



# แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

## BOND STRENGTH OF STEEL REINFORCEMENT IN CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE

นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา (Natthawut Thipyotha)<sup>1</sup>  
เกรียงศักดิ์ แก้วกุลชัย (Griengsak Kaewkulchai)<sup>2</sup>  
สถาพร โภคา (Sdhabhon Bhokha)<sup>3</sup>  
วิวัฒน์ พัวทัศนานนท์ (Wiwat Puatatsananon)<sup>4</sup>

<sup>1</sup>นักศึกษาระดับปริญญาเอก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี [natthawut.thip@gmail.com](mailto:natthawut.thip@gmail.com)

<sup>2</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี [griengsak@gmail.com](mailto:griengsak@gmail.com)

<sup>3</sup>รองศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี [nyakobo@ubu.ac.th](mailto:nyakobo@ubu.ac.th)

<sup>4</sup>ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี [puatatsa@gmail.com](mailto:puatatsa@gmail.com)

**บทคัดย่อ :** บทความนี้ นำเสนอผลการทดสอบการหาค่าแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1,600 และ 1,800 kg/m<sup>3</sup> โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 สำหรับการทดสอบกระทำโดยการหล่อก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15x15x15 cm. ที่ฝังเหล็กเสริม ขนาด RB6, RB9, DB12, DB16, DB 20, และ DB25 mm. ยาว 0.80 m. ลงในเนื้อของคอนกรีตมวลเบาสูง 15 cm. และทดสอบหาแรงยึดเหนี่ยว ที่อายุ 28 วัน ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ผลการทดสอบพบว่า แรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยสำหรับเหล็กเส้นกลมมีสมการเท่ากับ  $u_w = 0.624\sqrt{f_c'} / D$  สำหรับเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ  $u_w = 2.39\sqrt{f_c'} / D$  ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยที่ได้จากสมการนี้ มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน ACI เท่ากับ 61.36 และ 26 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อยตามลำดับ

**ABSTRACT :** This paper presents the experimental results on determining the bond strength of steel reinforcement in cellular lightweight concrete having wet densities of 1600 kg/m<sup>3</sup> and 1800 kg/m<sup>3</sup> using sand to cement ratios of 1:1 and 2:1 and water to cement ratios of 0.40, 0.45 and 0.50. Test procedure was performed using the standard 15 × 15 × 15 cm concrete cubes inserted with 0.8 m steel bars of various sizes of RB6 RB9 DB12 DB16 DB20 and DB25 at embedded depth of 15 cm. At age of 28 days, all test samples were loaded using the standard tensile test method. From the test results equations of allowable bond strengths for round bar as show of  $u_w = 0.624\sqrt{f_c'} / D$ , and deformed bar of  $u_w = 2.39\sqrt{f_c'} / D$ . The allowable bond strengths from equations less than ACI standard equal to 61.36 and 26 percentage, respectively.

**KEYWORDS:** Bond Strength, Cellular Lightweight Concrete, Foam Concrete, Aerated Concrete

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันปัญหาสภาวะโลกร้อนเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานที่มากเกินไปของมนุษย์ในการดำเนินกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น ซึ่งอุตสาหกรรมก่อสร้างก็เป็นกิจกรรมหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหาสภาวะโลกร้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการใช้วัสดุก่อสร้างที่ไม่ส่งเสริมให้เกิดการประหยัดพลังงาน ทั้งพลังงานที่ต้องใช้ในการก่อสร้าง และพลังงานที่ต้องใช้กับเครื่องปรับอากาศภายในอาคาร[1] นอกจากนี้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุก่อสร้างก็เป็นปัญหาที่สำคัญเช่นกัน ดังนั้นการพัฒนาวัสดุก่อสร้างใหม่ๆ ที่สามารถลดการใช้พลังงานและเพื่อเป็นวัสดุทางเลือกจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า (Cellular lightweight concrete) เป็นวัสดุทางเลือกชนิดหนึ่งที่ได้รับการยอมรับว่าสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ คอนกรีตชนิดนี้มีส่วนผสมของฟองอากาศ ซึ่งเกิดจากการเติมโฟมเหลวทรงรูป (Preformed foam) ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อคอนกรีตแทนการใช้หินหรือมวลรวมหยาบ[2] โดยคุณสมบัติพื้นฐานของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าจะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหนาแน่นหรือปริมาณฟองอากาศที่เติมเข้าไป คอนกรีตชนิดนี้นอกจากช่วยลดการใช้หินในงานก่อสร้างและมีน้ำหนักเบาแล้ว ยังมีความเป็นฉนวนสูง จึงนิยมใช้ในการทำผนัง เพื่อลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร หน่วยน้ำหนักของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามีค่าตั้งแต่ 300 จนถึง 1800 kg/m<sup>3</sup> ขึ้นอยู่กับการนำไปใช้และความเหมาะสมในงานแต่ละประเภท

