

การวิเคราะห์ตัวแปรของท่อผนังบางรูปหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิด
โดยออกแบบการทดลอง

Parametric Analysis of Foam-Filled Polygonal Thin-walled Tubes Subjected to Torque using Experimental Design

สมญา ภูณะยา*

Somya Poonay*

Received: April 16, 2024; Revised: July 9, 2024; Accepted: July 10, 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เน้นการศึกษาตัวแปรของท่อผนังบางรูปหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิดโดยวิธีการทดลอง ได้แก่ ท่อวงกลม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยม ท่อทุกตัวจะมีความยาวเส้นรอบรูปของหน้าตัดและความยาวเท่ากัน การวิเคราะห์จะพิจารณาผลกระทบของความหนาแน่นโฟมและจำนวนหน้าตัดที่เพิ่มขึ้น ส่วนตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะ ผลการทดลองพบว่า พฤติกรรมความเสียหายจะเริ่มต้นที่ปลายด้านหนึ่งของท่อและเกิดจำนวนของเส้นการพับเพิ่มขึ้นตามมุมบิดที่เพิ่มขึ้น ผลของความหนาแน่นโฟม พบว่าความหนาแน่นโฟมที่ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ให้แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะสูงสุด และความหนาแน่น 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่ำสุด ส่วนผลของรูปทรงหน้าตัดพบว่า ท่อวงกลมจะให้แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะสูงสุด รองลงมาเป็นท่อแปดเหลี่ยม หกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมต่ำสุด ตามลำดับ

คำสำคัญ : ท่อหลายเหลี่ยม; แรงบิด; เติมโฟม; การทดลอง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

¹ Faculty of Engineering, Ubonratchathani University

* Corresponding Author, Tel. 08 2951 4114, E - mail: somya.p@ubu.ac.th

Abstract

This paper focuses on the parametric study of foam-filled polygonal thin-walled tubes subjected to torsion using experiments. The tube shapes include circle, octagonal, hexagonal, and square. The tubes have the same perimeter, length, and material. The effects of foam density and the number of polygon corners are also investigated. The parameters for analysis are average force, maximum force, absorbed energy, and specific absorbed energy. The experimental results show that failure behavior starts at one end of the tube, and the number of hinge lines increases with the torsional angle. The results for foam density concluded that the average force, maximum force, absorbed energy, and specific absorbed energy of foam with a density of 100 kg/m^3 are the highest, while those of foam with a density of 50 kg/m^3 are the lowest. Furthermore, the results for polygonal shapes indicate that the circular tube has the highest average force, maximum force, absorbed energy, and specific absorbed energy, followed by the octagonal and hexagonal tubes, with the square tube being the lowest.

Keywords: Polygonal Tubes; Torque; Foam-filled; Experiment

บทนำ

การพัฒนาตัวดูดซับพลังงานหรือตัวกันชน ให้มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงเนื่องจากพลังงานจลน์ที่มากระทำ เพื่อช่วยลดความเสียหายของโครงสร้างหลักและเพิ่มความปลอดภัยต่อมนุษย์เนื่องจากอุบัติเหตุลดการบาดเจ็บและการสูญเสียชีวิตของผู้ใช้โครงสร้างเหล่านี้ ตัวแปรที่สำคัญใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาความสามารถในการดูดซับพลังงานของตัวดูดซับพลังงาน ได้แก่ แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะ เป็นต้น มีนักวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษาค้นคว้าตัวดูดซับพลังงาน ซึ่งจะมีวิธีวิเคราะห์ 3 วิธีเพื่อหาคำตอบคือ วิธีทางทฤษฎี [1] - [7] วิธีการทดลอง [8] - [9] และวิธีทางจำลองทางคอมพิวเตอร์ [10] - [12] การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวดูดซับพลังงาน สามารถจำแนกตามความสนใจของนักวิจัย เช่น จำแนกตามรูปร่าง ท่อสี่เหลี่ยม [2] - [3] โครงสร้างรังผึ้ง [4] ปริมาตรทรงสี่เหลี่ยม [11] - [12] ท่อรูปร่างหลายเหลี่ยม [13] - [15] ท่อกลม [16] กรวยกลม [17] - [18] ท่อรูปดาว [19] และท่อที่มีครีบด้านข้าง [20] เป็นต้น จำแนกคุณสมบัติวัสดุ เช่น การเติมโฟมเข้าไปภายในท่อที่มีรูปร่างต่าง ๆ [20] - [21] จำแนกตามแรงมากระทำ คือ แรงดัด [8] - [9] แรงแนวแกน [16] - [17], [22] แรงบิด [23] เป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาตัวดูดซับพลังงานของท่อที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยมและเติมโฟมภายในท่อเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงาน โดยแรงที่มากระทำกับท่อเป็นแรงบิด ซึ่งมีผู้วิจัยเกี่ยวกับตัวดูดซับพลังงานที่ใช้แรงบิดน้อยมาก เนื่องจากแรงบิดเป็นแรงที่ต้องอาศัยชิ้นส่วนต่อโยงกับชิ้นส่วนอื่นจึงจะเกิดแรงบิดได้ ส่วนรูปร่างหลายเหลี่ยมที่ทำการศึกษาค้นคว้า คือ ท่อวงกลม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟม 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และงานวิจัยนี้ใช้วิธีการวิเคราะห์โดยการทำการทดลอง

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยของการวิเคราะห์ตัวแปรของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิดด้วยวิธีการทดลอง สามารถแบ่งตามหัวข้อดังนี้

