

## บทที่ 3 วิธีการทดสอบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบรวมถึงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุที่ใช้ และวิธีการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของคอนกรีตกับเหล็กเสริมโดยใช้โพลิเมอร์เพสต์เป็นตัวเชื่อมประสาน

### 3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.1.1 ซิลิกาฟุ้ง

ซิลิกาฟุ้ง (Silica Fume) เป็นวัสดุผสมเพิ่มชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นผลพลอยได้ของโรงงานผลิตซิลิกอนเมททัลและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นกระบวนการรีดักชันจากควอร์ตซ์ (Quartz) ที่บริสุทธิ์ไปเป็นซิลิกอนโดยวิธี Electric Arc ที่อุณหภูมิสูงถึง 2,000 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดไอ (Fume) ของ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งต่อมาจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลั่นตัวที่อุณหภูมิต่ำ ได้เป็นอนุภาคของซิลิกาขนาดเล็กมากที่ไม่เป็นผลึก ซิลิกาฟุ้งจะถูกดักจับในตัวดักจับเพื่อบรรจุใส่ถุงไว้ เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีอนุภาคที่เล็กมาก มีพื้นที่ผิวสูงมาก และอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึก จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานได้อย่างรวดเร็ว ซิลิกาฟุ้งจากโรงงานโลหะซิลิกอนและเฟอร์โรซิลิกอนอัลลอยด์เป็นซิลิกาฟุ้งที่มีคุณภาพดีโดยร้อยละ 61 ถึง 98 ประกอบด้วยซิลิกอน ซึ่งร้อยละ 85 ถึง 95 ของซิลิกอนดังกล่าวอยู่ในรูปไม่เป็นผลึกหรืออสัณฐานซึ่งมีความว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาองค์ประกอบหลักทางเคมีของซิลิกาฟุ้งคือ  $\text{SiO}_2$  ซึ่งควรอยู่ในรูปที่ไม่เป็นผลึกเป็นส่วนใหญ่ ซิลิกาฟุ้งที่มีจำหน่ายในท้องตลาดมี  $\text{SiO}_2$  มากกว่าร้อยละ 90 ขึ้นไป ส่วนที่เหลือจะเป็นองค์ประกอบของ  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  และออกไซด์อื่นๆอีกร้อยละ 1 หรือ 2 ซึ่งออกไซด์เหล่านี้ถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาณของ  $\text{SiO}_2$  คุณสมบัติทางกายภาพของซิลิกาฟุ้งที่เห็นชัดเจน คือเป็นฝุ่นผงที่ละเอียดมากสีเทา เทาดำหรือเทาอมขาว แต่ถ้าเป็นซิลิกาฟุ้งควบแน่นจะมีขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากการรวมตัวของซิลิกาฟุ้งหลายอนุภาคเข้าด้วยกัน ความถ่วงจำเพาะของซิลิกาฟุ้งมีค่าประมาณ 2.2 มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.1 ไมโครเมตร มีพื้นที่ผิวประมาณ 200,000 ถึง 250,000  $\text{cm}^2/\text{กรัม}$  ขนาดอนุภาคของซิลิกาฟุ้งมีขนาดที่เล็กมากเพราะมีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงกว่า 150 เท่า

#### 3.1.2 เถ้าแกลบ-เปลือกไม้

เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ (Rice Husk – Bark Ash) ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าของบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด จ. ฉะเชิงเทรา โดยใช้แกลบและเปลือกไม้เป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนแก่เตาเผา ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างแกลบและเปลือกไม้ในการเผา

เท่ากับ 4:1 โดยแลกเปลี่ยนวัสดุที่เหลือจากโรงสีข้าวขณะที่เปลือกไม้เป็นวัสดุที่เหลือจากไม้ยูคาลิปตัส ในการทำเชื้อกระดาษ วัตถุประสงค์ในการผลิตกระดาษไฟฟ้าของทางบริษัท เพื่อให้ภายในกลุ่มบริษัท ด้วยกัน และที่เหลือบางส่วนจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเพื่อเสริมระบบ เตาเผาที่ใช้ในการ ผลิตกระดาษไฟฟ้าเป็นแบบฟลูอิดไคซ์ เบด (Fluidized Bed) ความร้อนในการเผาอยู่ระหว่าง 800-900 องศาเซลเซียส คุณภาพของเถ้าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้มีความสม่ำเสมอสูง โดยทั่วไปพบว่าประมาณร้อยละ 20 ของแลกเปลี่ยนเปลือกไม้ที่เผาจะกลายเป็นเถ้า และจากข้อมูลของทางบริษัท ไทยเพาเวอร์ ซัพพลาย จำกัด พบว่าปริมาณเถ้าแลกเปลี่ยนเปลือกไม้ที่มีปริมาณสูงถึง 435 ตัน/วัน หรือประมาณ 160,000 ตัน/ปี

### 3.1.3 เถ้าถ่านหิน

เถ้าถ่านหิน (Fly Ash) ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เถ้าถ่านหินจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง โดยไม่ต้อง ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ มีน้ำหนักแห้งตะแกรงเบอร์ 325 เท่ากับ ร้อยละ 32.29

### 3.1.4 สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

การวิจัยครั้งนี้ใช้สาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิดเกล็ด ตาม มอก. 150-2518 โดยทำการผสมเกล็ด โซเดียมไฮดรอกไซด์กับน้ำที่ความเข้มข้น 18 โมลาร์

