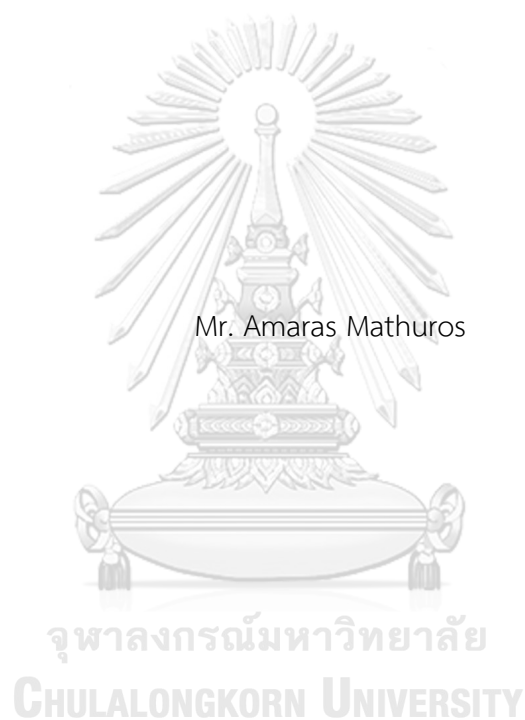


พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต
โดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BOND BEHAVIOR BETWEEN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEET
AND CONCRETE USING CARBON NANOTUBE REINFORCED EPOXY



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Civil Engineering
Department of Civil Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	พฤติกรรมคาร์ยิตเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตโดยใช้อีพอกซีเสริมฟ่อนานาโนคาร์บอน
โดย	นายอมเรศ มธูรส
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารีย์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ)	

อมเรศ มธูรส : พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตโดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน. (

BOND BEHAVIOR BETWEEN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEET AND CONCRETE USING CARBON NANOTUBE REINFORCED EPOXY) อ.ที่ปรึกษา

หลัก : ผศ. ดร.พิชชา จงวิวัฒน์สกุล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และคอนกรีตโดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา คือประเภทของท่อนาโนคาร์บอน ประกอบด้วย แบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) และแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 2.00% ของปริมาณอีพอกซี และประเภทของอีพอกซี ประกอบด้วยอีพอกซีชนิดค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร ผลการศึกษาพบว่าพลังงานการต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 51.11% และ 56.47% ตามลำดับ เมื่อใช้ SWCNTs ที่ 1.00% ของปริมาณอีพอกซีในอีพอกซีค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามการใช้ SWCNTs และ MWCNTs เสริมอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร มีแนวโน้มให้พลังงานการต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด รวมถึงค่าการเลื่อนไถลสูงสุดที่ลดลง สำหรับรูปแบบการหลุดลอกโดยส่วนใหญ่มีการแยกตัวที่วัสดุประสานและคอนกรีต ทั้งนี้การใช้อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร โดยการใช้อีพอกซีเสริม SWCNTs ที่ปริมาณ 0.25% ของปริมาณอีพอกซี มีการหลุดลอกจากการสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน และการใช้ MWCNTs 0.25% ของปริมาณอีพอกซีมีการหลุดลอกจากการแตกหักของคอนกรีต จากการตรวจสอบการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซีและการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับ CFRP ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่าให้ผลสอดคล้องกับผลของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด โดยผลของชุดทดสอบที่มีหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูง มีลักษณะการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีที่ดีและช่องว่างของอีพอกซีน้อย จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของอีพอกซี

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ลายมือชื่อนิสิต

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970468821 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Bond behavior, Carbon fiber reinforced polymer, Carbon nanotube,
Concrete, Epoxy

Amaras Mathuros :

BOND BEHAVIOR BETWEEN CARBON FIBER REINFORCED POLYMER SHEET A
ND CONCRETE USING CARBON NANOTUBE REINFORCED EPOXY. Advisor:

Asst. Prof. Pitcha Jongvivatsakul, Ph.D.

This research aims to study the bond behavior between carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and concrete using epoxy reinforced by carbon nanotubes (CNTs). Specimens containing CFRP, concrete, and epoxy with varying types and weights of CNTs were subjected to the single shear pushing tests. Single-walled carbon nanotubes (SWCNTs) and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) with weight fractions of 0.25, 0.50, 1.00 and 2.00% are employed for preparation of CNT modified epoxy and types of epoxy are epoxy with densities of 1.30 and 1.65 kg/liter. The results show that interfacial fracture energy and ultimate bond stress increased 51.11% and 56.47% respectively when 1.00% of SWCNTs was added to 1.30-kg/liter epoxy. However, the addition of SWCNTs and MWCNTs in 1.65-kg/liter epoxy reduced the interfacial fracture energy, ultimate bond stress, and ultimate slip. By observing the failure mode of specimens, most specimens failed by the adhesive and concrete separation. However, the failure modes were shifted to an adhesion decohesion and concrete substrate fracture when 1.65-kg/liter epoxy was reinforced by 0.25% of SWCNTs and MWCNTs. In addition, microstructures of epoxy were studied using scanning electron microscope. It is observed that, for specimens having high ultimate bond stress, there are relatively less void in epoxy. This result shows the efficiency of the CNTs to improve epoxy properties.

Field of Study: Civil Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชชา จองวิวัฒน์สกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ เสนอแนวทาง ให้คำแนะนำตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.วิฑิต ปานสุข รองศาสตราจารย์ ดร.อัศววัชร เล่นวารี และรองศาสตราจารย์ ดร.บุรฉัตร ฉัตรวีระ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และข้อเสนอแนะในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ที่ให้คำแนะนำในการเขียนรายงานการวิจัย ตลอดจน นายชนะชัย ทองโถม นายทศพร ประเสริฐศรี นายคิมเส็ง คี และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วง ขอขอบพระคุณ บริษัท ชิก้า (ประเทศไทย) จำกัด และบริษัท รีโทรฟิท สตาร์คเจอร์ สเปนเซียลลิสต์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนและติดตั้งวัสดุในงานวิจัย สุดท้ายนี้กำลังใจที่สำคัญที่สุด ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่ให้ความอุปการะ สนับสนุนในการศึกษา และคอยให้กำลังใจที่ดีแก่ข้าพเจ้าเสมอมา จนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

อมเรศ มธุรส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 แผนการดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 พฤติกรรมการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต	5
2.1.1 บทนำ	5
2.1.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต	6
2.2 อีพอกซีและท่อคาร์บอน	10
2.2.1 อีพอกซี (Epoxy).....	10
2.2.2 ท่อคาร์บอน (Carbon nanotubes, CNTs).....	10
2.2.3 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอีพอกซีเสริมท่อคาร์บอน	11
2.3 การทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต.....	16

2.3.1	ประเภทของการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล.....	16
2.3.2	ตัวแปรมีผลต่อการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล.....	18
2.4	ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตด้วยอีพอกซีเสริมฟ่อนาโนคาร์บอน	19
2.4.1	ผลกระทบของประเภทเส้นใย	20
2.4.2	ผลกระทบของประเภทอีพอกซี.....	21
2.4.3	ผลกระทบของความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	23
2.4.4	ผลกระทบของความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	24
2.5	ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต.....	26
2.5.1	สมการของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต	26
2.5.2	พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต	29
2.5.3	สมการประยุกต์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต.....	31
บทที่ 3	ระเบียบวิธีวิจัย.....	33
3.1	วัสดุและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	34
3.1.1	วัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย.....	34
3.1.2	การหล่อคอนกรีตตัวอย่าง.....	36
3.1.3	การผสมสารระหว่างอีพอกซีและฟ่อนาโนคาร์บอน	39
3.1.4	การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge).....	40
3.2	การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test).....	44
3.3	ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	45

3.3.1 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน	45
3.3.2 ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน	45
3.3.3 ประเภทของอีพอกซี	45
3.4 ชุดทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)	46
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย	47
4.1 แรงกระทำสูงสุดจากการทดสอบ.....	47
4.1.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนต่อแรงกระทำสูงสุด	54
4.1.2 อิทธิพลของประเภทอีพอกซีต่อแรงกระทำสูงสุด.....	55
4.2 การกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน.....	56
4.2.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่มีต่อความยาวยึดเหนี่ยว ประสิทธิผล	64
4.2.2 อิทธิพลของประเภทของอีพอกซีที่มีต่อความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล	66
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล.....	66
4.3.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนต่อการเลื่อนไถลสูงสุด.....	70
4.3.2 อิทธิพลของประเภทอีพอกซีต่อการเลื่อนไถลสูงสุด	71
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล.....	72
4.4.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด..	78
4.4.2 อิทธิพลของประเภทอีพอกซีต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด	79
4.5 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส.....	80
4.5.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนต่อพลังงานต้านทานการแตกหัก ที่ผิวสัมผัส	82
4.5.2 อิทธิพลของประเภทอีพอกซีต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส	83
4.6 การวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต	84
4.7 การตรวจสอบการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM).....	90

4.7.1 ลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในชั้นอีพอกซี.....	90
4.7.2 ลักษณะการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	93
4.8 การวิเคราะห์อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและประเภทของอีพอกซี ต่อผลการศึกษา.....	96
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	98
บรรณานุกรม.....	100
ภาคผนวก.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	104



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน [7]	11
ตารางที่ 2.2	ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดกับปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและคาร์บอนแบล็ค [9]	14
ตารางที่ 2.3	ค่าโมดูลัสของยังกับปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและคาร์บอนแบล็ค [9]	15
ตารางที่ 2.4	คุณสมบัติทางกลกับค่าความหนาแน่นของอีพอกซี [10]	16
ตารางที่ 2.5	สรุปผลกระทบของประเภทเส้นใย [14]	21
ตารางที่ 2.6	สรุปผลกระทบของประเภทอีพอกซี [14]	22
ตารางที่ 2.7	สรุปผลกระทบของความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]	24
ตารางที่ 2.8	สรุปผลกระทบของความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]	25
ตารางที่ 3.1	ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต	34
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติทางกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	35
ตารางที่ 3.3	คุณสมบัติทางกลของท่อนาโนคาร์บอน	36
ตารางที่ 3.4	คุณสมบัติทางกลของอีพอกซี	36
ตารางที่ 3.5	รายละเอียดชุดทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนเดียว (Single shear pushing test)	46
ตารางที่ 4.1	แรงกระทำสูงสุดจากการทดสอบ	49
ตารางที่ 4.2	ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล	57
ตารางที่ 4.3	การเลื่อนไถลสูงสุด	67
ตารางที่ 4.4	หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด	73
ตารางที่ 4.5	พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส	81
ตารางที่ 4.6	รูปแบบการหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต	85

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [2]	5
รูปที่ 2.2 รูปแบบการหลุดล่อน (Debonding modes) [3].....	6
รูปที่ 2.3 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าวของแรงดัดช่วงภายใน (Intermediate flexural crack induced interfacial debonding, IC debonding) [2].....	8
รูปที่ 2.4 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าววิกฤตในแนวทแยง (Critical diagonal crack, CDC debonding) [2].....	8
รูปที่ 2.5 การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม (Concrete cover separation) [2].....	9
รูปที่ 2.6 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสช่วงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Plate end interfacial debonding) [2].....	10
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน [6].....	10
รูปที่ 2.8 พฤติกรรมเหนียวรั้งการแตกหักของอีพอกซีที่เกิดขึ้นจากการเสริมด้วย พลาสติกไซเซอร์และท่อนาโนคาร์บอน [8].....	12
รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนและคาร์บอนแบล็ค [9] .	13
รูปที่ 2.10 ประเภทการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนียว [11].....	17
รูปที่ 2.11 รายละเอียดชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึง (Pull test) [12].....	18
รูปที่ 2.12 รายละเอียดชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึง (Pull test) [13].....	19
รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [14]	19
รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนียวและการลื่นไถลกับผลกระทบของประเภทเส้นใย [14].....	20
รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนียวและการลื่นไถลกับผลกระทบของประเภทอีพอก ซี [14].....	22

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลกับผลกระทบของความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]	23
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลกับผลกระทบของความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]	25
รูปที่ 2.18 การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวของการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต [15].....	26
รูปที่ 2.19 การเสียรูปและสมมูลในรอยต่อการยึดเหนี่ยว [15].....	27
รูปที่ 2.20 แบบจำลองความสัมพันธ์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต [15].....	30
รูปที่ 2.21 การกระจายความเครียดในคอนกรีตตัวอย่าง (strain distribution) [18]	32
รูปที่ 3.1 ระเบียบวิธีวิจัย	33
รูปที่ 3.2 ลักษณะของท่อคาร์บอนที่ใช้ในการวิจัย	35
รูปที่ 3.3 รายละเอียดชุดทดสอบ (หน่วย มิลลิเมตร)	37
รูปที่ 3.4 การหล่อคอนกรีตตัวอย่างและคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก	37
รูปที่ 3.5 การบ่มคอนกรีตตัวอย่างและคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก	38
รูปที่ 3.6 การทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก	38
รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อคาร์บอน	39
รูปที่ 3.8 อีพอกซี (ส่วนประกอบ A) ก่อนและหลังผสมกับท่อคาร์บอน	40
รูปที่ 3.9 การเตรียมพื้นผิวคอนกรีตตัวอย่าง	41
รูปที่ 3.10 แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และกระดาษฉนวน	42
รูปที่ 3.11 การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)	42
รูปที่ 3.12 คอนกรีตตัวอย่างหลังจากการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge).....	44
รูปที่ 3.13 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test) .	45

รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) จากมุมมองด้านบนของตัวอย่างทดสอบ (หน่วย มิลลิเมตร)	47
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด.....	50
รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน.....	55
รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดกับประเภทของอีพอกซี.....	56
รูปที่ 4.5 การกระจายความเครียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน	58
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล	64
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน.....	65
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลกับประเภทของอีพอกซี.....	66
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล.....	68
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบการเลื่อนไถลสูงสุดกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน.....	71
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการเลื่อนไถลสูงสุดกับประเภทของอีพอกซี.....	72
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล	74
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน	79
รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดกับประเภทของอีพอกซี.....	80
รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน.....	83
รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสกับประเภทของอีพอกซี.....	84
รูปที่ 4.17 ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต	86
รูปที่ 4.18 ลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในชั้นอีพอกซีโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	91
รูปที่ 4.19 ลักษณะการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน	94

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ปัจจุบันการเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ อาทิ มีน้ำหนักที่เบา สะดวกในการติดตั้ง มีกำลังรับน้ำหนักสูง ต้านทานต่อการกัดกร่อน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับโครงสร้างคอนกรีตได้หลากหลายรูปแบบ เป็นต้น แต่ในขณะเดียวกันมักพบปัญหาของการเสริมกำลังระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างคอนกรีต คือ การวิบัติแบบหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างคอนกรีตที่มักจะเกิดขึ้นก่อนเวลาที่ควรจะเป็น ซึ่งส่งผลต่อกำลังรับน้ำหนักที่ลดลงและความเสียหายที่เกิดขึ้นตามมาของโครงสร้างคอนกรีต

อีพอกซีซึ่งเป็นวัสดุประสานที่นิยมใช้ในการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างคอนกรีต จึงเป็นวัสดุที่มีส่วนสำคัญที่ช่วยลดปัญหาการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างคอนกรีต หากอีพอกซีนั้นมีคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างคอนกรีตที่มีประสิทธิภาพ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนซึ่งเป็นวัสดุโครงสร้างระดับนาโน เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์สำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาและงานในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนเมื่อผสมกับอีพอกซีสามารถช่วยเพิ่มคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีได้

เนื่องด้วยการเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มักประสบกับปัญหาการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและโครงสร้างคอนกรีต งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตโดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนในการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณท่อนาโนคาร์บอน ประเภทท่อนาโนคาร์บอน และประเภทของอีพอกซีที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตด้วยอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน มีขอบเขตของการวิจัย ดังนี้

1.3.1 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1.3.1.1 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน ประกอบด้วย แบบผนังชั้นเดียว (Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNTs) และแบบผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)

1.3.1.2 ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ศึกษา คือ ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์, 0.50 เปอร์เซ็นต์, 1.00 เปอร์เซ็นต์ และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี

1.3.1.3 ประเภทของอีพอกซี ประกอบด้วย อีพอกซีชนิดค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร (Sikadur® -330) และชนิดที่ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร (Sikadur® -30)

1.3.2 ประเภทของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คือ แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)

1.3.3 คอนกรีตตัวอย่าง มีขนาดหน้าตัดกว้าง 150 มิลลิเมตร ความลึก 150 มิลลิเมตร และมีความยาว 500 มิลลิเมตร

1.3.4 การผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน

1.3.4.1 นำอีพอกซี (ส่วนประกอบ A) และท่อนาโนคาร์บอน ผสมด้วยเครื่องกวนสาร (Mechanically stirrer) ที่ความเร็วในการกวนสาร 900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องอัลตราโซนิค (Ultrasonic) เป็นเวลา 15 นาที

1.3.4.2 เมื่อต้องการใช้งานอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน นำอีพอกซี (ส่วนประกอบ A) และท่อนาโนคาร์บอน จากการผสมสารเคมีในขั้นตอนแรก มาผสมกับอีพอกซี (ส่วนประกอบ B) ด้วยสว่านความเร็วรอบต่ำ เป็นเวลา 4 นาที

1.3.5 ประเภทของการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล คือ การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)

1.4 แผนการดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การดำเนินการทดสอบ และการวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียด ดังนี้

1.4.1 การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.1.1 การศึกษาพฤติกรรมการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

1.4.1.2 การศึกษาคูณสมบัติอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน

1.4.1.3 การศึกษาการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต

1.4.1.4 การศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตด้วยอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน

1.4.1.5 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

1.4.2 การดำเนินการทดสอบ

1.4.2.1 การออกแบบและเตรียมอุปกรณ์การทดสอบ

1.4.2.2 การหล่อคอนกรีตตัวอย่าง

1.4.2.3 การผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน

1.4.2.4 การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

1.4.2.5 การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)

1.4.3 การวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.4.3.1 ผลแรงกระทำสูงสุดจากการทดสอบ

1.4.3.2 ผลการกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

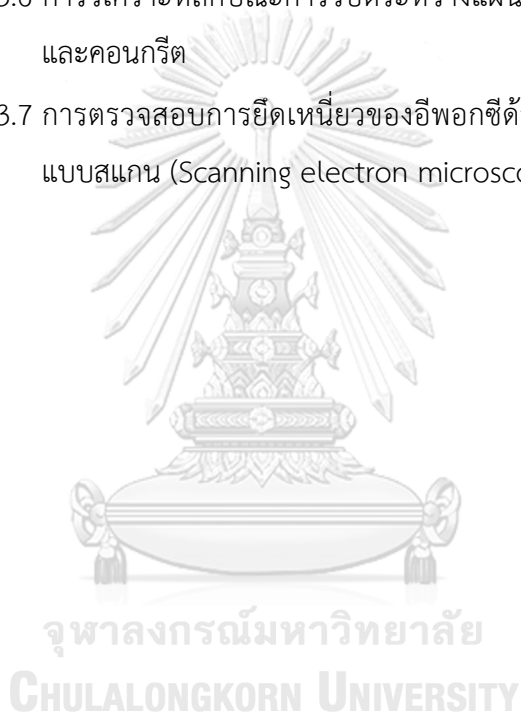
1.4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล

1.4.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล

1.4.3.5 ผลพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

1.4.3.6 การวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต

1.4.3.7 การตรวจสอบการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM)



บทที่ 2

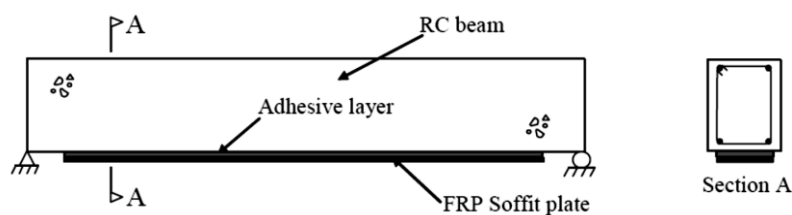
การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ผู้วิจัยได้แบ่งเนื้อเรื่องออกเป็น 5 หัวข้อ โดยกล่าวถึง 1. พฤติกรรมการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต 2. อีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน 3. การทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต 4. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต และ 5. ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

2.1 พฤติกรรมการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

2.1.1 บทนำ

การเสริมกำลังภายนอกด้วยการใช้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเสริมกำลังหรือซ่อมแซมโครงสร้างคอนกรีตส่วนต่าง ๆ อาทิ คาน เสา และพื้น เป็นต้น โดยหนึ่งในวิธีการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่บริเวณท้องคานโดยติดขนานตามความยาวของคาน ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีประสิทธิภาพและง่ายสำหรับการติดตั้ง ดังแสดงดังรูปที่ 2.1 ในการออกแบบคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะออกแบบให้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยช่วยในการรับแรงดึงซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัด ซึ่งคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังจะมีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อคานสามารถรับแรงต้านทานจากน้ำหนักบรรทุกก่อนที่จะมีการวิบัติเกิดขึ้นกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยปัญหาที่มักพบ คือคานคอนกรีตเสริมเหล็กไม่สามารถรับแรงต้านทานจากน้ำหนักบรรทุกตามที่ออกแบบไว้ เนื่องจากเกิดการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต [1]



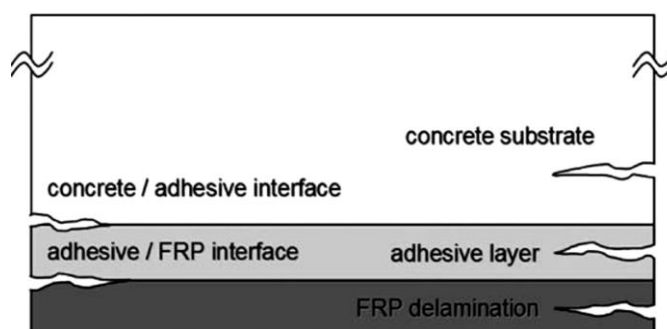
รูปที่ 2.1 คานคอนกรีตเสริมเหล็กเสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [2]

2.1.2 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

พฤติกรรมการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตได้มีการศึกษาที่หลายหลาย โดย Au และ Büyüköztürk [3] ได้แบ่งลักษณะการวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตโดยมีอีพอกซีเป็นวัสดุประสาน ออกเป็น 5 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 2.2 คือ

1. การหลุดล่อนของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP delamination)
2. การแยกตัวของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและวัสดุประสาน (FRP/adhesive separation)
3. การสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน (adhesion decohesion)
4. การแยกตัวของวัสดุประสานและคอนกรีต (adhesive/concrete separation)
5. การแตกหักของคอนกรีต (concrete substrate fracture)

โดยได้จัดออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 การสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุ (material decohesion) และ ประเภทที่ 2 การแตกหักที่ผิวสัมผัส (interface fracture) ซึ่งทั้ง 2 ประเภท เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตโดยมีอีพอกซีเป็นวัสดุประสาน สำหรับ ประเภทที่ 1 การสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุ (material decohesion) รูปแบบการหลุดล่อนที่จัดอยู่ในประเภทนี้คือ การหลุดล่อนของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (FRP delamination) การสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน (adhesion decohesion) และการแตกหักของคอนกรีต (concrete substrate fracture) ประเภทที่ 2 การแตกหักที่ผิวสัมผัส (interface fracture) รูปแบบการหลุดล่อนที่จัดอยู่ในประเภทนี้คือ การแยกตัวของพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและวัสดุประสาน (FRP/adhesive separation) และการแยกตัวของวัสดุประสานและคอนกรีต (adhesive/concrete separation)



รูปที่ 2.2 รูปแบบการหลุดล่อน (Debonding modes) [3]

งานวิจัยของ ททัยกาญจน์ [4] ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต จากการศึกษาโดยการทดสอบแรงดึง (Pull test) ของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต พบว่า ลักษณะการวิบัติมักเกิดขึ้นที่ชั้นวัสดุเชื่อมประสานเป็นส่วนมาก เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้น ที่ส่งผลให้เกิดการสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน (adhesion decohesion) และการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตมีประสิทธิภาพที่ลดลง

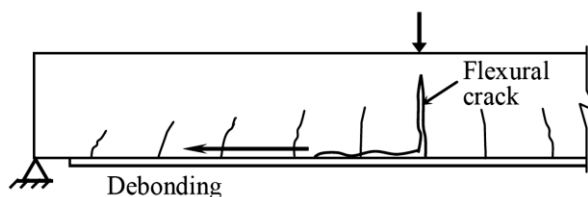
Teng และคณะ [5] ได้ศึกษาการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตในคาน โดยลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตในคาน มี 2 ลักษณะ คือ การวิบัติแบบหลุดล่อนช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Intermediate crack-induced debonding, IC debonding) และ การวิบัติแบบหลุดล่อนช่วงปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Plate-end debonding, PE debonding)

1. การวิบัติแบบหลุดล่อนช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Intermediate crack-induced debonding, IC debonding)

การวิบัติแบบหลุดล่อนช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Intermediate crack-induced debonding, IC debonding) ลักษณะของการหลุดล่อนนี้จะมีทิศทางการเคลื่อนที่จากบริเวณช่วงภายในออกไปสู่บริเวณช่วงปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยลักษณะการวิบัติแบบหลุดล่อนช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมี 2 ลักษณะ คือ การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าวของแรงดัดช่วงภายใน (Intermediate flexural crack induced interfacial debonding, IC debonding) และการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าวของแรงดัดและแรงเฉือนช่วงภายใน (Critical diagonal crack, CDC debonding)

1.1 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าวของแรงดัดช่วงภายใน (Intermediate flexural crack induced interfacial debonding, IC debonding)

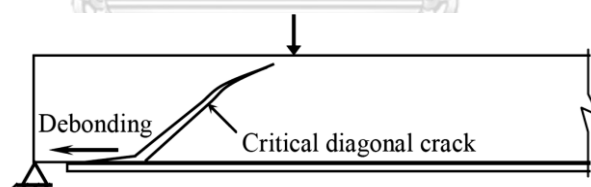
การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าวของแรงดัดช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เมื่อคอนกรีตเกิดการแตกร้าวจากแรงดัด จะทำให้เกิดความเค้นจากคอนกรีตส่งผ่านการแตกร้าวไปยังแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เมื่อบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตถึงค่าวิกฤต จะส่งผลให้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการหลุดล่อนจากบริเวณรอยแตกร้าวไปยังส่วนปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าวของแรงดัดช่วงภายใน (Intermediate flexural crack induced interfacial debonding, IC debonding) [2]

1.2 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าววิกฤตในแนวทแยง (Critical diagonal crack, CDC debonding)

การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าววิกฤตในแนวทแยง มีลักษณะการวิบัติแตกต่างจากการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าวของแรงดัดช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเกิดจากการแตกของรอยแตกร้าวที่กว้างขึ้นจากแรงเฉือนช่วงภายใน สำหรับการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าววิกฤตในแนวทแยง เกิดขึ้นเมื่อความเค้นจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แนวตั้งของรอยแตกร้าวบริเวณผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตถึงค่าวิกฤต จะส่งผลให้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยเกิดการหลุดล่อน แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสจากรอยร้าววิกฤตในแนวทแยง (Critical diagonal crack, CDC debonding) [2]

