



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

อิทธิพลของการวางมุมเส้นใยต่อความสามารถในการรับแรงกระแทกของท่ออลูมิเนียมที่หุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส/โพลิเอสเตอร์

The influence of fiber orientation angle on the impact characteristic of circular aluminum tube reinforced by fiber glass/polyester

เกียรติพงษ์ กำลังแข็ง ขวาลิต ถินวงศ์พิทักษ์* และ สมญา ปูณะยา

Kiatipong Komlungkang, Chawalit Thinwongpituk* and Somya Poonaya

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี 34190

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, Ubonratchathani, 34190, Thailand.

Received March 2014

Accepted June 2014

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการวางมุมของเส้นใย เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรับแรงกระแทกในแนวแกน ให้แก่โครงสร้างท่อรูปทรงกระบอกโดยการหุ้มด้วยวัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรง การศึกษานี้ดำเนินการด้วยวิธีการทดลองโดยใช้ชิ้นงานที่เป็นท่อโครงสร้างร่วมระหว่างอลูมิเนียม (6063-T5) ที่มีสัดส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความหนา (D/t ratio) เท่ากับ 25.40, 29.63, และ 42.33 ผิวชั้นนอกของท่ออลูมิเนียมจะถูกหุ้มด้วยวัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงไฟเบอร์กลาส/โพลิเอสเตอร์ ในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวางมุมของเส้นใยไว้ที่ 6 รูปแบบ คือ $[0]_3$, $[45]_3$, $[90]_3$, $[0/90]_2$, $[45/-45]_2$, และ $[90/0]_2$ จากนั้นจะนำชิ้นงานไปทำการทดสอบแบบกระแทกในแนวแกนด้วยหัวกระแทกน้ำหนัก 45 kg และมีความเร็วในการกระแทกที่ 6.26 m/s จากผลการศึกษาพบว่าท่อโครงสร้างร่วมและท่ออลูมิเนียมเปล่ามีแนวโน้มในการรับแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) และจากการศึกษารูปแบบการวางมุมของเส้นใยพบว่าที่รูปแบบ $[0/90]_2$ สามารถรับแรงกระแทกได้สูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าท่ออลูมิเนียมเปล่าถึง 50.02, 45.14, และ 52.03 % ที่ D/t เท่ากับ 25.40, 29.63, และ 42.33 ตามลำดับ นอกจากนี้บทความนี้ยังได้แสดงลักษณะและพฤติกรรมการเสียหายของท่อโครงสร้างร่วมอีกด้วย

คำสำคัญ : การกระแทก ท่อโครงสร้างร่วม ไฟเบอร์กลาส วัสดุประกอบ

Abstract

This study was aimed to increase the impact resistance of circular tubes reinforced by fiber reinforced plastic (FRP). The tube made of aluminum 6063-T5 with the D/t ratio of 25.40, 29.63, and 42.33. Outside surface of aluminum tube was reinforced by wrapping fiberglass/polyester. The fiber orientation angle were $[0]_3$, $[45]_3$, $[90]_3$, $[0/90]_2$, $[45/-45]_2$, and $[90/0]_2$. Then, they were tested under impact with cross head of 45 kg and speed of 6.26 m/s in axial direction. The result revealed that the impact resistance of the hybrid tube and aluminum

* Corresponding author. Tel.: 045-353309; fax: 045-353308

Email address: k.komlungkang@gmail.com (Komlungkang, K.), Chawalit@rocketmail.com* (Thinwongpituk, C.), PNya@hotmail.com (Poonaya, S.)

doi: 10.14456/kkuenj.2015.10

tube trend to increase as the D/t ratio increases and The hybrid tube with wrapped angle of $[0/90_2]$ was maximum mean load and higher than aluminum tube by 50.02, 45.14, and 52.03 % at D/t = 25.40, 29.63, and 42.33 receptively. Failure mode and crush behavior of hybrid tube were also presented and disused in this paper.

