ระบบสั่นแล้วปรับเรียงแนวของเส้นใยในกระบวนผลิตสำหรับโพลิเมอร์เสริมความแข็งแรงด้วยคาร์บอนไฟเบอร์รีไซเคิล

Vibro-Aligned Systems for Recycled Carbon Fiber Reinforced Polymer (rCFRP) Processing

นรศักดิ์ สิกขา (Norasak Sikkha)[1]* นำพล มหายศนันท์ (Numpon Mahayotsanun)**
เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล (Sedthawatt Sucharitpwatskul)*** พงษ์ศักดิ์ ถึงสุข (Pongsak Tuengsook)****

(Received: *March 15, 2024*; Revised: *August 28, 2024*; Accepted: *August 29, 2024*)

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาผลกระทบการวางแนวเริ่มต้นของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน (rCFRP) และอัตราส่วนของเส้นใยต่อโพลีเมอร์ โดยใช้การสั่นสะเทือนสำหรับวางแนวของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน ด้วยการนำเส้นใยวางด้านบนของแผ่นกรอง (ที่มีรูสี่เหลี่ยม) และทำการสั่นเพื่อจัดแนวไฟเบอร์ จากนั้นเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนจะถูกผสมกับวัสดุเมทริกซ์ (โพลีโพรพีลีน) ในอัตราส่วน (25/75, 20/80 และ 15/85) ด้วยการให้ความร้อน ซึ่งการผสมเส้นใยที่ได้จะนำไปวิเคราะห์การจัดตำแหน่งของเส้นใยในโพลีเมอร์ผสมโดยใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ ทำการทดสอบแรงดึงเพื่อประเมินคุณสมบัติทางกลที่ศึกษาซึ่งถูกวางในสามทิศทาง (0°, 45°, 90°) โดยผลการวิจัยพบว่าการวางแนว 90° และอัตราส่วนไฟเบอร์ต่อโพลีเมอร์ 20/80 ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ผลที่ได้สามารถนำไปประยุกค์ใช้ในกระบวนการที่ 3 และ 4 ของ Vibro-Aligning-Heating

ABSTRACT

This paper experimentally investigated the effect of recycled carbon fiber reinforced plastic (rCFRP)'s initial orientations and fiber-to-polymer ratios using vibration for fiber alignment. The studied rCFRPs were placed on top of a filter plate (with rectangular holes) and vibrated for fiber alignment. The rCFRPs were then mixed with the matrix material (Polypropylene) at different ratios (25/75, 20/80, and 15/85) by heating. The alignments of fibers in the mixed polymers were analyzed by using image processing software. Tensile testing of fibers at 0°, 45°, 90° to the pulled direction was conducted to evaluate the mechanical properties. The results showed that a 90° orientation and a fiber-to-polymer ratio of 20/80 provided the highest tensile strength values.

คำสำคัญ: เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนเสริมแรงด้วยพอลิเมอร์ การเรียงตัวในแนวแกน การสั่นเพื่อการเรียงตัว

Keywords: Recycled carbon fiber reinforce polymer, Orientation, Vibration-alignment

[1]*Corresponding author: noei.norasak@gmail.com*

**นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*
Student, Master of Engineering in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kean University

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*
Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kean University

****นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัศดุแห่งชาติ*
Researcher of the National Metal and Materials Technology Center (MTEC)

*****อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี*
Lecturer, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi

บทนำ

ตลาดอุตสาหกรรมยานยนต์ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีการนำวัสดุน้ำหนักเบาที่มีคุณสมบัติดีที่สุดอย่างหนึ่งมาใช้นั่น คือ เส้นใยคาร์บอน โดยเส้นใยคาร์บอนก่อนถูกนำมาขึ้นรูปเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ชิ้นส่วนยานยนต์ อุปกรณ์กีฬาบางชนิด หรือแม้กระทั่งใช้ในทางอากาศยาน หากเส้นใยนี้ได้ผ่านกระบวนการเสริมแรงเส้นใย จะส่งผลให้เกิดคุณสมบัติของเส้นใยเพิ่มขึ้นมา โดยจะขึ้นอยู่กับเนื้อสารที่นำมาเสริมแรง หากจะกล่าวถึงเส้นใยเสริมแรงที่นิยมที่สุด คงหลีกไม่พ้นเส้นใยคาร์บอนเสริมแรงด้วยโพลิเมอร์ (CFRP) ซึ่งได้ชื่อว่าเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ความทนทานสูง สามารถใช้งานได้ต่อเนื่องและทนต่อความร้อนสูงได้ดี ส่งผลให้ขนาดของตลาดวัสดุน้ำหนักเบาทั่วโลกอยู่ที่ประมาณ 113.78 พันล้านเหรียญสหรัฐในปี 2016 และเพิ่มขึ้นในทุกปี เนื่องจากความต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์ที่เพิ่มขึ้น และคาดว่าอัตราการเติบโต หรือ CAGR จะอยู่ที่ 8.9% [1] หากแต่เมื่อมีการเกิดขึ้นของเส้นใยคาร์บอนนี้ย่อมมีของเสียที่เกิดขึ้น ที่ส่งผลให้เกิดเส้นใยเหลือทิ้ง วิธีการที่ทำให้เกิดประโยชน์สูงสุดนั่นคือการทำกลับมารีไซเคิลเพื่อนำกลับมาใช้งานอีกครั้ง โดยเมื่อผ่านการรีไซเคิลเส้นใยคาร์บอนจะอยู่ในลักษณะเส้นใยแบบสั้น ซึ่งเป็นการยากต่อการขึ้นรูปเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากเส้นใยก่อนจะถูกรีไซเคิลมีลักษณะเป็นเส้นใยต่อเนื่องจึงมีคุณสมบัติทางกลที่ดี ต่างจากเส้นไยที่ถูกรีไซเคิลที่เป็นแบบสั้น [2-4] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เล็งเห็นถึงปัญหาและประโยชน์ของสิ่งนี้ จึงได้ออกแบบกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานจากเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนแบบสั้นที่ง่ายและมีประสิทธิภาพต่อการจัดเรียงตัดของเส้นใยนี้

แนวความคิดในการขึ้นรูปชิ้นงานประกอบด้วย 4 กระบวนการ ได้แก่ การสั่นเพื่อการเรียงตัว การเคลือบสารพอลิเมอร์ การซ้อนทับแผ่นชิ้นงาน และการทำความร้อนด้วยสุญญากาศ ซึ่งเป็นขั้นตอนสมบูรณ์ในการขึ้นรูป หากแต่งานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่ 2 หัวข้อหลัก คือ การสั่นเพื่อการเรียงตัว และการเคลือบสารพอลิเมอร์ หรือเรียกอีกอย่างว่า Vibro-Aligning-Heating (VAH) โดยจะใช้วิธีการสั่นเพื่อปรับการเรียงตัวของเส้นใยให้อยู่ในแนวแกนเดียวกันเพื่อทำให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปมีจุดเด่นในการรับแรงตามแนวแกน ซึ่งการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง ส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตค่อนข้างมาก วัสดุคอมโพสิตที่มีเส้นใยเสริมแรงจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกับแรงที่มากระทำต่อวัสดุ จะมีความแข็งแรง และความแกร่งสูง แต่หากแรงที่มากระทำต่อวัสดุนั้นตั้งฉากต่อทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสริมแรง วัสดุคอมโพสิตจะมีสมบัติทางกลที่ไม่ดีนัก นอกจากนั้นการกระจายตัวของเส้นใยเสริมแรง มีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต หากเส้นใยเสริมแรงมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอในเนื้อแมททริกซ์ อาจทำให้บริเวณที่ไม่มีเส้นใยเสริมแรงอยู่มีความแข็งแรงไม่เทียบเท่าบริเวณอื่น และอาจเกิดความเสียหายในบริเวณนั้นขึ้นก่อนบริเวณอื่น [2, 5-7] โดยประกอบกับปัจจัยอีกสองอย่างที่มีผลคือ อัตราส่วนของเส้นใยคาร์บอนต่อพอลิเมอร์และแนวการเรียงตัวของเส้นใย โดยเส้นใยโดยกล่าวถึงอย่างแรกคืออัตราส่วนของเส้นใยคาร์บอนต่อพอลิเมอร์มีผลอย่างมากในการเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยและเนื้อสารพอลิเมอร์ ตามรายงานการทดสอบที่ Liang Guo et al. [8] ได้ศึกษาและทดสอบอัตราส่วนของเส้นใยต่อพอลิเมอร์ และการเรียงตัว โดยผลลัพธ์ที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วน 20 ต่อ 80 ทำมุมกับแนวแกน 0 องศา งานวิจัยนี้จึงได้ปรับอัตราส่วนให้ครอบคลุมเพิ่ม โดยใช้อัตราส่วน 15 ต่อ 85 20 ต่อ 80 และ 25 ต่อ 75 และแนวแกนการทำมุม 0 45 และ 90 โดยในขั้นตอนสุดท้ายจะถูกทำไปทดสอบผ่านการทดสอบแรงดึงในมาตรฐาน ASTM D3039 สำหรับ Polymer Matrix Composite Materials ความเร็วในการดึง 2 มิลลิเมตรต่อนาที และระยะทดสอบ (Gauge Length) อยู่ที่ 150 มิลลิเมตร [9]

งานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาชุดเครื่องมือการสั่นโดยใช้มอเตอร์ในการกระตุ้นให้เกิดการสั่นสะเทือนเพื่อให้เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนนั้นมีการปรับเรียงตัว โดยมีการวางมุมการเรียงตัวเริ่มต้นกับทิศทางการไหลของวัสดุที่ 0, 45 และ 90 องศา บนแผ่นกรองที่มีรูขนาดพอที่จะทำให้เส้นใยไหลผ่านจากการสั่น หลังจากนั้นเส้นใยรีไซเคิลจะถูกนำไปผสมกับ Polypropylene หรือ PP ที่อัตราส่วนระหว่างเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนกับพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน คือ 25/75 20/80 และ 15/85 ด้วยการให้ความร้อน โดยจะมีการใช้การทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อหาอุณหภูมิที่

เหมาะสมสำหรับการคงตัวของพอลิเมอร์และเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน ซึ่งชิ้นงานผสมเส้นใยที่ได้จะนำไปวิเคราะห์การจัดตำแหน่งของเส้นใยในโพลีเมอร์ผสมโดยใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลภาพ ทำการทดสอบแรงดึงเพื่อประเมินคุณสมบัติทางกล

วัตถุประสงค์การวิจัย

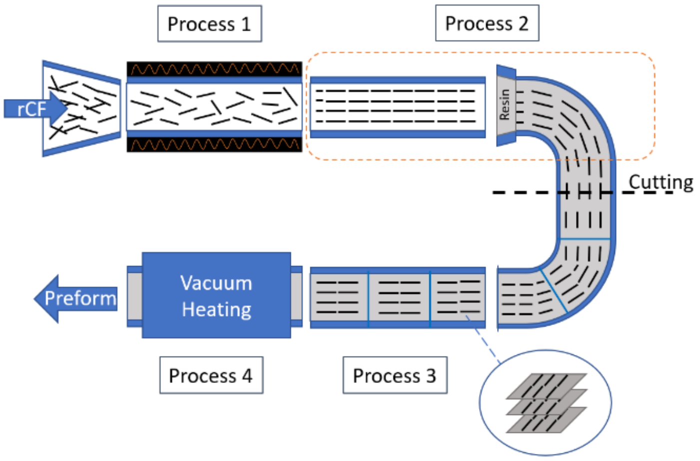
1. เพื่อออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตคอมโพสิตแบบ Vibro-Aligning-Heating (VAH)

2. เพื่อศึกษาผลกระทบของระบบสั่นกับการเรียงตัวของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนในกระบวนการ Vibro-Aligning-Heating (VAH) กับคุณสมบัติทางโครงสร้างและทางกลของวัสดุ

วิธีการและวัสดุ

1. การออกแบบกระบวนการผลิตคอมโพสิตแบบ Vibro-Aligning-Heating (VAH)

แนวคิดกระบวนการผลิตนั้นประกอบด้วย 4 กระบวนการ คือ การสั่นเพื่อการเรียงตัว การเคลือบสารเรซิน การซ้อนทับแผ่นชิ้นงาน และการทำความร้อนด้วยสุญญากาศ ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่กระบวนการ 1 และ 2 คือ การสั่นเพื่อปรับการเรียงตัวของเส้นใย และการเคลือบเรซิน โดยจะหาอุณหภูมิที่เหมาะส เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณสมบัติทางกล



ภาพที่ 1 แบบแนวคิดกระบวนการผลิต

1) กระบวนการที่ 1 สั่นเพื่อการเรียงตัว Recycled Carbon Fiber (rCF) ที่ใส่เข้ามาในระบบ จะถูกส่งเข้าในกระบวนการที่ 1 เพื่อปรับการเรียงตัวให้อยู่ในทิศทางเดียวกันด้วยวิธีการสั่นสะเทือน ให้เส้นใยเรียงตัวอยู่ในแนวแกนเดียวกัน

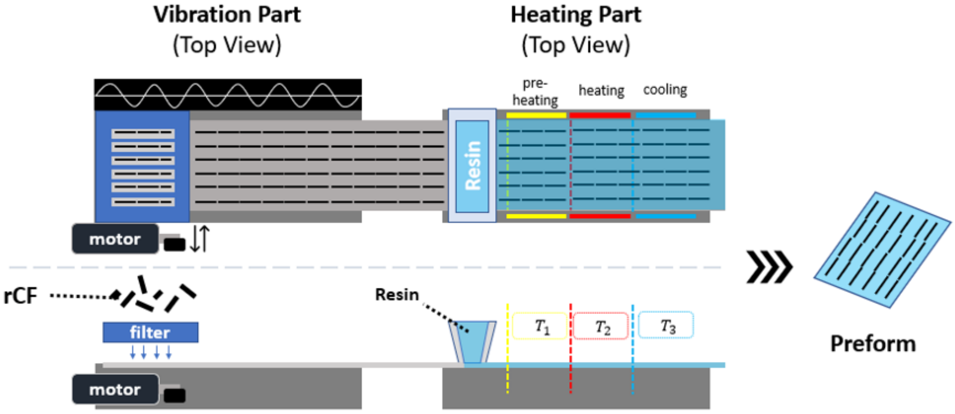
2) กระบวนการที่ 2 เคลือบเรซิน โดย rCF ที่ผ่านการเรียงตัวจะถูกลำเลียงผ่าน belt conveyor จากนั้นจะถูกเคลือบด้วยสารเรซิน ทำให้ rCF จับตัวกับเรซินแล้วมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ได้ออกมาเป็นแผ่น Recycled Carbon Fiber Reinforced Polymer (rCFRP)

3) กระบวนการที่ 3 ซ้อนทับแผ่น rCFRP เนื่องจากแผ่น rCFRP ที่ถูกส่งมาจากขั้นตอนที่ 2 มีความหนาไม่มาก ดังนั้นจึงทำการนำแผ่น rCFRP มาซ้อนทับกันเพื่อเพิ่มความหนาให้ได้ขนาดตามแบบ

4) กระบวนการที่ 4 ทำความร้อนด้วยสุญญกาศ แผ่น rCFRP ที่ถูกซ้อนทับกันมาจากกระบวนการที่ 3 แต่ละชั้นของแผ่น rCFRP ยังไม่เป็นเนื้อเดียวกัน จึงนำเข้ากระบวนการที่ 4 หรือ Vacuum Heating โดยให้ความร้อนแบบสุญญากาศ เพื่อให้เนื้อของเรซินแต่ละเผื่อเชื่อมติดกันเป็นเนื้อเดียวกัน

2. การทดสอบผลกระทบของระบบสั่นกับการเรียงตัวของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนในกระบวนการ Vibro-Aligning-Heating (VAH)

ในงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการทั้งหมด 2 กระบวนการ คือ การสั่นเพื่อการเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิลและการหลอมละลายโพลิเมอร์เพื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ โดยกระบวนการแรกจะเป็นส่วนของการสั่นเพื่อการเรียงตัว (Vibration Process) ซึ่งการทดสอบจะเริ่มจากการป้อนเส้นใยเข้าสู่ระบบ ด้วยวิธีการป้อนเข้าแบบอิสระ เนื่องด้วยด้วยลักษณะทางกายภาพของเส้นใยคาร์บอนนี้ เป็นแบบเส้นใยสั้น (Short fiber) ซึ่งมีขนาดที่แตกต่างกันทำให้เกิดการเกี่ยวพันระหว่างเส้นใย ส่งผลให้การสั่นเพื่อปรับเรียงตัวทำได้ยาก จึงได้ใช้แผ่นช่วยกรอง (Filter plate) เพื่อแยกเส้นใยออกจากกันโดยถูกติดตั้งห่างจากฐานจัดเรียงตัวที่ถูกออกแบบมา 1 ถึง 2 เซนติเมตร จากนั้นจะถูกลำเลียงไปยังส่วนของกระบวนการทำความร้อน (Heating Process) เพื่อรวมเนื้อเมทริกซ์เข้ากับเส้นใยคาร์บอน ในส่วนนี้ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ ซึ่งเดิมเป็นสถานะของแข็ง ดังภาพที่ 2 หากแต่การขึ้นรูปต้องทำการหลอมละลายเนื้อพอลิเมอร์ ให้เป็นสถานะของเหลว จึงจำเป็นต้องหาค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์แต่ละชนิด ส่วนนี้จะถูกแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ ปรับอุณหภูมิ (Pre-Heating) เพื่อให้พอลิเมอร์เพิ่มอุณหภูมิขึ้นอย่างช้าๆ เพื่อรักษาสถานะของสาร ส่วนต่อมาเป็นการทำความร้อน (Heating) ที่จุดอุณหภูมิที่ทำให้พอลิเมอร์ละลายโดยสมบูรณ์ ก่อนจะถึงส่วนสุดท้ายการเย็นตัว (Cooling) ที่จำเป็นต้องเย็นตัวลงอย่างช้าๆกระทั่งได้ชิ้นงาน (Preform) ออกมา



ภาพที่ 2 กระบวนการทดสอบ

3. วัสดุ

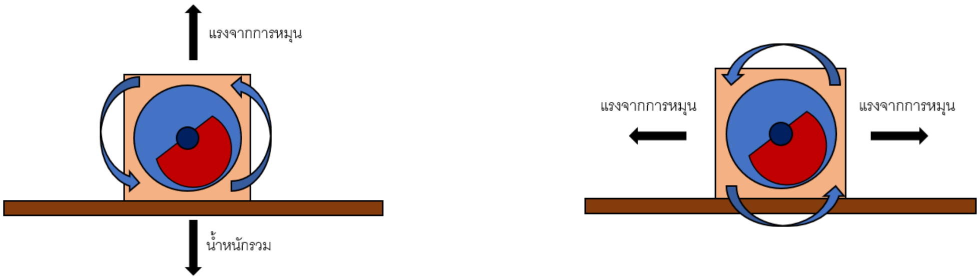
วัสดุที่เลือกใช้ในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน (Recycled Carbon Fiber) ดังภาพที่ 3(ก) และเนื้อเมทริกซ์ (Matrix) ดังภาพที่ 3(ข และ ค) โดยเส้นใยคาร์บอนจะมีลักษณะเป็นเส้นใยแบบสั้น (Short Fiber) ซึ่งคุณสมบัติจะแตกต่างจากเส้นใยแบบต่อเนื่อง ดังนั้นกระบวนการที่ใช้ในการขึ้นรูปจึงแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับอีกปัจจัยหนึ่งปัจจัยร่วมคือ เนื้อเมทริกซ์ โดยจะใช้ทั้งหมด 2 แบบ คือ พอลิโพรไพลีน (Polypropylene) เรียกย่อว่า PP และพอลิเอไมด์ (Polyamide) หรือไนลอน (Nylon) โดยทั้งสองชนิดนี้จะถูกพิจารณาคุณสมบัติต่างๆและความเป็นไปได้เพื่อใช้ขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

(ก) เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน (rCF) (ข) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene) (ค) ไนลอน (Nylon)

ภาพที่ 3 (ก) เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน (rCF) (ข) พอลิโพรไพลีน (Polypropylene) (ค) ไนลอน (Nylon)

4. การออกแบบการสั่นสะเทือนสำหรับการเรียงตัวของเส้นใย

การสั่นสะเทือนนั้นของระบบจะขึ้นอยู่กับมอเตอร์เขย่าที่ใช้ แรงที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแบบกลับไป-มา (Simple Harmonic Motion) การจัดเรียงตัวจะคำนึงถึงการสั่นเพียง 2 ทิศทางในแนว X หรือ ขนานกับพื้น ดังภาพที่ 4(ข) โดยการสั่นจะมีความถี่ที่คงที่ เพื่อให้เส้นใยไม่เกิดการเคลื่อนที่ไปด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไป ทำให้การปรับเรียงการจัดเรียงตัวของเส้นใยเสถียรมากขึ้น ซึ่งในแนวแกน Y หรือ แรงในแนวตั้งฉากกับพื้น ดังภาพที่ 4(ก) ไม่ต้องการให้เกิดการสั่นหรือเกิดการสั่นน้อยที่สุด เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ขึ้นลงทำให้เส้นใยเกิดการกระดอน การจัดเรียงตัวจึงทำได้ยาก จึงเลือกแรงที่เกิดขึ้นให้น้อยกว่ามวลรวมของระบบ



(ก) (ข)

ภาพที่ 4 ลักษณะการสั่นของมอเตอร์ในแนวแกน x (ก) และ y (ข)

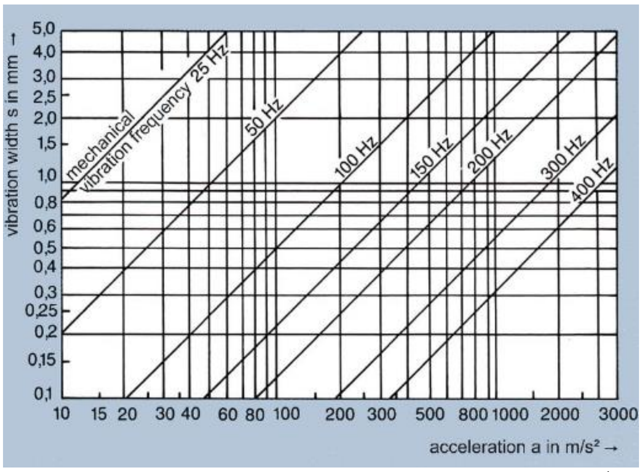
การเลือกมอเตอร์สำหรับสั่นในขนาดที่เหมาะสม จะผ่านการคำนวนด้วยสมการ (1) เพื่อหาขนาดของแรงที่ใช้ภายใต้น้ำหนักของระบบขนาด 100 กรัม เนื่องจากไม่ทราบแรงตั้งต้นที่จะป้อนเข้าระบบ และสมการ (2) หาขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสม ดังนี้

$$F_{\mathrm{c}} = m_{sum} \cdot a/1000 \qquad \text{(สมการที่ 1)}$$

แรงที่ระบบต้องการจากสมการที่ 1 คำนวนโดยใช้มวลรวมของระบบคือ 0.1 กิโลกรัม ส่วนอัตราเร่ง(a) สามารถหาได้จาก ภาพที่ 5 โดยใช้แอมพลิจูดของการสั่น คือ 3 มิลลิเมตร ประกอบกับความถี่ของมอเตอร์ คือ 50 Hz จะได้ค่า a ที่ 170 m/s^2 ดังนั้นเมื่อแทนในสมการข้างต้น จะได้แรงที่ระบบต้องการ 0.017 kN หรือ 1.733 Kg
หลังจากนั้นค่านี้จะถูกนำไปพิจารณากับมอเตอร์ที่จะใช้งาน

$$F_{\mathrm{c(motor)}} = m_u \cdot e \cdot \ \omega^2/1000 \qquad \text{(สมการที่ 2)}$$

ขนาดแรงของมอเตอร์ ($F_{c(motor)}$) จากสมการที่ 2 เมื่อ ω มีค่าเท่ากับ $2\pi f_m$ และ f_m มีค่าเท่ากับ 335 ดังนั้น ω มีค่า 2103.8 เมื่อคำนวนร่วมกับมอเตอร์น้ำหนัก 0.002 กิโลกรัม ร่วมกับค่า e ที่ 0.002 เมตร ขนาดของมอเตอร์ที่เลือกใช้ จะมีค่าแรงเขย่า 1.8049 kg ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงที่ระบบต้องการที่สุด



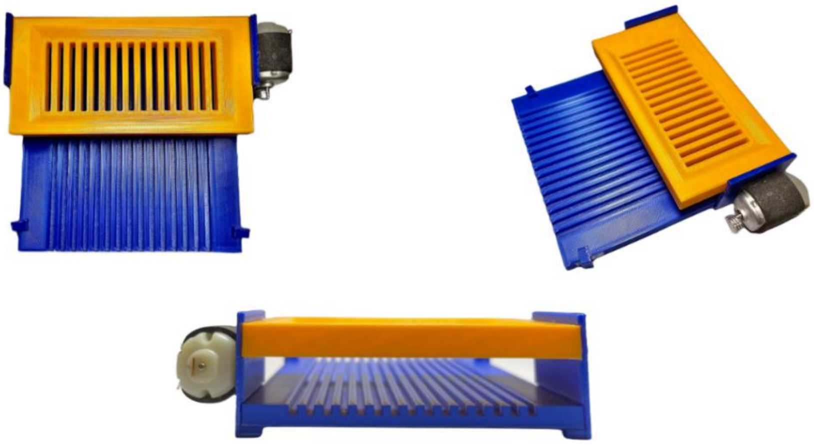
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ของแรงหนีศูนย์กลาง แอมพลิจูด และความเร็วการสั่นสะเทือน [10]

