วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 38 ฉบับที่ 1 (93-100) มกราคม-มีนาคม 2554 บทความวิชาการ
KKU Engineering Journal Vol.38 No.1 (93-100) January – March 2011

โครงสร้างเหล็กผสมแนวใหม่

นันทวัฒน์ ขมหวาน [1] และ กริสน์ ชัยมูล [*2]

บทคัดย่อ

ด้วยสภาวะโลกร้อน , การอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติ และการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ โครงสร้างอาคารและโครงสร้างพื้นฐานที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นสิ่งที่ต้องการ งานวิจัยทางด้านวิศวกรรมโยธาจึงมุ่งประเด็นใหญ่ไปที่การทำให้วัสดุมีคุณภาพดีขึ้นและการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อที่จะแก้ปัญหาทั้งทางด้านวิศวกรรมและความกังวลระดับโลกต่างๆ หนึ่งในเทคโนโลยีฉลาดที่กำลังถูกพัฒนาและส่งเสริม คือ เทคโนโลยีที่ถูกเรียกว่า “โครงสร้างเหล็กผสมแนวใหม่” โดยเหล็กซึ่งเป็นองค์อาคารหลัก และวัสดุอื่น เช่น โพลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer, FRP), กระจก และไม้ สามารถถูกใช้อย่าง เหมาะสม ความเป็นธรรมชาติและรูปแบบโครงสร้างสมัยใหม่ สามารถ ถูกผสมผสาน กันได้อย่างลงตัวด้วยเทคโนโลยีใหม่นี้ ดังนั้นเทคโนโลยีนี้อาจจะกลายเป็นการก่อสร้างพื้นฐานอันใหม่ในอนาคตอันใกล้นี้ บทความนี้จึงต้องการแนะนำและวิจารณ์เกี่ยวกับเทคโนโลยีใหม่นี้

คำสำคัญ: โครงสร้างผสม โครงสร้างสมรรถนะสูง เอฟ-อาร์-พี กระจก ไม้

---

[1] อาจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, จังหวัดนครปฐม 73140, อีเมล์: fengnwk@ku.ac.th

[*2] อาจารย์, สาขาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, จังหวัดมหาสารคาม 44150, อีเมล์: k.chaimoon@msu.ac.th

[*] corresponding author

New Hybrid Steel Structures

Nantawat Khomwan [1] and Krit Chaimoon [*2]

Abstract

From the crisis of global warming, conservation of natural resources and economic growth, building structures and infrastructures with high performances are needed. Research on civil engineering is then highly focused on upgrading materials and developing new technologies to earn a brilliant solution both in engineering and global concerns. One of the smart technologies being developed and promoted is the so-called “new hybrid steel structure” in which steel, the main structural element, and other structural materials such as fiber-reinforced polymer (FRP), glass and timber can be utilized appropriately. Ecological and modern structure styles can be efficiently integrated with this new technology. Therefore, this technology may become a new fundamental construction in the near future. This paper is, hence, aimed at introducing and discussing about this new technology.

Keywords: hybrid structure, high-performance structure, FRP, glass, timber

[1] Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom, 73140 E-mail: fengnwk@ku.ac.th

[*2] Lecturer, Field of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University, Mahasarakham, 44150, E-mail: k.chaimoon@msu.ac.th