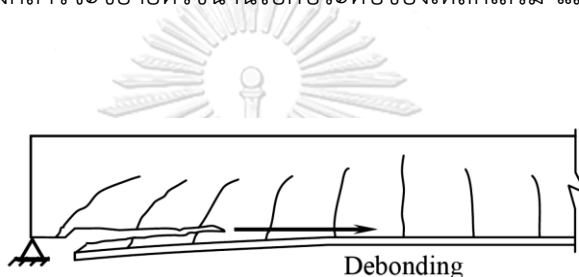
2. การวิบัติแบบหลุดล่อนช่วงปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Plate-end debonding, PE debonding)

การวิบัติแบบหลุดล่อนช่วงปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Plate-end debonding, PE debonding) ลักษณะของการหลุดล่อนจะมีทิศทางการเคลื่อนที่จากบริเวณช่วงปลายออกไปสู่บริเวณช่วงภายในของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ลักษณะการวิบัติ

แบบหลุดล่อนช่วงปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย มี 2 ลักษณะ คือ การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม (Concrete cover separation) และการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสช่วงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Plate end interfacial debonding)

2.1 การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม (Concrete cover separation)

การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม เกิดจากความเค้นที่มีค่าสูงของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและวัสดุประสาน จึงเกิดรอยแตกกว้างช่วงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย หากมีแรงกระทำเพิ่มมากขึ้นจะมีการขยายตัวของรอยแตกกว้างไปถึงระดับของเหล็กเสริมรับแรงดึงและรอยแตกกว้างดังกล่าวจะขยายตัวขนานไปกับระดับของเหล็กเสริม แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การแยกออกของคอนกรีตหุ้ม (Concrete cover separation) [2]

2.2 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสช่วงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย (Plate end interfacial debonding)

การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสช่วงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย เกิดจากความเค้นที่มีค่าสูงของผิวสัมผัสระหว่างคอนกรีตและวัสดุประสานบริเวณปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และหากความเค้นดังกล่าวมีค่าสูงกว่ากำลังของคอนกรีตจะเกิดการหลุดล่อนของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งการหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสช่วงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยนี้สามารถสังเกตได้เนื่องจากจะมีชั้นบาง ๆ ของคอนกรีตติดออกมากับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยด้วย แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การหลุดล่อนที่ผิวสัมผัสช่วงปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
(Plate end interfacial debonding) [2]

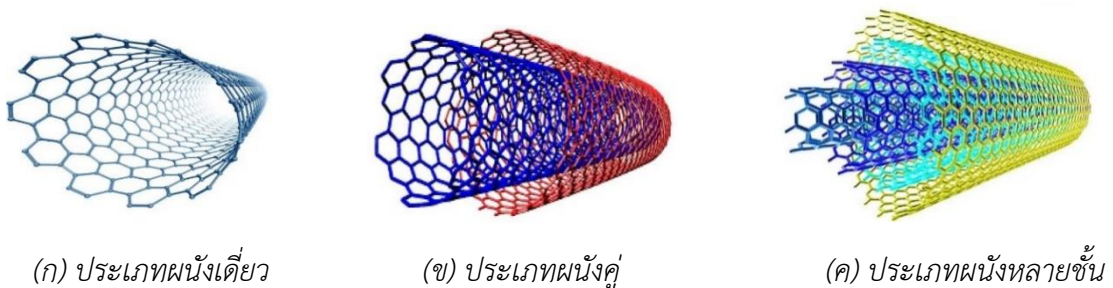
2.2 อีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน

2.2.1 อีพอกซี (Epoxy)

อีพอกซีเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่มีความสำคัญกับระบบของพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งนิยมใช้เป็นวัสดุประสานในการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตหรือโครงสร้างอื่น ๆ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำท่อนาโนคาร์บอนเป็นสารผสมเพิ่มในอีพอกซี เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของกำลังการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต

2.2.2 ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotubes, CNTs)

ท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุโครงสร้างระดับนาโน แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว (Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNTs) ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังคู่ (Double-Walled Carbon Nanotubes, DWCNTs) และท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs) แสดงดังรูปที่ 2.7 และคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของท่อนาโนคาร์บอน [6]

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน [7]

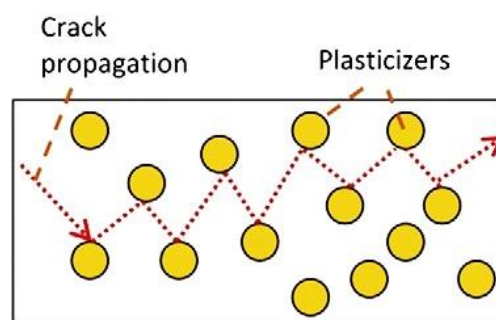
คุณสมบัติ	ท่อนาโนคาร์บอน		
	ผนังชั้นเดียว	ผนังสองชั้น	ผนังหลายชั้น
กำลังรับแรงดึง (Tensile strength, GPa)	50 - 500	23 - 63	10 - 60
โมดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus, TPa)	1	-	0.3 - 1
การแยกตัว ณ จุดขาด (Elongation at break, %)	5.8	28	-
ความหนาแน่น (Density, g/cm ³)	1.3 - 1.5	1.5	1.8 - 2.0
การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, s/m)	10 ⁶	10 ⁶	10 ⁶
การนำความร้อน ณ อุณหภูมิห้อง (Thermal conductivity at room temperature, W/m-K)	6000	3000	2000
เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability, in air)	>700	>700	>700
เส้นผ่านศูนย์กลาง (Typical diameter, nm)	1	5	20
พื้นที่ผิว (Specific surface area, m ² /g)	10 - 20	10 - 20	10 - 20

2.2.3 การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน

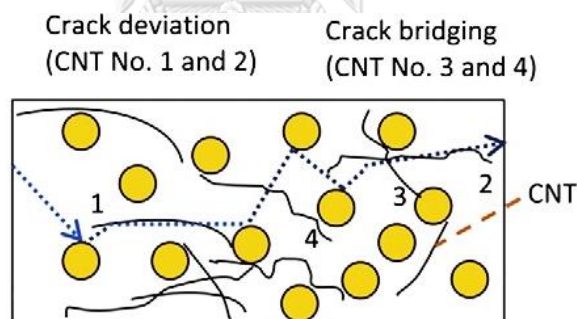
2.2.3.1 การศึกษาคุณสมบัติของวัสดุลามิเนตเสริมเส้นใยคาร์บอนด้วยอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน

Ashrafi และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังชั้นเดียว (SWCNTs) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติของวัสดุลามิเนตเสริมเส้นใยคาร์บอน โดยนำอีพอกซีเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) ทำการทดสอบความต้านทานต่อการแตกหักของวัสดุลามิเนต (Interlaminar fracture toughness test) ทำการแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบ ซึ่งรูปแบบที่ 1 คือ การทดสอบโดยแรงกระทำปกติ (normal force) และ รูปแบบที่ 2 คือ การทดสอบภายใต้แรงเฉือน (shear force) จากการศึกษาพบว่า การนำอีพอกซีเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) ที่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ของ

ปริมาณอีพอกซี ทำให้ค่าความเสียหายของพื้นที่ของวัสดุลามิเนตลดลง 5 เปอร์เซ็นต์ ความแข็งแรงหลังการบิบัติเพิ่มขึ้น 3.5 เปอร์เซ็นต์ ความต้านทานต่อการแตกหักสำหรับการทดสอบรูปแบบที่ 1 เพิ่มขึ้น 13 เปอร์เซ็นต์ และความต้านทานต่อการแตกหักสำหรับการทดสอบรูปแบบที่ 2 เพิ่มขึ้น 28 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) มีประสิทธิภาพในการเพิ่มคุณสมบัติทางกลในอีพอกซี แสดงดังรูปที่ 2.8



(ก) การตรึงรอยแตกเนื่องจากพลาสติกไซเซอร์



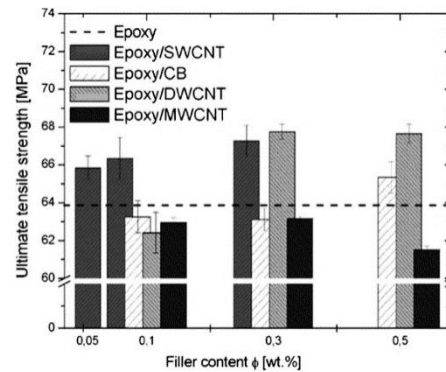
(ข) ท่อนาโนคาร์บอนช่วยแก้ปัญหา รอยร้าว

รูปที่ 2.8 พฤติกรรมเหนียวรั้งการแตกหักของอีพอกซีที่เกิดขึ้นจากการเสริมด้วยพลาสติกไซเซอร์และท่อนาโนคาร์บอน [8]

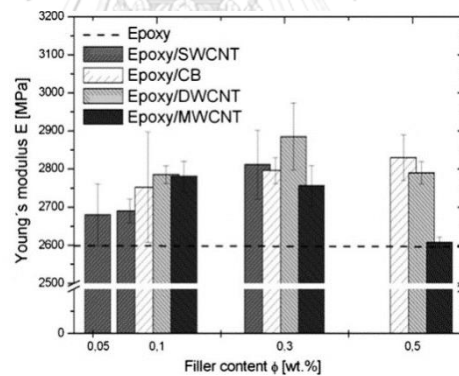
2.2.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน

Gojny และคณะ [9] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) และคาร์บอนแบล็ค (Carbon black, CB) โดยประเภทของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษา คือ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) ท่อนาโน

คาร์บอนแบบผนังคู่ (DWCNTs) และท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) รวมทั้งคาร์บอนแบล็ค (CB) จากการทดสอบคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนทั้ง 3 ประเภท และคาร์บอนแบล็ค (CB) พบว่ามีการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลทั้งค่าความเค้นดึงสูงสุดและค่าโมดูลัสของยังที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับอีพอกซีปกติ แสดงดังรูปที่ 2.9



(ก) ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (ultimate tensile strength)



(ข) ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus)

รูปที่ 2.9 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนและคาร์บอนแบล็ค [9]

ตารางที่ 2.2 ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดกับปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและคาร์บอนแบล็ค [9]

คุณสมบัติ		ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength, MPa)			
		SWCNTs	CB	DWCNTs	MWCNTs
ปริมาณ (content, wt%)	-	63.80 (± 1.09)			
	0.05 %	65.84 (± 0.64)	-	-	-
	0.1 %	66.34 (± 1.11)	63.28 (± 0.85)	62.43 (± 1.08)	62.97 (± 0.25)
	0.3 %	67.28 (± 0.63)	63.13 (± 0.59)	67.77 (± 0.40)	63.17 (± 0.13)
	0.5 %	-	65.34 (± 0.82)	67.66 (± 0.50)	61.52 (± 0.19)

จากรูปที่ 2.9(ก) และตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) มีความโดดเด่นในด้านของประสิทธิภาพ กล่าวคือ เมื่อใส่ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) ในปริมาณน้อยที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใส่คาร์บอนแบล็ค (CB) ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังคู่ (DWCNTs) และ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) แต่อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) ให้ค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุดมากกว่า ดังจะเห็นได้จากการศึกษาที่ปริมาณ 0.05 เปอร์เซ็นต์ อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด 65.84 (± 0.64) เมกะปาสคาล ส่วนที่ปริมาณ 0.1 เปอร์เซ็นต์ อีพอกซีเสริมคาร์บอนแบล็ค (CB) มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด 63.28 (± 0.85) เมกะปาสคาล อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังคู่ (DWCNTs) มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด 62.43 (± 1.08) เมกะปาสคาล และ อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) มีค่ากำลังรับแรงดึงสูงสุด 62.97 (± 0.25) เมกะปาสคาล เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ค่าโมดูลัสของยังกับปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและคาร์บอนแบล็ค [9]

คุณสมบัติ		ค่าโมดูลัสของยัง (Young's modulus, MPa)			
		SWCNTs	CB	DWCNTs	MWCNTs
ปริมาณ	-	2599 (± 81)			
(content, wt%)	0.05 %	2681 (± 80)	-	-	-
	0.1 %	2691 (± 31)	2752 (± 144)	2785 (± 23)	2780 (± 40)
	0.3 %	2812 (± 90)	2796 (± 34)	2885 (± 88)	2765 (± 53)
	0.5 %	-	2830 (± 60)	2790 (± 29)	2609 (± 13)

จากภาพที่ 2.9(ข) และตารางที่ 2.3 แสดงให้เห็นว่า ค่ายังโมดูลัสของอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) และคาร์บอนแบล็ค (CB) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) และคาร์บอนแบล็ค (CB) ในปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังคู่ (DWCNTs) ไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด และอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) มีค่ายังโมดูลัสน้อยลง เมื่อปริมาณท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (MWCNTs) เพิ่มขึ้น

งานวิจัยของ Rousakis และคณะ [10] ได้ศึกษาคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น (MWCNTs) ทำการทดสอบโดยการดึง (Tensile test) โดยใช้อีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.15, 1.1 และ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ จากการศึกษาของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่นที่ 1.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 40.58 เปอร์เซ็นต์ ค่าสูงสุดการไหล เพิ่มขึ้น 60.33 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความหนาแน่นที่ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 54.89 เปอร์เซ็นต์ ค่าสูงสุดการไหล เพิ่มขึ้น 61.81 เปอร์เซ็นต์ และที่ค่าความหนาแน่นที่ 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวลดลง 10.09 เปอร์เซ็นต์ ค่าสูงสุดการไหล เพิ่มขึ้นเล็กน้อย 1.48 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติทางกลกับค่าความหนาแน่นของอีพอกซี [10]

คุณสมบัติ		ค่าความหนาแน่นของอีพอกซี (Density of epoxy, g/cm ²)					
		1.15		1.1		0.9	
ความเค้นดึง สูงสุด (Maximum stress, MPa)	ไม่มีท่อนาโน คาร์บอน	34.8	ลดลง	24.94	เพิ่มขึ้น	31.75	เพิ่มขึ้น
	มีท่อนาโน คาร์บอน	31.29	10.09%	41.975	40.58%	70.39	54.89%
ระยะยืดสูงสุด (Strain at maximum stress, mm/mm)	ไม่มีท่อนาโน คาร์บอน	42.265	เพิ่มขึ้น	15.07	เพิ่มขึ้น	9.77	เพิ่มขึ้น
	มีท่อนาโน คาร์บอน	42.90	1.48%	37.99	60.33%	25.585	61.81%

จากตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า การใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน โดยอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.1 และ 0.9 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าความเค้นดึงสูงสุดและระยะยืดสูงสุดเพิ่มขึ้น และอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.15 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าความเค้นดึงสูงสุดที่ลดลงและระยะยืดสูงสุดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3 การทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

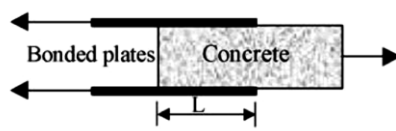
2.3.1 ประเภทของการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล

Chen และ Teng [11] ได้แบ่งประเภทการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ออกเป็น 5 ประเภท แสดงดังรูปที่ 2.10 ดังต่อไปนี้

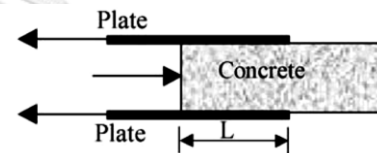
1. การทดสอบแรงดึงแบบแรงเฉือนคู่ (double shear pull test or far end support (FES) double shear test)

2. การทดสอบแรงผลักแบบแรงเฉือนคู่ (double shear push test or near end support (NES) double shear support)
3. การทดสอบแรงดึงแบบแรงเฉือนเดี่ยว (single shear pull test or far end support (FES) single shear test)
4. การทดสอบแรงผลักแบบแรงเฉือนเดี่ยว (single shear push test or near end support (NES) single shear test)
5. การทดสอบคานและคานประยุกต์ (Beam and modified beam test)

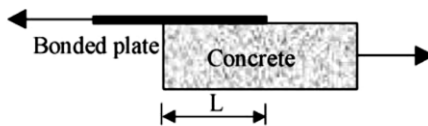
โดยการทดสอบ 4 ประเภทแรก เรียกว่าการทดสอบแรงดึง (Pull tests) เนื่องจากแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยจะถูกดึงโดยตรงจากพื้นผิวคอนกรีตด้วยแรงดึง (Tensile force)



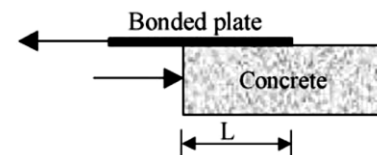
(ก) การทดสอบแรงดึงแบบแรงเฉือนคู่



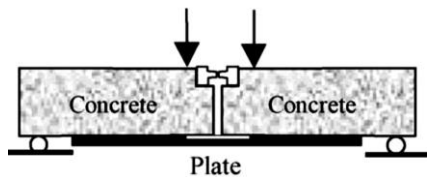
(ข) การทดสอบแรงผลักแบบแรงเฉือนคู่



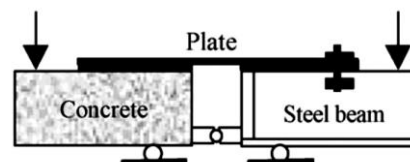
(ค) การทดสอบแรงดึงแบบแรงเฉือนเดี่ยว



(ง) การทดสอบแรงผลักแบบแรงเฉือนเดี่ยว



(จ) การทดสอบคาน



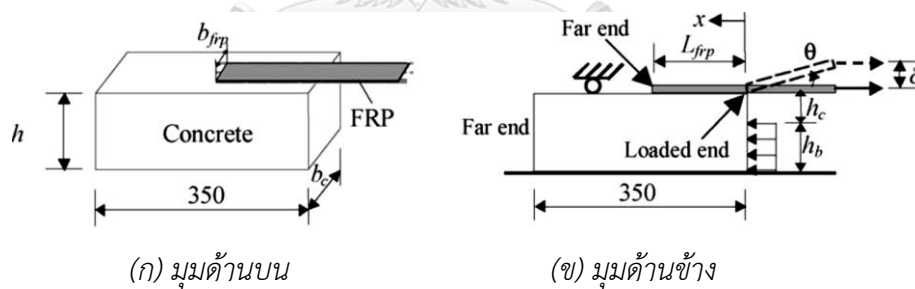
(ซ) การทดสอบคานประยุกต์

รูปที่ 2.10 ประเภทการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยว [11]

2.3.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการทดสอบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถล

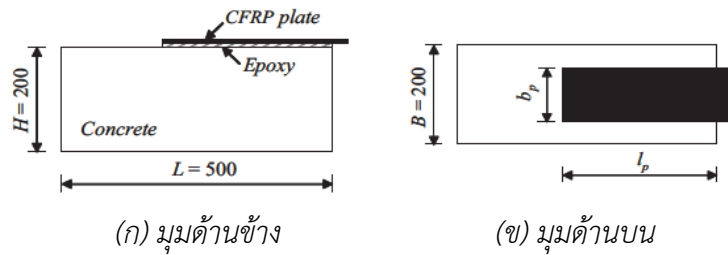
สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการศึกษาโดยการทดสอบแรงดึงแบบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear push test or near end support, NES) หรือ การทดสอบแรงดึง (Pull test) ในการศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตโดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน ซึ่งการศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพสำหรับการทดสอบแรงดึง (Pull tests) มีการศึกษาที่หลากหลาย

การทดสอบประสิทธิภาพของการทดสอบการดึง (Pull tests) โดย Yao และคณะ [12] ได้ทำการศึกษา เพื่อประเมินผลของตัวแปรที่มีผลต่อการทดสอบแรงดึง (Pull test) คือ ความยาวของวัสดุยึดเหนี่ยว (bond length) อัตราส่วนความกว้างระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต (width ratio between FRP and concrete block) ความสูงของขอบคอนกรีต (height of concrete free edge) และตำแหน่งของแรง (offset of load position) แสดงดังรูปที่ 2.11 จากผลการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย คือ ความยาวของวัสดุยึดเหนี่ยว (bond length) อัตราส่วนความกว้างระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต (width ratio between FRP and concrete block) และความสูงของขอบคอนกรีต (height of concrete free edge) โดยส่งผลกระทบต่อกระจายความเค้น (stress distribution) ในชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 2.11 รายละเอียดชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึง (Pull test) [12]

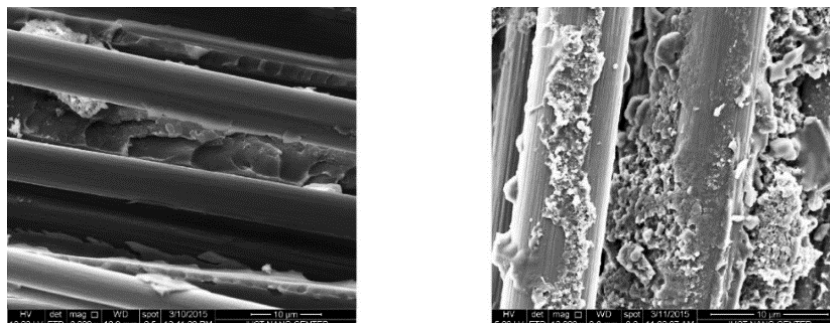
เพื่อประเมินผลของตัวแปรที่มีผลต่อการทดสอบประสิทธิภาพของการทดสอบแรงดึง (Pull tests) คือ ความยาวของวัสดุยึดเหนี่ยว (bond length) ความกว้างของวัสดุยึดเหนี่ยว (bond width) และความแข็งแรงของคอนกรีต (concrete strength) Chu และคณะ [13] ได้ทำการทดสอบการดึง (Pull tests) แสดงดังรูปที่ 2.12 จากผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความยาวของวัสดุยึดเหนี่ยว (bond length) ความกว้างของวัสดุยึดเหนี่ยว (bond width) ทำให้เกิดความล่าช้าในการพังเนื่องจากชิ้นงานตัวอย่างมีการรับน้ำหนักเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังของคอนกรีต (concrete strength) ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับน้ำหนักเพียง 10 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.12 รายละเอียดชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบแรงดึง (Pull test) [13]

2.4 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตด้วยอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน

Irshidat และ Al-Saleh [14] ได้ศึกษาผลกระทบของการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยการหล่อตัวอย่างคอนกรีตเสริมเหล็กจำนวน 30 ตัวอย่าง และเสริมด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย โดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs) โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 3.4 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี และผ่านการทดสอบแรงดึง (Pull test) จากการศึกษาลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ผ่านการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM) พบว่า การใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนจะมีชิ้นส่วนคอนกรีตติดออกมาพร้อมกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยมากกว่า เมื่อเทียบกับอีพอกซีที่ไม่ได้เสริมท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนส่งผลต่อประสิทธิภาพการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต



(ก) อีพอกซีที่ไม่ได้เสริมท่อนาโนคาร์บอน

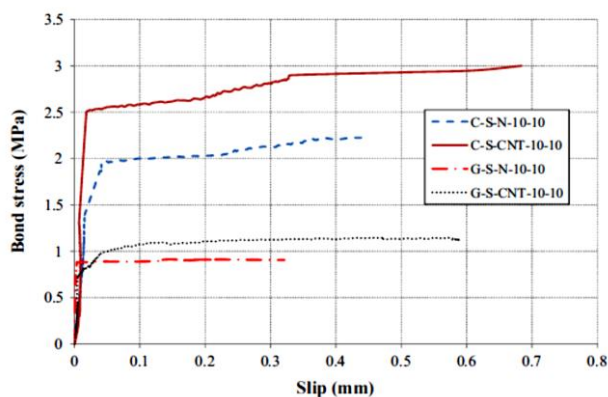
(ข) อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน

รูปที่ 2.13 การวิเคราะห์การวิบัติที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน [14]

การศึกษาผลกระทบของการใช้อีพอกซีเสริมท่อานาโนคาร์บอนต่อพฤติกรรมของการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตของ Irshidat และ Al-Saleh [14] มีตัวแปรศึกษาคือ ประเภทของเส้นใย ประเภทของอีพอกซี ความยาวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย และความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตด้วยอีพอกซีเสริมท่อานาโนคาร์บอน โดยกล่าวในข้อ 2.4.1 - 2.4.4 ดังต่อไปนี้

2.4.1 ผลกระทบของประเภทเส้นใย

การศึกษาผลกระทบของประเภทเส้นใยที่มีผลต่อการเพิ่มความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยใช้อีพอกซีเสริมด้วยท่อานาโนคาร์บอน ประเภทของเส้นใยที่ใช้ในการศึกษาคือเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้อีพอกซีเสริมท่อานาโนคาร์บอนกับเส้นใยคาร์บอน ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 35 เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดของการลื่นไถลเพิ่มขึ้น 52 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้อีพอกซีเสริมท่อานาโนคาร์บอนในอีพอกซีกับเส้นใยแก้ว ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 26 เปอร์เซ็นต์และค่าสูงสุดของการลื่นไถล เพิ่มขึ้น 83 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลกับผลกระทบของประเภทเส้นใย

[14]

คำอธิบาย รูปที่ 2.14 C หมายถึง แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, G หมายถึงแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว, N หมายถึง ไม่เสริมท่อานาโนคาร์บอน, CNT หมายถึง เสริมท่อานาโนคาร์บอน, 10-10 หมายถึง ความยาวและความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

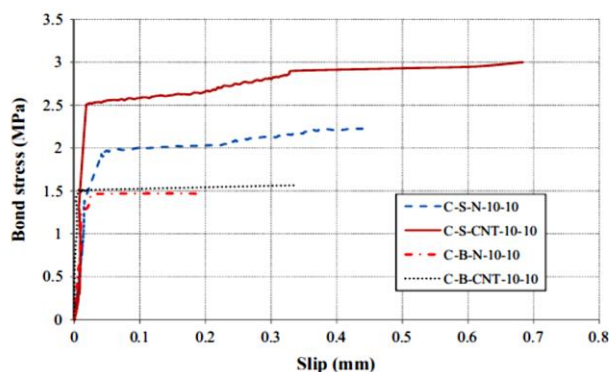
ตารางที่ 2.5 สรุปผลกระทบของประเภทเส้นใย [14]

คุณสมบัติ		ประเภทของเส้นใย			
		คาร์บอน		แก้ว	
หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond stress, MPa)	ไม่มีท่อนาโนคาร์บอน	2.23	เพิ่มขึ้น	0.91	เพิ่มขึ้น
	มีท่อนาโนคาร์บอน	3.00	35%	1.15	26%
ค่าสูงสุดการลื่นไถล (Ultimate slippage, mm)	ไม่มีท่อนาโนคาร์บอน	0.45	เพิ่มขึ้น	0.32	เพิ่มขึ้น
	มีท่อนาโนคาร์บอน	0.68	52%	0.59	83%

จากรูปที่ 2.14 และ ตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าประเภทของเส้นใยคาร์บอนและเส้นใยแก้ว ให้ความแข็งแรงยึดเหนี่ยวและค่าสูงสุดการลื่นไถลที่เพิ่มขึ้นทั้งคู่ โดยเส้นใยคาร์บอนจะให้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นมากกว่าเส้นใยแก้ว และเส้นใยแก้วจะให้ค่าสูงสุดการลื่นไถลที่มากกว่าเส้นใยคาร์บอน

2.4.2 ผลกระทบของประเภทอีพอกซี

การศึกษาผลกระทบของประเภทอีพอกซีที่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยใช้อีพอกซีเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอน ประเภทอีพอกซีที่ใช้ในการศึกษาคืออีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร และอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.13 กิโลกรัมต่อลิตร ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 35 เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดของการลื่นไถลเพิ่มขึ้น 52 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนในอีพอกซีที่มีค่าความหนาแน่น 1.13 กิโลกรัมต่อลิตร ความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 6 เปอร์เซ็นต์และค่าสูงสุดของการลื่นไถล เพิ่มขึ้น 81 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลกับผลกระทบของประเภทอีพอกซี [14]