Keywords : Impact, Hybrid tube, Fiber glass, Composite material

1. บทนำ

การเสียหายของโครงสร้างยานยนต์มีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างเป็นสิ่งสำคัญที่จะปกป้องอันตรายให้แก่ผู้โดยสารเมื่อเกิดอุบัติเหตุหรือแม้กระทั่งชิ้นส่วนที่สำคัญของรถยนต์เอง ในปัจจุบันการออกแบบและงานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างยานยนต์จะเน้นให้ความสำคัญไปที่การเพิ่มสมรรถนะในการรับแรงกระแทก และการลดน้ำหนักของโครงสร้าง วัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงก็เป็นวัสดุประเภทหนึ่งที่ได้รับคามนิยมนำมาทำเป็นชิ้นส่วนของยานพาหนะในปัจจุบัน เช่น เรือ รถยนต์ เครื่องบิน หรือแม้กระทั่งใช้ในการเสริมการรับแรงของสิ่งปลูกสร้าง เป็นต้น เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีความแข็งแรงต่อน้ำหนักที่สูง จึงมีข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทโลหะ ทั้งนี้ได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการเสียหายของโครงสร้างยานยนต์ภายใต้การชน (Crashworthiness) อย่างกว้างขวาง และได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่น การศึกษาโครงสร้างรูปทรงต่างๆ ของท่ออลูมิเนียมเพื่อหารูปทรงที่เหมาะสมในการรับแรงกระแทกในแนวแกน [1, 2] การศึกษาการรับแรงกดในแนวแกนในเชิงเปรียบเทียบของโครงสร้างท่อรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ทำมาจาก Mild steel, ไฟเบอร์กลาส/โพลีเอสเตอร์และเคพลาร์/โพลีเอสเตอร์ [3] การศึกษาจำนวนชั้นของเส้นใยที่มีผลต่อการรับแรงกดของท่อรูปทรงกลมที่ทำมาจากไฟเบอร์กลาส/อีพอกซี [4] การศึกษาโครงสร้างท่อรูปทรงต่างๆ ในการรับแรงกดในแนวแกนที่ทำมาจากไฟเบอร์กลาส/โพลีเอสเตอร์ [5] อย่างไรก็ตามในการเพิ่มสมรรถนะในการรับแรงของโครงสร้างนั้น จะต้องไม่ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเพิ่มมากเกินไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดเชื้อเพลิงและลดน้ำหนักตัวถึง ต่อมาจึงมีแนวคิดในการนำวัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงมาหุ้มที่บริเวณผิวภายนอกของโครงสร้าง เพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรับแรงของโครงสร้างซึ่ง Kil-Sung Lee และคณะ [6] ได้นำวัสดุ

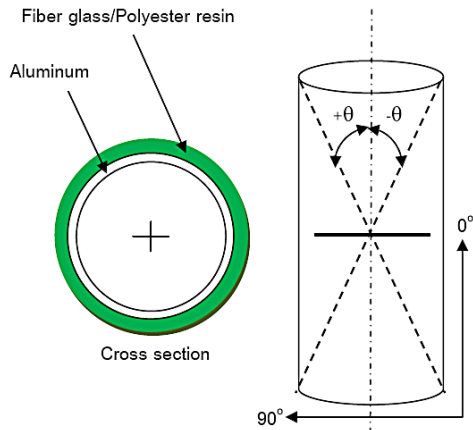
ประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงคาร์บอน/อีพอกซี มาหุ้มที่บริเวณผิวภายนอกของโครงสร้างท่ออลูมิเนียมรูปทรงสี่เหลี่ยม และรูปทรงกลม จากผลการศึกษา พบว่ามีผลตอบสนองของโครงสร้างร่วมในการรับแรงกดและกระแทกในแนวแกนได้เป็นอย่างดี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการใช้วัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงมาหุ้มที่บริเวณผิวภายนอกของโครงสร้างท่ออลูมิเนียมรูปทรงกระบอกเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการรับแรงกระแทกในแนวแกน โดยได้เลือกใช้ไฟเบอร์กลาส/โพลีเอสเตอร์ เนื่องจากหาซื้อได้ง่าย และมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงประเภทอื่นๆ การศึกษานี้จะใช้วิธีการทดลองเป็นหลัก และการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกจะเป็นตัวชี้วัดในงานวิจัยนี้

2. วิธีการวิจัย

2.1 การเตรียมชิ้นงาน

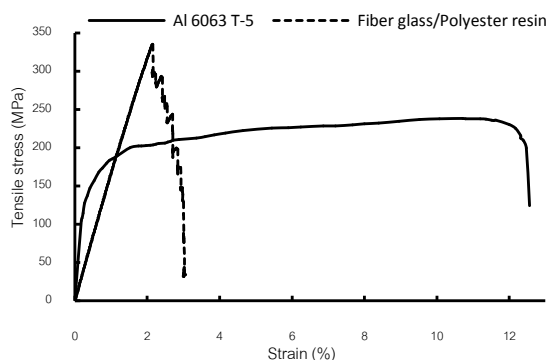
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะเป็นท่อโครงสร้างร่วมรูปทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วยท่อชั้นในคือท่ออลูมิเนียม (6063-T5) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 30.48, 35.56, และ 50.80 mm ความหนาขนาด 1.2 mm ซึ่งคิดเป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความหนา (D/t) เท่ากับ 25.40, 29.63, และ 42.33 ชิ้นงานมีความยาว 100 mm ผิวชั้นนอกของท่ออลูมิเนียมจะถูกหุ้มด้วยวัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงซึ่งเส้นใยที่ใช้คือไฟเบอร์กลาสชนิด E-glass ที่มีลักษณะเป็นแผ่น และมีทิศทางการวางมุมของเส้นใยในทิศทางเดียวขนาด 400 g/m^2 ในส่วนของวัสดุประสานที่ใช้คือโพลีเอสเตอร์ (Isophthalic acid type) แบบไม่อิมตัว ชิ้นงานขึ้นรูปด้วยวิธีใช้มือทา (Hand lay-up) โดยทำการกำหนดจำนวนชั้นของเส้นใยไว้ที่ 3 ชั้น แต่ละชั้นจะมีความหนาที่ 0.70 mm และทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการวางมุมของเส้นใยไว้ที่ 6 รูปแบบคือ $[0]_3$, $[45]_3$, $[90]_3$, $[0/90_2]$, $[45/-45_2]$, และ $[90/0_2]$



