



การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อคาร์บอนไฟเบอร์ที่เติมโพลีเมอร์ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน

นิรุต อ่อนสลุง*

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร

มานะ วิชางาม

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1058 1199 อีเมล: onsalung@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.05.005

รับเมื่อ 28 ตุลาคม 2562 แก้ไขเมื่อ 30 มกราคม 2563 ตอบรับเมื่อ 16 มีนาคม 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 25 พฤษภาคม 2563

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อคาร์บอนไฟเบอร์เติมโพลีเมอร์ภายใต้แรงกระทำในแนวแกนที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน 6 รูปแบบ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศและเติมโพลีเมอร์ชนิดพอลิยูรีเทน ความหนาแน่น 50, 100 และ 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ชิ้นงานถูกทดสอบภายใต้แรงกระทำด้วยเครื่องทดสอบการกระแทก โดยใช้ความเร็วของหัวค้อน 6.76 เมตรต่อวินาที ณ จุดตกกระทบ ผลการศึกษาพบว่า ลักษณะการเสียหายของชิ้นงานมี 2 ลักษณะ คือ แบบที่ 1 เสียหายแบบแตกแยกและบานออกจากกัน พบในกลุ่มการวางมุมของเส้นใย [0/90] แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ยุบเข้าด้านในท่อแล้วบานออกด้านนอกของท่อ การเสียหายแบบที่ 2 จะเกิดการเสียหายแบบแตกแยกและบานออกจากกันในแนวเฉือน ซึ่งพบในกลุ่มการวางมุมของเส้นใย [45/-45] และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของความหนาแน่นโพลีเมอร์พบว่า ชิ้นงานที่มีความหนาแน่นโพลีเมอร์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยสูงขึ้น แต่ส่งผลทำให้ค่าพลังงานดูดซับมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้นเกิดการยุบตัวน้อยลง

คำสำคัญ: พลังงานดูดซับ การชนกระแทก พอลิยูรีเทนโพลีเมอร์



The Energy Absorption Capacity of Foam-filled Carbon Fiber Tube Subjected to Axial Impact

Nirut Onsalung*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Industry and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Sakon Nakhon Campus, Sakon Nakhon, Thailand

Mana Wichangarm

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1058 1199, E-mail: onsalung@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2020.05.005

Received 28 October 2019; Revised 30 January 2020; Accepted 16 March 2020; Published online: 25 May 2020

© 2020 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

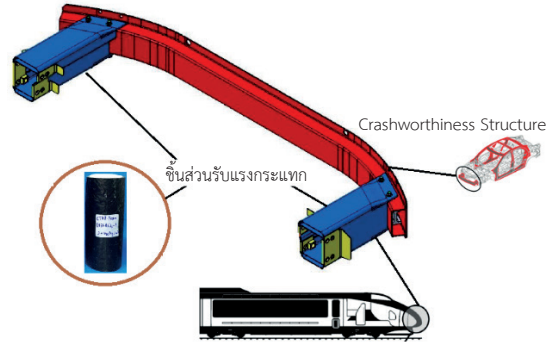
This research is an experimental study to investigate the energy absorption capacity of carbon fiber tube under axial impact test. The specimen consist of 6 patterns which fabricated by using vacuum infusion method. The entire specimen filled with polyurethane foam at density 50, 100 and 150 kg/m³. The specimens are tested by drop hammer testing machine. The speed of drop head hammer to impact surface specimen is 6.76 m/s. The results found that the collapse mode are occurring into 2 patterns i.e. type 1 the specimen are broken out and folds diverge out which mostly found in the ply angle of carbon fiber [0/90]. Type 2 the collapse folds move to inwards and then the folds are collapse outwards and broken which found that the ply angle of specimen [45/-45]. Considering the influence of foam density, the result shown that while the density of foam-filled increase the maximum load and the mean load are higher while the energy absorption are tend to decrease. In this reason, due to the increased of strength of the specimen and the specimen are reduced collapse displacement.

Keywords: Energy Absorption, Crashworthiness, Polyurethane Foam

1. บทนำ

โครงสร้างส่วนหน้าของรถยนต์มีความสำคัญต่อการป้องกันความเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน (Crashworthiness Structure) และมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความปลอดภัยของผู้โดยสารในกรณีที่เกิดการชน พลังงานที่เกิดจากการชนจะทำให้โครงสร้างเกิดการยุบตัว พลังงานจะถูกถ่ายเทมายังส่วนรับแรงกระแทกและส่งไปยังห้องผู้โดยสารโดยอันตรายต่อผู้โดยสารจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานที่เหลืออยู่ หากสามารถดูดซับพลังงานที่เหลือเหล่านี้ได้ก่อนที่จะส่งผลมายังผู้โดยสารก็จะทำให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้น และลดความเสี่ยงของอันตรายอันจะทำให้เกิดความสูญเสียชีวิตของผู้ขับขี่ ซึ่งมีการศึกษามาอย่างต่อเนื่อง [1], [2] ในการออกแบบทางด้านวิศวกรรมการชนกระแทกมีตัวแปรที่สำคัญได้แก่ ความสามารถการดูดซับพลังงานและรูปแบบการเสียหายโครงสร้าง นอกจากนี้ผู้ออกแบบยังต้องพยายามเลือกใช้ขนาด รูปร่าง ชนิดวัสดุ ภาวะที่กระทำให้เป็นตามความต้องการตามเงื่อนไขของตัวแปร ชิ้นส่วนดูดซับพลังงานที่เสริมในส่วนหน้าของโครงสร้างยานยนต์ดังแสดงในรูปที่ 1

