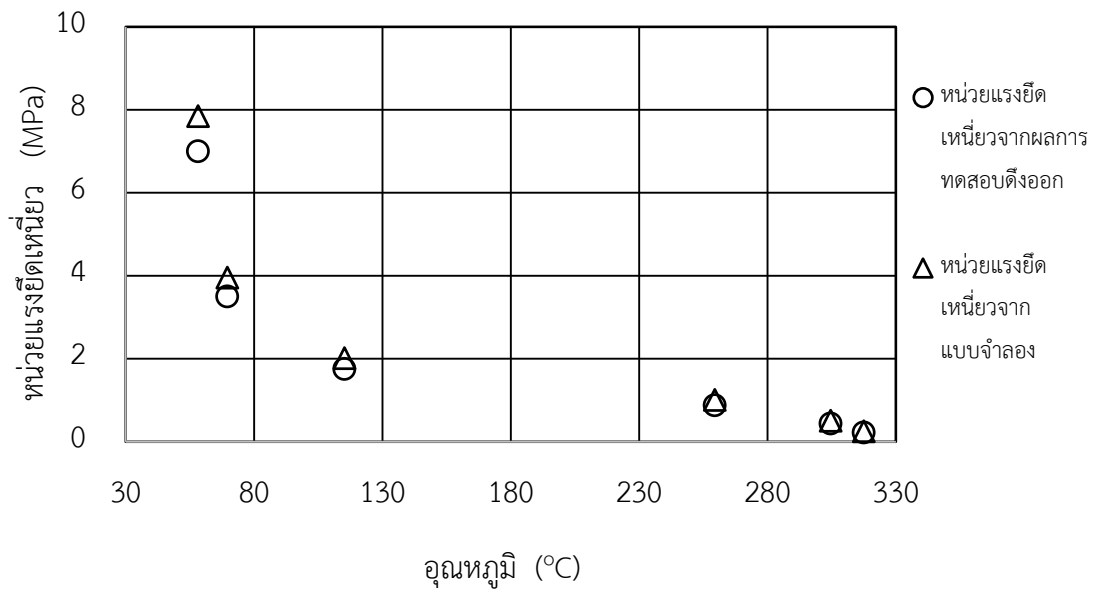
รูปที่ 2.7 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบ และแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบ และแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบ และแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm

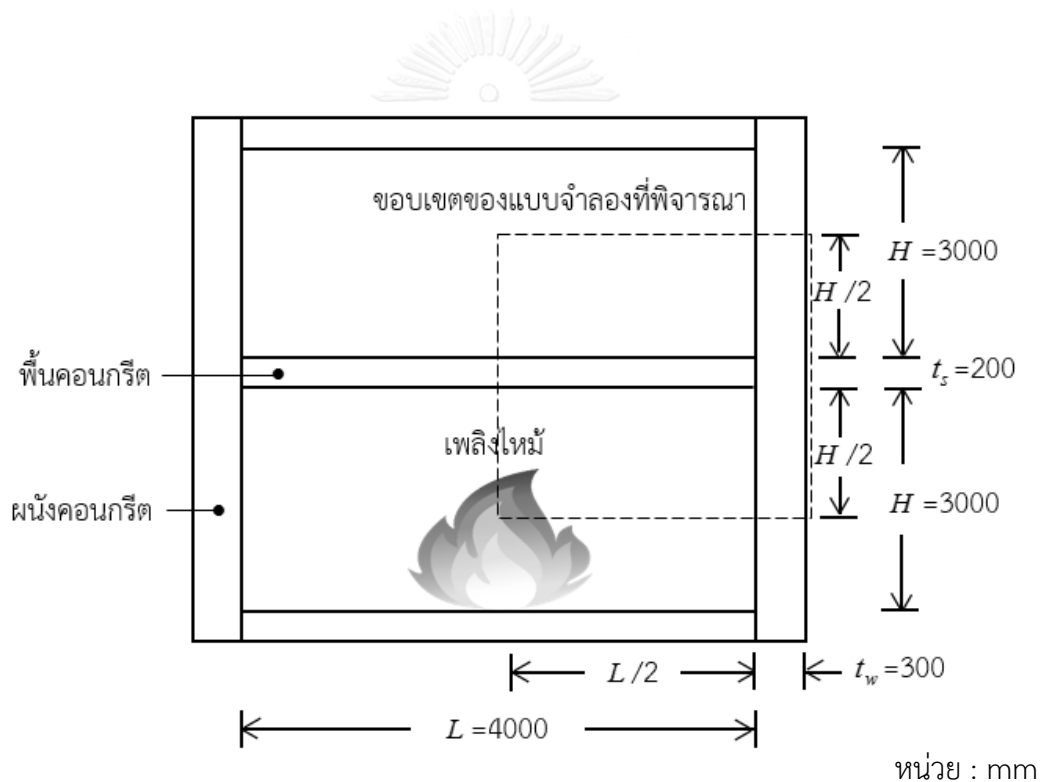


รูปที่ 2.10 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบ และแบบจำลองสำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

## บทที่ 3

### การทดสอบขนาดจริง

การทดสอบขนาดจริงพิจารณาจำลองขึ้นตัวอย่างบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตตามสถานะใช้งานจริง โดยพิจารณาลักษณะเพลิงไหม้ภายในพื้นที่ปิดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 พื้นคอนกรีตจากกึ่งกลางช่วงความยาวและผนังคอนกรีตระหว่างกึ่งกลางความสูงของชั้นล่างและชั้นบน ทั้งนี้ การทดสอบขนาดจริงมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนและสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมในบทที่ 4



รูปที่ 3.1 พื้นที่ปิดล้อมที่เกิดเพลิงไหม้

### 3.1 รายละเอียดการทดสอบ

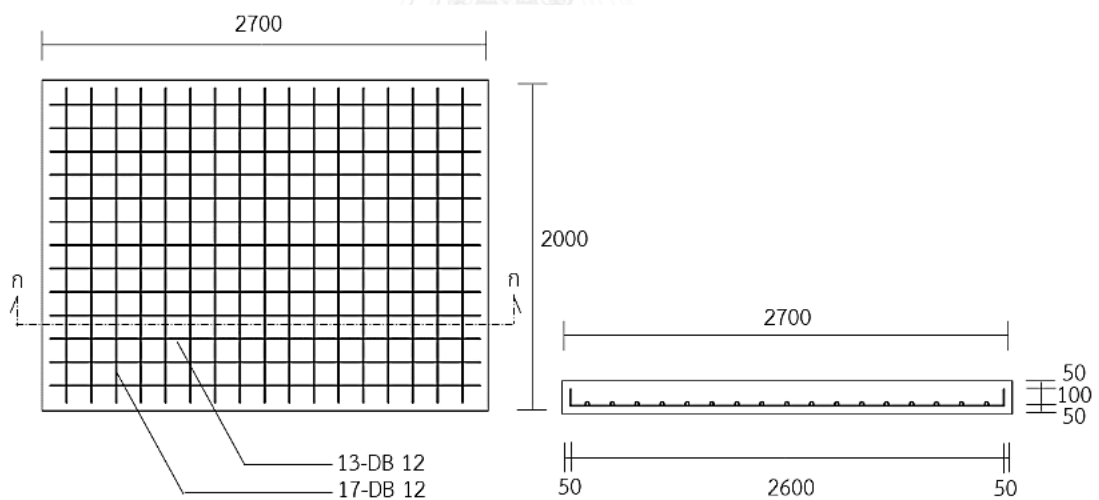
การทดสอบขนาดจริงกำหนดขึ้นตัวอย่างทดสอบ 8 ตัวอย่าง โดยพิจารณาระยะเวลาการให้ความร้อนตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834-1 2 ช่วงเวลา ได้แก่ 60 min และ 120 min สำหรับเหล็กเสริมชนิดข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 (มอก. 24-2548) ขนาด 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ ดังตารางที่ 3.1 การทดสอบดำเนินการ ณ ศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย (Fire Safety Research Center : FSRC) ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการทดสอบ

ขึ้นตัวอย่างทดสอบ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม (mm)	ระยะฝังในผนังคอนกรีต (mm)	ระยะเวลาการให้ความร้อน (min)
SW-DB12-F060	12	120	60
SW-DB16-F060	16	160	60
SW-DB20-F060	20	200	60
SW-DB25-F060	25	250	60
SW-DB12-F120	12	120	120
SW-DB16-F120	16	160	120
SW-DB20-F120	20	200	120
SW-DB25-F120	25	250	120

### 3.2 ชั้นตัวอย่างทดสอบ

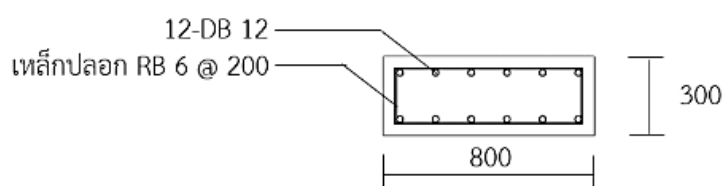
ชั้นตัวอย่างทดสอบประกอบด้วย พื้นคอนกรีตที่มีความยาว 2000 mm ความกว้าง 2700 mm และความหนา 200 mm เชื่อมต่อกับผนังคอนกรีตที่มีความกว้าง 800 mm ความสูง 2400 mm และความหนา 300 mm โดยเชื่อมต่อกันที่ความสูง 1750 mm ด้วยการเจาะเสียบเหล็กที่ตำแหน่งกึ่งกลางความกว้างของพื้นคอนกรีต โดยกำหนดระยะคอนกรีตหุ้มของเหล็กเสริมภายในแผ่นพื้น 50 mm และความยาวของเหล็กเสริม 50 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยมีระยะฝังของเหล็กเสริมในพื้นคอนกรีต 40 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และระยะฝังในผนังคอนกรีต 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง การเจาะเสียบเหล็กใช้อีพอกซีเรซินตามรายละเอียดในบทที่ 2 ที่มีความหนา 2 mm เคลือบรอบเหล็กเสริมส่วนที่ฝังในผนังคอนกรีต โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม 4 mm สำหรับรายละเอียดการเสริมเหล็กในแผ่นพื้นและผนังคอนกรีตพิจารณาตามปริมาณเหล็กเสริมน้อยที่สุด ตามมาตรฐาน ACI 318-11 [11] สำหรับชั้นตัวอย่างทดสอบพื้นและผนังคอนกรีตที่ใช้มีอัตราส่วนเนื้อที่เหล็กต่อหน้าตัดคอนกรีตเท่ากับ 0.0027 และ 0.0056 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีต และเหล็กเสริม แสดงดังตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



(ก.1) ภาพตัดด้านบน

(ก.2) ภาพตัดด้านข้าง ก-ก

#### (ก) พื้นคอนกรีต



#### (ข) ผนังคอนกรีต

หน่วย : mm

รูปที่ 3.2 รายละเอียดการเสริมเหล็ก : (ก) พื้นคอนกรีต (ข) ผนังคอนกรีต

**ตารางที่ 3.2** สมบัติเชิงกลของคอนกรีต

การเก็บ ตัวอย่าง	ขนาดตัวอย่าง (mm)	ค่าการยุบตัว (cm)	กำลังอัดประลัย (MPa)		
			7 day	14 day	28 day
ครั้งที่ 1*	150 x 300	10	39	45	52
ครั้งที่ 2*	150 x 300	12	27	32	38

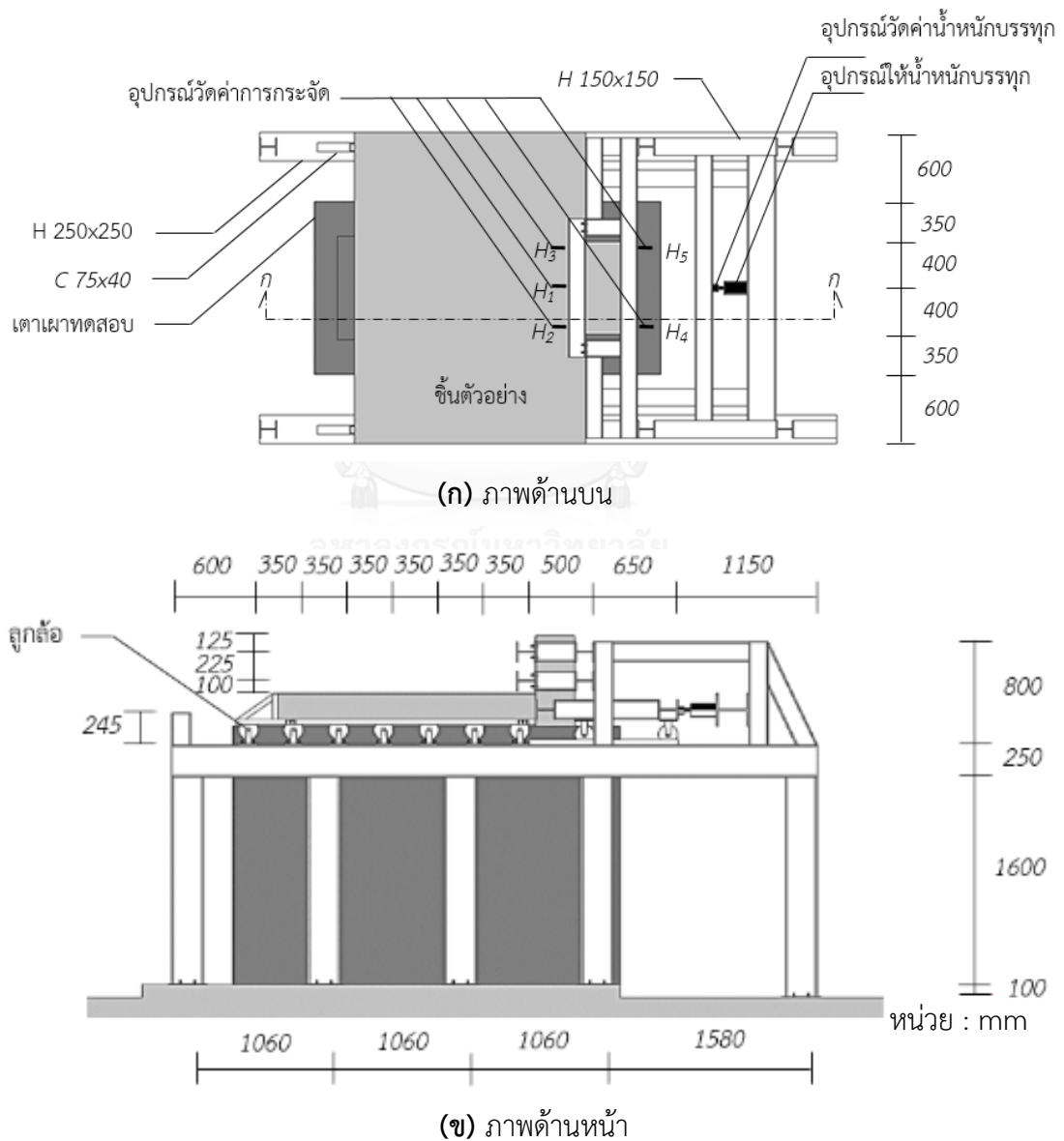
\*เนื่องจากสถานที่เตรียมชิ้นตัวอย่างพื้นและผนังคอนกรีตสำหรับการทดสอบขนาดจริง มีพื้นที่จำกัดจึงแบ่งการหล่อคอนกรีตออกเป็น 2 ครั้ง : หล่อครั้งที่ 1 วันที่ 9 พ.ย. 2559 และ หล่อครั้งที่ 2 วันที่ 30 พ.ย. 2559

**ตารางที่ 3.3** สมบัติเชิงกลของเหล็กเสริม

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	มอดุลัสของ สภาพยืดหยุ่น ของเหล็กเสริม (MPa)	กำลังรับแรงดึงคราก (MPa)	กำลังรับแรงดึงประลัย (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืด (%)
12	198,750	507	614	25.8
16	202,372	505	642	26.3
20	200,452	464	605	24.5
25	197,688	485	644	25.2

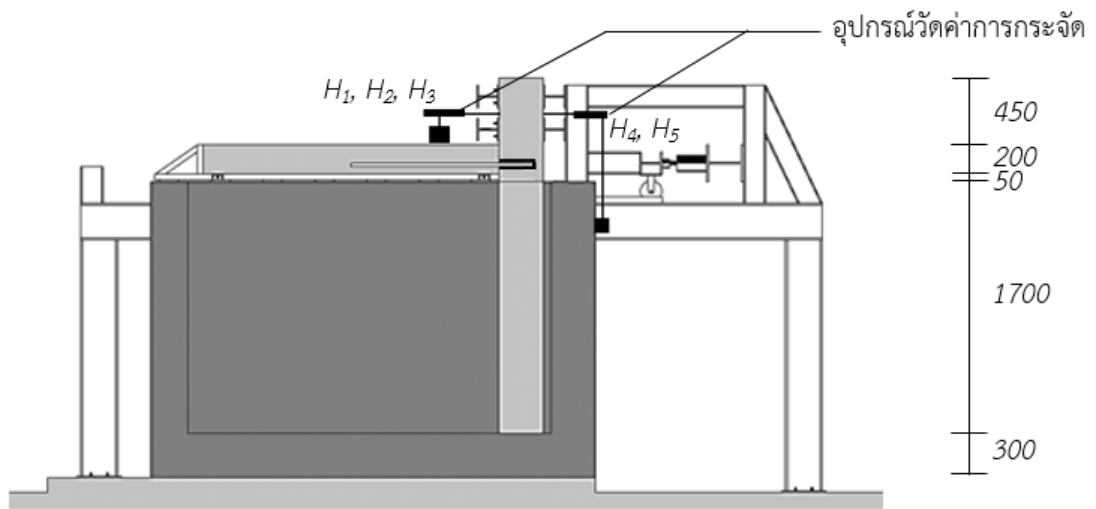
### 3.3 การติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบ

ชิ้นตัวอย่างทดสอบส่วนที่เป็นพื้นคอนกรีตติดตั้งบริเวณด้านบนของเตาเผาทดสอบเพื่อให้ห้องสัมผัสความร้อน โดยวางบนลูกล้อซึ่งติดตั้งบนโครงเหล็กเพื่อให้แผ่นพื้นเคลื่อนที่ได้แบบอิสระตามทิศทางของแรงดึงออก การให้แรงดึงออกควบคุมโดยอุปกรณ์ให้น้ำหนักบรรทุกที่ติดตั้งบริเวณด้านหลังของโครงเหล็ก ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 3.3 – 3.4 ส่วนของผนังคอนกรีตติดตั้งโดยตรงบนพื้นของเตาเผาทดสอบ โดยให้ผนังสัมผัสความร้อนเพียงด้านเดียวและใช้โครงสร้างเหล็กยึดเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ด้านข้าง และแสดงการติดตั้งจริงดังรูปที่ 3.5



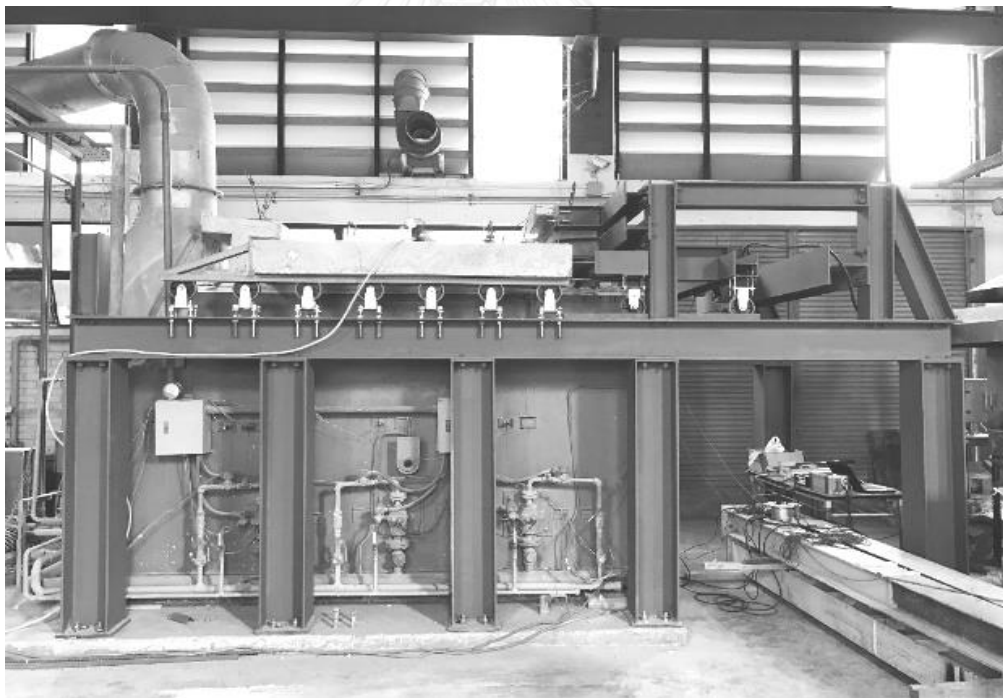
รูปที่ 3.3 การติดตั้งการทดสอบ : (ก) ภาพด้านบน (ข) ภาพด้านหน้า





หน่วย : mm

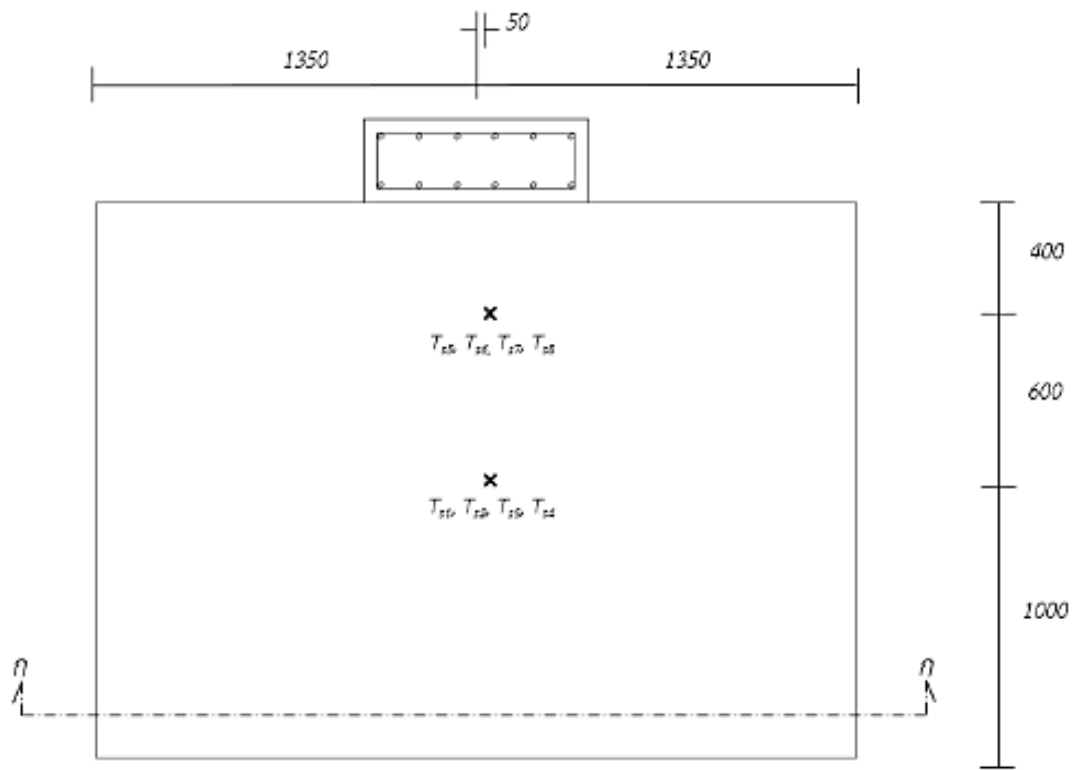
รูปที่ 3.4 รูปตัด ก-ก ตำแหน่งการติดตั้งชิ้นตัวอย่างและอุปกรณ์วัดค่าการกระจัด



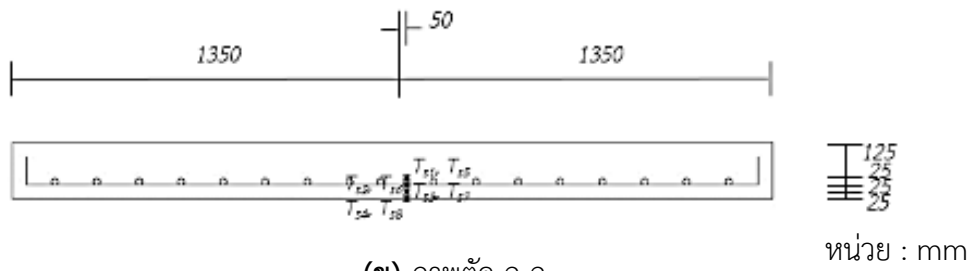
รูปที่ 3.5 การติดตั้งจริงสำหรับการทดสอบขนาดจริง

เตาเผาทดสอบมีขนาดภายในกว้าง 900 mm ยาว 2500 mm และสูง 1700 mm โดยการให้ความร้อนภายในเตาเผาทดสอบอาศัยหัวจุก๊าซปิโตรเลียมเหลวซึ่งติดตั้งที่ระดับความสูง 500 mm 3 ตำแหน่ง และที่ระดับความสูง 1150 mm 2 ตำแหน่ง การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาทดสอบอาศัยอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิชนิดเค (type – K thermocouples) ที่ติดตั้งบริเวณใกล้เคียงกับหัวจุก๊าซจำนวน 5 ตำแหน่ง โดยควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834-1 [8]

การวัดค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างระหว่างการทดสอบอาศัยการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิชนิดเคที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิ  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$  ค่าความคลาดเคลื่อน  $\pm 1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยแสดงตำแหน่งติดตั้งภายในส่วนของแผ่นพื้นและผนังคอนกรีต ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ ในขณะที่ ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินระหว่างการทดสอบอาศัยการวัดค่าอุณหภูมิจากอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิชนิดเคบนแท่งเหล็กอ้างอิงที่มีการติดตั้งภายในแผ่นพื้นโดยใช้สารหล่อลื่นเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้แบบอิสระโดยไม่เกิดการยึดเหนี่ยวเพิ่มเติม 2 ตำแหน่ง แทนการติดตั้งบนเหล็กเสริม บริเวณรูเจาะเสียบเหล็กโดยตรง เพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซิน และจากการศึกษาการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิบริเวณด้านบน กลาง และด้านล่างของเหล็กเสริม (ภาคผนวก ก) มีผลต่างกันเพียง 2 % เท่านั้น จึงเลือกติดตั้งที่บริเวณกลางเหล็กเสริม เพื่อความสะดวกในการติดตั้งอุปกรณ์ รูปที่ 3.8 – 3.12 แสดงตำแหน่งของเหล็กเสริม แท่งเหล็กอ้างอิง และตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิ



(ก) ภาพด้านบน

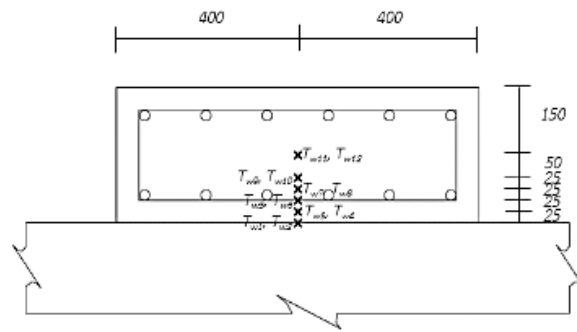


(ข) ภาพตัด ก-ก

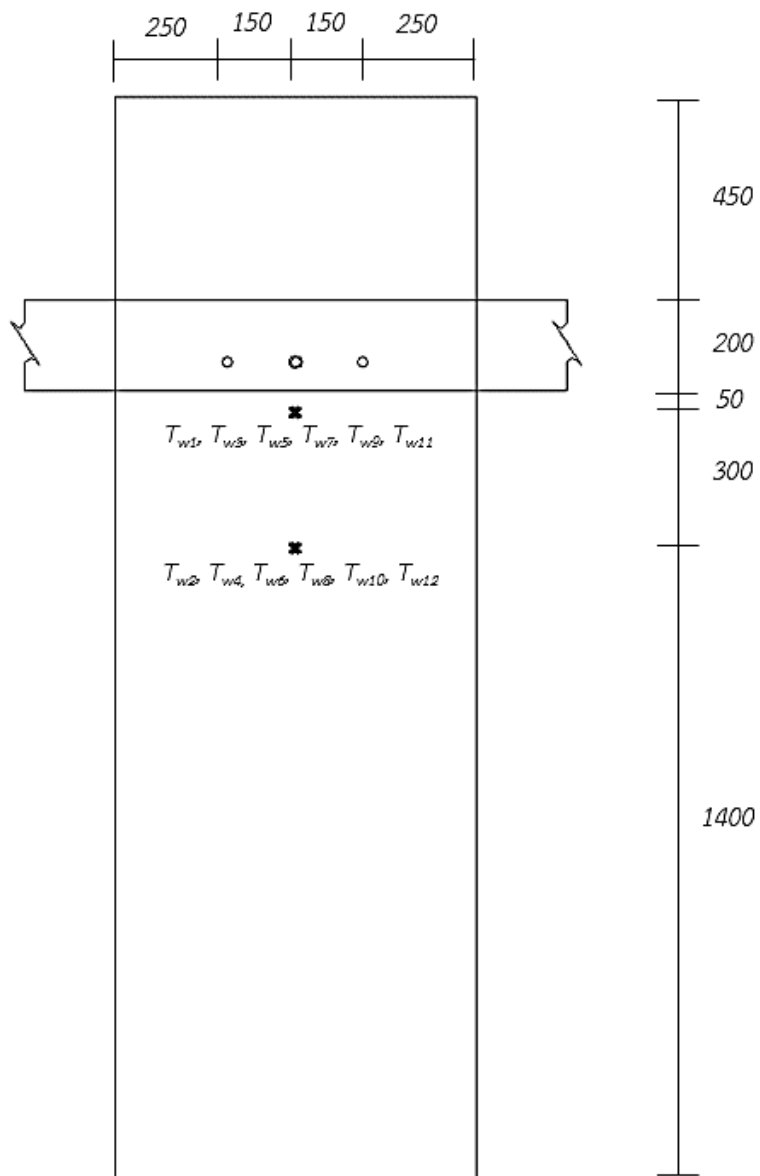
หน่วย : mm

รูปที่ 3.6 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณพื้นคอนกรีต : (ก) ภาพด้านบน

(ข) ภาพตัด ก-ก



(ก) ภาพด้านบน

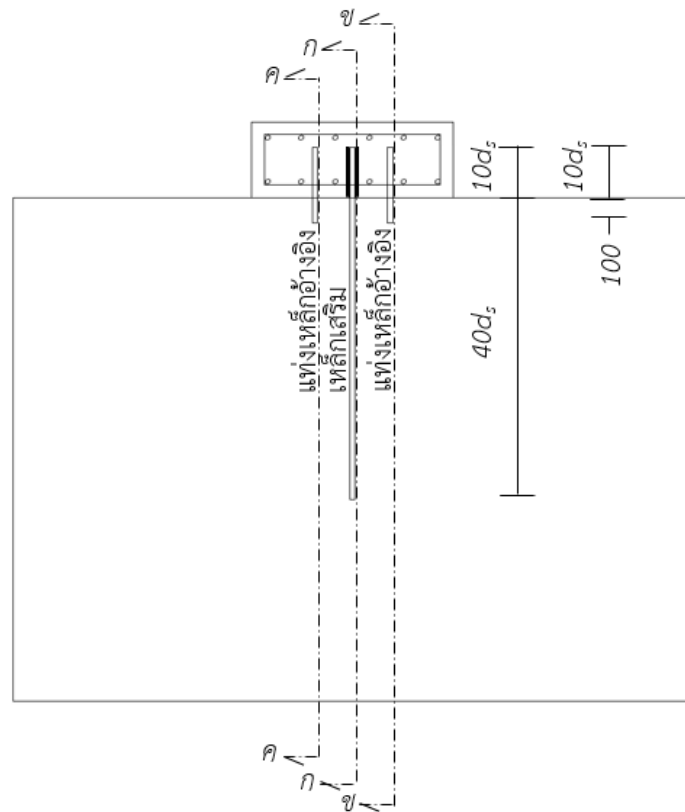


(ข) ภาพด้านหน้า

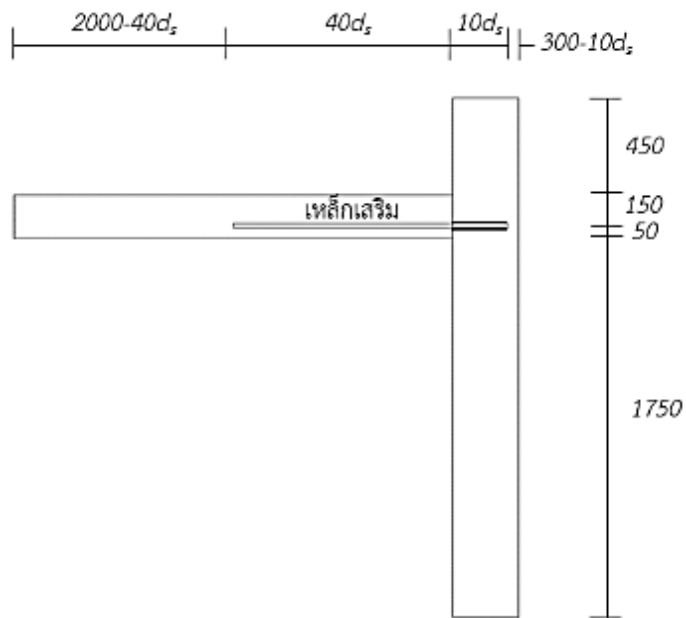
หน่วย : mm

รูปที่ 3.7 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณผนังคอนกรีต : (ก) ภาพด้านบน

(ข) ภาพด้านหน้า



(ก) ภาพด้านบน

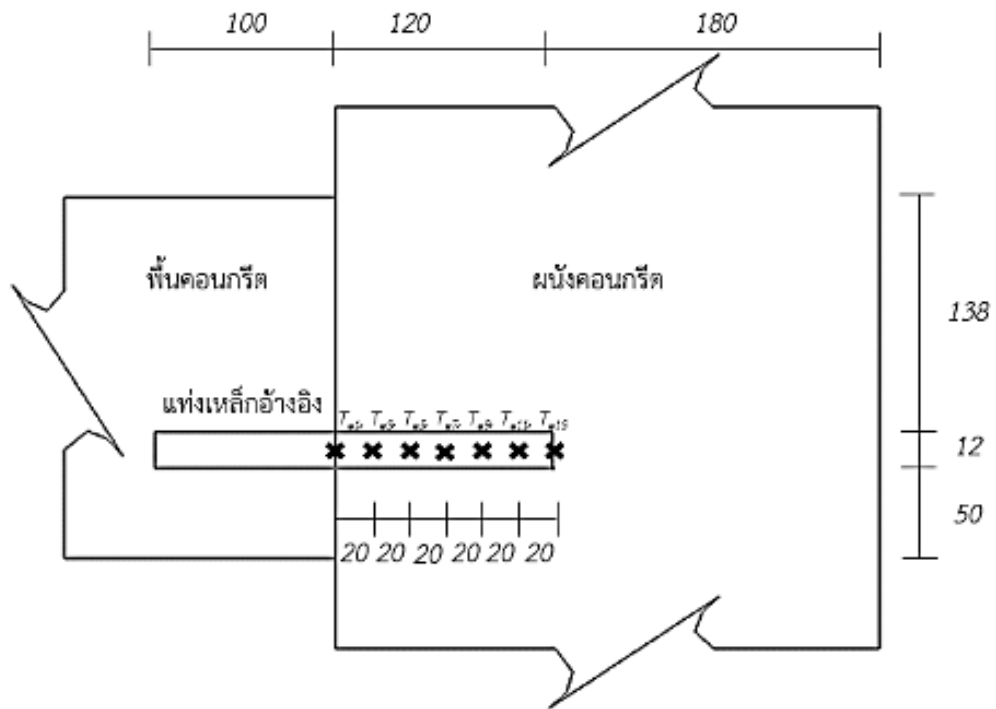


หน่วย : mm

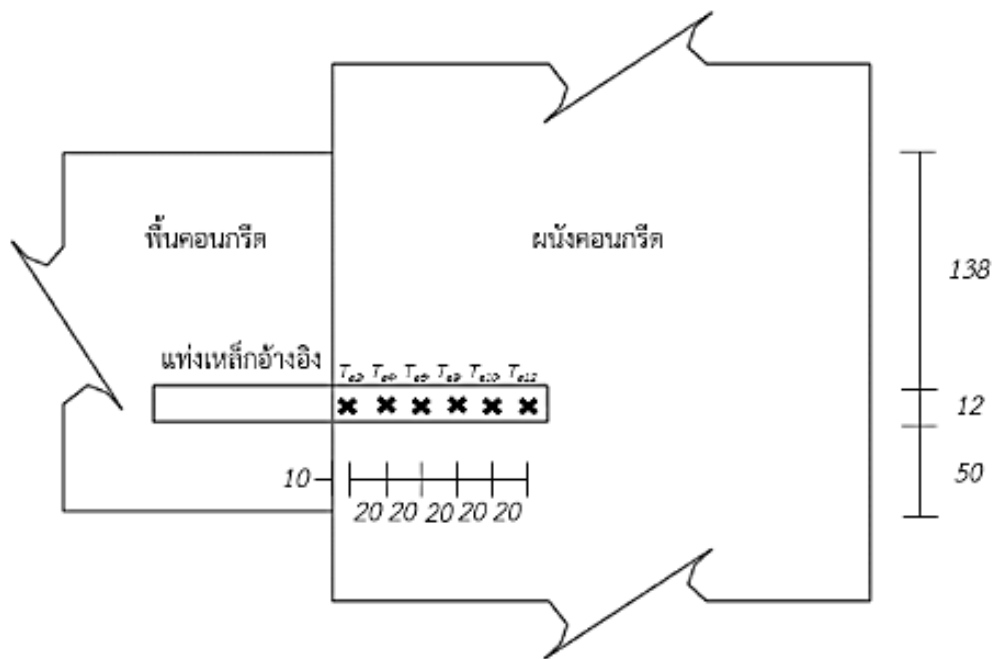
(ข) ภาพตัด ก-ก เหล็กเสริม

รูปที่ 3.8 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง : (ก) ภาพด้านบน