[*] corresponding author

1. บทนำ

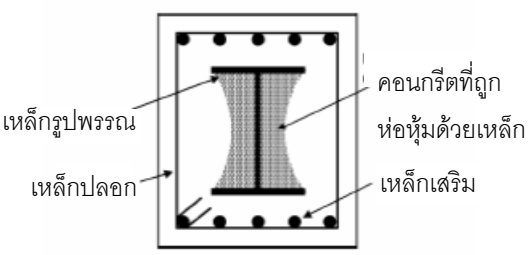
แม้แต่ในประเทศที่ต้องเผชิญกับภัยธรรมชาติที่รุนแรง ไม่ว่าจะเป็น แผ่นดินไหว พายุไต้ฝุ่น หรือพายุหิมะ อาคารสูงและโครงสร้างที่มีช่วงยาวมากๆ ก็ยังสามารถถูกก่อสร้างได้ ด้วยการใช้โครงสร้างเหล็กซึ่งมีความแกร่งและกำลังสูง (high rigidity and strength) อีกทั้งยังสามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาในด้านต่างๆ อย่างมากมาย อย่างไรก็ตาม ในภาวะปัจจุบันซึ่งหลายสิ่งมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันและรุนแรง ไม่ว่าจะเป็นภาวะโลกร้อน การขาดแคลนทรัพยากรธรรมชาติ หรือการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ ทำให้ความต้องการใช้โครงสร้างเหล็กมีสูงขึ้น แต่โครงสร้างต้องมีประสิทธิภาพสูงและมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

เพื่อที่จะตอบสนองความต้องการดังกล่าว การพัฒนาผลิตภัณฑ์เหล็กขั้นสูง เช่น เหล็กที่มีกำลังสูงขึ้นและเหล็กที่ต้านทานการกัดกร่อนได้ดี กำลังได้รับการส่งเสริม ไปพร้อมๆ กันกับการพัฒนาโครงสร้างผสมระหว่างเหล็กกับวัสดุชนิดอื่น และเพื่อที่จะส่งเสริมโครงสร้างเหล็กผสมแบบใหม่ (new hybrid steel structures) ตัวอย่างเช่น ในปลายปี ค .ศ. 2009 สมาคมวิศวกรโยธาญี่ปุ่น (the Japanese Society of Civil Engineers, JSCE) ได้เผยแพร่ข้อกำหนดมาตรฐานสำหรับโครงสร้างผสม (Standard Specifications for Hybrid Structures) และกำลังพัฒนาโครงสร้างผสมแนวใหม่ เช่น ใช้ร่วมกับ โพลิเมอร์เสริมเส้นใย (fiber-reinforced polymer, FRP) (Tanaka and Ueda, 2010) รวมทั้ง กระจก (glass) และไม้ (timber) เพื่อเป็นทางเลือกของโครงสร้างผสมแบบเดิม คือ เหล็กกับคอนกรีต (concrete)

บทความนี้ต้องการที่จะแนะนำเทคโนโลยีใหม่นี้แก่วิศวกร นิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจ รวมถึงนักวิจัย เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานในการประยุกต์ใช้ในอนาคตและเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

2. หลักการของโครงสร้างผสม

โครงสร้างผสม (hybrid structures) สร้างจากวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปด้วยการยึดเหนี่ยวทางกล (mechanically bonding) ทำให้โครงสร้างผสมมีคุณสมบัติที่ดีกว่าหรือสามารถตอบสนองความต้องการได้ดีกว่าโครงสร้างที่ใช้วัสดุนั้นๆ เพียงชนิดเดียว เช่น โครงสร้างผสมแบบเดิมระหว่างคอนกรีตกับเหล็กรูปพรรณ (steel-reinforced concrete, SRC) ดังแสดงในรูปที่ 1 คอนกรีตจะช่วยป้องกันเหล็กรูปพรรณไม่ให้เกิดการโก่งเดาะเฉพาะแห่ง (local buckling) และช่วยเพิ่มความสามารถในการป้องกันไฟไหม้และป้องกันการกัดกร่อน ส่วนเหล็กรูปพรรณทำให้โครงสร้างรับแรงได้มากขึ้น เป็นต้น



รูปที่ 1 *หน้าตัดโครงสร้างผสมคอนกรีตกับเหล็ก (Parra-Montesinos et al., 2005)*

3. คุณสมบัติของวัสดุ

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติต่างๆ ของ เหล็ก , ไม้เนื้ออ่อน (สิทธิชัย , 2545), กระจก (บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ , 2553) และ FRP ชนิดเสริมใยแก้ว (Teng et al., 2002) (glass-fiber-reinforced polymer, GFRP) ซึ่งเป็นชนิดที่นิยมใช้ทั่วไป

