

การเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินยึดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม
บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังที่สัมผัสเพลิงไหม้



นายภูวิศร อ้อแสงชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Bond deterioration of epoxy resins between concrete and steel rebar at slab to wall
connection exposed to fire

Mr. Phuwisorn Horsangchai



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

ภูวิศร อ้อแสงชัย : การเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินยึดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังที่สัมผัสเพลิงไหม้ (Bond deterioration of epoxy resins between concrete and steel rebar at slab to wall connection exposed to fire) อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. ธัญวัฒน์ โพธิศิริ, 97 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประเมินการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ในงานเจาะ เสียบเหล็กบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ โดยประยุกต์ใช้การทดสอบการดึงออก (pull-out test) ควบคู่กับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตซึ่งสัมผัสความร้อน จากเพลิงไหม้มาตรฐานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และพิจารณาเหล็กเสริมเจาะเสียบเป็นเหล็กข้ออ้อยชั้น คุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม.

การทดสอบการดึงออกมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว โดยใช้อีพ็อกซีเรซินที่แตกต่าง กันสองชนิด (A และ B) จากผลการทดสอบ พบว่าอุณหภูมิวิกฤติของ อีพ็อกซีเรซินทั้งสองชนิด มีแนวโน้มลดลงตาม ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอุณหภูมิวิกฤติ มีแนวโน้มลดลงตามขนาดของเส้นผ่าน ศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ชนิดของอีพ็อกซีเรซินที่ต่างกันไม่ได้ส่งผลอย่างมี นัยสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยว

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ ประเมินค่าอุณหภูมิของอีพ็อกซีเรซิน โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS 15.0 และทำการเปรียบเทียบสภาพนำความร้อนและความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีตโดยอ้างอิงผลการทดสอบใน งานวิจัยที่ผ่านมา

สำหรับการประมาณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนัง คอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ พิจารณาใช้สมการทำนายค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ลดลงตามค่าอุณหภูมิที่ เพิ่มขึ้น ซึ่งอ้างอิงจากผลการทดสอบการดึงออก ประกอบกับผลการประมาณค่าอุณหภูมิของอีพ็อกซีเรซินจาก แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้ จากผลการประมาณความต้านทานการดึงออก พบว่า ความต้านทานการดึง ออกของอีพ็อกซีเรซิน (ชนิด A) บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตมีการลดค่าตามระยะเวลาเพลิงไหม้อย่างมี นัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 60 นาทีแรกของเพลิงไหม้ (เหลือเพียง 57% 65.9% 73.7% และ 80.3% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 DB 16 DB 20 และ DB 25 ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม.) ในขณะที่ ระยะคอนกรีตหุ้มที่ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการลดค่าดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (จาก 57% เป็น 98.3% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 เมื่อระยะคอนกรีตหุ้มเพิ่มจาก 50 มม. เป็น 150 มม.) นอกจากนี้เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่ามีแนวโน้มการลดค่า ความต้านทานการดึงออกในภาวะเพลิงไหม้น้อยกว่า (เหลือ 22% 31.7% 41.9% และ 53.9% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 DB 16 DB 20 และ DB 25 ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม. ที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ 180 นาที)

ภาควิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ นิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5570331021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORDS: EPOXY RESINS / PULL-OUT TEST / ELEVATED TEMPERATURE

PHUWISORN HORSANGCHAI: Bond deterioration of epoxy resins between concrete and steel rebar at slab to wall connection exposed to fire. ADVISOR: ASSOC. PROF. THANYAWAT POTHISIRI, Ph.D., 97 pp.

A method for assessing bond deterioration of epoxy resins between concrete and steel rebar at slab-to-wall connections exposed to fire has been proposed by employing the pull-out test in conjunction with the heat transfer analysis of the connections exposed to standard fire by the finite element method. The steel rebars investigated were SD40 grade with varying diameters of 12 mm, 16 mm, 20 mm and 25 mm.

A series of pull-out tests were conducted to examine the bond deterioration of epoxy resins at elevated temperatures through the relationship between the critical temperature and bond stress. Two different types of epoxy resins (A and B) were investigated. It is found from the test results that the critical temperature for both types of epoxy resins tends to decrease with the increasing bond stress. In addition, the critical temperature is significantly lower for steel rebar with larger diameters. Meanwhile, the effect from varying types of epoxy resins on the bond characteristics is negligible.

The heat transfer analysis for the slab-to-wall connection was carried out to estimate the temperature of the epoxy resin using the finite element models in ANSYS 15.0. The conductivity and the specific heat of concrete used in the thermal model were calibrated using test results taken from previous research work.

The assessment of the pull-out resistance of epoxy resins at the slab-to-wall connection exposed to fire adopts a set of predicting equations for bond strength deterioration with respect to temperature based on the pull-out test results in conjunction with the temperature of epoxy resins estimated by the heat transfer model. It is found that the pull-out resistance of the epoxy resin (type A) at the slab-to-wall connection reduces significantly with the heating duration, particularly during the first 60 minutes (reduced to 57%, 65.9%, 73.7% and 80.3% for DB12, DB16, DB20 and DB25 steel rebar with a concrete cover of 50 mm). The reduction of the pull-out resistance is lower when a larger concrete cover is used (from 57% to 98.3% for DB12 steel rebar when the concrete cover is increased from 50 mm to 150 mm). Furthermore, the reduction of the pull-out resistance tends to be lower for steel rebar with larger diameters (reduced to 22%, 31.7%, 41.9% and 53.9% for DB12, DB16, DB20 and DB25 steel rebar with a concrete cover of 50 mm and the heating duration of 180 minutes).

Department: Civil Engineering

Student's Signature

Field of Study: Civil Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดีจาก รศ. ดร. ธีรวัฒน์ โพธิศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างมากในงานวิจัยในครั้งนี้มาโดยตลอด รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย จึงใคร่ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ รศ. ดร. สมิตร ส่งพิริยะกิจ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและดูแลในการเตรียมตัวอย่างทดสอบ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย ศ. ดร. ธีรพงศ์ แสนจันทร์ฉวีไชย ผศ. ดร. วิทิต ปานสุข และ รศ. ดร. สมิตร ส่งพิริยะกิจ ที่กรุณารับเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องสมบูรณ์ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ บริษัท ซิมป์สัน สตรอง-ไท (ประเทศไทย) จำกัด และ บริษัท ฮิลติ (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ได้เอื้อเฟื้อตัวอย่างอิพ็อกซีเรซิน เพื่อใช้ในการทดสอบ ตลอดจน คำแนะนำและข้อมูลต่างๆ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยเพื่อความปลอดภัยจากอัคคีภัย (Fire Safety Research Center) ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำในการทดสอบ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอน และที่สำคัญขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้อง ที่คอยให้กำลังใจรวมทั้ง เพื่อนๆ รุ่นพี่รุ่นน้อง ทุกท่าน ที่คอยให้กำลังใจและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ ตลอดจนความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	9
สารบัญรูป.....	11
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	15
บทที่ 2 การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา.....	17
บทที่ 3 การทดสอบการดึงออก.....	20
3.1 ชิ้นตัวอย่างทดสอบ.....	20
3.2 รายละเอียดการทดสอบ.....	25
3.3 รหัสชิ้นตัวอย่าง.....	28
3.4 ผลการทดสอบการดึงออก.....	29
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการดึงออก.....	37
บทที่ 4 การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อ ระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต.....	43
4.1 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน.....	44
4.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ.....	46
4.3 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบขนาดจริงจากงานวิจัยที่ผ่านมา.....	48
4.4 การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต.....	53
บทที่ 5 การประมาณความต้านทานการดึงออก.....	61

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
6.1 สรุปผลการวิจัย	71
6.2 ข้อเสนอแนะ	72
รายการอ้างอิง	73
ภาคผนวก ก	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	97



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ในการศึกษา.....	16
ตารางที่ 3.1 การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	22
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการทดสอบการดึงออกอีพ็อกซีเรซิน A.....	26
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการทดสอบการดึงออกอีพ็อกซีเรซิน B.....	26
ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.	30
ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.	30
ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.	31
ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.	32
ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.	33
ตารางที่ 3.9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสำหรับ อีพ็อกซีเรซิน A.....	39
ตารางที่ 3.10 หน่วยแรงยึดเหนี่ยววิกฤติของอีพ็อกซีเรซิน (MPa) ที่คำนวณตามสมการที่ (4).....	42
ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปกติมวลรวมเนื้อปูน	47
ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กเสริม.....	47
ตารางที่ 4.3 ค่า $C_{p,c}^{peak}$ ตามปริมาณความชื้น.....	48
ตารางที่ 4.4 รายละเอียดการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต	55
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับเหล็ก เสริมขนาด 12 มม.....	57
ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับเหล็ก เสริมขนาด 16 มม.....	58
ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับเหล็ก เสริมขนาด 20 มม.....	59
ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับเหล็ก เสริมขนาด 25 มม.....	60

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 12	64
ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 16	65
ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 20	66
ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 25	67
ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริม DB 20	68
ตารางที่ 5.6 ความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้	69
ตารางที่ 5.7 ตัวประกอบการลดค่าความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้	70
ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.	76
ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.	81
ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.	85
ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.	89
ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.	93

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 การเจาะเสียบเหล็กบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต.....	14
รูปที่ 1.2 กรอบแนวคิดของการดำเนินงานวิจัย	15
รูปที่ 2.1 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่เจาะเสียบเหล็กเสริมและยึดด้วยอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิปกติ.....	17
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการวิบัติจากการแตกร้าวของคอนกรีตในการทดสอบการดึงออก ที่อุณหภูมิปกติ .	18
รูปที่ 2.3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างในการทดสอบการดึงออกที่อุณหภูมิสูง	19
รูปที่ 3.1 ชั้นตัวอย่างทดสอบการดึงออก.....	21
รูปที่ 3.2 การติดตั้งชั้นตัวอย่างทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิสูง.....	25
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ	28
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรหัสชั้นตัวอย่าง.....	28
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว ของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.....	35
รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว ของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.....	35
รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว ของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.....	36
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว ของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.....	36
รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว ของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.....	37
รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว จากการปรับเส้นโค้ง กรณีอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาด	38

รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากการปรับเส้นโค้ง กรณีเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A และ B.....	40
รูปที่ 4.1 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต :	45
รูปที่ 4.2 ลักษณะของชิ้นส่วน.....	46
รูปที่ 4.3 ชิ้นตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา.....	49
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งแท่งเหล็กอ้างอิง	49
รูปที่ 4.5 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิบนแท่งเหล็กอ้างอิง	50
รูปที่ 4.6 แบบจำลองจุดต่อระหว่างคานกับผนังคอนกรีต.....	51
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่แปรเปลี่ยนสภาพนำความร้อนของ คอนกรีตกับผลการทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆ.....	52
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่แปรเปลี่ยนความร้อนจำเพาะสูงสุด ของคอนกรีตกับผลการทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆ	53
รูปที่ 4.9 การแบ่งชิ้นส่วนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	54
รูปที่ 4.10 การกระจายค่าอุณหภูมิบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต.....	56
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ใช้คำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน	56
รูปที่ 5.1 แนวทางการประมาณความต้านทานการดึงออก	63

บทที่ 1

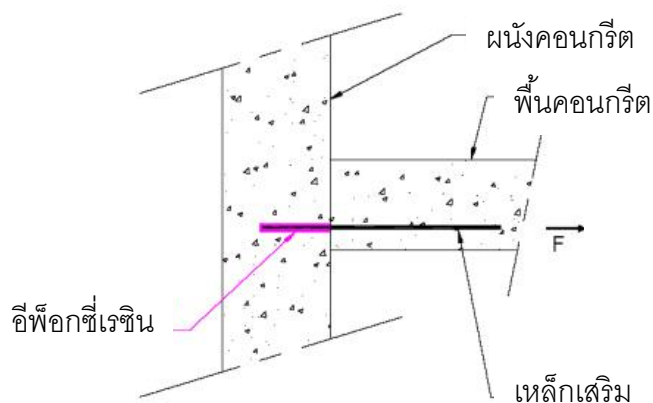
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยเรซินและสารที่ทำให้แข็ง (hardener) [1] วัสดุดังกล่าวนิยมใช้ในการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมในงานเจาะเสียบเหล็กบริเวณจุดต่อระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก เนื่องจากคุณสมบัติเชิงกลด้านกำลังยึดเหนี่ยว (bond strength) ที่ดี [2] โดยที่รูปแบบของจุดต่อที่นิยมประยุกต์ใช้เทคนิคการเจาะเสียบเหล็กในการก่อสร้าง ได้แก่ จุดต่อระหว่างพื้นคอนกรีตและผนังคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 1.1

โครงสร้างที่ใช้อีพ็อกซีเรซินยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมมีแนวโน้มที่มีกำลังยึดเหนี่ยวสูงกว่าโครงสร้างที่ไม่ใช้อีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิปกติ อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ N. Pinoteau และคณะ [4] ซึ่งได้ทำการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิสูง พบว่ากำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น โดยที่กำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินอาจลดลงเกิน 50% เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 80°C ด้วยเหตุดังกล่าว ภายใต้สภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เช่น ในการเกิดเพลิงไหม้ จุดต่อของโครงสร้างที่มีการยึดเหนี่ยวด้วยอีพ็อกซีเรซินจึงมีความเสี่ยงต่อการวิบัติ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประเมินการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ในงานเจาะเสียบเหล็กบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ โดยประยุกต์ใช้การทดสอบการดึงออก (pull-out test) ควบคู่กับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตซึ่งสัมผัสความร้อนจากเพลิงไหม้มาตรฐานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และพิจารณาเหล็กเสริมเจาะเสียบเป็นเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม.



รูปที่ 1.1 การเจาะเสียบเหล็กบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต

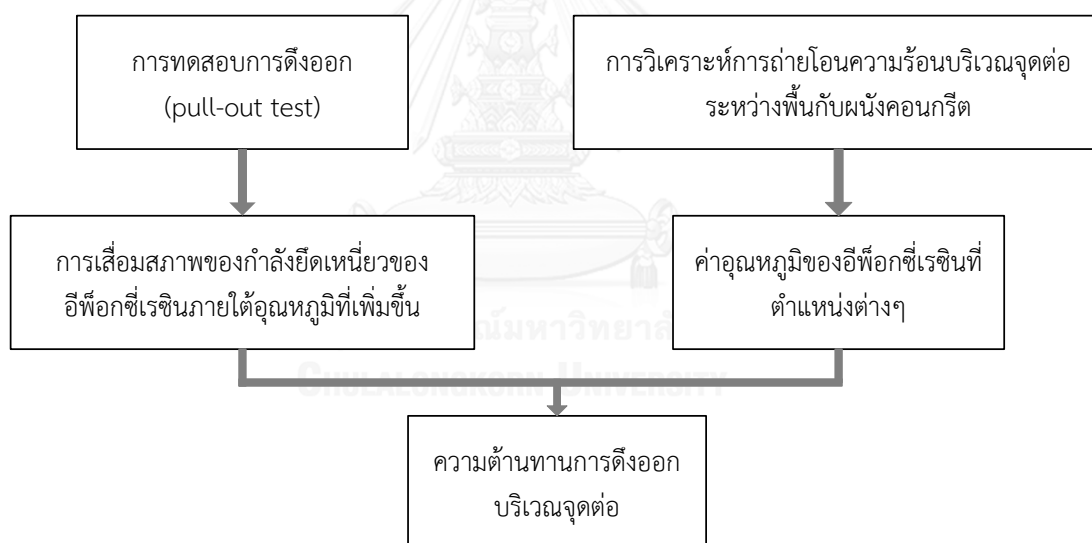
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการประเมินการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ในงานเจาะเสียบเหล็กบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ โดยประยุกต์ใช้การทดสอบการดึงออก (pull-out test) ควบคู่กับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตซึ่งสัมผัสความร้อนจากเพลิงไหม้มาตรฐานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การประเมินความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินที่ยึดระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังในภาวะเพลิงไหม้อาศัยข้อมูลจากการศึกษา 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การทดสอบการดึงออกสำหรับชิ้นตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอก และการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนัง

การทดสอบการดึงออกเป็นการทดสอบขนาดเล็ก (small-scale test) เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนใช้ในการทำนายการกระจายค่าอุณหภูมิของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตภายใต้เพลิงไหม้มาตรฐานเพื่อประเมินความต้านทานการดึงออก (pull-out resistance) บริเวณจุดต่อดังกล่าวที่ระยะเวลาการให้ความร้อนแตกต่างกัน รูปที่ 1.2 แสดงกรอบแนวคิดของการดำเนินงานวิจัยนี้



รูปที่ 1.2 กรอบแนวคิดของการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้พิจารณาเลือกใช้ฮีฟ็อกซีเรซิน 2 ชนิดได้แก่ ชนิด A และ ชนิด B ซึ่งมีคุณสมบัติเชิงกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1.1 สำหรับการทดสอบการดึงออกกำหนดรูปแบบขึ้นตัวอย่างทดสอบในลักษณะของคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. และความยาว 300 มม. บรรจุภายในเหล็กรูปทรงกระบอกกลวง ซึ่งมีความหนา 2.8 มม. (ดูรายละเอียดในบทที่ 3) นอกจากนี้พิจารณาเลือกใช้เหล็กเสริมเป็นเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ตามลำดับ สำหรับฮีฟ็อกซีเรซิน A สำหรับฮีฟ็อกซีเรซิน B พิจารณาเลือกใช้เพียงเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. เพื่อศึกษาผลกระทบของชนิดฮีฟ็อกซีเรซินต่อการเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยว โดยกำหนดระยะฝั่งของเหล็กเสริมเป็นระยะลึก 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม คอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบเป็นคอนกรีตปกติมวลรวมเนื้อปูน (calcareous aggregate) ซึ่งมีค่ากำลังอัดระบุของคอนกรีตรูปทรงกระบอกมาตรฐานที่ 28 วัน เท่ากับ 30 MPa ทั้งนี้ เนื่องจากการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทดสอบการดึงออกที่อุณหภูมิสูงโดยทั่วไปเป็นการวิบัติแบบเฉือน (shearing-off failure) ซึ่งเกิดขึ้นบริเวณฮีฟ็อกซีเรซิน ดังนั้นการศึกษานี้จึงพิจารณาสมมติฐานให้กำลังยึดเหนี่ยวของฮีฟ็อกซีเรซินไม่ขึ้นอยู่กับกำลังอัดของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตประยุกต์ใช้โปรแกรม ANSYS 15.0 โดยกำหนดให้จุดต่อสัมผัสความร้อนแบบเปลื้องไหม้มาตรฐาน ISO 834 [5] บริเวณผิวด้านล่างของพื้นคอนกรีตและผิวด้านในของผนังคอนกรีต (ดูรายละเอียดในบทที่ 3) โดยกำหนดตัวแปรศึกษาได้แก่ ความหนาของคอนกรีตหุ้ม ระยะเวลาที่ให้ความร้อน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม สำหรับคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุคอนกรีตและเหล็กเสริมพิจารณาตามมาตรฐาน EN1992-1-2 [6] และ EN 1993-1-2 [7] ตามลำดับ ในขณะที่พิจารณาคุณสมบัติเชิงความร้อนของฮีฟ็อกซีเรซิน ตามข้อมูลจากงานวิจัยที่ผ่านมา [8-10]

