

การเสริมกำลัง CFRP โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก  
Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) for Strengthening of Reinforced Concrete Structure

ภาคภูมิ มงคลสังข์\*

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

\*E-mail: phakphumm@gmail.com

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการเสริมกำลังของโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยคาร์บอนไฟเบอร์อาคารที่มีการใช้งานน้ำหนักบรรทุกเกินที่ผู้ออกแบบได้ออกแบบไว้ การเสริมกำลังโครงสร้างให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้ตามต้องการจึงเป็นสิ่งสำคัญ การประเมินกำลังรับน้ำหนักโครงสร้างต้องมีการสำรวจข้อมูลทั้งด้านสภาพทางกายภาพและรายละเอียดโครงสร้างทั้งด้านคุณสมบัติวัสดุ รายละเอียดทางวิศวกรรม ทดสอบแบบไม่ทำลาย กิ่งทำลาย และวิเคราะห์เสถียรภาพของโครงสร้างด้วยการศึกษาพบว่าการเสริมกำลังโครงสร้างด้วยคาร์บอนไฟเบอร์เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการเสริมกำลังของโครงสร้างในปัจจุบันและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเสริมกำลังของโครงสร้างได้เป็นอย่างดี สำหรับการติดตั้งระบบ CFRP ต้องให้ผู้ที่มีความเชี่ยวชาญและเข้าใจขั้นตอนการติดตั้งเป็นผู้ดำเนินการติดตั้ง รวมถึงต้องมีการบริหารจัดการการวางน้ำหนักบรรทุกให้ได้ตามที่ผู้ออกแบบได้กำหนดไว้ภายหลังการเสริมกำลังด้วยเพื่อความปลอดภัยในอนาคต

**คำสำคัญ:** การเสริมกำลัง คาร์บอนไฟเบอร์ โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก การทดสอบแบบไม่ทำลาย การทดสอบแบบกิ่งทำลาย

### Abstract

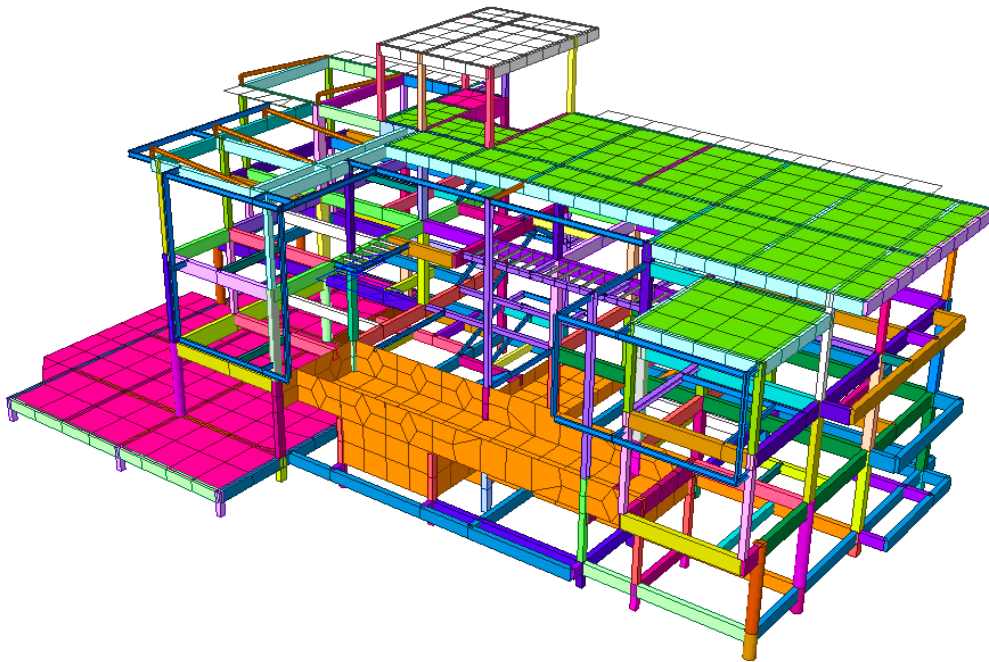
This paper presents the results of strengthening of reinforced concrete structural members with carbon fiber reinforced polymers (CFRP) for building has had Live Load by designer has designed from lacking control. Strengthening structure to support load weight according to requirement has been important. To evaluate the capacity of structures must have investigate data concern physical properties, structural details, structural material, non – destructive test, semi destructive test and analysis of stability for Building structures. From studying, it found structure strengthening system by CFRP system has become an appropriate choice for the current structural strengthening and CFRP has been able to increase efficiency in straightening structure well. For installing the CFRP system must be carried out by proficiently by specialists who understand the procedures. In addition, from strengthening structure, building should have had Live Load administration and management in building according to designer specifies after strengthening for safety in long term.

**Keywords:** Straightening, Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP), Reinforced Concrete Structure, Non – Destructive Test, Semi Destructive Test

### 1. บทนำ

อาคารเก่าหลายแห่งมีความจำเป็นต้องปรับปรุงการใช้งานใหม่เพื่อให้มีความทันสมัย โดยในบางโซนพื้นที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้งานซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อน้ำหนักบรรทุกที่ต้องเพิ่มขึ้น อาทิเช่น มีการปรับปรุงจากเดิมใช้งานเป็นพักอาศัยเปลี่ยนแปลงเป็นห้องอาหารหรือเปลี่ยนเป็นห้องประชุม ซึ่งส่งผลกระทบต่อน้ำหนักบรรทุกตามกฎกระทรวงโดยน้ำหนักบรรทุกที่ต้องเพิ่มขึ้นนั้นส่งผลกระทบต่อกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างหลักอย่างแน่นอน จึงจำเป็นต้องมีการ

ตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างเดิมว่าสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นได้หรือไม่ การตรวจสอบโดยส่วนใหญ่จะเป็นการตรวจสอบโดยวิธีไม่ทำลาย (NDT) และแบบกึ่งทำลาย จะให้ทราบถึงค่ากำลังของวัสดุ ณ ปัจจุบันของโครงสร้าง เพื่อนำไปประกอบการวิเคราะห์โครงสร้างโดยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method 3D) ดังรูปที่ 1 ประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้างต่อไป หากมีชิ้นส่วนของโครงสร้างที่จำเป็นต้องเสริมกำลังผู้ออกแบบก็จะประเมินและหารูปแบบการเสริมกำลังที่เหมาะสม ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะติดปัญหาเรื่องรูปแบบทางสถาปัตยกรรมที่เปลี่ยนไปหลังการเสริมกำลัง หากเป็นวิธีขยายหน้าตัด หรือเสริมเหล็กรูปพรรณจะส่งผลกระทบต่อขนาดของโครงสร้างที่จะใหญ่ขึ้นห้องคานจะต่ำลงมา มีผลต่อระดับของฝ้าที่จะต้องลดลงตาม จะส่งผลกระทบต่อรูปแบบงานทางสถาปัตยกรรม ดังนั้นการเสริมกำลังโดยใช้คาร์บอนไฟเบอร์จึงเป็นวิธีที่ตอบโจทย์ในเรื่องนี้ได้เป็นอย่างดีโดยในการเสริมโครงสร้างโดยวิธีดังกล่าวจำเป็นต้องมีการคำนวณและติดตั้งอย่างถูกวิธีโดยผู้เชี่ยวชาญโดยเฉพาะ



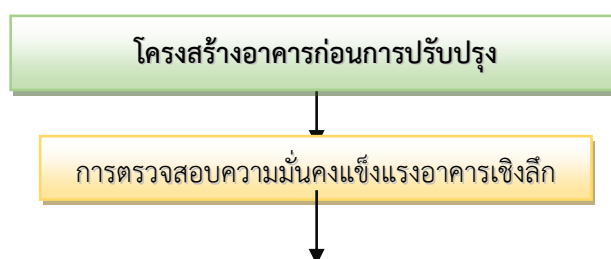
รูปที่ 1 การจำลองโครงสร้างด้วยโปรแกรม Finite Element

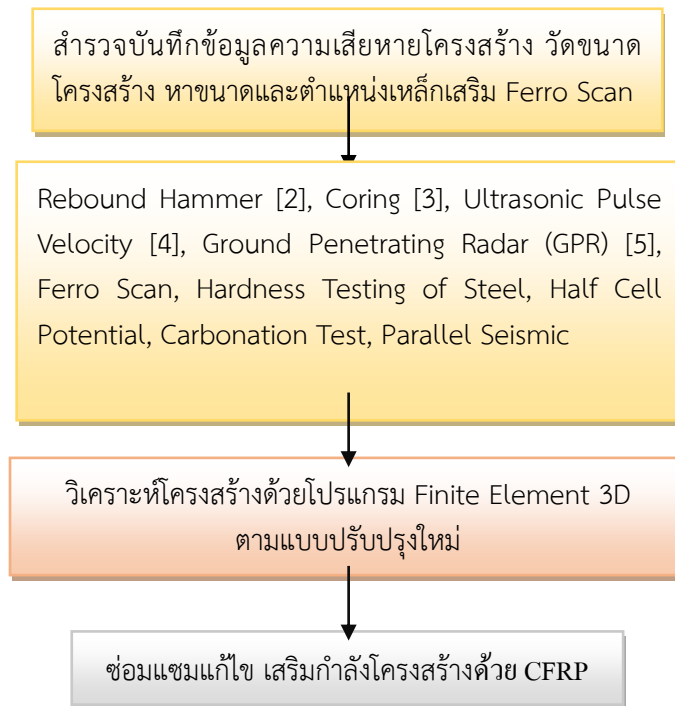
## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อเป็นการศึกษาวิธีการเสริมกำลังโดยใช้คาร์บอนไฟเบอร์และการตรวจสอบโครงสร้างอาคารเชิงลึกโดยวิธีไม่ทำลาย (NDT) [1] และแบบกึ่งทำลาย เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ประเมินเสถียรภาพของโครงสร้างก่อนการเสริมกำลังโครงสร้างอาคาร

## 3. แนวทางการตรวจสอบและเสริมกำลังโครงสร้าง

แนวทางการตรวจสอบเสถียรภาพของโครงสร้างอาคารเชิงลึกและเสริมกำลังโครงสร้างอาคารสามารถแสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 2





รูปที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการตรวจสอบและเสริมกำลังโครงสร้าง [6]

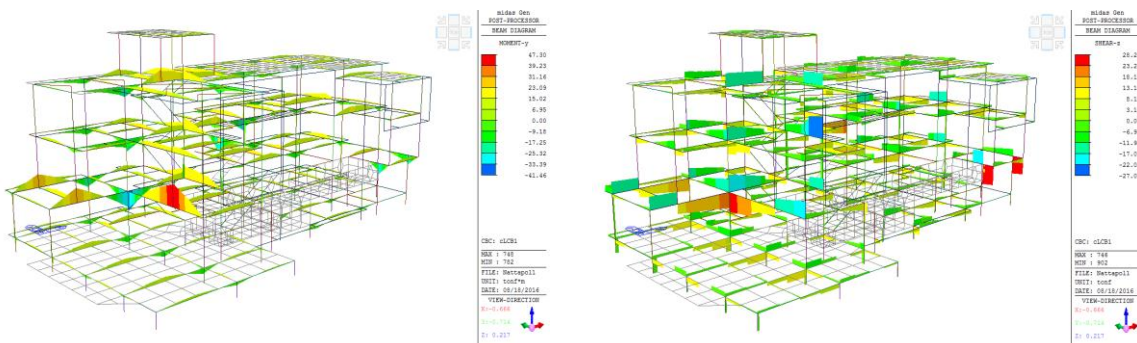
#### 4. ขั้นตอนการดำเนินงาน

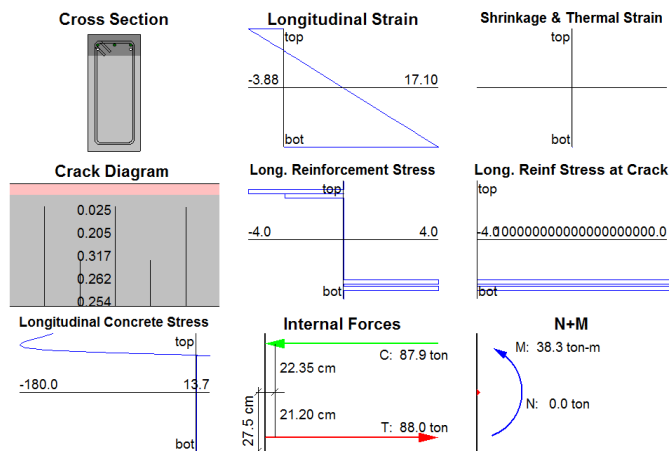
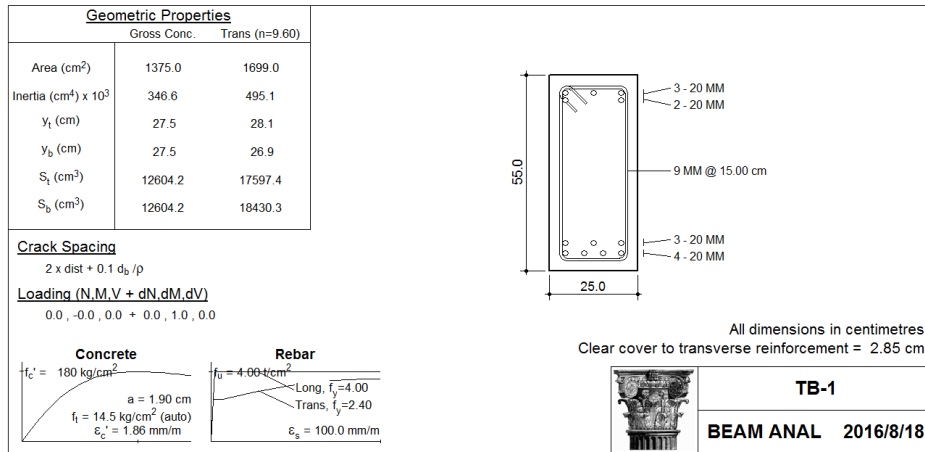
##### 4.1 งานสำรวจและตรวจสอบโครงสร้าง

งานสำรวจและประเมินสภาพเบื้องต้นอาคารทางกายภาพของอาคาร โดยสำรวจสภาพความเสียหายของอาคาร เช่น รอยแตกร้าวที่พื้น คาน เสา และทดสอบทางวิศวกรรมโครงสร้าง สุ่มตรวจสอบกำลังอัดประลัยของคอนกรีต ( $F_c'$ ) โดยวิธี Rebound Hammer, เจาะเก็บตัวอย่างแท่งคอนกรีตด้วยวิธี Coring และนำมาทดสอบในห้องปฏิบัติการ ตรวจสอบความต่อเนื่องของคอนกรีตด้วยวิธีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Velocity, UPV) ตรวจสอบรายละเอียดเหล็กเสริมโดย Ferro Scan หรือ Ground Penetrating Radar (GPR) ในตำแหน่งที่มีการปรับปรุงโครงสร้าง และนำผลการตรวจสอบทางวิศวกรรมไปประกอบการวิเคราะห์ ประเมินความมั่นคงแข็งแรงของโครงสร้าง

##### 4.2 การตรวจสอบและวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Finite Element 3D

ขอบเขตการวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารตามรูปแบบของโครงสร้างที่มีการปรับปรุงใหม่ด้วยโปรแกรม Finite Element 3D ดังรูปที่ 3 เพื่อหาหน่วยแรงต่างๆ เช่น ค่าแรงเฉือน โมเมนต์ดัด ที่เกิดขึ้นจริง จากนั้นจึงนำมาตรวจสอบเปรียบเทียบกับโครงสร้างหลักจริง เช่น พื้น คาน เสาตามแบบ โดยใช้ค่ากำลังรับแรงอัด ( $f_c'$ ) ที่ได้จากการตรวจสอบ ณ ปัจจุบัน หากตำแหน่งของโครงสร้างหลักใดมีค่ากำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างหลักที่ยอมให้มีค่าน้อยกว่าหน่วยแรงที่เกิดขึ้นจริงจะต้องมีการเสริมกำลังโครงสร้างในตำแหน่งดังกล่าวนี้





รูปที่ 3 ผลวิเคราะห์หน่วยแรงโครงสร้างจากโปรแกรม Finite Element

#### 4.3 งานออกแบบเสริมกำลังโครงสร้างอาคารโดยคาร์บอนไฟเบอร์ Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)

แผ่นโพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber Reinforced Polymers) วัสดุทำจากเส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง (High Strength Fibers) มีกำลังรับแรงมากกว่าเหล็กประมาณ 10 เท่าโดยปกติCFRP ที่ใช้ทั่วไปมี 3 ประเภทได้แก่ แบบแผ่น (Sheet) ความหนาประมาณ 0.11-0.17 มม. แบบสทริป (STRIP) ความหนาประมาณ 1.2-1.4 มม. และแบบแท่งกลม (ROD) เส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 8 มม. ดังรูปที่ 4 - 5



CFRP STRIP



CFRP WRAP



CFRP ROD

รูปที่ 4 ประเภทของ Carbon Fiber Reinforced Polymers

**NIBICHI**

**NIBICHI CFU60 : TECHNICAL DATASHEET**

Product	<>	NIBICHI-CFU60
Fabric Construction	<>	Fiber Orientation 0° (Uni-Directional)
		Warp : Black Carbon Fiber
		Weft : White Thermoplastic Heat-Set Fiber
Dry Fiber Tensile Strength	<>	> 4800 MPa
Fiber Tensile E-Modulus	<>	> 230 GPa
Elongation at Break	<>	> 2.10%
Fiber Design Thickness	<>	0.337 mm.
Area Weight	<>	600±25 g/m <sup>2</sup>
Filament	<>	TORAY (JAPAN)
Fiber Density	<>	1.75 g/cm <sup>3</sup>
Shelf Life	<>	Unlimited (Product Warranty)
Storage Condition	<>	7-35 °C

**IMPORTANT**  
All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms. The fabric style listed may not be available from inventory, and minimum order quantities may apply.

Distributed by Thai Carbon Fiber Co., Ltd.  
616/29 Sathupradit Rd., Bangsonggang, Yanwaeng Bangkok 10120 Tel: (66)02-031 6886(sales) Fax: (66)02-294-5382

**NIBICHI**

**NIBICHI CFU60 : TECHNICAL DATASHEET**

Product	<>	NIBICHI-CFU60
Fabric Construction	<>	Fiber Orientation 0° (Uni-Directional)
		Warp : Black Carbon Fiber
		Weft : White Thermoplastic Heat-Set Fiber
Dry Fiber Tensile Strength	<>	> 4800 MPa
Fiber Tensile E-Modulus	<>	> 230 GPa
Elongation at Break	<>	> 2.10%
Fiber Design Thickness	<>	0.337 mm.
Area Weight	<>	600±25 g/m <sup>2</sup>
Filament	<>	TORAY (JAPAN)
Fiber Density	<>	1.75 g/cm <sup>3</sup>
Shelf Life	<>	Unlimited (Product Warranty)
Storage Condition	<>	7-35 °C

**IMPORTANT**  
All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms. The fabric style listed may not be available from inventory, and minimum order quantities may apply.

Distributed by Thai Carbon Fiber Co., Ltd.  
616/29 Sathupradit Rd., Bangsonggang, Yanwaeng Bangkok 10120 Tel: (66)02-031 6886(sales) Fax: (66)02-294-5382

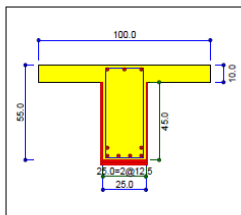
## รูปที่ 5 ตัวอย่างข้อมูลผลิตภัณฑ์ Carbon Fiber Reinforced Polymers

ดังนั้นในการใช้งาน CFRP ต้องมีการสำรวจตรวจสอบและวิเคราะห์คำนวณออกแบบโครงสร้างที่จะใช้งานจริงให้เหมาะสมโดยวิศวกรโครงสร้าง เพื่อให้การติดตั้ง CFRP ได้อย่างถูกต้อง และโครงสร้างอาคารมีความปลอดภัยในการใช้งานตามหลักวิศวกรรม โดยทั่วไป CFRP จะถูกออกแบบให้เสริมกำลังการรับแรงดัด (Flexural Strengthening) เสริมกำลังรับแรงเฉือน (Shear Strengthening) และเสริมกำลังเพื่อเพิ่มความเหนียวให้กับชิ้นส่วนโครงสร้าง โดยการคำนวณ และออกแบบเพื่อเสริมกำลังของโครงสร้างนั้นต้องคำนวณ และออกแบบอย่างถูกต้องตามหลักวิชาการทางวิศวกรรม (ACI 318-08 & ACI 440.2 R08) [6] [7] ดังรูปที่ 6 – 7

### 1. Geometry and Materials

Design Code : ACI318-05, ACI 440.2R  
 Design Concept : ISIS CANADA - Design Manual No.4  
 Material Data :  $f_{ck} = 195 \text{ kgf/cm}^2$  ( $\beta_1=0.850$ )  
 $f_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$   
 $f_{yk} = 2400 \text{ kgf/cm}^2$

Section : H x B = 55 x 25 cm  
 : hf x bf = 10 x 100 cm  
 Top Bar (Layer1) : 3 - d20 (dr = 2.5 cm)  
 Bot. Bar (Layer2) : 2 - d20 (db = 7 cm)  
 Bot. Bar (Layer1) : 4 - d20 (de = 2.5 cm)  
 Stirrups : 1 - d6 @ 20 cm



- Tension : Rebar  $\phi_{Ts} = 50.87 \text{ tonf}$   
 - Tension : FRP  $\phi_{Tp} = 21.16 \text{ tonf}$   
 - Design Moment Strength  $\phi M_n = 36.07 \text{ tonf-m}$   
 - Strength Ratio :  $M_u / \phi M_n = 0.954 \leq 1.000 \dots \text{O.K}$

- Extreme Strain : Concrete  $\epsilon_c = 0.0014$   
 - Extreme Strain : Rebar  $\epsilon_s = 0.0138 \geq 0.0040 \dots \text{O.K}$   
 - Extreme Strain : FRP  $\epsilon_{sp} = 0.0150$   
 - Failure Mode : Steel Yielding  $\rightarrow$  FRP Rupture

### 6. Check FRP Strain at Required Flexural Strength

- Design Moment Strength  $\phi M_n = 34.40 \text{ tonf-m}$   
 - Neutral Axis Depth  $c = 6.57 \text{ cm}$   
 - Concrete Strain  $\epsilon_c = 0.0018$   
 - Rebar Strain  $\epsilon_s = 0.0122$   
 - FRP Strain  $\epsilon_{sp} = 0.0133$

### 7. Check Tension Reinforcements

-  $A_s = \Sigma(A_{bar} + A_{tp} \cdot (f_{tp} / \phi_{tp}) / (f_y \phi_s)) = 26.68 \text{ cm}^2$   
 -  $A_{cr} = \Sigma(A_{bar}) = 9.42 \text{ cm}^2$   
 -  $d_c = \Sigma(A_s \cdot d_{aj}) / (A_s) = 2.82 \text{ cm}$   
 -  $d_c = \Sigma(A_s \cdot d_{aj}) / (A_s) = 2.50 \text{ cm}$   
 -  $d = H - d_c = 52.18 \text{ cm}$   
 -  $A_{s,min1} = 3 \cdot \sqrt{f_{ck}} / f_y \cdot B \cdot d = 1.29 \text{ cm}^2$   
 -  $A_{s,min2} = 200 / f_y \cdot B \cdot d = 0.43 \text{ cm}^2$   
 -  $A_{s,min} = \text{Max}(A_{s,min1}, A_{s,min2}) = 1.29 < 26.68 \text{ cm}^2 \dots \text{O.K}$

### 8. Check Shear Force

- Strength Reduction Factor: Concrete  $\phi_c = 0.750$   
 - Strength Reduction Factor: Stirrup  $\phi_s = 0.750$   
 - Strength Reduction Factor: FRP  $\phi_{fp} = 0.300$   
 -  $\phi_c V_c = \phi_c \cdot 2 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot B \cdot d = 7.08 \text{ tonf}$   
 -  $\phi_s V_s = \phi_s \cdot A_v \cdot f_y \cdot d / s = 1.29 \text{ tonf}$   
 -  $\phi_{fp} V_{fp} = \phi_{fp} \cdot 2 \cdot T_{fp} \cdot W_{fp} \cdot f_{fp} = 16.32 \text{ tonf}$   
 -  $\phi V_n = \phi_c V_c + \phi_s V_s + \phi_{fp} V_{fp} = 24.69 \text{ tonf} \geq V_u = 22.80 \text{ tonf} \dots \text{O.K}$

### 2. Reinforcing Materials

Position	W <sub>tp</sub> (cm)	T <sub>tp</sub> (cm)	f <sub>tp</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	E <sub>tp,ALLOW</sub>	$\phi_{tp}$	Product
Bottom	25.00	0.0334	36199.92	0.0150	0.7000	A <sup>2</sup> xO <sup>2</sup> xJ <sup>4</sup> A <sup>2</sup> SK-N300 (2 Ply)
Side (Shear)	45.00	0.0167	36199.92	0.0150	0.3000	A <sup>2</sup> xO <sup>2</sup> xJ <sup>4</sup> A <sup>2</sup> SK-N300 (1 Ply)

### 3. Member Force and Moment

-  $M_u = 34.40 \text{ tonf-m}$   
 -  $V_u = 22.80 \text{ tonf}$

### 4. Bending Moment Capacity - Before Strengthening

- Strength Reduction Factor: Concrete  $\phi_c = 0.900$   
 - Strength Reduction Factor: Rebar  $\phi_s = 0.900$   
 - Neutral Axis Depth  $c = 3.16 \text{ cm}$   
 - Compression : Concrete  $\phi_c C_c = 40.05 \text{ tonf}$   
 - Compression : Rebar  $\phi_s C_s = 10.82 \text{ tonf}$   
 - Tension : Rebar  $\phi_s T_s = 50.87 \text{ tonf}$   
 - Design Moment Strength  $\phi M_n = 25.13 \text{ tonf-m}$   
 - Strength Ratio :  $M_u / \phi M_n = 1.369 > 1.000 \dots \text{Reinforcement}$

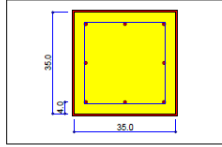
### 5. Bending Moment Capacity - After Strengthening

- Strength Reduction Factor: Concrete  $\phi_c = 0.900$   
 - Strength Reduction Factor: Rebar  $\phi_s = 0.900$   
 - Strength Reduction Factor: FRP  $\phi_{fp} = 0.700$   
 - Neutral Axis Depth  $c = 4.76 \text{ cm}$   
 - Compression : Concrete  $\phi_c C_c = 60.36 \text{ tonf}$   
 - Compression : Rebar  $\phi_s C_s = 11.66 \text{ tonf}$

## รูปที่ 6 ตัวอย่างการคำนวณการเสริมกำลัง Carbon Fiber Reinforced Polymers คาน

### 1. Geometry and Materials

Design Code : ACI318-05, ACI 440.2R  
 Design Concept : ISIS CANADA - Design Manual No.4  
 Material Data :  $f_{ck} = 195 \text{ kgf/cm}^2$  ( $\beta_1=0.85$ )  
 $f_y = 3000 \text{ kgf/cm}^2$   
 $f_{frp} = 2400 \text{ kgf/cm}^2$   
 Section Dim. :  $35 \times 35 \text{ cm}$   
 Effective Len. :  $KL_u = 4 \text{ cm}$   
 Steel Distribut. :  $8 - 3 - d16$  ( $d_s = 4 \text{ cm}$ )  
 Total Steel Area :  $A_{st} = 16.1 \text{ cm}^2$  ( $\rho_{st}=0.0131$ )



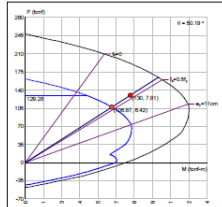
### 2. Reinforcing Materials

Position	$W_{tp}$ (cm)	$T_{tp}$ (cm)	$f_{tp}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$E_{tp, Allow}$	$\phi_{tp}$	Product
Horizontal	50.00	0.1002	36199.92	0.0150	0.7000	A%2D/A%2A SK-N300 (6 Ply)
Vertical	5.00	0.1200	28552.05	0.0170	0.7000	A%2D/A%2C SK-CP80512 (1 Line)

### 3. Magnified Moment

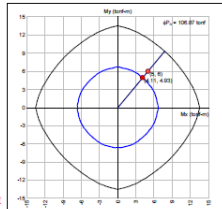
$KL_u/f_y = 4/10 = 0 < 34-12(M_u/M_c) = 22.00$   
 $\delta_s = 1.000$

$KL_u/f_y = 4/10 = 0 < 34-12(M_u/M_c) = 22.00$   
 $\delta_y = 1.000$



### 4. Member Force and Moment

$P_u = 130 \text{ tonf}$   
 $\phi_s M_{ux} = \phi_s \cdot \text{MAX}(M_{ux}, P_u e_{ux}) = 5 \text{ tonf-m}$   
 $\phi_y M_{uy} = \phi_s \cdot \text{MAX}(M_{uy}, P_u e_{uy}) = 6 \text{ tonf-m}$



### 5. Check Axial and Moment Capacity - Before Strengthening

Rotation Angle  $\theta = 50.19^\circ$   
 Depth to the Neutral Axis  $c = 35.73 \text{ cm}$   
 Strength Reduction Factor  $\phi = 0.65$   
 Maximum Axial Load  $\phi P_{n(max)} = 129.28 \text{ tonf}$   
 Design Axial Load Strength  $\phi P_n = 106.87 \text{ tonf}$   
 Design Moment Strength  $\phi M_{ux} = 4.11 \text{ tonf-m}$   
 $\phi M_{uy} = 4.93 \text{ tonf-m}$

Strength Ratio : Applied/Design = 1.216 > 1.000 ..... Reinforcement

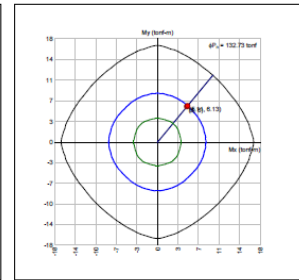
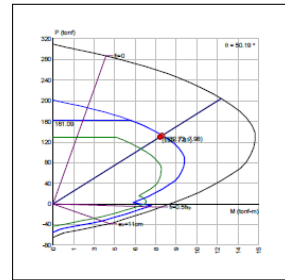
### 6. Calculate Concrete Strength - After Strengthening

Ultimate Confinement Pressure due to FRP Strengthening  
 $\epsilon'_{frp} = 0.0020$   
 $f'_{frp} = \epsilon'_{frp} \cdot E_{frp, Allow} = 4826.66 \text{ kgf/cm}^2$   
 $f'_{mp} = 2 (\phi_{frp} \cdot f_{frp} - f_{tp}) / (B + D) = 38.69 \text{ kgf/cm}^2$   
 Volumetric Ratio of FRP Strength to Concrete Strength  
 $\alpha_{cc} = f'_{mp} / (f_{cc} - f_{ck}) = 0.305$   
 Compressive Strength of Confined Concrete  
 $f'_{cc} = f_{ck} \cdot (1 + \alpha_{frp} \cdot \alpha_{cc}) = 254.52 \text{ kgf/cm}^2$   
 $\alpha_{frp} = 1.000$

### 7. Check Axial and Moment Capacity - After Strengthening

Rotation Angle  $\theta = 50.19^\circ$   
 Depth to the Neutral Axis  $c = 35.4 \text{ cm}$   
 Strength Reduction Factor  $\phi = 0.65$   
 Maximum Axial Load  $\phi P_{n(max)} = 161.09 \text{ tonf}$   
 Design Axial Load Strength  $\phi P_n = 132.73 \text{ tonf}$   
 Design Moment Strength  $\phi M_{ux} = 5.11 \text{ tonf-m}$   
 $\phi M_{uy} = 6.13 \text{ tonf-m}$

Strength Ratio : Applied/Design = 0.979 < 1.000 ..... O.K.



## รูปที่ 7 ตัวอย่างการคำนวณการเสริมกำลัง Carbon Fiber Reinforced Polymers เสา

### 4.4 การติดตั้ง Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP)

ขั้นตอนในการติดตั้งระบบ CFRP ต้องให้ผู้ที่มีการประสบการณ์ ความเชี่ยวชาญและเข้าใจในขั้นตอนการติดตั้งเป็นผู้ดำเนินการติดตั้ง โดยทำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเพื่อความปลอดภัยในการทำงาน ดังรูปที่ 8 โดยในการติดตั้งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้



## รูปที่ 8 การติดตั้ง Carbon Fiber Reinforced Polymers

- เตรียมพื้นผิวคอนกรีตเดิมที่จะติดตั้ง CFRP โดยสกัดปูนฉาบโครงสร้างเดิมออก หากพบการแตกร้าวให้ทำการซ่อมแซมก่อนการติดตั้งด้วยระบบ Concrete Repair หรือ Epoxy Injection ก่อน
- กรณี Bond - Critical Application ได้แก่ การเสริมกำลังแรงดัด และกำลังแรงเฉือน ของพื้น หรือกรณี Contact - Critical Application ได้แก่ การรัดวงรอบ (Confinement) ของโครงสร้างคอนกรีต ต้องเตรียมพื้นผิวให้เรียบ มุมที่จะหุ้มแผ่น CFRP จะต้องเจียรลบมุมผิวคอนกรีตโครงสร้างเป็นรัศมีอย่างน้อย 13 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันความเครียดและการเกิดช่องว่างระหว่าง CFRP กับคอนกรีต และฉาบแต่งพื้นผิวด้วย Epoxy Putty Filler และเตรียมผิวให้เรียบโดยการขัด (Abrasive) หรือขัดด้วยน้ำ (Water - blasting) บริเวณที่จะติดตั้งแผ่น CFRP

3. ทาเคลือบนำยารองพื้นผิวคอนกรีตที่จะติดตั้ง CFRP ด้วย Epoxy Resin เพื่อการยึดเกาะที่ดีระหว่างคอนกรีตกับวัสดุ CFRP ควรผสม Epoxy Resin ตามคำแนะนำของผู้ผลิต เครื่องมือที่เหมาะสมควรเป็นใบพัดไฟฟ้า ผสมที่อุณหภูมิที่เหมาะสมภายในระยะเวลาที่กำหนด โดยส่วนประกอบของ Epoxy Resin และ Hardness ที่ถูกผสมแล้วต้องใช้ให้หมดภายในเวลา Pot Life ที่กำหนดเนื่องจากเวลาและการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อการแข็งตัวของ Epoxy Resin

4. วางแผ่น CFRP บน Epoxy Resin ที่ทาไว้ขณะที่ยังไม่แข็งตัว ริดฟองอากาศด้วยลูกกลิ้ง จากนั้นทา Epoxy Resin ทับบนแผ่น CFRP ให้ชุ่ม โดย Epoxy Resin จะต้องซึมผ่านบนแผ่น CFRP

5. ในกรณีต้องวางชั้นของ CFRP ซ้อนทับแผ่นเดิม ให้ทา Epoxy Resin และวางแผ่นก่อนที่ Epoxy Resin ในชั้นแรกจะแข็งตัว แผ่นของ CFRP จะต้องวางตามแนวที่กำหนด แผ่นยึดตรง วางถูกทิศทาง การซ้อนทับของแผ่นจะกระทำได้ตามแนวยาวของแผ่นโดยกำหนดความยาวในช่วงซ้อนทับตามคำแนะนำของผู้ผลิต โดยความยาวของการซ้อนทับต้องไม่น้อยกว่า 10 เซนติเมตร

6. ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและผิวคอนกรีตที่จะติดตั้ง มีผลกระทบโดยตรงต่อประสิทธิภาพการติดตั้งของ CFRP ดังนั้นต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมก่อนการติดตั้ง โดยทั่วไป Epoxy Resin ไม่ควรติดตั้งบนผิวคอนกรีตโครงสร้างที่มีความชื้นเกิน 4 %

## 5. บทสรุป

5.1 การทดสอบแบบ Non-destructive Testing ช่วยตรวจสอบได้อย่างสะดวก รวดเร็ว ไม่ทำลายโครงสร้างและยังสามารถประเมินกำลังเสถียรภาพของโครงสร้างอาคาร ณ ปัจจุบันว่าจะมีความมั่นคงแข็งแรงและปลอดภัยตามหลักวิศวกรรมเพื่อนำไปวิเคราะห์การเสริมกำลังโครงสร้างต่อไป

5.2 การจำลองรูปแบบของโครงสร้างด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จะช่วยให้สามารถหาค่าแรงภายในจริงที่เกิดขึ้น (Moment, Shear, Torsion, Axial force, Stress) และนำไปประเมินเปรียบเทียบกับผลการตรวจสอบดังกล่าวข้างต้น หากสภาพโครงสร้าง ณ ปัจจุบันมีกำลังรับน้ำหนัก (Strength) น้อยกว่าแรงภายในที่เกิดขึ้นจึงจะนำไปวิเคราะห์การเสริมกำลังโครงสร้างต่อไป

5.3 การเสริมกำลังโดยใช้คาร์บอนไฟเบอร์เป็นวิธีเสริมกำลังที่มีประสิทธิภาพ น้ำหนักเบา ลดปัญหาในเรื่องของงานทางสถาปัตยกรรม ซึ่งต้องมีการติดตั้งอย่างถูกวิธีโดยผู้ที่มีประสบการณ์ ความเชี่ยวชาญและเข้าใจในขั้นตอนการติดตั้งเป็นผู้ดำเนินการติดตั้ง โดยทำตามคำแนะนำของบริษัทผู้ผลิตเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน

5.4 ภายหลังจากการเสริมกำลังสามารถตรวจสอบกำลังรับน้ำหนักจริงได้โดยทดสอบ Load Test เพื่อตรวจสอบความสามารถในการรับกำลังของโครงสร้างว่าสามารถรับน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มขึ้นได้ตามที่เสริมกำลังไว้หรือไม่โดยอ้างอิงมาตรฐาน ACI 318-08 [7]

## 6. กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินงานของบทความนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้นเนื่องจากได้รับการสนับสนุนข้อมูลจาก บริษัท Thai Carbon Fiber Co., Ltd. และบริษัท One Engineering Consultants Co., Ltd.

## บรรณานุกรม

- [1] ACI Committee 228.2R – 98, Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI Annual of Concrete Practice, Farmington Hills, MI, American Concrete Institute.
- [2] ASTM C805-02, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2003.
- [3] ASTM C42/C42M-03, Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete. Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2003.

- [4] ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.02, ASTM, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials, 2003.
- [5] ASTM D6432, Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA, American Society for Testing and Materials.
- [6] ACI 440.2R-02, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI 2002, American Concrete Institute.
- [7] ACI Committee 318-08, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 2008, Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.