

การศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตคาร์บอนไฟเบอร์ชนิดถักทอ

Study on Mechanical Properties of Woven Carbon Fiber Composite

พัทธดนย์ กอนันตชัย* และ ชัยณรงค์ ศรีกุลวงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนประชากราษฎร์ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
*E-mail: pattadon.ko@gmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 085 3967 113

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตชนิดหนึ่ง ซึ่งมีโครงสร้างเกิดจากการถักทอของเส้นใยคาร์บอน โดยเกิดจากการถักยัดระหว่างชั้น เทคนิคการถักเส้นใยที่ใช้นอกจากทำให้เกิดการยึดกันแล้วยังก่อให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุอีกด้วย การทดสอบคุณสมบัติวัสดุ 3 วิธีได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาความแข็งแรงเชิงกลของวัสดุดังกล่าว ได้แก่ การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลเฉพาะเส้นใยกระทำตามมาตรฐาน ASTM D3822, การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลกรณีเส้นใยถูกถักทอแล้วทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6856/D6856M และ การทดสอบหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตที่เกิดจากการขึ้นรูปเส้นใยนั้นเข้ากับเมตริกตามมาตรฐาน ASTM D3039/D3039M โดยการทดสอบวิธีที่หนึ่ง กระทำเพื่อตรวจสอบชนิดของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ การทดสอบวิธีที่สองเพื่อหาผลของการถักทอต่อความแข็งแรงที่ได้ และการทดสอบวัสดุวิธีสุดท้ายกระทำเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุคอมโพสิตชนิดนี้

คำหลัก: วัสดุคอมโพสิตแบบถักทอ, คาร์บอนไฟเบอร์สามมิติ, คุณสมบัติเชิงกล

Abstract

This paper presents the study on the mechanical behavior of a composite material associating with the structure of the woven carbon fiber material. Woven technique is applied not only for connecting two different layers but also for creating the space between the layers. Three material testing methods are conducted in order to determine the mechanical strength of the fiber composite including the individual fiber test according to the ASTM D3822, the woven fiber test according to the ASTM D6856/D6856M, and matrix-fiber composite test according to the ASTM D3039/D3039M. Typically, the first testing method is to examine the mechanical strength regarding the type of as-received carbon fiber. The second one is conducted for determining the strength of the woven fiber along with the examination of woven technique used. The mechanical strength of the composite material of matrix-3D carbon fiber composite can be determined by the third material testing method. The test features are focused on the relationship between type of carbon fiber, woven technique and global strength of 3D carbon fiber composite.

Keywords: woven composite, 3D carbon fiber, mechanical properties

1. บทนำ

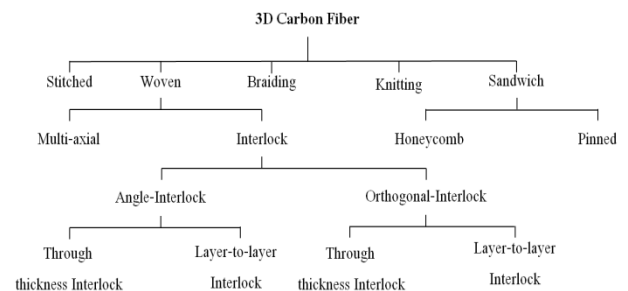
เทคโนโลยีสิ่งทอเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนามายาวนานกว่า 30 ปี เพื่อการผลิตสิ่งทอในรูปแบบสามมิติ ไม่ว่าจะเป็นการทอใยแก้ว, ใยสังเคราะห์ และโลหะคอมโพสิต ซึ่งจุดมุ่งหมายของการทอดังกล่าวเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพและคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เนื่องจากวัสดุประเภทคอมโพสิตนั้นมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติรับแรงได้ดีในทิศทางเดียว จึงทำให้เทคนิคการทอถูกใช้เป็นเทคนิคเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงในทิศทางอื่นๆ

การจำแนกประเภทของคอมโพสิตนั้นใช้การแบ่งตามลักษณะของวัสดุเสริมแรง เช่น มีลักษณะเป็นเส้นใย (fiber composite), อนุภาค (particle composite), ก้อน (flake composite), เรียงเป็นชั้น (lamina composite) และถักทอ (textile composite) ในส่วนของวัสดุเสริมแรงที่เป็นคาร์บอนไฟเบอร์ก็มีทั้งแบบสองมิติและสามมิติ