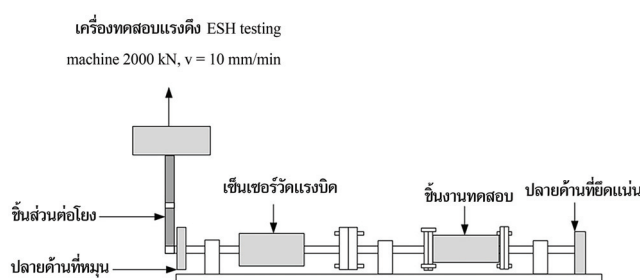
1. ขอบเขตงานวิจัย

1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นอลูมิเนียมที่มีความหนา 1 มิลลิเมตร ความยาวเส้นรอบวงของหน้าตัด 320 มิลลิเมตร ความยาวของท่อ 150 มิลลิเมตร

- 1.2 ท่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม
- 1.3 โฟมที่ใส่เข้าไปในท่อ จะเป็นโฟมชนิดโพลียูรีเทนที่มีความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
- 1.4 ความเร็วที่ใช้ในการบดท่ออย่างช้า ๆ เท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที
- 1.5 ปลายของท่ออีกด้านจะรับแรงบด ส่วนอีกด้านจะถูกยึดแน่นไม่ให้เคลื่อนที่
- 1.6 ค่าที่ได้จากการวัดคือ แรงบดกับมุมบด เพื่อนำไปคำนวณหาตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์

2. ชุดทดสอบแรงบด

ชุดทดสอบแรงบด ได้ทำการออกแบบและสร้าง เพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 1 ประกอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อดึงชิ้นตัวอย่าง 2 ชิ้น ให้หมุนแกนเพลลาเพื่อบดชิ้นงานทดสอบ โดยมีเซ็นเซอร์วัดแรงบด และชิ้นงานทดสอบปลายด้านหนึ่งจะหมุนต่อกับเซ็นเซอร์วัดแรงบด ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะยึดแน่น



(ก) ส่วนประกอบชุดมือทดสอบ



(ข) ส่วนประกอบ

รูปที่ 1 ชุดทดสอบแรงบด

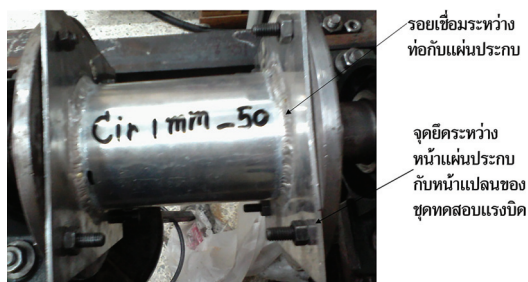
3. การขึ้นรูปชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม ในการขึ้นรูปชิ้นงานจะใช้วิธีการขึ้นรูปด้วยเครื่องปั๊มสำหรับท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อแปดเหลี่ยม เป็นมุม 90 60 และ 45 องศา ตามลำดับ ส่วนท่อวงกลมจะทำการขึ้นรูปด้วยการหมุนโดยเครื่องหมุนแล้วเชื่อมติดกันที่รอยพับ ปลายทั้งสองข้างของท่อจะเชื่อมติดกับแผ่นอลูมิเนียมพร้อมเจาะรูเพื่อยึดติดกับหน้าแปลนของชุดทดสอบแรงบด ดังรูปที่ 2(ก)

ส่วนการเติมโฟมภายในท่อ ท่อทุก ๆ หน้าตัดจะทำการเติมโฟม ด้วยความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยโฟมที่เติมจะเป็นโพลียูรีเทนที่เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิด คือ โพลียอล (Polyol) และไดโซไซยาเนต (Diisocyanate) ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากันจึงจะเกิดการขยายตัว ปริมาตรโฟมที่จะเติมภายในท่อดังตารางที่ 1 และดังรูปที่ 2(ข)

ตารางที่ 1 ปริมาตรโฟมที่เติมเข้าไปในท่อ

ความหนาแน่นโฟม (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ปริมาตรโฟม (ลูกบาศก์เซนติเมตร)			
	ท่อสี่เหลี่ยม	ท่อหกเหลี่ยม	ท่อแปดเหลี่ยม	ท่อวงกลม
50	19.01	22.10	23.15	24.47
75	28.52	33.15	34.73	36.71
100	38.03	44.20	46.71	48.95



(ก) ชิ้นงานและติดตั้งกับชุดทดสอบแรงบิด



(ข) ผสมน้ำยาโพลีออลและไดโซยานตเพื่อให้โฟมเกิดแข็งตัว

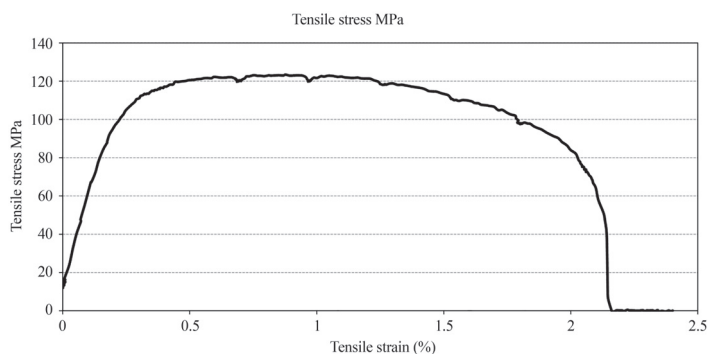
รูปที่ 2 การขึ้นรูปชิ้นงาน

4. คุณสมบัติวัสดุ

การหาคคุณสมบัติของวัสดุของอลูมิเนียมความหนา 1 มิลลิเมตร เป็นไปตามมาตรฐาน British Standard BSEN 1002-1:1990 [24] โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง โดยการทดสอบและผลการทดสอบ ดังรูปที่ 3 และผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียมพบว่า ความหนาแน่น 2,700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ยังก์มอดูลัสเฉลี่ย 49.46 จิกะปาสคาล ความเค้นที่จุดคราก 110.38 เมกะปาสคาล และความเค้นประลัย 155.95 เมกะปาสคาล