(ข) ภาพตัด ก-ก เหล็กเสริม



(ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 12 mm



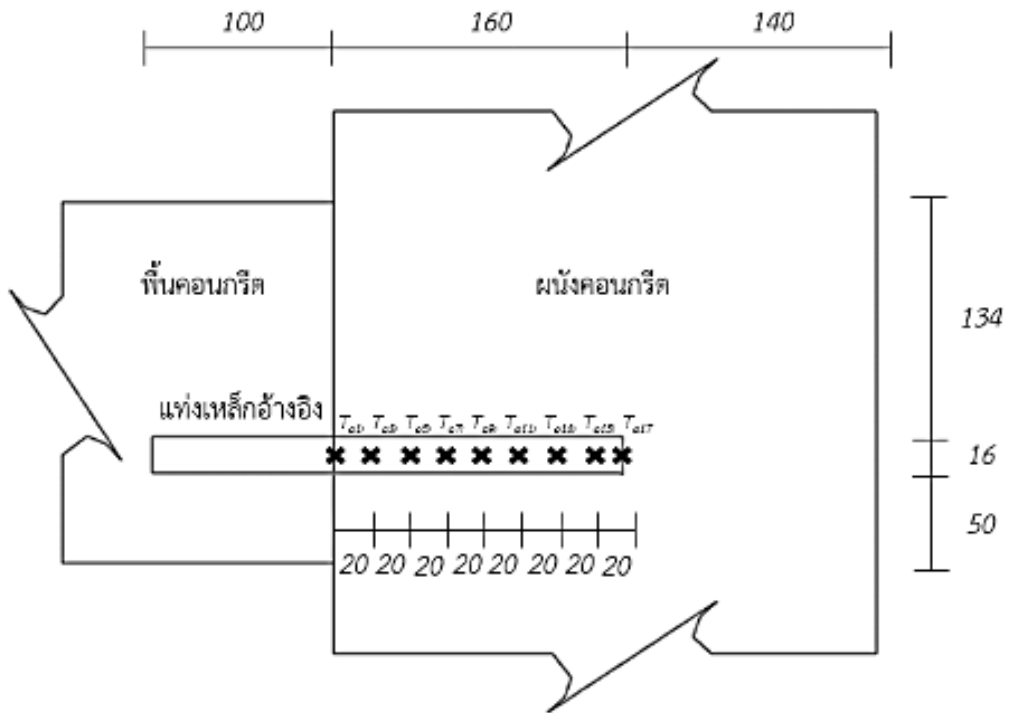
(ข) ภาพตัด ค-ค แท่งเหล็กเสริมอ้างอิง 12 mm

หน่วย : mm

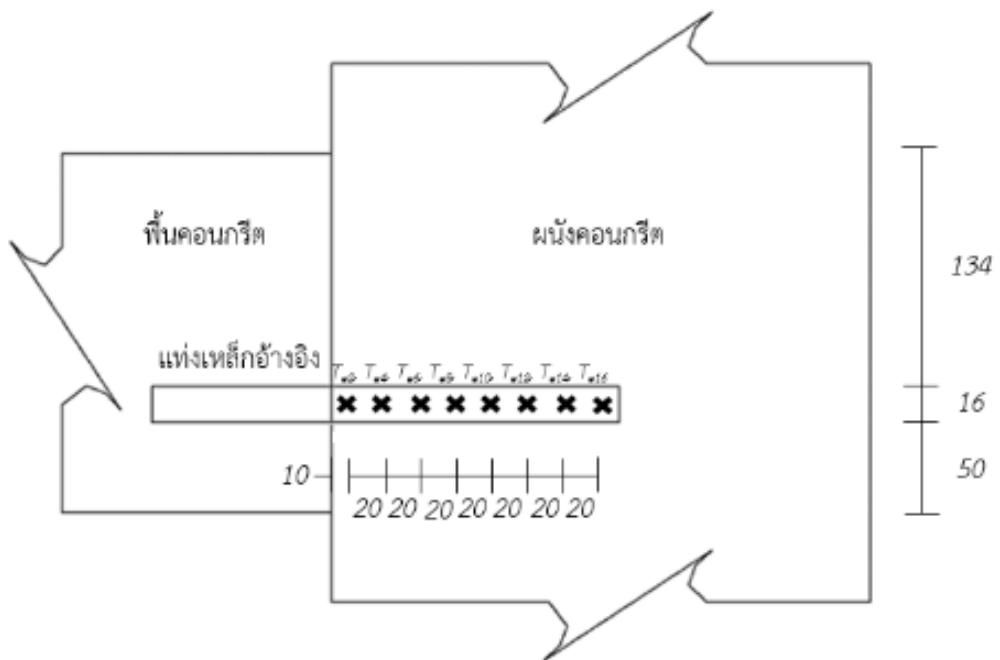
รูปที่ 3.9 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง :

(ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 12 mm

(ข) ภาพตัด ค-ค แท่งเหล็กเสริมอ้างอิง 12 mm



(ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 16 mm



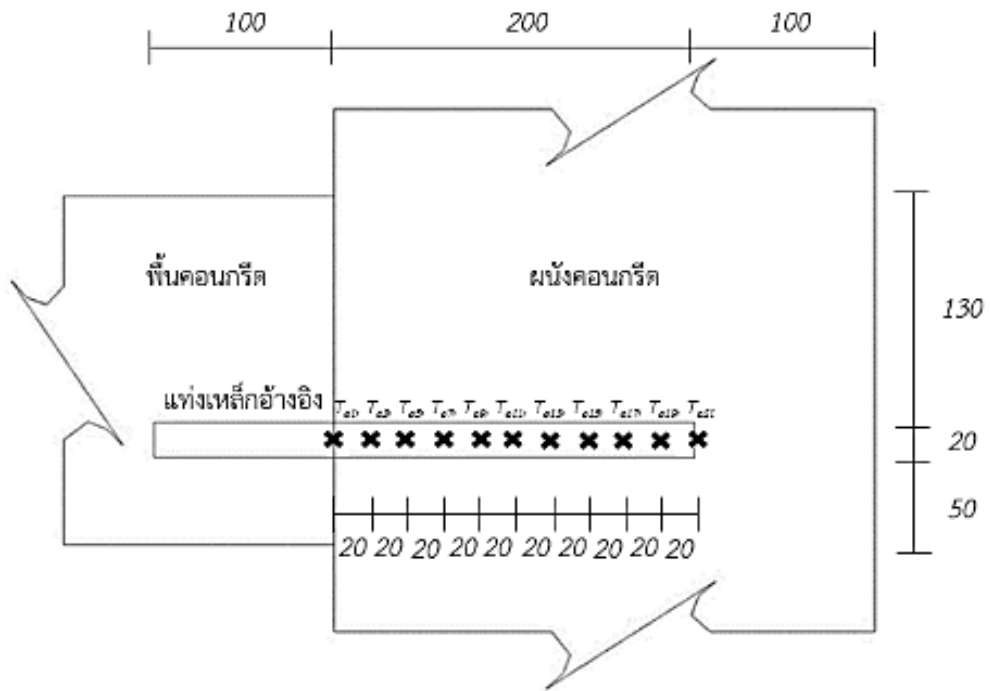
(ข) ภาพตัด ค-ค แท่งเหล็กเสริมอ้างอิง 16 mm

หน่วย : mm

รูปที่ 3.10 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง :

(ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 16 mm

(ข) ภาพตัด ค-ค แท่งเหล็กเสริมอ้างอิง 16 mm



(ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 20 mm



(ข) ภาพตัด ค-ค แท่งเหล็กเสริมอ้างอิง 20 mm

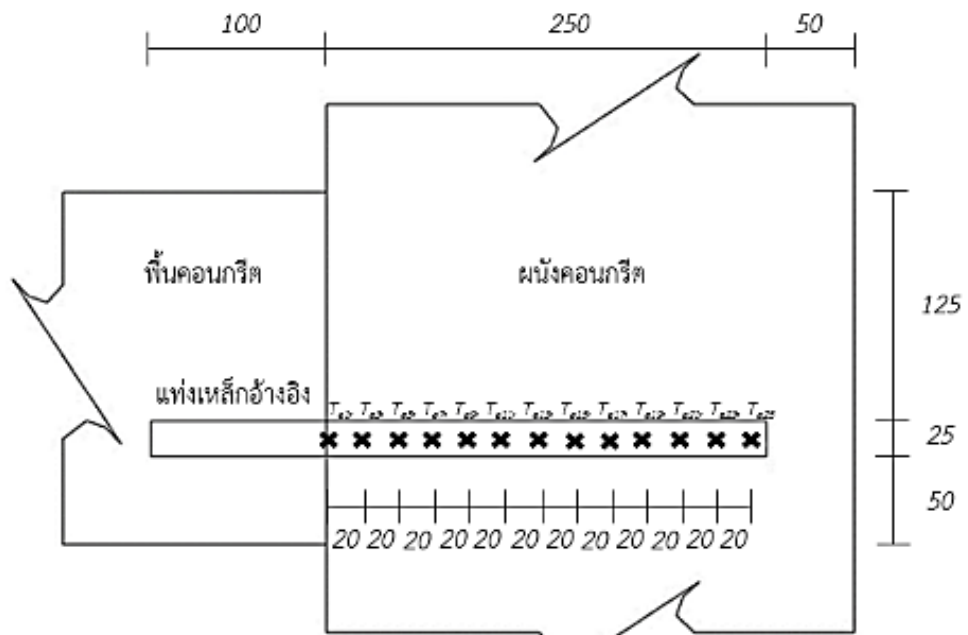
หน่วย : mm

รูปที่ 3.11 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแท่งเหล็กอ้างอิง :

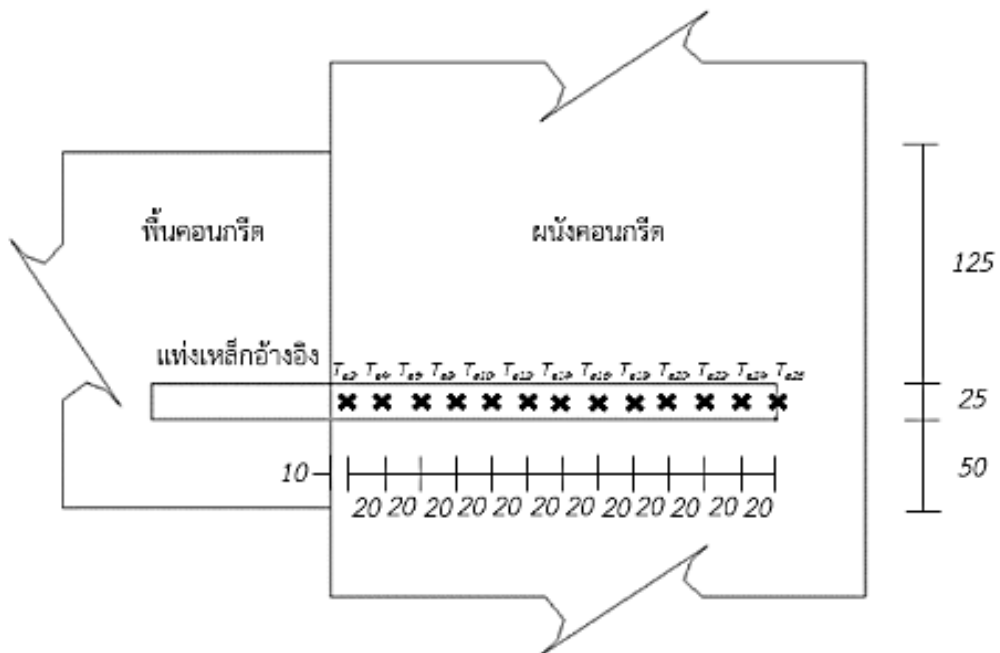
(ก) ภาพตัด ข-ข แท่งเหล็กอ้างอิง 20 mm

(ข) ภาพตัด ค-ค แท่งเหล็กเสริมอ้างอิง 20 mm





(ก) ภาพตัด ข-ข แห่งเหล็กอ้างอิง 25 mm



(ข) ภาพตัด ค-ค แห่งเหล็กอ้างอิง 25 mm

หน่วย : mm

รูปที่ 3.12 ตำแหน่งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิที่ติดตั้งบริเวณแห่งเหล็กอ้างอิง :

(ก) ภาพตัด ข-ข แห่งเหล็กอ้างอิง 25 mm

(ข) ภาพตัด ค-ค แห่งเหล็กเสริมอ้างอิง 25 mm

นอกจากนี้ ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการกระจัดเชิงเส้น (linear variable differential transducer : LVDT) ที่มีระยะการวัด  $\pm 200$  mm บริเวณด้านหน้ารอยต่อ โดยติดตั้งบนพื้นคอนกรีต และวัดเทียบกับผนังคอนกรีต 3 ตำแหน่ง ได้แก่ บริเวณกึ่งกลาง ( $H_1$ ) และบริเวณด้านข้าง ( $H_2$  และ  $H_3$ ) เพื่อตรวจสอบการกระจัดตามแนวราบของแผ่นพื้นเทียบกับผนังคอนกรีตตามทิศทางของแรงดึงออก และติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าการกระจัดเชิงเส้นที่มีระยะการวัด  $\pm 50$  mm บริเวณด้านหลัง 2 ตำแหน่ง ( $H_4$  และ  $H_5$ ) เพื่อตรวจสอบการกระจัดตามแนวราบของผนังคอนกรีตเทียบกับเสาเพื่อทดสอบตามทิศทางของแรงดึงออก ดังแสดงในรูปที่ 3.3 – 3.4

### 3.4 วิธีการทดสอบ

การทดสอบเริ่มจากการให้ความร้อนกับชิ้นตัวอย่างโดยควบคุมความร้อนตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834-1 ตามระยะเวลาที่กำหนด เมื่อสิ้นสุดการให้ความร้อนจึงให้แรงดึงออกโดยควบคุมอัตราการเพิ่มประมาณ 100 kN/min จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างเกิดการวิบัติ ทั้งนี้ การวิบัติภายใต้แรงดึงออกพิจารณาโดยสังเกตจากค่าน้ำหนักบรรทุกที่มีลักษณะลดลงจากค่าสูงสุดที่วัดค่าจากอุปกรณ์วัดค่าน้ำหนักบรรทุก ดังแสดงตำแหน่งในรูปที่ 3.3 (ก) หรือพิจารณาจากค่าการกระจัดเทียบระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตที่วัดค่าจากอุปกรณ์วัดค่าการกระจัดที่ตำแหน่ง  $H_1$  สูงเกินกว่าเกณฑ์การกระจัดสูงสุด 10 mm [7] ซึ่งจากการทดสอบ พบว่าน้ำหนักบรรทุกของทุกตัวอย่างทดสอบมีลักษณะลดลงจากค่าสูงสุดก่อนที่ค่าการกระจัดจะถึง 10 mm ดังแสดงในรูปที่ ข.1 – ข.8 (ภาคผนวก ข) ดังนั้น ในการทดสอบนี้จึงเลือกเกณฑ์การวิบัติจากการสังเกตค่าน้ำหนักบรรทุกสูงสุดเป็นหลัก

### 3.5 ผลการทดสอบขนาดจริง

ข้อมูลที่วัดค่าจากการทดสอบขนาดจริง ประกอบด้วย แรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อน อุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่าง และ อุณหภูมิที่บริเวณผิวของพื้นและผนังคอนกรีตที่สัมผัสกับเปลิงไหม้ระหว่างการทดสอบ

รูปที่ 3.13 – 3.16 แสดงการกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้จากการทดสอบขนาดจริงเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อน จากรูปดังกล่าวพบว่าค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้ของชิ้นตัวอย่างทุกขนาดที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min มีค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินสูงกว่าชิ้นตัวอย่างที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min โดยที่ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินมีความแตกต่างกันสูงสุดที่บริเวณผิวของผนังคอนกรีต

ตารางที่ 3.4 แสดงแรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินภายใต้แรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมที่คำนวณตามสมการที่ (16) และลักษณะการวิบัติของแต่ละชิ้นตัวอย่าง ทั้งนี้ การคำนวณกำลังยึดเหนี่ยวภายใต้แรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมพิจารณาจากสมการ

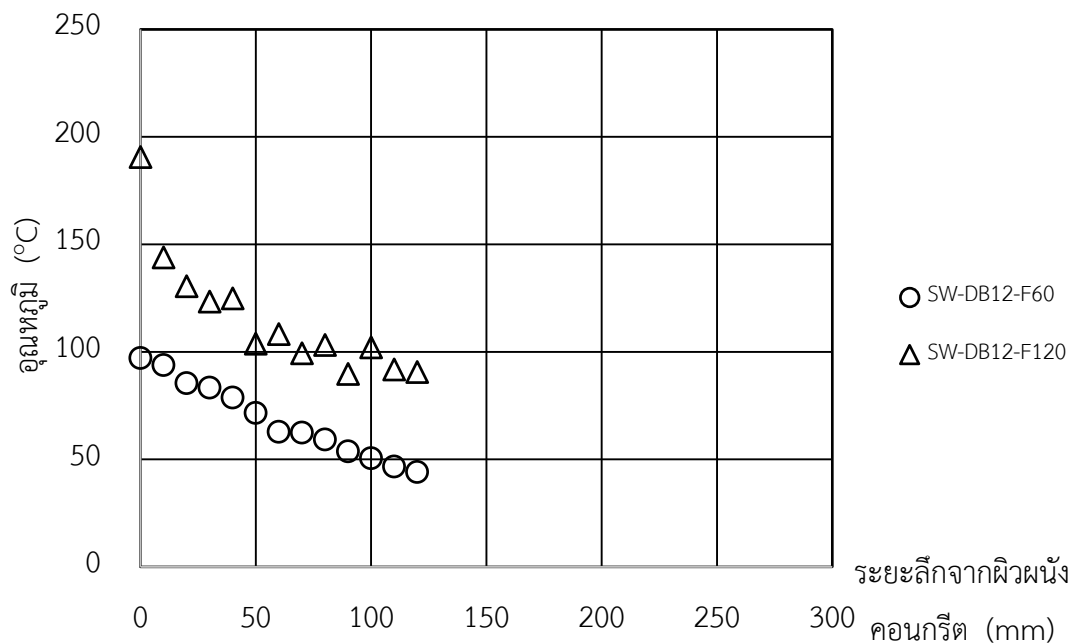
$$\tau_{e,test}^{cr} = \frac{R_{test}}{1000\pi d_s l_{bw}} \quad (16)$$

โดยที่  $\tau_{e,test}^{cr}$  (MPa) แทนกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินจากการทดสอบ  $R_{test}$  (kN) แทนแรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมที่วัดได้จากการทดสอบขนาดจริง  $d_s$  (mm) แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบู่ของเหล็กเสริม และ  $l_{bw}$  (mm) แทนความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังในผนังคอนกรีต

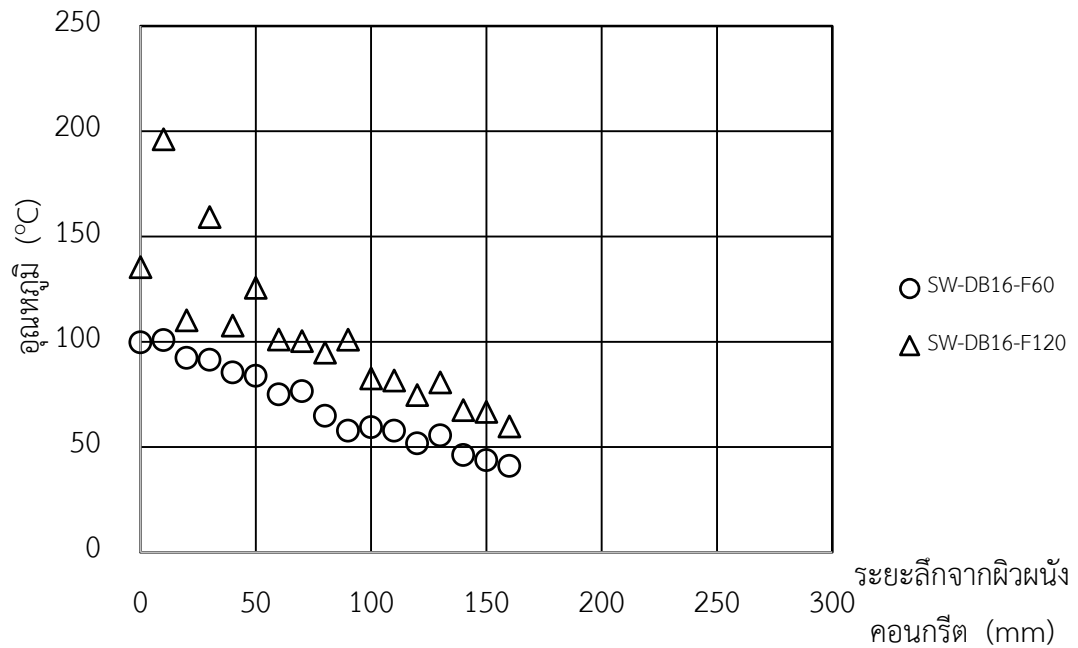
จากผลการทดสอบพบว่า ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินมีค่าลดลงเหลือ 95.2% 71.8% 42.7% และ 47.6% เมื่อเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวระบู่ของอิพอกซีเรซินที่อุณหภูมิปรกติ (12.4 MPa) สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm และที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินมีค่าลดลงเหลือ 46.8% 41.9% 29.0% และ 36.3% สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min และ 120 min เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่ามีแนวโน้มการลดค่ากำลังยึดเหนี่ยวรวดเร็วกว่า สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm

และ 20 mm ยกเว้นกรณีเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm กลับมีแนวโน้มการลดค่ากำลังยึดเหนี่ยวน้อยกว่าเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ทั้งนี้ เนื่องจากเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm มีระยะฝังลึกจากผิวผนังคอนกรีตถึง 250 mm ซึ่งจากรูปที่ 3.16 จะเห็นได้ว่าที่ระยะลึกจากผิวผนังคอนกรีตมากกว่า 100 mm เป็นต้นไปนั้น ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินยังไม่สูงถึงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $60^{\circ}\text{C}$ ) ส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินไม่เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิปกติ และค่ากำลังยึดเหนี่ยวเฉลี่ยตลอดช่วงความยาวของเหล็กเสริมขนาด 25 mm สูงกว่าเหล็กเสริมขนาด 20 mm

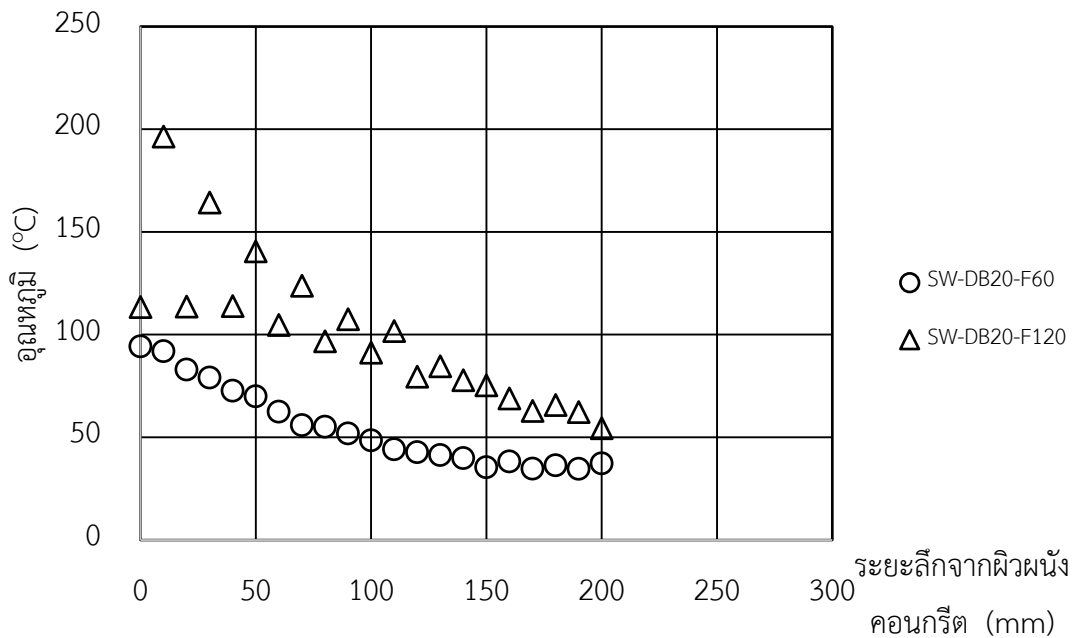
สำหรับลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทั้งหมดเป็นการวิบัติแบบเฉือน โดยรูปแบบการวิบัติเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมกับอิพอกซีเรซิน ระหว่างอิพอกซีเรซินกับคอนกรีต หรือผสมระหว่างทั้งสองรูปแบบ ในขณะที่ค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อน แสดงข้อมูลในภาคผนวก ค โดยที่ข้อมูลดังกล่าวใช้เป็นส่วนหนึ่งในการตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในบทที่ 4



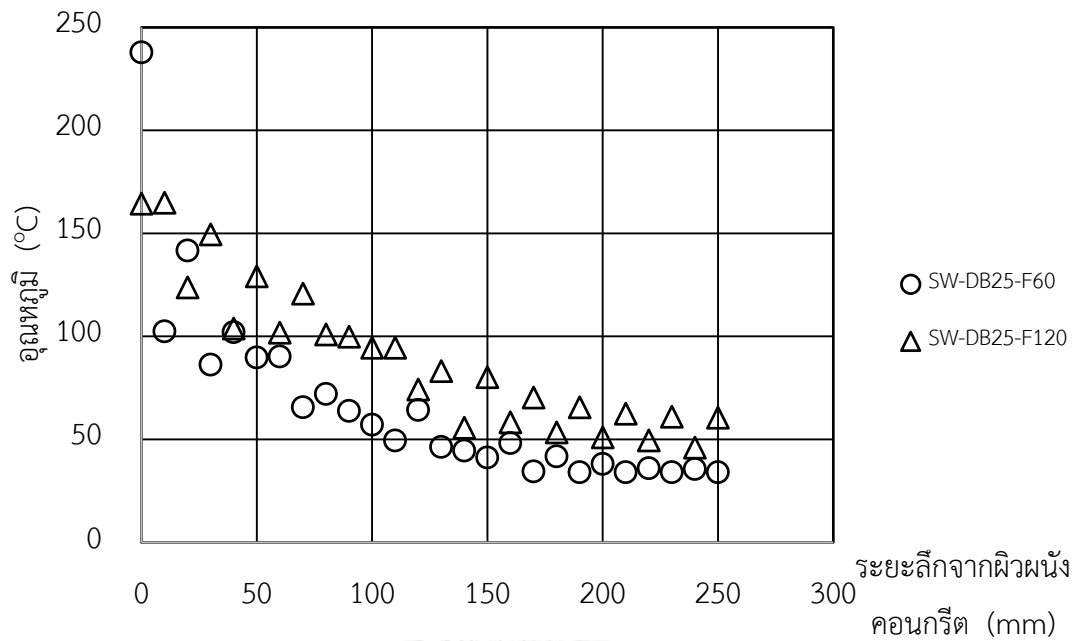
รูปที่ 3.13 การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F60 และ SW-DB12-F120



รูปที่ 3.14 การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชั้นตัวอย่าง SW-DB16-F60 และ SW-DB16-F120


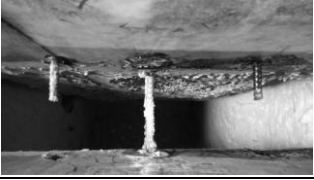
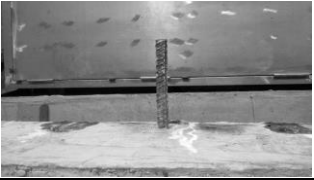







รูปที่ 3.15 การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชั้นตัวอย่าง SW-DB20-F60 และ SW-DB20-F120



รูปที่ 3.16 การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F60 และ SW-DB25-F120

**ตารางที่ 3.4** แรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซิน และลักษณะการวิบัติการรื้อถอนจากการทดสอบขนาดจริง

ชิ้นตัวอย่างทดสอบ	แรงต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม (kN)	กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซิน (MPa)	ลักษณะการวิบัติ
SW-DB12-F060	53.3	11.8	
SW-DB16-F060	26.0	5.8	
SW-DB20-F060	72.0	8.9	
SW-DB25-F060	41.6	5.2	
SW-DB12-F120	104.1	5.3	
SW-DB16-F120	45.3	3.6	
SW-DB20-F120	115.4	5.9	
SW-DB25-F120	87.5	4.5	

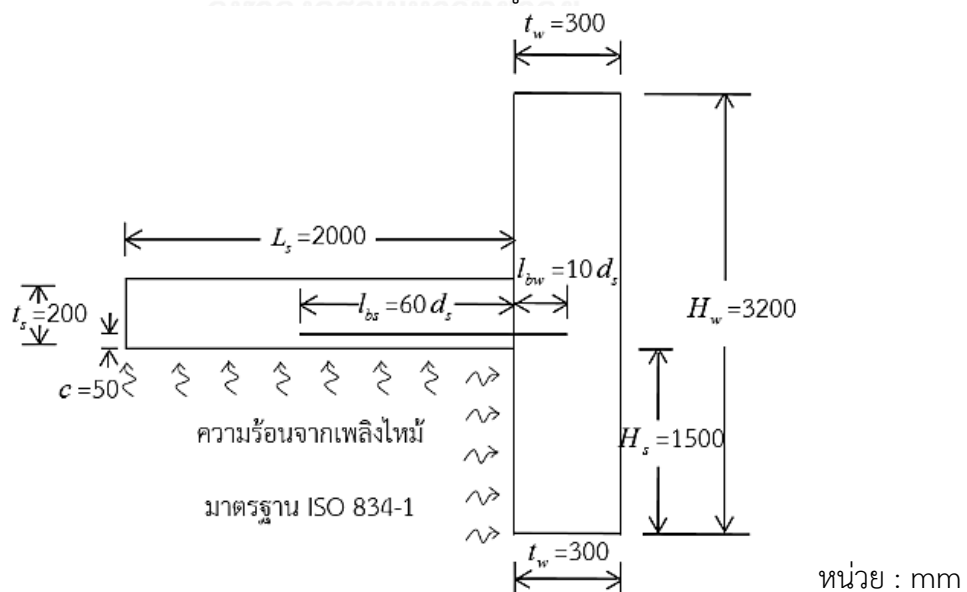
## บทที่ 4

### การประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม

การประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมโดยวิธีการที่นำเสนออาศัยแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต ดังแสดงรายละเอียดในข้อ 4.1 และสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม ดังแสดงรายละเอียดในข้อ 4.2 สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอพิจารณาเปรียบเทียบแรงต้านทานการดึงออกรวมทั้งคุณสมบัติของอิพอกซีเรซินที่คำนวณได้กับผลการทดสอบขนาดจริง ดังแสดงรายละเอียดในข้อ 4.3

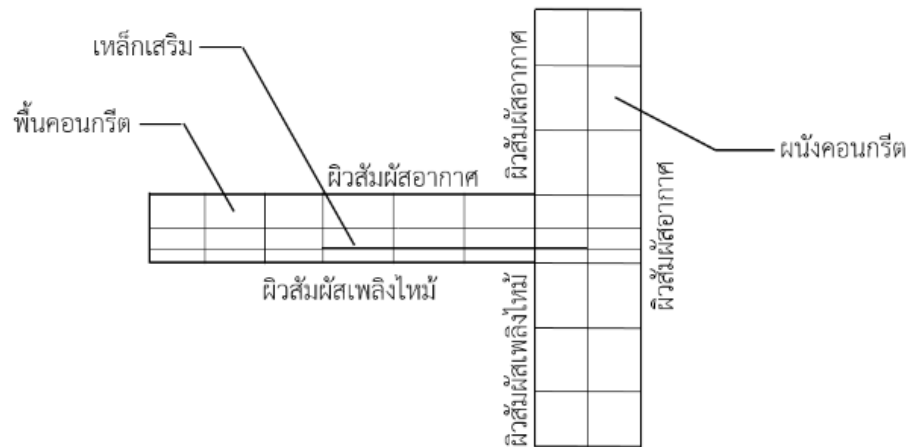
#### 4.1 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตพิจารณาลักษณะเปลิงไหม้ภายในพื้นที่ปิดล้อม ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ในบทที่ 3 โดยกำหนดขอบเขตของแบบจำลองจากคุณลักษณะสมมาตรของโครงสร้าง กล่าวคือพื้นคอนกรีตจากกึ่งกลางช่วงความยาวและผนังคอนกรีตระหว่างกึ่งกลางความสูงของชั้นล่างและชั้นบน ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 4.1 สำหรับเงื่อนไขบริเวณขอบเขต และแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

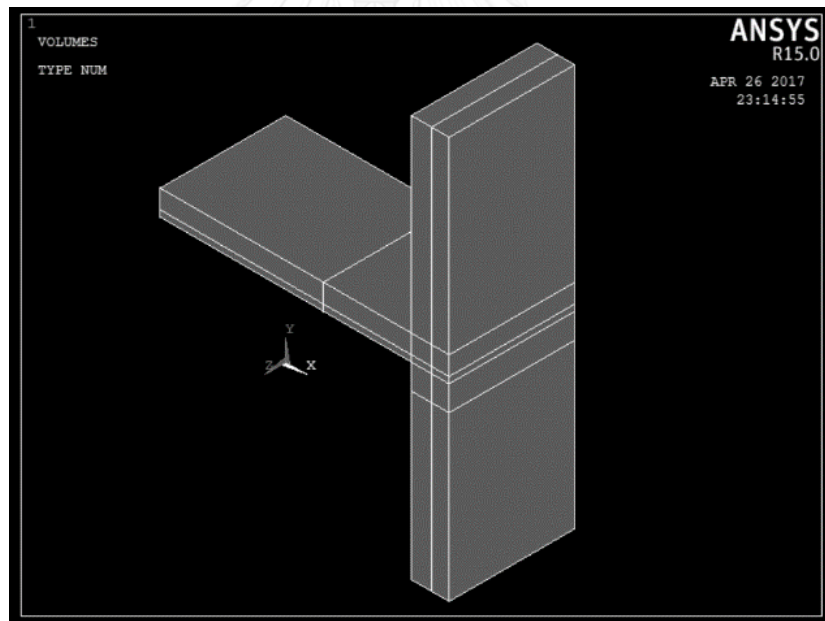


รูปที่ 4.1 รายละเอียดแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต





รูปที่ 4.2 เจ็อนไขบริเวณขอบเขตแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต



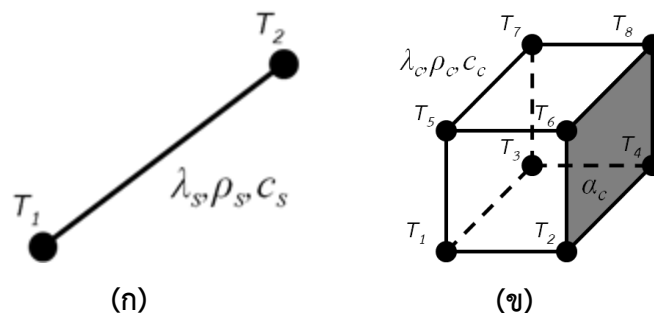
รูปที่ 4.3 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในโปรแกรม ANSYS

แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในรูปแบบที่ 4.1 พิจารณาให้พื้นคอนกรีตมีความกว้าง 1000 mm ความยาว 2000 mm และความหนา 200 mm ในขณะที่ผนังคอนกรีตมีความกว้าง 1000 mm ความหนา 300 mm และความสูง 3200 mm พื้นคอนกรีตเชื่อมต่อกับผนังที่ความสูง 1500 mm ด้วยเหล็กเสริมที่มีความยาว 70 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยที่เหล็กเสริมฝังในพื้นคอนกรีตที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างและที่ระยะลึก 50 mm จากผิวด้านล่างของพื้น และมีระยะฝังในพื้นคอนกรีต 60 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม และระยะฝังในผนังคอนกรีต 10 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ทั้งนี้แบบจำลองดังกล่าวไม่พิจารณาอิพอกซีเรซิน เนื่องจากสัดส่วนปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตและเหล็กเสริมจึงไม่ส่งผลกระทบต่อถ่ายโอนความร้อนอย่างมีนัยสำคัญ และกำหนดให้ความร้อนเข้าสู่แบบจำลองบริเวณผิวด้านล่างของพื้นและผิวด้านข้างของผนังที่สัมผัสเพลิงไหม้ในรูปการเพิ่มค่าอุณหภูมิตามเวลาที่วัดค่าได้จากการทดสอบขนาดจริง ในขณะที่ผิวบริเวณอื่นของพื้นและผนังกำหนดให้เป็นผิวที่สัมผัสอากาศ และไม่ระบุขอบเขตสำหรับบริเวณภาคตัดสมมาตรของโครงสร้าง

วัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในบทที่ 4 นี้ เพื่อทำนายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากการทดสอบขนาดจริง โดยพิจารณาการถ่ายโอนความร้อนในรูปแบบของการนำความร้อนชั่วคราวในปริภูมิ 3 มิติ ดังสมการ

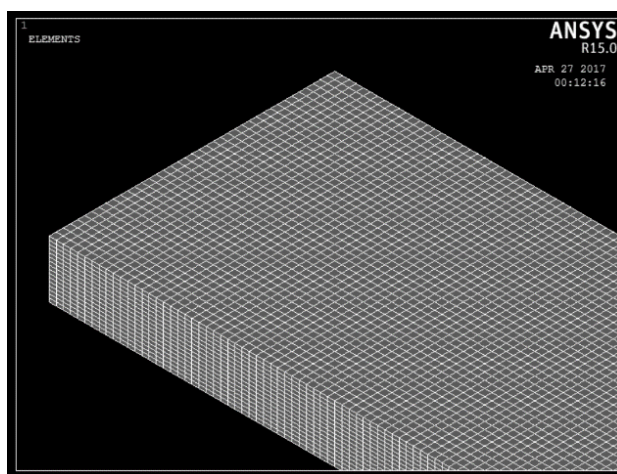
$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} + \lambda_m \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} + S_m \quad (16)$$

โดยที่  $\rho_m$  (kg/m<sup>3</sup>) แทนความหนาแน่นของวัสดุ  $c_m$  (J/kg °C) แทนความร้อนจำเพาะของวัสดุ  $\lambda_m$  (W/m °C) แทนสภาพนำความร้อนของวัสดุ  $S_m$  (W) แทนความร้อนที่เกิดภายในวัสดุต่อหน่วยเวลา และ  $T_m$  (°C) แทนอุณหภูมิของวัสดุที่เวลา  $t$  (sec)

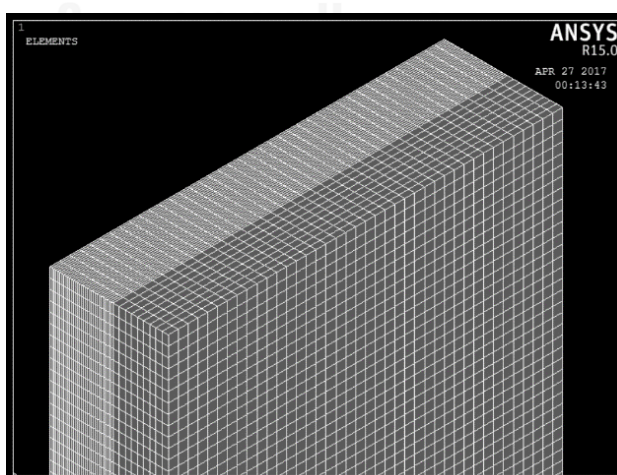


รูปที่ 4.4 ลักษณะของชิ้นส่วน : (ก) LINK33 สำหรับเหล็กเสริม (ข) SOLID70 สำหรับคอนกรีต

การวิเคราะห์แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS โดยที่พิจารณาเลือกใช้ SOLID70 แทนชิ้นส่วนคอนกรีต และ LINK33 แทนชิ้นส่วนเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยจากการตรวจสอบการลู่เข้าของคำตอบ พบว่าขนาดของชิ้นส่วนคอนกรีตและเหล็กเสริมในช่วงระหว่าง 5 – 25 mm ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ ซึ่งแต่ละจุดต่อของชิ้นส่วนดังกล่าวประกอบด้วยระดับชั้นความถี่ 1 ค่า คือค่าอุณหภูมิบริเวณจุดต่อ โดยที่  $\rho_c$  แทนความหนาแน่นของคอนกรีต  $c_c$  แทนความร้อนจำเพาะของคอนกรีต  $\lambda_c$  แทนสภาพนำความร้อนของคอนกรีต  $\rho_s$  แทนความหนาแน่นของเหล็กเสริม  $c_s$  แทนความร้อนจำเพาะของเหล็กเสริม และ  $\lambda_s$  แทนสภาพนำความร้อนของเหล็กเสริม



(ก)

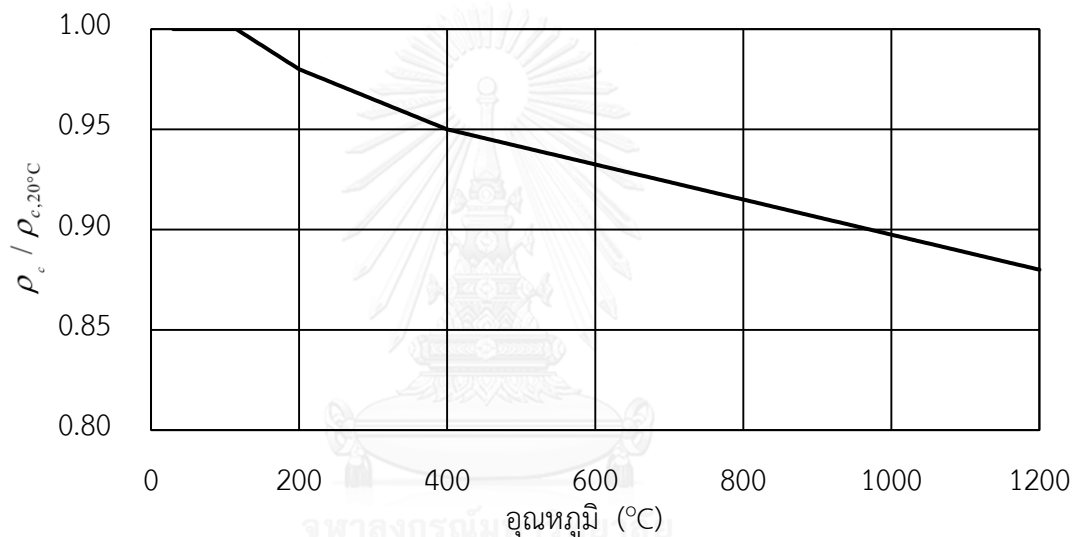


(ข)

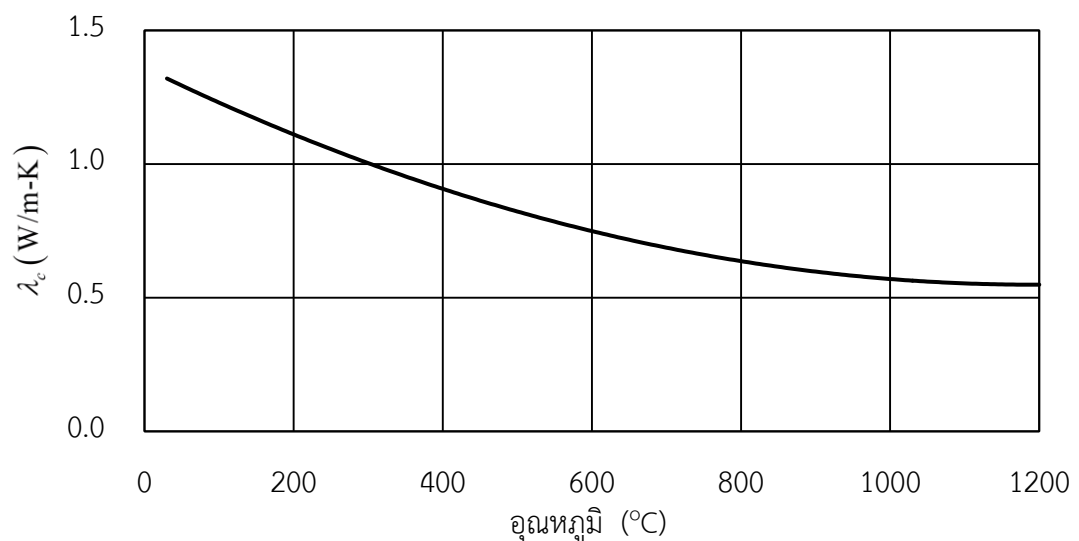
รูปที่ 4.5 การแบ่งชิ้นส่วนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ : (ก) ชิ้นส่วนพื้น (ข) ชิ้นส่วนผนัง

สมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตพิจารณาตามมาตรฐาน EN 1992-1-2 [12] สำหรับคอนกรีตปรกติมวลรวมเนื้อปูน โดยกำหนดความหนาแน่นที่อุณหภูมิปรกติ ( $\rho_{c,20^{\circ}\text{C}}$ ) เท่ากับ  $2400 \text{ kg/m}^3$  และแปรผันตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6 สภาพนำความร้อนแบบขีดจำกัดล่าง [7] ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และความร้อนจำเพาะ (สำหรับปริมาณความชื้น 3 %) ดังแสดงในรูปที่ 4.8

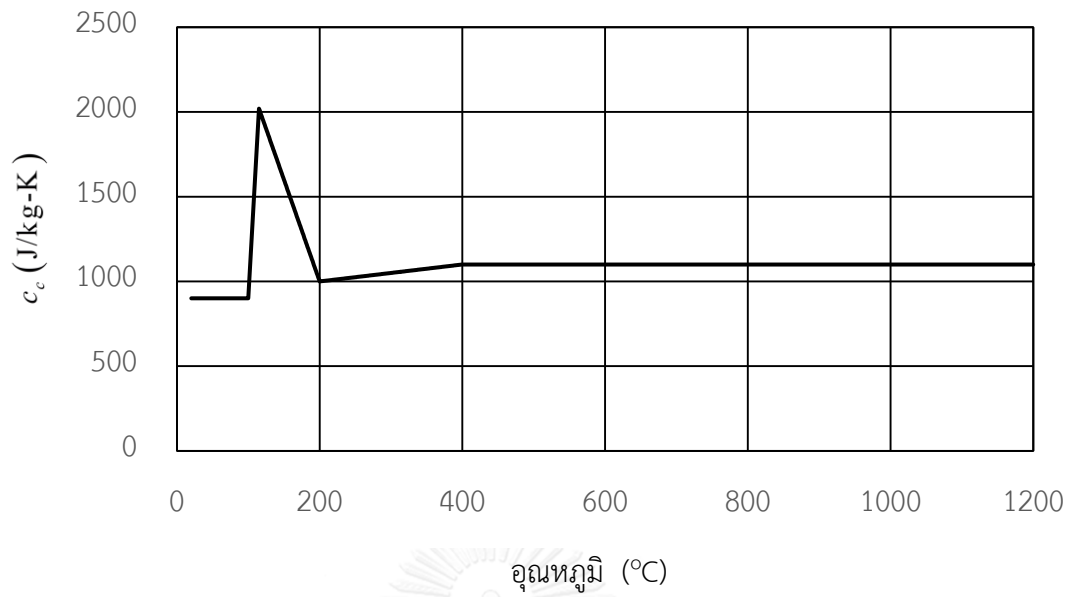
สำหรับสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กเสริมพิจารณาตามมาตรฐาน EN 1993-1-2 [13] โดยพิจารณาให้เหล็กเสริมที่อุณหภูมิสูงมีค่าความหนาแน่น  $\rho_s$  เท่ากับความหนาแน่นที่อุณหภูมิปรกติ  $7850 \text{ kg/m}^3$  ในขณะที่สภาพนำความร้อนและความร้อนจำเพาะของเหล็กเสริม แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ



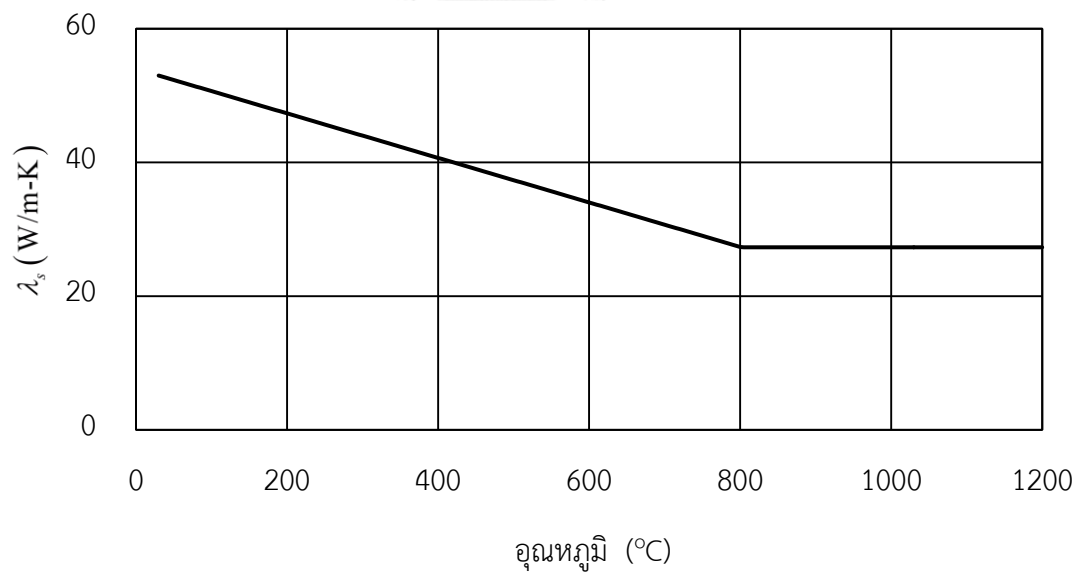
รูปที่ 4.6 การแปรผันของความหนาแน่นของคอนกรีตตามอุณหภูมิ [11]



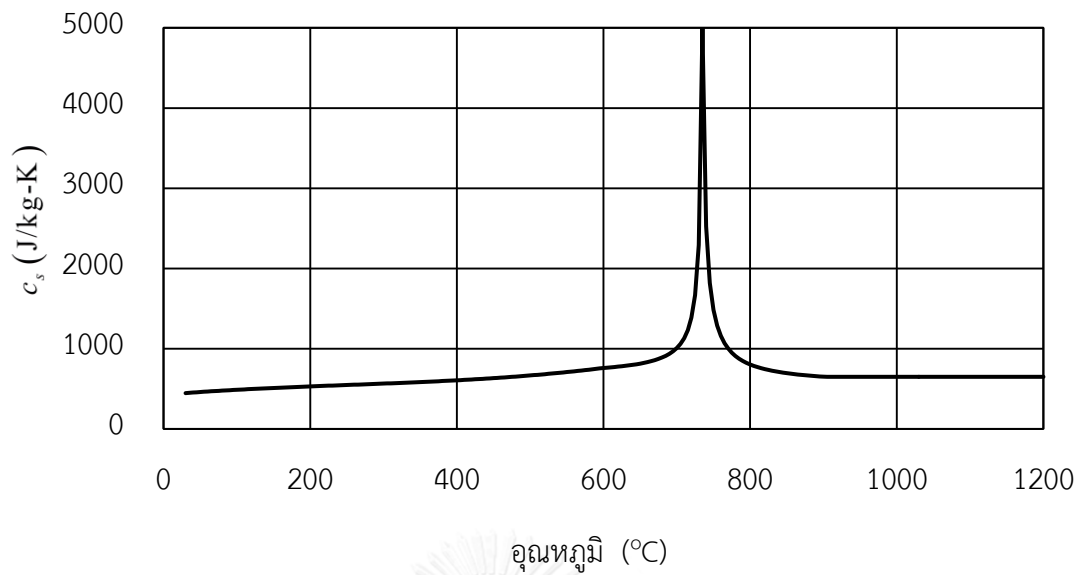
รูปที่ 4.7 การแปรผันของสภาพนำความร้อนของคอนกรีตตามอุณหภูมิ [11]



รูปที่ 4.8 การแปรผันของความร้อนจำเพาะของคอนกรีตตามอุณหภูมิ [11]



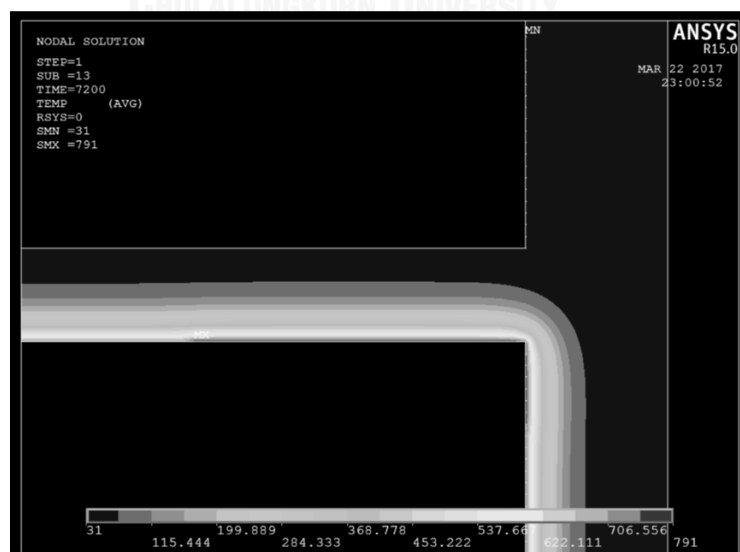
รูปที่ 4.9 การแปรผันของสภาพนำความร้อนของเหล็กตามอุณหภูมิ [12]



รูปที่ 4.10 การแปรผันของความร้อนจำเพาะของเหล็กตามอุณหภูมิ [12]

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนพิจารณาให้เท่ากับ  $25 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  บริเวณผิวคอนกรีตที่สัมผัสเพลิงไหม้ และ  $9 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  บริเวณผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสเพลิงไหม้ และสภาพเปล่งรังสีเท่ากับ 0.7 [14] [15] [16]

ตัวอย่างการกระจายค่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในโปรแกรม ANSYS แสดงดังรูปที่ 4.11 สำหรับค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมในข้อ 4.2 ประยุกต์ใช้ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งของเหล็กเสริมในผนังคอนกรีตที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต



รูปที่ 4.11 การกระจายค่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต

## 4.2 สมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม

การประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้อาศัยค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินบริเวณรอยต่อจากการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนในหัวข้อที่ 4.1 ร่วมกับสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินจากผลการทดสอบการดึงออกของ ภูวิศร อ้อแสงชัย [7] ดังแสดงตามสมการที่ (17) – (20) สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ

$$\tau_e^{cr}(T_e) = e^{\left(\frac{234.62 - T_e}{74.48}\right)} \quad \text{สำหรับ DB12} \quad (17)$$

$$\tau_e^{cr}(T_e) = e^{\left(\frac{233.56 - T_e}{74.91}\right)} \quad \text{สำหรับ DB16} \quad (18)$$

$$\tau_e^{cr}(T_e) = e^{\left(\frac{210.53 - T_e}{80.41}\right)} \quad \text{สำหรับ DB20} \quad (19)$$

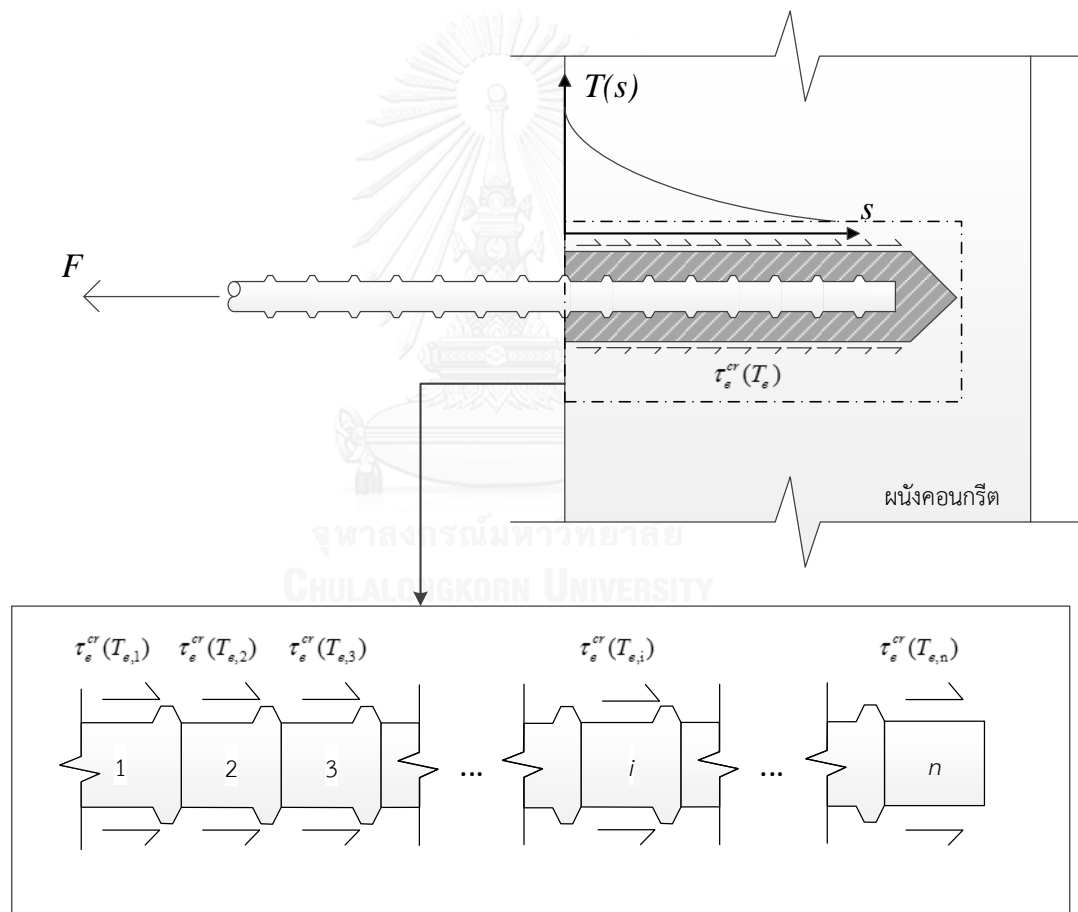
$$\tau_e^{cr}(T_e) = e^{\left(\frac{206.25 - T_e}{88.46}\right)} \quad \text{สำหรับ DB25} \quad (20)$$

ทั้งนี้ เมื่อค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ใช้ในสมการที่ (17) – (20) มีค่าเท่ากับหรือต่ำกว่าอุณหภูมิปรกติ (31 °C) กำหนดให้ใช้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวระบุของอิพอกซีเรซินที่มีค่าเท่ากับ 12.4 MPa เป็นค่าคงที่แทนสมการที่ (17) – (20)

การประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมในการศึกษานี้ พิจารณาแบ่งช่วงความยาวของอิพอกซีเรซินตามแนวระยะฝั่งของเหล็กเสริม ดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยที่กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินในแต่ละช่วงความยาวแปรผันตามอุณหภูมิที่แตกต่างกันและความต้านทานการดึงออกคำนวณจากสมการ

$$R \approx \sum_{i=1}^n \tau_e^{cr}(T_{e,i}) \pi d_s \frac{l_{bw}}{n} 1000 \quad (21)$$

โดยที่  $R$  (kN) แทนความต้านทานการดึงออก  $\tau_e^{cr}(T_{e,i})$  (MPa) แทนกำลังยึดเหนี่ยวของ อีพอกซีเรซินในช่วงความยาวที่  $i$  ซึ่งมีค่าอุณหภูมิ  $T_{e,i}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) ที่คำนวณจากสมการที่ (17) - (20) สำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาดที่พิจารณา  $T_{e,i}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) แทนอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพอกซีเรซินในช่วง ความยาวที่  $i$  ที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนในบทที่ 3  $d_s$  (mm) แทนขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางระบุมของเหล็กเสริม  $l_{bw}$  (mm) แทนความยาวของเหล็กเสริมที่ฝังในผนังคอนกรีต และ  $n$  แทนจำนวนช่วง โดยในการศึกษานี้พิจารณาให้แปรเปลี่ยนตามระยะฝังของเหล็กเสริม ( $n = 12$  สำหรับ DB12;  $n = 16$  สำหรับ DB16;  $n = 20$  สำหรับ DB20;  $n = 25$  สำหรับ DB25)



รูปที่ 4.12 แนวทางการประมาณความต้านทานการดึงออก [7]

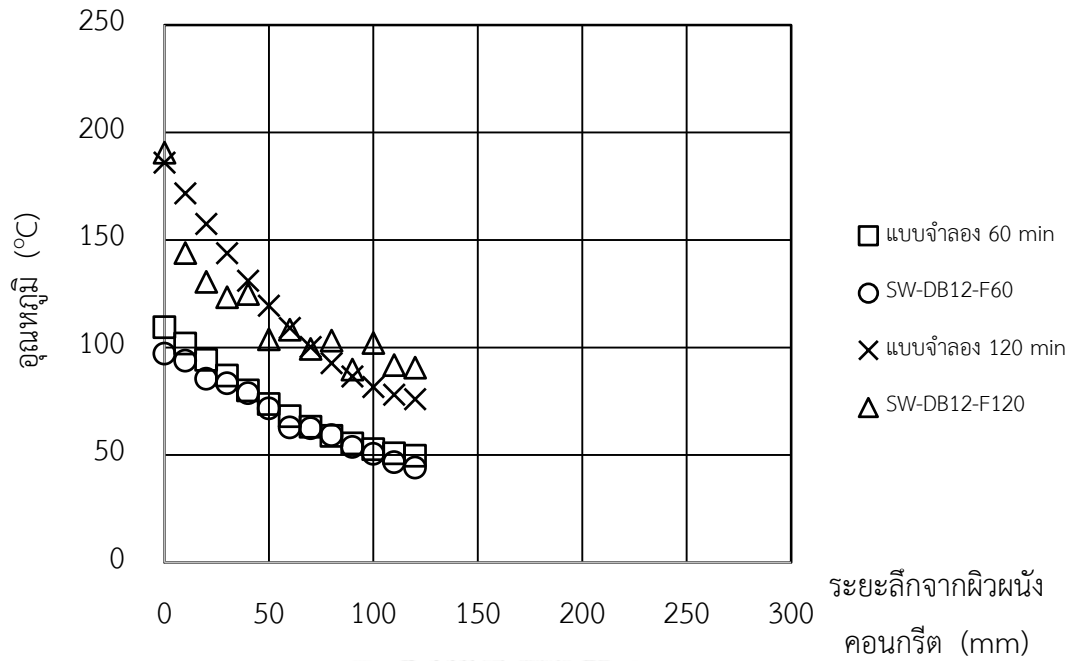


### 4.3 การตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอ

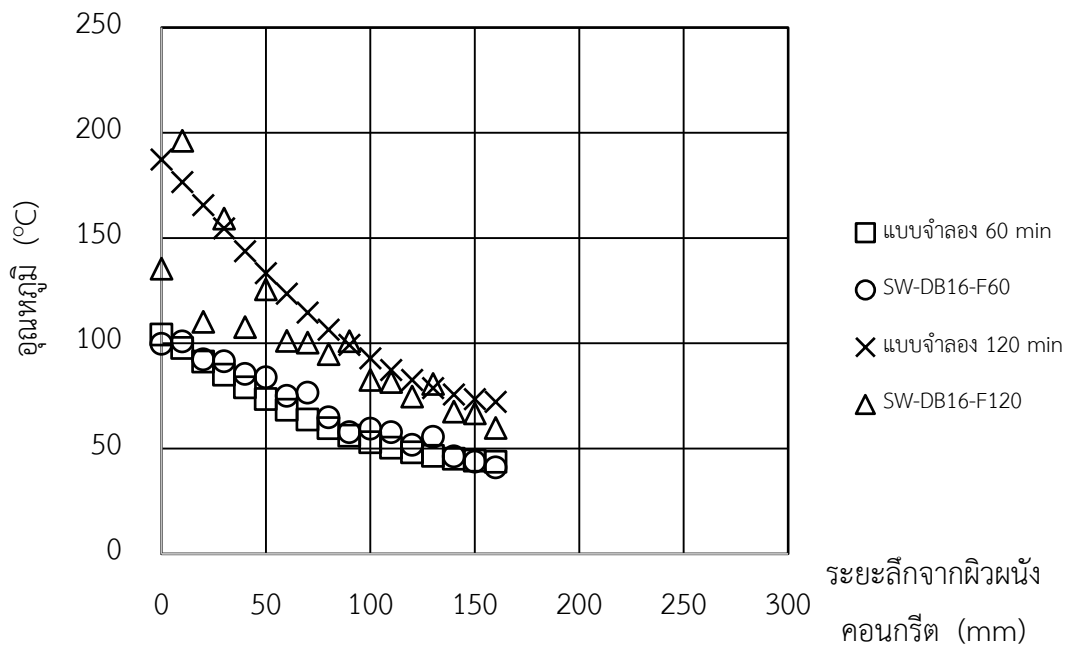
การตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอพิจารณาเปรียบเทียบอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตและความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมที่ได้จากสมการประมาณค่ากับผลการทดสอบขนาดจริง

รูปที่ 4.13 – 4.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min และ 120 min ที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนกับผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดแสดงดังตารางที่ 4.1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.13 0.17 0.20 และ 0.62 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min และมีค่าเท่ากับ 0.21 0.50 0.71 และ 0.45 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min และเมื่อพิจารณาความแม่นยำของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบระหว่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min และ 120 min ของเหล็กเสริมทั้ง 4 ขนาด พบว่า ที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min แบบจำลองมีค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 0.79 1.29 1.82 และ 3.82 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm และที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min มีค่าเท่ากับ 1.45 2.67 2.87 และ 3.59 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ซึ่งเห็นได้ว่าที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min มีค่าเบี่ยงเบนโดยรวมต่ำกว่าที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min

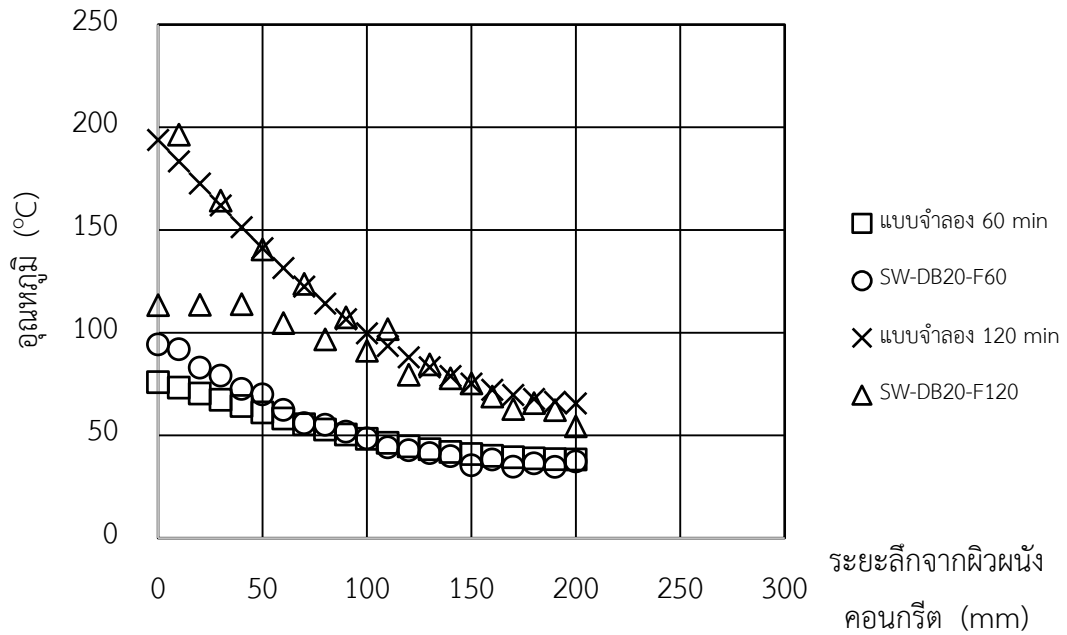
นอกจากนี้ ค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างพื้นและผนังคอนกรีตเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min และ 120 min ที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนใกล้เคียงกับผลการทดสอบขนาดจริง (แสดงข้อมูลในภาคผนวก ค) โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 0.45 0.65 0.65 และ 0.49 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min และมีค่าเท่ากับ 0.49 0.54 0.56 และ 0.49 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min



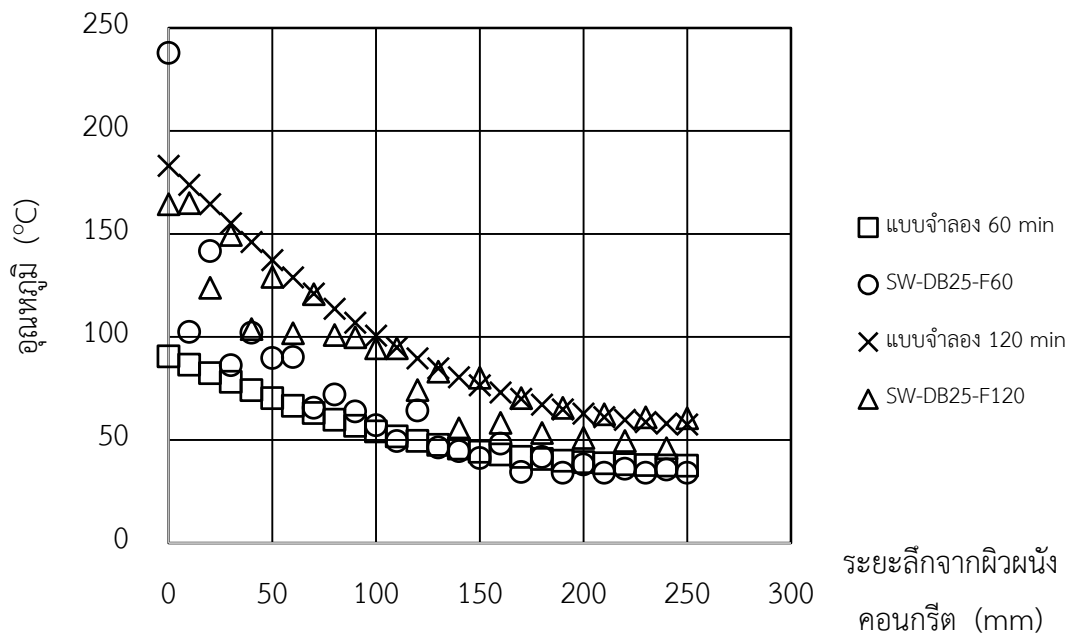
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนกับการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนกับการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนกับการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนกับการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

