

อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
คาร์บอนและคอนกรีต



นางสาวหทัยกาญจน์ จิฤดี

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 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON BOND BEHAVIOR BETWEEN CARBON
FIBER REINFORCED POLYMER SHEET AND CONCRETE

Miss Hathaikan Jiruedee



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต
โดย	นางสาวหทัยกาญจน์ จิฤดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทิต ปานสุข)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อัครวัชร เล่นาวารี)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. จักรพันธ์ เทือกตะ)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ความสำคัญของปัญหา.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	4
บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 วิธีการติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....	8
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อวัสดุเสริมเส้นใย.....	9
2.3 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....	17
2.4 แบบจำลองและสมการที่ใช้ในการศึกษากำลังการยึดเหนี่ยว.....	19
2.5 การเลื่อนไถลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นวัสดุเสริมเส้นใย.....	22
2.6 งานศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	27
3.1 การเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบ.....	28
3.2 การทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40

4.1 ลักษณะการวิบัติในพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต	40
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงยึดเหนี่ยวในระบบ FRP	47
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงยึดเหนี่ยวในระบบ FRP	53
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กำลังคอนกรีต เวลา และแรงยึดเหนี่ยวในระบบ FRP	55
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	58
5.1 สรุปผลการทดลอง	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
5.3 งานวิจัยในอนาคต.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก ก ส่วนผสมในการทดสอบ.....	63
ภาคผนวก ข การเตรียมตัวอย่างทดสอบ	68
ภาคผนวก ค Strain Load.....	79
ภาคผนวก ง Shear Stress-Slip.....	99
ภาคผนวก จ ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น.....	121
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	143

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนบนแผ่นพื้นไร้คาน	2
รูปที่ 2.1 รูปแบบแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	7
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย	10
รูปที่ 2.3 การจัดเรียงเส้นใยแบบ Unidirectional (0°), Bidirectional ($0^\circ+90^\circ$), Bidirectional (45°)	10
รูปที่ 2.4 พฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของเส้นใยต่างๆ	11
รูปที่ 2.5 อิทธิพลของความชื้นที่ส่งผลต่อแรงดึง (a) แรงเฉือน (b) ในการแตกหักของชิ้นทดสอบ	16
รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการเสื่อมสลายของยึดเหนี่ยว	18
รูปที่ 2.7 ลักษณะการวิบัติพฤติกรรมยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต	19
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟ Strain Distribute	21
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกราฟ Shear Stress – Slip	21
รูปที่ 2.10 ลักษณะการดึงทดสอบของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	22
รูปที่ 2.11 การหาค่า G_f	25
รูปที่ 3.1 ระเบียบงานวิจัย	27
รูปที่ 3.2 ลักษณะการเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบ	28
รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก	29
รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้ผ้าห่ม	32
รูปที่ 3.5 รายละเอียดชิ้นงาน (1) ส่วนที่ใช้ทดสอบพันธะ (2) ส่วนที่ประยุกต์ในการรับแรงดึง	36
รูปที่ 3.6 การติดตั้ง Strain Gauge ในคานคอนกรีตที่ทดสอบแรงดึง	38
รูปที่ 3.7 การทดสอบแรงดึง	38
รูปที่ 3.8 การประกอบเพื่อทดสอบแรงดึง	39
รูปที่ 3.9 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการดึง	39

รูปที่ 4.1 สภาพการวิบัติที่พบหลังจากทำการทดลอง (ก) การวิบัติที่ผิวคอนกรีตใกล้รอยเชื่อม ประสานระหว่างพอลิเมอร์และคอนกรีต (ข) การวิบัติที่แนวเชื่อมประสานระหว่างพอลิเมอร์และ คอนกรีต (ค) การวิบัติที่พอลิเมอร์หรือวัสดุเชื่อมประสาน (ง) การวิบัติบริเวณแนวเชื่อมประสาน ระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและพอลิเมอร์	41
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	44
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดบนวัสดุพอลิเมอร์แบบแผ่น	45
รูปที่ 4.4 กำลังรับความเครียด (Strain Load) ที่ตำแหน่งต่างๆของ D24-1	46
รูปที่ 4.5 ความเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ตรวจวัด (Strain Distribute) ของ D24-1	46
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง คอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา	47
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง คอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา	48
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง คอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา	48
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง คอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา	49
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง คอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา	49
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง คอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา	50
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและ คอนกรีตที่กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา	51
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต ที่กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา	51
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต ที่กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา	52

รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยืดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต
ที่กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา.....52

รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยืดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต
ที่กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา.....53

รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยืดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต
ที่กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา.....53

รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip)ที่กำลัง
คอนกรีต 350 ksc ให้ความชื้นแบบรอบเวลา54

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยืดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต
ที่กำลังคอนกรีต 240 ksc เมื่อได้รับความชื้น 100 % ตามรอบเวลา55

รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานการยืดเหนี่ยวจากการทดลองและแบบจำลอง56

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเชิงกลตามแนวแกนในวัสดุต่างๆ.....	8
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเส้นใย	11
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเรซินล่วนที่ขึ้นรูปบ่มแล้ว	13
ตารางที่ 3.1คุณสมบัติวัสดุเชื่อมประสาน	29
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของแผ่นวัสดุเสริมเส้นใย Sika CarboDur S1.012	30
ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของผ้าห่มไฟฟ้า.....	31
ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบแรงดึง	34
ตารางที่ 4.1 ลักษณะการวิบัติหลังทดสอบดึงด้วยวิธี Pull-out Test.....	42
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวจากการทดลองและแบบจำลอง.....	57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ประเทศไทยได้มีการก่อสร้างและใช้งานอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากการรับน้ำหนักการใช้งาน และจุดประสงค์การใช้งานเปลี่ยนไปส่งผลให้ต้องการความสามารถในการรับกำลังเพิ่มขึ้น อีกทั้งอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อม ตลอดจนอายุการใช้งานที่ผ่านมา อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเกิดการเสื่อมสภาพ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการซ่อมแซมและเสริมกำลังแก่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก การปรับปรุงคุณภาพอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กให้รองรับกับวัตถุประสงค์การใช้งานนั้นมีหลากหลายวิธี การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Fiber Reinforced Polymer; FRP) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และเริ่มได้รับความนิยมมาปรับปรุงคุณสมบัติแก่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กอีกวิธีหนึ่งในประเทศไทย ในการซ่อมแซมและเสริมกำลังอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก (นันทวัฒน์ และ กริสน์, 2554)

สาเหตุที่วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีบทบาทในการซ่อมแซม และเสริมกำลังแก่อาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก คือ วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีความสามารถในการเสริมกำลังแก่องค์อาคารที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักซึ่งเบา อีกทั้งค่าบำรุงรักษาวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีราคาต่ำ (Tuakta, 2011) วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสะดวกในการขึ้นรูป และติดตั้งกับองค์อาคารที่ต้องการเสริมกำลัง อีกทั้งยังมีความทนทาน ป้องกันการเสื่อมสลายของคอนกรีตและเหล็กเสริมจากสภาพแวดล้อมภายนอก (JSCE, 1999(a)) นอกจากนี้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง หรือซ่อมแซมโครงสร้างได้โดยตรง มีความต้านทานในการเสื่อมสลายเนื่องจากสภาพแวดล้อม และสารเคมีได้เป็นอย่างดี (มยพ. 1508-51, 2551) อายุการใช้งานที่ยาวนานวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนอกจากช่วยเสริมกำลังแล้วอายุการใช้งานยังยาวนานประมาณ 75 ถึง 100 ปี โดยมีการบำรุงรักษาน้อย (Gangarao and Vijay, 2010)

ในประเทศไทยมีการติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก่องค์อาคารต่างๆเพื่อเสริมกำลัง และซ่อมแซมอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูปที่ 1.1 ดังนั้นผู้ออกแบบติดตั้งจำเป็นต้องมีความรู้ ความเข้าใจในพฤติกรรมของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ก่อนจะนำมาประยุกต์ใช้ในประเทศไทย



รูปที่ 1.1 การเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนบนแผ่นพื้นไร้คาน

1.2 ความสำคัญของปัญหา

หลังจากมีการนำวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมาเสริมกำลัง จึงเกิดงานวิจัยและการศึกษาวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากมาย โดยเฉพาะในเรื่องการศึกษาคุณสมบัติในการเสริมกำลังของวัสดุเสริมเส้นใย เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจ และนำมาประยุกต์ใช้ได้เหมาะสมตามจุดประสงค์ในแต่ละพื้นที่ Japan Society of Civil Engineers (JSCE) แนะนำว่าในการเสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมเส้นใยควรจะทดสอบว่า ชิ้นงานมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือไม่ ช่วงอุณหภูมิที่ควรทดสอบควรอยู่ระหว่าง $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ แต่หากชิ้นส่วนของคุณสมบัติต่างๆขององค์อาคารที่ทำการเสริมเส้นใยมีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิ ควรทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 1 ถึง 35°C เพื่อที่จะปรับใช้ให้เข้ากับสภาพการทำงาน หรือสภาพแวดล้อมการใช้งาน (JSCE, 1999(b))

สำหรับประเทศไทย กรมโยธาธิการและผังเมืองได้ทำการศึกษาและพบว่าความชื้นอาจเป็นอุปสรรคต่อความสามารถในการยึดเกาะระหว่างวัสดุรองพื้นและเรซินอาจลดลงเมื่อเกิดความชื้น ความชื้นจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของการยึดเกาะต่อตัวพอลิเมอร์และผิวคอนกรีตเป็นหลักแต่อาจจะรวมตัวกันบนแผ่นเส้นใยซึ่งทำให้คุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่นำมาเสริมกำลังของโครงสร้างเปลี่ยนไป จึงควรศึกษาถึงปัจจัยของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติต่างของวัสดุที่นำมาเสริมเส้นใย ซึ่งประเทศไทยยังไม่ได้ศึกษาถึงปัจจัยดังกล่าวอย่างจริงจัง (มยพ. 1508-51, 2551)

ในปี 2008 UMI microform พบว่า อุณหภูมิจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกายภาพและอายุการใช้งานในคานที่เสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นกำลังและความเหนียวในคานที่เสริมกำลังจะลดลง (UMI microform 1458105, 2008) ต่อมาในปี 2001 Gangaroa และ Vijay ได้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติทางกลในองค์อาคารที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังพบว่า องค์อาคารที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมกำลังเมื่อมีอุณหภูมิลดลง คุณสมบัติในการรับแรงดึง แรงดัด โมดูลัสยืดหยุ่น และกำลังจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่โอกาสที่จะเกิดการโก่งและการพังทลายจะลดลง (Gangaroa and Vijay, 2010)

สำหรับประเทศไทยมีช่วงอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 27°C ซึ่งมีช่วงระหว่างที่อุณหภูมิต่ำสุด -1.4°C ถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ 44.5°C ของข้อมูล 61 ปี ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2494 ถึง 2554 ของประเทศไทยมีความชื้นสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 64 เปอร์เซ็นต์ ถึง 84 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยอยู่ที่ 79 เปอร์เซ็นต์ (www.tmd.go.th) ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีช่วงอุณหภูมิ และความชื้นที่มีช่วงกว้าง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อคุณสมบัติต่างๆของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อที่จะนำวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมา

ประยุกต์ และเสริมกำลังให้แก่โครงสร้างให้ได้ถูกต้อง มีกำลังที่ตามที่ต้องการในการออกแบบเหมาะสมต่ออุณหภูมิและความชื้นในประเทศไทยซึ่งมีสภาพอุณหภูมิและความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตลอดทั้งปี จึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความชื้นต่อคุณสมบัติทางกล ต่อชิ้นวัสดุคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ที่อุณหภูมิระหว่าง 30°C ถึง 50°C และความชื้นที่ 100%RH เพื่อที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบการเสริมกำลัง และวางแผนการซ่อมแซมในการบำรุงรักษาอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุเสริมเส้นใยภายใต้อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่างๆ

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความชื้นที่มีผลต่อคุณสมบัติพันธะระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นและคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.3.2 เพื่อสร้างฐานข้อมูลในการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิ และความชื้นต่อวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

1.3.3 เพื่อศึกษาสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังการยึดเหนี่ยวต่อกำลังคอนกรีตที่ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้น

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 ศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ 30°C และ 50°C ต่อคุณสมบัติการเสริมกำลังในองค์ประกอบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.4.2 ศึกษาถึงอิทธิพลของความชื้น ในช่วงความชื้นอากาศปกติและความชื้น 100%RH ต่อคุณสมบัติการเสริมกำลังในองค์ประกอบของคอนกรีตเสริมเหล็ก

1.4.3 วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้ศึกษามีลักษณะเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่น (Carbon fiber reinforced polymer sheet)

1.4.4 วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเสริมกำลังตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ด้วยวิธีแบบบ่มสำเร็จ (Precured)

1.4.5 ทำการบ่มวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 3 วัน ภายใต้ อุณหภูมิห้อง เพื่อป้องกันไม่ให้วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นหลุดล่อนออกมา

1.4.6 ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกหล่อขึ้นรูป ขนาด 10 x 10 x 50 ซม. ซึ่งจะถูกทดสอบหลังจากการบ่มคอนกรีตแล้วอย่างน้อย 28 วัน

1.4.7 เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก ออกจากผ้าห่มไฟฟ้า จะต้องนำมาทดสอบคุณสมบัติทางกลทันที เพื่อป้องกันอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมภายนอกบริเวณ

1.4.8 วัสดุที่ใช้ในการเชื่อมประสาน คือ Epoxy

1.4.9 การทดสอบพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวกระทำที่อุณหภูมิปกติเท่านั้น



บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) คือ วัสดุที่มีส่วนประกอบของวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป ซึ่งมีการเชื่อมประสานวัสดุต่างๆเข้าด้วยกันด้วยพอลิเมอร์ที่มีลักษณะ ความยาวมากกว่าความหนา โดยวัสดุประกอบนั้นสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน (Tounsi, 2006) การประยุกต์ใช้วัสดุพอลิเมอร์ในงานโครงสร้างต้องมีวัสดุอย่างน้อยหนึ่งชนิดจากส่วนประกอบทำหน้าที่เสริมกำลังอย่างต่อเนื่อง ปกติแล้วเส้นใยที่ต่อเนื่อง (Continuous Fibers) มักจะมีความสามารถในการต้านทานการเสียรูปภายใต้แรงกระทำ (Stiffness) และกำลังรับน้ำหนักสูงเหมาะแก่การเสริมกำลังให้แก่โครงสร้าง ความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะมีขนาดไม่เกิน 76 มม. และ 0.04 มม. ตามลำดับ (ACI, 2002) เมื่อจำแนกตามวัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลังทางด้านวิศวกรรมโยธาสามารถจำแนกออกได้ 3 ชนิด ตามลักษณะเส้นใยที่เป็นองค์ประกอบ (นันทวัฒน์ และกริสน์, 2554) คือ

1) โพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP) มักจะประสบปัญหาเมื่อนำมาใช้งานในโครงสร้างที่มีการรับน้ำหนักต่อเนื่องยาวนาน (JSCE, 1999 (a)) จะเกิดความเสียหายเนื่องจากการคืบ หากจำเป็นต้องใช้ในงานที่ต้องรับแรงต่อเนื่องเป็นเวลานาน ควรออกแบบให้เกิดความเครียดที่เส้นใยแก้วไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์ของค่ากำลังดึงที่จุดประลัยในเส้นใยแก้ว เส้นใยแก้วจะมีความเปราะ ทำให้เกิดการแตกหักง่าย หากมีการดัดหรืองอเส้นใย จะทำให้ไม่สามารถรับแรงได้

2) โพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีที่อุณหภูมิสูง โดยจะจัดเรียงตัวโมเลกุลของคาร์บอนขึ้นเป็นลักษณะเส้นยาว เพื่อเสริมกำลังทำให้มีความแข็งแรงสูง มีความสามารถรับแรงดึงได้สูงถึง 10-15 เท่าของเหล็กกล้าที่มีขนาดเท่ากัน (Tuakta, 2011) อย่างไรก็ตาม เส้นใยคาร์บอนจะมีความเปราะ ทำให้เกิดการแตกหักง่าย หากมีการดัดหรืองอเส้นใย จะทำให้ไม่สามารถรับแรงได้ ดังนั้นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้ หรือ ซ่อมแซมในโครงสร้างอาคาร ที่มีลักษณะรับน้ำหนักอย่างต่อเนื่องและยาวนาน เช่น สะพาน หรือ งานที่ต้องการคุณภาพสูง เป็นต้น ซึ่งเส้นใยคาร์บอน (Carbon fiber) ที่ใช้กันจะมี 2 แบบคือชนิด High Tensile Strength จะใช้เสริมในงานคอนกรีตเสริมเหล็กชนิด High Modulus จะใช้เสริมในงานโครงสร้างเหล็ก

3) โพลีเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิดจะมีความคงทนสูง ทนต่อความล้า และแรงกระแทกได้ดี มีความยืดหยุ่น แต่มีข้อเสีย คือ การตัดแต่ง หรือผลิตด้วยเครื่องจักรยาก (JSCE, 1999(a)) ซึ่งจะถูกขึ้นรูปสำเร็จมาจากโรงงานผลิตเพื่อนำมาใช้งานเลย วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิดสามารถตัดงอได้ โดยที่เส้นใยไม่เสียรูป หรือเกิดการแตกหัก

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบหลัก 2 ส่วน (มยพ .1508-51) คือ ส่วนที่เป็นเส้นใย ซึ่งจะทำหน้าที่ เสริมกำลัง และความแข็งแรงแก่โครงสร้าง ส่วนประกอบที่สำคัญอีกส่วนที่เชื่อมประสานระหว่างเส้นใยและโครงสร้าง คือ แมทริก หรือ พอลิเมอร์ ซึ่งทำหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างองค์อาคารโดยรอบและเส้นใยที่ใช้ในการเสริมกำลัง อีกทั้งยังป้องกันความเสียหายทางกายภาพ และแรงเฉือนระหว่างชั้นต่อเส้นใย ในโครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กโดยรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย อย่างไรก็ตามการใช้เส้นใยต่างชนิดกันส่งผลต่อสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รูปแบบแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (MTECH, 2008)

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเชิงกลตามแนวแกนในวัสดุต่างๆ (มยผ .1508-51, 2551)

คุณสมบัติ	เหล็กเสริม	ลวดพันเกลียว	แท่งGFRP	เทนดอน(Tendons)		
				GFRP	CRFP	AFRP
กำลังรับแรงดึง	483-690	1369-1862	517-1207	1379-1724	165-2410	1200-2068
กำลังรับแรงดลาง	276-414	1034-1396	ไม่สามารถหาจุดครากได้			
โมดูลัสแรงดึง	200	186-200	41-55	48-62	152-165	50-74
ความเคียดแรงดึงที่จุด เปลี่ยน	>0.10	>0.04	0.035-0.05	0.03-0.045	0.01-0.015	0.02-0.026
กำลังรับแรงอัด	276-414	ไม่มี	310-482	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
สัมประสิทธิ์การขยายตัว เนื่องจากอุณหภูมิ	11.7	11.7	9.9	9.9	0.0	-1.0
ความถ่วงจำเพาะ	7.9	7.9	1.5-2.0	2.4	1.5-1.6	1.25

2.1 วิธีการติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่นิยมมี 3 แบบ ในแต่ละแบบจะมีลักษณะการติดตั้งที่แตกต่างกันออกไปเล็กน้อย (มยผ .1508-51, 2551) มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 การติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบขึ้นรูปเปียก (wet lay-up)

การติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบขึ้นรูปเปียก จะขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่บริเวณสถานที่ก่อสร้าง โดยทำการจัดวางเส้นใยพอลิเมอร์จึงเคลือบด้วยเรซินในรูปของเหลว และทำการบ่มเรซินให้สมบูรณ์

2.1.2 การติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบบ่มสำเร็จ

การติดตั้งวัสดุเสริมเส้นใยแบบบ่มสำเร็จจะเคลือบพอลิเมอร์ และบ่มวัสดุพอลิเมอร์ในการติดตั้งเข้ากับโครงสร้างอาคารแบบสภาวะแบบแผ่น หรือแบบแถบ เป็นตะแกรงเปลือกบางเพื่อติดตั้งที่ผิวคอนกรีตในการเสริมกำลังคอนกรีต

2.1.3 การติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบฝังใกล้ผิว

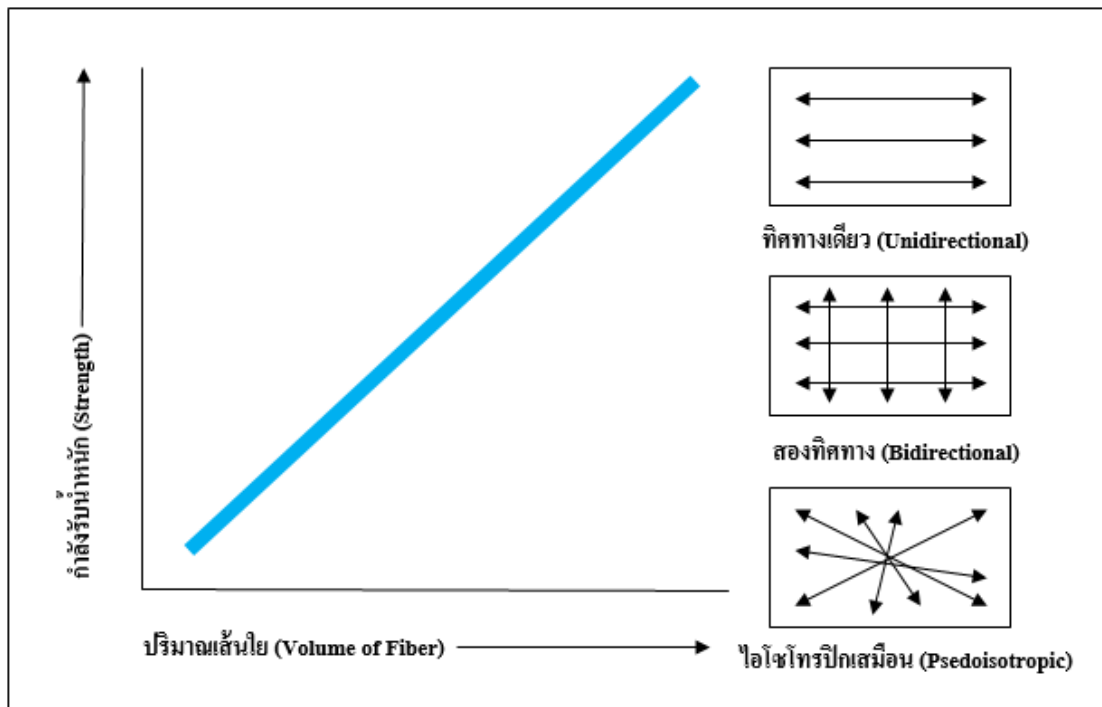
การติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบฝังใกล้ผิว จะดำเนินการโดยการนำวัสดุพอลิเมอร์ติดเข้ากับโครงสร้าง เพื่อรับน้ำหนักของชั้นส่วนที่บริเวณที่รองรับชั้นส่วนที่รับโมเมนต์ลบ และป้องกันการเกิดความเสียหาย อันเนื่องมาจากแรงกระทบ และ แรงเสียดสีระหว่างคอนกรีต และวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อวัสดุเสริมเส้นใย

เนื่องด้วยคุณสมบัติที่ดีหลากหลายประการของแผ่นวัสดุเสริมเส้นใย วัสดุนี้จึงเป็นที่แพร่หลายในการเสริมกำลังของโครงสร้าง แต่จากงานศึกษาพบว่า การเสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุเสริมเส้นใยนี้ บางครั้งอาจเกิดการวิบัติหาคู่ล่อน อันเกิดจากพฤติกรรมแบบเปราะ ซึ่งบางกรณีอาจเกิดขึ้นก่อนที่ได้ประเมินเอาไว้ ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้งานของวัสดุเสริมเส้นใยลดลง (สดสวย, 2554) โดยมีปัจจัยต่างๆ ดังนี้คือ

2.2.1 สมบัติของเส้นใยเสริมแรง

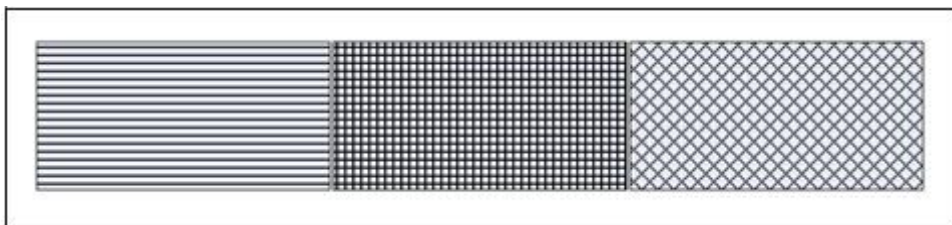
ลักษณะของการจัดวางเส้นใยเพื่อเสริมกำลังให้แก่องค์อาคาร เป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่ง เนื่องจากทิศทางของเส้นใยจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลไม่เหมือนกัน จึงจำเป็นต้องศึกษาว่าองค์อาคารที่ต้องเสริมกำลังนั้น มีความต้องการที่จะปรับปรุงคุณสมบัติใดจึงทำการเลือกลักษณะการจัดเรียงเส้นใยในการติดตั้ง (มยผ.1508-51, 2551) การจัดเรียงเส้นใยทิศทางเดียว (Unidirectional or One-dimensional Fiber Arrangement) จะส่งผลให้วัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใยมีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก ทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยจะสามารถรับน้ำหนักและโมดูลัสประลัยสูงสุดในทิศทางตามแกนของเส้นใย ส่วนการจัดเรียงเส้นใยในแนวระนาบ (Planar Arrangement) มีลักษณะการจัดเรียงเส้นใยสองมิติ ส่งผลให้มีกำลังรับน้ำหนักแตกต่างกันในแต่ละทิศทาง หากนำมาเปรียบเทียบกับ การจัดเรียงตัวแบบสามมิติ ซึ่งมีคุณสมบัติแบบไอโซทรอปิก จะสามารถรับน้ำหนักได้น้อยกว่าการจัดเรียงตัวทิศทางเดียว โดยคุณสมบัติทางกลในแต่ละทิศทางจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่ออัตราส่วนโดยปริมาตรของเส้นใยที่จัดเรียงตัวในทิศทางที่พิจารณา ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับน้ำหนักและทิศทางการเรียงตัวของเส้นใย

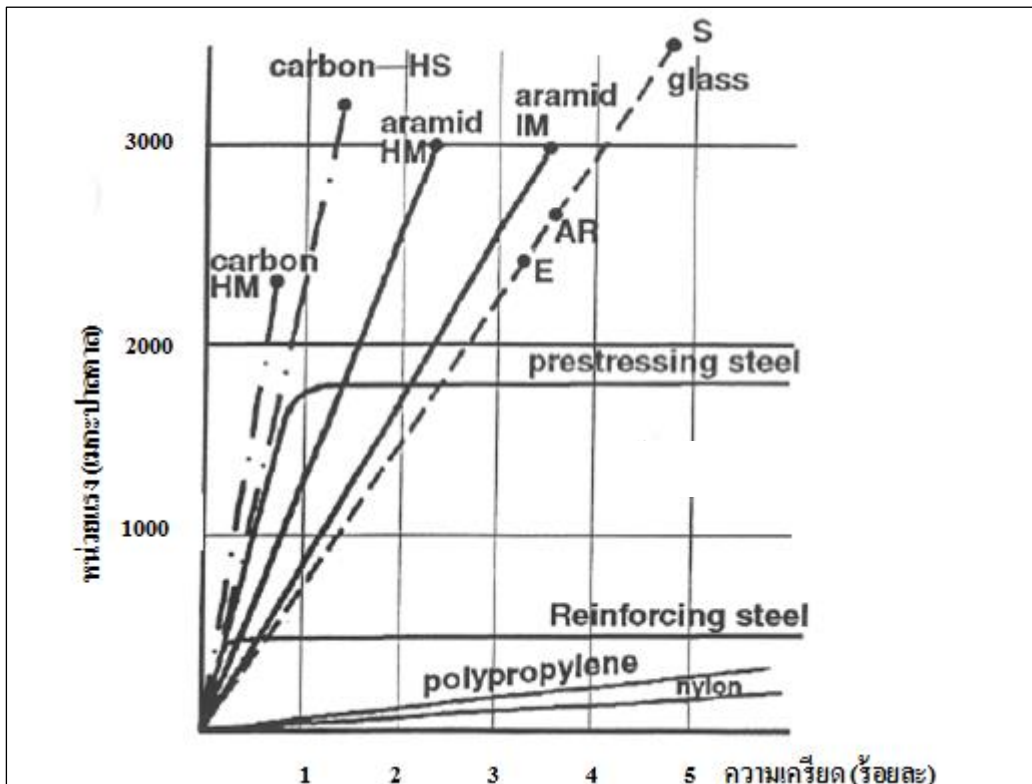
(ACI 440R-96,2002)

วัสดุเสริมเส้นใยแบบแผ่นจะมีรูปแบบการจัดเรียงเส้นใยที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการ และลักษณะการใช้งานโดยทั่วไปงานเสริมกำลังคอนกรีตจะใช้รูปแบบจัดเรียงทิศทางเดียว (Unidirectional) เพื่อความสะดวกในการติดตั้ง และประสิทธิภาพในการกำหนดทิศทางการรับแรงที่ต้องการมากขึ้นแต่ในบางกรณีแผ่นวัสดุเสริมเส้นใยอาจใช้รูปแบบการจัดเรียงแบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional) เพื่อที่จะการกระจายถ่ายแรงหรือเพื่อการรับแรงเฉือนในทิศทางต่างๆตามความเหมาะสม (ACI 440R-96, 2002) การเรียงตัวของเส้นใยได้แสดงให้เห็ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การจัดเรียงเส้นใยแบบ Unidirectional (0°), Bidirectional ($0^\circ+90^\circ$), Bidirectional (45°) (ACI 440R-96, 2002)

นอกจากทิศทางการจัดเรียงตัวแล้ว การเลือกใช้วัสดุเสริมเส้นใย จะส่งผลต่อความเค้น ความเครียด และกำลังดึงของวัสดุเสริมเส้นใย เพราะคุณสมบัติทางกลในแต่ละเส้นใยจะแตกต่างกัน จึงควรที่จะเลือกใช้เส้นใยให้เหมาะสมต่อองค์อาคารเพื่อให้สมรรถนะสูงสุด และคุ้มทุน (สดสวย, 2554) ดังรูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของเส้นใยแบบต่างๆ โดยตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึง คุณสมบัติของเส้นใย



รูปที่ 2.4 พฤติกรรมระหว่างหน่วยแรงและความเครียดภายใต้แรงดึงของเส้นใยต่างๆ

(ACI 440R-96, 2002)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเส้นใย (Head, 1996)

Unidirectional Advanced Composite Materials	Fiber content (% by weight)	Density (kg/m ³)	Longitudinal Tensile Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)
Carbon Fiber/Polyester CFRP Laminate	65-75	1600-1900	120-250	1200-2250
Aramid/Epoxy AFRP Laminate	60-70	1050-1200	40-125	1000-1800
Glass/Epoxy GFRP Laminate	50-80	1600-2000	20-55	400-1800

2.2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ (เรซิน)

พอลิเมอร์หรือเรซิน มีหน้าที่ถ่ายแรงระหว่างเส้นใยเสริมกำลัง และโครงสร้างโดยรอบ ทำให้วัสดุเสริมเส้นใยสามารถยึดติดอยู่กับองค์อาคาร และเสริมกำลังให้แก่องค์อาคารได้ อีกทั้งยังป้องกันการเสื่อมถอยของวัสดุเสริมเส้นใย คอนกรีตเสริมเหล็ก หรือองค์อาคารเหล็กเนื่องจากแรงกระทบต่างๆจากภายนอก หรือสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม (Tim and Luke, 2010) คุณสมบัติของแมทริกซ์พอลิเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อกำลังของวัสดุเสริมเส้นใยในการรับแรงเฉือนระหว่างชั้น (Inter Laminar Shear) ในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก ได้แก่ แรงเฉือนในระนาบ (In-plane Shear) ต่อระบบโครงสร้าง ภายใต้แรงดัด (Bending Loads) และแรงบิด (Torsional Loads) เพราะพอลิเมอร์สามารถช่วยค้ำยันทางด้านข้างเพื่อป้องกันการโก่งเดาะ (Buckling) ในขณะที่รับแรงอัดอีกด้วย ดังนั้นพอลิเมอร์จึงมีส่วนสำคัญต่อสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (ปิยลักษณ์ และอัครวัชร, 2554)

พอลิเมอร์ที่นิยมใช้งานในโครงสร้างปัจจุบันนิยมใช้พอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester: UP) สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า มีผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ของประเทศสหรัฐอเมริกา ใช้พอลิเอสเตอร์แบบไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบหลัก (The composite Institute, 2002) ซึ่งเรซินส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นของเหลวหนืด โดยจะคงสภาพในรูปแบบนี้ตั้งแต่กระบวนการผลิตเรซินจนถึงขั้นตอนการบ่มเรซิน ซึ่งจะผ่านกระบวนการผลิตบางส่วนที่ขึ้นรูปผสมเส้นใยให้เป็นแผ่น เรซินนี้จะสามารถใช้งานได้ในสภาวะบางอุณหภูมิ หรือความดันเท่านั้น ในบางครั้งอาจเรียกเรซินที่มีวัสดุตั้งต้นผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยาบางส่วนว่า Preproduction Forms of Partially Reacted materials หรือวัสดุที่ทำให้หนาแน่นทางเคมี (chemically-thickened Materials) โดยจะจัดเรียงเส้นใยประกอบขึ้นเป็นแผ่น คุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์บางชนิดจะแสดงให้เห็นตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติทางกายภาพของเรซินล้าวนที่ขึ้นรูปบ่มแล้ว (ACI 440R-96, 2002)

คุณสมบัติ	ไอโซพอลิเอสเตอร์ 7241	ไวนิเอสเตอร์		
		930-35	D-1618	D-1222
ความแข็งบาร์คอลล	50	45	45	40
กำลังรับแรงดึง (กก./ตร.ซม.)	802	893	914	809
โมดูลัสรับแรงดึง (กก./ตร.ซม.)	33745	33745	32337	33051
ความเครียดดึงที่จุดแตกหัก (ร้อยละ)	2.9	4.2	5.2	3.9
กำลังรับแรงดัด (กก./ตร.ซม.)	1280	1526	1526	1159
โมดูลัสรับแรงดัด (กก./ตร.ซม.)	35152	34458	34458	37263
อุณหภูมิที่เกิดการบิดตัว (องศาเซลเซียส)	109	133	119	141

2.2.3 สัดส่วนการผสมของเส้นใยเสริมแรง

เนื่องจากวัสดุที่เป็นเส้นใยเสริมแรง มักมีสมบัติเชิงกลสูงกว่าโพลีเมอร์ ดังนั้นหากโพลีเมอร์มีเส้นใยเสริมแรงมากขึ้น จะทำให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลสูงขึ้น แต่การผสมเส้นใยเสริมแรงกับโพลีเมอร์ก็มีขีดจำกัดเนื่องจากเส้นใยเสริมแรง ควรมีเนื้อโพลีเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ (สดสวย, 2554)

2.2.4 การเตรียมสภาพผิวก่อนทำการติดตั้ง FRP

การเตรียมผิวหน้าของชิ้นวัสดุที่ต้องการเสริมกำลังเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและระบบ FRP (ACI 440.2R-02, 2002) ซึ่งลักษณะการใช้งานและระบบ FRP ที่ต่างกันอาจต้องมีการเตรียมผิวที่แตกต่างกันมาตรฐาน ACI 440 ได้จัดแบ่งการใช้งานระบบ FRP ออกเป็น 2 ประเภทกล่าวคือ

ประเภทแรงยึดเหนี่ยววิกฤต (Bond Critical Application) เป็นการเสริมกำลังรับแรงดัดและแรงเฉือนของคานพื้นเสาและผนังซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและระบบ FRP เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการสร้างพฤติกรรมเชิงประกอบ (Composited Behavior) และประเภทการสัมผัสวิกฤต (Contact Critical Application) เป็นการเสริมกำลังโดยแรงยึดเหนี่ยวไม่มีบทบาทหลักในการรับแรง เช่น การเสริมกำลังด้วยการรัดรอบเสาคอนกรีตเพื่อโอบปิดเสาแบบตั้งรับ (Passive Confinement) ซึ่งแรงโอบรัดตัวเสาเกิดจากการตั้งรับของแผ่นเส้นใยจากการขยายตัว (Dilate) ของหน้าตัดเสาเนื่องจากแรงอัด

ดังนั้นสำหรับการเสริมกำลังประเภทการสัมผัสวิกฤต การสัมผัสแบบสนิระหว่างคอนกรีตและระบบวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ก็เพียงพอสำหรับทำให้เกิดการบีบรัดคอนกรีตขณะนำหน้าบรรทุกเกินพิกัดปกติอย่างไรก็ตามในการจัดทำมาตรฐาน ACI ได้หลีกเลี่ยงการแบ่งแยกเช่นนี้ด้วยเหตุผล 3 ประการดังนี้

1) ถึงแม้แรงยึดเหนี่ยวจะไม่ใช่อะไรจำเป็นในการใช้งานประเภทสัมผัสวิกฤตแต่ก็ควรจะมีเพื่อให้เกิดความคงทนเนื่องจากในสภาพแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนรุนแรงการที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอาจนำไปสู่ความเสียหายที่รุนแรงได้ในกรณีที่น้ำแทรกเข้าไปในวัฏจักรการแข็งตัวและละลาย (Freeze and Thaw)

2) ในปัจจุบันยังไม่มีข้อมูลเพียงพอที่จะอธิบายได้ว่าการสัมผัสแบบสนิทสามารถทำให้เกิดแรงโอบรัดเสาได้เมื่อต้องการโดยไม่ทำให้เกิดการขยายตัวออกด้านข้างอย่างมากของคอนกรีตในเสา

3) ในระยะเริ่มแรกของการพัฒนาเทคโนโลยีการใช้งานวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนี้การสนับสนุนให้มีการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและระบบวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในการใช้งานทุกรูปแบบและทุกโครงการมีแต่จะส่งผลดีต่อการก่อสร้าง

หากต้องติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก่องค์อาคารเพื่อการซ่อมบำรุง จำเป็นที่จะต้องรื้อวัสดุตกแต่ง และปูนทรายที่ฉาบออก รวมทั้งทำความสะอาดผิวของคอนกรีตก่อนทำการติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เพื่อให้ระบบวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีกำลังตามที่ได้ออกแบบและมีพฤติกรรมเป็นไปตามจุดประสงค์ของการออกแบบ

2.2.5 อุณหภูมิ

ในปัจจุบัน ผู้ออกแบบจะมองข้ามปัญหาเรื่องอุณหภูมิ แต่แท้จริงแล้วอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และอายุการใช้งาน อย่างไรก็ตามยังไม่มีค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกลของโครงสร้างที่ทำการเสริมกำลังอย่างจริงจัง แต่ทราบว่าความร้อนส่งผลต่อการขยายตัวของคอนกรีต, เส้นใย และวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอื่นๆต่อไป ค่าการระบายความร้อนและการขยายตัวของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้น จะส่งผลต่อค่าโมดูลัสอย่างเห็นได้ชัด (JSCE, 1999(a)) การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิหรือความร้อนจะมีลักษณะแบบเชิงเส้น ดังสมการ

$$\alpha_L = \frac{E_f \alpha_f V_f + E_m \alpha_m (1 - V_f)}{E_f V_f + E_m (1 - V_f)} \quad (2.1)$$

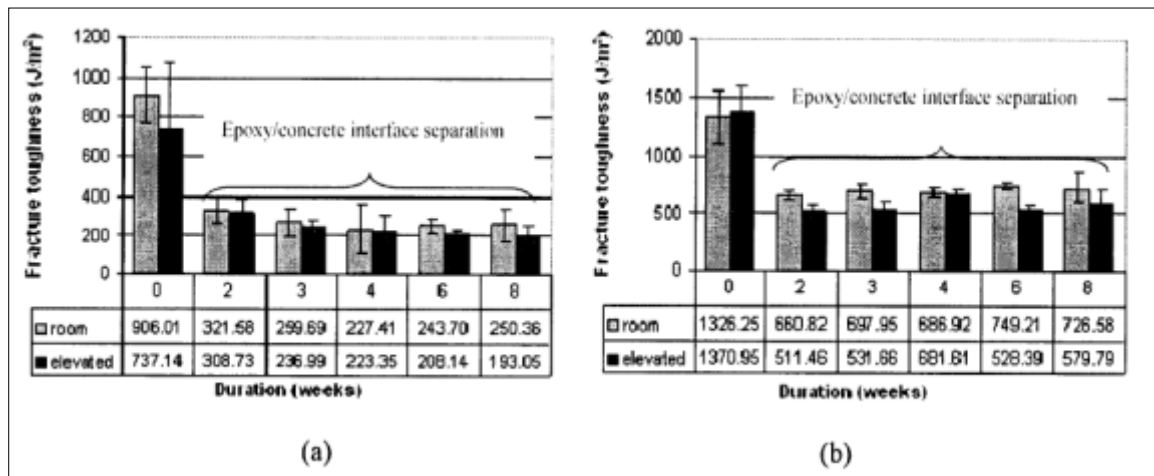
เมื่อ	α_L	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามแนวแกน
	α_f	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเส้นใย
	α_m	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของเรซิน
	E_f	คือ ค่ายังโมดูลัสของเส้นใย
	E_m	คือ ค่ายังโมดูลัสของเรซิน
	V_f	คือ ปริมาตรการขยายตัวของแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