5. การพัฒนาเครื่องทดสอบการสั่นสะเทือนสำหรับการเรียงตัวของเส้นใย

โดยแต่ละกระบวนการจะมีการทดสอบในแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งอุปกรณ์และเครื่องมือที่สำคัญคือในส่วนของการจัดเรียงเส้นใย และการทำให้สั่นสะเทือน ที่ถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีดังนี้

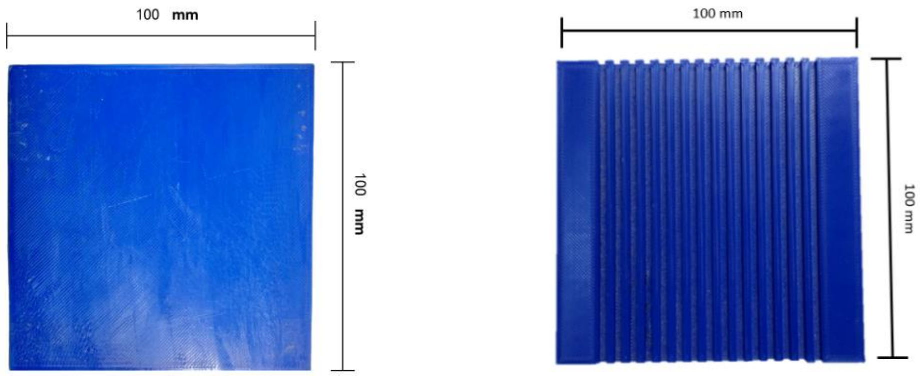
1 การสั่นเพื่อการเรียงตัว อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างเครื่องทดสอบ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เครื่องที่ทำให้เกิดการสั่นหรือมอเตอร์เขย่า และแผ่นสำหรับติดตั้งเครื่องสั่น โดยลักษณะของแผ่นที่ใช้จะมี 2 แบบ ได้แก่ แผ่นเรียบและแผ่นทดสอบชนิดมีร่อง มีข้อมูลดังนี้

1.1 มอเตอร์เขย่าไฟฟ้า (Vibration motor) โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ขนาดเล็ก แรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์ ความเร็วรอบ 3200 รอบต่อนาที ซึ่งมีหน้าที่ในการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่และการจัดตัวของเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล โดยใช้มอเตอร์ทำการสั่นฐานของพื้นที่จัดเรียงตัวเส้นใยคาร์บอนที่มีขนาดพื้นที่ 10x10 เซนติเมตร และถูกติดตั้งเข้ากับแผ่นกรอง ดังนั้นลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองจึงเป็นดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 มอเตอร์เขย่า และการติดตั้ง

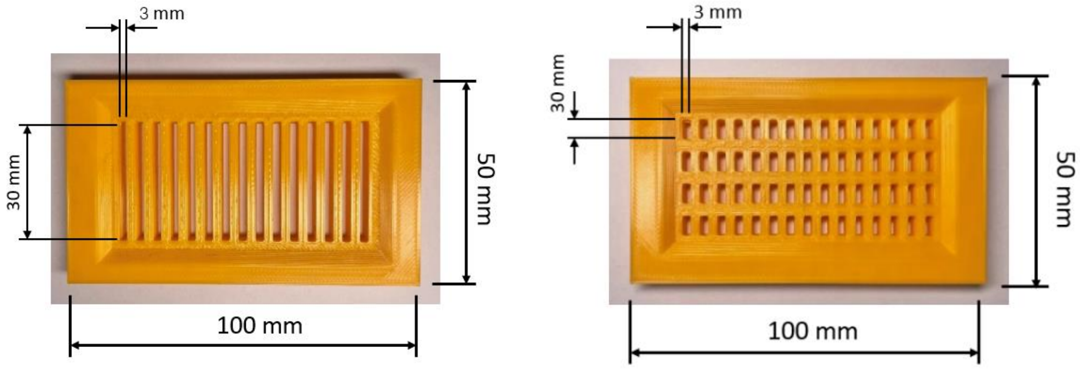
1.2 แผ่นทดสอบ ใช้ทดสอบในส่วนการจัดเรียงตัวของ rCF โดยจะใช้ด้วยกันทั้งหมด 2 แบบ คือ แผ่นแบบเรียบ และแผ่นแบบมีร่อง ดังแสดงในภาพที่ 7(ก) และ 7(ข) ตามลำดับ โดยใช้แผ่นที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร กว้าง 100 มิลลิเมตร และยาว 100 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นร่อง 15 ร่อง มีความลึก 3 ช่วง คือ 1 2 และ 3 มิลลิเมตร แตะละร่องมีความกว้าง 3 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบของการสั่นเพื่อปรับการเรียงตัวของเส้นใย



(ก) (ข)

ภาพที่ 7 ชนิดแผ่นทดสอบ (ก) แผ่นเรียบ (ข) แผ่นแบบมีร่อง

1.3) แผ่นกรองเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล มีหน้าที่ทำการกรองเส้นใยให้เส้นใยที่เกียวพันกันแยกออกจากกันได้มากที่สุด ซึ่งในการทดสอบนี้จะใช้ช่องกรอง 2 แบบ คือ ช่องยาว 30 มิลลิเมตร กว้าง 3 มิลลิเมตร และช่องสั้น ยาว 5 มิลลิเมตร กว้าง 3 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 8



(ก) (ข)

ภาพที่ 8 แผ่นกรองเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล (ก) แบบช่องยาว (ข) ช่องสั้น

6. ขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์

การนำวิธีวิเคราะห์หรือเครื่องวิเคราะห์มาใช้ในการปฏิบัติงานวิเคราะห์ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเพื่อ ประเมินประสิทธิภาพผลการวิเคราะห์ของวิธีหรือเครื่องวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปร ดังตารางที่ 1 และทำการศึกษาสิ่งที่จำเป็นได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์การเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอน (Fiber Alignment Analysis) ด้วยเทคนิค SEM จาก Preforms ที่ผลิตได้ของ VRH ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์ดอิมิชชั่น (FE-SEM) ยี่ห้อ TESCAN, Model : MIR

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์ความถี่ของการสั่น โดยพิจารณาต่อปริมาณและลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนโดยการเปรียบเทียบจากอุปกรณ์จริงและการคำนวน

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์อุณหภูมิ Glass Transition Temperature (Tg) และอุณหภูมิ Melting- Temperature (Tm) สำหรับทำนายอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูปวัสดุคอมโพสิต ด้วยเครื่องทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC)

ขั้นตอนที่ 4 ปรับอัตราส่วน Fiber Volume Fraction เพื่อดูปริมาณสูงสุดของเส้นใยคาร์บอน (Maximum Fiber Content) ที่สามารถเติมลงในเนื้อแมททริกซ์ของพอลิเมอร์ Polypropylene (PP) และ Nylon

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์อัตราการเรียงตัวของเส้นใย โดยอ้างอิงแนวแกนเพื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยที่เกิดการเรียงตัว โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์วัตถุบนภาพถ่าย Image J

ขั้นตอนที่ 6 ศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต พฤติกรรมความเค้น-ความเครียด (Stress–Strain Behavior) ด้วยการทดสอบแรงดึง (Tensile Tests) ด้วยมาตรฐาน ASTM D3039 สำหรับ Polymer Matrix Composite Materials ด้วยเครื่อง Tensile Testing ยี่ห้อ INSTRON ,Model : Bionix® Orthopaedic Subsystems (MTS)