FRP (กริสน์ , 2553) เป็นวัสดุเชิงประกอบ (composite materials) ชนิดหนึ่งที่มีโพลิเมอร์หรือเรซิน (polymer or resin) เป็นเนื้อหลัก (matrix) และมีเส้นใย (fibers) เป็นวัสดุเสริมแรง (reinforcement materials) FRP มีจุดเด่นเหนือกว่าเหล็ก คือ กำลังดึงสูง อัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักสูง และทนต่อการกัดกร่อนได้ดี FRP ถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ตามชนิดของเส้นใยที่ฝังอยู่ข้างในประกอบด้วย

(1) โพลิเมอร์เสริมเส้นใยแก้ว (glass-fiber-reinforced polymer, GFRP)

(2) โพลิเมอร์เสริมเส้นใยคาร์บอน (carbon-fiber-reinforced polymer, CFRP) และ

(3) โพลิเมอร์เสริมเส้นใยอะรามิด (aramid-fiber-reinforced polymer, AFRP)

FRP มีทั้งแบบแผ่น และแบบเส้นลักษณะคล้ายเหล็กเส้น อย่างไรก็ตาม FRP ก็มีข้อด้อยหลายอย่าง เช่น มีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นตรงจนกระทั่งวิบัติจึงไม่มีการครากและวิบัติอย่างฉับพลัน (นันทวัฒน์ และคณะ, 2552; Khomwan et al., 2005) ดังรูปที่ 2 ทนไฟได้น้อย และมีความสามารถในรับแรงอัดได้ไม่ดี อายุการใช้งานค่อนข้างน้อยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเนื้อหลัก เป็นต้น

ตารางที่ 1 *คุณสมบัติต่างๆ ของวัสดุ*

คุณสมบัติ	เหล็กรูปพรรณ	ไม้เนื้ออ่อน	กระจก	GFRP [n]
หน่วยน้ำหนัก (กก./ลบ.ม)	7850	620 ถึง 760	2500	1600 ถึง 2000
กำลังดึง (กก./ตร.ซม.)	2500	640 ถึง 770	400	4000 ถึง 18000
โมดูลัสยืดหยุ่น ($\times 10^6$ กก./ตร.ซม.)	2.05	0.082 ถึง 0.114	0.071	0.20 ถึง 0.55
กำลังอัด (กก./ตร.ซม.)	2500	220 ถึง 370	10000	-
อัตราส่วนกำลังดึงต่อน้ำหนัก (กก./ตร.ซม. - ลบ.ม./กก.)	0.32	0.97 ถึง 1.04	0.16	2.00 ถึง 11.25

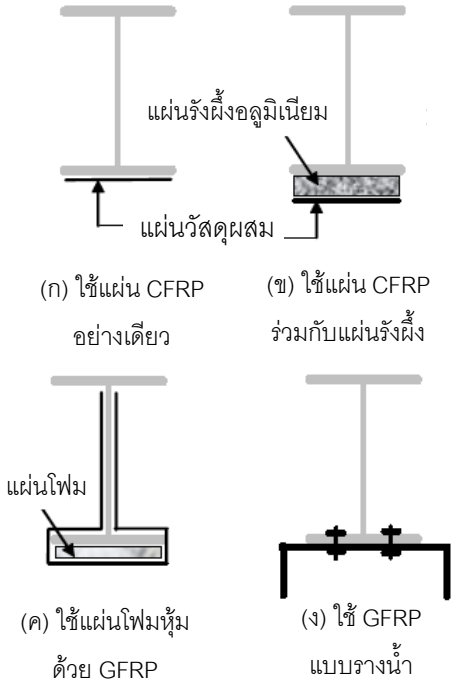
[n] ปริมาณเส้นใย (fiber content) เท่ากับร้อยละ 50 ถึง 80 โดยน้ำหนัก