ตารางที่ 4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน

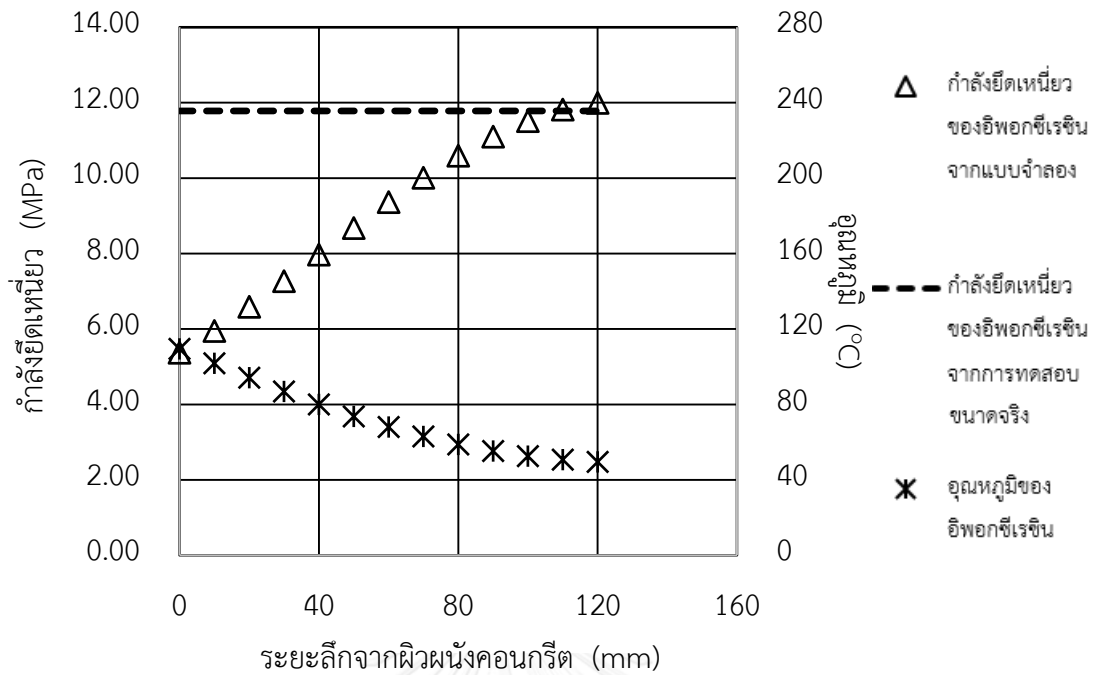
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (mm)	ระยะเวลาการให้ความร้อน (min)	อุณหภูมิแตกต่างสูงสุดของอิพอกซีเรซิน (°C)		ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด*	ค่าเบี่ยงเบน**
		การทดสอบขนาดจริง	แบบจำลอง		
12	60	97.1	109.4	0.13	0.79
	120	130.5	157.5	0.21	1.45
16	60	41.0	43.7	0.17	1.29
	120	110.2	165.6	0.50	2.67
20	60	35.4	40.8	0.20	1.82
	120	113.4	193.9	0.71	2.87
25	60	34.4	41.7	0.62	3.82
	120	55.6	80.4	0.45	3.59

$$*ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด = \max_i \frac{|T_{e,model}^i - T_{e,test}^i|}{T_{e,test}^i}$$

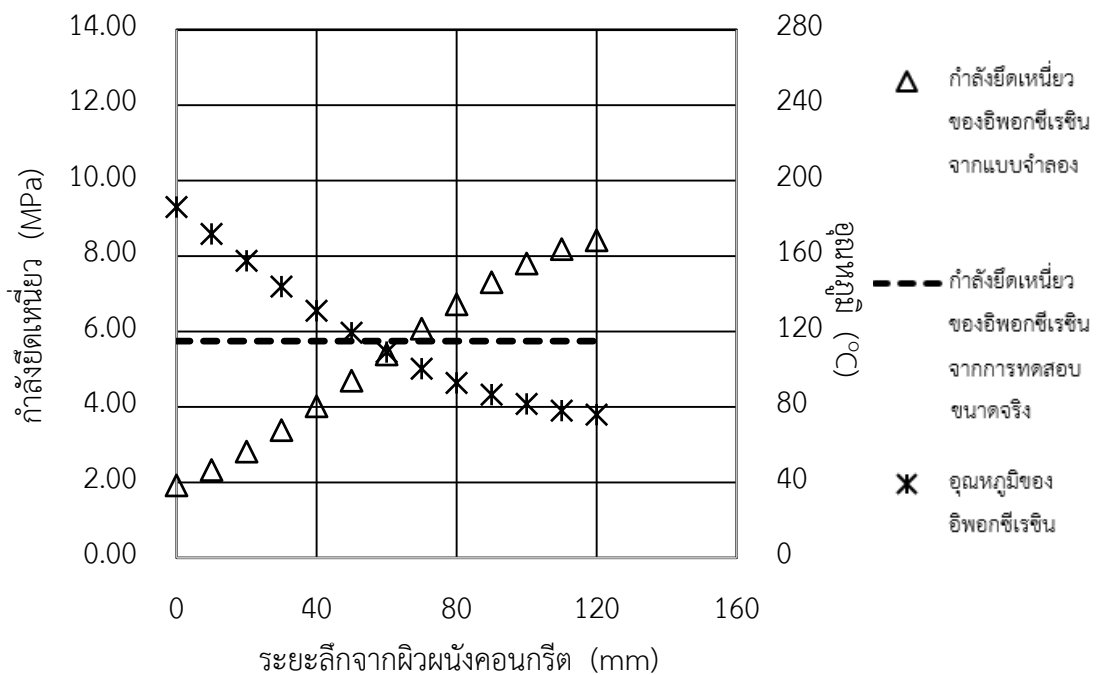
$$**ค่าเบี่ยงเบน = \sum_{i=1}^n \frac{|T_{e,model}^i - T_{e,test}^i|}{T_{e,test}^i}$$

โดยที่  $T_{e,model}^i$  (°C) แทนค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินจากแบบจำลองในช่วงความยาวที่  $i$   $T_{e,test}^i$  (°C) แทนค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินจากการทดสอบในช่วงความยาวที่  $i$  และ  $n$  แทนจำนวนของค่าอุณหภูมิตลอดความยาวของเหล็กเสริม โดยพิจารณาให้แปรเปลี่ยนตามระยะฝั่งของเหล็กเสริม ( $n = 13$  สำหรับ DB12;  $n = 17$  สำหรับ DB16;  $n = 21$  สำหรับ DB20;  $n = 26$  สำหรับ DB25)

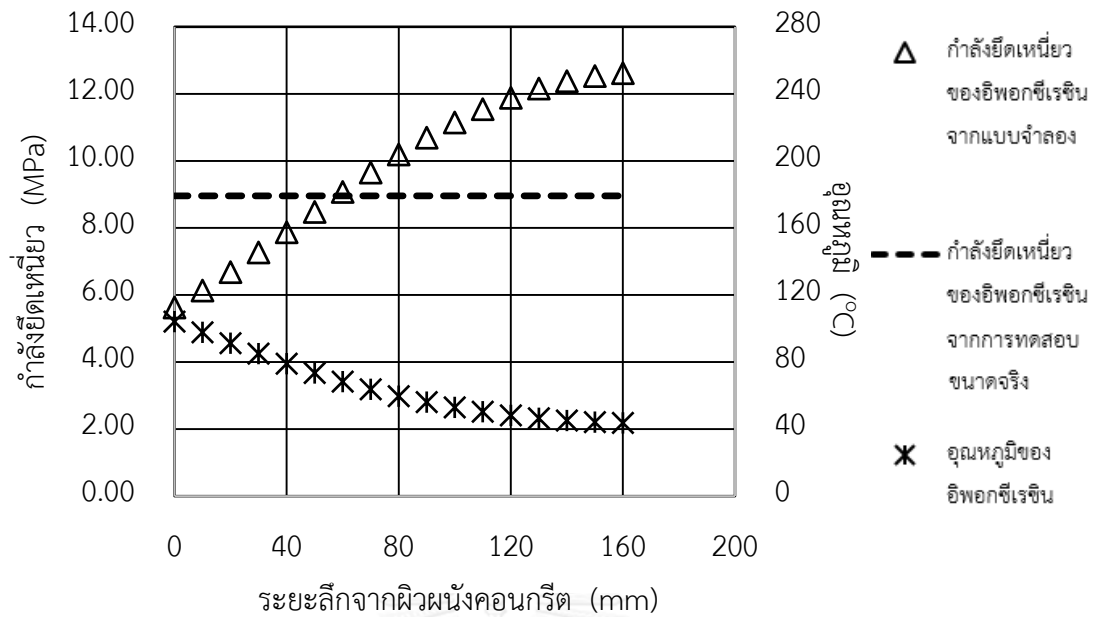
รูปที่ 4.17 – 4.24 แสดงผลการเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบขนาดจริงและสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวพบว่า กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยค่าความแม่นยำแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.77 1.09 0.88 และ 0.97 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min และมีค่าเท่ากับ 0.92 1.04 1.07 และ 0.82 สำหรับรอยต่อโครงสร้างที่ใช้เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min นอกจากนี้ ตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า สมการประมาณค่ายังแสดงแนวโน้มการลดค่าที่สอดคล้องกับผลการทดสอบขนาดจริง ยกเว้นสำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm และ 16 mm ที่มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินใกล้เคียงกัน และที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm และ 25 mm มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินใกล้เคียงกัน จึงเป็นการยืนยันความแม่นยำของสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป



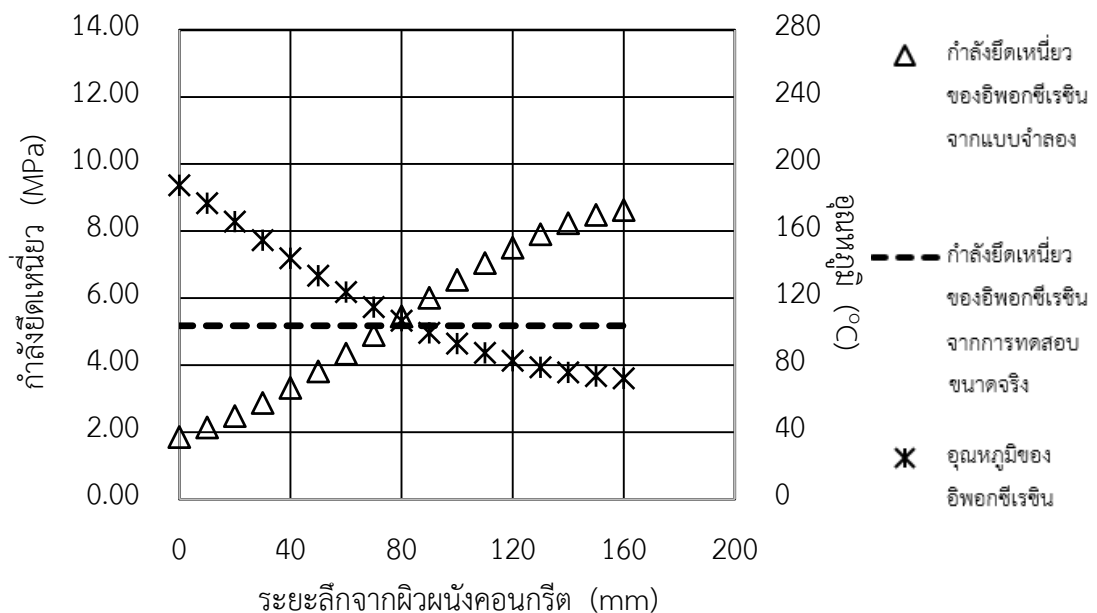
รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



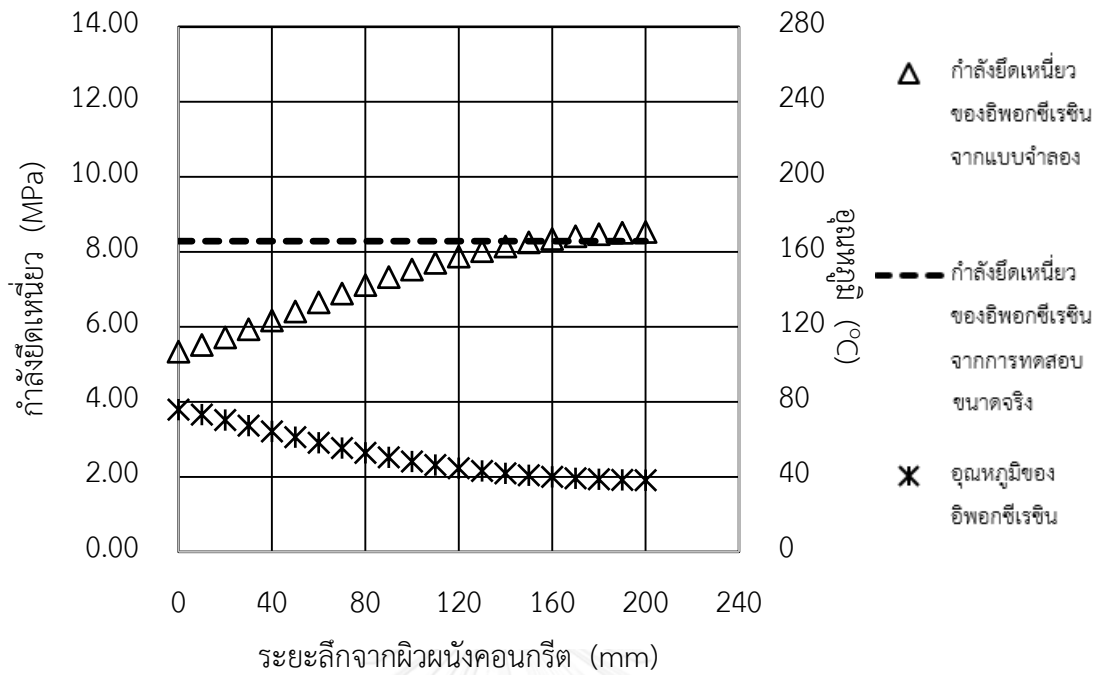
รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



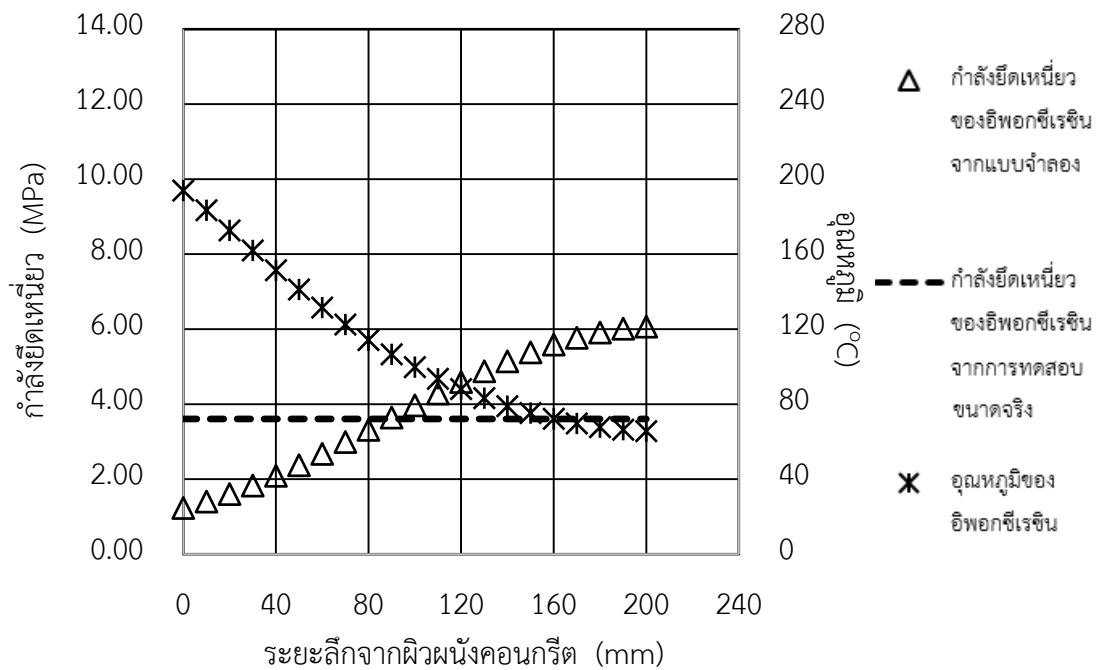
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm

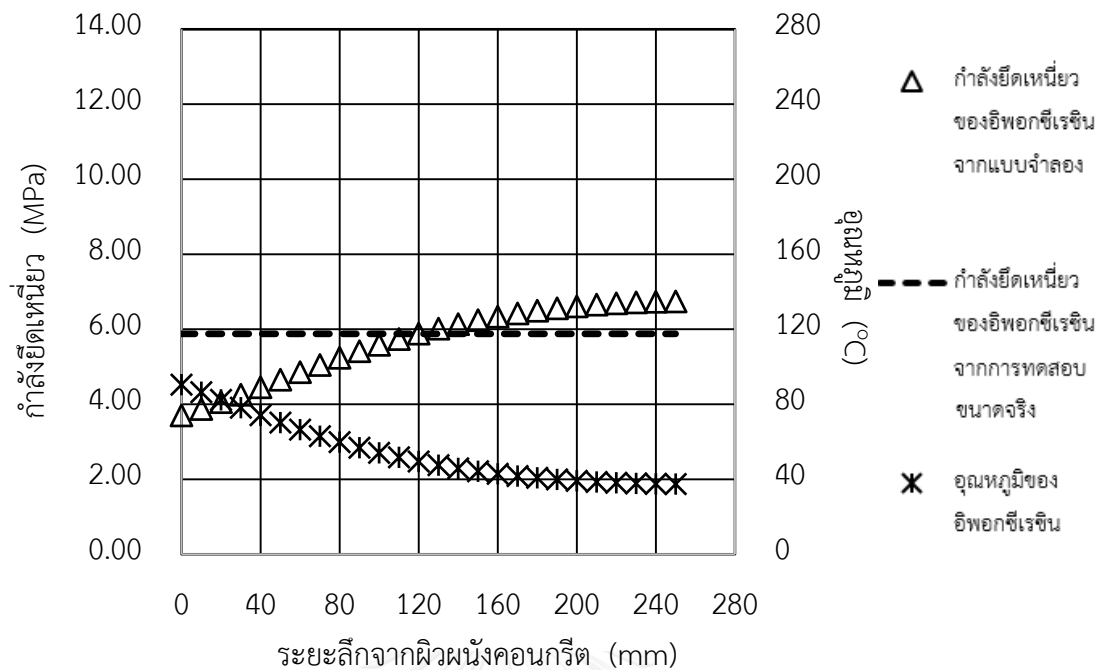


รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm

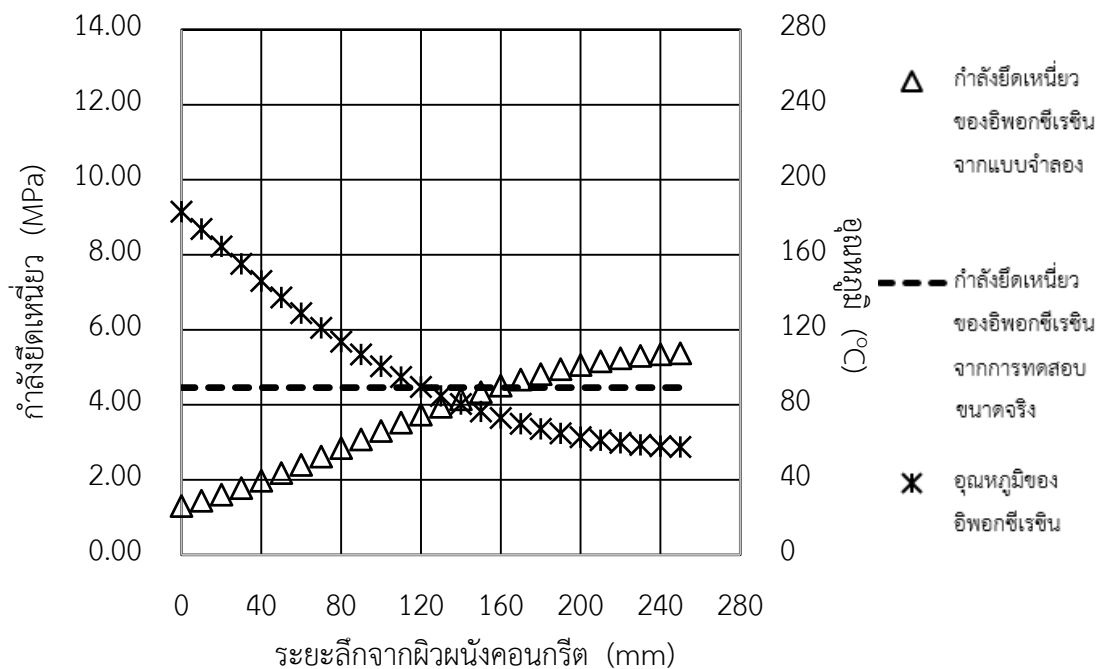


รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm





รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 60 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองกับการทดสอบขนาดจริง ที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 120 min สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

ตารางที่ 4.2 ค่าความแม่นยำของวิธีการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของเหล็กเสริม  (mm)	ระยะเวลา การให้ความ ความร้อน  (min)	ความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม/ กำลังยึดเหนี่ยว (kN / MPa)		ค่าความ แม่นยำ*
		การทดสอบ ขนาดจริง	สมการประมาณค่า	
12	60	53.3 / 11.8	41.3 / 9.1	0.77
	120	26.0 / 5.8	24.0 / 5.3	0.92
16	60	72.0 / 8.9	78.8 / 9.7	1.09
	120	41.6 / 5.2	43.3 / 5.4	1.04
20	60	104.1 / 5.3	91.7 / 4.7	0.88
	120	45.3 / 3.6	48.4 / 3.8	1.07
25	60	115.4 / 5.9	112.6 / 5.7	0.97
	120	87.5 / 4.5	73.3 / 3.7	0.82

\*ค่าความแม่นยำ = ค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมจากสมการประมาณค่า / ค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมจากการทดสอบขนาดจริง

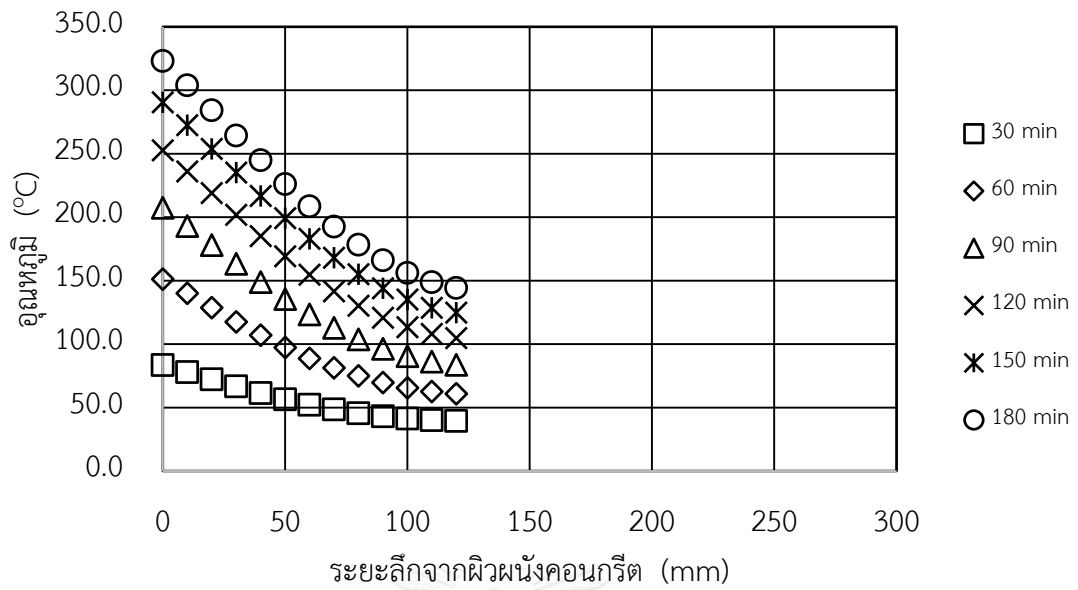
## บทที่ 5

### การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานการดึงออก ของเหล็กเสริมในภาวะเพลิงไหม้

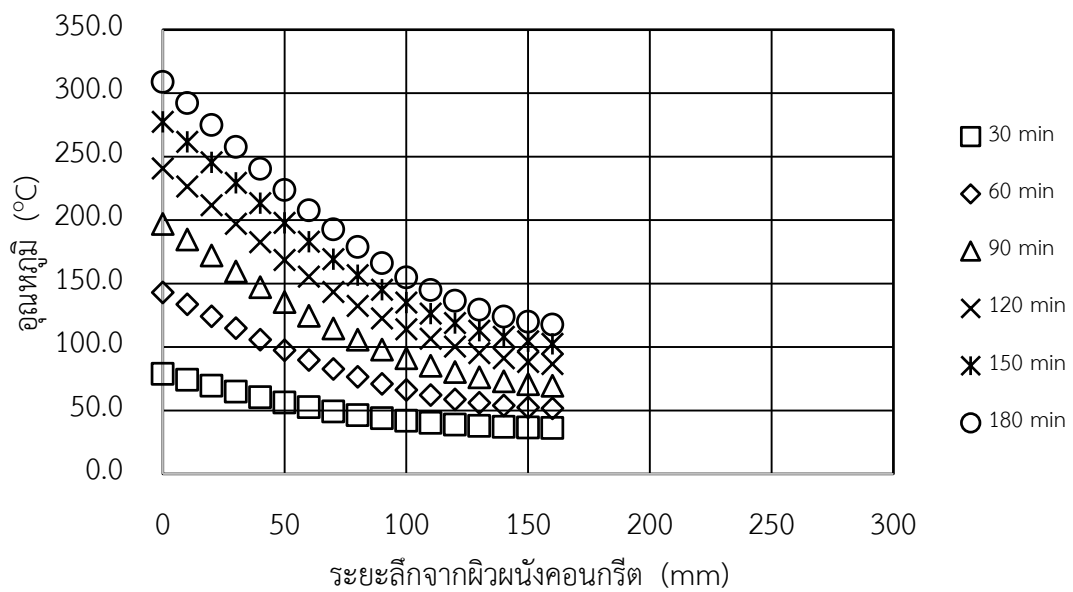
การศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมในภาวะเพลิงไหม้ โดยอาศัยวิธีการการประมาณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมในบทที่ 4 พิจารณาปรับตัวแปรศึกษา 2 ค่า ได้แก่ ระยะเวลาการให้ความร้อน และระยะคอนกรีตหุ้มของเหล็กเสริม สำหรับเหล็กเสริมทั้ง 4 ขนาด ได้แก่ 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm

#### 5.1 ระยะเวลาการให้ความร้อน

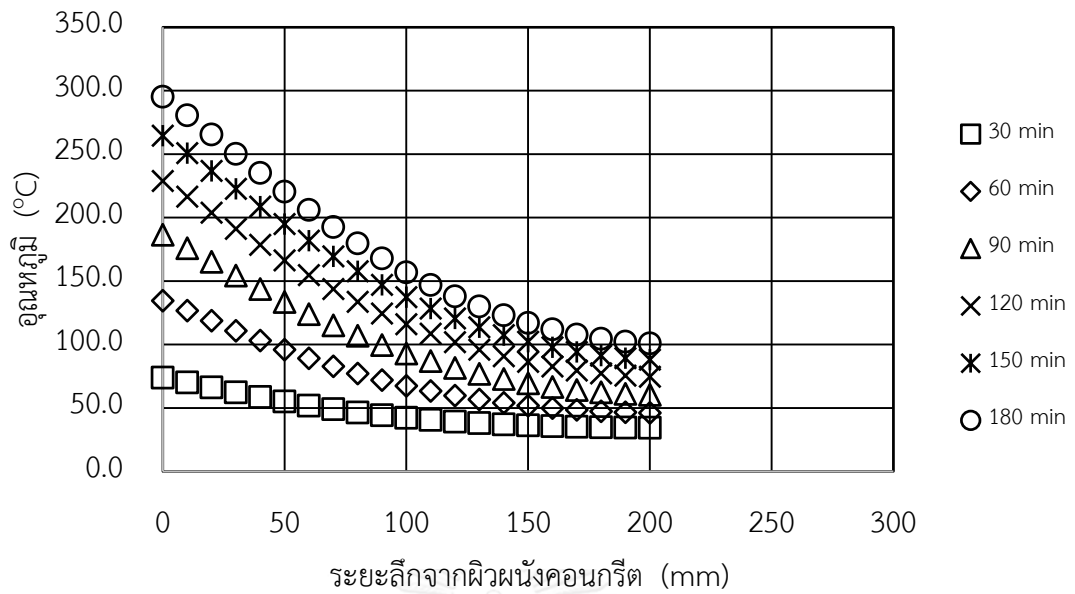
รูปที่ 5.1 – 5.4 แสดงค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต โดยปรับเปลี่ยนระยะเวลาการให้ความร้อน สำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาด โดยที่กำหนดให้ระยะคอนกรีตหุ้มของเหล็กเสริมมีค่าคงที่เท่ากับ 50 mm จากรูปดังกล่าว พบว่าระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินสูงขึ้นอย่างชัดเจน และมีค่าสูงสุดที่บริเวณผิวของผนังคอนกรีต นอกจากนี้ เหล็กเสริมที่มีขนาดเล็กกว่ามีอัตราการเพิ่มค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่บริเวณผิวผนังคอนกรีตสูงกว่า (อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 180 min มีค่าเท่ากับ 323 °C 309 °C 295 °C และ 280 °C สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ)



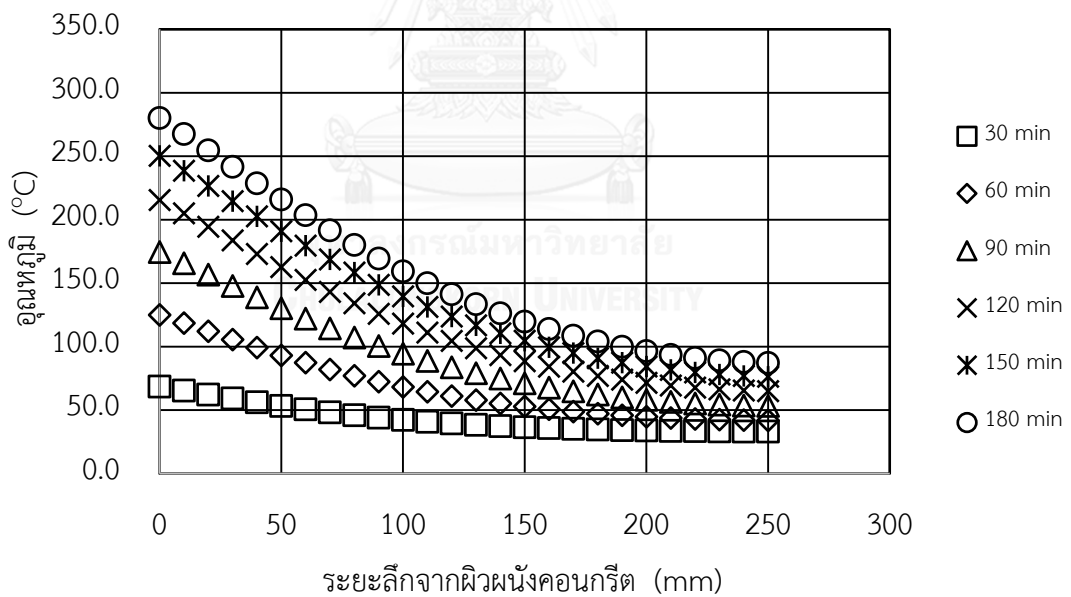
รูปที่ 5.1 การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



รูปที่ 5.2 การกระจายค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm

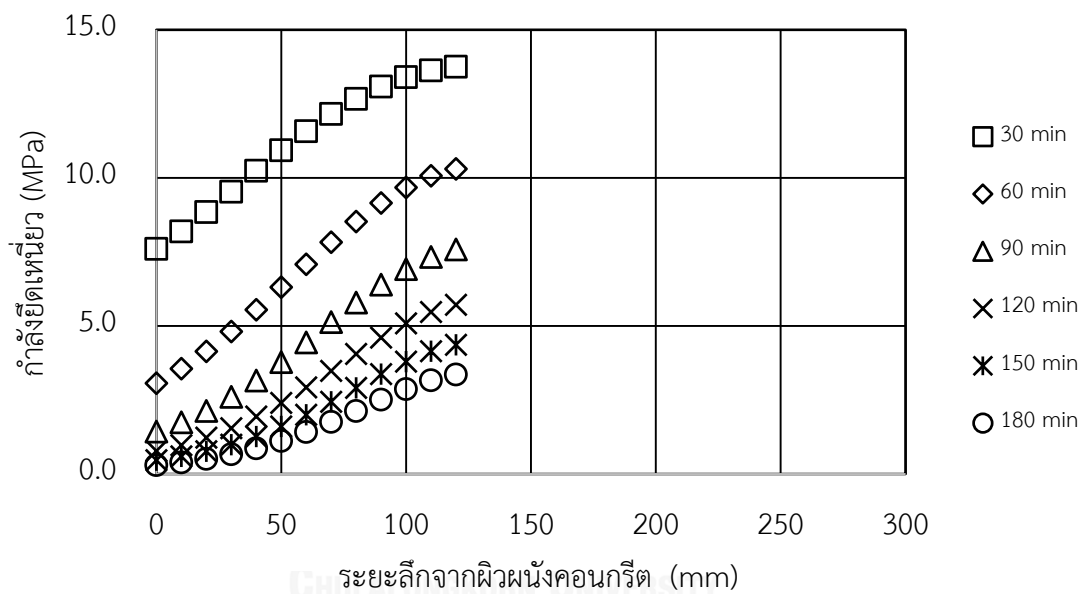


รูปที่ 5.3 การกระจายค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm

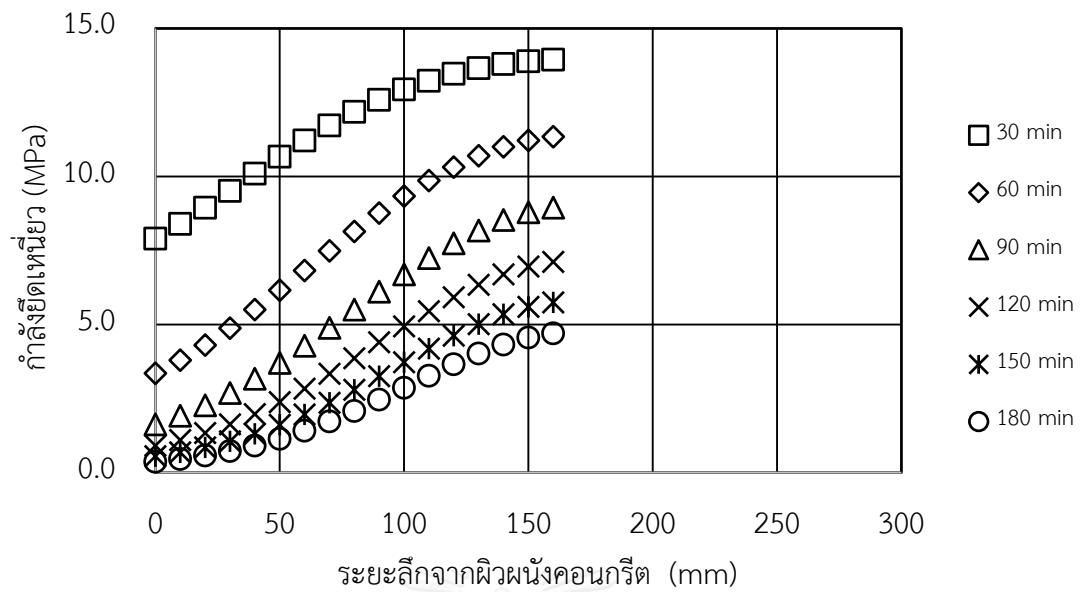


รูปที่ 5.4 การกระจายค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

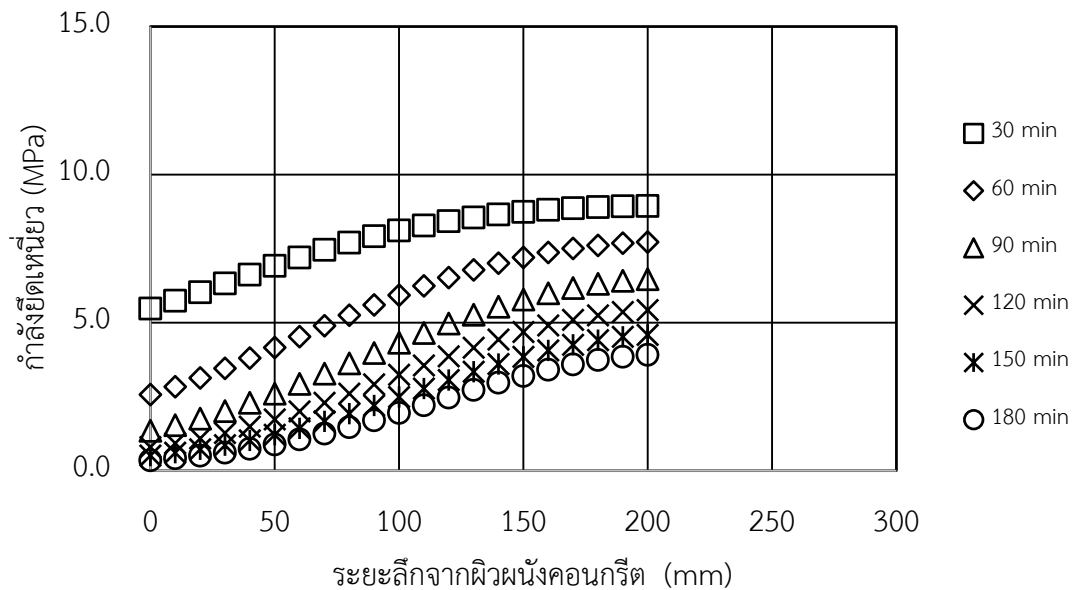
รูปที่ 5.5 – 5.8 แสดงค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม โดยใช้ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินจากรูปที่ 5.1 – 5.4 จากรูปดังกล่าว พบว่าระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินลดลงอย่างชัดเจนและมีค่าสูงสุดที่บริเวณผิวของผนังคอนกรีต นอกจากนี้ เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่ามีอัตราการลดค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่บริเวณผิวผนังคอนกรีตสูงกว่า (กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 30 min เหลือ 61.3% 63.7% 44.4% และ 37.9% สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ)



