

ความสัมพันธ์ของรูปร่างพื้นที่หน้าตัดกับความสามารถดูดซับพลังงานของท่อหุ้ม

ด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด

The Relationship of Cross-Sectional Area Shape with the Energy Absorption Capacity of Fiberglass Composite Polygon Tubes Under Torsional Moment.

สมญา ภูณะยา¹ และ รัชดา โสภาคะยัง²

Somya Poonaya¹ and Ratchada Sopakayang²

Received: May 7, 2024

Revised: May 16, 2024

Accepted: May 17, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดของท่อหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส ที่มีผลต่อความสามารถดูดซับพลังงานภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อกกลม ผลการเปรียบเทียบโมเมนต์บิดระหว่างการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ส่วนผลของโมเมนต์บิดสูงสุดพบว่า ท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำสุดและจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นจนถึงท่อกกลมจะให้ค่าโมเมนต์บิดสูงสุดมากที่สุด ผลของโมเมนต์บิดเฉลี่ย พบว่า ท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยต่ำสุดและท่อหกเหลี่ยมมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุด ส่วนท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉลี่ยไม่มากนัก ส่วนผลของประสิทธิภาพ พบว่า ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาส

คำสำคัญ: ท่อหลายเหลี่ยม, การดูดซับพลังงาน, โมเมนต์บิด, ไฟไนต์เอลิเมนต์

¹รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

E-mail: somya.p@ubu.ac.th

²ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University

E-mail: ratchada.s@ubu.ac.th

ความหนา 1 และ 2 mm เมื่อเทียบกับท่อเปล่าไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส จะให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น 73.77% และ 73.29% ตามลำดับ และยังพบอีกว่าท่อหกลหุ้มหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นในการออกแบบควรเลือกใช้ท่อหกลหุ้มหุ้มไฟเบอร์กลาสเพราะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานดีที่สุด

Abstract

This research aims to study on the increase the number of sectional sides on the energy absorption capacity of fiberglass composite polygon tubes under torsional moment. The fiberglass composite polygon tubes include square, hexagonal, octagonal, decagonal, icosagonal, tetracontagonal, hexacontagonal, octacontagonal, and circle tubes. The results can be concluded that the comparisons between experimental results are good agree with finite element results. Then, it can find that the value of the maximum torsional moment of empty and fiberglass composite square tubes have the lowest, next the maximum torsional moment increases with the number of sectional sides of tube increase and that of circle tubes have the highest. The results of the average torsional moment of all square tubes have the lowest and all hexagonal tubes have the highest, but other polygonal tubes have slightly change of average torsional moment. The value of torsional moment efficiency of fiberglass composite hexagonal tubes has higher than empty tube equal to 73.77% and 73.29%. It can also be found that the value of torsional moment efficiency of fiberglass composite hexagonal tubes at thickness 1 mm and 2 mm have similar values. Hence, in the design, the fiberglass composite hexagonal tubes should be chosen to increase the energy absorption capacity.

Keywords: Polygon Tube, Energy Absorption, Torsional Moment, Finite Element

1. บทนำ

การเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างและชิ้นส่วนภายในโครงสร้าง เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงและมีความปลอดภัยมากขึ้น ภายใต้พลังงานจลน์ที่มากกระทำกับโครงสร้าง ได้แก่ กันชนของรถยนต์ แผงกันตามบริเวณขอบทางโค้ง แผงกันบริเวณขอบสะพาน และตัวดูดซับพลังงานป้องกันการกระแทก เป็นต้น เพื่อลดความสูญเสียการบาดเจ็บและเสียชีวิตของผู้ขับขี่ให้เบาบางลง วิศวกรผู้ออกแบบด้านการกระแทก โครงสร้างต้องคำนึงถึงตัวแปรสำคัญที่จะใช้ในการวิเคราะห์ ประกอบด้วย แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ พลังงานดูดซับจำเพาะ และประสิทธิภาพการรับแรงของโครงสร้าง เป็นต้น ในการออกแบบสิ่งที่ต้องการคือ ค่าแรงเฉื่อยที่สูงเพื่อจะได้พลังงานดูดซับสูงขึ้นและแรงสูงสุดต่ำ ๆ เพื่อที่จะให้ตัวดูดซับพลังงานเกิดความเสียหาย ก่อนที่โครงสร้างหลักจะเกิดการเสียหาย ทำให้ผู้ขับขี่มีความปลอดภัย ส่วนพลังงานดูดซับจำเพาะจะใช้พิจารณาเกี่ยวกับน้ำหนักของโครงสร้าง พลังงานดูดซับจำเพาะควรมีค่าสูงเพื่อจะช่วยลดปัญหาการสิ้นเปลืองน้ำมันของยานพาหนะได้

การพัฒนาประสิทธิภาพของตัวดูดซับพลังงาน ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเกี่ยวกับรูปร่างหน้าตัดของท่อ พร้อมกับหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส โดยรูปร่างหน้าตัดที่จะทำการศึกษาจะเป็นการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมบริเวณหน้าตัด

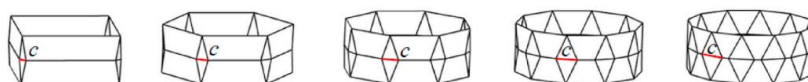
ของท่อตั้งแต่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยใช้วิธีการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปพลังงานดัดของท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสเปรียบเทียบกับพลังงานดัดของท่อเปล่า ที่สำคัญงานวิจัยนี้จะมีจุดเด่นคือ เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมเสริมแรงด้วยการหุ้มไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเฉพาะแรงแนวแกน [1, 4-7] และโมเมนต์ดัด [2] วัสดุที่ใช้ทำท่อเป็นอลูมิเนียมที่มีจุดเด่นในการช่วยลดน้ำหนักของโครงสร้างและประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือ การนำตัวดัดพลังงานไปติดตั้งไว้กับชิ้นส่วนโครงสร้างหรือยานพาหนะที่รับแรงกระแทกภายใต้โมเมนต์บิด เนื่องจากโมเมนต์บิดจะเกิดจากการต่อโยงกับชิ้นส่วนอื่น ๆ เพื่อทำให้เกิดการบิด [8] เช่น นำไปติดตั้งกับโครงสร้างช่วงล่างของรถยนต์ การนำไปยึดกับตัวดัดพลังงานที่รับแรงกดและโมเมนต์ดัด เพื่อเพิ่มความสามารถการดัดพลังงานและสร้างความปลอดภัยของผู้ขับขี่ได้มากยิ่งขึ้น