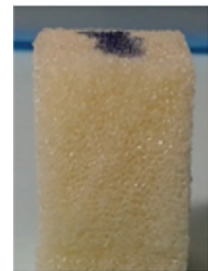
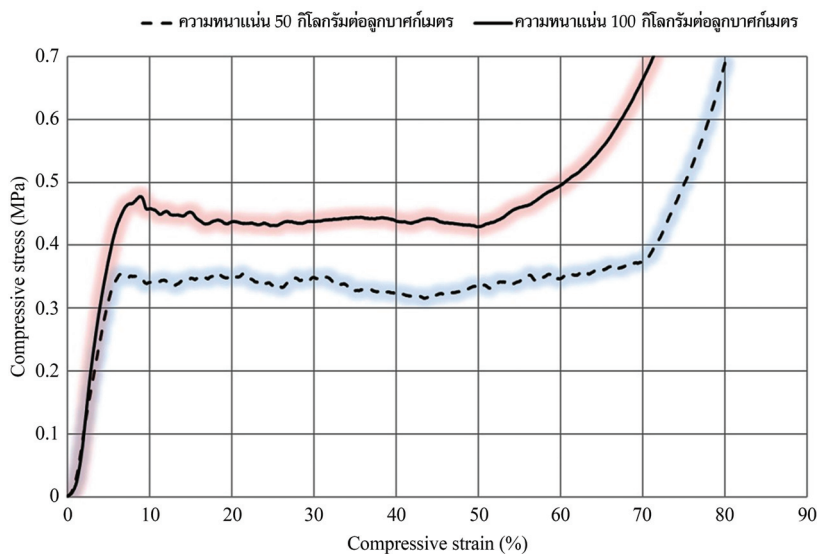
(ก) การทดสอบแรงดึงของอลูมิเนียม



(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดของอลูมิเนียม

รูปที่ 3 การทดสอบและคุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียม

ส่วนคุณสมบัติวัสดุของโฟมหาได้โดยการทดสอบด้วยแรงกด โดยโฟมมีขนาด 12 x 12 x 25.4 มิลลิเมตร ผลที่ได้ดังรูปที่ 4 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดกับความเครียด



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นอัดกับความเครียดอัดของโฟม (ข) การทดสอบโฟม
รูปที่ 4 การทดสอบและคุณสมบัติวัสดุของโฟมที่ความหนาแน่น 50 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ส่วนคุณสมบัติของวัสดุโฟมความหนาแน่น 75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สามารถหาความสัมพันธ์ของความหนาแน่นโฟม [25] ได้จากสมการที่ (1) โดยทราบค่าความเค้นครากตัว σ_p ที่ความหนาแน่น 50 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จากรูปที่ 4(ก)

$$\sigma_p = c \left(\frac{\rho_f}{\rho_{f0}} \right)^m \quad (1)$$

เมื่อ σ_p คือ ความเค้นครากตัว ρ_f คือ ความหนาแน่นโฟม ρ_{f0} คือ ความหนาแน่นโฟมสถานะเริ่มเชิงตัว ส่วนค่าของ c และ m เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จาก 2 สมการ 2 ตัวแปรที่ได้มาจากค่าความหนาแน่นโฟม 50 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

5. ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยนี้จะทำการทดลองที่มีรูปร่างหลายเหลี่ยม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยท่อแต่ละรูปร่าง จะถูกเติมโฟมเข้าไปภายในท่อ ที่มีความหนาแน่นโฟม 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งการทดลองในแต่ละกรณีจะทำซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ได้ผลการทดลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ รวมขั้นตอนการทดลองในงานวิจัยนี้จำนวน 36 ขั้นตอน สำหรับขั้นตอนการทดลอง จากรูปที่ 1(ข) ท่อจะถูกใส่เข้าไปในชุดทดสอบแรงบิด โดยปลายทั้งสองข้างจะยึดกับหน้าแปลนของชุดทดสอบ เครื่องทดสอบแรงบิดจะเคลื่อนที่ขึ้นอย่างช้า ๆ ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อให้ชิ้นตัวอย่างทั้งสองชิ้นเคลื่อนที่ โดยชิ้นตัวอย่างที่ต่อกับเพลาของชุดทดสอบแรงบิด จะทำให้เพลาหมุนแล้วท่อจะเกิดการบิดตัวรอบแกนของท่อ หลังจากนั้นเซ็นเซอร์วัดแรงบิดจะทำการบันทึกค่าแรงบิดและมุมบิดเพื่อนำไปคำนวณต่อไป

6. ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ท่อเติมโฟมภายใต้แรงบิด กับการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นโฟมและชนิดของท่อ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ มีดังนี้

6.1 แรงสูงสุด หมายถึง แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นในกราฟระหว่างแรงบิดกับมุมบิดที่ทำให้ท่อเดิมนิโม่เสียรูปไปเหตุผลในการใช้แรงบิดสูงสุด เนื่องจากแรงบิดสูงสุดควรเป็นแรงที่มีค่าน้อยกว่าแรงที่รับได้ของโครงสร้างหลัก ไม่เช่นนั้นโครงสร้างหลักจะเกิดความเสียหายก่อน ซึ่งจะทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้

6.2 แรงเฉื่อย หมายถึง แรงเฉื่อยของท่อเดิมนิโม่ที่ได้รับจากกราฟระหว่างแรงบิดกับมุมบิดท่อจะเกิดการบิดตัวจนไม่สามารถบิดได้ เหตุผลที่ใช้แรงเฉื่อย เนื่องจากแรงเฉื่อยที่มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อสูงขึ้น