สำหรับงานโครงสร้างทั่วไป คอนกรีตที่ใช้อาจต้องมีค่ากำลังรับแรงอัดไม่น้อยกว่า 145 kg/cm<sup>2</sup> ซึ่งคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่มีค่าความหนาแน่นระหว่าง 1600 – 1800 kg/m<sup>3</sup> จะมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถพัฒนาใช้งานด้านโครงสร้างนี้ได้ [3, 4]

ดังนั้นหากจะนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่ามาใช้ในงานโครงสร้าง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า และคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ต้องทราบคือ แรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า เพื่อประโยชน์ต่อการออกแบบโครงสร้างต่อไป

## 2. วัสดุ เครื่องมือและอุปกรณ์

### 2.1 วัสดุ

- 1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1
- 2) ทรายหยาบ
- 3) น้ำประปา
- 4) สารเพิ่มฟองอากาศ (Foaming Agent)
- 5) เหล็กเสริม RB6, RB9, DB12, DB16, DB 20 และ

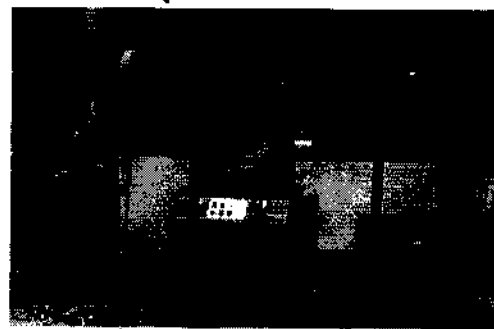
DB25 mm. ยาว 0.80 m.

### 2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) โม่ผสมคอนกรีต
- 2) เครื่องผลิตโฟมเหลว (Foam Generator) ดังรูปที่ 1
- 3) แบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm. สูง 30 cm. และแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 cm.
- 5) เครื่องทดสอบแรงอัดและทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 เครื่องผลิตโฟมเหลว



รูปที่ 2 เครื่องทดสอบแรงอัดและทดสอบแรงดึง

## 3. การทดสอบ

### 3.1 การเตรียมวัสดุและเครื่องมือ

1) เตรียมทราย โดยการร่อนเอาหินหรือกรวดออกจากทราย เพื่อให้ได้ทรายที่สะอาด

2) ทดสอบหาปริมาณความชื้นที่ผิวของทราย และทำการปรับแก้อัตราส่วนผสมที่ออกแบบไว้

3) ตรวจสอบความพร้อมของเครื่องผลิต โฟมเหลว

4) เตรียมเหล็กเสริม ยาวท่อนละ 80 cm.

### 3.2 ขั้นตอนการผสม

1) เตรียมเครื่องผลิตโฟมเหลวทรงรูป ซึ่งประกอบด้วยปั๊มลม และถังแรงดันผสมน้ำยาเพิ่มฟอง โดยผสมสารเพิ่มฟองกับน้ำในอัตราส่วน 1:30 ใส่ลงในถังของเครื่องผลิตโฟม และปรับแรงดันของถังให้เหมาะสมที่ 0.65 MPa

2) ใส่ทรายและซีเมนต์ลงในโม้ผสมคอนกรีต เสร็จแล้วเปิดเครื่องผสมให้ทราย และซีเมนต์คลุกด้วยกัน

