

ผลของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนเสริมพอลิเบนซอกซาซีนเรซินต่อคุณสมบัติทางกล Effects of Weave Structure on Mechanical Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polybenzoxazine Composites

ร้อยเอกหญิง กังสดาล อินทกุล
Captain Kangsadan Inthakun

กองวิชาเคมี ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก 26001 ประเทศไทย
Department of Chemistry, Academic Division, Chulachomklao Royal Military Academy,
Nakhon Nayok 26001, Thailand

*Corresponding Author. E-mail : Kangsadan.in@crma.ac.th

(Received: August 24, 2023, Revised: October 5, 2023, Accepted: October 27, 2023)

บทคัดย่อ : จุดมุ่งหมายของงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางกลของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซีนเรซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายคาร์บอนทิศทางเดียว เพื่อใช้ในการพัฒนาเกราะกันกระสุนในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะที่มีน้ำหนักเบาและประสิทธิภาพสูง จากผลการทดลองในส่วนของคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงให้ค่าสูงที่สุด โดยค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งและความต้านทานแรงกระแทกสูงสุดในชิ้นงานคอมพอสิต มีค่าเท่ากับ 763 ± 55 เมกะปาสคาล และ 43 ± 2 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งชิ้นงานคอมพอสิตหลังการทดสอบจะเกิดความเสียหายเป็นรูปโคนกดลึกบริเวณผิวหน้าคล้ายกับการยิงกระสุนปะทะวัสดุในส่วนของคุณสมบัติความแข็งแรงต่อแรงดัดพบว่าในชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนทิศทางเดียวมีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 517 ± 26 เมกะปาสคาล เนื่องจากมีความหนาแน่นและจำนวนของเส้นใยคาร์บอนที่สูง และเส้นใยคาร์บอนมีทิศทางในแนวเดียวกับแรงดัด จากสมบัติทางกายภาพพบว่าพอลิเบนซอกซาซีนเมตริกียึดติดได้ดีกับทุกโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนตรวจสอบโดยโครงสร้างฐานของวัสดุคอมพอสิต นอกจากนี้วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงที่มีสมบัติความหนาแน่นต่ำจะมีความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งและความต้านทานแรงกระแทกสูงที่สุด เนื่องจากโครงสร้างการทอ 2 มิติ มีความสามารถในการส่งผ่านภาระได้พร้อมกันทั้ง 2 ทิศทางในแนวตามยาวและตามขวาง จึงมีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป การรับและกระจายแรงได้ดี นอกจากนี้ลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงมีจุดสัมผัสแรงเสียดทานการหักของเส้นใยและจุดการสอดประสานกัน ที่น้อยกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยลักษณะอื่น ซึ่งส่งผลให้มีคุณสมบัติทางกลที่สูงขึ้นจึงเหมาะสำหรับนำมาพัฒนาเกราะกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ

คำสำคัญ : พอลิเบนซอกซาซีน พอลิเมอร์คอมพอสิต เกราะกันกระสุน โครงสร้างการทอ

Abstract : This work aimed to study the effects of weaving structures of fiber-reinforced polybenzoxazine resin composites (plain weave, twill weave, and unidirectional carbon fabric) on the physical and mechanical properties to develop a lightweight and high-performance strike panel of hard ballistic armor. The experimental results revealed that the flexural strength and impact resistance of the twill weave structure of the composite exhibited the greatest value among other structures in which those values of 763 ± 55 MPa and 43 ± 2 kJ/m², respectively. After testing, the specimen composites would cause damage deep on the surface area in the shape of base/cone, similar to the shooting of strike panel. The highest tensile strength of 517 ± 26 MPa was from the specimen reinforced with unidirectional fabrics structures due to the high density and high filament count of carbon fibers and the same direction as the tensile testing of carbon fibers. Physical properties, it was found an excellent adhesion between carbon fiber weave structure and the polymer matrix, so demonstrating that both cooperating to achieve good result these laminates by scanning electron microscopy. Moreover, will weave structures of composite with low-density properties would have high flexural strength and impact resistance composites. Due to the 2D woven structure, these were able to transmit load simultaneously in longitudinal and transverse weave directions. Therefore, it had good resistance to stiffness, stress, and stress distribution. As in weave structure of composite, it could be seen that twill weave had low contact friction, crimp, and binding effect because of its minimum intersection point compared with plain weave and unidirectional fabrics, therefore twill weave is a low level of fiber crimp impart relatively high mechanical properties compared with a plain weave therefore twill weave is suitable to develop strike panel for a hard ballistic armor application.

Keyword : Polybenzoxazine, Polymer composite, Ballistic impact, Weave design

1. บทนำ

ปัจจุบันเหตุการณ์ความไม่สงบในประเทศไทยโดยเฉพาะในเขตสามจังหวัดชายแดนภาคใต้ทำให้ทหาร ตำรวจ รวมไปถึงพลเรือนในพื้นที่เสี่ยง จำเป็นต้องใช้ยุทธภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพสูงทางด้านการต้านทานแรงกระแทก ยุทธภัณฑ์ที่ช่วยลดการสูญเสียชีวิตและทรัพย์สินคือเกราะกันกระสุน หมวกกันกระสุน และรถกันกระสุน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันหรือลดอันตรายจากกระสุนปืน [1] เกราะกันกระสุนที่ถูกพัฒนาจากอดีตถึงปัจจุบันของผู้ประกอบการนิยมใช้คือ เหล็กและเซรามิก แต่วัสดุดังกล่าวมีน้ำหนักมาก ราคาแพง และเมื่อรับแรงปะทะจากกระสุนปืนอาจทำให้เกิดการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งเป็นอันตรายต่อบุคคลอื่นและผู้สวมใส่ วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตเริ่มได้รับความนิยมมากขึ้นสำหรับนำมาประยุกต์ใช้เป็นเกราะกันกระสุน เนื่องจากมีน้ำหนักเบา มีความแข็งแรง ขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถนำมาปรับปรุงสมบัติได้หลากหลาย [2-4]

วัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ พอลิเมอร์เมตริก (Polymer Matrix) และส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement Materials) ซึ่งส่วนที่เป็นพอลิเมอร์เมตริก ทำหน้าที่เป็นกาวประสานยึดวัสดุเสริมแรงทำให้เกิดความคงรูปของชิ้นงานคอมพอสิต โดยพอลิเมอร์เมตริกที่นิยมนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุนที่มีประสิทธิภาพสูงคือ เทอร์โมเซตเรซิน เช่น อีพอกซี (Epoxy) ฟีนอลิกส์ (Phenolics) ไวนิลเอสเตอร์ (Vinyl Ester) และพอลิเบนซอกซาซีน (Polybenzoxazine) [5-15] เป็นต้น และส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง นิยมใช้เส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรงซึ่งสามารถช่วยเพิ่มสมบัติทางกลให้สูงขึ้นเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์ใช้ผลิตเป็นเกราะกันกระสุน โดยวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่นิยมนำมาผลิตเกราะกันกระสุนได้แก่ เส้นใยอะรามิด (Aramid Fiber) หรือที่รู้จักในชื่อทางการค้าคือ เคพลาร์ (Kevlar) เส้นใยพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงยิ่งยวด (Ultra High Molecular Weight Polyethylene:

UHMWPE) เส้นใยแก้ว (Glass Fiber) และเส้นใยคาร์บอน (Carbon Fiber) เป็นต้น จึงส่งผลให้เกราะกันกระสุนที่ผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตมีความแข็งแรงสูงและน้ำหนักเบา [5-13, 16]