2. วัตถุประสงค์

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มขึ้นของจำนวนเหลี่ยม ของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อความสามารถดัดพลังงานของท่อหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด

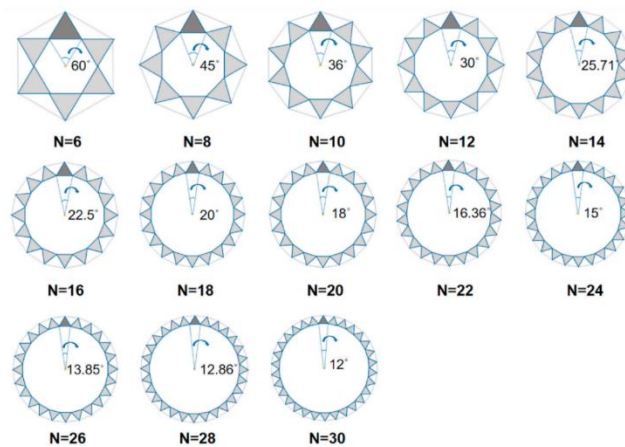
3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดัดพลังงานให้มีความสามารถในการดัดพลังงานของโครงสร้างได้เนื่องจากพลังงานจลน์ที่มากระทำ เป็นการเพิ่มความปลอดภัยและป้องกันการสูญเสียชีวิตเนื่องจากอุบัติเหตุ วิธีการหนึ่งที่ได้ทำการศึกษาคือ การพัฒนาลักษณะรูปร่างหน้าตัดของท่อ เป็นการวิเคราะห์ในเชิงเปรียบเทียบค่าพลังงานดัดของตัวดัดพลังงาน เช่น ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม ภายใต้แรงกระทำในแนวแกน โมเมนต์ดัด หรือ โมเมนต์บิด จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ท่อวงกลมจะให้พลังงานดัดสูงสุดสำหรับแรงกระทำในแนวแกนของท่อของ Somya Poonaya (2007) [1] ท่อสี่เหลี่ยมจะให้พลังงานดัดสูงสุดจากการกระทำด้วยโมเมนต์ดัด Somya Poonaya (2009) [2] และท่อวงกลมจะให้พลังงานดัดสูงสุดภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของ Surasing Arayakul et al. (2014) [3] นอกจากนั้นยังมีการพัฒนาตัวดัดพลังงานเป็นท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม โดยท่อจะมีลักษณะรูปโอริกามิ (Origami) อยู่บริเวณเหลี่ยมด้านข้าง ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม และท่อบีสองเหลี่ยม ภายใต้แรงในแนวแกนท่อของ Shuguang Yao et al. (2020) [4] ดังรูปที่ 1 จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของโอริกามิจะทำให้แรงสูงสุดลดลง ส่วนแรงเฉลี่ยจะขึ้นอยู่กับโมดความเสียหายที่แตกต่างกัน



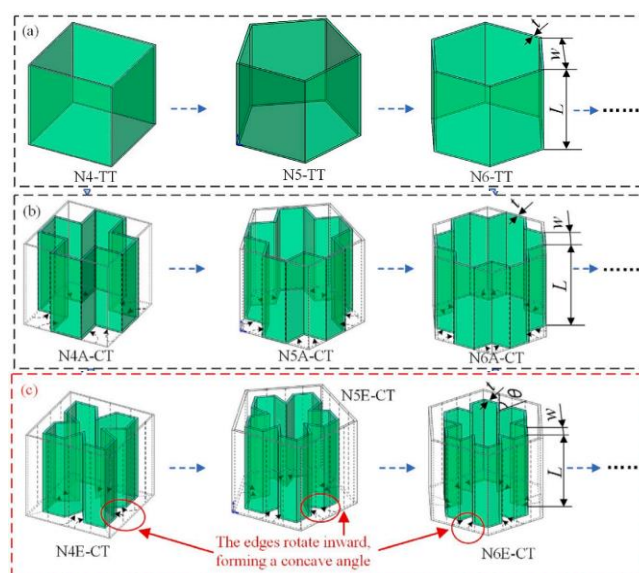
รูปที่ 1 ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมแบบโอริกามิ [4]

มีการพัฒนาตัวดูดซับพลังงานของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมโดยการเพิ่มเซลล์รูปสามเหลี่ยมบริเวณเหลี่ยมตามแนวเส้นรอบวงของท่อที่มีจำนวนตั้งแต่ 6 จนถึง 30 เหลี่ยม ภายใต้แรงกดในแนวแกนของ Shuguang Yao et al. (2020) [5] ดังรูปที่ 2 ผลการวิเคราะห์พบว่าท่อที่มีด้าน $N=24$ เหลี่ยม จะให้ค่าพลังงานดูดซับดีที่สุดและมีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้น 110.37% เมื่อเทียบกับตัวที่มีค่าน้อยที่สุด $N=6$



รูปที่ 2 ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมที่เพิ่มเซลล์รูปสามเหลี่ยมตามแนวเส้นรอบวงของท่อ [5]

ยังมีการศึกษาท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมเว้า ภายใต้แรงกดในแนวแกนของ Jing Zeng et al. [6] โดยลักษณะการเว้าเข้าจะเป็นไปตามจำนวนด้านของท่อ ซึ่งจะแบ่งเป็นแบบ I และแบบ II เป็นการลบมุมเพื่อลดขนาดพื้นที่ ดังรูปที่ 3