โดยทั่วไปโครงสร้างยานพาหนะมักจะทำด้วยโลหะ เช่น เหล็ก หรืออะลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งพบว่า ให้ผลในการดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกได้ดี [3] แต่วัสดุเหล่านี้มีน้ำหนักมาก อีกทั้งต้นทุนที่ใช้ในการผลิตค่อนข้างสูง ซึ่งนักวิจัยหลายๆ กลุ่มก็ทราบข้อมูลนี้เป็นอย่างดี และพยายามที่จะลดน้ำหนักและลดต้นทุนในกระบวนการผลิต การวิจัยในช่วงปัจจุบันนี้นักวิจัยได้ให้ความสำคัญกับวัสดุประกอบ (Composite Materials) อย่างมาก โดยเฉพาะวัสดุประกอบที่ขึ้นรูปจากเส้นใยด้วยการถัก เช่น เส้นใยแก้ว เส้นใยไฟเบอร์กลาส และเส้นใยคาร์บอน ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อน ไม่เหนียวนาทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และที่สำคัญมีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนได้ดี เนื่องจากวัสดุจะขึ้นรูปจากการถักเส้นใยจะมีการจัดเรียงมุมไขว้กันแบบต่างๆ เพื่อเสริมความแข็งแรง ซึ่งได้รับความนิยมในโครงสร้างของเครื่องบินอากาศยานเนื่องจากมีความแข็งแรงและความทนทานต่อการกัดกร่อนและความล้า [4] นอกจากนี้



รูปที่ 1 ชิ้นส่วนดูดซับพลังงานที่เสริมในส่วนหน้าของโครงสร้างยานยนต์

ยังมีการวิจัยเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างด้วยวิธีการต่างๆ หนึ่งในนั้นก็คือ การเติมโฟม เช่น พีวีซีโฟม [5] พอลิยูรีเทนโฟม [6] ซึ่งโฟมมีคุณสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบาและความแข็งแรงสูง จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การเติมโฟมลงในท่อโลหะ เช่น ท่ออะลูมิเนียมพบว่า อิทธิพลของโฟมสามารถเปลี่ยนโหมดการเสียหายของชิ้นงานได้ [7] นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเกี่ยวกับรูปทรงของชิ้นงาน เช่น ทรงกระบอก ทรงกรวย หรือศึกษาทิศทางมุมเอียงของภาวะที่กระทำกับชิ้นงาน [8] เนื่องจากการพัฒนาชิ้นส่วนที่รับการชนกระแทก โดยเฉพาะบริเวณด้านหน้าของยานยนต์มักจะออกแบบให้ชิ้นส่วนรับแรงกระแทกในแนวแกนเป็นหลักและสามารถยุบตัวได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือการยุบตัวที่เหมาะสมของชิ้นส่วนสามารถดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกได้ดี และเพิ่มความปลอดภัยกับผู้โดยสารได้เมื่อเกิดการชนกระแทก การทดสอบการชนกระแทกด้วยแรงในแนวแกนเป็นที่นิยมในระดับห้องปฏิบัติการเพราะจะทำให้ทราบถึงภาวะกระทำเทียบกับเวลาขณะที่กระแทก (Load-time) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้าง โดยผลการศึกษากการชนด้วยความเร็วต่ำของท่อไฟเบอร์กลาสเติมโฟมพบว่า ท่อที่เติมโฟมนั้นสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าท่อโลหะที่เติมโฟม 1050 เฟอร์เซ็นต์ และสามารถลดน้ำหนักลงได้ 11 เฟอร์เซ็นต์ [9] นอกจากนี้การใช้คาร์บอนไฟเบอร์เสริมแรงด้วยอีพ็อกซีเรซิน และเติมโฟม ซึ่งได้ทำการทดสอบโดยการเติมโฟมในท่อคาร์บอน

แบบช่องย่อยที่แตกต่างกัน 7 รูปแบบ โดยทำการทดสอบโดยใช้แรงกดในด้านขวางของชิ้นงาน (Lateral Compression) ผลการศึกษาพบว่า ชิ้นงานที่เติมโฟมในรูปแบบที่ 6 สามารถดูดซับพลังงานได้สูงที่สุด [10] การศึกษาทดลองการชนด้วยความเร็วต่ำของท่อคาร์บอนไฟเบอร์เสริมแรงโดยขึ้นรูปชิ้นงานในสองรูปแบบคือ เป็นท่อกลมแบบปิดและแบบเปิดโดยมีการวางมุมของเส้นใยที่แตกต่างกันผลการทดสอบพบว่า มีรูปแบบการเสียหายเกิดขึ้น 3 รูปแบบ [11] การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของกล่องอะลูมิเนียมที่ขึ้นรูปแบบรังผึ้งและมีการเสริมแรงด้วยท่อคาร์บอนไฟเบอร์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าคอลัมน์อะลูมิเนียมทรงสี่เหลี่ยมที่เสริมด้วยคาร์บอนไฟเบอร์เสริมแรงแบบรังผึ้งมีการดูดซับพลังงานการดูดซับพลังงานจำเพาะ และประสิทธิภาพการกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 60.6 เปอร์เซ็นต์ 27.8 เปอร์เซ็นต์ และ 17.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ [12]

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า วัสดุประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์นั้นสามารถที่จะดูดซับพลังงานจากการชนได้ดีกว่าวัสดุประเภทโลหะ อย่างไรก็ตาม การศึกษาถึงความหนาแน่นของโฟมที่เติมในท่อคาร์บอนไฟเบอร์ที่มีขนาดมุม และจำนวนชั้นของเส้นใยที่มีผลต่อความเสียหายของชิ้นงานจากการชนกระแทกในแนวแกนนั้นยังต้องทำการศึกษาเพิ่มเติม โดยเฉพาะอิทธิพลของการวางมุมเส้นใยและวัสดุที่เติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เช่น โฟมเป็นการพัฒนาวัสดุประกอบให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น และสามารถประยุกต์ใช้งานได้ในงานระดับอุตสาหกรรม

ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อคาร์บอนไฟเบอร์ที่เติมโฟมภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน โดยจะทำการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะการเสียหายของชิ้นงาน ค่าภาระสูงสุด ค่าภาระเฉลี่ย และความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อคาร์บอนไฟเบอร์ที่เติมโฟม รวมถึงศึกษาความหนาแน่นของโฟมที่มีผลต่อพฤติกรรมกรรมการเสียหายของชิ้นงาน อันจะเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ด้านวัสดุรับแรงชนกระแทก และนำไปสู่การผลิตเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ของประเทศต่อไป



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2 โฟมพอลิยูรีเทน (ก) โฟมขาวหรือพอลิโอล (ข) โฟมดำหรือไดไอโซไซยาเนต (ค) พอลิยูรีเทนโฟม

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

2.1.1 การขึ้นรูปโฟม

การศึกษานี้จะใช้โฟมพอลิยูรีเทนในการขึ้นรูปสำหรับใช้ในการทดสอบ คุณสมบัติเป็นโฟมชนิดแข็ง (Rigid Polyurethane Foam) มีคุณสมบัติเด่น เป็นฉนวนที่ติดไฟแต่ไม่ลามไฟ มีน้ำหนักเบา และแข็งแรง มีประสิทธิภาพสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิระหว่าง -70 ถึง 100 องศาเซลเซียส มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี โฟมชนิดนี้เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิด คือ ชนิดที่ 1 มีสีเหลืองคล้ายพอลิเอสเทอร์เรซิน เรียกว่า โฟมขาวหรือพอลิโอล (Polyol) ชนิดที่ 2 มีสีน้ำตาลไหม้เกือบดำ ซึ่งเรียกว่าโฟมดำหรือไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) และ 2 (ข) ตามลำดับ

ในการให้กำเนิดโฟมจะนำเอาของเหลวทั้ง 2 ชนิด มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากันจึงเกิดการขยายตัว อัตราส่วนการขยายตัวในที่โล่งเท่ากับ 1:27 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2 (ค)

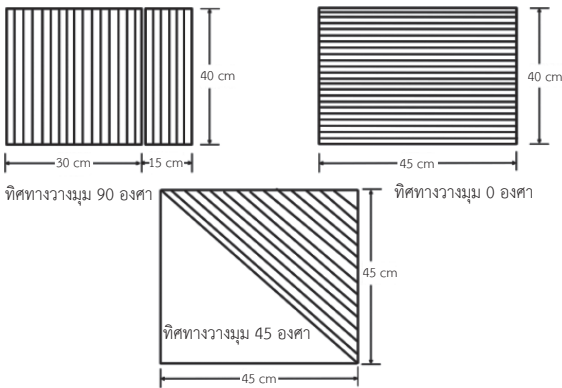
งานวิจัยนี้ขึ้นรูปโฟมโดยผสมโฟมขาวและดำอย่างละ 1:1 ส่วน ในแก้วพลาสติกกวนให้เข้ากันระยะเวลา 30 วินาที จากนั้นเทลงในแบบท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ความยาว 50 เซนติเมตร และปิดฝาอุดท่อ ดังรูปที่ 3 (ก) ป้อนให้โฟมแข็งตัวอย่างสมบูรณ์ระยะเวลา 3 ชั่วโมง จึงทำการถอดแบบแล้วตัดขนาดโฟมแม่แบบตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 3 (ข) และ 3 (ค)



(ก) เดิมโฝมในแบบ



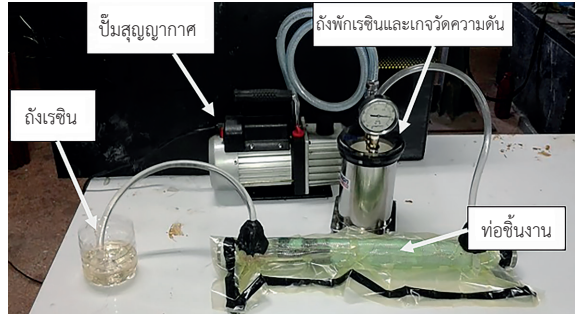
(ข) ตัดปลาย (ค) แกะโฝมออกจากแบบ
รูปที่ 3 ขั้นตอนการขึ้นรูปโฝมพอลิยูรีเทน



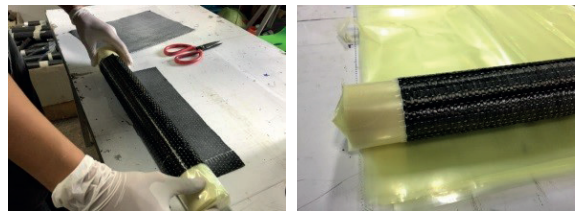
รูปที่ 4 ขนาดและทิศทางของเส้นใยคาร์บอน

2.1.2 การตัดเส้นใยคาร์บอน

การศึกษานี้จะใช้เส้นใยคาร์บอนชนิดทิศทางเดียว หรือ Unidirectional ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นใยเรียงตัวในแนวเดียวกันและถูกยึดด้วยด้ายเรซิน ในรูปแบบทอเป็นผืน ดังแสดงในรูปที่ 4 คุณสมบัติเด่นของเส้นใยคาร์บอนคือ มีความเหนียว ทนความร้อนการกัดกร่อนต่อสารเคมีสูง การตัดเส้นใยคาร์บอนเพื่อใช้พันเข้ากับโฝมแม่แบบที่ความหนาแน่นแตกต่างกันมีรายละเอียดดังนี้ การตัดเส้นใยเพื่อพันในมุมหรือทิศทาง 0 องศา ทำการตัดเส้นใยตามแนวยาวขนาด 45 เซนติเมตร และความกว้าง 40 เซนติเมตร ส่วนการตัดเส้นใย