รูปที่ 2 *การทดสอบแรงดึงและการแตกหักของ FRP (นันทวัฒน์ และคณะ, 2552)*

4. ชนิดของโครงสร้างเหล็กผสมแนวใหม่

4.1 โครงสร้างเหล็กผสม FRP

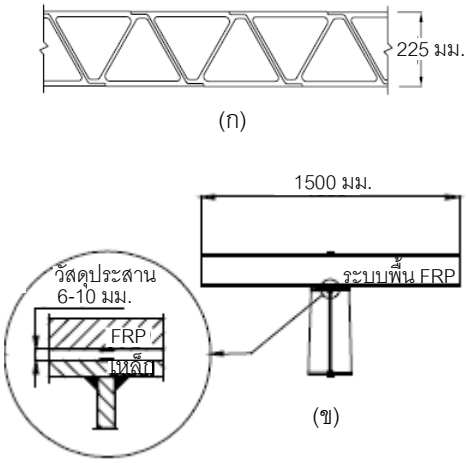
โครงสร้างเหล็กผสม FRP (hybrid FRP-steel structures) มีการประยุกต์ใช้หลายแบบ ทั้งที่มีหรือไม่มีคอนกรีต FRP จะถูกติดยึดเข้ากับระบบโดยเฉพาะบริเวณที่รับแรงดึง เช่น ช่วงกลางคาน FRP ช่วยเสริมกำลัง ช่วยยืดช่วงอายุการรับแรงกระทำซ้ำ (fatigue life) และช่วยลดการขยายตัวของรอยร้าว (crack propagation) รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างเหล็กผสม FRP ที่ไม่ใช้คอนกรีตรูปแบบต่างๆ จากการศึกษา (Edberg et al., 1996; Gillespie et al., 1996) พบว่า กำลังของหน้าตัดผสมรูปแบบ (ก), (ข), (ค) และ (ง) ดังแสดง ในรูปที่ 3 เพิ่มขึ้นจากกำลังของหน้าตัดที่มีเหล็กอย่างเดียวร้อยละ 42 , 71, 41 และ 37 ตามลำดับ



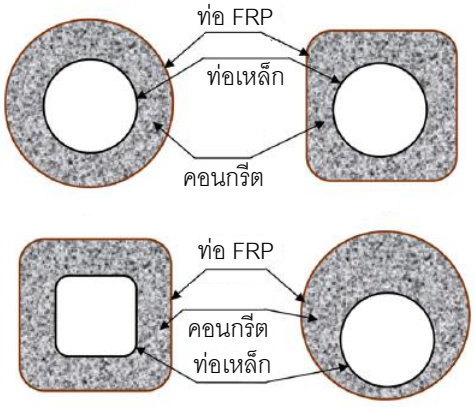
รูปที่ 3 *หน้าตัดเหล็กผสม FRP แบบต่างๆ (Edberg et al., 1996; Gillespie et al., 1996)*

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างคานสะพานเหล็กผสมกับระบบพื้นสะพาน FRP ซึ่งยึดติดกันโดยใช้วัสดุประสาน ระบบพื้น FRP ทำหน้าที่เสมือนเป็นคอร์ดด้านบน (top chord) ของหน้าตัดผสม ความสามารถในการรับแรงของระบบผสมสูงกว่าระบบปกติ จากการทดสอบพบว่าการวิบัติเกิดขึ้นในระบบพื้น FRP ขณะที่เกิดการครากของปีกล่างของคานเหล็ก (Keller and Gürtler, 2005)

เสาผสมแบบใหม่ ชนิด หนึ่งดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยส่วนท่อภายนอกทำด้วย FRP ส่วนท่อภายในเป็นเหล็กรูปพรรณและมีคอนกรีตอยู่ระหว่างส่วนทั้งสอง ถูกรายงานว่าเป็นเสาที่มีความเหนียวสูงมากเมื่อเทียบกับเสาแบบต่างๆ ที่มีใช้ในปัจจุบัน (Teng et al., 2007)



รูปที่ 4 *(ก) ระบบพื้นสะพาน FRP (ข) คานสะพานเหล็กผสมกับระบบพื้นสะพาน FRP (Keller and Gürtler, 2005)*



