

บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

สำหรับบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการทดสอบค่ากำลังยึดเหนี่ยว ความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวเมื่อรับแรงกระทำคงค้าง และความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวเมื่อรับแรงซ้ำไปซ้ำมาของเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตซึ่งยึดประสานกันด้วยอิโพลีเมอร์เพสต์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการนำไปใช้ในงานซ่อมแซม โดยจะทำการเทียบกับความคงทนของคอนกรีตควบคุมซึ่งเกิดจากการฝังเหล็กในคอนกรีตสดที่อายุ 28 วันและวัสดุยึดประสานอีพ็อกซีที่ขายตามท้องตลาด

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น

4.1.1 ซิลิกาฟุ่ม (SF)

ซิลิกาฟุ่ม(SF) มีองค์ประกอบหลักคือ SiO_2 ร้อยละ 88.3 ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C1240 [26] ระบุว่าซิลิกาฟุ่มต้องมีปริมาณ SiO_2 ไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 และในส่วนองค์ประกอบออกไซด์อื่นๆเช่น Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO มีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ SiO_2 และเมื่อพิจารณาความไม่เป็นผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) จากรูปที่ 4.1ก พบว่า XRD Pattern แสดงให้เห็นว่าซิลิกาฟุ่มมีความไม่เป็นผลึก (Amorphous)

4.1.2 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RHBA)

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RHBA) พบว่ามี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 84.75 มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 0.16 และ 0 ตามลำดับ โดยมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 84.91 และมีปริมาณ SO_3 ร้อยละ 0.6 ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีเท่ากับร้อยละ 3.72 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 [23] สามารถจัดให้เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (RHBA) เป็นวัสดุปอซโซลาน Class N ได้ เนื่องจากผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีปริมาณถึงร้อยละ 70 และปริมาณ (LOI) ไม่เกินร้อยละ 10 เมื่อพิจารณาความไม่เป็นผลึกโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD) พบว่าเถ้าแกลบ-เปลือกไม้มีทั้งส่วนที่เป็นผลึกซึ่งเป็นองค์ประกอบของซิลิกอนออกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุ และส่วนที่ไม่เป็นผลึกซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.1ข

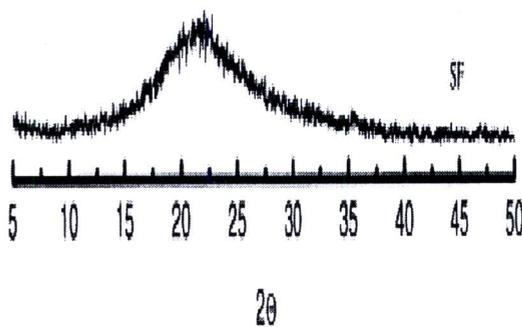
4.1.3 เถ้าถ่านหิน (FA)

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) มี SiO_2 เป็นองค์ประกอบหลักเท่ากับร้อยละ 36.02 มี Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 20.58 และ 15.91 ตามลำดับ โดยมีผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 เท่ากับร้อยละ 72.51 และมีปริมาณ SO_3 ร้อยละ 2.24 ส่วนค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (LOI) มีเท่ากับร้อยละ

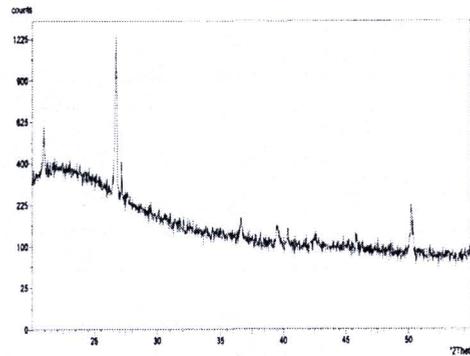
0.07 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบทางเคมีตามมาตรฐาน ASTM C 618 [23] สามารถจัดให้เถ้าถ่านหิน (FA) เป็นเถ้าถ่านหิน Class F ได้ เนื่องจากผลรวมของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 มีปริมาณถึงร้อยละ 70 และปริมาณ (LOI) ไม่เกินร้อยละ 6

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟูม เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และเถ้าถ่านหิน

Materials	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	LOI
SF	88.3	1.17	4.76	0.48	1.05	-
RHBA	84.75	0.16	-	2.78	0.60	3.72
FA	36.02	20.58	15.91	18.75	2.24	0.07



ก.) XRD ของ ซิลิกาฟูม



ข.) XRD ของ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

รูปที่ 4.1 ความเป็นผลึกของวัสดุโดยใช้เทคนิค X-Ray Diffractometer (XRD)

4.2 กำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในส่วนนี้จะศึกษากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยและคอนกรีตโดยใช้วัสดุยึดประสานบริเวณรูเจาะในลักษณะเหมือนกับการเกร้าท์ โดยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ใช้ทดสอบจะมีอัตราส่วนผสมระหว่างเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 [31] อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 และอัตราส่วนของเถ้าถ่านหินล้วน โดยใช้สารละลายด่างเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 18 โมลาร์ ในทุกๆ ส่วนผสม นอกจากนี้ยังใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2OSiO_2) เพื่อเพิ่มความเป็นด่างและเพิ่มปริมาณซิลิกอนให้กับวัสดุ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 2.5 : 1

4.2.1 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร กับคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยอีโพลีเมอร์เพสต์

การทดสอบนี้จะทำการเจาะตัวอย่างคอนกรีตซึ่งออกแบบกำลังอัด 28 MPa ลึก 8 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 12 มิลลิเมตร และใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ฝังไปในรูเจาะและใช้อีโพลีเมอร์เพสต์เป็นตัวยึดประสานระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีต จากนั้นนำมาทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 3 7 28 และ 90 วัน เปรียบเทียบผลการพัฒนากำลังยึดเหนี่ยวกับเหล็กข้ออ้อยของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน และผลิตภัณฑ์ยึดประสานอีพ็อกซี

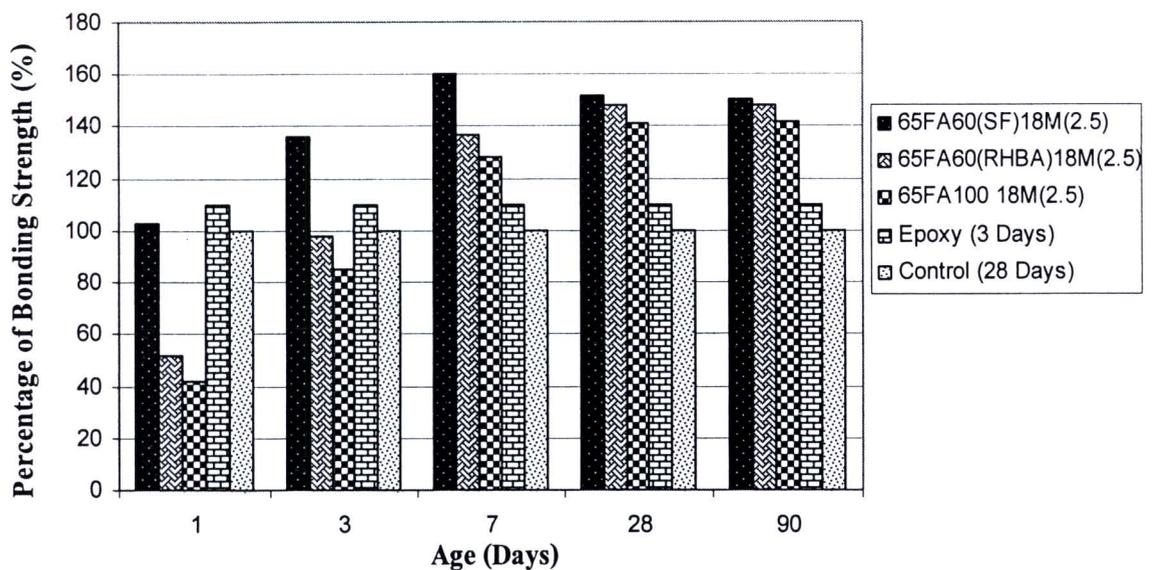
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยใช้อีโพลีเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

Mix Symbol	Bonding Strength (MPa)				
	(Percent of bonding Strength in comparison with control. %)				
	1 Day	3 Days	7 Days	28 Days	90 Days
Control	-	-	-	12.3(100)	-
Epoxy	-	13.5(110)	-	-	-
65FA60(SF)18M(2.5)	12.7(103)	16.6(136)	19.7(160)	18.7(152)	18.5(150)
65FA60(RHBA)18M (2.5)	6.4(52)	12.0(98)	16.9(137)	18.2(148)	18.2(148)
65FA100 18M(2.5)	5.1(42)	10.4(85)	15.8(128)	17.3(141)	17.5(142)

จากตารางที่ 4.2 พบว่ากำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 และเถ้าถ่านหินล้วน 100:0 ให้กำลังยึดเหนี่ยว ที่อายุ 1 วัน เท่ากับ 12.7 6.4 และ 5.1 MPa คิดเป็นร้อยละ 103 52 และ 42 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และเมื่ออายุการทดสอบผ่านไปพบว่าวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์มีการพัฒนากำลังต่อไปเรื่อยๆ โดยที่อายุ 28 วัน วัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ มีกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 18.7 18.2 และ 17.3 MPa คิดเป็นร้อยละ 152 148 และ 141 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และที่อายุ 90 วัน กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับ 18.5 18.2 และ 17.5 MPa คิดเป็นร้อยละ 150 148 และ 142 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และในส่วนกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานอีพ็อกซีที่ใช้เวลาในการบ่ม 3 วัน ตามคำแนะนำของผู้ผลิตซึ่งพบว่าให้ค่าเท่ากับ 13.5 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 110 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุม

จากผลการทดสอบดังกล่าวพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ซึ่งมีอัตราส่วนเถ้านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 ให้กำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม โดยคิดเป็นร้อยละ 103 ที่อายุ 3 วัน กำลังยึดเหนี่ยวเพิ่มมากขึ้นเป็นร้อยละ 136 เมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมซึ่งสูงกว่าวัสดุยึดประสานอิพ็อกซีที่อายุ 3 วันเช่นกัน กำลังยึดเหนี่ยวจะเพิ่มขึ้นตามอายุการทดสอบ โดยที่อายุ 7 วัน กำลังยึดเหนี่ยวจะเท่ากับ 19.7 MPa แต่ที่อายุ 28 วัน กลับพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวลดลงเล็กน้อยมีค่าเท่ากับ 18.7 MPa เป็นสาเหตุมาจากซิลิกาฟุ่มเป็นวัสดุที่ไม่เป็นผลึกสูง ทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ทำปฏิกิริยาได้ดีกับซิลิกาฟุ่ม (SiO_2) เพสต์จึงเกิดการขยายตัวอย่างรวดเร็วภายในรูเจาะทำให้กำลังยึดเหนี่ยวที่ระยะต้นมีค่าสูง แต่เนื่องด้วยการขยายตัวที่มากเกินไปอาจทำให้เกิดรอยแตกร้าวภายในรูเจาะทำให้กำลังยึดเหนี่ยวที่ 28 วันลดต่ำลงซึ่งงานวิจัยในอดีต [31] พบพฤติกรรมเช่นเดียวกัน และในงานวิจัยนี้ทำการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 90 วันด้วย และพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวมีค่าไม่ต่างจากที่อายุ 28 วันมากนัก คือมีค่าเท่ากับ 18.5 MPa แสดงให้เห็นว่ารอยแตกร้าวที่เกิดขึ้นไม่ได้มีการเพิ่มปริมาณและทำให้กำลังยึดเหนี่ยวตกลงไปอีก ในส่วนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้านเกลบ-เปลือกไม้ 60:40 พบว่ากำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและอิพ็อกซีค่อนข้างมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาคของเถ้านเกลบ-เปลือกไม้เป็นผลึกมากกว่าทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ช้าส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์เพสต์ผสมเถ้านเกลบ-เปลือกไม้ มีกำลังยึดเหนี่ยวในช่วงอายุแรกต่ำ [31] แต่เมื่ออายุเพิ่มขึ้นพบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ดังกล่าวเกิดการขยายตัวภายในรูเจาะและพัฒนากำลังอย่างต่อเนื่องโดยที่อายุ 3 วัน กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับ 12 MPa ซึ่งเทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 98 ที่อายุ 7 วัน กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับ 16.9 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 137 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุม ที่อายุ 28 วัน กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าเท่ากับ 18.2 MPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับจีโอโพลิเมอร์ที่มีส่วนผสมซิลิกาฟุ่ม และที่อายุ 90 วัน กำลังยึดเหนี่ยวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงจากที่อายุ 28 วัน อาจบอได้ว่ากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนผสมของเถ้านหินต่อเถ้านเกลบ-เปลือกไม้ 60:40 ต้องใช้ระยะเวลา 3 วัน ในการพัฒนากำลังให้เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุม (ร้อยละ 98) ต่างกับกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีส่วนผสมของซิลิกาฟุ่มที่มีกำลังในระยะต้น (1 วัน) ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พร้อมพงษ์ และคณะ [31] ซึ่งทำการศึกษากำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ ที่แทนที่เถ้านหินด้วยซิลิกาฟุ่มและเถ้านเกลบ-เปลือกไม้ในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วนเถ้านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 18 โมลาร์ ให้กำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 วัน เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันและยังพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 28 วันสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ส่วนผสมอื่นๆ และในส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์แทนที่เถ้านหินด้วยเถ้านเกลบ-เปลือกไม้พบว่าการพัฒนากำลังยังคงต้องใช้ระยะเวลา 7 วัน จึงจะได้กำลังยึดเหนี่ยวที่เทียบเท่ากับคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน

ในส่วนของจีโอโพลิเมอร์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน พบว่ากำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 วัน ต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ค่อนข้างมาก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.1 MPa คิดเป็นร้อยละ 42 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุมที่อายุ 3 วัน ยังคงต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมและยังคงต้องใช้ระยะเวลาถึง 7 วัน ที่ทำให้กำลังยึดเหนี่ยวมากกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.8 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 128 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุม เมื่อเปรียบเทียบกำลังยึดเหนี่ยวที่อายุเดียวกัน พบว่าต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ผสมซิลิกาฟูมและเถ้าแกลบ-เปลือกไม้อย่างชัดเจน โดยกำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 28 วัน มีค่าเท่ากับ 17.3 MPa คิดเป็นร้อยละ 141 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุม และที่อายุ 90 วัน กำลังยึดเหนี่ยวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีค่าเท่ากับ 17.5 MPa คิดเป็นร้อยละ 142 ของกำลังยึดเหนี่ยวคอนกรีตควบคุม ซึ่งอาจเกิดจากเถ้าถ่านหินมีปริมาณอลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) ที่สูง และมีซิลิกาออกไซด์ (SiO_2) ที่ต่ำ ทำให้ค่า Si/Al มีค่าน้อย เพสต์จึงเกิดการขยายตัวภายในรูเจาะได้ไม่ดีพอ กำลังยึดเหนี่ยวจึงมีค่าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ เชียรศักดิ์ และคณะ[30] ทำการศึกษากำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์โดยการแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ที่อัตราส่วนต่างๆและคำนวณหาอัตราส่วน Si/Al ในส่วนผสมพบว่าเมื่อแทนที่เถ้าถ่านหินด้วยเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ในปริมาณมากขึ้นเท่าใด อัตราส่วน Si/Al จะเพิ่มสูงเช่นกัน ส่งผลให้เพสต์เกิดการขยายตัวทำให้กำลังอัดของจีโอโพลิเมอร์มีค่าสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 4.2 ร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเทียบกับอิพ็อกซี่และคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน

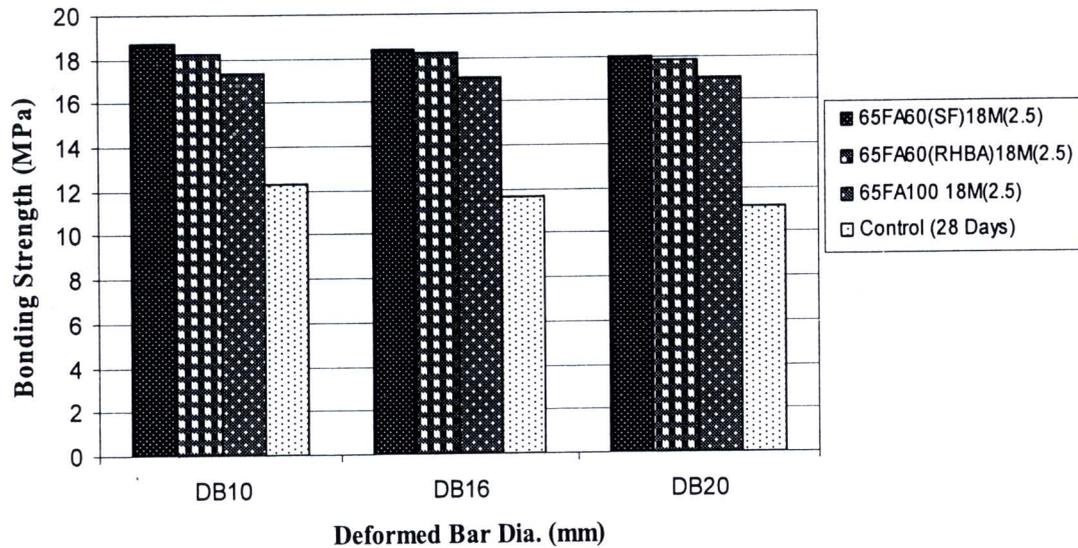
4.2.2 ผลของขนาดเหล็กเสริมต่อค่ากำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตโดยใช้จีโอโพลิเมอร์ เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน

การศึกษากำลังยึดเหนี่ยวในส่วนนี้จะใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 16 และ 20 มิลลิเมตร ทำการฝังในคอนกรีตและใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานบริเวณรูเจาะ จากนั้นนำไปทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 4.3 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 16 และ 20 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่อายุ 28 วัน

Mixed Symbol	Bonding Strength (MPa)		
	DB10	DB16	DB20
Control (28 Days)	12.3	11.7	11.2
65FA60(SF)18M(2.5)	18.7	18.4	18.0
65FA60(RHBA)18M(2.5)	18.2	18.2	17.8
65FA100 18M (2.5)	17.3	17.1	17.0

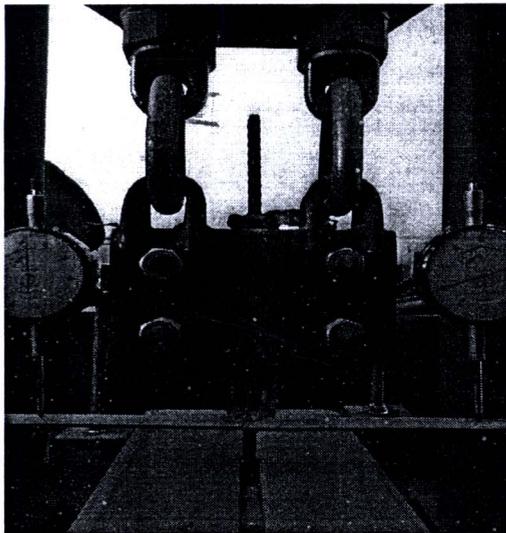
เมื่อเพิ่มขนาดเหล็กข้ออ้อยในการฝังจาก 10 มิลลิเมตรเป็น 16 และ 20 มิลลิเมตร โดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ได้มีค่าแตกต่างกันไม่มากนักดังแสดงในตารางที่ 4.3 วัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 และอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 ฝังเหล็กข้ออ้อยขนาด 16 และ 20 มิลลิเมตร ให้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 18.4 และ 18.0 MPa และ 18.2 และ 17.8 MPa ตามลำดับ ในส่วนจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วนให้ค่ากำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 17.1 และ 17.0 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มขนาดเหล็กข้ออ้อยกำลังยึดเหนี่ยวมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักและแนวโน้มของกำลังยึดเหนี่ยวในแต่ละส่วนผสมยังคงเป็นไปในทิศทางเดียวกับการใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตร และเมื่อนำวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ทั้ง 3 ส่วนผสมไปเปรียบเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วัน ที่ขนาดเหล็กข้ออ้อยเท่ากันพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ยังคงมีค่าสูงกว่ากำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมเช่นเดียวกันดังรูปที่ 4.3 ดังนั้นผลกระทบเรื่องขนาดของเหล็กต่อกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะมีไม่มากเมื่อเทียบกับคอนกรีตควบคุมที่ฝังเหล็กชนิดเดียวกัน



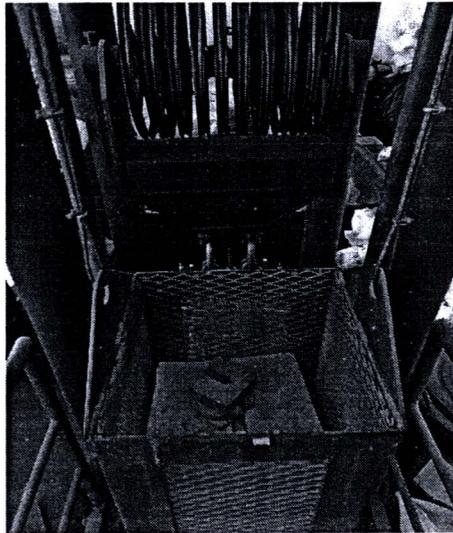
รูปที่ 4.3 กำลังยึดเหนี่ยวที่ 28 วันระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริม โดยใช้จีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานเทียบกับคอนกรีตควบคุม โดยใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 10 16 และ 20 มิลลิเมตร

4.3 ความคงทนของกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำคงค้างระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในการศึกษาส่วนนี้จะเป็นการศึกษาความคงทนของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์เมื่อรับกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้าง (Creep Bond Stress) ระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมข้ออ้อย โดยการทนแรงกระทำคงค้าง (Sustained load) ที่ร้อยละ 30 40 และ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ 28 วัน โดยรูปแบบการติดตั้งตัวอย่างทดสอบจะเป็นไปดังรูปที่ 4.4 จากนั้นจะใช้เวลาเก็บข้อมูลผลการทดสอบโดยจะวัดระยะเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อย (Bond Slip) เป็นระยะเวลา 90 วัน โดยจะเริ่มเก็บข้อมูลในนาที่ที่ 1 6 12 30 ตามด้วยชั่วโมงที่ 1 2 5 20 50 100 200 500 700 และ 1000 ชั่วโมง ซึ่งภาระแรงกระทำคงค้างที่ใช้ในวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะแสดงในตารางที่ 4.4



ก)วิธีการติดตั้งตัวอย่างทดสอบ



ข) การให้แรงกระทำค้ำแก่ตัวอย่างทดสอบ

รูปที่ 4.4 วิธีการติดตั้งตัวอย่างทดสอบและการให้แรงกระทำค้ำ

ตารางที่ 4.4 แรงกระทำที่ใช้ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวแบบค้ำระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยอีโพลิเมอร์เพสต์

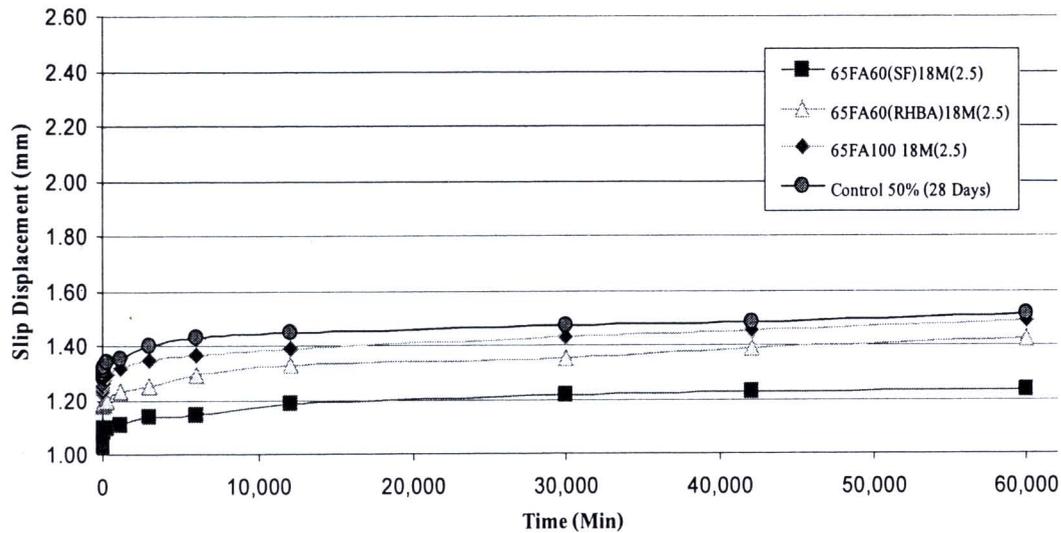
Mix Symbol	Sustained Load (kN)		
	30% of UBS	40% of UBS	50% of UBS
Control (28 Days)	N/A	N/A	14.49
65FA60(SF)18M(2.5)	14.10	18.80	23.50
65FA60(RHBA)18M(2.5)	13.72	18.30	22.87
65FA100 18M (2.5)	13.04	17.39	21.74