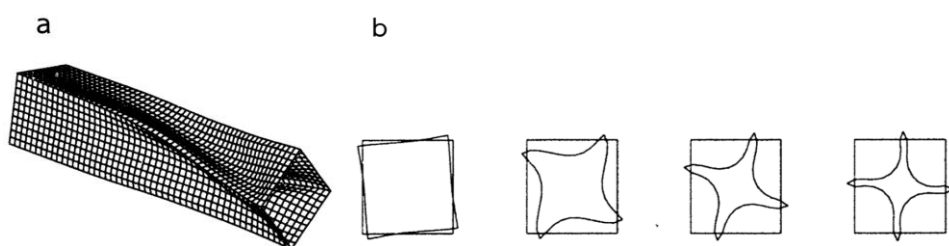
รูปที่ 3 ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม (a) ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม (b) ท่อหลายเหลี่ยมเว้า (c) ท่อหลายเหลี่ยมเว้าลบมุม [6]

การเพิ่มประสิทธิภาพความสามารถในการดูดซับพลังงานของตัวดูดซับพลังงานอีกทางเลือกหนึ่ง โดยการนำไฟเบอร์กลาสผสมเรซินไปหุ้มท่ออลูมิเนียมภายใต้แรงกระแทกแบบพลศาสตร์ของ M.A. Mansor et.al (2021) [7] โดยงานวิจัยได้ทำการจัดเรียงท่ออลูมิเนียมรูปทรงกระบอกวางซ้อนกันแล้วแทรกไฟเบอร์กลาสเข้าไปตรงช่องว่างระหว่างท่ออลูมิเนียม การจัดวางประกอบด้วยอลูมิเนียมวาง 2 และ 3 ชั้น ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มความหนาของชั้นอลูมิเนียมและไฟเบอร์กลาสจะทำให้พลังงานดูดซับจำเพาะสูงขึ้นและสามารถรับการกระแทกดีขึ้น

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการศึกษาท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมมีความสำคัญมาก สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อเหล่านี้ได้ ด้วยการใช้วัสดุอลูมิเนียมและหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส นอกจากจะให้ประโยชน์เนื่องจากมีน้ำหนักเบาแล้วยังให้พลังงานดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาท่ออลูมิเนียมรูปร่างหลายเหลี่ยมเสริมแรงด้วยการหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด จุดเด่นในการวิจัยนี้คือเป็นการศึกษาภายใต้โมเมนต์บิด ซึ่งมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสามารถในการชนของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมภายใต้โมเมนต์บิดน้อยมาก เช่น การหาคุณสมบัติทางกลภายใต้โมเมนต์บิดของท่อวงกลมที่ใช้วัสดุประกอบที่ประสานกันระหว่างไฟเบอร์กลาสกับปานรามิของ Jun Ke et al. (2023) [9] และการทำงานทางทฤษฎีความเสียหายของผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของ Weigang Chen et al. (2000) [8] ได้วิเคราะห์ทฤษฎีความเสียหายของโครงสร้างที่เรียกว่า “วิธีเส้นการพับ (Hinge Line Method)” เมื่อโครงสร้างเกิดการเสียรูปในช่วงพลาสติก (Plastic Deformation) จะเกิดเส้นการพับรอบ ๆ โครงสร้าง โดยพลังงานงานภายในโครงสร้างที่เสียรูปแล้วหาได้จากผลรวมของพลังงานที่กระจายเข้าไปในแต่ละเส้นการพับ การศึกษาเป็นการวิเคราะห์กับท่อสี่เหลี่ยมผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดดังรูปที่ 4 และสมการทั่วไปแสดงในสมการที่ 1

$$T \cdot \dot{\theta} = \int_S N_{\alpha\beta} \cdot \dot{\epsilon}_{\alpha\beta} dS \quad (1)$$

เมื่อ T คือ โมเมนต์บิดที่กระทำที่ปลายของท่อ, $\dot{\theta}$ คือ ความเร็วเชิงมุม, S คือ พื้นผิวของเส้นการพับ, $N_{\alpha\beta}$ และ $\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$ คือ เทนเซอร์ของความเค้นแผ่นบาง (Membrane Stress Tensor) และเทนเซอร์ของอัตราความเครียด ตามลำดับ



รูปที่ 4 รูปร่างความเสียหายภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของท่อสี่เหลี่ยมผนังบาง (a) ท่อสี่เหลี่ยมบิดไปมุม 45 องศา (b) การเสียรูปของพื้นที่หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม [8]

4. วิธีดำเนินการศึกษา

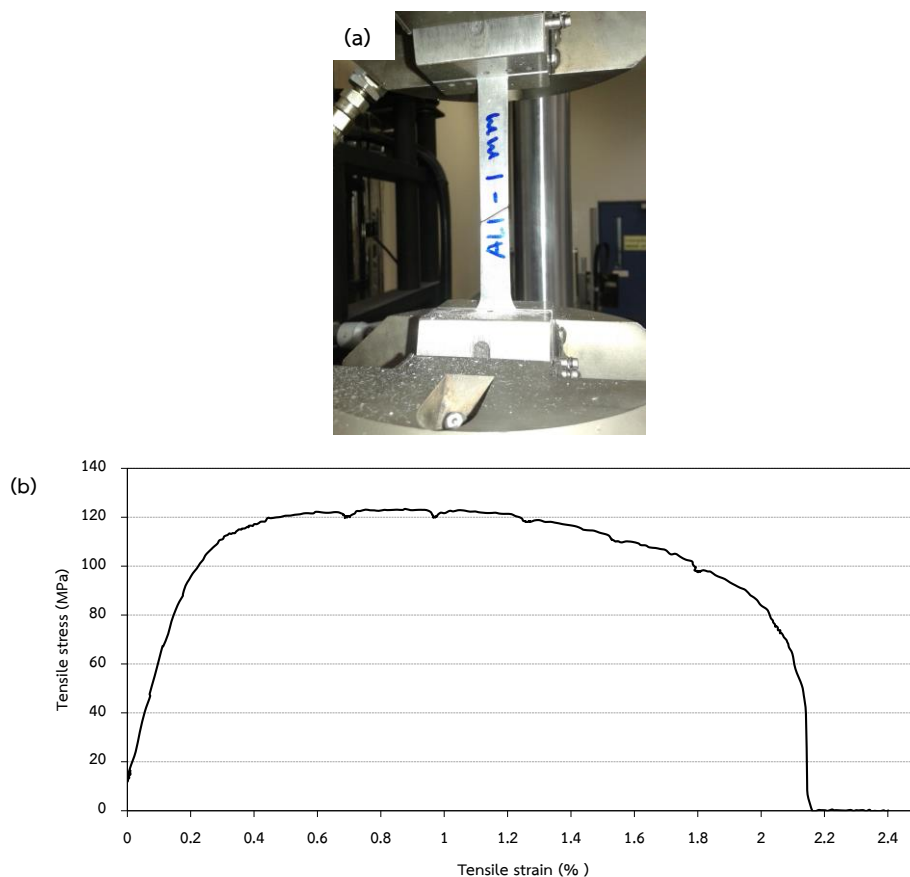
การวิเคราะห์การเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของหน้าตัดท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้การกระทำของโมเมนต์บิด มีวิธีดำเนินการศึกษา ดังนี้