3) เมื่อทรายและซีเมนต์คลุกเข้ากันดีแล้ว ใส่น้ำสำหรับผสมคอนกรีตลงในโม้ผสมคอนกรีต โดยให้เต็มเข้ารอบๆ เพื่อให้ น้ำสามารถผสมเข้ากับทรายและซีเมนต์ได้ง่ายยิ่งขึ้น

4) ในระหว่างผสมให้สังเกตการแตกคลุกเข้ากันของทราย ซีเมนต์ และน้ำ หรือซีเมนต์มอร์ตาร์ หากพบว่าซีเมนต์มอร์ตาร์จับตัวกันเป็นก้อน ให้ปิดเครื่องผสมแล้วใช้เกรียงบดซีเมนต์มอร์ตาร์ให้แตกตัวออกจากกัน ไม่จับตัวกัน เสร็จแล้วเปิดเครื่องผสมอีกครั้งจนซีเมนต์มอร์ตาร์คลุกเข้ากันได้ดี จึงเปิดเครื่องผสม

5) ฉีดโฟมเหลวใส่ไปในเครื่องผสม ดังรูปที่ 3 เปิดเครื่องผสมรองน โฟมเหลว และซีเมนต์มอร์ตาร์คลุกเข้ากันได้ดี โดยสังเกตได้จากสีของคอนกรีตมีสีเดียวกันตลอด จึงหยุดเครื่องผสม สำหรับเวลาที่ใช้ในการผสมในแต่ละครั้ง ไม่ควรใช้เวลานาน 5 นาที



รูปที่ 3 การฉีดโฟมเหลวผสมซีเมนต์มอร์ตาร์

### 3.3 การหล่อตัวอย่าง

1) การเทคอนกรีตมวลเบาลงในแบบหล่อ จะต้องเทให้เต็มสูงเกินแบบ และทำให้แน่นด้วยการเคาะข้างแบบ หลังจากนั้นปล่อยให้คอนกรีตแข็งตัวประมาณ 45 นาที แล้วจึงใช้ฟูดเหล็กตัดคอนกรีตส่วนที่เกินออก

2) การหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด ใช้แบบหล่อรูปทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 15 cm. สูง 30 cm. ดังรูปที่ 4(ก)

3) การหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงยึดเหนี่ยว ใช้แบบหล่อรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 cm. ตั้งเหล็กเสริมไว้ตรง ๗ ตำแหน่งกลางแบบหล่อ และระยะห่างเท่ากับ 15 cm. ดังรูปที่ 4(ข)

4) ถอดแบบหล่อ เมื่อคอนกรีตมีอายุ 24 ชั่วโมง

5) บ่มชิ้นในอากาศสภาวะปกติ



(ก)



(ข)

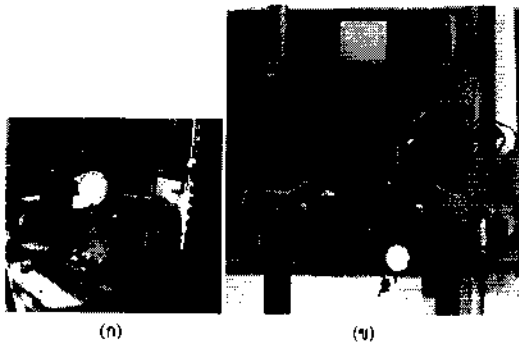
รูปที่ 4 (ก) การหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบกำลังรับแรงอัด

(ข) การหล่อตัวอย่างสำหรับทดสอบแรงยึดเหนี่ยว

### 3.4 การทดสอบ

การทดสอบกำลังรับแรงอัดและแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า ที่มีค่าความหนาแน่น

เบี่ยงเท่ากับ 1600 และ 1800 kg/cm.<sup>3</sup> โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 และอัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 รวม 12 ชุดร ทำการทดสอบแรงอัดตามมาตรฐาน ASTM C 39[5] โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 cm. สูง 30 cm. ที่อายุ 28 วัน จำนวน 36 ก้อน ดังรูปที่ 5(ก) บันทึกค่ากำลังรับแรงอัดของแท่งตัวอย่างเพื่อใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงอัด และทำการทดสอบแรงอัดเหนียวของเหล็กเสริมตามมาตรฐาน ASTM C 234[5] โดยใช้ตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 15×15×15 cm. ที่มีเหล็กเสริมขนาด RB6, RB9, DB12, DB16, DB20 และ DB25 mm. ที่อายุ 28 วัน จำนวน 216 ก้อน ดังรูปที่ 5(ข) บันทึกค่าแรงดึงที่ทำให้เหล็กเสริมหลุดออกจากคอนกรีต เพื่อใช้คำนวณหาแรงยึดเหนียวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสต่อไป