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติเชิงกายภาพของฮีฟ็อกซีเรซินที่ใช้ในการศึกษา

ฮีฟ็อกซีเรซิน	ระยะเวลาแข็งตัวที่อุณหภูมิ 20°C (ชม.)	กำลังยึดเหนี่ยวที่ 2 วัน (MPa)	กำลังอัด (MPa)	การดูดซึมน้ำ (%)	มอดุลัสของสภาพยืดหยุ่น (MPa)
A	12	14	-	-	-
B	24	26	102.3	0.10	4442

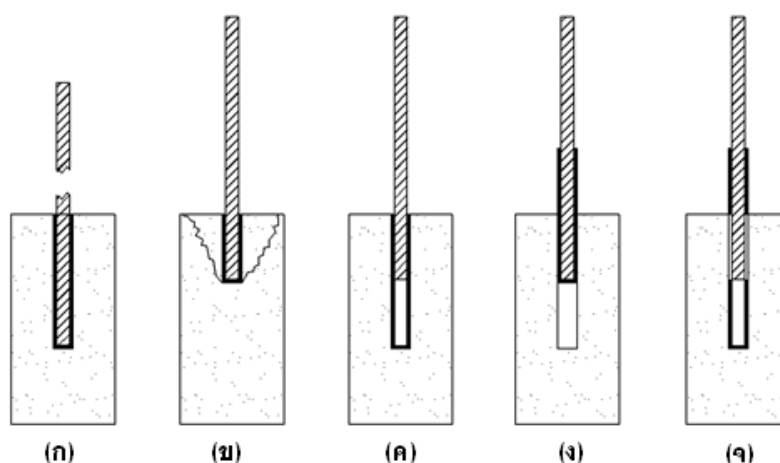
หมายเหตุ : ข้อมูลที่แสดงในตารางอ้างอิงจากบริษัทผู้ผลิตฮีฟ็อกซีเรซิน

บทที่ 2

การทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมา

อีพ็อกซีเรซินมีคุณสมบัติที่ดีในด้านกำลังยึดเหนี่ยวและความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุยึดเหนี่ยวประเภทอื่น [11] โดยกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ในงานเจาะเสียบเหล็กมีค่าสูงกว่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยตรง [3]

จากการทดสอบการดึงออกของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่เจาะเสียบเหล็กเสริมและยึดด้วยอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิปกติ พบว่าเกิดการวิบัติ 3 รูปแบบ [3] ได้แก่ การขาดของเหล็กเสริมภายใต้แรงดึง การวิบัติจากการแตกร้าวของคอนกรีต และการวิบัติแบบเฉือนระหว่างเหล็กเสริมกับอีพ็อกซีเรซิน หรือระหว่างคอนกรีตกับอีพ็อกซีเรซิน ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) – 2.1(จ) ตามลำดับ โดยที่หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเนื้อคอนกรีตประกอบด้วยหน่วยแรงเฉือนและหน่วยแรงดึง หน่วยแรงที่เกิดขึ้นในเหล็กเสริมเป็นหน่วยแรงดึงเป็นหลัก ในขณะที่หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในอีพ็อกซีเรซินสามารถพิจารณาในรูปของหน่วยแรงเฉือน ทั้งนี้ ที่อุณหภูมิปกติการวิบัติส่วนใหญ่เกิดที่บริเวณคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างคอนกรีตรูปทรงกระบอกที่เจาะเสียบเหล็กเสริมและยึดด้วยอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิปกติ : (ก) การขาดของเหล็กเสริม (ข) การแตกร้าวของคอนกรีต (ค) การวิบัติแบบเฉือนระหว่างเหล็กเสริมกับอีพ็อกซีเรซิน (ง) การวิบัติแบบเฉือนระหว่างคอนกรีตกับอีพ็อกซีเรซิน (จ) การวิบัติแบบเฉือนแบบผสม



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างการวิบัติจากการแตกร้าวของคอนกรีตในการทดสอบการดึงออก
ที่อุณหภูมิปกติ [3]

หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นในอีพ็อกซีเรซินอาจผันแปรตามระยะฝั่งเหล็กเสริมสำหรับกรณี
ที่ระยะฝั่งเล็กกว่า 75 มิลลิเมตร [12-14] อย่างไรก็ตาม จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบการดึง
ออกในงานวิจัยที่ผ่านมา [15] พบว่าสามารถพิจารณาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแบบคงที่สำหรับการ
ประมาณค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินตามสมการ

$$\tau = \frac{F}{\pi dL} \quad (1)$$

โดยที่ τ แทนหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซิน (MPa)

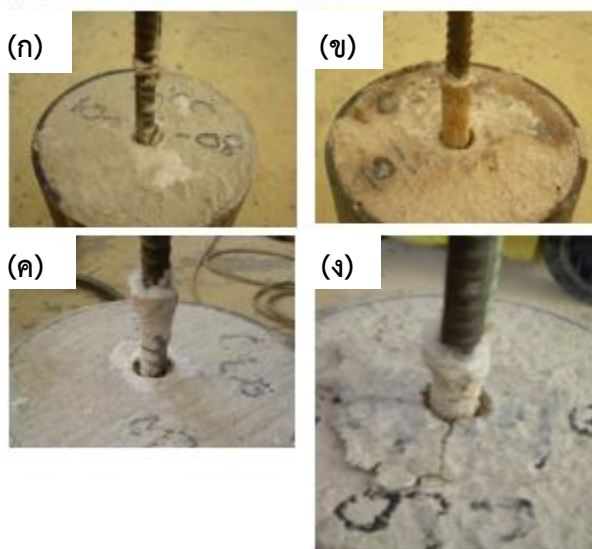
F แทนแรงดึงในการทดสอบการดึงออก (N)

d แทนเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของเหล็กเสริม (mm)

L แทนระยะฝั่งเหล็กเสริม (mm)

สำหรับกรณีที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะการวิบัติของอีพ็อกซีเรซินส่วนใหญ่เป็นการวิบัติ
แบบเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับเหล็กเสริมหรือที่ผิวสัมผัสระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับ
คอนกรีต รวมทั้งการวิบัติแบบผสมผสานระหว่างการวิบัติแบบเฉือนและการแตกร้าวของคอนกรีต
บริเวณผิว [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.3

ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่
สภาวะอุณหภูมิสูง ได้แก่ อุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature) ซึ่งได้จากการทดสอบการดึงออก
ด้วยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวคงที่ภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [4]



รูปที่ 2.3 ลักษณะการวิบัติของตัวอย่างในการทดสอบการดึงออกที่อุณหภูมิสูง :

- (ก) การวิบัติแบบเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมกับอีพ็อกซีเรซิน
 (ข) การวิบัติแบบเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตกับอีพ็อกซีเรซิน (ค) การวิบัติแบบผสม
 (ง) การวิบัติแบบผสมที่มีการแตกร้าวของคอนกรีต [4]

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่อุณหภูมิสูงยังคงค่อนข้างจำกัด โดยงานวิจัยที่ผ่านมา [4] ได้มีการทดสอบการดึงออกของชิ้นตัวอย่างที่มีการเจาะเสียบเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. เท่านั้น ด้วยเหตุดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน ได้แก่ 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ในภาวะอุณหภูมิสูง รวมทั้งแนวทางการประยุกต์ใช้พฤติกรรมดังกล่าวในการทำนายความต้านทานการดึงออกบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตที่สัมผัสเพลิงไหม้

บทที่ 3

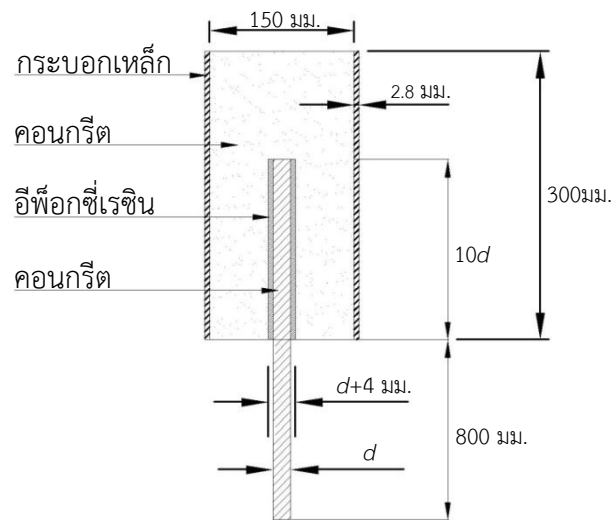
การทดสอบการดึงออก

การทดสอบการดึงออกด้วยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวคงที่ภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่แปรเปลี่ยนตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสำหรับการเจาะเสียบเหล็กเสริมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน

3.1 ชั้นตัวอย่างทดสอบ

ชั้นตัวอย่างทดสอบสำหรับการทดสอบการดึงออกประกอบด้วย เหล็กเสริมข้ออ้อย คอนกรีตรูปทรงกระบอกซึ่งทำการเจาะรูบริเวณจุดศูนย์กลางเพื่อติดตั้งเหล็กเสริม และอีพ็อกซีเรซินซึ่งทำหน้าที่ยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม เหล็กข้ออ้อยที่ใช้เป็นเหล็กชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ตามลำดับ โดยกำหนดระยะฝังของเหล็กเสริม 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง และกำหนดขนาดของรูเจาะให้ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม 4 มิลลิเมตร (ดูรูปที่ 3.1 ประกอบ)

คอนกรีตรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มม. และความยาว 300 มม. ค่ากำลังอัดเฉลี่ยที่ 28 วัน เท่ากับ 28.0 MPa (จากการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตรูปทรงกระบอกจำนวน 5 ตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM C 39 [16]) โดยทำการหล่อคอนกรีตภายในเหล็กรูปทรงกระบอกกลวงซึ่งมีความหนา 2.8 มม. ทั้งนี้ การติดตั้งกระบอกเหล็กดังกล่าวเพื่อช่วยป้องกันการแตกร้าวและการหลุดล่อนของคอนกรีตจากการเพิ่มค่าอุณหภูมิ รวมทั้งช่วยควบคุมให้การกระจายความร้อนจากเตาทดสอบเข้าสู่บริเวณด้านข้างโดยรอบของชั้นตัวอย่างคอนกรีตให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดขั้นตอนการเตรียมชั้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น






รูปที่ 3.1 ชิ้นตัวอย่างทดสอบการดึงออก





ตารางที่ 3.1 การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
1		เตรียมกระบอกเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150 มม. หนา 2.8 มม. ยาว 300 มม.
2		นำคอนกรีตผสมเสร็จจากโรงงานเทใส่กระบอกเหล็ก
3		แต่งหน้าคอนกรีตให้เรียบ

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

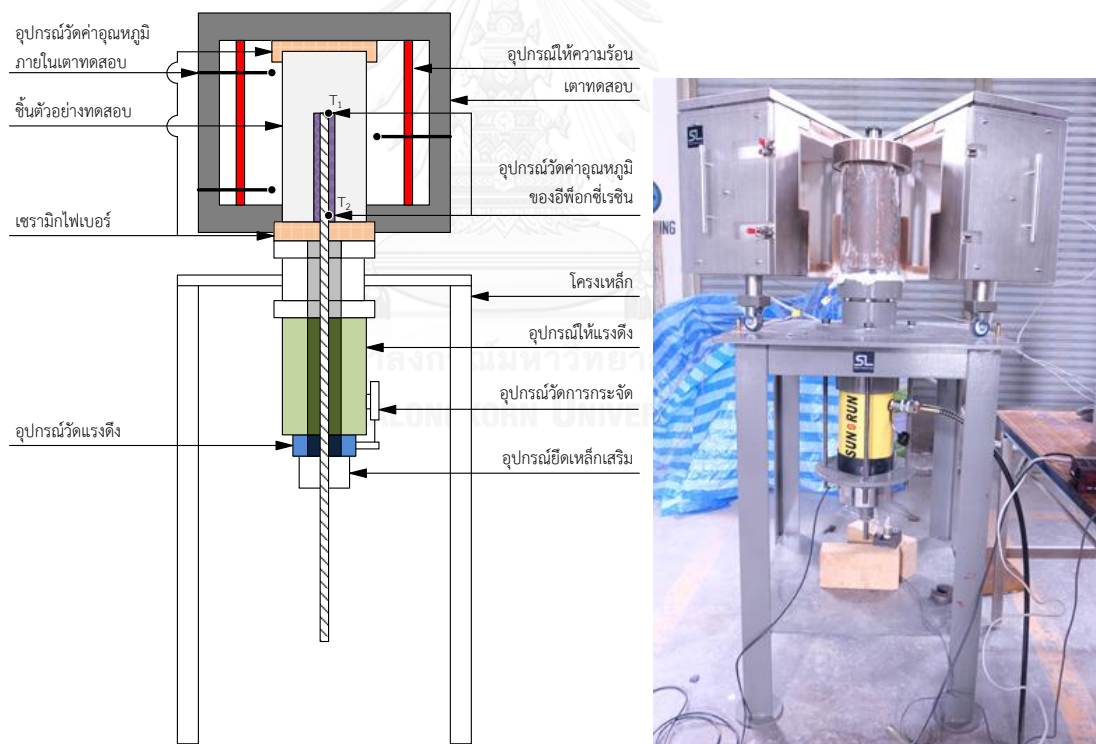
ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
4		เมื่อคอนกรีตอายุ 7 วัน เจาะรูด้วยสว่านสำหรับการติดตั้งเหล็กเสริม
5		ขัดและเป่าลมเพื่อทำความสะอาดรูเจาะ
6		ฉีดอีพ็อกซีเรซินที่ผสมแล้วลงในรูเจาะ

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) การเตรียมชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ขั้นตอนที่	ภาพประกอบ	คำอธิบายภาพประกอบ
7		<p>เสียบเหล็กลงไปในรูเจาะ และรอให้อีพ็อกซีเรซิน แข็งตัว</p>
8		<p>บ่มชิ้นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 28 วันก่อนการทดสอบ การดึงออก</p>

3.2 รายละเอียดการทดสอบ

รูปที่ 3.2 แสดงรายละเอียดการติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบการดึงออกภายในเตาทดสอบซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ให้แรงดึงคงที่เพื่อให้เกิดหน่วยแรงยึดเหนี่ยวตามค่าที่กำหนด จากนั้นจึงทำการให้ความร้อนด้วยเตาทดสอบโดยควบคุมอัตราการเพิ่มค่าอุณหภูมิคงที่ประมาณ $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที่}$ จนกระทั่งอุณหภูมิภายในเตาทดสอบสูงถึง 500°C และควบคุมค่าอุณหภูมิภายในเตาทดสอบให้คงที่จนกระทั่งชิ้นตัวอย่างทดสอบเกิดการวิบัติ โดยพิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของฮีทค็อกซ์เรซินที่วัดได้บริเวณปลายเหล็กเสริม (T_1) และบริเวณผิวคอนกรีต (T_2) เป็นค่าอุณหภูมิวิกฤติสำหรับค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่กำหนด การวิบัติของชิ้นตัวอย่าง พิจารณาจากการกระจัดของเหล็กเสริม ซึ่งได้จากอุปกรณ์วัดการกระจัด (LVDT) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยกำหนดเกณฑ์การวิบัติจากการกระจัดสูงสุดที่ 10 มม. ตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของชิ้นตัวอย่างสำหรับการทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิสูงที่ทำการศึกษา



รูปที่ 3.2 การติดตั้งชิ้นตัวอย่างทดสอบการดึงออกภายใต้อุณหภูมิสูง

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดการทดสอบการดึงออกอีพ็อกซีเรซิน A

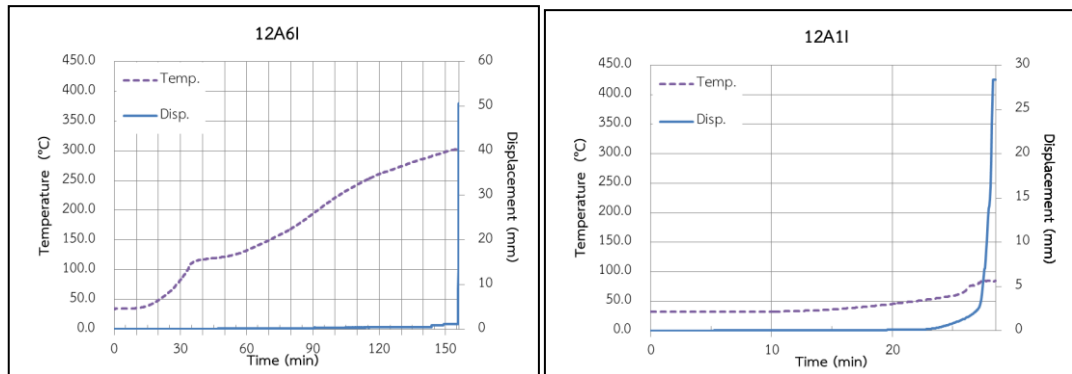
เส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริม (มม.)	หน่วยแรง ยึดเหนี่ยว (MPa)	แรงดึง (kN)	เส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริม (มม.)	หน่วยแรง ยึดเหนี่ยว (MPa)	แรงดึง (kN)
12	7	31.7	20	7	88.0
	3.5	15.8		3.5	44.0
	1.75	7.9		1.75	22.0
	0.875	4.0		0.875	11.0
	0.4375	2.0		0.4375	5.5
	0.21875	1.0		0.21875	2.7
16	7	56.3	25	7	137.4
	3.5	28.1		3.5	68.7
	1.75	14.1		1.75	34.4
	0.875	7		0.875	17.2
	0.4375	3.5		0.4375	8.6
	0.21875	1.8		0.21875	4.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดการทดสอบการดึงออกอีพ็อกซีเรซิน B