4.1 วัสดุที่ใช้ทำท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมเป็นอลูมิเนียม ขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร ความยาวเส้นรอบวง 320 มิลลิเมตร และความยาวท่อ 150 มิลลิเมตร

4.2 ท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมที่จะทำการศึกษาคือ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม และท่อกกลม

4.3 คุณสมบัติของวัสดุ

4.3.1 อลูมิเนียม มีความหนาแน่น $2,700 \text{ kg/m}^3$ ค่าอัตราส่วนปัวซอง 0.3 และคุณสมบัติอื่น ๆ สามารถหาได้จากเครื่องทดสอบแรงดึง ดังรูปที่ 5 จะได้ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น $32,000 \text{ MPa}$ ความเค้นโหมดตัว 125.64 MPa และค่าความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดพลาสติก (Plastic Strain) ที่ใช้ในโปรแกรมออบาคัส (ABAQUS) แสดงในตารางที่ 1

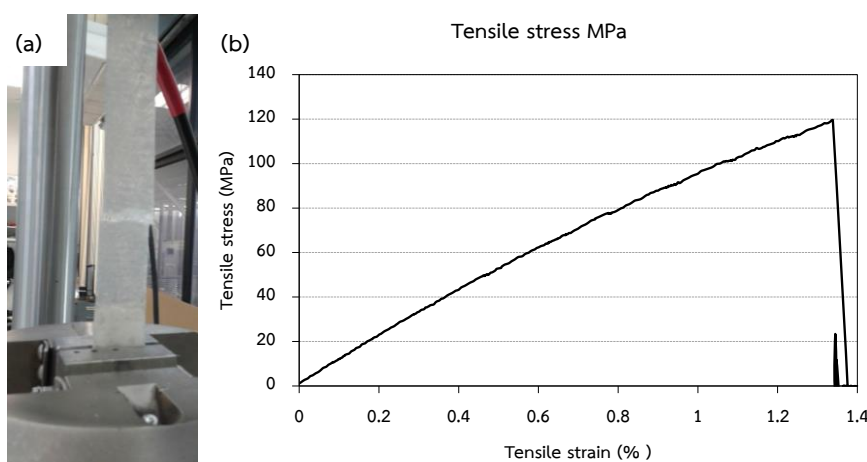


รูปที่ 5 คุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียม (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง
(b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของอลูมิเนียม

ตารางที่ 1 ค่าความเค้นจริงและความเครียดพลาสติกของอลูมิเนียมที่ใช้ในโปรแกรมอบาคัส

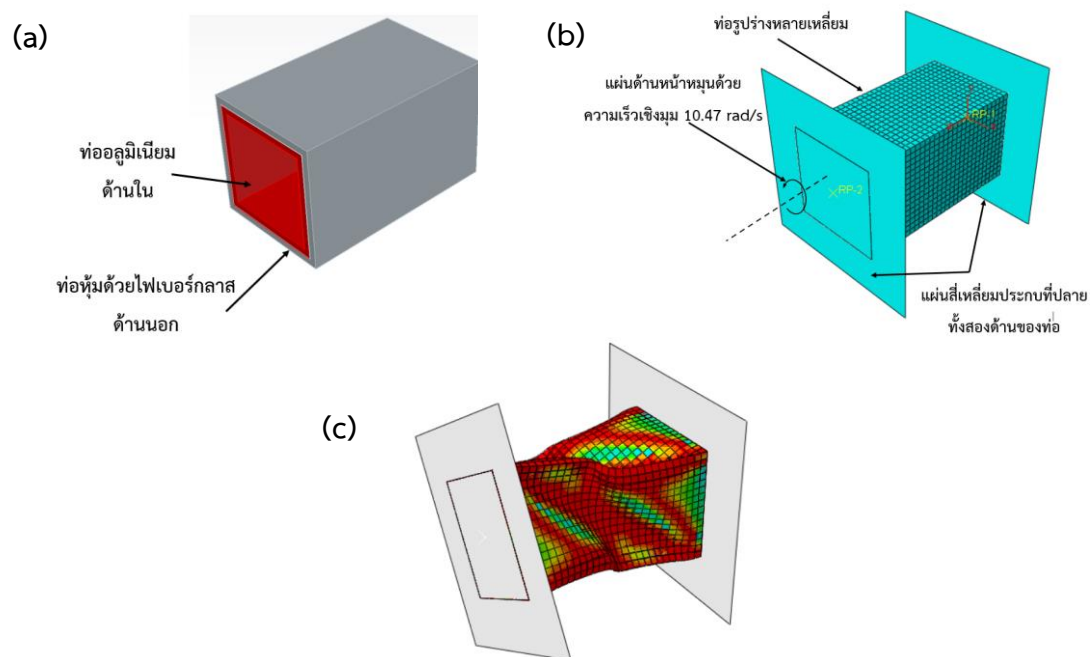
ความเค้นจริง (MPa)	ความเครียดพลาสติก
119.02	0.00000
120.75	0.00322
121.99	0.00366
122.47	0.00409
123.84	0.00508
124.02	0.00512
124.75	0.00656
125.64	0.00680

4.3.2 คุณสมบัติวัสดุของไฟเบอร์กลาส สามารถหาได้จากเครื่องทดสอบแรงดึง ที่แสดงดังรูปที่ 6 จะได้ความหนาแน่นของวัสดุ 112 kg/m^3 อัตราส่วนปัวซอง 0.2 และค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น $8,930 \text{ MPa}$ และค่าความเค้นครากตัว 121 MPa