รูปที่ 5 (ก) การทดสอบกำลังรับแรงอัด  
(ข) การทดสอบแรงยึดเหนียว

#### 4. ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัด และแรงยึดเหนียวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ดังแสดงในตารางที่ 1 - 3 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนียวกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ดังแสดงในรูปที่ 7 - 13

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

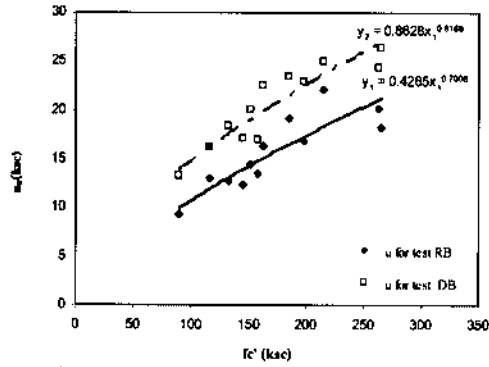
ความหนาแน่น (kg/m. <sup>3</sup> )	กำลังรับแรงอัด ที่อายุ 28 วัน (kg/cm. <sup>2</sup> )					
	S:C = 1:1			S:C = 2:1		
	W:C = 0.40	W:C = 0.45	W:C = 0.50	W:C = 0.40	W:C = 0.45	W:C = 0.50
1600	132	158	152	145	90	116
1800	265	262	215	162	197	185

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบแรงยึดเหนียวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1600 kg/m.<sup>3</sup>

เหล็กเสริม	แรงยึดเหนียวของเหล็กเสริม (kg/cm. <sup>2</sup> )					
	S:C = 1:1			S:C = 2:1		
	W:C = 0.40	W:C = 0.45	W:C = 0.50	W:C = 0.40	W:C = 0.45	W:C = 0.50
RB 6	18.79	27.72	19.09	22.07	21.25	26.16
RB 9	32.25	26.21	38.53	27.53	16.38	25.77
DB 12	50.00	47.84	48.01	42.07	32.08	42.57
DB 16	41.20	36.98	42.02	37.29	29.59	33.53
DB 20	29.59	25.36	39.06	34.61	24.71	28.31
DB 25	26.84	25.46	31.12	23.30	19.24	25.72

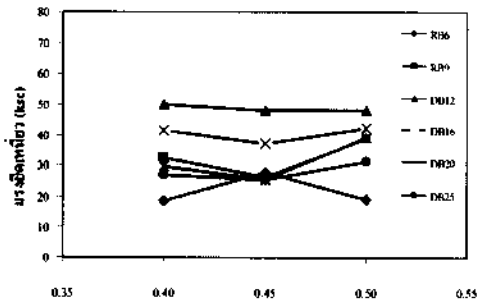
ตารางที่ 3 ผลการทดสอบแรงยึดเหนียวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1800 kg/m.<sup>3</sup>

เหล็กเสริม	แรงยึดเหนียวของเหล็กเสริม (kg/cm. <sup>2</sup> )					
	S:C = 1:1			S:C = 2:1		
	W:C = 0.40	W:C = 0.45	W:C = 0.50	W:C = 0.40	W:C = 0.45	W:C = 0.50
RB 6	29.59	36.36	37.99	32.63	34.97	33.90
RB 9	43.44	44.54	50.73	33.03	32.73	42.97
DB 12	70.13	51.74	51.50	60.70	61.08	60.73
DB 16	57.43	51.54	55.08	44.44	46.66	43.55
DB 20	45.66	49.60	49.92	39.13	42.19	45.20
DB 25	38.21	41.36	43.77	36.02	33.47	38.32