*UBS คือ Ultimate Bonding Strength

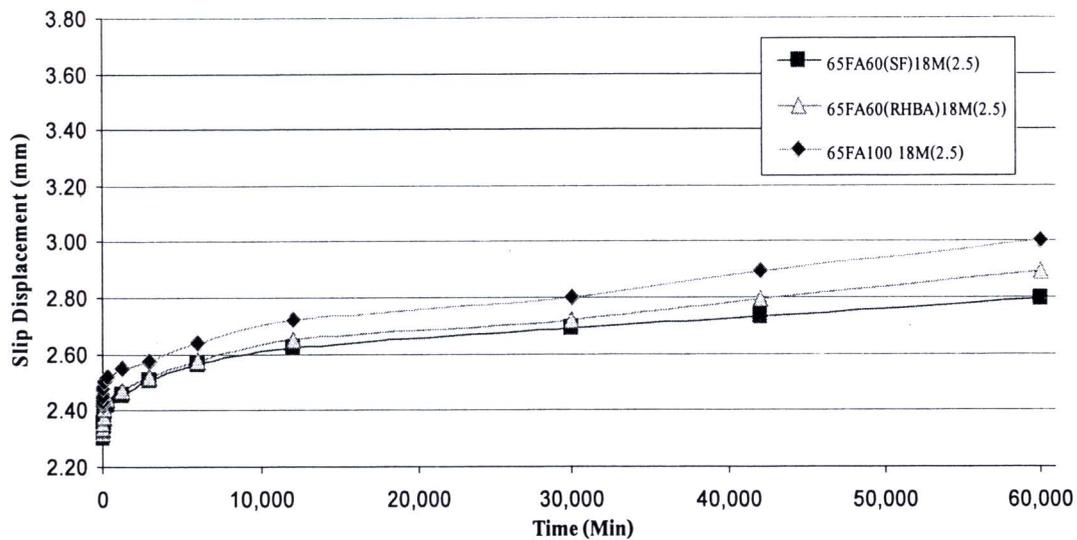
จากตารางที่ 4.4 ระยะเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อย (Slip Displacement) ที่ยึดประสานด้วยวัสดุอีโพลิเมอร์เพสต์จะทำการเทียบกับระยะหลุดของเหล็กข้ออ้อยที่ฝังในคอนกรีต (คอนกรีตควบคุม) ที่รับแรงกระทำค้ำร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว ตามมาตรฐาน ACI 408 [25] ระบุว่ากำลังยึดเหนี่ยว (Bond Strength) ที่เกิดระหว่างเหล็กเสริมข้ออ้อยและคอนกรีตต้องไม่เกิน 800 psi หรือ 5.7 MPa ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมในงานวิจัยนี้จะอยู่ที่ประมาณร้อยละ 50

4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะหลุดของเหล็กเสริมเทียบกับเวลาในวัสดุยึดประสานอีโพลิเมอร์ จากการทดสอบความคงทนของวัสดุยึดประสานอีโพลิเมอร์เพสต์ที่รับกำลังยึดเหนี่ยวแบบค้ำเป็นเวลา 1,000 ชั่วโมง [24] จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กเสริม

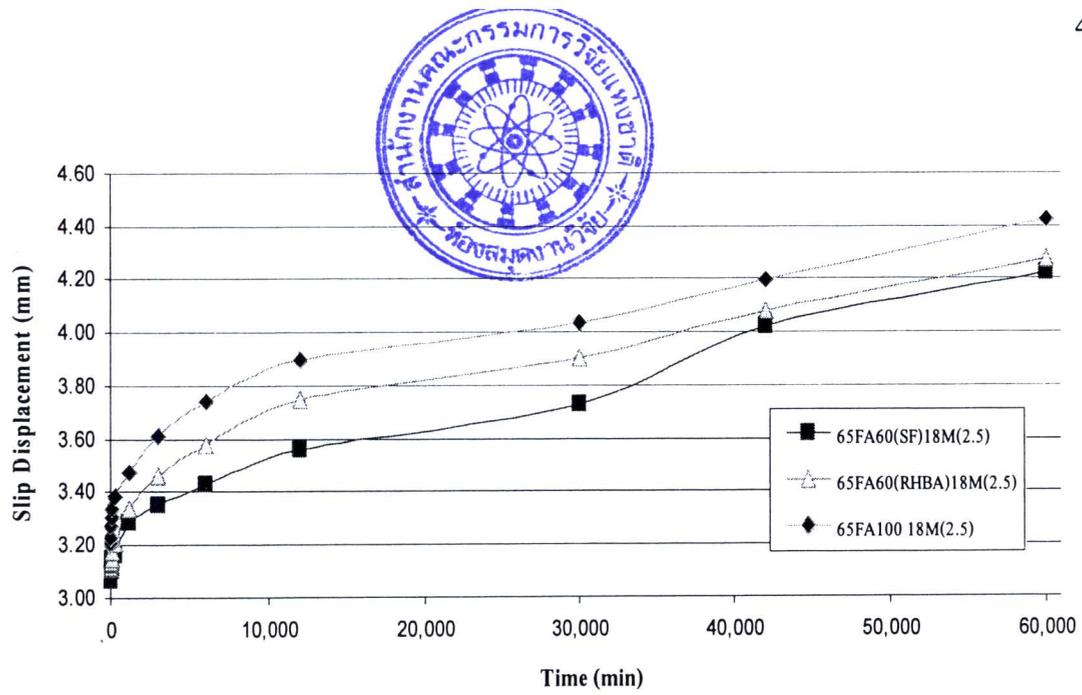
(Slip Displacement) เทียบกับระยะเวลา (Time) และแสดงผลในแต่ละระดับของแรงกระทำคงค้างได้
 ค้างรูปที่ 4.5 ถึง 4.7



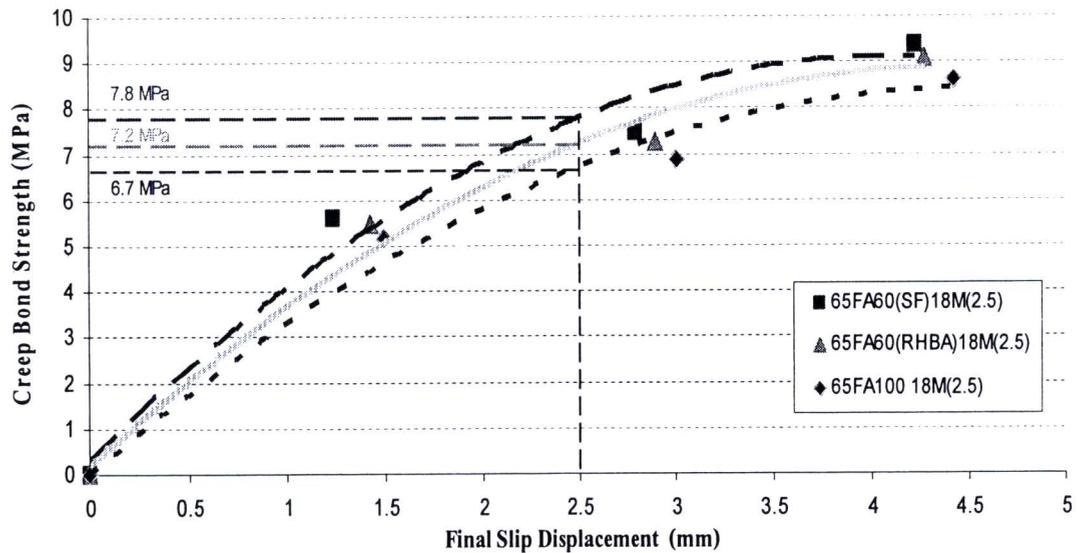
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด (Slip Displacement) ของเหล็กข้ออ้อยเทียบกับ
 เวลา ซึ่งยึดประสานกันด้วยอีโพลีเมอร์เฟสค์ตามส่วนผสมต่างๆ เมื่อให้แรงกระทำ
 คงค้างที่ร้อยละ 30 และเปรียบเทียบกับตัวควบคุมที่ร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด (Slip Displacement) ของเหล็กข้ออ้อยเทียบกับ
 เวลา ซึ่งยึดประสานกันด้วยอีโพลีเมอร์เฟสค์ตามส่วนผสมต่างๆ เมื่อให้แรงกระทำ
 คงค้างที่ร้อยละ 40



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด (Slip Displacement) ของเหล็กข้ออ้อยเทียบกับเวลา ซึ่งยึดประสานกันด้วยอีโพลีเมอร์เพสต์ตามส่วนผสมต่างๆ เมื่อให้แรงกระทำคงค้างที่ร้อยละ 50



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุด (Slip Displacement) ของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1,000 ชั่วโมง และค่ากำลังยึดเหนี่ยวของอีโพลีเมอร์เพสต์ส่วนผสมต่างๆ

จากกราฟรูปที่ 4.5 - 4.7 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อย (Slip Displacement) เทียบกับเวลา (Time) ของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์หรือเส้นโค้งการคืบ (Creep Curve) จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อแรงกระทำคงค้างเริ่มต้นยิ่งมาก วัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะมีพฤติกรรมการคืบมากขึ้นด้วย เช่น ที่แรงกระทำร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวในวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์รูปที่ 4.7 จะเห็นพฤติกรรมการคืบในระยะที่ 3 อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าแรงกระทำคงค้างส่งผลโดยตรงกับพฤติกรรมการคืบดังจะเห็นได้จากกราฟรูปที่ 4.5 และเมื่อเปรียบเทียบกับระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยในคอนกรีตควบคุมกับจีโอโพลิเมอร์เพสต์พบว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมเมื่อรับแรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยว ซึ่งเมื่อดูค่าภาระแรงกระทำจากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าแรงกระทำคงค้างที่ให้แก่คอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ 14.49 kN ใกล้เคียงกับภาระแรงกระทำที่ให้กับจีโอโพลิเมอร์เพสต์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 14.10 13.72 และ 13.04 kN (ที่ร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด) แต่กลับพบว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความคงทนต่อแรงกระทำคงค้างได้ดีกว่าคอนกรีตควบคุม

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1,000 ชั่วโมง (Final Slip Displacement) เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยว (Creep Bond Strength) รูปที่ 4.8 พบว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 มีความคงทนต่อแรงกระทำคงค้างมากที่สุดสังเกตได้จากเส้นกราฟอยู่เหนือเส้นอื่นๆ และจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วนมีความคงทนน้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังยึดเหนี่ยวมาก ความคงทนต่อแรงกระทำคงค้างก็จะมากตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาการเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตร ตาม ASTM C234 [22] ที่เวลา 1,000 ชั่วโมง พบว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 กำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ต้องไม่เกิน 7.8 MPa (จากรูปที่ 4.8 โดยการลากตัดเส้นกราฟที่ระยะ 2.5 มิลลิเมตร) หรือคิดเป็นร้อยละ 42 ของกำลังยึดเหนี่ยว วัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 และอัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วนพบว่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ต้องไม่เกิน 7.2 MPa และ 6.7 MPa หรือคิดเป็นร้อยละ 40 และ 39 ของกำลังยึดเหนี่ยวตามลำดับ จึงจะทำให้ระยะการเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยไม่เกิน 2.5 มิลลิเมตรเช่นเดียวกัน สามารถบอกได้ว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์สามารถใช้เป็นวัสดุซ่อมแซมที่มีความคงทนต่อแรงกระทำคงค้างที่ดีได้แต่ต้องเป็นการรับน้ำหนักบรรทุกที่ไม่มากจนเกินไปหรือไม่เกินร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด

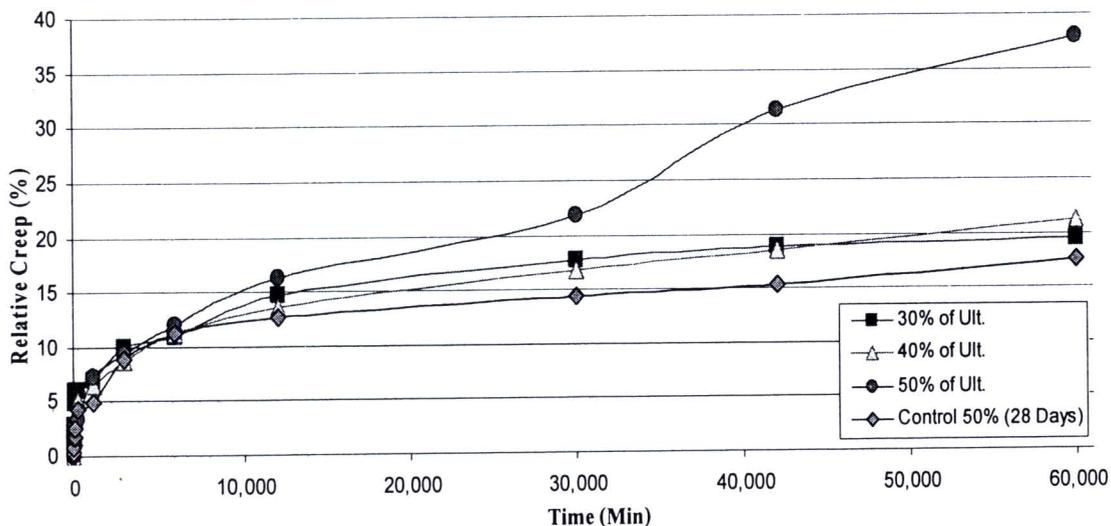
4.3.2 การคืบสัมพัทธ์และอัตราการคืบของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยอีโพลิเมอร์เฟสท์เมื่อรับแรงกระทำค้ำ