รูปที่ 6 คุณสมบัติวัสดุของไฟเบอร์กลาส (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของไฟเบอร์กลาส

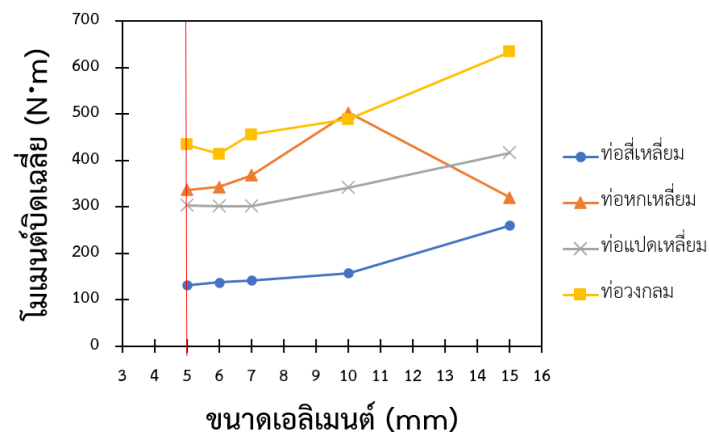
4.4 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่จะศึกษา คือ การเปลี่ยนแปลงจำนวนเหลี่ยมของพื้นที่หน้าตัดท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม และทอวงกลม การจำลองทางคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (a) การวางชั้นของอลูมิเนียมกับไฟเบอร์กลาส (b) การสร้างแบบจำลอง (c) ลักษณะการเสียรูปของท่อ

รูปที่ 7 การจำลองคอมพิวเตอร์ของท่อรูปหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด การวิเคราะห์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้การจำลองในโปรแกรมออบาคัส (ABAQUS) การจำลองเริ่มจากการเลือกลักษณะปัญหาเป็นแบบพลศาสตร์ชัดเจน (Explicit Dynamic) โดยความเร็วเชิงมุมในการบิดของแผ่นประกอบด้านหน้า 5 rad/s ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ใช้เวลา 0.105 วินาที จะบิดไปเป็นมุม 30 องศา ส่วนแผ่นประกบอีกที่ปลายด้านหนึ่งของท่อ จะมีเงื่อนไขขอบเขตไม่ให้เคลื่อนที่ทุกทิศทาง ลักษณะเอลิเมนต์แผ่นประกบที่ปลายท่อทั้งสองเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมีสี่โนดแบบแข็งเกร็ง (R3D4: A 4-node 3-D Bilinear Rigid Quadrilateral.) ส่วนชิ้นงานทดสอบเป็นท่อพื้นที่หน้าตัดรูปหลายเหลี่ยมลักษณะเอลิเมนต์แบบเปลือก (Shell Elements) รูปสี่เหลี่ยมมีสี่โนดแบบเสียรูปได้ (S4R :Deformable Body) คุณสมบัติวัสดุเป็นแบบเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) ลักษณะการสัมผัสของทุกชิ้นงานเป็นแบบทั่วไป (General Contact) ส่วนการสัมผัสกันระหว่างอลูมิเนียมและไฟเบอร์กลาสเป็นแบบผิวต่อผิว (Surface to Surface) โดยทุกผิวสัมผัสกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.01 และที่ปลายท่อทั้งสองข้างจะเชื่อมติดกันกับแผ่นประกบด้วยคำสั่ง “Tie”

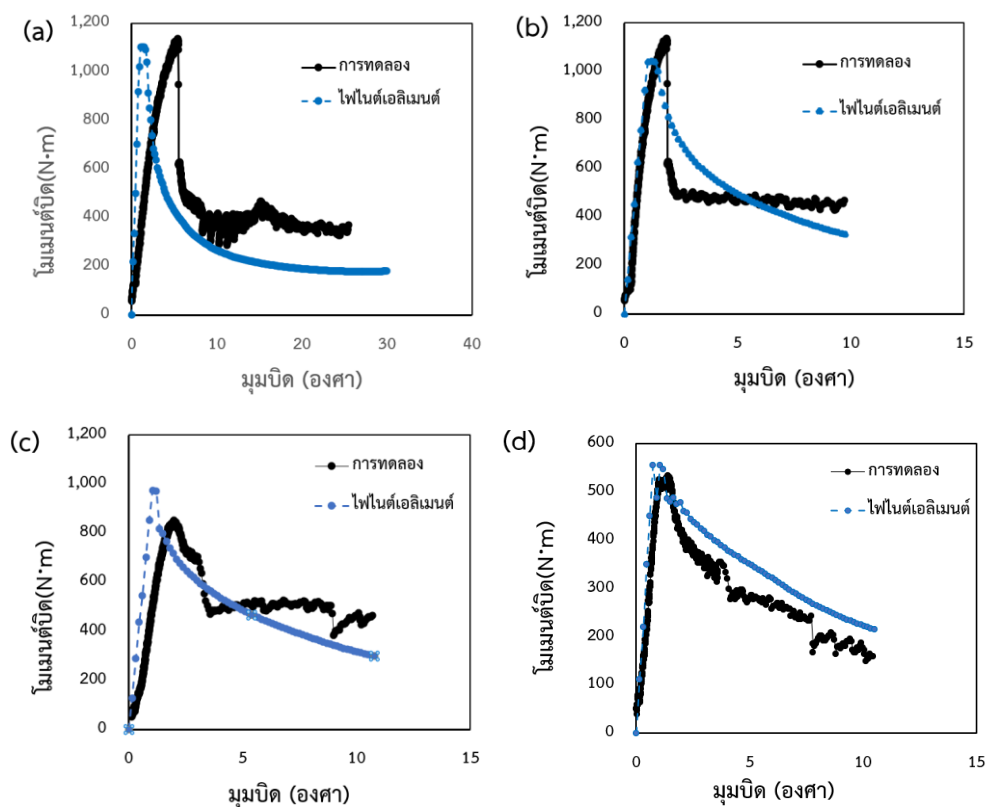
การหาค่าความอิสระของเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 8 เป็นตัวอย่างแสดงการหาค่าความอิสระของเอลิเมนต์ของท่อรูปหลายเหลี่ยมที่มีความหนาอลูมิเนียม 1 mm จะเห็นว่าเอลิเมนต์เริ่มมีความเสถียรหรือมีการลู่เข้าของค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ขนาดเอลิเมนต์ 5, 6 และ 7 mm ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จะใช้ขนาดเอลิเมนต์ เท่ากับ 5 mm