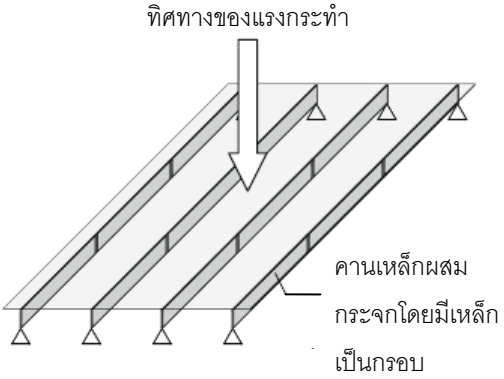
รูปที่ 5 *ตัวอย่างหน้าตัดเสาผสม เหล็ก คอนกรีต และ FRP (Teng et al., 2007)*

ข้อด้อยของโครงสร้างเหล็กผสม FRP เกิดจากคุณสมบัติของวัสดุทั้งสอง โดยเฉพาะการทนต่อไฟไหม้ ซึ่งต้องพึงระวังในการใช้งานหรือต้องหาวิธีแก้ไข

4.2 โครงสร้างเหล็กผสมกระจก

สำหรับในโครงสร้างที่ต้องการความสวยงามและหรูหรา คานกระจก (glass beams) นิยมใช้เป็นแผ่นเสริมกำลังด้านข้างโปร่งแสง (transparent stiffeners) สำหรับผนังกระจก (glass facade) หรือหลังคากระจก อย่างไรก็ตามในการใช้งานมักจะประสบปัญหาในการออกแบบเนื่องจากความเปราะของกระจกทำให้ความปลอดภัยทางโครงสร้างต่ำ ทางออกหนึ่งก็คือการใช้โครงสร้างเหล็กผสมกระจก (hybrid glass-steel structures) ซึ่งเหล็กที่มีความเหนียวกว่าถูกใช้ร่วมกับกระจก ในโครงสร้างชนิดนี้กระจกจะถูกยึดติดกับโครงเหล็กบางโดยใช้วัสดุผนึกสำหรับงานโครงสร้าง (structural sealants) เพื่อลดการสัมผัสโดยตรงระหว่างวัสดุทั้งสอง ระบบนี้ทำให้การก่อสร้างที่ต้องการช่วงห่างโครงสร้างมากๆ เป็นไปได้ และสามารถตอบสนองความต้องการทางสถาปัตยกรรมและเจ้าของงานได้ ลักษณะการประยุกต์ใช้งานโดยทั่วไปสำหรับหลังคากระจกดังแสดงในรูปที่ 6

การวิบัติที่อาจพบได้ในโครงสร้างระบบนี้ คือ การวิบัติของการเชื่อมต่อ (adhesive failure or debonding) ระหว่างผิวเคลือบของเหล็กกับวัสดุผนึก การโก่งเดาะเนื่องจากการบิดด้านข้าง (lateral torsional buckling) ของทั้งระบบเพราะโครงสร้างมีความชะลูดสูงและการค้ำยันทางข้างไม่เพียงพอ การวิบัติของกระจกตามด้วยการเสียรูปด้านข้างหรือบิดเบี้ยว หรือการวิบัติเนื่องจากการเสียรูปอย่างมากซึ่งไม่เสถียรภายใต้แรงกระทำระยะยาวที่เรียกว่าการคืบ (creep) เป็นต้น (Belis et al., 2009)

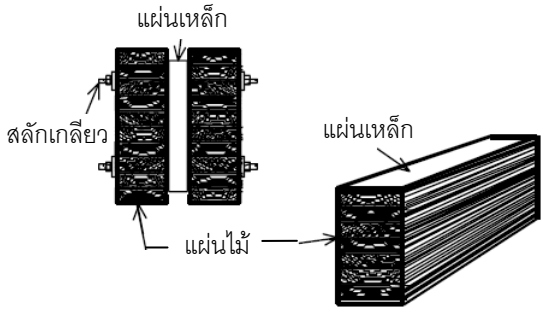


รูปที่ 6 *ลักษณะการประยุกต์ใช้โครงสร้างเหล็กผสมกระจกสำหรับงานหลังคา (Belis et al., 2009)*