การคืบสัมพัทธ์ (Relative Creep) สามารถบอกถึงความเร็วของเหล็กที่หลุดจากคอนกรีต จากตารางที่ 4.5 วัสดุยึดประสานอีโพลิเมอร์เฟสท์ที่รับน้ำหนักบรรทุกค้ำมากจะส่งผลให้เหล็กหลุดออกมาเร็วขึ้นด้วย โดยเฉพาะเมื่อรับแรงกระทำค้ำร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว พบว่าอัตราการคืบสัมพัทธ์จะสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เช่น วัสดุอีโพลิเมอร์เฟสท์อัตราส่วนเถ้านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 รับแรงกระทำค้ำร้อยละ 30 40 และ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว มีอัตราการคืบร้อยละ 19.37 21.26 และ 37.96 ตามลำดับ หรือ วัสดุอีโพลิเมอร์เฟสท์อัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ 60:40 มีอัตราการคืบร้อยละ 20.81 24.68 และ 37.50 ตามลำดับ และที่ร้อยละแรงกระทำค้ำเท่ากัน พบว่าการคืบสัมพัทธ์ไม่แตกต่างกัน เช่น ที่ปริมาณน้ำหนักบรรทุกร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยว ในวัสดุอีโพลิเมอร์เฟสท์อัตราส่วนเถ้านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 เถ้านหินต่อเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ 60:40 และเถ้านหินล้วนมีการคืบสัมพัทธ์ที่ 1,000 ชั่วโมง ร้อยละ 19.37 20.81 และ 21.59 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าการคืบสัมพัทธ์จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อวัสดุอีโพลิเมอร์รับแรงกระทำค้ำร้อยละเท่ากัน และเมื่อทำการเปรียบเทียบการคืบสัมพัทธ์กับคอนกรีตควบคุมพบว่าวัสดุยึดประสานอีโพลิเมอร์เฟสท์ มีการคืบสัมพัทธ์ที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุมมากเมื่อรับแรงกระทำค้ำร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว จากการทดสอบดังกล่าวสามารถบอกได้ว่าวัสดุอีโพลิเมอร์เฟสท์ที่มีระยะเวลาเถื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยที่ระยะเวลาช่วงปลายมากจะส่งผลให้การคืบสัมพัทธ์ที่มากขึ้นเช่นกัน

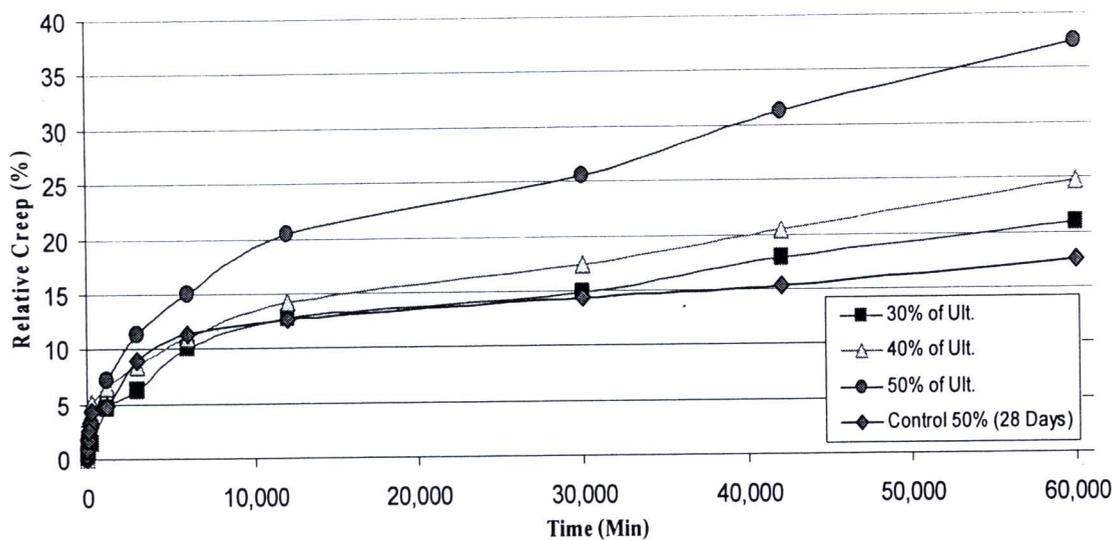
ตารางที่ 4.5 การคืบสัมพัทธ์ที่ 1,000 ชั่วโมง เมื่อให้น้ำหนักบรรทุกค้ำที่ร้อยละ 30 40 และ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยอีโพลิเมอร์

Mix Symbol	Relative Creep (%)		
	30% of UBS	40% of UBS	50% of UBS
Control (28 Days)	N/A	N/A	17.48
65FA60(SF)18M(2.5)	19.37	21.26	37.96
65FA60(RHBA)18M(2.5)	20.81	24.68	37.50
65FA100 18M(2.5)	21.59	24.20	38.20

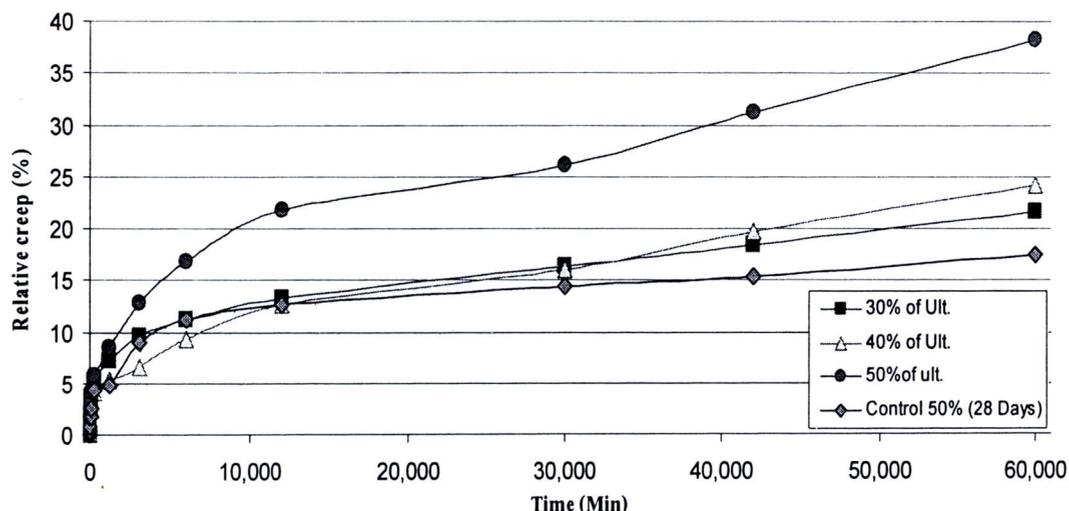
*UBS คือ Ultimate Bonding Strength



รูปที่ 4.9 อัตราการคืบของวัสดุอีพ็อกซีประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟลูมเท่ากับ 60:40 ที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 40 และ 50 และเปรียบเทียบคอนกรีตควบคุมที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50



รูปที่ 4.10 อัตราการคืบของวัสดุอีพ็อกซีประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้เท่ากับ 60:40 ที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 40 และ 50 และเปรียบเทียบคอนกรีตควบคุมที่ให้แรงกระทำคงค้างร้อยละ 50



รูปที่ 4.11 อัตราการคืบของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินส่วนที่ให้ความแรงกระทำค้ำร้อยละ 30 40 และ 50 และเปรียบเทียบคอนกรีตควบคุมที่ให้ความแรงกระทำค้ำร้อยละ 50

เมื่อพิจารณาอัตราการคืบ (Creep Rate) หรือปริมาณการคืบที่เวลาใดๆ ในแต่ละช่วงเวลาการเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 4.9-4.11 พบว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีอัตราการคืบเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน โดยในระยะแรกอัตราการคืบจะเพิ่มอย่างรวดเร็วและจะเริ่มคงที่ในช่วงกลางและในระยะปลายพบว่าอัตราการคืบมีการเพิ่มขึ้นอีกอย่างต่อเนื่อง โดยจะเห็นว่าที่แรงกระทำค้ำร้อยละ 30 และ 40 ของกำลังยึดเหนี่ยวจะเห็นอัตราการคืบของทั้ง 3 ระยะอย่างชัดเจน อัตราการคืบจะแปรผันตรงกับแรงกระทำค้ำ คือเมื่อให้แรงกระทำค้ำมากอัตราการคืบก็จะมากตามไปด้วย ดังจะเห็นเมื่อให้แรงกระทำค้ำกับวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว พบว่าอัตราการคืบจะสูงและแสดงให้เห็นพฤติกรรมการคืบในระยะที่ 3 อย่างรวดเร็วและเมื่อวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์รับแรงกระทำค้ำร้อยละ 30 และ 40 ของกำลังยึดเหนี่ยว พบว่าอัตราการคืบในระยะแรกใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม แต่ในระยะปลายพบว่าอัตราการคืบจะสูงกว่าคอนกรีตควบคุม วัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีอัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 รับแรงกระทำค้ำร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวดังรูปที่ 4.9 พบว่ามีอัตราการคืบน้อยกว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ส่วนผสมอื่นๆ และอัตราการคืบมีค่าใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุมในระยะต้นแต่ในส่วนอัตราการคืบระยะปลายพบว่ามีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมเล็กน้อย

4.3.3 สัดส่วนของระยะเลื่อนเนื่องจากการคืบต่อแรงกระทำคงค้างระหว่างเหล็กและคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เฟสค์

สัดส่วนของระยะเลื่อนเนื่องจากการคืบต่อแรงกระทำคงค้าง (Creep Displacement / Sustained Load) หาได้จากผลระยะเลื่อนของเหล็กเสริมเทียบกับแรงดึงที่เกิดในวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ เพื่อเป็นการตรวจสอบความคงทนต่อพฤติกรรมกรคืบที่เกิดในวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ขึ้นกับแรงกระทำคงค้างที่ระยะเวลา 1,000 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุม ซึ่งผลการทดสอบจะเป็นไปตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ระยะเลื่อนหลุดเนื่องจากผลของการคืบเทียบกับแรงกระทำคงค้างของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ที่นำหน้าบรทุกร้อยละ 30 40 และ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว

Mix Symbol	Applied load (Percent of UBS)	Creep Displacement (mm)	Creep Displacement / Sustained Load (mm / kN)
65FA60(SF)18M(2.5)	30 %	0.2000	0.0142
	40 %	0.4900	0.0261
	50 %	1.1625	0.0495
65FA60(RHBA)18M(2.5)	30 %	0.2450	0.0179
	40 %	0.5725	0.0313
	50 %	1.1650	0.0509
65FA100 18M(2.5)	30 %	0.2650	0.0203
	40 %	0.5850	0.0336
	50 %	1.2250	0.0563
Control (28 Days)	30 %	N/A	N/A
	40 %	N/A	N/A
	50 %	0.2250	0.0155

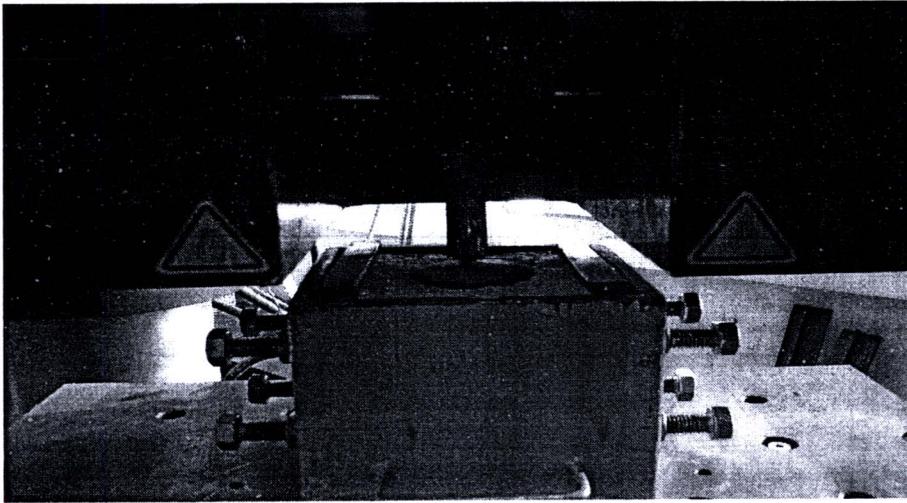
เมื่อพิจารณาระยะเลื่อนหลุด (Creep Displacement) ของเหล็กข้ออ้อยเทียบกับแรงกระทำคงค้าง (Sustained Load) ในวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสค์ดังตารางที่ 4.6 พบว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสค์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 รับแรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 40 และ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยวให้ค่าสัดส่วนของระยะเลื่อนจากการคืบต่อแรงกระทำคงค้างเท่ากับ 0.0142 0.0261 และ 0.0495 mm/kN ตามลำดับ และวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสค์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 ให้ค่าสัดส่วนของระยะเลื่อนจากการคืบต่อแรงกระทำคงค้างเท่ากับ