รูปที่ 1 ลักษณะของท่อโครงสร้างร่วม

2.2 คุณสมบัติของวัสดุ

การทดสอบคุณสมบัติทางกลของวัสดุท่ออลูมิเนียมจะใช้วิธีทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานอ้างอิง ASTM E8M และไฟเบอร์กลาส/โพลีเอสเตอร์ จะใช้วิธีทดสอบแรงดึงตามมาตรฐานอ้างอิง ASTM 3039 ซึ่งในแต่ละกรณีจะทำการทดสอบ 5 ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย คุณสมบัติทางกลของวัสดุแต่ละชนิด แสดงดังรูปที่ 2 และตารางที่ 1



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของชิ้นงานทดลอง

ตารางที่ 1 สมบัติทางกลของวัสดุ

Specimen	Young's modulus (GPa)	Tensile strength (MPa)	Strain at yield point (%)
Aluminum 6063-T5	60.70	238.10	12.56
Fiber glass /Polyester	17.12	361.07	2.64

2.3 วิธีการทดลอง

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองด้วยวิธีการทดสอบแบบกระแทกในแนวแกน โดยใช้เครื่องทดสอบที่มีชื่อว่า Vertical impact testing machine แสดงดังรูปที่ 3 หัวกระแทกสามารถปรับเปลี่ยนน้ำหนักได้ตั้งแต่ 20-60 kg ในส่วนของการประมวลผลของเครื่องทดสอบจะมีโหลดเซลล์ (Load cell) ที่สามารถวัดแรงที่กระทำได้สูงสุดถึง 200 kN และมี Data logger บันทึกข้อมูลได้สูงสุดที่ 10,000 ค่าต่อวินาที เมื่อทดสอบโหลดเซลล์จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วนำผลที่ได้ไปยัง Data logger เพื่อทำการบันทึกข้อมูล จากนั้นผลที่ได้จะนำเข้าสู่อุปกรณ์คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล โดยผลที่ได้จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำ (Load) และเวลา (Time)

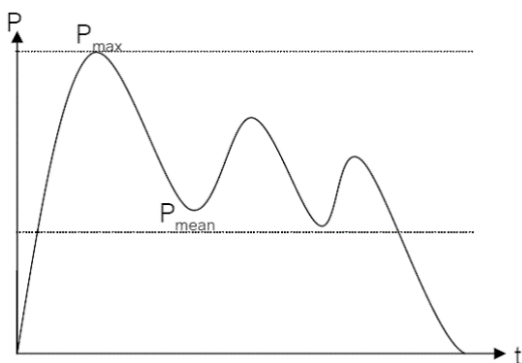


รูปที่ 3 เครื่องทดสอบแบบกระแทก

ในส่วนของการทดลองจะใช้หัวกระแทกที่มีน้ำหนัก 45 kg ปล่อยที่ความสูง 2 m ความเร็วในการกระแทกที่ 6.26 m/s คิดเป็นพลังงานจลน์ในการกระแทกเท่ากับ 881.72 J ทำการบันทึกภาพด้วยกล้องความเร็วสูงในการทดลองแต่ละกรณีจะทำการทดสอบ 4 ครั้ง ข้อมูลจากการบันทึกจะนำไปคำนวณหาค่าโหลดสูงสุดและโหลดเฉลี่ย ของท่อโครงสร้างอลูมิเนียมเปล่าและท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใยที่แตกต่างกัน จากนั้นจะนำข้อมูลที่บันทึกได้ไปทำการวิเคราะห์เพื่อทำการเปรียบเทียบต่อไป

2.4 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้จะมีตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาที่สำคัญ 2 ตัวแปรด้วยกัน ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงกระแทกของโครงสร้าง โดยทั่วไปแล้วจะอ้างอิงมาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับเวลา แสดงดังรูปที่ 4 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับเวลา

1. โหลดสูงสุด (Maximum load, P_{max})

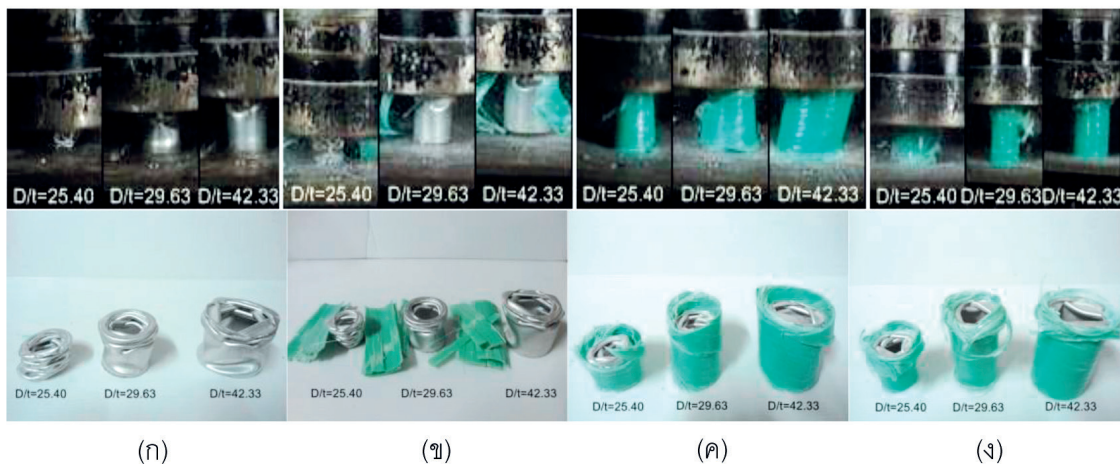
เป็นโหลดสูงสุดที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนสิ้นสุดเวลาการยุบตัว แสดงดังรูปที่ 4 ค่าโหลดสูงสุดควรที่จะอยู่ในช่วงที่เหมาะสม และไม่ควรที่จะสูงเกินไป เนื่องจากกรณีเกิดการกระแทกจะทำให้เกิดแรงตอบสนองกลับที่สูงเกินไป