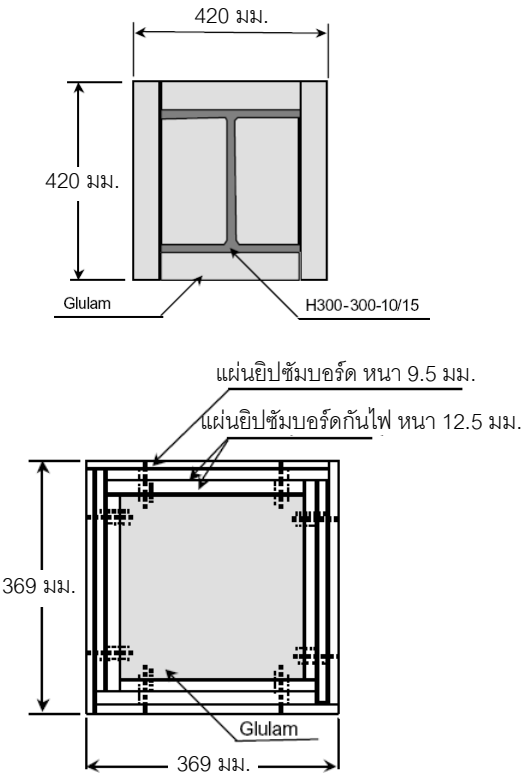
4.3 โครงสร้างเหล็กผสมไม้

การประยุกต์ใช้ไม้ให้มีประสิทธิภาพถูกส่งเสริมด้วยเหตุผลด้านการสงวนทรัพยากรธรรมชาติและการอนุรักษ์

สิ่งแวดล้อม ทางหนึ่งก็คือการใช้ไม้ร่วมกับเหล็ก ตัวอย่างหน้าตัดโครงสร้างเหล็กผสมไม้ (hybrid timber-steel structures) แสดงในรูปที่ 7 ซึ่งเป็นคานไม้เสริมเหล็กในสองแบบ



รูปที่ 7 *ตัวอย่างหน้าตัดโครงสร้างเหล็กผสมไม้ (Sakamoto et al., 2004)*



รูปที่ 8 *ตัวอย่างหน้าตัดโครงสร้างเหล็กผสมไม้ที่ทนไฟได้ดี (Sakamoto et al., 2004)*

ปัญหาสำคัญของโครงสร้างไม้ก็คือการติดไฟง่าย จากการทดสอบความสามารถในการทนต่อไฟไหม้ พบว่าโครงสร้างเหล็กผสมไม้ยังคงสามารถรับน้ำหนักบรรทุกได้หลังการปล่อยให้ถูกเผานาน 1 ชั่วโมงแล้วทิ้งไว้ในเตาเผาอีก 3 ชั่วโมง ซึ่งผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐานส่วนใหญ่ที่กำหนดไว้ว่า โครงสร้างต้องสามารถทนไฟได้นานอย่างน้อย 1 ชั่วโมง รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างหน้าตัดโครงสร้างเหล็กผสมไม้ที่จากการทดสอบพบว่าทนไฟได้ดี (Sakamoto et al., 2004) ไม้ที่ใช้ในการทดสอบเป็นไม้ลามิเนทติดกาว (Glulam – glued-laminated timber)

อีกปัญหาหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงสำหรับโครงสร้างแบบนี้คือความสามารถในการทนต่อแรงแผ่นดินไหว จากการศึกษาพบว่าการวิบัติมักจะเกิดที่รอยต่อ จึงต้องมีการออกแบบรอยต่อที่ดีและเหมาะสม (Sakamoto et al., 2004)