6.3 พลังงานดูดซับ หมายถึง พลังงานของท่อที่เกิดการเสียรูปเนื่องจากการบิดตัวของท่อ หาได้จากกราฟพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงบิดกับระยะบิดตัวของท่อ หรือหาค่าโดยประมาณจากแรงบิดเฉลี่ยคูณด้วยระยะบิดตัวของท่อ ประโยชน์ของพลังงานดูดซับที่มีค่าสูงจะยิ่งดี เพื่อดูดซับพลังงานจลน์ที่มากระทำกับท่อได้มากที่สุด พลังงานดูดซับสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$E_a = \int Fds \approx F_{ave}S \quad (2)$$

โดยที่

- E_a = พลังงานดูดซับ
- F = แรงบิดที่กระทำกับท่อเดิมนิโม่
- ds = การเปลี่ยนแปลงระยะบิดตัวของชิ้นงาน
- F_{ave} = แรงบิดเฉลี่ย
- S = ระยะบิดตัว

แต่ในทางปฏิบัติพลังงานดูดซับมักจะหาจากแรงเฉื่อยคูณด้วยมุมบิดสุดท้ายของท่อเดิมนิโม่

6.4 พลังงานดูดซับจำเพาะ หมายถึง พลังงานดูดซับของท่อเดิมนิโม่เทียบกับมวลของท่อ พลังงานดูดซับจำเพาะมักจะใช้พิจารณาในกรณีที่มิให้โครงสร้างที่มีน้ำหนักมากเกินไป เช่น รถยนต์ ถ้าตัวโครงสร้างมีน้ำหนักมากเกินไปจะทำให้เกิดการสิ้นเปลืองน้ำมันสูง ดังนั้นพลังงานดูดซับจำเพาะหาได้จากสมการที่ (3)

$$E_s = \frac{E_a}{m} = \frac{\int Fds}{m} \quad (3)$$

โดยที่

- E_s = การดูดซับพลังงานจำเพาะ
- F = แรงบิดที่กระทำกับท่อเดิมนิโม่
- ds = การเปลี่ยนแปลงระยะบิดตัวของชิ้นงาน
- m = มวลของท่อเดิมนิโม่

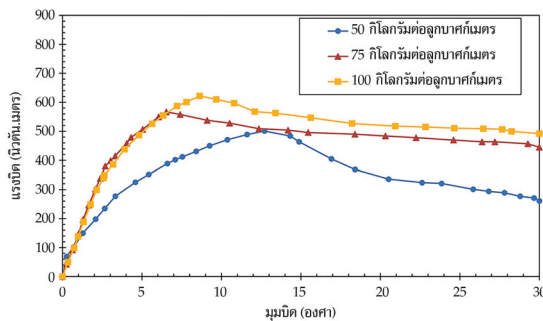
ผลการทดลองและการวิจารณ์

1. ผลตอบสนองของแรงบิดกับพฤติกรรมความเสียหาย

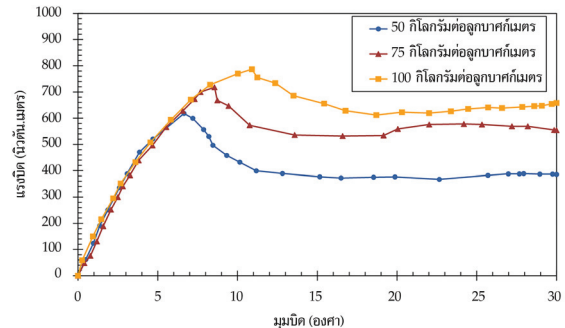
ผลการทดลองของท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมเดิมนิโม่ภายใต้แรงบิด ผลตอบสนองจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิด ดังรูปที่ 5 ซึ่งรูปร่างของท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม ตามลำดับ โดยท่อแต่ละรูปร่างจะเดิมนิโม่ที่ความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าพฤติกรรมความเสียหายของท่อเดิมนิโม่ทุกตัว จะมีการแบ่งช่วงพฤติกรรมความเสียหายได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกท่อมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่นที่เรียกว่า “ช่วงอีลาสติก” เป็นช่วงที่ท่อเดิมนิโม่รับแรงบิดจากเริ่มต้นไปถึงแรงบิดที่จุดคราก ช่วงนี้เมื่อท่อเดิมนิโม่แรงบิดท่อจะเกิดการบิดตัวจนเกิดการเสียรูป

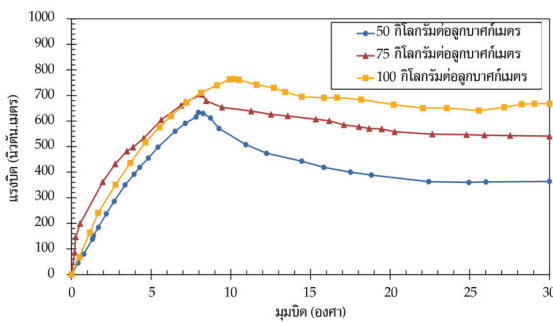
แต่พอปลดแรงบิดออกท่อเติมโฝมจะคืนรูปเข้าที่เดิม ส่วนช่วงที่สองเมื่อเพิ่มแรงบิดต่อไปอีก ท่อจะมีการเสียรูปอย่างถาวร ที่เรียกว่า “ช่วงพลาสติก” เป็นช่วงที่ท่อเติมโฝมจะบิดตัวต่อจากจุดครากไปจนถึงจุดแรงบิดสูงสุดหรือจุดประลัย หลังจากนั้นช่วงที่สาม ท่อเติมโฝมจะเกิดการเสียรูปลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งหน้าตัดของท่อเติมโฝมเล็กลงเรื่อย ๆ เรียกว่า “ช่วงพังทลาย”