คาร์บอนไฟเบอร์สามมิตินั้นต่างจากรูปแบบสองมิติในด้านของการเพิ่มมิติทางด้านความหนา ซึ่งการเพิ่มความหนาจะเปรียบเสมือนการเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยทั่วไปการเพิ่มความหนาจะใช้การเพิ่มชั้นของวัสดุเสริมแรงและเพื่อให้วัสดุสามารถรับแรงได้หลายทิศทางมากขึ้น แต่จากวิธีการดังกล่าวจะมีปัญหาของการแยกตัวระหว่างชั้น (delamination) ทำให้เกิดความเสียหายก่อนถึงจุดความเค้นสูงสุดวัสดุจึงไม่สามารถรับแรงได้ตามคุณสมบัติของตัววัสดุเอง จึงได้มีการใช้การถักทอแทนการเรียงชั้นของวัสดุเสริมแรง โดยสามารถแบ่งรูปแบบของคาร์บอนไฟเบอร์สามมิติได้ ดังรูปที่ 1

วัสดุในงานวิจัยนี้ได้จัดอยู่ในประเภทการทอ (woven) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า distance fabric [1] ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายพฤติกรรมของวัสดุในรูปแบบการทอในระนาบ [2] และในรูปแบบของการอธิบายการถักทอในแกนความหนา [3]

ในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติการทดสอบได้ทำการทดสอบใน 3 วิธีคือ วิธีการทดสอบเฉพาะเส้นใย, วิธีการทดสอบแบบถักทอ และวิธีการทดสอบแบบถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว ซึ่งทำการทดสอบเพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 1 การแบ่งประเภทของคาร์บอนไฟเบอร์ [4]

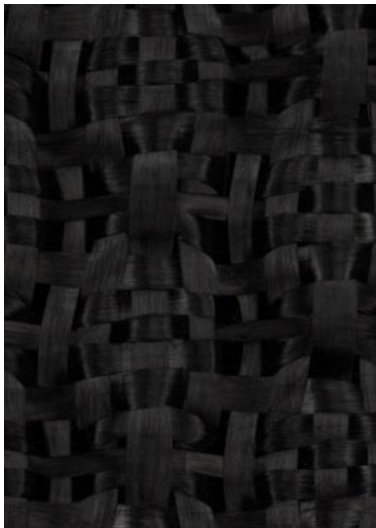
2. คุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์

การถักทอได้เริ่มจากการไขว้กันเป็นลายต่างๆ ของเส้นใยในสองทิศทาง ซึ่งเปรียบเสมือนการเรียงสองชั้น แต่เมื่อต้องการเพิ่มชั้นของการถักทอหรือเพื่อต้องการเพิ่มความหนาของวัสดุ จึงจำเป็นต้องมีการถักทอในแนวความหนาเพื่อเป็นการเชื่อมต่อระหว่างชั้นและเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดความเสียหายจากการแยกตัวของชั้น ลักษณะการทอจะอยู่ในรูปแบบของการทอผ้า ดังนั้นจะมีการกำหนดทิศทางการทอของเส้นใย 3 ทิศทาง คือ เส้นใยที่ใช้ทอในแนวระนาบ 2 ทิศทางเรียกว่าแนว weft กับ warp ส่วนเส้นใยที่ใช้ทอในทิศความหนาเรียกว่า z-binder ดังนั้นการแยกประเภทของการทอในรูปแบบสามมิติ จะแยกประเภทตามการทอของเส้นใยตามแนว z-binder เช่น ในลักษณะแกนเดียวหรือหลายแกนการทอ (multi-axial woven) รวมไปถึงการแบ่งตามมุมของการทอ (angle-interlock woven) และการยี่ระหว่างชั้น (layer-to-