0.0179 0.0313 และ 0.0509 mm/kN ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมพบว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่รับแรงกระทำคงค้ำร้อยละ 30 ค่าสัดส่วนของระยะเลื่อนจากการคืบต่อน้ำหนักคงค้ำจะใกล้เคียงกับคอนกรีตควบคุม แต่เมื่อรับแรงกระทำคงค้ำร้อยละ 40 และ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว พบว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีค่า สัดส่วนของระยะเลื่อนจากการคืบต่อแรงกระทำคงค้ำมากกว่าคอนกรีตควบคุมทั้งสิ้น แสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการคืบของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์เกิดขึ้นมากกว่าคอนกรีตควบคุมที่ร้อยละแรงกระทำคงค้ำมากขึ้นไป (ร้อยละ 40 และ 50) แต่ถ้าลดปริมาณแรงกระทำคงค้ำน้อยกว่าร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดผลจากพฤติกรรมการคืบจะเกิดขึ้นน้อยเมื่อเทียบกับพฤติกรรมการคืบของคอนกรีตควบคุม

จากการทดสอบพฤติกรรมการคืบที่ผ่านมาจะเห็นว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังยึดเหนี่ยวประลัยสูงจะมีความคงทนต่อพฤติกรรมการคืบได้ดี และมีความสอดคล้องกับกำลังอัดประลัยของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ด้วยกล่าวคือ จีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังอัดสูงจะส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สูงขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพร้อมพงศ์ ผุงเพิ่มตระกูลและคณะ [31] ได้กล่าวว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 มีกำลังอัดที่ 28 วัน เท่ากับ 440 กก/ซม² ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ให้กำลังอัดสูงสุดและให้กำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 79 กก/ซม² ซึ่งเป็นกำลังยึดเหนี่ยวประลัยสูงที่สุดเช่นกัน

4.4 ผลของแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาที่มีต่อกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์

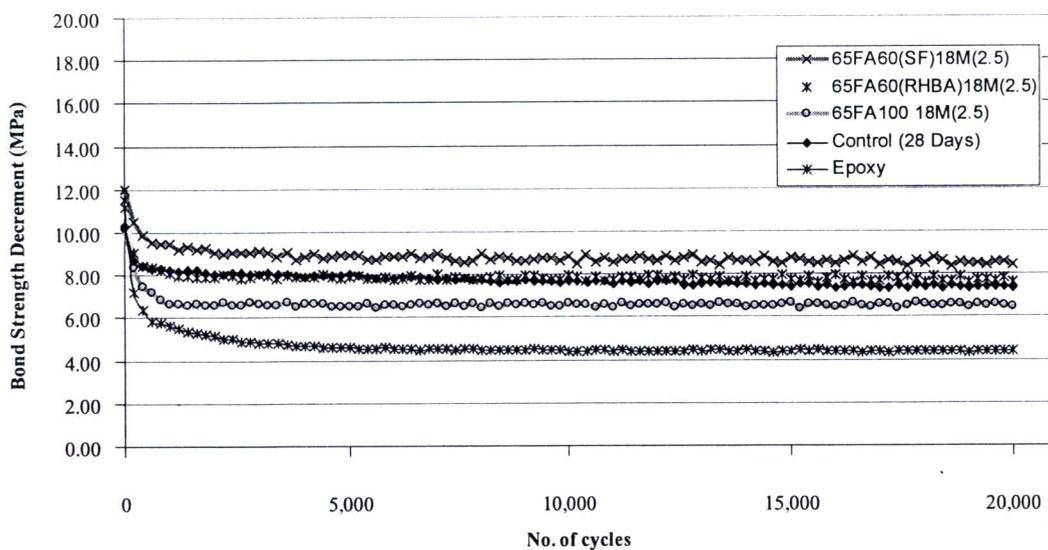
ในการศึกษาส่วนนี้จะเป็นการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์ เมื่อรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาหรือการศึกษาพฤติกรรมการล้า (Fatigue) โดยจะเริ่มทดสอบที่อายุเพสต์ 28 วัน นับจากวันที่เริ่มผสม การทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวซ้ำไปซ้ำมาจะเป็นในลักษณะ ดึง-ปล่อย (Cyclic pull out test) ในระนาบเดียวกับการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวประลัย เพื่อไม่ให้เกิดแรงอัดขึ้นภายในเหล็กข้ออ้อยและภายในรูเจาะ ใช้ความถี่ในการทดสอบเท่ากับ 1.0 และ 1.5 Hz และระยะเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยหรือแอมพลิจูดการสั่น (Amplitude) เท่ากับ 0.50 0.75 และ 1.0 มิลลิเมตร การทดสอบจะควบคุม Amplitude และวัดการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงเค้น (Stress) ทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ การติดตั้งตัวอย่างทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4.12 หลังจากทำการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวซ้ำไปซ้ำมาแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวประลัยอีกครั้ง เพื่อดูค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่สูญเสียไปหลังจากรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำ 20,000 รอบ



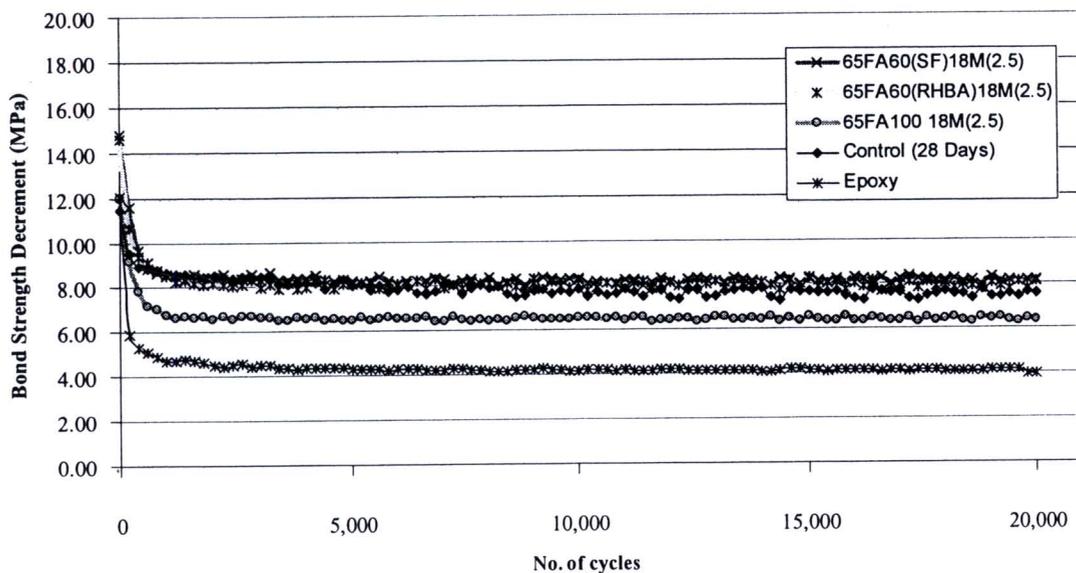
รูปที่ 4.12 วิธีการติดตั้งตัวอย่างทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมา

4.4.1 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับรอบการสั่นหลังจากรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานกันด้วยอีโพลีเมอร์เพสต์

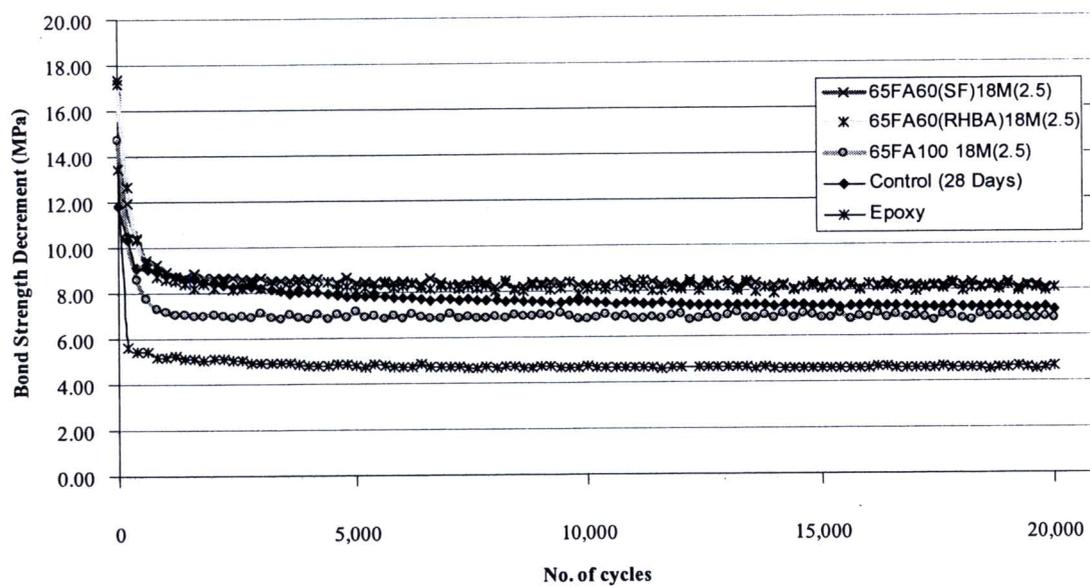
จากการทดสอบความคงทนของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ เมื่อรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา สามารถสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลง เทียบกับจำนวนรอบการสั่น (S-N Curve) ดังรูปที่ 4.13 ถึง 4.18



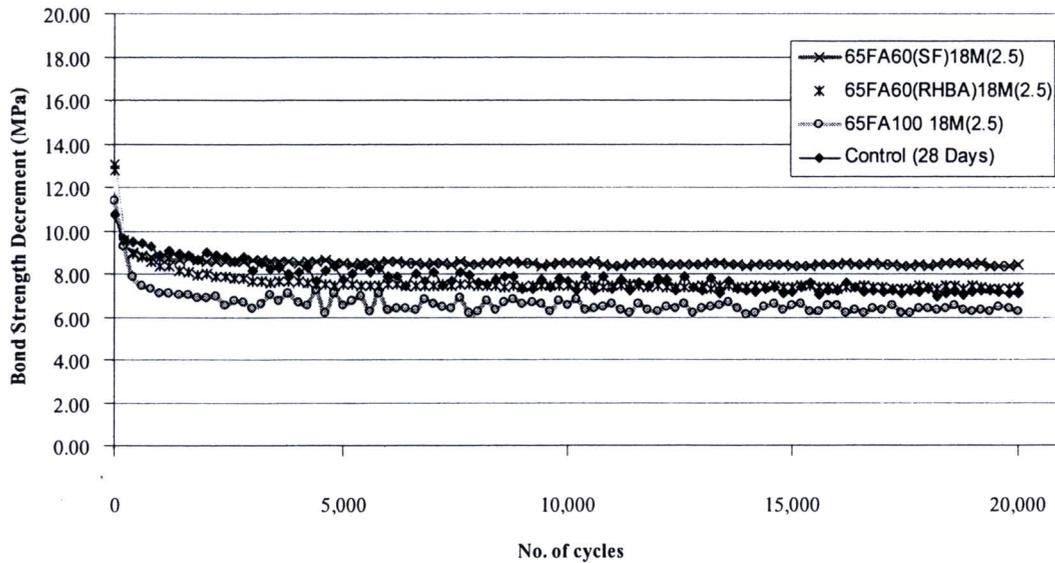
รูปที่ 4.13 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ ที่ความถี่ 1.0 Hz แอมพลิจูดการสั่น 0.50 มิลลิเมตร



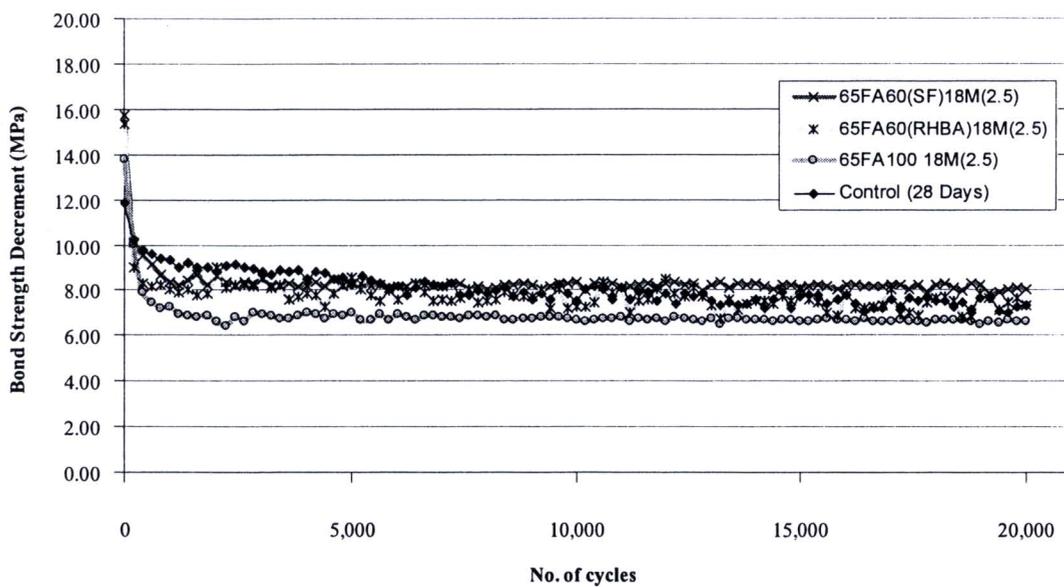
รูปที่ 4.14 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์
เฟสค์ ที่ความถี่ 1.0 Hz แอมพลิจูดการสั่น 0.75 มิลลิเมตร