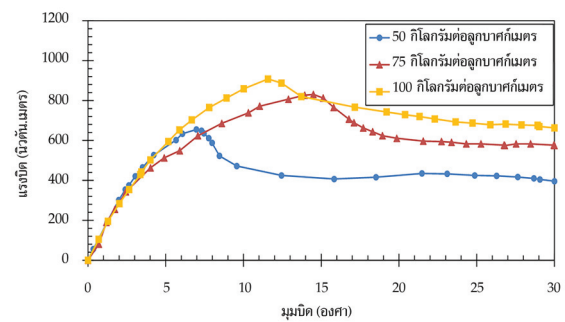
(ก) ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม



(ข) ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม



(ค) ท่อหน้าตัดแปดเหลี่ยม



(ง) ท่อหน้าตัดวงกลม

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับมุมบิดของท่อ



$$50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(ก) ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม



$$50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$75 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

(ข) ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม

รูปที่ 6 การเสียรูปของท่อเติมโฝม



$$50 \frac{kg}{m^3}$$

$$75 \frac{kg}{m^3}$$

$$100 \frac{kg}{m^3}$$

(ค) ท่อหน้าตัดแปดเหลี่ยม



$$50 \frac{kg}{m^3}$$

$$75 \frac{kg}{m^3}$$

$$100 \frac{kg}{m^3}$$

(ง) ท่อหน้าตัดวงกลม

รูปที่ 6 การเสียรูปของท่อเติมโม่ (ต่อ)

รูปที่ 6 เป็นการเสียรูปของท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยมและท่อวงกลม โดยภายในท่อแต่ละหน้าตัดจะเติมโม่ที่มีความหนาแน่น 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ลักษณะการเสียรูปของท่อแต่ละรูปร่างจะเริ่มดันขึ้นที่ปลายด้านหนึ่งของท่อ โดยจะเกิดรอยพับขึ้นด้านข้างท่อซึ่งจำนวนรอยพับจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของท่อและความหนาแน่นโม่ จำนวนรอยพับจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของท่อและตามมุมบิดที่เพิ่มขึ้น จนถึงค่าแรงบิดสูงสุดหรือจุดประลัยจำนวนรอยพับตัวด้านข้างของท่อจะมีขีดจำกัดสูงสุดค่าหนึ่ง หลังจากนั้นการเสียรูปของท่อจะอยู่ในช่วงพังทลายกล่าวคือ บริเวณหน้าตัดของท่อแต่ละด้านจะยุบตัวลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งหน้าตัดของท่อจะชนติดกันพอดี ทั้งนี้รูปร่างความเสียหายของท่อแต่ละหน้าตัดจะแตกต่างกันไป ซึ่งจะเป็นงานวิจัยที่ทำการศึกษาคือต่อไป

2. ผลของความหนาแน่นโม่

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นโม่ที่ใส่เข้าไปภายในของท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยมและท่อวงกลม โดยความหนาแน่นโม่ ประกอบด้วย 50 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ตัวแปรดังตารางที่ 2 ประกอบด้วย แรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับของท่อ พลังงานดูดซับจำเพาะ และประสิทธิภาพพลังงานดูดซับ ตามลำดับ

จากข้อมูลในตารางที่ 2 นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของความหนาแน่นโม่ดังรูปที่ 7 และสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

1) แรงเฉื่อย ดังรูปที่ 7(ก) พบว่าแรงเฉื่อยจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาแน่นของโม่เพิ่มขึ้น ซึ่งแรงเฉื่อยจะมีผลต่อพลังงานดูดซับของท่อถ้าแรงเฉื่อยเพิ่มขึ้นยิ่งดีมีความสำคัญมาก ดังนั้นความหนาแน่นโม่ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้แรงเฉื่อยสูงสุด

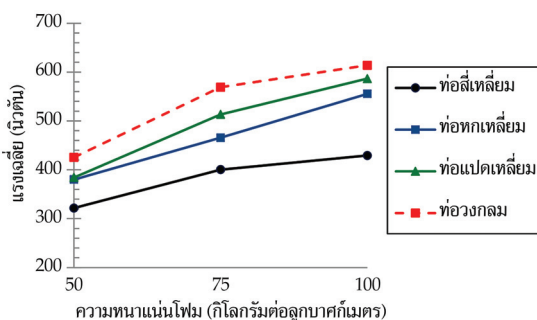
2) แรงสูงสุด ดังรูปที่ 7(ข) พบว่าแรงสูงสุดจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาแน่นของโม่เพิ่มขึ้น และความหนาแน่นโม่ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้แรงสูงสุด ซึ่งแรงสูงสุดจะมีผลต่อการยุบตัวของท่อถ้าแรงสูงสุดมีค่าสูงจะทำให้ท่อยุบตัวได้ยาก จึงมีผลทำให้พลังงานดูดซับของท่อน้อยลง ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อโครงสร้างหลักที่ต้องการความปลอดภัย

3) พลังงานดูดซับ ดังรูปที่ 7(ค) พบว่าพลังงานดูดซับจะเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น และความหนาแน่นโฟม 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้พลังงานดูดซับสูงสุด พลังงานดูดซับของท่อที่มีค่าสูง จะมีความสามารถในการต้านทานพลังงานจลน์ที่มากระทำกับท่อ ทำให้โครงสร้างหลักมีความปลอดภัยสูง