เส้นผ่านศูนย์กลาง เหล็กเสริม (มม.)	หน่วยแรง ยึดเหนี่ยว (MPa)	แรงดึง (kN)
20	7	88.0
	3.5	44.0
	1.75	22.0
	0.875	11.0
	0.4375	5.5
	0.21875	2.7

การทดสอบการดึงออกสำหรับชิ้นตัวอย่างทดสอบทั้งหมด 60 ชิ้นตัวอย่าง (ทดสอบซ้ำ 1 ครั้ง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของผลการทดสอบ) ซึ่งแต่ละชิ้นตัวอย่างประกอบด้วยตัวแปรต้น 3 ตัวแปร หน่วยแรงยึดเหนี่ยว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมเจาะเสียบ และชนิดของอีพ็อกซีเรซิน โดยตัวอย่างอีพ็อกซีเรซิน A ทดสอบด้วยหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 6 ค่า ได้แก่ 7 MPa 3.5 MPa 1.75 MPa 0.875 MPa 0.4375 MPa และ 0.21875 MPa สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ค่า ได้แก่ 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ส่วนอีพ็อกซีเรซิน B ทดสอบด้วยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ A สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดสอบจากการใช้อีพ็อกซีเรซินต่างชนิดกัน

การพิจารณาค่าอุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ ดังแสดงตัวอย่างใน รูปที่ 3.3 (ก) สำหรับชิ้นตัวอย่าง 12A6I (อีพ็อกซีเรซิน A/เหล็กเสริมขนาด 12 มม./หน่วยแรงยึดเหนี่ยว 0.21875 MPa) ซึ่งแสดงการวิบัติที่เวลา 156 นาที และรูปที่ 3.3 (ข) สำหรับชิ้นตัวอย่าง 12A1I (อีพ็อกซีเรซิน A/เหล็กเสริมขนาด 12 มม./หน่วยแรงยึดเหนี่ยว 7 MPa) ซึ่งแสดงการวิบัติที่เวลา 28 นาที ทั้งนี้ จากผลการทดสอบชิ้นตัวอย่างทั้งหมดพบว่าเมื่อระยะเวลาการกระจัดของเหล็กเสริมมีค่าประมาณ 3-5 มม. ชิ้นตัวอย่างไม่สามารถรับแรงดึงคงที่ที่กำหนดได้ ดังนั้นการพิจารณาการวิบัติจากค่าการกระจัดสูงสุดไม่เกิน 10 มม. จึงเป็นเกณฑ์ที่เหมาะสม



(ก)

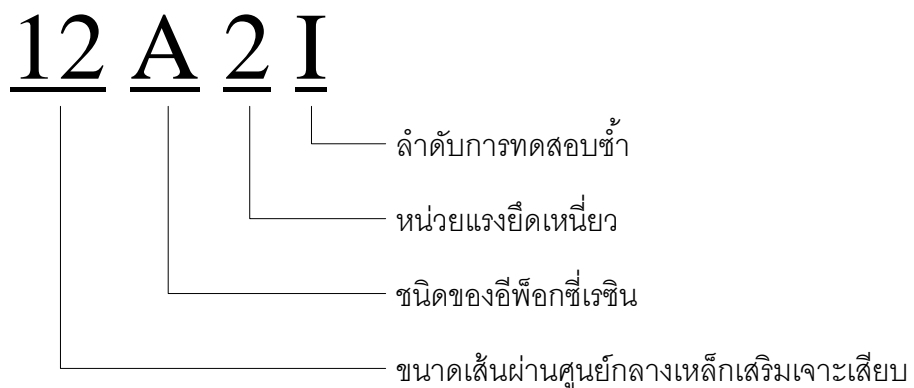
(ข)

รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ :

(ก) 12A6I (แรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 0.21875 MPa) และ (ข) 12A1I (แรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 7 MPa)

3.3 รหัสขึ้นตัวอย่าง

เนื่องจากในการศึกษานี้มีขึ้นตัวอย่างทดสอบจำนวนมาก จึงกำหนดรหัสขึ้นตัวอย่างเพื่อความสะดวกในการจัดการข้อมูล โดยรหัสดังกล่าวประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ชนิดของอีพ็อกซีเรซิน หน่วยแรงยึดเหนี่ยว และลำดับการทดสอบซ้ำ รูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างรหัสขึ้นตัวอย่าง



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างรหัสขึ้นตัวอย่าง

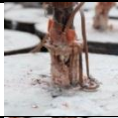
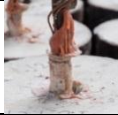






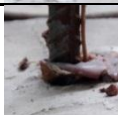
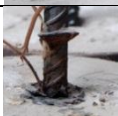

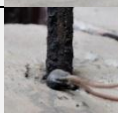
รหัสชั้นตัวอย่างแต่ละตำแหน่งแสดงความหมายตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม
 - 12 หมายถึงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม.
 - 16 หมายถึงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม.
 - 20 หมายถึงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.
 - 25 หมายถึงเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มม.
- ชนิดของอีพ็อกซีเรซิน
 - A หมายถึงอีพ็อกซีเรซินชนิด A
 - B หมายถึงอีพ็อกซีเรซินชนิด B
- หน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่ใช้ในการทดสอบ
 - 1 หมายถึงหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 7 MPa
 - 2 หมายถึงหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 3.5 MPa
 - 3 หมายถึงหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 1.75 MPa
 - 4 หมายถึงหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 0.875 MPa
 - 5 หมายถึงหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 0.4375 MPa
 - 6 หมายถึงหน่วยแรงยึดเหนี่ยว 0.21875 MPa
- ลำดับของการทดสอบซ้ำ
 - I หมายถึงชั้นตัวอย่างที่ 1
 - II หมายถึงชั้นตัวอย่างที่ 2













3.4 ผลการทดสอบการดึงออก

ตารางที่ 3.4 ถึง 3.8 แสดงหน่วยแรงยึดเหนี่ยว อุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature) และลักษณะการวิบัติ (failure mode) ของแต่ละชั้นตัวอย่าง

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.




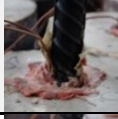





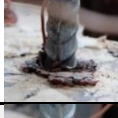

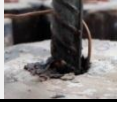
รหัสตัวอย่าง	หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (τ) (MPa)	อุณหภูมิวิกฤติ ($^{\circ}\text{C}$)	ลักษณะการวิบัติ
12A1I	7	84.3	
12A1II	7	65.7	
12A2I	3.5	89.2	
12A2II	3.5	96.8	
12A3I	1.75	259.8	
12A3II	1.75	256.9	
12A4I	0.875	279.7	
12A4II	0.875	279.0	
12A5I	0.4375	293.3	
12A5II	0.4375	301.4	
12A6I	0.21875	302.9	
12A6II	0.21875	316.3	

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.

รหัสตัวอย่าง	หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (τ) (MPa)	อุณหภูมิวิกฤติ ($^{\circ}\text{C}$)	ลักษณะการวิบัติ
16A1I	7	93.9	
16A1II	7	82.2	
16A2I	3.5	86.0	
16A2II	3.5	98.2	
16A3I	1.75	247.6	
16A3II	1.75	217.0	
16A4I	0.875	278.7	
16A4II	0.875	264.7	
16A5I	0.4375	305.5	
16A5II	0.4375	308.4	
16A6I	0.21875	311.0	
16A6II	0.21875	318.4	












ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัสตัวอย่าง	หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (τ)	อุณหภูมิวิกฤติ	ลักษณะการวิบัติ
--------------	-------------------------------	----------------	-----------------

	(MPa)	(°C)	
20A1I	7	64.3	
20A1II	7	62.0	
20A2I	3.5	66.2	
20A2II	3.5	65.4	
20A3I	1.75	156.5	
20A3II	1.75	171.7	
20A4I	0.875	276.7	
20A4II	0.875	280.9	
20A5I	0.4375	296.6	
20A5II	0.4375	298.0	
20A6I	0.21875	277.0	
20A6II	0.21875	305.8	













ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.

รหัสตัวอย่าง	หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (τ) (MPa)	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)	ลักษณะการวิบัติ

25A1I	7	57.6	
25A1II	7	58.7	
25A2I	3.5	76.5	
25A2II	3.5	62.7	
25A3I	1.75	111.2	
25A3II	1.75	119.2	
25A4I	0.875	254.2	
25A4II	0.875	264.7	
25A5I	0.4375	303.7	
25A5II	0.4375	305.5	
25A6I	0.21875	308.9	
25A6II	0.21875	326.1	

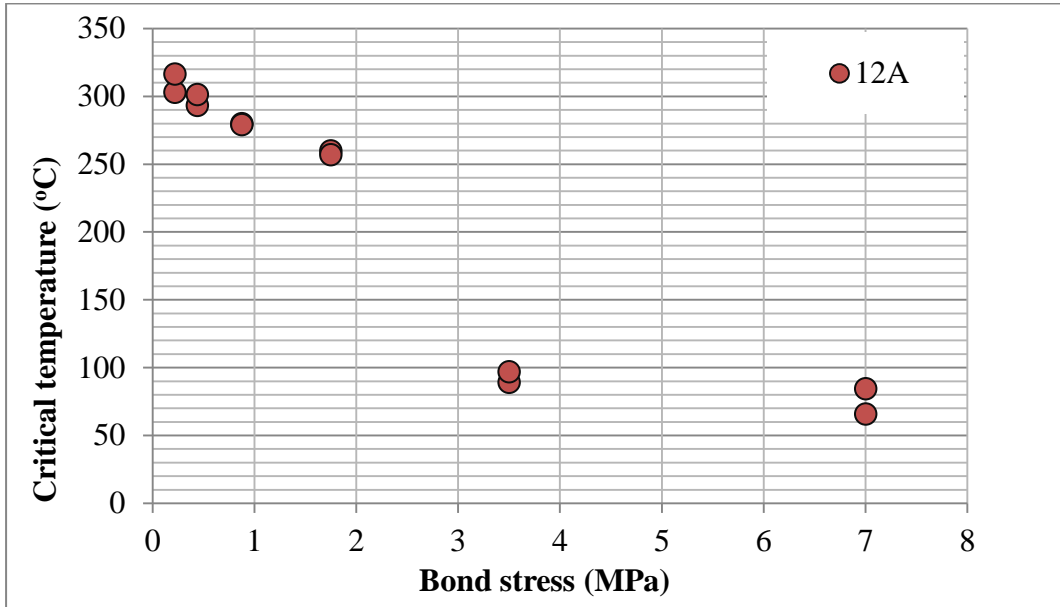
ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัสตัวอย่าง	หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (τ) (MPa)	อุณหภูมิวิกฤติ ($^{\circ}\text{C}$)	ลักษณะการวิบัติ
--------------	--	--	-----------------

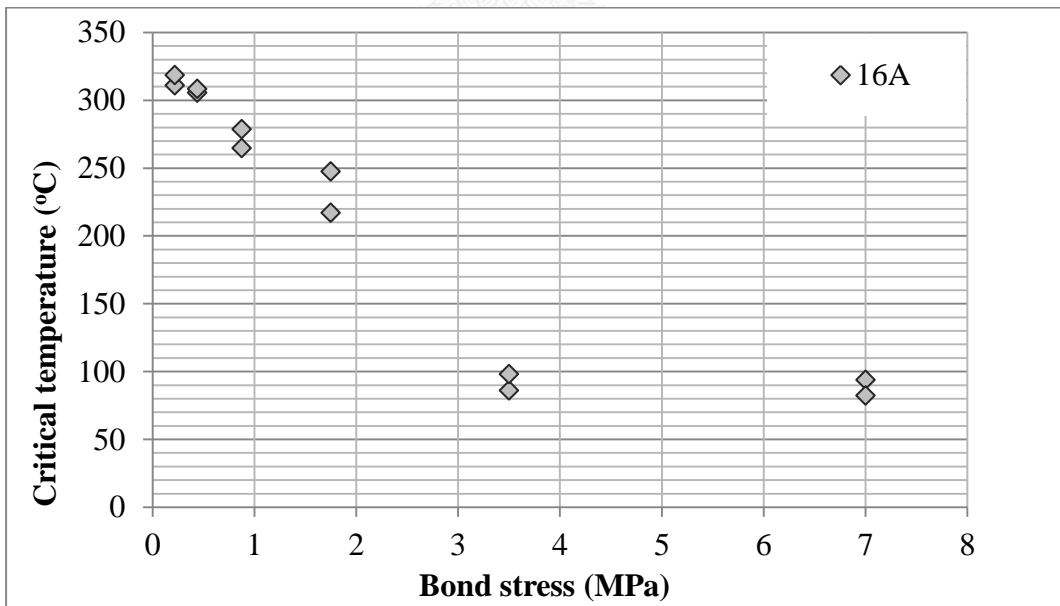
20B1I	7	52.9	
20B1II	7	57.2	
20B2I	3.5	85.2	
20B2II	3.5	90.5	
20B3I	1.75	105.1	
20B3II	1.75	119.0	
20B4I	0.875	255.2	
20B4II	0.875	252.0	
20B5I	0.4375	274.7	
20B5II	0.4375	271.3	
20B6I	0.21875	299.6	
20B6II	0.21875	288.4	

จากผลการทดสอบที่แสดงในตารางข้างต้น พบว่าลักษณะการวิบัติของชิ้นตัวอย่างทั้งหมดเป็นการวิบัติแบบเฉือน (shearing-off failure) โดยการวิบัติเกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเหล็กเสริมกับอีพ็อกซีเรซิน ระหว่างอีพ็อกซีเรซินกับคอนกรีต หรือผสมระหว่างสองแบบดังกล่าวในช่วงความยาวของระยะฝังเหล็กเสริม

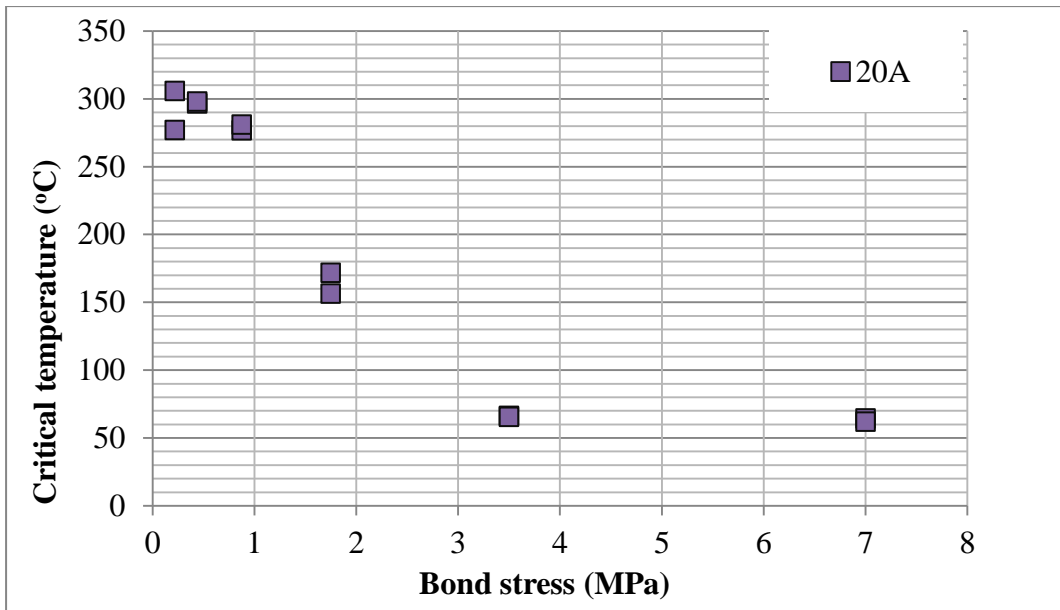
นอกจากนี้ ข้อมูลในตารางที่ 3.5 – 3.9 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 3.5 – 3.9



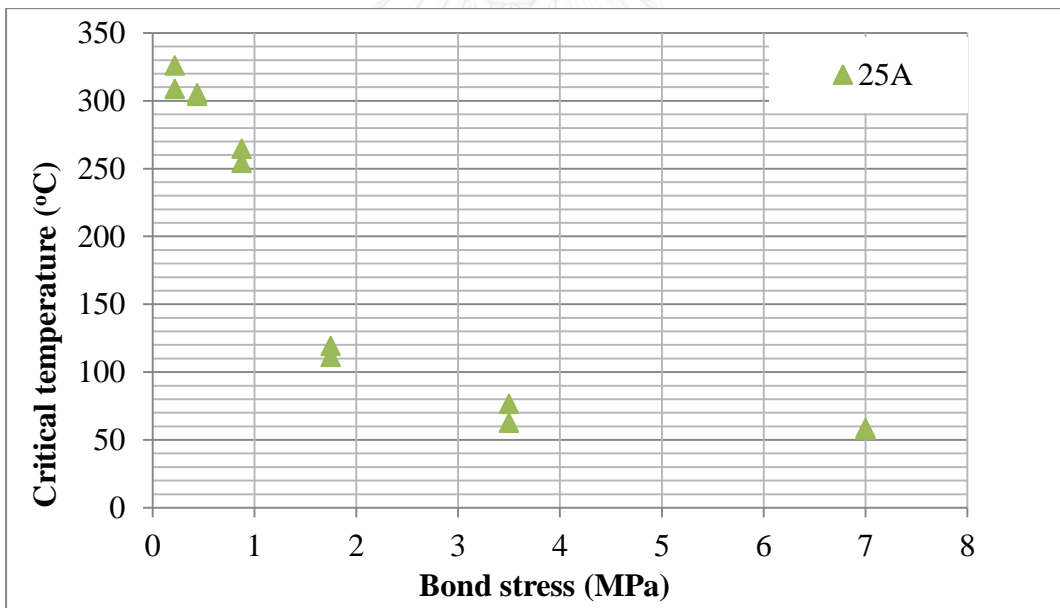
รูปที่ 3.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.