รูปที่ 8 ความอิสระของขนาดเอลิเมนต์ท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมที่ความหนาอลูมิเนียม 1 mm

5. ผลการศึกษา

5.1 การเปรียบเทียบผลการจำลองคอมพิวเตอร์กับผลการทดลอง เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลการทดลองที่จะนำมาเปรียบเทียบนี้ได้มาจากการวิจัยที่ผ่านมา[3] ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบผลไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง (a) ท่อวงกลม (b) ท่อแปดเหลี่ยม (c) ท่อหกเหลี่ยม และ (d) ท่อสี่เหลี่ยม

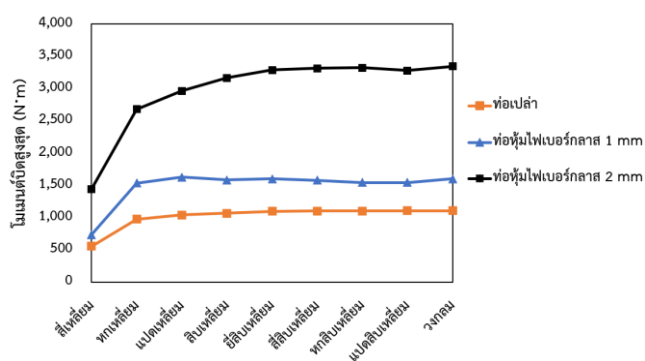
ในรูปที่ 9 (a) - (d) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับมุมบิดของท่อพบว่ากราฟมีทิศทางไปในทางเดียวกัน จากผลการทดลองในตารางที่ 2 พบว่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยทั้งหมดของท่อ มีความคลาดเคลื่อน 10.31% เนื่องจากการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบจำลองของท่อจะไม่มีรอยเชื่อมที่มุมรอยพับ แต่ในการทดลองการขึ้นรูปท่อจะเป็นการพับขึ้นรูปสำหรับท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ส่วนท่่วงกลม จะเป็นการม้วนขึ้นรูป ซึ่งท่อที่ใช้ในการทดลองจะทำการเชื่อมที่บริเวณรอยพับ และในการทดลองในแต่ละกรณี จะทำการทดลองซ้ำกัน 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

ตารางที่ 2 ค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยของท่อลักษณะต่าง ๆ

ชนิดท่อ	โมเมนต์บิดเฉลี่ย (N·m)		ร้อยละความคลาดเคลื่อน
	การทดลอง	ไฟไนต์เอลิเมนต์	
ท่่วงกลม	600.47	505.29	15.85
ท่อแปดเหลี่ยม	611.66	527.99	13.68
ท่อหกเหลี่ยม	542.32	499.02	7.98
ท่อสี่เหลี่ยม	331.93	344.25	-3.71
เฉลี่ย			10.31

5.2 ผลของการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม

5.2.1 โมเมนต์บิดสูงสุดคือ โมเมนต์บิดที่มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ ท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมควรมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดที่ต่ำกว่าโครงสร้างหลัก เพื่อสามารถทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจลน์ที่มากระทำกับโครงสร้างหลัก ไม่เช่นนั้นโครงสร้างหลักจะเกิดการเสียหายก่อนท่อได้ ผลการเปรียบเทียบระหว่างท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสที่ความหนา 1 mm และ ความหนา 2 mm กับท่อเปล่า (ไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส) ดังแสดงในรูปที่ 10

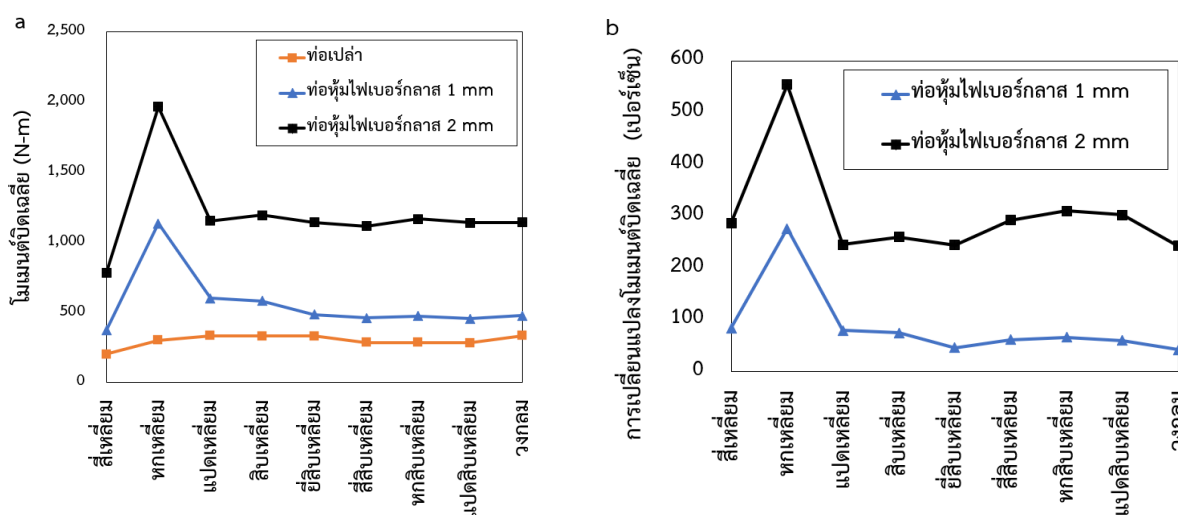


รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดสูงสุดกับท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm และท่อเปล่า (ไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส)