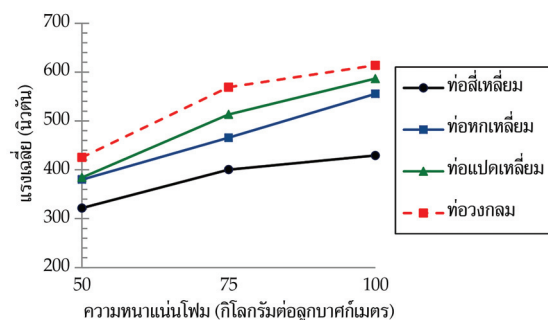
4) พลังงานดูดซับจำเพาะ ดังรูปที่ 7(ง) พบว่าความหนาแน่นของโฟมที่ 75 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะให้ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะสูงสุดขึ้นอยู่กับชนิดของท่อ ซึ่งพลังงานดูดซับจำเพาะของทั้งสองความหนาแน่นนี้มีค่าความแตกต่างกันน้อยมาก แต่พลังงานดูดซับจำเพาะของความหนาแน่นของโฟม 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะมีค่าต่ำสุด ผลของพลังงานดูดซับจำเพาะจะคำนึงถึงมวลของท่อ ซึ่งจะมีผลต่อน้ำหนักของโครงสร้างหลักที่มากขึ้น ดังนั้นถ้าพิจารณาเกี่ยวกับน้ำหนักจึงควรเลือกใช้ท่อที่มีพลังงานดูดซับจำเพาะสูง

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษา

ชนิดท่อ	ความหนาแน่นโฟม	ตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์				
		มวล (กิโลกรัม)	แรงเฉื่อย (นิวตัน)	แรงสูงสุด (นิวตัน)	พลังงานดูดซับ (จูล)	พลังงานดูดซับจำเพาะ (จูลต่อกิโลกรัม)
ท่อสี่เหลี่ยม	50	0.179	321.63	501	168.54	940.38
	75	0.203	400.30	567	209.76	1032.17
	100	0.227	429.30	622	224.95	990.02
ท่อหกเหลี่ยม	50	0.181	379.98	618	199.11	1098.63
	75	0.208	465.53	718	243.94	1174.15
	100	0.234	555.48	787	291.07	1242.40
ท่อแปดเหลี่ยม	50	0.184	384.37	634	201.41	1095.67
	75	0.212	513.20	704	268.92	1270.85
	100	0.239	586.50	765	307.33	1283.80
ท่อบางกลม	50	0.187	425.37	655	222.89	1191.51
	75	0.216	569.03	831	298.17	1377.65
	100	0.246	613.70	908	321.58	1308.26

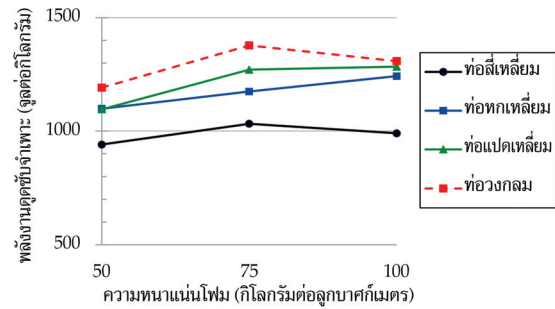
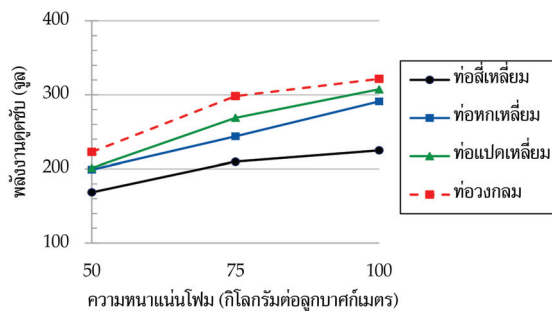


(ก) แรงเฉื่อย



(ข) แรงสูงสุด

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของความหนาแน่นโฟม



(ค) พลังงานดูดซับ

(ง) พลังงานดูดซับจำเพาะ

รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของความหนาแน่นไนโตรเจน (ต่อ)

3. ผลของชนิดท่อ

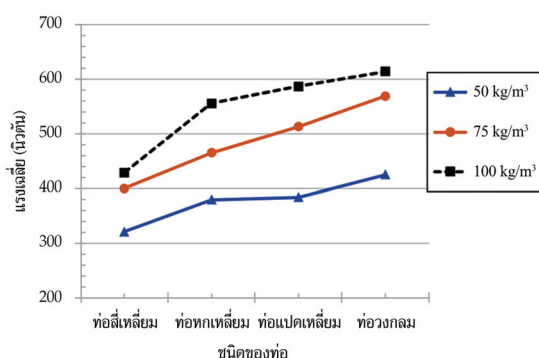
การพิจารณาผลของชนิดท่อที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน ได้แก่ ทอส์เหลี่ยม ทอหกเหลี่ยม และทอวงกลมตามลำดับ กับผลของตัวแปรที่ศึกษา ดังรูปที่ 8 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

1) แรงเฉลี่ย ดังรูปที่ 8(ก) พบว่าแรงเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ตามจำนวนเหลี่ยมของท่อที่เพิ่มขึ้น คือ ทอวงกลมมีค่าแรงเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมาเป็นทอแปดเหลี่ยม ทอหกเหลี่ยม และทอส์เหลี่ยมมีค่าแรงเฉลี่ยต่ำที่สุด

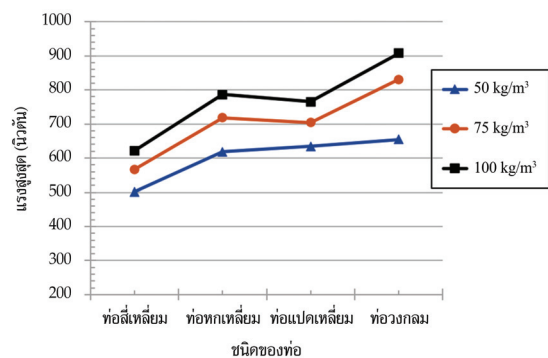
2) แรงสูงสุด ดังรูปที่ 8(ข) พบว่าแรงสูงสุดเพิ่มขึ้นมากที่สุดในทอวงกลม และทอส์เหลี่ยมมีค่าแรงสูงสุดต่ำสุด ส่วนทอหกเหลี่ยมและทอแปดเหลี่ยมมีค่าแรงสูงสุดใกล้เคียงกันมากทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นไนโตรเจน