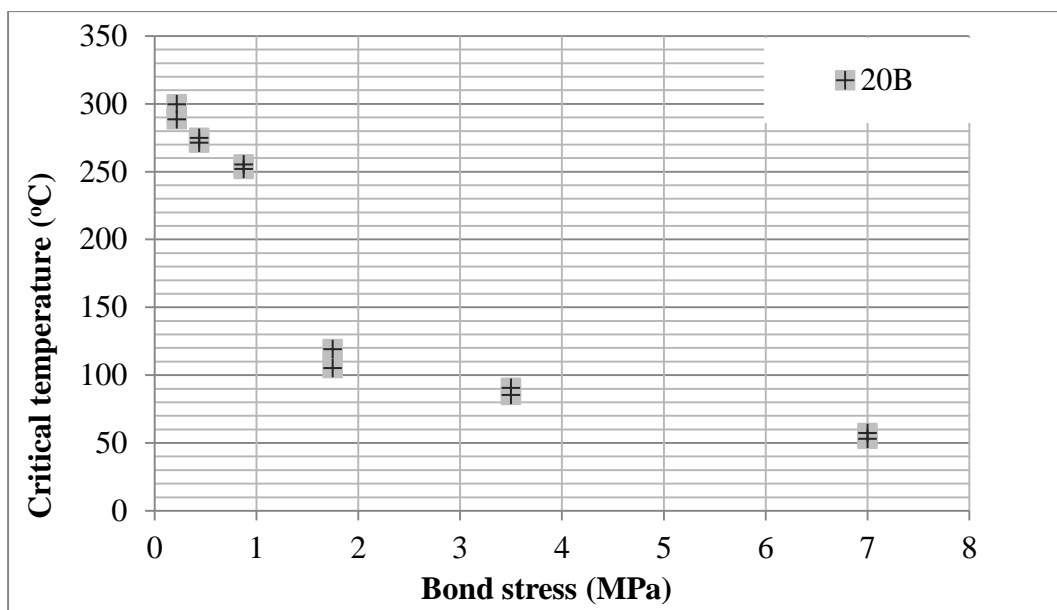
รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤตกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.



รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.

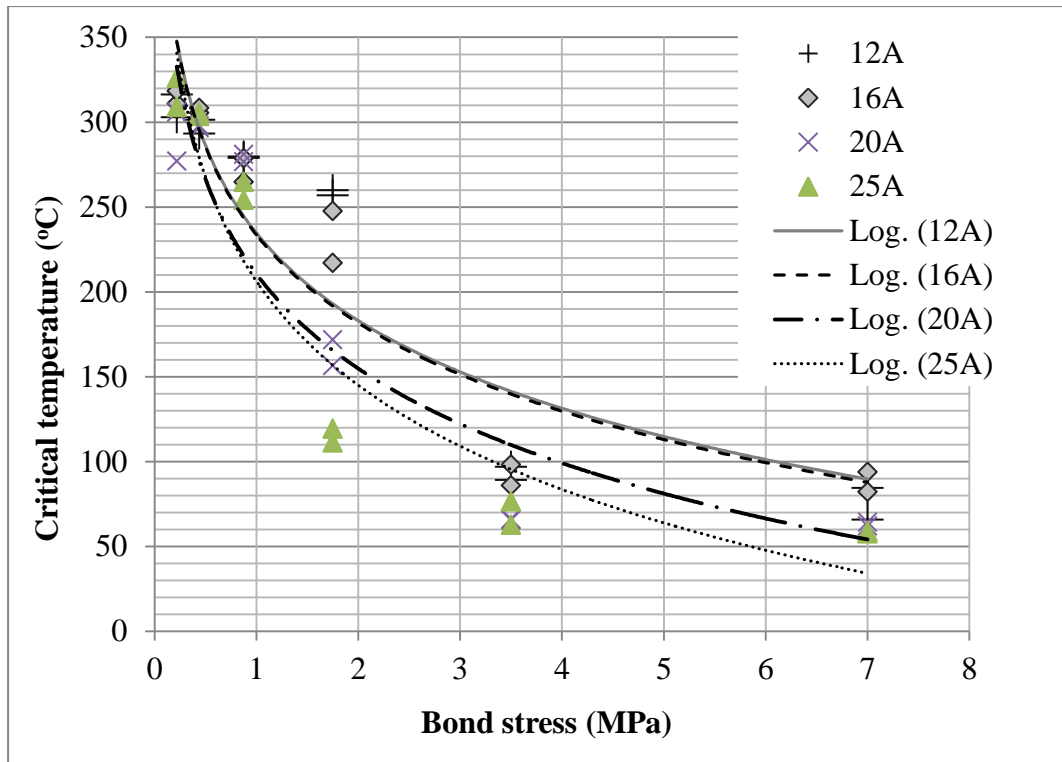


รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดสอบการดึงออก

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวประยุกต์ใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) ด้วยสมการลอการิทึม (logarithmic) เพื่อพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างของความสัมพันธ์ดังกล่าว เนื่องจากผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้น และชนิดของอีพ็อกซีเรซิน

รูปที่ 3.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากการปรับเส้นโค้ง กรณีอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาด โดยที่สมการปรับเส้นโค้งแสดงดังตารางที่ 3.9 ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 100% แสดงว่าสมการปรับเส้นโค้งเหมาะสมกับชุดข้อมูลอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่ R^2 เท่ากับ 0% แสดงให้เห็นว่าสมการปรับเส้นโค้งไม่เหมาะสมกับข้อมูลโดยสิ้นเชิง



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากการปรับเส้นโค้ง กรณีอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมแต่ละขนาด

ตารางที่ 3.9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสำหรับ อีพ็อกซีเรซิน A

ชุดข้อมูล	สมการปรับเส้นโค้ง	R ² (%)
12A	$T_{cr} = -74.48\ln(\tau) + 234.62$	82.84
16A	$T_{cr} = -74.91\ln(\tau) + 233.56$	88.24
20A	$T_{cr} = -80.41\ln(\tau) + 210.53$	87.56
25A	$T_{cr} = -88.46\ln(\tau) + 206.25$	91.62

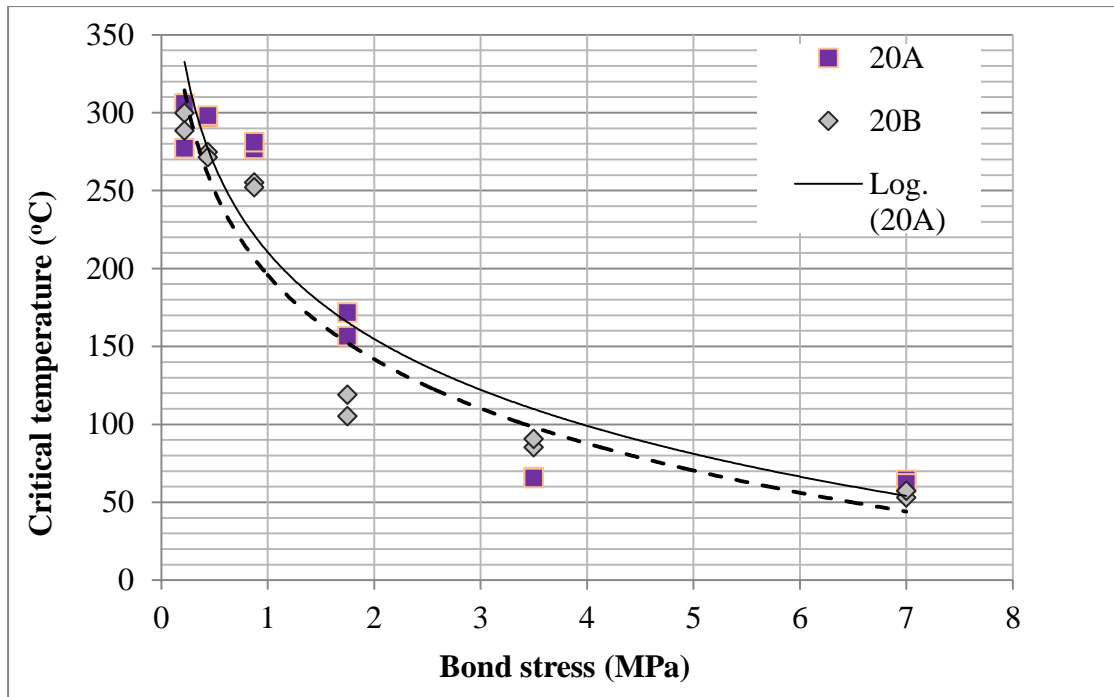
T_{cr} : อุณหภูมิวิกฤติ

τ : หน่วยแรงยึดเหนี่ยว

จากรูปที่ 3.10 และ ตารางที่ 3.9 พบว่าค่าอุณหภูมิวิกฤติของอีพ็อกซีเรซิน A มีแนวโน้มลดลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นกรณีของเหล็กเสริมขนาด 12 มม. และ 16 มม. ซึ่งแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้ เมื่อลองทำการปรับเส้นโค้งโดยใช้ข้อมูลผลการทดสอบทั้งหมดของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมทุกขนาดจะได้สมการดังนี้

$$T_{cr} = -79.57\ln(\tau) + 221.24 \quad (2)$$

โดยที่ค่า R² เท่ากับ 85.71% ซึ่งน้อยกว่าค่า R² ในตารางที่ 3.9 สำหรับเหล็กเสริมทุกขนาด ยกเว้นเหล็กเสริมขนาด 12 มม. ซึ่งแสดงให้เห็นผลกระทบของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมต่อความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวอย่างชัดเจน



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวจากการปรับเส้นโค้งกรณีเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A และ B

รูปที่ 3.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว จากการปรับเส้นโค้งกรณีเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A และ B โดยที่สมการปรับเส้นโค้งสำหรับอีพ็อกซีเรซิน B สามารถเขียนในรูปสมการ

$$T_{cr} = -77.98 \ln(\tau) + 195.86 \quad (3)$$

โดยที่ R^2 เท่ากับ 91.50% ทั้งนี้ ค่าอุณหภูมิวิกฤติที่ทำนายโดยสมการปรับเส้นโค้งสำหรับอีพ็อกซีเรซิน A และ B แตกต่างกันไม่เกิน 15°C ในช่วงของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่พิจารณา ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชนิดของอีพ็อกซีเรซินที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลต่อความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวอย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาวิเคราะห์หกลไกที่สามารถอธิบายแนวโน้มของอุณหภูมิวิกฤติของอีพ็อกซีเรซินที่ลดลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้น พบว่าการวิบัติแบบเฉือน (shearing-off failure) ของชิ้นตัวอย่างสามารถอธิบายโดยอ้างอิงงานวิจัยที่ผ่านมาของ L. Bouazaoui และ A. Li [3] ซึ่งพิจารณาหน่วยแรงยึดเหนี่ยววิกฤติที่ส่งผลให้เกิดการวิบัติแบบเฉือนของอีพ็อกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมตามสมการ

$$\frac{2\tau_c}{t\sigma_s} = \frac{\alpha_1}{\sinh(\alpha_1 L)} \left(1 - \frac{\alpha_2}{\alpha_1^2} (1 - \cosh(\alpha_1 L)) \right) \quad (4)$$

โดยที่ $\alpha_1^2 = \frac{2G_a}{t^2} \left(\frac{1}{E_s} + \frac{t^2}{E_a(r^2 - t^2)} \right)$

$$\alpha_2 = \frac{2G_a}{E_a(r^2 - t^2)}$$

τ_c แทนหน่วยแรงเฉือนวิกฤติของอีพ็อกซีเรซิน (MPa)

t แทนความหนาของอีพ็อกซีเรซิน (mm)

E_a แทนมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของอีพ็อกซีเรซิน (MPa)

พิจารณาให้มีค่าเท่ากับ 4,442 MPa ที่อุณหภูมิปกติ (จากตารางที่ 1.1)

E_s แทนมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นของเหล็กเสริม (MPa)

พิจารณาให้มีค่าคงที่เท่ากับ 200,000 MPa ในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 325°C

r แทนรัศมีของเหล็กเสริม (mm)

σ_s แทนหน่วยแรงดึงในเหล็กเสริม (MPa) คำนวณจากแรงดึงออกที่กระทำหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเสริม (F/A_s)

L แทนระยะฝังของเหล็กเสริม (mm)

G_a แทนมอดูลัสเฉือนของอีพ็อกซีเรซิน (MPa)

การศึกษานี้พิจารณาให้ค่า E_a และ G_a แปรผันตามอุณหภูมิที่เพิ่มดังสมการ

$$G_a = -6.2929T_a + 2015.3 \quad (5)$$

$$E_a = -2.025T_a + 4505.7 \quad (6)$$

โดยที่ T_a แทนอุณหภูมิของอีพ็อกซีเรซิน (°C) ทั้งนี้ สมการที่ (5) และ (6) ได้จากการปรับเทียบค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่นและมอดูลัสเฉือนของอีพ็อกซีเรซินที่อุณหภูมิปกติ ($E_a = 4,442 \text{ MPa}$ และ $G_a = 1760 \text{ MPa}$) โดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา [17]

จากสมการที่ (4) สามารถคำนวณหน่วยแรงยึดเหนี่ยววิกฤติของอีพ็อกซีเรซินสำหรับกรณีที่มีแรงดึงกระทำที่เหล็กเสริมซึ่งส่งผลให้เกิดหน่วยแรงยึดเหนี่ยวคงที่ 7 MPa ในช่วงอุณหภูมิ 25°C - 325°C ดังแสดงในตารางที่ 3.10 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยววิกฤติของอีพ็อกซีเรซินมีแนวโน้มลดลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นสำหรับทุกค่าอุณหภูมิที่พิจารณา

ตารางที่ 3.10 หน่วยแรงยึดเหนี่ยววิกฤติของอีพ็อกซีเรซิน (MPa) ที่คำนวณตามสมการที่ (4)

อุณหภูมิ (°C)	หน่วยแรงยึดเหนี่ยววิกฤติ (MPa)			
	DB 12	DB 16	DB 20	DB 25
25	41.65	28.58	21.07	15.25
75	38.46	26.43	19.50	14.13
125	34.78	23.93	17.68	12.82
175	30.42	20.95	15.49	11.26
225	24.98	17.22	12.75	9.28
275	17.47	12.06	8.94	6.51
300	11.78	8.14	6.04	4.40

ทั้งนี้ จากการวิเคราะห์ข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในตารางที่ 3.9 มีความเหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินความต้านทานการดึงออกบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตที่สัมผัสเพลิงไหม้ต่อไป

บทที่ 4

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อ ระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตภายใต้ภาวะเพลิงไหม้มาตรฐานประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ โดยใช้โปรแกรม ANSYS 15.0 โดยพิจารณาการนำความร้อนชั่วคราว (transient heat conduction) ตามสมการ

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + S \quad (7)$$

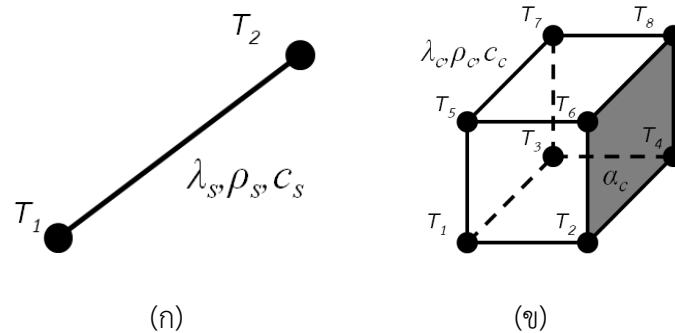
- โดยที่ ρ แทนความหนาแน่น (kg/m^3)
 c แทนความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)
 k แทนสภาพนำความร้อน ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)
 S แทนความร้อนที่เกิดภายในวัสดุต่อหน่วยเวลา (W)
 T แทนอุณหภูมิ ($^\circ\text{C}$)
 t แทนเวลา (sec)

4.1 แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน

แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตภายใต้ภาวะเพลิงไหม้มาตรฐาน พิจารณาลักษณะพื้นที่ปิดล้อมซึ่งเกิดเพลิงไหม้ (fire compartment) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยพิจารณาเฉพาะส่วนของพื้นคอนกรีตถึงกึ่งกลางช่วงความยาวและผนังคอนกรีตถึงกึ่งกลางความสูงของชั้น

แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนประกอบด้วย พื้นคอนกรีตซึ่งมีความยาว 2000 มม. ความหนา 200 มม. และกว้าง 1000 มม. และผนังคอนกรีตซึ่งมีความหนา 300 มม. ความสูง 3200 มม. และกว้าง 1000 มม. โดยพื้นคอนกรีตเชื่อมต่อกับผนังคอนกรีตที่ตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของผนังคอนกรีต กำหนดความยาวของเหล็กเสริม 70 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม โดยระยะห่างของเหล็กเสริมในพื้นที่คอนกรีต 60 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม และระยะห่างของเหล็กเสริมในผนังคอนกรีต 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม โดยอยู่กึ่งกลางความกว้างของผนังคอนกรีต กำหนดให้ความร้อนเข้าสู่แบบจำลองด้านที่สัมผัสเพลิงไหม้ในรูปของการเพิ่มค่าอุณหภูมิตามเวลาตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 รายละเอียดของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4.1

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS พิจารณาใช้ชิ้นส่วนประเภท SOLID70 สำหรับคอนกรีตและ LINK33 สำหรับเหล็กเสริม รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะของชิ้นส่วน SOLID70 และ LINK33 ซึ่งแต่ละจุดต่อประกอบด้วยระดับชั้นความเร็ว 1 ค่า ได้แก่ อุณหภูมิบริเวณจุดต่อ โดยที่ λ_s คือสภาพนำความร้อนของเหล็กเสริม ρ_s คือความหนาแน่นของเหล็กเสริม c_s คือความร้อนจำเพาะของเหล็กเสริม λ_c คือสภาพนำความร้อนของคอนกรีต ρ_c คือความหนาแน่นของคอนกรีตและ c_c คือความร้อนจำเพาะของคอนกรีต (ดูรายละเอียดคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุในข้อ 4.2)



รูปที่ 4.2 ลักษณะของชิ้นส่วน : (ก) LINK33 สำหรับเปลือกเสริม (ข) SOLID70 สำหรับคอนกรีต

4.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุ

การศึกษานี้พิจารณาคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตและเหล็กเสริม ได้แก่ สภาพนำความร้อน ความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสภาพเปล่งรังสี (emissivity) ของคอนกรีตบริเวณผิวตามมาตรฐาน EN 1992-1-2 [6] และ EN 1993-1-2 [7] ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ ค่าความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีต ($C_{p,c}^{peak}$) ในตารางที่ 4.1 ในช่วงอุณหภูมิ 100-200 °C พิจารณาตามปริมาณความชื้นของคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ 25 W/m²°C บริเวณพื้นผิวคอนกรีตที่สัมผัสเพลิงไหม้ และ 4 W/m²°C บริเวณพื้นผิวคอนกรีตที่ไม่สัมผัสเพลิงไหม้ และสภาพเปล่งรังสีของคอนกรีตเท่ากับ 0.7