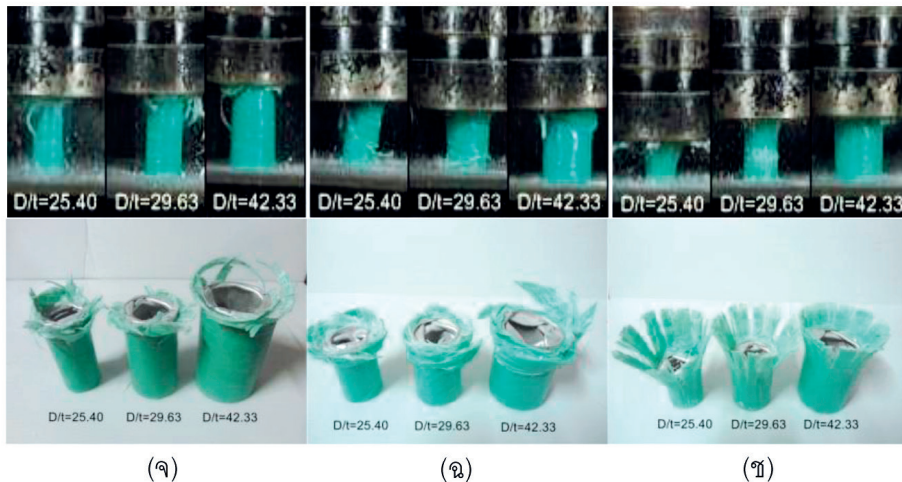
2. โหลดเฉลี่ย (Mean load, P_{mean})

เป็นโหลดเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนสิ้นสุดเวลาการยุบตัว แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโหลดเฉลี่ยควรมีค่าสูง เนื่องจากจะเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงที่เกิดจากการกระแทก

3. ผลการทดลอง

จากการทดสอบการกระแทกในแนวแกนแบบแรงกระทำต่อเนื่องของท่อโครงสร้างอลูมิเนียมเปล่าและท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใยในกรณีต่างๆ ผลการศึกษาจะแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมและความสามารถในการรับแรงกระแทกด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้





รูปที่ 5 ลักษณะการเสียหายภายนอกของชิ้นงาน (ก) ท่ออลูมิเนียมเปล่า (ข) $[0]_3$ (ค) $[45]_3$ (ง) $[90]_3$ (จ) $[0/90]_2$ (ฉ) $[45/-45]_2$ และ (ช) $[90/0]_2$

3.1 ลักษณะการเสียหายของโครงสร้าง

ลักษณะการเสียหายของท่ออลูมิเนียมเปล่า และท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย ทั้ง 6 กรณี จะมีลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

1. ลักษณะการเสียหายของท่ออลูมิเนียมเปล่า

ลักษณะการเสียหายของท่ออลูมิเนียมเปล่า ในทุกกรณี ขณะรับแรงกระแทกจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Diamond mode [5, 6] แสดงดังรูปที่ 5 (ก) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าว ท่ออลูมิเนียมจะเกิดการเสียหายจากการรับแรงกระแทกในลักษณะการพับตัวที่ไม่สมมาตร และมีลักษณะรูปร่างของหน้าตัดบริเวณที่เกิดการเสียหายคล้ายเพชร

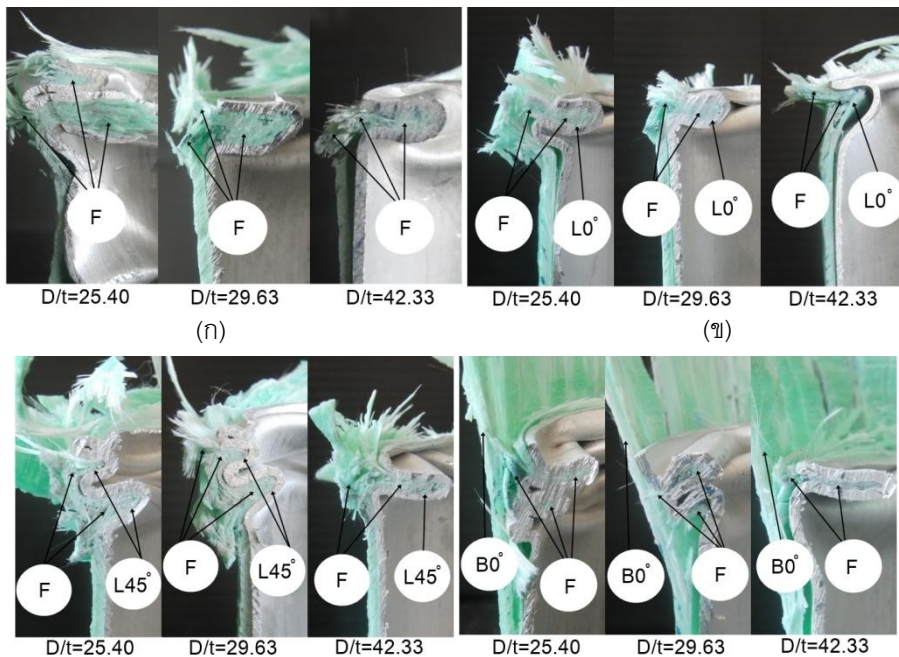
2. ลักษณะการเสียหายของท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[0]_3$