### 3.1.5 สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na<sub>2</sub>O·SiO<sub>2</sub>)

ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต ชนิดที่ 2 ตาม มอก. 433-2539 ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของ โซเดียมซิลิเกต

Property of Na <sub>2</sub> O·SiO <sub>2</sub>		
Sodium Oxide (Na <sub>2</sub> O)	%	15.36
Silicon Dioxide (SiO <sub>2</sub> )	%	33.28
Mole Ratio (Na <sub>2</sub> O : SiO <sub>2</sub> )		1 : 2.24
Specific Gravity (At 20°C)		1.598
Density	Baume'	54.2

### 3.1.6 เหล็กข้ออ้อย

ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 16 และ 20 มิลลิเมตร แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของเหล็กเส้นข้ออ้อยชั้นคุณภาพที่ SD40

Diameter (mm)	Cross Section Area (mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)
10	78.5	560.2	718.1
16	201.1	601.8	720.5
20	314.2	554.3	674.5

### 3.1.7 อีพ็อกซีสำหรับงานยึดประสานระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตประเภทชิโซโทรปิก

#### ชนิด 2 ส่วนผสม

อีพ็อกซีสำหรับงานเสียบเหล็กและเชื่อมประสานประเภทชิโซโทรปิกชนิด 2 ส่วนผสม ประกอบด้วย สาร A และสาร B ซึ่งสาร A ประกอบด้วย 3-อะมิโนเมทิล-3,5,5-ไตรเมทิลไซโคลเฮกซิลอะมีน: 3,6-ไดอะซอกเทน-1,8-ไดอะมีน

สาร B ประกอบด้วย ออกซิเรน อนุพันธ์ของโมโน (C12-14-อัลคิลออกซี) เมลทิลเมื่อสาร A และสาร B ทำปฏิกิริยารวมกันจะเกิดสารผสมคือ บิสฟีนอล เอ-อีพอกซีไฮดรินอีพ็อกซีเรซิน (น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย  $\leq 700$ ) มีผลระคายเคืองต่อดวงตาและผิวหนัง หากสัมผัสผิวหนังอาจทำให้เกิดการแพ้ได้และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ อาจก่อให้เกิดผลข้างเคียงต่อสภาพแวดล้อมทางน้ำ อย่าให้สัมผัสกับผิวหนัง สวมถุงมือที่เหมาะสมก่อนการใช้งาน



รูปที่ 3.1 อีพ็อกซีสำหรับงานเสียบเหล็กและเชื่อมประสานประเภทชิโซโทรปิกชนิด 2 ส่วนผสม

## 3.2 การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

### 3.2.1 การเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

สำหรับการศึกษานี้ใช้แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ ขนาด 15x15x15 ซม.<sup>3</sup> เป็นแบบหล่อคอนกรีต ซึ่งมีอัตราส่วนผสมตามตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมที่ให้ค่ากำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28 MPa

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบ

Materials	Mix Proportion (kg/m <sup>3</sup> )
Portland Cement Type I	350
Sand	787
Limestone	1027
Water	188
Water Cement Ratio (w/c)	0.5
Slump	8 cm.

### 3.2.2 การเตรียมตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์เพสต์

ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้อัตราส่วนผสมของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์จากงานวิจัยที่ผ่านมา [31] ดังจะแสดงในตารางที่ 3.4 ดังนี้

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนผสมของจีโอโพลิเมอร์เพสต์สำหรับน้ำหนักเพสต์สด 1,000 กรัม

Mix No.	Symbol	Mix Proportion (g)				
		FA	RHBA	SF	Na <sub>2</sub> OSiO <sub>2</sub>	NaOH
1	65FA60(SF)18M(2.5)	390	-	260	250	100
2	65FA60(RHBA)18M(2.5)	390	260	-	250	100
3	65FA100 18M(2.5)	650	-	-	250	100

\*FA คือ เถ้าถ่านหิน RHBA คือ เถ้าแกลบ-เปลือกไม้ และ SF คือ ซิลิกาฟูม

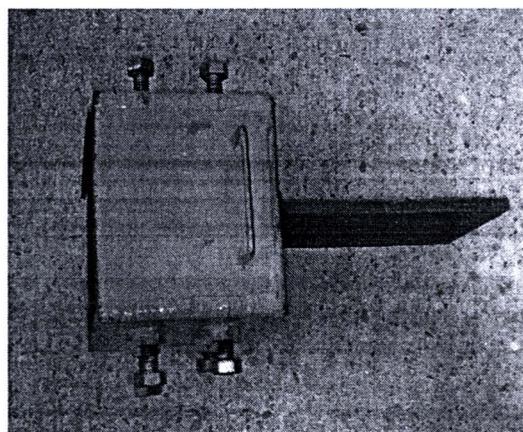
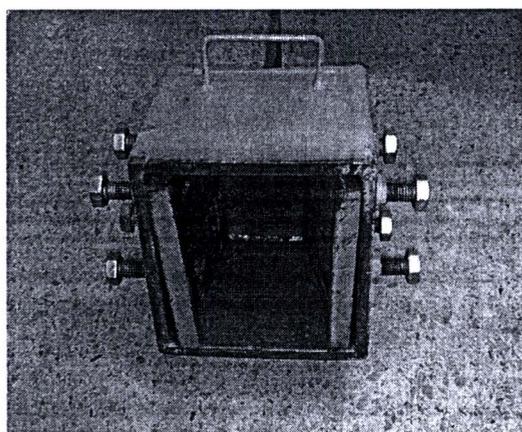
วิธีการผสมจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะเริ่มจากนำสารละลายโซเดียมซิลิเกตและโซเดียมไฮดรอกไซด์(ส่วนที่เป็นของเหลว) ผสมเข้าด้วยกันและตั้งทิ้งไว้ให้เย็นลงที่อุณหภูมิประมาณ 27 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการผสมซิลิกาฟูมและเถ้าถ่านหิน (ส่วนที่เป็นของแข็ง) เข้าด้วยกันผสมโดยวิธีผสมแห้ง จากนั้นจึง