คำอธิบาย รูปที่ 2.15 C หมายถึง แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, S หมายถึงอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร, B หมายถึง อีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.13 กิโลกรัมต่อลิตร, N หมายถึง ไม่เสริมท่อนาโนคาร์บอน, CNT หมายถึง เสริมท่อนาโนคาร์บอน, 10-10 หมายถึง ความยาวและความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ตารางที่ 2.6 สรุปผลกระทบของประเภทอีพอกซี [14]

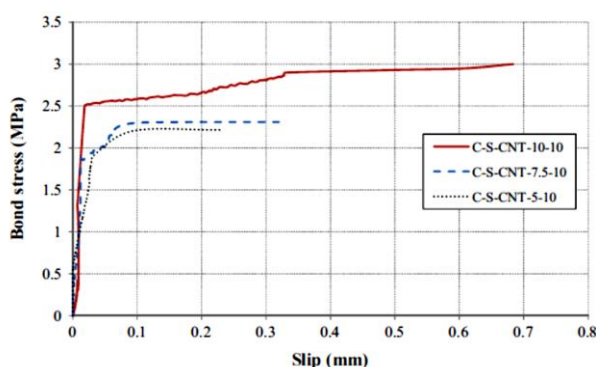
คุณสมบัติ		ความหนาแน่น (Density, kg/L)			
		1.30		1.13	
หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond stress, MPa)	ไม่มีท่อนาโนคาร์บอน	2.23	เพิ่มขึ้น	1.47	เพิ่มขึ้น
	มีท่อนาโนคาร์บอน	3.00	35%	1.57	6%
ค่าสูงสุดการลื่นไถล (Ultimate slippage, mm)	ไม่มีท่อนาโนคาร์บอน	0.45	เพิ่มขึ้น	0.19	เพิ่มขึ้น
	มีท่อนาโนคาร์บอน	0.68	52%	0.34	81%

จากรูปที่ 2.15 และ ตารางที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่าอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร และอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.13 กิโลกรัมต่อลิตร ให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวและค่าสูงสุดการลื่นไถลที่เพิ่มขึ้นทั้งคู่ โดยอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร จะให้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นมากกว่าอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.13 กิโลกรัมต่อลิตร และอีพอกซีที่ค่าความ

หนาแน่น 1.13 กิโลกรัมต่อลิตร จะให้ค่าสูงสุดการลื่นไถลที่มากกว่าอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร

2.4.3 ผลกระทบของความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การศึกษาผลกระทบของความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยใช้อีพอกซีเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอน ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.16 แสดงให้เห็นว่าการใช้อีพอกซีเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 5 - 7.5 เซนติเมตร ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 4 เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดของการลื่นไถลเพิ่มขึ้น 30 เปอร์เซ็นต์ การใช้อีพอกซีเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 7.5 - 10 เซนติเมตร ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 40 เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดของการลื่นไถลเพิ่มขึ้น 114 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลกับผลกระทบของความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]

คำอธิบาย รูปที่ 2.16 C หมายถึง แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, S หมายถึง อีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร, CNT หมายถึง เสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอน, 10-10 / 7.5-10 / 5-10 หมายถึง ความยาวและความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

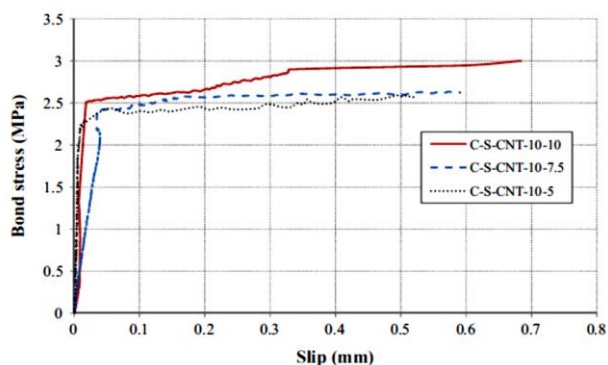
ตารางที่ 2.7 สรุปผลกระทบของความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]

คุณสมบัติ	ความยาวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย		
	5 เซนติเมตร	7.5 เซนติเมตร	10 เซนติเมตร
หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond stress, MPa)	2.22	2.31	3.00
	เพิ่มขึ้น 4 %		เพิ่มขึ้น 40 %
ค่าสูงสุดการลื่นไถล (Ultimate slippage, mm)	0.23	0.32	0.68
	เพิ่มขึ้น 30 %		เพิ่มขึ้น 114 %

จากรูปที่ 2.16 และ ตารางที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 5 - 7.5 เซนติเมตร และที่ 7.5 - 10 เซนติเมตร ให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวและค่าสูงสุดการลื่นไถลที่เพิ่มขึ้นทั้งคู่ โดยการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 7.5 - 10 เซนติเมตร ช่วยเพิ่มหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและค่าสูงสุดการลื่นไถลมากกว่าการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 5 - 7.5 เซนติเมตร

2.4.4 ผลกระทบของความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

การศึกษาผลกระทบของความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่มีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยใช้อีพอกซีเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอน ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นว่าการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวที่ 5 - 7.5 เซนติเมตร ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 2 เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดของการลื่นไถลเพิ่มขึ้น 13 เปอร์เซ็นต์ การใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวที่ 7.5 - 10 เซนติเมตร ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของการยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้น 14 เปอร์เซ็นต์ และค่าสูงสุดของการลื่นไถลเพิ่มขึ้น 26 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลกับผลกระทบของความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]

คำอธิบาย รูปที่ 2.17 C หมายถึง แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน, S หมายถึงอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร, CNT หมายถึง เสริมท่อนาโนคาร์บอน, 10-10, 10-7.5, 10-5 หมายถึง ความยาว-ความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

ตารางที่ 2.8 สรุปผลกระทบของความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย [14]

คุณสมบัติ	ความกว้างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย		
	5 เซนติเมตร	7.5 เซนติเมตร	10 เซนติเมตร
หน่วยแรงยึดเหนี่ยว (Bond stress, MPa)	2.23	2.63	3.00
	เพิ่มขึ้น 2 %		เพิ่มขึ้น 14 %
ค่าสูงสุดการลื่นไถล (Ultimate slippage, mm)	0.45	0.59	0.68
	เพิ่มขึ้น 13 %		เพิ่มขึ้น 26 %

จากรูปที่ 2.17 และ ตารางที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าความกว้างการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 5 - 7.5 เซนติเมตร และที่ 7.5 - 10 เซนติเมตร ให้หน่วยแรงยึดเหนี่ยวและค่าสูงสุดการลื่นไถลที่เพิ่มขึ้นทั้งคู่ โดยการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนกับความกว้างการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 7.5 - 10 เซนติเมตร ช่วยเพิ่มหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและค่าสูงสุด

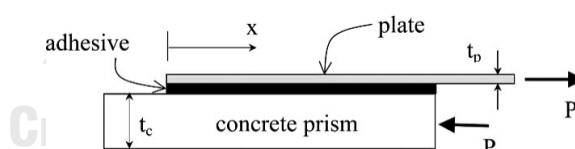
การลื่นไถลมากกว่าการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนกับความยาวการยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยที่ 5 - 7.5 เซนติเมตร

2.5 ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

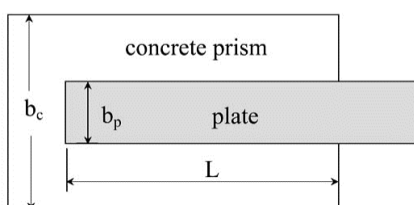
ความสัมพันธ์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต สามารถศึกษาได้จากการทดสอบแรงเฉือนการยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ซึ่งการส่งผ่านความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตมีผลต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

2.5.1 สมการของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

การยึดเหนี่ยวของรอยต่อระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต สำหรับชุดการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear test) ประกอบด้วย แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย วัสดุประสาน และคอนกรีตตัวอย่าง มีความหนาและความกว้างที่ตลอดความยาว แสดงดังรูปที่ 2.18



(ก) มุมด้านข้าง



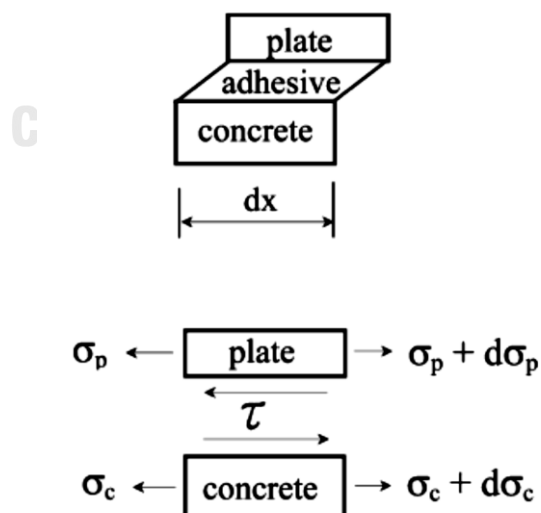
(ข) มุมด้านบน

รูปที่ 2.18 การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวของการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต [15]

คำอธิบาย รูปที่ 2.18 กำหนดให้สัญลักษณ์ต่าง ๆ มีความหมายดังต่อไปนี้

b_p	คือ	ความกว้างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
t_p	คือ	ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
E_p	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
x, L	คือ	ระยะยึดเหนี่ยวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
b_c	คือ	ความกว้างของคอนกรีตตัวอย่าง
t_c	คือ	ความหนาของคอนกรีตตัวอย่าง
E_c	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของคอนกรีตตัวอย่าง

Yuan และคณะ [15] ศึกษาแบบจำลองหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต โดยตั้งสมมติฐานให้แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตตัวอย่างมีการเสียรูปจากความเค้นคงที่ตามแนวแกน ซึ่งมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและไม่คำนึงถึงแรงดัด และการตั้งสมมติฐานให้ชั้นวัสดุประสานมีการเสียรูปจากความเค้นเฉือนคงที่และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในชั้นวัสดุประสาน



รูปที่ 2.19 การเสียรูปและสมดุลในรอยต่อการยึดเหนี่ยว [15]

จากการตั้งสมมติฐานของแบบจำลองหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการลื่นไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตดังกล่าว สามารถเขียนสมการควบคุมจากการพิจารณาการสมดุลระหว่างรอยต่อการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต แสดงดัง รูปที่ 2.19 ดังนี้

$$\frac{d\sigma_p}{dx} - \frac{\tau}{t_p} = 0 \quad (2.1)$$

$$\sigma_p t_p b_p + \sigma_c t_c b_c = 0 \quad (2.2)$$

กำหนดให้ τ คือ ความเค้นเฉือนในชั้นวัสดุประสาน
 σ_p คือ ความเค้นตามแนวแกนในแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
 σ_c คือ ความเค้นตามแนวแกนในคอนกรีตตัวอย่าง

สมการคอนสติติวทีฟ (Constitutive equations) ของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย วัสดุประสาน และคอนกรีตตัวอย่าง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tau = f(\delta) \quad (2.3)$$

$$\sigma_p = E_p \frac{du_p}{dx} \quad (2.4)$$

$$\sigma_c = E_c \frac{du_c}{dx} \quad (2.5)$$

การลื่นไถลที่พื้นผิวสัมผัส (δ) คือ ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตตัวอย่าง นั่นคือ

$$\delta = u_p - u_c \quad (2.6)$$

นำสมการที่ (2.2) ถึงสมการที่ (2.6) แทนค่าในสมการที่ (2.1)

$$\frac{d^2\delta}{dx^2} - \frac{2G_f}{\tau_f^2} \lambda^2 f(\delta) = 0 \quad (2.7)$$

$$\sigma_p = \frac{\tau_f^2}{2G_f t_p \lambda^2} \frac{d\delta}{dx} \quad (2.8)$$

$$\lambda^2 = \frac{\tau_f^2}{2G_f} \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{b_p}{b_c E_c t_c} \right) \quad (2.9)$$

กำหนดให้ τ_f คือ หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเฉพาะที่
 G_f คือ พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

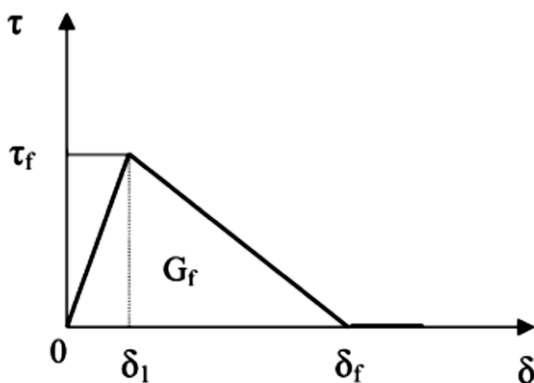
สมการควบคุมเชิงอนุพันธ์ (Governing differential equation) คือสมการที่ (2.7) สำหรับรอยต่อการยึดเหนี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.18 โดยพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส G_f สามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟจากความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนเฉพาะที่หรือความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสและการเลื่อนเนื่องจากแรงเฉือนเฉพาะที่ $f(\delta)$

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5.2 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

แบบจำลองของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนเฉพาะที่ระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต ได้มีการนำเสนอในรูปแบบต่าง ๆ ที่หลากหลาย อาทิ Nakaba และคณะ [16] กับ Wu และคณะ [17] เป็นต้น โดยแบบจำลองที่มีการประมาณใกล้เคียงกับพฤติกรรมจริงคือแบบจำลองเชิงเส้นคู่ ซึ่งประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้น คือ เส้นตรงที่ลาดขึ้นและเส้นตรงที่ลาดลง แสดงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสกับการเลื่อนจะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นไปพร้อมกัน จนกระทั่งความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสถึงค่าสูงสุดเท่ากับ τ_f และมีการเลื่อนเท่ากับ δ_1 จากนั้นจะมีการอ่อนตัวที่ผิวสัมผัส (Interfacial softening) หรือการแตกร้าวขนาดเล็ก (Micro cracking) และความเค้นเฉือน

ที่ผิวสัมผัสกับการเคลื่อนไถลจะลดลงแบบเชิงเส้นไปพร้อมกัน จนกระทั่งการเคลื่อนไถลมีค่ามากกว่าการเคลื่อนไถลประลัย (δ_f) ทำให้ความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสจะมีค่าเท่ากับศูนย์ และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (G_f) คือ พื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนที่ผิวสัมผัสและการเคลื่อนไถล



รูปที่ 2.20 แบบจำลองความสัมพันธ์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต [15]

การแตกหัก (หรือการหลุดลอกหรือการแตกร้าวขนาดใหญ่) ของชิ้นส่วนจากแรงเฉือนสำหรับการยึดเหนี่ยวเฉพาะที่ จะไม่พิจารณาแรงเฉือนตกค้าง (Residual shear strength) หรือแรงเสียดทาน และการเสียดกันของมวลรวม (Friction and aggregate interlock) หลังจากการหลุดลอกตลอดความยาวสำหรับการหลุดลอกของรอยต่อ จากรูปที่ 2.20 สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

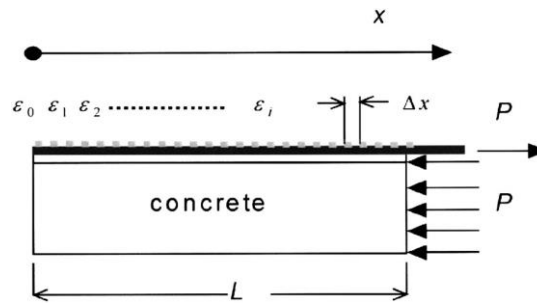
$$f(\delta) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\tau_f}{\delta_1} \delta & ; 0 \leq \delta \leq \delta_1 \\ \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_1} (\delta_f - \delta) & ; \delta_1 < \delta \leq \delta_f \\ 0 & ; \delta > \delta_f \end{array} \right\} \quad (2.10)$$

2.5.3 สมการประยุกต์ของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่น พอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต

การประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลที่ได้ผลจากการทดสอบแรงดึง (Pull test) โดยค่าความเครียดที่ได้ผลมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) ที่ติดตั้งบนคอนกรีตตัวอย่าง ซึ่งการกระจายความเครียดในคอนกรีตตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 2.21 สามารถนำมาหาค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยว โดยประยุกต์ใช้สมการจากการตั้งสมมติฐานการพิจารณาการสมดุล ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต สมการคำนวณหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยวแสดงดังสมการที่ 2.11 [18]

$$\tau_i = \frac{E_f t_f (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{\Delta x} \quad (2.11)$$

กำหนดให้	τ_i	คือ	หน่วยแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ย ณ ตำแหน่ง i
	E_f	คือ	ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
	t_f	คือ	ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
	ε_i	คือ	ค่าความเครียดจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) ณ ตำแหน่ง i
	ε_{i-1}	คือ	ค่าความเครียดจากอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) ณ ตำแหน่ง $i-1$
	Δx	คือ	ระยะห่างของอุปกรณ์ตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge)



รูปที่ 2.21 การกระจายความเครียดในคอนกรีตตัวอย่าง (strain distribution) [18]

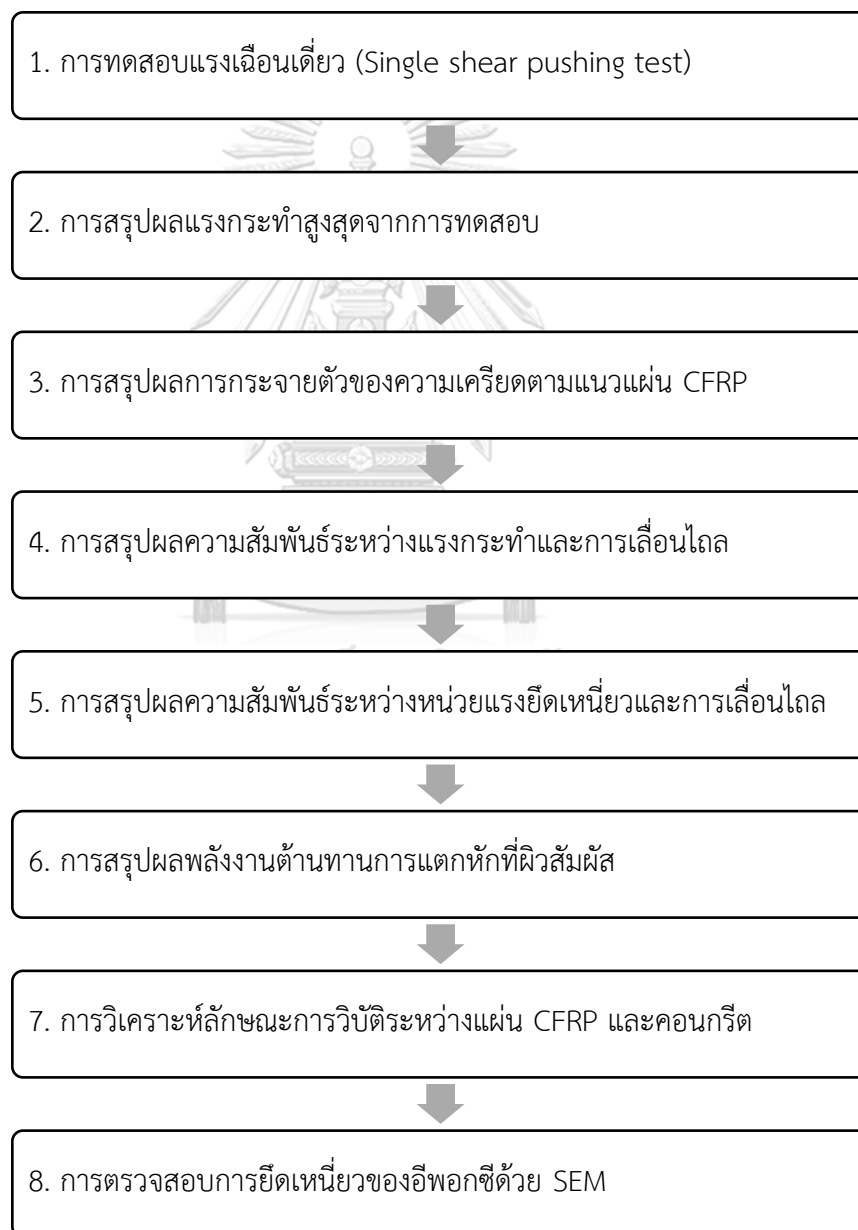
การลื่นไถลสามารถหาค่าได้จากค่าความเครียดที่ได้จากเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) ที่ติดตั้งบนคอนกรีตตัวอย่าง เช่นเดียวกับการหาหน่วยแรงยึดเหนี่ยว โดยสามารถหาค่าการลื่นไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต [18] แสดงดังสมการที่ (2.12)

$$S_i = \frac{\Delta x}{2} \left(\epsilon_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \epsilon_j + \epsilon_i \right) \quad (2.12)$$

กำหนดให้ S_i คือ การลื่นไถลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย ณ ตำแหน่ง i
 ϵ_0 คือ ความเครียด ณ ตำแหน่งปลายของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้ผู้วิจัยได้อธิบายถึงกระบวนการวิจัย โดยผู้วิจัยได้แบ่งขั้นตอนของงานวิจัยออกเป็น 8 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 วัสดุและการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบในการวิจัยมีกระบวนการดังนี้ คือ การหล่อคอนกรีตตัวอย่าง การผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน และการติดตั้งแผ่น CFRP และ Strain Gauge โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 วัสดุและคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัสดุหลักที่ใช้สำหรับการศึกษาวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1.1.1 คอนกรีตตัวอย่าง ได้ออกแบบให้มีค่ากำลังอัดประลัย 35 เมกะปาสคาล การตรวจสอบค่ากำลังอัดประลัยโดยการทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง หลังจากผ่านการบ่มเป็นเวลาอย่างน้อย 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 / C39M-18 [19] ซึ่งค่ากำลังอัดประลัยของคอนกรีตตัวอย่างที่ได้นั้นมีค่าเฉลี่ย 37.1 เมกะปาสคาล โดยมีปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย (Concrete mix design) แสดงดังตารางที่ 3.1 สำหรับรายละเอียดแสดงดังภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.1 ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีต

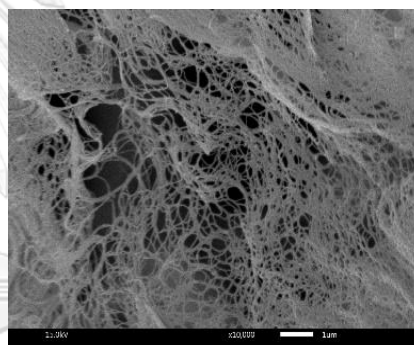
วัสดุ	องค์ประกอบสำหรับคอนกรีต 1 ลบ.ม.
ซีเมนต์	374 kg.
น้ำ	191 kg.
ทราย	740 kg.
หิน (3/4"-#4)	1,150 kg.
สารผสมเพิ่ม (CPAC 20405)	1,870 cc.

3.1.1.2 แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) คือ Sika® carbodur® S512 มีความกว้าง 50 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.2 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติทางกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 3.2

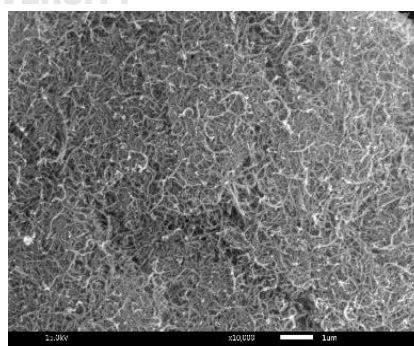
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติทางกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

คุณสมบัติทางกล	ประเภทของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
	Sika® carbodur® S512
กำลังรับแรงดึง (MPa)	3,303
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นรับแรงดึง (MPa)	180,777
ความเครียดรับแรงดึง ณ จุดแตกหัก (%)	1.7

3.1.1.3 ท่อนาโนคาร์บอน มี 2 ประเภท คือ ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว (SWCNTs) และท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น (MWCNTs) แสดงดังรูปที่ 3.3 และมีคุณสมบัติทางกลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 3.3



(ก) ประเภทผนังเดี่ยว (ข) ประเภทผนังเดี่ยวโดย SEM



(ค) ประเภทผนังหลายชั้น

(ง) ประเภทผนังหลายชั้นโดย SEM

รูปที่ 3.2 ลักษณะของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการวิจัย

ตารางที่ 3.3 คุณสมบัติทางกลของท่อนาโนคาร์บอน

คุณสมบัติทางกล	ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน	
	SWCNTs	MWCNTs
เส้นผ่านศูนย์กลาง (nm)	~1.6±0.4	20-40
ความยาว (μm)	>5	10-30
ความบริสุทธิ์ของคาร์บอน (%)	>85	>95
พื้นที่ผิว (m ² /g)	~495	>100

3.1.1.4 อีพอกซี มี 2 ประเภท คือ อีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 (Sikadur® - 330) และอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.65 (Sikadur® - 30) มีคุณสมบัติทางกลของอีพอกซีแสดงดังตารางที่ 3.4 สำหรับอัตราส่วนของปริมาณอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการวิจัย แสดงดังภาคผนวก ข

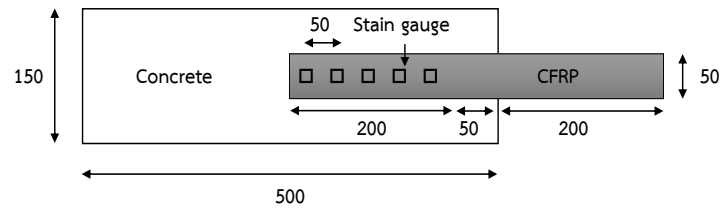
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกลของอีพอกซี

คุณสมบัติทางกล	ประเภทของอีพอกซี	
	Sikadur® - 30	Sikadur® - 330
ความหนาแน่น (kg/l)	1.65	1.30
กำลังรับแรงดึง (MPa)	31	30
ค่าโมดูลัสยืดหยุ่นรับแรงดึง (MPa)	11,200	4,500
ความเครียดรับแรงดึง ณ จุดแตกหัก (%)	1	0.9

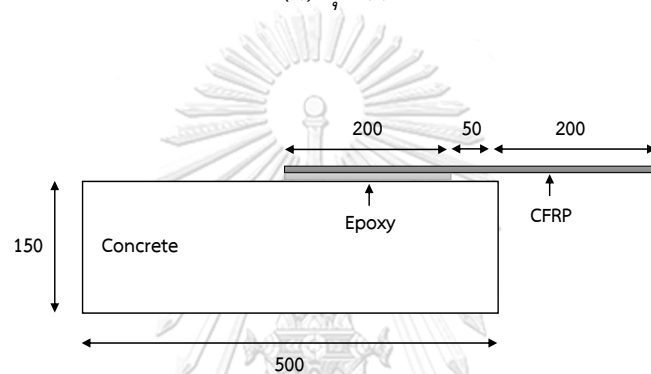
3.1.2 การหล่อคอนกรีตตัวอย่าง

การทดสอบประกอบด้วยคอนกรีตตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 24 ตัวอย่าง โดยมีขนาดหน้าตัดกว้าง 150 มิลลิเมตร ความลึก 150 มิลลิเมตร และมีความยาว 500 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3 การตรวจสอบค่ากำลังอัดประลัยโดยการทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกจำนวนทั้งสิ้น 6 ตัวอย่าง ซึ่งคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร และมีความสูง 300 มิลลิเมตร