อุณหภูมิจะส่งผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยตรงไม่ว่าจะเป็นค่าโมดูลัส แรงดึง แรงดัด แรงต้านทานการคืบ การยึดตัว การโก่ง การแตกหัก และการรับแรงกระแทก โดยเฉพาะวัสดุเชื่อมประสานเมื่อได้รับความร้อนที่สูงค่าโมดูลัส, แรงเฉือนและแรงดัดของวัสดุเชื่อมประสานจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด (ACI 440.2R-02, 2002)

2.2.6 ความชื้น

ความชื้นเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีมักจะถูกมองข้าม ทำให้กำลัง และอายุการใช้งานมีประสิทธิภาพไม่ได้ตามที่ต้องการออกแบบ สิ่งที่ยังเชื่อว่าความชื้นมีผลต่อคุณสมบัติการใช้งาน คือ การหดขยายตัวของปริมาตรคอนกรีต (Tuakta, 2011) ในสภาวะที่แห้ง ปริมาตรของคอนกรีตจะหดตัว ทำให้พื้นที่ผิวของคอนกรีตลดลง ทำให้แนวเชื่อมประสานของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตยึดแน่นขึ้นในทางกลับกันเมื่อคอนกรีตได้รับความชื้น ปริมาตรคอนกรีตจะขยายตัวทำให้แรงเชื่อมแน่นของวัสดุประสานระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตลดลง ความดันภายในของคอนกรีตก็เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่ได้รับอิทธิพลจากความชื้น (Bazant and Prat, 1998) หลังจากทำการผสมและบ่มขึ้นรูปคอนกรีต ในเนื้อคอนกรีตจะพบว่ามีน้ำจากความชื้นเนื่องจากฟองอากาศ และการระเหยตัวของน้ำเนื่องจากการทำปฏิกิริยาทางเคมี เมื่อคอนกรีตนี้อยู่ในสภาวะที่ได้รับความชื้น น้ำจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโพรงดังกล่าว ซึ่งจะทำให้เกิดความดันน้ำจากภายใน ทำให้เกิดความเครียดเพิ่มขึ้น เกิดรอยแตกขนาดเล็กจากภายในโพรง สะสมจนส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตจนกระทั่งรอยแตกขยายตัวออกมาสู่ผิวชั้นนอกของคอนกรีต นอกจากนี้มาตรฐานการทดสอบ ASTM C 39 กล่าวว่า ในตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการทดสอบด้านกำลังหากมีความชื้นจะทำให้ค่าที่ทดสอบกำลังอัดมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่แห้ง เป็นผลจากการขยายตัวของซีเมนต์เพสต์ ซึ่งเมื่อน้ำเข้าสู่คอนกรีตจะส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างซีเมนต์เพสต์และวัสดุมวลรวมนั้นมีค่าลดลง ในส่วนของวัสดุเชื่อมประสานวัสดุแม้ว่ายังไม่ได้มีการศึกษาแยกแยะระหว่างอิทธิพลของน้ำหรือความชื้นและอิทธิพลของเกลือ แต่

อิทธิพลของน้ำทะเลส่งผลต่อกำลังการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสานลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ (ACI 440.2R-02, 2002) สำหรับอิทธิพลของความชื้นต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของความชื้นที่ส่งผลต่อแรงดึง (a) แรงเฉือน (b) ในการแตกหักของชั้นทดสอบ (Tuakta, 2011)

การลดกำลังของแรงเชื่อมระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอันเนื่องมาจากได้รับอิทธิพลของความชื้นอย่างต่อเนื่อง การเสื่อมสลายเนื่องจากความชื้นที่พื้นผิวได้รับสามารถประเมินได้ในรูปแบบเอ็กโพเนนเชียล (Tuakta, 2011) ดังสมการต่อไปนี้

$$\Gamma = Ae^{-b\left(\frac{C}{C_{th}}\right)} \quad (2.2)$$

โดยที่ A และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทำการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิ เนื่องจากธรรมชาติของรอบความชื้นที่เกิดขึ้นในชิ้นวัสดุจะสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{d\Gamma}{dN} = q\left(\frac{C}{C_{th}}\right)^n \quad (2.3)$$

เมื่อ	Γ	คือ ค่าความเหนียวของการแตกหักในผิวบน
	N	คือ จำนวนรอบของความขึ้นในขึ้นทดสอบระหว่างแห้งและขึ้น
	q	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพังของการรับแรงดึงภายใต้การรับความชื้นอย่างต่อเนื่อง
	n	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพังของการรับแรงเฉือนภายใต้การรับความชื้นอย่างต่อเนื่อง
	C	คือ ความชื้นชั่วคราว
	C_{th}	คือ ความชื้นที่เปลี่ยนไป

2.3 ลักษณะการวิบัติของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันมีเส้นใย และวัสดุพอลิเมอร์หลากหลายให้เลือกใช้ตามวัตถุประสงค์ต่างๆเพื่อเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีตด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยไม่ว่าจะเป็นประเทศไทยและในต่างประเทศอย่างไรก็ตามวัสดุเมทริกหรือพอลิเมอร์ยังมีข้อจำกัดในการใช้ ที่ทำให้คุณสมบัติรับแรงดึง หรือแรงยึดเหนี่ยวตามแนวแกนระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นเส้นใยลดลง (ธรรมชาติ, 2552) กล่าวคือ

1) วัสดุเชื่อมประสานระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตเสริมเหล็กส่วนมากจะเสื่อมสภาพเมื่อต้องทนต่อสภาพแวดล้อมที่ประมาณ 70 ถึง 80 °C ขึ้นไปพอลิเมอร์บางชนิดเมื่อได้รับอุณหภูมิดังกล่าวอาจเกิดการเสื่อมสภาพและสูญเสียกำลังในทันที

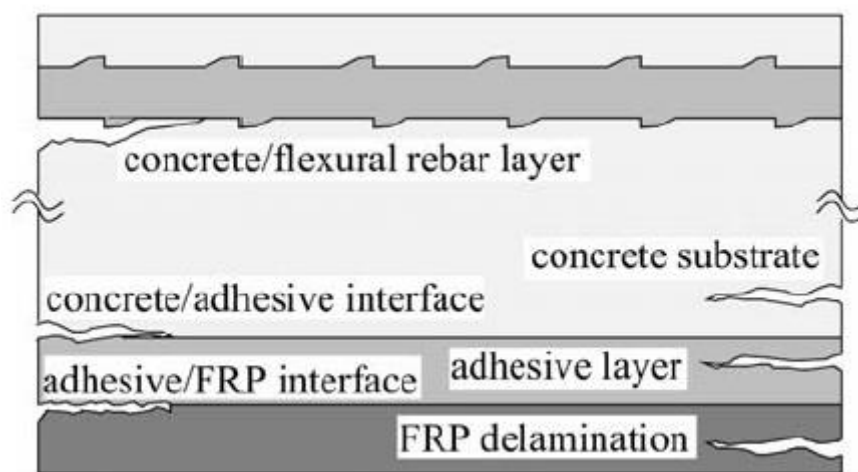
2) การยึดเกาะระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีสมรรถนะลดลงเนื่องจากความชื้นที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวคอนกรีตโดยการสูญเสียความสามารถในการยึดเกาะอาจเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างการติดตั้ง และภายหลังการใช้งานอย่างต่อเนื่องในสภาวะที่มีความชื้นสูง

3) ในบางครั้งอาจประสบปัญหาความเข้ากันได้ (Compatibility) ของวัสดุพอลิเมอร์และผิวคอนกรีตที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์ในการขยายตัวของคอนกรีต และวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำ และค่าโมดูลัสยืดหยุ่น เป็นต้น ซึ่งหากมีค่าความแตกต่างของวัสดุแต่ละส่วนต่างกันมากอาจส่งผลให้เกิดการแยกตัวออกจากกัน

โดยทั่วไปแล้วการเสื่อมสลายการวิบัติของคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้น มักจะเกิดจากการเสื่อมสลายของวัสดุประสาน แต่ยังไม่มีการศึกษาที่แน่ชัดว่าเกิดจากปัจจัยใดบ้าง อย่างไรก็ตามการเสื่อมสลายของวัสดุเชื่อมประสานจนให้เกิดความวิบัตินั้นได้รับอิทธิพลมาจากอุณหภูมิและความชื้น (Bazant and Prat, 1998) เมื่อคอนกรีตเสริมเหล็กและวัสดุพอลิ

ลิเมอร์เสริมเส้นใยได้รับอุณหภูมิและความชื้นที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การหดขยายของวัสดุจะไม่เท่ากัน ซึ่งจะก่อให้เกิดรอยร้าวขึ้นเนื่องจากการยึดเหนี่ยวนี้ อีกทั้งความชื้นทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันในวัสดุเชื่อมประสาน ส่งผลให้เกิดความเสื่อมสลายของแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน (Tuakta, 2011)

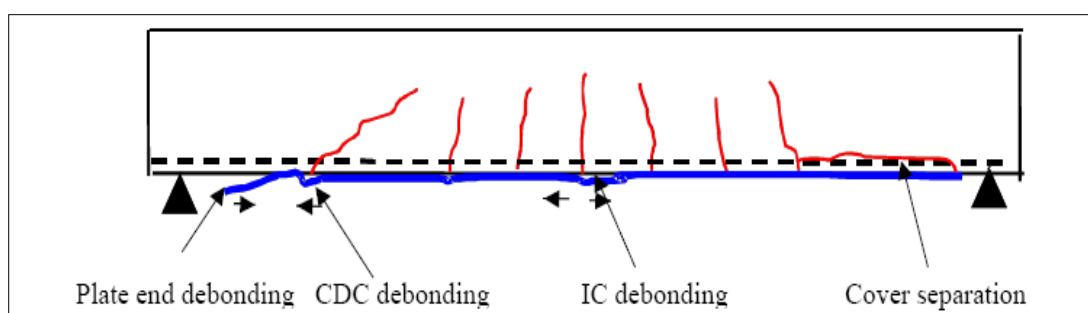
ลักษณะหรือพฤติกรรมของการวิบัติหรือการเสื่อมสภาพนั้นมักจะเกิดขึ้นในส่วนพื้นผิวส่วนบน (concrete interface) ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งความล้มเหลวในของพันธะนี้จะมีลักษณะที่สามารถเกิดได้อยู่ 5 ลักษณะ กล่าวคือ 1) การแยกตัวที่วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย, 2) การเสื่อมสลายแรงยึดติดระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและกาว, 3) การเสื่อมสลายของพันธะของวัสดุเชื่อมประสาน, 4) การแยกตัวระหว่างวัสดุเชื่อมประสานและคอนกรีต และ 5) การแตกหักของคอนกรีต



รูปที่ 2.6 พฤติกรรมการเสื่อมสลายของยึดเหนี่ยว (Tuakta, 2011)

การศึกษารูปแบบการวิบัติในรูปแบบต่างที่เกิดขึ้นซึ่งรวมไปถึงการวิบัติของพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสานระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นที่ติดตั้งแบบไม่ยึดติดกับคอนกรีตที่ผ่านมา สามารถแบ่งออกเป็น 4 ลักษณะ (Oral and Tzu, 2006) คือ 1) การวิบัติแบบหลุดล่อนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นที่ช่วงด้านในของคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นวัสดุเสริมเส้นใย (plate-end debonding, PE debonding) ในการหลุดล่อนนี้จะมีทิศทางการหลุดล่อนจากขอบของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นเข้ามาสู่ผิวด้านใน, 2) การเกิดรอยแตกวิกฤตในแนวทแยง (critical diagonal crack debonding, CDC debonding) สาเหตุเกิดจากความสามารในการรับแรงเฉือนของคอนกรีตต่ำ, 3) การวิบัติแบบหลุดล่อนของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นซึ่งเริ่มเกิดการเสื่อมสลายจากด้านในของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยออกสู่ปลายแผ่น (intermediate crack-induced debonding, IC debonding) ซึ่งเริ่มเกิดการเสื่อม

สลายจากด้านที่เกิดรอยร้าวด้านในของวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยออกสู่ปลายแผ่นวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยและ 4) การแยกตัวของคอนกรีตที่ป้องกันเหล็กเสริม (covering separation) มักจะเกิดเมื่อบริเวณ interface มีความเครียดสูงแต่คอนกรีตมีความแข็งแรงต่ำ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 โดยความเค้นที่ผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและชั้นวัสดุประสานซึ่งมีค่าสูงมากในบริเวณใกล้เคียงรอยร้าวที่มีอยู่และที่บริเวณปลายแผ่นเป็นกลไกที่ทำให้เกิดการหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย



รูปที่ 2.7 ลักษณะการวิบัติพฤติกรรมยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต (Ye, Lu and Chen, 2005)

2.4 แบบจำลองและสมการที่ใช้ในการศึกษากำลังการยึดเหนี่ยว

แบบจำลองการยึดเหนี่ยว (Shear stress) นั้นได้มีการศึกษาวิจัยอย่างมากมายโดยเฉพาะกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นเหล็กกับคอนกรีตและวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยกับคอนกรีต สามารถจำแนกแบบจำลองกำลังการยึดเหนี่ยวออกได้เป็น 3 ประเภท (Limpaninlachat, 2011) คือ แบบจำลองจากการทดสอบ (Empirical model) ซึ่งผลของแบบจำลองที่ได้เกิดจากการการวิเคราะห์การถดถอยของผลที่ทดสอบโดยตรง แบบจำลองชนิดนี้จะคำนวณกำลังการยึดเหนี่ยวประลัยซึ่งหาได้จากแรงเฉือนเฉลี่ยคูณกับความกว้างและความยาวของพื้นที่ที่ใช้ในการยึดเหนี่ยว ส่วนมากความยาวที่ใช้ในการยึดเหนี่ยวจะใช้เพียงระยะความยาวประลัยผลแบบจำลองการแตกหักทางกล (Fracture-mechanics-based model) แบบจำลองนี้จะวัดกำลังการยึดเหนี่ยวจากแรงที่ใช้ดึงโดยตรงและแบบจำลองในการออกแบบกำลังการยึดเหนี่ยวเฉพาะทาง โดยแบบจำลองนี้จะใช้ในการศึกษาผลกระทบต่างๆที่สังเกตเฉพาะเช่น อิทธิพลของกำลังคอนกรีต หรือ Mohr – Coulomb Strength เป็นต้น

สำหรับการประยุกต์ใช้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงเฉือนและการเลื่อนไถล (Shear stress – slip curve) ในตัวอย่างการทดสอบจะดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Strain gauge) บนวัสดุโพลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ตำแหน่งต่างๆเพื่อใช้ในการศึกษาพลังงานที่ทำให้เกิด

การแตกหักของแรงยึดเหนี่ยว (Gf) การหาค่า Gf นี้จะต้องศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่ากำลังยึดเหนี่ยวและค่าการเลื่อนไถลในทุกๆตำแหน่งและกำลังที่ใช้ดึงจากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain gauges) ดังรูปที่ 2.8 ที่แสดงให้เห็นถึง strain distribution โดยจะนำค่าของความเครียดมาใช้ในการศึกษากำลังการยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต สำหรับสมการแรงเฉือนในการเลื่อนไถลของงานวิจัยนี้จะทดสอบแบบ single - lap pullout ซึ่งปรับปรุงจากสมการดูดยภาพ โดยสมการแรงเฉือนหาได้ดังสมการที่ 2.4

$$\tau_i = \frac{E_f t_f (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{\Delta x} \quad (2.4)$$

เมื่อ τ_i คือ ความเค้นแรงเฉือนเฉลี่ยที่ตำแหน่ง i

$\varepsilon_i, \varepsilon_{i-1}$ คือ ค่าความเครียดจากอุปกรณ์วัดความเครียด (Stain gauge) ที่ตำแหน่ง i และ i-1

E_f คือ ค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

Δx คือ ระยะห่างของ strain gauges

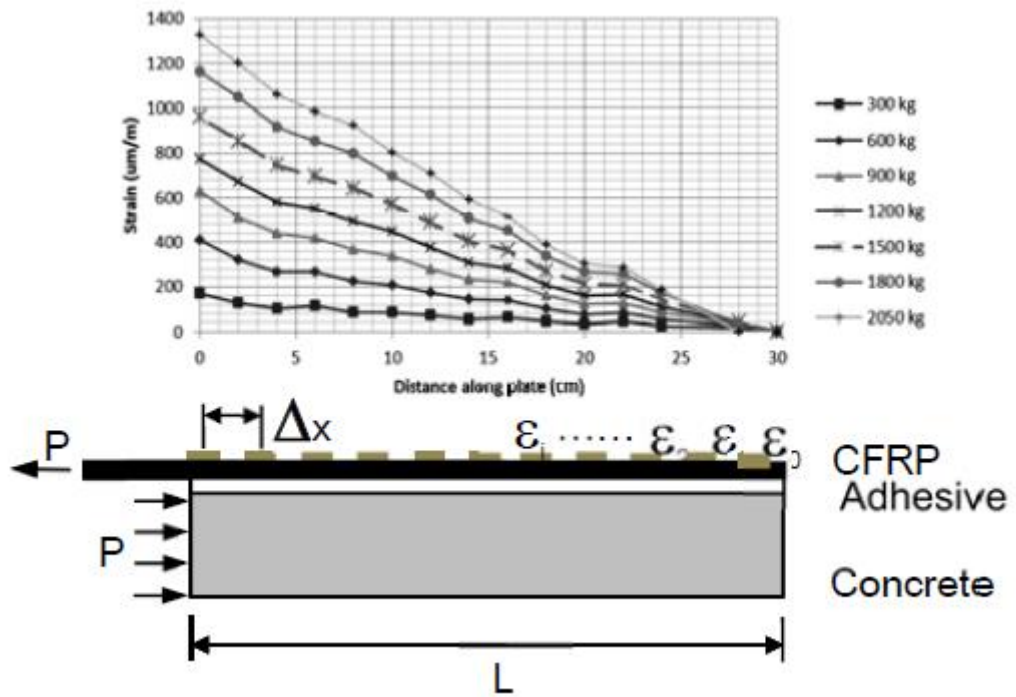
t_f คือ ความหนาของแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การเลื่อนไถลที่เกิดขึ้นนั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากค่าความเครียดที่วัดได้จากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain gauges) ในแต่ละตำแหน่งเช่นกันดังสมการที่ 2.5 โดยรูปที่ 2.9 จะแสดงให้เห็นถึงกราฟความสัมพันธ์ shear stress - slip ดังนี้

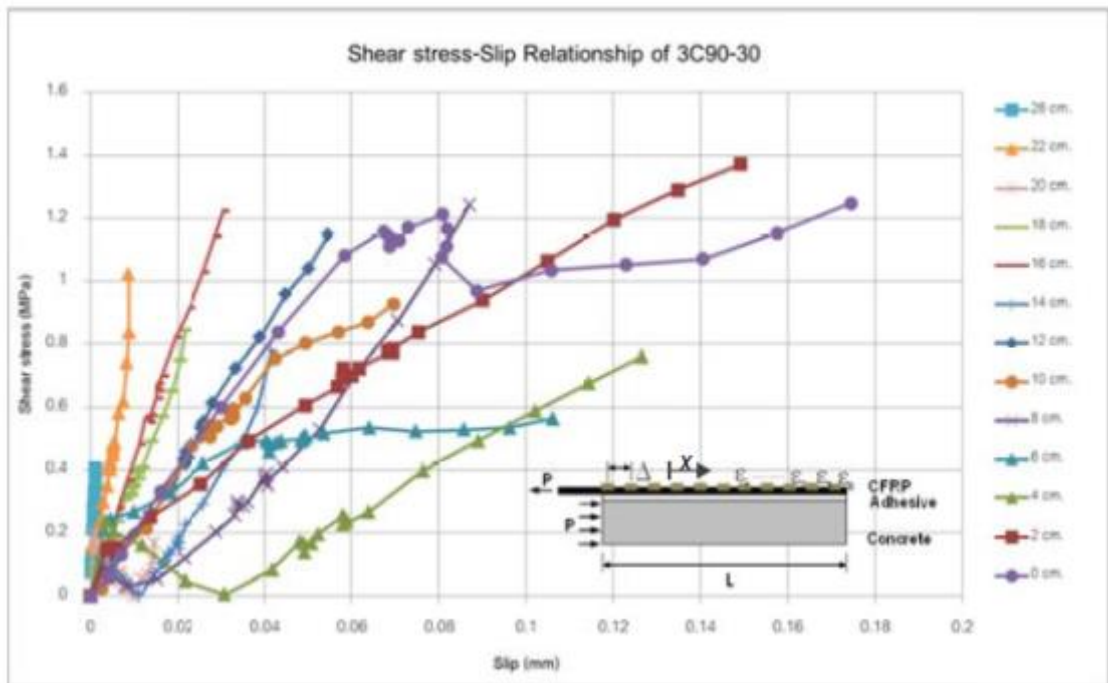
$$S_i = \frac{\Delta x}{2} \left(\varepsilon_0 + 2 \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j + \varepsilon_i \right) \quad (2.5)$$

เมื่อ S_i คือ การเลื่อนไถลของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ตำแหน่ง i

ε_0 คือ ค่าความเครียดที่ตำแหน่งปลายของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างกราฟ Strain Distribute (Limpaninlachat, 2011)



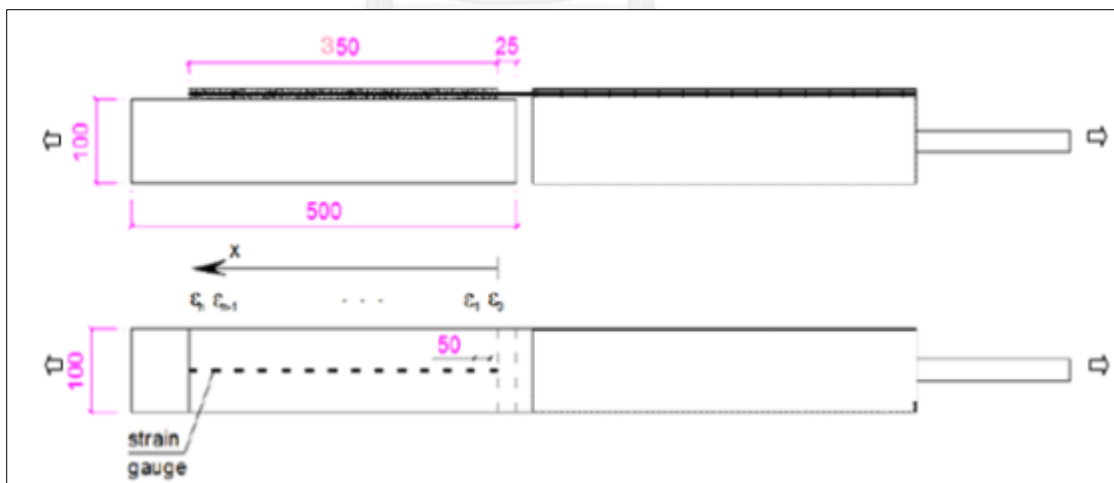
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกราฟ Shear Stress – Slip (Limpaninlachat, 2011)

2.5 การเลื่อนไถลของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตเสริมเหล็กและแผ่นวัสดุเสริมเส้นใย

Jianguo และคณะได้ทำการศึกษาแรงเฉือนและการเลื่อนไถลของแรงยึดเหนี่ยว ($\tau - s$ model) ซึ่งจะศึกษาบนพื้นฐานความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึง และการเลื่อนไถลโดยใช้หลักการกระจายความเครียด โดยรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการทดสอบ ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังสมการดังต่อไปนี้ (Limpaninlachat, 2011)

$$\frac{G_a}{t_a} = \frac{G_p G_{ad}}{G_p t_{ad} + G_{ad} t_p}, G_p = \frac{E_p}{2(1 + \gamma_p)}, G_{ad} = \frac{E_{ad}}{2(1 + \gamma_{ad})} \quad (2.6)$$

เมื่อ G_a คือ โมดูลัสแรงเฉือนของกา
 t_a คือ ความหนาของกา
 E_p, E_{ad} คือ โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุรองพื้นและกา
 t_p, t_{ad} คือ ความหนาของวัสดุรองพื้นและกา
 γ_p, γ_{ad} คือ อัตราส่วนปัวซองค์ของวัสดุรองพื้นและกา



รูปที่ 2.10 ลักษณะการดึงทดสอบของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

(Chanh, 2011)

ความเครียดเลื่อนไถลที่เกิดจากแรงดึงที่ปลายมีความสัมพันธ์ต่อการทดสอบแรงดึงทางเดียว ดังสมการต่อไปนี้

$$\varepsilon = f(s) = A(1 - e^{-Bs}) \quad (2.7)$$

จาก
$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{df(s)}{ds} \frac{ds}{dx} = \frac{df(s)}{ds} \varepsilon = \frac{df(s)f(s)}{ds} \quad (2.8)$$

$$\tau_i = E_f t_f \frac{d\varepsilon}{dx} = E_f t_f \frac{df(s)f(s)}{ds} \quad (2.9)$$

ดังนั้น
$$\tau = A^2 B E_f t_f e^{-Bs} (1 - e^{-Bs}) \quad (2.10)$$

การหาพลังงานการแตกหักที่พื้นผิวหาได้จาก สมการดังต่อไปนี้

$$G_f = \int_0^{\infty} \tau ds \quad (2.11)$$

$$A = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f t_f}} \quad (2.12)$$

จากทฤษฎีการหาค่าลึงสูงสุดที่ใช้ในการดึงวัสดุทดสอบตัวอย่างสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$P_{\max} = b_f E_f t_f \varepsilon_{\max} = b_f E_f t_f \lim_{s \rightarrow \infty} A(1 - e^{-Bs}) = b_f E_f t_f A \quad (2.13)$$

$$P_{\max} = b_f \sqrt{2E_f t_f G_f} = (b_f + 2\Delta b_f) \sqrt{2E_f t_f G_f} \quad (2.14)$$

เมื่อ $\Delta b_f = 3.7$ มม. ที่ใช้สำหรับลดทอนจากความกว้างของแนวเชื่อมประสาน

$$\tau = 2BG_f(e^{-Bs} - e^{-2Bs}) \quad (2.15)$$

ให้ $\frac{d\tau}{ds} = -2B^2G_f(e^{-Bs} - 2e^{-2Bs}) \quad (2.16)$

ดังนั้น $S_{\max} = \frac{\ln 2}{B} = \frac{0.693}{B} \quad (2.17)$

และ $\tau_{\max} = 0.5BG_f \quad (2.18)$

เมื่อ τ_{\max} คือ แรงเค้นสูงสุดของการเชื่อมประสาน
 S_{\max} คือ การตอบสนองการเลื่อนไถลเนื่องจากแรงเค้นสูงสุด
 G_f คือ พลังงานการแตกหัก

ดังนั้น แบบจำลองการหาความเครียด และแรงดึงจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ B และ G_f ซึ่งผลกระทบของตัวแปรทั้งคู่นี้ มีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติของคอนกรีตเสริมเหล็ก แรงเชื่อมแน่น และแรงยึดเหนี่ยวของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยต่อองค์อาคารที่ทำการติดตั้ง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังสมการต่อไปนี้

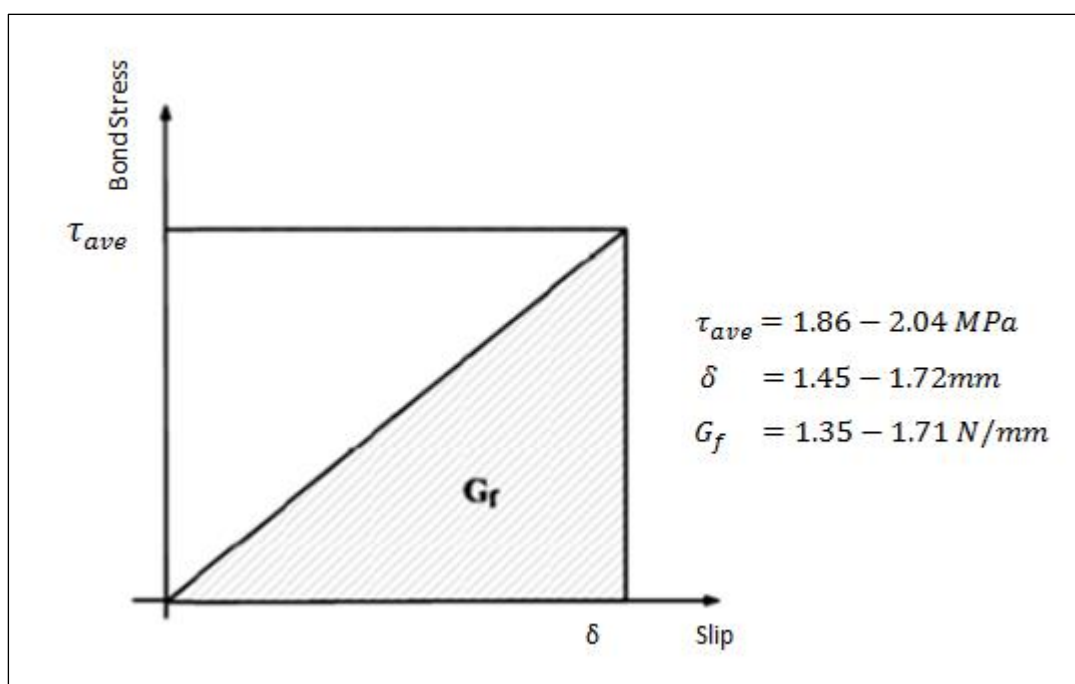
$$G_f = 0.446 \left(\frac{G_a}{t_a} \right)^{-0.352} f_c^{0.236} (E_f t_f)^{0.023} \quad (2.19)$$

$$B = 6.846 (E_f t_f)^{0.108} \left(\frac{G_a}{t_a} \right)^{0.833} \quad (2.20)$$

ประสิทธิภาพของพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวทางกลระหว่างคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย จะสามารถเสริมกำลังได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการถ่ายแรงในชั้นเชื่อมประสาน หรือชั้นพอลิเมอร์ ซึ่งมีลักษณะการถ่ายแรง 3 ลักษณะคือ แรงยึดเหนี่ยวทางเคมีระหว่าง

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต, สมบัติการยึดเหนี่ยวทางกลอันเนื่องมาจากลักษณะพื้นผิวที่เชื่อมประสานระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต และ แรงเสียดทานอันเนื่องมาจากผิวสัมผัสระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและพื้นที่ผิวคอนกรีตโดยรอบ (Shahriar, 2010)

กำลังการแตกหักเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของพฤติกรรมการยึดเหนี่ยว ค่า G_f นี้จะหาค่าได้จากพื้นที่ใต้กราฟระหว่างความเค้นและความเครียด ซึ่งแสดงตัวอย่างให้เห็นในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การหาค่า G_f (Limpaninlachat, 2011)

2.6 งานศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปิยลักษณ์ (2554) ได้ศึกษาการเสริมกำลังขององค์อาคารด้วยวัสดุแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใย มีลักษณะการหลุดล่อนได้ 2 ลักษณะ คือ การหลุดล่อนของแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยที่บริเวณของปลายแผ่น (plate-end deboning) ซึ่งมีทิศทางการวิบัติที่เกิดจากการหลุดล่อนของขอบแผ่นวัสดุเสริมเส้นใยจากขอบแผ่นเข้าสู่กึ่งกลางแผ่น และการวิบัติเคลื่อนตัวจากบริเวณภายในที่เกิดขึ้นภายใน (intermediate crack-induced deboning) มีลักษณะการวิบัติเคลื่อนตัวจากภายในของแผ่นวัสดุเสริมเส้นใยออกสู่ขอบแผ่นพอลิเมอร์ โดยการวิเคราะห์การวิบัติของแผ่นวัสดุเสริมเส้นใยนี้สามารถวิเคราะห์ได้จากการหลุดล่อนของวัสดุเสริมเส้นใยด้วยวิธีกำลัง (strength approach) และวิธีกลศาสตร์การแตกหัก (fracture mechanics approach)

Stratford and Bisby (2012, 2010) ได้ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิระหว่าง 40°C ถึง 70°C ต่อแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วยเส้นใยแก้ว เพื่อเสริมความแข็งแรง และกำลังในคาน พบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเชื่อมระหว่างแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างคานลดลง ส่งผลต่อสมรรถนะในการรับภาระน้ำหนักในคานลดลง

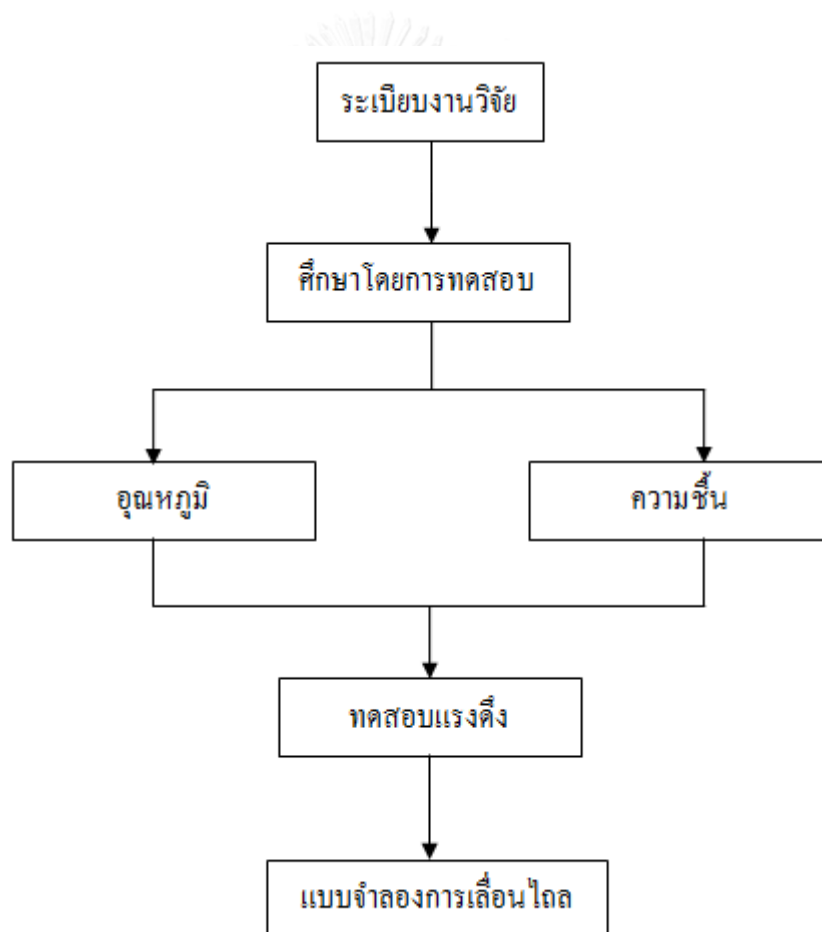
Zhang (2011) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP) ชนิดต่างๆ ได้แก่ พอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (GFRP), พอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP), พอลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (AFRP) ที่นำมาเสริมกำลังโครงสร้างคอนกรีต รวมถึงชิ้นส่วนคานสำหรับต้านทานความร้อนเมื่อเกิดอัคคีภัย พบว่า ในขณะที่คานได้รับอุณหภูมิ 20°C , 50°C และ 70°C ไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อารรับน้ำหนักอย่างเด่นชัด อย่างไรก็ตามคุณสมบัติในการรับน้ำหนักของคานมีประสิทธิภาพลดลงหากเป็นช่วงคานสั้นจะส่งผลกระทบอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิห้องปกติ



บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษากำลังในคานคอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เส้นใยคาร์บอนแบบแผ่น โดยศึกษากำลังรับแรงดึงเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติ และศึกษาพฤติกรรมของตัวอย่างคอนกรีตเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เส้นใยคาร์บอนแบบแผ่นเมื่อได้รับอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 และศึกษาพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวเมื่อได้รับความชื้นอันเนื่องจากการแช่น้ำ (ความชื้น RH 100%) มีระเบียบวิธีวิจัยเพื่อทดสอบคุณสมบัติในตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยที่อุณหภูมิต่างๆ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระเบียบงานวิจัย

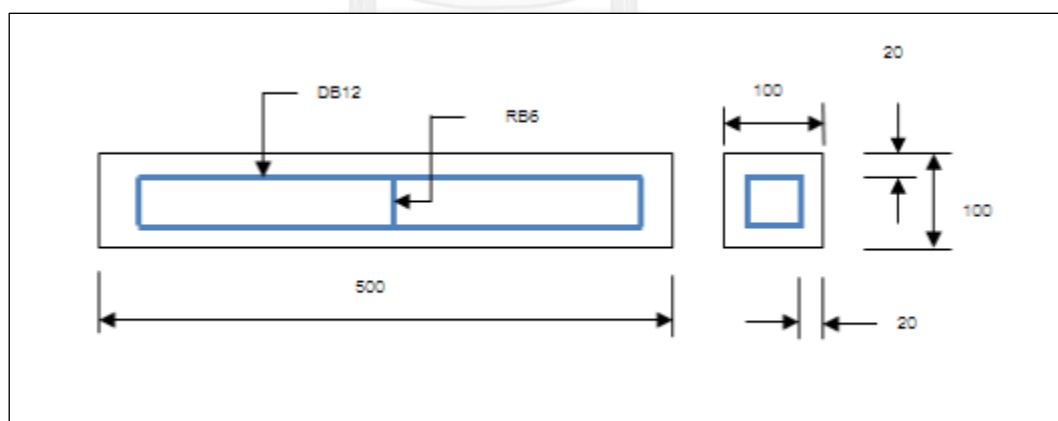
3.1 การเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบ

3.1.1 คอนกรีต

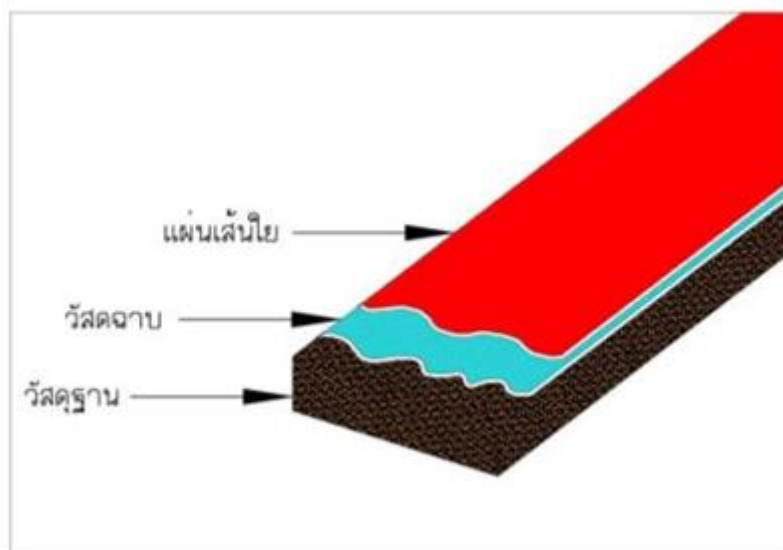
ส่วนผสมของคอนกรีตจะใช้อัตราส่วนผสมตามมาตรฐาน ASTM C192/C 192M-07 (Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory) คุณสมบัติคอนกรีตที่ใช้ทดสอบจะมีกำลังที่ 24 MPa และ 35 MPa

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด 10 x10x50 ซม. จะถูกหล่อขึ้นรูปเข้าแบบภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากทำการผสม หลังจากเทคอนกรีตเข้าแบบเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมงจะถอดแบบออก และจะทำการบ่มตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ความชื้นและอุณหภูมิห้องที่ความชื้นสัมพัทธ์ 95 เปอร์เซ็นต์ และ อุณหภูมิ 25 ± 2 °C เมื่อคอนกรีตผ่านการบ่มคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C192/C 192M-07 (Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory) ซึ่งจะต้องผ่านการบ่มมาแล้วอย่างน้อย 28 วัน ตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาด 150 x 300 มม. จะถูกนำมาตรวจสอบกำลังให้ได้กำลังที่ต้องการทดสอบด้วยตัวอย่างรูปทรงกระบอกตามมาตรฐาน ASTM C 31

คอนกรีตเสริมเหล็กจะใช้เหล็กเสริมขนาด DB12 จำนวนสี่เส้นที่ขอบ เหล็กปลอกรัศขนาด RB6 รัศเหล็กนอน โดยมีระยะห่างคงที่ 20 ซม.ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 และจะติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเสริมเหล็กในตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.3 ลักษณะการติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยบนตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็ก