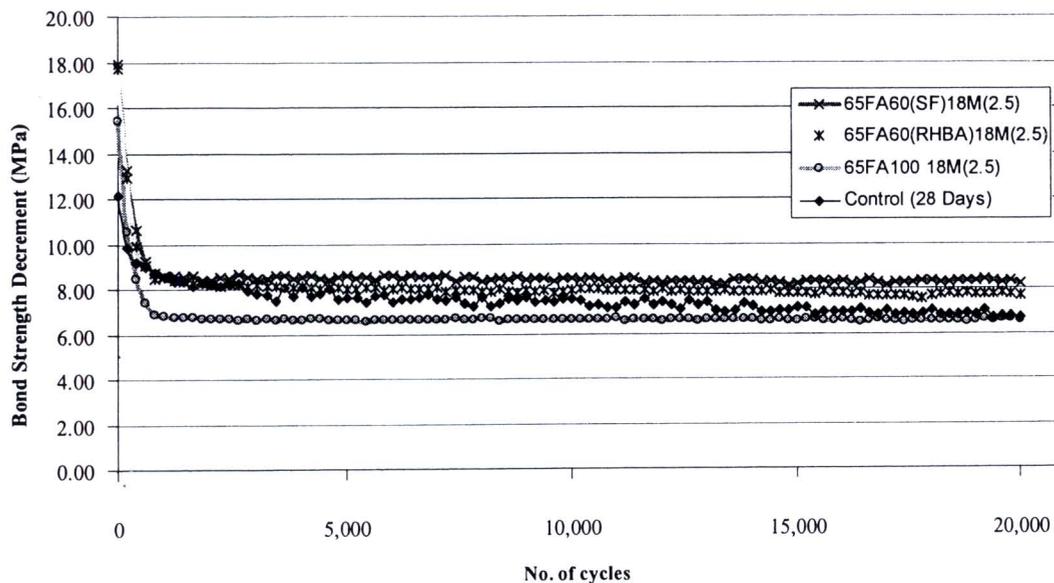
รูปที่ 4.15 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์
เฟสค์ ที่ความถี่ 1.0 Hz แอมพลิจูดการสั่น 1.0 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.16 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์
เพสต์ ที่ความถี่ 1.5 Hz แอมพลิจูดการสั่น 0.50 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.17 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์
เพสต์ ที่ความถี่ 1.5 Hz แอมพลิจูดการสั่น 0.75 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.18 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงเทียบกับจำนวนรอบการสั่นของวัสดุยึดประสานจีโอโพลีเมอร์ เพสต์ ที่ความถี่ 1.5 Hz แอมพลิจูดการสั่น 1.0 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.13 ถึง 4.18 พบว่าเมื่อให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาที่วัสดุยึดประสานจีโอโพลีเมอร์ ความคงทนของวัสดุจะลดลงค่อนข้างสูง เห็นได้จากกำลังยึดเหนี่ยวลดลง (Bond Strength Decrement) อย่างรวดเร็วที่รอบการสั่นแรกๆ และเมื่อทดสอบที่ระยะแอมพลิจูดมากขึ้น พบว่าความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวจะลดลงด้วยเช่นกัน และเมื่อพิจารณาเทียบกับความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยที่ฝังในคอนกรีต (คอนกรีตควบคุม) ที่อายุ 28 วันจากกราฟข้างต้น พบว่าคอนกรีตควบคุมมีความคงทนต่อกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมาดีกว่าวัสดุจีโอโพลีเมอร์เพสต์ และเนื่องจากกำลังยึดเหนี่ยวของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ลดลงอย่างรวดเร็วและจะคงที่ต่อไปเมื่อรอบการสั่นเพิ่ม ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลีเมอร์เพสต์ดังกล่าวมีขีดจำกัดการล้า (Endurance Limit) ซึ่งกำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้านี้จะไม่ใช่กำลังจากวัสดุยึดประสานจากจีโอโพลีเมอร์โดยตรงแต่จะเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเหล็กข้ออ้อยและจีโอโพลีเมอร์แตกแล้ว สาเหตุมาจากที่ขีดจำกัดการล้าจีโอโพลีเมอร์เกิดการแตกแล้วแต่ก็ยังคงรับกำลังได้เล็กน้อยซึ่งเกิดจากแรงเสียดทาน แต่ถึงแม้ว่าจีโอโพลีเมอร์เพสต์จะมีความคงทนต่อกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมาต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมแต่เมื่อเทียบกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงกับอ็อกซี่ที่นำมาศึกษาพร้อมด้วย (รูปที่ 4.13 ถึง 4.15) ความคงทนของจีโอโพลีเมอร์เพสต์มีค่าสูงกว่าอ็อกซี่อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงจนถึงขีดจำกัดการล้าของอ็อกซี่ลดลงสูงกว่าจีโอโพลีเมอร์เพสต์และคอนกรีตควบคุม

เมื่อพิจารณาความคงทนต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของจีโอโพลีเมอร์เพสต์ทั้งสามอัตราส่วนผสมจะเห็นว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนผสมเก้าส่วนหิโนต่อซีลิกาฟุ่ม 60:40 ความถี่การสั่น 1.0 Hz ระยะแอมพลิจูดการสั่น (Amplitude) 0.50 มิลลิเมตร กำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรก (Initial Bond Strength หรือ IBS) เท่ากับ 12 MPa และจุดที่กำลังยึดเหนี่ยวถึงขีดจำกัดการล้า (Fatigue

Strength) เท่ากับ 8.5 Mpa จะเห็นว่ากำลังยึดเหนี่ยวที่จุดทั้งสองสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนผสมอื่นๆและคอนกรีตควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.3 และ 7.4 MPa ตามลำดับ เป็นเพราะกำลังยึดเหนี่ยวประลัยของจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเหล่านี้หันต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 มีค่าสูงกว่าคอนกรีตควบคุมและจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนผสมอื่นๆ ฉะนั้นเราสามารถวิเคราะห์ความคงทนของจีโอโพลิเมอร์เพสต์ได้จากผลต่างกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรก (Initial Bond Strength) และกำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้า (Fatigue Bonding Strength หรือ FBS) จะแสดงเป็นค่าร้อยละการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยว (Bond Strength Decrement) และแสดงค่าร้อยละความแข็งแรงของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์และคอนกรีตควบคุม โดยจะนำค่า Fatigue Bonding Strength , FBS ไปเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดของจีโอโพลิเมอร์เพสต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้ในการออกแบบสำหรับใช้งานจริง ดังตารางที่ 4.7 ถึง 4.8

ตารางที่ 4.7 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่ความถี่การสั่น 1.0 Hz

Mix Symbol	Amplitude (mm)	IBS (MPa)	FBS (MPa) (Comparison with UBS %)	Bond Strength Decrement (%)
65FA60(SF)18M(2.5)	0.50	12.0	8.5 (45.5)	29.12
	0.75	14.8	8.2 (43.9)	44.59
	1.00	17.3	8.1 (43.3)	53.18
65FA60(RHBA)18M(2.5)	0.50	11.5	7.7 (42.3)	33.04
	0.75	14.6	7.8 (42.9)	46.57
	1.00	17.5	8.0 (44.0)	54.28
65FA100 18M(2.5)	0.50	10.2	6.5 (37.8)	36.27
	0.75	12.0	6.3 (36.6)	47.50
	1.00	14.7	6.7 (39.0)	54.42
Control (28 Days)	0.50	10.3	7.4 (60.2)	28.16
	0.75	11.4	7.6 (61.8)	33.33
	1.00	11.8	7.1 (57.7)	39.83
Epoxy	0.50	11.2	4.3 (31.9)	61.61
	0.75	12.0	4.1 (30.4)	65.83
	1.00	13.4	4.6 (34.3)	65.67

UBS : 65FA60(SF)18M(2.5) (28 Days) = 18.7 MPa, 65FA60(RHBA)18M(2.5) (28 Days) = 18.2 MPa

65FA100 18M(2.5) (28 Days) = 17.2 MPa, Control (28 Days) = 12.3 MPa , Epoxy (3 Days) = 13.5 MPa

ตารางที่ 4.8 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมซึ่งยึดประสานด้วยอีโพลีเมอร์
เพสต์ที่มีความถี่การสั่น 1.5 Hz

Mix Symbol	Amplitude (mm)	IBS (MPa)	FBS (MPa) (Comparison with UBS %)	Bond Strength Decrement (%)
65FA60(SF)18M(2.5)	0.50	13.1	8.4 (44.9)	35.87
	0.75	15.7	8.2 (43.9)	47.78
	1.00	17.9	8.2 (43.9)	54.19
65FA60(RHBA)18M(2.5)	0.50	12.8	7.4 (40.7)	42.18
	0.75	15.4	7.6 (41.8)	50.65
	1.00	17.7	7.8 (42.9)	55.93
65FA100 18M(2.5)	0.50	11.3	6.3 (36.6)	44.25
	0.75	13.8	6.7 (40.0)	51.54
	1.00	15.4	6.6 (38.4)	57.14
Control (28 Days)	0.50	10.7	7.2 (58.5)	32.71
	0.75	11.8	7.2 (58.5)	38.98
	1.00	12.1	6.7 (54.5)	44.62

UBS : 65FA60(SF)18M(2.5) (28 Days) = 18.7 MPa, 65FA60(RHBA)18M(2.5) (28 Days) = 18.2 MPa
65FA100 18M(2.5) (28 Days) = 17.2 MPa, Control (28 Days) = 12.3 MPa , Epoxy (3 Days) = 13.5 MPa

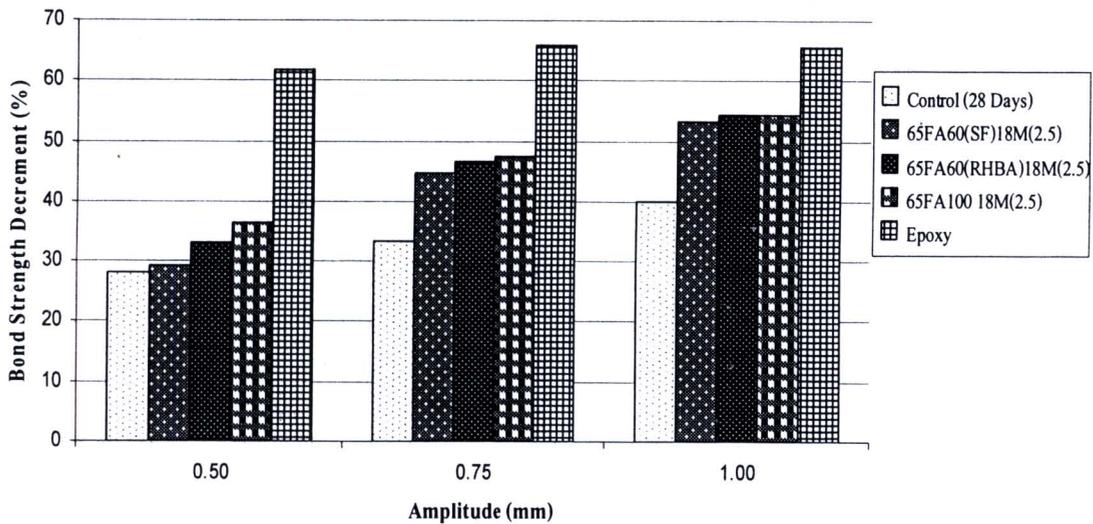
จากตารางที่ 4.7 ถึง 4.8 แสดงค่าการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยว (Bond Strength Decrement) ที่ความถี่ 1.0 และ 1.5 Hz แอมพลิจูดการสั่น (Amplitude) 0.50 0.75 และ 1.0 มิลลิเมตร ค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรก (IBS) จะส่งผลโดยตรงกับกำลังยึดเหนี่ยวคือถ้ากำลังยึดเหนี่ยวประลัยมากกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรกก็จะมาก และการเพิ่มระยะแอมพลิจูดก็ส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรกสูงด้วยเช่นกัน และถ้าร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงมีค่ามากจะส่งผลให้วัสดุยึดประสานนั้นมีความคงทนต่อแรงกระทำเข้าไปเข้ามาต่ำ เช่น วัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 ความถี่ 1.5 Hz และแอมพลิจูดการสั่น 0.50 0.75 และ 1.0 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.8) กำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรกเท่ากับ 13.1 15.7 และ 17.9 MPa กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 35.87 47.78 และ 54.19 ของกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรก ในส่วนอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้ากลบ-เปลือกไม้ 60:40 และอัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วนมีความคงทนต่อแรงกระทำเข้าไปเข้ามาต่ำกว่าอีโพลีเมอร์เพสต์ส่วนผสมซิลิกาฟุ่มเล็กน้อยดังรูปที่ 4.19-4.20 เนื่องจากร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงมีค่าสูงกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความคงทนของเหล็กที่ฝังใน