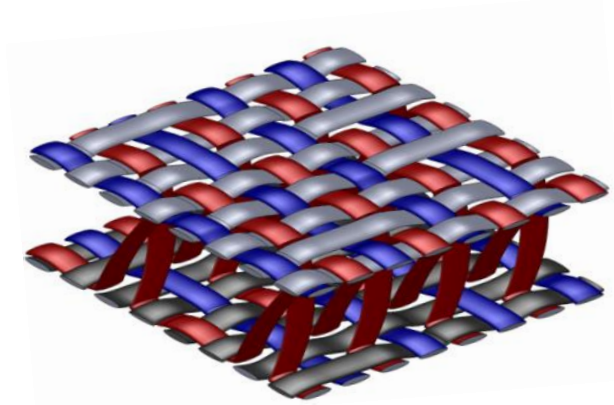
layer interlock woven) หรือยึดตลอดแนวความหนา (through thickness interlock woven)

วัสดุในงานวิจัยนี้มีลักษณะใกล้เคียงในรูปแบบการทอ (woven) ซึ่งวัสดุมีการถักทอในแนว weft กับ warp และมีการใช้เส้นใยในแนว z-binder ในการถักทอขึ้นลงเชื่อมต่อนระหว่างชั้นของรูปแบบการทอในสามมิติ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดทิศทางการวางเส้นใยแนว z-binder เป็นทิศ 0° และตั้งฉากเป็น 90° แต่วัสดุจะมีลักษณะพิเศษของรูปแบบลายถักอันเนื่องมาจากการถักทอเส้นใยของแนว z-binder นั้นเอง

เทคนิคการถักทอนั้นทำให้เกิดลายถักของเส้นใย ซึ่งมีพื้นฐานใน 3 รูปแบบ คือ 1x1 (plain weave), 2x2 (twill) และ satin แต่วัสดุในงานวิจัยนี้มีลักษณะลายถักที่แตกต่างจากลายถักพื้นฐาน ดังรูปที่ 2 และลักษณะการถักทอเชื่อมต่อนระหว่างชั้น เป็นลักษณะการถักทอเพื่อให้เกิดช่องว่างระหว่างชั้น เป็นการเพิ่มมิติด้านความหนาของวัสดุ และยังสามารใส่วัสดุเสริมแรงชนิดอื่นๆภายในช่องว่างที่เกิดขึ้นจากการถักทอเชื่อมต่อนระหว่างชั้นเพื่อเพิ่มความแข็งแรงได้ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 ลายการถักทอเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ในแนวระนาบ



รูปที่ 3 หนึ่งในหน่วยเซลล์ของการถักทอสำหรับวัสดุประเภทคาร์บอนไฟเบอร์

3. การทดสอบวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์

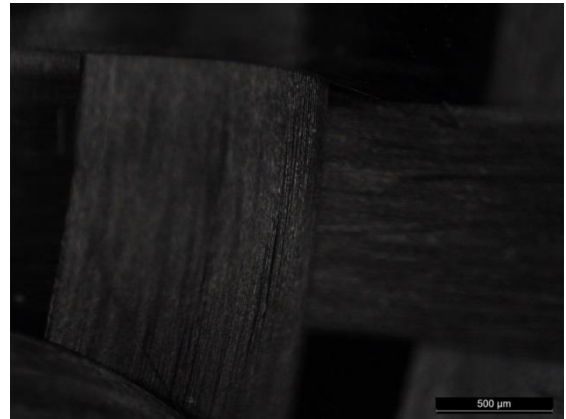
คาร์บอนไฟเบอร์ถูกทดสอบจากการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว ซึ่งจะสามารถทำให้ค่าโมดูลัสของยังในทิศทางการทดสอบ จึงมีการทดสอบวัสดุใน 3 วิธี คือ การทดสอบเฉพาะเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์, การทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์แบบถักทอ และการทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์แบบถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว เพื่อให้สามารถหาคุณสมบัติของวัสดุได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

วิธีที่ 1 เป็นการทดสอบเฉพาะเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ซึ่งเส้นใยถูกนำมาจากถักทอ ทำการทดสอบเพื่อตรวจสอบชนิดและคุณภาพของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ จะถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3822 ชิ้นงานทดสอบมีขนาดยาว 250 มม. และเนื่องจากเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เป็นวัสดุที่ไม่ต้านทานต่อแรงเฉือน จึงต้องทำการหล่อหัวจับเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ด้วยอีพอกซี เพื่อป้องกันการฉีกขาดเนื่องจากหัวจับยึดชิ้นงาน