นำสารละลายทั้ง 2 ผสมกับสารตั้งต้นเทใส่หม้อป่นเป็นเวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นนำจีโอโพลิเมอร์เพสต์ดังกล่าวไปใช้ในการทดสอบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

#### 3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยโพลิเมอร์เพสต์

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมกับคอนกรีตนั้น จะออกแบบให้เป็นลักษณะกล่องขนาดใหญ่กว่าคอนกรีตเล็กน้อย ซึ่งมีขนาดประมาณ 20x20x20 ซม<sup>3</sup> ประกบยึดคอนกรีตด้วยแผ่นเหล็กประกบข้างและใช้น็อตด้านละ 4 ตัวทำการบีบแผ่นประกบทั้งสองไม่ให้คอนกรีตเกิดการเคลื่อนที่ขณะทดสอบ ด้านล่างของกล่องยึดคอนกรีตจะเชื่อมด้วยแผ่นเหล็กครีบเพื่อให้เครื่อง UTM (Universal Testing Machine) บีบยึดกับกล่องตัวอย่างได้ ดังรูปที่ 3.2



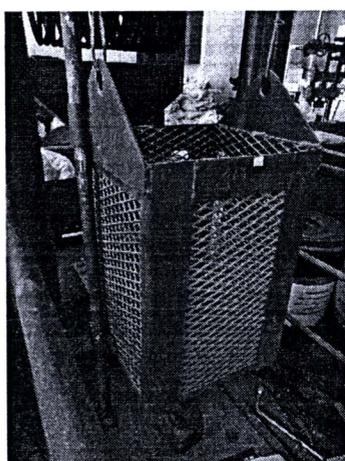
รูปที่ 3.2 กล่องจับยึดคอนกรีตที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยว

#### 3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำค้ำระหว่างเหล็กกับคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยจีโอโพลิเมอร์เพสต์

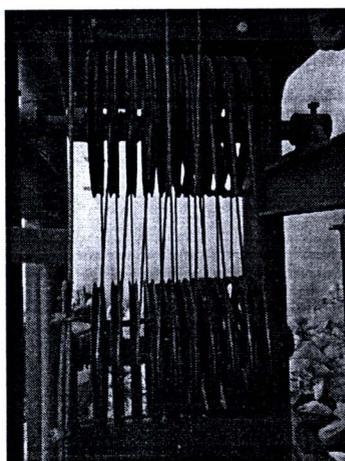
เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำค้ำจะแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยเครื่องทดสอบจะประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นตะกร้าที่สำหรับใส่น้ำหนักถ่วงโดยน้ำหนักที่ใช้จะเป็นแผ่นเหล็กหนัก 16 กิโลกรัม ส่วนที่สองจะเป็นส่วนของรอกที่ใช้ทดแรง (Pulleys) ทำการยึดรอกดังกล่าวไว้ด้วยโครงเหล็ก (Steel Frame) ร้อยลวดสลิงผ่านระบบรอกทดแรงดังกล่าว ซึ่งสามารถทดแรงได้ถึงประมาณ 10 เท่าตามทฤษฎี เพื่อเป็นการลดน้ำหนักที่จะนำมาถ่วงแรงค้ำให้กับชิ้นตัวอย่างทดสอบ และส่วนที่สามจะเป็นส่วนปากจับยึดเหล็กข้ออ้อยและกล่องสำหรับจับยึดตัวอย่างคอนกรีต ดังรูปที่ 3.4



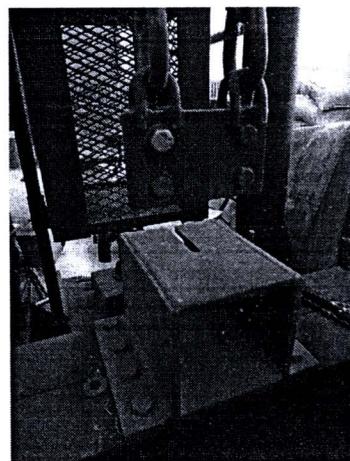
รูปที่ 3.3 เครื่องทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบคาง



ก.) ตะกร้าใส่น้ำหนัก



ข.) ชุดรอกทดแรง (Pulleys)