สำหรับคุณสมบัติเชิงความร้อนของอีพ็อกซีเรซินขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนของวัสดุผสมภายในอีพ็อกซีเรซินซึ่งมีค่าผันแปรค่อนข้างสูง [8-10] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีต บริเวณจุดต่อที่ทำการวิเคราะห์มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับคอนกรีตและเหล็กเสริม ดังนั้นการศึกษานี้จึงไม่พิจารณาอีพ็อกซีเรซินในการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อน

จากตารางที่ 4.1 และ 4.3 จะเห็นได้ว่ามาตรฐาน EN 1992-1-2 กำหนดสภาพนำความร้อนของคอนกรีตในรูปขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง ในขณะที่ ค่าความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีตผันแปรตามปริมาณความชื้น ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับเทียบค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตดังกล่าวในแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน โดยอ้างอิงผลการทดสอบจากงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของแบบจำลองในการทำนายการกระจายค่าอุณหภูมิบริเวณจุดต่อของโครงสร้าง เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตต่อไป

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตปกติมวลรวมเนื้อปูน

อุณหภูมิของวัสดุ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	สภาพนำความร้อน (W/m°C)	ความร้อนจำเพาะ (J/kg°C)
20 – 100	$\rho_{c,20^\circ\text{C}} = 2400$	ขีดจำกัดบน : $2.0 - 0.2451 \left(\frac{T_c}{100} \right)$ $+ 0.0107 \left(\frac{T_c}{100} \right)^2$	900
100 – 115			$C_{p,c}^{peak}$
115 – 200	$\rho_{c,20^\circ\text{C}} \left(1 - 0.02 \frac{T_c - 115}{85} \right)$	ขีดจำกัดล่าง : $1.36 - 0.136 \left(\frac{T_c}{100} \right)$ $+ 0.0057 \left(\frac{T_c}{100} \right)^2$	$\left(\frac{1000 - C_{p,c}^{peak}}{85} \right) T_c$ $+ \frac{200}{85} (C_{p,c}^{peak} - 575)$
200 – 400	$\rho_{c,20^\circ\text{C}} \left(0.98 - 0.03 \frac{T_c - 200}{200} \right)$		$900 + \frac{T_c}{2}$
400 – 1200	$\rho_{c,20^\circ\text{C}} \left(0.95 - 0.07 \frac{T_c - 400}{800} \right)$		1100

T_c : อุณหภูมิของคอนกรีต

$\rho_{c,20^\circ\text{C}}$: ความหนาแน่นของคอนกรีตที่อุณหภูมิปกติ (20°C)

$C_{p,c}^{peak}$: ความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีต

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเชิงความร้อนของเหล็กเสริม

อุณหภูมิของวัสดุ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	สภาพนำความร้อน (W/m°C)	ความร้อนจำเพาะ (J/kg°C)
20 – 600	7850	$54 - 3.33 \times 10^{-2} T_s$	$425 + 0.773 T_s - 1.69 \times 10^{-3} T_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} T_s^3$
600 – 735			$666 + \frac{13002}{738 - T_s}$
735 – 800		27.3	$545 + \frac{17820}{T_s - 731}$
800 – 900			
900 – 1200			650

T_s : อุณหภูมิของเหล็กเสริม

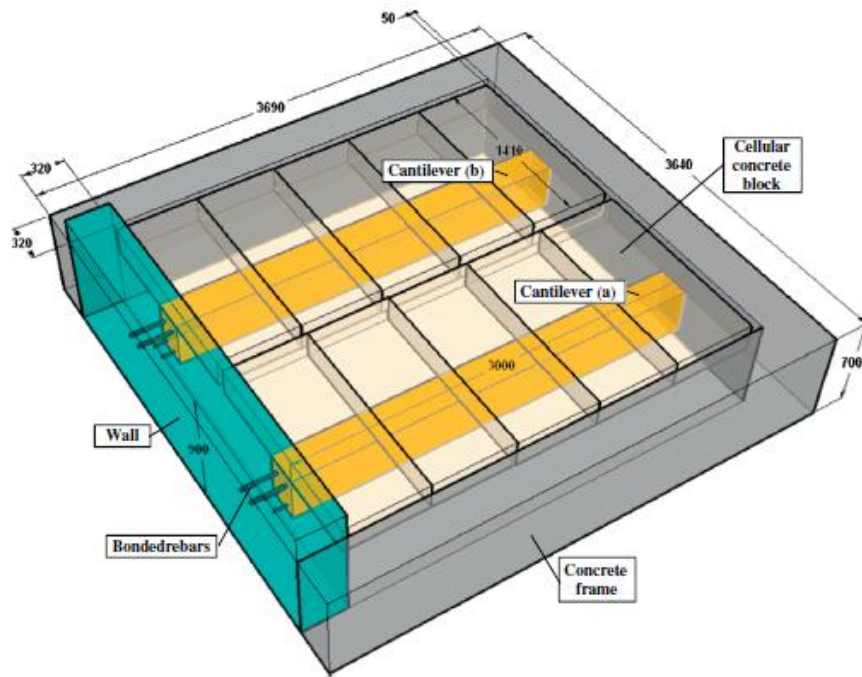
ตารางที่ 4.3 ค่า $C_{p,c}^{peak}$ ตามปริมาณความชื้น

ปริมาณความชื้น (%)	$C_{p,c}^{peak}$ (J/kg-K)
0.0	900
1.5	1470
3.0	2020
10.0	5600

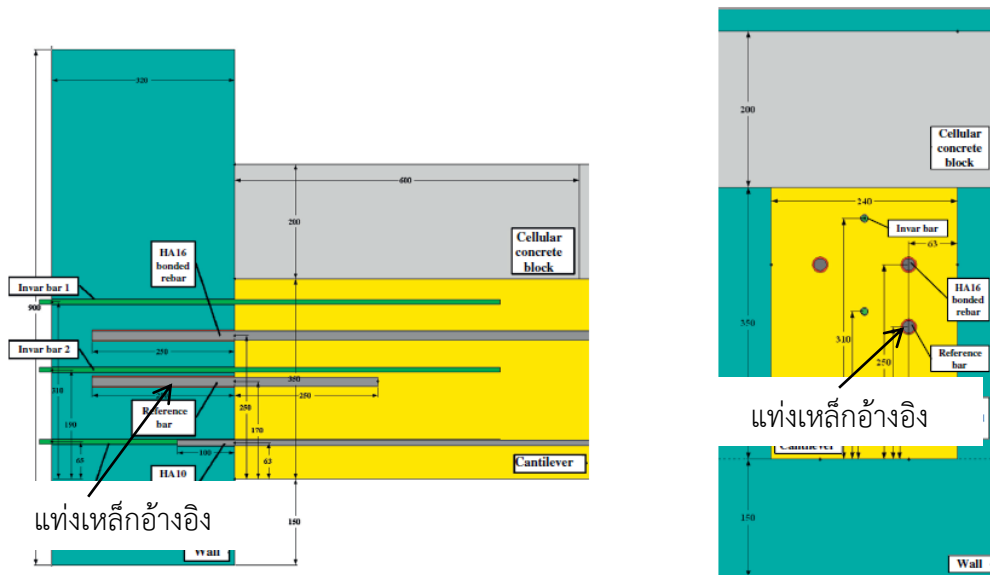
4.3 การเปรียบเทียบแบบจำลองกับผลการทดสอบขนาดจริงจากงานวิจัยที่ผ่านมา

งานวิจัยที่ผ่านมา [18] ได้นำเสนอผลการทดสอบจุดต่อระหว่างผนังกับคานที่เชื่อมโดยการเจาะเสียบเหล็กเสริมด้วยอีพ็อกซีเรซินในภาวะเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834 ลักษณะชื้นตัวอย่างเป็นคาน 2 ชั้นเชื่อมกับผนังด้านเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4.3 คอนกรีตมีกำลังอัดเฉลี่ยที่ 90 วัน เท่ากับ 33.0 MPa และความหนาแน่นคอนกรีตเท่ากับ 2181 กก./ลบ.ม. ที่ 90 วัน คานแต่ละชั้นเชื่อมกับผนังด้วยเหล็กเสริม 4 เส้นและยึดด้วยอีพ็อกซีเรซินชนิดเดียวกัน ส่วนบนของคานเชื่อมด้วยเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มม. เจาะรูกว้าง 20 มม. ลึก 250 มม. ในขณะที่ส่วนล่างของคานเชื่อมด้วยเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. เจาะรูกว้าง 12 มม. ลึก 100 มม.

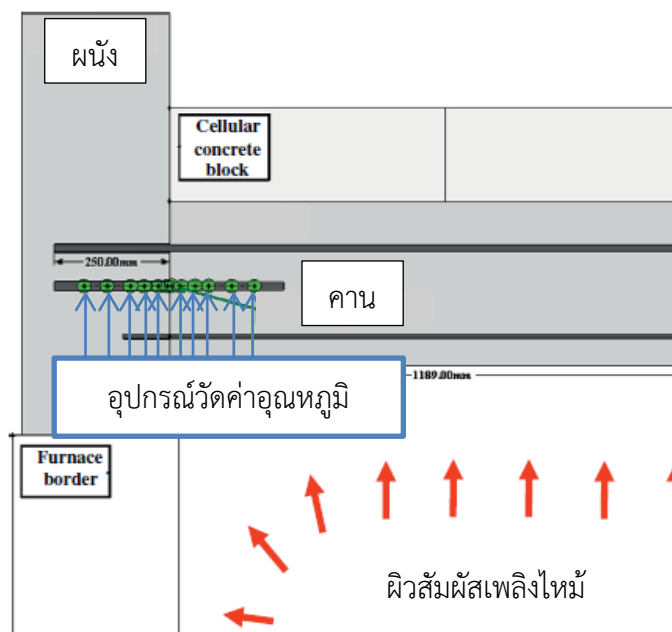
รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งเหล็กเสริมทั้ง 4 เส้น และแท่งเหล็กอ้างอิงที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิซึ่งทำการติดตั้งที่ระยะลึก 5 มม. 25 มม. 55 มม. 85 มม. 135 มม. และ 185 มม. จากผิวบริเวณรอยต่อระหว่างผนังและคานดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.3 ชั้นตัวอย่างทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา [18]



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งตำแหน่งเหล็กอ้างอิง

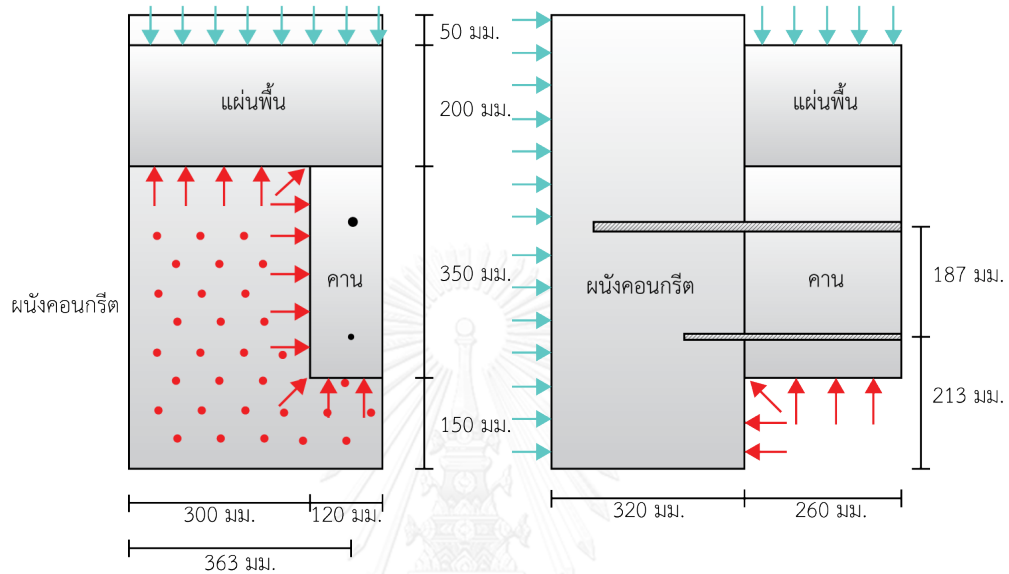


รูปที่ 4.5 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าอุณหภูมิบนแท่งเหล็กอ้างอิง

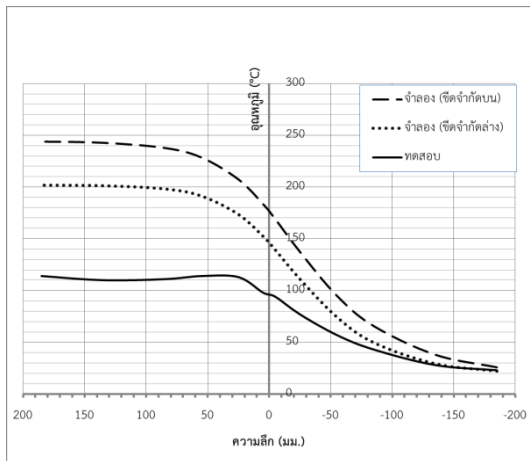
แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนที่ใช้ในการพิจารณาเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตประกอบด้วย คอนกรีตซึ่งมีความยาว 260 มม. ความกว้าง 120 มม. (ครึ่งหนึ่งของขนาดจริง) และความลึก 350 มม. ผนังคอนกรีตซึ่งมีความหนา 320 มม. ความกว้าง 420 มม. และความสูง 750 มม. และพื้นคอนกรีตซึ่งมีความยาว 260 มม. ความกว้าง 420 มม. และความหนา 350 มม. คอนกรีตเชื่อมต่อกับผนังคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยกำหนดความยาวของเหล็กเสริมเท่ากับ 510 มม. สำหรับเหล็กเสริมบน และ 360 มม. สำหรับเหล็กเสริมล่าง รวมทั้งกำหนดให้ความร้อนเข้าสู่แบบจำลองด้านที่สัมผัสเพลิงไหม้ในรูปของการเพิ่มค่าอุณหภูมิตามเวลาตามเพลิงไหม้มาตรฐาน ISO 834

สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS พิจารณาใช้ชิ้นส่วนประเภท SOLID70 สำหรับคอนกรีตและ LINK33 สำหรับเหล็กเสริมโดยพิจารณาขนาดของชิ้นส่วนเท่ากัน 10 มม. ทุกชิ้น โดยที่พิจารณาค่าสภาพนำความร้อน ความหนาแน่นและความร้อนจำเพาะของเหล็กเสริมตามตารางที่ 4.2 ในขณะที่พิจารณาค่าสภาพนำความร้อนของคอนกรีต 2 รูปแบบตามสมการขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และพิจารณาค่าความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีตในช่วงอุณหภูมิ 100-200°C สำหรับปริมาณความชื้น 1.5% และ 10% ตามตารางที่ 4.3

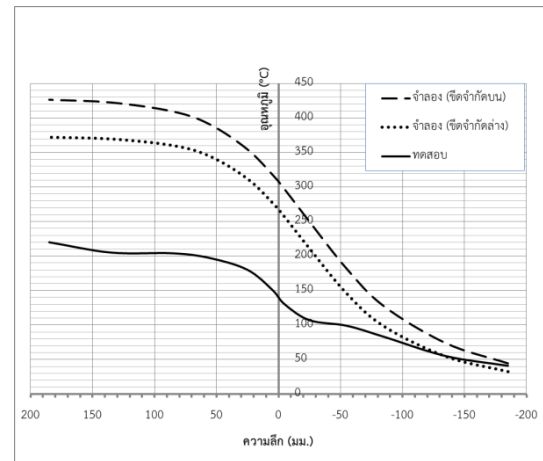
ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติเชิงความร้อนคอนกรีตกับผลการทดสอบขนาดจริงจากงานวิจัยที่ผ่านมา [18] แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสภาพความนำความร้อนแบบ ชีตจำกัดล่างและความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีตเท่ากับ 5600 J/kg-K (สำหรับปริมาณความชื้น 10%) เหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายโอนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต



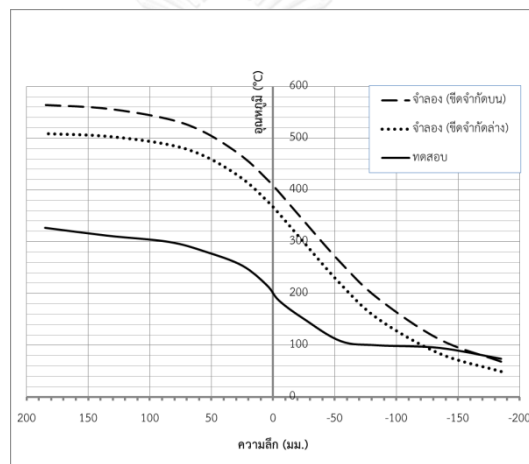
รูปที่ 4.6 แบบจำลองจุดต่อระหว่างคานกับผนังคอนกรีต



(ก) 60 นาที

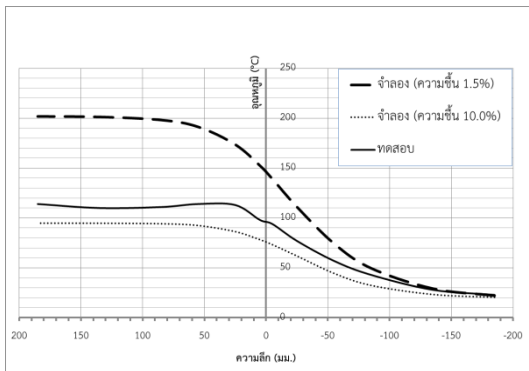


(ข) 120 นาที

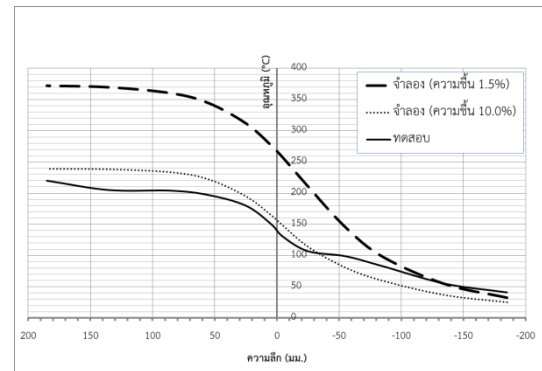


(ค) 180 นาที

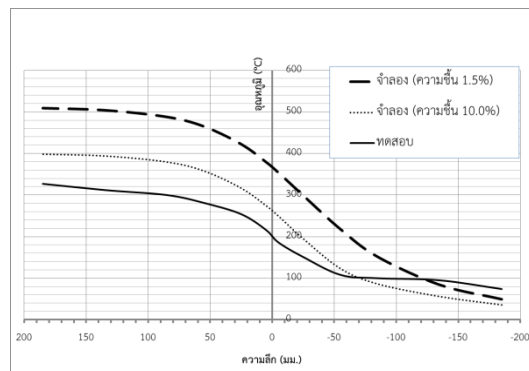
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่แปรเปลี่ยนสภาพนำความร้อนของคอนกรีตกับผลการทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆ



(ก) 60 นาที



(ข) 120 นาที



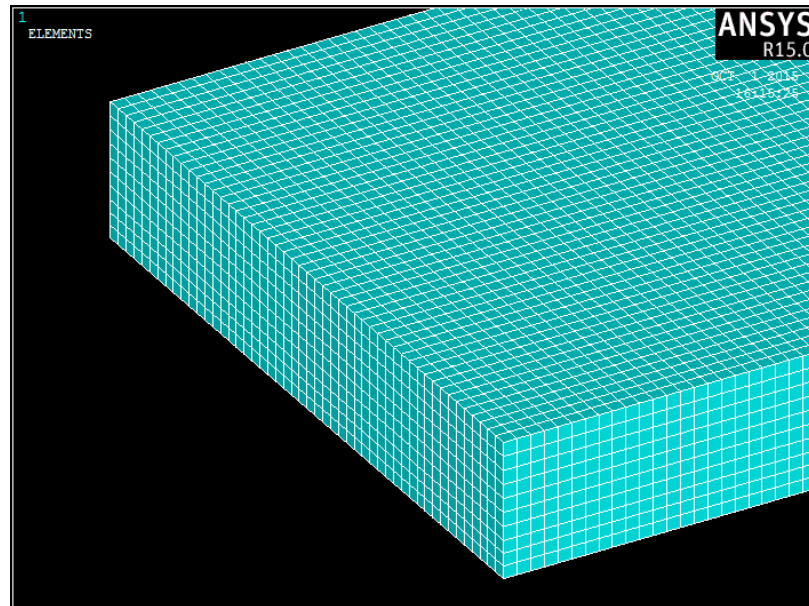
(ค) 180 นาที

รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองที่แปรเปลี่ยนความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีตกับผลการทดสอบที่ระยะเวลาต่างๆ

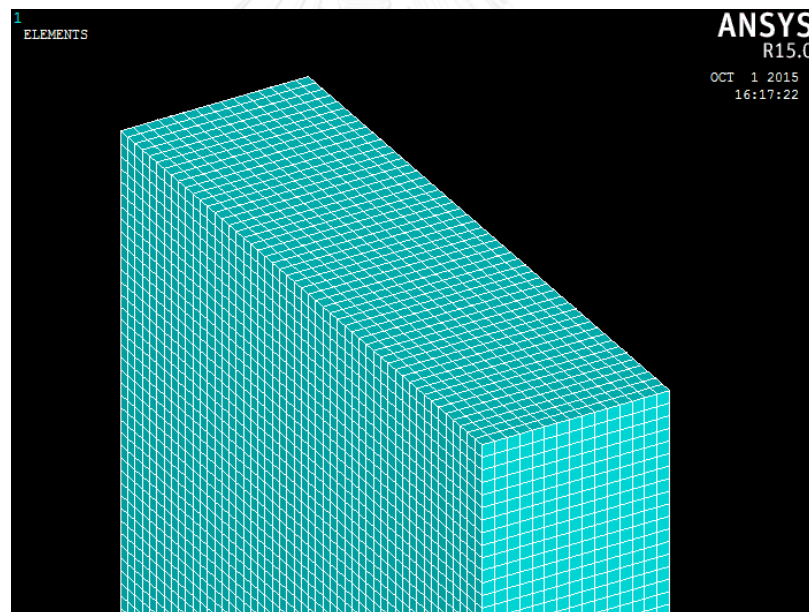
4.4 การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต

แบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับคอนกรีตใช้ในการทำนายการกระจายค่าอุณหภูมิภายในอิพ็อกซีเรซินเพื่อประเมินความต้านทานการดึงออกบริเวณจุดต่อโดยพิจารณาปรับเปลี่ยนตัวแปรศึกษาได้แก่ ความหนาของคอนกรีตหุ้ม ระยะเวลาที่ให้ความร้อน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม ดังแสดงในตารางที่ 4.4

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม ANSYS พิจารณาใช้ชิ้นส่วนประเภท SOLID70 สำหรับคอนกรีต และ LINK33 สำหรับเหล็กเสริม โดยกำหนดขนาดของชิ้นส่วนในช่วงระหว่าง 20-30 มม. ดังแสดงในรูปที่ 4.9 สำหรับค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุพิจารณาใช้ค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบในข้อ 4.3



(ก)



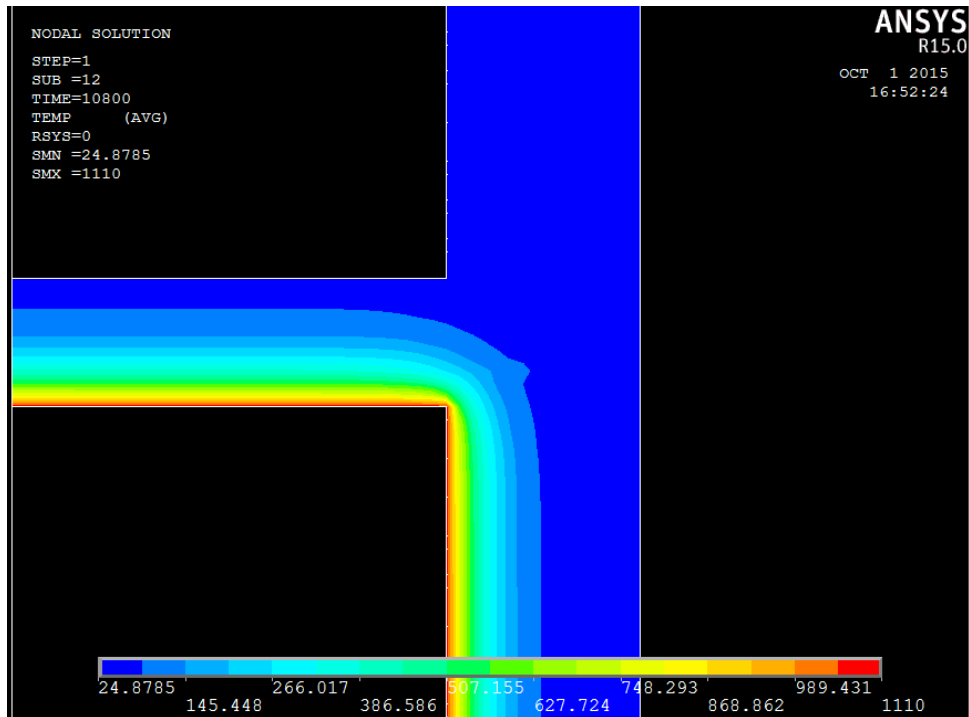
(ข)

รูปที่ 4.9 การแบ่งชิ้นส่วนในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ : (ก) บริเวณปลายชิ้นส่วนพื้น
(ข) บริเวณส่วนบนของผนัง

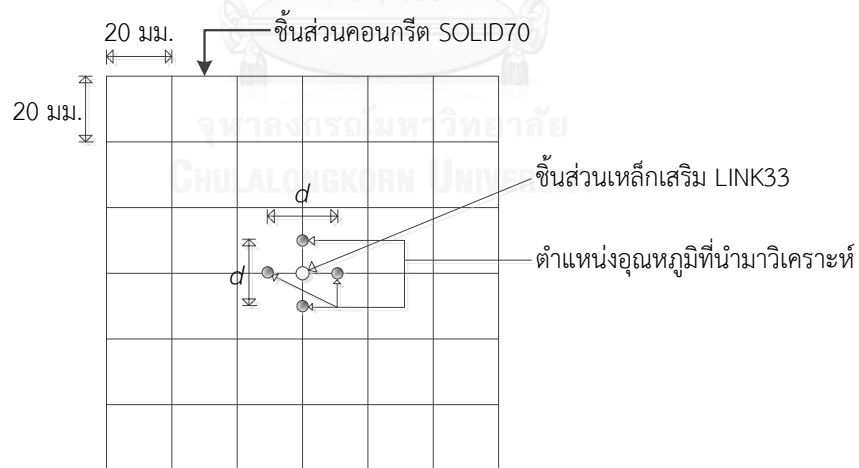
ตารางที่ 4.4 รายละเอียดการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต

No.	เหล็กเสริม	ระยะคอนกรีตหุ้ม (มม.)	ระยะเวลาให้ความร้อน (นาที)					
1	DB12	50	30	60	90	120	150	180
2		100						
3		150						
4	DB16	50						
5		100						
6		150						
7	DB20	50						
8		100						
9		150						
10	DB25	50						
11		100						
12		150						

รูปที่ 4.10 แสดงตัวอย่างการกระจายค่าอุณหภูมิบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตที่ได้จากโปรแกรม ANSYS โดยที่เนื่องจากบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตของโครงสร้างจริงนั้น อีพ็อกซีเรซินจะเคลือบบริเวณผิวของเหล็กเสริม ด้วยเหตุนี้ ค่าอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการประมาณความต้านทานการดึงออกจึงพิจารณาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณตำแหน่งผิวของเหล็กเสริม ซึ่งผันแปรตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (d) ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนแสดงดังตารางที่ 4.5-4.8 สำหรับเหล็กเสริมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม. ตามลำดับ ทั้งนี้ ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการให้ความร้อนที่แสดงในตารางดังกล่าว จะนำไปใช้ในการประมาณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ในบทที่ 5 ต่อไป



รูปที่ 4.10 การกระจายค่าอุณหภูมิบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ใช้คำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับ เหล็กเสริมขนาด 12 มม.

เหล็กเสริม	ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ระยะลึกจาก ผิวผนัง (มม.)	อุณหภูมิของอิพ็อกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
DB12	50	0	77.5	124.5	169.7	210.8	246.3	277.3
		20	66.9	102.8	138.7	173.5	205.1	233.4
		40	57.0	84.0	110.1	137.1	163.6	188.5
		60	48.8	70.1	89.4	108.6	128.7	148.9
		80	43.0	60.0	75.6	90.1	104.4	119.3
		100	39.2	52.6	66.0	78.2	89.3	100.3
		120	36.7	47.3	58.4	69.1	78.8	87.9
	100	0	40.8	55.9	70.6	84.5	99.3	114.8
		20	39.3	52.8	66.1	78.5	90.9	104.0
		40	37.6	49.4	61.3	72.4	83.0	93.7
		60	36.0	46.0	56.5	66.4	75.8	84.7
		80	34.7	42.9	52.0	60.9	69.3	77.2
		100	33.7	40.3	48.1	56.1	63.7	70.9
		120	33.0	38.3	44.9	51.9	58.7	65.3
	150	0	33.2	39.1	46.7	54.7	62.5	69.7
		20	32.8	38.0	44.8	52.1	59.2	65.9
		40	32.5	36.9	42.9	49.4	56.0	62.2
		60	32.2	35.9	41.1	46.9	52.9	58.7
		80	31.9	35.0	39.4	44.6	50.0	55.3
		100	31.7	34.2	38.0	42.5	47.4	52.3
		120	31.5	33.6	36.8	40.8	45.1	49.6

ตารางที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับ เหล็กเสริมขนาด 16 มม.

เหล็กเสริม	ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ระยะลึกจาก ผิวผนัง (มม.)	อุณหภูมิของอิพ็อกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
DB16	50	0	75.5	120.9	164.2	203.3	237.7	268.3
		20	65.1	99.7	134.1	167.3	197.9	225.6
		40	55.3	81.4	106.2	131.9	157.6	181.8
		60	47.5	67.9	86.3	104.4	123.7	143.3
		80	41.9	58.1	73.2	86.9	100.4	114.6
		100	38.2	50.7	63.5	75.2	85.7	96.0
		120	35.8	45.4	56.0	66.3	75.6	84.0
		140	34.3	41.6	50.3	59.1	67.4	75.1
		160	33.2	38.6	45.2	52.4	59.5	66.3
	100	0	40.3	54.8	69.1	82.8	97.1	112.2
		20	38.8	51.9	64.7	76.9	89.0	101.7
		40	37.2	48.5	60.1	70.9	81.2	91.7
		60	35.7	45.2	55.3	65.0	74.1	82.9
		80	34.4	42.1	50.8	59.5	67.6	75.4
		100	33.4	39.5	46.8	54.4	61.8	68.8
		120	32.7	37.4	43.5	50.1	56.7	63.1
		140	32.2	35.8	40.9	46.5	52.4	58.1
		160	31.8	34.5	38.5	43.2	48.2	53.3
	150	0	33.1	38.7	46.0	53.8	61.4	68.5
		20	32.7	37.7	44.1	51.2	58.2	64.7
		40	32.4	36.6	42.3	48.6	55.0	61.2
		60	32.1	35.6	40.6	46.2	52.0	57.7
		80	31.8	34.7	38.9	43.9	49.1	54.3
		100	31.6	33.9	37.5	41.7	46.4	51.1
		120	31.4	33.3	36.2	39.9	44.0	48.3
		140	31.3	32.8	35.2	38.3	41.9	45.8
		160	31.2	32.3	34.2	36.8	39.9	43.3

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับ เหล็กเสริมขนาด 20 มม.

เหล็กเสริม	ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ระยะลึกจาก ผิวผนัง (มม.)	อุณหภูมิของอิพ็อกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
DB20	50	0	80.9	131.1	175.7	214.3	248.0	271.6
		20	68.7	105.0	140.7	174.4	205.2	227.4
		40	57.3	83.6	109.1	135.5	161.7	181.4
		60	48.5	68.8	87.0	105.4	125.1	141.1
		80	42.2	58.4	73.2	86.5	100.0	111.5
		100	38.1	50.6	63.3	74.7	84.8	92.8
		120	35.6	45.1	55.6	65.8	74.8	81.2
		140	34.0	41.1	49.7	58.5	66.8	72.8
		160	33.0	38.3	45.2	52.6	60.1	65.7
		180	32.4	24.2	41.8	48.0	54.4	59.5
	200	31.8	33.8	38.4	43.1	48.2	52.4	
	100	0	41.1	55.8	70.2	84.3	99.2	114.6
		20	39.3	52.6	65.5	77.9	89.9	102.4
		40	37.5	48.9	60.4	71.2	81.4	91.5
		60	35.8	45.2	55.2	64.9	73.8	82.3
		80	34.4	41.9	50.4	58.9	67.0	74.5
		100	33.3	39.1	46.2	53.6	60.8	67.7
		120	32.5	36.9	42.7	49.0	55.4	61.6
		140	32.0	35.3	39.9	45.3	50.8	56.4
		160	31.6	34.1	37.8	42.2	47.1	52.0
		180	31.4	27.4	36.1	39.8	43.9	48.2
	200	31.2	32.1	34.5	37.2	40.5	44.1	
	150	0	33.2	39.1	46.5	54.4	62.0	69.0
		20	32.9	38.0	44.6	51.8	58.9	65.5
		40	32.5	36.8	42.7	49.1	55.7	61.9
		60	32.2	35.8	40.8	46.5	52.4	58.2
		80	31.9	34.8	39.0	44.0	49.3	54.6
		100	31.6	33.9	37.4	41.8	46.5	51.2
		120	31.4	33.2	36.1	39.7	43.9	48.1
		140	31.3	32.6	35.0	38.0	41.6	45.4
160		31.2	32.2	34.1	36.6	39.7	43.0	
180		31.1	29.3	33.4	35.5	38.1	41.0	
200	31.1	31.5	32.7	34.3	36.4	38.8		

ตารางที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตสำหรับ เหล็กเสริมขนาด 25 มม.