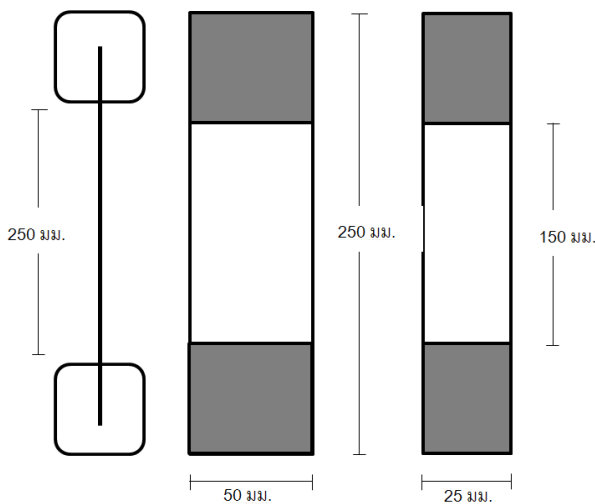
วิธีที่ 2 เป็นการทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์แบบถักทอ ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของลายถักทอของเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D6856/D6856M ชิ้นงานทดสอบมีขนาดกว้าง 50 มม. และยาว 250 มม.

วิธีที่ 3 เป็นการทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์แบบถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว โดยวัสดุผสมคืออีพอกซี ซึ่ง

ถูกทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039/D3039M ซึ่งงานทดสอบมีขนาด กว้าง 25 มม. และยาว 250 มม. และทำการติด strain gauge เพื่อทำการหาค่าอัตราส่วนปัวซองในมุม 0° และ 90° ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM E132 ทั้งนี้ได้ทำการฉีควัสดุประสานประเภทเรซินเข้าไปภายในช่องว่างของวัสดุบริเวณที่ใช้จับยึดชิ้นงาน เพื่อป้องกันปัญหาจากแรงกดของหัวจับยึดชิ้นงาน



รูปที่ 5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 10 เท่า



รูปที่ 4 ลักษณะชิ้นงานทดสอบวิธีที่

1, 2 และ 3 ตามลำดับ

โดยความเร็วของการทดสอบทั้ง 3 วิธีคือ 2 มม./นาที่ ทั้งนี้การทดสอบในวิธีที่ 2 และ 3 จะมีระยะความยาวของการทดสอบ 150 มม.(gauge length) ซึ่งจะทดสอบในสามทิศทาง ได้แก่มุม 0° , 90° และ 45° ซึ่งแต่ละทิศทางจะทำการทดสอบ 4 ชิ้นงาน และระมัดระวังการฉีกขาดของชิ้นงานอันเป็นผลจากหัวจับยึดชิ้นงาน

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบวัสดุในงานวิจัยนี้ได้มีการวัดขนาดและตรวจสอบลายถัก ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์ในการถ่ายภาพ ดังรูปที่ 5

ในส่วนของผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุคาร์บอนไฟเบอร์นั้นให้ผลแตกต่างกันในแต่ละวิธีที่ทำการทดสอบ โดยการทดสอบเฉพาะเส้นใย (ดังรูปที่ 6-ก) สามารถทนแรงดึงสูงสุดที่ 95-110 นิวตันและมีระยะยืดสูงสุดที่ 0.8-1.0 มม. ส่วนในการทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์แบบถักทอ (ดังรูปที่ 6-ข) และแบบถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว (ดังรูปที่ 6-ค) นั้นทำการทดสอบใน 3 ทิศทาง ซึ่งได้ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบจากเครื่องทดสอบแรงดึง

กรณีการทดสอบ	แรงดึงสูงสุด (นิวตัน)	ระยะยืด สูงสุด(มม.)
- เฉพาะเส้นใย	95-110	0.8-1
- แบบถักทอ(ทิศทาง 0°)	3,800-4,900	5.0-7.0
- แบบถักทอ(ทิศทาง 45°)	170-380	20.2-27.0
- แบบถักทอ(ทิศทาง 90°)	3,200-4,500	4.7-6.5
- แบบถักทอที่ขึ้นรูป (ทิศทาง 0°)	8,000-9,500	3.2-4.8
- แบบถักทอที่ขึ้นรูป (ทิศทาง 45°)	2,500-5,000	20-40
- แบบถักทอที่ขึ้นรูป (ทิศทาง 90°)	5,500-6,500	4.0-5.2