3.1.2 วัสดุเชื่อมประสาน

พอลิเมอร์หรือแมททริกที่ใช้จากผลิตภัณฑ์ของ Sika (Thailand) Limited ผลิตภัณฑ์ silcadur-330 มีลักษณะเป็น resin ผสมกับ epoxy ซึ่งผลิตภัณฑ์แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนผสม A มีสีขาว ส่วนผสม B มีสีดำ เมื่อทำการผสมแล้วจะได้ส่วนผสมสีเทา ด้วยอัตราส่วน 4:1 โดยส่วนผสมมีความหนาแน่น 1.30 ± 1 kg/l หนัก 2.2 และ 0.4 กิโลกรัมต่อถัง ตามลำดับ ก่อนทำการทาวัดเชื่อมประสานต้องทำความสะอาดชิ้นตัวอย่างคอนกรีตก่อน และการใช้ต้องทาวัดเชื่อมประสานรองพื้นและทับหลังประมาณ 4 ม.ม. แล้วจึงทำการจัดวางแผ่น CFRP ในชั้นต่อไปในกรณีหลายชั้นคุณสมบัติวัสดุเชื่อมประสานแสดงให้เห็ндังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุเชื่อมประสาน

คุณสมบัติวัสดุเชื่อมประสาน	รายละเอียดของวัสดุเชื่อมประสาน
Service Temperature	-40 ^o c ถึง 45 ^o c
Tensile Strength	30N/mm ² (7 วัน ที่ 23 ^o c)
E-modulus	Flexural 3800 N/mm ² Tensile 4500 N/mm ²
Elongation break	0.9% (7 วัน ที่ 23 ^o c)

3.1.3 วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของแผ่นวัสดุเสริมเส้นใย Sika CarboDur S1.012 (Sika, 2002)

Plate Properties		Unit	Sika CarboDur S1.012
Elastic Modulus	Mean Value	MPa	165000
	Min. Value	MPa	>160000
	5% Fractile-Value	MPa	162000
	95% Fractile-Value	MPa	180000
Tensile Strength	Mean Value	MPa	3100
	Min. Value	MPa	>2800
	5% Fractile-Value	MPa	3000
	95% Fractile-Value	MPa	3600
Density		g/cm ³	1.60
Temperature Resistant		°C	>150
Fiber Volume Content		%	68
Width		mm	10
Thickness		mm	1.2
Cross Section Area		mm ²	120

วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่นำมาทดสอบเป็นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่น แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้ทดสอบ คือ Sika CarboDur S1.012 ซึ่งจะมีคุณสมบัติของแผ่นวัสดุเสริมเส้นใยตามตารางที่ 3.2 โดยผ่านการรับรองมาตรฐานจาก ACI 440.2R-08 เมื่อทำการเชื่อมประสานวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ต้องทำการบ่มอย่างน้อย 3 วัน และหลังจากการบ่มอย่างน้อย 7 วันจึงจะนำมาทำการทดสอบ

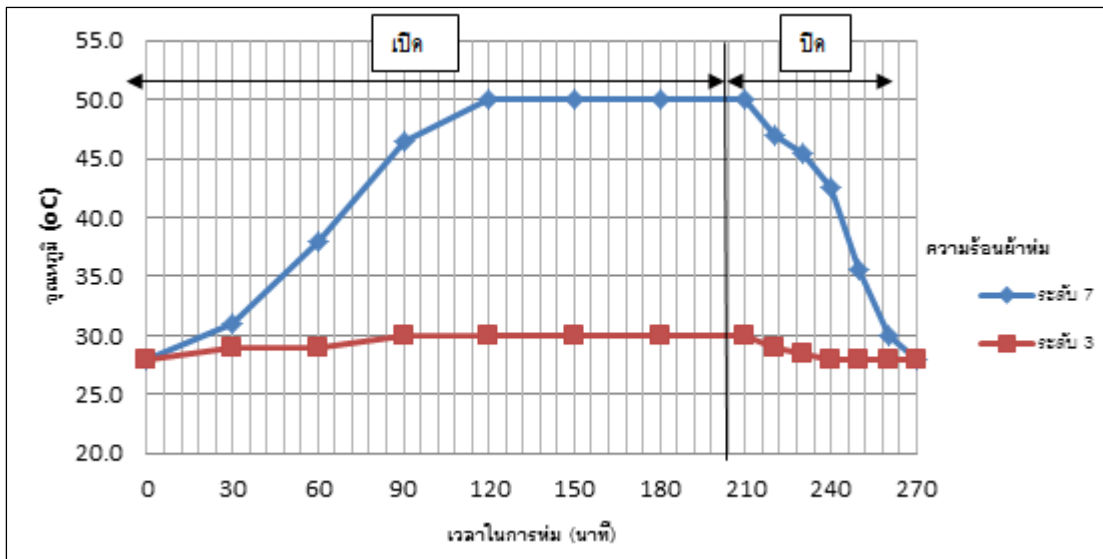
3.1.4 การควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างคอนกรีต

ผ้าห่มไฟฟ้า หรือ Electric blanket จะถูกใช้ควบคุมอุณหภูมิเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกลของตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ผ้าห่มไฟฟ้าจะมีขนาดกว้าง 135 ซม. ยาว 180 ซม. สามารถใช้งานได้ยาวนานต่อเนื่อง 8-12 ชั่วโมง ผ้าห่มไฟฟ้าผลิตด้วยผ้าคอตตอน 30% มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิซึ่งภายในจะมีแผง sensor เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิ ความยาวสายไฟของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ มีความยาว 1.5 เมตร สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของผ้าห่มไฟฟ้าแสดงให้เห็นในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงคุณสมบัติของผ้าห่มไฟฟ้า

คุณสมบัติของผ้าห่มไฟฟ้า	รายละเอียดของผ้าห่มไฟฟ้า
Electric Power	130W (110-220v)
Size	135x180 cm.
Warranty temperature	below 70 celsius
Temperature control	controller and sensor coil
Length of cord	1.5 m.
Safety	current fuse
Material	cotton polyester 30%
heat coil	nilson nylon thermostat Made in Korea

สำหรับการวิจัยนี้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ผ้าห่มแบบต่อเนื่องยาวนานจึงดำเนินการติดตั้ง Timer ในการควบคุมเวลาในการทำงานของผ้าห่มในการควบคุมเวลาการให้ความร้อน และให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน จึงให้ผ้าห่มทำงาน 7 ชั่วโมง และพัก 1 ชั่วโมงในหนึ่งวัน จากการตรวจวัด ความร้อนและเวลาในการทำงานของผ้าห่มได้ผลดังรูปที่ 3.4 ที่อุณหภูมิห้อง 28 °C



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายใต้ผ้าห่ม

3.2 การทดสอบคุณสมบัติตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การทดสอบคุณสมบัติทางกลในตัวอย่างคอนกรีตเสริมเส้นใยที่อุณหภูมิต่างๆ จะทำการทดสอบแรงดึงในคอนกรีตเสริมเหล็กจะถูกถ่ายโอนไปยังแรงยึดติดหรือที่พอลิเมอร์ อันเป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างแผ่นวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต ซึ่งบริเวณนี้จะรับภาระตลอดเวลาเนื่องจากความเครียด ซึ่งจะเกิดความวิบัติขึ้นได้ง่ายในบริเวณนี้ ดังนั้นจึงเรียกพื้นที่ ความยาวที่เชื่อมแน่นของคอนกรีตและแผ่นเสริมเส้นใยรับความเครียดได้อย่างมีประสิทธิภาพระยะเวลาหนึ่ง คือ ความยาวประสิทธิผล (L_e) (Mongi et al., 2009) การศึกษาความยาวประสิทธิผล (L_e) นั้นมีการศึกษาอย่างหลากหลาย แต่สมการที่แนะนำและใช้เป็นที่แพร่หลายในการคำนวณหาความยาวประสิทธิผล (L_e) มาจากการศึกษาของ Maeda et al. (ACI 440.2R-02, 2002) ดังสมการต่อไปนี้

$$L_e = \frac{23300}{(nE_f t_f)^{0.58}} \quad (3.1)$$

เมื่อ	L_e	คือ	ความยาวประสิทธิผล
	n	คือ	จำนวนชั้น FRP
	E_f	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเสริมเส้นใย
	t_f	คือ	ความหนาของ FRP

สำหรับการศึกษานี้ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาความยาวประสิทธิผล (L_e) นั้น มาจากข้อมูลที่ได้จากเจ้าของบริษัทที่ผลิตผลิตภัณฑ์วัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่นำมาใช้ ซึ่งความยาวประสิทธิผล (L_e) ที่ได้มีค่า 332.8 มม. แต่ในการทดสอบเลือกติดตั้งที่ความยาว 350 มม.

$$L_e = \frac{23300}{\left(1 \times \frac{165000}{1000} \times (1.2 + 4 + 4)\right)^{0.58}} = 332.8 \text{ mm.}$$

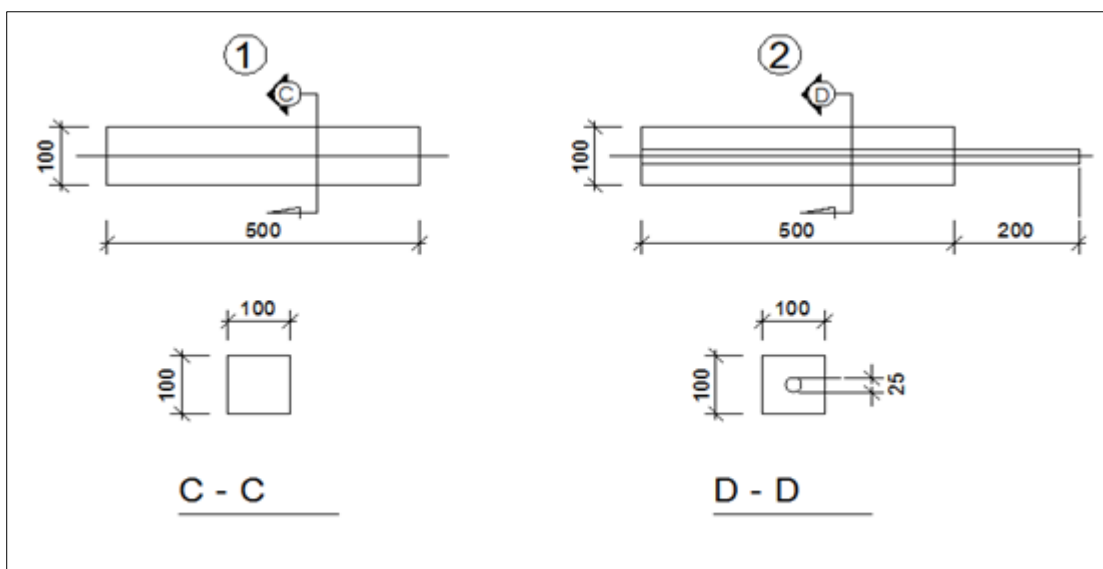
ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กแบ่งออกเป็นสองส่วนดังรูปที่ 3.5 เพื่อทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใย และคอนกรีตเสริมเหล็ก ดังรูปที่ 3.6 ชิ้นตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.3 ซึ่งจะทำการศึกษาในแต่ละชิ้นตัวอย่างตามจำนวนรอบ ซึ่งจะศึกษาตั้งแต่รอบอุณหภูมิที่ระยะเวลา 32 วันจนครบ 16 รอบ และความชื้น 100%RH ตลอดระยะเวลาที่การทดสอบจะทำการดึงตามรอบที่กำหนด เมื่อนำตัวอย่างคอนกรีตทั้งสองส่วนมาประกบกันแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะถูกติดตั้งที่บริเวณด้านบนของตัวอย่างคอนกรีต ดังรูปที่ 3.7

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบแรงดึง

รหัสตัวอย่าง	จำนวนชุดทดสอบ ชิ้น	กำลังคอนกรีต ksc	หม้อต้มน้ำที่อุณหภูมิ	หม้อน้ำสลับที่อุณหภูมิ	แรงน้ำ	รอบที่ใช้ในการทดสอบ
A24-2	1	240	50 °C	-	-	1
A24-4	1	240	50 °C	-	-	2
A24-6	1	240	50 °C	-	-	3
A24-8	1	240	50 °C	-	-	4
A24-12	1	240	50 °C	-	-	6
A24-16	1	240	50 °C	-	-	8
A24-24	1	240	50 °C	-	-	12
A24-32	1	240	50 °C	-	-	16
B35-2	1	350	50 °C	-	-	1
B35-12	1	350	50 °C	-	-	6
B35-24	1	350	50 °C	-	-	12
B35-32	1	350	50 °C	-	-	16
C24-2	1	240	-	50 °C	-	1
C24-4	1	240	-	50 °C	-	2
C24-6	1	240	-	50 °C	-	3
C24-8	1	240	-	50 °C	-	4
C24-12	1	240	-	50 °C	-	6
C24-16	1	240	-	50 °C	-	8
C24-24	1	240	-	50 °C	-	12
C24-32	1	240	-	50 °C	-	16
D35-2	1	350	-	50 °C	-	1
D35-12	1	350	-	50 °C	-	6

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้ทำการทดสอบแรงดึง (ต่อ)

รหัส ตัวอย่าง	จำนวนชุด ทดสอบ ชิ้น	กำลัง คอนกรีต ksc	ห่มผ้าตลอดที่ อุณหภูมิ	ห่มผ้าสลับที่ อุณหภูมิ	แช่น้ำ	รอบที่ใช้ในการ ทดสอบ
D35-24	1	350	-	50 °C	-	12
D35-32	1	350	-	50 °C	-	16
E24-2	1	240	-	30 °C	-	1
E24-4	1	240	-	30 °C	-	2
E24-6	1	240	-	30 °C	-	3
E24-8	1	240	-	30 °C	-	4
E24-12	1	240	-	30 °C	-	6
E24-16	1	240	-	30 °C	-	8
E24-24	1	240	-	30 °C	-	12
E24-32	1	240	-	30 °C	-	16
F35-2	1	350	-	30 °C	-	1
F35-12	1	350	-	30 °C	-	6
F35-24	1	350	-	30 °C	-	12
F35-32	1	350	-	30 °C	-	16
G24-32	3	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	16
G24-36	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	18
G24-40	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	20
G24-44	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	22
G24-48	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	48
H24-1	3	240	อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ			
I35-1	3	350	อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ			



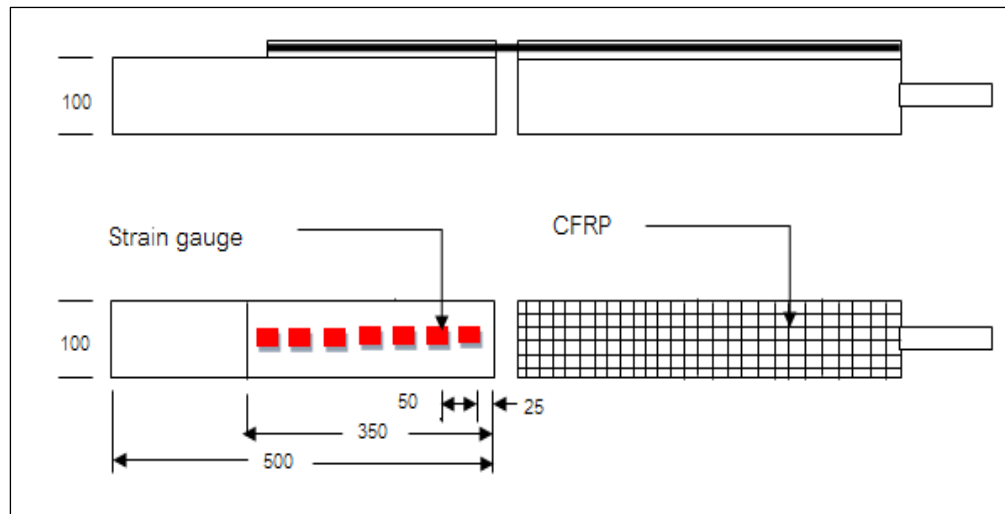
รูปที่ 3.5 รายละเอียดชิ้นงาน (1) ส่วนที่ใช้ทดสอบพันธะ (2) ส่วนที่ประยุกต์ในการรับแรงดึง
(Chanh, 2011)

ตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กที่ถูกติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะต้องพักหลังการบ่มอย่างน้อย 7 วัน และตรวจสอบความเรียบร้อยของอุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ก่อนที่จะนำตัวอย่างคอนกรีตไปที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อทำการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นให้ได้คุณสมบัติตามที่กำหนดในแต่ละขั้นการทดสอบ ให้ได้ตามระยะเวลา ซึ่งจะศึกษาตามรอบอุณหภูมิ รวมไปถึงความชื้นนั้น อุปกรณ์วัดความเครียด (Stain gauge) จะถูกติดตั้งที่ด้านบนของตัวอย่างคอนกรีตซึ่งจะถูกติดตั้งหลังจากติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเชิงแรงเป็นที่เรียบร้อยภายหลังการควบคุมอุณหภูมิด้วยผ้าห่มไฟฟ้าเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำมาทดสอบ โดยระยะห่างในการติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียด (Stain gauge) จะมีระยะห่างอยู่ที่ 5 ซม. ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.6 เมื่อทำการติดตั้งแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และ อุปกรณ์วัดความเครียด (Stain gauge) เป็นที่เรียบร้อยแล้ว

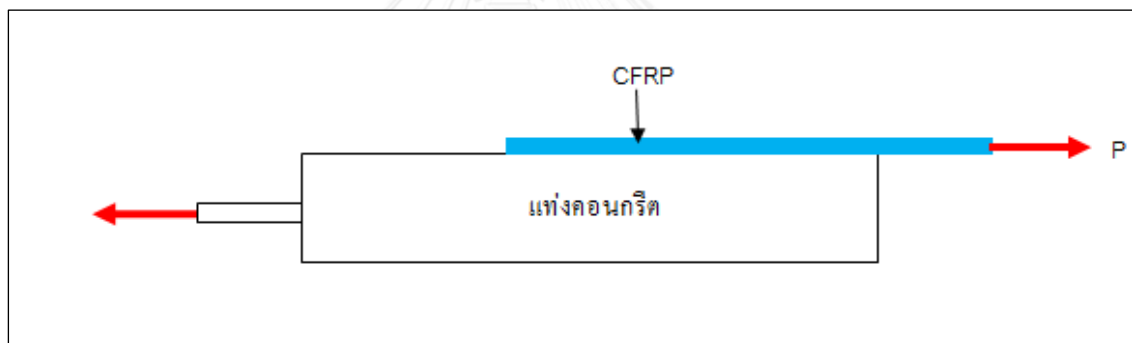
สำหรับการทดสอบพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกบ่มด้วยความร้อนจากผ้าห่มไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้การห่มไว้ตลอดเวลาการบ่มโดยไม่นำตัวอย่างคอนกรีตออกจากผ้าห่ม ระยะการทำงานของผ้าห่มนั้นจะถูกควบคุมโดย timer เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมการทำงานของผ้าห่มไฟฟ้าที่ได้ตั้งระดับความร้อนที่ต้องการเรียบร้อยแล้ว การทำงานของผ้าห่มไฟฟ้าจะทำงานเป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมงและพักเครื่อง 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง ในการบ่มหรือชุดทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิจะบ่มด้วยความร้อนแบ่งเป็น

2 ลักษณะคือ 1.) การทดสอบตามจำนวนรอบอุณหภูมิต่ำสลับสูง และอีก 24 ชั่วโมงถัดมาจะปิดการทำงานตลอดทั้งวันซึ่งจะครบ 1 รอบ ในการบ่มความร้อนแก่ตัวอย่างคอนกรีตจะดำเนินการให้ความร้อนอุณหภูมิสลับโดยแบ่งเป็น ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50 °C (ความร้อนผ้าห่มระดับ 7) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (การทำงานของผ้าห่มไฟฟ้าจะทำงานเป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมงและพักเครื่อง 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง) สลับกับ 28°C (อุณหภูมิภายในผ้าห่มหลังจากหยุดการทำงานของผ้าห่มไฟฟ้าซึ่งมีความร้อนเท่ากับอุณหภูมิห้องเฉลี่ย) นานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ อุณหภูมิ 30 °C (ความร้อนผ้าห่มระดับ 3) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (การทำงานของผ้าห่มไฟฟ้าจะทำงานเป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมงและพักเครื่อง 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมง) สลับกับ 28°C (อุณหภูมิภายในผ้าห่มหลังจากหยุดการทำงานของผ้าห่มไฟฟ้าซึ่งมีความร้อนเท่ากับอุณหภูมิห้องเฉลี่ย) ตัวอย่างคอนกรีตจะทำการทดสอบสูงสุดอยู่ที่ 16 รอบ การควบคุมอุณหภูมิครบระยะเวลา 1 รอบ ซึ่งจะใช้เวลา 2 วัน โดยจะนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบการดึงเมื่อถึงรอบที่ 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 และ 16 รอบตามลำดับ 2) การทดสอบที่อุณหภูมิคงที่การทำงานของผ้าห่มไฟฟ้าจะทำงานเป็นระยะเวลา 7 ชั่วโมงและพักเครื่อง 1 ชั่วโมงจนครบ 24 ชั่วโมงในทุกๆวันที่ดำเนินการทดสอบ การให้ความร้อนของผ้าห่มเริ่มจากควบคุมที่อุณหภูมิคงที่ 50 °C (ความร้อนผ้าห่มระดับ 7) นานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอีกชุดการทดสอบความร้อนของผ้าห่มเริ่มจากควบคุมที่อุณหภูมิคงที่ 30 °C (ความร้อนผ้าห่มระดับ 3) นานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงตลอดเวลาที่ทดสอบซึ่งมีจำนวนวันที่ทดสอบการดึงตามอิทธิพลของอุณหภูมิในวันที่ 2, 4, 6, 8, 12, 16, 24 และ 32 วันตามลำดับ

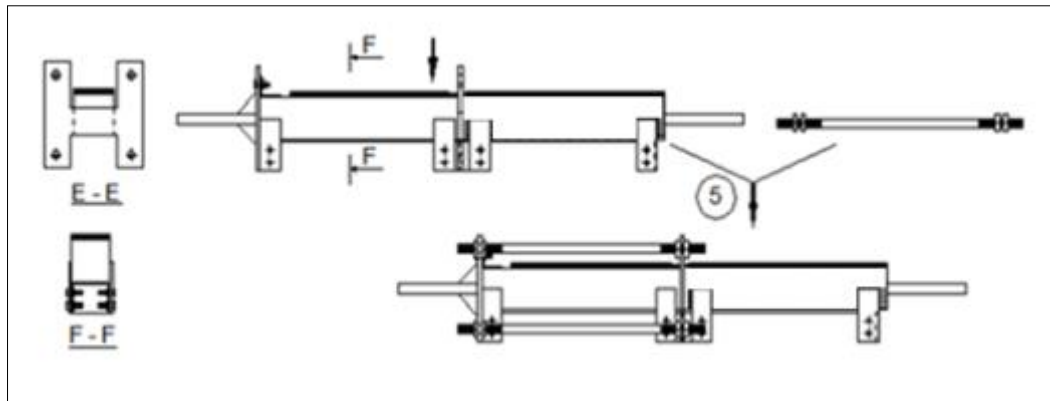
สำหรับการทดสอบพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ที่กำหนด ตัวอย่างคอนกรีตจะถูกกำหนดที่อุณหภูมิห้อง (28 °C) จะดำเนินการควบคุมอิทธิพลของความชื้นโดยที่จะดำเนินการบ่มตัวอย่างคอนกรีตด้วยวิธีแช่น้ำให้ชิ้นตัวอย่างมีความชื้นสัมพัทธ์ 100% ตัวอย่างทดสอบจะถูกแช่น้ำในอ่างซึ่งระดับน้ำท่วมตัวอย่างคอนกรีตเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นตัวอย่างคอนกรีตจะถูกยกขึ้นจากน้ำผึ่งให้แห้งเป็นระยะ 24 ชั่วโมง ซึ่งครบ 1 รอบการศึกษา การควบคุมความชื้นครบระยะเวลา 1 รอบ ซึ่งจะใช้เวลา 2 วัน โดยจะนำชิ้นตัวอย่างคอนกรีตมาทดสอบการดึงเมื่อถึงรอบที่ 16, 18, 20, 22 และ 24 รอบตามลำดับ ดังรูปที่ 3.8 โดยที่การดึงนั้นจะส่งผลให้เกิดการเลื่อนโกลที่ชั้นผิวเชื่อมประสาน ซึ่งจะถูกดึงด้วยเครื่องมือที่แสดง ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.6 การติดตั้ง Strain Gauge ในคานคอนกรีตที่ทดสอบแรงดึง (Chanh, 2011)



รูปที่ 3.7 การทดสอบแรงดึง



รูปที่ 3.8 การประกอบเพื่อทดสอบแรงดึง (Chanh, 2011)



รูปที่ 3.9 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการดึง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองนี้เป็นการทดลองพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นและคอนกรีตภายใต้อุณหภูมิ และความชื้นที่กำหนด ในช่วงของความยาวประสิทธิผลของแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยจะศึกษาการเลื่อนไถลจากการดึงในแนวระดับโดยตรง ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองทั้งสิ้นจำนวน 49 ชิ้น ผลการทดลองได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

4.1 ลักษณะการวิบัติในพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

ในการหาความสัมพันธ์ของแรงยึดเหนี่ยวในปัจจุบันต่างๆ โดยการวิบัติของพันธะยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นจากแรงดึงระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตนั้นจะเกิดการวิบัติที่ชั้นเชื่อมประสาน หรือชั้น Interface concrete ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี แต่จากการทดสอบนั้นไม่มีผลการวิบัติที่แผ่นเส้นใย ลักษณะการวิบัติในชั้นส่วนที่ทำการทดสอบนั้นเกิดการวิบัติดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดจะแสดงให้เห็นที่รูปที่ 4.3) เนื่องจากแรงดึงของเครื่องทดสอบดึงที่ด้านบริเวณรอยต่อจึงส่งผลให้อุปกรณ์วัดความเครียดลำดับที่ 1 รับแรงดึงโดยตรงก่อนจึงเกิดการวิบัติเป็นบริเวณแรกเพราะเป็นบริเวณที่มีค่าความเครียดสูงที่สุด ลักษณะการวิบัติส่วนมากจะวิบัติที่บริเวณแนวพอลิเมอร์หรือวัสดุเชื่อมประสานสามารถสังเกตได้ชัดก่อนการดึงทดสอบพบว่าที่บริเวณพอลิเมอร์นั้นเมื่อได้รับความชื้นจะเกิดการพองหรือบวมตัวผิดรูปไปจากเดิมเช่นเดียวกันกับตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมินั้นเกิดการผิดรูปในลักษณะเอี้ยวเหลวในบางตัวอย่าง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของพอลิเมอร์ในเรื่องขอความชื้นและอุณหภูมินั้นมีส่วนสำคัญในการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ตารางที่ 4.1 จะแสดงลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นในการศึกษารูปการวิบัติในตัวอย่างคอนกรีตต่างๆจะแสดงที่ภาคผนวก จ



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.1 สภาพการวิบัติที่พบหลังจากทำการทดลอง (ก) การวิบัติที่ผิวคอนกรีตใกล้รอยเชื่อมประสานระหว่างพอลิเมอร์และคอนกรีต (ข) การวิบัติที่แนวเชื่อมประสานระหว่างพอลิเมอร์และคอนกรีต (ค) การวิบัติที่พอลิเมอร์หรือวัสดุเชื่อมประสาน (ง) การวิบัติบริเวณแนวเชื่อมประสานระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและพอลิเมอร์

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการวิบัติหลังทดสอบดึงด้วยวิธี Pull-out Test

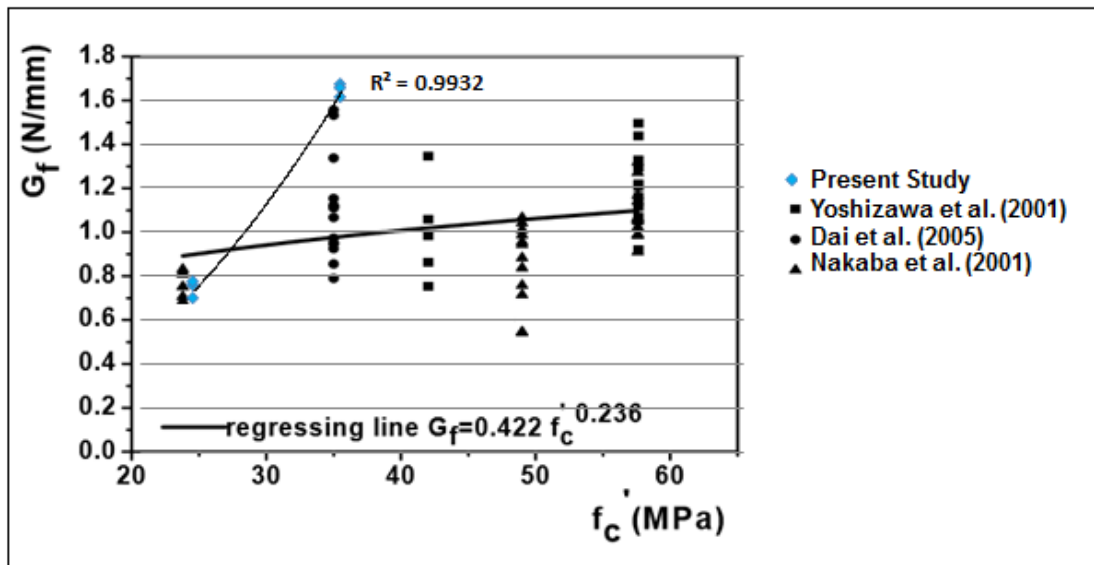
รหัสตัวอย่าง	จำนวนชุดทดสอบ ชิ้น	กำลัง คอนกรีต MPa	ห่มผ้าตลอดที่อุณหภูมิ	ห่มผ้าสลับที่อุณหภูมิ	แช่น้ำ	รอบการ ทดสอบที่	การ วิบัติ
A24-2	1	240	50 °C	-	-	1	PF
A24-4	1	240	50 °C	-	-	2	P
A24-6	1	240	50 °C	-	-	3	P
A24-8	1	240	50 °C	-	-	4	P
A24-12	1	240	50 °C	-	-	6	PC
A24-16	1	240	50 °C	-	-	8	P
A24-24	1	240	50 °C	-	-	12	PF
A24-32	1	240	50 °C	-	-	16	PF
B35-2	1	350	50 °C	-	-	1	P
B35-12	1	350	50 °C	-	-	6	PF
B35-24	1	350	50 °C	-	-	12	P
B35-32	1	350	50 °C	-	-	16	P
C24-2	1	240	-	50 °C	-	1	PF
C24-4	1	240	-	50 °C	-	2	P
C24-6	1	240	-	50 °C	-	3	C
C24-8	1	240	-	50 °C	-	4	PF
C24-12	1	240	-	50 °C	-	6	P
C24-16	1	240	-	50 °C	-	8	PF
C24-24	1	240	-	50 °C	-	12	PF
C24-32	1	240	-	50 °C	-	16	PF
D35-2	1	350	-	50 °C	-	1	P
D35-12	1	350	-	50 °C	-	6	P

ตารางที่ 4.1 ลักษณะการวิบัติหลังทดสอบดึงด้วยวิธี Pull-out Test (ต่อ)

รหัสตัวอย่าง	จำนวนชุดทดสอบ ชิ้น	กำลังคอนกรีต MPa	ห่มผ้าตลอดที่ อุณหภูมิ	ห่มผ้าสลับที่ อุณหภูมิ	แช่น้ำ	รอบการทดสอบที่	การวิบัติ
D35-24	1	350	-	50 °C	-	12	PF
D35-32	1	350	-	50 °C	-	16	PF
E24-2	1	240	-	30 °C	-	1	C
E24-4	1	240	-	30 °C	-	2	PF
E24-6	1	240	-	30 °C	-	3	P
E24-8	1	240	-	30 °C	-	4	P
E24-12	1	240	-	30 °C	-	6	PF
E24-16	1	240	-	30 °C	-	8	P
E24-24	1	240	-	30 °C	-	12	P
E24-32	1	240	-	30 °C	-	16	C
F35-2	1	350	-	30 °C	-	1	C
F35-12	1	350	-	30 °C	-	6	PF
F35-24	1	350	-	30 °C	-	12	P
F35-32	1	350	-	30 °C	-	16	PF
G24-32	3	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	16	PF
G24-36	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	18	C
G24-40	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	20	P
G24-44	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	22	PF
G24-48	1	240	-	-	เปียกสลับแห้ง	48	C
H24-1	3	240	อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ				PC
I35-1	3	350	อุณหภูมิอากาศภายในห้องทดสอบ				PC

หมายเหตุ : PF=การวิบัติที่ผิวคอนกรีตใกล้รอยเชื่อมประสานระหว่างพอลิเมอร์และคอนกรีต P=การวิบัติที่พอลิเมอร์หรือวัสดุเชื่อมประสาน, PC=การวิบัติบริเวณแนวเชื่อมประสานระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและพอลิเมอร์ และ C=การวิบัติที่บริเวณผิวคอนกรีต

จากการศึกษาของJian-Gou Daiและคณะพบว่ากำลังของคอนกรีตมีอิทธิพลต่อความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต รูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงค่าที่ได้จากการศึกษาและสมการและการศึกษาของJian-Gou Daiและคณะ ซึ่งการทดสอบเป็นในทิศทางเดียวกันโดยค่ากำลังยึดเหนี่ยวตัวอย่างคอนกรีตปกติที่กำลัง 35 MPa จะมีค่าสูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตปกติที่กำลัง 24 MPa ถึงแม้ว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวตัวอย่างคอนกรีตปกติที่กำลัง 35 MPa ที่ได้จากการทดสอบมีค่าสูงแต่ยังอยู่ใกล้เคียงกับการทดสอบของ Jian-Gou Daiและคณะ โดยมีค่าสมการถดถอยอยู่ที่ 0.9 ค่าในการทดสอบนี้ได้จากตัวอย่างคอนกรีตที่ทำการทดสอบในอุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ของตัวอย่างคอนกรีตปกติที่กำลัง 24 MPa และ 35 MPa อย่างละ 3 ชุดทดสอบ



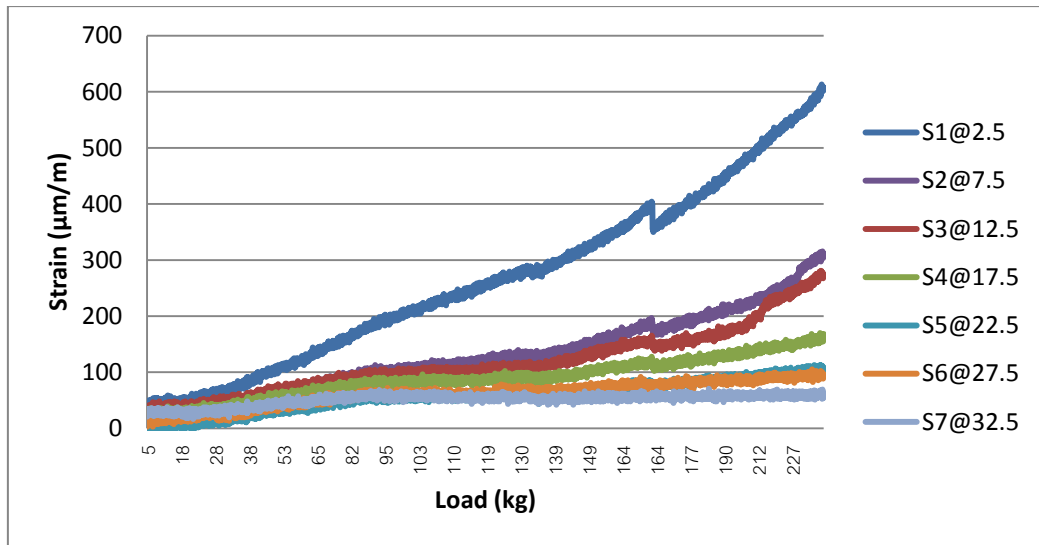
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและกำลังคอนกรีต

การติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain gauge) จะถูกติดตั้งบนวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่นจำนวน 7 จุด ดังรูปที่ 4.3 โดยผลของเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (Strain gauge) จะแสดงออกมาในรูปของกำลังรับความเครียด (Strain Load) และ ลักษณะการความเครียดที่ตำแหน่งต่างๆ (Strain Distribute) ค่าความเครียดจะสูงขึ้นแปรผันตามกับกำลังดึง ตำแหน่งการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain gauge) จะอ่านค่าได้มากที่สุดที่ตำแหน่งที่ 1 ไม่ว่าจะดึงด้วยแรงขนาดใดก็ตาม โดยตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.4 ถึง รูปที่ 4.5 ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain gauge) พบว่าค่าเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด

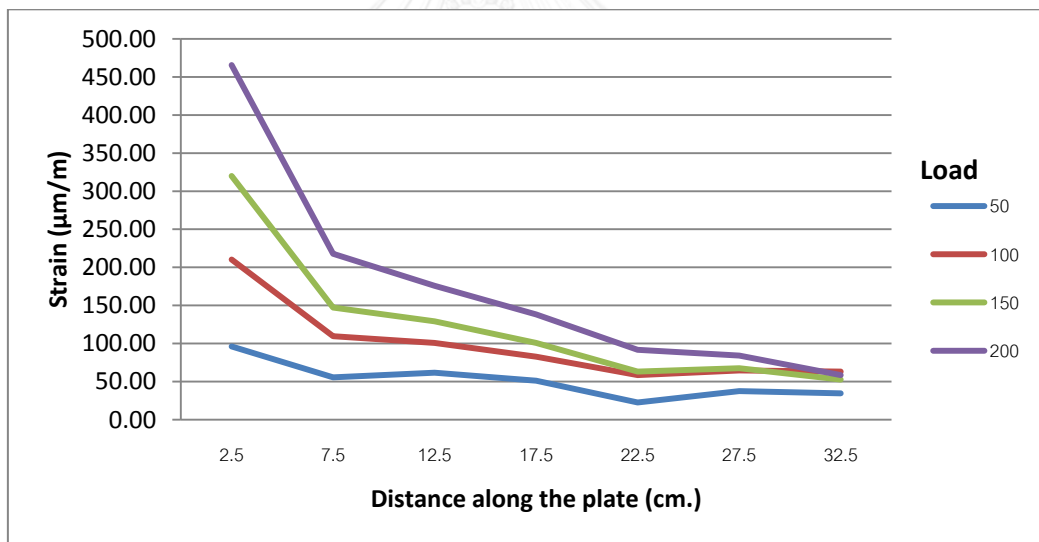
(Strain Gauge) ตัวที่ 1 มีค่าสูงสุดสอดคล้องกับลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้นบริเวณเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (Strain Gauge) ตัวที่ 1 ก่อน ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีหรือผลการทดสอบต่างๆไป โดยตรวจวัดแรงดึงเครียดที่ตำแหน่งสุดท้ายจะมีความเครียดน้อยมาก การหลุดล่อนจะเริ่มหลุดล่อนจากทางด้านปลายของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแบบแผ่น เมื่อคอนกรีตได้รับแรงดึง 50 kN ค่ากำลังรับความเครียด (Strain Load) และความเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ตรวจวัด (Strain Distribute) จากการทดลองแสดงให้เห็นที่ภาคผนวก ค และ ง ตามลำดับ



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์วัดความเครียดบนวัสดุพอลิเมอร์แบบแผ่น



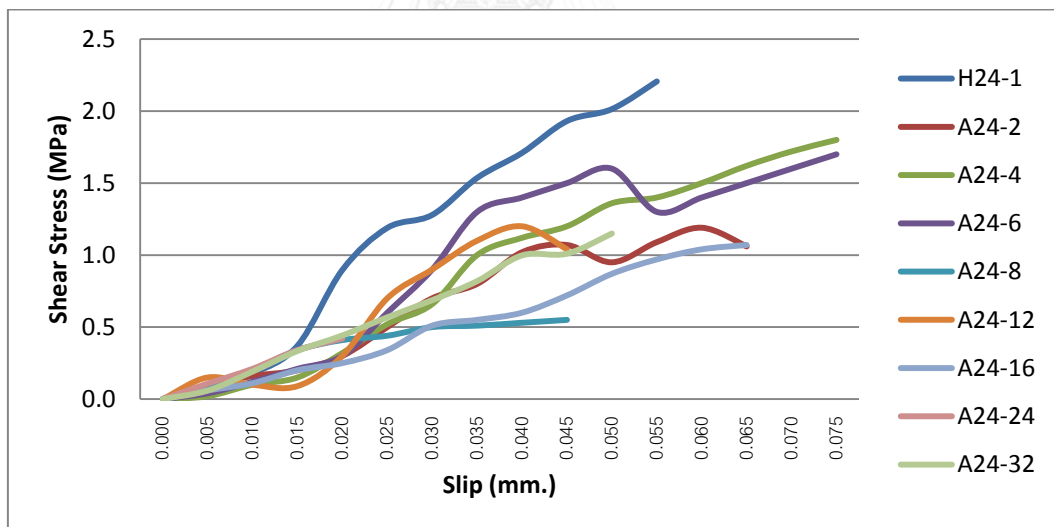
รูปที่ 4.4 กำลังรับความเครียด (Strain Load) ที่ตำแหน่งต่างๆของ D24-1