สำหรับการหล่อและการบ่มของคอนกรีตตัวอย่างและคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 3.4 และ 3.5 การทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกแสดงดังรูปที่ 3.6



(ก) มุมด้านบน



(ข) มุมด้านข้าง

รูปที่ 3.3 รายละเอียดชุดทดสอบ (หน่วย มิลลิเมตร)



(ก) การหล่อคอนกรีตตัวอย่าง



(ข) การหล่อคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก

รูปที่ 3.4 การหล่อคอนกรีตตัวอย่างและคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก



รูปที่ 3.5 การบ่มคอนกรีตตัวอย่างและคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก



(ก) คอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก (ข) การทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก



(ค) คอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกหลังการทดสอบ

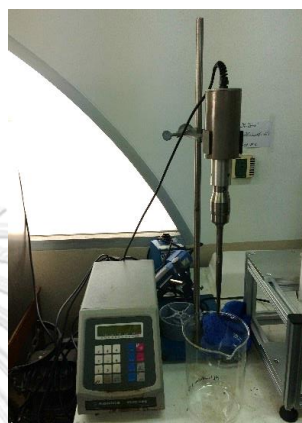
รูปที่ 3.6 การทดสอบคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก

3.1.3 การผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน

การผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน ผู้วิจัยใช้อุปกรณ์ในการผสม คือ เครื่องกวนสาร (Mechanically stirrer) เครื่องอัลตราโซนิก (Ultra-sonicator) และสว่านความเร็วรอบต่ำ (Low speed driller) แสดงดังรูปที่ 3.7



(ก) เครื่องกวนสาร



(ข) เครื่องอัลตราโซนิก



(ค) สว่านความเร็วรอบต่ำ

รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน

โดยแบ่งขั้นตอนการผสมสารเคมีออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. นำสารทั้งสองชนิดคืออีพอกซี (ส่วนประกอบ A) และท่อนาโนคาร์บอน ผสมด้วยเครื่องกวนสาร (Mechanically stirrer) โดยใช้ความถี่ในการกวนที่ 900 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

2. จากนั้นนำมาผสมด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (Ultra-sonicator) เป็นเวลา 15 นาที เพื่อเพิ่มการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนในการผสมกับอีพอกซี หลังจากนั้นเมื่อผสมเสร็จแล้ว บรรจุผลิตภัณฑ์ลงในถุงซิปล็อก แสดงดังรูปที่ 3.8 เพื่อเตรียมใช้งานในขั้นตอนที่ 3

3. เมื่อต้องการใช้งานอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนเป็นวัสดุประสานระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต นำอีพอกซี (ส่วนประกอบ A) และท่อนาโนคาร์บอนจากการผสมสารเคมีในขั้นตอนที่สอง มาผสมกับอีพอกซี (ส่วนประกอบ B) ด้วยสว่านความเร็วรอบต่ำ เป็นเวลา 4 นาที



(ก) ก่อนผสมท่อนาโนคาร์บอน



(ข) หลังผสมท่อนาโนคาร์บอน

รูปที่ 3.8 อีพอกซี (ส่วนประกอบ A) ก่อนและหลังผสมกับท่อนาโนคาร์บอน

3.1.4 การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge)

การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) บนคอนกรีตตัวอย่าง ตัวอย่างคอนกรีตจะต้องมีอายุอย่างน้อย 28 วัน

จากนั้นเตรียมพื้นผิวคอนกรีตโดยการขัดและกำจัดเศษฝุ่นที่ติดอยู่บริเวณพื้นผิวออก แสดงดังรูปที่ 3.9 พื้นผิวคอนกรีตจะต้องแห้งและสะอาด บริเวณมุมของตัวอย่างคอนกรีตจะต้องลบมุมให้มีรัศมีอย่างน้อย 10 มิลลิเมตร ด้วยใบขัดเพชร และมีความชันสูงสุดของพื้นผิวไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ การทำอีพอกซีลงบนพื้นผิวคอนกรีต ใช้เกรียงที่ปริมาณการใช้ 0.7 – 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเมตร โดยทำอีพอกซีทิ้งไว้อย่างน้อย 7 วัน [20] ก่อนการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)



(ก) การขัดพื้นผิวคอนกรีตตัวอย่าง

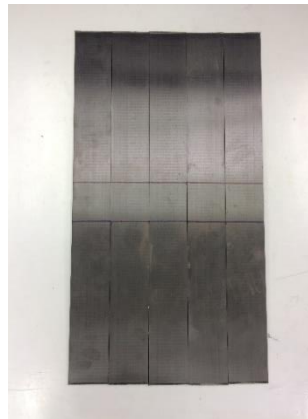


(ข) การกำจัดเศษฝุ่นพื้นผิวคอนกรีตตัวอย่าง

รูปที่ 3.9 การเตรียมพื้นผิวคอนกรีตตัวอย่าง

เมื่อเตรียมพื้นผิวคอนกรีตตัวอย่างเสร็จเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นทำการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ซึ่งมีความกว้าง 50 มิลลิเมตร และความยาว 450 มิลลิเมตร ที่ด้านบนของคอนกรีตตัวอย่าง โดยมีระยะการทำอีพอกซีที่มีความยาว 200 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.3

สำหรับความหนาของอีพอกซีกำหนดไว้ที่ 1 มิลลิเมตร ซึ่งการควบคุมความหนาผู้วิจัยได้ใช้กระดาษฉนวนขนาด 50×50 มิลลิเมตร มีความหนา 1 มิลลิเมตร ติดตั้งบริเวณแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ที่ระยะ 50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ต่อจากระยะยึดเหนี่ยว แสดงดังรูปที่ 3.9 และการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 3.10



(ก) CFRP



(ข) CFRP และกระดาษฉนวน

รูปที่ 3.10 แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และกระดาษฉนวน



(ก) การทำอิพอกซีที่ CFRP



(ข) การทำอิพอกซีที่คอนกรีตตัวอย่าง



(ค) การติดตั้ง CFRP กับคอนกรีตตัวอย่าง

รูปที่ 3.11 การติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP)

ระยะการทาบอกซีที่ความยาว 200 มิลลิเมตร หรือความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล คือ บริเวณที่แรงดึงในการทดสอบตัวอย่างจะถ่ายโอนไปยังแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต ซึ่งเป็นบริเวณที่อาจเกิดการวิบัติจากความเครียดได้ง่าย เป็นความยาวที่ยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีตได้รับความเครียดช่วงเวลาหนึ่งอย่างมีประสิทธิภาพ ในการคำนวณความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลผู้วิจัยได้ใช้สมการของ Chen และ Teng [11] แสดงดังสมการ (3.1) ซึ่งคำนวณได้ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล 183 มิลลิเมตร โดยผู้วิจัยได้ใช้ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่ 200 มิลลิเมตร

$$L_e = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f'_c}}} \quad (3.1)$$

กำหนดให้	L_e	คือ	ความยาวประสิทธิผลของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
	E_f	คือ	โมดูลัสยืดหยุ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
	t_f	คือ	ความหนาของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย
	f'_c	คือ	กำลังรับแรงกดของคอนกรีต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

หลังจากติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนเรียบร้อยแล้ว จะมีการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) ทั้งหมด 5 จุด ซึ่งแต่ละจุดมีระยะห่างกัน 50 มิลลิเมตร แสดงดังภาพที่ 3.3 (ก) โดยคอนกรีตตัวอย่างหลังจากการติดตั้งติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) แสดงดังรูปที่ 3.12



(ก) หลังจากการติดตั้ง CFRP

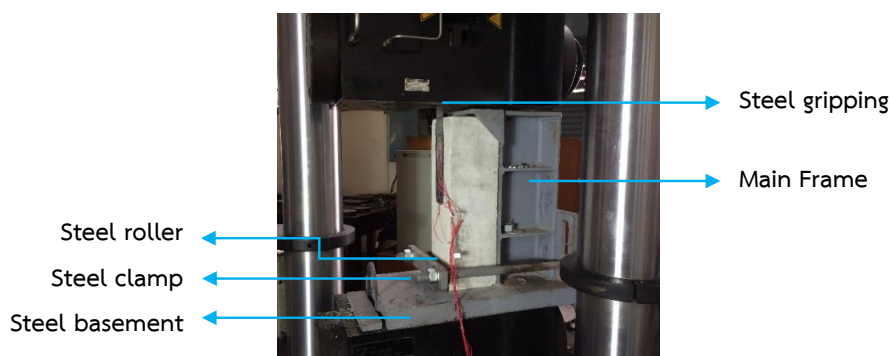


(ข) หลังจากการติดตั้ง Strain Gauge

รูปที่ 3.12 คอนกรีตตัวอย่างหลังจากการติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (CFRP) และเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge)

3.2 การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)

เมื่อทำการหล่อคอนกรีตตัวอย่าง ผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอน และติดตั้งแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain Gauge) ขั้นตอนต่อไป คือ การทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test) แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งประกอบด้วย โครงเหล็กยึดชุดทดสอบ ซึ่งพัฒนาโดยชนะชัยและอัครวัชร [21] และเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) โดยโครงเหล็กยึดชุดทดสอบ ประกอบด้วย ฐานเหล็ก (Steel basement), เหล็กหนีบ (Steel clamp), เหล็กหมุน (Steel roller) และโครงเหล็กหลัก (Main Frame) เพื่อยึดตัวอย่างคอนกรีต โดยมีเหล็กจับ (Steel gripping) จับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและใส่แรงดึงในแนวตั้งด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) จากนั้นคุ้มครองระยะการเคลื่อนตัวของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที จนกระทั่งชุดทดสอบมีการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยและคอนกรีต และบันทึกผลการทดสอบระหว่างแรงกระทำและความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ทั้งนี้ การติดตั้งชุดทดสอบจะต้องควบคุมศูนย์กลางของแรงกระทำในแนวตั้งของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนให้ตรงกับฐานเหล็ก (Steel basement) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดโมเมนต์ในระหว่างการทดสอบ



รูปที่ 3.13 การติดตั้งชุดทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)

3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต โดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน มีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา ดังนี้

3.3.1 ประเภทของท่อนาโนคาร์บอน

3.3.1.1 แบบผนังชั้นเดียว (Single-Walled Carbon Nanotubes, SWCNTs)

3.3.1.2 แบบผนังหลายชั้น (Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)

3.3.2 ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน

3.3.2.1 ท่อนาโนคาร์บอน ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี

3.3.2.2 ท่อนาโนคาร์บอน ปริมาณ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี

3.3.2.3 ท่อนาโนคาร์บอน ปริมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี

3.3.2.1 ท่อนาโนคาร์บอน ปริมาณ 2.0 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี

3.3.3 ประเภทของอีพอกซี

3.3.3.1 อีพอกซี ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร (Sikadur® -330)

3.3.3.2 อีพอกซี ค่าความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร (Sikadur® -30)

3.4 ชุดทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)

การศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตด้วยอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน มีจำนวนชุดทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test) ทั้งหมด 24 ชุด แสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 รายละเอียดชุดทดสอบสำหรับการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test)

ชื่อชุดทดสอบ	จำนวนชุดทดสอบ	ประเภทแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใย	ประเภทท่อนาโนคาร์บอน	ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน	ประเภทอีพอกซี
O-1	2 ชุด	คาร์บอน	-	-	ประเภท 1
S-0.25-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังชั้นเดียว	0.25 %	ประเภท 1
S-0.50-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังชั้นเดียว	0.50 %	ประเภท 1
S-1.00-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังชั้นเดียว	1.00 %	ประเภท 1
S-2.00-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังชั้นเดียว	2.00 %	ประเภท 1
M-0.25-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังหลายชั้น	0.25 %	ประเภท 1
M-0.50-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังหลายชั้น	0.50 %	ประเภท 1
M-1.00-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังหลายชั้น	1.00 %	ประเภท 1
M-2.00-1	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังหลายชั้น	2.00 %	ประเภท 1
O-2	2 ชุด	คาร์บอน	-	-	ประเภท 2
S-0.25-2	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังชั้นเดียว	0.25 %	ประเภท 2
M-0.25-2	2 ชุด	คาร์บอน	ผนังหลายชั้น	0.25 %	ประเภท 2

คำอธิบาย ตารางที่ 3.5 ปริมาณท่อนาโนคาร์บอน คือ เปอร์เซ็นต์ท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ของปริมาณของอีพอกซี, ประเภทที่ 1 คือ อีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร, ประเภทที่ 2 คือ อีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร

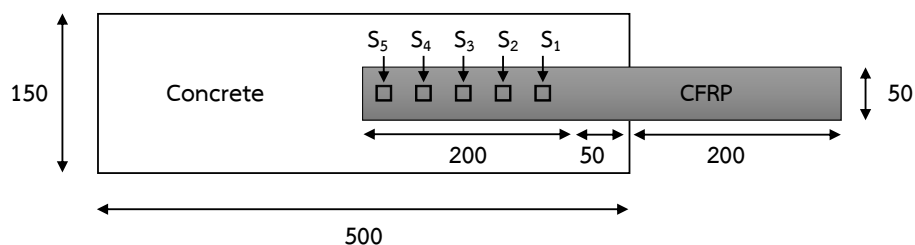
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผลการวิจัย

ในบทนี้ผู้วิจัยได้แบ่งออกเป็น 7 หัวข้อ โดยกล่าวถึง 1. แรงกระทำสูงสุดจากการทดสอบ 2. การกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน 3. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล 4. ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล 5. พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส 6. การวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต และ 7. การตรวจสอบการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM)

4.1 แรงกระทำสูงสุดจากการทดสอบ

จากการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test) ระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตโดยใช้ฮ็อกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนด้วยเครื่องทดสอบยูนิเวอร์แซล (Universal testing machine) โดยผลการทดสอบที่ได้ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด โดยค่าความเครียดที่ได้เป็นค่าความเครียดจากการติดตั้งเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) ตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน 5 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 4.1 และความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.2



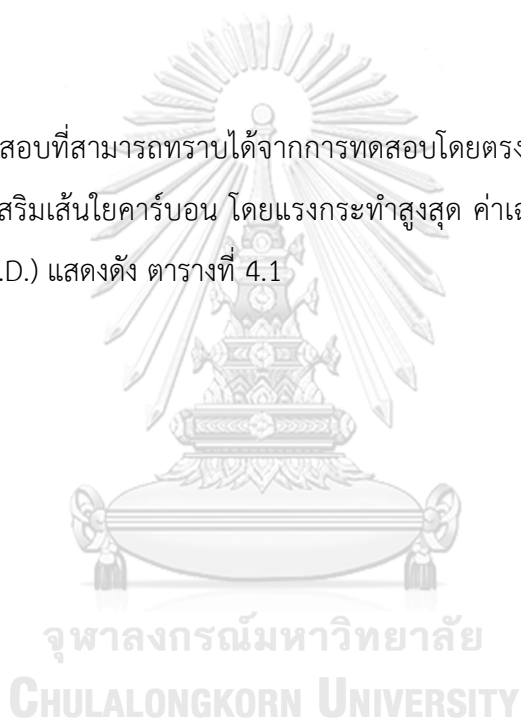
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain gauge)

จากมุมมองด้านบนของตัวอย่างทดสอบ (หน่วย มิลลิเมตร)

คำอธิบายรูปที่ 4.1

กำหนดให้	S_1	คือ	Strain gauge ตำแหน่งที่ 1 ณ ระยะยึดเหนี่ยวที่ 0 มิลลิเมตร
	S_2	คือ	Strain gauge ตำแหน่งที่ 2 ณ ระยะยึดเหนี่ยวที่ 50 มิลลิเมตร
	S_3	คือ	Strain gauge ตำแหน่งที่ 3 ณ ระยะยึดเหนี่ยวที่ 100 มิลลิเมตร
	S_4	คือ	Strain gauge ตำแหน่งที่ 4 ณ ระยะยึดเหนี่ยวที่ 150 มิลลิเมตร
	S_5	คือ	Strain gauge ตำแหน่งที่ 5 ณ ระยะยึดเหนี่ยวที่ 200 มิลลิเมตร

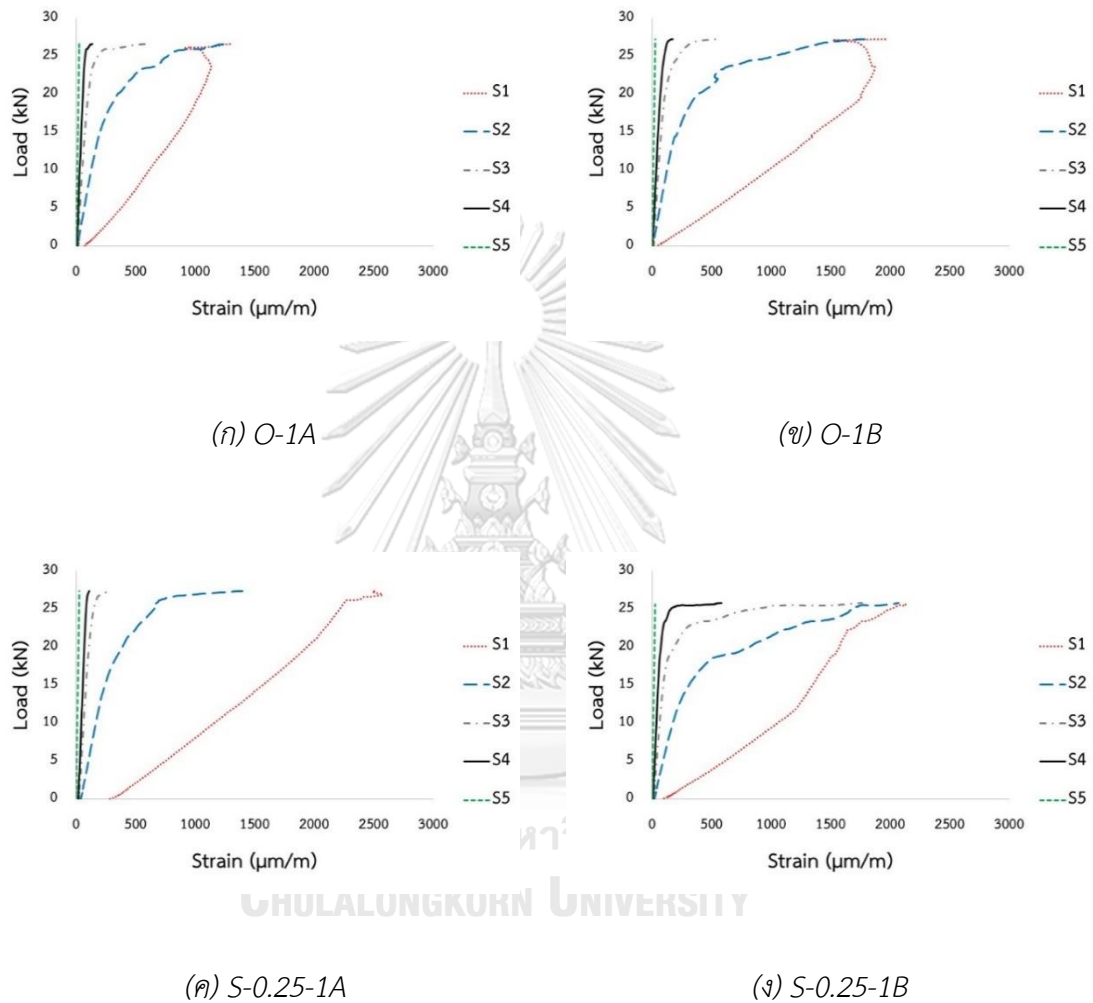
ซึ่งผลการทดสอบที่สามารถทราบได้จากการทดสอบโดยตรงคือแรงกระทำสูงสุดที่กระทำที่ปลายแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยแรงกระทำสูงสุด ค่าเฉลี่ยแรงกระทำสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แสดงดัง ตารางที่ 4.1



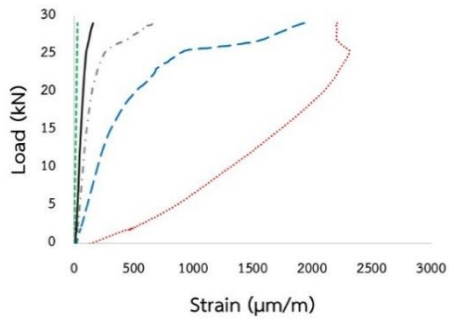
ตารางที่ 4.1 แรงกระทำสูงสุดจากการทดสอบ

ชื่อชุดทดสอบ		แรงกระทำสูงสุด (P_{Max} , kN)	ค่าเฉลี่ย แรงกระทำสูงสุด (kN)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
O-1	O-1A	26.63	26.95	0.45
	O-1B	27.27		
S-0.25-1	S-0.25-1A	27.41	26.62	1.12
	S-0.25-1B	25.83		
S-0.50-1	S-0.50-1A	29.12	26.20	4.14
	S-0.50-1B	23.27		
S-1.00-1	S-1.00-1A	23.58	23.58	-
	S-1.00-1B	N/A		
S-2.00-1	S-2.00-1A	29.09	28.15	1.33
	S-2.00-1B	27.21		
M-0.25-1	M-0.25-1A	27.39	26.00	1.96
	M-0.25-1B	24.62		
M-0.50-1	M-0.50-1A	24.30	24.37	0.10
	M-0.50-1B	24.44		
M-1.00-1	M-1.00-1A	28.23	26.12	2.99
	M-1.00-1B	24.00		
M-2.00-1	M-2.00-1A	26.80	26.87	0.09
	M-2.00-1B	26.93		
O-2	O-2A	47.26	47.26	-
	O-2B	N/A		
S-0.25-2	S-0.25-2A	38.99	37.09	2.69
	S-0.25-2B	35.19		
M-0.25-2	M-0.25-2A	45.70	45.70	-
	M-0.25-2B	N/A		

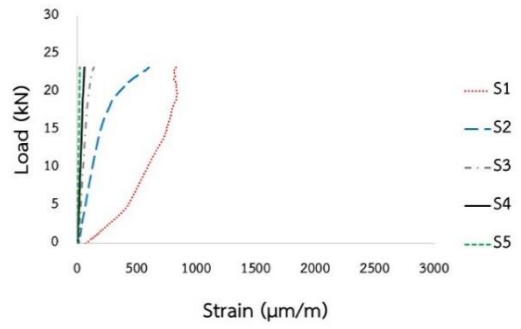
คำอธิบาย ตารางที่ 4.1 ชื่อชุดทดสอบ โดยชื่อที่ไม่ได้ระบุอักษร A และ B คือ ค่าเฉลี่ยของชุดทดสอบแรก (ระบุอักษร A) และชุดทดสอบที่สอง (ระบุอักษร B) และ N/A คือ ไม่ได้ระบุผล เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเทคนิค



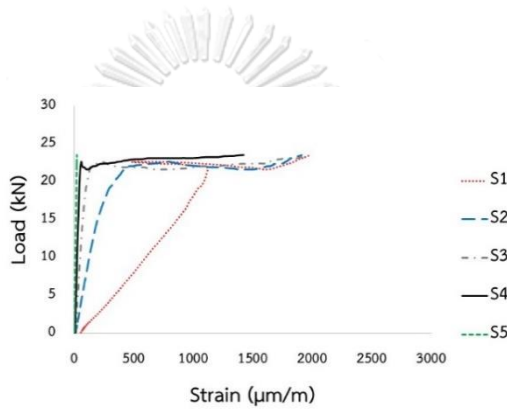
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด



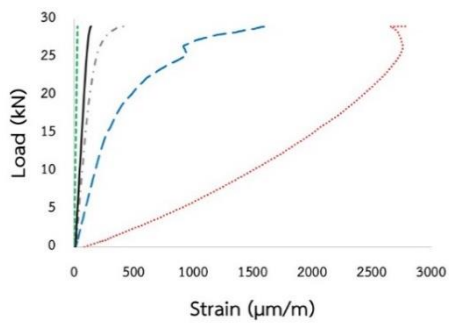
(จ) S-0.50-1A



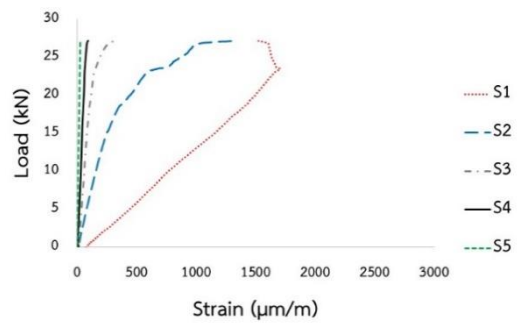
(ฉ) S-0.50-1B



(ช) S-1.00-1A

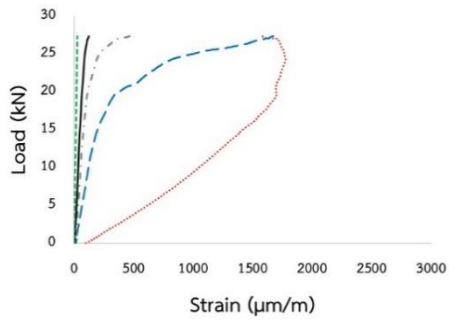


(ซ) S-2.00-1A

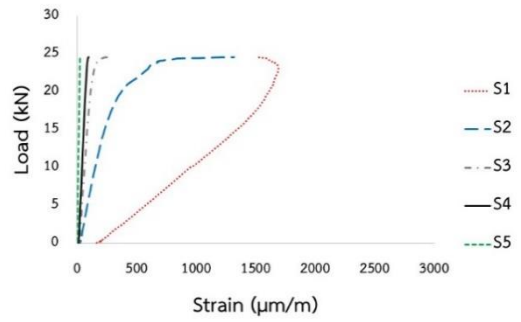


(ฅ) S-2.00-1B

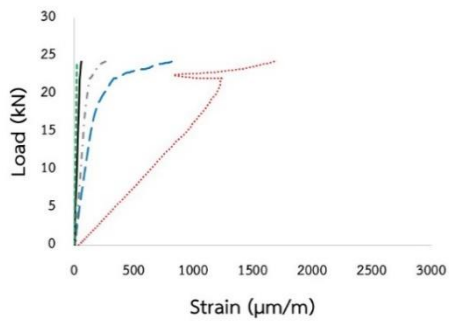
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด (ต่อ)