ท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[0]_3$ จะมีลักษณะการเสียหาย แสดงดังรูปที่ 5 (ข) ท่อชั้นในที่เป็นอลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทกจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Diamond mode และในส่วน ของชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่มีมุม 0° ที่มุมบริเวณผิวชั้นนอกของท่ออลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทกจะเกิดการเสียหายแบบ Lamina bucking 0° ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าว ชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่มีมุม 0° จะเกิดการเสียหายจากการรับแรงกระแทกในลักษณะโก่งตัวด้วยการทำมุม 0° กับแนวระนาบ และแยกตัวออกจากท่ออลูมิเนียม

3. ลักษณะการเสียหายของท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[45]_3$

ท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[45]_3$ มีลักษณะการเสียหาย แสดงดังรูปที่ 5 (ค) ท่อชั้นในที่เป็นอลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทกจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Diamond mode และในส่วน ของชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่มีมุม 45° ที่มุมบริเวณผิวชั้นนอกของท่ออลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทกจะเกิด การเสียหายแบบ Lamina bucking 45° ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าว ชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่มีมุม 45° จะเกิดการเสียหายจากการรับแรงกระแทกในลักษณะโก่งตัวคล้ายสปริงด้วยการทำมุม 45° กับแนวระนาบหุ้มท่อชั้นในที่เป็นอลูมิเนียมไว้ และจากการสังเกตภายในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างท่ออลูมิเนียมกับเส้นใยที่หุ้มไว้พบว่า เกิดการแยกตัวออกจากรวม

ดังนั้นท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุม $[0]_3$ และ $[45]_3$ จะเกิดการตอบสนองในการรับแรงกระแทกของโครงสร้างร่วมกันในช่วงที่รับแรงกระแทกในช่วงที่เกิดการกระแทกครั้งแรกเท่านั้น เนื่องจากภายหลังจากการรับแรงกระแทกในครั้งแรกท่อโครงสร้างร่วมดังกล่าวจะเกิดการแยกตัวกันระหว่างโครงสร้างที่เป็นอลูมิเนียมกับไฟเบอร์กลาส/โพลีเอสเตอร์



รูปที่ 6 ลักษณะการเสียหายภายในของชิ้นงาน (ก) $[90]_3$ (ข) $[0/90]_2$ (ค) $[45/-45]_2$, และ (ง) $[90/0]_2$

4. ลักษณะการเสียหายของท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[90]_3$

ท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[90]_3$ พบว่าท่อชั้นในที่เป็นออลูมิเนียมขณะรับแรงกระทำจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Diamond mode แสดงดังรูปที่ 5 (ง) และในส่วนของชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่มีมุม 90° ที่หุ้มบริเวณผิวชั้นนอกของท่อออลูมิเนียมขณะรับแรงกระทำจะเกิดการเสียหายแบบ Fiber breaking โดยสังเกตได้จากบริเวณ F แสดงดังรูปที่ 6 (ก) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าว ชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่มีมุม 90° ขณะรับแรงกระทำจะมีพฤติกรรมโดยการรัดและประคองบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียมจนเส้นใยเกิดการแตกหัก โดยชั้นของเส้นใยที่เกิดการแตกหักชั้นที่ 1 และ 2 จะเข้าไปแทรกในบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และชั้นของเส้นใยชั้นที่ 3 ชั้นของเส้นใยที่เกิดการแตกหักบางส่วนจะแทรกเข้าไปในบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และบางส่วนจะหลุดออกจากบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม

5. ลักษณะการเสียหายของท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[0/90]_2$