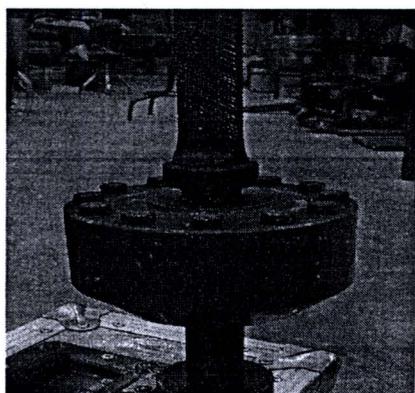


ค.) ปากจับยึดก้อนตัวอย่าง

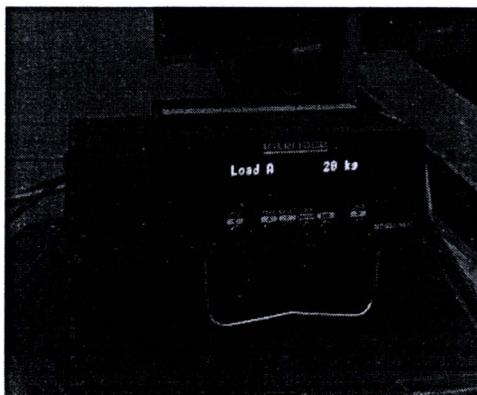
รูปที่ 3.4 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบคาง

ถึงแม้ว่าเครื่องทดสอบดังกล่าวจะสามารถทดสอบแรงดึงได้ถึง 10 เท่าตามทฤษฎี แต่การใช้งานจริงทางผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องทดสอบก่อน เพื่อหาค่าแรงดึงที่ถูกต้อง ซึ่งการสอบเทียบจะประกอบด้วยเครื่องสอบเทียบแรงดึง (Load Cell) (รูปที่ 3.5ก.) และหน้าจอแสดงผล (Monitor) (รูปที่ 3.5ข.) โดยวิธีการทดสอบจะทำการติดตั้ง Load Cell กับเครื่องทดสอบ (รูปที่ 3.6) จากนั้นทำการเชื่อมต่อเข้ากับหน้าจอแสดงผลแรงที่กระทำกับ Load Cell ซึ่งจะเป็นลักษณะแรงดึง (Tension) เริ่มทำการสอบเทียบโดยการใส่น้ำหนักถ่วงลงในตะกร้าใส่น้ำหนักโดยเริ่มต้นที่ 200 กิโลกรัม อ่านค่าแรงดึงที่กระทำกับ Load Cell บนหน้าจอแสดงผลแล้วบันทึกค่าจากนั้นทำการเพิ่ม

น้ำหนักถ่วงขึ้นเรื่อยๆ โดยเพิ่มครั้งละ 50 กิโลกรัม ทำการบันทึกค่าแรงดึงที่ได้จนถึงน้ำหนัก 600 กิโลกรัมจึงสิ้นสุดการสอบเทียบ จากนั้นทำการสอบเทียบครั้งต่อไปโดยการเริ่มต้นที่น้ำหนัก 200 กิโลกรัมและเพิ่มน้ำหนักไปจนถึง 600 กิโลกรัมเช่นกัน ทำการสอบเทียบจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งค่าการสอบเทียบที่ได้จะเป็นแรงดึงอยู่ในช่วง 2,000-6,000 กิโลกรัมตามทฤษฎี



ก) เครื่องสอบเทียบแรงดึง (Load Cell)



ข) หน้าจอแสดงผลแรงดึง (Monitor)

รูปที่ 3.5 เครื่องมือสอบเทียบ



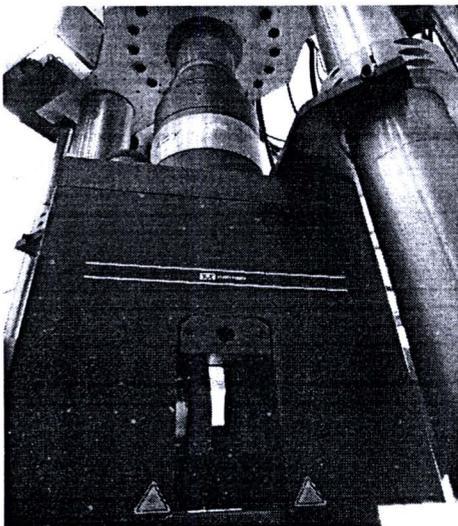
รูปที่ 3.6 การติดตั้งLoad Cell เข้ากับเครื่องทดสอบ



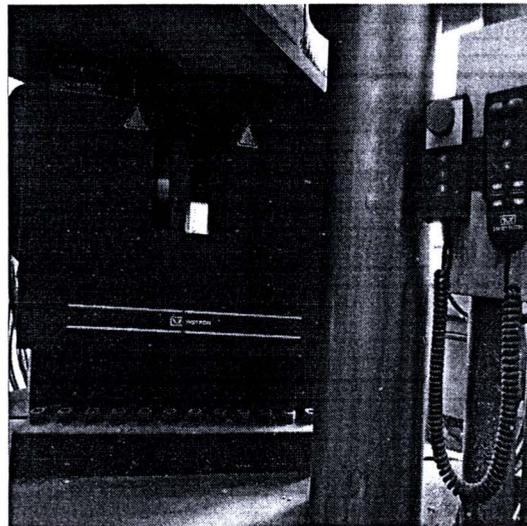
รูปที่ 3.7 การเพิ่มน้ำหนักถ่วงครั้งละ 50 กิโลกรัมและทำการอ่านค่าแรงดึงที่เกิดขึ้น

### 3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาระหว่างเหล็กกับคอนกรีตซึ่งยึดประสานด้วยอีโพลีเมอร์เพสต์

เครื่องมือทดสอบจะเหมือนกับการทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวดังรูปที่ 3.2 แต่จะเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงานของเครื่อง UTM (Universal Testing Machine) ดังรูปที่ 3.8 ให้เป็นแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาในลักษณะดิ่ง-ปล่อย (Harversine Wave) โดยวิธีการทดสอบจะแสดงไว้ดังรูปที่ 3.15