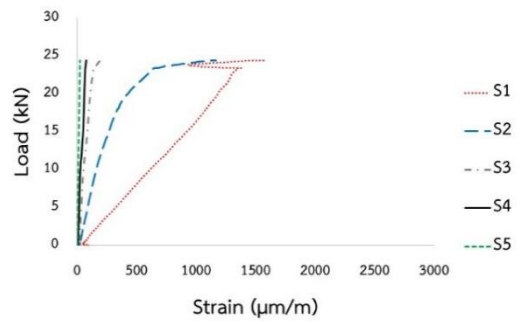
(ญ) M-0.25-1A



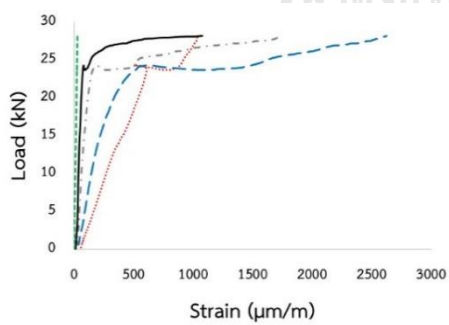
(ฎ) M-0.25-1B



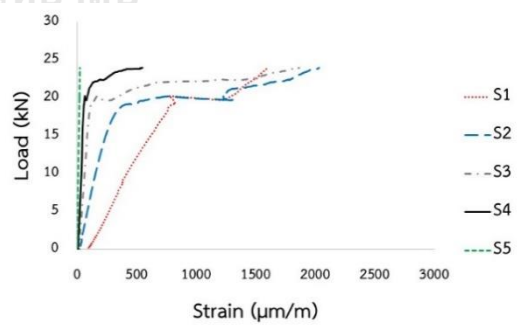
(ฏ) M-0.50-1A



(ฐ) M-0.50-1B

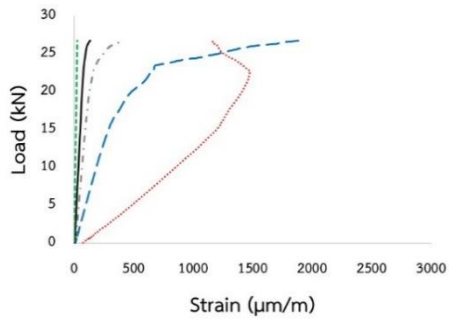


(ฑ) M-1.00-1A

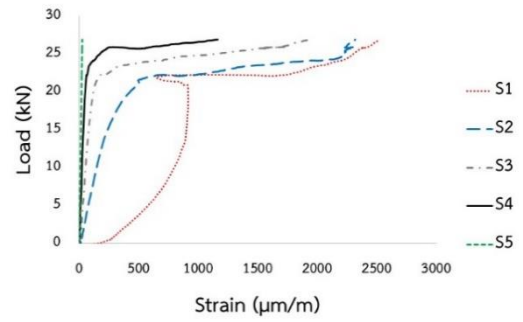


(ฒ) M-1.00-1B

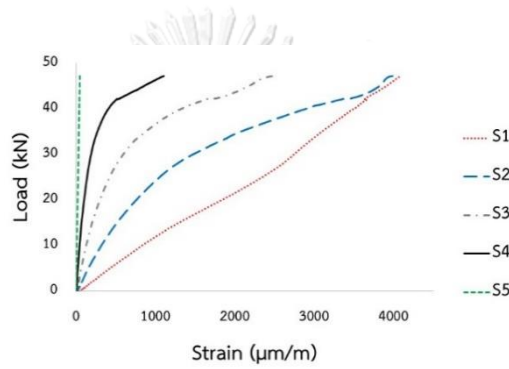
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด (ต่อ)



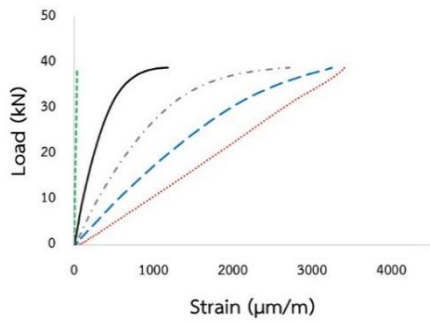
(ณ) M-2.00-1A



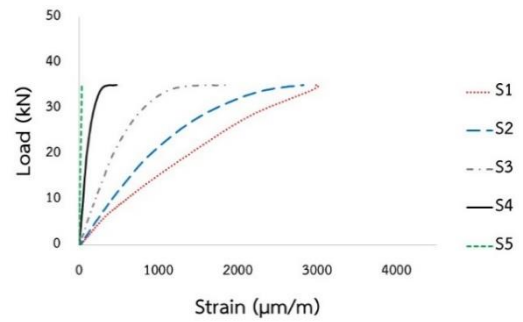
(ด) M-2.00-1B



(ต) O-2A

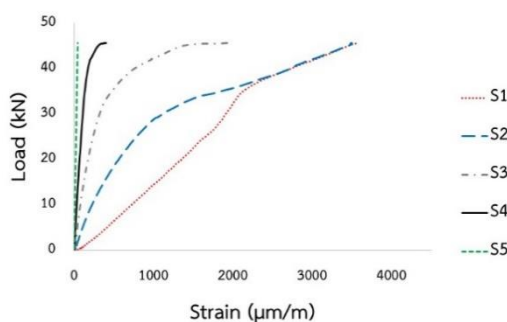


(ถ) S-0.25-2A



(ท) S-0.25-2B

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด (ต่อ)



(ธ) M-0.25-2A

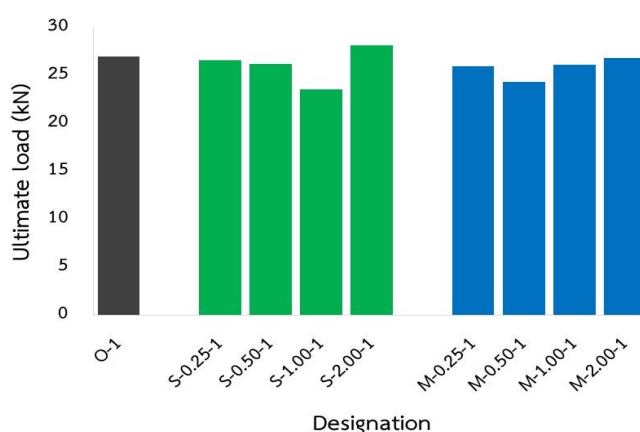
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและความเครียด (ต่อ)

4.1.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนต่อแรงกระทำสูงสุด

แรงกระทำสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.3 พบว่าแรงกระทำสูงสุด มีค่าอยู่ระหว่าง 23.58–28.15 กิโลนิวตัน โดยเมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนที่ประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษาก็อีพอกซีโดยไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-1) ที่ความหนาแน่น 1.30 พบว่าการใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ปริมาณ 0.50 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.50-1 และ S-1.00-1) มีค่าแรงกระทำสูงสุด ลดลง 2.81 และ 12.51 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-1) มีค่าคงที่ สำหรับการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-2.00-1) มีค่าเพิ่มขึ้น 4.45 เปอร์เซ็นต์ และจากการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-1, M-0.50-1 และ M-1.00-1) มีค่าลดลง 3.53, 9.58 และ 3.11 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจากการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-2.00-1) พบว่ามีค่าคงที่

จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนสำหรับการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี มีผลต่อแรงกระทำสูงสุด โดยให้ค่าเพิ่มขึ้นสูงที่สุด คือ 4.45 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนัง

เดี่ยวและผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.50 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอิพอกซี มีค่าแรงกระทำสูงสุดลดลง สำหรับการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอิพอกซี และจากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอิพอกซี พบว่ามีค่าคงที่

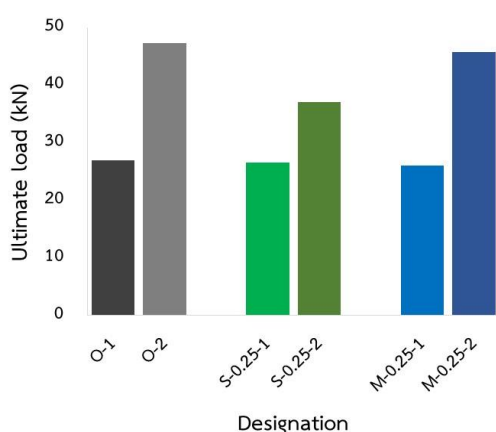


รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดกับประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอน

4.1.2 อิทธิพลของประเภทอิพอกซีต่อแรงกระทำสูงสุด

ประเภทของอิพอกซีจากการใช้อิพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่า แรงกระทำสูงสุดที่อิพอกซีชนิดความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร โดยไม่ใช้ท่อานาโนคาร์บอนเสริมอิพอกซี (O-2) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น 75.33 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอิพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร โดยไม่ใช้ท่อานาโนคาร์บอนเสริมอิพอกซี (O-1) และแรงกระทำสูงสุดของชิ้นตัวอย่างอิพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอิพอกซี (S-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 39.30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอิพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอิพอกซี (S-0.25-1) และการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอิพอกซี (M-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 75.75 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอิพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอิพอกซี (M-0.25-1) แสดงดังรูปที่ 4.4

จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทอีพอกซีมีต่อแรงกระทำสูงสุด โดยการใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 ให้ค่าแรงกระทำสูงสุด สูงกว่าอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 ทั้งนี้การใช้การใส่ท่อไนคาร์บอนทั้งประเภทผนังเดียวและผนังหลายชั้นที่อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 มีแนวโน้มให้ค่าแรงกระทำสูงสุดที่ลดลง



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบแรงกระทำสูงสุดกับประเภทของอีพอกซี

4.2 การกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

การกระจายความเครียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนสามารถตรวจสอบเพื่อหาค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล คือ ระยะที่ความเครียดมีค่าเท่ากับศูนย์ [22] ผู้วิจัยได้แสดงการกระจายความเครียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน ที่แรงกระทำร้อยละ 20, 40, 60, 80 และร้อยละ 100 ของแรงกระทำสูงสุดของแต่ละชุดทดสอบ และหาความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของแต่ละชุดทดสอบจากค่าของความเครียดมีค่าลดลงเท่ากับร้อยละ 97 ของความเครียด [23] ที่ร้อยละของแรงกระทำร้อยละ 20 – 100 ตามที่ได้แบ่งไว้ข้างต้น และหาค่าของความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล ซึ่งค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลของแต่ละชุดทดสอบ ค่าเฉลี่ยความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แสดงดังตารางที่ 4.2

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมีความเครียดสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแรงกระทำ ซึ่งตรงกับตำแหน่งของเครื่องมือ

ตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) ตำแหน่งที่ 1 (S_1) แสดงดังรูปที่ 4.1 ในหัวข้อที่ 4.1 โดยความเครียดจะมีค่าลดลงเมื่อมีระยะออกห่างจากแรงกระทำไปสู่ปลายแผ่นของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

เมื่อเปรียบเทียบความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลด้วยแบบจำลองของ Chen และ Teng [11] ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.183 เมตร พบว่าแบบจำลองนี้มีระยะความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลใกล้เคียงกับค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่หาได้จากการกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนของชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.6

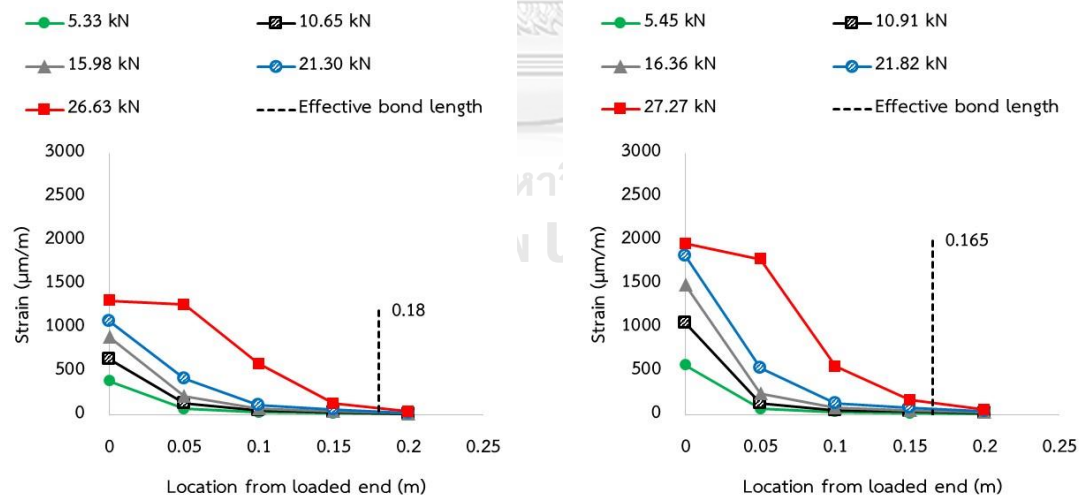
ตารางที่ 4.2 ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล

ชื่อชุดทดสอบ		ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (L_e , m)	ค่าเฉลี่ยความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล (m)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
O-1	O-1A	0.180	0.173	0.011
	O-1B	0.165		
S-0.25-1	S-0.25-1A	0.180	0.178	0.004
	S-0.25-1B	0.175		
S-0.50-1	S-0.50-1A	0.180	0.183	0.004
	S-0.50-1B	0.185		
S-1.00-1	S-1.00-1A	0.160	0.160	-
	S-1.00-1B	N/A		
S-2.00-1	S-2.00-1A	0.170	0.173	0.004
	S-2.00-1B	0.175		
M-0.25-1	M-0.25-1A	0.175	0.178	0.004
	M-0.25-1B	0.180		
M-0.50-1	M-0.50-1A	0.165	0.173	0.011
	M-0.50-1B	0.180		
M-1.00-1	M-1.00-1A	0.175	0.173	0.004
	M-1.00-1B	0.170		

ตารางที่ 4.2 ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ (ต่อ)

ชื่อชุดทดสอบ		ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ (L_e , m)	ค่าเฉลี่ยความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ (m)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.)
O-2	O-2A	0.180	0.180	-
	O-2B	N/A		
S-0.25-2	S-0.25-2A	0.185	0.183	0.004
	S-0.25-2B	0.180		
M-0.25-2	M-0.25-2A	0.170	0.170	-
	M-0.25-2B	N/A		

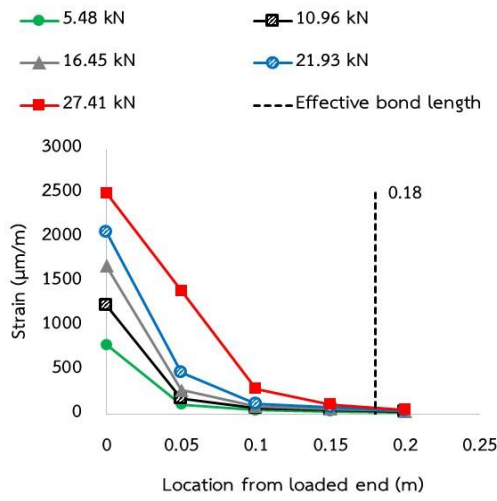
คำอธิบาย ตารางที่ 4.2 ชื่อชุดทดสอบ โดยชื่อที่ไม่ได้ระบุอักษร A และ B คือ ค่าเฉลี่ยของชุดทดสอบแรก (ระบุอักษร A) และชุดทดสอบที่สอง (ระบุอักษร B) และ N/A คือ ไม่ได้ระบุผล เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเทคนิค



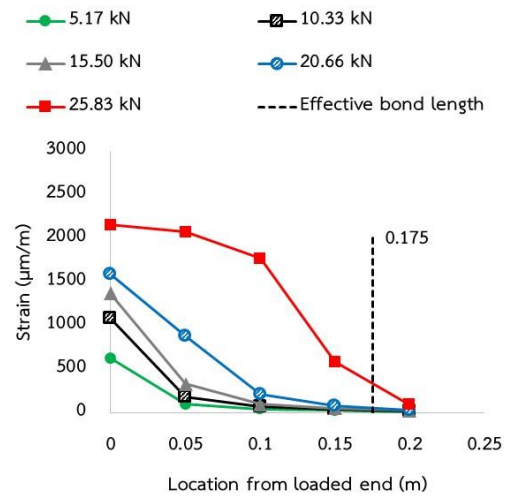
(ก) O-1A

(ข) O-1B

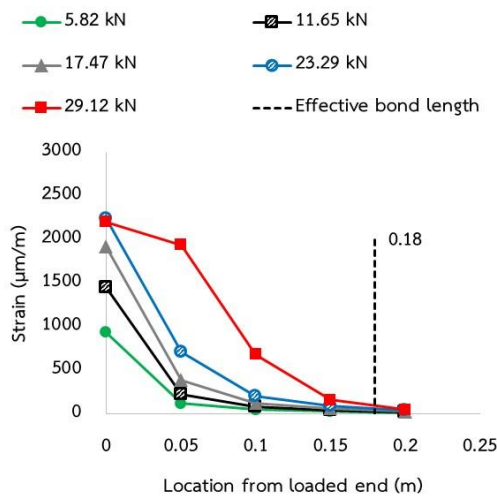
รูปที่ 4.5 การกระจายความเค้นบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน



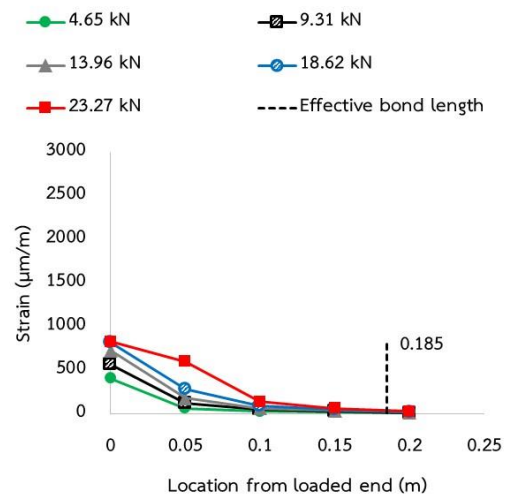
(ค) S-0.25-1A



(ง) S-0.25-1B

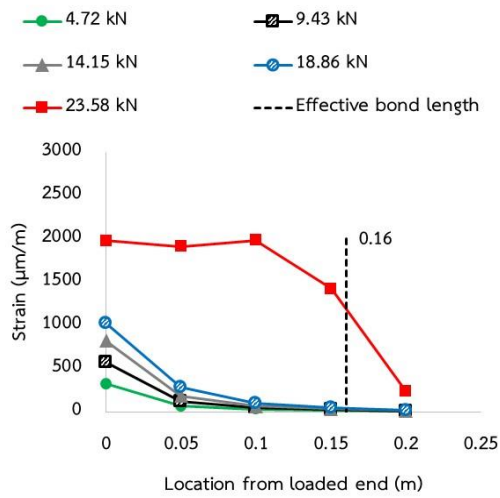


(จ) S-0.50-1A

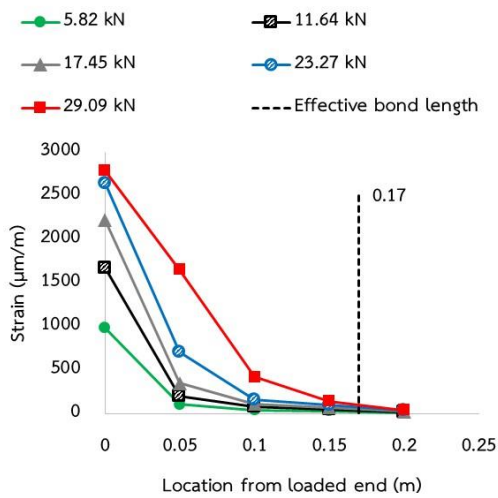


(ฉ) S-0.50-1B

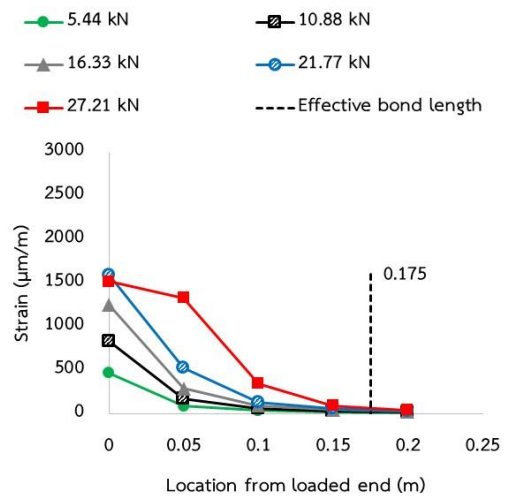
รูปที่ 4.5 การกระจายความเคียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (ต่อ)



(ข) S-1.00-1A

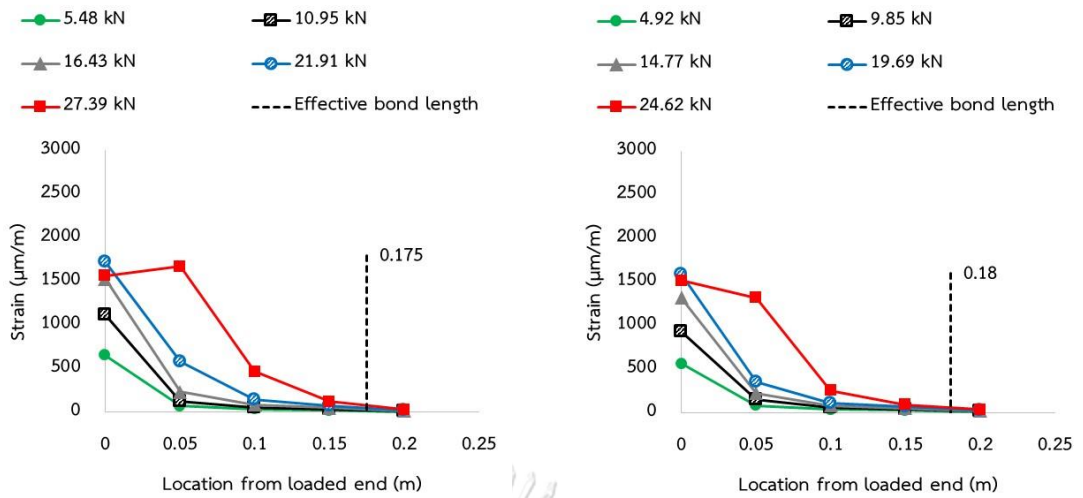


(ค) S-2.00-1A



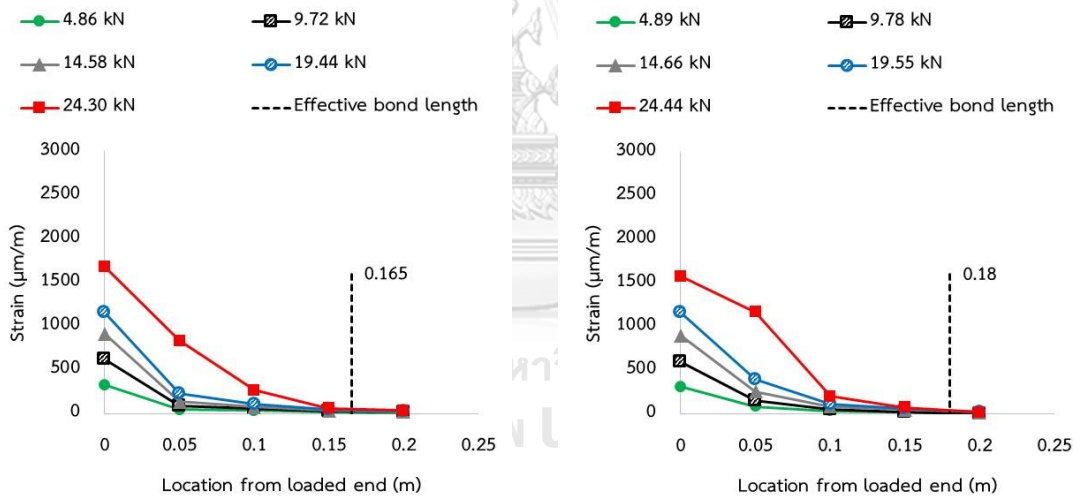
(ฅ) S-2.00-1B

รูปที่ 4.5 การกระจายความเค้นบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (ต่อ)



(ญ) M-0.25-1A

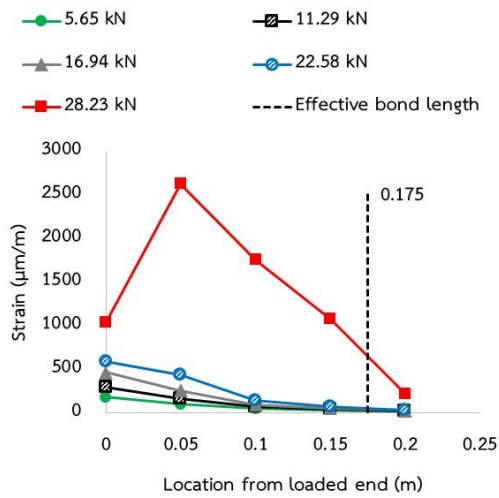
(ฎ) M-0.25-1B



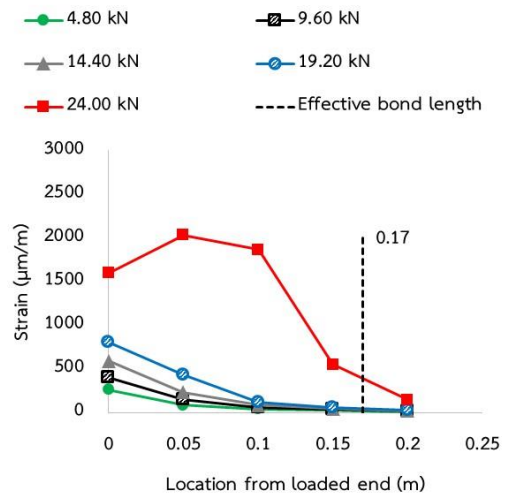
(ฏ) M-0.50-1A

(ฐ) M-0.50-1B

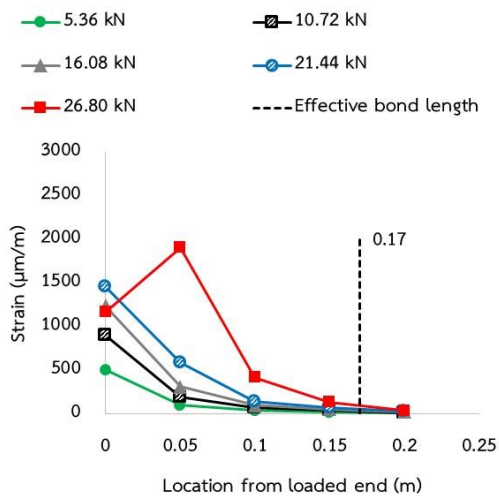
รูปที่ 4.5 การกระจายความเค้นบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (ต่อ)



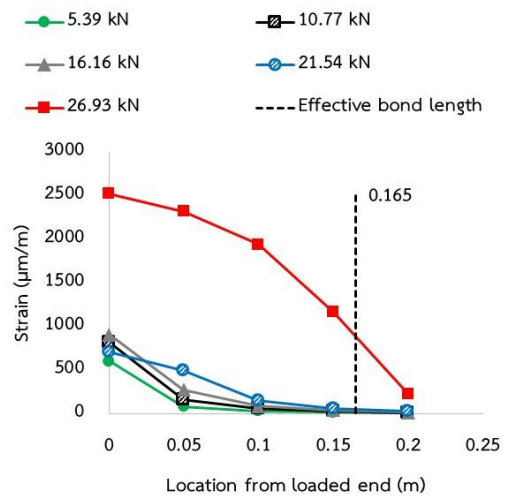
(จ) M-1.00-1A



(ต) M-1.00-1B

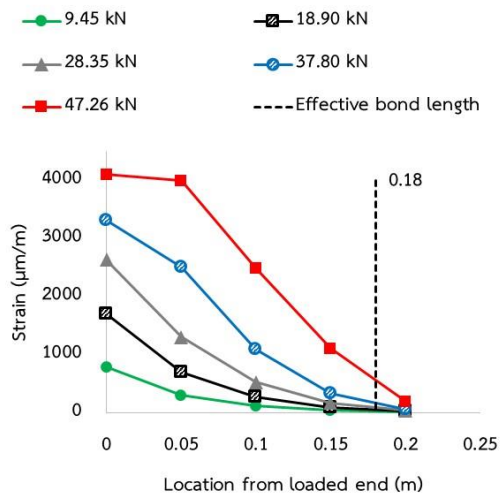


(ฉ) M-2.00-1A

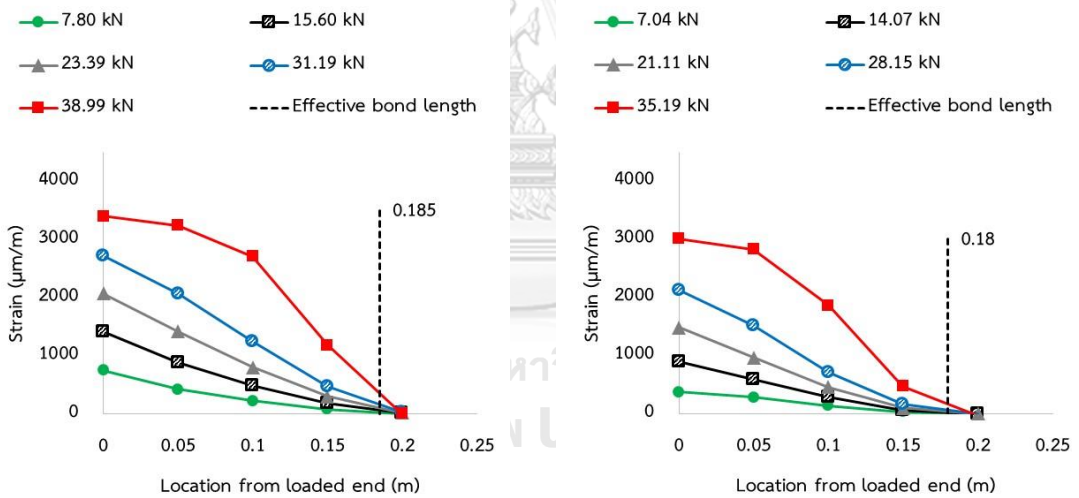


(ค) M-2.00-1B

รูปที่ 4.5 การกระจายความเคียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (ต่อ)