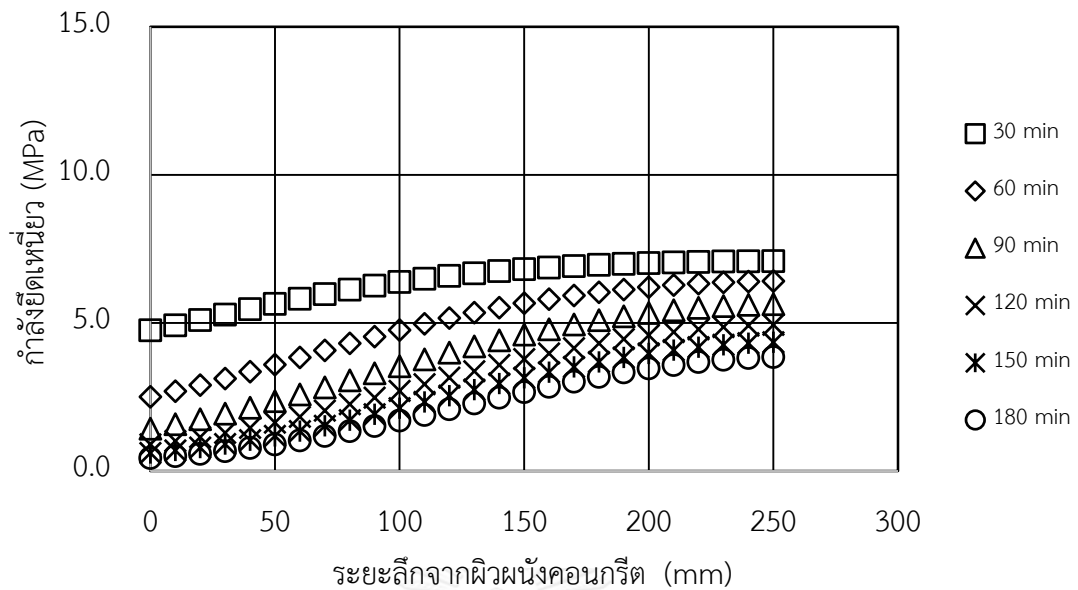
รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm



รูปที่ 5.7 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm

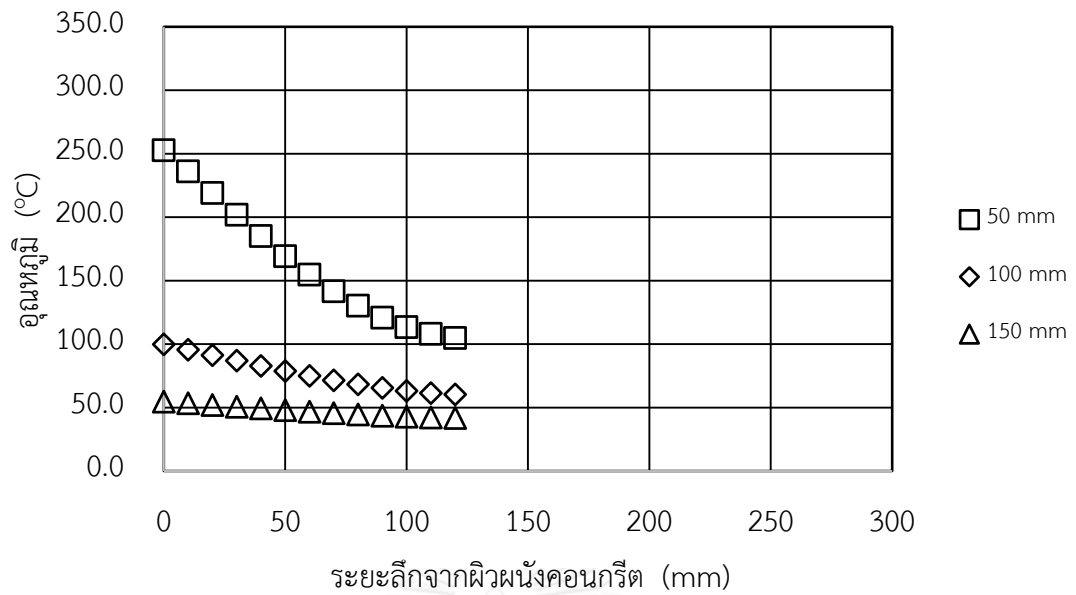


**รูปที่ 5.8** การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะเวลาการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

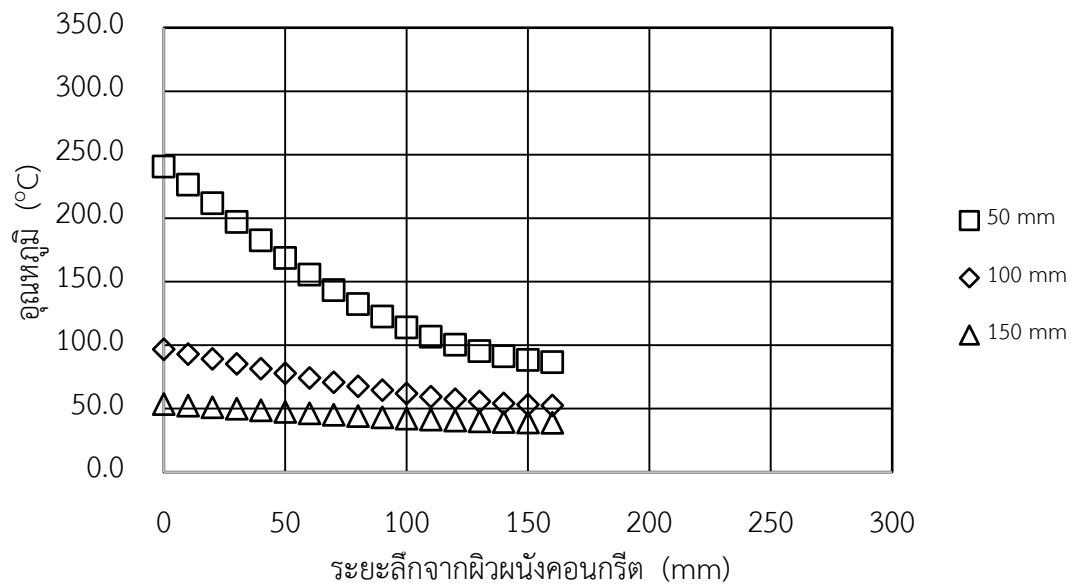
## 5.2 ระยะเวลาคอนกรีตหุ้มเหล็กเสริม

รูปที่ 5.9 – 5.12 แสดงค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต โดยปรับเปลี่ยนระยะคอนกรีตหุ้ม สำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาด โดยที่กำหนดให้ระยะเวลาการให้ความร้อนมีค่าคงที่เท่ากับ 120 min จากรูปดังกล่าว พบว่าระยะคอนกรีตหุ้มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินต่ำลงอย่างชัดเจน และมีค่าสูงสุดที่บริเวณผิวของผนังคอนกรีต นอกจากนี้ เหล็กเสริมที่มีขนาดเล็กกว่ามีอัตราการเพิ่มค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่บริเวณผิวผนังคอนกรีตสูงกว่า (อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ระยะคอนกรีตหุ้ม 50 mm มีค่าเท่ากับ 253 °C 241 °C 229 °C และ 216 °C สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ)

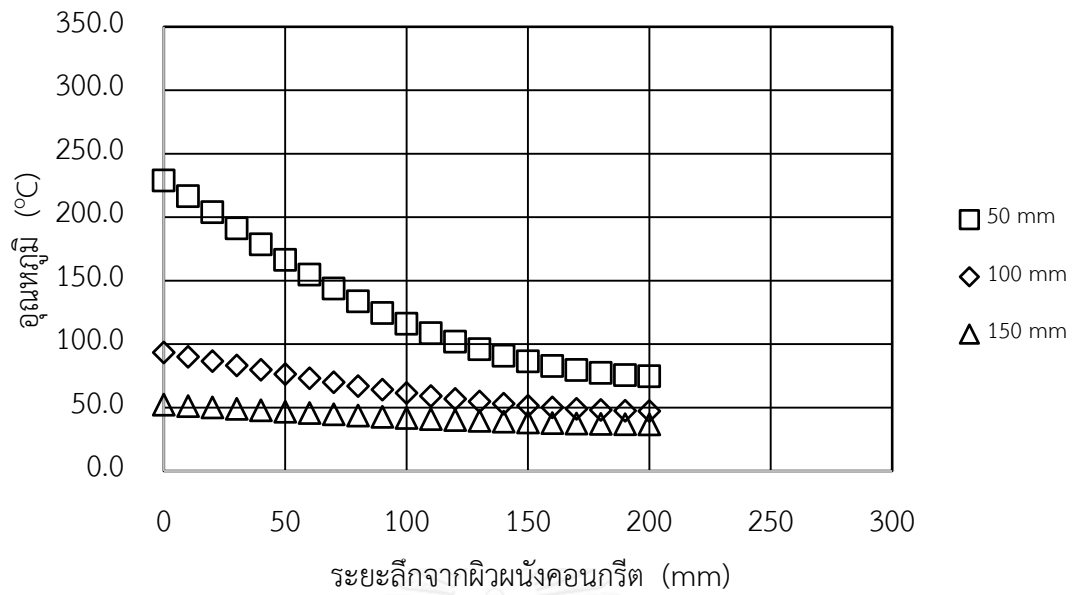




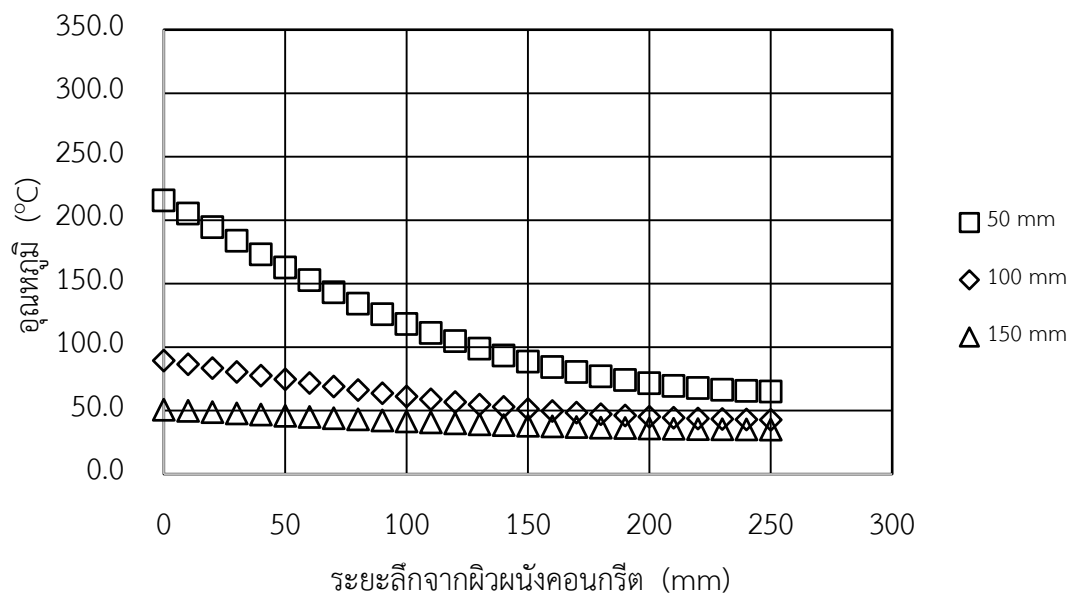
รูปที่ 5.9 การกระจายค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินตามระยะคอนกรีตหุ้ม  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



รูปที่ 5.10 การกระจายค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินตามระยะคอนกรีตหุ้ม  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm

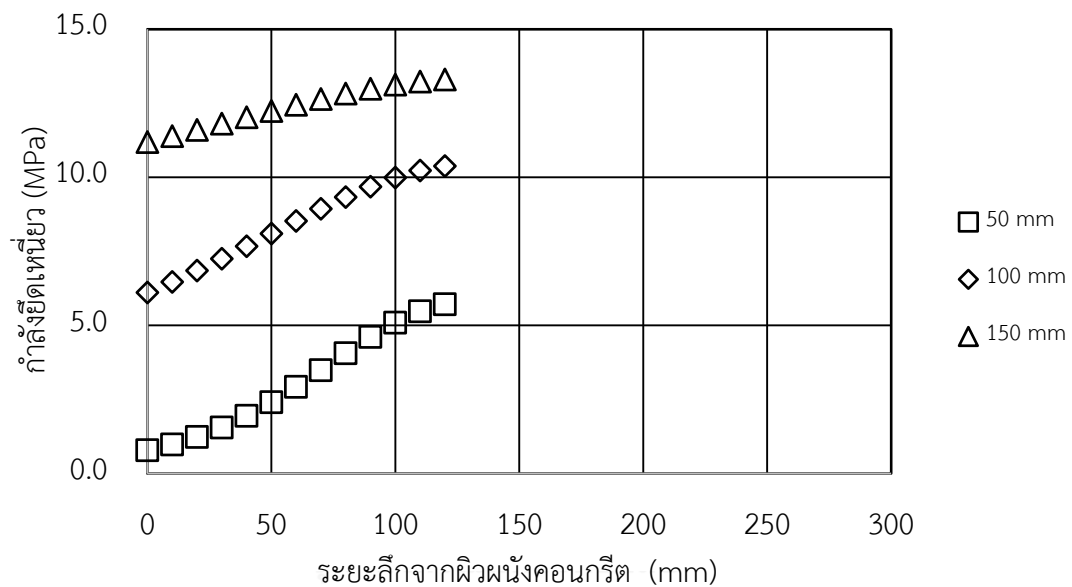


รูปที่ 5.11 การกระจายค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินตามระยะคอนกรีตหุ้ม  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm

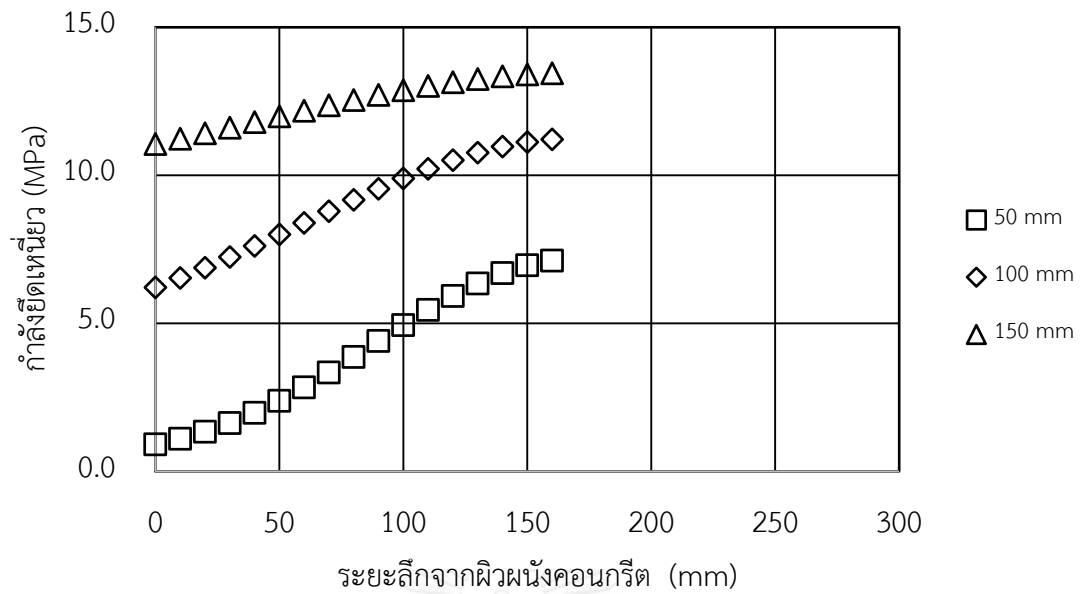


รูปที่ 5.12 การกระจายค่าอุณหภูมิของอีพอกซีเรซินตามระยะคอนกรีตหุ้ม  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

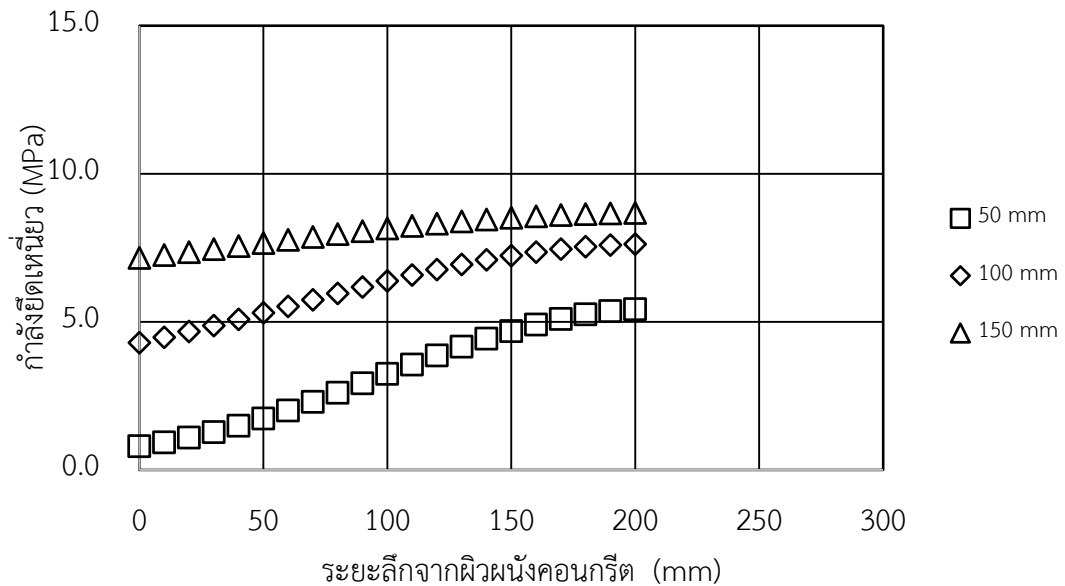
รูปที่ 5.13 – 5.16 แสดงค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม โดยใช้ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินจากรูปที่ 5.9 – 5.12 จากรูปดังกล่าว พบว่าระยะคอนกรีตหุ้มที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและมีค่าสุดที่บริเวณผิวของผนังคอนกรีต นอกจากนี้ เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่ามีอัตราการลดค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่บริเวณผิวผนังคอนกรีตสูงกว่า (กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ระยะคอนกรีตหุ้ม 100 mm เหลือ 49.2% 50.0% 34.7% และ 29.8% สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm 16 mm 20 mm และ 25 mm ตามลำดับ)



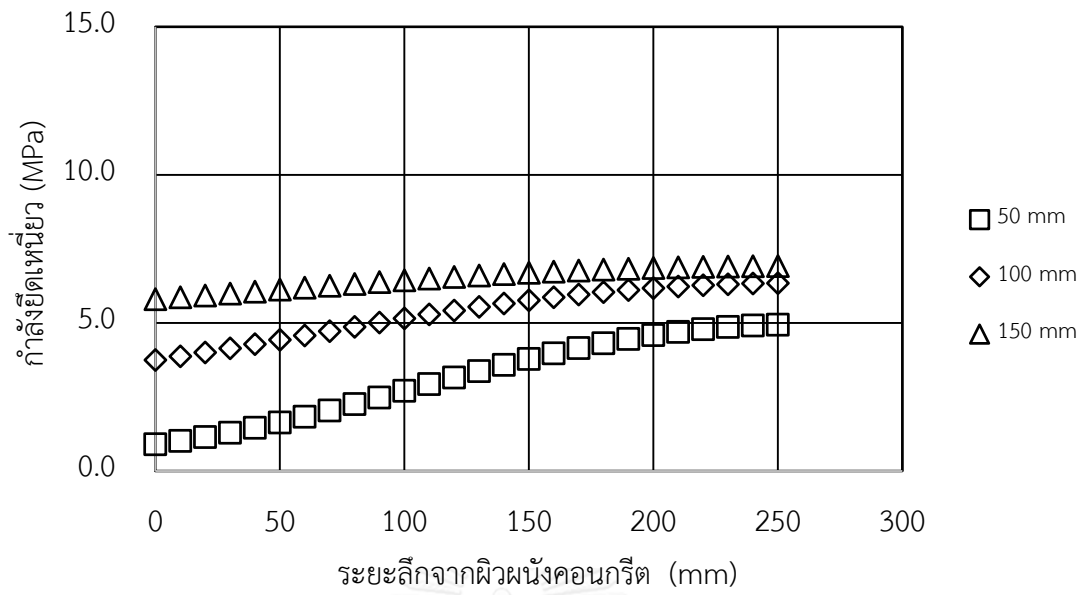
รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะคอนกรีตหุ้มที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm



รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะคอนกรีตหุ้มที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm



รูปที่ 5.15 การเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะคอนกรีตหุ้มที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm



รูปที่ 5.16 การเปรียบเทียบกำลังอัดเหนียวของอิพอกซีเรซินที่คำนวณโดยวิธีการที่นำเสนอ สำหรับระยะคอนกรีตหุ้มที่แตกต่างกัน สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

**ตารางที่ 5.1** ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
12	50	0	83.5	151.1	207.5	252.7	290.6	323.1
		10	78.0	140.0	193.0	236.1	272.5	303.9
		20	72.3	128.7	178.1	219.0	253.8	284.2
		30	66.7	117.5	163.2	201.8	235.1	264.3
		40	61.4	107.0	148.9	185.1	216.8	244.8
		50	56.5	97.4	135.5	169.3	199.2	226.1
		60	52.2	88.8	123.4	154.6	182.9	208.6
		70	48.5	81.3	112.8	141.6	168.1	192.5
		80	45.5	75.0	103.8	130.3	155.1	178.3
		90	43.1	69.7	96.4	120.8	144.0	166.0
		100	41.3	65.6	90.5	113.4	135.2	156.1
		110	40.1	62.6	86.2	108.0	128.7	148.7
	120	39.4	60.9	83.7	104.8	124.8	144.3	
	100	0	36.6	55.7	77.6	99.8	122.5	144.7
		10	36.0	53.8	74.6	95.6	117.0	138.0
		20	35.5	52.0	71.6	91.3	111.4	131.2
		30	34.9	50.1	68.5	87.0	105.8	124.5
		40	34.4	48.2	65.4	82.8	100.4	117.9
		50	33.9	46.4	62.4	78.8	95.2	111.6
		60	33.4	44.7	59.6	75.0	90.4	105.7
		70	33.0	43.1	57.0	71.5	85.9	100.3
		80	32.7	41.7	54.6	68.3	82.0	95.5
		90	32.4	40.5	52.6	65.5	78.5	91.3
		100	32.2	39.6	50.9	63.2	75.6	87.9

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
12	100	110	32.0	38.9	49.6	61.4	73.4	85.3
		120	32.0	38.5	48.9	60.3	72.1	83.7
	150	0	31.4	35.7	44.3	54.7	65.6	76.4
		10	31.4	35.4	43.5	53.4	63.9	74.2
		20	31.3	35.0	42.6	52.1	62.1	72.0
		30	31.3	34.7	41.8	50.7	60.2	69.8
		40	31.3	34.3	40.9	49.4	58.4	67.6
		50	31.2	34.0	40.1	48.0	56.7	65.4
		60	31.2	33.7	39.4	46.8	55.0	63.4
		70	31.2	33.4	38.6	45.6	53.4	61.4
		80	31.1	33.1	38.0	44.6	52.0	59.7
		90	31.1	32.9	37.4	43.6	50.7	58.1
		100	31.1	32.7	36.9	42.8	49.6	56.7
		110	31.1	32.6	36.6	42.2	48.8	55.7
		120	31.1	32.5	36.4	41.9	48.3	55.0

**ตารางที่ 5.2** ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
16	50	0	78.7	142.9	197.0	240.7	277.3	308.8
		10	74.1	133.7	184.7	226.4	261.7	292.1
		20	69.5	124.2	172.1	211.7	245.5	274.9
		30	64.8	114.8	159.4	197.0	229.3	257.5
		40	60.4	105.8	147.1	182.5	213.3	240.4
		50	56.2	97.4	135.4	168.6	197.8	223.7
		60	52.5	89.7	124.5	155.5	183.0	207.7
		70	49.2	82.7	114.6	143.3	169.2	192.7
		80	46.3	76.5	105.8	132.3	156.5	178.7
		90	43.8	71.0	97.9	122.5	145.1	166.1
		100	41.8	66.2	91.1	113.9	135.0	154.8
		110	40.1	62.1	85.2	106.5	126.3	144.8
		120	38.8	58.7	80.2	100.3	118.8	136.4
		130	37.7	56.0	76.2	95.2	112.8	129.4
		140	37.0	53.9	73.0	91.1	108.0	123.9
		150	36.5	52.5	70.7	88.2	104.5	119.9
	160	36.2	51.6	69.4	86.5	102.5	117.6	
	100	0	36.0	53.9	75.0	96.7	118.8	140.3
		10	35.5	52.3	72.4	93.0	113.8	134.3
		20	35.1	50.7	69.7	89.1	108.9	128.3
		30	34.6	49.0	66.9	85.3	103.9	122.3
		40	34.1	47.4	64.2	81.5	99.0	116.3
		50	33.7	45.8	61.5	77.8	94.2	110.5
		60	33.3	44.2	58.9	74.2	89.6	105.0



ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
16	100	70	33.0	42.8	56.4	70.8	85.3	99.8
		80	32.7	41.5	54.1	67.6	81.3	94.9
		90	32.4	40.3	51.9	64.6	77.5	90.4
		100	32.2	39.2	50.0	61.9	74.1	86.3
		110	32.0	38.3	48.3	59.5	71.1	82.7
		120	31.8	37.5	46.8	57.4	68.4	79.5
		130	31.7	36.9	45.5	55.6	66.1	76.8
		140	31.6	36.4	44.6	54.2	64.3	74.6
		150	31.6	36.0	43.9	53.1	63.0	72.9
		160	31.5	35.8	43.4	52.5	62.2	72.0
	150	0	31.4	35.4	43.5	53.5	64.2	74.7
		10	31.3	35.1	42.8	52.4	62.6	72.7
		20	31.3	34.8	42.0	51.1	60.9	70.7
		30	31.3	34.4	41.3	49.9	59.2	68.7
		40	31.2	34.1	40.5	48.7	57.6	66.6
		50	31.2	33.8	39.8	47.5	55.9	64.6
		60	31.2	33.6	39.0	46.3	54.3	62.6
		70	31.1	33.3	38.3	45.2	52.8	60.7
		80	31.1	33.0	37.7	44.1	51.3	58.9
		90	31.1	32.8	37.1	43.1	49.9	57.1
		100	31.1	32.6	36.6	42.2	48.7	55.5
		110	31.1	32.4	36.1	41.3	47.5	54.1
		120	31.1	32.3	35.6	40.6	46.5	52.8
		130	31.1	32.1	35.3	40.0	45.6	51.7
		140	31.0	32.0	35.0	39.5	44.9	50.8
		150	31.0	32.0	34.8	39.1	44.3	50.1

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะเหล็ก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
16	150	160	31.0	31.9	34.7	38.9	44.0	49.7



**ตารางที่ 5.3** ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
20	50	0	73.9	134.6	186.5	228.9	264.5	295.2
		10	70.0	126.7	175.9	216.5	250.8	280.5
		20	66.1	118.7	165.1	203.8	236.8	265.4
		30	62.3	110.8	154.3	191.1	222.7	250.2
		40	58.6	103.1	143.7	178.5	208.7	235.1
		50	55.1	95.9	133.6	166.3	195.0	220.4
		60	51.9	89.1	124.0	154.7	181.9	206.1
		70	49.0	82.9	115.1	143.8	169.4	192.5
		80	46.4	77.2	107.0	133.7	157.8	179.7
		90	44.2	72.0	99.6	124.4	147.0	167.8
		100	42.2	67.4	92.9	116.0	137.2	156.8
		110	40.6	63.3	86.9	108.5	128.4	146.8
		120	39.2	59.8	81.6	101.9	120.5	137.9
		130	38.0	56.7	76.9	96.0	113.5	129.9
		140	37.0	54.0	72.9	90.8	107.5	123.0
		150	36.2	51.8	69.4	86.4	102.2	117.0
		160	35.6	49.9	66.5	82.6	97.8	112.0
		170	35.1	48.5	64.2	79.6	94.1	107.8
		180	34.8	47.3	62.4	77.2	91.3	104.5
		190	34.5	46.6	61.1	75.5	89.3	102.2
	200	34.4	46.2	60.4	74.6	88.1	100.9	
	100	0	35.4	52.0	72.3	93.4	114.7	135.6
		10	35.0	50.6	70.0	90.0	110.3	130.3
		20	34.6	49.2	67.6	86.6	105.9	124.9

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอ็อกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)						
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)	
20	100	30	34.2	47.8	65.2	83.2	101.4	119.5	
		40	33.9	46.4	62.7	79.8	97.0	114.1	
		50	33.5	45.0	60.3	76.4	92.7	108.9	
		60	33.2	43.6	58.0	73.1	88.5	103.8	
		70	32.9	42.4	55.7	70.0	84.5	99.0	
		80	32.6	41.2	53.6	67.0	80.7	94.4	
		90	32.4	40.1	51.5	64.1	77.1	90.0	
		100	32.1	39.1	49.7	61.5	73.7	86.0	
		110	32.0	38.2	48.0	59.1	70.6	82.2	
		120	31.8	37.4	46.4	56.8	67.7	78.8	
		130	31.7	36.7	45.0	54.8	65.1	75.6	
		140	31.6	36.1	43.8	53.0	62.8	72.8	
		150	31.5	35.6	42.8	51.4	60.8	70.4	
		160	31.4	35.1	41.9	50.1	59.0	68.2	
		170	31.4	34.8	41.2	49.0	57.6	66.4	
		180	31.3	34.5	40.6	48.1	56.4	65.0	
		190	31.3	34.4	40.2	47.5	55.6	64.0	
		200	31.3	34.3	40.0	47.2	55.1	63.4	
		150	0	31.3	35.0	42.6	52.3	62.6	72.9
			10	31.3	34.7	42.0	51.2	61.1	71.1
			20	31.3	34.4	41.3	50.1	59.6	69.2
			30	31.2	34.2	40.6	49.0	58.1	67.3
			40	31.2	33.9	40.0	47.9	56.6	65.5
			50	31.2	33.7	39.3	46.8	55.1	63.6
			60	31.2	33.5	38.7	45.7	53.4	61.3
			70	31.1	33.2	38.0	44.7	52.1	59.9

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะเหล็ก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
20	150	80	31.1	32.9	37.4	43.7	50.8	58.2
		90	31.1	32.7	36.9	42.7	49.4	56.5
		100	31.1	32.5	36.4	41.8	48.2	54.9
		110	31.1	32.4	35.9	41.0	47.0	53.4
		120	31.1	32.2	35.4	40.2	45.9	52.0
		130	31.0	32.1	35.0	39.5	44.9	50.7
		140	31.0	32.0	34.7	38.9	44.0	49.6
		150	31.0	31.9	34.4	38.3	43.2	48.5
		160	31.0	31.8	34.1	37.8	42.5	47.6
		170	31.0	31.7	33.9	37.5	41.9	46.9
		180	31.0	31.7	33.7	37.1	41.4	46.3
		190	31.0	31.6	33.6	36.9	41.1	45.8
		200	31.0	31.6	33.6	36.8	40.9	45.6

**ตารางที่ 5.4** ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	50	0	68.4	125.0	174.6	215.6	250.3	280.2
		10	65.3	118.6	165.8	205.1	238.6	267.5
		20	62.2	112.1	156.8	194.5	226.7	254.6
		30	59.1	105.6	147.8	183.7	214.7	241.6
		40	56.1	99.2	138.9	173.1	202.7	228.7
		50	53.2	93.1	130.3	162.7	191.0	215.9
		60	50.6	87.4	122.1	152.7	179.6	203.5
		70	48.1	82.0	114.4	143.1	168.7	191.5
		80	46.0	77.0	107.2	134.2	158.4	180.2
		90	44.0	72.4	100.6	125.9	148.7	169.4
		100	42.3	68.2	94.5	118.2	139.7	159.3
		110	40.8	64.4	88.8	111.1	131.3	149.9
		120	39.5	61.0	83.7	104.6	123.7	141.3
		130	38.3	57.9	79.1	98.7	116.7	133.4
		140	37.4	55.2	74.9	93.4	110.4	126.2
		150	36.5	52.8	71.1	88.5	104.7	119.7
		160	35.8	50.7	67.8	84.2	99.6	113.9
		170	35.2	48.8	64.8	80.4	95.0	108.6
		180	34.7	47.2	62.2	77.0	90.9	104.0
		190	34.2	45.9	60.0	74.0	87.4	99.9
200	33.9	44.7	58.1	71.5	84.3	96.4		
210	33.6	43.8	56.6	69.4	81.8	93.5		
220	33.4	43.0	55.3	67.7	79.7	91.1		
230	33.2	42.5	54.3	66.4	78.0	89.2		

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะเหล็ก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอ็อกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	50	240	33.1	42.1	53.7	65.4	76.9	87.9
		250	33.1	41.9	53.3	64.9	76.3	87.1
	100	0	34.7	49.8	69.2	89.4	109.9	130.0
		10	34.4	48.7	67.1	86.5	106.1	125.3
		20	34.1	47.5	65.1	83.5	102.2	120.6
		30	33.8	46.3	63.0	80.5	98.3	115.9
		40	33.5	45.1	60.9	77.5	94.5	111.3
		50	33.2	44.0	58.8	74.6	90.7	106.6
		60	33.0	42.8	56.8	71.7	87.0	102.1
		70	32.7	41.8	54.8	68.9	83.4	97.8
		80	32.5	40.7	52.9	66.2	79.9	93.6
		90	32.3	39.8	51.1	63.6	76.6	89.6
		100	32.1	38.9	49.4	61.2	73.5	85.8
		110	31.9	38.1	47.8	58.9	70.5	82.2
		120	31.8	37.3	46.4	56.8	67.7	78.8
		130	31.7	36.6	45.0	54.8	65.1	75.7
		140	31.6	36.1	43.8	52.9	62.7	72.8
		150	31.5	35.5	42.7	51.2	60.5	70.1
		160	31.4	35.1	41.7	49.7	58.5	67.6
		170	31.4	34.6	40.8	48.4	56.7	65.4
		180	31.3	34.3	40.0	47.2	55.1	63.4
		190	31.3	34.0	39.3	46.1	53.7	61.6
		200	31.2	33.7	38.8	45.2	52.4	60.1
210	31.2	33.5	38.3	44.4	51.4	58.8		
220	31.2	33.4	37.9	43.8	50.5	57.7		
230	31.2	33.2	37.6	43.3	49.9	56.8		

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	100	240	31.2	33.2	37.4	43.0	49.4	56.2
		250	31.2	33.1	37.3	42.8	49.1	55.9
	150	0	31.3	34.5	41.6	50.7	60.6	70.7
		10	31.2	34.3	41.0	49.8	59.3	69.0
		20	31.2	34.1	40.5	48.8	58.0	67.4
		30	31.2	33.9	39.9	47.8	56.7	65.7
		40	31.2	33.6	39.3	46.9	55.3	64.0
		50	31.2	33.4	38.7	45.9	54.0	62.3
		60	31.1	33.2	38.2	45.0	52.7	60.7
		70	31.1	33.0	37.6	44.1	51.4	59.0
		80	31.1	32.8	37.1	43.2	50.1	57.4
		90	31.1	32.6	36.6	42.3	48.9	55.9
		100	31.1	32.5	36.2	41.5	47.7	54.4
		110	31.1	32.3	35.7	40.7	46.6	53.0
		120	31.1	32.2	35.3	40.0	45.5	51.6
		130	31.0	32.0	34.9	39.3	44.5	50.3
		140	31.0	31.9	34.6	38.6	43.6	49.1
		150	31.0	31.8	34.3	38.1	42.8	48.0
		160	31.0	31.7	34.0	37.5	42.0	47.0
		170	31.0	31.7	33.7	37.1	41.3	46.0
		180	31.0	31.6	33.5	36.6	40.6	45.2
		190	31.0	31.5	33.3	36.3	40.1	44.4
		200	31.0	31.5	33.1	35.9	39.6	43.8
210	31.0	31.4	33.0	35.7	39.2	43.2		
220	31.0	31.4	32.9	35.5	38.8	42.7		
230	31.0	31.4	32.8	35.3	38.6	42.4		



ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	150	240	31.0	31.4	32.8	35.2	38.4	42.1
		250	31.0	31.4	32.7	35.1	38.3	42.0