6-ก



6-ข



6-ค



รูปที่ 6-ก ชิ้นงานหลังการทดสอบวิธีเฉพาะเส้นใย ตามมาตรฐาน ASTM D3822

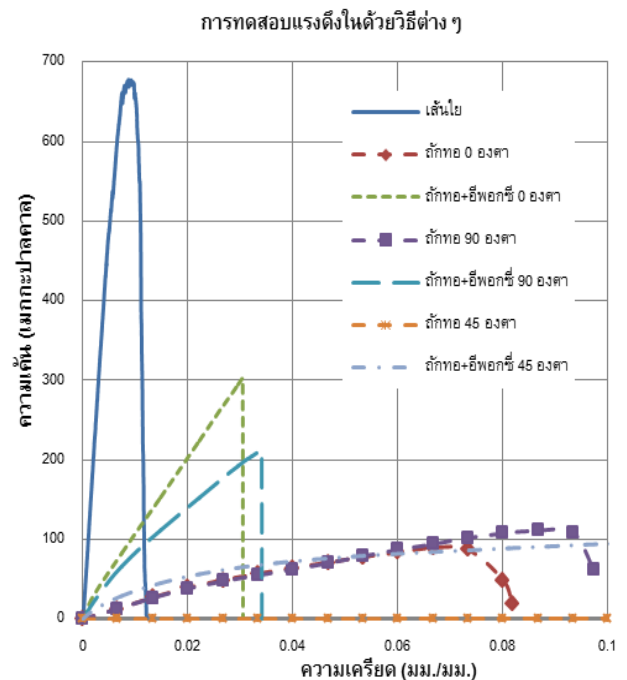
6-ข ชิ้นงานหลังการทดสอบวิธีการถักทอตามมาตรฐาน ASTM D6856/D6856M

6-ค ชิ้นงานหลังการทดสอบวิธีการถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปตามมาตรฐาน ASTM D3039/D3039M

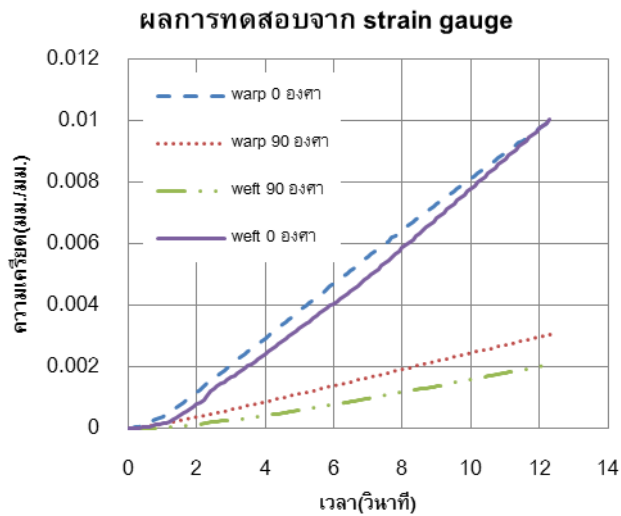
การทดสอบวัสดุทำให้สามารถหาค่าโมดูลัสของยังได้จากผลของการทดสอบแรงดึงหรือจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด โดยค่าความชันดังกล่าวจะเป็นค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ อย่างไรก็ตามในการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุในการทดสอบแบบต่างๆ โดยการทดสอบสำหรับลักษณะการถักทอธรรมดาและการถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปนั้นมีความสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นตรง จึงทำการคำนวณค่าคุณสมบัติของวัสดุในช่วง 1% ความเครียด ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเส้นตรงของทั้ง 3 วิธีการทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลวิธีการทดสอบเฉพาะเส้นใยแข็งแรงที่สุด ส่วนวิธีการทดสอบแบบถักทอและวิธีทดสอบแบบถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปมีความสมบัติต่ำลงมา โดยทั้ง 2 วิธีการทดสอบ มุม 0° และ 90° จะมีความแข็งแรงมากกว่ามุม 45° ดังรูปที่ 7