รูปที่ 5 การขึ้นรูปท่อคาร์บอนด้วยระบบสุญญากาศ



รูปที่ 6 พันเส้นใยเข้ากับแม่แบบตามทิศทางที่จัดเตรียมไว้

ทิศทาง 90 องศา ทำการตัดตามแนวขวาง 30 เซนติเมตร และความยาว 40 เซนติเมตร และตัดเส้นใยเพิ่มในแนวขวาง 15 เซนติเมตร และความยาว 40 เซนติเมตร เพื่อต่อเป็นผืนขนาดกว้าง 45 เซนติเมตร และความยาว 40 เซนติเมตร และการตัดเส้นใยที่มีมุม 45 องศา ทำการตัดเส้นใยรูปแบบสามเหลี่ยม 2 ส่วนประกบกัน ขนาดของแผ่นสามเหลี่ยมคือ 45x45x64 เซนติเมตร ดังรูปที่ 4

2.1.3 การขึ้นรูปท่อคาร์บอนด้วยระบบสุญญากาศ

การศึกษานี้จะใช้เรซินเป็นตัวประสานโดยจะทำการขึ้นรูปท่อคาร์บอนด้วยระบบสุญญากาศ ซึ่งเป็นวิธีการขึ้นรูปที่ ให้ประสิทธิภาพสูงเนื่องจากการแทรกซึมของเรซินได้ดี [9] อุปกรณ์และกระบวนการขึ้นรูปขึ้นงานท่อคาร์บอนไฟเบอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5

2.1.4 การพันเส้นใยคาร์บอนเข้ากับโฝมแม่แบบ

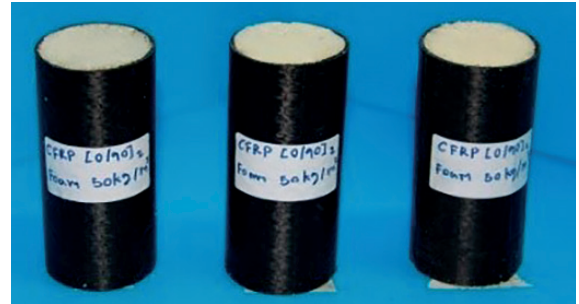
ในด้านของการออกแบบของวัสดุเสริมเส้นใยจุดเด่นคือ สามารถวางทิศทางหรือมุมของเส้นใยต่างๆ ที่ต้องการในการรับแรง ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยเริ่มต้นจากการเตรียมเส้นใยตามทิศทางที่กำหนดไว้บนโต๊ะในแนวระนาบ พันสเปรย์กาวเพื่อยึดประสานระหว่างโฝมแม่แบบและเส้นใย นำโฝม

แม่แบบวางกดทับแล้วพัน 1 รอบ โดยมีเส้นใยเคเยเหนือประมาณ 5 มิลลิเมตร หลังจากนั้นพันเส้นใยชั้นที่ 2 ตามที่กำหนดทิศทางของเส้นใย พันเส้นใยจนครบรอบตามขนาดมุมและจำนวนชั้นของเส้นใย มีรายละเอียดดังนี้ เตรียมอุปกรณ์ในการขึ้นรูป ได้แก่ ปัมสุญญากาศขนาด 108 ลิตรต่อนาที ถังพักเรซินขนาด 1 ลิตร การขึ้นรูปขึ้นงานเริ่มต้นโดยการเชื่อมสายสุญญากาศนำเรซินกับถังเรซินและเชื่อมสายนำเรซินกับถังพักเรซิน ผสมเรซินลงในแก้วปริมาตรของเนื้อเรซิน และตัวเร่งปฏิกิริยาสัดส่วน 200:70 ของน้ำหนัก กวนเรซินทั้งสองเข้าด้วยกันในทิศทางเดียว ระยะเวลา 2-2.30 นาที จากนั้นนำเรซินเทลงในถังเรซิน เปิดปัมสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกจากชิ้นงานและดูดเรซินเข้าสู่ชิ้นงาน เมื่อเรซินเข้าสู่ชิ้นงานซึ่งจะแทรกซึมผ่านผ้าซับฟิล์มกดแบบและผ่านชั้นของเส้นใย โดยความดันของอากาศที่ดูดออกคือ -0.2 บาร์ หลังจากเรซินกระจายทั่วชิ้นงานแล้วจึงถอดสายเชื่อม แล้วปล่อยให้ชิ้นงานแห้งในระยะเวลา 24-48 ชั่วโมง จากนั้นทำการถอดแบบเริ่มต้นจากดึงสายเชื่อมออกจากชิ้นงาน ตัดถุงสุญญากาศด้วยกรรไกร แกะตาข่ายนำเรซิน ผ้าซับเรซิน ฟิล์มลอกแบบ แล้วทำการถอดแม่แบบออกจากชิ้นงานด้วยการดึงออกจากกัน แล้วจึงตัดชิ้นงานไปทดสอบตามที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 7 และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาด มุม และจำนวนชั้นของเส้นใย

Specimens	D_{mean} (mm)	t_{mean} (mm)	l_{mean} (mm)
C-F50-[0/90] ₂	43.98	1.72	101.60
C-F100-[0/90] ₂	43.02	1.84	100.28
C-F150-[0/90] ₂	43.92	1.64	100.82
C-F50-[45/-45] ₂	43.24	1.72	100.32
C-F100-[45/-45] ₂	44.58	1.50	99.42
C-F150-[45/-45] ₂	43.10	1.62	101.22

โดยที่ C คือ ท่อคาร์บอน F50 คือ โฟมที่มีความหนาแน่น 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร F100 คือ โฟมที่มีความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร F150 คือ โฟมที่มีความหนาแน่น 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [0/90]₂ คือ การวางมุมเส้นใย [0/90/0/90] และ [45/-45]₂ คือ การวางมุมเส้นใย [45/-45/45/-45]