**ตารางที่ 5.5** ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
12	50	0-10	7.6	3.1	1.4	0.8	0.5	0.3
		10-20	8.2	3.6	1.7	1.0	0.6	0.4
		20-30	8.8	4.1	2.1	1.2	0.8	0.5
		30-40	9.5	4.8	2.6	1.6	1.0	0.7
		40-50	10.2	5.5	3.2	1.9	1.3	0.9
		50-60	10.9	6.3	3.8	2.4	1.6	1.1
		60-70	11.6	7.1	4.5	2.9	2.0	1.4
		70-80	12.2	7.8	5.1	3.5	2.4	1.8
		80-90	12.7	8.5	5.8	4.1	2.9	2.1
		90-100	13.1	9.2	6.4	4.6	3.4	2.5
		100-110	13.4	9.7	6.9	5.1	3.8	2.9
		110-120	13.6	10.1	7.3	5.5	4.1	3.2
		รวม	120.2	73.1	46.8	31.9	22.6	16.4
	100	0-10	14.3	11.1	8.2	6.1	4.5	3.3
		10-20	14.4	11.3	8.6	6.5	4.9	3.7
		20-30	14.5	11.6	8.9	6.9	5.2	4.0
		30-40	14.6	11.9	9.3	7.3	5.6	4.4
		40-50	14.7	12.2	9.7	7.7	6.1	4.8
		50-60	14.8	12.5	10.1	8.1	6.5	5.2
		60-70	14.9	12.8	10.5	8.5	6.9	5.6
		70-80	15.0	13.1	10.9	8.9	7.4	6.1
		80-90	15.1	13.3	11.2	9.3	7.8	6.5
		90-100	15.1	13.5	11.5	9.7	8.1	6.8
100-110	15.1	13.7	11.8	10.0	8.5	7.2		

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
12	100	110-120	15.2	13.9	12.1	10.4	8.9	7.6
		รวม	161.4	137.3	111.7	90.4	73.1	59.4
	150	0-10	15.3	14.4	12.9	11.2	9.7	8.4
		10-20	15.3	14.5	13.0	11.4	9.9	8.6
		20-30	15.3	14.6	13.2	11.6	10.1	8.9
		30-40	15.3	14.6	13.3	11.8	10.4	9.1
		40-50	15.3	14.7	13.5	12.0	10.6	9.4
		50-60	15.3	14.8	13.6	12.2	10.9	9.7
		60-70	15.4	14.8	13.8	12.5	11.2	10.0
		70-80	15.4	14.9	13.9	12.6	11.4	10.2
		80-90	15.4	15.0	14.0	12.8	11.6	10.5
		90-100	15.4	15.0	14.1	13.0	11.8	10.7
		100-110	15.4	15.0	14.2	13.1	12.0	10.9
		110-120	15.4	15.1	14.3	13.2	12.1	11.0
		รวม	167.2	161.2	148.8	134.2	119.8	106.9

ตารางที่ 5.6 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)						
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)	
16	50	0-10	7.9	3.4	1.6	0.9	0.6	0.4	
		10-20	8.4	3.8	1.9	1.1	0.7	0.5	
		20-30	8.9	4.3	2.3	1.3	0.9	0.6	
		30-40	9.5	4.9	2.7	1.6	1.1	0.7	
		40-50	10.1	5.5	3.2	2.0	1.3	0.9	
		50-60	10.7	6.2	3.7	2.4	1.6	1.1	
		60-70	11.2	6.8	4.3	2.8	2.0	1.4	
		70-80	11.7	7.5	4.9	3.3	2.4	1.7	
		80-90	12.2	8.1	5.5	3.9	2.8	2.1	
		90-100	12.6	8.8	6.1	4.4	3.3	2.5	
		100-110	12.9	9.3	6.7	4.9	3.7	2.9	
		110-120	13.2	9.9	7.2	5.5	4.2	3.3	
		120-130	13.5	10.3	7.7	5.9	4.6	3.7	
		130-140	13.7	10.7	8.2	6.3	5.0	4.0	
	140-150	13.8	11.0	8.5	6.7	5.3	4.3		
	150-160	13.9	11.2	8.8	7.0	5.6	4.6		
	รวม			231.0	195.6	172.7	157.7	147.4	139.8
	100	100	0-10	14.0	11.0	8.3	6.2	4.6	3.5
			10-20	14.1	11.2	8.6	6.5	4.9	3.8
			20-30	14.2	11.5	8.9	6.9	5.3	4.1
			30-40	14.2	11.7	9.2	7.2	5.6	4.4
			40-50	14.3	12.0	9.6	7.6	6.0	4.8
			50-60	14.4	12.3	9.9	8.0	6.4	5.2
60-70			14.5	12.5	10.3	8.4	6.8	5.6	

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
16	100	70-80	14.6	12.8	10.6	8.8	7.2	6.0
		80-90	14.6	13.0	11.0	9.2	7.6	6.4
		90-100	14.7	13.2	11.3	9.5	8.0	6.8
		100-110	14.7	13.4	11.6	9.9	8.4	7.1
		110-120	14.7	13.6	11.9	10.2	8.8	7.5
		120-130	14.8	13.7	12.1	10.5	9.1	7.8
		130-140	14.8	13.8	12.3	10.8	9.3	8.1
		140-150	14.8	13.9	12.5	11.0	9.6	8.4
		150-160	14.8	14.0	12.6	11.1	9.8	8.5
		รวม	240.5	109.4	92.2	76.9	64.1	53.5
	150	0-10	14.9	14.1	12.6	11.1	9.6	8.3
		10-20	14.9	14.2	12.8	11.2	9.8	8.6
		20-30	14.9	14.2	12.9	11.4	10.0	8.8
		30-40	14.9	14.3	13.0	11.6	10.2	9.0
		40-50	14.9	14.3	13.2	11.8	10.5	9.3
		50-60	14.9	14.4	13.3	12.0	10.7	9.5
		60-70	14.9	14.4	13.4	12.2	10.9	9.8
		70-80	14.9	14.5	13.5	12.4	11.2	10.1
		80-90	14.9	14.5	13.7	12.5	11.4	10.3
		90-100	14.9	14.6	13.8	12.7	11.6	10.5
		100-110	14.9	14.6	13.9	12.9	11.8	10.8
		110-120	14.9	14.7	14.0	13.0	12.0	11.0
		120-130	14.9	14.7	14.0	13.1	12.2	11.2
		130-140	14.9	14.7	14.1	13.3	12.3	11.3
		140-150	14.9	14.7	14.2	13.3	12.4	11.5
		150-160	14.9	14.7	14.2	13.4	12.5	11.6

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
16	150	รวม	127.4	123.9	116.0	106.3	96.3	87.1



ตารางที่ 5.7 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
20	50	0-10	5.5	2.6	1.3	0.8	0.5	0.3
		10-20	5.7	2.8	1.5	0.9	0.6	0.4
		20-30	6.0	3.1	1.8	1.1	0.7	0.5
		30-40	6.3	3.5	2.0	1.3	0.9	0.6
		40-50	6.6	3.8	2.3	1.5	1.0	0.7
		50-60	6.9	4.2	2.6	1.7	1.2	0.9
		60-70	7.2	4.5	2.9	2.0	1.4	1.1
		70-80	7.5	4.9	3.3	2.3	1.7	1.3
		80-90	7.7	5.3	3.6	2.6	1.9	1.5
		90-100	7.9	5.6	4.0	2.9	2.2	1.7
		100-110	8.1	5.9	4.3	3.2	2.5	2.0
		110-120	8.3	6.2	4.7	3.6	2.8	2.2
		120-130	8.4	6.5	5.0	3.9	3.1	2.5
		130-140	8.5	6.8	5.3	4.2	3.3	2.7
		140-150	8.7	7.0	5.5	4.4	3.6	3.0
		150-160	8.7	7.2	5.8	4.7	3.8	3.2
		160-170	8.8	7.4	6.0	4.9	4.1	3.4
		170-180	8.9	7.5	6.2	5.1	4.3	3.6
		180-190	8.9	7.6	6.3	5.2	4.4	3.7
	190-200	8.9	7.7	6.4	5.4	4.5	3.8	
		รวม		102.1	74.0	54.8	42.1	33.4
	100	0-10	8.8	7.2	5.6	4.3	3.3	2.5
		10-20	8.9	7.3	5.7	4.5	3.5	2.7
		20-30	8.9	7.4	5.9	4.7	3.7	2.9

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)						
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)	
20	100	30-40	9.0	7.6	6.1	4.9	3.9	3.1	
		40-50	9.0	7.7	6.3	5.1	4.1	3.3	
		50-60	9.0	7.8	6.5	5.3	4.3	3.5	
		60-70	9.1	8.0	6.7	5.5	4.6	3.8	
		70-80	9.1	8.1	6.9	5.7	4.8	4.0	
		80-70	9.1	8.2	7.0	6.0	5.0	4.2	
		90-100	9.2	8.3	7.2	6.2	5.3	4.5	
		100-110	9.2	8.4	7.4	6.4	5.5	4.7	
		110-120	9.2	8.5	7.6	6.6	5.7	4.9	
		120-130	9.2	8.6	7.7	6.8	5.9	5.1	
		130-140	9.2	8.7	7.8	6.9	6.1	5.4	
		140-150	9.3	8.8	8.0	7.1	6.3	5.5	
		150-160	9.3	8.8	8.1	7.2	6.4	5.7	
		160-170	9.3	8.9	8.1	7.4	6.6	5.9	
		170-180	9.3	8.9	8.2	7.5	6.7	6.0	
		180-190	9.3	8.9	8.3	7.5	6.8	6.1	
		190-200	9.3	8.9	8.3	7.6	6.9	6.2	
		รวม			120.6	109.4	95.3	82.1	70.5
		150	0-10	9.3	8.9	8.1	7.2	6.3	5.5
			10-20	9.3	8.9	8.1	7.3	6.4	5.7
			20-30	9.3	8.9	8.2	7.4	6.5	5.8
			30-40	9.3	9.0	8.3	7.5	6.7	5.9
			40-50	9.3	9.0	8.3	7.6	6.8	6.1
			50-60	9.3	9.0	8.4	7.7	6.9	6.2
			60-70	9.3	9.0	8.5	7.8	7.1	6.4
			70-80	9.3	9.1	8.5	7.9	7.2	6.5



ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
20	150	80-90	9.3	9.1	8.6	8.0	7.3	6.6
		90-100	9.3	9.1	8.7	8.1	7.4	6.8
		100-110	9.3	9.1	8.7	8.2	7.5	6.9
		110-120	9.3	9.2	8.8	8.2	7.6	7.1
		120-130	9.3	9.2	8.8	8.3	7.8	7.2
		130-140	9.3	9.2	8.9	8.4	7.8	7.3
		140-150	9.3	9.2	8.9	8.5	7.9	7.4
		150-160	9.3	9.2	8.9	8.5	8.0	7.5
		160-170	9.3	9.2	9.0	8.6	8.1	7.6
		170-180	9.3	9.2	9.0	8.6	8.1	7.7
		180-190	9.3	9.2	9.0	8.6	8.2	7.7
		190-200	9.3	9.3	9.0	8.7	8.2	7.8
		รวม			122.9	120.3	114.2	106.4

**ตารางที่ 5.8** ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตสำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	50	0-10	4.7	2.5	1.4	0.9	0.6	0.4
		10-20	4.9	2.7	1.6	1.0	0.7	0.5
		20-30	5.1	2.9	1.7	1.1	0.8	0.6
		30-40	5.3	3.1	1.9	1.3	0.9	0.7
		40-50	5.5	3.4	2.1	1.5	1.0	0.8
		50-60	5.6	3.6	2.4	1.6	1.2	0.9
		60-70	5.8	3.8	2.6	1.8	1.4	1.0
		70-80	6.0	4.1	2.8	2.0	1.5	1.2
		80-90	6.1	4.3	3.1	2.3	1.7	1.3
		90-100	6.3	4.5	3.3	2.5	1.9	1.5
		100-110	6.4	4.8	3.5	2.7	2.1	1.7
		110-120	6.5	5.0	3.8	2.9	2.3	1.9
		120-130	6.6	5.2	4.0	3.2	2.5	2.1
		130-140	6.7	5.3	4.2	3.4	2.8	2.3
		140-150	6.7	5.5	4.4	3.6	3.0	2.5
		150-160	6.8	5.7	4.6	3.8	3.2	2.7
		160-170	6.9	5.8	4.8	4.0	3.3	2.8
		170-180	6.9	5.9	4.9	4.1	3.5	3.0
		180-190	7.0	6.0	5.1	4.3	3.7	3.2
		190-200	7.0	6.1	5.2	4.5	3.8	3.3
200-210	7.0	6.2	5.3	4.6	4.0	3.5		
210-220	7.0	6.3	5.4	4.7	4.1	3.6		
220-230	7.1	6.3	5.5	4.8	4.2	3.7		
230-240	7.1	6.4	5.6	4.9	4.3	3.8		

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	50	240-250	7.1	6.4	5.6	4.9	4.3	3.8
		รวม	129.7	100.7	79.1	63.8	52.7	44.4
	100	0-10	7.0	5.9	4.7	3.7	3.0	2.4
		10-20	7.0	5.9	4.8	3.9	3.1	2.5
		20-30	7.0	6.0	4.9	4.0	3.2	2.6
		30-40	7.0	6.1	5.1	4.1	3.4	2.8
		40-50	7.0	6.2	5.2	4.3	3.5	2.9
		50-60	7.1	6.3	5.3	4.4	3.7	3.1
		60-70	7.1	6.3	5.4	4.6	3.9	3.2
		70-80	7.1	6.4	5.5	4.7	4.0	3.4
		80-90	7.1	6.5	5.7	4.9	4.2	3.6
		90-100	7.1	6.6	5.8	5.0	4.3	3.7
		100-110	7.2	6.6	5.9	5.2	4.5	3.9
		110-120	7.2	6.7	6.0	5.3	4.6	4.1
		120-130	7.2	6.8	6.1	5.4	4.8	4.2
		130-140	7.2	6.8	6.2	5.5	4.9	4.4
		140-150	7.2	6.8	6.3	5.7	5.1	4.5
		150-160	7.2	6.9	6.4	5.8	5.2	4.7
		160-170	7.2	6.9	6.4	5.9	5.3	4.8
		170-180	7.2	7.0	6.5	6.0	5.4	4.9
180-190	7.2	7.0	6.5	6.0	5.5	5.0		
190-200	7.2	7.0	6.6	6.1	5.6	5.1		
200-210	7.2	7.0	6.6	6.2	5.7	5.2		
210-220	7.2	7.0	6.7	6.2	5.8	5.3		
220-230	7.2	7.1	6.7	6.3	5.8	5.4		
230-240	7.2	7.1	6.7	6.3	5.9	5.4		

ขนาดเหล็กเสริม (mm)	ระยะคอนกรีตหุ้ม (mm)	ระยะลึกจากผิวผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	100	240-250	7.2	7.1	6.8	6.3	5.9	5.5
		รวม	146.1	135.9	122.1	108.5	96.0	84.9
	150	0-10	7.2	7.0	6.4	5.8	5.2	4.6
		10-20	7.2	7.0	6.5	5.9	5.3	4.7
		20-30	7.2	7.0	6.5	5.9	5.3	4.8
		30-40	7.2	7.0	6.6	6.0	5.4	4.9
		40-50	7.2	7.0	6.6	6.1	5.5	5.0
		50-60	7.2	7.1	6.6	6.1	5.6	5.1
		60-70	7.2	7.1	6.7	6.2	5.7	5.2
		70-80	7.2	7.1	6.7	6.3	5.8	5.3
		80-90	7.2	7.1	6.8	6.3	5.8	5.4
		90-100	7.2	7.1	6.8	6.4	5.9	5.5
		100-110	7.2	7.1	6.8	6.4	6.0	5.6
		110-120	7.2	7.1	6.9	6.5	6.1	5.7
		120-130	7.2	7.2	6.9	6.6	6.2	5.7
		130-140	7.2	7.2	6.9	6.6	6.2	5.8
		140-150	7.2	7.2	7.0	6.7	6.3	5.9
		150-160	7.2	7.2	7.0	6.7	6.3	6.0
		160-170	7.2	7.2	7.0	6.7	6.4	6.1
		170-180	7.2	7.2	7.0	6.8	6.5	6.1
180-190	7.2	7.2	7.0	6.8	6.5	6.2		
190-200	7.2	7.2	7.1	6.8	6.5	6.2		
200-210	7.2	7.2	7.1	6.9	6.6	6.3		
210-220	7.2	7.2	7.1	6.9	6.6	6.3		
220-230	7.2	7.2	7.1	6.9	6.6	6.3		
230-240	7.2	7.2	7.1	6.9	6.7	6.4		

ขนาด เหล็ก เสริม (mm)	ระยะ คอนกรีต หุ้ม (mm)	ระยะลึก จากผิว ผนัง (mm)	ความต้านทานการดึงออกตามระยะเวลาการให้ความร้อน (kN)					
			30 (min)	60 (min)	90 (min)	120 (min)	150 (min)	180 (min)
25	150	240-250	7.3	7.2	7.1	6.9	6.7	6.4
		รวม	147.9	145.7	140.2	132.6	124.4	116.1



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น พบว่า ตัวแปรที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซิน ได้แก่ มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น และมอดุลัสเฉือน ที่แปรผันตามอุณหภูมิ โดยตัวแปรดังกล่าวจะเริ่มเสื่อมกำลังลงเมื่ออุณหภูมิของอิพอกซีเรซินสูงถึงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ คล้ายแก้วของอิพอกซีเรซิน ดังนั้น จึงได้พัฒนาแบบจำลองการยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบแบบจำลองดังกล่าวกับผลการทดสอบการดึงออก พบว่า ค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ได้จากแบบจำลองเชิงกลใกล้เคียงกับผลการทดสอบ โดยมีค่าแตกต่างกันสูงสุดไม่เกิน 17% สำหรับเหล็กเสริมทุกขนาดที่พิจารณา นอกจากนี้ แบบจำลองยังแสดงแนวโน้มการลดค่าที่รวดเร็วกว่าของกำลังยึดเหนี่ยวในภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสำหรับเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า ดังนั้น จึงได้ประยุกต์ใช้ผลการทดสอบการดึงออกดังกล่าวสำหรับการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม ควบคู่กับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และตรวจสอบความแม่นยำกับผลการทดสอบขนาดจริง

จากผลการทดสอบขนาดจริง พบว่า ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่วัดได้เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการให้ความร้อนของเหล็กเสริมทุกขนาดที่ได้รับความร้อนเป็นระยะเวลานานกว่าจะมีค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินสูงกว่า โดยที่ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินมีความแตกต่างกันสูงสุดที่บริเวณผิวของผนังคอนกรีต และเหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่ามีแนวโน้มการลดค่ากำลังยึดเหนี่ยวรวดเร็วกว่า

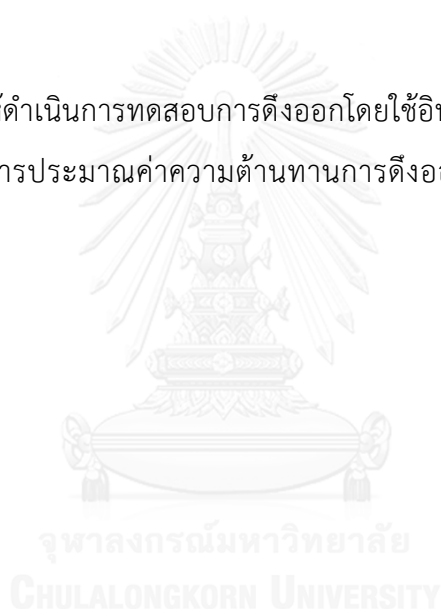
สำหรับการตรวจสอบความแม่นยำโดยการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินจากการทดสอบกับผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อน พบว่า ค่าอุณหภูมิของอิพอกซีเรซินที่ได้จากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนใกล้เคียงกับผลการทดสอบ และที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min มีความแม่นยำสูงกว่าที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min และเมื่อเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากการทดสอบขนาดจริงกับสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริม พบว่า กำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินที่ได้จากสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมใกล้เคียงกับผลการทดสอบ และยังแสดงแนวโน้มการลดค่าที่สอดคล้องกับผลการทดสอบขนาดจริง ยกเว้นสำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm และ 16 mm ที่มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินใกล้เคียงกัน และที่ระยะเวลาการให้ความร้อน

120 min เหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm และ 25 mm มีค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอิพอกซีเรซินใกล้เคียงกัน จึงเป็นการยืนยันความแม่นยำของสมการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

นอกจากนี้ จากการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมในภาวะเพลิงไหม้ พบว่า ระยะเวลาการให้ความร้อนที่นานกว่าจะส่งผลให้อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินสูงขึ้นและทำให้ค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมลดลง และรอยต่อโครงสร้างที่มีระยะคอนกรีตหุ้มของเหล็กเสริมน้อยกว่าจะส่งผลให้อุณหภูมิของอิพอกซีเรซินสูงกว่าและทำให้ค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมลดลงเช่นกัน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยขอเสนอให้ดำเนินการทดสอบการดึงออกโดยใช้อิพอกซีเรซินชนิดอื่น เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของวิธีการประมาณค่าความต้านทานการดึงออกของเหล็กเสริมเมื่อนำไปใช้กับอิพอกซีเรซินชนิดอื่น



### รายการอ้างอิง

- [1] Shaw, J.D.N. A review of resins used in construction. International Journal of Adhesion and Adhesives 2(2) (1982): 77-83.
- [2] Çolak, A., Çoşgun, T., and Bakirci, A.E. Effects of environmental factors on the adhesion and durability characteristics of epoxy-bonded concrete prisms. Construction and Building Materials 23(2) (2009): 758-767.
- [3] Bouazaoui, L. and Li, A. Analysis of steel/concrete interfacial shear stress by means of pull out test. International Journal of Adhesion and Adhesives 28(3) (2008): 101-108.
- [4] Pinoteau, N., Pimienta, P., Guillet, T., Rivillon, P., and Rémond, S. Effect of heating rate on bond failure of rebars into concrete using polymer adhesives to simulate exposure to fire. International Journal of Adhesion and Adhesives 31(8) (2011): 851-861.
- [5] Pinoteau, N., et al. Prediction of failure of a cantilever–wall connection using post-installed rebars under thermal loading. Engineering Structures 56 (2013): 1607-1619.
- [6] Horsangchai, P. and Pothisiri, T. Bond deterioration of epoxy resins between steel rebar and concrete at elevated temperatures. in 28th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering Chulalongkorn University (Bangkok, Thailand), 2015.
- [7] ภูวิศร อ้อแสงชัย. การเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีเรซินยึดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังที่สัมผัสเพลิงไหม้. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558.
- [8] Fire-Resistance Tests—Element of Building Construction. ISO 834-1. International Organization for Standardization, 1999.
- [9] CEN, Eurocode 2: Design of Concrete Structures: Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. EN 1992-1-1. UK: European Committee for Standardization, 2004.



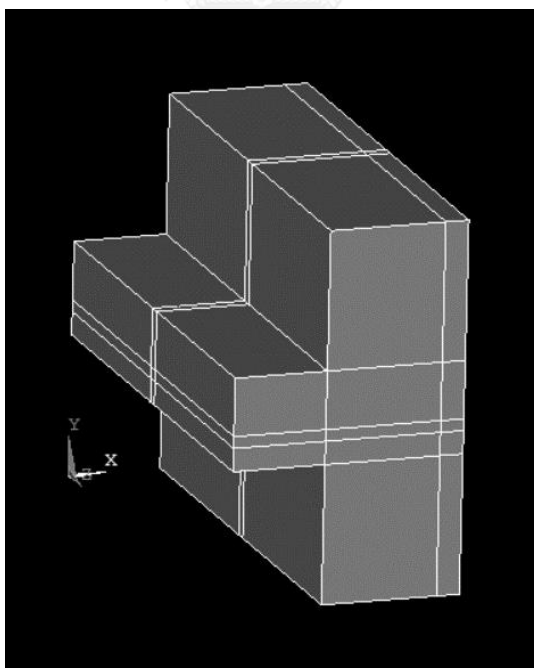
- [10] Jeyranpour, F., Alahyarizadeh, G., and Arab, B. Comparative investigation of thermal and mechanical properties of cross-linked epoxy polymers with different curing agents by molecular dynamics simulation. Journal of Molecular Graphics and Modelling 62 (2015): 157-164.
- [11] ACI, Building Code Requirements for Structural Concrete ACI 318-11. American Concrete Institute, 2011.
- [12] CEN, Eurocode2: Design of concrete structures, Part1.2: General rules-structural fire design. EN 1992-1-2. UK: European Committee for Standardization, 2004.
- [13] CEN, Eurocode3: Design of steel structures, Part1.2: General rules-structural fire design. EN 1993-1-2. UK: European Committee for Standardization, 2005.
- [14] Gao, W., Dai, J.-G., Teng, J., and Chen, G. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire. Engineering structures 52 (2013): 488-501.
- [15] Albrifkani, S. and Wang, Y.C. Explicit modelling of large deflection behaviour of restrained reinforced concrete beams in fire. Engineering Structures 121 (2016): 97-119.
- [16] Xu, Q., Han, C., Wang, Y.C., Li, X., Chen, L., and Liu, Q. Experimental and numerical investigations of fire resistance of continuous high strength steel reinforced concrete T-beams. Fire Safety Journal 78 (2015): 142-154.



## ภาคผนวก ก

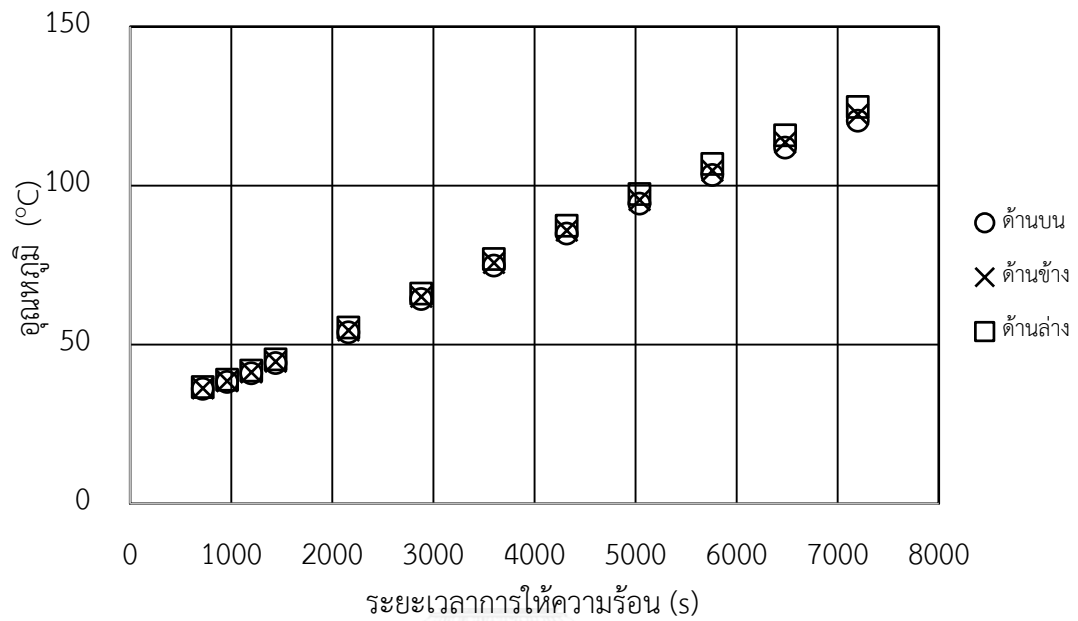
### แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตสำหรับการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบริเวณรอบเหล็กเสริม

แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีตสำหรับการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบริเวณรอบเหล็กเสริม เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิในการทดสอบขนาดจริงในบทที่ 3 โดยการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนจากแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ ก.1 โดยพื้นคอนกรีตมีความกว้าง 1000 mm ความยาว 200 mm และความหนา 200 mm ในขณะที่ผนังคอนกรีตมีความกว้าง 1000 mm ความหนา 300 mm และความสูง 800 mm พื้นคอนกรีตเชื่อมต่อกับผนังที่ความสูง 300 mm ด้วยเหล็กเสริมที่มีความยาว 450 mm โดยที่เหล็กเสริมฝังในพื้นคอนกรีตที่ตำแหน่งกึ่งกลางของความกว้างและที่ระยะ 50 mm จากผิวด้านล่างของพื้น และมีระยะฝังในพื้นคอนกรีต 200 mm และระยะฝังในผนังคอนกรีต 250 mm โดยพิจารณาเลือกใช้ SOLID70 แทนชิ้นส่วนคอนกรีตและเหล็กเสริม



รูปที่ ก.1 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างพื้นและผนังคอนกรีต สำหรับการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบริเวณด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างของเหล็กเสริม

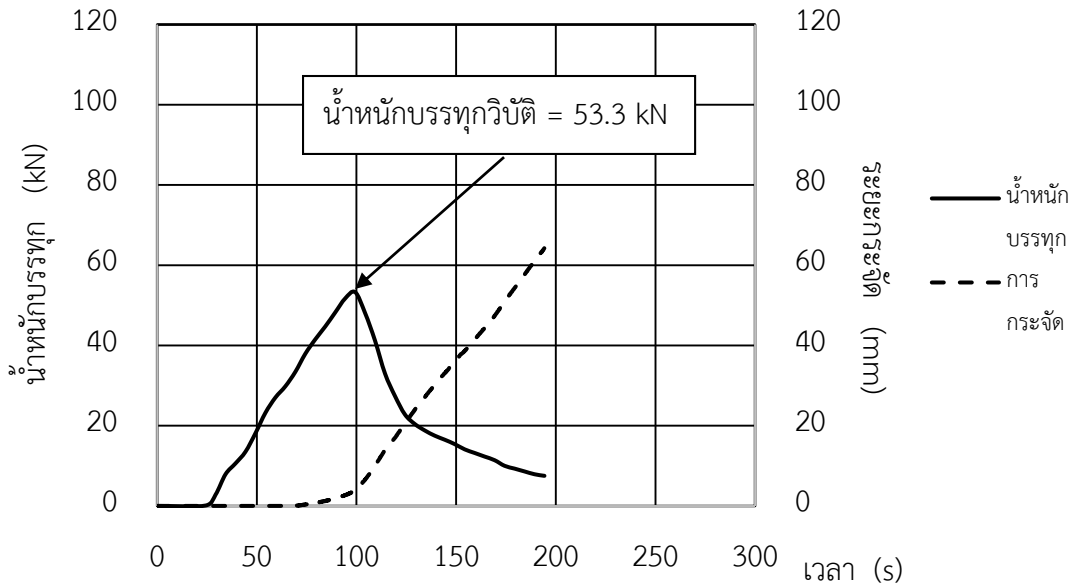
รูปที่ ก.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบริเวณด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างของเหล็กเสริมที่บริเวณผิวรอยต่อของโครงสร้าง โดยพิจารณาตามแต่ละระยะเวลาการให้ความร้อน พบว่า ความแตกต่างสูงสุดมีเพียง 2 % เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่บริเวณด้านบนและด้านล่างเปรียบเทียบกับบริเวณด้านข้างของเหล็กเสริมที่เป็นตำแหน่งการติดตั้งจริงในการทดสอบขนาดจริง



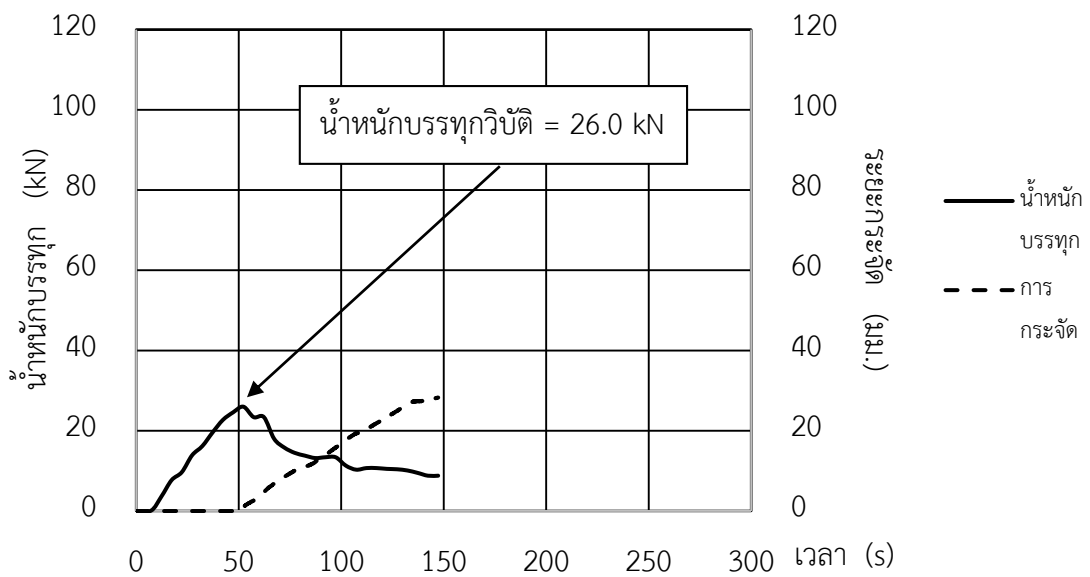
รูปที่ ก.2 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิบริเวณด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างของเหล็กเสริม

### ภาคผนวก ข

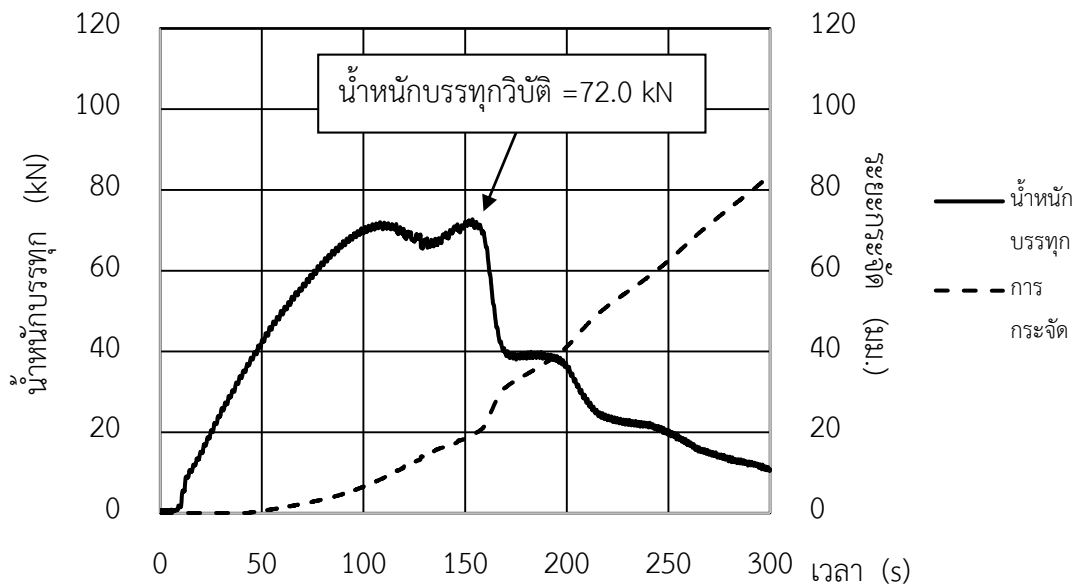
การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง



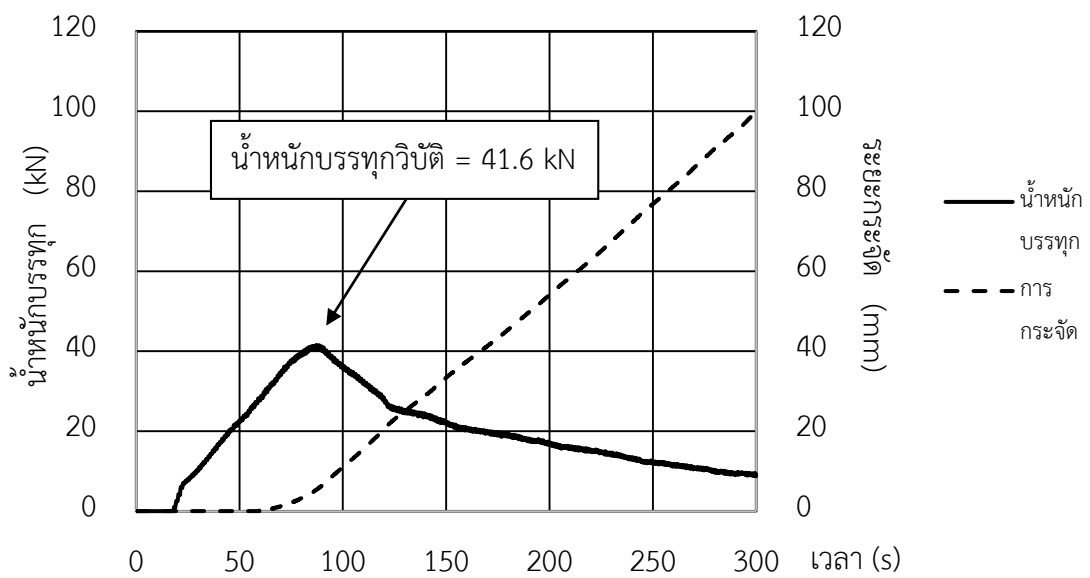
รูปที่ ข.1 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 60 min