3) พลังงานดูดซับ ดังรูปที่ 8(ค) พบว่าพลังงานดูดซับเพิ่มขึ้น ตามจำนวนเหลี่ยมของท่อที่เพิ่มขึ้น คือ ทอวงกลมมีพลังงานดูดซับมากที่สุด รองลงมาเป็นทอแปดเหลี่ยม ทอหกเหลี่ยม และทอส์เหลี่ยมมีพลังงานดูดซับน้อยที่สุด

4) พลังงานดูดซับจำเพาะ ดังรูปที่ 8(ง) พบว่าพลังงานดูดซับจำเพาะเพิ่มขึ้น ตามจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้น คือทอวงกลมจะมีพลังงานดูดซับจำเพาะสูงที่สุด รองลงมาเป็นทอแปดเหลี่ยม ทอหกเหลี่ยม และทอส์เหลี่ยมมาพลังงานดูดซับจำเพาะน้อยที่สุด ทั้งนี้พลังงานดูดซับจำเพาะยังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นไนโตรเจน จะเห็นว่าทอวงกลมที่มีความหนาแน่นไนโตรเจน 75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีพลังงานดูดซับจำเพาะมากกว่าทอวงกลมที่มีความหนาแน่นไนโตรเจน 60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เนื่องจากทอวงกลมที่มีความหนาแน่นไนโตรเจน 60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีพลังงานดูดซับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังรูปที่ 8(ค) เมื่อเทียบกับมวลที่เพิ่มขึ้น

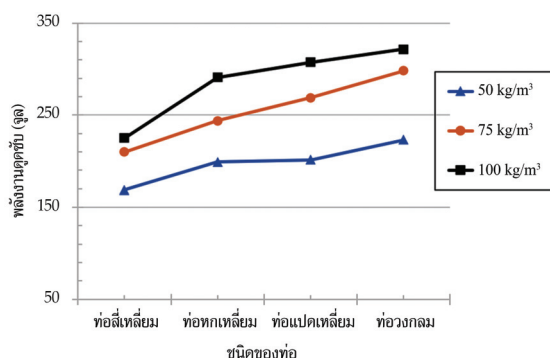


(ก) แรงเฉลี่ย

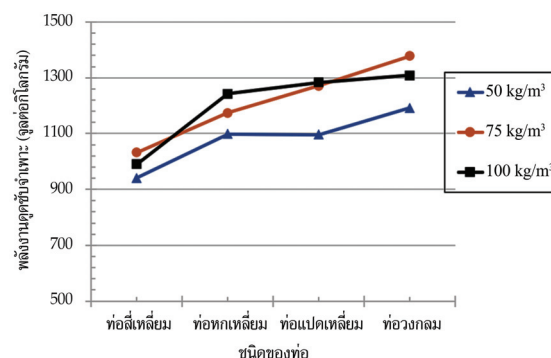


(ข) แรงสูงสุด

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของชนิดท่อ



(ค) พลังงานดูดซับ



(ง) พลังงานดูดซับจำเพาะ

รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์กับผลของชนิดท่อ (ต่อ)

สรุปผล

ผลการศึกษาตัวแปรของท่อที่มีหน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงบิดโดยวิธีการทดลอง จะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นโฟมภายในท่อและชนิดของท่อที่มีรูปร่างหน้าตัดแตกต่างกัน สามารถสรุปได้ว่า

1. พฤติกรรมการเสียหายของท่อจะเริ่มต้นด้วยการเกิดเส้นการพับที่ปลายด้านหนึ่งของท่อ เส้นการพับตัวจะเพิ่มมากขึ้นตามมุมบิดไปของท่อ จำนวนเส้นการพับจะขึ้นอยู่กับชนิดของท่อและความหนาแน่นโฟม
2. ผลของความหนาแน่นโฟม พบว่าความโฟมที่มีความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จะให้ค่าแรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด รองลงมาเป็น ความหนาแน่นโฟม 75 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และความหนาแน่นโฟม 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรมีค่าต่ำสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นการพับตัวของท่อและความยาวของเส้นการพับตัว
3. ผลรูปร่างของท่อ พบว่า ท่อวงกลมจะให้ค่าแรงเฉื่อย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะมากที่สุด รองลงมาเป็น ท่อแปดเหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีค่าต่ำสุด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเส้นการพับตัวของท่อและความยาวของเส้นการพับตัว

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ได้ให้ใช้เครื่องทดสอบแรงดึง และขอขอบคุณผู้ให้ทุนวิจัยโดยคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

References

- [1] Alexander, J. M. (1960). An Approximate Analysis of the Collapse of Thin Cylindrical Shells Under Axial Loading. **The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics**. Vol. 13, Issue 1, pp. 10-15. DOI: 10.1093/QJMAM/13.1.10
- [2] Kecman, D. (1983). Bending Collapse of Rectangular and Square Section Tubes. **International of Journal Mechanical Science**. Vol. 25, Issue 9-10, pp. 623-636. DOI: 10.1016/0020-7403(83)90072-3
- [3] Wierzbicki, T. and Abramowicz, W. (1983). On the Crushing Mechanics of Thin-Walled Structures. **Journal of Applied Mechanics**. Vol. 50, Issue 4a, pp. 727-734. DOI: 10.1115/1.3167137