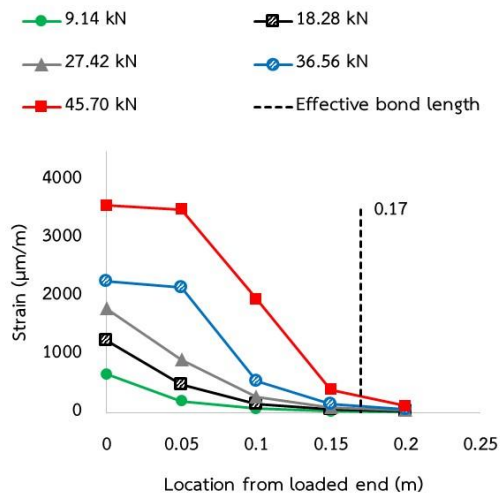
(ด) O-2A



(ถ) S-0.25-2A

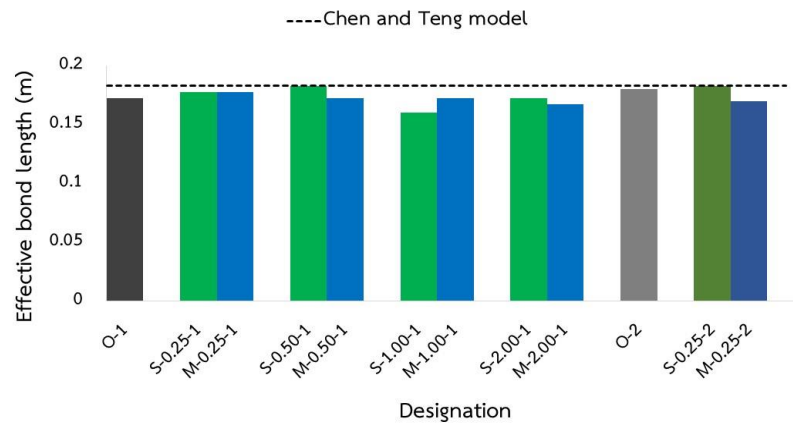
(ท) S-0.25-2B

รูปที่ 4.5 การกระจายความเค้นบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (ต่อ)



(จ) M-0.25-2A

รูปที่ 4.5 การกระจายความเครียดบนแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (ต่อ)

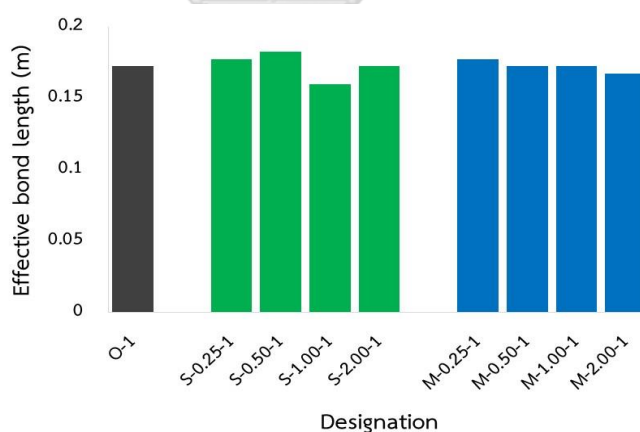


รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ

4.2.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่มีต่อความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ีพอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิภาพมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่

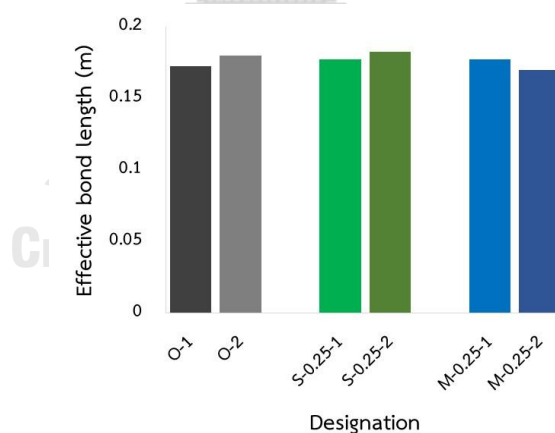
ระหว่าง 0.160 - 0.183 เมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบอีพอกซีเสริมท่อานาโนคาร์บอนที่ประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษากับอีพอกซีโดยไม่ใช้ท่อานาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-1) ที่ความหนาแน่น 1.30 พบว่าการใช้ปริมาณของท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ปริมาณ 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-1 และ S-0.50-1) มีค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลเพิ่มขึ้น 2.90 และ 5.80 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-1.00-1) มีค่าลดลง 7.25 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-2.00-1) พบว่ามีค่าคงที่จากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.25 ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-1) มีค่าเพิ่มขึ้น 2.90 เปอร์เซ็นต์ จากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-2.00-1) มีค่าลดลง 2.90 เปอร์เซ็นต์ และจากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.50 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ในอีพอกซี พบว่ามีค่าคงที่ (M-0.50-1 และ M-1.00-1) จึงสรุปได้ว่า อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอนที่ไม่มีผลต่อความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลกับประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอน

4.2.2 อิทธิพลของประเภทของอีพอกซีที่มีต่อความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล

จากการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่ามีความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.170 – 0.183 ซึ่งความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-2) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น 4.35 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 โดยไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-1) และความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 2.82 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-1) และการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-2) มีค่าลดลง 4.23 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-1) แสดงดังรูปที่ 4.8 จึงสรุปได้ว่า อิทธิพลของประเภทของอีพอกซีไม่มีผลต่อความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลกับประเภทของอีพอกซี

4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล สามารถหาค่าการเลื่อนไถลสูงสุด จากรูปที่ 4.9 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล ณ ตำแหน่งใกล้กับแรงกระทำที่ปลาย

แผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนซึ่งตรงกับตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) ตำแหน่งที่ 1 (S_1) แสดงดังรูปที่ 4.1 ในหัวข้อที่ 4.1 สำหรับการเลื่อนไถลได้มาจากการคำนวณดังสมการที่ (2.12) ในหัวข้อที่ 2.5.3 และการเลื่อนไถลสูงสุด คือ ระยะสูงสุดจากการเลื่อนไถลระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนกับคอนกรีตขณะเกิดแรงกระทำ ก่อนจะเกิดการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ [24] ซึ่งการเลื่อนไถลสูงสุดของชุดทดสอบ ค่าเฉลี่ยการเลื่อนไถลสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แสดงดังตารางที่ 4.3

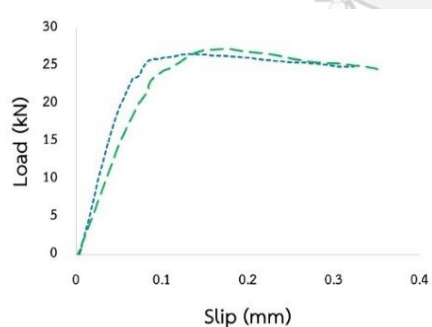
ตารางที่ 4.3 การเลื่อนไถลสูงสุด

ชื่อชุดทดสอบ		การเลื่อนไถลสูงสุด (S_{max} , mm)	ค่าเฉลี่ย การเลื่อนไถลสูงสุด (mm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
O-1	O-1A	0.323	0.337	0.020
	O-1B	0.351		
S-0.25-1	S-0.25-1A	0.367	0.353	0.019
	S-0.25-1B	0.340		
S-0.50-1	S-0.50-1A	0.391	0.355	0.050
	S-0.50-1B	0.320		
S-1.00-1	S-1.00-1A	0.328	0.328	-
	S-1.00-1B	N/A		
S-2.00-1	S-2.00-1A	0.345	0.340	0.007
	S-2.00-1B	0.335		
M-0.25-1	M-0.25-1A	0.321	0.320	0.002
	M-0.25-1B	0.319		
M-0.50-1	M-0.50-1A	0.292	0.313	0.029
	M-0.50-1B	0.333		
M-1.00-1	M-1.00-1A	0.324	0.311	0.018
	M-1.00-1B	0.298		

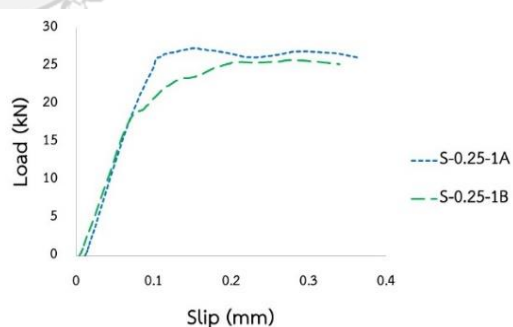
ตารางที่ 4.3 การเลื่อนไถลสูงสุด (ต่อ)

ชื่อชุดทดสอบ		การเลื่อนไถลสูงสุด (S_{max} , mm)	ค่าเฉลี่ย การเลื่อนไถลสูงสุด (mm)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
M-2.00-1	M-2.00-1A	0.367	0.362	0.008
	M-2.00-1B	0.356		
O-2	O-2A	0.538	0.538	-
	O-2B	N/A		
S-0.25-2	S-0.25-2A	0.450	0.408	0.078
	S-0.25-2B	0.367		
M-0.25-2	M-0.25-2A	0.419	0.419	-
	M-0.25-2B	N/A		

คำอธิบาย ตารางที่ 4.3 ชื่อชุดทดสอบ โดยชื่อที่ไม่ได้ระบุอักษร A และ B คือ ค่าเฉลี่ยของชุดทดสอบแรก (ระบุอักษร A) และชุดทดสอบที่สอง (ระบุอักษร B) และ N/A คือ ไม่ได้ระบุผล เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเทคนิค

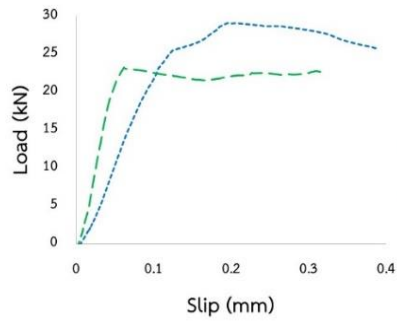


(ก) O-1

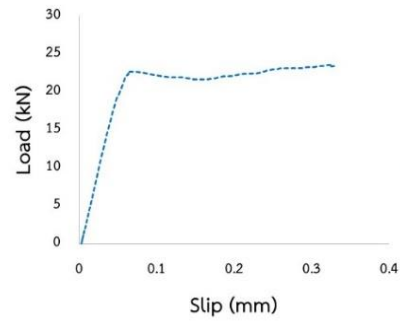


(ข) S-0.25-1

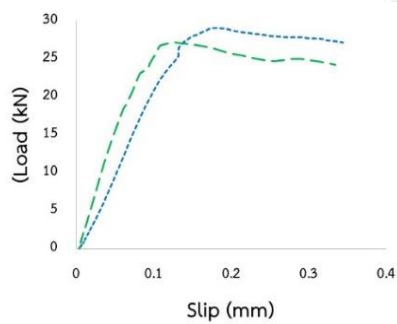
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล



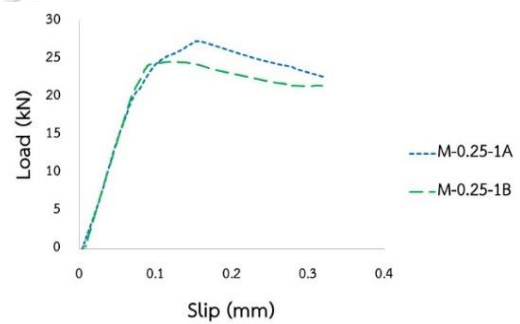
(ค) S-0.50-1



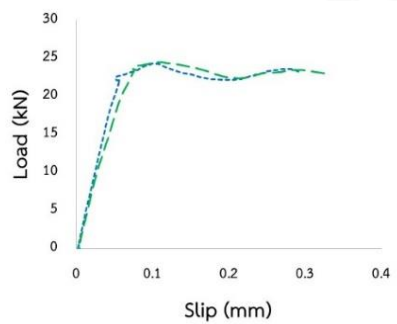
(ง) S-1.00-1



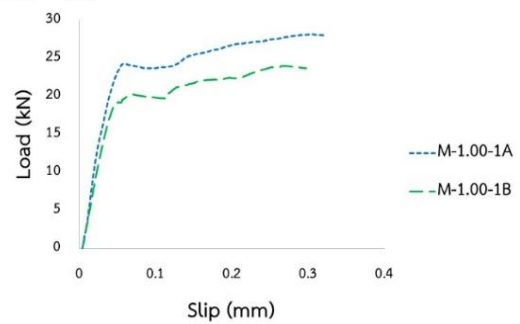
(จ) S-2.00-1



(ฉ) M-0.25-1

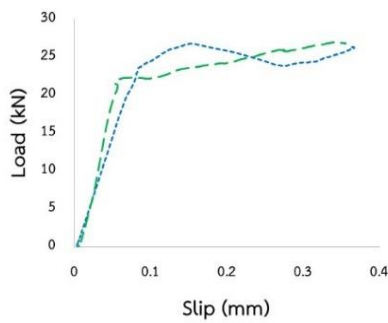


(ช) M-0.50-1

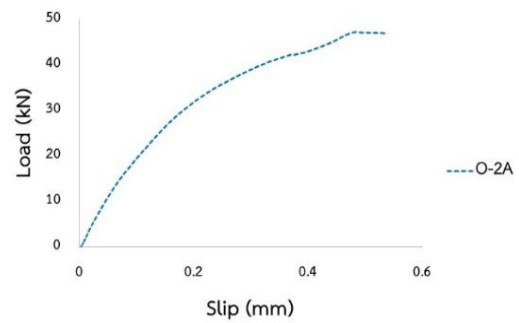


(ซ) M-1.00-1

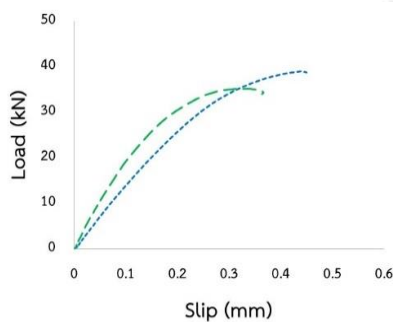
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล (ต่อ)



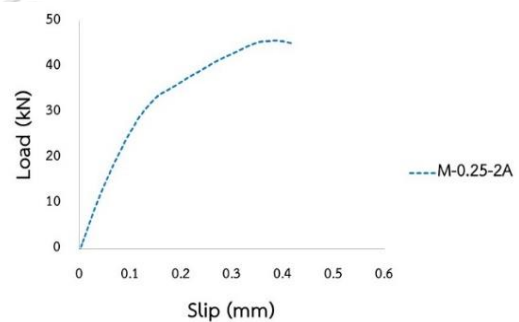
(ฉ) M-2.00-1



(ญ) O-2A



(ฎ) S-0.25-2



(ฏ) M-0.25-2

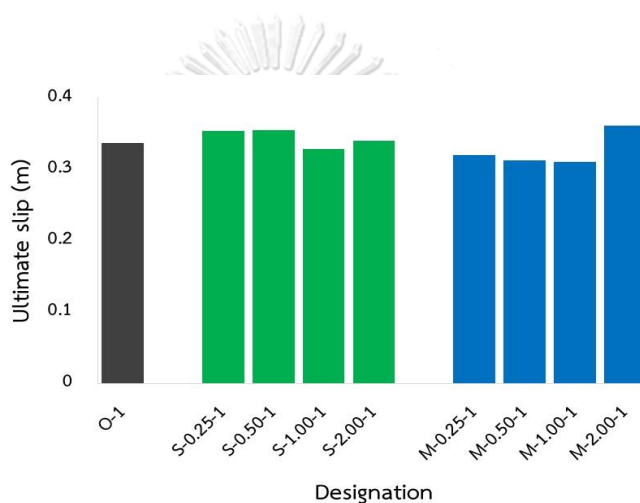
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเลื่อนไถล (ต่อ)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.3.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนต่อการเลื่อนไถลสูงสุด

เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน ที่ีพอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าการเลื่อนไถลสูงสุด มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.311- 0.362 มิลลิเมตร โดยเมื่อเปรียบเทียบกับพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนที่ประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษากับพอกซีโดยไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมพอกซี (O-1) ที่ความหนาแน่น 1.30 พบว่าการใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนประเภทหนึ่งเดียวที่ปริมาณ 0.25 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณพอกซี (S-0.25-1 และ S-0.50-1) มีค่าการเลื่อนไถลสูงสุดเพิ่มขึ้น 4.81 และ 5.40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และจากการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทหนึ่งเดียว 1.00

เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-1.00-1) มีค่าลดลง 2.60 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-2.00-1) พบว่ามีค่าคงที่ จากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-2.00-1) มีค่าเพิ่มขึ้น 7.24 เปอร์เซ็นต์ และจากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.25, 0.50 และ 1.00 เปอร์เซ็นต์ในอีพอกซี (M-0.25-1, M-0.50-1 และ M-1.00-1) พบว่ามีค่าลดลง 5.06, 7.25 และ 7.86 ตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอนมีผลต่อการเลื่อนไถลสูงสุดเพียงเล็กน้อย



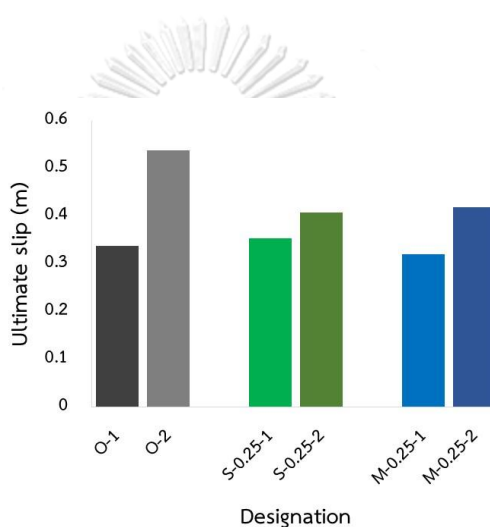
รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบการเลื่อนไถลสูงสุดกับประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอน

4.3.2 อิทธิพลของประเภทอีพอกซีต่อการเลื่อนไถลสูงสุด

ประเภทของอีพอกซีจากการใช้อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่า การเลื่อนไถลสูงสุดที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 มีค่าการเลื่อนไถลสูงสุดที่สูงกว่าอีพอกซีความหนาแน่น 1.30 สำหรับอีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยไม่ใช้ท่อานาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-2) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น 59.58 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 โดยไม่ใช้ท่อานาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-1) และการเลื่อนไถลสูงสุด ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 15.50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-1) และการใช้ท่อานาโนคาร์บอน

ประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 30.95 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อนานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-1) แสดงดังรูปที่ 4.11

จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทอีพอกซีมีต่อการเลื่อนไถลสูงสุด โดยการใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 ให้ค่าการเลื่อนไถลสูงสุด สูงกว่าอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 ทั้งนี้การใช้การใช้นาโนคาร์บอนทั้งประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นที่อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 มีแนวโน้มให้การเลื่อนไถลสูงสุดที่ลดลง



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบการเลื่อนไถลสูงสุดกับประเภทของอีพอกซี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล

ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลของชุดทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.12 สามารถหาค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด โดยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถลได้มาจากการคำนวณดังสมการที่ (2.11) และ (2.12) ในหัวข้อที่ 2.5.3 ซึ่งหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด [16] สำหรับงานวิจัยนี้ได้คำนวณหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ระยะยึดเหนี่ยว 0 - 0.05 เมตร (ตรงกับ Strain gauge ตำแหน่งที่ 1 ถึง 2), ที่ระยะยึดเหนี่ยว 0.05 - 0.10 เมตร (ตรงกับ Strain gauge ตำแหน่งที่ 2 ถึง 3), ที่ระยะยึดเหนี่ยว 0.10 - 0.15 เมตร (ตรงกับ Strain gauge ตำแหน่งที่ 3 ถึง 4) และที่ระยะยึดเหนี่ยว 0.15 - 0.20 เมตร (ตรงกับ Strain gauge ตำแหน่งที่ 4 ถึง 5) โดยตำแหน่งของเครื่องมือตรวจวัดความเครียด (Strain gauge) แสดงดัง

รูปที่ 4.1 ในหัวข้อที่ 4.1 โดยงานวิจัยนี้ได้คำนวณหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดจากค่าเฉลี่ยของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดตามระยะยึดเหนี่ยวสูงสุดที่กล่าวไปข้างต้น ซึ่งหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ค่าเฉลี่ยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แสดงดังตารางที่ 4.4

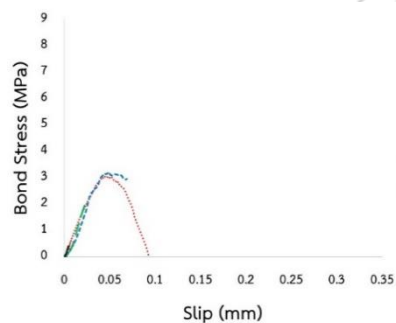
ตารางที่ 4.4 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด

ชื่อชุดทดสอบ		หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (τ_{Max} , MPa)	ค่าเฉลี่ยหน่วยแรง ยึดเหนี่ยวสูงสุด (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
O-1	O-1A	2.16	2.78	0.87
	O-1B	3.39		
S-0.25-1	S-0.25-1A	3.28	3.64	0.51
	S-0.25-1B	4.00		
S-0.50-1	S-0.50-1A	3.77	2.50	1.79
	S-0.50-1B	1.23		
S-1.00-1	S-1.00-1A	4.35	4.35	-
	S-1.00-1B	N/A		
S-2.00-1	S-2.00-1A	3.88	3.22	0.94
	S-2.00-1B	2.56		
M-0.25-1	M-0.25-1A	3.30	3.02	0.40
	M-0.25-1B	2.74		
M-0.50-1	M-0.50-1A	1.89	1.98	0.13
	M-0.50-1B	2.07		
M-1.00-1	M-1.00-1A	3.58	3.58	0.00
	M-1.00-1B	3.58		
M-2.00-1	M-2.00-1A	3.04	3.99	1.35
	M-2.00-1B	4.95		
O-2	O-2A	5.81	5.81	-
	O-2B	N/A		

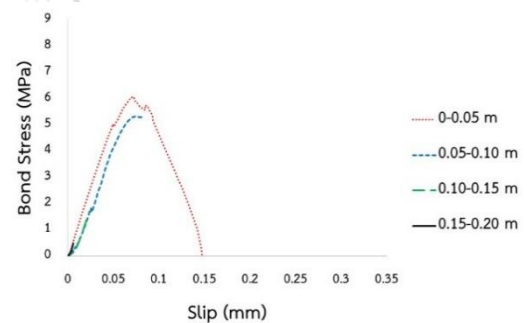
ตารางที่ 4.4 หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (ต่อ)

ชื่อชุดทดสอบ		หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด (τ_{Max} , MPa)	ค่าเฉลี่ยหน่วยแรง ยึดเหนี่ยวสูงสุด (MPa)	ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
S-0.25-2	S-0.25-2A	4.71	4.47	0.33
	S-0.25-2B	4.24		
M-0.25-2	M-0.25-2A	5.24	5.24	-
	M-0.25-2B	N/A		

คำอธิบาย ตารางที่ 4.4 ชื่อชุดทดสอบ โดยชื่อที่ไม่ได้ระบุอักษร A และ B คือ ค่าเฉลี่ยของชุดทดสอบแรก (ระบุอักษร A) และชุดทดสอบที่สอง (ระบุอักษร B) และ N/A คือ ไม่ได้ระบุผล เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเทคนิค

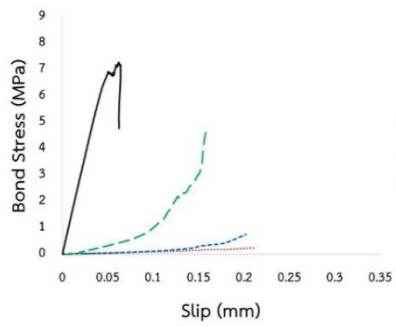


(ก) O-1A

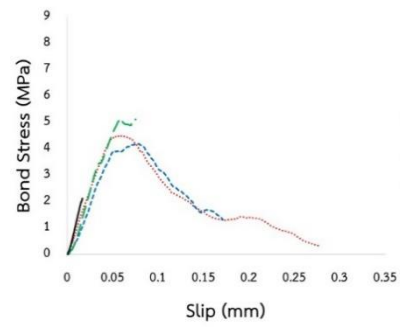


(ข) O-1B

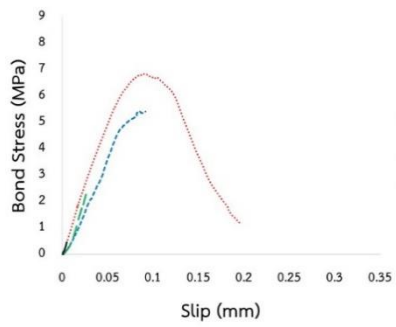
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล



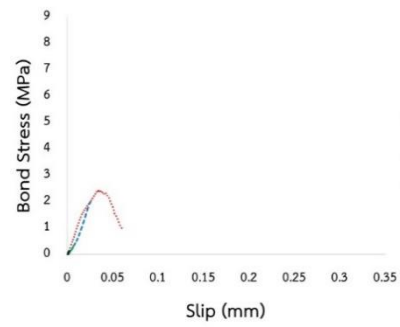
(ค) S-0.25-1A



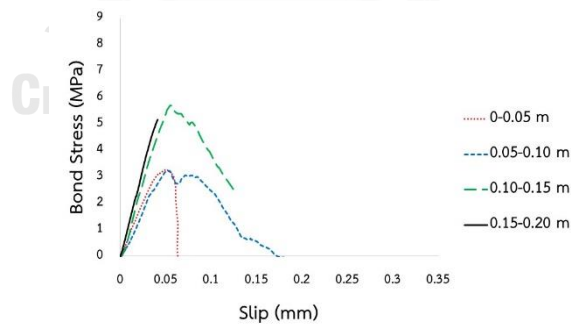
(ง) S-0.25-1B



(จ) S-0.50-1A

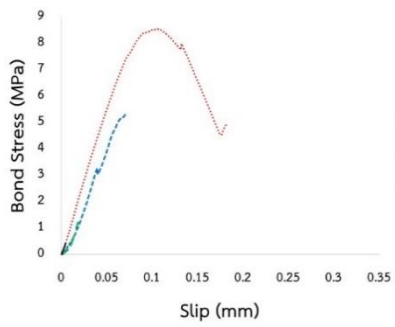


(ฉ) S-0.50-1B

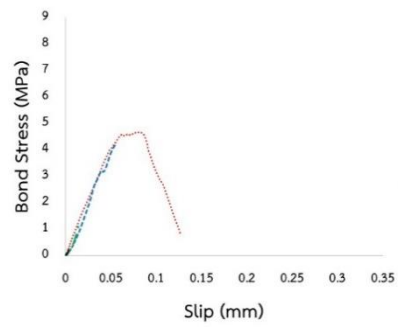


(ช) S-1.00-1A

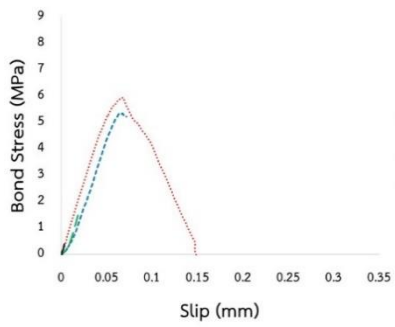
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล (ต่อ)