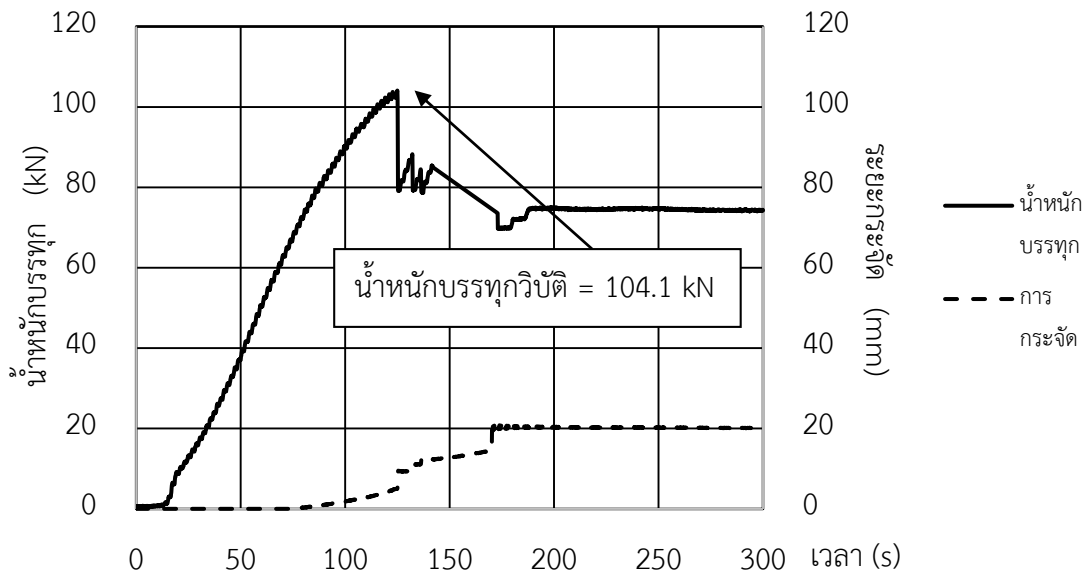
รูปที่ ข.2 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 120 min



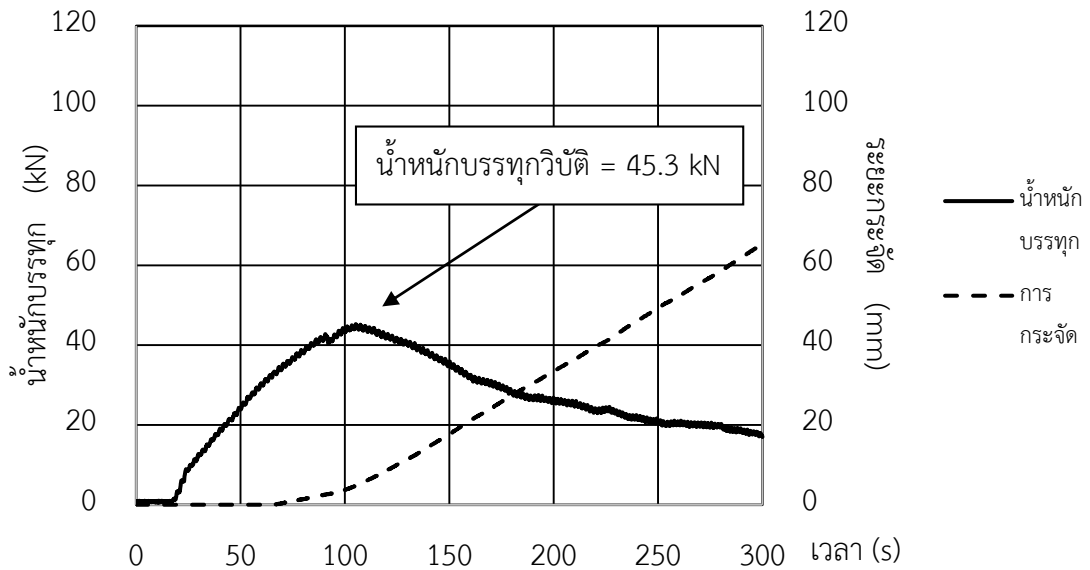
รูปที่ ข.3 การเปรียบเทียบค่าน้ำหน้กบรทุกและค่าการ๒๒๒จากผลการทดสอบขนาดจ้ริง  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm ให้ความร้อ๒๒๒เวลา 60 min



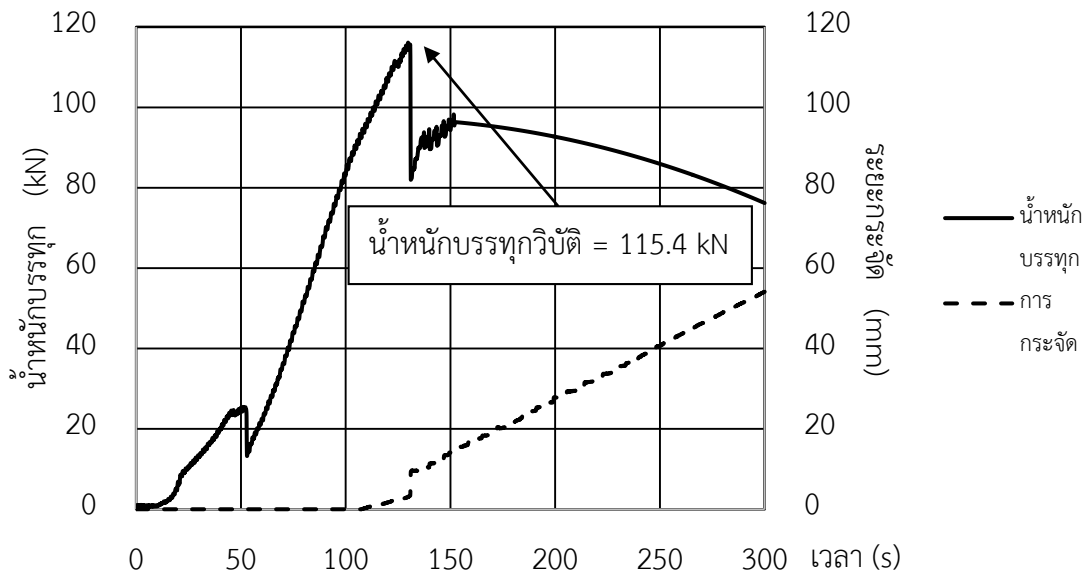
รูปที่ ข.4 การเปรียบเทียบค่าน้ำหน้กบรทุกและค่าการ๒๒๒จากผลการทดสอบขนาดจ้ริง  
สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 mm ให้ความร้อ๒๒๒เวลา 120 min



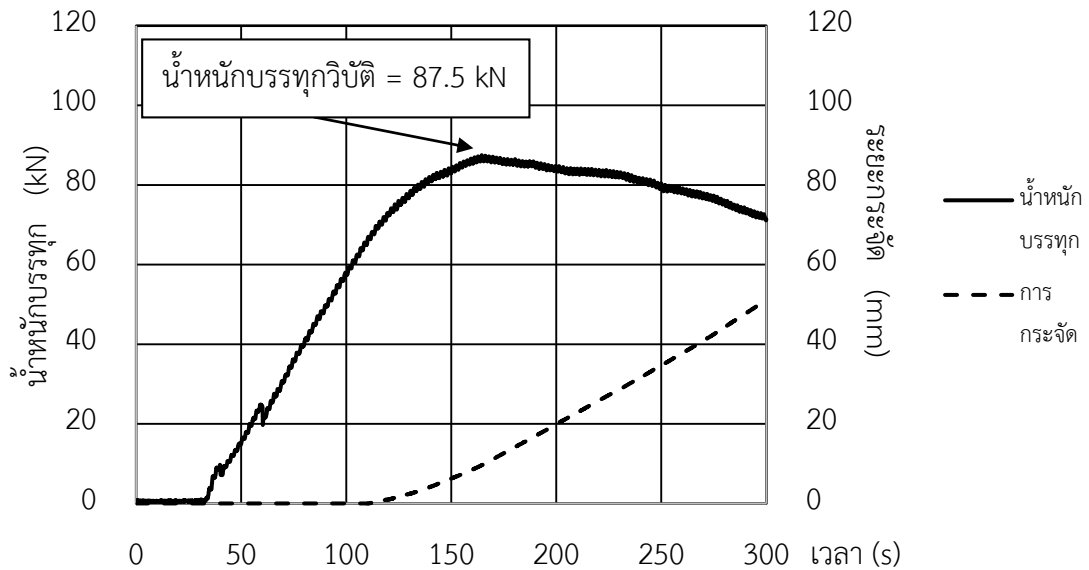
รูปที่ ข.5 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 60 min



รูปที่ ข.6 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 120 min



รูปที่ ข.7 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 60 min

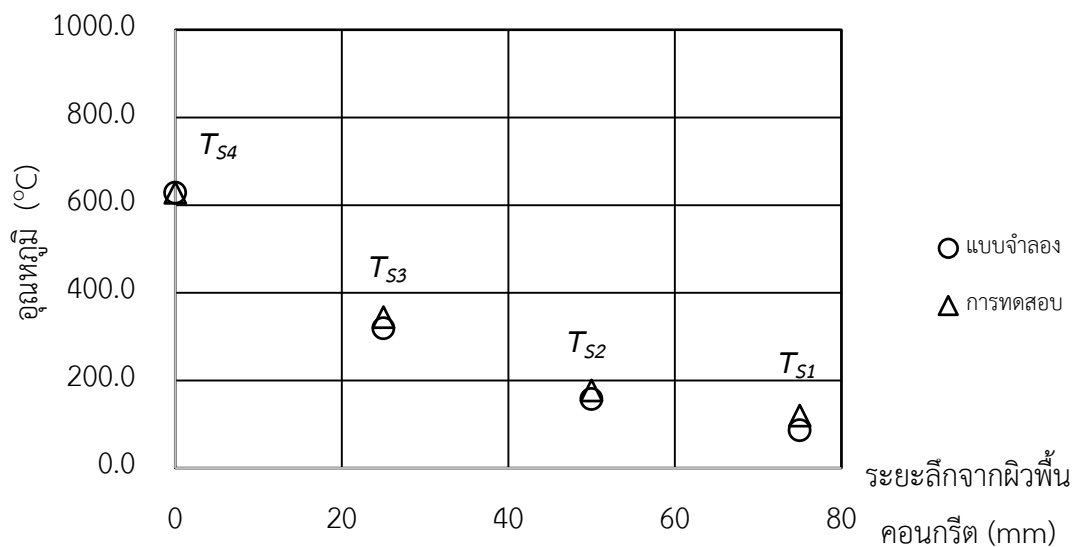


รูปที่ ข.8 การเปรียบเทียบค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการกระจัดจากผลการทดสอบขนาดจริง สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 mm ให้ความร้อนระยะเวลา 120 min

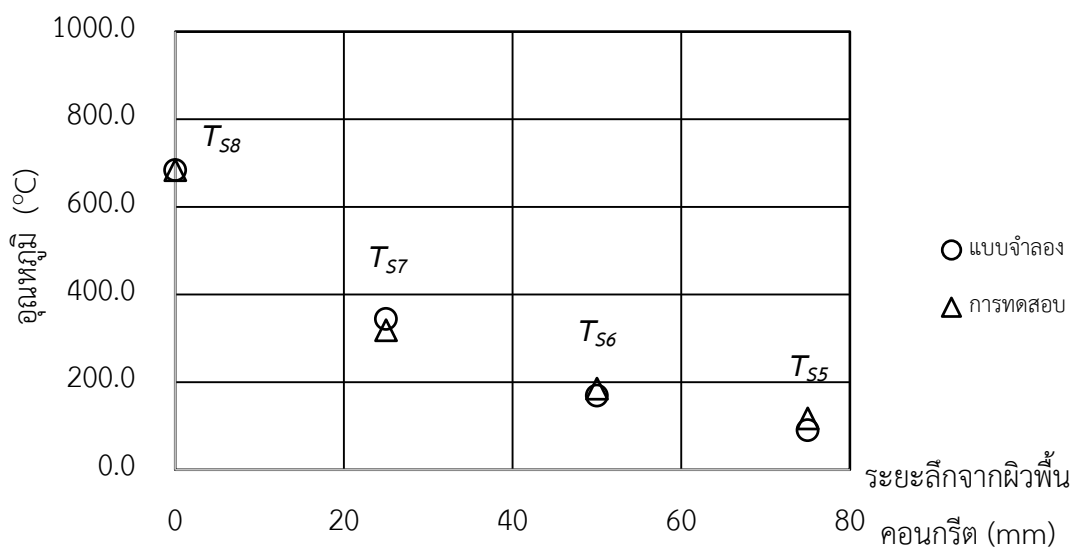


## ภาคผนวก ค

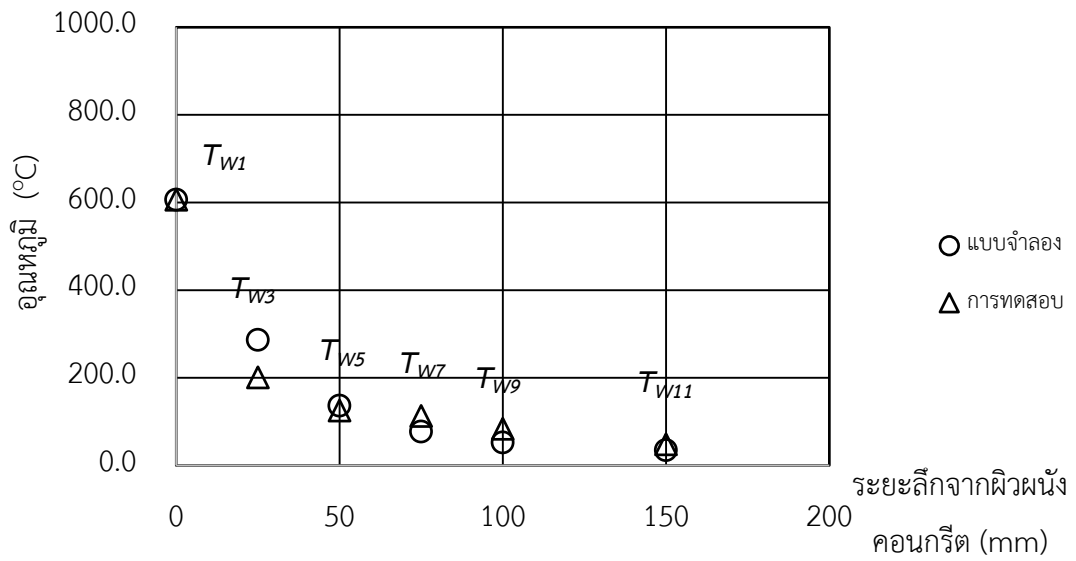
การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างจากการทดสอบขนาดจริงและแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน



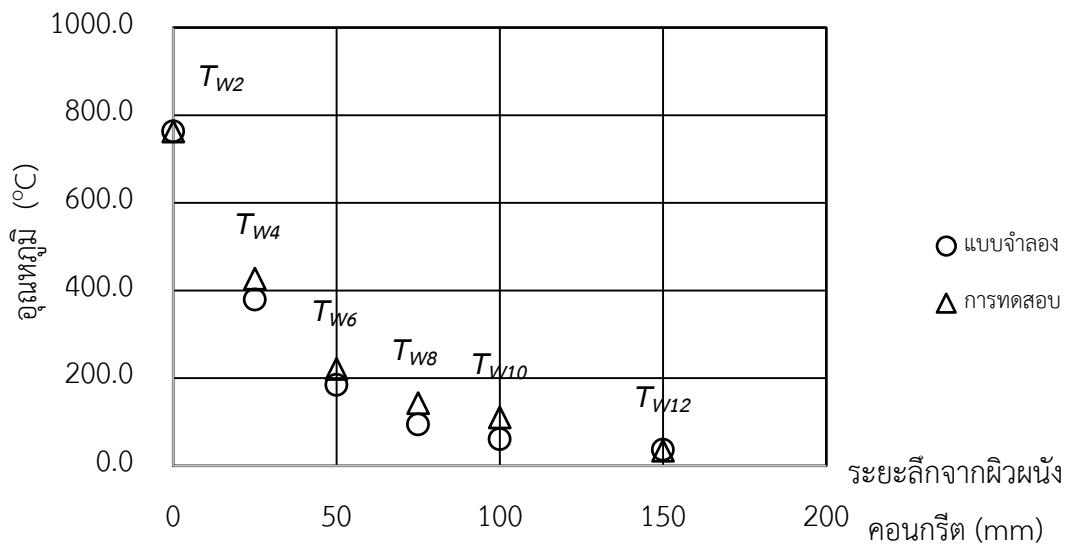
รูปที่ ค.1 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชั้นตัวอย่าง SW-DB12-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



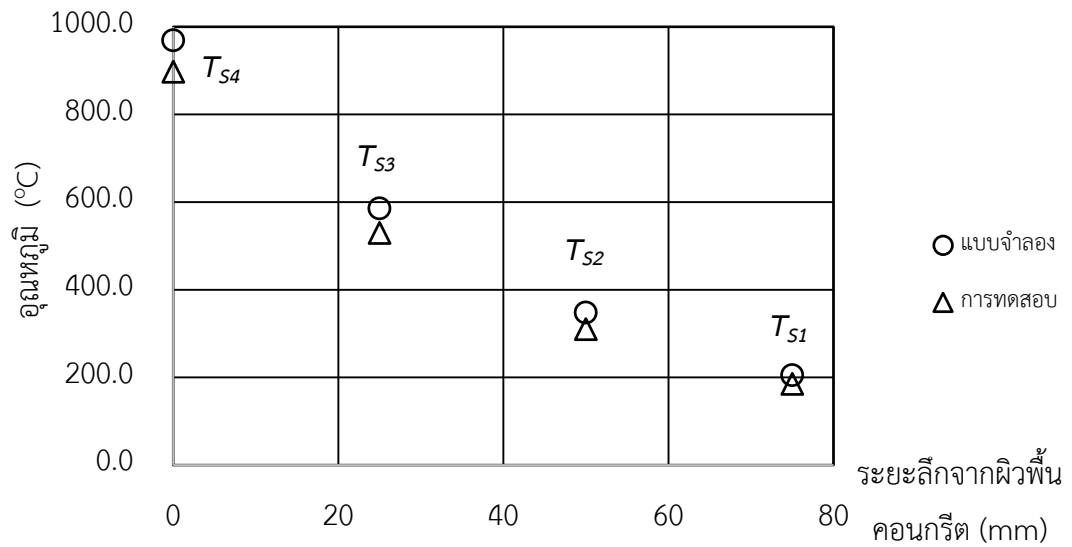
รูปที่ ค.2 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชั้นตัวอย่าง SW-DB12-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$



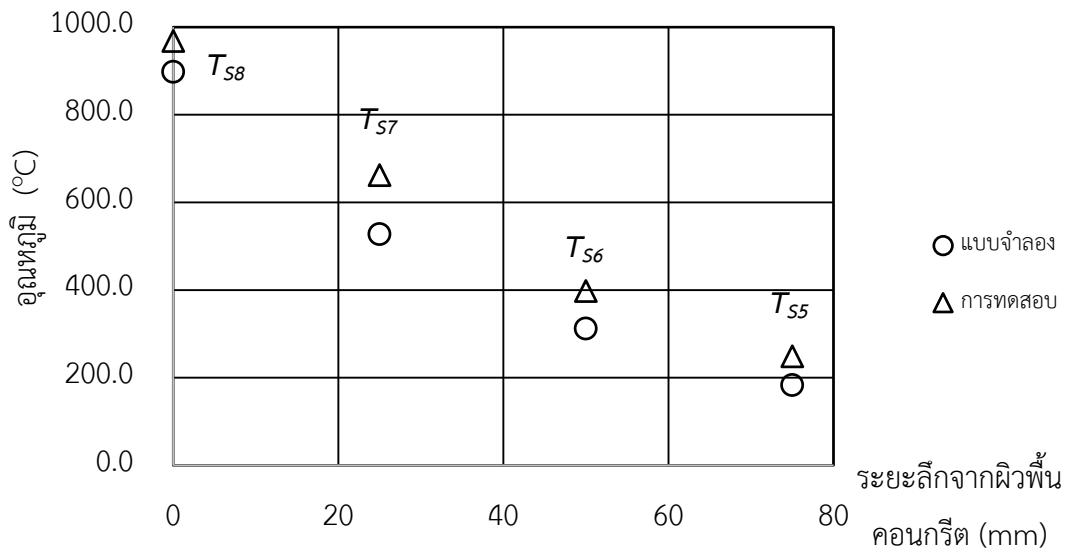
รูปที่ ค.3 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W1}$   $T_{W3}$   $T_{W5}$   $T_{W7}$   $T_{W9}$  และ  $T_{W11}$



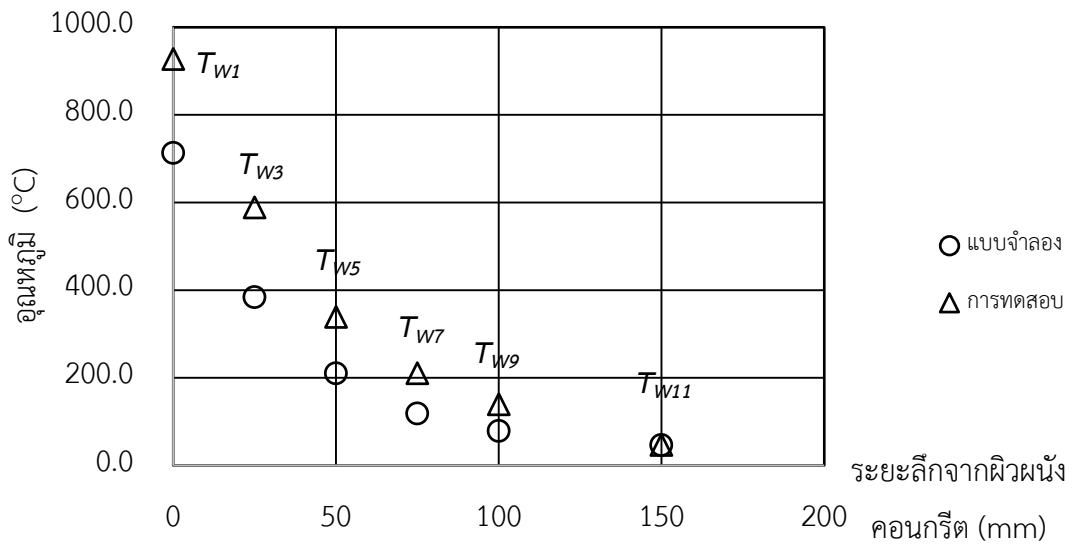
รูปที่ ค.4 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W2}$   $T_{W4}$   $T_{W6}$   $T_{W8}$   $T_{W10}$  และ  $T_{W12}$



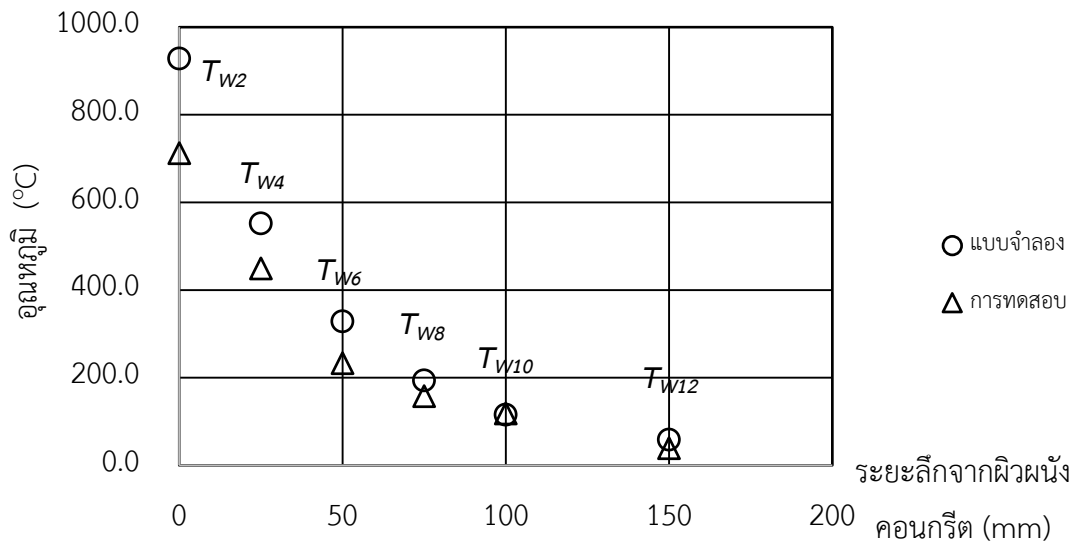
รูปที่ ค.5 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



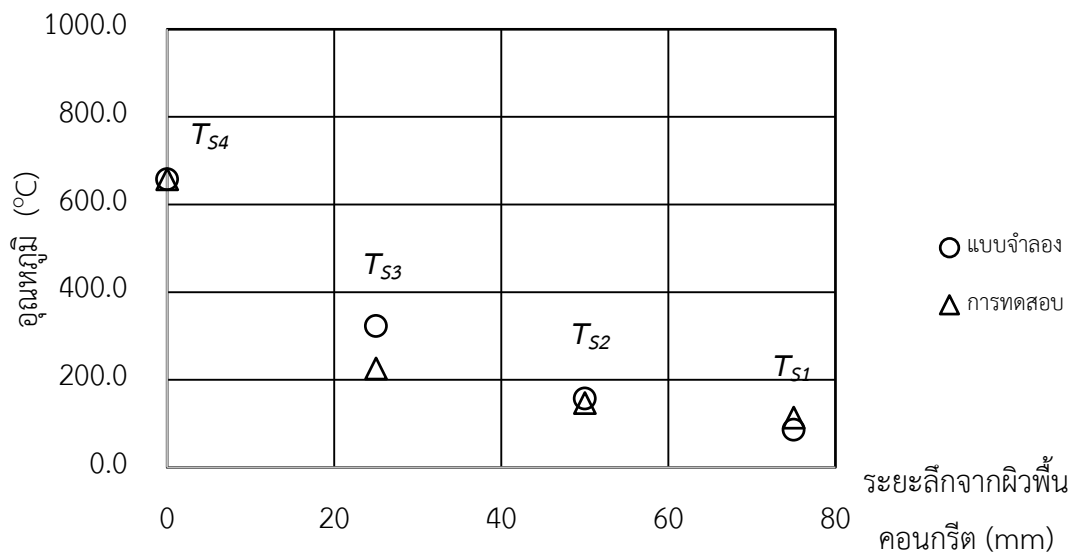
รูปที่ ค.6 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$



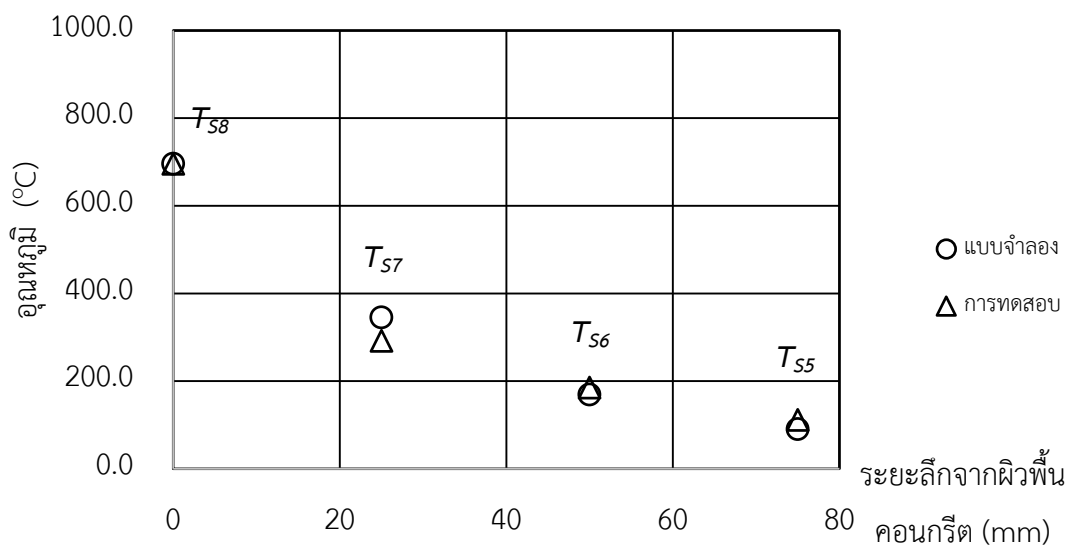
รูปที่ ค.7 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W1}$   $T_{W3}$   $T_{W5}$   $T_{W7}$   $T_{W9}$  และ  $T_{W11}$



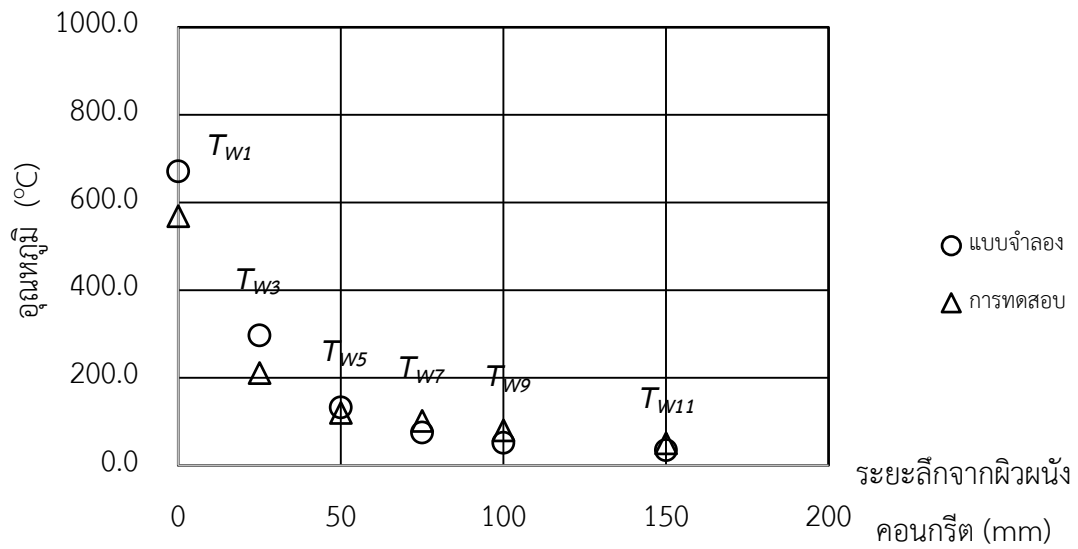
รูปที่ ค.8 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB12-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W2}$   $T_{W4}$   $T_{W6}$   $T_{W8}$   $T_{W10}$  และ  $T_{W12}$



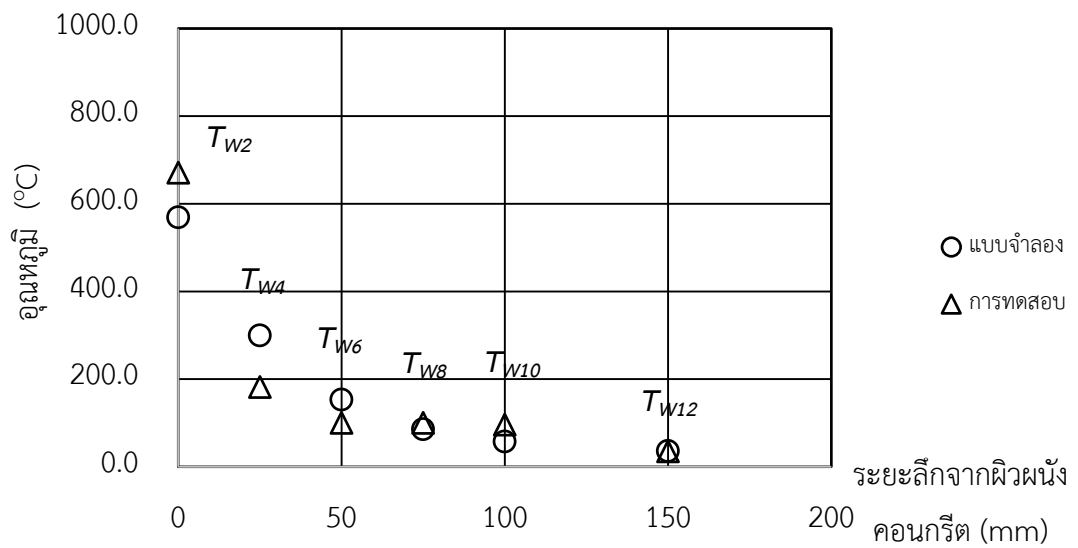
รูปที่ ค.9 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



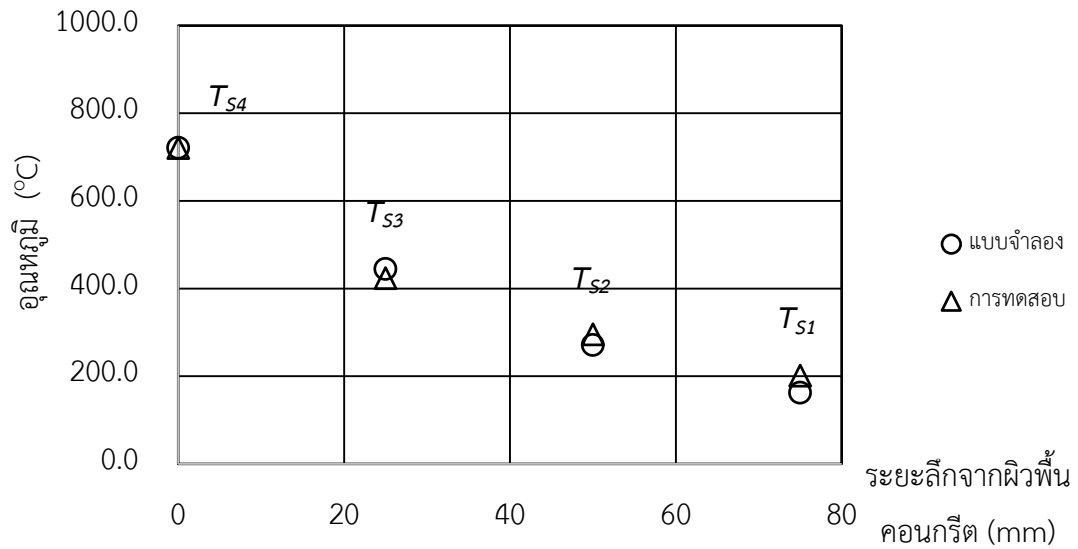
รูปที่ ค.10 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$



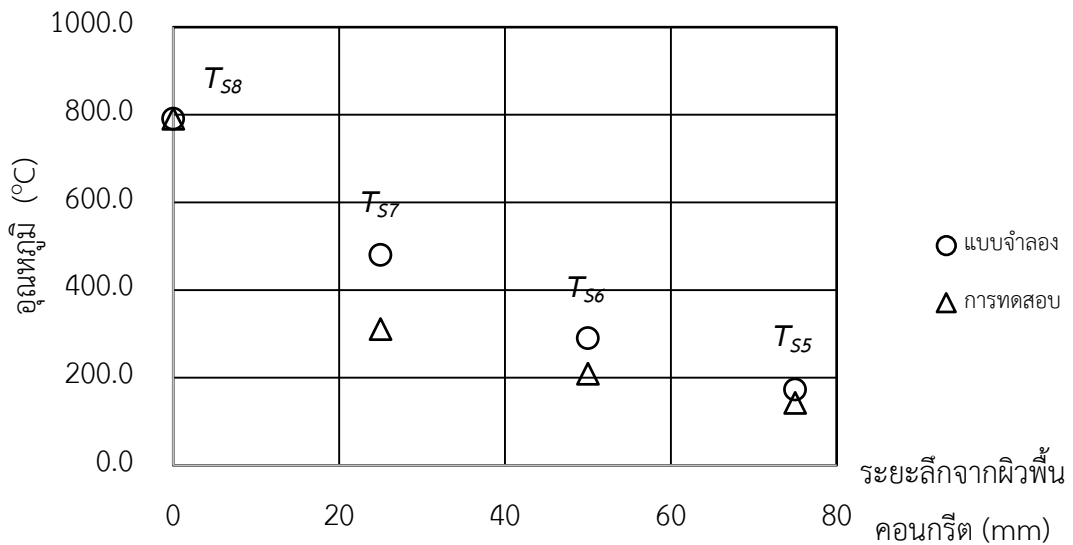
รูปที่ ค.11 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w1}$   $T_{w3}$   $T_{w5}$   $T_{w7}$   $T_{w9}$  และ  $T_{w11}$