5. การประยุกต์ใช้งานโครงสร้างเหล็กผสมแนวใหม่

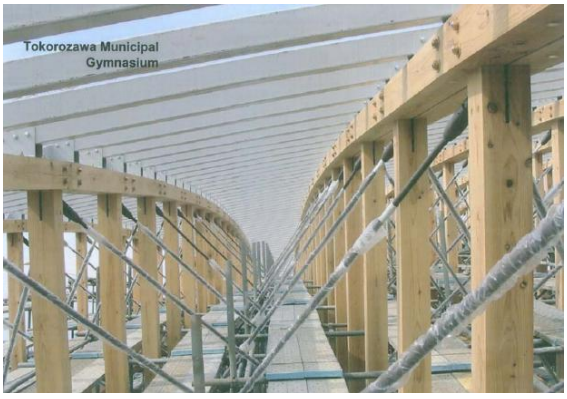
โครงสร้างเหล็กผสม FRP นิยมใช้ในงานเสริมกำลังโครงสร้างเดิม เนื่องจากราคาของ FRP ยังค่อนข้างสูงแต่มีความคุ้มค่าสำหรับงานซ่อมแซมที่โครงสร้างยังต้องเปิดใช้บริการอยู่ตลอดเวลา โดยเฉพาะโครงสร้างสะพาน นอกจากนั้นยังเป็นโครงสร้างที่อยู่ในที่โล่งมีความเสี่ยงต่อไฟไหม้น้อย ดังตัวอย่างในรูปที่ 9

รูปที่ 9 *ตัวอย่างการเสริมกำลังสะพานเหล็กด้วย FRP (National Composite Network, 2010)*

ตัวอย่างการใช้งานจริงของโครงสร้างเหล็กผสมกระจก (Belis et al., 2009) แสดงในรูปที่ 10 ซึ่งเป็นเรือนกระจก (glasshouse) ระหว่างทำการก่อสร้างในประเทศเนเธอร์แลนด์ ด้วยระยะช่วงห่างสูงสุด (maximum span) เท่ากับ 7.4 ม.

สำหรับตัวอย่างโครงสร้างเหล็กผสมไม้แสดงใน รูปที่ 11 ซึ่งเป็นการประยุกต์ใช้ในประเทศญี่ปุ่น โครงสร้างมีความสวยงาม และแลดูนุ่มนวลไม่แข็งกระด้างเหมือนคอนกรีต

รูปที่ 10 *เรือนกระจกระหว่างก่อสร้างด้วยโครงสร้างเหล็กผสมกระจก (Belis et al., 2009)*



รูปที่ 11 *ตัวอย่างโครงสร้างเหล็กผสมไม้ (Yamada, 2009)*

6. บทสรุป

เทคโนโลยีโครงสร้างเหล็กผสมกับ ไม้ กระจก และ FRP เป็นทางเลือกสำหรับโครงสร้างแบบเดิม ทำให้วัสดุต่างๆ ถูกใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม แต่เทคโนโลยีเหล่านี้ ยังค่อนข้างใหม่มาก แม้จะมีการประยุกต์ใช้งานจริงไปบ้างแล้ว แต่ก็ยังคงต้องการงานวิจัยอีกมาก เพื่อเป็นข้อมูลในการทำมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง และให้เกิดความมั่นใจและส่งเสริมการใช้งานจริงให้มากขึ้น งานวิจัยที่ต้องการ เช่น

(1) การพัฒนาและศึกษารอยต่อระหว่างวัสดุ
(2) การพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น และมีราคาต่อหน่วยลดลง
(3) การทดสอบโครงสร้างภายใต้น้ำหนักบรรทุกแบบต่างๆ
(4) การทดสอบโครงสร้าง ทั้งระยะสั้นและระยะยาว
(5) การศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม
(6) การพัฒนาข้อกำหนด คำแนะนำ และมาตรฐานในการออกแบบและประยุกต์ใช้งาน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบคุณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้ให้โอกาสในการเข้าร่วมอบรมเกี่ยวกับเทคโนโลยีการก่อสร้างโครงสร้างเหล็ก ณ ประเทศญี่ปุ่น ภายใต้ ความตกลงระหว่างราชอาณาจักรไทย และญี่ปุ่น สำหรับความเป็นหุ้นส่วนทางเศรษฐกิจ (Japan Thailand Economic Partnership Agreement, JTEPA)

เอกสารอ้างอิง

กริสน์ ชัยมูล. (2553). “คอนกรีตเสริมโพลิเมอร์เสริมเส้นใย: ทางเลือกสำหรับโครงสร้างทนต่อการกัดกร่อน ” วิศวกรรมสาร มข., ปีที่ 37, ฉบับที่ 3 , หน้า 237-245.