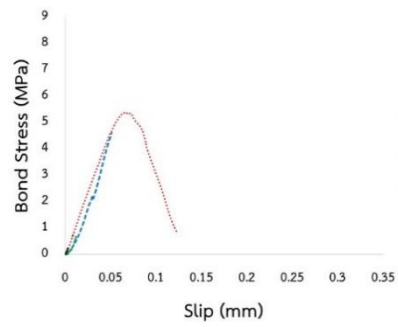
(จ) S-2.00-1A



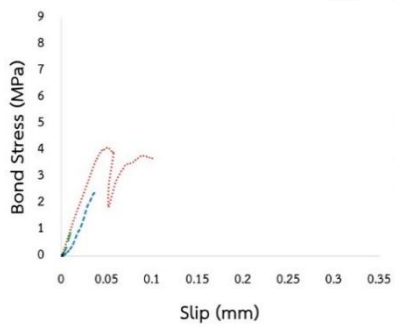
(ฉ) S-2.00-1B



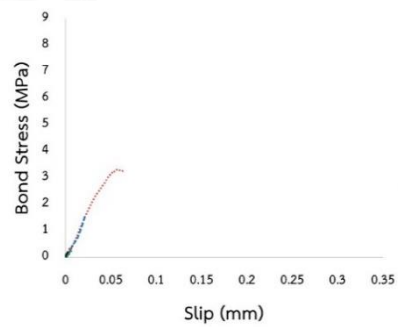
(ญ) M-0.25-1A



(ฎ) M-0.25-1B

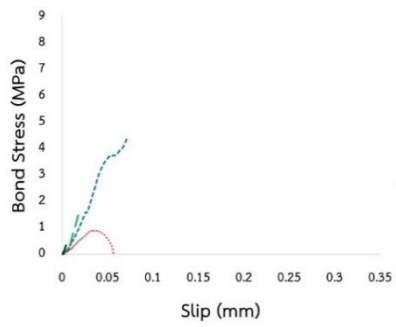


(ฏ) M-0.50-1A

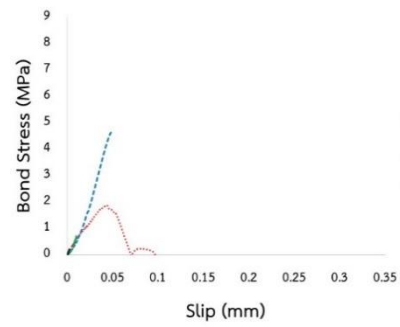


(ฐ) M-0.50-1B

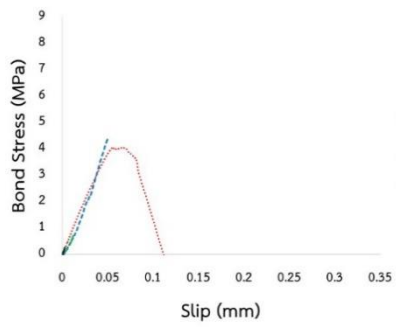
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล (ต่อ)



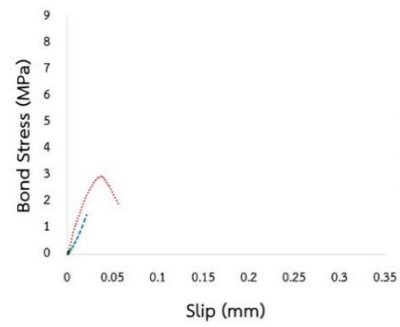
(ข) M-1.00-1A



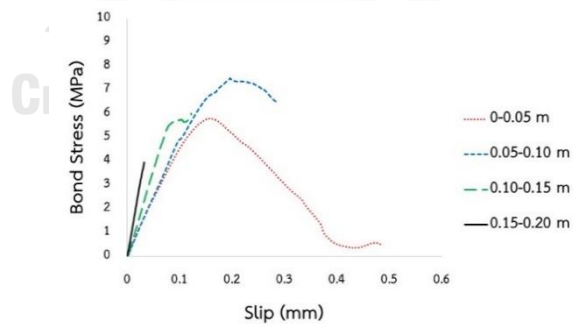
(ค) M-1.00-1B



(ณ) M-2.00-1A

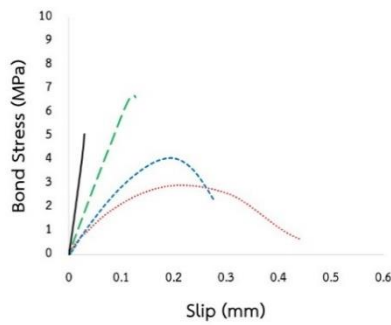


(ด) M-2.00-1B

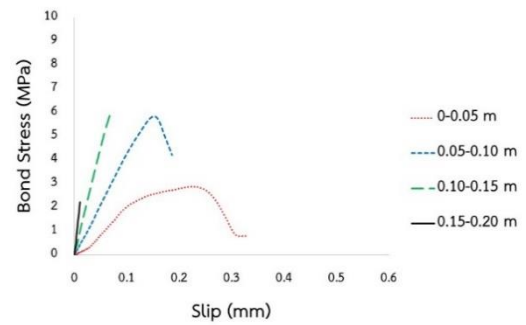


(ต) O-2A

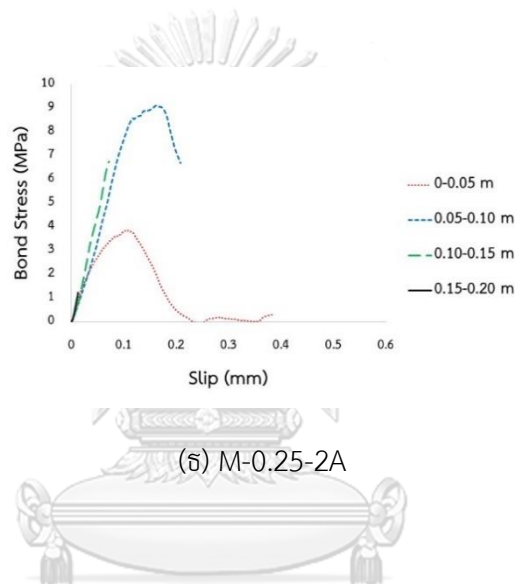
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล (ต่อ)



(ก) S-0.25-2A



(ข) S-0.25-2B



(ค) M-0.25-2A

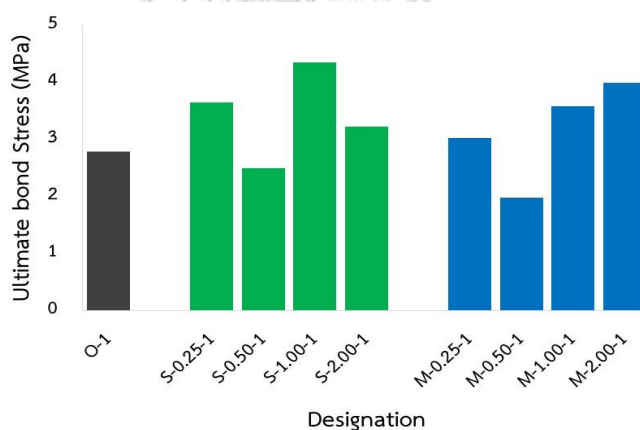
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไถล (ต่อ)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อคาร์บอนต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด

เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อคาร์บอนของตัวอย่างที่ออฟอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด มีค่าอยู่ระหว่าง 1.98 – 4.35 เมกะปาสคาล โดยเมื่อเปรียบเทียบกับออฟอกซีเสริมท่อคาร์บอนที่ประเภทและปริมาณของท่อคาร์บอนที่ใช้ในการศึกษากับออฟอกซีโดยไม่ใช้ท่อคาร์บอนเสริมออฟอกซี (O-1) ที่ความหนาแน่น 1.30 พบว่าการใช้ปริมาณของท่อคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ปริมาณ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณออฟอกซี (S-0.50-1) มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ลดลง 10.07 เปอร์เซ็นต์สำหรับการใช้ท่อคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25, 1.00 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ

อีพอกซี (S-0.25-1, S-1.00-1 และ S-2.00-1) หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้น 30.94, 56.47 และ 15.83 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจากการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นโดยจากการใช้ปริมาณของท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.50 ของปริมาณอีพอกซี (M-0.50-1) มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ลดลง 28.78 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25, 1.00 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-1, M-1.00-1 และ M-2.00-1) มีค่าเพิ่มขึ้น 8.63, 28.78 และ 43.53 เปอร์เซ็นต์ จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอนมีผลต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด โดยการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี ให้ค่าเพิ่มขึ้นสูงที่สุด 56.47 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นที่ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซีให้ค่าที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

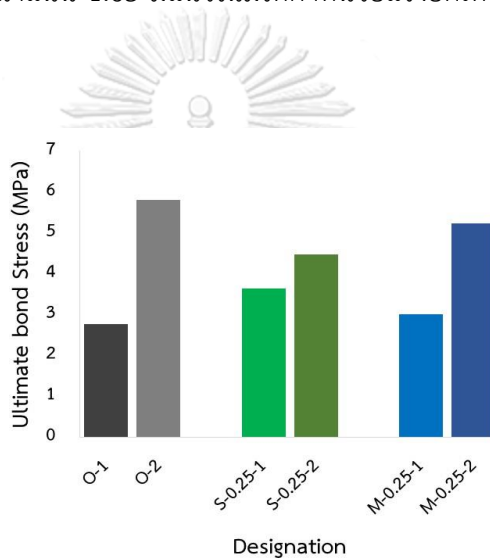


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดกับประเภทและปริมาณของท่อานาโนคาร์บอน

4.4.2 อิทธิพลของประเภทอีพอกซีต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด

จากการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่า หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยไม่ใช้ท่อานาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-2) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น 108.99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับอีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.30 โดยไม่ใช้ท่อานาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-1) และหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยใช้ท่อานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 22.80

เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-1) และการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 73.51 เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีความหนาแน่น 1.30 โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-1) แสดงดังรูปที่ 4.14 จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทอีพอกซีมีผลต่อหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดโดยการใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 ให้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่สูงกว่าอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 ทั้งนี้การใช้การใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นที่อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 มีแนวโน้มให้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ลดลง



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดกับประเภทของอีพอกซี

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ผู้วิจัยได้ใช้แบบจำลองเชิงเส้นคู่ ซึ่งประกอบด้วยเส้นตรงสองเส้น คือ เส้นตรงที่ลาดขึ้นและเส้นตรงที่ลาดลง แสดงรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.5.2 ในบทที่ 2 โดยพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (G_f) คือ พื้นที่ใต้กราฟของความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและการเลื่อนไกล [15] แสดงดังรูปที่ 2.20 ในบทที่ 2 โดยหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ระยะการเลื่อนไกลที่ δ_1 ถึง δ_f พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ค่าเฉลี่ยพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

ชื่อชุดทดสอบ		หน่วยแรง ยึดเหนี่ยว สูงสุด (τ_{Max} , MPa)	ระยะการ เลื่อนไถลที่ δ_1 ถึง δ_f	พลังงาน ต้านทาน การแตกหัก ที่ผิวสัมผัส (N/mm)	ค่าเฉลี่ย พลังงาน ต้านทาน การแตกหัก ที่ผิวสัมผัส (N/mm)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
O-1	O-1A	2.16	0.293	0.349	0.472	0.17
	O-1B	3.39	0.305	0.596		
S-0.25-1	S-0.25-1A	3.28	0.319	0.602	0.641	0.06
	S-0.25-1B	4.00	0.286	0.680		
S-0.50-1	S-0.50-1A	3.77	0.338	0.735	0.466	0.38
	S-0.50-1B	1.23	0.303	0.197		
S-1.00-1	S-1.00-1A	4.35	0.279	0.714	0.714	-
	S-1.00-1B	N/A	N/A	N/A		
S-2.00-1	S-2.00-1A	3.88	0.294	0.669	0.549	0.17
	S-2.00-1B	2.56	0.296	0.428		
M-0.25-1	M-0.25-1A	3.30	0.283	0.530	0.484	0.07
	M-0.25-1B	2.74	0.286	0.437		
M-0.50-1	M-0.50-1A	1.89	0.267	0.277	0.311	0.05
	M-0.50-1B	2.07	0.305	0.345		
M-1.00-1	M-1.00-1A	3.58	0.263	0.580	0.557	0.03
	M-1.00-1B	3.58	0.252	0.534		
M-2.00-1	M-2.00-1A	3.04	0.219	0.556	0.635	0.11
	M-2.00-1B	4.95	0.282	0.714		
O-2	O-2A	5.81	0.411	1.564	1.564	-
	O-2B	N/A	N/A	N/A		

ตารางที่ 4.5 พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส (ต่อ)

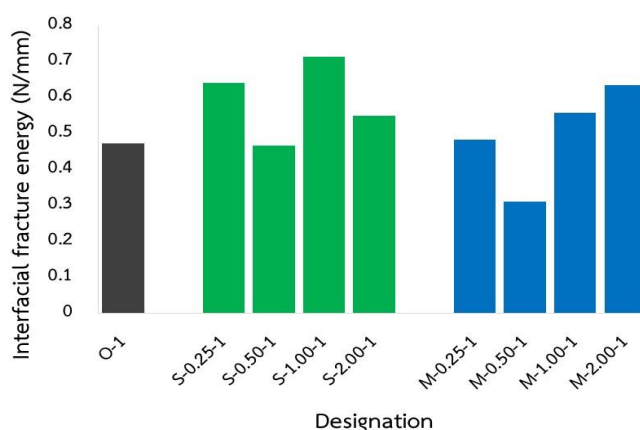
ชื่อชุดทดสอบ		หน่วยแรง ยึดเหนี่ยว สูงสุด (τ_{Max} , MPa)	ระยะการ เลื่อนไถลที่ δ_1 ถึง δ_f	พลังงาน ต้านทาน การแตกหัก ที่ผิวสัมผัส (N/mm)	ค่าเฉลี่ย พลังงาน ต้านทาน การแตกหัก ที่ผิวสัมผัส (N/mm)	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน (S.D.)
S-0.25-2	S-0.25-2A	4.71	0.311	1.059	0.918	0.20
	S-0.25-2B	4.24	0.253	0.776		
M-0.25-2	M-0.25-2A	5.24	0.331	1.098	1.098	-
	M-0.25-2B	N/A	N/A	N/A		

คำอธิบาย ตารางที่ 4.5 ชื่อชุดทดสอบ โดยชื่อที่ไม่ได้ระบุอักษร A และ B คือ ค่าเฉลี่ยของชุดทดสอบแรก (ระบุอักษร A) และชุดทดสอบที่สอง (ระบุอักษร B) และ N/A คือ ไม่ได้ระบุผล เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเทคนิค

4.5.1 อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส เมื่อเปรียบเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน ที่ีพอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4.15 พบว่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส มีค่าอยู่ระหว่าง 0.31 – 0.72 นิวตันต่อมิลลิเมตร โดยจากการใช้ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ปริมาณ 0.25, 1.00 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-1, S-0.50-1 และ S-0.50-1) มีค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส เพิ่มขึ้น 35.75, 51.11 และ 16.14 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับการใส่ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.50-1) มีค่าคงที่ และจากการใส่ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 1.00 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-1.00-1 และ M-2.00-1) มีค่าเพิ่มขึ้น 17.85 และ 34.39 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จากการใส่ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี พบว่ามีค่าคงที่ (M-0.25-1) และจากการใส่ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้นที่ปริมาณ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี พบว่ามีค่าลดลง (M-

0.50-1) จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนมีผลต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส โดยการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี ให้ค่าเพิ่มขึ้นสูงสุด 51.11 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้น 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซีให้ค่าที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

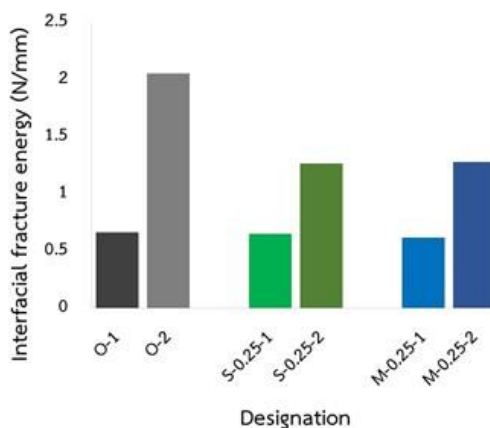


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน

4.5.2 อิทธิพลของประเภทอีพอกซีต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส

ประเภทของอีพอกซีจากการใช้อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่า พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-2) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น 207.37 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 โดยไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมอีพอกซี (O-1) และพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 โดยใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 94.39 เปอร์เซ็นต์ และการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (M-0.25-2) มีค่าเพิ่มขึ้น 105.87 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่น 1.30 ในปริมาณการใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่เท่ากัน แสดงดังรูปที่ 4.16 จึงสรุปได้ว่าอิทธิพลของประเภทอีพอกซีมีผลต่อพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสโดยการใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 ให้ค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่

ผิวสัมผัสที่สูงกว่าอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 ทั้งนี้การใช้การใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว และผนังหลายชั้นที่อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 มีแนวโน้มให้ค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสที่ลดลง



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสกับประเภทของอีพอกซี

4.6 การวิเคราะห์ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต

จากการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test) ระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตโดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต ตามรูปแบบการหลุดล่อน (Debonding modes) ของ Au และ Büyüköztürk [3] ดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.1.2 ซึ่งลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตสำหรับงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 รูปแบบการหลุดล่อนระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต

ชื่อชุดทดสอบ		รูปแบบการหลุดล่อน (Debonding modes)
O-1	O-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	O-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
S-0.25-1	S-0.25-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	S-0.25-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
S-0.50-1	S-0.50-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	S-0.50-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
S-1.00-1	S-1.00-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	S-1.00-1B	N/A
S-2.00-1	S-2.00-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	S-2.00-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
M-0.25-1	M-0.25-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	M-0.25-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
M-0.50-1	M-0.50-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	M-0.50-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
M-1.00-1	M-1.00-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	M-1.00-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
M-2.00-1	M-2.00-1A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	M-2.00-1B	Adhesive/concrete separation (ACS)
O-2	O-2A	Adhesive/concrete separation (ACS)
	O-2B	N/A
S-0.25-2	S-0.25-2A	Adhesion decohesion (AD)
	S-0.25-2B	Adhesion decohesion (AD)
M-0.25-2	M-0.25-2A	Concrete substrate fracture (CSF)
	M-0.25-2B	N/A

คำอธิบาย ตารางที่ 4.6 ชื่อชุดทดสอบ โดยชื่อที่ไม่ได้ระบุอักษร A และ B คือ ค่าเฉลี่ยของชุดทดสอบแรก (ระบุอักษร A) และชุดทดสอบที่สอง (ระบุอักษร B), รูปแบบการหลุดล่อน โดย

Adhesive/concrete separation (ACS) คือ การแยกตัวของวัสดุประสานและคอนกรีต, Adhesion decohesion (AD) คือ การสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน, Concrete substrate fracture (CSF) คือ การแตกหักของคอนกรีต และ N/A คือ ไม่ได้ระบุผล เนื่องจากความคลาดเคลื่อนทางเทคนิค

ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตจากการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.30 สำหรับทุกชุดทดสอบ พบว่ามีรูปแบบการหลุดล่อนเป็นแบบ ACS คือ การแยกตัวของวัสดุประสานและคอนกรีต จากการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.65 สำหรับการใช้อีพอกซีที่ไม่ได้เสริมท่อนาโนคาร์บอน (O-2) พบว่ามีรูปแบบการหลุดล่อน เป็นแบบ ACS เช่นเดียวกับการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.30 และการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.65 โดยการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี พบว่าการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว (S-0.25-2) พบว่ามีรูปแบบการหลุดล่อน เป็นแบบ AD คือ การสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่ดีในอีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.65 ซึ่งเป็นอีพอกซีที่มีความหนาแน่นสูง จึงส่งผลต่อคุณสมบัติของอีพอกซีที่ด้อยประสิทธิภาพลง และการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น (M-0.25-2) พบว่ามีรูปแบบการหลุดล่อน เป็นแบบ CSF คือ การแตกหักของคอนกรีต อย่างไรก็ตามการแตกหักของคอนกรีตของการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น (M-0.25-2) มีคอนกรีตที่ติดออกมากับอีพอกซีและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในปริมาณน้อยและบาง เมื่อเทียบกับการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.65 ที่ไม่ได้เสริมท่อนาโนคาร์บอน (O-2) ซึ่งมีรูปแบบการวิบัติแบบการแยกตัวของวัสดุประสานและคอนกรีต แต่มีคอนกรีตที่ติดออกมากับอีพอกซีและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในปริมาณมากและหนารวมถึงมีการแตกหักของคอนกรีตบริเวณรอบพื้นที่การยึดเหนี่ยวด้วย แสดงดังรูปที่ 4.17



(ก) O-1A

(ข) O-1B

รูปที่ 4.17 ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต



(ค) S-0.25-1A



(ง) S-0.25-1B



(จ) S-0.50-1A



(ฉ) S-0.50-1B



(ช) S-1.00-1A

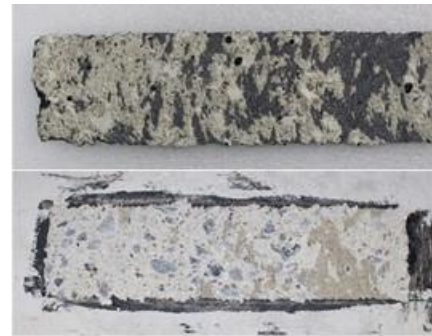


(ซ) S-2.00-1A

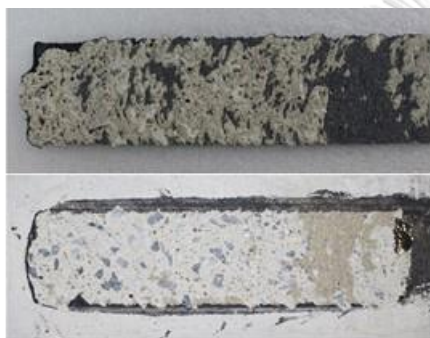
รูปที่ 4.17 ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต (ต่อ)



(ฉ) S-2.00-1B



(ญ) M-0.25-1A



(ฎ) M-0.25-1B



(ฏ) M-0.50-1A



(ฐ) M-0.50-1B

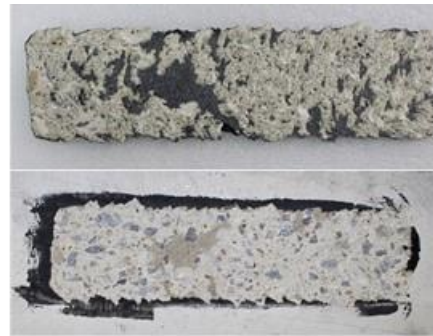


(ฑ) M-1.00-1A

รูปที่ 4.17 ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต (ต่อ)



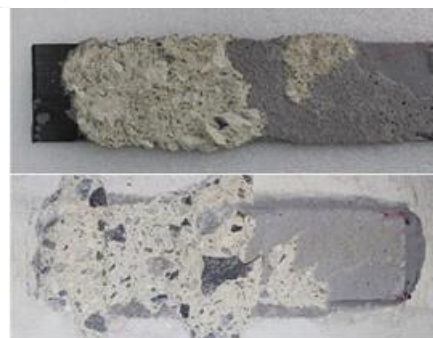
(ฅ) M-1.00-1B



(ณ) M-2.00-1A



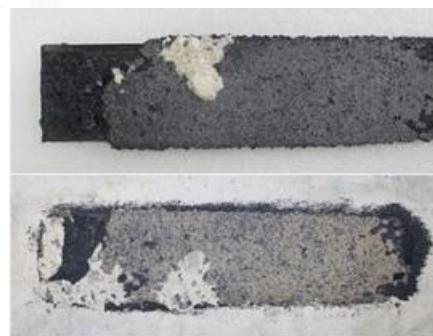
(ด) M-2.00-1B



(ต) O-2A



(ถ) S-0.25-2A



(ท) S-0.25-2B

รูปที่ 4.17 ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต (ต่อ)



(ธ) M-0.25-2A

รูปที่ 4.17 ลักษณะการวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต (ต่อ)

4.7 การตรวจสอบการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM)

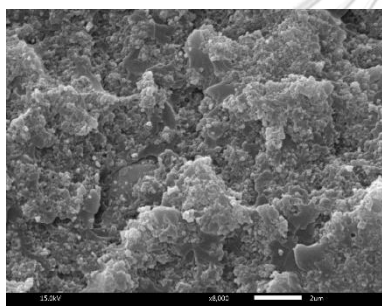
การตรวจสอบการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning electron microscope, SEM) ผู้วิจัยได้นำตัวอย่างของแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนหลังจากการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว (Single shear pushing test) โดยตรวจสอบลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซี แสดงดังรูปที่ 4.18 และลักษณะการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.19 โดยผู้วิจัยได้นำผลของการตรวจสอบการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดในหัวข้อที่ 4.4 โดยมีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

4.7.1 ลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในชั้นอีพอกซี

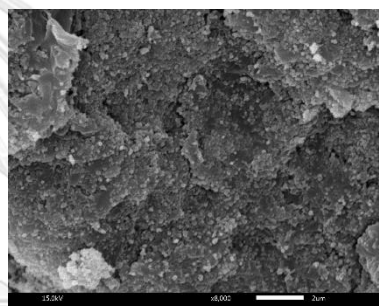
ลักษณะของการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซีเปรียบเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อนานาโนคาร์บอน ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่าลักษณะของการยึดเหนี่ยวที่สามารถเห็นได้อย่างเด่นชัด คือการใช้ท่อนานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-1.00-1) ซึ่งให้ผลของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงที่สุด มีลักษณะการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีที่ดีและช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ท่อนานาโน

คาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นที่ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.50-1 และ M-0.50-1) ซึ่งให้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ต่ำ มีการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีที่ต่ำกว่าและช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ให้ผลที่ต่ำ