พอลิเบนซอกซาซีน [14,15 และ17] เป็นเทอร์โมเซตเรซินที่พัฒนาจากฟีนอลิกส์เรซินมีสมบัติที่โดดเด่น คือ สังเคราะห์ได้ง่าย ไม่เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้อื่นจากการบ่มมอดอเมอร์ให้เป็นพอลิเมอร์มีเสถียรภาพทางความร้อนและทางกลสูง ค่าการหดตัวจากการขึ้นรูปใกล้เคียง 0% ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ ค่าความหนืดก่อนการขึ้นรูปต่ำ และสามารถทำอัลลอยด์ร่วมกับเรซินอื่นได้หลายชนิด เช่น ระบบของพอลิเบนซอกซาซีนกับอีพอกซี [18] พอลิเบนซอกซาซีนกับสารไดแอนไฮโดรด์ [19] และพอลิเบนซอกซาซีนกับยูรีเทน [20-22] เป็นต้น ทำให้ได้เรซินมีสมบัติกว้างขวางและหลากหลายมากขึ้น

เส้นใยคาร์บอนประกอบด้วยแกรไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นรูปแบบของคาร์บอนบริสุทธิ์ ประกอบด้วยวงแหวน 6 เหลี่ยมต่อกันเป็นร่างมีสมบัติที่โดดเด่นคือ น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงต่อแรงดึงในทิศตั้งฉากสูง ทนทานต่อการกระแทก ทนทานต่อสารเคมีและความร้อนสูง และทนต่อการขีดข่วน สมบัติดังกล่าวทำให้เส้นใยคาร์บอนได้รับความนิยมในอุตสาหกรรมการบิน วิศวกรรมอวกาศ การทหาร อุตสาหกรรมยานยนต์และการกีฬา เป็นต้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะใช้พอลิเบนซอกซาซีนเป็นพอลิเมอร์เมตริกหลักทำงานร่วมกับเส้นใยคาร์บอนที่มีโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอสิต [23, 24]

โดยทั่วไปเกราะกันกระสุนที่เตรียมจากวัสดุคอมพอสิตประกอบด้วย 2 ส่วน ที่สำคัญ คือ แผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ (Strike Panel) ทำหน้าที่ทำลายหัวกระสุนให้แตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และช่วยลดความเร็วของลูกกระสุนก่อนถึงแผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน ต้องมีสมบัติที่แข็งแรง รับแรงปะทะจากกระสุนปืนได้ในหลายตำแหน่ง และสามารถทำลายหัวกระสุนปืน และส่วนที่ 2

คือ แผ่นหลังหรือแผ่นดูดซับพลังงาน (Support Panel) ทำหน้าที่ดูดซับพลังงาน กระจ่ายแรงปะทะตามแนวเส้นใย และทำให้กระสุนสูญเสียพลังงานจนหยุดในที่สุด ต้องมีสมบัติที่เหนียว ยืดหยุ่น และดูดซับพลังงานได้สูง [1, 25] วัสดุคอมพอสิตประเภทเสริมแรงด้วยเส้นใยการทอเริ่มมีบทบาทมากขึ้นในการผลิตชิ้นงานในอุตสาหกรรมยานยนต์ งานด้านโยธา งานด้านการต้านทานแรงกระแทก เป็นต้น เนื่องจากวัสดุคอมพอสิตประเภทเสริมแรงด้วยเส้นใยการทอมีข้อดีในแง่ของความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป (Stiffness) การรับและกระจายแรง (Stress and Stress Distribution) ที่ดี [2] ส่วนการเสริมแรงที่เป็นเส้นใยการทอที่ใช้โดยทั่วไปเป็นการทอโครงสร้างแบบสองมิติ ซึ่งเป็นพื้นฐานการทอที่ง่าย มีหลายรูปแบบ ได้แก่ การทอลายขัดธรรมดา (Plain Weave Fabric) การทอลายสองหรือลายทแยง (Twill Weave Fabric) และการทอลายตัววน (Satin Weave Fabric) เป็นต้น จากงานวิจัยของ Saiman M.P. และคณะ (2014) วัสดุเสริมแรงที่มีลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยที่แตกต่างกันย่อมมีผลต่อคุณสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน [27] ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิต โดยใช้พอลิเบนซอกซาซินเรซินเป็นเมทริกซ์ และใช้โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบทอลายขัดธรรมดา ทอลายสองหรือลายทแยง และคาร์บอนทิศทางเดียว (Unidirectional Carbon Fabric) เป็นวัสดุเสริมแรง เพื่อใช้ในการพัฒนาทำเกราะกันกระสุนต่อไป [5-15]

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางกลของวัสดุคอมพอสิตโดยใช้เบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลักษณะต่าง ๆ

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Murugan และคณะ (2014) [26] ศึกษาผลของสมบัติทางกลจากการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตของอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้วและเส้นใยคาร์บอน โดยกำหนดจำนวนชั้น และการจัดลำดับชั้นจำนวน 4 ชั้นงาน โดยทดสอบความต้านทานต่อแรงดึง, แรงดัดโค้ง และแรงกระแทก ตามมาตรฐาน ASTM D3039, ASTM D790 และ ASTM D256 ตามลำดับ ผลที่ได้วัสดุที่มีการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ GCCG (โครงสร้างแซนวิชที่มีเส้นใยคาร์บอนเป็นแกนกลาง) ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกสูงกว่าการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ CGGC ซึ่งมีค่าเท่ากับ 194.8 เมกะปาสคาล และ 143.58 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ ในส่วนการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ CGGC (โครงสร้างแซนวิชที่มีเส้นใยแก้วเป็นแกนกลาง) ให้ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งสูงกว่าการจัดลำดับชั้นในรูปแบบ GCCG ซึ่งมีค่าเท่ากับ 198.7 เมกะปาสคาล

Saiman M.P. และคณะ (2014) [27] ศึกษาโครงสร้างการทอเส้นใยเสริมแรงที่ทำจากเส้นใยปอแก้ว จำนวนสี่รูปแบบที่แตกต่างกัน เหตุผลในการใช้รูปแบบการทอที่แตกต่างกันเพื่อลดเปอร์เซ็นต์การหักเห เนื่องจากช่วยเพิ่มความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานได้ รูปแบบการทอคือ Twill 4/4, Satin 8/3 และ Basket 4/4 ในขณะที่ Plain 1/1 ใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับความต้านทานแรงดึง การทอเส้นใยที่มีรูปแบบการทอแตกต่างกันได้รับการปรับให้เหมาะสมโดยใช้แบบจำลองของซอฟต์แวร์ Wisetex โดยใช้ พอลิเอสเตอร์ไม่อิมตัว (UPE) เป็นเมทริกซ์เรซินที่ใช้เป็นตัวประสานในชิ้นงานโดยใช้กระบวนการสุญญากาศเพื่อผลิตแผ่นชิ้นงานคอมพอสิต จากนั้นนำชิ้นงานคอมพอสิตมาทดสอบความต้านทานแรงดึง และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของชิ้นงานคอมพอสิต จากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างการทอที่มีลักษณะแตกต่างกันส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยปอแก้ว โดยโครงสร้างการทอที่มี

เปอร์เซ็นต์การหักที่ต่ำ จะส่งผลให้ชิ้นงานคอมพอสิตมีค่าความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น