ก) UTM (Actuator)



ข) UTM (Base)

รูปที่ 3.8 เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) สำหรับใช้ทดสอบแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานด้วยอีโพลีเมอร์เฟสท์

การทดสอบในส่วนนี้จะใช้แบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม<sup>3</sup> โดยใช้อัตราส่วนผสมตามตารางที่ 3.3 โดยออกแบบให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28 MPa และใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 10 16 และ 20 มิลลิเมตร ทำการเทียบลงในคอนกรีตที่ได้เตรียมรูเจาะขนาดต่างๆกัน ไว้ดังแสดงตารางที่ 3.5 โดยใช้อีโพลีเมอร์เฟสท์เป็นตัวเชื่อมประสาน ทำการทดสอบกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวตามมาตรฐาน ASTM C 234 [22] ทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 1 3 7 28 และ 90 วันและเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงยึดเหนี่ยวของตัวอย่างควบคุมซึ่งเกิดจากการเสียบเหล็กขณะที่ยังไม่แข็งตัวและทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 28 วัน ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยว

$$u = \frac{P}{\pi D L} \quad (3.1)$$

โดยที่  $u$  = ค่ากำลังรับแรงยึดเหนี่ยว (MPa)

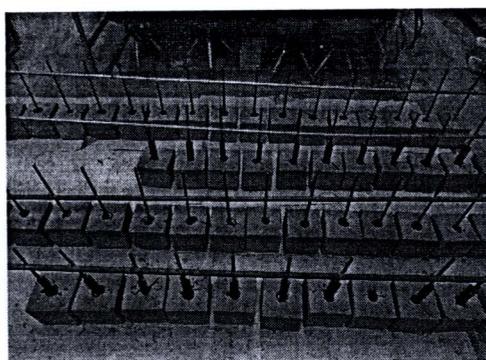
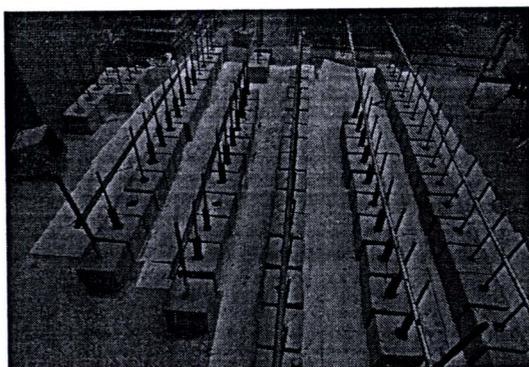
$P$  = ค่าแรงดึงสูงสุดที่กระทำ (นิวตัน)

$D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กข้ออ้อย (มิลลิเมตร)

$L$  = ระยะฝังเหล็ก (มิลลิเมตร)

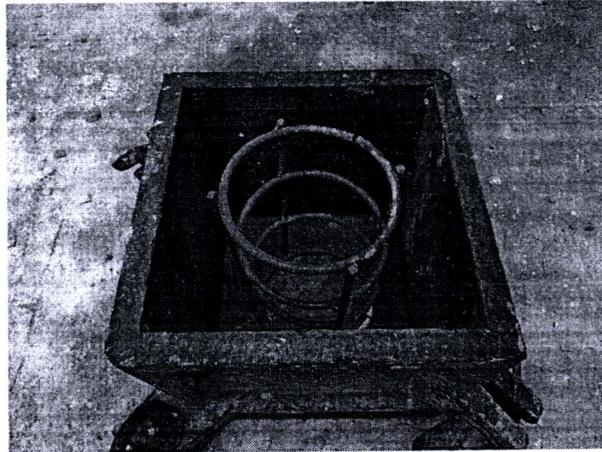
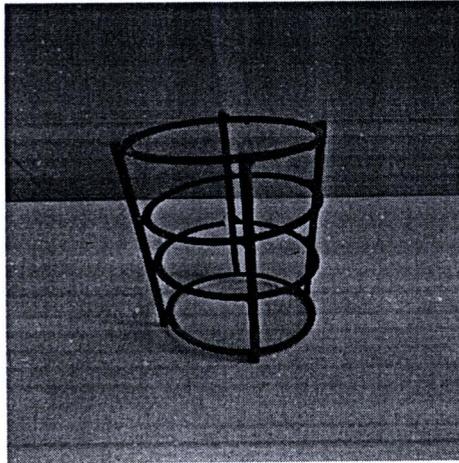
ตารางที่ 3.5 แสดงขนาดรูเจาะและความลึกของการฝังเหล็ก

Deformed Bar Diameter (mm)	Hole Diameter (mm)	Hole Length (mm)
10	12	80
16	20	90
20	25	90



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างคอนกรีตที่ใช้อีโพลีเมอร์เฟสท์เป็นวัสดุเชื่อมประสานก่อนการทดสอบ