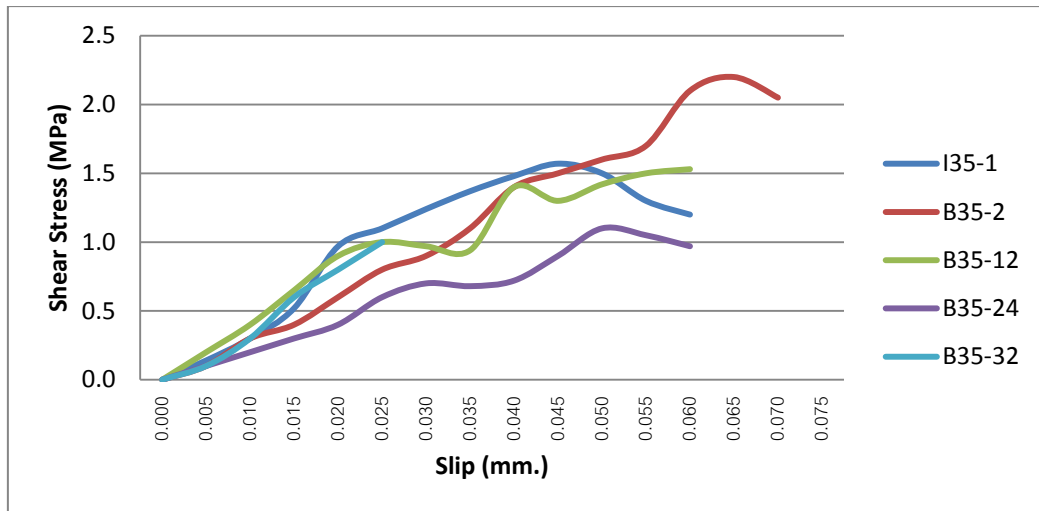
รูปที่ 4.5 ความเครียด ณ ตำแหน่งต่างๆของอุปกรณ์ตรวจวัด (Strain Distribute) ของ D24-1

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงยึดเหนี่ยวในระบบ FRP

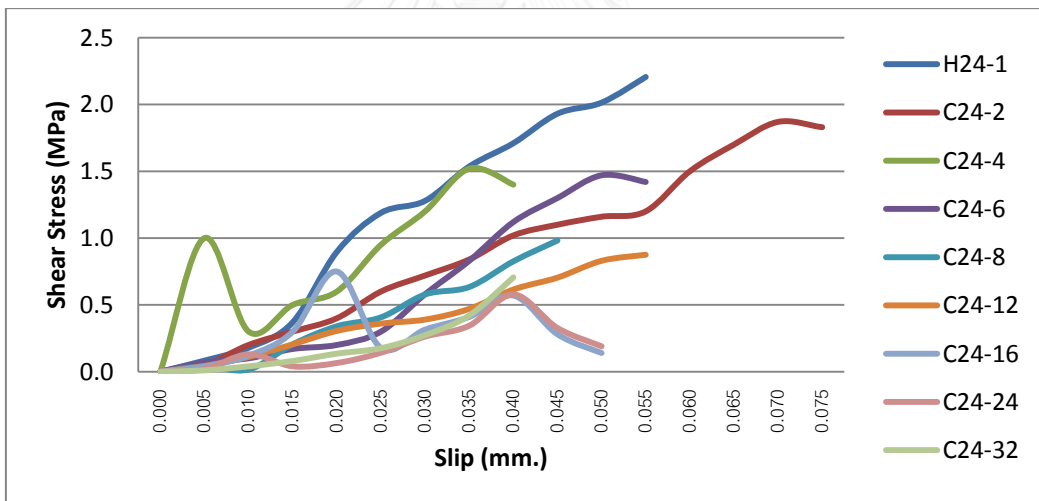
ในการทดสอบอภิตีผลของอุณหภูมิต่อการเลื่อนไถลระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ได้กำหนดให้ชิ้นทดสอบได้รับความร้อนด้วยผ้าห่มไฟฟ้าใน 3 ลักษณะที่กำลังคอนกรีต 240 และ 350 กล่าวคือ 1.)ให้ความร้อนตลอดเวลาที่อุณหภูมิ 50 °C 2.)ให้ความร้อนแบบรอบเวลาที่อุณหภูมิ 50 °C และ 3.)ความรอบเวลาที่อุณหภูมิ 30 °C ด้วยระยะเวลาคงที่อันเป็นตัวแทนของสิ่งแวดล้อมภายนอก ความชื้นสัมพัทธ์ในชิ้นทดสอบอยู่ระหว่าง 65% ถึง 95% ซึ่งเป็นช่วงความชื้นที่เกิดขึ้นในประเทศไทย ในการทดสอบแรงดึงจะทดสอบเมื่อชิ้นทดสอบได้รับความชื้นรอบที่ 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 และ 16 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (Shear Stress-Slip) ได้ผลดังรูปที่ 4.6 ถึง 4.11 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงค่าเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain gauge) ตัวที่ 1 ซึ่งมีค่ามากที่สุดในแต่ละชุดทดสอบ ที่ตำแหน่งตรวจวัดตำแหน่งนี้จะนำไปพิจารณาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวตามสมการของ Jain-Gou Dai และคณะ ส่วนผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) แต่ละชิ้นทดสอบจะแสดงในภาคผนวก ง เมื่อตัวอย่างคอนกรีตได้รับอภิตีผลของอุณหภูมียาวนานขึ้นค่าความเครียดและการเลื่อนไถลที่เกิดขึ้นจะลดลงแปรผันตามเวลา



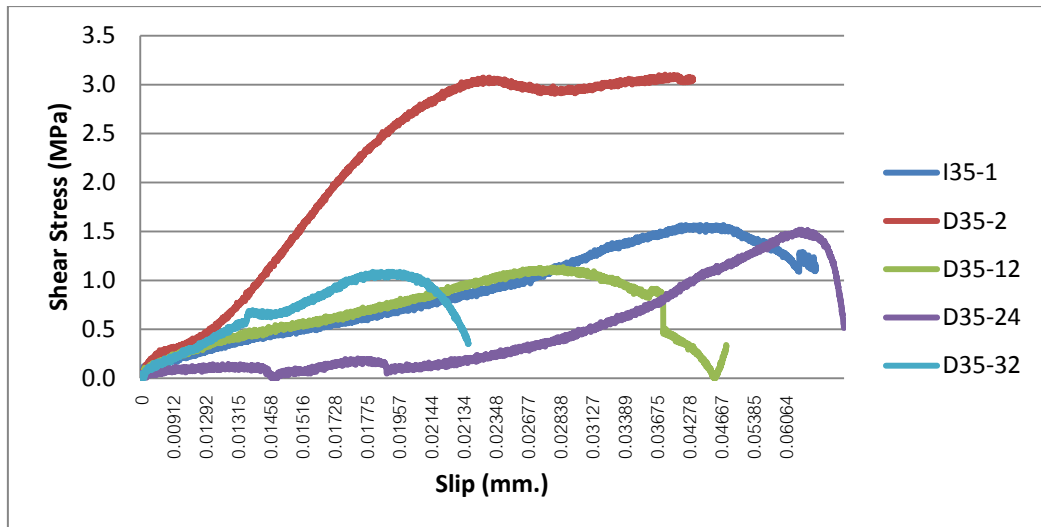
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา



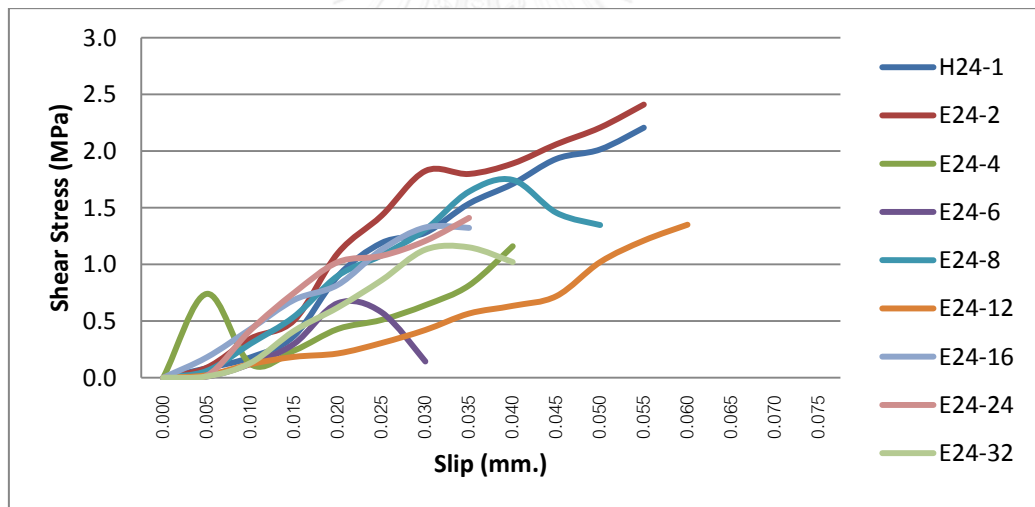
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง
คอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา



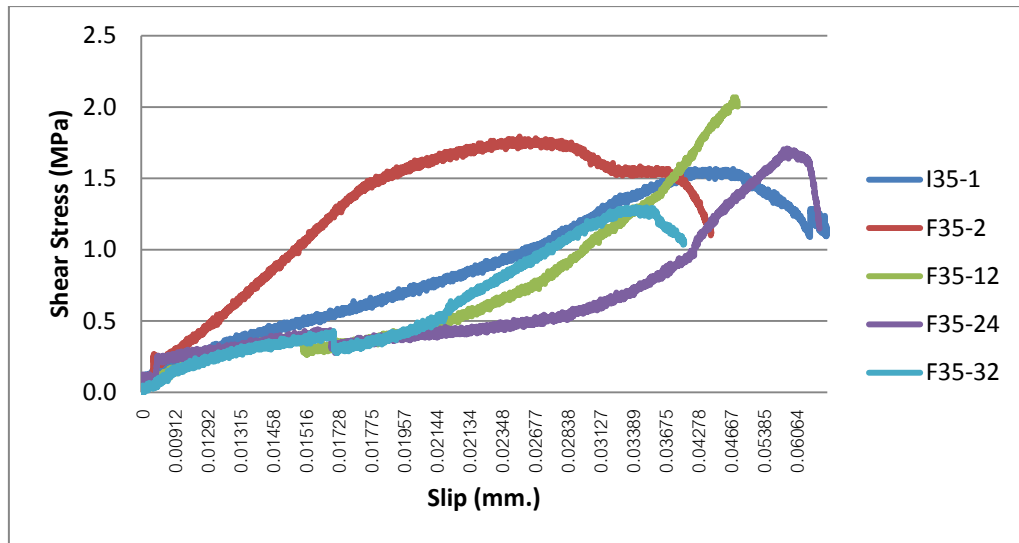
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลัง
คอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา

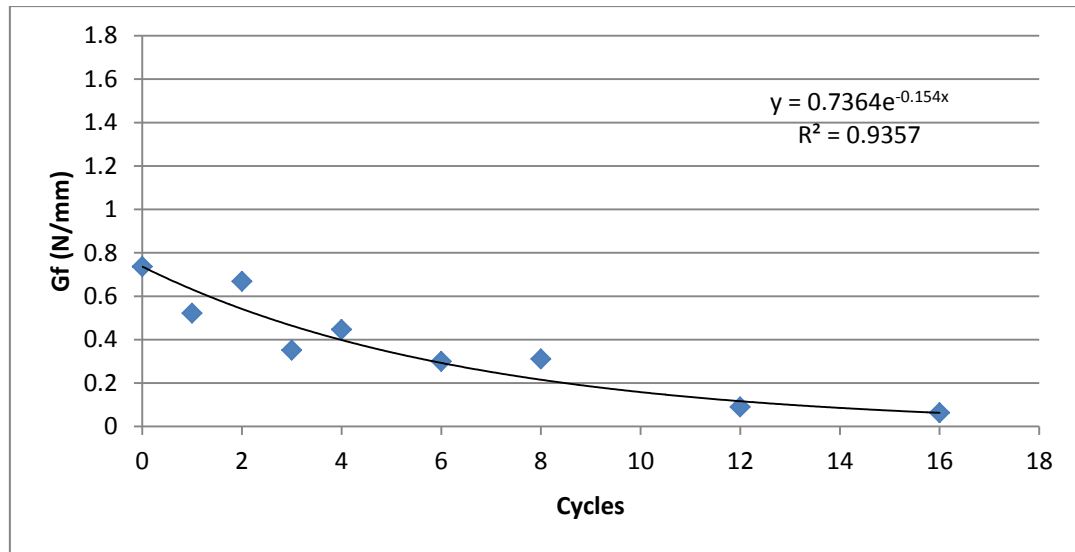


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา

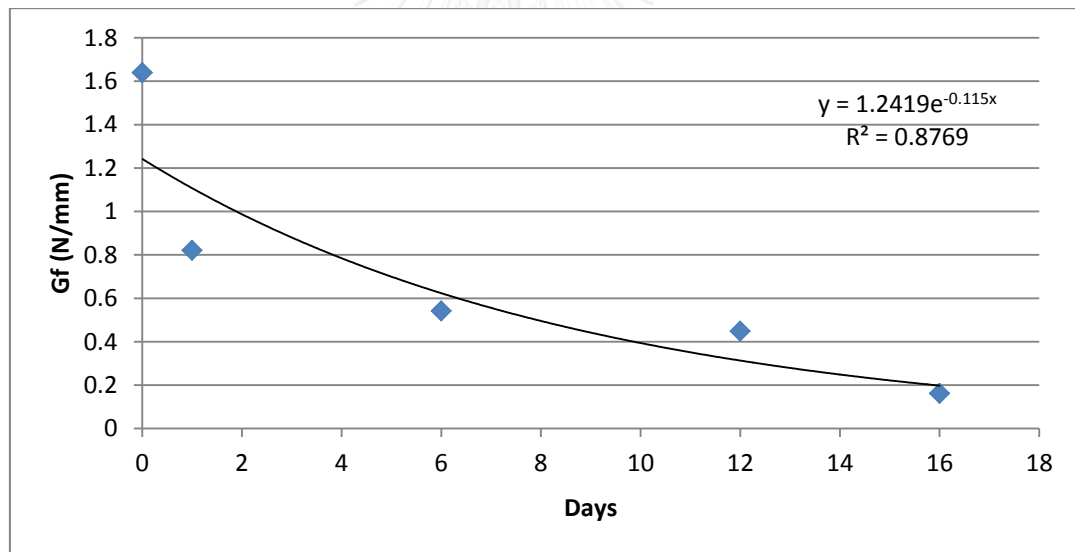


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ที่กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา

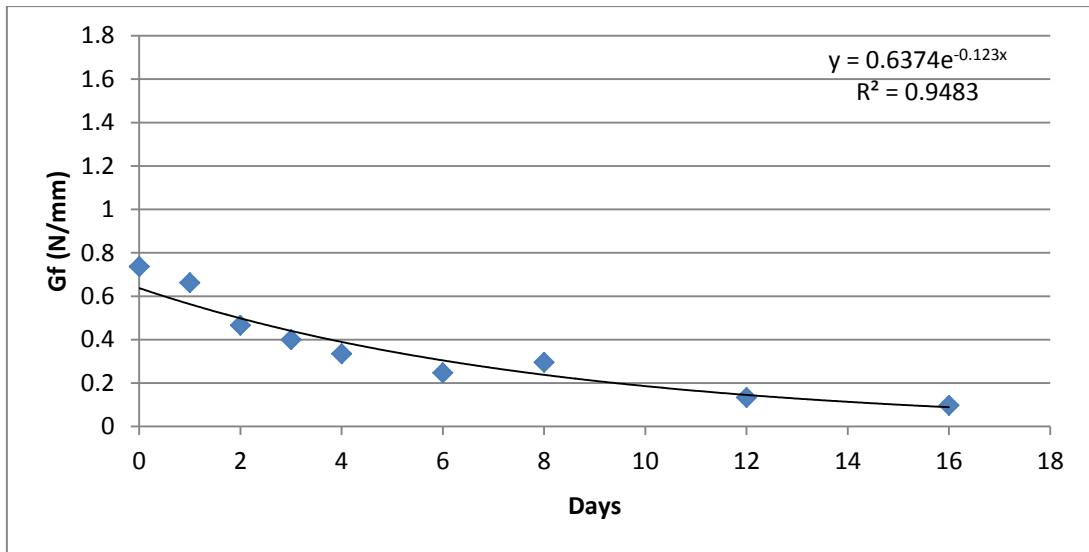
ในการศึกษาพลังงานในการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ซึ่งหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟรวมของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) พบว่า เมื่อขึ้นทดสอบที่ได้รับความร้อนในลักษณะต่างๆ ในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น พลังงานยึดเหนี่ยวจะมีค่าลดลงในลักษณะการลดลงแบบ Exponential ตามระยะเวลาที่ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิ โดยมีค่าการวิเคราะห์การถดถอย (Regression) มากกว่า 0.70 ในทุกกรณีศึกษา ค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวต่างๆที่ดำเนินการทดสอบในแต่ละชุดทดสอบนำมาจัดเรียงตามลำดับเวลาที่ได้รับการอิทธิพลของความร้อนเพื่อหาความสัมพันธ์กับเวลา ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 4.12 ถึง รูปที่ 4.17 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของตัวอย่างที่มีกำลัง 24 MPa จะมีค่าน้อยกว่า 35 MPa อันเนื่องมาจากอิทธิพลของกำลังคอนกรีต ตามสมการของ Jain-Gou Dai และคณะ ในชิ้นตัวอย่างที่ได้รับอุณหภูมิสูงจะมีค่าพลังงานยึดเหนี่ยวลดลงมากกว่าอุณหภูมิต่ำ และตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับอิทธิพลของความร้อนตลอดเวลาจะลดลงมากกว่าแบบรอบ ดังนั้นอุณหภูมิจึงเป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งส่งผลต่อพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต



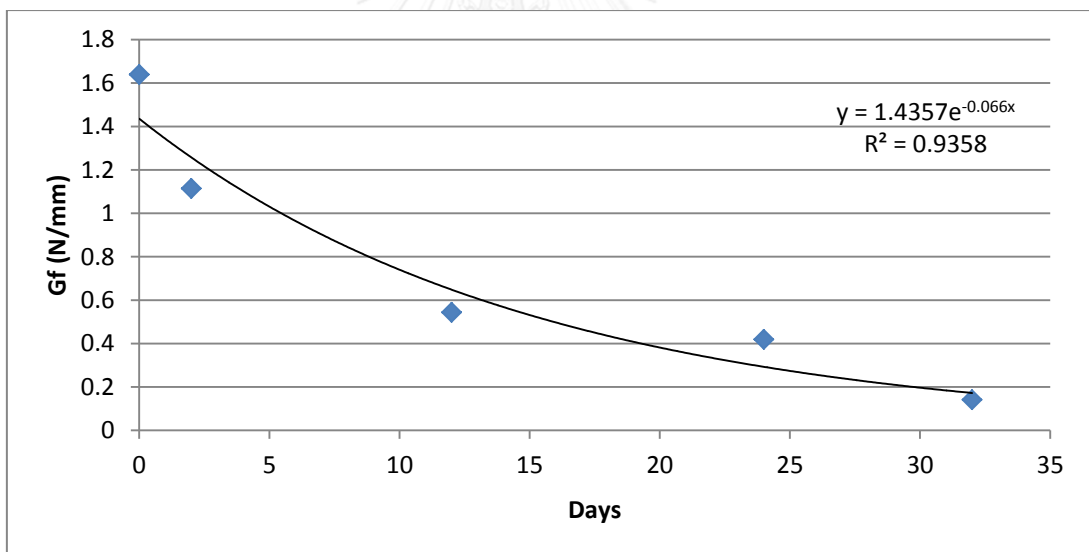
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและพลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีต
ที่กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา



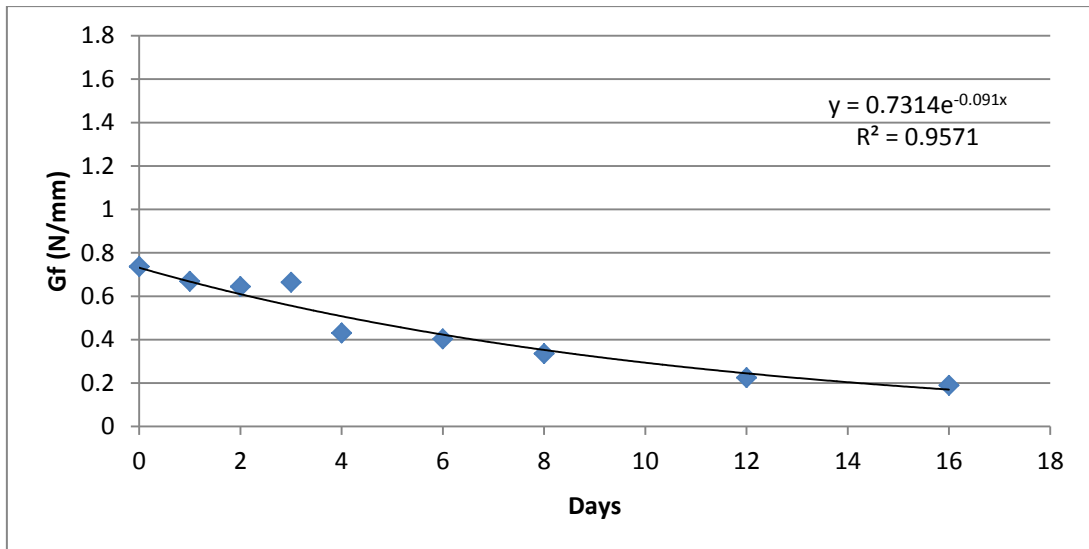
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีตที่
กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ตลอดเวลา



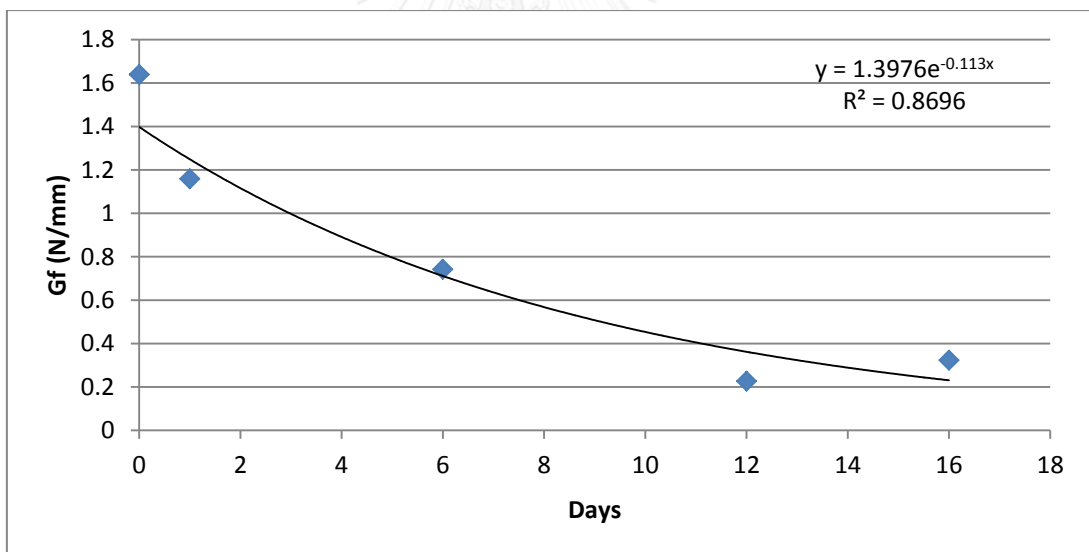
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังงานการยัดเหนียวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีตที่ กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังงานการยัดเหนียวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีตที่ กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 50 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีตที่กำลังคอนกรีต 240 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา

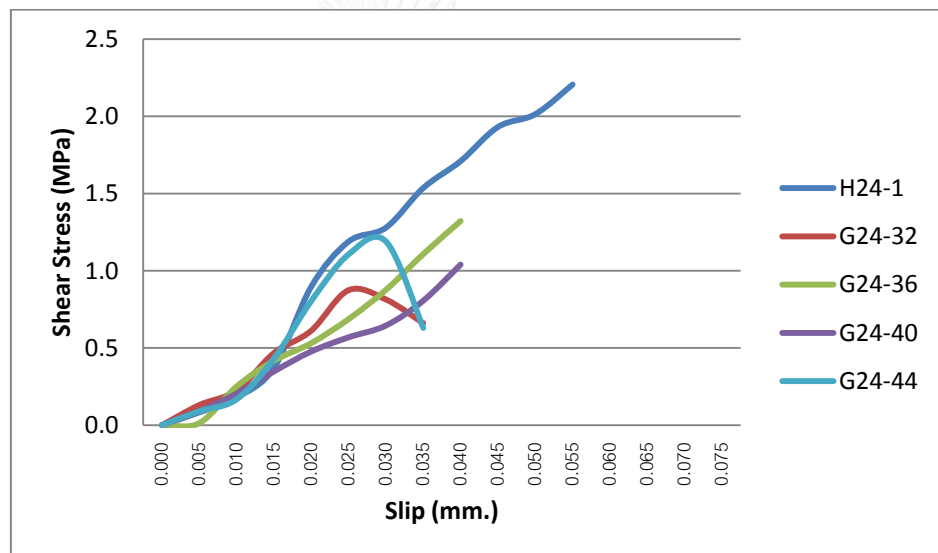


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาหลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีตที่กำลังคอนกรีต 350 ksc อุณหภูมิควบคุม 30 °C ให้ความร้อนแบบรอบเวลา

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและแรงยึดเหนี่ยวในระบบFRP

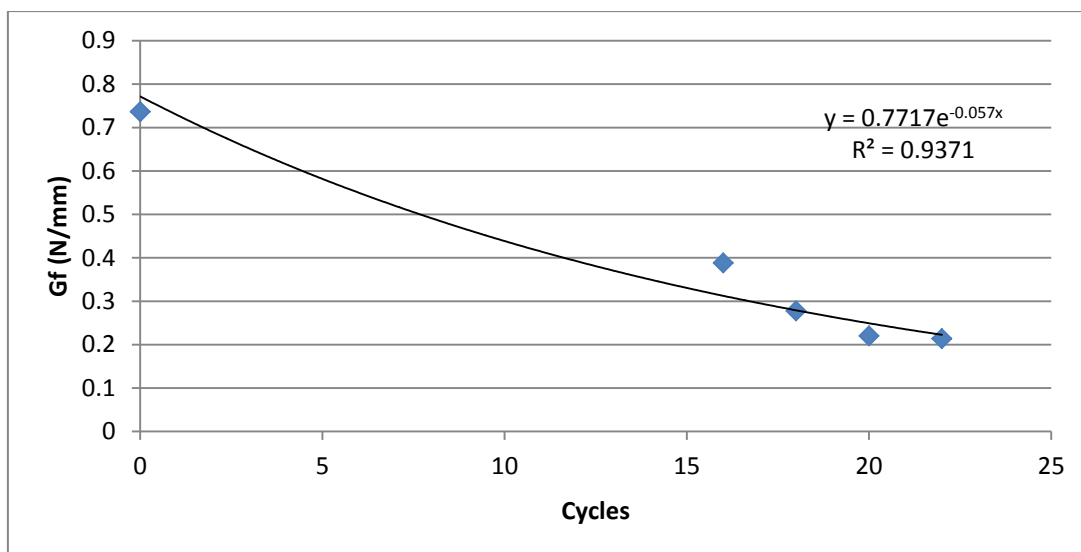
ในการทดสอบอิทธิพลของความชื้นต่อการเลื่อนไถลระหว่างแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ได้กำหนดให้ขึ้นทดสอบที่มีกำลังคอนกรีต 240 ได้รับความชื้น 100 % โดยการแช่

น้ำแบบสลับด้วยระยะเวลาคงที่อันเป็นตัวแทนของสิ่งแวดล้อมภายนอก ในการทดสอบแรงดึงจะทดสอบเมื่อขึ้นทดสอบได้รับความชื้นรอบที่ 32, 36, 40 และ 44 โดยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) ได้ผลดังรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงค่าเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain gauge) ตัวที่ 1 ซึ่งมีค่ามากที่สุดในแต่ละชุดทดสอบ ที่ตำแหน่งตรวจวัดตำแหน่งนี้จะนำไปพิจารณาหาค่าพลังงานยึดเหนี่ยวตามสมการของ Jain-Gou Dai และคณะ ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) แต่ละชั้นทดสอบจะแสดงในภาคผนวก ง เมื่อตัวอย่างคอนกรีตได้รับอิทธิพลของความชื้นยาวนานขึ้นค่าความเครียดและการเลื่อนไถลที่เกิดขึ้นจะลดลงแปรผันตามเวลา



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip)ที่กำลังคอนกรีต 350 ksc ให้ความชื้นแบบรอบเวลา

ในการศึกษาพลังงานในการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ซึ่งหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟรวมของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเลื่อนไถล (shear stress-slip) พบว่า เมื่อขึ้นทดสอบที่ได้รับความร้อนในลักษณะต่างๆ ในระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น พลังงานยึดเหนี่ยวจะมีค่าลดลงในลักษณะการลดลงแบบ Exponential เช่นเดียวกันกับตัวอย่างทดสอบที่ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ โดยมีค่าการถดถอย (Regression) 0.93 ดังรูปที่ 4.19 ที่แสดงค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวต่างๆ แต่พลังงานพันธะยึดเหนี่ยวจะน้อยกว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาพลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุเสริมเส้นใยและคอนกรีตที่ กำลังคอนกรีต 240 ksc เมื่อได้รับความชื้น 100 % ตามรอบเวลา

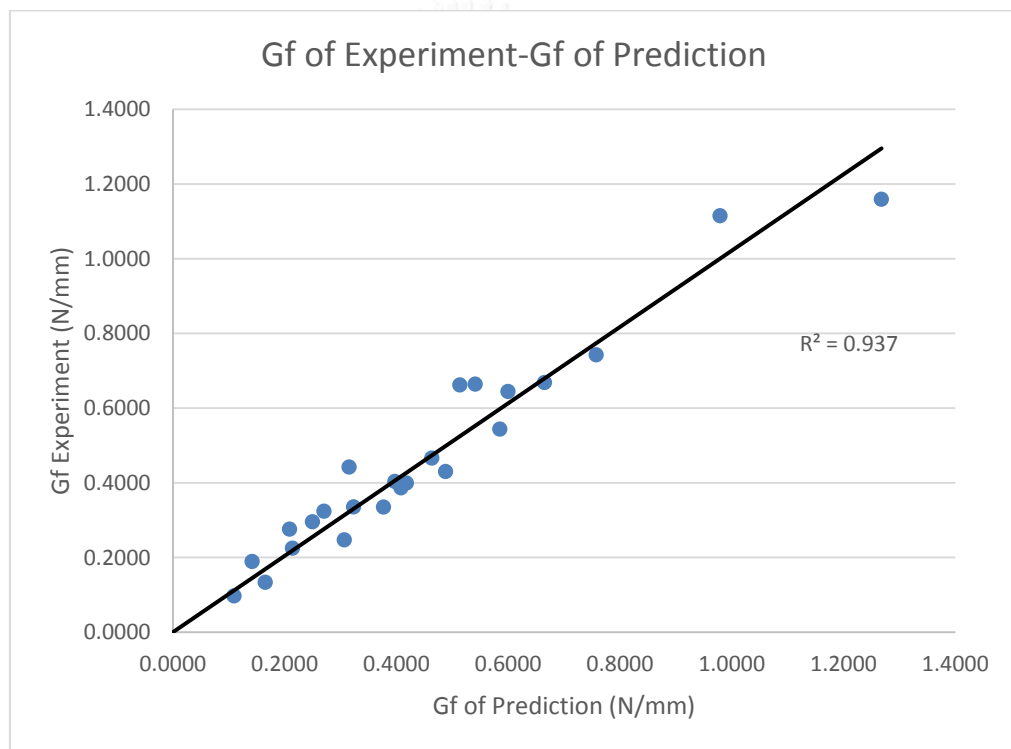
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ กำลังคอนกรีต เวลา และแรงยึดเหนี่ยวในระบบ FRP

จากการทดสอบพลังงานในการยึดเหนี่ยวของตัวอย่างทดสอบต่าง ๆ นั้นเมื่อนำมาศึกษา รูปแบบ และดำเนินการจัดทำแบบจำลองได้ตั้งสมการที่ 4.1 สมการพลังงานยึดเหนี่ยวนี้ในรูปของ พจน์รอบเวลาและอุณหภูมินั้นได้จากการทำสมการถดถอย (Regression) และการเทียบบรรทัดอย่างค (Interpolate) ในส่วนของพจน์ของกำลังคอนกรีตนั้นได้ทำการศึกษาสมการของ และดำเนินการ ปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์จนได้เป็นสมการที่ 4.1

$$G_f = 9.3792 \times \left(1.047 + \left(\frac{1.723(T-28)}{22}\right)\right) e^{-0.103t} T^{-0.7747} f_c'^{1.71} \quad (4.1)$$

โดยที่	G_f	คือ	พลังงานการยึดเหนี่ยว ,(N/mm)
	t	คือ	เวลาในการได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิ ,(วัน)
	T	คือ	อุณหภูมิ ,(°C)
	f_c'	คือ	กำลังคอนกรีต ,(MPa)

สมการนี้จะใช้ในการศึกษาที่อุณหภูมิระหว่าง 30 °C ถึง 50 °C ภายใต้ค่า f_c ระหว่าง 24 MPa ถึง 35 MPa การเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์ เสริมเส้นใยและคอนกรีตจากแบบจำลองและค่าที่ได้จากผลทดสอบโดยสมการของ Jain-Gou Dai และคณะ พบว่าค่าที่ได้จากสมการมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ แต่สมการดังกล่าวมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย อยู่ที่ 12.40 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 28.69 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงให้เห็นใน ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงค่าการถดถอย (Regression) มีค่าถึง 0.94 ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในสมการนั้นมาจากผลพลังงานการยึดเหนี่ยวในตัวอย่างคอนกรีตที่กำลัง 350 MPa ได้ผลที่ค่อนข้างสูงมากกว่าสมการของ Jain-Gou Dai และคณะ ดังรูปที่ 4.2 ที่ได้แสดงไว้ในข้างต้น



รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวจากการทดลองและแบบจำลอง

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบระหว่างค่าพลังงานการยึดเหนี่ยวจากการทดลองและแบบจำลอง

Code	Strength	Temp.	Cycle	Gf (N/mm)		Error (%)	Gf(pre.)
				Experiment	Model		Gf(exp.)
A24-2	24	50	1	0.6621	0.5137	22.41	0.78
A24-4	24	50	2	0.4663	0.4634	0.60	0.99
A24-6	24	50	3	0.3993	0.4181	4.71	1.05
A24-8	24	50	4	0.3348	0.3772	12.64	1.13
A24-12	24	50	6	0.2469	0.3069	24.31	1.24
A24-16	24	50	8	0.2954	0.2498	15.45	0.85
A24-24	24	50	12	0.1333	0.1655	24.09	1.24
A24-32	24	50	16	0.0972	0.1096	12.77	1.13
B35-2	35	50	1	1.1149	0.9793	12.16	0.88
B35-12	35	50	6	0.5438	0.5851	7.61	1.08
B35-24	35	50	12	0.4423	0.3154	28.69	0.71
B35-32	35	50	16	0.2759	0.2089	24.30	0.76
C24-2	24	30	1	0.6683	0.6651	0.49	1.00
C24-4	24	30	2	0.6444	0.6000	6.89	0.93
C24-6	24	30	3	0.6640	0.5413	18.49	0.82
C24-8	24	30	4	0.4302	0.4883	13.50	1.13
C24-12	24	30	6	0.4033	0.3974	1.48	0.99
C24-16	24	30	8	0.3355	0.3234	3.60	0.96
C24-32	24	30	12	0.2250	0.2142	4.79	0.95
C24-24	24	30	16	0.1894	0.1419	25.09	0.75
E35-2	35	30	1	1.1591	1.2679	9.39	1.09
E35-12	35	30	6	0.7425	0.7575	2.03	1.02
E35-24	35	30	12	0.3862	0.4083	5.73	1.06
E35-32	35	30	16	0.3237	0.2705	16.46	0.84
Mean Error						12.40	0.97
Maximum Error						28.69	1.24
Maximum Error						0.49	0.71

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การศึกษาพฤติกรรมยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตนี้ ได้ทดสอบโดยใช้เครื่องมือในการดึงโดยจะดึงโดยตรง ทิศทางขนานแท่งคอนกรีตเพื่อลดปัจจัยอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องในการศึกษาการวิบัติของแรงยึดเหนี่ยว หรือพฤติกรรมในการเลื่อนไถลระหว่างแรงยึดเหนี่ยวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด จากผลการศึกษาได้ผลการทดลองดังนี้

- แม้ว่าวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถเสริมกำลังให้แก่คอนกรีตให้มีกำลังมากขึ้น แต่ความอ่อนแอของระบบวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยอยู่ที่พันธะเชื่อมประสาน ดังนั้นเมื่อเกิดแรงดึงที่ทำให้ระบบวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเลื่อนไถล ระบบพันธะยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตจะเกิดในบริเวณชั้นเชื่อมประสาน โดยที่การยึดเหนี่ยวในส่วนที่ใกล้แรงดึงวิบัติก่อน (Load Free) สอดคล้องกับการศึกษาของJain-Gou Daiและคณะ

- พันธะยึดเหนี่ยวในระบบวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะมีกำลังลดลงจากเดิมเมื่อได้รับอิทธิพลจากรอบความชื้น และอุณหภูมิในช่วงต้น กำลังจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อได้รับรอบความเปียก-แห้ง ตั้งแต่รอบที่ 8 (16 วัน) โดยลักษณะการลดลงนั้นมีลักษณะลดลงแบบ exponential เนื่องจากพอลิเมอร์เกิดการขยายตัวจากความชื้นและความร้อน

- อุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนแบบแผ่นและคอนกรีตลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อได้รับอิทธิพลเป็นเวลานาน แต่ความชื้นและกำลังของคอนกรีตนั้นมีผลต่อแรงพันธะยึดเหนี่ยวน้อย

- สมการพลังงาน $G_f = 9.3792 \times (1.047 + (\frac{1.723(T-28)}{22}))e^{-0.103t}T^{-0.7747}f_c'^{1.71}$ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 12.6 เปอร์เซ็นต์ โดยสมการนี้จะใช้ในการศึกษาที่อุณหภูมิระหว่าง 30 °C ถึง 50 °C ภายใต้ค่า f_c' ระหว่าง 24 MPa ถึง 35 MPa สอดคล้องกับการศึกษาของJain-Gou Daiและคณะ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การติดตั้งทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตจะติดตั้ง strain gauges ภายหลังจากการนำเข้าควบคุมอุณหภูมิและความชื้น เพื่อป้องกันการเสียหาย และอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมต่อ strain gauges โดยที่ขณะทำการเครื่องย้ายตัวอย่างที่จะทดสอบต้องเคลื่อนย้ายด้วยความระมัดระวัง ไม่ให้เกิดผลกระทบต่อวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
2. ก่อนการทดสอบการดึงควรตรวจสอบให้แน่ใจว่าชิ้นส่วนยึดติดกับแท่นดึง และได้ระดับเดียวกัน เพื่อให้ตัวอย่างทดสอบเกิดการดึงโดยตรงอย่างแท้จริง
3. เพื่อหลีกเลี่ยงแรงเฉือนที่อาจเกิดขึ้นในการทดสอบ รวมไปถึงให้ระมัดระวังในการขนย้ายตัวอย่างทดสอบเข้าสู่แท่งดึงทดสอบ หากขนย้ายไม่ถูกวิธีจะทำให้เกิดการวิบัติก่อนการทดสอบ

5.3 งานวิจัยในอนาคต

1. ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตนี้ ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยเพิ่มเติมเมื่อเสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยหลายชั้น ควรคำนึงอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตในทิศทางของเส้นใยในแบบต่างๆ และรวมไปถึงวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดอื่นๆ และเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้นเป็นฐานข้อมูลและนำมาประยุกต์ใช้ได้เหมาะสมต่อไป
2. แม้ว่าวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะเสริมกำลังให้กับคอนกรีต แต่อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อตัวอย่างคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนั้นไม่ควรมองข้าม ควรศึกษาผลกระทบถึงกำลัง แรงเฉือน และการเสื่อมสลายอันเนื่องมาจากอุณหภูมิและความชื้น ซึ่งสามารถนำไปสู่การประเมินอายุการใช้งานของคอนกรีตที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในอนาคต
3. เพื่อความถูกต้องสำหรับการศึกษามากขึ้นควรศึกษาพอลิเมอร์หรือวัสดุเชื่อมประสาน รวมไปถึงชนิดของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยชนิดอื่นๆ และเพิ่มจำนวนชิ้นส่วนทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น
4. ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ควรศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นที่ส่งผลต่อขนาดความยาวประสิทธิผล (effective length) ของวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ต้องการ

รายการอ้างอิง

1. ASTM C78-02, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)* 2002, West Conshohocken, PA.
2. Bazant, Z.P. and P.C. Prat, *Effects of Temperature and Humidity on Fracture of Concrete*. ACI Material Journal, Title No. 85-M32, 1998.
3. ACI 440.2R-02, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structure*. 2002: American Concrete Institute, Michigan.
4. Tuakta, C., *Effects of Moisture on Debonding in FRP-retrofitted Concrete System*, Thesis of Doctor Degree. Civil Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
5. Chanh, T.M.T., *Debonding of Flexural Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Polypara Phenylene Benzobisoxazole (PBO) Mesh*, in Thesis Proposal of Master Degree of Engineering, Civil Engineering. 2011, Chulalongkorn University.
6. Gangarao, V.S.H. and P.V. Vijay, *Feasibility Review of FRP materials for Structural Applications*, Engineering Research & Development Center (CEERD-CT-T). 2010: US Army Corps of Engineers.
7. Head, P.R., *Advanced Composites in Civil Engineering- a Critical Overview at the high Interest, Low Usage Stage of Development*, in *Proceeding of the 2nd International Conference on Advanced Composite Material in Bridges and Structures*. 1996: Canadian Society of Civil Engineering, Montreal, Canada.
8. JSCE(a), *Guidelines for retrofit of Concrete structure*. 1999, JSCE.
9. JSCE(b), *Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with use of Continuous Fiber Sheets*, in *Concrete Libraly No.95*. 1999, JSCE.
10. MTEC, *Polymers Technology*. 2008: National Metal and Materials Technology Center, Thailand.
11. Oral, B. and T.Y. Yu, *Understanding and Assessment of Debonding Failure in FRP-Concrete Systems*. 2006: Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Cambridge, U.S.A.
12. Limpaninlachat, P., *Bond Behavior between reinforced Concrete after Fire and Carbon Fiber Reinforced Plastic*, in Thesis Proposal of Master Degree of Engineering, Civil Engineering. 2011, Chulalongkorn University.