คอนกรีต (คอนกรีตควบคุม) จะเห็นว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความคงทนต่อแรงกระทำเข้าไปเข้ามาต่ำกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงของคอนกรีตควบคุมคิดเป็นร้อยละ 32.71 38.98 และ 44.62 ของกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรก เป็นเพราะจีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุที่มีความเปราะ (Brittle) เมื่อรับแรงกระทำเข้าไปเข้ามาวัสดุจะเกิดการแตกร้าวภายในรูเจาะ ส่งผลให้วัสดุจีโอโพลิเมอร์มีกำลังยึดเหนี่ยวลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบวัสดุยึดประสานอีพ็อกซีพบว่าอีพ็อกซีซึ่งเป็นวัสดุยึดประสานในท้องตลาดมีความคงทนต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์และคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด จะเห็นได้จากกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงมีค่าสูงซึ่งคิดเป็นร้อยละ 61.61 65.83 และ 65.67 ของกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรก ที่ความถี่ 1.0 Hz ระยะแอมพลิจูด 0.50 0.75 และ 1.0 ตามลำดับ

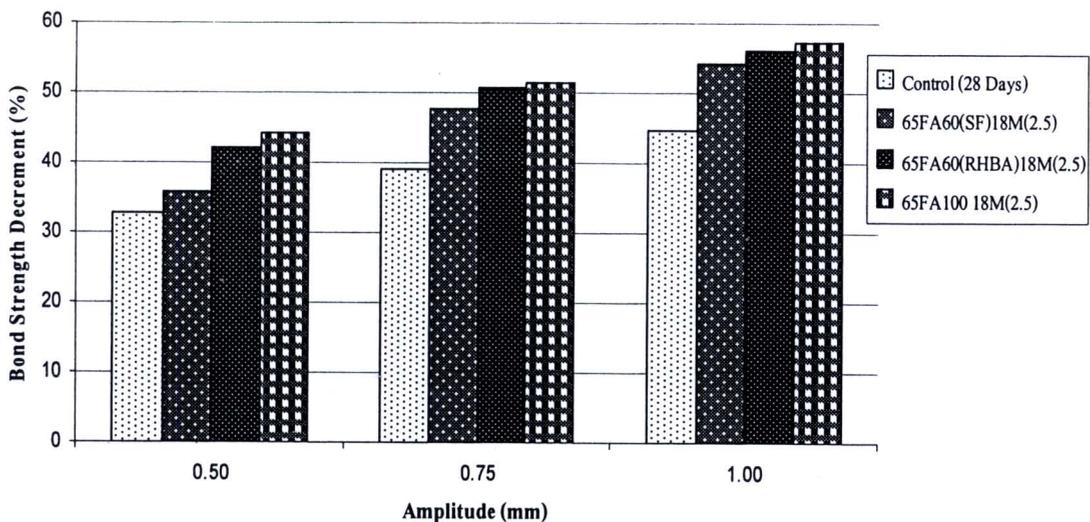
ผลของความถี่เมื่อระยะแอมพลิจูดการสั่นคงที่พบว่าความคงทนของวัสดุเมื่อรับกำลังยึดเหนี่ยวแบบเข้าไปเข้ามาจะมีค่าลดลงเมื่อความถี่การสั่นเพิ่มขึ้น เช่น วัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 ระยะแอมพลิจูดการสั่น 0.75 มิลลิเมตร ความถี่ 1.0 และ 1.5 Hz ค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 44.59 และ 47.78 ของกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรกตามลำดับ หรือจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ 60:40 กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 46.57 และ 50.65 ของกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรกตามลำดับ และจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้านหินล้วน กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 47.50 และ 51.54 ของกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรกตามลำดับ ในส่วนคอนกรีตควบคุมจะเห็นว่าความคงทนต่อกำลังยึดเหนี่ยวแบบเข้าไปเข้ามาจะลดลงเมื่อความถี่การสั่นเพิ่มขึ้นเช่นกันคือเมื่อให้ระยะแอมพลิจูดการสั่น 1.0 มิลลิเมตร ความถี่ 1.0 และ 1.5 Hz กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงคิดเป็นร้อยละ 39.83 และ 44.62 ของกำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรกตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความถี่การสั่นมากขึ้นจะส่งผลให้กำลังยึดเหนี่ยวลดลงเพิ่มขึ้น ทำให้ความคงทนของวัสดุยึดประสานมีค่าต่ำลง

เมื่อพิจารณาค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้า (FBS) พบว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวจะไม่ใช่กำลังจากวัสดุยึดประสานแต่จะเป็นกำลังยึดเหนี่ยวที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอโพลิเมอร์ที่แตกร้าวแล้ว ซึ่งเมื่อนำค่า FBS มาเทียบกับค่ากำลังยึดเหนี่ยวประลัย (Ultimate Bond Strength, UBS) จะได้เป็นค่าความแข็งแรงของตัวยึดประสาน ในส่วนวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 จะเห็นว่ากำลังยึดเหนี่ยวที่จุด FBS จะประมาณ 8.2 -8.5 MPa (ตารางที่ 4.7-4.8 คิดเป็นร้อยละ 42.9-45.5 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัย) และในวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้านหินต่อเถ้าเกลบ-เปลือกไม้ 60:40 และอัตราส่วนเถ้านหินล้วน พบว่าค่าความแข็งแรงต่ำกว่ากับจีโอโพลิเมอร์เพสต์ส่วนผสมซิลิกาฟุ่มเล็กน้อยคือร้อยละ 36.6-44.0 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัย และเมื่อเปรียบเทียบกับคอนกรีตควบคุมพบว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีความคงทนของตัวยึดประสานต่ำกว่า

คอนกรีตควบคุมซึ่งเท่ากับร้อยละ 54.5-61.8 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัย ส่วนวัสดุที่ออกซึ่งค่าความแข็งแรงของตัวยึดประสานต่ำกว่าจีโอโพลิเมอร์เฟสดีและคอนกรีตควบคุมซึ่งเท่ากับร้อยละ 30.4-34.3 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัย สำหรับการออกแบบให้วัสดุยึดประสานรับกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมา ต้องคำนึงถึงค่าความล้าในวัสดุด้วย ดังนั้นจึงควรพยายามออกแบบให้วัสดุรับกำลังยึดเหนี่ยว (Bond Stress) ต่ำกว่าค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้าหรือ Fatigue Bonding Strength ,FBS



รูปที่ 4.19 ร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสดีที่รอบการสั่นแรกเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้า ที่ความถี่ 1.0 Hz



รูปที่ 4.20 ร้อยละกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงระหว่างคอนกรีตกับเหล็กเสริมที่ยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เฟสดีที่รอบการสั่นแรกเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวที่ขีดจำกัดการล้า ที่ความถี่ 1.5 Hz

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเห็นว่าวัสดุยึดประสานอีโพอลิเมอร์เพสต์มีความคงทนต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาลดลงเมื่อให้ความถี่และแอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้น และถ้ากำลังยึดเหนี่ยวประลัยมีค่าสูง ความคงทนต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของอีโพอลิเมอร์เพสต์ก็จะมากตามไปด้วย ในส่วนวัสดุยึดประสานอีพ็อกซี ความคงทนต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมามีค่าน้อยกว่าอีโพอลิเมอร์เพสต์และคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบการลดลงของกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานได้จากกราฟรูปที่ 4.19 ถึง 4.20 และหลังจากการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมาแล้วนำตัวอย่างไปทดสอบหาลงกำลังยึดเหนี่ยวประลัยอีกครั้งเพื่อดูค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่สูญเสีย (Bonding Strength Loss) ผลการทดสอบดังกล่าวจะแสดงไว้ในหัวข้อถัดไป

4.4.2 กำลังยึดเหนี่ยวที่สูญเสียของวัสดุยึดประสานอีโพอลิเมอร์เพสต์หลังให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา
ตารางที่ 4.9 ถึง 4.10 เป็นผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานหลังจากให้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ เพื่อวิเคราะห์กำลังยึดเหนี่ยวที่สูญเสีย (Bonding Strength Loss) โดยจะทำการเปรียบเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัย (Ultimate Bond strength) ของวัสดุยึดประสานนั้นๆ ที่อายุ 28 วัน

จากการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานหลังจากให้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ดังตารางที่ 4.9 ถึง 4.10 พบว่าวัสดุยึดประสานจะเกิดการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยว (Bonding Strength Loss) ทำให้กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือ (Remaining Bond Strength, RBS) มีค่าลดลง โดยจะสัมพันธ์กับระยะแอมพลิจูดการสั่น (Amplitude) คือถ้าระยะแอมพลิจูดมากกำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือจะมีค่าลดลงดังเช่นวัสดุอีโพอลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 ให้ความถี่การสั่น 1.0 Hz ระยะแอมพลิจูดเท่ากับ 0.50 0.75 และ 1.0 มิลลิเมตร (ตารางที่ 4.9) กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 16.5 15.5 และ 14.3 MPa โดยคิดเป็นร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 11.76 17.21 และ 23.36 ตามลำดับ วัสดุอีโพอลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้ากลบ-เปลือกไม้ 60:40 กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 15.6 14.7 และ 13.4 MPa โดยคิดเป็นร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 14.40 19.30 และ 26.43 ตามลำดับ และอีโพอลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 14.6 13.7 และ 12.0 MPa โดยคิดเป็นร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 15.76 20.82 และ 30.45 ตามลำดับ จะเห็นว่าอีโพอลิเมอร์เพสต์ส่วนผสมเถ้าถ่านหินล้วนและเถ้ากลบ-เปลือกไม้ มีการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวใกล้เคียงกันแต่มีค่าสูงกว่าอีโพอลิเมอร์เพสต์ส่วนผสมซิลิกาฟุ่มเล็กน้อย ในส่วนของคอนกรีตควบคุมพบว่าการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวต่ำกว่าวัสดุอีโพอลิเมอร์เพสต์โดยมีร้อยละการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวที่ความถี่การสั่น 1.0 Hz เท่ากับ 7.22 16.37 และ 19.20 แต่เมื่อเทียบกับวัสดุยึดประสานอีพ็อกซีแล้วจะเห็นว่าวัสดุอีพ็อกซีมีร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยว (Bonding

Strength Loss) สูงกว่าจีโอโพลีเมอร์เพศตัวอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีร้อยละการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 16.60 33.13 และ 49.96 ที่ระยะแอมพลิจูด 0.50 0.75 และ 1.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.9 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างที่สูญเสียไปของจีโอโพลีเมอร์เพศหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.0 Hz เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัพท์ที่ 28 วัน

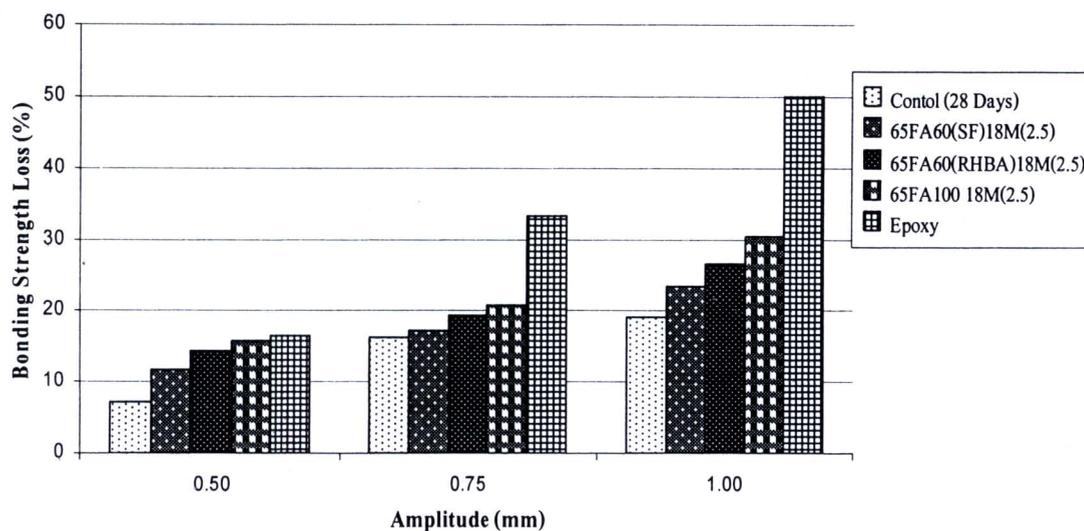
Mix Symbol	UBS (MPa)	Amplitude (mm.)	RBS (MPa)	Bonding Strength Loss (%)
65FA60(SF)18M(2.5)	18.7	0.50	16.5	11.76
		0.75	15.5	17.21
		1.00	14.3	23.36
65FA60(RHBA)18M(2.5)	18.2	0.50	15.6	14.40
		0.75	14.7	19.30
		1.00	13.4	26.43
65FA100 18M(2.5)	17.3	0.50	14.6	15.76
		0.75	13.7	20.82
		1.00	12.0	30.45
Control (28 Days)	12.3	0.50	11.4	7.22
		0.75	10.3	16.37
		1.00	9.9	19.20
Epoxy	13.5	0.50	11.2	16.60
		0.75	9.0	33.13
		1.00	6.7	49.96