นันทวัฒน์ ขมหวาน เดชา เปรมปรี วัชรากร พรหมภักดี และจารินทร์ สุวรรณการณ์. (2552). “แรงยึดเหนี่ยว

ประลัยของคาร์บอนไฟเบอร์และคอนกรีต " เอกสารประกอบการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาครั้งที่ 14 , มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, ประเทศไทย, 13-15 พฤษภาคม, หน้า 1711-1716.

บริการข้อมูลวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุแก้ว. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ . สมบัติของวัสดุแก้ว. สืบค้นได้จาก: http://www2.mtec.or.th/th /research/gsat/glassweb/property.html (วันที่เข้า: 11 พ.ย. 2553).

สิทธิชัย แสงอาทิตย์. (2545). "เอกสารประกอบการสอนวิชาการทดสอบวัสดุ" สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

Belis, J., Callewaert, D., Delincé, D., Van Impe, R. (2009). Experimental failure investigation of a hybrid glass/steel beam. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 4, 1163-1173.

Edberg, W., Mertz, D., Gillespie Jr., J. (1996). *Rehabilitation of Steel Beams Using Composite Materials*, Proceedings of the Materials Engineering Conference, Materials for the New Millenium, ASCE, New York, November 10-14, 502-508.

Gillespie, J. W., Mertz, D. R., Edberg, W. M., Ammar, N., Kasai, K., Hodgson, I. C. (1996). *Rehabilitation of Steel Bridge Girders Through Application of Composite Materials*, Proceedings of the 28th International SAMPE Technical Conference, November 4-7, 1249-1257.

Keller, T., Gürtler, H. (2005). Quasi-static and fatigue performance of a cellular FRP bridge deck adhesively bonded to steel girders. *Composite Structures*, Vol. 70, No. 4, 484-496.

Khomwan, N., Foster, S.J., Smith, S.T. (2005). *Debonding Failure in Flexurally Strengthened Reinforced Concrete Beams* (*UNICIV Report R-440*). The University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering, Kensington, Sydney, Australia, February 2005, ISBN: 85841 407 4, 252 pp.

National Composite Network. Available from: http://www.ncn-uk.co.uk/DesktopDefault.aspx? tabindex=145&tabid=432 (accessed on November 20, 2010).

Parra-Montesinos, G.J., Dasgupta, P., Goel, S.C. (2005). Development of connections between hybrid steel truss-FRC beams and RC columns for precast earthquake-resistant framed construction. *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 13, 1931-1941.

Sakamoto, I., Kawai, N., Okada, H., Yanaguchi, N, Isoda, H, Yusa, S. (2004). *A Final Report of a Research and Development project on Timber-based Hybrid Building Structures*, Proceedings of WCTE 2004, June.

Tanaka S., Ueda T. Standard Specifications for Performance Verification of Hybrid Structures in Japan. Available from: http://www.poly.ac.mw /cesar/Full%20Papers/293.pdf (accessed on November 12, 2010).

Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., Lam, L. (2002). *FRP Strengthened Concrete Structures*, Chichester: Wiley.

Teng, J.G., Yu, T., Wong, Y.L., Dong, S.L. (2007). Hybrid FRP-concrete-steel tubular columns: Concept and behavior. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 4, 846-854.

Yamada, S. (2009). *New Hybrid Structures (Lecture Notes)*. Seminar on Steel Structure Construction in Japan, Japan-Thailand Steel Industry Cooperation Program, Tokyo, Japan, November 2009.