13. Shahriar, Q., *Bond Behaviour of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Rebars in Concrete*, in *Master's Thesis. B.Sc.* . 2010, Bangladesh University of Engineering & Technology, Bangladesh.
14. SikaCarboDur, S., *Heavy-Duty CFRP Strengthening System*. 2002: Product Data Sheet, Sika CarboDur Plates.
15. Tim , J.S. and A.B. Luke, *Temperature Effects in Adhesively Bonded FRP Strengthening Applied to Steel Beam: Experiment Observation*, in *CICE 2010-The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. 2010.
16. Tim , J.S. and A.B. Luke, *Effect of Warm Temperatures on Externally Bonded FRP Strengthening*. 2012(16(3)): p. 235-244.
17. Tounsi, A., *Improved Theoretical Solution for interfacial Stresses in Concrete Beams Strengthened with FRP Plate*. . International Journal of Solids and Structures 43, 2006: p. 4154-4174.
18. UMI microform, *UMI Number:1458105*. ProQuest LLC 789 East Eisenhower Parkway, United States, 2008.
19. Wu, Z. and H. Niu, *Study on Debonding Failure Load of RC Beam Strengthened with FRP Sheet*. Journal of Structural Engineering, JSCE, 2000. **Vol.46A**.
20. Ye, L.P., X.Z. Lu, and J.F. Chen *Design Proposal for the Debonding Strengths of FRP Strengthened RC Beams in the Chinese Design Code*. Proceeding of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005), December, Hong Kong, China, 2005.
21. Zhang, S., *Structural Performance of Steel/FRP Reinforced Concrete Beams at Temperature*. School of Engineering and Information Technology, The University of New South Wales, Australia, 2011.
22. เล่นวารีย์, ป.ว.แ.ด.อ., การวิเคราะห์การหลุดร่อนสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพลาสติกเสริมเส้นใยโดยแนวความคิดการปลดปล่อยพลังงาน. การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติครั้งที่ 16, มหาวิทยาลัยมหิดล, 2554.
23. กุลประภา, ธ., เทคโนโลยีวัสดุ *Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)* ในการเสริมกำลังโครงสร้าง. E-Journal TCA , บริษัท นนทรี จำกัด, 2552.
24. นันทวัฒน์ ขมหวาน และ กริสน์ ชัยมุก, โครงสร้างเหล็กผสมแนวใหม่. วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 มกราคม-มีนาคม 2554, 2554.

25. ปิยะลักษณ์ วัฒนาศิริ และ ดร.อัศววัชร เล่นวารี, การศึกษาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการหลุดล่อนที่ช่วงภายในสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย. การประชุมวิชาการวิศวกรรมแห่งชาติครั้งที่ 17, โรงแรม เซ็นทารา แอนด์คอนเวนชันเซ็นเตอร์ อุดรธานี, 2555.
26. มยผ.1508-51, มาตรฐานการเสริมสร้างกำลังโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวัสดุคอมโพสิตเสริมเส้นใย. 2551, กรมโยธาธิการและผังเมือง, กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ.
27. สุจิตธรรมกุล, ส., ข้อจำกัดและข้อพึงระวังในการใช้งานวัสดุ *FRP Composites* ในงานเสริมกำลังโครงสร้าง. วารสารคอนกรีต, ฉบับที่ 11 ประจำเดือน ธันวาคม 2010, สมาคมคอนกรีตแห่งประเทศไทย, 2554.





ภาคผนวก ก
ส่วนผสมในการทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

MIX DESIGN			
THESIS : INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON BONDING BETWEEN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEET AND CONCRETE			
DATE OF CASTING	: 12 September 2013	PRODUCTION No.	: 35A
CLASS OF CONCRETE	: Class A 350	SLUMP	: 5.5-10.5
COMPRESIVE STRENGTH (ksc)	:	350 (CYLINDER)	
W/O	: 0.6	AIR	: 8
BRAND OF CEMENT	: Tra Chang OPC Type 1	CEMENT FACTOR	: 250/cu.m.
LABORATORY	: Civil Engineering Laboratory, Chulalongkorn University		
CALCULATION OF PROPORTION VOLUME FOR 1 CU.M. OF CONCRETE			
Water requirement		= 225	ltr.
Solid volume of cementations materials	= $489.2/2.73$	= 181	ltr.
Solid volume of fine aggregate	= 1-1542	= 528	ltr.
Solid volume of coarse aggregate	= $828/2.64$	= 314	ltr.
Air content	= $8.0 \times 1000 / 100$	= 80	ltr.
Total volume		= 1522	ltr.
ADJUST MIXTURE FROM MOISTURE			
Solid weight of fine aggregate	= $828 \times (1+1.02)$	= 844.6	kg.
Solid weight of coarse aggregate	= $633 \times (1+1.04)$	= 645.6	kg.
Water surface of fine aggregate	= 2-0.5	= 1.5	%
Water surface of coarse aggregate	= 4-0.7	= 3.3	%
Water requirment	= $225-828(0.015)-633(0.033)$	= 195.1	ltr.
COMPOSITION FOR 1 CU.M. OF CONCRETE			
Cementitious materials		= 489.2	kg.
Water		= 195.1	ltr.
Sand (Normal)		= 539.0	kg.
Rock (3/4"-#4)		= 844.6	kg.

MIX DESIGN			
THESIS : INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON BONDING			
BETWEEN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEET AND CONCRETE			
DATE OF CASTING	: 12 September 2013	PRODUCTION No.	: 24B
CLASS OF CONCRETE	: Class B 240	SLUMP	: 5.5-10.5
COMPRESIVE STRENGTH (ksc)	:	240 (CYLINDER)	
W/O	: 0.6	AIR	: 8
BRAND OF CEMENT	: Tra Chang OPC Type 1	CEMENT FACTOR	: 250/cu.m.
LABORATORY	: Civil Engineering Laboratory, Chulalongkorn University		
CALCULATION OF PROPORTION VOLUME FOR 1 CU.M. OF CONCRETE			
Water requirement		= 225	ltr.
Solid volume of cementations materials	= $388/2.73$	= 144	ltr.
Solid volume of fine aggregate	= 1-1441	= 761	ltr.
Solid volume of coarse aggregate	= $828/2.70$	= 312	ltr.
Air content	= $8.0 \times 1000 / 100$	= 80	ltr.
Total volume		= 1522	ltr.
ADJUST MIXTURE FROM MOISTURE			
Solid weight of fine aggregate	= $828 \times (1+1.02)$	= 844.6	kg.
Solid weight of coarse aggregate	= $633 \times (1+1.04)$	= 645.6	kg.
Water surface of fine aggregate	= 2-0.5	= 1.5	%
Water surface of coarse aggregate	= 4-0.7	= 3.3	%
Water requirment	= $225 - 828(0.015) - 633(0.033)$	= 191.7	ltr.
COMPOSITION FOR 1 CU.M. OF CONCRETE			
Cementitious materials		= 388	kg.
Water		= 191.7	ltr.
Sand (Normal)		= 645.6	kg.
Rock (3/4"-#4)		= 844.6	kg.

THESIS : INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON BONDING

BETWEEN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEET AND CONCRETE QUALITY CONTROL SHEET

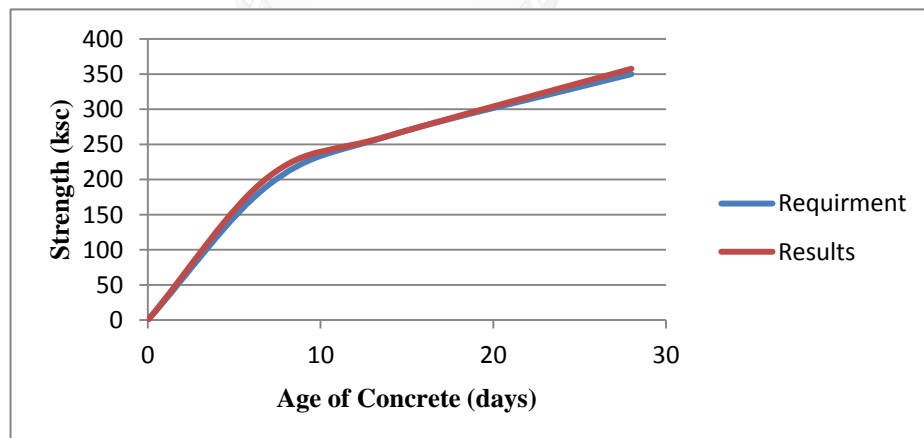
Class : A
 Code : 35A
 Laboratory : Civil Engineering Laboratory, Chulalongkorn University

CONCRETE TEST

Slump : 9.5 cm.
 Air Content : - %
 Concrete Temperature : - °C

COMPRESSIVE STRENGTH

Age of Concrete	Sample					Required	
	1	2	3	Average	%	%	ksc
7 days	200.0	201.0	211.0	204.0	58.3	55.0	192.5
14 days	258.9	262.9	265.8	262.5	75.0	75.0	262.5
28 days	355.0	358.0	360.0	357.7	102.2	100.0	350.0



THESIS : INFLUENCE OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ON BONDING

BETWEEN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEET AND CONCRETE QUALITY CONTROL SHEET

Class : B

Code : 24B

Laboratory : Civil Engineering Laboratory, Chulalongkorn University

CONCRETE TEST

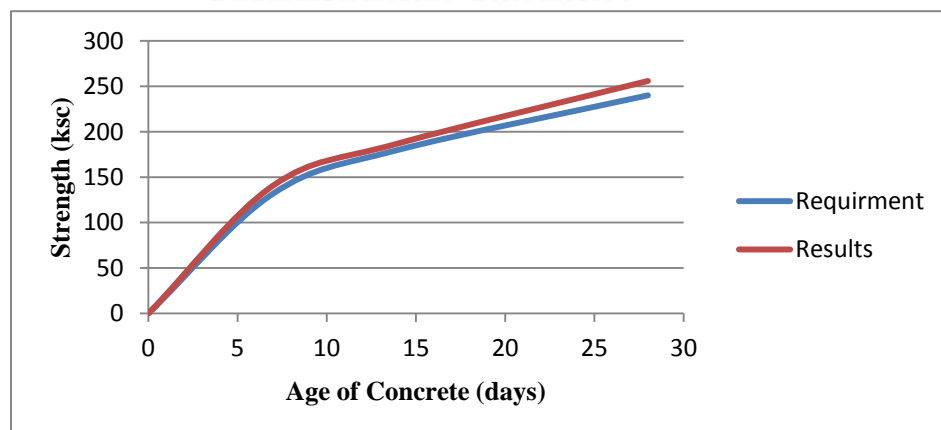
Slump : 8.5 cm.

Air Content : - %

Concrete Temperature : - °C

COMPRESSIVE STRENGTH

Age of Concrete	Sample				Required		
	1	2	3	Average	%	%	ksc
7 days	141.0	140.4	141.0	140.8	58.7	55.0	132.0
14 days	188.9	186.6	185.8	187.1	78.0	75.0	180.0
28 days	258.9	252.9	255.8	255.9	106.6	100.0	240.0



ภาคผนวก ข
การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ ข-1 เตรียมแบบหล่อ



รูปที่ ข-2 เตรียมเหล็กเสริม



รูปที่ ข-3 ผสมคอนกรีต



รูปที่ ข-4 เทเข้าแบบ



รูปที่ ข-5 การบ่มคอนกรีต



รูปที่ ข-6 ตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาทดสอบกำลัง



รูปที่ ข-7 กำลังที่ได้จากตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ ข-8 ตัวอย่างคอนกรีตหลังทดสอบกำลัง



รูปที่ ข-9 การเตรียมผิวตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ ข-10 วัดความชื้นที่คอนกรีตก่อนการติดตั้งวัสดุพอลิเมอร์เสริมเส้นใย



รูปที่ ข-11การเตรียมพอลิเมอร์ในการติดตั้ง



รูปที่ ข-12การติดตั้งCFRPแบบแผ่นบนตัวอย่างคอนกรีต



รูปที่ ข-13 ตัวอย่างคอนกรีตหลังติดตั้งCFRP



รูปที่ ข-14 การWrapตัวอย่างคอนกรีตบนด้านที่ไม่ทดสอบ



รูปที่ ข-15 การให้ความร้อนแก่ตัวอย่างคอนกรีตด้วยผ้าห่มไฟฟ้า



รูปที่ ข-16 การให้ความชื้นแก่คอนกรีตด้วยการแช่น้ำ



รูปที่ ข-17 การติดตั้ง Strain Gauge หลังจากทดสอบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นตามที่กำหนด



รูปที่ ข-18 แท่นตั้งตัวอย่างคอนกรีตที่ติดตั้ง CFRP



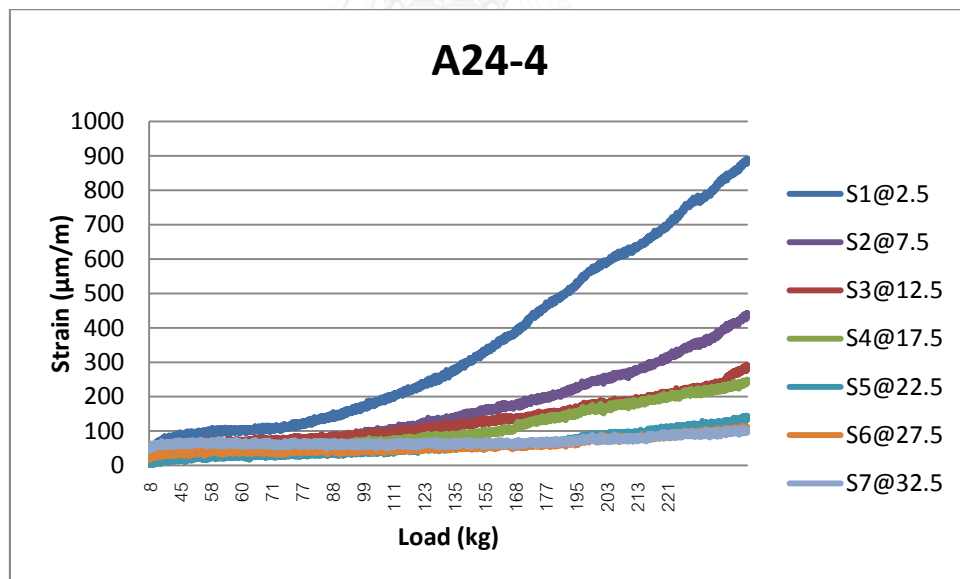
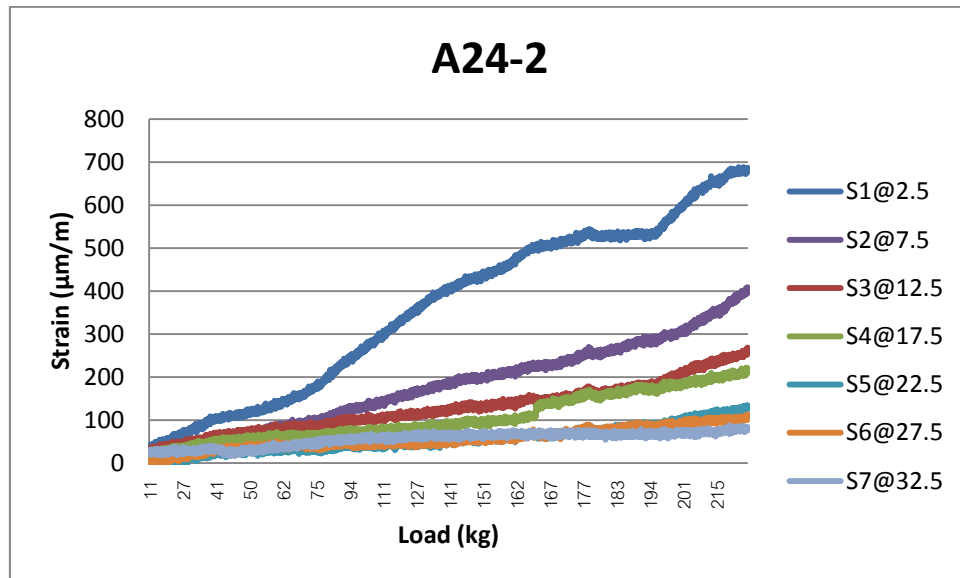
รูปที่ ข-19 การติดตั้งตัวอย่างคอนกรีตบนแท่นตั้ง

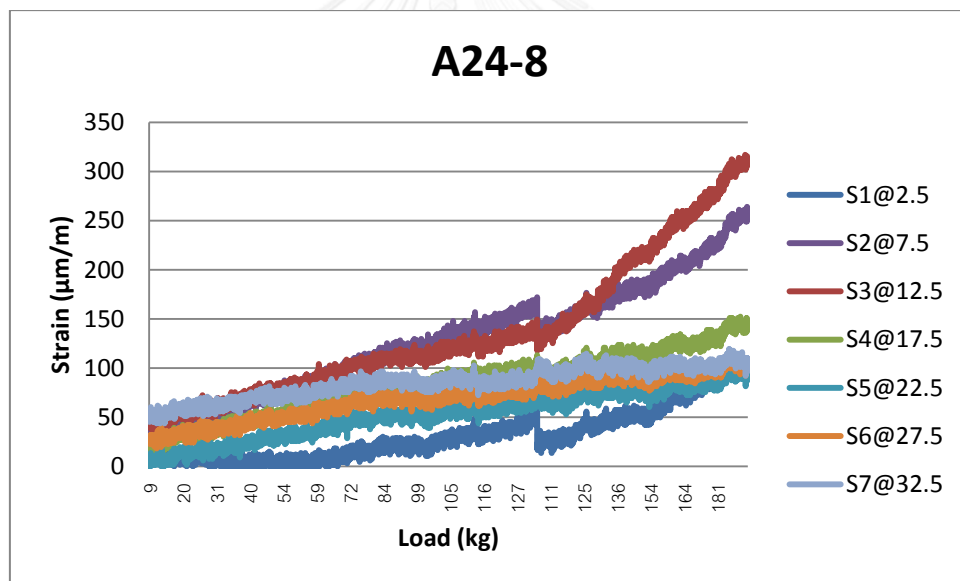
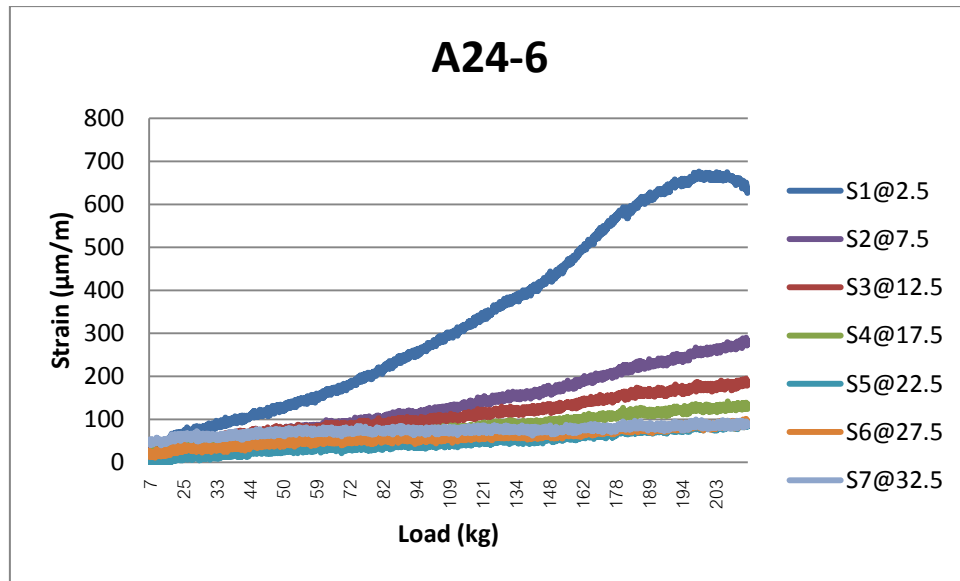


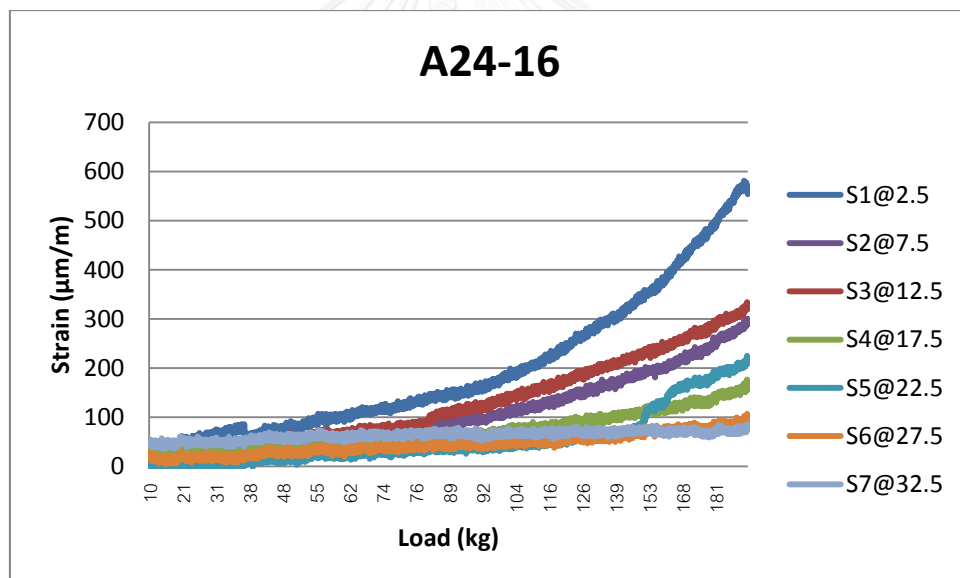
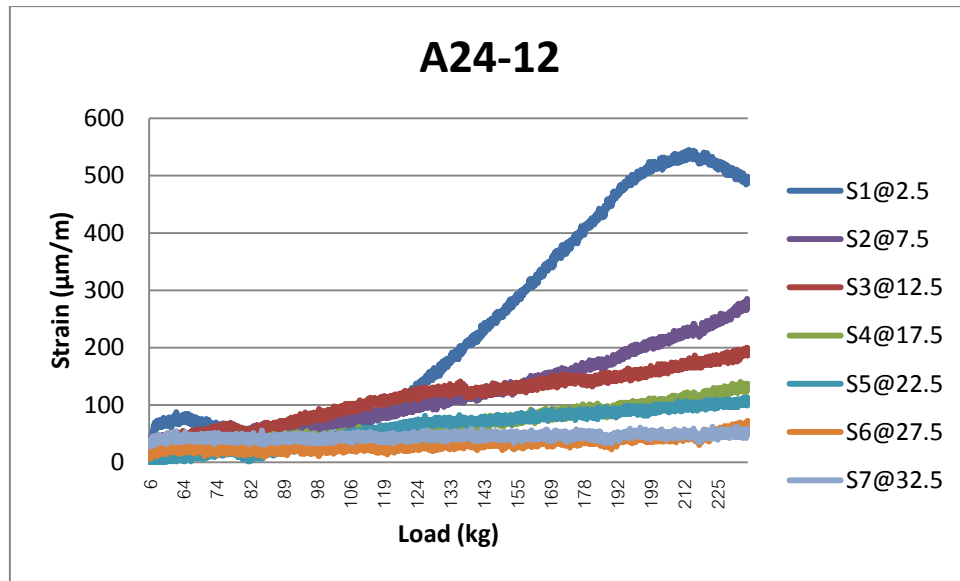
รูปที่ ข-20 ตัวอย่างคอนกรีตหลังจากการทดสอบ

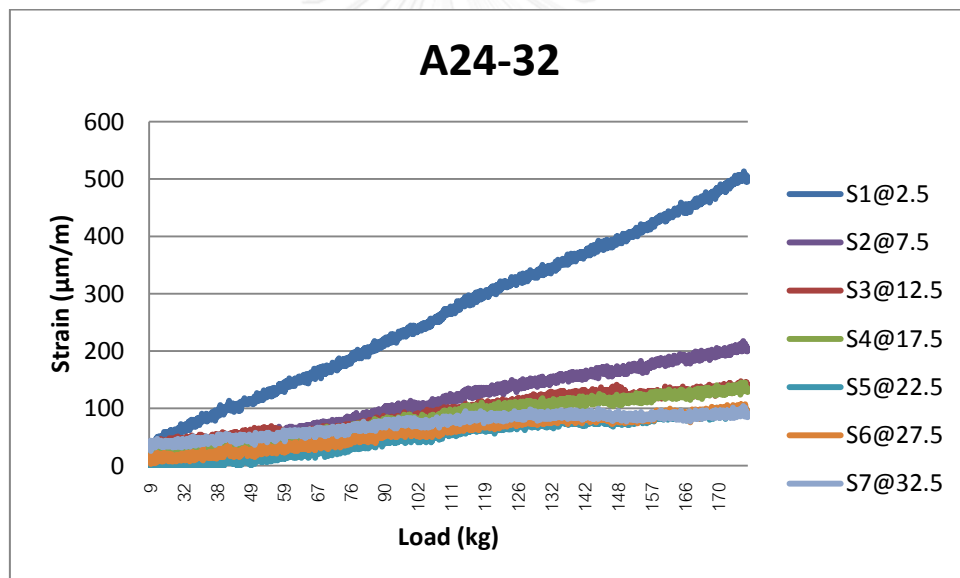
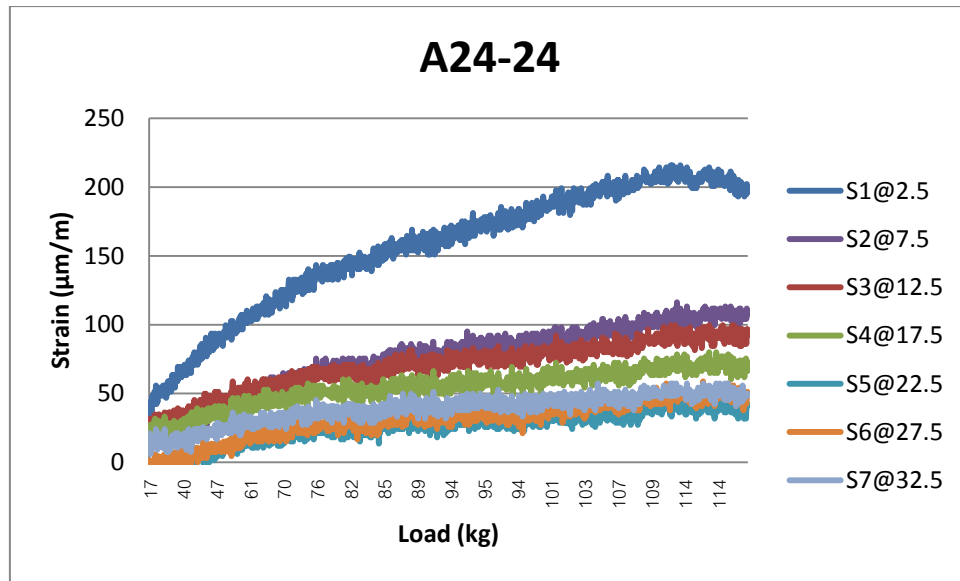
ภาคผนวก ค
Strain Load

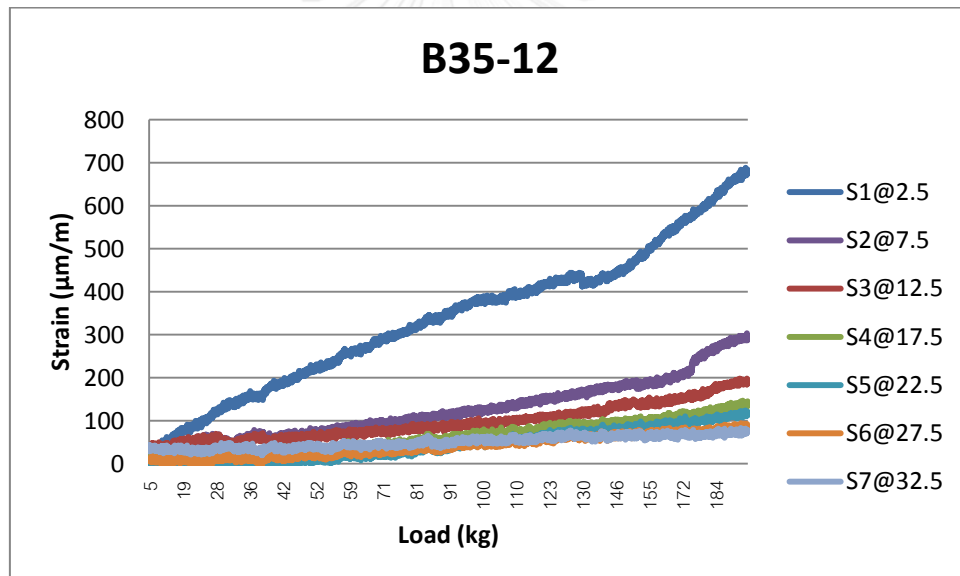
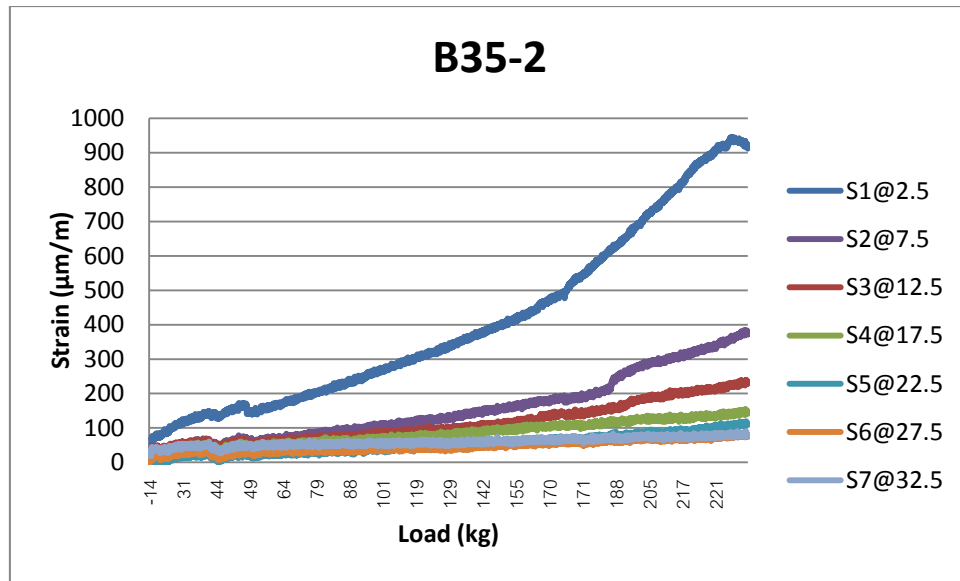
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

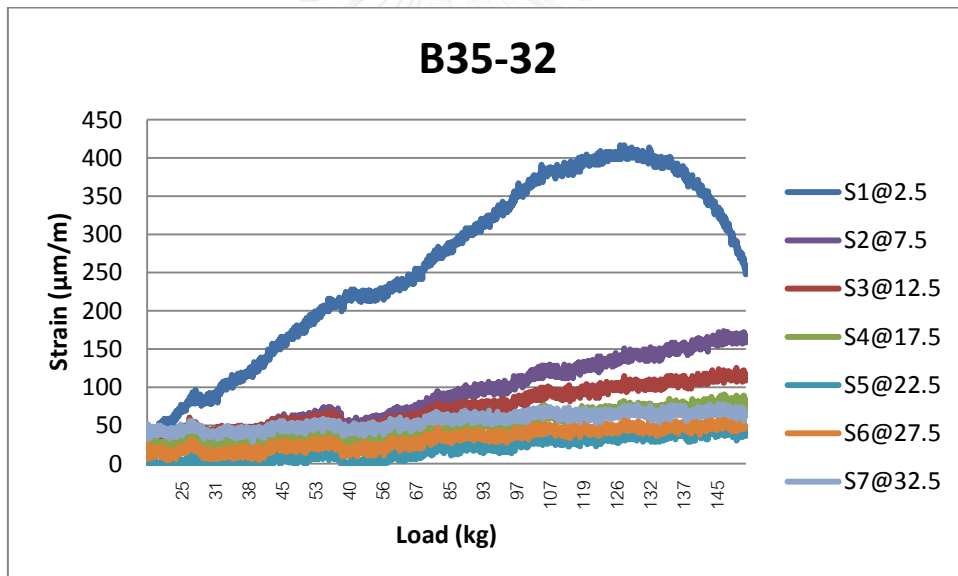
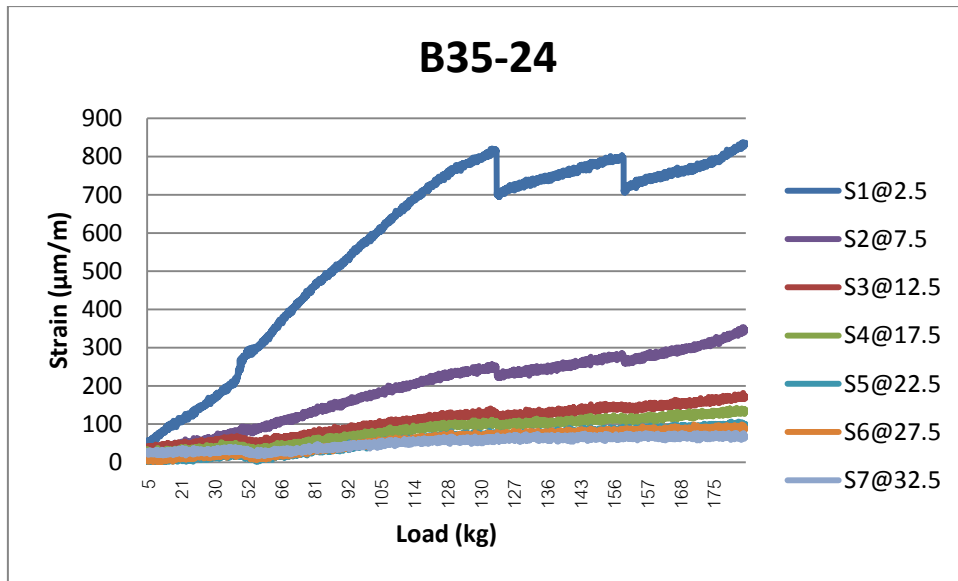


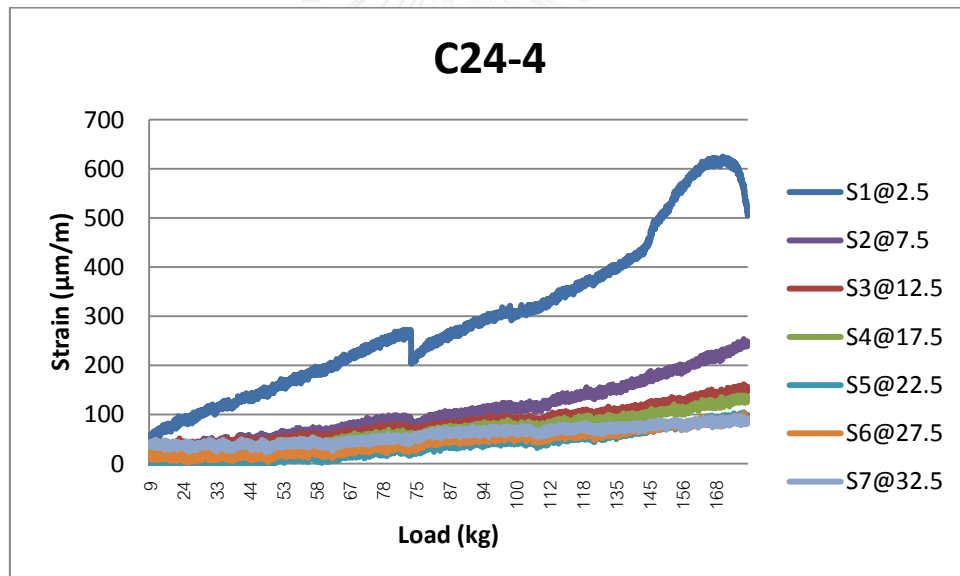
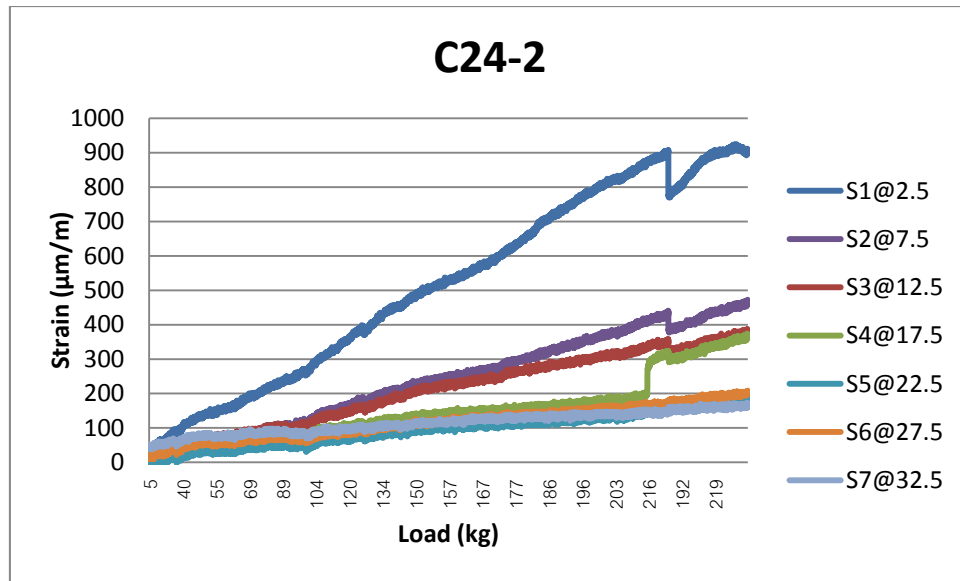


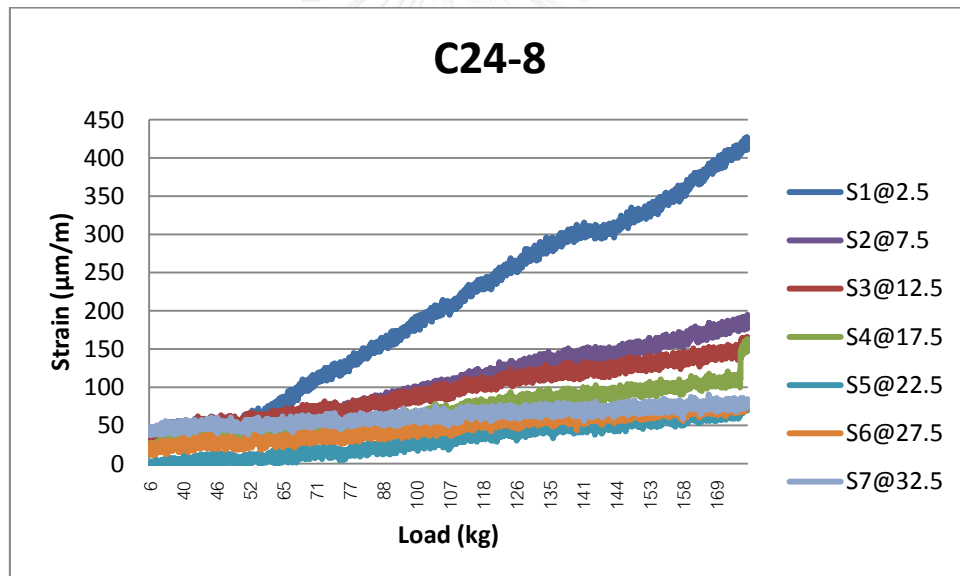
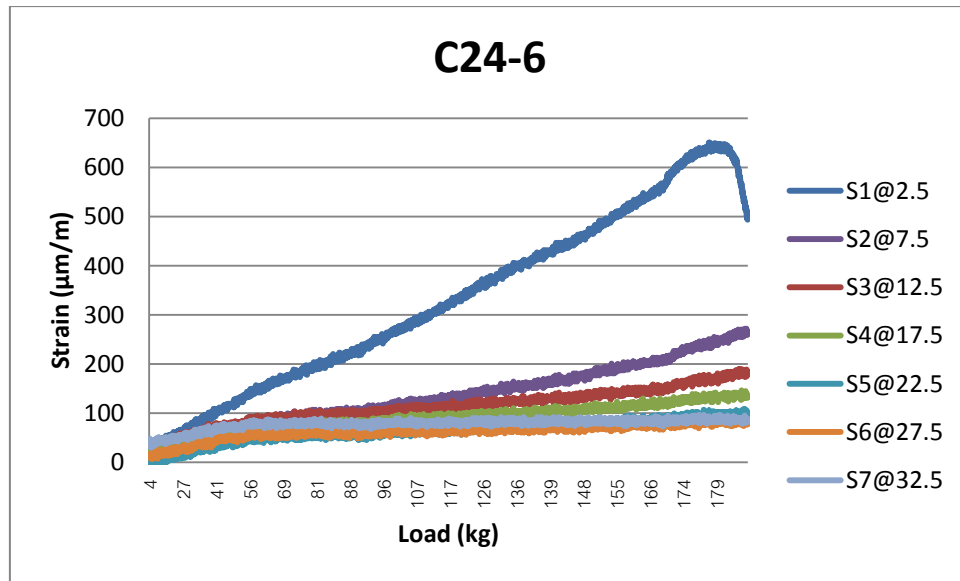