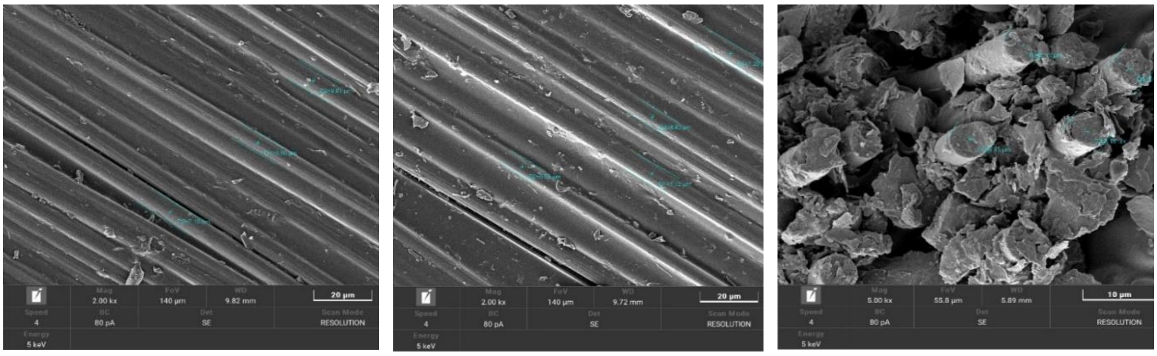
ตารางที่ 1 ตัวแปรที่ต้องการศึกษา

ตัวแปรที่ต้องการศึกษา (Variables/Factors)	**ค่าที่ศึกษา (Values)(หน่วย)**	**วิธีการที่ใช้ในการศึกษา**
1. การเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอน	ลักษณะและรูปแบบของเส้นใยก่อนทำการขึ้นรูปในกระบวนการ VAH (-)	ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์ดอิมิชชั่น (FE-SEM) ยี่ห้อ TESCAN ,Model : MIR
2. การสั่นเพื่อการเรียงตัว	ลักษณะการสั่นที่เหมาะสมสำหรับการปรับการเรียงตัวของเส้นใย (-)	ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดสอบในรูปแบบLab-Scale เพื่อทดสอบและบันทึกผล
3. อุณหภูมิสำหรับการหลอมพอลิเมอร์	อุณหภูมิ Glass Transition Temperature (Tg) และ Melting Temperature (Tm) (°C)	ทดสอบด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC)
4. อัตราส่วนพอลิเมอร์	อัตราส่วนที่มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบ (กรัม)	ปรับอัตราส่วนก่อนทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบโดยใช้ ผลรวมเส้นใย/พอลิเมอร์ 10 กรัม
5. อัตราการเรียงตัวของเส้นใย	ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยหลังจากการขึ้นรูป (องศา)	ใช้โปรแกรมวิเคราะห์วัตถุบนภาพถ่าย Image J
6. สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิต	ความสามารถในการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ (-)	ทดสอบแรงดึงด้วยมาตรฐาน ASTM D3039 ด้วยเครื่อง Tensile Testing ยี่ห้อ INSTRON ,Model : Bionix® Orthopaedic Subsystems (MTS)

ผลการวิจัย

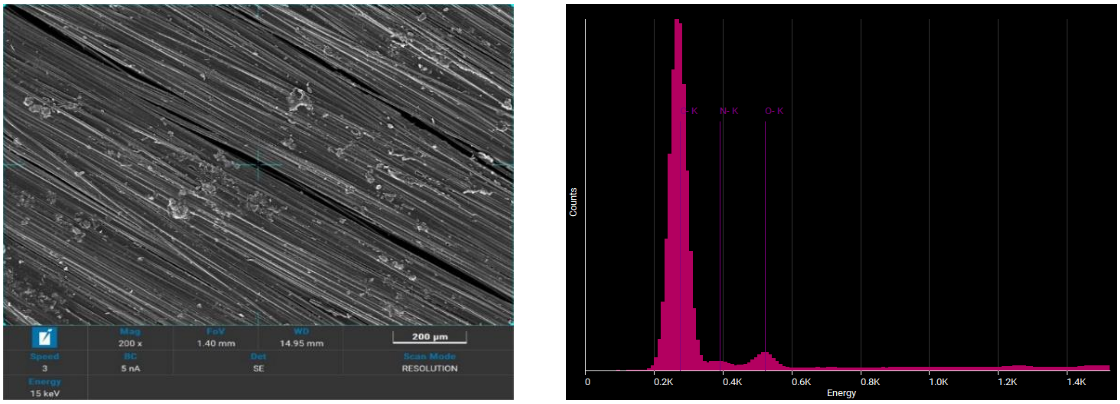
ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล

เส้นใยคาร์บอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นชนิดที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิล โดยมีลักษณะเป็นเส้นใยแบบสั้น (Short-Carbon Fiber) คุณสมบัติโดยทั่วไปจะแตกต่างกับเส้นใยคาร์บอนปกติ จึงได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของเส้นใยนี้ ผ่านการวิเคราะห์ทางเทคนิคด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อดูความเป็นผลึกของวัสดุคอมโพสิตต้นแบบ และความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยคาร์บอนและโพลิเมอร์ จะเห็นว่าจากภาพที่ 9 ขนาดเส้นใยจะอยู่ที่ 6-8 ไมโครเมตร และมีการปะปนอยู่เล็กน้อย ด้วยเศษตกค้างจากกระบวนการรีไซเคิล ซึ่งเส้นใยยึดกันด้วยอีพ๊อกซีบางๆ ทำให้การจับตัวระหว่างเส้นใยไม่แข็งแรง ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยใช้เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนนี้ซึ่งมี epoxy เดิมอยู่ ทำการขึ้นรูปด้วยการเติม เทอร์โมพลาสติกเข้าไป ซึ่งพอลิเมอร์ 2 ชนิดนั้นไม่ได้เกิดการรวมตัวกันขึ้น แต่เป็นการจับตัวกันระหว่างพอลิเมอร์ชนิดใหม่กับเส้นใยเดิมที่มี epoxy อยู่



ภาพที่ 9 ขนาดและลักษณะทางกายภาพของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน

เมื่อทำการนำเส้ยในรีไซเคิลคาร์บอนมาตรวจสอบธาตุองค์ประกอบจะพบว่า ธาตุคาร์บอนเฉลี่ยมีอยู่ถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือจะประกอบไปด้วยสิ่งเจือปนเล็กน้อย คือ ไนโตรเจน 8 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 6 เปอร์เซ็นต์ และยังมีธาตุอื่นเล็กน้อยเพียงไม่ถึง 1 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 10 (ก) พื้นที่วิเคราะห์ส่วนประกอบธาตุ (ข) อัตราส่วนธาตุ

การสั่นที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล

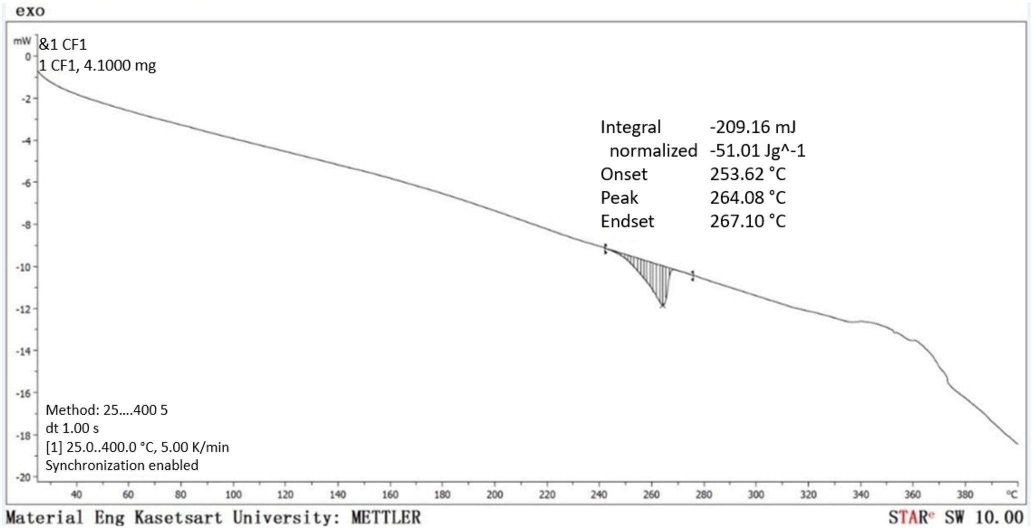
จากการทดสอบจะทำให้เห็นว่าการปรับความลึกของช่องจัดเรียงให้มีความลึก 1 2 และ 3 มิลลิเมตร ส่งผลต่อการกระจายตัวเส้นใย ซึ่งร่องลึก 3 มิลลิเมตรสามารถปรับเรียงได้ดีที่สุดเนื่องจากใช้แรงสั่นเพียง 2 ทิศทาง ทำให้ง่าย