ท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย $[0/90]_2$ พบว่าท่อชั้นในที่เป็นออลูมิเนียมขณะรับแรงกระทำจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Diamond mode แสดงดังรูปที่ 5 (จ) และในส่วนของชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่หุ้มบริเวณผิวชั้นนอกของท่อออลูมิเนียมขณะรับแรงกระทำ ชั้นที่ 1 ที่มีมุม 0° ในขณะรับแรงกระทำจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Local buckling 0° โดยสังเกตได้จากบริเวณ $L0^\circ$ แสดงดังรูปที่ 6 (ข) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าวนี้ ชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ที่มีมุม 0° จะเกิดการเสียหายจากการรับแรงกระทำในลักษณะเกิดการโก่งตัว และเข้าไปแทรกที่บริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม สาเหตุเนื่องมาจากในขณะรับแรงกระทำ ชั้นของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 3 ที่มีมุม 90° จะมีพฤติกรรมโดยการรัดและประคองชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ไว้ จึงทำให้ชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ที่มีมุม 0° เกิดการโก่งตัว และเข้าไปแทรกที่บริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และในส่วนการเสียหายของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 3 ที่มีมุม 0° ในขณะรับแรงกระทำจะเกิดการเสียหายแบบ Fiber breaking โดยสังเกตได้จากบริเวณ F แสดงดังรูปที่ 6 (ข) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าวเส้นใยจะเกิด

การแตกหัก โดยที่ชั้นของเส้นใยที่เกิดการแตกหักชั้นที่ 2 จะเข้าไปแทรกในบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และชั้นของเส้นใยชั้นที่ 3 บางส่วนจะแทรกเข้าไปในบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และบางส่วนจะหลุดออกจากบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม

6. ลักษณะการเสียหายของท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย [45/-45]₂

ท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย [45/-45]₂ พบว่าท่อชั้นในที่เป็นออลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทกจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Diamond mode แสดงดังรูปที่ 5 (ฉ) และในส่วนของชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้นที่หุ้มบริเวณผิวชั้นนอกของท่อออลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทก ชั้นที่ 1 ที่มีมุม 45° ในขณะรับแรงกระแทกจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Local buckling 45° โดยสังเกตได้จากบริเวณ L45° แสดงดังรูปที่ 6 (ค) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าวนี้ ชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ที่มีมุม 45° จะเกิดการเสียหายจากการรับแรงกระแทกในลักษณะเกิดการโก่งตัว และเข้าไปแทรกที่บริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม สาเหตุเนื่องมาจากในขณะรับแรงกระแทกชั้นของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 3 ที่มีมุม -45° จะมีพฤติกรรมโดยทำการรัดและประคองชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ไว้ จึงทำให้ชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ที่มีมุม 45° เกิดการโก่งตัวและเข้าไปแทรกที่บริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และในส่วนของชั้นของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 3 ที่มีมุม -45° ในขณะรับแรงกระแทกจะเกิดการเสียหายแบบ Fiber breaking โดยสังเกตได้จากบริเวณ F แสดงดังรูปที่ 6 (ค) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าวเส้นใยจะเกิดการแตกหัก โดยที่ชั้นของเส้นใยที่เกิดการแตกหักชั้นที่ 2 จะเข้าไปแทรกในบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และชั้นของเส้นใยชั้นที่ 3 บางส่วนจะแทรกเข้าไปในบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และบางส่วนจะหลุดออกจากบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม

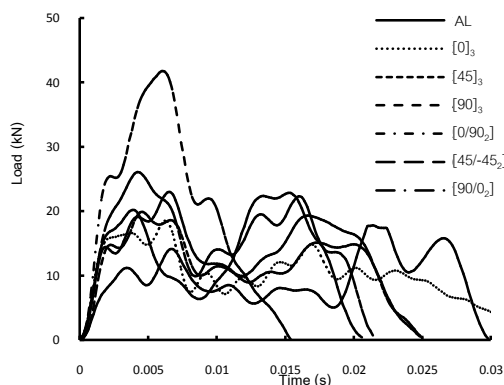
7. ลักษณะการเสียหายของท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย [90/0]₂

ท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใย [90/0]₂ พบว่าท่อชั้นในที่เป็นออลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทกจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Diamond mode แสดงดังรูปที่ 5 (ข) และในส่วนของชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้น

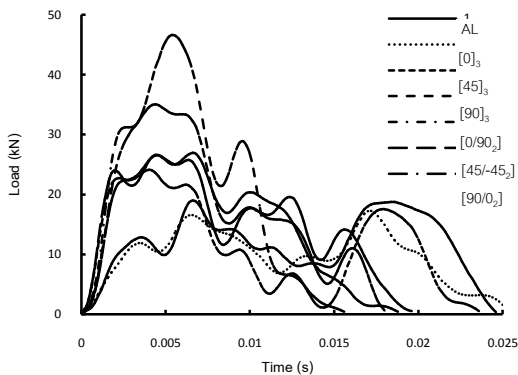
ที่หุ้มบริเวณผิวชั้นนอกของท่อออลูมิเนียมขณะรับแรงกระแทก ชั้นที่ 1 ที่มีมุม 90° ในขณะรับแรงกระแทกจะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Fiber breaking โดยสังเกตได้จากบริเวณ F แสดงดังรูปที่ 6 (ง) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าวนี้ ชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ที่มีมุม 90° ขณะรับแรงกระแทกจะมีพฤติกรรมโดยทำการรัดและประคองบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และยังมีพฤติกรรมในการดึงชั้นของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 3 ที่มีมุม 0° ไว้จนเส้นใยชั้นที่ 1 เกิดการแตกหัก บางส่วนของชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ที่เกิดการแตกหักจะเข้าไปแทรกในบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม และบางส่วนจะติดอยู่ที่หน้าชั้นของเส้นใยชั้นที่ 2 และจากพฤติกรรมของชั้นของเส้นใยชั้นที่ 1 ในขณะรับแรงกระแทกที่ทำการดึงชั้นของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 3 ไว้จึงทำให้ชั้นของเส้นใยชั้นที่ 2 และ 3 ที่มีมุม 0° เกิดลักษณะการเสียหายแบบ Lamina bending 0° โดยสังเกตได้จากบริเวณ B0° แสดงดังรูปที่ 6 (ง) ซึ่งจากลักษณะการเสียหายดังกล่าวเส้นใยจะเกิดการดัด และเกิดการขยายตัวออกจากบริเวณรอยพับของท่อออลูมิเนียม