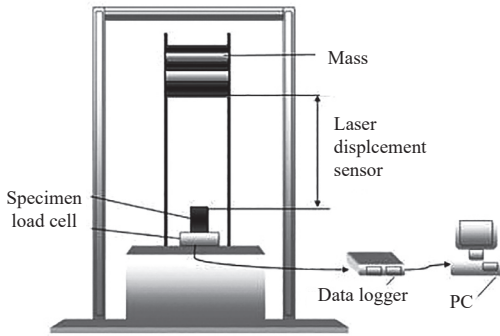


รูปที่ 7 ตัวอย่างชิ้นงานที่พร้อมสำหรับการทดสอบ

2.2 เครื่องทดสอบการกระแทก

ดังที่กล่าวในบทนำชิ้นส่วนด้านหน้ารถยนต์ต้องยุบตัวได้เหมาะสมซึ่งส่วนใหญ่จะรับแรงในแนวแกนเป็นหลัก ดังนั้นการจำลองสภาวะการชนกระแทกในชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งมีลักษณะเป็นหอสูง มีหัวค้อนสำหรับตบกระแทกชิ้นงาน เมื่อหัวค้อนถูกปล่อยให้ตกกระทบกับชิ้นงาน เครื่องทดสอบจะบันทึกระยะเวลายุบตัวที่เกิดขึ้นตลอดการทดสอบสัมพันธ์กับแรงกระแทกซึ่งถูกอ่านค่าโดยโพลดเซลล์และบันทึกข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์ โดยจะมีเลเซอร์ตรวจจับความเร็วของค้อนก่อนที่ตกกระทบชิ้นงาน ค่าต่างๆ ที่เครื่องทดสอบบันทึกได้จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นข้อมูลในการคำนวณหาความสามารถในการดูดพลังงานจากการชนกระแทกต่อไป

เครื่องทดสอบการกระแทกที่ใช้ในการศึกษานี้มีลักษณะเป็นหอสูง (Drop Hammer Tower) ดังแสดงในรูปที่ 8 ความเร็วในกระแทกคือ 6.76 เมตรต่อวินาที และน้ำหนักของหัวค้อนคือ 30 กิโลกรัม ความสูงของหัวค้อนที่ตกลงมากระแทกกับชิ้นงานคือ 2.43 เมตร อุปกรณ์ติดตั้งหัวค้อนสามารถยกขึ้นไปในระดับความสูงต่างๆ ก่อนปล่อยให้ตกกระทบชิ้นงานอย่างอิสระ (Free Falling) ในขณะที่ทดสอบจะทำการบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง และบันทึกแรงกระแทกเพื่อนำไปวิเคราะห์ผลการเสียหายต่อไป ซึ่งฐานด้านล่างของเครื่องดังรูปที่ 8 และ 9 ได้ติดตั้งโพลดเซลล์เพื่อบันทึกค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างการชนกระแทกของชิ้นงานและหัวค้อน โดยโพลดเซลล์ดังกล่าวสามารถบันทึกข้อมูลได้ที่ความถี่สูงสุดถึง 10 กิโลเฮิรตซ์ หัวค้อนที่ใช้ในการทดสอบสามารถเปลี่ยนน้ำหนักได้ระหว่าง 20-60 กิโลกรัม



รูปที่ 8 แบบจำลองเครื่องทดสอบการกระแทก

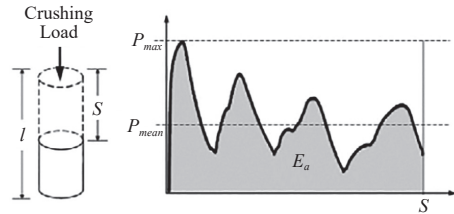


รูปที่ 9 โครงสร้างเครื่องทดสอบแรงกระแทก

2.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

2.3.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการชนกระแทก

การศึกษาโครงสร้างที่รับการชนแรงกระแทกมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการออกแบบโครงสร้างต่างๆ ให้มีความทนทานต่อภาระที่เกิดขึ้น โดยมีทฤษฎีและตัวแปรที่เกี่ยวข้องหลายตัวด้วยกัน เช่น ค่าภาระสูงสุด (P_{max}) ค่าภาระเฉลี่ย (P_{mean}) และพลังงานดูดซับ (E_a) เป็นต้น ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ได้มาจากกราฟของภาระและระยะยุบตัว ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยค่าตัวแปรต่างๆ ของโครงสร้างภายใต้การรับแรงกระแทกจะวิเคราะห์จากผลการทดสอบการชนกระแทก และการคำนวณค่าพลังงานดูดซับได้จากพื้นที่ใต้กราฟ เป็นต้น



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระและระยะยุบตัว[3]

2.3.2 ภาระสูงสุด

ภาระสูงสุด (Maximum Load) หมายถึง ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นในกราฟของค่าภาระและระยะยุบตัวตลอดช่วงเวลาการเสียหายของชิ้นงาน ซึ่งค่าของภาระสูงสุดควรจะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมไม่สูงมากเกินไปเพราะจะทำให้อัตราเร่งไม่คงที่ เช่น ผลจากแรงความเร่งและการลดความเร็วอย่างทันทีทันใด อาจทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ได้

2.3.3 ภาระเฉลี่ย

ภาระเฉลี่ย (Mean Crushing Load) หมายถึง ค่าของภาระเฉลี่ยตลอดการรับภาระของโครงสร้างภายใต้การชนกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว โดยมักเปรียบเทียบกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน ซึ่งค่าภาระเฉลี่ยนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ โดยทั่วไปแล้วค่าภาระเฉลี่ยควรมีค่าสูงเพื่อให้ได้ค่าพลังงานดูดซับที่สูงตามไปด้วย

2.3.4 พลังงานดูดซับ

พลังงานดูดซับ (Energy Absorption) หมายถึง ค่าพลังงานที่ชิ้นงานสามารถดูดซับได้ตลอดการชนกระแทกหรือการยุบตัว ซึ่งหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟระหว่างภาระที่ใช้กับระยะยุบตัวที่ได้จากการชนกระแทกของโครงสร้างสามารถหาได้จากสมการที่ (1)