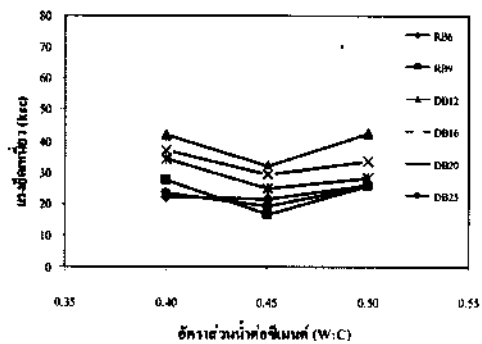


รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดหนึ่งยวกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า

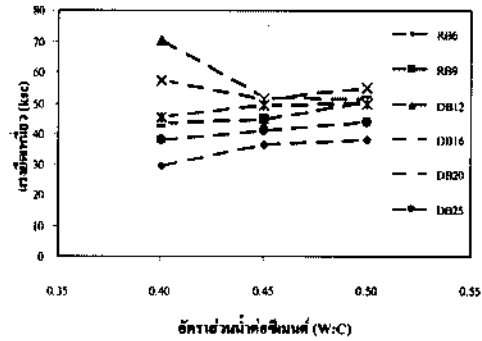
จากรูปที่ 7 พบว่า แรงอัดหนึ่งยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่า จะแปรผันโดยตรงกับค่ากำลังรับแรงอัด และมีสมการแนวโน้มเป็นสมการยกกำลัง สำหรับเหล็กเส้นกลมเท่ากับ  $y_1 = 0.4265x_1^{0.7006}$  และสำหรับเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ  $y_2 = 0.8628x_1^{0.6168}$



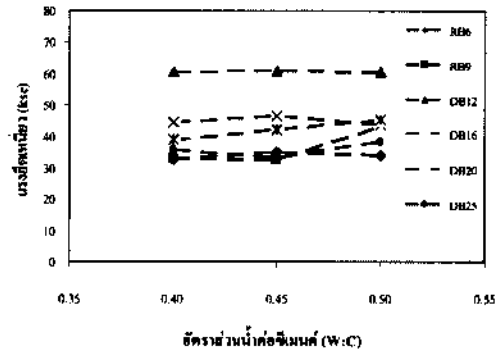
รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดหนึ่งยวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1600 kg/m.³ และ S:C เท่ากับ 1:1



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดหนึ่งยวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1600 kg/m.³ และ S:C เท่ากับ 2:1

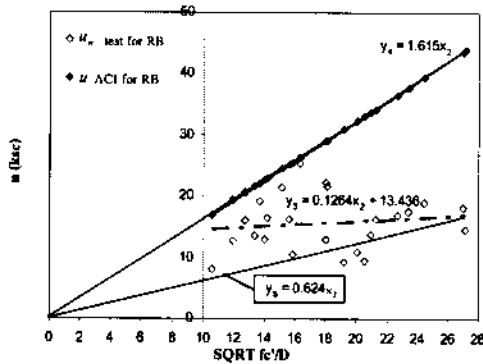


รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดหนึ่งยวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1800 kg/m.³ และ S:C เท่ากับ 1:1

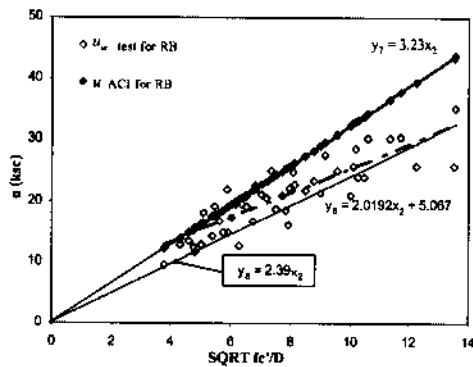


รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดหนึ่งยวกับอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูล่าที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1800 kg/m.³ และ S:C เท่ากับ 2:1

จากรูปที่ 8 - 11 พบว่า อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์มีผลกระทบต่อแรงอัดหนึ่งยวของเหล็กเสริมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเส้นกลม ในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูก้ากับค่า  $\sqrt{f_c'}/D$



รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กข้ออ้อย ในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูก้ากับค่า  $\sqrt{f_c'}/D$

รูปที่ 12 และ 13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยของเหล็กเสริม  $n_w$  (ใช้ส่วนปลอดภัยเท่ากับ 2) กับค่า  $\sqrt{f_c'}/D$  เปรียบเทียบค่าแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยที่ได้จากการทดสอบกับแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยจากสมการของ ACI คือ  $1.615\sqrt{f_c'}/D$  ตามมาตรฐานออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิธีหน้าแรงใช้งาน [6]

จากรูปที่ 12 พบว่าแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยของเหล็กเส้นกลมที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากสมการ ACI ทุกขนาดของเหล็กเสริม โดยมีสมการแนวโน้มเชิงเส้นเท่ากับ  $y_3 = 0.1264x_2 + 13.436$  และเมื่อทำการปรับแก้สมการให้สอดคล้องกับสมการของ ACI จะได้สมการใหม่เท่ากับ  $y_1 = 0.624x_2$  โดยที่ค่า  $x_2$  คือ  $\sqrt{f_c'}/D$  ดังนั้น สมการแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยของเหล็กเส้นกลม จึงมีค่าเท่ากับ

$n_w = 0.624\sqrt{f_c'}/D$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสมการของ ACI เท่ากับ 61.36 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 13 พบว่าแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยของเหล็กข้ออ้อยที่ได้จากการทดสอบมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากสมการ ACI ทุกขนาดของเหล็กเสริม โดยมีสมการแนวโน้มเชิงเส้นเท่ากับ  $y_6 = 2.0192x_2 + 5.067$  และเมื่อทำการปรับแก้สมการให้สอดคล้องกับสมการของ ACI จะได้สมการใหม่เท่ากับ  $y_8 = 2.39x_2$  โดยที่ค่า  $x_2$  คือ  $\sqrt{f_c'}/D$  ดังนั้น สมการแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยของเหล็กข้ออ้อย จึงมีค่าเท่ากับ  $n_w = 2.39\sqrt{f_c'}/D$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสมการของ ACI เท่ากับ 26 เปอร์เซ็นต์

## 5. สรุป

งานวิจัยนี้เสนอผลการทดสอบแรงยึดเหนี่ยวของเหล็กเสริมในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูก้า ที่ความหนาแน่นเท่ากับ 1600 และ 1800 kg/m<sup>3</sup> ใช้อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์เท่ากับ 0.40, 0.45 และ 0.50 อัตราส่วนทรายต่อซีเมนต์เท่ากับ 1:1 และ 2:1 ในเบื้องต้นจากผลการทดสอบ พบว่าแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยสำหรับเหล็กเส้นกลมมีสมการเท่ากับ  $n_w = 0.624\sqrt{f_c'}/D$  และสำหรับเหล็กข้ออ้อยเท่ากับ  $n_w = 2.39\sqrt{f_c'}/D$  ซึ่งค่าแรงยึดเหนี่ยวปลอดภัยที่ได้จากสมการนี้ มีค่าน้อยกว่ามาตรฐาน ACI เท่ากับ 61.36 และ 26 เปอร์เซ็นต์ สำหรับเหล็กเส้นกลมและเหล็กข้ออ้อยตามลำดับ

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ บริษัท แอลซีเอ็ม (ประเทศไทย) จำกัด ที่ได้อนุญาตให้เครื่องมือและน้ำยาโพมสำหรับผลิตคอนกรีตมวลเบา และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีสำหรับการใช้สถานที่และเครื่องมือทดสอบ

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ปิติ ศุคนจสุขกุล, 2549. Global Warming, Kyoto Protocol และทฤษฎีเกี่ยวกับอุตสาหกรรมก่อสร้างไทย ตอนที่ 1. วารสารคอนกรีตสมาคมคอนกรีตไทย.
- [2] นัฐวุฒิ ทิพย์โยธา และคณะ, 2551. การออกแบบอัตราส่วนผสมของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลล์ลูก้า. การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปีครั้งที่ 4, 20-22 ตุลาคม 2551 ณ โรงแรมลายทอง จ.อุบลราชธานี.