เหล็กเสริม	ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ระยะลึกจาก ผิวผนัง (มม.)	อุณหภูมิของอิฐที่อกซีเรซินตามระยะเวลาการให้ความร้อน (°C)					
			30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
DB25	50	0	79.5	128.5	172.8	210.0	243.4	272.3
		19	68.2	103.7	138.2	170.8	201.0	228.2
		38	57.0	82.7	107.0	132.1	157.8	182.1
		58	48.1	67.7	84.8	102.0	121.1	140.9
		77	41.7	57.2	71.0	83.2	95.8	109.9
		96	37.5	49.4	61.4	71.8	80.9	90.2
		115	34.9	43.9	53.9	63.4	71.5	78.6
		135	33.4	39.9	48.1	56.5	64.3	71.0
		154	32.5	37.2	43.7	50.8	58.0	64.5
		173	31.9	35.4	40.5	46.4	52.7	58.8
		192	31.6	34.1	38.1	43.0	48.4	53.9
		212	31.4	33.2	36.3	40.3	44.9	49.8
	231	31.2	32.5	34.9	38.1	41.9	46.2	
	250	31.0	31.4	32.7	34.8	37.6	40.9	
	100	0	40.9	55.2	69.3	83.4	97.9	112.7
		19	39.2	52.1	64.9	77.1	89.0	100.9
		38	37.5	48.6	59.9	70.6	80.7	90.4
		58	35.8	45.0	54.9	64.4	73.2	81.4
		77	34.3	41.7	50.1	58.6	66.5	73.8
		96	33.2	38.9	45.9	53.3	60.4	67.1
		115	32.4	36.7	42.4	48.7	55.0	61.1
		135	31.9	35.1	39.6	44.9	50.4	55.9
		154	31.6	33.9	37.4	41.8	46.6	51.5
		173	31.4	33.0	35.8	39.3	43.4	47.7
		192	31.2	32.4	34.5	37.5	40.9	44.7
		212	31.1	32.0	33.6	36.0	38.9	42.2
	231	31.1	31.7	32.9	34.8	37.2	40.0	
	250	31.0	31.3	32.0	33.2	35.0	37.2	
	150	0	33.1	38.6	45.6	53.2	60.6	67.6
		19	32.7	37.5	43.9	50.8	57.7	64.3
38		32.4	36.5	42.1	48.4	54.8	60.9	
58		32.1	35.6	40.4	46.0	51.8	57.5	
77		31.8	34.7	38.8	43.7	49.0	54.2	
96		31.6	33.9	37.4	41.6	46.3	51.0	
115		31.4	33.2	36.1	39.7	43.9	48.1	
135		31.3	32.7	35.0	38.1	41.7	45.5	
154		31.2	32.2	34.1	36.7	39.8	43.2	
173		31.1	31.9	33.4	35.6	38.3	41.3	
192		31.1	31.7	32.9	34.7	37.0	39.6	
212		31.1	31.5	32.5	34.0	36.0	38.3	
231	31.1	31.4	32.2	33.4	35.1	37.1		
250	31.0	31.3	31.8	32.8	34.1	35.8		

บทที่ 5

การประมาณความต้านทานการดึงออก

การประมาณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ ในบทนี้พิจารณาใช้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่อ้างอิงจากผลการทดสอบการดึงออกในบทที่ 3 ประกอบกับผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในบทที่ 4

จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวในตารางที่ 3.9 สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A และสมการที่ (3) สำหรับอีพ็อกซีเรซิน B สามารถประเมินกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงของอีพ็อกซีเรซินในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ดังสมการ

สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A เหล็กเสริมขนาด 12 มม.

$$\tau_c(T) = e^{\left(\frac{234.62-T}{74.48}\right)} \quad (8)$$

สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A เหล็กเสริมขนาด 16 มม.

$$\tau_c(T) = e^{\left(\frac{233.56-T}{74.91}\right)} \quad (9)$$

สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A เหล็กเสริมขนาด 20 มม.

$$\tau_c(T) = e^{\left(\frac{210.53-T}{80.41}\right)} \quad (10)$$

สำหรับอีพ็อกซีเรซิน A เหล็กเสริมขนาด 25 มม.

$$\tau_c(T) = e^{\left(\frac{206.25-T}{88.46}\right)} \quad (11)$$

สำหรับอีพ็อกซีเรซิน B เหล็กเสริมขนาด 20 มม.

$$\tau_c(T) = e^{\left(\frac{195.86-T}{77.98}\right)} \quad (12)$$

นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต (ตารางที่ 4.5 ถึง 4.8) สามารถระบุค่าอุณหภูมิของอิพ็อกซีเรซินที่ตำแหน่งต่างๆบริเวณจุดต่อในภาวะเพลิงไหม้ ซึ่งเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทั้งสองส่วนดังกล่าว จะสามารถประมาณความต้านทานการดึงออกตามสมการ (ดูรูปที่ 5.1 ประกอบ)

$$F \approx \sum_{i=1}^n \tau_c(T_i) \pi d \frac{L}{n} \quad (13)$$

โดยที่ F แทนความต้านทานการดึงออก (kN)

$\tau_c(T_i)$ แทนกำลังยึดเหนี่ยวของอิพ็อกซีเรซิน (MPa) ในช่วงที่ i ซึ่งมีค่าอุณหภูมิเฉลี่ย T_i ($^{\circ}\text{C}$)

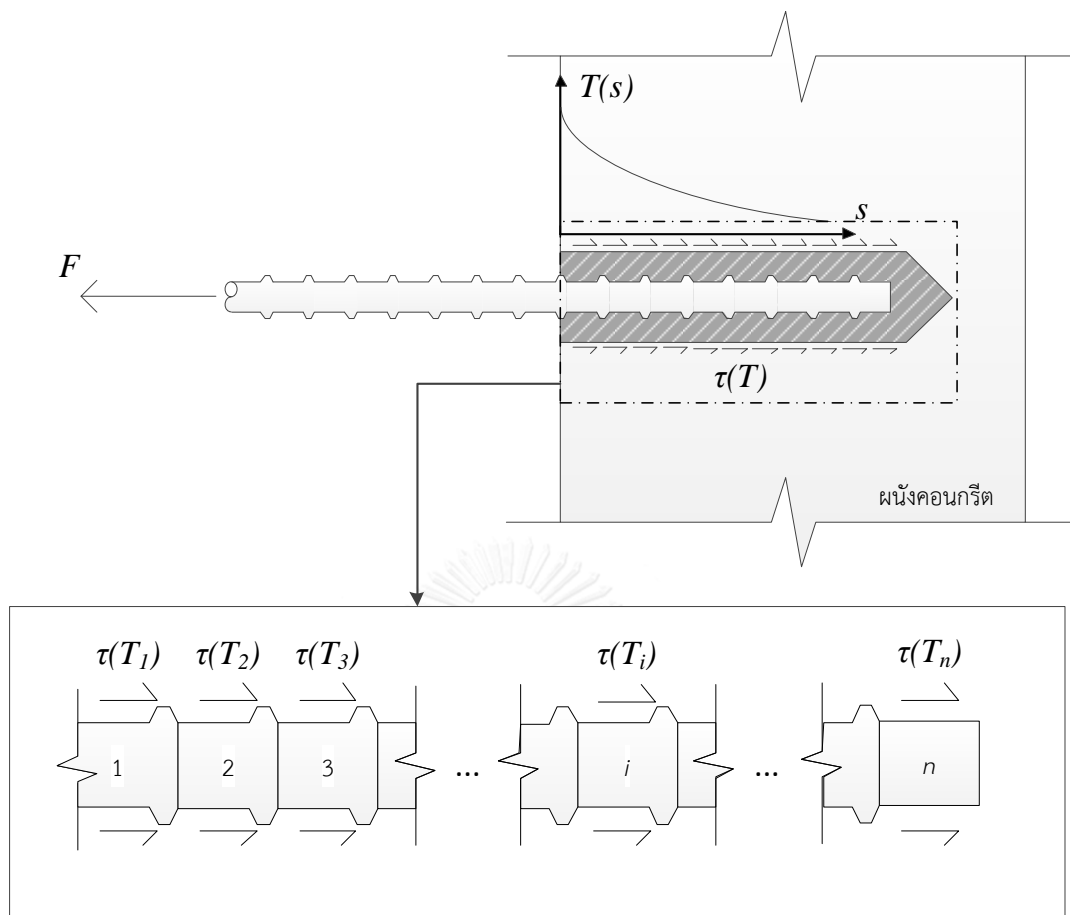
d แทนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริม (mm)

L แทนระยะฝังเหล็กเสริม (mm)

n แทนจำนวนช่วง โดยในการศึกษานี้พิจารณาให้แปรเปลี่ยนตามระยะฝังเหล็กเสริม

จากสมการที่ (13) สามารถคำนวณความต้านทานการดึงออกของอิพ็อกซีเรซิน บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ต่างๆได้ ดังแสดงผลการคำนวณในตารางที่ 5.1 -5.4 กรณีอิพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 12 DB 16 DB 20 และ DB 25 ตามลำดับ และตารางที่ 5.5 กรณีอิพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริม DB 20 ทั้งนี้ จากข้อมูลในตารางดังกล่าว สามารถสรุปผลการประมาณความต้านทานการดึงออกได้ดังตารางที่ 5.6 และตัวประกอบการลดค่า (reduction factor) ความต้านทานการดึงออกของอิพ็อกซีเรซิน A และ B สำหรับเหล็กเสริมขนาดต่างๆ บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ในช่วง 0-180 นาที ดังตารางที่ 5.7

จากตารางที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า ความต้านทานการดึงออกของอิพ็อกซีเรซิน (ชนิด A) บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตมีการลดค่าตามระยะเวลาเพลิงไหม้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 60 นาทีแรกของเพลิงไหม้ (เหลือเพียง 57% 65.9% 73.7% และ 80.3% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 DB 16 DB 20 และ DB 25 ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม.) ในขณะที่ ระยะคอนกรีตหุ้มที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการลดค่าดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (จาก 57% เป็น 98.3% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 เมื่อระยะคอนกรีตหุ้มเพิ่มจาก 50 มม. เป็น 150 มม.) นอกจากนี้เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่ามีแนวโน้มการลดค่าความต้านทานการดึงออกในภาวะเพลิงไหม้น้อยกว่า (เหลือ 22% 31.7% 41.9% และ 53.9% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 DB 16 DB 20 และ DB 25 ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม. ที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ 180 นาที) ทั้งนี้ การลดค่าความต้านทานการดึงออกดังกล่าวอาจส่งผลด้านความปลอดภัยของโครงสร้างอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 5.1 แนวทางการประมาณความต้านทานการดึงออก

ตารางที่ 5.1 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 12

ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ช่วงระยะ ฝังเหล็กเสริม (มม.)	ความต้านทานการดึงออก (kN) ตามระยะเวลาเพลิงไหม้					
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
50	0-20	6.7	3.8	2.2	1.3	0.8	0.6
	20-40	7.7	5.0	3.3	2.2	1.5	1.0
	40-60	8.6	6.3	4.6	3.4	2.5	1.8
	60-80	9.5	7.3	5.8	4.6	3.7	2.9
	80-100	10.1	8.3	6.8	5.7	4.8	4.0
	100-120	10.6	9.0	7.6	6.5	5.7	5.0
	รวม		53.2	39.7	30.4	23.8	19.0
100	0-20	10.3	8.5	7.0	5.9	4.9	4.1
	20-40	10.5	8.9	7.5	6.4	5.5	4.7
	40-60	10.7	9.3	8.0	6.9	6.1	5.3
	60-80	10.9	9.7	8.5	7.5	6.6	5.9
	80-100	11.1	10.1	9.0	8.0	7.2	6.5
	100-120	11.2	10.4	9.4	8.5	7.7	7.1
	รวม		64.8	56.8	49.4	43.2	38.0
150	0-20	11.3	10.5	9.5	8.6	7.8	7.1
	20-40	11.3	10.6	9.8	8.9	8.1	7.4
	40-60	11.4	10.8	10.0	9.2	8.5	7.8
	60-80	11.4	10.9	10.2	9.5	8.8	8.2
	80-100	11.5	11.1	10.5	9.8	9.2	8.5
	100-120	11.5	11.2	10.6	10.1	9.5	8.9
	รวม		68.5	65.1	60.7	56.1	51.8

ตารางที่ 5.2 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 16

ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ช่วงระยะ ฝังเหล็กเสริม (มม.)	ความต้านทานการดึงออก (kN) ตามระยะเวลาเพลิงไหม้					
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
50	0-20	8.9	5.2	3.1	1.9	1.2	0.8
	20-40	10.2	6.8	4.6	3.1	2.1	1.5
	40-60	11.4	8.4	6.3	4.7	3.5	2.6
	60-80	12.5	9.8	7.8	6.3	5.1	4.1
	80-100	13.3	11.0	9.1	7.7	6.6	5.6
	100-120	13.9	12.0	10.2	8.8	7.7	6.8
	120-140	14.2	12.7	11.2	9.8	8.7	7.9
	140-160	14.5	13.3	12.0	10.8	9.7	8.8
	รวม	98.9	79.1	64.3	53.2	44.7	38.1
100	0-20	13.4	11.1	9.3	7.8	6.6	5.5
	20-40	13.7	11.6	9.9	8.5	7.3	6.3
	40-60	14.0	12.2	10.5	9.2	8.1	7.1
	60-80	14.2	12.7	11.2	9.9	8.8	7.9
	80-100	14.4	13.2	11.8	10.6	9.6	8.7
	100-120	14.6	13.6	12.4	11.3	10.3	9.4
	120-140	14.7	13.9	12.9	11.9	11.0	10.1
	140-160	14.8	14.2	13.4	12.5	11.6	10.8
	รวม	113.9	102.5	91.5	81.7	73.2	65.7
150	0-20	14.6	13.6	12.4	11.3	10.2	9.3
	20-40	14.7	13.8	12.8	11.7	10.7	9.8
	40-60	14.8	14.0	13.1	12.1	11.1	10.3
	60-80	14.8	14.2	13.4	12.5	11.6	10.8
	80-100	14.9	14.4	13.6	12.8	12.0	11.2
	100-120	14.9	14.5	13.9	13.2	12.4	11.7
	120-140	14.9	14.6	14.1	13.5	12.8	12.1
	140-160	15.0	14.7	14.3	13.8	13.2	12.5
	รวม	118.6	113.9	107.6	100.7	94.0	87.8

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 20

ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ช่วงระยะ ฝังเหล็กเสริม (มม.)	ความต้านทานการดึงออก (kN) ตามระยะเวลาเพลิงไหม้					
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
50	0-20	6.8	4.0	2.4	1.5	1.0	0.8
	20-40	7.9	5.3	3.6	2.5	1.8	1.4
	40-60	8.9	6.7	5.1	3.9	2.9	2.3
	60-80	9.8	7.8	6.4	5.2	4.3	3.6
	80-100	10.5	8.7	7.4	6.3	5.5	4.8
	100-120	10.9	9.5	8.2	7.2	6.4	5.8
	120-140	11.2	10.1	9.0	8.0	7.1	6.6
	140-160	11.4	10.5	9.6	8.6	7.8	7.3
	160-180	11.5	11.7	10.0	9.2	8.5	7.9
	180-200	11.6	12.0	10.5	9.8	9.1	8.6
	รวม	100.3	86.3	72.1	62.2	54.3	49.1
100	0-20	10.4	8.8	7.4	6.3	5.3	4.5
	20-40	10.7	9.2	7.9	6.8	5.9	5.2
	40-60	10.9	9.6	8.4	7.4	6.6	5.8
	60-80	11.1	10.0	8.9	8.0	7.2	6.5
	80-100	11.3	10.4	9.5	8.6	7.8	7.1
	100-120	11.4	10.7	9.9	9.1	8.4	7.7
	120-140	11.5	11.0	10.3	9.6	8.9	8.3
	140-160	11.6	11.2	10.6	10.0	9.4	8.8
	160-180	11.6	11.8	10.9	10.3	9.8	9.2
	180-200	11.7	11.9	11.1	10.7	10.2	9.7
	รวม	112.4	104.6	94.9	86.7	79.4	72.8
150	0-20	11.4	10.7	9.8	8.9	8.1	7.5
	20-40	11.5	10.8	10.0	9.2	8.5	7.8
	40-60	11.5	11.0	10.3	9.5	8.8	8.2
	60-80	11.6	11.1	10.5	9.8	9.1	8.5
	80-100	11.6	11.2	10.7	10.1	9.5	8.9
	100-120	11.6	11.4	10.9	10.4	9.8	9.3
	120-140	11.7	11.4	11.1	10.6	10.1	9.6
	140-160	11.7	11.5	11.2	10.8	10.4	9.9
	160-180	11.7	11.8	11.3	11.0	10.6	10.2
	180-200	11.7	11.8	11.4	11.2	10.8	10.5
	รวม	116.0	112.7	107.2	101.5	95.8	90.5

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริม DB 25

ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ช่วงระยะ ฝังเหล็กเสริม (มม.)	ความต้านทานการดึงออก (kN) ตามระยะเวลาเพลิงไหม้					
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
50	0-19	6.7	4.2	2.7	1.8	1.3	0.9
	19-38	7.7	5.4	3.9	2.8	2.0	1.5
	38-58	8.6	6.6	5.3	4.1	3.2	2.5
	58-77	9.4	7.7	6.4	5.5	4.6	3.8
	77-96	9.9	8.5	7.4	6.5	5.7	5.0
	96-115	10.3	9.2	8.1	7.2	6.6	6.0
	115-135	10.6	9.7	8.7	7.9	7.2	6.7
	135-154	10.7	10.1	9.3	8.5	7.8	7.2
	154-173	10.8	10.3	9.7	9.0	8.3	7.7
	173-192	10.9	10.5	10.0	9.4	8.8	8.2
	192-212	10.9	10.6	10.2	9.7	9.2	8.7
	212-231	10.9	10.7	10.4	10.0	9.5	9.0
	231-250	10.9	10.8	10.6	10.3	9.9	9.5
รวม		128.3	114.3	102.6	92.6	84.1	76.8
100	0-19	9.9	8.5	7.3	6.3	5.4	4.6
	19-38	10.1	8.8	7.7	6.7	6.0	5.3
	38-58	10.3	9.2	8.1	7.2	6.5	5.9
	58-77	10.5	9.5	8.6	7.8	7.1	6.5
	77-96	10.6	9.9	9.0	8.3	7.6	7.0
	96-115	10.7	10.1	9.4	8.7	8.1	7.5
	115-135	10.8	10.4	9.8	9.2	8.6	8.0
	135-154	10.9	10.5	10.1	9.5	9.0	8.5
	154-173	10.9	10.7	10.3	9.8	9.3	8.9
	173-192	10.9	10.7	10.4	10.1	9.7	9.2
	192-212	10.9	10.8	10.6	10.3	9.9	9.5
	212-231	10.9	10.9	10.7	10.4	10.1	9.8
	231-250	10.9	10.9	10.8	10.6	10.3	10.0
รวม		138.3	130.8	122.7	114.9	107.5	100.7
150	0-19	10.7	10.1	9.4	8.6	8.0	7.4
	19-38	10.8	10.2	9.6	8.9	8.2	7.7
	38-58	10.8	10.3	9.7	9.1	8.5	8.0
	58-77	10.8	10.5	9.9	9.4	8.8	8.3
	77-96	10.9	10.6	10.1	9.6	9.1	8.6
	96-115	10.9	10.6	10.3	9.8	9.3	8.9
	115-135	10.9	10.7	10.4	10.0	9.6	9.2
	135-154	10.9	10.8	10.5	10.2	9.8	9.4
	154-173	10.9	10.8	10.6	10.3	10.0	9.6
	173-192	10.9	10.9	10.7	10.5	10.2	9.8
	192-212	10.9	10.9	10.7	10.5	10.3	10.0
	212-231	10.9	10.9	10.8	10.6	10.4	10.2
	231-250	10.9	10.9	10.8	10.7	10.5	10.3
รวม		141.4	138.2	133.6	128.3	122.7	117.3