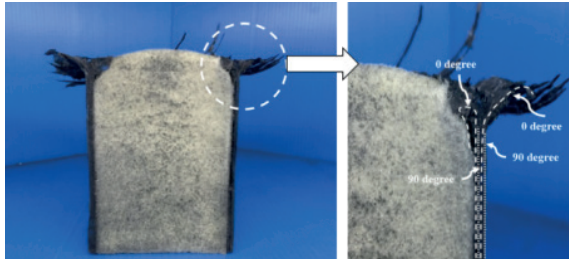
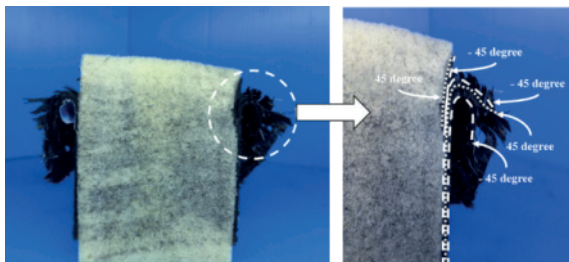
$$E_a = \int PdS \tag{1}$$

โดยที่

E_a คือ พลังงานที่ชิ้นงานดูดซับไว้ได้

P คือ ภาระที่กระทำกับวัสดุชิ้นงาน

dS คือ การเปลี่ยนแปลงระยะยุบตัวของชิ้นงาน

รูปที่ 11 ลักษณะการเสียหายของ C-F100-[0/90]₂รูปที่ 12 ลักษณะการเสียหายของ C-F100-[45/-45]₂

3. ผลการวิจัย

3.1 ลักษณะการเสียหายของชิ้นงาน

จากการศึกษาลักษณะการเสียหายของชิ้นงานพบว่า มีลักษณะการเสียหาย 2 แบบ ดังนี้ การเสียหายแบบที่ 1 เสียหายแบบแตกแยกและบานออกจากกันพบในกลุ่มการวางมุมของเส้นใย [0/90] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Ataabadi [11] แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ยูบเข้าด้านในท่อนแล้วบานออกด้านนอกของท่อ และการเสียหายแบบที่ 2 จะเกิดการเสียหายแบบแตกแยกและบานออกจากกันในแนวเฉียง ซึ่งพบในกลุ่มการวางมุมของเส้นใย [45/-45]

จากรูปที่ 11 และ 12 แสดงลักษณะการเสียหายของ C-F100-[0/90]₂ และ C-F100-[45/-45]₂ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาลักษณะการเสียหายของ C-F100-[0/90]₂ พบว่า มีลักษณะการเสียหายจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เส้นใยของส่วนที่อยู่ด้านในจะยุบเข้าด้านในท่อนซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยชั้นที่ 1 และ 3 คือมุม 0 องศา ที่ทำหน้าที่รับแรงในแนวแกน ส่งผลให้เส้นใยโก่งตัวแยกชั้นออกจากกัน ส่วนที่ 2 เส้นใยของส่วนที่อยู่ด้านนอกจะบานออกด้านนอกของท่อ ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 4 คือมุม 90 องศา ที่



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 13 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน [0/90]₂ (ก) 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ข) 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ (ค) 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

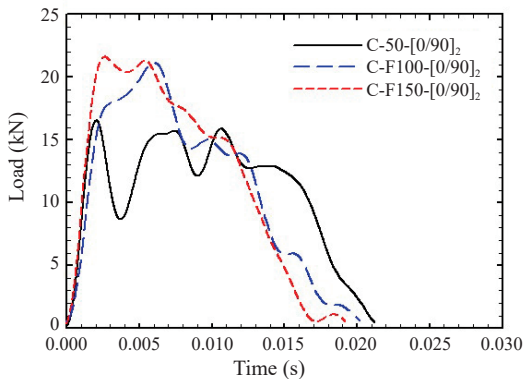
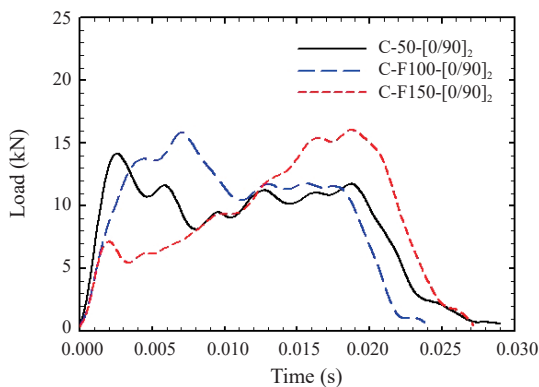


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 14 การเสียหายสุดท้ายของชิ้นงาน [45/-45]₂ (ก) 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ข) 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ (ค) 150 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ทำหน้าที่รัดประคองมุม 0 องศา ส่งผลทำให้เกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นที่ 1 และ 4 ซึ่งสอดคล้องกับโหมดการเสียหายแบบ Splaying Mode และ Brittle Fracturing Mode [11]