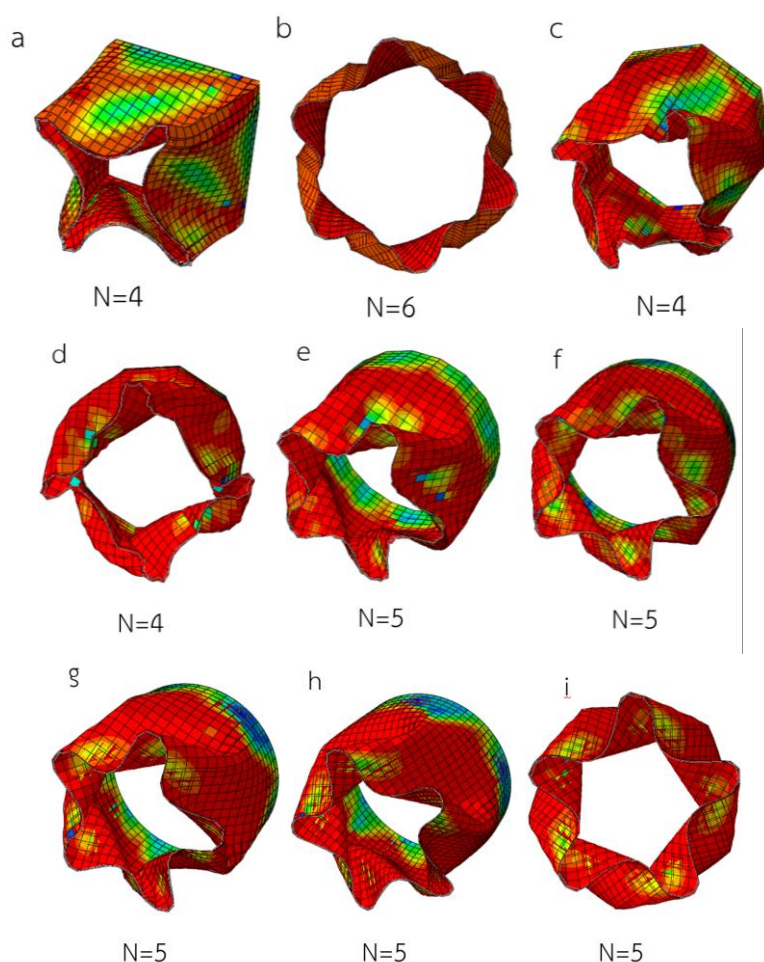
จากรูปที่ 10 พบว่าท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำสุดและท่อกกลมจะให้ค่าโมเมนต์บิดสูงสุดมากที่สุด และค่าโมเมนต์บิดสูงสุดจะเพิ่มขึ้นไปถึงท่อหกเหลี่ยม หลังจากนั้นค่าโมเมนต์บิดสูงสุดจากท่อหกเหลี่ยมจนถึงท่อกกลมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บิดสูงสุดของท่อกกลมกับท่อสี่เหลี่ยม พบว่าท่อเปล่า เพิ่มขึ้น 98.69% ท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm เพิ่มขึ้น 118.41% และท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 2 mm เพิ่มขึ้น 132.19% ตามลำดับ

5.2.2 โมเมนต์บิดเฉื่อย เป็นตัวแปรที่ใช้ในการพิจารณาความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อ พื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยม ท่อที่มีโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงจะให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานที่สูง ผลการวิเคราะห์ท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมแสดงในรูปที่ 11

จากรูปที่ 11 (a) พบว่า ท่อเปล่า (ท่อไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส) จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยไม่มากนักที่ทุก ๆ รูปร่างหน้าตัดของท่อ ส่วนท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm จะเห็นว่า ท่อสี่เหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยต่ำสุดและท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงสุด ส่วนท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อกกลมมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยน้อยมาก ดังในรูปที่ 11 (b) ถ้าพิจารณาท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm และ 2 mm จะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉื่อยเปรียบเทียบกับท่อเปล่าหกเหลี่ยมไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น 276.67% และ 553.96% ตามลำดับ



รูปที่ 11 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉื่อยกับท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม (b) การเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉื่อยของท่อหุ้มไฟเบอร์กลาส ความหนา 1 และ 2 mm เปรียบเทียบกับท่อเปล่า (ไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส)

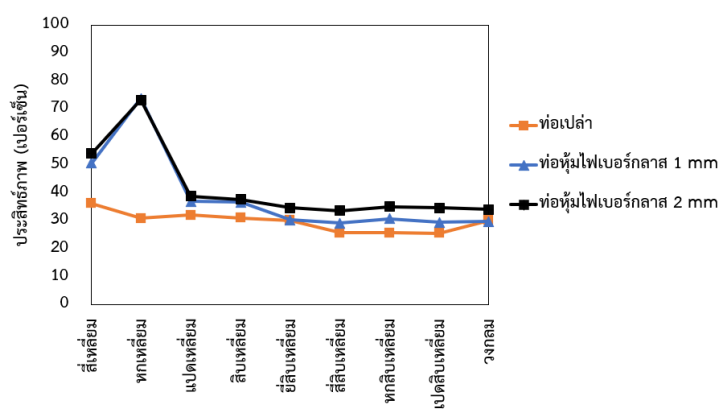


รูปที่ 12 การเสียรูปของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสขนาดความหนา 1 mm
 (a) ท่อสี่เหลี่ยม (b)ท่อหกเหลี่ยม (c) ท่อแปดเหลี่ยม (d) ท่อสิบเหลี่ยม (e) ท่อยี่สิบเหลี่ยม (f) ท่อสี่สิบเหลี่ยม
 (g) ท่อหกสิบเหลี่ยม (h) ท่อแปดสิบเหลี่ยม (i) ท่อวงกลม

จากรูปที่ 12 เป็นการเสียรูปของท่อพื้นที่หน้าตัดรูปร่างหลายเหลี่ยม พบว่า ท่อหกเหลี่ยมจะมีเส้นการพับมากที่สุด ($N = 6$) ส่วนท่อสี่เหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อกสิบเหลี่ยม มีเส้นการพับจำนวน 4 เส้น ($N = 4$) ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม มีเส้นการพับจำนวน 5 เส้น จะเห็นว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุด เพราะในทฤษฎีความเสียหายของโครงสร้างที่มีการเสียรูปในช่วงพลาสติก ความสามารถในการดูดซับพลังงานมีการกระจายตามเส้นการพับของโครงสร้าง [8] ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุด เนื่องจากมีเส้นการพับมากที่สุด