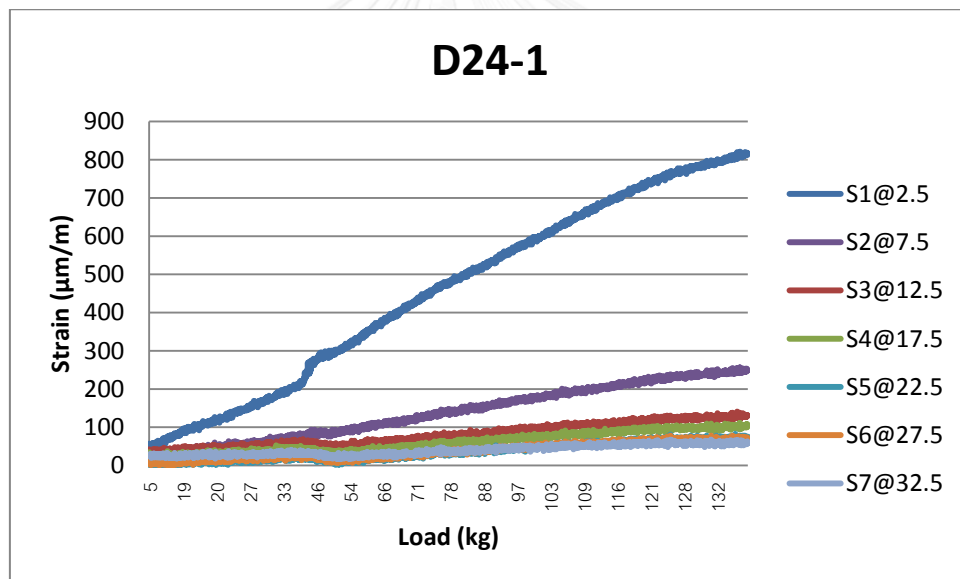
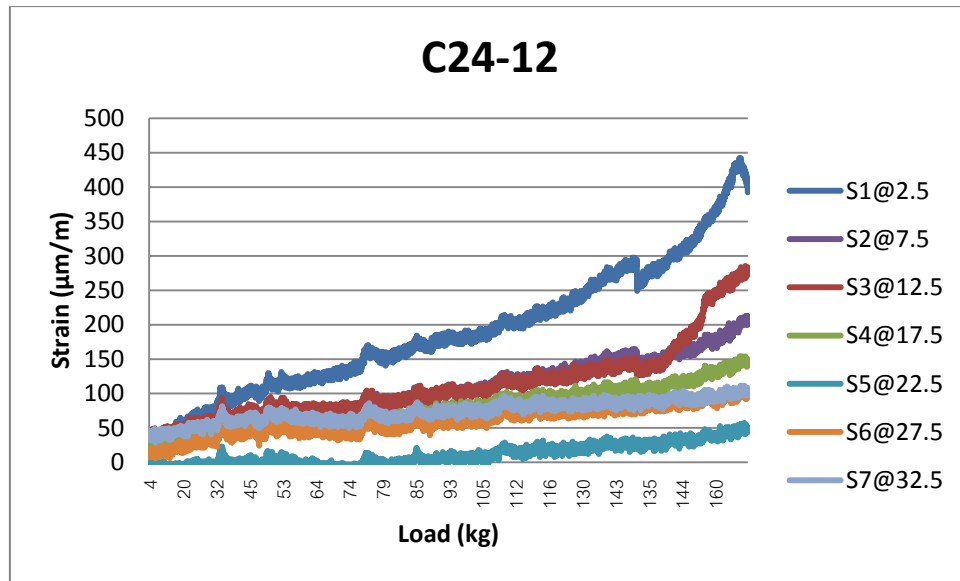


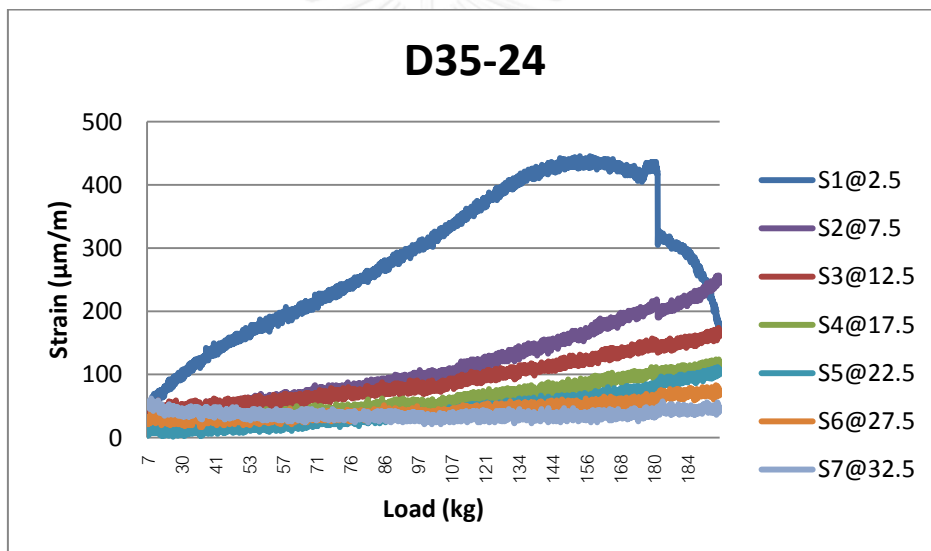
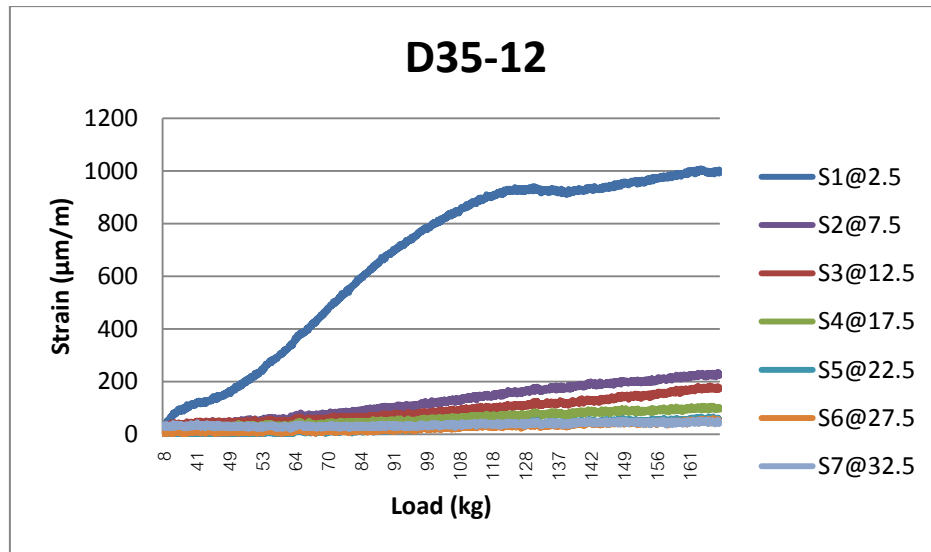


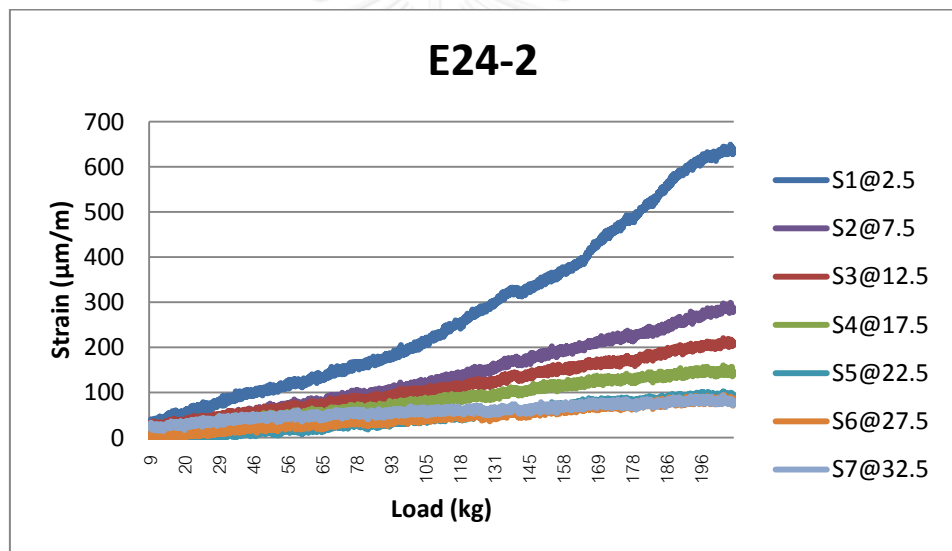
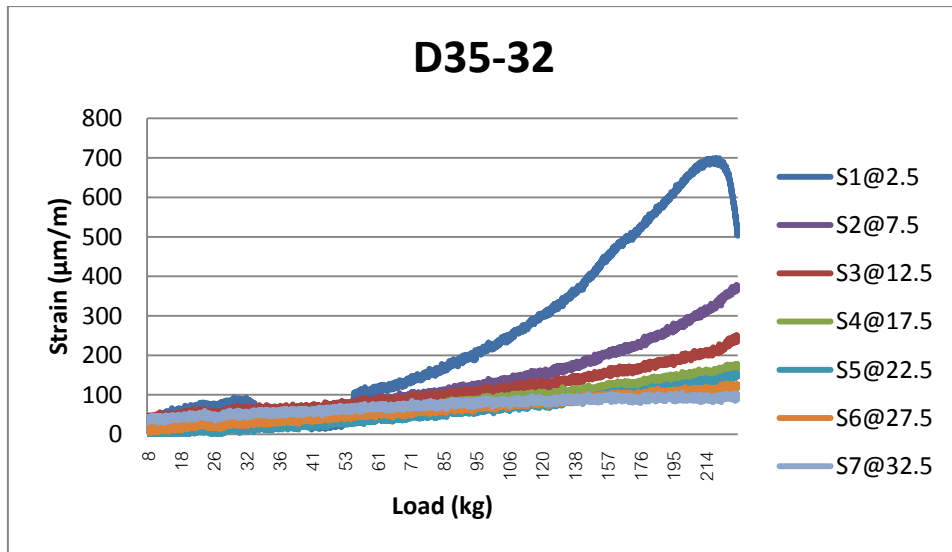


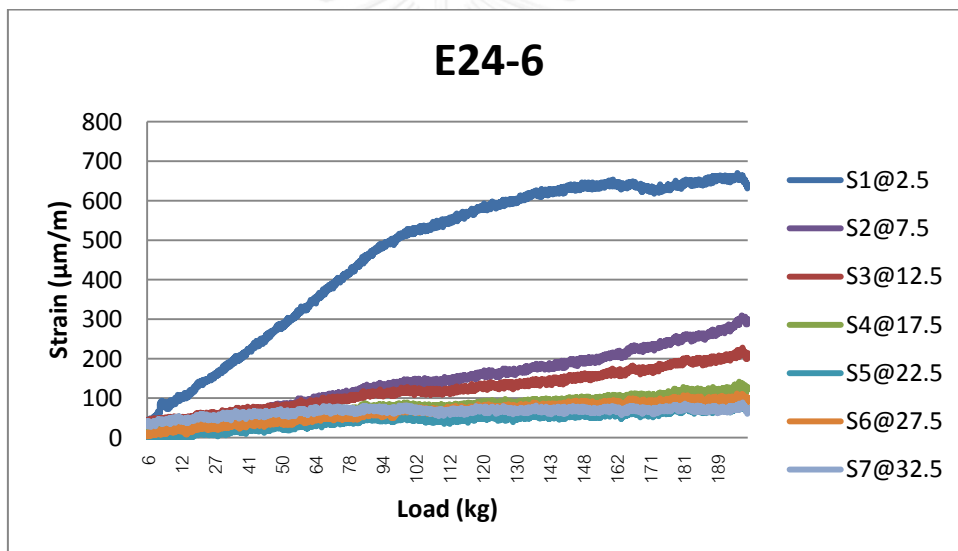
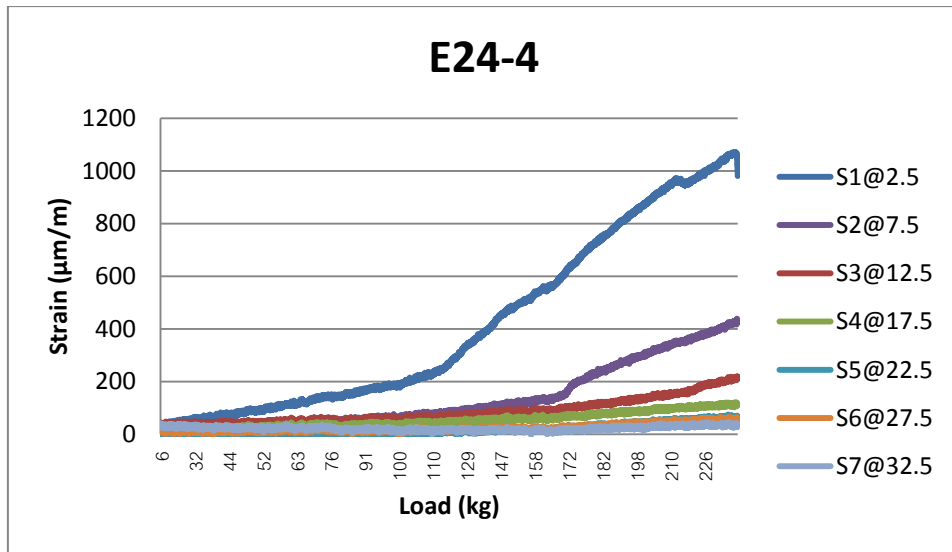


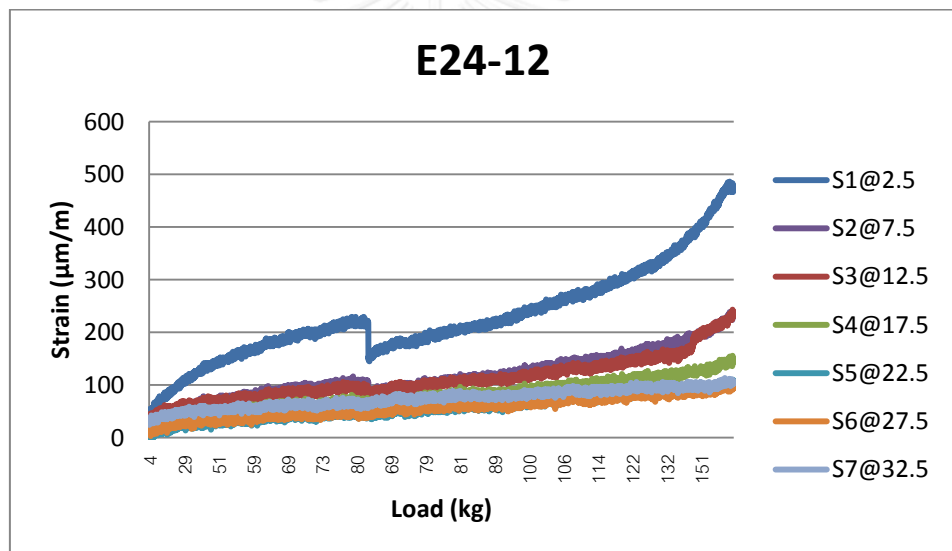
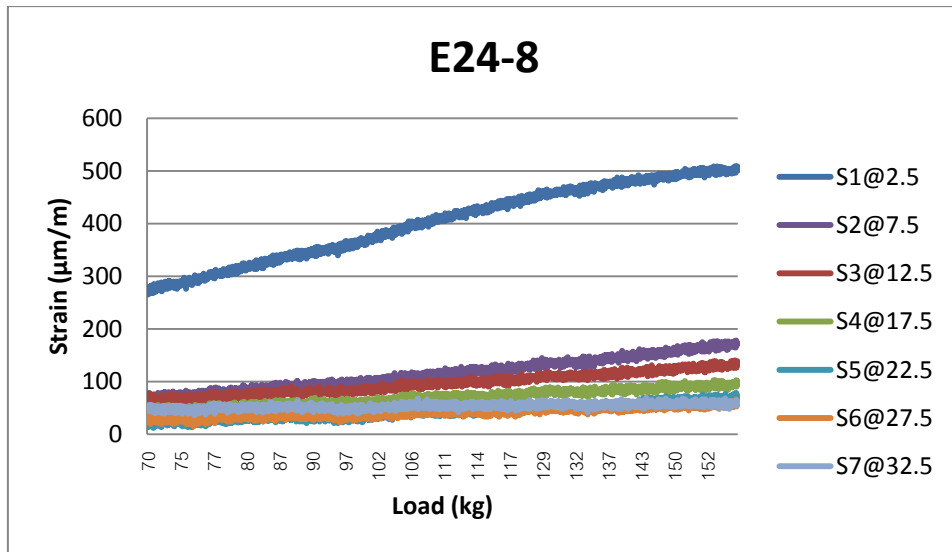


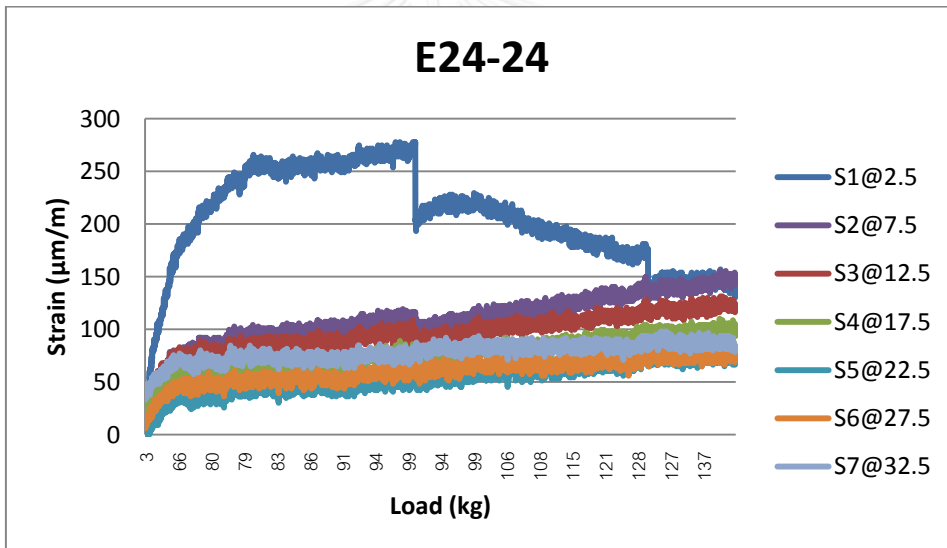
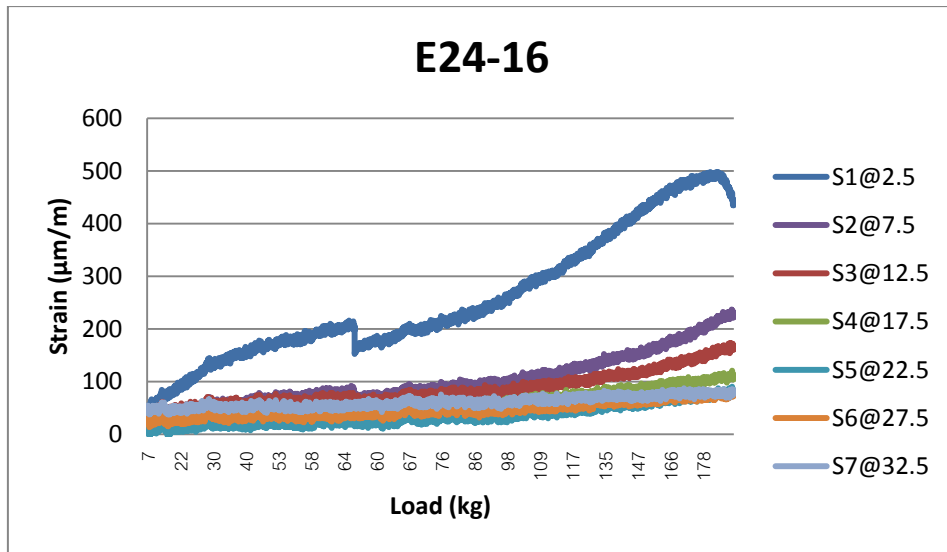


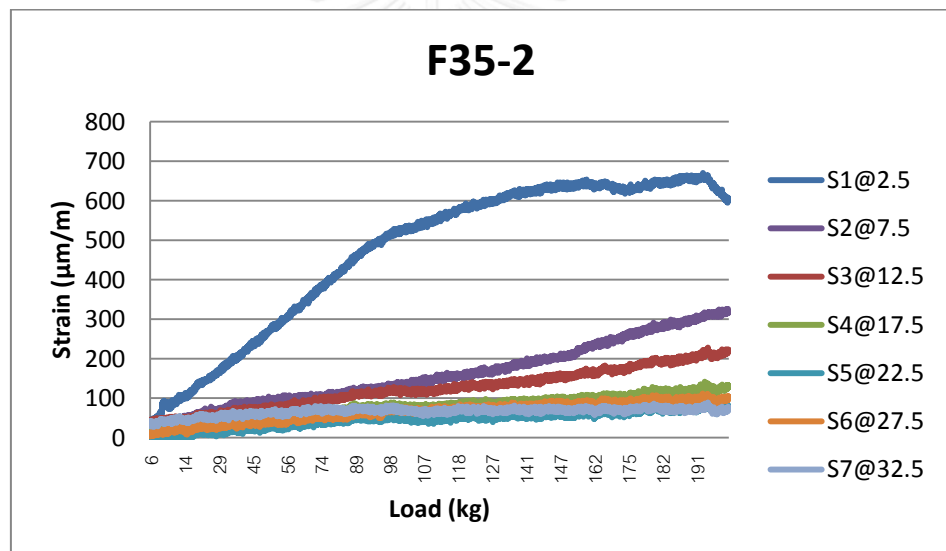
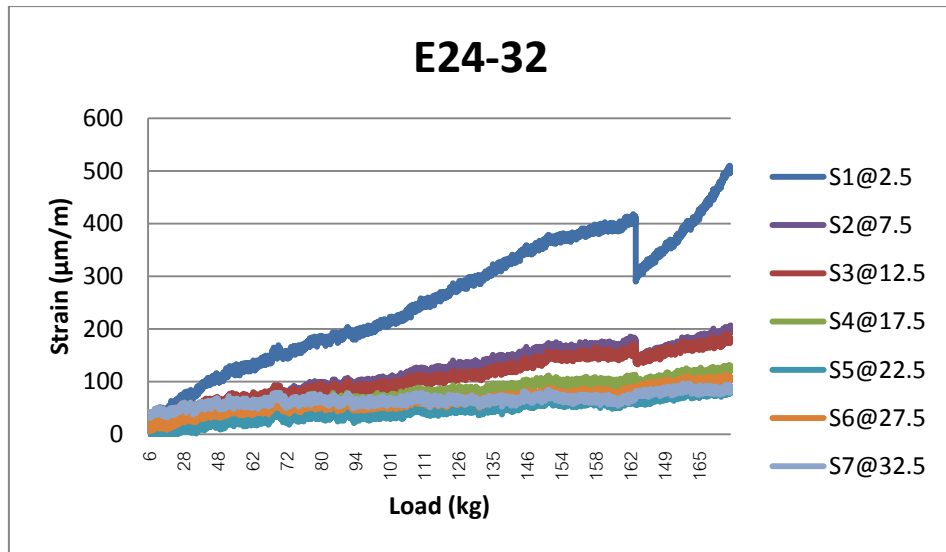


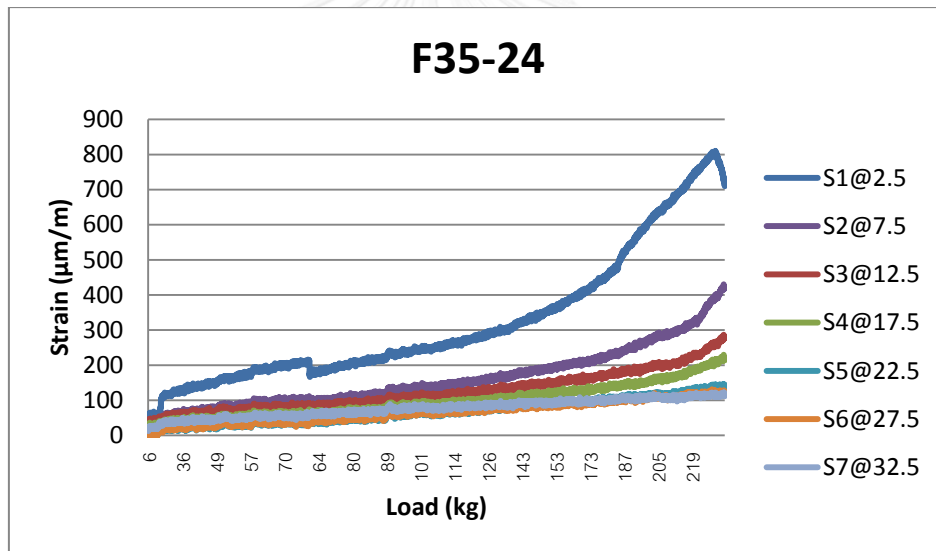
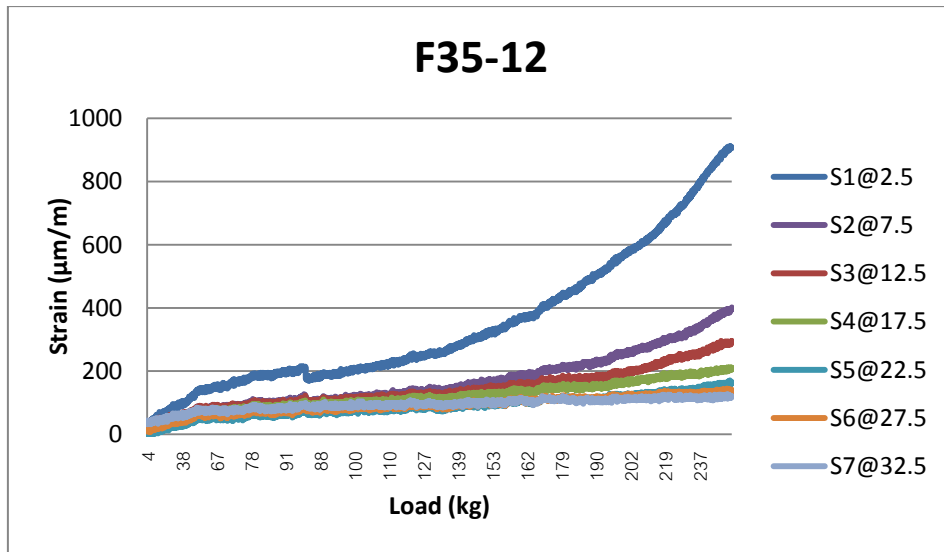


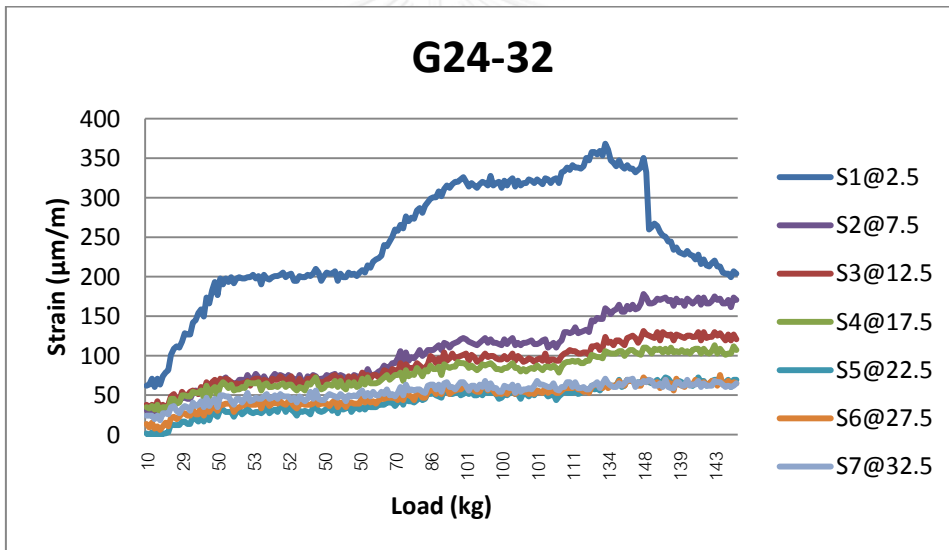
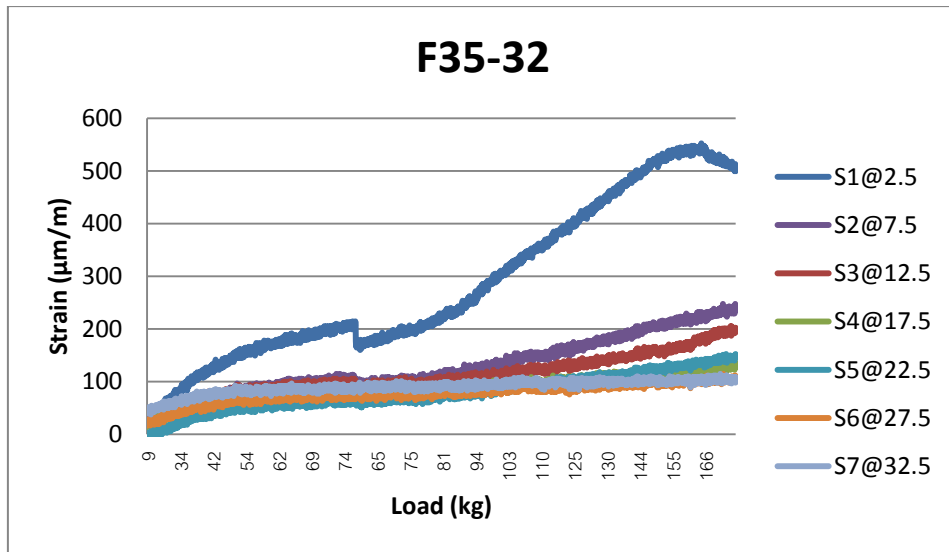


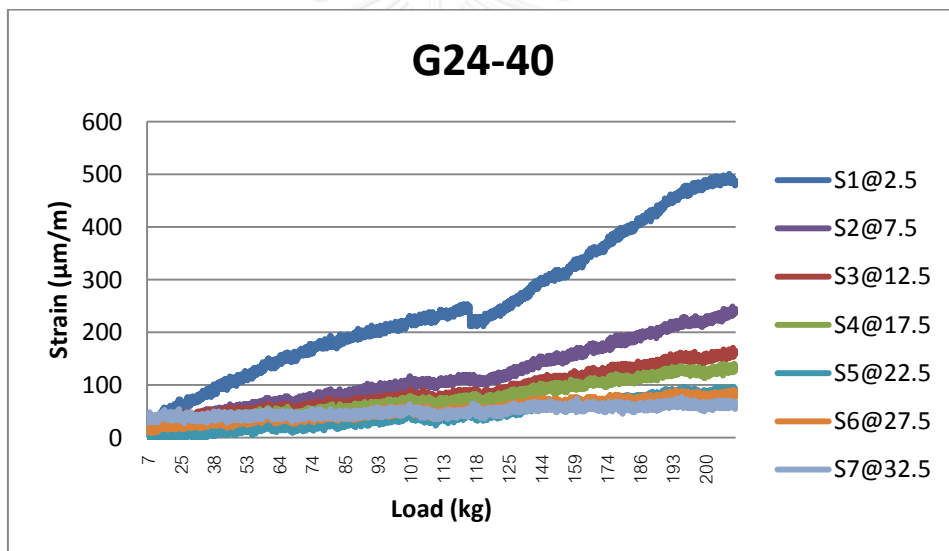
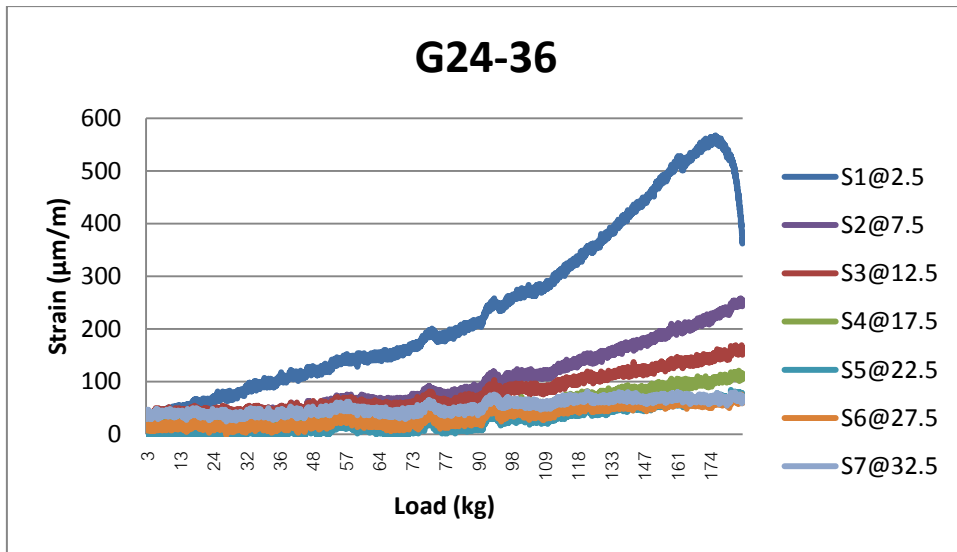


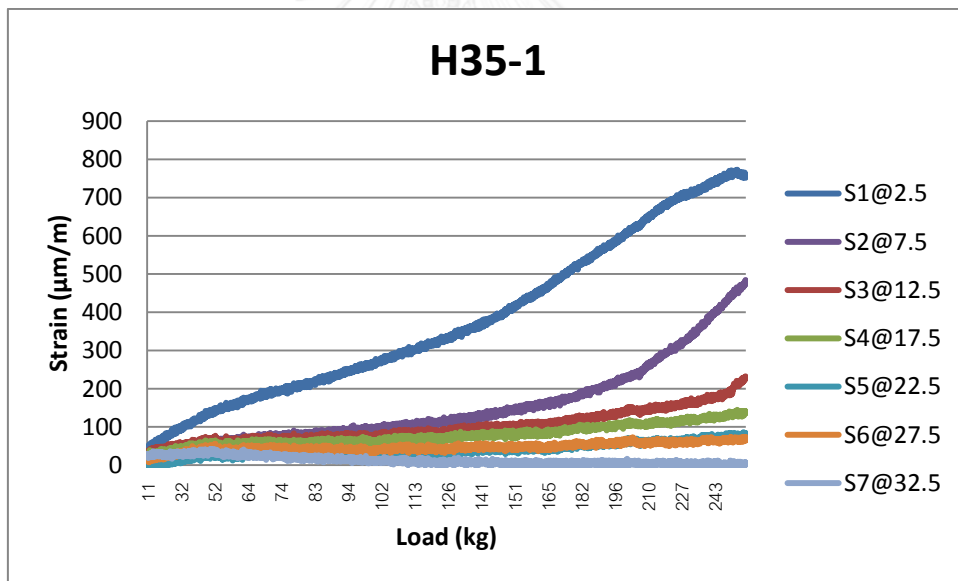
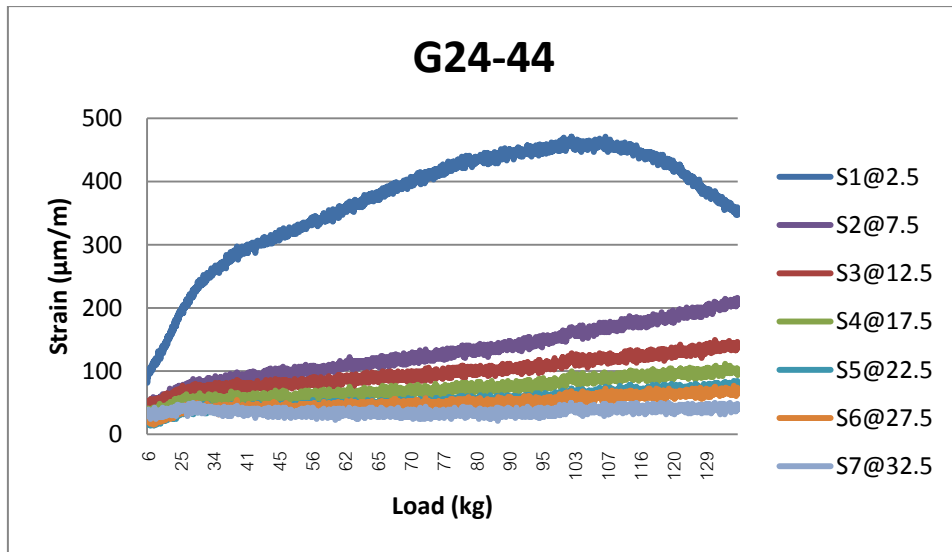








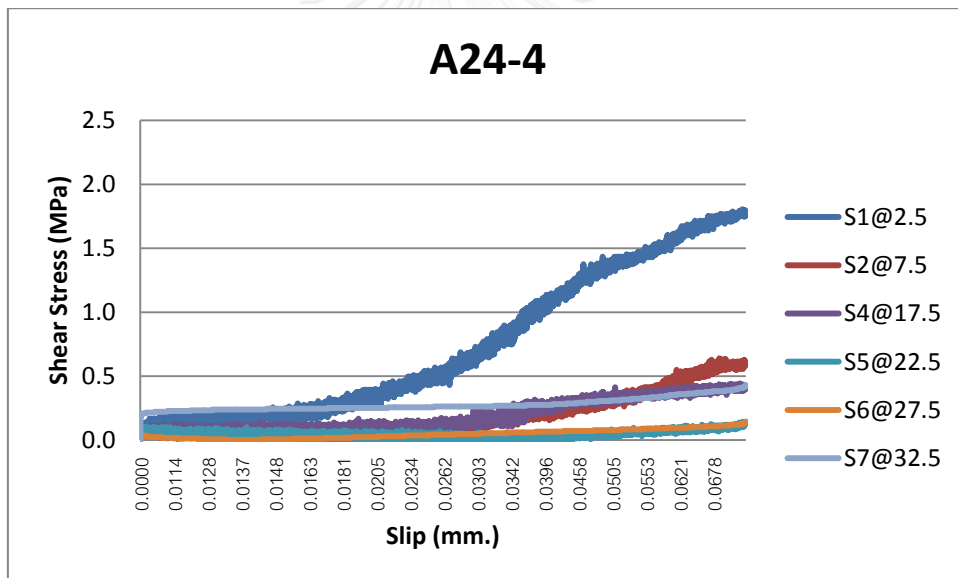
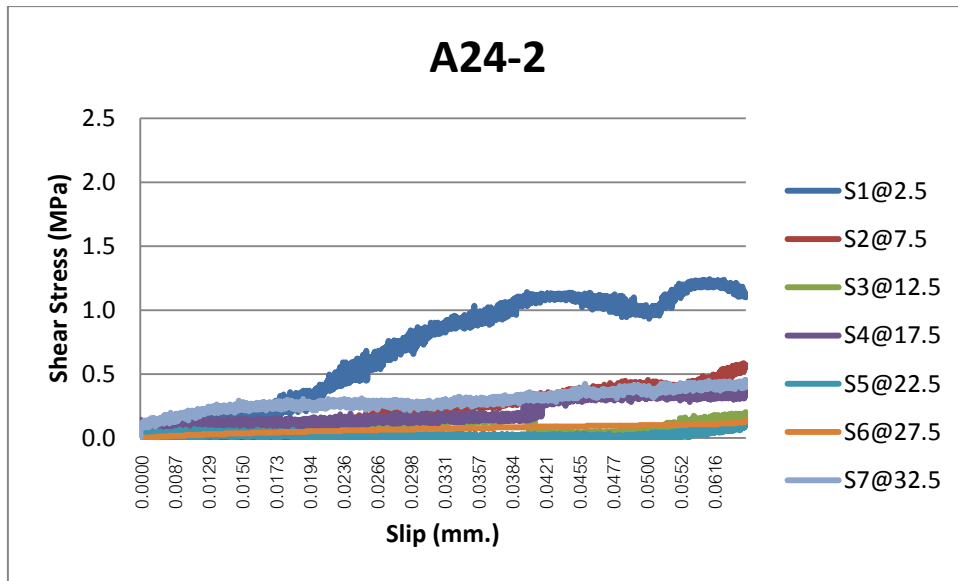