Ismail A.E. และคณะ (2015) [28] ศึกษาความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมพอสิตพอลิเอสเตอร์เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยปอแก้ว เส้นใยปอแก้วที่นำมาใช้ผ่านการทอและจัดเรียงตามแนวเส้นใย ทำการทดสอบด้วยพอลิเอสเตอร์เรซิน เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นชิ้นงานคอมพอสิตที่มีรูปร่างตามรูปทรงเรขาคณิตมาตรฐานการทดสอบ และทำการทดสอบในแนวแกนเดียวกับชิ้นงาน เพื่อศึกษาคุณสมบัติแรงดึง โดยทำการศึกษาตัวแปรสำคัญ 2 ตัว คือ ทิศทางของเส้นใย และจำนวนชั้น จากผลการศึกษาพบว่า ทิศทางการวางแนวของเส้นใยในการทดสอบมีผลอย่างมากต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด แต่ไม่ได้มีผลกับโมดูลัสความยืดหยุ่นของชิ้นงาน มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดและโมดูลัสของ Young อยู่ในช่วง 27.7-30.9% และ 2.4-3.7% ตามลำดับ โดยทำการทดสอบชิ้นงานให้เส้นใยอยู่ในแนวแกนเดียวกับแรงดึง ในการทดสอบ

Rios-Soberanis และคณะ (2012) [29] ศึกษาพฤติกรรมทางกลของวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างการทอเส้นใยกับลำดับความเสียหายภายใต้การรับแรงดึงสำหรับคอมพอสิตเสริมด้วยโครงสร้างการทอของเส้นใยแก้ว โดยใช้โครงสร้างการทอที่แตกต่างกัน คือ แบบเสื้อ (เส้นใยคู่) และแบบผ้าทอ (แกนสองแกนสลับกัน) โดยใช้ชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตขึ้นรูปโดยใช้อีพอกซีเรซินเป็นเมทริกซ์ บ่มด้วยสารชุบแข็งที่อุณหภูมิสูง โดยใช้ Bifunctional Epoxy และ Diglycidyl Ether of Bisphenol A (DGEBA) ผสมกับ Tetrafunctional amine และ Diamino Diphenyl Sulfone (DDS) ที่อุณหภูมิสูง จะได้วัสดุคอมพอสิตที่มีลักษณะโปร่งใสมีความแข็ง และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม จากการวิเคราะห์และบ่งชี้กระบวนการเกิดความเสียหาย และกลไกความล้มเหลวซึ่งนำไปสู่การแตกหักของวัสดุ พบว่าโครงสร้างการทอเสริมแรงเส้นใยรูปทรงเลขาคณิตส่งผลต่อการเกิดความเค้น (Stress) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น

ของความล้มเหลวของชิ้นงาน และการแพร่กระจายของรอยร้าวนำไปสู่การแยกขนาดเล็กในพื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวางโดยโครงสร้างการทอที่มีอิทธิพลต่อความล้มเหลวของเส้นใยจะวางขนานกับทิศทางการโหลดในมุม 0 องศา และ 90 องศาของการทดสอบภายใต้การทดสอบแรงดึง

P.V.Cavallaro และคณะ (2015) [30] ศึกษาผลกระทบของโครงสร้างการทอ และการไล่ระดับการหัก (CGs) ของวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีเรซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยเคฟล่า การศึกษาผลกระทบของรูปแบบการทอและความหักบนเส้นใยที่มีต่อระดับความทนทานต่อความเสียหายและความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์ เสริมแรงด้วยเส้นใยการทอ (WFRP) จากงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบ และตรวจสอบกลไกความล้มเหลว, การยึดเกาะระหว่างเส้นใยกับเมทริกซ์, การแตกร้าวของเมทริกซ์ และเส้นใย, การโก่งตัวของเส้นใยซึ่งเป็นผลมาจากการโหลดแบบคงที่และไดนามิก, การทดสอบด้วยแรงดัด แรงเฉือนแบบคานสั้น, การตกกระแทก, การโค้งงอหลังจากการกระแทก, แรงกระแทกแบบบอลลิสติก และการบีบอัดแบบแยกส่วน (SHCB) โดยทำการทดสอบกับชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตอีพอกซีที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยเคฟล่าจำนวน 20 ชั้น โดยมีโครงสร้างการทอเส้นใยเคฟล่าที่แตกต่างกันสามรูปแบบ ได้แก่ โครงสร้างการทอเส้นใยลายขัดธรรมดา โครงสร้างการทอเส้นใยลายทแยง 2×2 และโครงสร้างการทอเส้นใยแบบซาติน 4H ลามิเนตถูกสร้างขึ้นโดยมีสไตร์การทอแบบไล่ระดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้โครงสร้างการทอ และการไล่ระดับการหัก (CGs) ของวัสดุคอมพอสิต แบบสานส่งผลเชิงบวกต่อการกระจายความเค้นเชิงพื้นที่ในช่วงหนึ่ง เมื่อมีการโหลดที่รุนแรง และความเค้นระหว่างเส้นใย และเมทริกซ์ ที่ยึดเกาะกันเหนียวแน่น นำไปสู่ความสามารถในการหลุดลอกเมื่อวัสดุที่แตกหักเป็นชั้นๆ ลดลง ดังนั้นการพึงพาประสิทธิภาพเชิงกลกับรูปแบบการ

ทอเส้นใย, การหยักของเส้นใย และการไล่ระดับการหยัก (CGs) มีผลต่อระดับความทนทานต่อความเสียหายและความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเมอร์เสริมแรงด้วยเส้นใยการทอ (WFRP) ได้ จากผลการทดลองพบว่าเส้นใยที่มีโครงสร้างการทอเส้นใยลายขัดธรรมดา (Plain) ซึ่งมีรอยหยักมากที่สุด ส่งผลให้สมบัติทางกล ความแข็งแรง และการดูดซับพลังงานได้น้อยลง

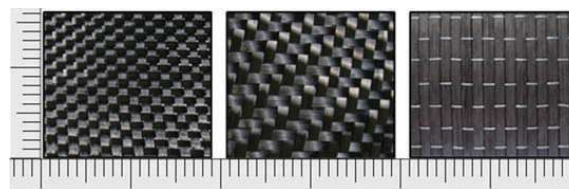
4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 การเตรียมเมตริกซ์เรซิน

เบนซอกซาซินมอนอเมอร์ (BA-a) สังเคราะห์จากบิสฟีนอลเอ (Bisphenol A) บริษัท PTT Phenol ประเทศไทยฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) บริษัท Merck-Chemical Co, Ltd. ประเทศเยอรมนี และอะนิลีน (Aniline) บริษัท LOBA Chemie Pvt. Ltd. ประเทศอินเดีย ในอัตราส่วน 1:4:2 โดยโมล ตามลำดับ ด้วยเครื่องให้ความร้อนพร้อมปั่นกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 40 นาที โดยเทคนิคไม่ใช้ตัวทำละลาย ทั้งไว้ให้เย็น และนำมาบดด้วยโกร่งบดสารให้ละเอียดจะได้ของแข็งลักษณะเป็นผงสีเหลืองที่อุณหภูมิห้อง

4.2 การเตรียมวัสดุพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน

4.2.1 วัสดุคอมพอสิตคือ พอลิเบนซอกซาซินเรซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนในอัตราส่วน 35:65 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เตรียมโดยนำพอลิเบนซอกซาซินให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ทาลงบนโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน 3 แบบ ได้แก่ ทอลายขัดธรรมดา ทอลายสองหรือลายทแยง และผ้าคาร์บอนทิศทางเดียว ดังภาพที่ 1 บนเตาให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



(ก) (ข) (ค)

ภาพที่ 1 โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

(ก) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา (ข) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยง (ค) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว

4.2.2 การเรียงชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนชนิดต่าง ๆ ในการทดสอบสมบัติทางกลทำการทดสอบ 7 ชิ้นงานต่อโครงสร้างการทอ โดยทุก ๆ ชิ้นงานมีจำนวน 8 ชั้นเท่ากันทุกชิ้นงาน เพื่อให้ได้ความหนาตามมาตรฐานการทดสอบโดยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบทอลายขัดธรรมดา และทอลายสองหรือลายทแยง (เส้นใยการทอลักษณะทิศทางมุม 0 และ 90 องศา) มีการจัดเรียงในทิศทางเดียวกันทุกชั้น ส่วนการจัดเรียงของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนผ้าคาร์บอนทิศทางเดียว (ไม่ใช่เส้นใยการทอ) จะสลับไขว้กันลักษณะทิศทางมุม 0 และ 90 องศา และขึ้นรูปชิ้นงานคอมพอสิตโดยใช้เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molder) ที่ความดัน 15 เมกะปาสกาล และที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4.3 การวัดความหนาแน่นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนชนิดต่าง ๆ

ความหนาแน่นของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน ทำการทดสอบโดยวิธีการแทนที่ด้วยน้ำตามมาตรฐาน ASTM D08-792 (Method A) จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น โดยมีขนาด 50 มิลลิเมตร × 25 มิลลิเมตร และทำการชั่งน้ำหนักทั้งในอากาศและในน้ำ และทำการ

เปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นตามทฤษฎีโดยใช้ข้อมูลปริมาณเส้นใย เพื่อประเมินคุณภาพของชิ้นงานคอมพอสิตความหนาแน่นคำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\rho = \frac{A}{A-B} \rho_o \quad (1)$$

โดย ρ และ ρ_o คือ ความหนาแน่นของชิ้นงานและของน้ำที่อุณหภูมิที่กำหนด (กรัม/ลบ.ซม.) ตามลำดับ

A และ B คือ น้ำหนักของชิ้นงานในอากาศและในน้ำ (กรัม) ตามลำดับ

4.4 การทดสอบความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การทดสอบความต้านทานแรงดึง โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D3039 ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron Model 8801) โดยใช้ความเร็วในการดึง (Test Speed) 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 100 กิโลนิวตัน และความยาวของเกจ (Gage Length) 70 มิลลิเมตร จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น

4.5 การทดสอบความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Test) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790 ทดสอบแบบ 3 จุด (3-Points Bending) ด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (Instron รุ่น 5567) ใช้ความเร็วในการดึง (Test Speed) 2 มิลลิเมตร/นาที ด้วยน้ำหนักกด 1 กิโลนิวตัน และอัตราระยะห่างของขารองรับชิ้นงาน (Ratio of Span to Depth) เท่ากับ 16:1 จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น

4.6 การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก (Impact Test) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การทดสอบความต้านทานแรงกระแทก โดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D256 แบบไอซอด (Izod Type) ทดสอบด้วย เครื่อง Pendulum Impact Tester (Ceast รุ่น DAS 8000 Junior) ใช้ลูกตุ้มขนาด 25 จูล จำนวน 5 ชิ้นงาน ซึ่งแต่ละชิ้นงานคอมพอสิตมีจำนวนชั้น 8 ชั้น ค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact strength) คำนวณโดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{Impact Strength} = \frac{W}{A} \quad (2)$$

โดย W คือ ค่าพลังงานกระแทก (กิโลจูล, kJ)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (ตารางเมตร, m^2)

4.7 การวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน (Morphology) ของวัสดุพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การวิเคราะห์การยึดเกาะระหว่างเมตริกซ์พอลิเบนซอกซาซินกับเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงแบบต่าง ๆ วิเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด โดยนำชิ้นงานมาเคลือบพื้นผิวด้วยทองคำก่อนนำไปวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐาน ซึ่งใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์

5. ผลการศึกษา

5.1 ความหนาแน่นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การวัดค่าความหนาแน่นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับประเมินคุณภาพของวัสดุ โดยให้ข้อมูลลักษณะการกระจายตัวของเส้นใยในเมตริกซ์ของวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตรวมถึงการเกิดช่องว่างหรือช่องว่างของอากาศภายในวัสดุ โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลอง ความหนาแน่นตามทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

แสดงดังตารางที่ 1 โดยค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองคำนวณดังสมการที่ 1 ส่วนค่าความหนาแน่นตามทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานคำนวณดังสมการที่ 3 และ 4 [31] ตามลำดับ โดยความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดาและลายสองหรือลายทแยง มีค่าเท่ากับ 1.76 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ความหนาแน่นของเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ 1.80 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร และความหนาแน่นของพอลิเบนซอกซาซีนมีค่าเท่ากับ 1.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\rho_{ct} = \frac{1}{\frac{w_f}{\rho_f} + \frac{(1-w_f)}{\rho_m}} \quad (3)$$

โดย ρ_{ct} คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต (The Density of Composite Material) หน่วย คือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_f คือ ความหนาแน่นของเส้นใยเสริมแรง (The Density of Fiber) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_m คือ ความหนาแน่นของเมตริกซ์ (The Density of Matrix Resin) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

w_f คือ สัดส่วนน้ำหนักของเส้นใยเสริมแรง (The Weight Fraction of Fiber) หน่วยคือ กรัม

$$\Delta v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ex}}{\rho_{ct}} \quad (4)$$

โดย Δv คือ ช่องว่างภายในชิ้นงาน (Void Fraction)

ρ_{ct} คือ ความหนาแน่นตามทฤษฎีของวัสดุคอมพอสิต หน่วย คือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ρ_{ex} คือ ความหนาแน่นจากการทดลองของวัสดุคอมพอสิต (The Density of Experimental) หน่วยคือ กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร

ทำการคำนวณชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลักษณะต่าง ๆ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นของชิ้นงานวัสดุคอมพอสิต และค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุ

คอมพอสิต ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหนาแน่นจากการทดลองจากทฤษฎี และช่องว่างภายในชิ้นงานของการจัดลำดับชั้นของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

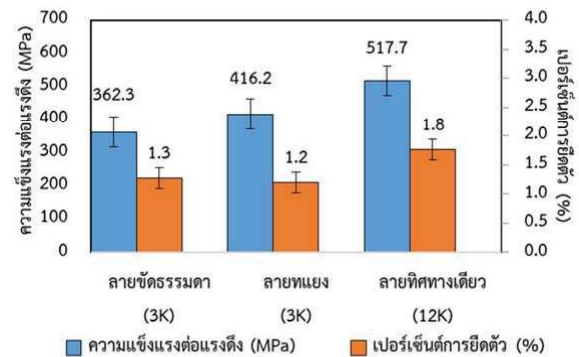
ชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ	ความหนาแน่นจากการทดลอง (ρ_{ex}) (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ความหนาแน่นตามทฤษฎี (ρ_{ct}) (กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร)	อัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงาน (Δv) (%)
การทอลายขัดธรรมดา (Plain Weave Fabric)	1.428±0.028	1.507	5.258±1.839
การทอลายสองหรือลายทแยง (Twill Weave Fabric)	1.457±0.028	1.507	3.332±1.839
การทอลายทิศทางเดียว (Unidirectional Carbon Fabric)	1.450±0.026	1.526	4.993±1.726

จากตารางที่ 1 ความหนาแน่นจากการทดลองของชิ้นงานคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 1.428, 1.457 และ 1.450 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ในชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว ตามลำดับ ซึ่งความหนาแน่นของชิ้นงานคอมพอสิตที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นตามทฤษฎี ส่งผลให้สัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมพอสิตมีค่าต่ำ ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 ความหนาแน่นจากการทดลองของชิ้นงานคอมพอสิตเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียวมีอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานเท่ากับ 5.258 ± 1.839 , 3.332 ± 1.839 และ 4.993 ± 1.726 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยสัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงาน

อยู่ระหว่าง $3.332 \pm 1.839 - 5.258 \pm 1.839$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุคอมพอลิธเพื่อทำโครงสร้าง (Structural Composites) กับวัสดุคอมพอลิธเพื่อทำเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบา (Lightweight Ballistic Composites) ของ Bhatnagar A. (2006) [32] พบว่าค่าช่องว่างภายในชิ้นงานของวัสดุคอมพอลิธเพื่อทำเกราะกันกระสุนน้ำหนักเบาต้องมีค่ามากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ถือว่ามีค่าช่องว่างภายในชิ้นงานที่ต่ำกว่าสามารถยอมรับได้ซึ่งบ่งบอกถึงช่องว่างอากาศในชิ้นงานที่น้อยและความสม่ำเสมอภายในชิ้นงานแต่ละชิ้นนั่นเอง นอกจากนี้แล้วในการทดลองของ Agarwal และคณะ (2014) [31] ได้ศึกษาการจัดลำดับชั้นของชิ้นงานคอมพอลิธที่พอกซีเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนร่วมกับเส้นใยแก้วโดยมีอัตราส่วนช่องว่างในชิ้นงานอยู่ระหว่าง $0.705 - 5.156$ เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการที่ค่าอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสูง ส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าพอลิเบนซอกซาซีนเรซินมีความสามารถในการอาบเส้นใยทั่วถึงและยึดติดกับเส้นใยคาร์บอนเป็นอย่างดี เนื่องจากพอลิเบนซอกซาซีนเรซินมีคุณสมบัติด้านความหนืดขณะหลอมเหลวต่ำ

5.2 ความต้านทานแรงดึง (Tensile Test) ของวัสดุคอมพอลิธพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ สมบัติความต้านทานแรงดึงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงหรือความต้านทานในการเปลี่ยนรูปร่างเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ



ภาพที่ 2 ผลการทดสอบค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

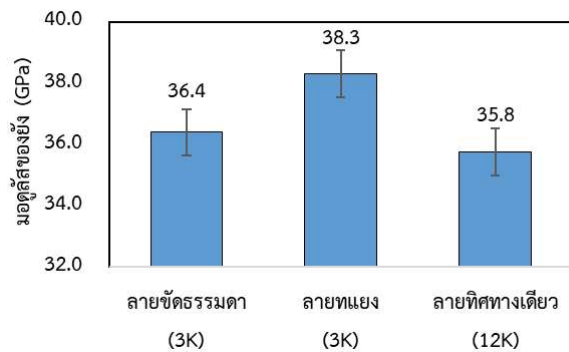
จากภาพที่ 2 ค่าความแข็งแรงของแรงดึงบ่งบอกถึงค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุคอมพอลิธพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว มีค่าเท่ากับ 362 ± 16 , 416 ± 17 และ 517 ± 26 เมกะปาสกาล ตามลำดับ จะเห็นว่าวัสดุคอมพอลิธที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว มีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าวัสดุคอมพอลิธที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างแบบการทอลายขัดธรรมดาและการทอลายสองหรือลายทแยง เนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวที่นำมาใช้เป็นวัสดุเสริมแรงมีความหนาแน่นของเส้นใย และจำนวน

เส้นใยหรือฟิลาเมนต์ที่สูงกว่า ดังตารางที่ 2 และมีเส้นใยทั้งหมดขนานกับทิศทางการทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial Tensile Test) ซึ่งเป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดขวางของวัสดุ จึงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงสูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายสองหรือลายทแยง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ismail A.E. และคณะ (2015) [28] พบว่าทิศทางการวางแนวของเส้นใยในการทดสอบมีผลอย่างมากต่อความต้านทานแรงดึงสูงสุด และเนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายสองหรือลายทแยงซึ่งเป็นโครงสร้างการทอ 2 มิติที่มีกลุ่มเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง (Warp และ Weft) โดยกลุ่มเส้นใยทั้งสองสอดประสานกัน (Interlacing) เกิดการแยกขนาดเล็กในพื้นที่ส่วนต่อประสานทำให้เกิดรอยแยกและรอยแตกของวัสดุได้ง่ายเมื่อได้รับแรงดึงในทิศทางเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rios-Soberanis และคณะ (2012) [29] พบว่ารอยร้าวช่วยเพิ่มการแยกและความล้มเหลวของชิ้นงานทดสอบอธิบายว่ารอยแตกตามขวางจะนำไปสู่การแยกขนาดเล็กในพื้นที่ส่วนต่อประสานระหว่างเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง และยังระบุด้วยว่าการสอดแทรกของเส้นใยตามยาวเป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตกที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเครียดสูงจึงทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของรอยแตก และจากค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว มีค่าเท่ากับ 1.27 ± 0.13 , 1.20 ± 0.09 และ 1.76 ± 0.11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พบว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวมีร้อยละการยืดตัวของชิ้นงานทดสอบที่จุดขาดเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวเริ่มต้นที่สูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดาและลายสองหรือลายทแยงเนื่องจากความหนาแน่นของเส้นใยและจำนวนเส้นใยหรือ

ฟิลาเมนต์ที่สูงกว่า ดังตารางที่ 2 คุณสมบัติของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ ตัวแปรอิสระจึงทำให้วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวมีความสามารถในการยืดตัวที่สูงกว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดาและการทอลายสองหรือลายทแยง ผลลัพธ์เหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนมีอิทธิพลอย่างมาก ต่อความต้านทานแรงดึง ความสามารถในการยืดตัว และความสามารถนำไปขึ้นรูปของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีน [33, 34]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ [35]

หัวข้อ	การทอลายขัดธรรมดา	การทอลายสองหรือลายทแยง	ผ้าคาร์บอนทิศทางเดียว
บริษัท Companies	Toray	Toray	Toray
ชนิดของเส้นใย Fiber Type	T300	T300	T700S
จำนวนเส้นใยฟิลาเมนต์ Filament Count	3K	3K	12K
เส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นใย Filament Diameter (μm)	7	7	7
ความแข็งแรงต่อแรงดึง Tensile Strength (MPa)	3530	3530	4800
มอดูลัสของยัง Tensile Modulus (GPa)	230	230	230
เปอร์เซ็นต์การยืดตัว Break Elongation (%)	1.5	1.5	2.1
ความหนาแน่นของเส้นใย Density (g/cm^3)	1.76	1.76	1.80
เทกซ์ Tex (g/km) น้ำหนักเป็นกรัมของเส้นด้ายยาว 1000 เมตร	198	198	800



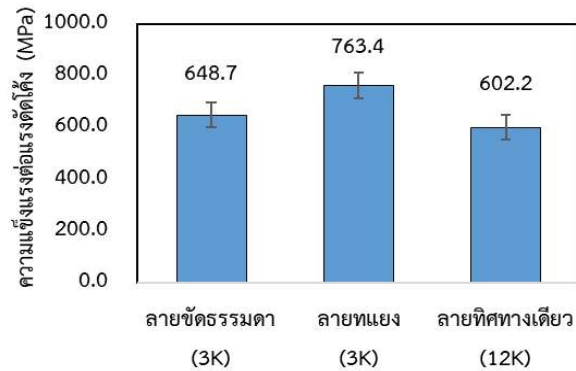
ภาพที่ 3 ผลการทดสอบมอดูลัสของยังของวัสดุพอลิเบน-ชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วย โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