5.2.3 ประสิทธิภาพการรับแรง เป็นการหาประสิทธิภาพความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม หาได้จากนำโมเมนต์บิดเฉลี่ยหารด้วยโมเมนต์สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 13 พบว่าท่อหกเหลี่ยม

หุ้มไฟเบอร์กลาสจะมีประสิทธิภาพสูงสุด ที่ความหนาไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm เท่ากับ 73.77% และ 73.29 % ตามลำดับ รองลงมาคือ ท่อสี่เหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสมีประสิทธิภาพสูงสุด ที่ความหนาไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm เท่ากับ 50.63% และ 54.06% ตามลำดับ ส่วนท่อหุ้มไฟเบอร์กลาสรูปร่างหลายเหลี่ยมชนิดอื่น ๆ จะมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ที่ความหนาไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm โดยเฉลี่ยมีประสิทธิภาพ 31.82% และ 35.48% ตามลำดับ และยังพบว่าท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาส 1 และ 2 mm มีประสิทธิภาพแตกต่างกันไม่นัก 11.50% ถ้าคำนึงถึงต้นทุน ควรเลือกใช้ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm แต่ถ้าคำนึงถึงความปลอดภัยควรใช้ท่อที่มีพลังงานดูดซับสูง ดังในรูปที่ 10 ควรเลือกใช้ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 2 mm



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกับท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม

6. สรุปและการอภิปราย/ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม สามารถสรุปผล ดังนี้

6.1 ผลการเปรียบเทียบกราฟค่าโมเมนต์บิดกับมุมบิดระหว่างการทดลองและไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยมีความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ย 10.31%

6.2 ผลของโมเมนต์บิดสูงสุด พบว่า ท่อสี่เหลี่ยมมีค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำสุด รองลงเป็นท่อหกเหลี่ยมและท่อวงกลมให้ค่าโมเมนต์บิดสูงสุดมากที่สุด ดังนั้นในการออกแบบควรใช้ท่อสี่เหลี่ยมและท่อหกเหลี่ยมที่มีค่าโมเมนต์บิดต่ำสุด

6.3 ผลของโมเมนต์บิดเฉลี่ย พบว่า ท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยต่ำสุด ท่อหกเหลี่ยมมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุด ส่วนท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์บิดเฉลี่ยไม่มากนัก ดังนั้นในการออกแบบควรใช้ท่อที่มีโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงสุดคือท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสหนา 2 mm จะให้ความปลอดภัยสูงต่อผู้ขับขี่

6.4 ผลของประสิทธิภาพการรับแรง พบว่า ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm จะให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับท่อเปล่าไม่หุ้มไฟเบอร์กลาส เนื่องจากท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสดังกล่าวจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉื่อยสูงสุดและค่าโมเมนต์บิดสูงสุดต่ำ จึงทำให้มีประสิทธิภาพการรับแรงที่สูงขึ้น และยังพบว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 และ 2 mm มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการออกแบบที่คุ้มทุนควรเลือกใช้ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 1 mm แต่คำนึงถึงความปลอดภัยสูงควรใช้ท่อหกเหลี่ยมหุ้มไฟเบอร์กลาสความหนา 2 mm เนื่องจากมีค่าโมเมนต์เฉื่อยสูงทำให้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Poonaya S, Thinvongpituk C, Teebonma U. Comparison of absorption energy of various section steel tubes under axial compression and bending loading. In: Proceedings of the 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2007 Oct 17-19; Chonburi, Thailand. Chonburi (Thailand): [Thai Society of Mechanical Engineers]; 2007. p. 32.
- [2] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under torsion loading. In: Proceedings of the 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2009 Nov 4-7; Chiang Mai, Thailand. Chiang Mai (Thailand): [Thai Society of Mechanical Engineers]; 2009. p. 75.
- [3] Arayangkul S, Poonaya S, Payom C. Absorbed energy efficiency of polygon thin-walled tubes subjected to torsion. Naresuan Univ Eng J. 2014;9(1):15-24.
- [4] Shuguang Y, Huifen Z, Mingyang L, Zhixiang L, Ping X. Energy absorption of origami tubes with polygonal cross-sections. Thin-walled Struct [Internet]. 2020 Dec [cited 2023 Aug 25];157:107013. Available from: https://www.researchgate.net/publication/343807602_Energy_absorption_of_origami_tubes_with_polygonal_cross-sections
- [5] Shuguang Y, Yuexing T, Zhixiang L, Fan Y, Ping X. Crushing characteristic of polygonal tubes with hierarchical triangular cells. Thin-walled Struct [Internet]. 2020 Dec [cited 2023 Sep 30];157(4):107031. Available from: https://www.researchgate.net/publication/343981628_Crushing_characteristic_of_polygonal_tubes_with_hierarchical_triangular_cells
- [6] Jing Z, Suchao X, Hui Z, Tao L, Yaxin L. Study and optimization of energy absorption characteristics of a new concave polygon tube. Structures [Internet]. 2023 July [cited 2023 Oct 10];53(1):1030-45. Available from: https://www.researchgate.net/publication/371977311_Study_and_optimization_of_energy_absorption_characteristics_of_a_new_concave_polygon_tube

- [7] Mansor MA, Ahmad Z, Abdullah MR. Crashworthiness capability of thin-walled fibre metal laminate tubes under axial crushing. *Eng Struct* [Internet]. 2022 Feb [cited 2023 Dec 3];252:113660. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029621017491>
- [8] Weigang C, Tomasz W. Torsional collapse of thin-walled prismatic columns. *Thin-Walled Struct* [Internet]. 2000 Mar [cited 2024 Jan 27];36(3) :181-96. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263823199000439>
- [9] Jun K, Li-jie L, Zhen-yu W, Zhong-ping L, Luo B, Dong-wei L. Torsional mechanical properties and damage mechanism of glass fiber-ramie hybrid circular tube. *Compos Struct* [Internet]. 2024 Jan [cited 2024 Mar 29];327:117680. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822323010267/>