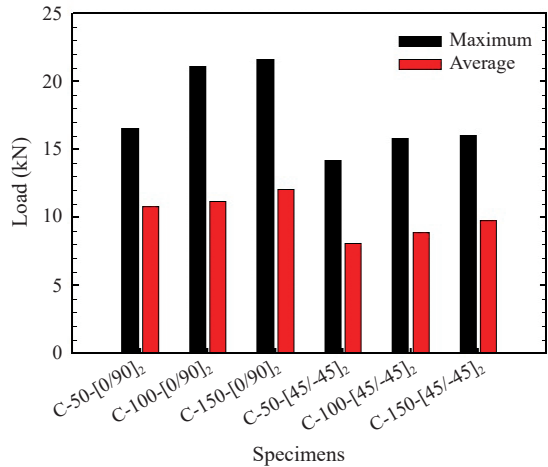
เมื่อพิจารณาลักษณะการเสียหายของ C-F100-[45/-45]₂ พบว่า มีลักษณะการเสียหายแบบแตกแยกและบานออกจากกัน ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของเส้นใยชั้นที่ 1 และ 3 ที่มีการวางมุม 45 องศา ทำหน้าที่รับแรงในแนวเฉียงด้านซ้ายของชิ้นงาน ในส่วนของชั้นที่ 2 และ 4 ที่มีมุม -45 องศา ทำหน้าที่รับแรงในแนวเฉียงด้านขวาของท่อชิ้นงาน และรัดประคองชั้นที่ 1 และ 3 จึงส่งผลให้ชิ้นงานแตกและบานออกจากกันในแนวเฉียง ความเสียหายของชิ้นงานที่นอกจากจะเกิดจากมุมของเส้นใยแล้ว ความหนาแน่นของโฟมก็มีผลเช่นเดียวกัน โดยที่ [0/90]₂ และ [45/-45]₂ เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นการยุบตัวของชิ้นงานก็จะมีน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 13 และ 14

(ก) ชิ้นงานที่วางมุมเส้นใย $[0/90]_2$ (ข) ชิ้นงานที่วางมุมเส้นใย $[45/-45]_2$

รูปที่ 15 ภาระและเวลาจากการทดสอบ

3.2 ผลการทดสอบภาระและระยะยุบตัวของชิ้นงาน

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับเวลาในการยุบตัวของชิ้นงานภายใต้ภาระกระทำในแนวแกนนั้น ไม่สามารถวัดค่าการยุบตัวของโครงสร้างในระหว่างการศึกษาเสียหายได้ เนื่องจากการยุบตัวเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมักนิยมเขียนกราฟของค่าภาระและเวลา ในส่วนของระยะยุบตัวในการศึกษานี้สามารถคำนวณได้จากความเร็วสูงสุดคูณกับเวลาจนสิ้นสุดการกระทำดังในรูปที่ 15 พิจารณารูปที่ 15 (ก) และ 15 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระ และเวลาของชิ้นทดสอบ $[0/90]_2$ และ $[45/-45]_2$ ตามลำดับ พบว่าความหนาแน่นของโฟมนั้นมีผลต่อภาระของชิ้นทดสอบภายใต้แรงกระทำ โดยชิ้นงานที่มีความหนาแน่นของโฟมมาก

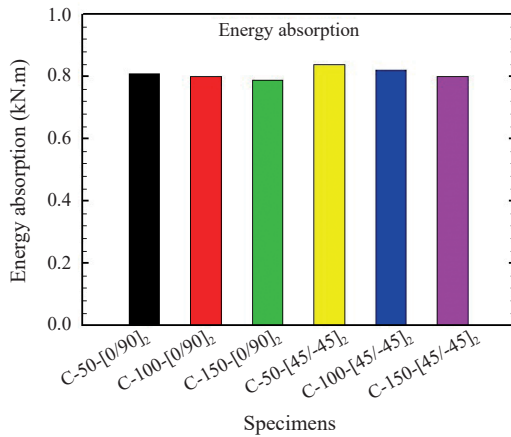


รูปที่ 16 ภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยของชิ้นทดสอบ

จะรับภาระได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่นของโฟมน้อย ซึ่งสอดคล้องกันทั้ง 2 แบบ เมื่อพิจารณาตามแนวอนหรือแนวแกน x พบว่า เวลาในการรับภาระของ $[0/90]_2$ น้อยกว่า $[45/-45]_2$ ทุกความหนาแน่นของโฟมเพราะผลจากอิทธิพลของการวางมุมเส้นใยชิ้นงาน $[0/90]_2$ ทำให้เวลาในการรับภาระน้อยกว่า $[45/-45]_2$ และเมื่อพิจารณาตามแนวตั้งหรือแนวแกน y พบว่า ภาระของ $[0/90]_2$ สูงกว่า $[45/-45]_2$ ทุกความหนาแน่นของโฟม ถึงแม้ว่า $[0/90]_2$ จะสามารถรับภาระได้มากกว่า $[45/-45]_2$ ทุกความหนาแน่นของโฟม แต่ด้วยเวลาในการรับภาระที่น้อยกว่า $[45/-45]_2$ จึงทำให้การยุบตัวของ $[0/90]_2$ น้อยตามไปด้วย ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นทดสอบด้วย

3.3 ผลของภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ย

รูปที่ 16 แสดงภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยของชิ้นงานพบว่า กลุ่ม $[0/90]_2$ จะมีค่าภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่ม $[45/-45]_2$ ในทุกความหนาแน่นของโฟม เพราะว่าการวางมุมของเส้นใย 0 องศา และ 90 องศา นั้นต้านแรงที่กระทำในแนวแกนได้สูงกว่ากลุ่ม 45 องศา และ -45 องศา แม้ว่า $[0/90]_2$ จะมีภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยสูงกว่ากลุ่ม $[45/-45]_2$ แต่การยุบตัวจากการเสียหายสุดท้ายของ $[0/90]_2$ น้อยกว่า $[45/-45]_2$ เพราะลักษณะทางกายภาพที่ต่างกันดังที่กล่าวมา



รูปที่ 17 ความสามารถในการดูดซับพลังงานขึ้นทดสอบ

แล้วในหัวข้อ 3.1 โดยความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อขึ้นงาน C-F150-[0/90]₂ สามารถรับภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยได้เท่ากับ 21.61 กิโลนิวตัน และ 12.06 กิโลนิวตันตามลำดับ โดยมีค่ามากกว่าขึ้นงานทดสอบ C-F50-[45/-45]₂ ที่มีค่าภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 14.17 กิโลนิวตัน และ 8.07 กิโลนิวตัน ตามลำดับ ซึ่งอิทธิพลของโพนสามารถเพิ่มความสามารถในการรับภาระของขึ้นงานได้ซึ่งคล้ายกับผลการทดลองที่ผ่านมาของ Wang และคณะ [9]