- [4] Wierzbicki, T. (1983). Crushing Analysis of Metal Honeycombs. **International of Journal Impact Engineering**. Vol. 1, Issue 2, pp. 157-174. DOI: 10.1016/0734-743X(83)90004-0
- [5] Poonaya, S., Teebonma, U., and Thinvongpituk, C. (2009). Plastic Collapse Analysis of Thin-Walled Circular Tubes Subjected to Bending. **Thin-Walled Structures**. Vol. 47, Issue 6-7, pp. 637-645. DOI: 10.1016/j.tws.2008.11.005
- [6] Huang, J., He, K., Liu, R., and Shi, C. (2022). Theoretical and Numerical Investigation of Mean Crushing Load of Uniform and Non-Uniform Multi-Cell Tube. **Thin-Walled Structures**. Vol. 180, Article ID 109956. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109956
- [7] Ge, C., Gao, Q., Wang, L., and Hong, Z. (2020). Theoretical Prediction and Numerical Analysis for Axial Crushing Behavior of Elliptical Aluminium Foam-Filled Tube. **Thin-Walled Structures**. Vol. 149, Article ID 106523. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106523
- [8] Elchalakani, M., Zhao, X. L., and Grzebieta, R. H. (2002). Bending Tests to Determine Slenderness Limits for Cold-Formed Circular Hollow Sections. **Journal of Constructional Steel Research**. Vol. 58, Issue 11, pp.1407-1430. DOI: 10.1016/S0143-974X(01)00106-7
- [9] Fu, X. and Zhang, X. (2023). Three-Point Bending of Thin-Walled Arched Beams with Square Sections. **Thin-Walled Structures**. Vol. 182, Part A, Article ID 110201. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110201
- [10] Poonaya, S., Thinvongpituk, C., and Teebonma, U. (2007). Comparison of Absorption Energy of Various Section Steel Tubes Under Axial Compression and Bending Loading. The **21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand**. Chonburi, Thailand, 17-19 October, p. 32
- [11] Nagel, G. M. and Thambiratnam, D. P. (2005). Computer Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Rectangular Tubes. **Thin-Walled Structures**. Vol. 43, Issue 8, pp. 1225-1242. DOI: 10.1016/j.tws.2005.03.008
- [12] Nagel, G. M. and Thambiratnam, D. P. (2006). Dynamic Simulation and Energy Absorption of Tapered Thin-Walled Tubes Under Oblique Impact Loading. **International of Journal Impact Engineering**. Vol. 32, Issue 10, pp. 1595-1620. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.01.002
- [13] Poonaya, S. and Thinvongpituk, C. (2009). Comparison of Energy Absorption of Various Section Steel Tubes Under Torsion Loading. The **23th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand**. Chiang Mai, Thailand, 4-7 November, p. 75
- [14] Arayangkul, S., Poonaya, S., and Payom, C. (2014). Absorbed Energy Efficiency of Polygon Thin-Walled Tubes Subjected to Torsion. **Naresuan University Engineering Journal**. Vol. 9, No. 1, pp. 15-24
- [15] Shuguang, Y., Huifen, Z., Mingyang, L., Zhixiang, L., and Ping, X. (2020). Energy Absorption of Origami Tubes with Polygonal Cross-Sections. **Thin-Walled Structures**. Vol. 157, Article ID 107013. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107013
- [16] Andrew, K. R. F., England, G. L., and Ghani, E. (1983). Classification of the Axial Collapse of Cylindrical Tubes Under Quasi-Loading. **International of Journal Mechanical Science**. Vol. 5, Issue 9/10, pp. 687-696. DOI: 10.1016/0020-7403(83)90076-0
- [17] Ahmad, Z. and Thambiratnam, D. P. (2009). Dynamic Computer Simulation and Energy Absorption of Foam-Filled Conical Tubes Under Axial Impact Loading. **Computer and Structures**. Vol. 87, Issue 3-4, pp. 185-197. DOI: 10.1016/j.compstruc.2008.10.003

- [18] Ahmad, Z. and Thambiratnam, D. P. (2009). Crushing Response of Foam-Filled Conical Tubes Under Quasi-Static Axial Loading. **Materials and Design**. Vol. 30, Issue 7, pp. 2393-2403. DOI: 10.1016/j.matdes.2008.10.017
- [19] Sahil, G., Anand, C., Sunil, K. S., and Rakesh, C. S. (2019). Crashworthiness Analysis of Foam Filled Star Shape Polygon of Thin-Walled Structure. **Thin-Walled Structures**. Vol. 144, Article ID 106312. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106312
- [20] Gang, Z., Suzhen, W., Guangyong, S., Guangyao, L., and Qing, L. (2014). Crushing Analysis of Foam-Filled Single and Bitubal Polygonal Thin-Walled Tubes. **International Journal of Mechanical Sciences**. Vol. 87, pp. 226-240. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.06.002
- [21] Seyed, S. B., Hamed, A., and Gholam, H. L. (2023). An Analytical Investigation on the Crushing Behavior of Thin-Walled Tubes Filled with a Foam with Strain Hardening Region. **Thin-Walled Structures**. Vol. 182, Part A, Article ID 110169. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110169
- [22] Mamalis, A. G., Manolakos, D. E., Viegelaahn, G. L., Vaxevanidis, N. M., and Johnson, W. (1986). On the Inextensional Axial Collapse of Thin-Walled PVC Conical Shells. **International of Journal Mechanical Science**. Vol. 28, Issue 6, pp. 323-335
- [23] Weigang, C. and Tomasz, W. (2000). Torsional Collapse of Thin-Walled Prismatic Columns. **Thin-Walled Structures**. Vol. 36, Issue 3, pp.181-196. DOI: 10.1016/S0263-8231(99)00043-9
- [24] British Standard. (1990). **Tensile Testing of Metallic Materials**. BS EN 10002-1.
- [25] Reyes, A., Hopperstad, O. S., and Langseth, M. (2004). Aluminum Foam-Filled Extrusions Subjected to Oblique Loading: Experimental and Numerical Study. **International Journal of Solids and Structures**. Vol. 41, Issues 5-6, pp. 1645-1675. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.09.053