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริม DB 20

ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ช่วงระยะ ฝังเหล็กเสริม (มม.)	ความต้านทานการดึงออก (kN) ตามระยะเวลาเพลิงไหม้					
		30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
50	0-20	5.9	3.4	2.0	1.3	0.8	0.6
	20-40	6.9	4.6	3.1	2.1	1.5	1.1
	40-60	7.9	5.8	4.4	3.3	2.5	2.0
	60-80	8.7	6.9	5.5	4.5	3.7	3.1
	80-100	9.3	7.7	6.5	5.5	4.7	4.2
	100-120	9.7	8.4	7.2	6.3	5.6	5.1
	120-140	9.9	8.9	7.9	7.0	6.2	5.8
	140-160	10.1	9.3	8.4	7.6	6.9	6.4
	160-180	10.2	10.4	8.9	8.1	7.4	6.9
	180-200	10.3	10.7	9.3	8.6	8.0	7.6
	รวม	88.7	76.1	63.2	54.4	47.3	42.7
100	0-20	9.2	7.7	6.5	5.5	4.6	3.9
	20-40	9.5	8.1	6.9	6.0	5.2	4.5
	40-60	9.7	8.5	7.4	6.5	5.7	5.1
	60-80	9.9	8.9	7.9	7.0	6.3	5.7
	80-100	10.0	9.2	8.3	7.5	6.8	6.2
	100-120	10.2	9.5	8.8	8.0	7.4	6.8
	120-140	10.2	9.8	9.1	8.5	7.8	7.3
	140-160	10.3	9.9	9.4	8.8	8.3	7.7
	160-180	10.3	10.4	9.6	9.2	8.6	8.1
	180-200	10.4	10.6	9.9	9.5	9.0	8.6
	รวม	99.7	92.6	83.8	76.4	69.7	63.8
150	0-20	10.1	9.5	8.6	7.8	7.1	6.5
	20-40	10.2	9.6	8.9	8.1	7.4	6.8
	40-60	10.2	9.7	9.1	8.4	7.7	7.2
	60-80	10.3	9.9	9.3	8.7	8.1	7.5
	80-100	10.3	10.0	9.5	8.9	8.4	7.9
	100-120	10.3	10.1	9.7	9.2	8.7	8.2
	120-140	10.4	10.2	9.8	9.4	9.0	8.5
	140-160	10.4	10.2	9.9	9.6	9.2	8.8
	160-180	10.4	10.4	10.1	9.8	9.4	9.0
	180-200	10.4	10.5	10.1	9.9	9.6	9.3
	รวม	103.0	100.0	95.0	89.8	84.6	79.7

ตารางที่ 5.6 ความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตใน
ภาวะเพลิงไหม้

อีพ็อกซีเรซิน	เหล็กเสริม	ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ความต้านทานการดึงออก (kN)						
			ตามระยะเวลาเพลิงไหม้						
			0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
A	DB12	50	69.6	53.2	39.7	30.4	23.8	19.0	15.3
		100	69.6	64.8	56.8	49.4	43.2	38.0	33.5
		150	69.6	68.5	65.1	60.7	56.1	51.8	48.0
	DB16	50	120.2	98.9	79.1	64.3	53.2	44.7	38.1
		100	120.2	113.9	102.5	91.5	81.7	73.2	65.7
		150	120.2	118.6	113.9	107.6	100.7	94.0	87.8
	DB20	50	117.2	100.3	86.3	72.1	62.2	54.3	49.1
		100	117.2	112.4	104.6	94.9	86.7	79.4	72.8
		150	117.2	116.0	112.7	107.2	101.5	95.8	90.5
	DB25	50	142.4	128.3	114.3	102.6	92.6	84.1	76.8
		100	142.4	138.3	130.8	122.7	114.9	107.5	100.7
		150	142.4	141.4	138.2	133.6	128.3	122.7	117.3
B	DB20	50	117.2	88.7	76.1	63.2	54.4	47.3	42.7
		100	117.2	99.7	92.6	83.8	76.4	69.7	63.8
		150	117.2	103.0	100.0	95.0	89.8	84.6	79.7

ตารางที่ 5.7 ตัวประกอบการลดค่าความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่าง
พื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้

อีพ็อกซีเรซิน	เหล็กเสริม	ระยะ คอนกรีตหุ้ม (มม.)	ตัวประกอบการลดค่าความต้านทานการดึงออก ตามระยะเวลาเพลิงไหม้						
			0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที	180 นาที
A	DB12	50	1.000	0.764	0.570	0.436	0.341	0.272	0.220
		100	1.000	0.931	0.815	0.709	0.621	0.546	0.481
		150	1.000	0.983	0.934	0.871	0.806	0.744	0.689
	DB16	50	1.000	0.823	0.659	0.535	0.443	0.372	0.317
		100	1.000	0.948	0.853	0.761	0.680	0.609	0.547
		150	1.000	0.987	0.948	0.895	0.838	0.782	0.731
	DB20	50	1.000	0.856	0.737	0.615	0.531	0.464	0.419
		100	1.000	0.959	0.893	0.810	0.740	0.678	0.621
		150	1.000	0.990	0.962	0.915	0.866	0.818	0.772
	DB25	50	1.000	0.901	0.803	0.721	0.651	0.591	0.539
		100	1.000	0.972	0.919	0.862	0.807	0.755	0.708
		150	1.000	0.993	0.971	0.938	0.901	0.862	0.824
B	DB20	50	1.000	0.757	0.649	0.540	0.464	0.404	0.364
		100	1.000	0.851	0.790	0.715	0.652	0.595	0.544
		150	1.000	0.879	0.853	0.810	0.766	0.722	0.680

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประเมินการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ใช้ในงานเจาะเสียบเหล็กบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ โดยประยุกต์ใช้การทดสอบการดึงออก (pull-out test) ควบคู่กับการวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตซึ่งสัมพันธ์ความร้อนจากเพลิงไหม้มาตรฐานโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และพิจารณาเหล็กเสริมเจาะเสียบเป็นเหล็กข้ออ้อยชั้นคุณภาพ SD40 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มม. 16 มม. 20 มม. และ 25 มม.

การทดสอบการดึงออกมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเสื่อมสภาพของกำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินภายใต้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยว โดยใช้อีพ็อกซีเรซินที่แตกต่างกันสองชนิด (A และ B) จากผลการทดสอบ พบว่าอุณหภูมิวิกฤติของ อีพ็อกซีเรซินทั้งสองชนิด มีแนวโน้มลดลงตามค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอุณหภูมิวิกฤติของอีพ็อกซีเรซิน A มีแนวโน้มลดลงตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ชนิดของอีพ็อกซีเรซินที่แตกต่างกันไม่ได้ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเสื่อมสภาพของการยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม ทั้งนี้ การศึกษานี้ยังสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองของ L. Bouazaoui และ A. Li [3] ในการอธิบายแนวโน้มของอุณหภูมิวิกฤติของอีพ็อกซีเรซินที่ลดลงตามขนาดของเหล็กเสริมที่เพิ่มขึ้นได้อีกด้วย

การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีต มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิของอีพ็อกซีเรซินที่ตำแหน่งต่างๆ สำหรับการประมาณความต้านทานการดึงออก โดยการศึกษาประยุกต์ใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม ANSYS 15.0 โดยใช้ชิ้นส่วนประเภท SOLID70 สำหรับคอนกรีตและ LINK33 สำหรับเหล็กเสริม ในขณะที่ไม่พิจารณาอีพ็อกซีเรซินในแบบจำลอง และกำหนดค่าคุณสมบัติเชิงความร้อนของคอนกรีตและเหล็ก

เสริมตามมาตรฐาน EN 1992-1-2 และ EN 1993-1-2 รวมทั้งทำการปรับเทียบสภาพนำความร้อนและความร้อนจำเพาะสูงสุดของคอนกรีตโดยอ้างอิงผลการทดสอบในงานวิจัยที่ผ่านมา

สำหรับการประมาณความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซินบริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตในภาวะเพลิงไหม้ พิจารณาใช้สมการทำนายค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอีพ็อกซีเรซินที่ลดลงตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิวิกฤติกับหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่อ้างอิงผลการทดสอบการดึงออก ประกอบกับผลการประมาณค่าอุณหภูมิของอีพ็อกซีเรซินจากแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อน ทั้งนี้ จากผลการประมาณความต้านทานการดึงออก พบว่า ความต้านทานการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน (ชนิด A) บริเวณจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตมีการลดค่าตามระยะเวลาเพลิงไหม้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง 60 นาทีแรกของเพลิงไหม้ (เหลือเพียง 57% 65.9% 73.7% และ 80.3% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 DB 16 DB 20 และ DB 25 ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม.) ในขณะที่ ระยะคอนกรีตหุ้มที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้อัตราการลดค่าดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (จาก 57% เป็น 98.3% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 เมื่อระยะคอนกรีตหุ้มเพิ่มจาก 50 มม. เป็น 150 มม.) นอกจากนี้เหล็กเสริมที่มีขนาดใหญ่กว่ามีแนวโน้มการลดค่าความต้านทานการดึงออกในภาวะเพลิงไหม้น้อยกว่า (เหลือ 22% 31.7% 41.9% และ 53.9% สำหรับเหล็กเสริม DB 12 DB 16 DB 20 และ DB 25 ซึ่งมีระยะคอนกรีตหุ้ม 50 มม. ที่ระยะเวลาเพลิงไหม้ 180 นาที)

6.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากข้อจำกัดด้านเวลาและงบประมาณจึงยังไม่สามารถดำเนินการทดสอบจุดต่อระหว่างพื้นกับผนังคอนกรีตของโครงสร้างขนาดจริงในภาวะเพลิงไหม้ เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นดังกล่าวต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] Fink JK. *Reactive Polymers Fundamentals and Applications (Second Edition)*. Norwich & N.Y., William Andrew, London, 2013.
- [2] Shaw JDN. A review of resins used in construction: Types of resin — applications — case histories. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **Volume 2**, Issue 2, April 1982, Pages 77–83.
- [3] Bouazaoui L, Li A. Analysis of steel/concrete interfacial shear stress by means of pull out test. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **Volume 28**, Issue 3, April 2008, Pages 101–108.
- [4] Pinoteau N, Pimienta P, Guillet T, Rivillon P, 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*, **Volume 31**, Issue 8, December 2011, Pages 851–861.
- [5] International Organization for Standardization, ISO 834-1: *Fire-Resistance Tests—Element of Building Construction*, 1999.
- [6] CEN, *Eurocode2: Design of concrete structures, Part1.2: General rules-structural fire design*, EN 1992-1-2, UK: European Committee for Standardization, 2004.
- [7] CEN, *Eurocode3: Design of steel structures, Part1.2: General rules-structural fire design*,. UK: European Committee for Standardization, 2005.
- [8] Evseeva LE, Tanaeva SA. Influence of antraquinone inclusions on the thermal properties of epoxy resins at low temperatures. *Cryogenics*, **Volume 38**, Issue 2, February 1998, Pages 253–255.
- [9] Yang Q, Li X, Shi L, Yang X, Sui G. The thermal characteristics of epoxy resin: Design and predict by using molecular simulation method. *Polymer*, **Volume 54**, Issue 23, 1 November 2013, Pages 6447–6454.
- [10] Zhou T, Wang X, Cheng P, Wang T, Xiong D, Wang X. Improving the thermal conductivity of epoxy resin by the addition of a mixture of graphite

- nanoplatelets and silicon carbide microparticles. *eXPRESS Polymer Letters*, **Volume 7**, Issue 7, 2013, Pages 585–594.
- [11] Adnan C, Turgay C, Bakırcı AE. Effects of environmental factors on the adhesion and durability characteristics of epoxy-bonded concrete prisms. *Construction and Building Materials*, **Volume 23**, Issue 2, February 2009, Pages 758–767.
- [12] Adnan C. Parametric study of factors affecting the pull-out strength of steel rods bonded into precast concrete panels. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **Volume 21**, Issue 6, 2001, Pages 487–493.
- [13] Adnan C. Estimation of ultimate tension load of methylmethacrylate bonded steel rods into concrete. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **Volume 27**, Issue 8, December 2007, Pages 653–660.
- [14] Van Gemart D. Force transfer in epoxy bonded steel/concrete joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **Volume 1**, Issue 2, October 1980, Pages 67–72.
- [15] Cook RA, Kunz J, Fuchs W, Konz RC. Behavior and design of single adhesive anchors under tensile load in uncracked concrete. *ACI Structural Journal*, **Volume 95**, Issue 1, January 1998, Pages 9-26.
- [16] ASTM C 39, “Test Method for Compressive Strength,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 1992, 5 pp.
- [17] Jeyranpour F, Alahyarizadeha Gh, 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*, **Volume 62**, August 2015, Pages 157-164.
- [18] Pinoteau N, Pimienta P, Guillet T, Rivillon P, Rémond S. Prediction of failure of a cantilever–wall connection using post-installed rebars under thermal loading. *Engineering Structures*, **Volume 56**, December 2013, Pages 1607-1619



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการดึงออกและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ

ผลการทดสอบบรรยายละเอียดขึ้นตัวอย่างด้วยรหัสขึ้นตัวอย่าง โดยรหัสดังกล่าว ประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเหล็กเสริม ชนิดของอีพ็อกซีเรซิน หน่วยแรงยึดเหนี่ยว และ ลำดับการทดสอบซ้ำ ซึ่งแสดงรายละเอียดในข้อ 3.3 ตาราง ก.1 – ก.5 แสดงผลการทดสอบการดึงออก โดยที่ T1 คืออุณหภูมิวิกฤติ ณ ตำแหน่งปลายเหล็กเสริม T2 คืออุณหภูมิวิกฤติ ณ ตำแหน่งลึกจากผิวคอนกรีต 1 ซม. และ Tavg คืออุณหภูมิวิกฤติเฉลี่ยระหว่าง T1 และ T2

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
12A1I	106.1	62.5	84.3	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A1I</p>
12A1II	74.9	56.5	65.7	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A1II</p>

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
12A2I	95.7	82.6	89.2	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A2I</p>
12A2II	102.3	91.3	96.8	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A2II</p>
12A3I	305.9	213.6	259.8	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A3I</p>

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
12A3II	303.2	210.5	256.9	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A3II</p>
12A4I	337.9	221.5	279.7	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A4I</p>
12A4II	331.2	226.7	279.0	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A4II</p>

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
12A5I	357.2	229.4	293.3	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A5I</p>
12A5II	357	245.7	301.4	<p>ขึ้นตัวอย่าง 12A5II</p>

ตารางที่ ก.1 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 12 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
12A6I	364	241.7	302.9	<p>ชั้นตัวอย่าง 12A6I</p>
12A6II	361.9	270.7	316.3	<p>ชั้นตัวอย่าง 12A6II</p>

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
16A1I	106.8	80.9	93.9	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A1I</p>
16A1II	106.4	57.9	82.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A1II</p>
16A2I	94	77.9	86.0	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A2I</p>

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
16A2II	108.1	88.2	98.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A2II</p> <p>Temperature (°C)</p> <p>Displacement (mm)</p> <p>Time (min)</p>
16A3I	308.7	186.4	247.6	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A3I</p> <p>Temperature (°C)</p> <p>Displacement (mm)</p> <p>Time (min)</p>
16A3II	309.3	124.6	217.0	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A3II</p> <p>Temperature (°C)</p> <p>Displacement (mm)</p> <p>Time (min)</p>

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
16A4I	326.6	230.8	278.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A4I</p>
16A4II	320.7	208.7	264.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A4II</p>
16A5I	356.7	254.2	305.5	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A5I</p>

ตารางที่ ก.2 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 16 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
16A5II	377.6	239.1	308.4	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A5II</p>
16A6I	402.3	219.6	311.0	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A6I</p>
16A6II	385.8	251	318.4	<p>ชั้นตัวอย่าง 16A6II</p>

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20A1I	76.1	52.4	64.3	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A1I</p> <p>Temperature (°C)</p> <p>Displacement (mm)</p> <p>Time (min)</p> <p>Legend: T1 (dotted red), T2 (dashed green), Tavg (dashed purple), Disp. (solid blue)</p>
20A1II	72.1	51.8	62.0	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A1II</p> <p>Temperature (°C)</p> <p>Displacement (mm)</p> <p>Time (min)</p> <p>Legend: T1 (dotted red), T2 (dashed green), Tavg (dashed purple), Disp. (solid blue)</p>
20A2I	71.5	60.8	66.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A2I</p> <p>Temperature (°C)</p> <p>Displacement (mm)</p> <p>Time (min)</p> <p>Legend: T1 (dotted red), T2 (dashed green), Tavg (dashed purple), Disp. (solid blue)</p>

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20A2II	67.8	63	65.4	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A2II</p>
20A3I	173.9	139	156.5	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A3I</p>
20A3II	176.6	166.8	171.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A3II</p>

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20A4I	357.9	195.5	276.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A4I</p>
20A4II	341.6	220.2	280.9	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A4II</p>
20A5I	356.8	236.4	296.6	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A5I</p>

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20A5II	352.6	243.3	298.0	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A5II</p>
20A6I	351	203	277.0	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A6I</p>
20A6II	365.5	246.1	305.8	<p>ชั้นตัวอย่าง 20A6II</p>

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
25A1I	64.8	50.3	57.6	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A1I</p>
25A1II	61.5	55.8	58.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A1II</p>
25A2I	96.7	56.3	76.5	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A2I</p>

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
25A2II	73.6	51.8	62.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A2II</p>
25A3I	122.4	100	111.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A3I</p>
25A3II	132.1	105.1	119.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A3II</p>

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
25A4I	317.7	190.7	254.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A4I</p>
25A4II	324.5	204.8	264.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A4II</p>
25A5I	382.5	224.8	303.7	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A5I</p>

ตารางที่ ก.4 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน A สำหรับเหล็กเสริมขนาด 25 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
25A5II	385.4	225.6	305.5	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A5II</p>
25A6I	391.6	226.3	308.9	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A6I</p>
25A6II	416.2	236	326.1	<p>ชั้นตัวอย่าง 25A6II</p>

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20B1I	57.9	47.9	52.9	<p>ชั้นตัวอย่าง 20B1I</p>
20B1II	56.9	57.5	57.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 20B1II</p>
20B2I	100	70.4	85.2	<p>ชั้นตัวอย่าง 20B2I</p>

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20B2II	99.6	81.4	90.5	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B2II</p>
20B3I	120.6	89.5	105.1	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B3I</p>
20B3II	138.7	99.3	119.0	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B3II</p>

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20B4I	314.6	195.7	255.2	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B4I</p>
20B4II	310.3	193.7	252.0	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B4II</p>
20B5I	335.4	214	274.7	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B5I</p>

ตารางที่ ก.5 (ต่อ) ผลการทดสอบการดึงออกของอีพ็อกซีเรซิน B สำหรับเหล็กเสริมขนาด 20 มม.

รหัส ตัวอย่าง	อุณหภูมิวิกฤติ (°C)			กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอีพ็อกซีเรซิน/ การกระจัดของเหล็กเสริมกับเวลาที่วัดค่าระหว่างการทดสอบ
	T1	T2	Tavg	
20B5II	332.3	210.3	271.3	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B5II</p>
20B6I	354.4	244.8	299.6	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B6I</p>
20B6II	356.3	220.5	288.4	<p>ขึ้นตัวอย่าง 20B6II</p>

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภูวิศร อ้อแสงชัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธาและเทคโนโลยี) เกียรตินิยมอันดับสอง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา พ.ศ. 2554 ได้เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