ตารางที่ 4.10 กำลังยึดเหนี่ยวระหว่างที่สูญเสียไปของจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.5 Hz เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยที่ 28 วัน

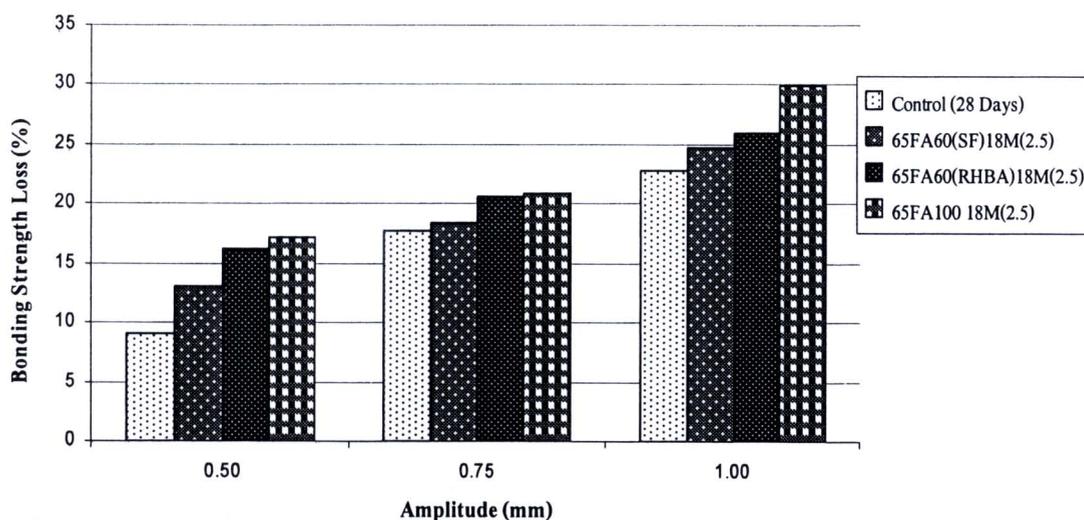
Mix Symbol	UBS (MPa)	Amplitude (mm.)	RBS (MPa)	Bonding Strength Loss (%)
65FA60(SF)18M(2.5)	18.7	0.50	16.2	13.07
		0.75	15.2	18.40
		1.00	14.0	24.76
65FA60(RHBA)18M(2.5)	18.2	0.50	15.2	16.17
		0.75	14.4	20.61
		1.0	13.5	25.90
65FA100 18M(2.5)	17.3	0.50	14.3	17.16
		0.75	13.7	20.86
		1.00	12.1	29.91
Control (28 Days)	12.3	0.50	11.2	9.08
		0.75	10.1	17.93
		1.00	9.5	22.75

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวซ้ำไปซ้ำมาความถี่การสั่น 1.5 Hz จะเห็นว่าวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์มีร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวไปในทิศทางเดียวกันกับกำลังยึดเหนี่ยวซ้ำไปซ้ำมาที่ความถี่ 1.0 Hz ดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.22 จีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อชิลิกาฟุ่ม 60:40 ให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาที่ความถี่ 1.5 Hz ระยะแอมพลิจูด 0.50 0.75 และ 1.0 มิลลิเมตร กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 16.2 15.2 และ 14.0 MPa คิดเป็นร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 13.07 18.40 และ 24.76 ตามลำดับ จีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบเปลือกไม้ 60:40 กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 15.2 14.4 และ 13.5 MPa คิดเป็นร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 16.17 20.61 และ 25.90 ตามลำดับ และจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 14.3 13.7 และ 12.1 MPa คิดเป็นร้อยละการสูญเสียเท่ากับ 17.16 20.86 และ 29.91 ตามลำดับ จากผลการทดสอบจะเห็นว่าร้อยละการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ยังคงสูงกว่าคอนกรีตควบคุมซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.08 17.93 และ 22.75 ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่มีกำลังยึดเหนี่ยวประลัยสูงจะมีร้อยละการสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวต่ำกว่าเล็กน้อย ดังเช่นจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อชิลิกาฟุ่ม 60:40 ซึ่งมีกำลังยึดเหนี่ยวประลัยสูงกว่า

จีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนผสมอื่นๆ การสูญเสียกำลังยึดเหนี่ยวหลังจากรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา จึงมีค่าน้อยกว่าแสดงให้เห็นว่า วัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังยึดเหนี่ยวประลัยสูงสามารถทนต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาได้ดีกว่าจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่มีกำลังยึดเหนี่ยวประลัยต่ำกว่าเล็กน้อย



รูปที่ 4.21 ร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.0 Hz



รูปที่ 4.22 ร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์หลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ ที่ความถี่ 1.5 Hz

เมื่อพิจารณาผลของความถี่ดังตารางที่ 4.11 จะเห็นว่าร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์และคอนกรีตควบคุมมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เช่น วัสดุจีโอโพลิเมอร์

เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟูม 60:40 ที่ความถี่การสั่น 1.0 และ 1.5 Hz แอมพลิจูดการสั่น 1.0 มิลลิเมตร มีร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 23.36 และ 24.76 ตามลำดับ หรือวัสดุจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 มีร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 26.43 และ 25.90 ตามลำดับ หรือจีโอโพลิเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินส่วนมีร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 30.45 และ 29.21 ตามลำดับ ในส่วนคอนกรีตควบคุมมีร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวเท่ากับ 19.20 และ 22.75 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลของความถี่ส่งผลกระทบต่อวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์และคอนกรีตควบคุมน้อย

ตารางที่ 4.11 ผลของความถี่ของแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับเหล็กข้ออ้อยซึ่งยึดประสานด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์

Mix Symbol	Amplitude (mm)	Bonding Strength Loss (%)	
		1.0 Hz	1.5 Hz
65FA60(SF)18M(2.5)	0.50	11.76	13.07
	0.75	17.21	18.40
	1.00	23.36	24.76
65FA60(RHBA)18M(2.5)	0.50	14.40	16.19
	0.75	19.30	20.61
	1.00	26.43	25.90
65FA100 18M(2.5)	0.50	15.76	17.16
	0.75	20.82	20.86
	1.00	30.45	29.91
Control (28 Days)	0.50	7.22	9.08
	0.75	16.37	17.73
	1.00	19.20	22.75
Epoxy	0.50	16.60	N/A
	0.75	33.13	N/A
	1.00	49.96	N/A

4.4.3 กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือหลังให้แรงกระทำเข้าไปซ้ำมาของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยตรง (คอนกรีตควบคุม)

วัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ถึงแม้ว่าจะมีร้อยละการสูญเสียของกำลังยึดเหนี่ยวมากกว่าคอนกรีตควบคุมแต่ในด้านกำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือ (Remaining Bond Strength, RBS) หลังจากรับแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมายังคงมีค่าสูงพอที่จะใช้งานต่อไปได้ โดยจะทำการเทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยของเหล็กที่ฝังในคอนกรีตโดยตรง (คอนกรีตควบคุม) ที่อายุ 28 วัน ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือหลังจากให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์เทียบกับกำลังยึดเหนี่ยวประลัยของคอนกรีตควบคุม

Mixed Symbol	Amplitude (mm)	RBS (MPa) (Comparison with control %)	
		1.0 Hz	1.5 Hz
65FA60(SF)18M(2.5)	0.50	16.5 (134)	16.2 (132)
	0.75	15.5 (126)	15.2 (124)
	1.00	14.3 (116)	14.3 (114)
65FA60(RHBA)18M(2.5)	0.50	15.6 (127)	15.2 (124)
	0.75	14.7 (120)	14.4 (117)
	1.00	13.4 (109)	13.6 (110)
65FA100 18M(2.5)	0.50	14.6 (119)	14.3 (116)
	0.75	13.7 (111)	13.7 (111)
	1.00	12.0 (98)	12.1 (98)
Epoxy	0.50	11.2 (90)	N/A
	0.75	9.0 (73)	N/A
	1.00	6.7 (55)	N/A

*กำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมมีค่าเท่ากับ 12.3 MPa คิดเป็นร้อยละ 100

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่าเมื่อวัสดุยึดประสานรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือ (Remaining Bond Strength) จะมีค่าน้อยลงเมื่อให้ระยะแอมพลิจูดการสั่นมีค่าสูงจากผลการทดสอบพบว่าวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์มีกำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือสูงกว่ากำลังยึดเหนี่ยวประลัยของคอนกรีตควบคุม เช่นวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 ระยะแอมพลิจูด 0.75 มิลลิเมตร ความถี่การสั่น 1.0 และ 1.5 Hz กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 14.3 และ 14.0 MPa คิดเป็นร้อยละ 126 และ 124 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัยคอนกรีตควบคุมตามลำดับ วัสดุอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบเปลือกไม้ 60:40 กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 13.4 และ 13.5 MPa คิดเป็นร้อยละ 109 และ 110 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัยคอนกรีตควบคุมตามลำดับ และวัสดุอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินล้วน กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าเท่ากับ 12.0 และ 12.1 MPa คิดเป็นร้อยละ 98 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัยคอนกรีตควบคุม จะเห็นว่าวัสดุอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 ซึ่งมีกำลังยึดเหนี่ยวประลัยสูง กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือจึงมีค่าสูงกว่าอีโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนอื่นๆ ในส่วนวัสดุฟ็อกซ์ กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือมีค่าต่ำกว่ากำลังยึดเหนี่ยวประลัยของคอนกรีตควบคุมอย่างเห็นได้ชัดซึ่งคิดเป็นร้อยละ 90 73 และ 55 ของกำลังยึดเหนี่ยวประลัยคอนกรีตควบคุมตามลำดับที่ความถี่ 1 Hz จากการทดสอบจะเห็นว่าวัสดุอีโพลีเมอร์เพสต์มีความคงทนต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม แต่ด้วยกำลังยึดเหนี่ยวของอีโพลีเมอร์มีค่าสูงเป็นผลให้กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือหลังจากรับแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมายังคงสูงกว่ากำลังยึดเหนี่ยวประลัยของคอนกรีตควบคุม ในการใช้งานจริงควรมีการปรับลดค่ากำลังออกแบบให้ต่ำลง เพื่อรองรับผลที่เกิดจากการล้าในวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์

4.5 กำลังยึดเหนี่ยวที่ยอมให้เมื่อวัสดุอีโพลีเมอร์เพสต์รับแรงกระทำคงค้างและแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา

จากการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้างและกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมา พบว่าวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินต่อซิลิกาฟุ่ม 60:40 และใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 18 โมลาร์ มีแนวโน้มที่จะใช้เป็นวัสดุแซมแซมในงานก่อสร้างมากที่สุด [31] เนื่องจากมีกำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 วัน เทียบเท่ากับกำลังยึดเหนี่ยวของคอนกรีตควบคุมที่อายุ 28 วันและกำลังยึดเหนี่ยวจะยังคงเพิ่มสูงขึ้นที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ในส่วนความคงทนกำลังยึดเหนี่ยวแบบซ้ำไปซ้ำมาจะพบว่าต่ำกว่าคอนกรีตควบคุม ฉะนั้นค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่ทำให้วัสดุไม่เกิดผลจากการล้าควรต่ำกว่าค่า Bond Strength ที่จุด Endurance Limits ซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.1 MPa คิดเป็นร้อยละ 43.3 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด ส่วนความคงทนต่อกำลังยึดเหนี่ยวคงค้างพบว่าที่แรงกระทำคงค้างร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุดหรือเท่ากับ 5.6 MPa การก๊ิบจะไม่ส่งผลกระทบต่อวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ดังกล่าว ในวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์เพสต์ที่ผสมเถ้าถ่านหินต่อเถ้าแกลบ-เปลือกไม้ 60:40 พบว่า

มีความคงทนต่อกำลังยึดเหนี่ยวแบบคงค้างและกำลังยึดเหนี่ยวแบบเข้าไปเข้ามาได้ดีเทียบเท่ากับจีโอโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อชิลิกาฟลูม 60:40 แต่ในด้านกำลังยึดเหนี่ยวประลัยจะเห็นว่ายังคงต้องใช้ระยะเวลาในการพัฒนากำลังที่อายุ 7 วัน จึงจะทำให้กำลังยึดเหนี่ยวมีค่ามากกว่าคอนกรีตควบคุม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในวัสดุยึดประสานจีโอโพลีเมอร์เพสต์อัตราส่วนเถ้าถ่านหินต่อชิลิกาฟลูม 60:40 มีประสิทธิภาพการนำไปใช้ในงานซ่อมแซมได้ดีที่สุด โดยเมื่อออกแบบให้รับแรงกระทำน้อยกว่าร้อยละ 30 ของกำลังยึดเหนี่ยวสูงสุด การคืบและการล้าจะไม่ส่งผลกระทบต่อวัสดุยึดประสานดังกล่าว