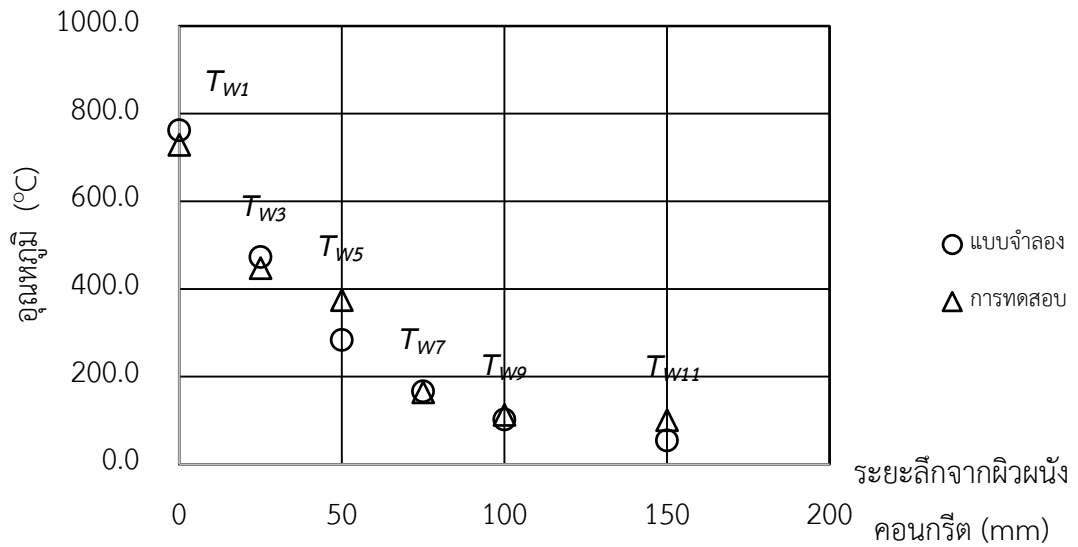
รูปที่ ค.12 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w2}$   $T_{w4}$   $T_{w6}$   $T_{w8}$   $T_{w10}$  และ  $T_{w12}$



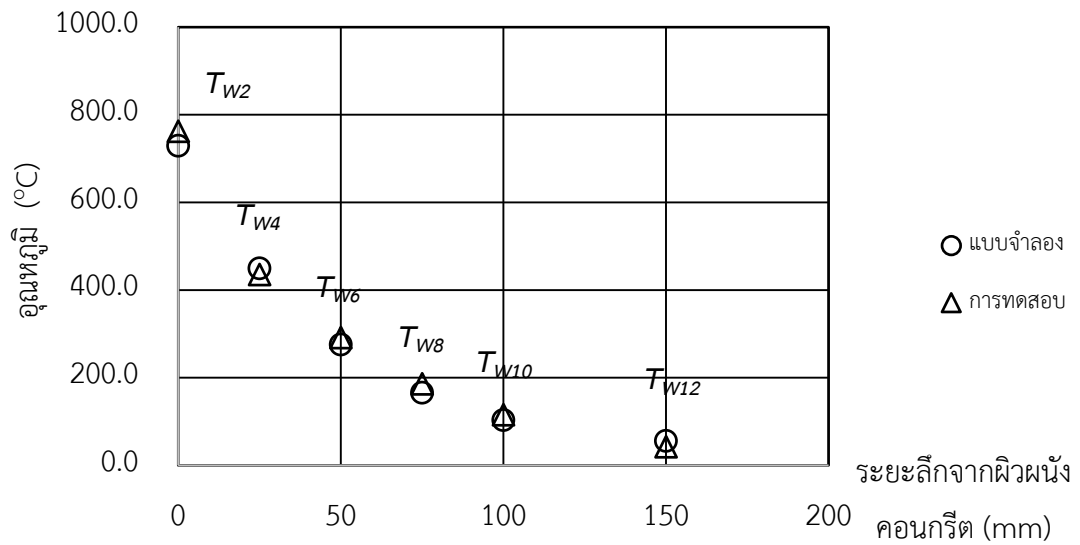
รูปที่ ค.13 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



รูปที่ ค.14 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$

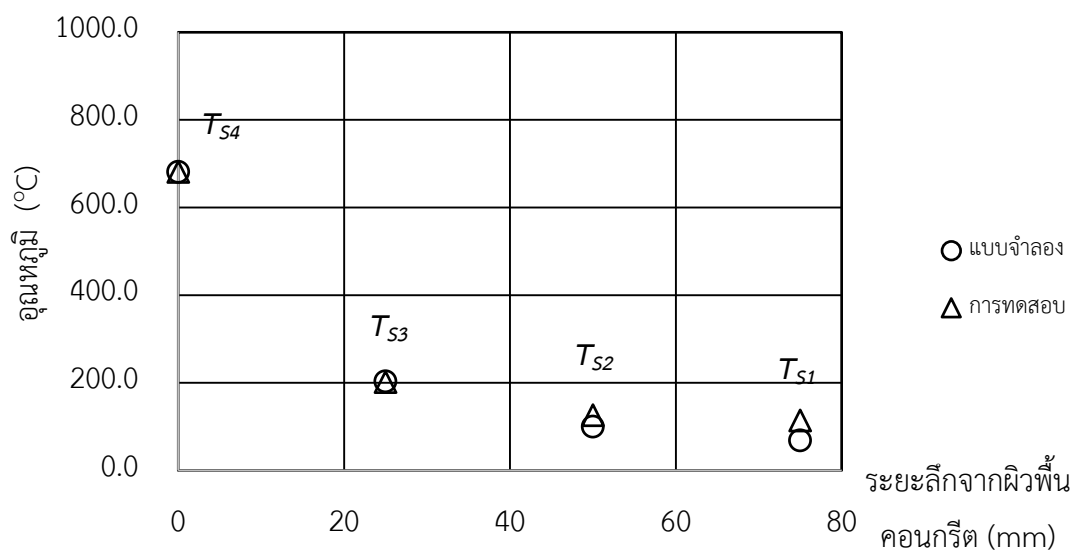


รูปที่ ค.15 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w1}$   $T_{w3}$   $T_{w5}$   $T_{w7}$   $T_{w9}$  และ  $T_{w11}$

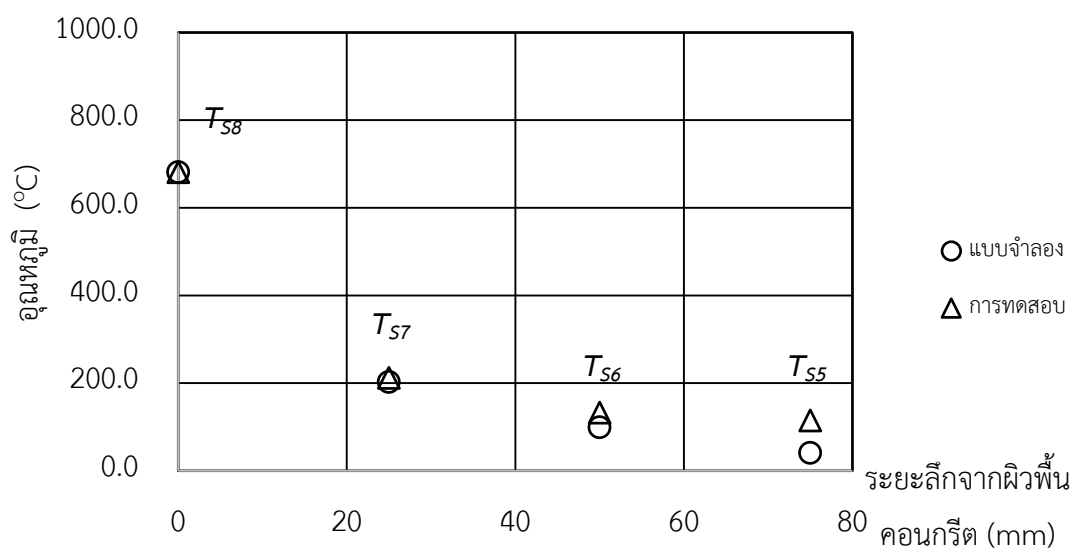


รูปที่ ค.16 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB16-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w2}$   $T_{w4}$   $T_{w6}$   $T_{w8}$   $T_{w10}$  และ  $T_{w12}$

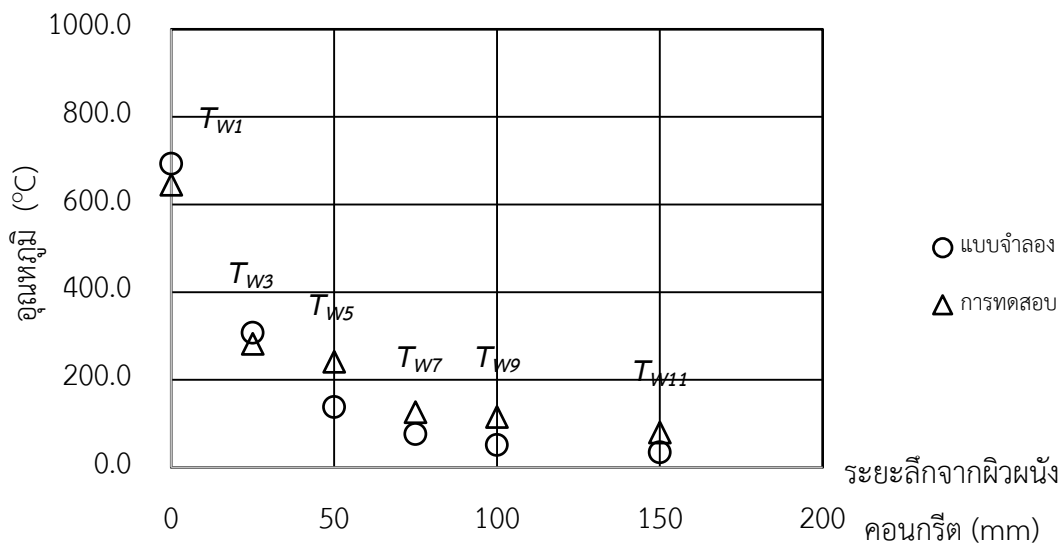




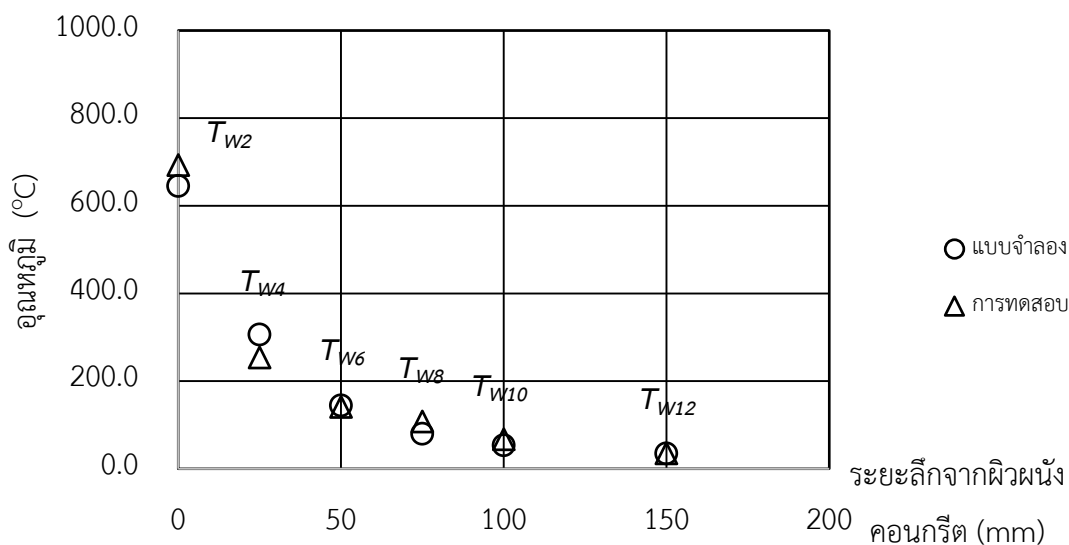
รูปที่ ค.17 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



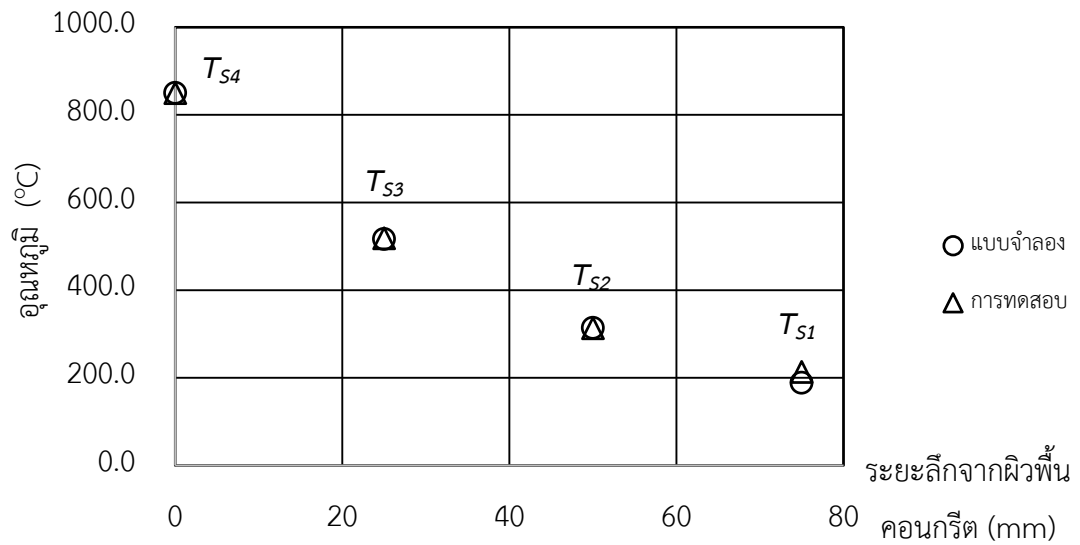
รูปที่ ค.18 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$



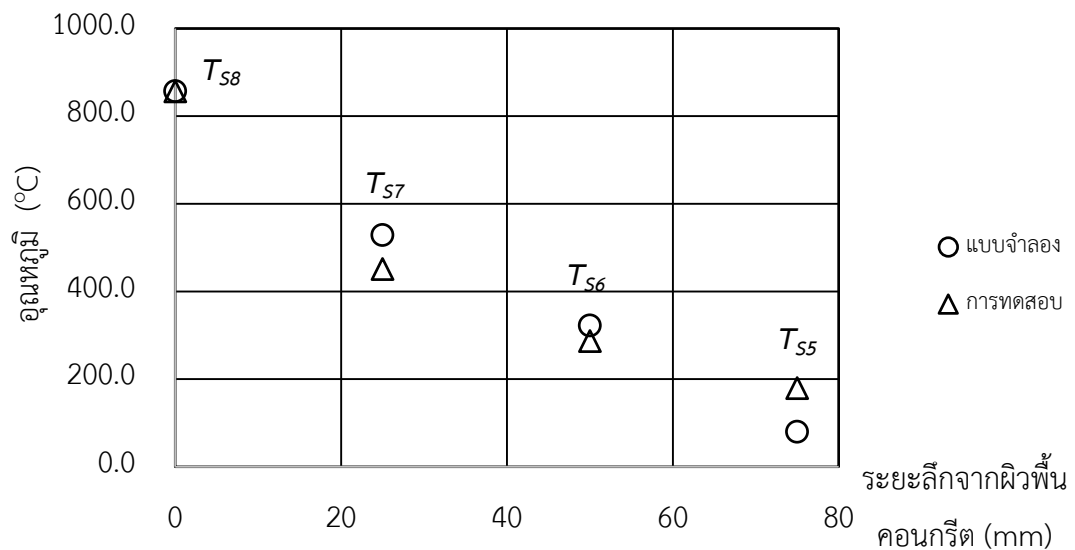
รูปที่ ค.19 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W1}$   $T_{W3}$   $T_{W5}$   $T_{W7}$   $T_{W9}$  และ  $T_{W11}$



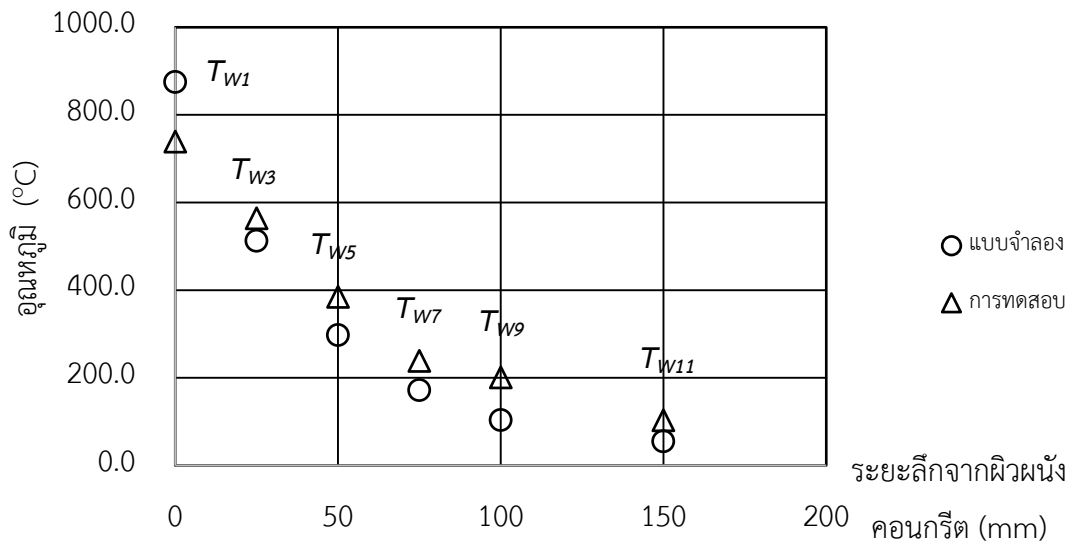
รูปที่ ค.20 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W2}$   $T_{W4}$   $T_{W6}$   $T_{W8}$   $T_{W10}$  และ  $T_{W12}$



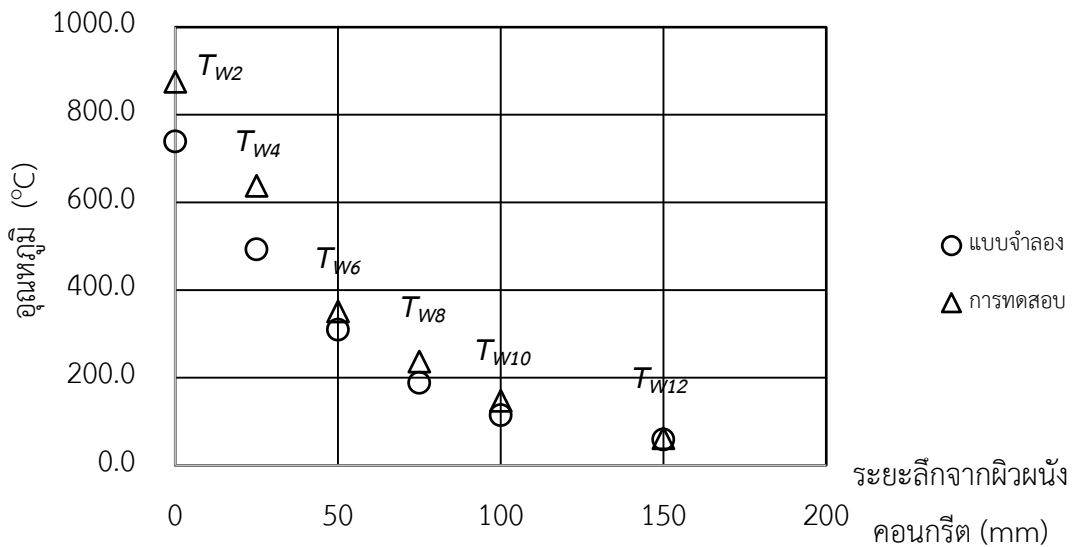
รูปที่ ค.21 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



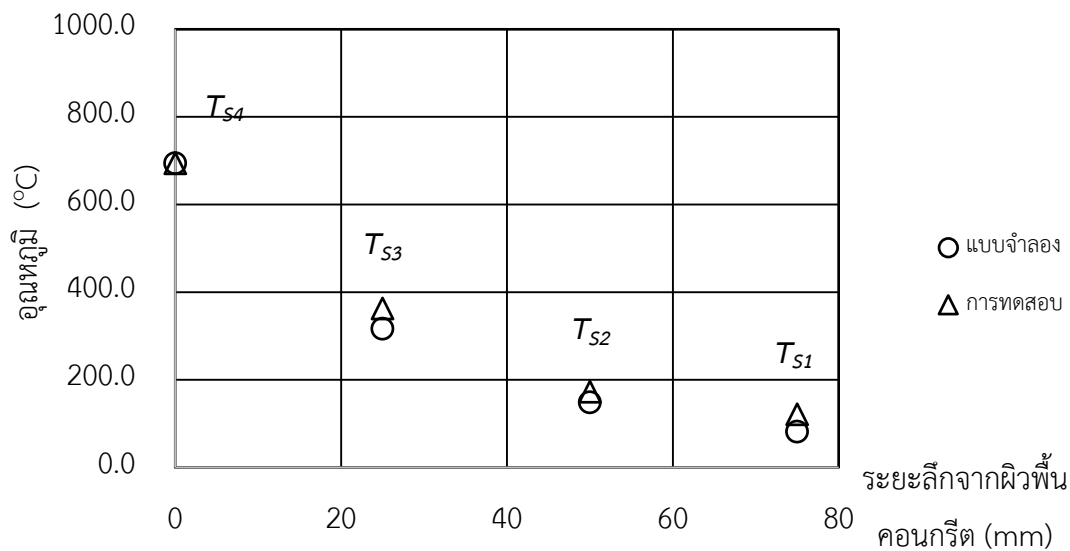
รูปที่ ค.22 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$



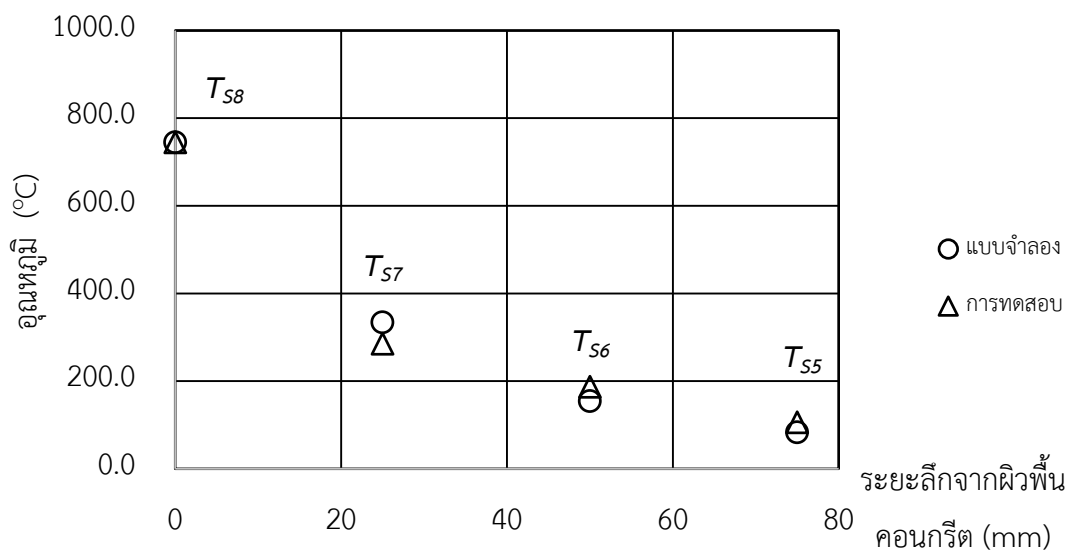
รูปที่ ค.23 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w1}$   $T_{w3}$   $T_{w5}$   $T_{w7}$   $T_{w9}$  และ  $T_{w11}$



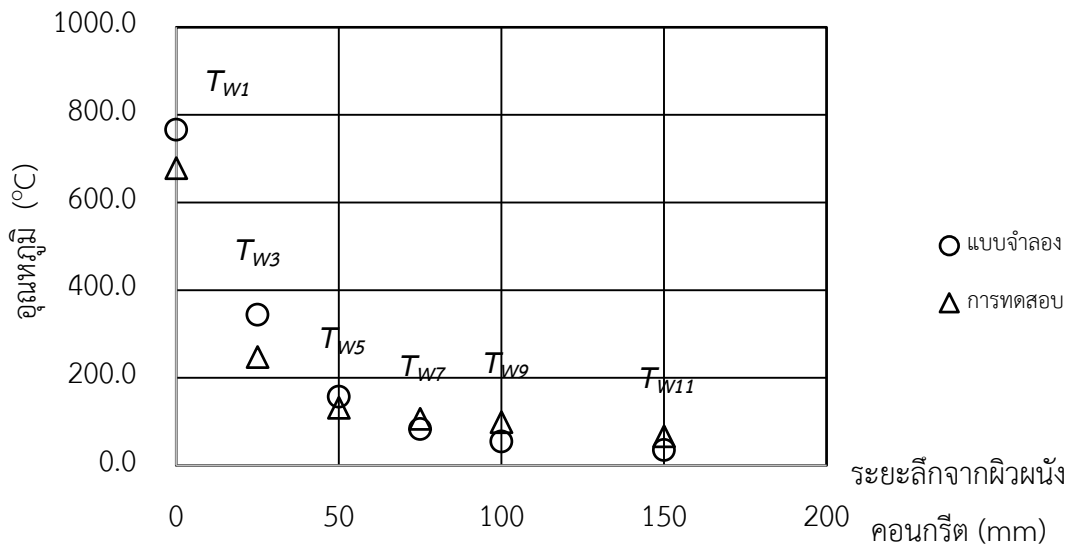
รูปที่ ค.24 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB20-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{w2}$   $T_{w4}$   $T_{w6}$   $T_{w8}$   $T_{w10}$  และ  $T_{w12}$



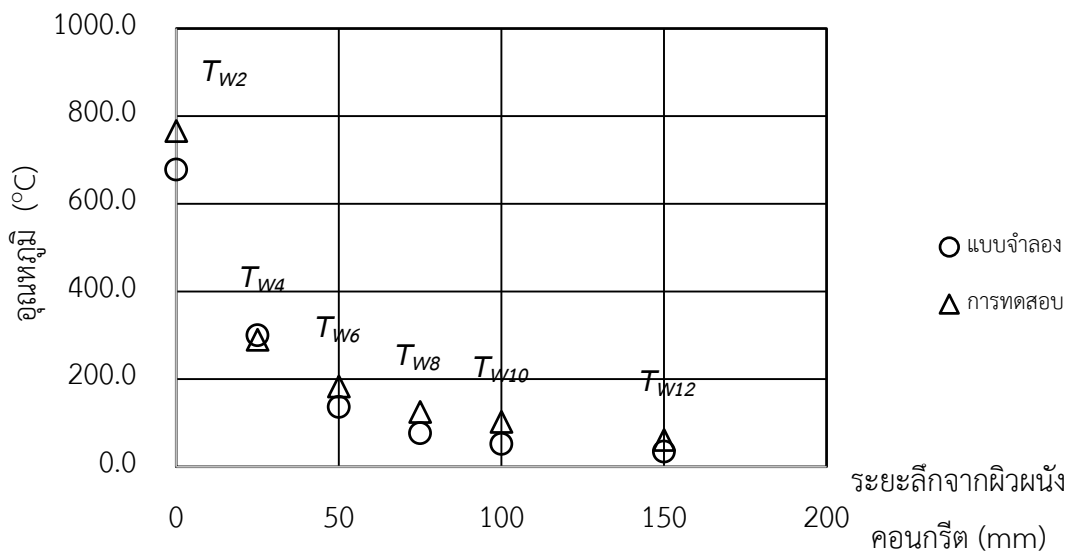
รูปที่ ค.25 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



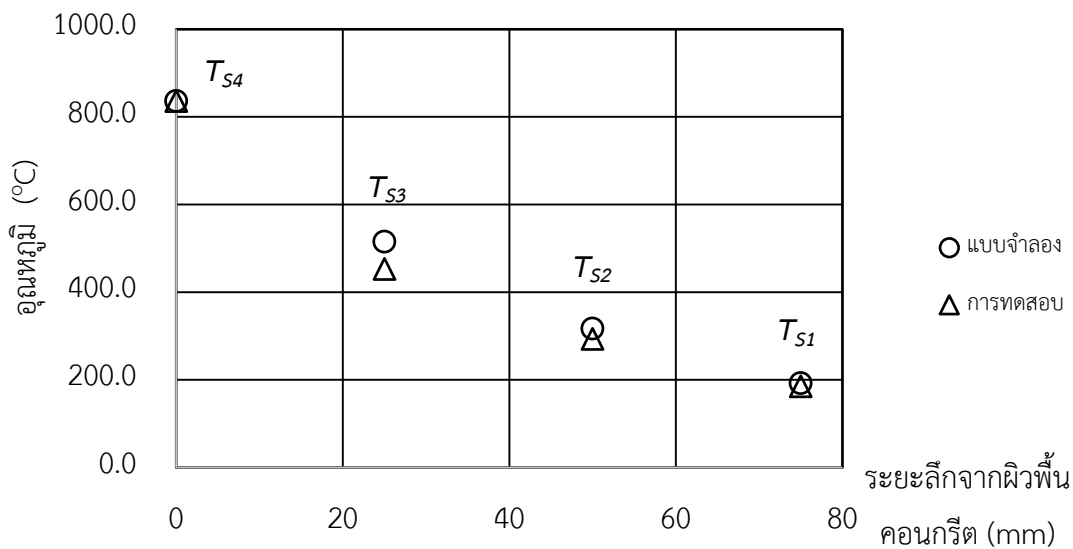
รูปที่ ค.26 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$



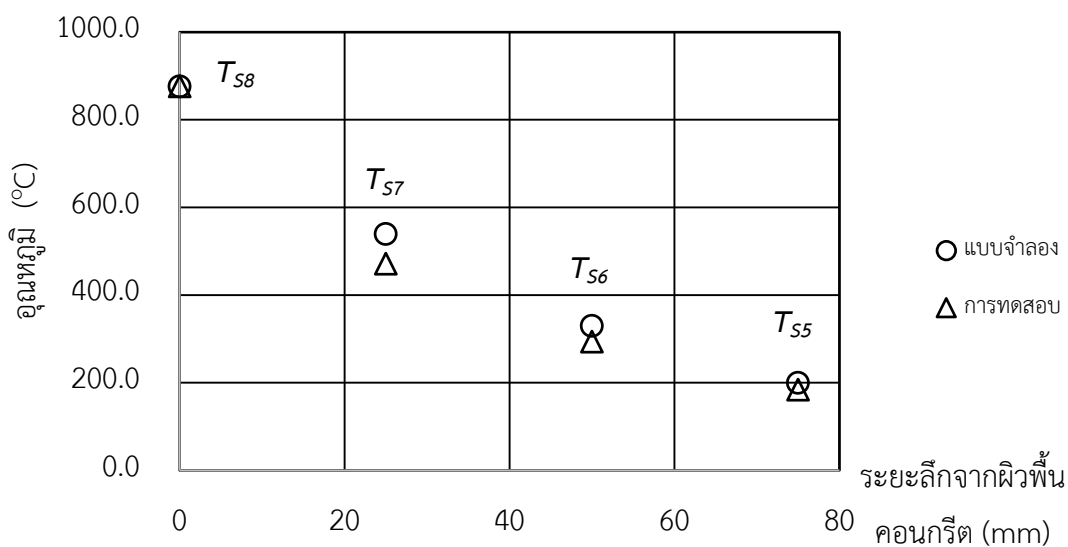
รูปที่ ค.27 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W1}$   $T_{W3}$   $T_{W5}$   $T_{W7}$   $T_{W9}$  และ  $T_{W11}$



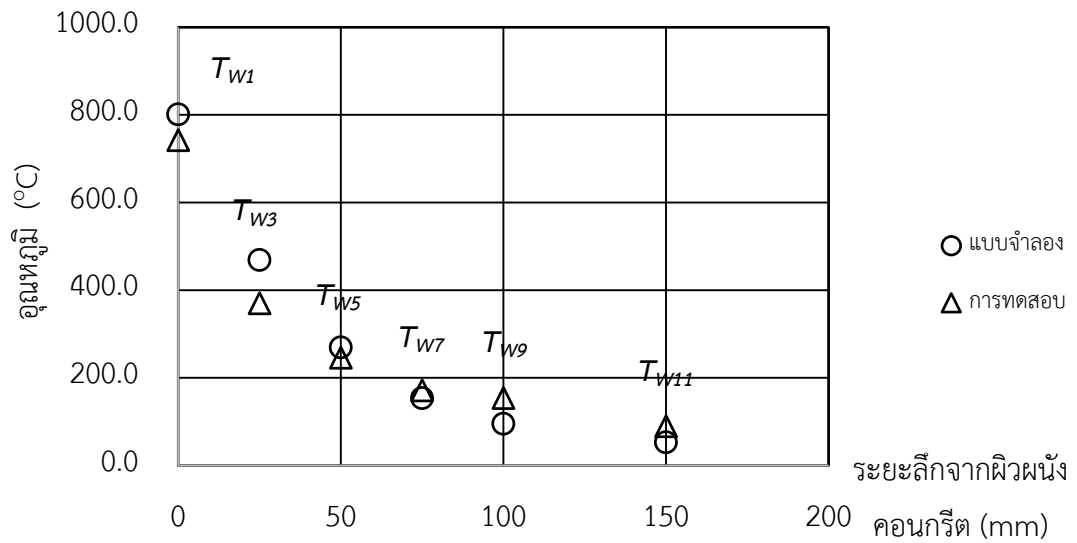
รูปที่ ค.28 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 60 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F060 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W2}$   $T_{W4}$   $T_{W6}$   $T_{W8}$   $T_{W10}$  และ  $T_{W12}$



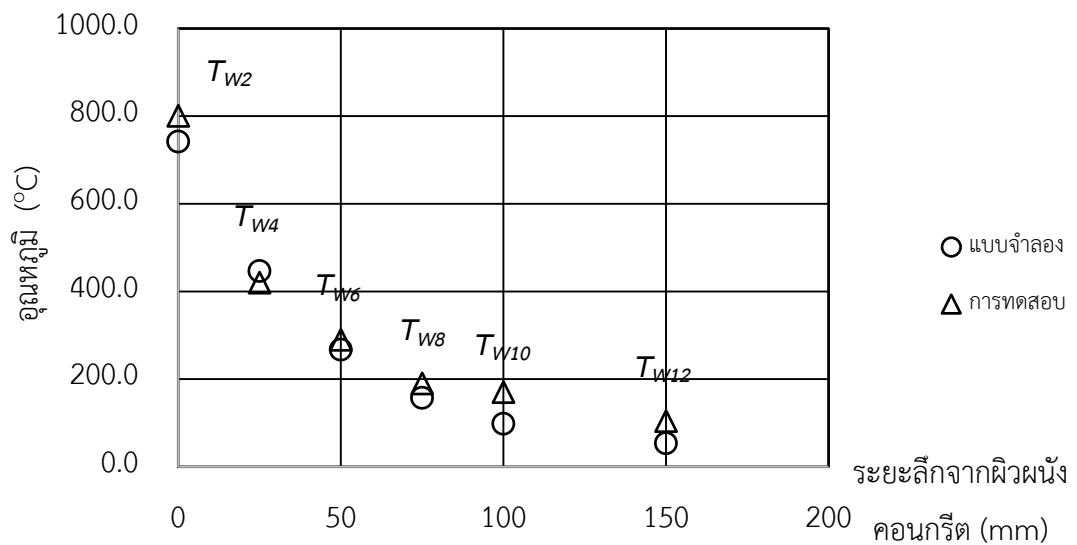
รูปที่ ค.29 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชั้นตัวอย่าง SW-DB25-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s1} - T_{s4}$



รูปที่ ค.30 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชั้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชั้นตัวอย่าง SW-DB25-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{s5} - T_{s8}$



รูปที่ ค.31 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W1}$   $T_{W3}$   $T_{W5}$   $T_{W7}$   $T_{W9}$  และ  $T_{W11}$



รูปที่ ค.32 การกระจายค่าอุณหภูมิภายในชิ้นตัวอย่างที่ระยะเวลาการให้ความร้อน 120 min สำหรับชิ้นตัวอย่าง SW-DB25-F120 บริเวณตำแหน่ง  $T_{W2}$   $T_{W4}$   $T_{W6}$   $T_{W8}$   $T_{W10}$  และ  $T_{W12}$



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายประกิต พรวิริยะธรรม เกิดวันที่ 16 เมษายน พ.ศ. 2533 จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นบุตรของนายเรืองยศ พรวิริยะธรรม และนางประไพพร พรวิริยะธรรม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมชลประทาน (วิศวกรรมโยธา-ชลประทาน) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2554 และเข้ารับการศึกษต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมโครงสร้าง) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558