3.4 ผลของความสามารถในการดูดซับพลังงาน

รูปที่ 17 แสดงพลังงานดูดซับของขึ้นงานพบว่า กลุ่มขึ้นทดสอบ [45/-45]₂ จะมีพลังงานดูดซับของขึ้นงานสูงกว่ากลุ่ม [0/90]₂ ในทุกความหนาแน่นของโพน เพราะว่าการวางมุมของเส้นใย 45 องศา และ -45 องศา นั้นจะเกิดความเค้นเฉือนขึ้นบนเส้นใยในระหว่างเกิดแรงชนทำให้การยุบตัวมากกว่าการวางมุมแบบ 90 องศา จึงมีผลทำให้การคำนวณพลังงานดูดซับของขึ้นงานได้ดีกว่ากลุ่ม [0/90]₂ อย่างไรก็ตาม การวางมุมแบบ [0/90]₂ จะต้านทานแรงกระแทกจากการชนได้สูงกว่าการวางมุมแบบเฉียงโดยพิจารณาจากรูปที่ 17 โดยพบว่าขึ้นงานทดสอบ C-F50-[45/-45]₂ สามารถดูดซับพลังงานได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีขึ้นงานทดสอบอื่นๆ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.84 กิโลนิวตัน โดยมากกว่าขึ้นงานทดสอบ C-F150-[0/90]₂ ประมาณ 3.57 เปอร์เซ็นต์

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ลักษณะการเสียหายของขึ้นงานจะมีรูปแบบการเสียหาย 2 ลักษณะ คือ การเสียหายแบบแตกแยกและบานออกจากกันพบในกลุ่มการวางมุมของเส้นใย [0/90] และการเสียหายแบบแตกแยกและบานออกจากกันในแนวเฉือนซึ่งพบในกลุ่มการวางมุมของเส้นใย [45/-45]

2. ผลของภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยพบว่า อิทธิพลของความหนาแน่นของโพนที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ภาระสูงสุดและภาระเฉลี่ยสูงขึ้นเป็นแนวโน้มที่จะทำให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานของขึ้นงานเพิ่มขึ้นด้วย

3. ความสามารถในการดูดซับพลังงานของขึ้นงานท่อคาร์บอนไฟเบอร์ที่เติมโพนภายใต้แรงกระแทกพบว่า ความหนาแน่นของโพนที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าพลังงานดูดซับลดลงเช่นกัน เนื่องจากโพนมีความแข็งเพิ่มขึ้นทำให้ท่อขึ้นงานยุบตัวได้น้อยลง แต่อย่างไรก็ตาม ความแข็งแรงของขึ้นงานในการรับแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกกรณี

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 และขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Onsalung, C. Thinwongpituk, and C. Pho-Ngam, "Study on the crashworthiness of bus side frame under quasi static load: axial, twisting, and bending load," in *Proceedings 20th Conference of Mechanical Engineering, Network of Thailand*, 2012 (in Thai).
- [2] N. Onsalung, C. Thinwongpituk, and A. Teeboonma, "Study on the crashworthiness of model bus side frame under crushing load," *KKU Engineering*



- Journal*, vol. 34, no. 3, pp. 343–354, 2007 (in Thai).
- [3] N. Onsalung, C. Thinvongpituk, V. Junchuan, and K. Pianthong, “Crush response of polyurethane foam-filled aluminium tube subjected to axial loading,” in *Proceedings The 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering*, Chiang Rai, 2012, pp. 534–541 (in Thai).
- [4] L. N. S. Chiu, B. G. Falzon, D. Ruan, S. Xu, R. S. Thomson, B. Chen, and W. Yan, “Crush responses of composite cylinder under quasi-static and dynamic loading,” *Composite Structures*, vol. 131, pp. 90–98, 2015.
- [5] J. Zhou, Z. Guan, and W. J. Cantwell, “The energy-absorbing behavior of composite tube-reinforced foams,” *International Journal of Composites Part B : Engineering*, vol. 139, pp. 227–237, 2018.
- [6] T. A. Sebaey and E. Mahdi, “Filler strengthening of foam-filled energy absorption devices using CFRP beam,” *International Journal of Composite Structures*, vol. 160, pp. 1–7, 2017.
- [7] N. Onsalung, C. Thinvongpituk, and K. Pianthong, “Impact response of circular aluminum tube filled with polyurethane foam,” *Materials Transactions*, vol. 55, no. 1, pp. 207–215, 2014.
- [8] S. E. Alkhatib, F. Tarlochan, A. Hashem, and S. Sassi, “Collapse behavior of thin-walled corrugated tapered tubes under oblique impact,” *International Journal of Thin-Walled Structures*, vol. 122, pp. 510–528, 2018.
- [9] Lu Wang, Weiqing Liu, Yuan Fang, Li Wan, and Ruili Huo, “Axial crush behavior and energy absorption capability of foam-filled GFRP tubes manufactured through vacuum assisted resin infusion process,” *International Journal of Thin-Walled Structures*, vol. 98, pp. 263–273, 2016.
- [10] M. Mahbod and M. Asgari, “Energy absorption analysis of a novel foam-filled corrugated composite tube under axial and oblique loadings,” *International Journal of Thin-Walled Structures*, vol. 129, pp. 58–73, 2018.
- [11] P. B. Ataabadi, D. Karagiozova, and M. Alves, “Crushing and energy absorption mechanisms of carbon fiber-epoxy tubes under axial impact,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 131, pp. 174–189, 2019.
- [12] G. Balaji and K. Annamalai, “Crushing response of square aluminium column filled with carbon fibre tubes and aluminium honeycomb,” *International Journal of Thin-Walled Structures*, vol. 132, pp. 667–681, 2018.