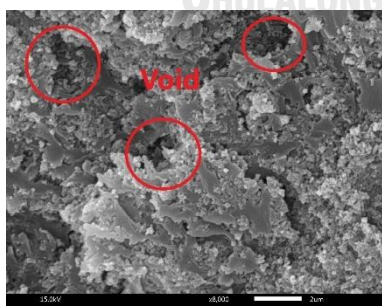
ลักษณะของการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร โดยไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมในอีพอกซี พบว่า ลักษณะของการยึดเหนี่ยวที่สามารถเห็นได้อย่างเด่นชัด คือการใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 (O-2) มีลักษณะการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีที่ดี ช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 (O-1) ซึ่งสอดคล้องกับผลของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ให้ผลที่ต่ำกว่า



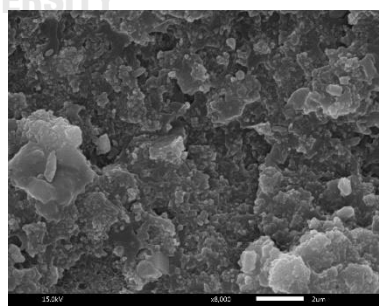
(ก) O-1



(ข) S-0.25-1

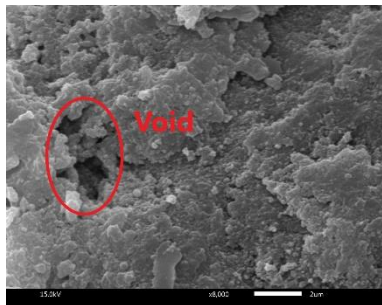


(ค) S-0.50-1

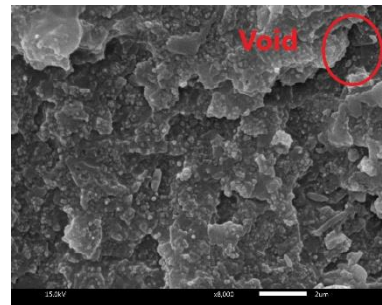


(ง) S-1.00-1

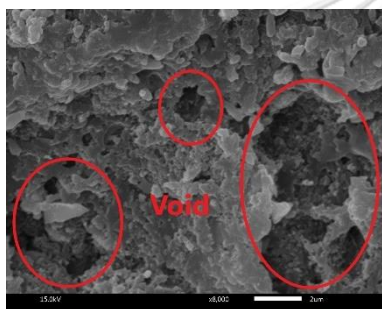
รูปที่ 4.18 ลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในชั้นอีพอกซีโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน



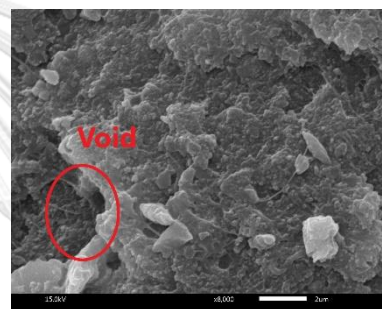
(จ) S-2.00-1



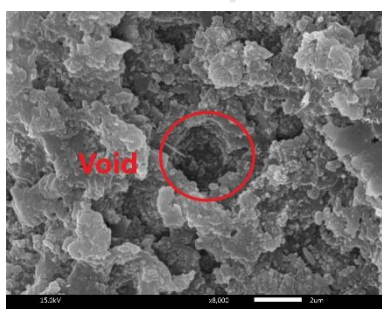
(ฉ) M-0.25-1



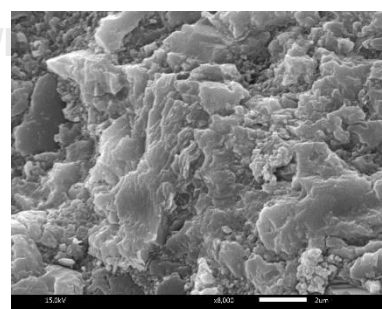
(ช) M-0.50-1



(ซ) M-1.00-1



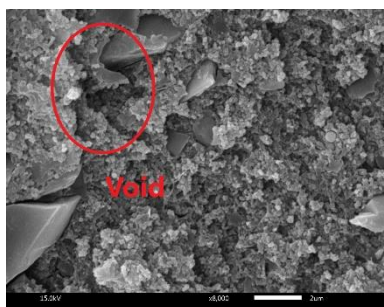
(ณ) M-2.00-1



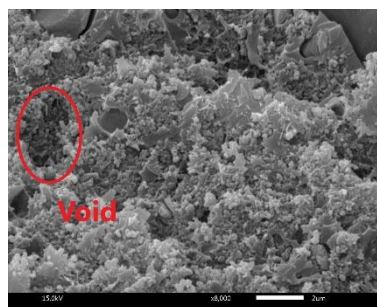
(ญ) O-2

รูปที่ 4.18 ลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซีโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

(ต่อ)



(ก) S-0.25-2



(ข) M-0.25-2

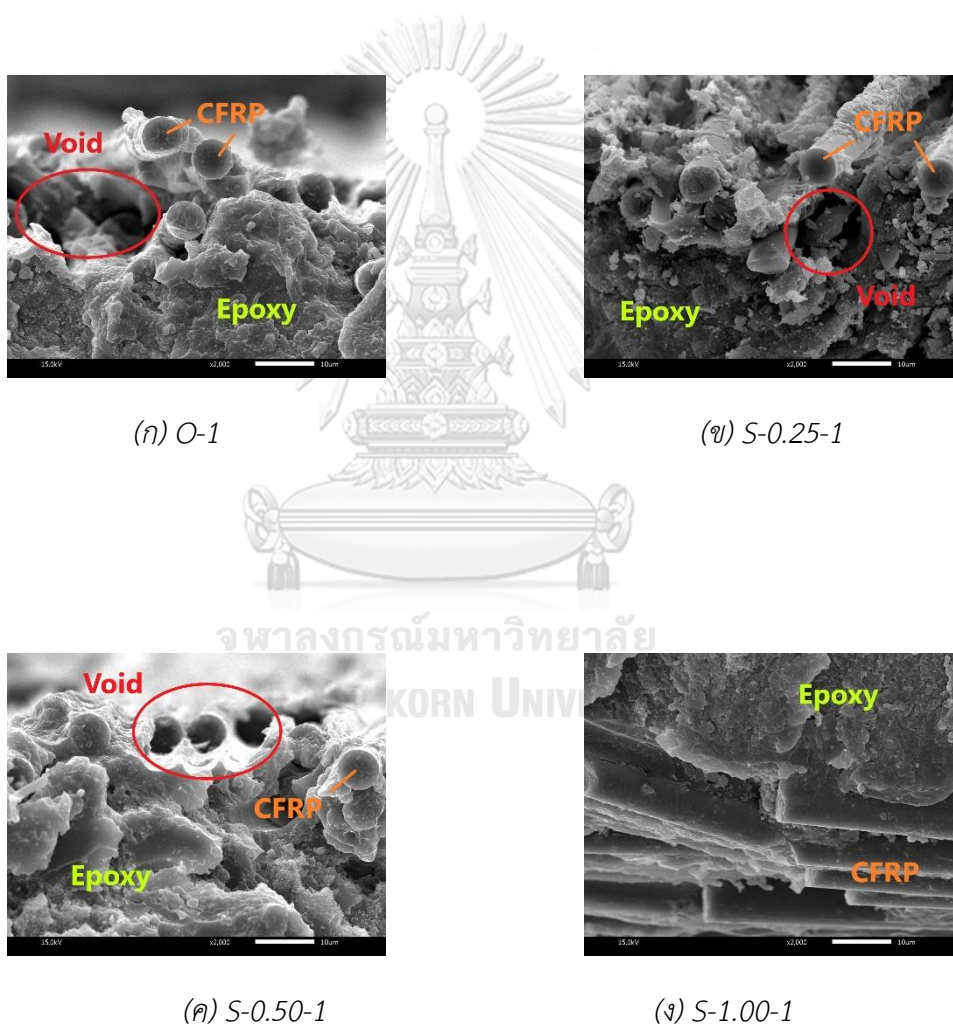
รูปที่ 4.18 ลักษณะการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซีโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

(ต่อ)

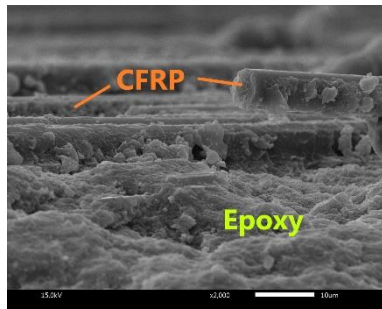
4.7.2 ลักษณะการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน

ลักษณะของการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนให้ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับลักษณะของการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซี โดยเปรียบเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร พบว่าลักษณะของการยึดเหนี่ยวที่สามารถเห็นได้อย่างเด่นชัด คือการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทหนึ่งเดียวที่ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-1.00-1) ซึ่งให้ผลของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด มีลักษณะการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ดี ช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทหนึ่งเดียวและหนึ่งหลายชั้นที่ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี (S-0.50-1 และ M-0.50-1) ซึ่งให้ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ต่ำ และมีการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ต่ำกว่า ช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนมากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ให้ผลที่ต่ำกว่า

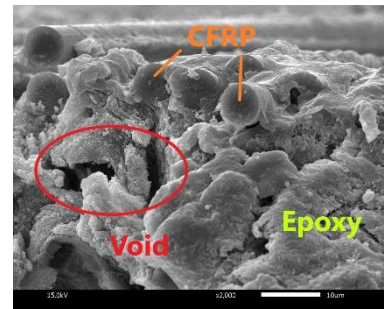
ลักษณะของการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 โดยไม่ใช้ ฟูนาโนคาร์บอนเสริมในอีพอกซี พบว่า ลักษณะของการยึดเหนี่ยวโดยการใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 (O-2) มีลักษณะการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนที่ดีกว่า ช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนน้อยกว่าอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 (O-1) รวมถึงการใช้การใช้ฟูนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นที่อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 (M-0.25-2, S-0.25-2) ซึ่งสอดคล้องกับผลของหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ให้ผลที่ต่ำกว่า



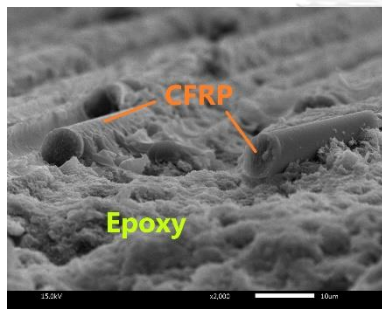
รูปที่ 4.19 ลักษณะการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน



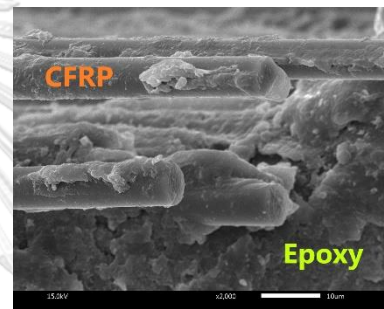
(จ) S-2.00-1



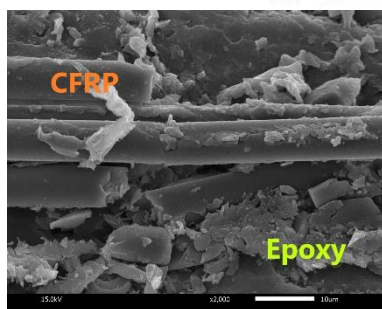
(ฉ) M-0.25-1



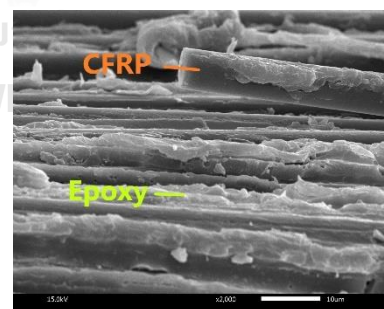
(ช) M-0.50-1



(ซ) M-1.00-1

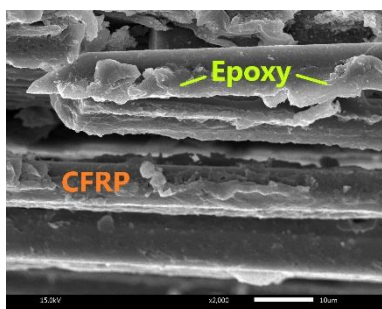


(ณ) M-2.00-1

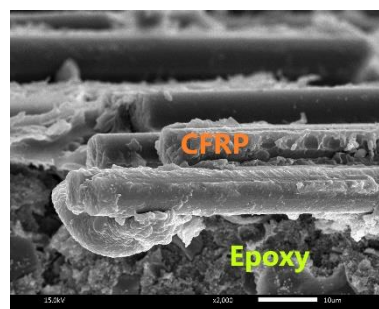


(ญ) O-2

รูปที่ 4.19 ลักษณะการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (ต่อ)



(ก) S-0.25-2



(ข) M-0.25-2

รูปที่ 4.19 ลักษณะการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน
โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (ต่อ)

4.8 การวิเคราะห์อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนและประเภทของอีพอกซี ต่อผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่า ค่าพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเทียบกับประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน ที่อีพอกซีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร โดยการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี ให้ค่าพลังงานด้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเพิ่มขึ้นสูงที่สุด คือ 51.11 และ 56.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ashrafi และคณะ [8] ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3.1 ผลจากการศึกษาจะเห็นได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (SWCNTs) มีประสิทธิภาพในการเพิ่มคุณสมบัติทางกลในอีพอกซี และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gojny และคณะ [9] ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3.2 ที่สรุปว่าท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้อีพอกซีเสริมท่อนาโนคาร์บอน (CNTs) ประเภทอื่น ๆ ทั้งนี้ด้วยคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว อาทิ กำลังรับแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น และการแยกตัว ณ จุดขาด ที่มีค่าสูงกว่าท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น [7] ดังได้กล่าวไว้ในตารางที่ 2.1 จึงอาจส่งผลให้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวมีประสิทธิภาพสูงกว่าท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น

สำหรับปริมาณการใช้ท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี เป็นปริมาณที่เหมาะสมของกระบวนการผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอนสำหรับการวิจัยนี้ ซึ่งได้แสดงดังหัวข้อ 3.1.2 ในบทที่ 3 หากปริมาณการใช้ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณมากกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนจะไม่ดี หรือหากปริมาณการใช้ท่อนาโนคาร์บอนปริมาณน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนอาจจะดี แต่เป็นปริมาณที่น้อยไป ที่จะส่งผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในอีพอกซี ซึ่งดูได้จากผลของพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด ที่มีค่าลดลง

นอกจากนี้สำหรับชิ้นตัวอย่างที่ไม่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนเสริมในอีพอกซี พบว่า การใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร ให้พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่สูงกว่าอีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร ทั้งนี้การใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นที่อีพอกซีที่ความหนาแน่น 1.65 มีแนวโน้มให้พลังงานต้านทานการแตกหักและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของงานวิจัยของ Rousakis และคณะ [10] ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.2.3.2 พบว่าอีพอกซีที่ค่าความหนาแน่นต่ำ เมื่อเสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอน จะให้มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวและค่าสูงสุดการเลื่อนไถลเพิ่มขึ้น มากกว่าการใช้อีพอกซีที่ค่าความหนาแน่นสูง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่จะกระจายตัวได้ดีกว่าในอีพอกซีที่มีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งในอีพอกซีที่มีความหนาแน่นสูง อาจต้องเพิ่มกระบวนการในการผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอนให้มีประสิทธิภาพที่สูงกว่า เนื่องจากในอีพอกซีที่ความหนาแน่นสูงจะทำให้การกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนเป็นไปได้ยากกว่าอีพอกซีที่มีความหนาแน่นต่ำ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต โดยใช้อีพอกซีเสริมท่อนานาโนคาร์บอน เพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณท่อนานาโนคาร์บอน ประเภทท่อนานาโนคาร์บอน และประเภทของอีพอกซีที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

1. สำหรับอีพอกซีที่มีค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใส่ท่อนานาโนคาร์บอน การใช้ท่อนานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ 1.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี ให้ค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดเพิ่มขึ้นสูงที่สุด คือ 51.11 และ 56.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยการใช้ท่อนานาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพในอีพอกซีรวมถึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนในอีพอกซีของกระบวนการผสมสารระหว่างอีพอกซีและท่อนานาโนคาร์บอนสำหรับการวิจัยนี้ และเนื่องจากคุณสมบัติของท่อนานาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยว อาทิ กำลังรับแรงดึง โมดูลัสความยืดหยุ่น และการแยกตัว ณ จุดขาด ที่มีค่าสูงกว่าท่อนานาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น จึงส่งผลให้ค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัสและหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่สูงกว่า

2. เมื่อเปรียบเทียบประเภทของอีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.30 และ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร โดยไม่ใช้ท่อนานาโนคาร์บอนเสริมในอีพอกซี พบว่า การใช้อีพอกซีความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร ให้พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส ค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดและค่าการเลื่อนไถลสูงสุดที่สูงกว่าอีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามการใช้ท่อนานาโนคาร์บอนทั้งประเภทผนังเดี่ยวและผนังหลายชั้นเสริมอีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร ทำให้ค่าพลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุด และการเลื่อนไถลสูงสุดที่ลดลง เนื่องจากในอีพอกซีที่มีความหนาแน่นสูงจะทำให้การกระจายตัวของท่อนานาโนคาร์บอนเป็นไปได้ยากกว่าอีพอกซีที่มีความหนาแน่นต่ำ จึงอาจส่งผลให้พลังงานต้านทานการแตกหักที่ผิวสัมผัส หน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดและค่าการเลื่อนไถลสูงสุดมีค่าลดลง

3. การวิบัติระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีตโดยส่วนใหญ่ มีรูปแบบการหลุดล่อนโดยการแยกตัวของวัสดุประสานและคอนกรีต อย่างไรก็ตามการใช้อีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร เสริมด้วยท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังเดี่ยวที่ปริมาณ 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซี มีการหลุดล่อนจากการสูญเสียการยึดเหนี่ยวของวัสดุเชื่อมประสาน ซึ่งอาจเกิดจากการกระจายตัวของท่อนาโนคาร์บอนที่ไม่ดีในอีพอกซีที่มีความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นอีพอกซีที่มีความหนาแน่นสูง จึงส่งผลต่อคุณสมบัติของอีพอกซีที่ด้อยประสิทธิภาพลง และการใช้ท่อนาโนคาร์บอนประเภทผนังหลายชั้น 0.25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณอีพอกซีความหนาแน่น 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร มีการหลุดล่อนจากการแตกหักของคอนกรีต ทั้งนี้มีคอนกรีตที่ติดออกมากับอีพอกซีและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยในปริมาณน้อย

4. จากการตรวจสอบการยึดเหนี่ยวภายในชั้นของอีพอกซีและการยึดเหนี่ยวของอีพอกซีกับ CFRP ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่ากรณีชุดทดสอบที่มีหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูง มีลักษณะการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีที่ดีและช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีชุดทดสอบที่มีค่าหน่วยแรงยึดเหนี่ยวสูงสุดที่ต่ำ มีการยึดเกาะหรือการรวมตัวของอีพอกซีที่ด้อยกว่า และช่องว่าง (Void) ของอีพอกซีมากกว่า จึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของท่อนาโนคาร์บอนที่มีการปรับปรุงคุณสมบัติของอีพอกซี

5. ความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลจากแบบจำลองของ Chen และ Teng [11] ซึ่งผู้วิจัยได้ใช้ในงานวิจัยนี้ พบว่าแบบจำลองนี้มีระยะความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลใกล้เคียงกับค่าความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผลที่หาได้จากการกระจายตัวของความเครียดตามแนวแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนของชุดทดสอบ ดังนั้น อิทธิพลของประเภทและปริมาณของท่อนาโนคาร์บอน รวมถึงประเภทของอีพอกซีจึงไม่มีผลต่อความยาวยึดเหนี่ยวประสิทธิผล

บรรณานุกรม

- [1] ปีย์ลักษณ์ ว. การวิเคราะห์การหลุดล่อนสำหรับคานคอนกรีตเสริมเหล็กที่เสริมกำลังด้วยแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยโดยวิธีการปลดปล่อยพลังงาน: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2014.
- [2] Teng JG, Chen J-F. Debonding failures of RC beams strengthened with externally bonded FRP reinforcement: Behaviour and modelling. In: Smith ST, editor. Proceedings of the first Asia-Pacific conference on FRP in structures: APFIS 2007. Department of Civil Engineering, University of Hong Kong; 2007.
- [3] Au C, Büyüköztürk O. Debonding of FRP plated concrete: A tri-layer fracture treatment. *Engineering Fracture Mechanics*. 2006;73:348-65.
- [4] ท้ายกาญจน์ จ. อิทธิพลของอุณหภูมิและความชื้นต่อพฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอนและคอนกรีต: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2014.
- [5] Teng JG. FRP-strengthened RC structures. West Sussex, England: Wiley; 2002.
- [6] Rafique I, Kausar A, Anwar Z, Muhammad B. Exploration of Epoxy Resins, Hardening Systems, and Epoxy/Carbon Nanotube Composite Designed for High Performance Materials: A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. 2016;55:312-33.
- [7] Liu S, Chevali VS, Xu Z, Hui D, Wang H. A review of extending performance of epoxy resins using carbon nanomaterials. *Composites Part B: Engineering*. 2018;136:197-214.
- [8] Ashrafi B, Guan J, Mirjalili V, Zhang Y, Chun L, Hubert P, et al. Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*. 2011;71:1569-78.
- [9] Gojny FH, Wichmann MHG, Fiedler B, Schulte K. Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites – A comparative study. *Composites Science and Technology*. 2005;65:2300-13.
- [10] Rousakis TC, Kouravelou KB, Karachalios TK. Effects of carbon nanotube enrichment of epoxy resins on hybrid FRP-FR confinement of concrete. *Composites Part B: Engineering*. 2014;57:210-8.
- [11] Chen JF, Teng JG. Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete. *Journal of Structural Engineering*. 2001;127:784-91.

- [12] Yao J, Teng JG, Chen JF. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. *Composites Part B: Engineering*. 2005;36:99-113.
- [13] Chu I-Y, Woo S-K, Lee Y. Experimental Study on Interfacial Behavior of CFRP-bonded Concrete. *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*. 2015;1:127-34.
- [14] Irshidat MR, Al-Saleh MH. Effect of using carbon nanotube modified epoxy on bond-slip behavior between concrete and FRP sheets. *Construction and Building Materials*. 2016;105:511-8.
- [15] Yuan H, Teng JG, Seracino R, Wu ZS, Yao J. Full-range behavior of FRP-to-concrete bonded joints. *Engineering Structures*. 2004;26:553-65.
- [16] Nakaba K, Kanakubo T, Furuta T, Yoshizawa H. Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Laminates and Concrete. 2001;98:359-67.
- [17] Woo S-K, Lee Y. Experimental study on interfacial behavior of CFRP-bonded concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2010;14:385-93.
- [18] Dai J, Ueda T, Sato Y. Development of the Nonlinear Bond Stress-Slip Model of Fiber Reinforced Plastics Sheet-Concrete Interfaces with a Simple Method. *Journal of Composites for Construction*. 2005;9:52-62.
- [19] ASTM C39 / C39M-18. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken, PA; 2018.
- [20] Sika. 2-COMPONENT EPOXY IMPREGNATION RESIN. PRODUCT DATA SHEET. 2017.
- [21] ชนะชัย ท, อัครวัชร ล. พฤติกรรมการยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตและแผ่นพอลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2018.
- [22] Bizindavyi L, Neale KW. Transfer Lengths and Bond Strengths for Composites Bonded to Concrete. *Journal of Composites for Construction*. 1999;3:153-60.
- [23] Yoshizawa H, Wu Z, Yuan H, Kanakubo T. STUDY ON FRP-CONCRETE INTERFACE BOND PERFORMANCE. *Doboku Gakkai Ronbunshu*. 2000;2000:105-19.
- [24] Gravina RJ, Aydin H, Visintin P. Extraction and Analysis of Bond-Slip Characteristics in Deteriorated FRP-to-Concrete Joints Using a Mechanics-Based Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017;29:04017013.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ปฏิภาคส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย (Concrete mix design)

กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอก	=	350	ksc.
ค่าการยุบตัว	=	7.5 – 12.5	cm.
อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์	=	0.51	
ขนาดใหญ่ที่สุดของมวลรวมขนาดใหญ่	=	19	mm.
<u>การคำนวณสำหรับปริมาตรงาน 1 CU.M. ของคอนกรีต</u>			
ปริมาตรของน้ำ	=	191	ltr.
ปริมาตรของซีเมนต์	=	$374 / 3.15$	= 119 ltr.
ปริมาตรของทราย	=	$740 / 2.65$	= 279 ltr.
ปริมาตรของหิน	=	$1,150 / 2.70$	= 426 ltr.
ปริมาตรของฟองอากาศ	=	$1 \times 1,000 / 100$	= 10 ltr.
รวมปริมาตรทั้งหมด	=	1,025	ltr.
<u>องค์ประกอบสำหรับปริมาตรงาน 1 CU.M. ของคอนกรีต</u>			
ซีเมนต์ (CPAC TYPE I)	=	374	kg.
น้ำ	=	191	ltr.
ทราย (ปกติ)	=	740	kg.
หิน (3/4"-#4)	=	1,150	kg.
CPAC 20405	=	1,870	cc.

ภาคผนวก ข อัตราส่วนของปริมาณอีพอกซีและท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการวิจัย

1. อีพอกซี ค่าความหนาแน่น 1.30 กิโลกรัมต่อลิตร (Sikadur® -330)

มีอัตราส่วนของอีพอกซี (ส่วนประกอบ A) ต่อ อีพอกซี (ส่วนประกอบ B) ที่อัตราส่วน 4 ต่อ 1

1.1 ปริมาณของอีพอกซีที่ใช้ในการผสมสารต่อหนึ่งปีกเกอร์

อีพอกซี (ส่วนประกอบ A) ปริมาณ 432 กรัม และอีพอกซี (ส่วนประกอบ B) ปริมาณ 108 กรัม รวม อีพอกซีทั้งหมด (ส่วนประกอบ A และ B) ปริมาณ 540 กรัม

1.2 ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการผสมสารต่อหนึ่งปีกเกอร์

ท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ อีพอกซีทั้งหมด มีปริมาณ 1.35 กรัม, 2.70 กรัม, 5.40 กรัม และ 10.80 กรัม ตามลำดับ

2. อีพอกซี ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1.65 กิโลกรัมต่อลิตร (Sikadur® -30)

มีอัตราส่วนของอีพอกซี (ส่วนประกอบ A) ต่อ อีพอกซี (ส่วนประกอบ B) ที่อัตราส่วน 3 ต่อ 1

1.1 ปริมาณของอีพอกซีที่ใช้ในการผสมสารต่อหนึ่งปีกเกอร์ อีพอกซี (ส่วนประกอบ A) ปริมาณ 405 กรัม อีพอกซี (ส่วนประกอบ B) ปริมาณ 135 กรัม รวม อีพอกซี ทั้งหมด (ส่วนประกอบ A และ B) ปริมาณ 540 กรัม

1.2 ปริมาณของท่อนาโนคาร์บอนที่ใช้ในการผสมสารต่อหนึ่งปีกเกอร์

ท่อนาโนคาร์บอนที่ปริมาณ 0.25, 0.50, 1.00 และ 2.00 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ อีพอกซีทั้งหมด มีปริมาณ 1.35 กรัม, 2.70 กรัม, 5.40 กรัม และ 10.80 กรัม ตามลำดับ

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายอมเรศ มธุรส
วัน เดือน ปี เกิด	16 ตุลาคม พ.ศ. 2533
สถานที่เกิด	จังหวัดพิจิตร
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาและการบริหารการก่อสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY