

คอนกรีตเสริมโพลิเมอร์เสริมเส้นใย: ทางเลือกสำหรับโครงสร้างทนต่อการกัดกร่อน

กริสน์ ชัยมูล*

บทคัดย่อ

การกัดกร่อนของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญอันหนึ่งและต้องการการป้องกัน โดยเฉพาะสำหรับโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ในปัจจุบันทางเลือกหนึ่งคือการใช้คอนกรีตเสริมโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer, FRP) เนื่องจาก FRP ทนต่อการกัดกร่อน อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีนี้ถือว่าเป็นเทคโนโลยีใหม่สำหรับวิศวกรโยธา และที่สำคัญพฤติกรรมทางกลของ FRP แตกต่างจากพฤติกรรมของเหล็กเส้น บทความนี้จึงต้องการแนะนำและวิจารณ์เกี่ยวกับเทคโนโลยีใหม่นี้ ในเรื่องคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของ FRP ข้อดีข้อเสีย งานวิจัยและการประยุกต์ใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP และข้อพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ รวมทั้งการวิจัยและการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทย

คำสำคัญ: โครงสร้างคอนกรีต เอฟ-อาร์-พี การกัดกร่อน คอนกรีตเสริม เอฟ-อาร์-พี

* อาจารย์ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44150
อีเมล: k.chaimoon@msu.ac.th

Concrete Reinforced with FRP Bars: Alternative for Noncorrosive Structures

Krit Chaimoon^{*}

Abstract

The corrosion of reinforcing steel in concrete structures is still a main problem and needed protection especially the structures subjected to aggressive environments. At present, an alternative is to use concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars as FRP bars are noncorrosive. However, this technology is quite new for civil engineers. More importantly, the mechanical properties of FRP bars are different from those of steel bars. This paper is, therefore, aimed at introducing and discussing about this technology in the issues of mechanical and physical properties of FRP bars; advantages and disadvantages, research work and applications of concrete structures reinforced with FRP bars; and economic considerations as well as research work and applications in Thailand.

Keywords: concrete structure, FRP, corrosion, concrete reinforced with FRP bars

^{*} Lecturer, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150, E-mail: k.chaimoon@msu.ac.th

1. บทนำ

เมื่อกล่าวถึงโครงสร้างคอนกรีต คนส่วนใหญ่ก็จะนึกถึงโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก (reinforced concrete (RC) structures) ที่พบเห็นโดยทั่วไป ทั้งที่เสริมด้วยเหล็กไม่อัดแรงและอัดแรง คอนกรีตเสริมเหล็กเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกใช้ในการก่อสร้างมานานและถูกพัฒนาเรื่อยมาจนกลายเป็นเทคโนโลยีที่วิศวกรโยธา สถาปนิก ช่างก่อสร้าง หรือแม้แต่คนทั่วไปก็รู้จักและคุ้นเคยเป็นอย่างดี โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กเป็นโครงสร้างที่มีราคาถูกเมื่อเทียบกับโครงสร้างประเภทอื่น สามารถหล่อเป็นรูปร่างต่างๆ ได้โดยสะดวก โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงเป็นที่นิยม อย่างไรก็ตามแม้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจะมีความแข็งแรง ทนทานต่อสภาวะดินฟ้าอากาศได้ดีกว่าโครงสร้างประเภทอื่น ปัญหาการกัดกร่อน (corrosion) เนื่องจากการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กก็ยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญและต้องการการแก้ไข โดยเฉพาะโครงสร้างที่ต้องเผชิญกับสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง เช่น อาคารและสะพานที่ก่อสร้างในทะเล เป็นต้น แม้ความเป็นต่างของคอนกรีตจะช่วยป้องกันการเป็นสนิมของเหล็กเสริมในระยะแรกๆ ได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป ผลรวมของสภาวะแวดล้อมต่างๆ เช่น ความชื้น อุณหภูมิ และคลอไรด์ จะทำให้ความเป็นต่างของคอนกรีตลดลง ทำให้เหล็กเสริมเป็นสนิม และในที่สุดกระบวนการกัดกร่อนจะทำให้คอนกรีตเสื่อมสภาพและส่งผลกระทบต่อความสามารถในการทำงานเพื่อที่จะป้องกันปัญหาการกัดกร่อน หลายเทคนิคได้ถูกนำมาใช้ เช่น การใช้คอนกรีตที่บีบแน่นขึ้น การใช้เถ้าลอยและสารปอชโซลานอื่นผสมคอนกรีต (สำเริง, 2548; วันชัย, 2553) การใช้เหล็กเส้นชนิดพิเศษที่เรียกว่า epoxy-coated steel bars แทนเหล็กเส้นทั่วไป แต่เทคนิคต่างๆ ก็ไม่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างแท้จริง Keesler and Powers (1988).

เมื่อไม่นานมานี้ วัสดุคอมโพสิต (composite materials) ชนิดหนึ่งประกอบด้วยเส้นใยเสริมแรงในวัสดุโพลิเมอร์หรือเรซิน หรือรู้จักกันในนามของโพลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer, FRP) ถูกผลิตคล้าย

เหล็กเส้น (steel bars) ในที่นี้จะขอเรียกว่า FRP เส้น (FRP bars) ได้กลายเป็นทางเลือกในการใช้แทนเหล็กเส้นในโครงสร้างคอนกรีต เนื่องจาก FRP ไม่เป็นสนิมและทนต่อการกัดกร่อน ทำให้ปัญหาการเป็นสนิมของเหล็กหมดไป นอกจากนั้นวัสดุชนิดนี้ยังมีกำลังดึงที่สูงมาก อันเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวเสริมแรงในโครงสร้าง

พฤติกรรมทางกลของ FRP เส้นแตกต่างจากพฤติกรรมของเหล็กเส้น หลักการคิดในการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กจึงไม่สามารถใช้ได้ทั้งหมดกับการออกแบบโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP และต้องได้รับการแก้ไขและปรับปรุงให้เหมาะสมเสียก่อน (ACI, 2001) FRP เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เหมือนกัน (anisotropic) และมีกำลังรับแรงดึงสูงเฉพาะในทิศทางเดียวกันกับเส้นใยที่เสริม และที่สำคัญวัสดุ FRP ไม่มีการคราก (yielding) แต่จะมีพฤติกรรมแบบวัสดุยืดหยุ่น (elastic) จนกระทั่งวิบัติ อันเป็นผลให้คอนกรีตเสริม FRP มีความเหนียว (ductility) น้อยกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก ซึ่งในการออกแบบต้องพิจารณาถึงข้อนี้ด้วย

คอนกรีตเสริม FRP ยังเป็นเทคโนโลยีที่ค่อนข้างใหม่ และยังต้องการงานวิจัยอีกมาก ข้อเสนอแนะในการออกแบบและก่อสร้างโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP เพิ่งจะมีเมื่อไม่นานมานี้ เช่น ประเทศญี่ปุ่นและแคนาดา มีเมื่อปี ค.ศ. 1997 และ 1996 ตามลำดับ ในขณะที่ประเทศสหรัฐอเมริกาหลังจากปี ค.ศ. 2000 แต่ด้วยข้อดีต่างๆ ของเทคโนโลยีนี้ ทำให้กำลังถูกใช้ในการก่อสร้างโครงการต่างๆ มากขึ้นเรื่อยๆ และกำลังถูกศึกษาและพัฒนาจากกลุ่มนักวิจัยจำนวนมากในต่างประเทศ บทความวิชาการนี้จึงได้รวบรวมเนื้อหาต่างๆ เกี่ยวกับคอนกรีตเสริม FRP และต้องการที่จะแนะนำเทคโนโลยีใหม่นี้ โดยหวังว่าจะเป็นประโยชน์แก่นักวิจัย วิศวกร ช่างก่อสร้าง นักศึกษา และผู้ที่สนใจ อันจะเป็นการรองรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้ในอนาคตต่อไป โดยจะกล่าวถึง FRP ก่อน โดยเฉพาะคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของ FRP เส้น แล้วจึงอภิปรายเกี่ยวกับโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP ทั้งข้อดีข้อเสีย ประสิทธิภาพมา งานวิจัย และการประยุกต์ใช้งาน ตามด้วยข้อพิจารณาทาง

เศรษฐศาสตร์ และการวิจัยและการประยุกต์ใช้งานในประเทศไทย ก่อนที่จะจบด้วยข้อสรุป

2. โพลีเมอร์เสริมเส้นใย หรือ FRP

การพัฒนาและการประยุกต์ใช้โพลีเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer, FRP) เป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตเริ่มมีขึ้นภายหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ในช่วงที่การใช้วัสดุคอมโพสิตกำลังขยายตัว โดยอุตสาหกรรมอากาศยานเป็นอุตสาหกรรมแรกๆ ที่สังเกตเห็นข้อดีของวัสดุคอมโพสิตว่าเป็นวัสดุที่มีกำลังสูงและมีน้ำหนักน้อย และในระหว่างยุคสงครามเย็น ก็ได้เริ่มมีการนำเอาวัสดุคอมโพสิตมาใช้ในอุตสาหกรรมอากาศยาน ยุทโธปกรณ์ นอกจากนั้นเมื่อเศรษฐกิจของอเมริกาเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว วัสดุคอมโพสิตยังได้ถูกนำมาใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆ มากขึ้น เช่น ไม้อัด และคันเบ็ดตกปลา เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จนกระทั่งทศวรรษที่ 1960 FRP จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุเสริมในคอนกรีต (วันชัย, 2553)

FRP เป็นวัสดุคอมโพสิตหรือวัสดุเชิงประกอบ (composite materials) ชนิดหนึ่งที่มีวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก (matrix) คือ โพลีเมอร์หรือเรซิน (polymer or resin) และมีวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) คือ เส้นใย (fibers) ขณะที่เส้นใยช่วยปรับปรุงโพลีเมอร์ให้มีคุณสมบัติดีขึ้น โพลีเมอร์ก็ช่วยให้ FRP มีรูปร่างที่ต้องการ นอกจากนั้นยังช่วยกระจายแรงที่กระทำต่อวัสดุไปยังเส้นใยแต่ละเส้น ผลรวมของโพลีเมอร์กับเส้นใยทำให้ FRP มีจุดเด่นหลายอย่าง ได้แก่ สามารถขึ้นรูปง่าย โดยเฉพาะมีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักสูงและ ทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ เส้นใยที่ใช้กันโดยทั่วไปมี 3 ชนิด ประกอบด้วย เส้นใยคาร์บอน (carbon fibers) ซึ่งมีความแข็งแรงสูง เส้นใยแก้ว (glass fibers) ซึ่งมีความแข็งแรงน้อยกว่าเส้นใยชนิดอื่น และเส้นใยอะรามิด (aramid fibers) ซึ่งเกิดจากกระบวนการโพลีเมอร์ไรเซชันของอะโรมาติกและมีโครงสร้างแข็งแรงมากเช่นเดียวกับเส้นใยคาร์บอน ขณะที่อีพ็อกซีเรซิน (epoxy resins) เรซินโพลีเอสเตอร์ (polyester resins) และเรซินไวนิลเอสเตอร์ (vinylester resins) เป็นเรซินชนิดที่ใช้โดยทั่วไป อย่างไรก็ตามเส้นใย

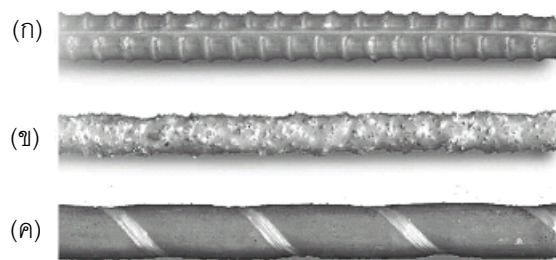
แก้วเป็นชนิดที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากราคาที่ถูกลงกว่าชนิดอื่น โดยเฉพาะเส้นใยแก้วประเภท E (E-glass) ที่มีราคาต่ำกว่าอีกประเภท คือ ประเภท S (S-glass)

โพลีเมอร์เสริมเส้นใยหรือ FRP จึงถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามชนิดของเส้นใย คือ

- (1) โพลีเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (glass-fiber-reinforced polymer, GFRP)
- (2) โพลีเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon-fiber-reinforced polymer, CFRP) และ
- (3) โพลีเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (aramid-fiber-reinforced polymer, AFRP)

นอกจากนี้ FRP ที่ใช้งานวิศวกรรมโครงสร้างยังสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ประเภทที่ใช้เสริมคอนกรีตแทนเหล็กเส้น (FRP reinforcing bars) หรือ FRP เส้นซึ่งเป็นประเภทที่จะกล่าวถึงในบทความนี้ และประเภทที่ใช้ในการเสริมกำลังแก่โครงสร้างเดิม (FRP for strengthening structures) โดยการปะติดภายนอกเข้ากับโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง รายละเอียดสำหรับ FRP ประเภทนี้สามารถศึกษาได้จากเอกสารอื่นๆ [5-7]

FRP เส้นจะถูกขึ้นรูปคล้ายเหล็กเส้น มีหน้าตัดหลายแบบแต่โดยส่วนใหญ่เป็นวงกลม และอาจมีผิวขรุขระหรือเป็นข้ออ้อยเพื่อเพิ่มการยึดเหนี่ยวกับคอนกรีต รูปแบบของผิวมี 3 แบบใหญ่ๆ คือ ข้ออ้อย (ribbed) เคลือบทราย (sand-coated) และพันรอบพร้อมเคลือบทราย (wrapped and sand-coated) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบผิว FRP เส้น (ก) ข้ออ้อย (ข) เคลือบทราย และ (ค) พันรอบพร้อมเคลือบทราย (ACI, 2001)

2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของ FRP เส้น

โดยธรรมชาติแล้ว FRP เส้นมีคุณสมบัติในแต่ละทิศทางไม่เหมือนกัน (anisotropic) โดยมีทิศทางตามยาว

เป็นทิศทางหลัก และสามารถผลิตได้ด้วยหลายเทคนิค เช่น เทคนิคที่มีชื่อว่า pultrusion braiding และ weaving นอกจากนั้นปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของเส้นใย ปริมาณเส้นใย (fiber volume) ชนิดของเรซิน การจัดเรียงตัวของเส้นใย (fiber orientation) และการควบคุมคุณภาพระหว่างการผลิต ต่างมีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของ FRP เส้น จึงทำให้ FRP เส้นจากต่างผู้ผลิตมีคุณสมบัติแตกต่างกัน

2.1.1 ความหนาแน่น

ความหนาแน่นของ FRP เส้นมีค่าอยู่ในช่วง 1,250 ถึง 2,100 กก./ลบ.ม. หรือมีค่าน้อยกว่าเหล็กอยู่ประมาณ 4 ถึง 6 เท่า (ตารางที่ 1) น้ำหนักที่น้อยกว่าทำให้ค่าขนส่งถูกกว่าและง่ายในการขนย้ายในสถานที่ก่อสร้าง

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นเหล็กเส้นและ FRP เส้น (กก./ลบ.ม.) (ACI, 2001)

เหล็ก	GFRP	CFRP	AFRP
7850	1250 ถึง 2100	1500 ถึง 1600	1250 ถึง 1400

2.1.2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน

สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของ FRP เส้น มีค่าไม่คงที่ทั้งในทิศทางตามยาวและตามขวาง (ตารางที่ 2) โดยมีค่าขึ้นอยู่กับ ชนิดของเส้นใย ชนิดของเรซิน และสัดส่วนปริมาตรของเส้นใย (fiber volume fraction) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเส้นใย ต่อปริมาตรของวัสดุคอมโพสิต

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของเหล็กเส้นและ FRP เส้น (ACI, 2001)

ทิศทาง	ส.ป.ส. การขยายตัวเนื่องจากความร้อน ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)			
	เหล็ก	GFRP*	CFRP*	AFRP*
ตามยาว	11.7	6 ถึง 10	-9 ถึง 0	-6 ถึง -2
ตามขวาง	11.7	21 ถึง 23	74 ถึง 104	60 ถึง 80

* ค่าของ fiber volume fraction อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7

2.1.3 พฤติกรรมภายใต้อุณหภูมิสูง

สำหรับโครงสร้างที่ต้องการการทนไฟเป็นหลักควรหลีกเลี่ยงการใช้คอนกรีตเสริม FRP เพราะโพลิเมอร์จะอ่อนตัวภายใต้ความร้อนที่สูงเกินไป ผลการทดสอบหลายอันชี้ว่าที่อุณหภูมิ 250 °C กำลังดึงของ GFRP และ CFRP

เส้นเดียว มีค่าลดลงมากกว่าร้อยละ 20 (Kumahara et al., 1993).

สำหรับ FRP เส้นในโครงสร้างคอนกรีต คุณสมบัติทางกลของโพลิเมอร์จะลดลงอย่างมากและการยืดเหนียวระหว่าง FRP เส้นกับคอนกรีตจะสูญเสียที่อุณหภูมิซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิที่เรียกว่า อุณหภูมิการเปลี่ยนเนื้อแก้ว (glass-transition temperature, T_g) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เฟสอสัณฐานของวัสดุโพลิเมอร์เปลี่ยนไปมาระหว่างสถานะที่ยืดหยุ่นคล้ายยางกับสถานะที่แข็งแบบเนื้อแก้ว สำหรับ FRP เส้นโดยทั่วไปค่า T_g มีค่าระหว่าง 65 ถึง 120 °C ขึ้นกับชนิดของเรซิน การศึกษาอันหนึ่งรายงานว่า ที่อุณหภูมิ 100 °C ค่ากำลังยึดเหนียวที่ได้จากการทดสอบแบบดึงแยก (pullout test) มีค่าลดลงระหว่างร้อยละ 20 ถึง 40 และที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C ค่าดังกล่าวมีค่าลดลงระหว่างร้อยละ 80 ถึง 90 (Katz et al., 1999) นักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาพฤติกรรมและความทนต่อไฟของโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP (Tanani, 1995; Blontrock et. al., 1999) อย่างไรก็ตามความเข้าใจในพฤติกรรมที่แท้จริงยังไม่ดีพอและยังต้องการงานวิจัยในเรื่องนี้อีกมาก วิธีการทดสอบและวิธีการออกแบบกำลังถูกพัฒนาและนำเสนอ Saafi (2002) แนะนำว่าความหนาของคอนกรีตหุ้มสำหรับโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP ควร มีค่าไม่น้อยกว่า 64 มม.

2.1.4 พฤติกรรมภายใต้แรงดึง

ภายใต้แรงดึง FRP เส้นจะไม่มีคราก (yielding) พฤติกรรมการรับแรงดึงของ FRP เส้นที่ทำจากเส้นใยชนิดเดียวจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเส้นตรงจนกระทั่งวิบัติ คุณสมบัติการรับแรงดึงของ FRP เส้นแสดงในตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า FRP เส้นมีกำลังดึงที่สูงกว่าเหล็กเสริมมาก กำลังดึง (tensile strength) และความแข็งเกร่ง (stiffness) ของ FRP เส้น ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น กรรมวิธีและคุณภาพในการผลิต โดยเฉพาะสัดส่วนปริมาตรของเส้นใย นอกจากนั้นกำลังดึงของ FRP เส้นบางชนิดยังขึ้นกับพื้นที่หน้าตัดด้วย ซึ่งแตกต่างจากเหล็กเส้น ยกตัวอย่างเช่น GFRP เส้นมีกำลัง

ดิ่งลดลงถึงร้อยละ 40 เมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางเพิ่มขึ้นจาก 9.5 เป็น 22.2 มม. (Faza and GangaRao, 1993).

ตารางที่ 3 คุณสมบัติการรับแรงดึงของเหล็กเส้นและ FRP เส้น (ACI, 2001)

คุณสมบัติ	เหล็ก	GFRP*	CFRP*	AFRP*
ความเค้นจุดคราก (กก./ซม. ²)	2400 ถึง 5,270	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
กำลังดึง (กก./ซม. ²)	3900 ถึง 7035	4920 ถึง 16310	6110 ถึง 37615	17530 ถึง 25895
โมดูลัสยืดหยุ่น ($\times 10^6$ กก./ซม. ²)	2.04	0.35 ถึง 0.52	1.22 ถึง 5.92	0.41 ถึง 1.28
ความเครียดจุดคราก (%)	1.4 ถึง 2.5	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ความเครียดจุดดึงขาด (%)	6.0 ถึง 12.0	1.2 ถึง 3.1	0.5 ถึง 1.7	1.9 ถึง 4.4

* ค่าของ fiber volume fraction อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 0.7

2.1.5 พฤติกรรมภายใต้แรงอัด

FRP เส้นมีความสามารถในการรับแรงอัดได้ไม่ดีและ ACI (2001) ไม่แนะนำให้ใช้ในการรับแรงอัด ซึ่งต่างจากเหล็กเส้นที่มีความสามารถในการรับแรงดึงและแรงอัดที่ใกล้เคียงกัน GFRP, CFRP และ AFRP เส้นถูกรายงานว่ามีค่ากำลังอัดเท่ากับร้อยละ 55, 78 และ 20 ของกำลังดึงตามลำดับ และมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นภายใต้แรงอัดเท่ากับประมาณร้อยละ 80, 85 และ 100 ของค่าโมดูลัสยืดหยุ่นภายใต้แรงดึงตามลำดับ (Mallick, 1988).

2.1.6 การยึดเหนี่ยว

ความสามารถในการยึดเหนี่ยวของ FRP เส้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง คือ การออกแบบ กระบวนการผลิต คุณสมบัติทางกลของ FRP เส้นเอง และสภาวะแวดล้อม คุณสมบัตินี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมาก การถ่ายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างคอนกรีตกับ FRP เส้น ถูกตั้งสมมุติฐานว่าแรงยึดเหนี่ยวถูกส่งผ่านเรซินไปยังเส้นใย และการสูญเสียการยึดเหนี่ยวเนื่องจากแรงเฉือน (bond-shear failure) ในเรซินอาจเกิดขึ้นได้ คุณสมบัติด้านการยึดเหนี่ยวของ FRP เส้นถูก

ศึกษาโดยใช้วิธีการทดสอบต่างๆ กัน (Faza and GangaRao, 1990; Ehsani et. al., 1996).

เช่น การทดสอบแบบดึงแยก (pullout test) การทดสอบแบบต่อทาบ (splice test) และการทดสอบแบบคานยื่น (cantilever beam) เพื่อให้ได้สมการทางทฤษฎี (empirical equation) สำหรับคำนวณระยะฝังยึด (embedment length)

3. โครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP

ข้อดีและข้อเสียของ FRP เส้นที่มีต่อโครงสร้างคอนกรีตสามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 4

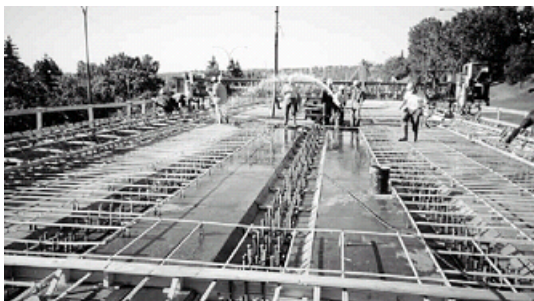
ตารางที่ 4 ข้อดีและข้อเสียของ FRP เส้นต่อโครงสร้างคอนกรีต (ACI, 2001)

ข้อดี	ข้อเสีย
กำลังดึงตามแนวยาวสูง	ไม่ครากก่อนเกิดการวิบัติแบบเปราะ และกำลังอัดต่ำ
ทนทานต่อการกัดกร่อน	กำลังตามแนวขวางต่ำ
ไม่มีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก	โมดูลัสยืดหยุ่นต่ำ
ทนทานต่อความล้า (fatigue) สูง	ไม่ทนทานต่อรังสีอัลตราไวโอเลต
น้ำหนักเบา	เส้นใยแก้วทนทานน้อยในสภาวะชื้น
ความเหนียวนำต่อความร้อนและไฟฟ้าต่ำ (สำหรับเส้นใยแก้วและอะรามิด)	เส้นใยแก้วและอะรามิดบางชนิดทนทานน้อยในสภาวะต่าง
-	สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนในแนวขวางสูงเมื่อเทียบกับคอนกรีต
-	อาจทนไฟได้น้อย โดยขึ้นกับชนิดของเรซิน ประเภทและความหนาของคอนกรีตหุ้ม

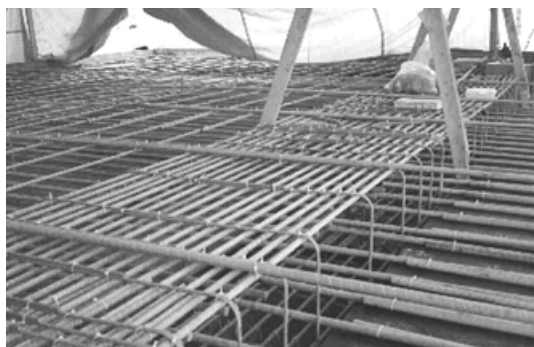
จากตารางจะเห็นได้ว่าความทนทานต่อการกัดกร่อนของ FRP เส้นเป็นจุดเด่นที่สำคัญซึ่งเหมาะสำหรับโครงสร้างในสภาวะแวดล้อมที่มีการกัดกร่อนสูง และด้วยข้อดีอื่นๆ ทำให้คอนกรีตเสริม FRP ถูกใช้ในการก่อสร้าง

โครงสร้างต่างๆ โดยเฉพาะ โครงสร้างโครงสร้างคอนกรีตที่ต้องมีการใช้และสัมผัสกับเกลือละลายน้ำแข็ง (deicing salts) โครงสร้างที่อยู่ใกล้หรืออยู่ในทะเล โครงสร้างที่ต้องสัมผัสกับสารกัดกร่อนอื่นๆ โครงสร้างที่ต้องการความเป็นกลางทางแม่เหล็กไฟฟ้าหรือมีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าต่ำ โครงสร้างที่ต้องนำความร้อนต่ำ โครงสร้างชั่วคราวของงานอุโมงค์ใต้ดินและงานเจาะดินที่ไม่สามารถใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กได้ และโครงสร้างที่ต้องมีน้ำหนักเบา สำหรับข้อเสียที่ FRP เส้นไม่มีการคราก่อนเกิดการวิบัติแบบเปราะ การใช้ FRP เส้นจึงต้องพึงระวังในข้อนี้ด้วย และการที่ FRP เส้นมีความสามารถในการรับแรงอัดได้น้อย มีโมดูลัสยืดหยุ่นภายใต้แรงอัดน้อยกว่าภายใต้แรงดึง ก็ไม่ควรใช้ในการเสริมองค์อาคารที่ต้องรับแรงอัด เช่น เสา หรือแม้แต่ในบริเวณที่ต้องรับแรงอัดขององค์อาคารรับแรงดัด

3.1 การประยุกต์ใช้โครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP



รูปที่ 2 การก่อสร้างสะพาน Crowchild เมือง Calgary, Alberta แคนาดา ในปี ค.ศ. 1997 ด้วย GFRP เส้น (ACI, 2001)



รูปที่ 3 การก่อสร้างโรงโม่ใน British Columbia ประเทศแคนาดา ในปี ค.ศ. 1998 ด้วย GFRP เส้น (ACI, 2001)

การใช้ FRP เส้นเสริมแทนเหล็กในยุโรปเริ่มต้นในประเทศเยอรมนีด้วยการก่อสร้างสะพานคอนกรีตอัดแรงที่ใช้ FRP เส้นแทนเหล็กเสริมอัดแรงในปี ค.ศ. 1986 และหลังจากนั้นก็มีความพยายามที่จะเพิ่มการวิจัยและการใช้ FRP เส้นในยุโรป หลายโครงการได้ถูกก่อสร้างด้วยคอนกรีตเสริม FRP เช่น สะพาน Headingley ในเมือง Manitoba ซึ่งใช้ทั้ง CFRP และ GFRP เส้น และสะพาน Kent Country Road No. 10 ใช้ CFRP แบบตะแกรงเสริมในบริเวณที่เกิดโมเมนต์ดัดลบ รูปตัวอย่างการประยุกต์ใช้คอนกรีตเสริม FRP ในโครงสร้างสะพานและอาคารแสดงในรูปที่ 2 และ รูปที่ 3

4. ข้อพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์

เมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP กับโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กในทางเศรษฐศาสตร์ ค่าก่อสร้างเริ่มต้นของโครงสร้างคอนกรีตเสริม FRP มีค่าสูงกว่ามากเนื่องจากราคา FRP เส้นที่สูงกว่าเหล็กเส้นมาก ทั้งด้วยเหตุผลของราคาวัสดุเองและด้วยเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ที่ปริมาณความต้องการยังไม่มากพอประกอบกับผู้ผลิตยังมีน้อยราย อย่างไรก็ตามราคา FRP ลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับในอดีตที่มีการประยุกต์ใช้เฉพาะในอุตสาหกรรมอากาศยาน และด้วยปริมาณการประยุกต์ใช้คอนกรีตเสริม FRP ที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (ในต่างประเทศ) ทำให้ราคาลดลงเรื่อยๆ อย่างไรก็ตามถ้ามองความคุ้มค่าในระยะยาว สำหรับโครงสร้างที่ต้องมีการบำรุงรักษาอยู่เป็นประจำและมีค่าบำรุงรักษาสูง คอนกรีตเสริม FRP เป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าพิจารณามากที่สุด เพราะนอกจากจะช่วยลดค่าบำรุงรักษาแล้วยังช่วยลดผลกระทบต่อผู้ใช้บริการในขณะที่ต้องมีการปิดทำการบำรุงรักษาซึ่งความเสียหายทางเศรษฐศาสตร์อาจจะมีมากกว่าค่าก่อสร้างเริ่มต้นด้วยซ้ำ นอกจากนั้นข้อดีอีกอย่างของ FRP ที่ควรนำมาพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์

ด้วยก็คือการที่มีน้ำหนักเบาซึ่งสามารถช่วยประหยัดค่าแรงได้ โดยเฉพาะในประเทศที่ค่าแรงสูง

5. การประยุกต์ใช้และงานวิจัยในประเทศไทย

เนื่องจากราคา FRP เส้นที่ยังสูงมาก การประยุกต์ใช้ในประเทศไทยจึงยังมีน้อย และมีการใช้เฉพาะกับโครงสร้างชั่วคราวที่ต้องการข้อดีของ FRP เส้นเท่านั้น เช่น ใช้ในโครงสร้างกำแพงกันดินส่วนที่หัวเจาะต้องเจาะผ่านของโครงการรถไฟฟ้าใต้ดินของการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (MRTA) อันอาจเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้คอนกรีตเสริม FRP ยังได้รับความสนใจน้อยจากนักวิจัยไทย งานวิจัยเกี่ยวกับ FRP ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเน้นเฉพาะประเภทที่ใช้ในการเสริมกำลังแก่โครงสร้าง (ชาคริตพิ์ และคณะ, 2552; Keong and Maprajong, 2009).

6. บทสรุป

คอนกรีตเสริม FRP เป็นการประยุกต์ใช้วัสดุ FRP ที่มีคุณสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนสูง มีกำลังดึงสูง และมีน้ำหนักเบา เทคโนโลยีนี้ยังค่อนข้างใหม่มากแต่กำลังได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ ในต่างประเทศ ด้วยความเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับโครงสร้างคอนกรีตที่ทนต่อการกัดกร่อน ไม่มีปัญหาการเป็นสนิมของเหล็กเสริม และทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง โดยถูกใช้กับโครงสร้างต่างๆ เช่น อาคารและสะพานที่ก่อสร้างในทะเล เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้ต้องการผู้ที่มีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้ โดยเฉพาะการออกแบบ เนื่องจากพฤติกรรมทางกลของ FRP เส้นแตกต่างจากเหล็กเส้น

เนื่องจากความใหม่ของเทคโนโลยีนี้และราคาในการก่อสร้างที่สูง การประยุกต์ใช้งานส่วนใหญ่จึงใช้กับโครงสร้างพิเศษที่ต้องการประโยชน์จากข้อดีของวัสดุ FRP และเทคโนโลยีนี้ยังต้องการพัฒนาและศึกษาอีกมาก โดยเฉพาะปัญหาที่เกิดจากข้อด้อยของตัววัสดุเอง เช่น การทนต่อไฟ สมรรถนะในระยะยาว การใช้งานที่หักงอได้ลำบาก นอกจากนี้มาตรฐานต่างๆ ก็ยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนาและวิจัย แม้การประยุกต์ใช้ในประเทศไทยยังมี

น้อย แต่ด้วยข้อดีของเทคโนโลยีนี้ เชื่อว่าในไม่ช้าเทคโนโลยีนี้จะถูกประยุกต์ใช้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

ชาคริตพิ์ ไม้พันธุ์ สุชาติ ล้มกตัญญู และกิตติศักดิ์ ชันดิยวิชัย. (2552). "ผลของการเสริมกำลังด้วยวัสดุโพลีเมอร์เสริมเส้นใยต่อหน่วยแรงฉีกของสะพานชนิดคอมโพสิต." เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 14., นครราชสีมา, ประเทศไทย, เล่ม 6, หน้า 1939-1945.

วันชัย สะตะ. (2553). "การใช้วัสดุพอลิโพรไพลีนภายในประเทศกับคอนกรีตเสริมเส้นใย" วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 37, ฉบับที่ 1, หน้า 29-37.

สำเริง รักซ้อน. (2548). "การใช้เส้นใยแก้ว-เปลือกไม้ในงานคอนกรีต" วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 429-440.

American Concrete Institute: ACI Committee 440. (2001). *ACI 440.1R-01 "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Rebars,"* ACI, Farmington Hills, Mich., USA.

American Concrete Institute: ACI Committee 440. (2008). *ACI 440.2R-08 "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures,"* ACI, Farmington Hills, Mich., USA.

Blontrock, H., Taerwe, L. and Matthys, S. (1999). "Properties of fiber reinforced plastics at elevated temperatures with regards to fire resistance of reinforced concrete members." *Fourth International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Baltimore, American Concrete Institute, 43-54.

Concrete Society. (2004). *Concrete Society Technical report 55 "Design guidance for*

- strengthening concrete structures using fibre composite materials*," Crowthorne, 102pp.
- Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H. and Tao, S. (1996). "Design Recommendation for Bond of GFRP Rebars to Concrete." *Journal of Structural Engineering*, 122 (3), 247-257.
- Faza, S.S. and GangaRao, H.V.S. (1990). "Bending and Bond Behavior of Concrete Beams Reinforced with Plastic Rebars." *Transportation Research Record* 1290, 185-193.
- Faza, S.S. and GangaRao, H.V.S. (1993). "Glass FRP Reinforcing Bars for Concrete, Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications, Developments in Civil Engineering." In: A. Nanni, Elsevier, Amsterdam, pp. 167-188.
- Keesler, R.J. and Powers, R.G. (1988). "Corrosion of Epoxy Coated Rebars—Keys Segmental Bridge—Monroe County." Report No. 88-8A, Florida Dept. of Transportation, Materials Office, Corrosion Research Laboratories, Gainesville, Fla.
- Kumahara, S., Masuda, Y. and Tanano, Y. (1993). "Tensile strength of continuous fiber bar under high temperature." *Int. Symposium on Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, In: A. Nanni & C. Dolan, ACI SP-183, 731-42.
- Katz, A., Berman, N. and Bank, L.C. (1999). "Effect of High Temperature on the Bond Strength of FRP Rebars." *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 3(2), 73-81.
- Keong, O.W. and Maprajong, T. (2009). "Field application of FRP technology for strengthening to prestressed flat slabs at Plaza Chiang Mai in Chiang Mai Thailand." *Proceedings of the 14th National Convention on Civil Engineering*, Nakhon Ratchasima, Thailand, V. 6, 2249-2253.
- Mallick, P.K. (1988). *Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design*, Marcell Dekker, Inc., New York, 469 pp.
- Saafi, M. (2002). "Effect of fire on FRP reinforced concrete members." *Composite Structures*, 58, 11-20.
- Tanan, H. (1995). "Fire resistance of continuous fiber reinforced concrete." *Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures, ILEM Proceedings*, In: L. Taerwe, 368-375.
- Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. and Lam, L. (2002). *FRP Strengthened Concrete Structures*, Chichester: Wiley.