3.2 โหลดสูงสุดและโหลดเฉลี่ย

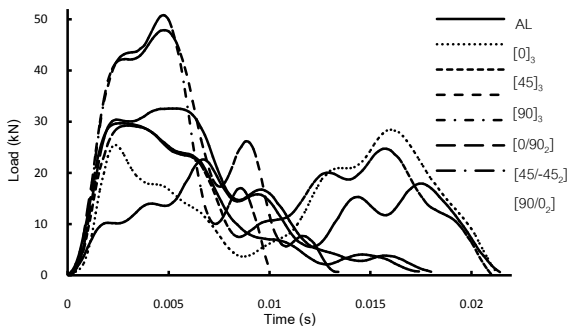
ค่าโหลดสูงสุดและโหลดเฉลี่ยจะสามารถหาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและเวลาที่ได้จากการทดสอบการกระแทกในแนวแกน แสดงดังรูปที่ 7, 8, และ 9 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและเวลาของชิ้นงานจากการทดสอบการกระแทกในแนวแกน ที่ D/t = 25.40



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและเวลาของชิ้นงานจากการทดสอบกระแทกในแนวแกน ที่ $D/t = 29.63$



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างโหลดและเวลาของชิ้นงานจากการทดสอบกระแทกในแนวแกน ที่ $D/t = 42.33$

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์โหลดสูงสุดและโหลดเฉลี่ย

D/t ชิ้นงาน		25.40	29.63	42.33
ท่ออลูมิเนียมเปล่า	P_{max} (kN)	17.81	18.95	22.54
	P_{mean} (kN)	10.13	11.53	12.28
[0] ₃	P_{max} (kN)	18.51	21.09	27.41
	P_{mean} (kN)	11.48	12.53	14.81
[45] ₃	P_{max} (kN)	19.87	24.08	29.24
	P_{mean} (kN)	12.81	14.42	15.86
[90] ₃	P_{max} (kN)	26.07	35.03	47.87
	P_{mean} (kN)	16.55	17.81	23.20
[0/90] ₂	P_{max} (kN)	41.76	46.59	50.72
	P_{mean} (kN)	21.02	20.27	25.60

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์โหลดสูงสุดและโหลดเฉลี่ย (ต่อ)

D/t ชิ้นงาน		25.40	29.63	42.33
[45/-45] ₂	P_{max} (kN)	22.01	26.91	32.51
	P_{mean} (kN)	15.20	16.44	18.31
[90/0] ₂	P_{max} (kN)	21.34	26.58	30.41
	P_{mean} (kN)	14.20	15.93	16.76

จากการทดสอบการกระแทกในแนวแกนของท่ออลูมิเนียมและท่อโครงสร้างร่วมในทุกกรณี จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับเวลา แสดงดังรูปที่ 7, 8, และ 9 จากรูปจะพบว่าในทุกกรณีของชิ้นงาน ช่วงเริ่มต้นการกระแทกชิ้นงานที่รับแรงกระแทกและยังไม่เกิดการเสียหาย โดยสังเกตจากโหลดที่เพิ่มขึ้นในช่วงแรก จากนั้นเมื่อชิ้นงานเกิดการเสียหายโหลดจะตกลงมา จากนั้นกราฟก็จะเกิดการแกว่งตัวที่สอดคล้องกับการเสียหายของชิ้นงานในขณะรับแรงกระแทก จากรูปที่ 7, 8, และ 9 ก็จะนำมาวิเคราะห์และคำนวณหาค่าโหลดสูงสุดและโหลดเฉลี่ย แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าโหลดสูงสุดและโหลดเฉลี่ยของท่ออลูมิเนียมเปล่าและท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใยเหมือนกันจะมีค่าที่เพิ่มขึ้นตาม D/t เนื่องจากชิ้นงานที่มี D/t สูงๆ จะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดในการรับแรงกระแทกมากกว่าชิ้นงานที่มี D/t ต่ำๆ จึงส่งผลให้ชิ้นงานที่มี D/t สูงๆ สามารถรับโหลดได้มากกว่าชิ้นงานที่มี D/t ต่ำๆ และในกรณีของรูปแบบการวางมุมของเส้นใย ที่ D/t ทุกกรณี จะพบว่าท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใยทุกกรณีจะมีโหลดสูงสุดสูงกว่าท่ออลูมิเนียมเปล่า และมีค่าสูงสุดที่รูปแบบการวางมุมของเส้นใย [0/90]₂, [90]₃, [45/-45]₂, [90/0]₂, [45]₃, และ [0]₃ ตามลำดับ และในส่วนของโหลดเฉลี่ยจะพบว่าท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใยทุกกรณีจะมีโหลดเฉลี่ยสูงกว่าท่ออลูมิเนียมเปล่า และมีค่าสูงสุดที่รูปแบบการวางมุมของเส้นใย [0/90]₂, [90]₃, [45/-45]₂, [90/0]₂, [45]₃, และ [0]₃ ตามลำดับ จากการศึกษาลักษณะการเสียหายพบว่าท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุมของเส้นใยที่แตกต่างกันจะมีลักษณะการเสียหายที่ไม่เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงจะมีความแข็งแรงสูงสุดในแนวตามความยาว