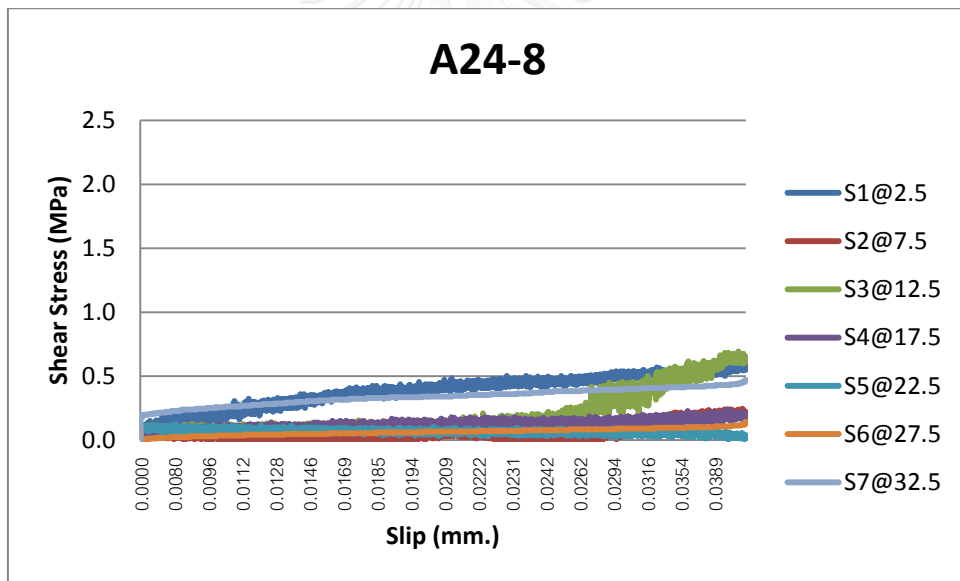
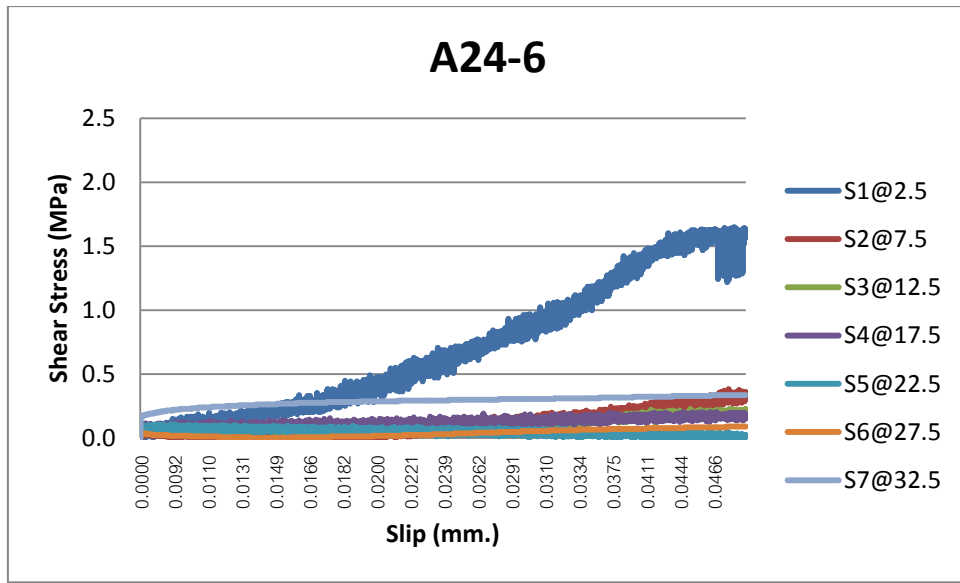


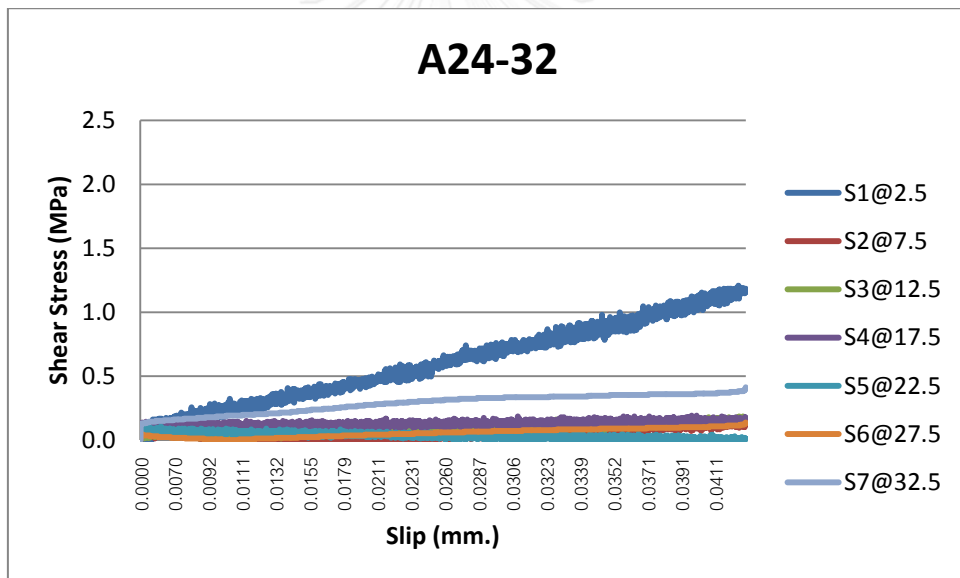
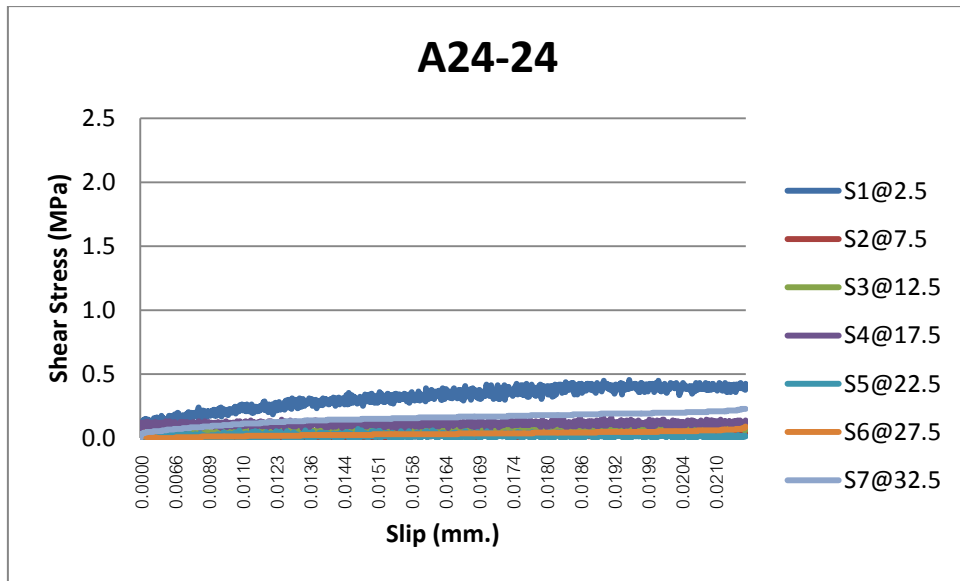
ภาคผนวก ง
Shear Stress-Slip

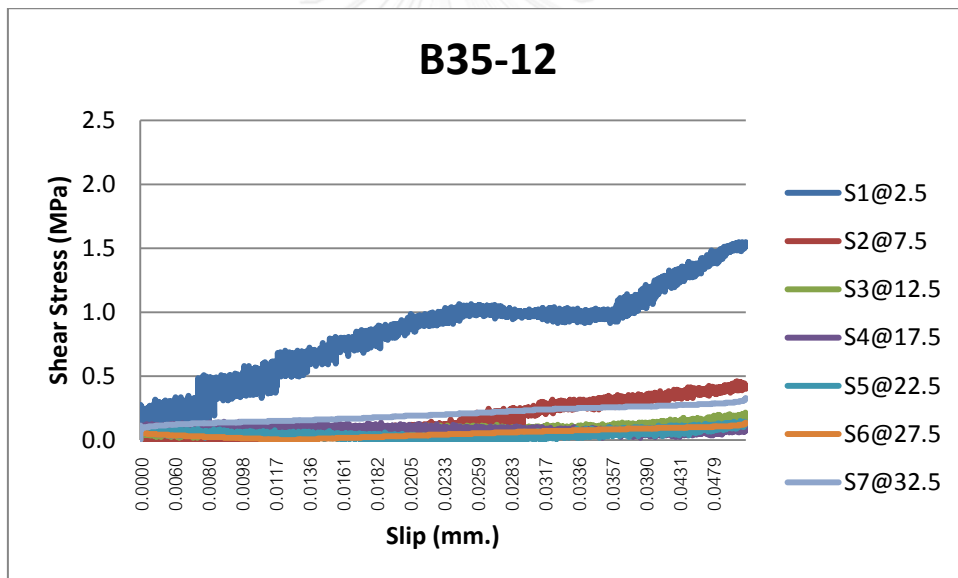
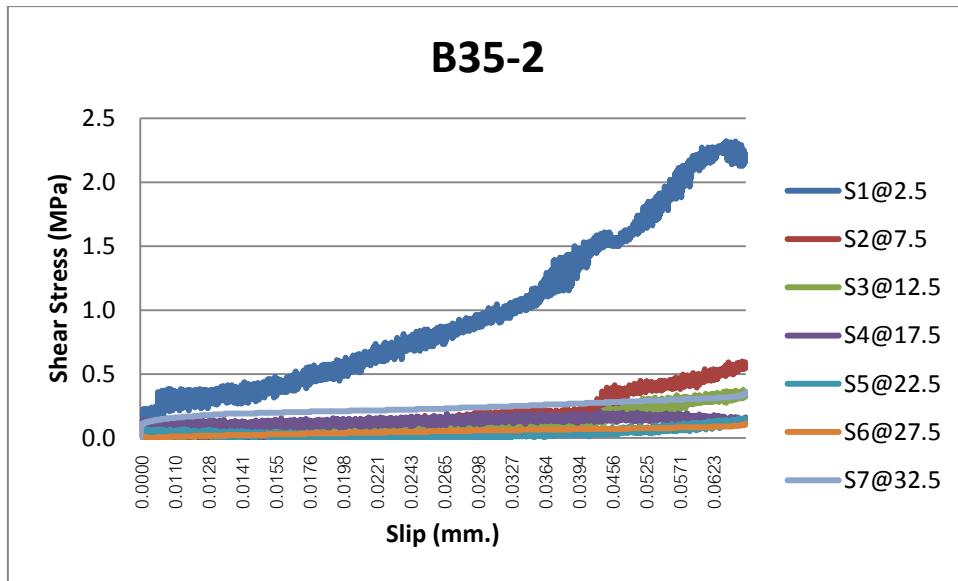


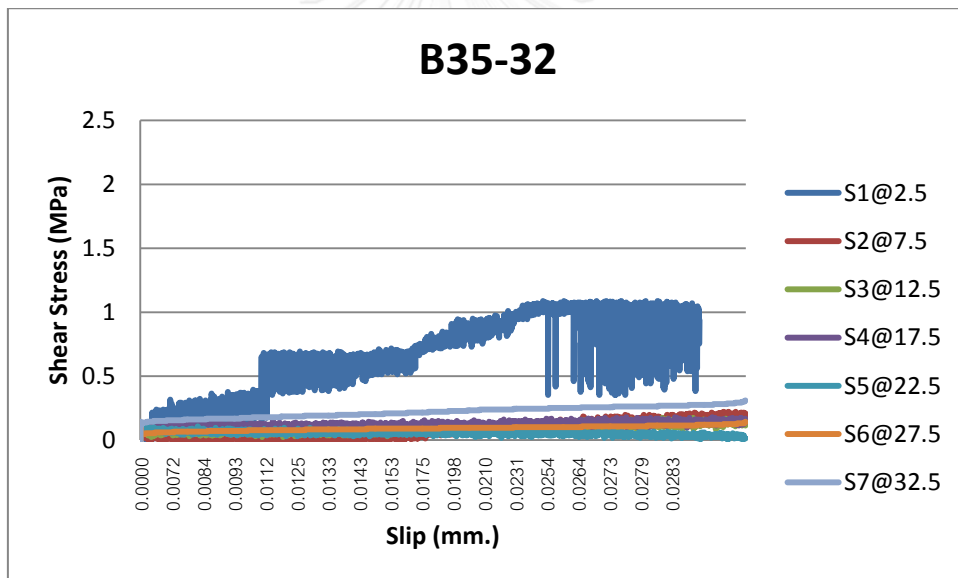
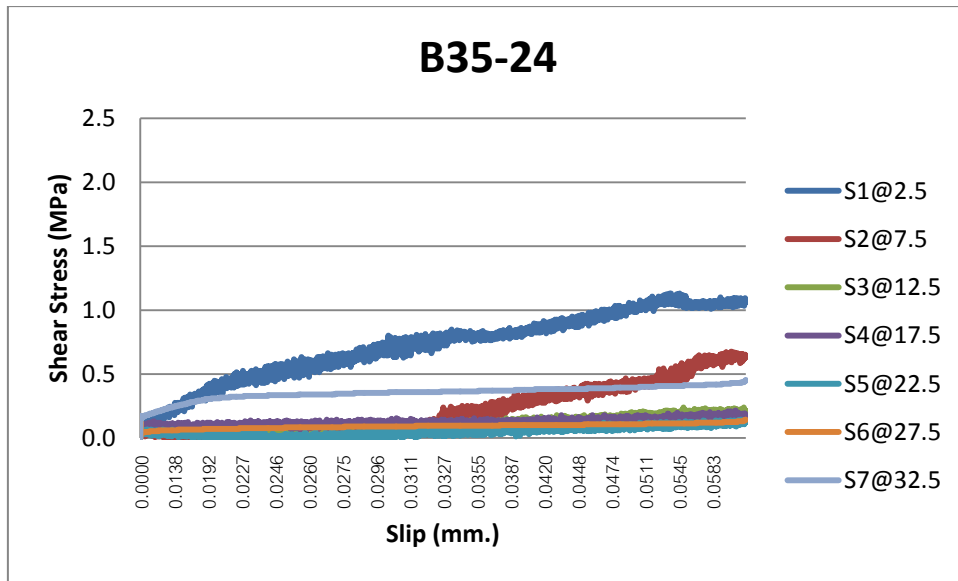
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

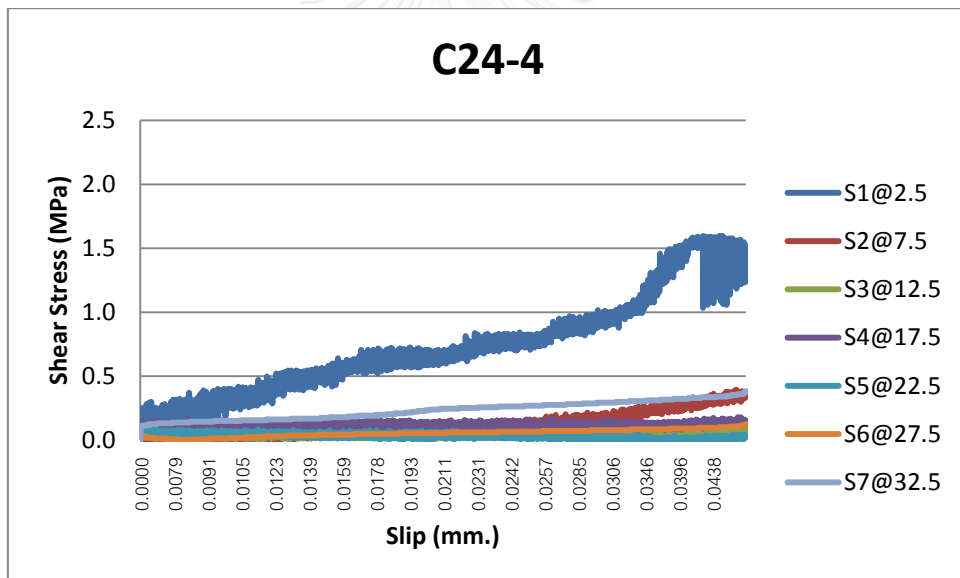
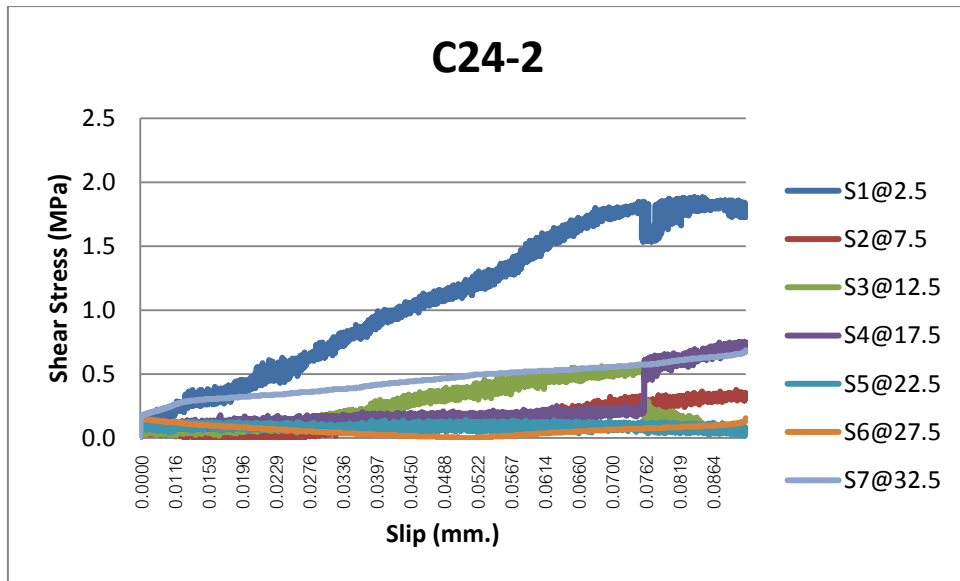


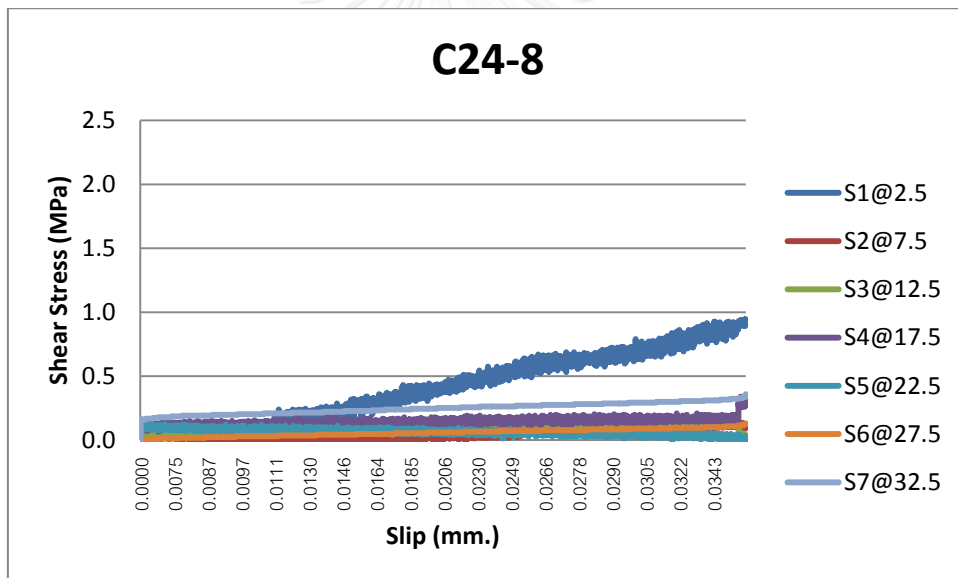
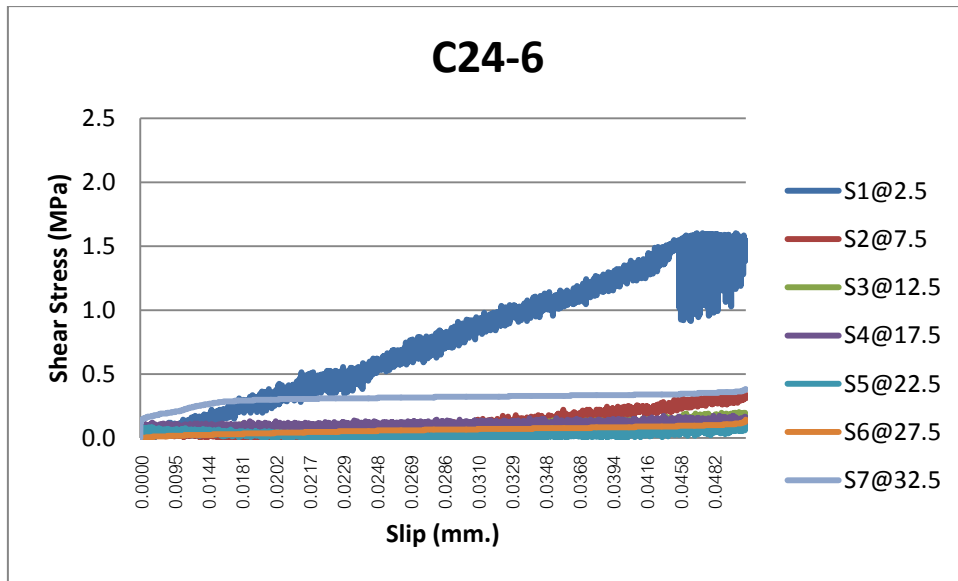


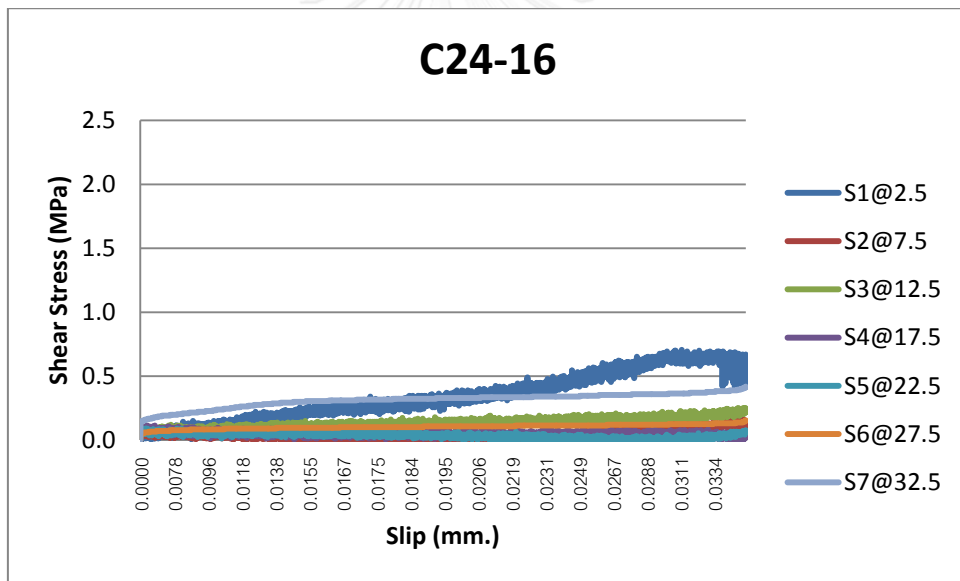
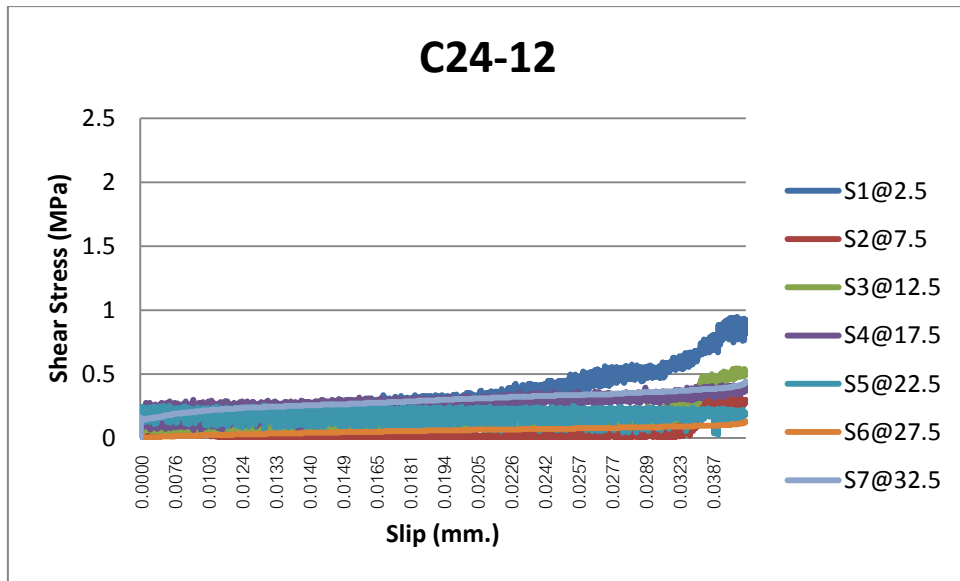


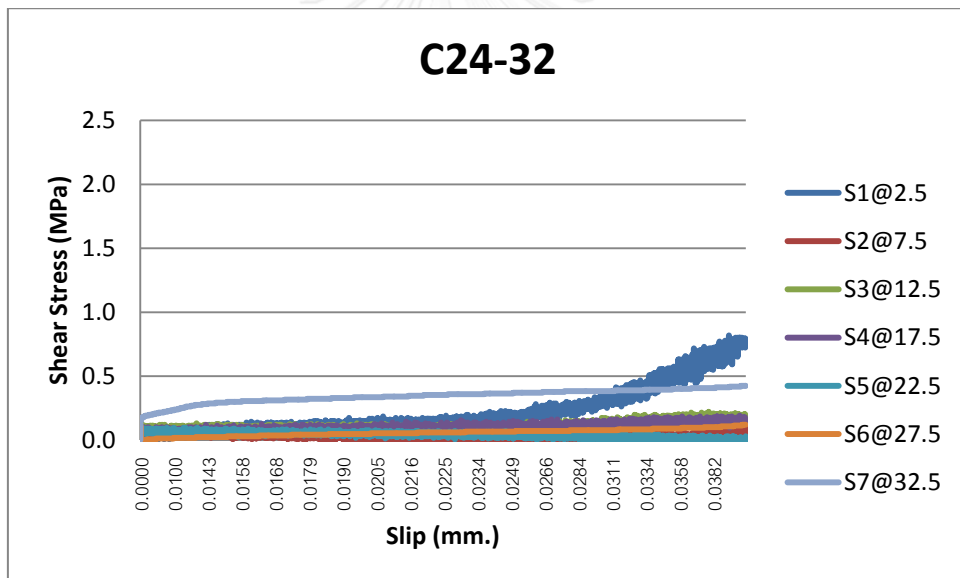
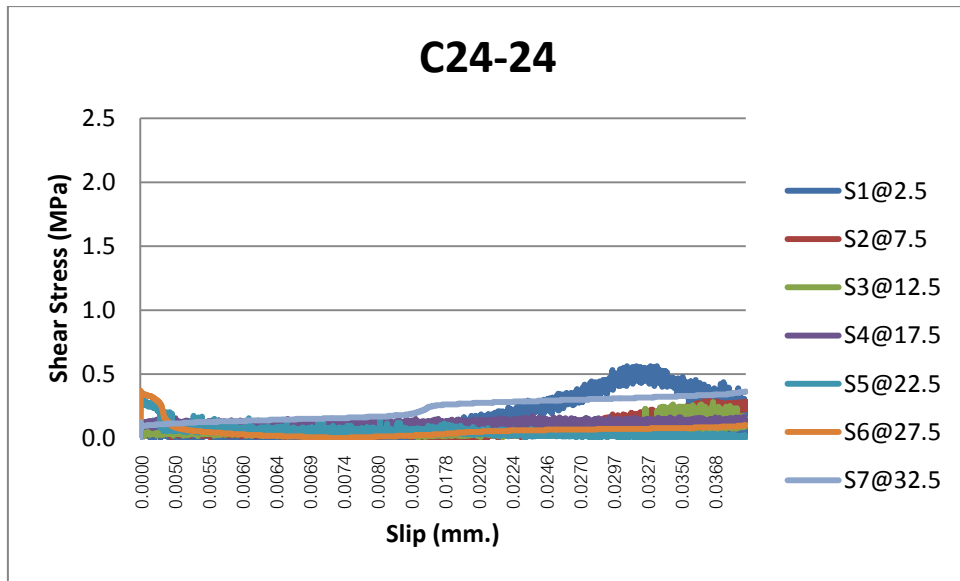


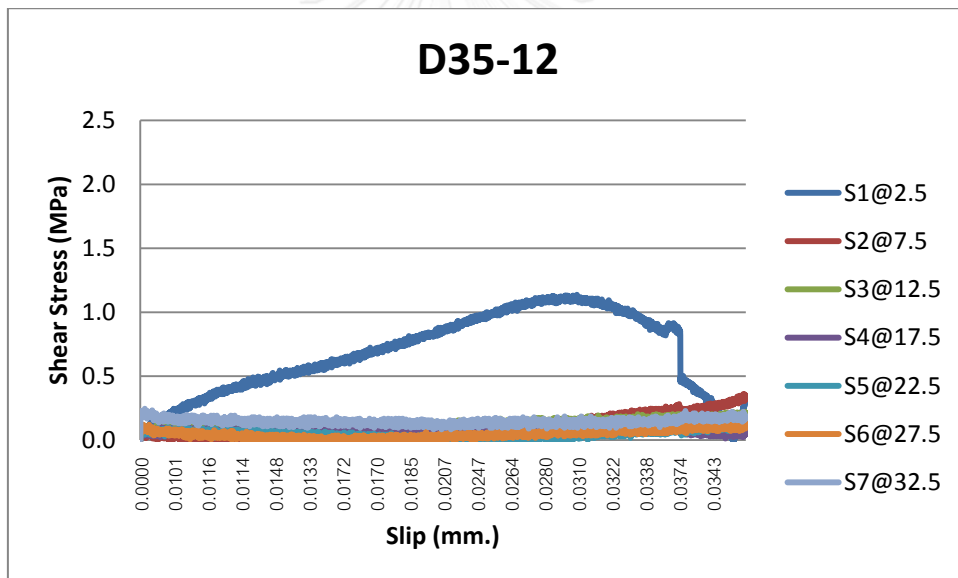
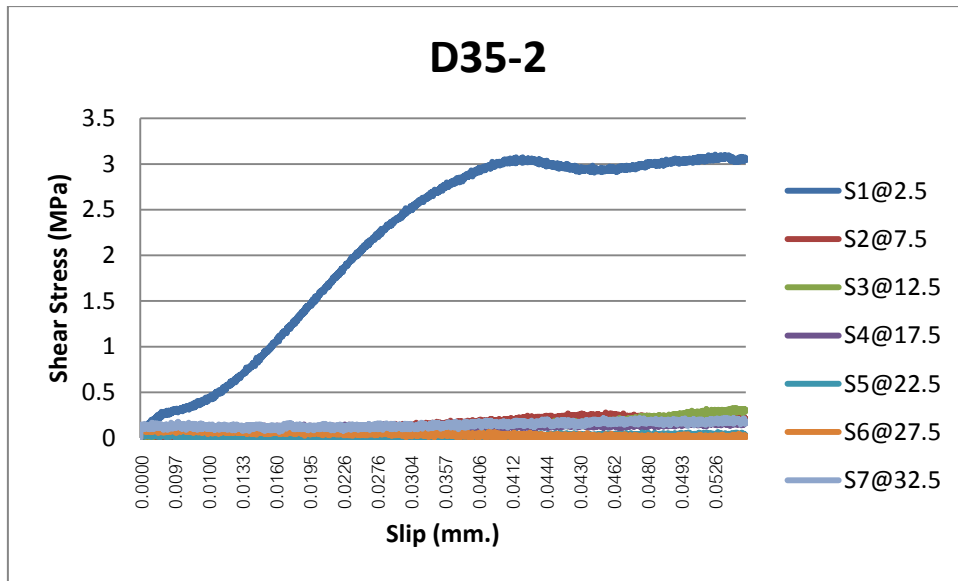


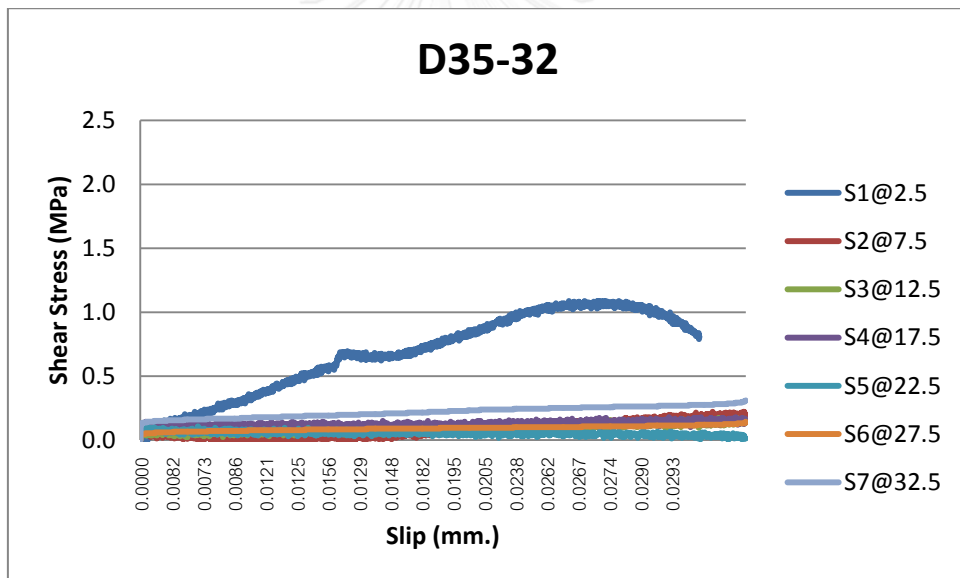
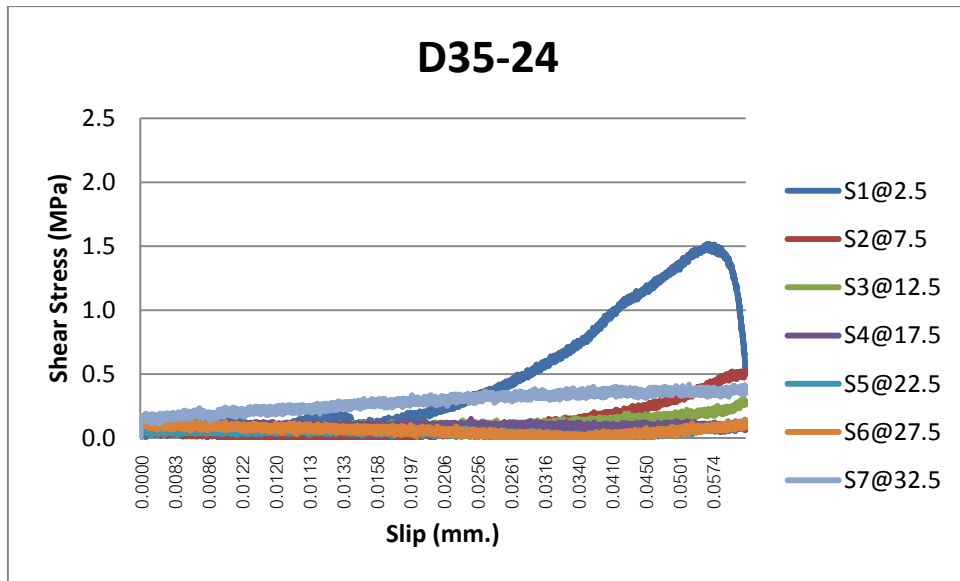


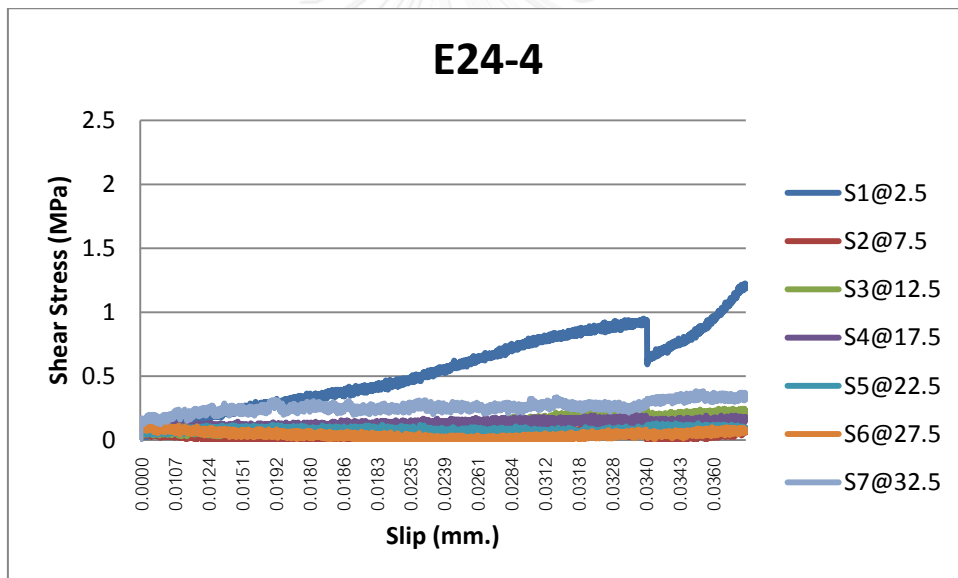
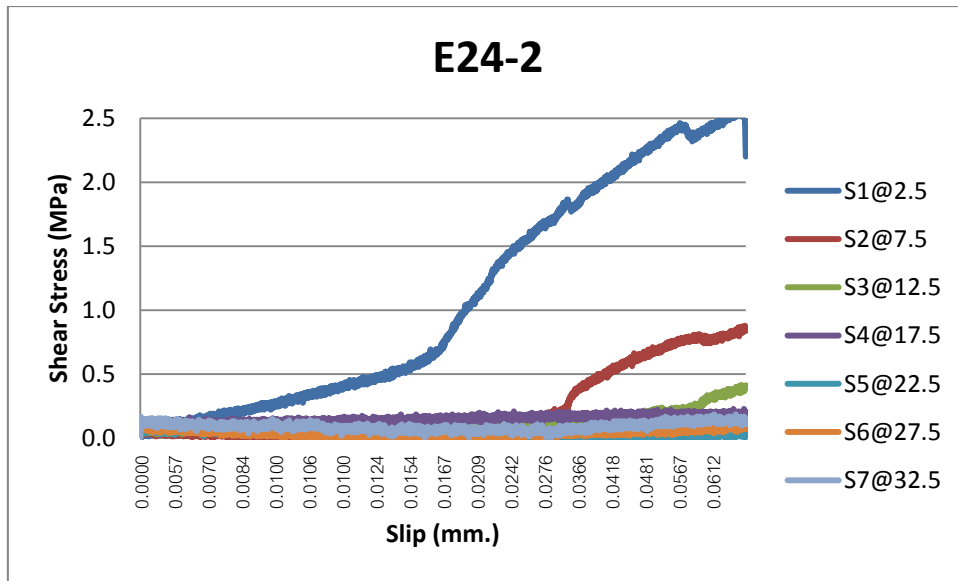