ต่อการเคลื่อนตัวลงร่อง โดย ร่องลึก 2 และ 1 มิลลิเมตร การปรับเรียงตัวจะลดลงตามลำดับ ดังตารางที่ 4.3 ซึ่งปัจจัยหลักที่ส่งผลให้การจัดเรียงตัวเป็นได้ยาก คือ เส้นในคาร์บอนรีไซเคิลที่มีขนาดไม่เท่ากันและมีเส้นใยที่เกี่ยวพันกัน เมื่อเริ่มกระบวนการสั่นจึงทำให้เส้นใยแยกตัวและปรับเรียงตัวได้ จึงได้ออกแบบการแยกเส้นใยด้วยวิธีการกรองเพื่อแยกเส้นใยออกจากกัน โดยช่องกรอง 2 แบบ คือ ช่องยาว 30 มิลลิเมตร กว้าง 3 มิลลิเมตร และช่องแบบเว้น ยาว 5 มิลลิเมตร กว้าง 3 มิลลิเมตร ผลที่ได้คือช่องกรองร่องยาวสามารถกรองเส้นใยได้ดีกว่าช่องกรองร่องสั้นในรูปแบบของเส้นใยที่มีขนาดต่างกัน เนื่องจากเหตุผลด้านขนาดที่ได้กล่าวไปข้างต้น ทำให้ช่องกรองร่องสั้นเหมาะสำหรับเส้นใยที่ขนาดเท่าหรือใกล้กัน และระยะห่างระหว่างฐานกับแผ่นกรองที่มีประสิทธิภาพที่สุดในงานนี้คือ 0 ถึง 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะการเรียงตัวเมื่อถูกสั่นภายใต้เงื่อนไขต่างๆ หลังผ่านไปในเวลา 15 วินาที

เงื่อนไข	**การเปลี่ยนแปลงหลังเกิดการสั่น 15 วินาที**	
	ก่อน	**หลัง**
สั่นบนแผ่นแบบมีร่องร่วมกับแผ่นกรองร่องยาวห่าง 0 – 0.5 มิลลิเมตร		
สั่นบนแผ่นแบบมีร่องร่วมกับแผ่นกรองร่องสั้นห่าง 0 - 0.5 มิลลิเมตร		

ลักษณะของเส้นใยคาร์บอนในงานวิจัยนี้ซึ่งผ่านกระบวนการรีไซเคิลได้ปริมาณธาตุคาร์บอนอยู่ที่ 85 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้คุณสมบัติการทนความร้อนไปจนถึงการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของเหลวลดลงจากเส้นใยดั้งเดิม จึงได้มีการผ่านกระบวนการตรวจสอบสามารถวัดค่าได้คือ เริ่มเปลี่ยนแปลงสถานะที่ 253.62 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสิ้นสุดที่ 267.10 องศาเซลเซียส โดยจุดพีคอยู่ที่ 264.08 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 11

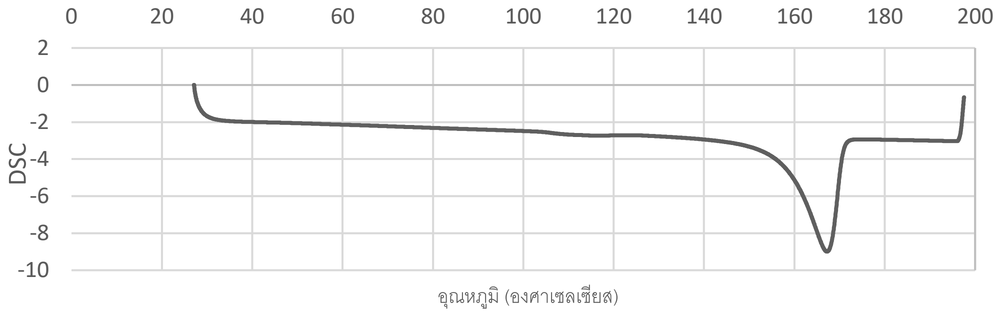


ภาพที่ 11 จุดหลอมเหลวของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน

จุดหลอมเหลวของโพลิเมอร์

ทดสอบกับโพลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ พอลิโพรไพลีน (Polypropylene) และ ไนลอน (Nylon) ทดสอบผ่านการเครื่องมือทดสอบ Differential Scanning Calorimetry (DSC) เพื่อหาอุณภูมิที่เหมาะสมในงานวิจัยได้ดังนี้

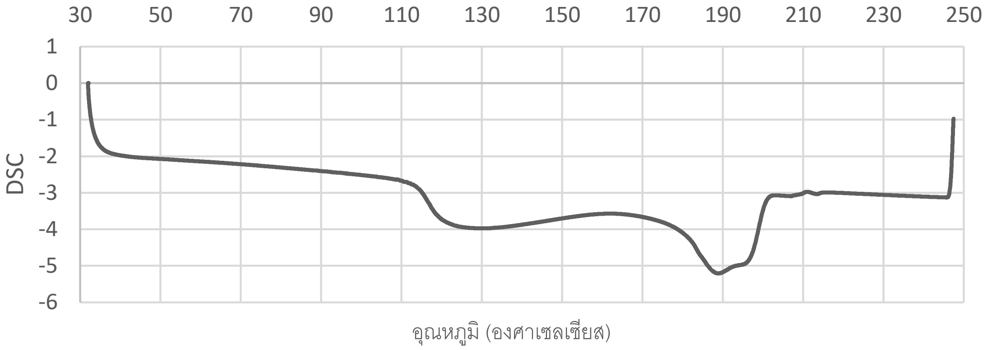
Polypropylene (PP) เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็งจนกระทั่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 157 องศาเซลเซียส สิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 172 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 12 ซึ่งจุด Melting peak ที่ 164 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึง 100 องศาเซลเซียส สถานะจะเริ่มเกิดการละลาย และเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวอย่างสมบูรณ์เมื่อถึง 178 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 12 กราฟจุดหลอดเหลวของพอลิโพรไพลีน (Polypropylene) โดย DSC

ไนลอน (Nylon) หรือ Polyamide เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของแข็ง จนกระทั่งเป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส สิ้นสุดการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ 196 องศาเซลเซียส ดังภาพที่ 13 มีจุด Melting peak อยู่ที่ 188 องศาเซลเซียส โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะจะเกิดขึ้นเมื่อได้รับความร้อนที่เพิ่มขึ้นกระทั่งอุณหภูมิถึง 102 องศา

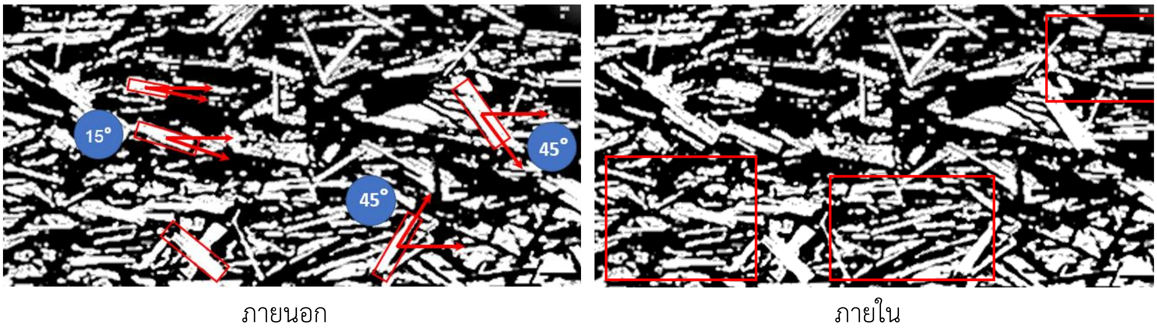
เซลเซียส จะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเข้าสู่ของเหลวอย่างสมบูรณ์ที่ 216 องศาเซลเซียส ซึ่งไนลอนในช่วงการหลอมเหลว 0 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ จะมีความหนืดที่สูง ส่งผลให้ไม่เหมาะแก่การขึ้นรูปที่ต้องมีกระบวนการไหล ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการนำวัสดุ PP ไปเป็นเมทริกซ์ผสมกับเส้นใยคาร์บอนรีไซเคิล



ภาพที่ 13 กราฟจุดหลอมเหลวของไนลอน (Nylon) โดย DSC

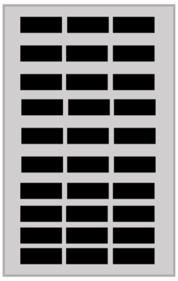
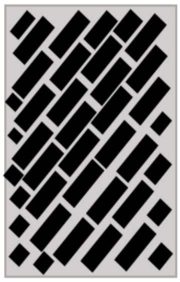
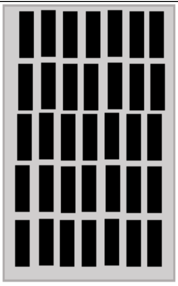
การเรียงตัวของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน

เนื่องจากการขึ้นรูปต้องการให้เกิดการเรียงตัวของเส้นใยเป็นแนวแกนเดียวกันเพื่อให้สามารถรับแรงในแนวแกนได้ดี ดังนั้นจึงต้องพิจารณาลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยเมื่อขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ผ่านกระบวนการ VAH ซึ่งได้นำภาพมาพิจารณาผ่านโปแกรม ImageJ และวิเคราะห์การคลาดเคลื่อนไปจากแนวแกนที่เป็นแกนหลัก พบว่ามีเส้นใยจำนวนหนึ่งบริเวณผิวนอกของชิ้นงานมีการเรียงตัวที่ผิดไปจากแกน ตั้งแต่ 0 – 45 องศา โดยเกิดจากการขึ้นรูปชิ้นงานที่ได้ทำการเคลือบพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์ได้รับความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลว เส้นใยจึงเกิดการเปลี่ยนทิศทางเล็กน้อยประกอบกับขนาดเส้นใยที่มีขนาดเล็กและสั้น ทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของเส้นใยขึ้น ซึ่งต่างจากภายในที่มีการจัดเรียงตัวในแนวแกนที่ดี ทำให้ในกระบวนการขึ้นรูปพร้อมพอลิเมอร์เกิดการเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยตั้งแต่ 0 ถึง 10 องศา หรืออาจไม่เกิดเลย ดังแสดงในภาพที่ 14 และถูกทำไปทดสอบผ่าน Tensile Test พบว่ารอยฉีกขาดจะเกิดขึ้นตามแนวการทำมุมของเส้นใยใกล้บริเวณกึ่งกลางของชิ้นงานทดสอบ ทั้งในกรณีทำมุม 0 45 และ 90 ซึ่งหากสังเกตจะพบว่าในกรณีทำมุม 90 จะมีการฉีกขาดที่เกิดจากการดึงกันระหว่างเส้นใย ทำให้รอยฉีกขาด ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 14 การวิเคราะห์แนวการเรียงตัวของเส้นใยด้วยโปรแกรม ImageJ

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการฉีกขาดของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน

การทดสอบ	**มุมของเส้นใย (องศา)**		
	0	**45**	**90**
ก่อนทดสอบ			
หลังทดสอบ			
ภาพจำลองแนวการเรียงตัว			

อัตราส่วนเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนต่อพอลิเมอร์และการทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง

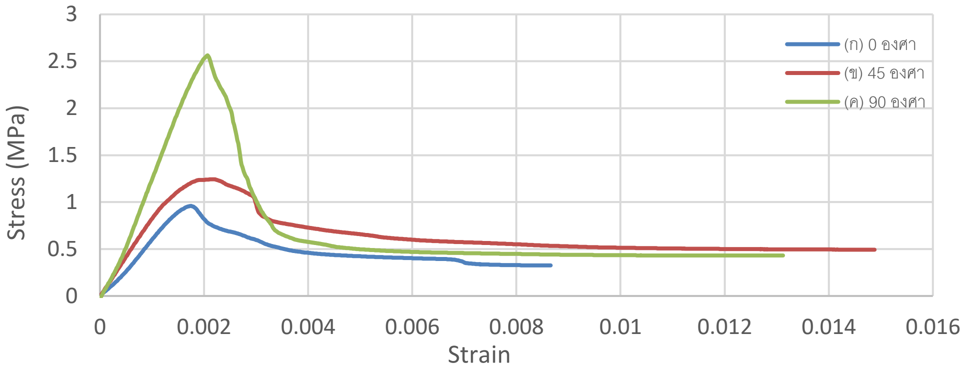
อัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนแบบสั้นต่างจากเส้นใยเดิม เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเส้นใยมีลักษณะเป็นชิ้น และถูกยึดและเสริมแรงด้วยเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน (Resin) เพื่อเสริมความแข็งแรง หากปริมาณเรซินมากจะส่งผลให้เกิดบริเวณที่มีเรซินเปล่า ที่ไม่มีโครงหลักอย่างเส้นใยคาร์บอน ทำให้บริเวณนั้นเปราะบางและแตกง่าย ในส่วนนี้จึงใช้ปริมาณเรซินที่พอเหมาะสำหรับเคลือบผิวเส้นใยและคอยยึดจับระหว่างเส้นใยเท่านั้น โดยปริมาณเส้นใยต่อเรซิน คือ 25/75 20/80 และ 15/85 โดยน้ำหนัก ด้วยน้ำหนักรวม (เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนและพอลิเมอร์) 10 กรัม ในการขึ้นรูปชิ้นงาน มีการทำมุมกับแนวแกนของเส้นใย 0° 45° 90° และการเรียงตัวแบบสุ่ม

โดยทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีขนาดกว้าง 25 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร และหนา 2.5 มิลลิเมตร โดยลักษณะการเรียงตัว 2 แบบ คือ การเรียงตัวในแนวเดียวกันที่มีการเรียงตัวทำมุม 0 45 และ 90 องศา และการเรียงตัวแบบสุ่ม ซึ่งจะมีการใช้อัตราส่วนเส้นใยต่อพอลิเมอร์ 15/85 20/80 และ 25/75 และทำการทดสอบ Tensile Test ในมาตรฐาน ASTM D3039 สำหรับ Polymer Matrix Composite Materials ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการทดสอบ ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดได้แก่ อัตราส่วนเส้นใยต่อพอลิเมอร์ 20/80 จึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบภายใต้หน่วยทำมุมได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงของชิ้นงาน 0 45 และ 90 องศา

อัตราส่วนเส้นใยต่อพอลิเมอร์	แรงที่สามารถรับได้ (N)			
	90°	45°	0°	เรียงตัวแบบสุ่ม
25 ต่อ 75	103.96	77.70	37.74	-
20 ต่อ 80	160.22	87.57	59.91	39.35
15 ต่อ 85	110.02	86.79	42.21	-

จากภาพที่ 14 จะเห็นว่าวัสดุ rCFRP ของงานวิจัยนี้มีลักษณะการแตกหักแบบเปราะ (Brittle Fractures) เนื่องจากกราฟจะมีการพุ่งขึ้นจนถึงจุดแตกหัก และลดลงจนกระทั่งคงที่ แสดงให้เห็นถึงการแตกหักแบบทันที โดยมีการยืดออกเล็กน้อยก่อนที่จะฉีกขาดโดนสมบูรณ์ เมื่อนำชิ้นงานอัตราส่วนเส้นใยต่อพอลิมเมอร์ที่ดีที่สุด คือ 20 ต่อ 80 มาเปรียบเทียบระหว่างเส้นใยทำมุม 0 45 และ 90 องศา พบว่าเส้นใยทำมุม 90 องศา สามารถรับแรงดึงในแนวแกนและมีค่ามอดูลัสดีที่สุด รองลงมาเป็น 45 และ 0 องศา ตามลำดับ โดยเหตุผลที่ทำให้ชิ้นงานที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วน 20 ต่อ 80 และทำมุม 90 องศา หรือทิศเดียวกับแนวแกน เนื่องจากการเลียบแบบลักษณะทางธรรมชาติของเส้นใยคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว โดยในกรณีนี้ เส้นใยมีลักษณะแบบสั้น จึงได้ทำการปรับเส้นใยให้อยู่ในแนวแกนเดียวกัน ก่อนเสริมแรงด้วยพอลิเมอร์คอมโพสิท ดังนั้นแรงจะถูกส่งถ่ายกันในแนวยาวของเส้นใยสู่พอลิเมอร์และส่งต่อสู่เส้นใยไปตลอดสาย จึงได้ผลลัพธ์ออกมา ดังภาพที่ 14 และได้ทำการเปรียบเทียบลงในตารางที่ 5



ภาพที่ 14 กราฟเปรียบเทียบความสามารถในการการรับแรงดึงของชิ้นงานทดสอบในอัตราส่วนเส้นใยต่อพอลิเมอร์ 20 ต่อ 80 ของการทำมุม (ก) 0 (ข) 45 และ (ค) 90 องศา

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่ามอดูลัสของชิ้นงานทดสอบที่มุมต่างๆ ซึ่งได้ผลดีที่สุดในอัตราส่วน คือ 20 ต่อ 80

ชิ้นงานทดสอบ (เส้นใย/พอลิเมอร์/องศา)	มอดูลัส (Modulus) (MPa)
20/80/0	519.82
20/80/45	798.10
20/80/90	1091.90
20/80/เรียงตัวแบบสุ่ม	321.13