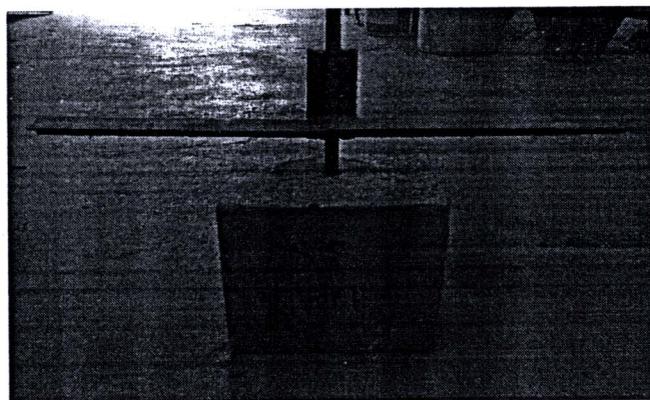
ในกรณีของเหล็กข้ออ้อยขนาด 16 และ 20 มิลลิเมตรนั้น ผู้ทดสอบได้นำเหล็กเส้นกลมสานเป็นตะกร้อเพื่อสำหรับเสริมกำลังในก้อนคอนกรีตขนาด  $15 \times 15 \times 15$  ซม<sup>3</sup> ด้วย เพื่อเป็นการควบคุมไม่ให้คอนกรีตแตกออกขณะทดสอบกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กขนาดใหญ่ลักษณะของเหล็กสานตะกร้อและการติดตั้งแสดงได้ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เหล็กสานตะกร้อสำหรับเสริมกำลังในก้อนคอนกรีต

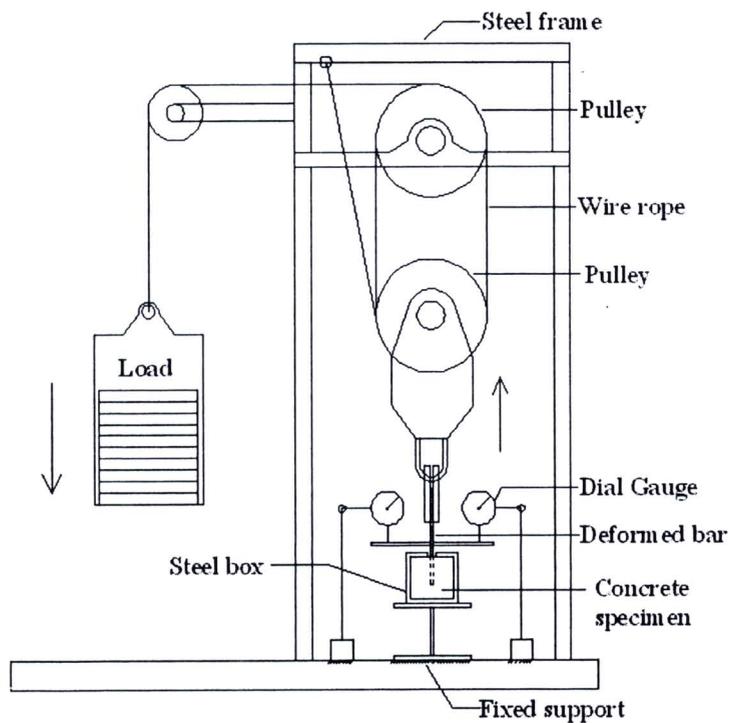
#### 3.4.2 การทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยอีโพลิเมอร์เพสต์ต่อแรงกระทำค้ำ

การทดสอบส่วนนี้จะใช้คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด  $15 \times 15 \times 15$  ซม<sup>3</sup> มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28 MPa ใช้เหล็กข้ออ้อยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เสียบลงในคอนกรีตที่เจาะรูแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 มิลลิเมตร ความลึก 8 เซนติเมตร โดยเหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตร ดังกล่าวจะประกบติดด้วยเหล็กเพื่อป้องกันการยัดของเหล็กเส้นขณะทำการทดสอบ และทำการเชื่อมด้วยแผ่นเหล็กขนาดยาวเพื่อให้ Dial Gauge สามารถวัดระยะเคลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยได้ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 เหล็กข้ออ้อยที่ทำการเชื่อมเหล็กประกบข้างและแผ่นเหล็กขนาดยาว

สำหรับการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำค้ำ จะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของการให้แรงกระทำค้ำต่อพฤติกรรมการคืบตัวของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ซึ่งจะทำการวัดระยะการเลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยออกจากก้อนคอนกรีตที่มีจีโอโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสานที่เวลาใดๆ โดยแรงกระทำค้ำที่ให้แก่อันตัวอย่างทดสอบที่ทำการฝังเหล็กข้ออ้อยไว้จะมี 3 ระดับ คือ ร้อยละ 30 40 และ 50 ของค่าแรงยึดเหนี่ยวประลัย (Ultimate Bonding Strength) ของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์ที่อายุ 28 วัน โดยจะทำการวัดระยะการเลื่อนตัวของเหล็กข้ออ้อยที่เกิดขึ้นเป็นระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง โดยระยะเวลาในการเก็บข้อมูลจะอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D2290 [24] เก็บข้อมูลในนาที่ที่ 1 6 12 30 ตามด้วยชั่วโมงที่ 1 2 5 20 50 100 200 500 700 และ 1000 ซึ่งวิธีการทำงานและติดตั้งตัวอย่างทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วิธีการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบค้ำ

ผลการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวแบบค้ำของวัสดุยึดประสานจีโอโพลิเมอร์เพสต์จะเทียบกับความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อยที่ฝังในคอนกรีต (คอนกรีตควบคุม) ที่อายุ 28 วัน โดยให้นำหนักบรรทุกค้ำร้อยละ 50 ของกำลังยึดเหนี่ยว ค่าที่ได้จะเป็นระยะเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อย (Bond Displacement) ที่ระยะเวลา 1,000 ชั่วโมง จากนั้นทำการคำนวณหาความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.2-3.4