จากภาพที่ 3 แสดงค่ามอดูลัสของยังของวัสดุคอม-พอลิพอลิเบนชอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ 36.40 ± 1.27 , 38.30 ± 1.29 และ 35.77 ± 0.83 จิกะปาสคาล ตามลำดับ จะเห็นว่าวัสดุคอมพอลิที่เสริมแรงด้วยการทอลายสองหรือลายทแยงมีค่ามอดูลัสสูงกว่าวัสดุคอมพอลิที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายทิศทางเดียว เนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงเป็นโครงสร้างการทอ 2 มิติ ที่มีกลุ่มเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวาง โดยกลุ่มเส้นใยทั้งสองสอดประสานกันและโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงที่เกิดการสอดประสานกันมีน้อยกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา จึงมีค่าความแข็งแรง (Stiffness) สูงกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายทิศทางเดียว จึงช่วยเพิ่มความทนทานต่อการเปลี่ยนรูปให้แก่ชิ้นงานวัสดุคอมพอลิได้ดี

5.3 ความต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural test) ของวัสดุคอมพอลิพอลิเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

ค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) ของวัสดุพอลิเบนชอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 4 พบว่าค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งของวัสดุคอมพอลิพอลิเบน-ชอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา การทอลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว มีค่าเท่ากับ 649 ± 56 , 763 ± 55 และ 602 ± 26 เมกะปาสคาล ตามลำดับ วัสดุคอมพอลิที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงมีค่าความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งสูงกว่าวัสดุคอมพอลิที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา และลายทิศทางเดียว เนื่องจากโครงสร้างการทอ 2 มิติ มีความสามารถในการส่งผ่านภาระได้พร้อมกันทั้ง 2 ทิศทาง ในระนาบที่ตั้งฉากกันในแนวแกน X และแกน Y หรือตามยาวและตามขวาง จึงมีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป การรับและกระจายแรง (Stress and Stress Distribution) ที่ดีกว่าวัสดุคอมพอลิที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว นอกจากนี้โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงเป็นการทอ 2 มิติ ที่มีกลุ่มเส้นใยตามยาวและเส้นใยตามขวางที่ทอสอดประสานในแนวตั้งฉากโดยการแทรกเส้นใยผ่านช่องว่างของเส้นใยตามขวาง เกิดเป็นระยะห่างของช่องว่างระหว่างเส้นใยซึ่งเป็นช่องว่างที่เกิดจากการรกลายของเส้นใยเพื่อส่งผ่านเส้นใยตามขวางเข้าไปทำมุมหักทอกับเส้นใยตามยาว (90 องศา) ซึ่งการรกลับของโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงจะมีการสอดประสานกันที่น้อยกว่าโครงสร้างการทอลายขัดธรรมดาจึงมีความสามารถโค้งงอได้มาก และการคืนกลับสู่สภาพเดิมต่อแรงดัดโค้งได้ดีกว่าโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา [36] ดังนั้นคุณสมบัติทางกลของวัสดุคอมพอลิจะขึ้นอยู่กับรูปแบบโครงสร้างการทอของเส้นใยคาร์บอนด้วยเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Tong, Mouritz และ Bannister (2002) [37] พบว่าคุณสมบัติของสิ่งทอจะขึ้น

อยู่กับชนิดของเส้นใยปริมาณเส้นใยที่ใช้ และรูปแบบการผลิตโดยรูปแบบและลวดลายบนพื้นเส้นใยและสิ่งทอจะขึ้นอยู่กับกรยกลสลับหรือการสอประสานกันของเส้นใย

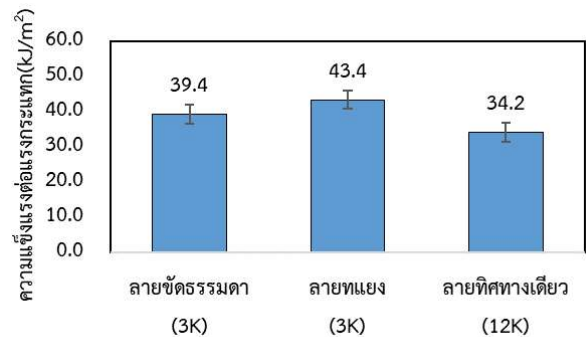


ภาพที่ 4 ผลการทดสอบความแข็งแรงต่อแรงดัดโค้งของวัสดุพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

5.4 ความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact Test) ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

สมบัติความต้านทานต่อแรงกระแทกบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานไว้ได้โดยไม่เกิดการแตกหักของวัสดุซึ่งบ่งบอกถึงความเหนียว (Toughness) ของวัสดุนั้นเอง ดังภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงต่อแรงกระแทกและวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ พบว่าค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) ของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขั้ดธรรมดาลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว มีค่าเท่ากับ 39 ± 7 , 43 ± 2 และ 34 ± 1 กิโลจูล/ตารางเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้าง การทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงมีสมบัติในการดูดซับพลังงานที่ดี

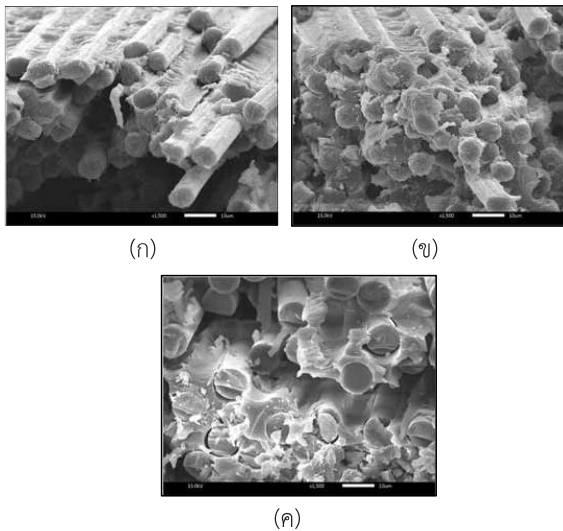
กว่าวัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยลายขั้ดธรรมดาและลายทิศทางเดียว เนื่องจากมีลักษณะการทอเส้นใยเป็นโครงสร้างแบบ 2 มิติ จึงที่ความทนทานต่อการเปลี่ยนรูปการรับและกระจายแรงได้ดี



ภาพที่ 5 ความแข็งแรงต่อแรงกระแทกของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอน แบบต่าง ๆ

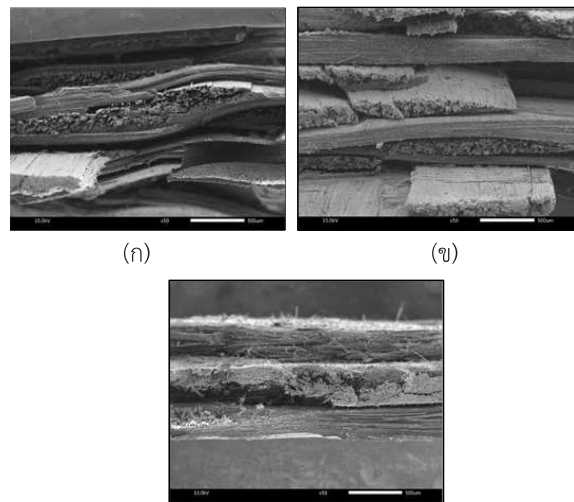
5.5 ลักษณะสัณฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ

การศึกษาสัณฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด รุ่น JSM-6610 ขนาดกำลังขยาย 1500 เท่า (X1500) เพื่อตรวจสอบ การยึดติดกันระหว่างเมตริกซ์และเส้นใยเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต โดยให้ข้อมูลเกี่ยวกับเฟสและลักษณะความเสียหายของวัสดุบ่งบอกถึงการตัดสินใจเลือกใช้เมตริกซ์และวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมพอสิต [38]



ภาพที่ 6 ลักษณะพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ (ก) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา (ข) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยง (ค) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย X1500

จากภาพที่ 6 แสดงลักษณะพื้นผิวของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ แสดงให้เห็นว่าพอลิเบนซอกซาซีนเรซินมีความสามารถในการอาบเส้นใยทั่วถึง และยึดติดได้ดีกับเส้นใยคาร์บอนในโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นของวัสดุในหัวข้อการทดลอง 5.1 จากการคำนวณอัตรา ส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานจากความหนาแน่นในการทดลองและความหนาแน่นตามทฤษฎี



ภาพที่ 7 ลักษณะพื้นฐานของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ (ก) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา (ข) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยง (ค) โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย X50

การศึกษาพื้นฐานวิทยาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด รุ่น JSM-6610 ขนาดกำลังขยาย 50 เท่า (X50) เพื่อตรวจสอบ ดูโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ จากภาพที่ 7 แสดงลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนที่แตกต่างกัน ตามรูปแบบการทอและการยกสลับหรือการสอดประสานกันของชิ้นงานคอมพอสิต

6. สรุปและอภิปรายผล

ในงานวิจัยได้ศึกษาสมบัติเชิงกลและกายภาพของวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ โดยใช้วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซีนเสริมแรงด้วยโครงสร้างการ

ทอเส้นใยคาร์บอนลาย ขัดธรรมดา ลายสองหรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว จำนวน 8 ชั้น เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลและกายภาพ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

6.1 พอลิเบนซอกซาซินเมตริกซ์ยึดติดได้ดีกับ โครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายขัดธรรมดา ลายสอง หรือลายทแยง และลายทิศทางเดียว ซึ่งตรวจสอบได้จากค่าช่องว่างภายในชิ้นงานจากการวัดค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีมีอัตราส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานเท่ากับ 5.258 ± 1.839 , 3.332 ± 1.839 และ 4.993 ± 1.726 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยสัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานอยู่ระหว่าง $3.332 \pm 1.839 - 5.258 \pm 1.839$ เปอร์เซ็นต์ มีค่าต่ำบ่งบอกถึงช่องว่างอากาศในชิ้นงานที่น้อยและสม่ำเสมอในชิ้นงานแต่ละชิ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะสัณฐานของวัสดุคอมพอสิต พอลิเบนซอกซาซินที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบต่าง ๆ จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นพอลิเบนซอกซาซินเรซินมีความสามารถในการอาบเส้นใยทั่วถึงและยึดติดได้ดีกับเส้นใยคาร์บอนในโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ เป็นอย่างดีเนื่องมาจากสมบัติความหนืดขณะหลอมเหลวต่ำของพอลิเบนซอกซาซินเรซิน ซึ่งสัดส่วนช่องว่างภายในชิ้นงานที่ต่ำและการยึดติดได้ดีระหว่างพอลิเบนซอกซาซินเรซิน และเส้นใยคาร์บอนในโครงสร้างการทอแบบต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงคุณภาพในการขึ้นรูปชิ้นงานวัสดุคอมพอสิตที่ดี

6.2 วัสดุคอมพอสิตที่เสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียวจะมีค่าความแข็งแรงต่อนึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นทิศทางการรับแรงดึงในทิศทางเดียว (Uniaxial Tensile Test) เป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดขวางของวัสดุสูงสุด มีค่าเท่ากับ 517 ± 26 เมกะปาสคาล เนื่องจากโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายทิศทางเดียว มีความหนาแน่นของเส้นใยและจำนวนเส้นใยหรือฟิลาเมนต์ที่สูง โดยมีเส้นใย

คาร์บอนทั้งหมดในทิศทางเดียวกันซึ่งขนานกับทิศทางการทดสอบแรงดึงในทิศทางเดียวซึ่งเป็นทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดขวางของชิ้นงานคอมพอสิตจึงมีค่าความแข็งแรงต่อนึงสูง

6.3 วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบลายสองหรือลายทแยงจะมีค่าความแข็งแรงต่อนึงดัดโค้ง (Flexural Strength) ซึ่งมีทิศทางของแรงกดตั้งฉากกับชิ้นงานคอมพอสิตสูงสุด มีค่าเท่ากับ 763 ± 55 เมกะปาสคาล เนื่องจากโครงสร้างการทอ 2 มิติ มีความสามารถในการส่งผ่านภาระ (Load) ได้พร้อมกันทั้ง 2 ทิศทาง ในระนาบที่ตั้งฉากกันในตามยาวและตามขวาง จึงมีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูป (Stiffness) การรับและกระจายแรง (Stress and Stress Distribution) ได้ดี นอกจากนี้ ลักษณะโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนลายสองหรือลายทแยงมีจุดสัมผัส (Contact Friction) การหยัก (Crimp) และจุดการสอดประสานกัน (Intersection Point) ที่น้อยกว่าโครงสร้างการทอลักษณะอื่น ส่งผลให้มีคุณสมบัติความแข็งแรงต่อนึงดัดโค้งที่สูงขึ้น

6.4 วัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบลายสองหรือลายทแยงยังมีค่าความแข็งแรงต่อการกระแทก (Impact Strength) ซึ่งมีทิศทางของแรงกระแทกจากการเหวี่ยงของลูกตุ้มตั้งฉากกับความหนาของชิ้นงานคอมพอสิตสูงสุดมีค่าเท่ากับ 43 ± 2 กิโลจูล/ตารางเมตร จึงมีสมบัติในการดูดซับพลังงานสูงสุดจึงเหมาะสำหรับนำมาพัฒนาเกราะแข็งกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ

6.5 จากการผลการทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้พบว่าวัสดุคอมพอสิตพอลิเบนซอกซาซินเสริมแรงด้วยโครงสร้างการทอเส้นใยคาร์บอนแบบลายสองหรือลายทแยงมีสมบัติความหนาแน่นต่ำ ค่าความแข็งแรงต่อนึงดัดโค้ง และความต้านทานแรงกระแทกสูงซึ่งลักษณะการทดสอบดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ

คอมพอสิตคล้ายกับการยิงกระสุนปะทะวัสดุ ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปโคนกลัดจากผิวด้านหน้าที่ถูกกระแทกจากลูกกระสุนไปยังผิวด้านหลังของวัสดุ ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นเกราะแข็งกันกระสุนจากวัสดุพอลิเมอร์คอมพอสิตในส่วนของแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะ โดยทำการทดสอบยิงเกราะกันกระสุนตามมาตรฐาน NIJ 0101.06 ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนพัฒนาโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า (กทพ.ร.จปร.) ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ รีมดุษิต อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ปรึกษางานวิจัย ที่กรุณาให้คำแนะนำปรับปรุง แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในงานวิจัยตั้งแต่ต้นจนจบสมบูรณ์ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ และหน่วยงานภายในหรือภายนอกของรัฐบาลไปเป็นแนวทางในการพัฒนาทำเกราะกันกระสุนในแผ่นหน้าหรือแผ่นปะทะต่อไป

8. บรรณานุกรม

- (1) กรรณิการ์ เดชรักษา. เกราะกันกระสุน.วารสารเทคโนโลยีวัสดุ ฉบับที่ 74, กรกฎาคม-กันยายน 2557: หน้า 59-65.
- (2) S. Rimdusit, S. Pirstpindvong, W. Tanthapanichakoon, S. Damrongsakkul, Toughening of Polybenzoxazine by Alloying with Urethane Prepolymer and Flexible Epoxy: A Comparative Study, Polymer Engineering Science, 45, pp. 288-296, (2005).
- (3) Rimdusit S., Jubsilp C., Kunopast P. and W. Bangsen, "Handbook of Benzoxazine Resins, Chapter 6: Chemorheology of Benzoxazine-based Resins" H. Ishida, and T. Agag, eds., Elsevier, Amsterdam, (2011).
- (4) วรณัฐ ดีละมัน คาร์บอนไฟเบอร์วัสดุป้องกันอาคารจากแผ่นดินไหวจากเว็บไซต์ศูนย์วิจัยและพัฒนาการป้องกันและจัดการภัยพิบัติ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ สืบค้นเมื่อ 17 กันยายน 2557 <http://dpm.nida.ac.th/main/index.php/articles/tsunami-and-earthquake/item/79>.