ทั้งนี้ได้มีการทดสอบแรงดึงใน วิธีที่ 3 ได้มีการติดตั้ง strain gauge โดยทำการติดในมุม 0° และ 90° ของทุกๆ ชิ้นงานทดสอบ ซึ่งค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ของความเครียดกับเวลา ในแต่ละทิศทางเมื่อนำมาหารกันจะเป็นค่าอัตราส่วนปัวซอง

ของวัสดุ ดังรูปที่ 8 และสามารถสรุปผลคุณสมบัติจากการทดสอบทั้งหมด ได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 7 ผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุ
คาร์บอนไฟเบอร์



รูปที่ 8 ผลการทดสอบโดยใช้ strain gauge

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเชิงกลของคาร์บอนไฟเบอร์

Case	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3
Thickness	0.2 mm	0.8 mm	1.2 mm
Density (g/mm ³)	9.82×10^{-4}	1.76×10^{-2}	6.75×10^{-2}
E_1	100 GPa	1.9 GPa	16 GPa
E_2	-	1.5 GPa	9.7 GPa
E_{45}	-	-	4.4 GPa
ν_{12}, ν_{21}	-	-	0.25

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

1. การทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์ในวิธีทดสอบเฉพาะเส้นใยทำให้สามารถทราบได้ว่า เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ที่ใช้ในการถักทอนั้น คือ เส้นใยประเภท T300 [5] ซึ่งคุณสมบัติเชิงกลของค่าโมดูลัสของยังในแนวแรงดึงอยู่ในช่วง 95-120 จิกะปาสคาล

2. การทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์ในวิธีถักทอนั้นค่าความแข็งแรงที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบแบบอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากไม่มีวัสดุฐานทำให้เกิดการวิ่งของเส้นใย ส่งผลให้ค่าการยึดตัวของวัสดุสูงขึ้น

3. การทดสอบคาร์บอนไฟเบอร์ในวิธีถักทอที่ผ่านการขึ้นรูปนั้น ผลการทดสอบพบว่าค่าความแข็งแรง

ของวัสดุมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงของเส้นใยเอง ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการถักทอของคาร์บอนไฟเบอร์ในรูปแบบพื้นฐาน (satin-weave) โดยมีค่าโมดูลัสของยังในทิศทาง 0° ประมาณ 80 จิกะปาสคาล [6] เป็นผลเนื่องมาจากเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์สามารถรับแรงได้เฉพาะทิศทางแรงดึงและไม่ทนต่อแรงเฉือนเมื่อนำมาถักทอรูปแบบลายถักทอที่มีความซับซ้อน อีกทั้งมีการถักทอเชื่อมต่อระหว่างชั้น ซึ่งการถักทอดังกล่าวทำให้เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เกิดการงอตัวมาก ทำให้เกิดสร้างแรงเฉือนระหว่างเส้นใยจึงส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ

4. ผลการทดสอบคุณสมบัติของคาร์บอนไฟเบอร์ทั้งหมดในงานวิจัยนี้สามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวัสดุนี้ต่อไปได้

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะนักวิจัยต้องขอขอบคุณสำนักกองทุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้ทุนวิจัยแก่โครงการนี้ (สัญญาเลขที่ RDG5450026) และต้องขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อทำวิทยานิพนธ์ ระดับบัณฑิตวิทยาลัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bannister, M.K., Braemar, R., Crothers, P.J. (1999). The mechanical performance of 3D woven sandwich composites, *Composite Structures*, vol. 47, pp. 687-690.
- [2] Bystrom, J., Jekabsons, N., Varna, J. (2000). An evaluation of different models for prediction of elastic properties of woven composites, *Composite Part B*, vol. 31, pp. 7-20.
- [3] Tan, P., Tong, L., Steven, G.P. (2000). Behavior of 3D orthogonal woven CFRP composites. Part III. FEA and analytical modeling

approaches, *Composites Part A*, vol. 31, pp. 273-281.

[4] Tong, L., Mouritz, A.P., Bannister, M.P. (2002). *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*, Elsevier Science, Kidlington, Oxfordshire, UK.

[5] Agarwal, B.D., Broutman, L.J., Chandrashekhara, K. (2006). *Analysis and performance of fiber composites* John Wiley & Sons, New York.

[6] Daniel, I.M., Luo, J.J., Schubel, P.M. (2008). Three-dimensional characterization of textile composites, *Composites Part B*, vol. 39, pp. 13-19.