การคืบสัมพัทธ์ (Relative Creep)

$$\text{Relative Creep} = \left( \frac{\text{FSD} - \text{ISD}}{\text{ISD}} \right) \times 100 \% \quad (3.2)$$

โดยที่ Final Slip Displacement (FSD) = ระยะเลื่อนของเหล็กข้ออ้อยที่ 1,000 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)  
Initial Slip Displacement (ISD) = ระยะเลื่อนเริ่มต้นของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1 นาที (มิลลิเมตร)

อัตราการคืบ (Creep Rate)

$$\text{Creep Rate} = \left( \frac{\text{SD}(t) - \text{ISD}}{\text{ISD}} \right) \times 100 \% \quad (3.3)$$

โดยที่ Slip Displacement (SD(t)) = ระยะเลื่อนของเหล็กข้ออ้อยที่ระยะเวลาใดๆ (มิลลิเมตร)  
Initial Slip Displacement (ISD) = ระยะเลื่อนเริ่มต้นของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1 นาที (มิลลิเมตร)

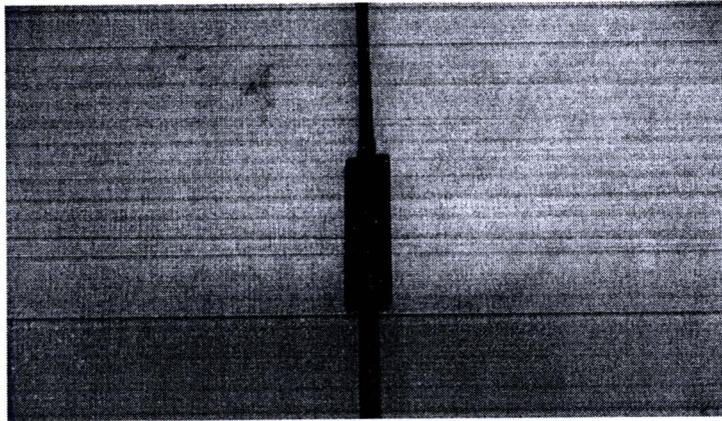
ระยะคืบต่อแรงกระทำคงค้าง (Creep Displacement / Sustained Load)

$$\text{Creep Displacement / Sustained Load} = \left( \frac{\text{FSD} - \text{ISD}}{\text{SL}} \right) \text{ mm / kN} \quad (3.4)$$

โดยที่ Final Slip Displacement (FSD) = ระยะเลื่อนของเหล็กข้ออ้อยที่ 1,000 ชั่วโมง (มิลลิเมตร)  
Initial Slip Displacement (ISD) = ระยะเลื่อนของเหล็กข้ออ้อยที่เวลา 1 นาที (มิลลิเมตร)  
Sustained Load (SL) = แรงดึงคงค้างที่ให้แก่วางทดสอบ (kN)

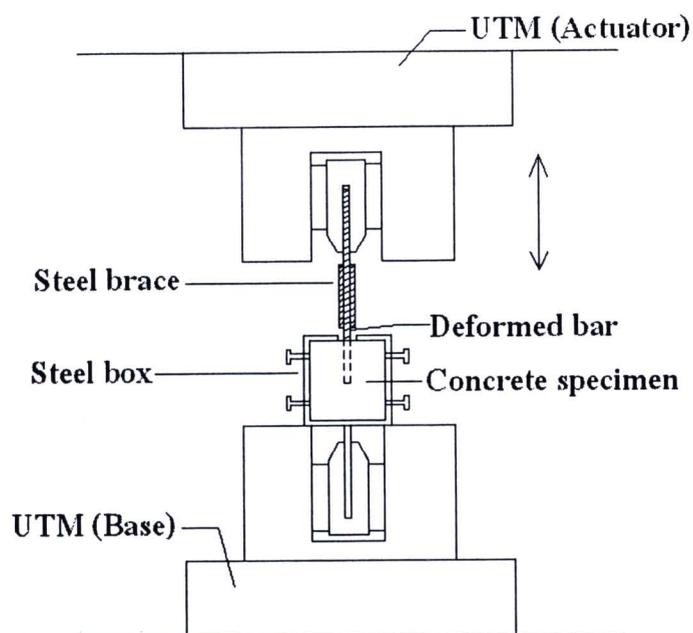
**3.4.3 การทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กและคอนกรีตที่ยึดประสานกันด้วยอีโ****โพลิเมอร์เพสต์ต่อแรงกระทำเข้าไปเข้ามา**

การทดสอบในส่วนนี้จะใช้คอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 ซม<sup>3</sup> ซึ่งออกแบบให้มีกำลังอัดที่อายุ 28 วัน เท่ากับ 28 MPa ทำการเจาะรูคอนกรีตให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะ 12 มิลลิเมตร ที่ความลึก 8 เซนติเมตร และใช้เหล็กข้ออ้อยขนาด 10 มิลลิเมตร เสียบลงไปนคอนกรีตที่เจาะรูไว้และใช้อีโพลิเมอร์เพสต์เป็นวัสดุเชื่อมประสาน โดยเหล็กข้ออ้อยดังกล่าวจะทำการเชื่อมด้วยเหล็กประกับข้างเพื่อป้องกันการบิดคดและการโก่งเดาะของเหล็กระหว่างการทดสอบดังรูปที่ 3.13