- (5) E. D. Pilpel, R.H.Holland, S.R.S. Johnson, "Composite Ballistic Panels and Method of Use", Google Patents, (2009)
- (6) F. Larsson, L. Svensson, "Carbon, Polyethylene and PBO Hybrid Fibre Composites for Structural Lightweight Armour", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 33(2), pp. 221-231, (2002).
- (7) S.N. Monteiro, et al., "Novel Ballistic Ramie Fabric Composite Competing with Kevlar Fabric in Multilayered Armor", Materials & Design, 96 (Supplement C), pp. 263-269, (2016).
- (8) K.S. Pandya, et al., "Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composites", Materials & Design, 44 (Supplement C), pp. 128-135, (2013).
- (9) L.H. Nguyen, et al., "A Methodology for Hydrocode Analysis of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Composite under Ballistic Impact", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 84 (Supplement C), pp. 224-235, (2016).
- (10) M. Grujicic, et al., "Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-Grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers", Journal of Materials Engineering and Performance, 18(9), pp. 1169, (2009).
- (11) M. Grujicic, et al., "Ballistic-performance Optimization of a Hybrid Carbon-nanotube/E-glass Reinforced Polyvinyl-ester-epoxy-matrix Composite Armor", Journal of Materials Science, 42(14), pp. 5347-5359, (2007).
- (12) A.K. Bandaru, L. Vetiyatil, S. Ahmad, "The Effect of Hybridization on the Ballistic Impact Behavior of Hybrid Composite Armors", Composites Part B: Engineering, 76(Supplement C), pp. 300-319, (2015).
- (13) N.K. Naik, A.V. Doshi, "Ballistic Impact Behaviour of Thick Composites: Parametric Studies", Composite Structures, 82(3), pp. 447-464, (2008).
- (14) S. Rimdusit, C.J., S. Tiptipakorn, "Alloys and Composites of Polybenzoxazines", Properties and Applications, New York: Springer, (2013).
- (15) N.N. Ghosh, B. Kiskan, Y. Yagci, "Polybenzoxazines New High Performance Thermosetting Resins: Synthesis and Properties", Progress in Polymer Science, 32(11): pp. 1344-1391, (2007).
- (16) P.K. Mallick, Fiber-Reinforce Composite. (1993).
- (17) H. Ishida, Handbook of Benzoxazine Resin. Elsevier Press, (2012).

- (18) C. Jubsilp, et al., "High Performance Wood Composites Based on Benzoxazine-Epoxy Alloys", *Bioresource Technology*, 99(18), pp. 8880-8886, (2008).
- (19) C. Jubsilp, T. Takeichi, S. Rimdusit, "Property Enhancement of Polybenzoxazine Modified with Dianhydride", *Polymer Degradation and Stability*, 96(6), pp. 1047-1053, (2011).
- (20) S. Rimdusit, W. Bangsen, P. Kasemsiri, "Chemorheology and Thermomechanical Characteristics of Benzoxazine-urethane Copolymers", *Journal of Applied Polymer Science*, 121(6): pp. 3669-3678, (2011).
- (21) S. Rimdusit, et al., "Toughening of Polybenzoxazine by Alloying with Urethane Prepolymer and Flexible Epoxy: A Comparative Study", *Polymer Engineering & Science*, 45(3): pp. 288-296, (2005).
- (22) Rimdusit S., et al., Effects of Polyol Molecular Weight on Properties of Benzoxazine-urethane Polymer Alloys. *Polymer Engineering & Science*, 48(11), pp. 2238-2246, (2008).
- (23) Chand, S., Review Carbon Fiber for Composites. *J. Mater. Sci*, 35: pp. 1303-1313, (2000).
- (24) Japan Chemical Fibers Association Carbon Fiber and Product. <http://www.carbonfiber.gr.jp/english/material/what.html>.
- (25) V. Okhawilai, S. Rimdusit, Chapter 35 Hard Armor Composites from Ballistic Fiber-reinforced Polybenzoxazine Alloys, pp. 699-723, (2017).
- (26) R. Murugan, R. Ramesh, K. Padmanabhan, "Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminates", *Procedia Engineering*, 97(Supplement C), pp. 459-468, (2014).
- (27) M.P. Salman, M.S. Wahab, M.U. Wahit, "The Effect of Fabric Weave on Tensile Strength of Woven Kenaf Reinforced Unsaturated Polyester Composite", *International Colloquium on Textile Engineer, Fashion, Apparel & Design*, pp. 52-56, (2014).
- (28) A.E. Ismail, M.A. Che Abdul Aziz, "Tensile strength of woven yarn kenaf fiber reinforced polyester composites", *Journal of Mechanical Engineering and Sciences (JMES)*, December 2015; Volume 9, pp. 1695-1704, (2015).
- (29) Rios-Soberanis et al., "Study of Mechanical Behavior of Textile Reinforced Composite Material", *Dyna*, year 79, No. 176, Medellin, December, 2012 : pp. 115-123, (2012).
- (30) P.V. Cavallaro., Society for Experiment Mechanics (outside the USA). Effects of Weave Styles and Crimp Gradients in Woven Kevlar/Epoxy Composites, (2015).
- (31) G. Agarwal, et al., "Effect of Stacking Sequence on Physical, Mechanical and Tribological Properties of Glass-carbon Hybrid Composites", *Friction*, 2(4): pp. 354-364, (2014).
- (32) A. Bhatnagar, "Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications", *Woodhead Publishing in Materials*, pp. 285, (2006).
- (33) M.R. O'Masta, H.N.G. Wadley, "Mechanisms of Projectile Penetration in Dyneema Encapsulated Aluminum Structures", *International Journal of Impact Engineering*, 74 pp. 16-35, (2014).
- (34) D.K.Y. Tam, P. Gao, T. Yi, "High-performance Ballistic Protection using Polymer Nanocomposites", pp. 213-237, (2012).
- (35) Toray Composite Materials America, Inc. Types of Carbon Fiber. from <https://www.toraycma.com/page.php?id=661>, (2018).
- (36) เข็มชัย เหมะจันทรม, สิ่งทอเทคนิค (Technical textiles), พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ออฟเซ็ท ครีเอชั่น จำกัด, สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมสิ่งทอ, (2549).
- (37) L. Tong, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, "3D Fiber Reinforced Polymer Composites", *Elsevier Science Ltd*, (2002).
- (38) N. Hameed, et al., "Mechanical Properties of Poly(styrene-co-acrylonitrile)-modified Epoxy Resin /glass Fiber Composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 110(6): pp. 3431-3438, (2008).