ของเส้นใยซึ่งก็คือที่มุม 0° แต่ในกรณีนี้นำมาใช้เป็นท่อ โครงสร้างสร้างร่วมโครงสร้างทั้งสองจำเป็นที่จะต้องตอบสนองกัน และกรณีของท่อโครงสร้างร่วมที่มีรูปแบบการวางมุม $[0/90_2]$ จะมีข้อได้เปรียบกรณีการตอบสนองในการรับแรงของท่อโครงสร้างร่วมเมื่อเทียบกับรูปแบบการวางมุมอื่นๆ โดยสังเกตได้จากมีปริมาณโหลดเฉลี่ยและโหลดสูงสุดที่สูงที่สุด เนื่องจากในชั้นแรกที่มีมุม 0° จะเกิดลักษณะการเสียหายแบบ Local buckling โดยเส้นใยจะเกิดการโค้งร่วมกับบริเวณรอยพับของท่ออลูมิเนียม ประกอบกับการแตกหักของเส้นใย Fiber breaking ในชั้นที่ 2 และ 3 ของมุม 90° ที่แทรกเข้าไปที่บริเวณรอยพับของท่ออลูมิเนียมในขณะรับแรง ซึ่งจะแตกต่างกันกับในกรณีที่รูปแบบการวางมุมอื่นๆ ที่มีมุม 0° ประกอบอยู่ด้วย เช่น ที่รูปแบบการวางมุม $[0]_3$ ชั้นของเส้นใยทั้ง 3 ชั้น จะเกิดการเสียหายแบบ Laminar buckling เส้นใยที่เกิดการโค้งจะเกิดการแยกตัวออกจากบริเวณรอยพับท่ออลูมิเนียม ทำให้ไม่เกิดการตอบสนองของโครงสร้างร่วมในการรับแรง

4. สรุป

จากการศึกษาในการนำวัสดุประกอบประเภทเส้นใยเสริมแรงไฟเบอร์กลาส/โพลีเอสเตอร์ มาใช้ในการเพิ่มสมรรถนะในการรับแรงกระแทกในแนวแกนของท่ออลูมิเนียม พบว่าสามารถเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกได้เป็นอย่างดี โดยพบว่าท่อโครงสร้างร่วมและท่ออลูมิเนียมเปล่ามีแนวโน้มในการรับแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นตาม D/t ท่อโครงสร้างร่วมทุกรูปแบบการวางมุมของเส้นใยสามารถรับแรงกระแทกได้สูงกว่าท่ออลูมิเนียมเปล่า และจากการศึกษารูปแบบการวางมุมของเส้นใยพบว่า ที่รูปแบบ $[0/90_2]$ ที่มีลักษณะการเสียหายโดยชั้นที่ 1 จะมีลักษณะการเสียหายแบบ Local buckling 0° และชั้นที่ 2 และ 3 จะมีลักษณะการเสียหายแบบ Fiber breaking สามารถรับแรงกระแทกได้สูงที่สุด ซึ่งสูงกว่าท่ออลูมิเนียมเปล่าถึง 50.02, 45.14, และ 52.03 % ที่ D/t เท่ากับ 25.40, 29.63, และ 42.33 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ทุนในการวิจัยครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Dong K, Sunghak L. Impact energy absorption of 6061 aluminum extruded tubes with different cross-sectional shapes. *Materials and Design* 1991;20:41-9.
- [2] Minoru Y, Manabu G, Yasuhiko S. Axial crush of hollow cylindrical structures with various polygonal cross-sections numerical simulation and experiment. *Journal of Materials Processing Technology* 2003;140:59-64.
- [3] Hamouda AMS, Saied RO, Shuaib FM. Energy absorption capacities of square tubular structures. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 2007;24:36-42.
- [4] Hakim SSA. Energy absorption characteristics and crashing parameters of filament glass fiber/epoxy composite tubes. *European Journal of Scientific Research* 2010;39:111-21.
- [5] Sivakumar P, Wim VP, Joris D, John V, Dimitrios K, Johan VA, et al. Crushing and energy absorption performance of different geometrical shapes of small-scale glass/polyester composite tubes under quasi-static loading conditions. *Composite Structures* 2011;93:992-1007.
- [6] Lee KS, Im KH, Yang IY. Experimental evaluation of the crashworthiness for lightweight composite structural member. *Thin Solid Films* 2010;518(20):5637-41.