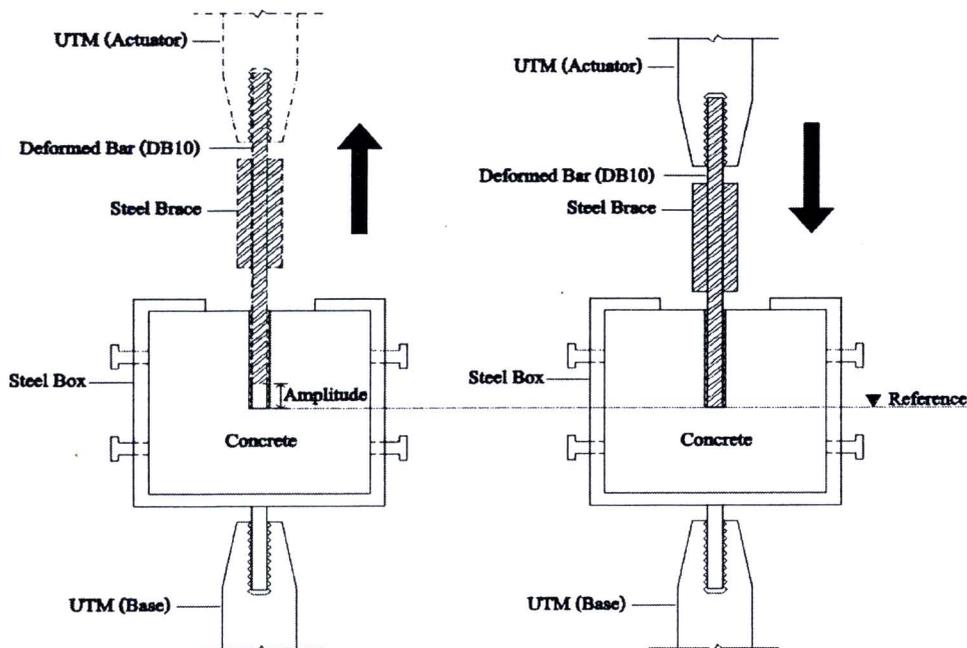


รูปที่ 3.13 เหล็กข้ออ้อยที่ทำการเชื่อมประกับข้างเพื่อป้องกันการขีดและการโก่งเดาะ

สำหรับการทดสอบความของคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจะเป็นการศึกษาถึงความล้าของจีโอโพลีเมอร์ที่นำมาทำเป็นวัสดุยึดประสาน โดยจะทดสอบในทิศทางเดียวกับการรับแรงของเหล็กเสริมซึ่งวิธีการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 3.15 โดยการให้ความถี่ของแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาที่ 1.0 และ 1.5 Hz และใช้แอมพลิจูดของแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาเท่ากับ 0.50 0.75 และ 1.0 มิลลิเมตร คิดเป็นร้อยละ 20 30 และ 40 ของระยะเลื่อนหลุดของเหล็กข้ออ้อยที่ยอมให้คือ 2.5 มิลลิเมตร [22] ตามลำดับ โดยจะให้แรงกระทำจำนวน 20,000 รอบ จากนั้นนำตัวอย่างที่ผ่านการให้แรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาแล้วมาทดสอบแรงยึดเหนี่ยวอีกครั้งเพื่อหาลำลังยึดเหนี่ยวที่สูญเสียไปซึ่งเป็นผลมาจากวัสดุยึดประสานมีพฤติกรรมการล้าเกิดขึ้น



รูปที่ 3.14 การติดตั้งตัวอย่างทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา



รูปที่ 3.15 วิธีการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา

ผลการทดสอบความคงทนของกำลังยึดเหนี่ยวต่อแรงกระทำแบบซ้ำไปซ้ำมาของวัสดุยึดประสานอีโพลีเมอร์พาสต์ จะทำการเทียบกับคอนกรีตควบคุมซึ่งเกิดจากการเสียบเหล็กข้ออ้อยขณะที่คอนกรีตยังไม่แข็งตัวและทดสอบค่ากำลังยึดเหนี่ยวที่อายุ 28 วัน และวัสดุยึดประสานอีพ็อกซี่ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะเป็นกำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงขณะให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมา การวิเคราะห์ผลจะใช้สมการที่ 3.5 และสมการที่ 3.6

กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลง (Bond Strength Decrement)

$$\text{Bond Strength Decrement} = \left( \frac{\text{IBS} - \text{FBS}}{\text{IBS}} \right) \times 100 \% \tag{3.5}$$

โดยที่ Initial Bonding Strength (IBS) = กำลังยึดเหนี่ยวที่รอบการสั่นแรก (MPa)

Fatigue Bonding Strength (FBS) = กำลังยึดเหนี่ยวที่ลดลงถึงขีดจำกัดการล้า (MPa)

กำลังยึดเหนี่ยวที่สูญเสีย (Bonding Strength Loss)

$$\text{Bonding Strength Loss} = \left( \frac{\text{UBS} - \text{RBS}}{\text{UBS}} \right) \times 100 \% \tag{3.6}$$

โดยที่ Ultimate Bonding Strength (UBS) = กำลังยึดเหนี่ยวประลัยที่อายุ 28 วัน (MPa)

Remaining Bond Strength (RBS) = กำลังยึดเหนี่ยวคงเหลือเมื่อผ่านการให้แรงกระทำซ้ำไปซ้ำมาจำนวน 20,000 รอบ (MPa)