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบกระบวนการจัดเรียงเส้นใยด้วยการสั่นสะเทือนทางกล ซึ่งเลือกใช้การสั่นไป-กลับ ในแนวระนาบ เพื่อปรับการเรียงตัว ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับเส้นใยคาร์บอนที่เรียงตัวเป็นแนวยาว ซึ่งประกอบด้วยวิธีการทดสอบ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ทดสอบการสั่นเพื่อปรับการเรียงตัวในระดับห้องทดลอง (Lab-Scale) ส่วนที่สองเป็นการทดสอบถึงการหลอมละลายของพอลิเมอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาตัวแปรดังนี้ ลักษณะของเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน การสั่นสะเทือน อุณหภูมิหลอมละลายของพอลิเมอร์ อัตราส่วนเส้นใยต่อพอลิเมอร์ การเรียงตัวของเส้นใย และสมบัติทางกลของคอมโพสิต

ผลการทดสอบในตัวแปรต่างๆมีดังนี้ เส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนมีลักษณะเป็นเส้นใยที่ถูกยึดต่อกันด้วยอีพ็อกซีบางๆ ส่งผลให้การจับตัวระหว่างเส้นใยไม่แข็งแรงและหากต้องการนำมาขึ้นรูปจะไม่เกิดการเรียงตัว จึงได้นำมาผ่านกระบวนการสั่นที่ได้ถูกออกแบบและประดิษฐ์ โดยใช้อุปกรณ์ที่ประกอบด้วยฐานที่มีลักษณะเป็นร่อง ถูกติดตั้งด้วยมอเตอร์สั่นสะเทือนด้านข้างทั้งสองด้าน และใช้ร่วมกับแผ่นกรองแบบยาว ที่มีความกว้างรูกรองใกล้เคียงกับเส้นใย คือ 3 มิลลิเมตร โดยความห่างระหว่างแผ่นกรองกับฐาน 0.0-0.5 มิลลิเมตร ทั้งหมดจะถูกติดตั้งและสั่นไปพร้อมกัน จากนั้นจึงได้ทดสอบเพิ่มเติมถึงคุณสมบัติทางอุณหภูมิของพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้ พบว่า พอลิโพรไพลีน มีจุดหลอมเหลว (Melting peak) อยู่ที่ 164 องศาเซลเซียส ซึ่งจากกราฟการหลอมเหลวจะมีความเสถียรมากกว่า ไนลอน ซึ่งจุดหลอมเหลว (Melting peak) มากกว่าอยู่ที่ 188 องศาเซลเซียส ทั้งยังมีความหนืดที่มากกว่า ด้วยเหตุนี้จึงได้ใช้พอลิโพรไพลีนในการขึ้นรูปร่วมกับเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอน ดังนั้นส่วนของการทำความร้อนในงานวิจัยนี้จากผลทดสอบสามารถแบ่งช่วงทำความร้อนออกเป็น 3 ช่วง คือ Pre-heating (T_1) อุณหภูมิห้องจนถึง 166 องศาเซลเซียส และ heating (T_2) ที่อุณหภูมิ 166 ถึง 172 องศาเซลเซียส และปล่อยให้เย็นตัว (T_3) จากนั้นทำการวิเคราะห์เส้นใยที่ผ่านกระบวนการสั่นด้วยโปรแกรม Image J จะเห็นว่าเส้นใยที่อยู่ภายในมีการเรียงตัวในแนวแกนตามที่ต้องการ ส่วนเส้นใยบริเวณผิวหน้าหรือภายนอก มีส่วนหนึ่งเบนตัวออกไปจากแนวแกน 0 ถึง 45 องศา ซึ่งเกิดจากสิ่งเร้าภายนอก เช่น ลม หรือปัจจัยอื่นๆ เนื่องจากเส้นใยนี้มีน้ำหนักที่เบามากอาจเกิดขึ้นได้ขณะสั่นเรียงตัว ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ ก่อนนำชิ้นงานไปทดสอบความสามารถในการรับแรงดึง (Tensile test) โดยใช้อัตราส่วนเส้นใยต่อพอลิเมอร์มาเป็นข้อกำหนดดังนี้ คือ 25/75 20/80 และ 15/85 โดยมีน้ำหนักรวม 10 กรัม นำมาขึ้นรูปร่วมกับการใช้องศาการเรียงตัวของเส้นใย 0 45 และ 90 เมื่อทดสอบผ่านการรับแรงในแนวแกนพบว่าอัตราส่วนที่ดีสุด คือ 20/80 15/85 และ 25/75 ตามลำดับ ในทุกๆองศาการทำมุม

จากการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบ ที่มีการเรียงตัวในแนวแกวเดียวกันและเรียงตัวแบบสุ่มทำให้เห็นว่า การเรียงตัวในแนวแกนเดียวกัน จะเกิดการยึดเกาะระหว่างเส้นใยรีไซเคิลคาร์บอนไฟเบอร์กับโพลิเมอร์ในแกนนั้นเป็นแนวยาว ส่งผลให้การรับแรงดึง (Tensile Strength) ดีกว่าการเรียงตัวแบบสุ่ม โดยเมื่อเปรียบเทียบในสัดส่วนเส้นใยต่อพอลิเมอร์ที่เท่ากันคือ 20 ต่อ 80 โดยทำมุม 0 45 และ 90 องศา พบว่าการเรียงตัวแนว 90 องศา ให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด

ข้อเสนอแนะ

วัสดุ rCFRP ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นเส้นใยแบบสั้นที่ถูกเสริมแรงด้วยพอลิเมอร์คอมโพสิท ดังนั้นจึงมีลักษณะคล้ายกับ Forged Carbon Fiber หากแต่คุณสมบัติจะด้อยกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบ เนื่องจากเส้นใยในงานวิจัยนี้เป็นแบบรีไซเคิล ที่เหมาะสำหรับการสร้างชิ้นงานที่ต้องการราคาให้ถูกลง แต่ยังคงคุณสมบัติที่ดีไว้ ทั้งนี้สามารถนำไปต่อยอดได้ในขั้นตอนเต็มของกระบวนการ VAH ซึ่งจะถูกนำไปซ้อนทับกันและบีบอัดด้วยสุญญากาศให้เป็นเนื้อเดียวกันต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจากบุคคลที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ศูนย์เครื่องมือวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตลอดไปจนถึง บริษัท บางกอก โพลีซีท ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาล้วนให้การสนับสนุนอุปกรณ์การวิจัย เครื่องมือทดสอบ และสถานที่ เป็นผลให้งานวิจัยนี้ดำเนินการได้อย่างราบรื่นและสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. Grand View Research. Lightweight materials market size, share & trends analysis report by product (aluminum, high strength steel), by application (automotive, aviation, energy), by region, and segment forecasts [online] 2017 Feb 18 [cited 2021 Apr 2]. Available from: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lightweight-materials-market
2. Callister WD. Materials science and engineering: An introduction. 7th ed. Hoboken: Wiley; 2006.
3. Suleman A, Chansoria P, Shirwaiker R. Ultrasound-assisted vat photopolymerization 3D printing of preferentially organized carbon fiber reinforced polymer composites. Journal of Manufacturing Processes. 2020;56:1340–1343.
4. Anwera A, Naguib HE. Multi-functional flexible carbon fiber composites with controlled fiber alignment using additive manufacturing. Additive Manufacturing. 2018;22:360–367.
5. Haslam M, Raeymaekers B. Aligning carbon nanotubes using bulk acoustic waves to reinforce polymer composites. Composites Part B: Engineering. 2014;60:91–97.
6. Suleman A, Chansoria P, Shirwaiker R. Ultrasound-assisted vat photopolymerization 3D printing of preferentially organized carbon fiber reinforced polymer composites. Journal of Manufacturing Processes. 2020;56:1340–1343.
7. Anwera A, Naguib HE. Multi-functional flexible carbon fiber composites with controlled fiber alignment using additive manufacturing. Additive Manufacturing. 2018;22:360–367.
8. Fang LG, Jin MH, Tao G, Yu TF, Cheng YH, Yuan QL, et al. Modeling and characterizations of mechanical behaviors of short carbon fiber and short glass fiber reinforced polyetherimide composites. Composites Science and Technology. 2022;229:109685.
9. Alarifi IM. Investigation into the structural, chemical and high mechanical reforms in B4C with graphene composite material substitution for potential shielding frame applications. Molecules. 2021;26(7):1921.
10. Brecon. Theoretical foundations and nominal values [online] 2022 Jan 15 [cited 2022 May 18]. Available from: https://brecon.de/en/know-how-center/theoretical-foundations-and-nominal-values/