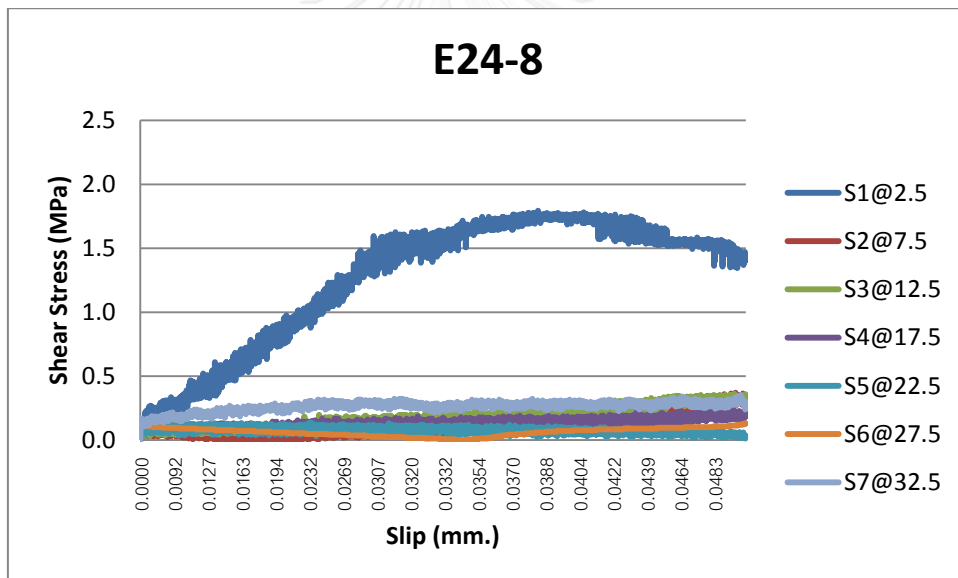
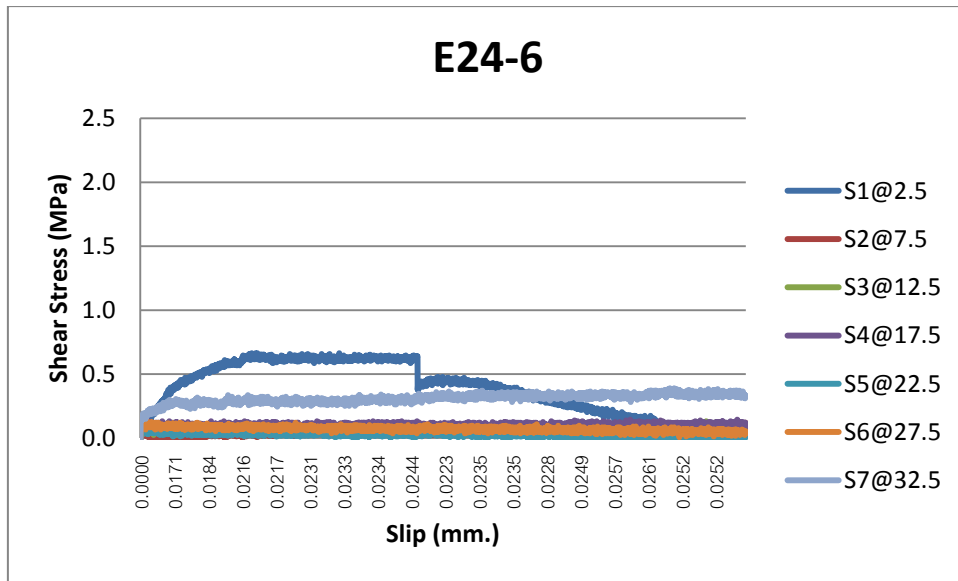


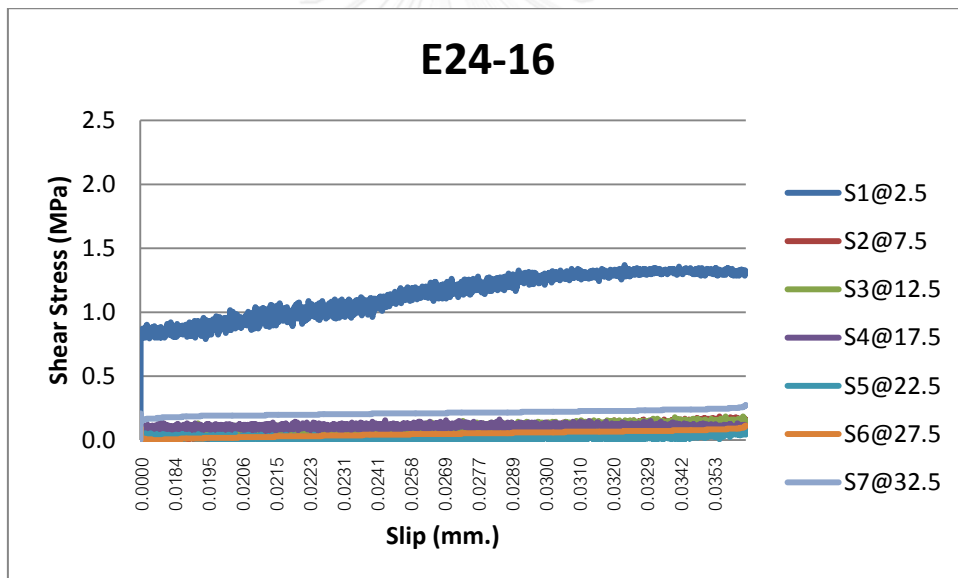
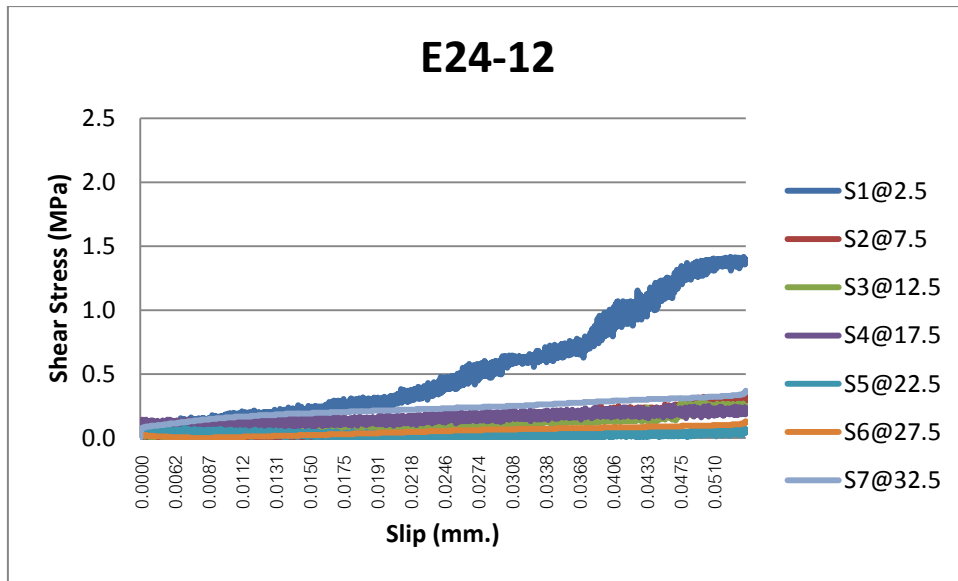


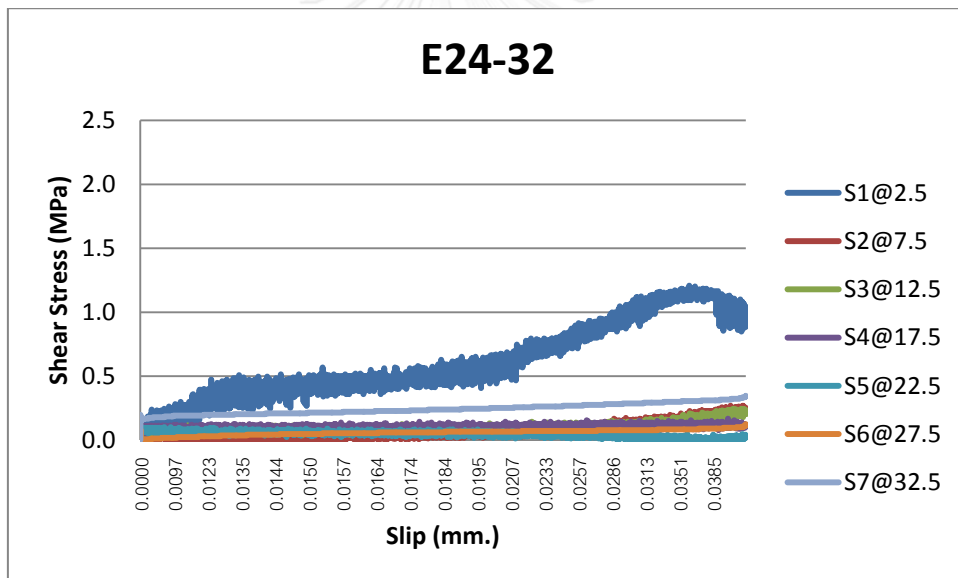
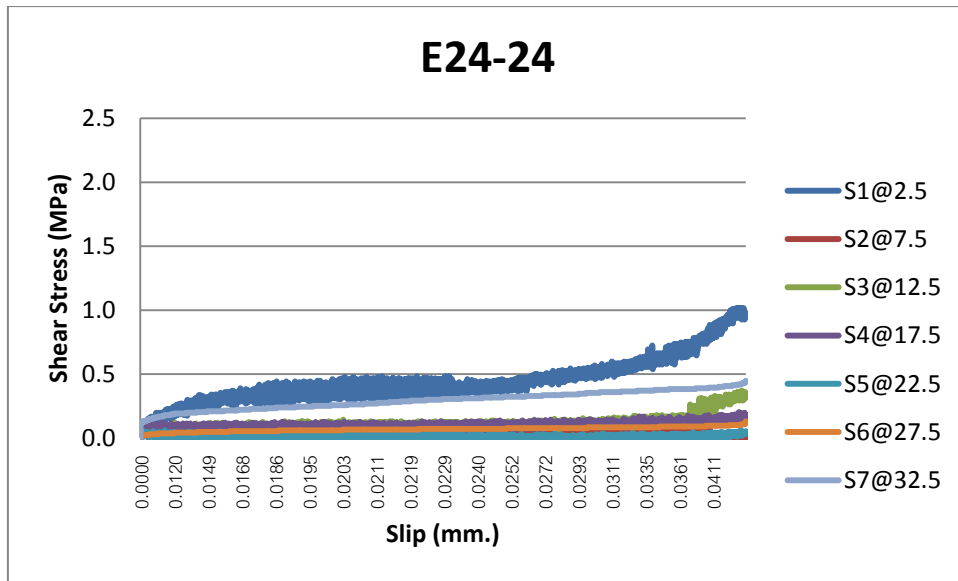


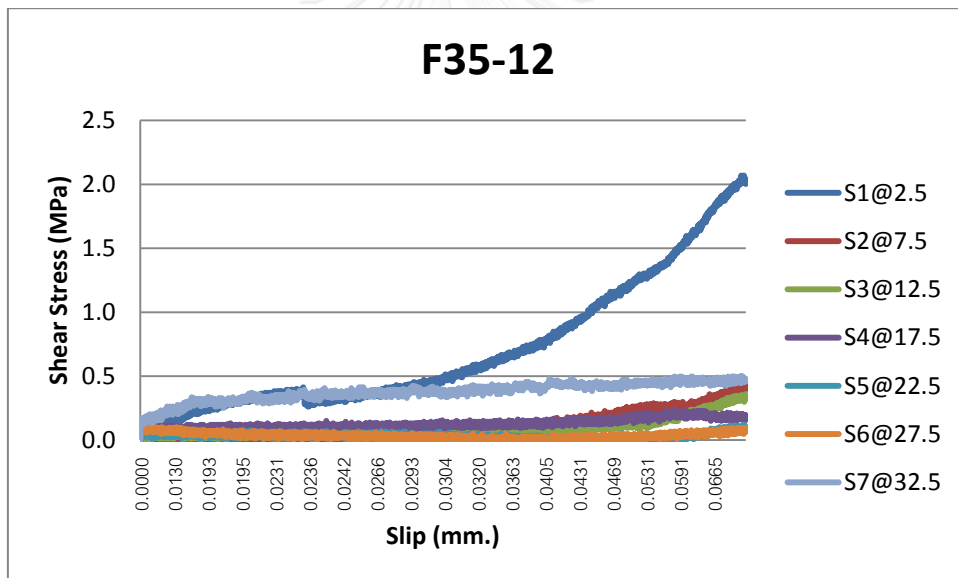
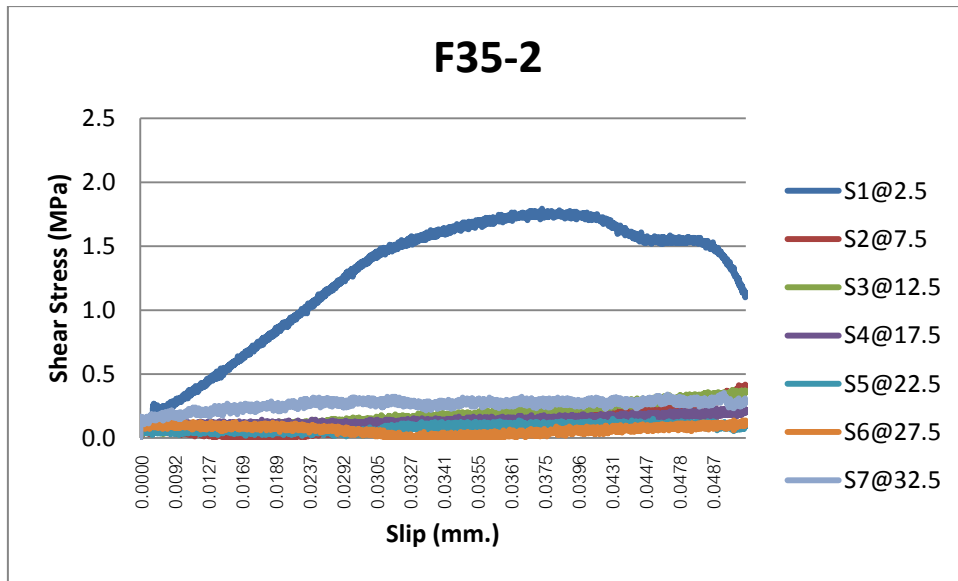


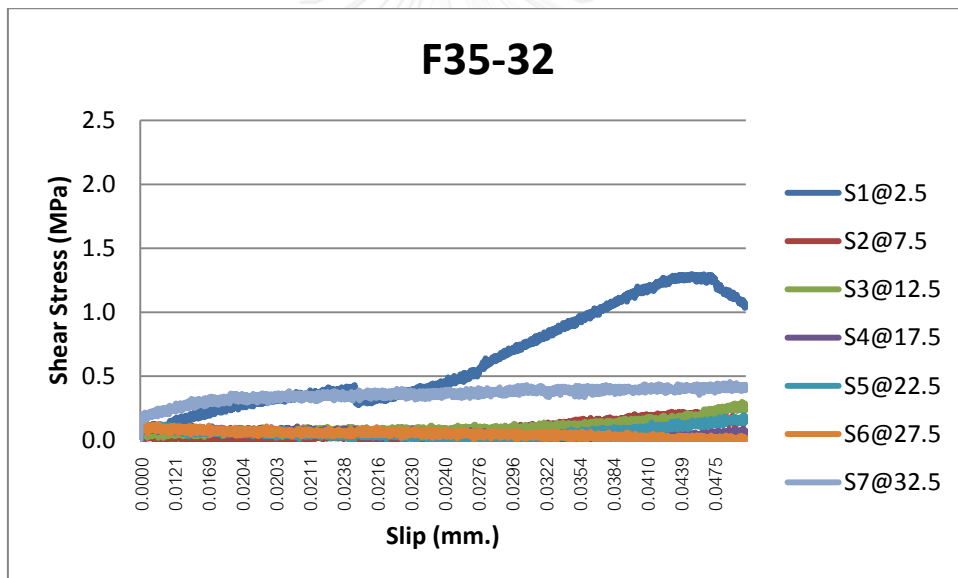
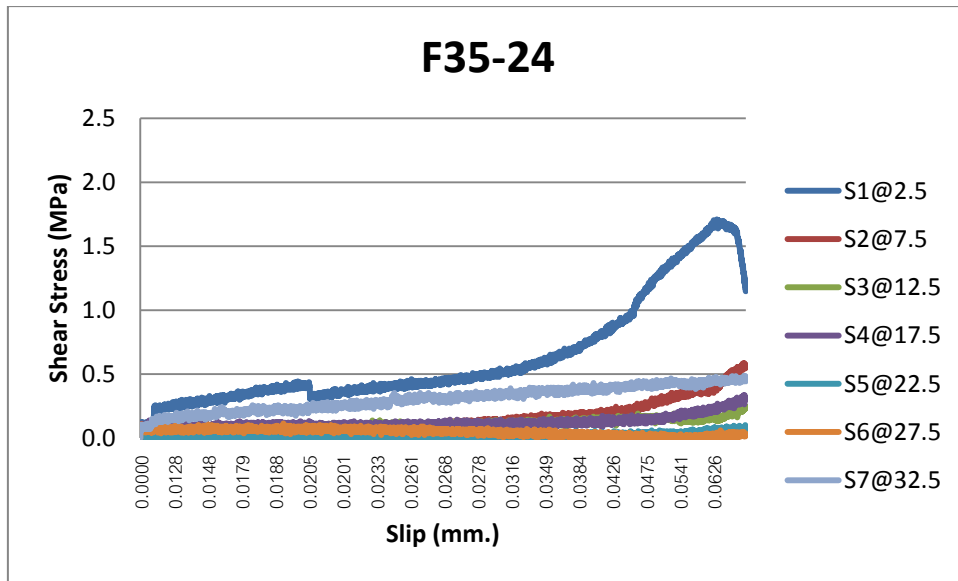


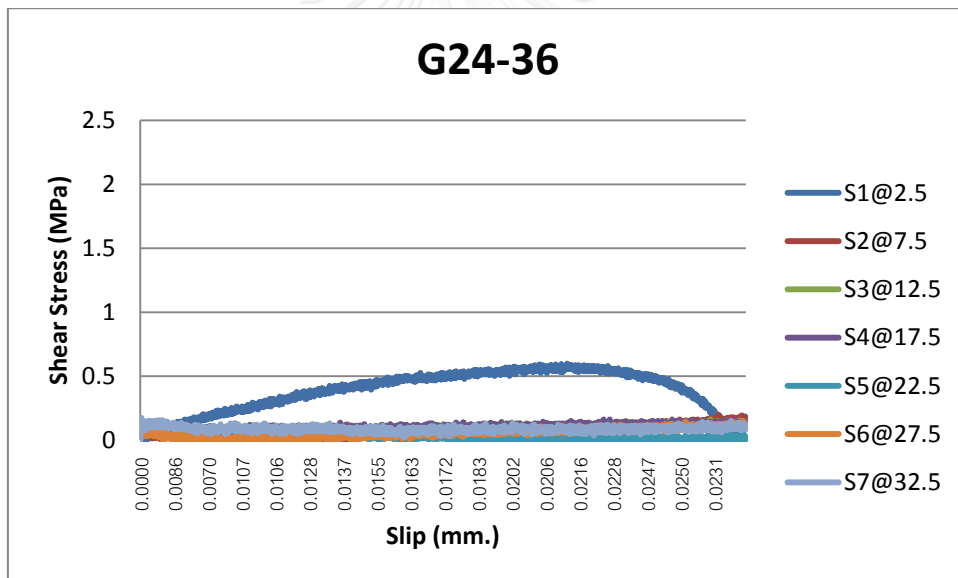
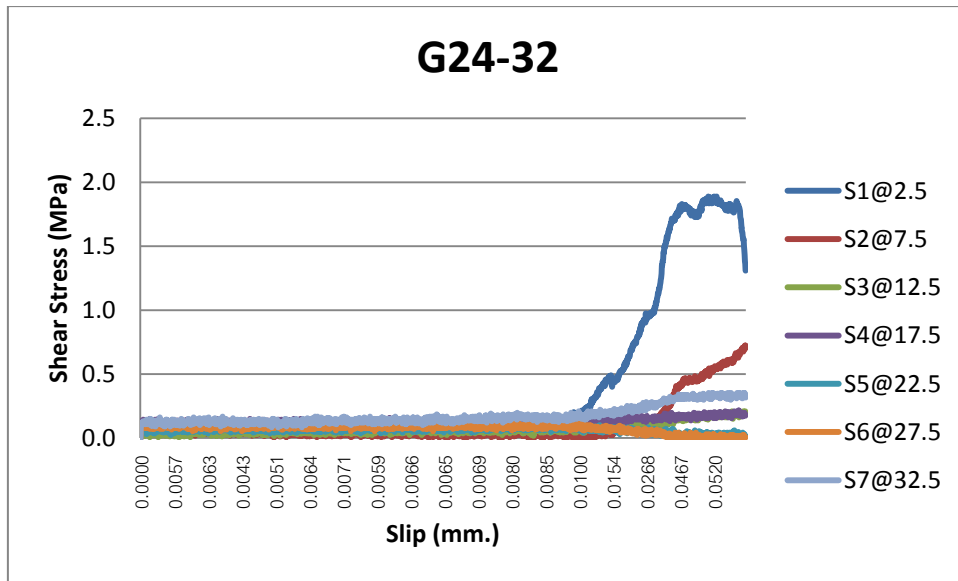


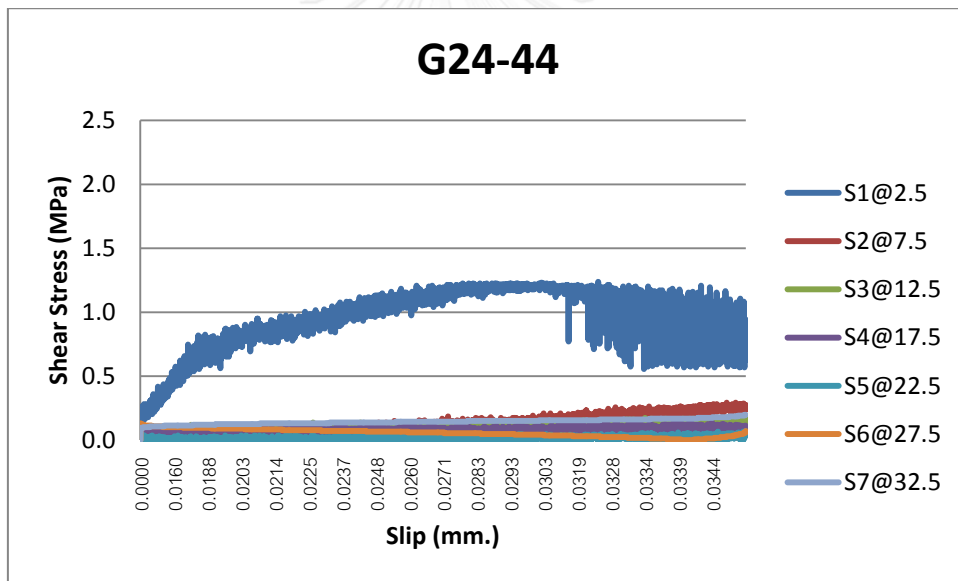
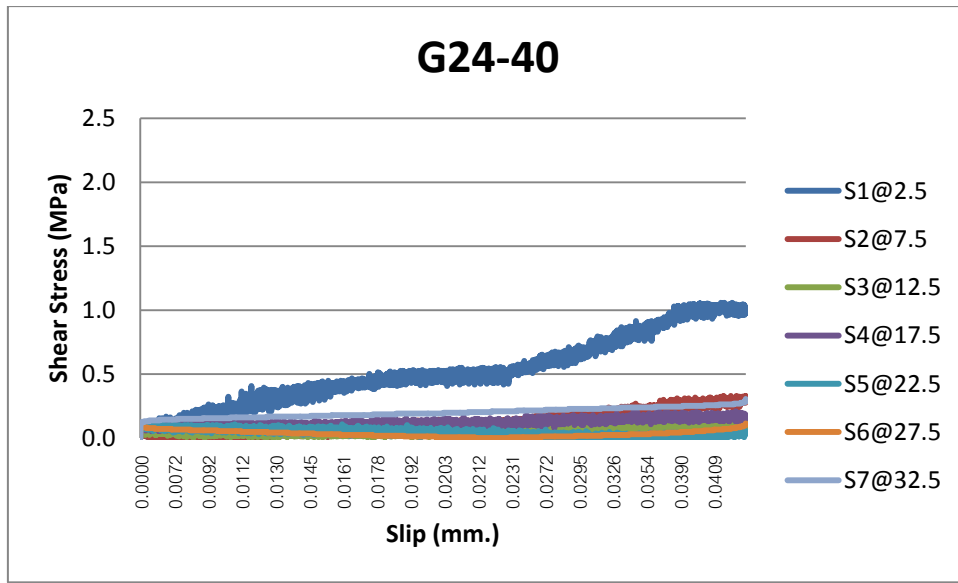


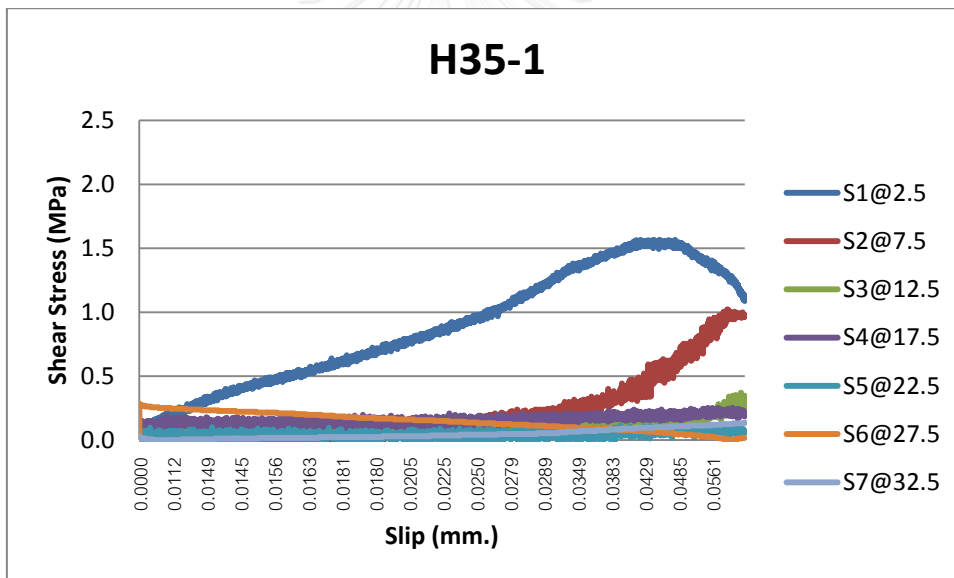
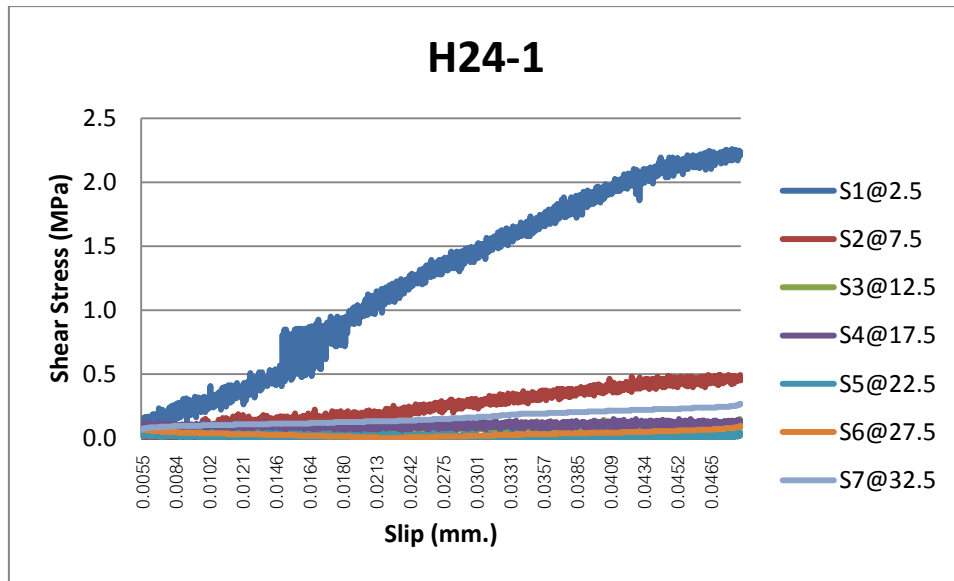












ภาคผนวก จ
ลักษณะการวิบัติที่เกิดขึ้น



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ จ-1 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-2



รูปที่ จ-2 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-4



รูปที่ จ-3 การวัดที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-6



รูปที่ จ-4 การวัดที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-8



รูปที่ จ-5 การวัดที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-12



รูปที่ จ-6 การวัดที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-16



รูปที่ จ-7 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-24



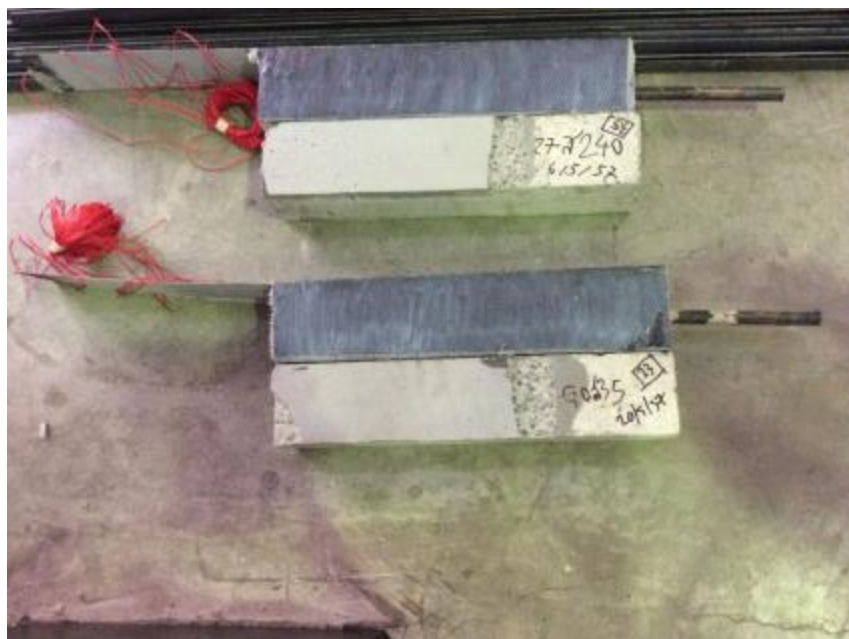
รูปที่ จ-8 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต A24-32



รูปที่ จ-9 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต B35-2



รูปที่ จ-10 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต B35-12



รูปที่ จ-11 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต B35-24



รูปที่ จ-12 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต B35-32



รูปที่ จ-13 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-2



รูปที่ จ-14 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-4



รูปที่ จ-15 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-6



รูปที่ จ-16 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-8



รูปที่ จ-17 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-12



รูปที่ จ-18 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-16



รูปที่ จ-19 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-24



รูปที่ จ-20 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต C24-32



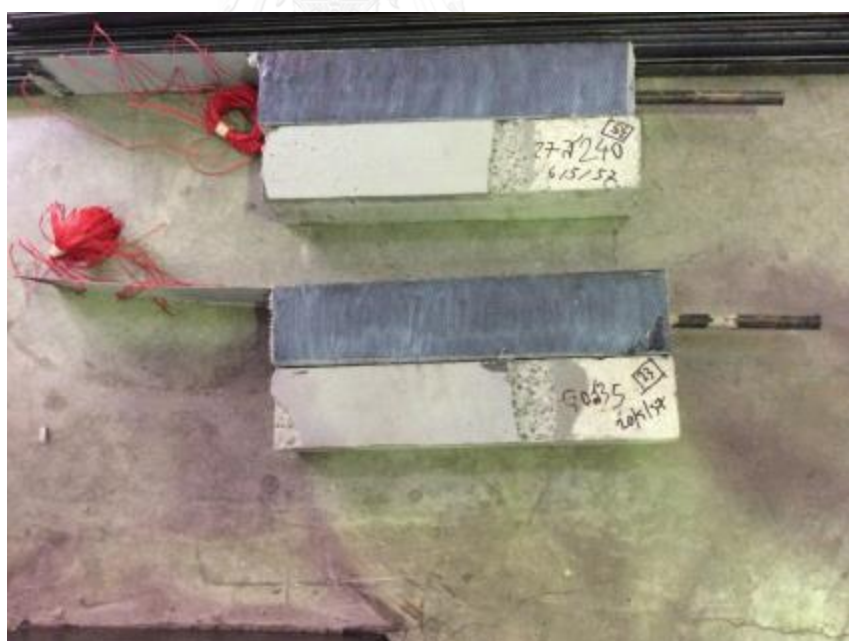
รูปที่ จ-21 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต D35-2



รูปที่ จ-22 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต D35-12



รูปที่ จ-22 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต D35-24



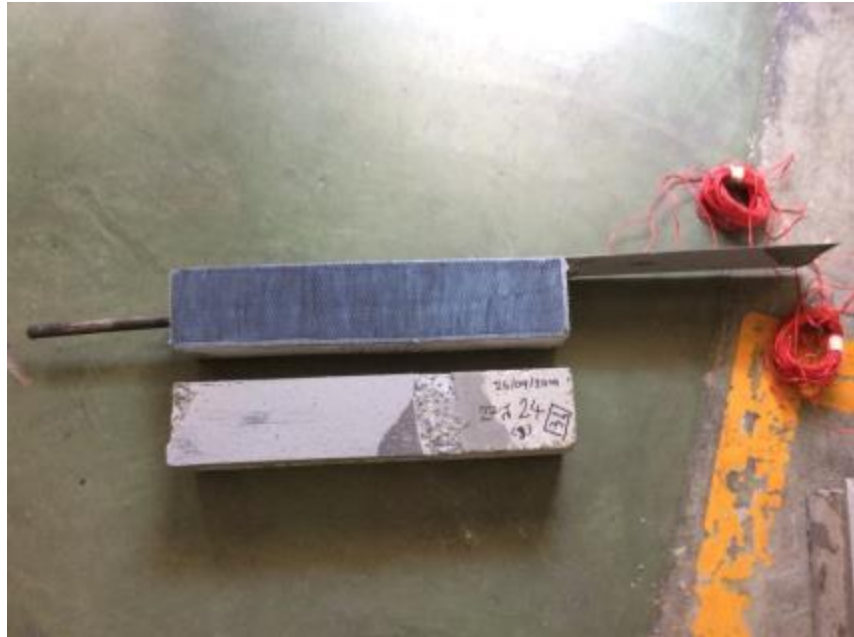
รูปที่ จ-23 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต D35-32



รูปที่ จ-24 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-2



รูปที่ จ-25 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-4



รูปที่ จ-26 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-6



รูปที่ จ-27 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-8



รูปที่ จ-28 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-12



รูปที่ จ-29 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-16



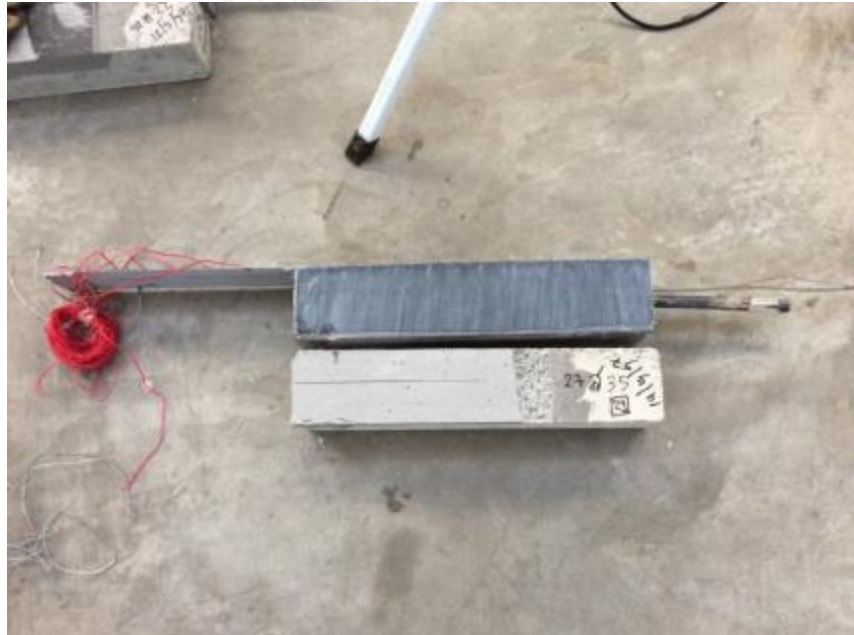
รูปที่ จ-30 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-24



รูปที่ จ-31 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต E24-32



รูปที่ จ-32 การวัดที่ตัวอย่างคอนกรีต F35-12



รูปที่ จ-33 การวัดที่ตัวอย่างคอนกรีต F35-24



รูปที่ จ-34 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต F35-32



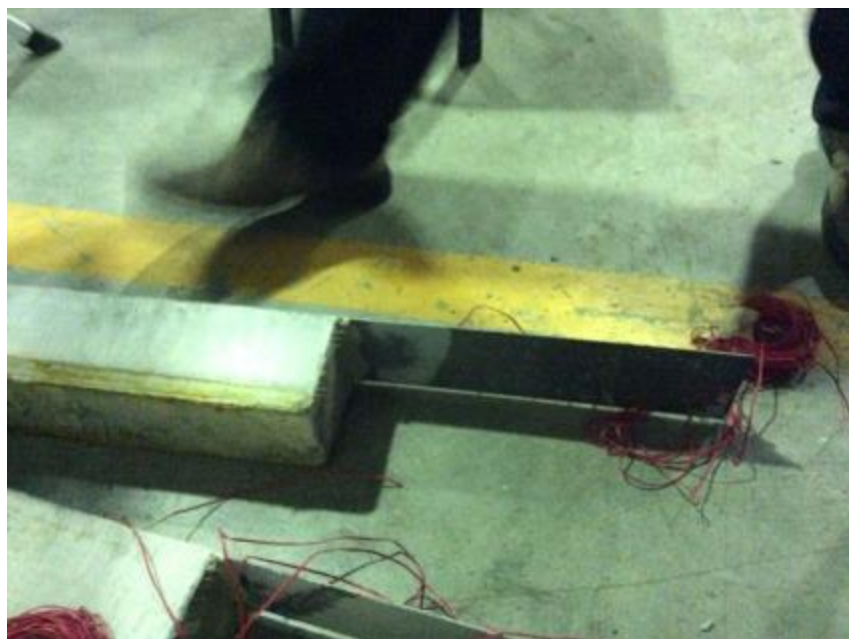
รูปที่ จ-35 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต G24-32



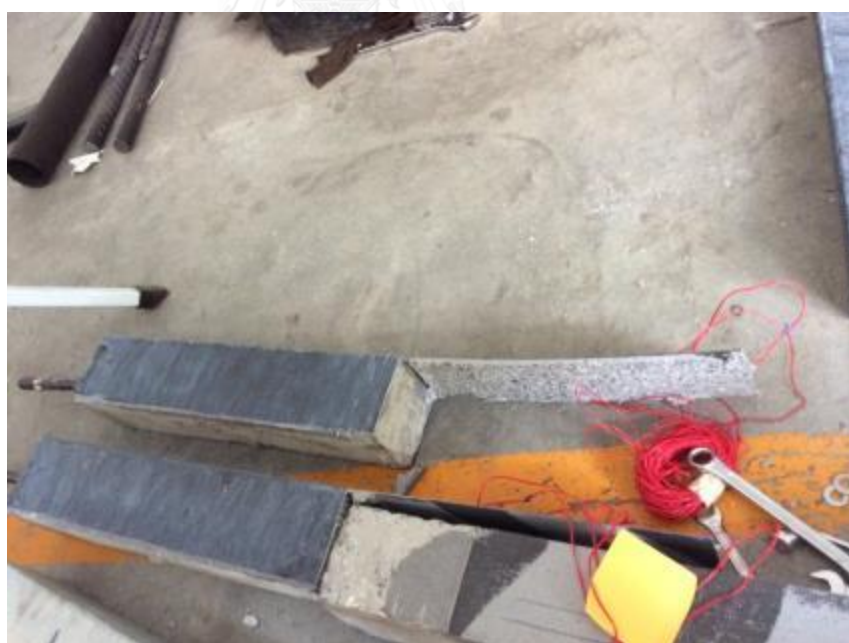
รูปที่ จ-36 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต G24-36



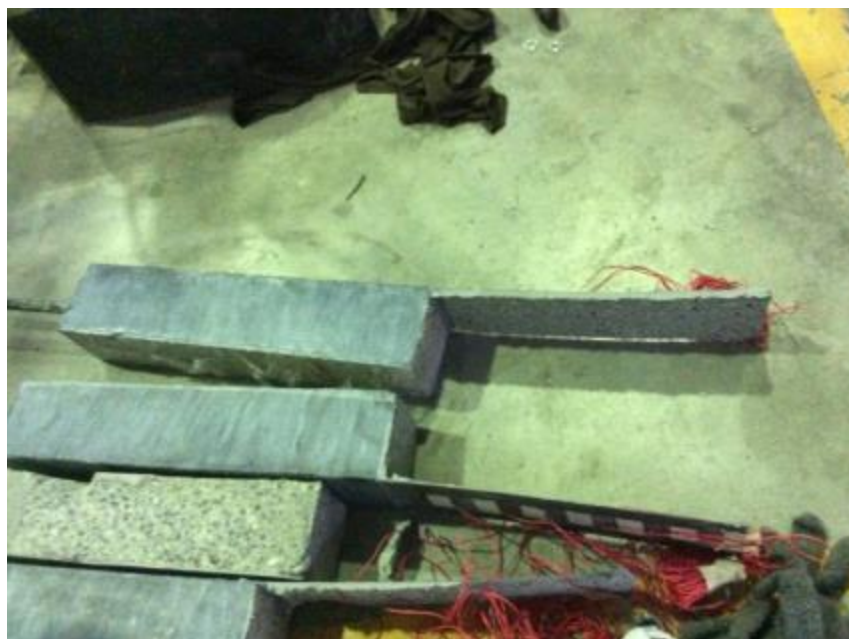
รูปที่ จ-37 การวิบัติที่ตัวอย่างคอนกรีต G24-40



รูปที่ จ-38 การวัดที่ขึ้นตัวอย่าง G24-44



รูปที่ จ-39 การวัดที่ขึ้นตัวอย่าง G24-48



รูปที่ จ-40 การวิบัติที่ขึ้นตัวอย่าง H24-48



รูปที่ จ-41 การวิบัติที่ขึ้นตัวอย่าง I24-48

