การศึกษาความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

Study on the Energy Absorption Capacity of Foam-Filled Thin-Walled Tubes with Polygon Cross-Sections under Torsional Loading

สมญา ภูนะยา[1*] และ รัชดา โสภาคะยัง[2]
Somya Poonaya[1*] and Ratchada Sopakayang[2]

Received: May 7, 2025
Revised: May 26, 2025
Accepted: May 29, 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมที่มีการเติมโฟมภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด โดยศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ได้แก่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม พร้อมความหนาแน่นโฟม 50, 100, 150, 200 และ 250 kg/m^3 ตามลำดับ การวิเคราะห์ใช้วิธีการทดลองและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่า ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดกับมุมบิดจากการทดลองกับไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนร้อยละ 8.31 ส่วนผลของความหนาแน่นโฟม พบว่า เมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้นจาก 0 kg/m^3 (ท่อไม่เติมโฟม) เป็น 100 kg/m^3 ความสามารถการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น แต่หลังจากความหนาแน่นโฟมมากกว่า 100 kg/m^3 ขึ้นไป จะเข้าสู่สภาวะการอิ่มตัว (ค่าความสามารถการดูดซับพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก) ผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ พบว่า ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ให้ค่าความสามารถการดูดซับพลังงานและใกล้เคียงกัน ถัดมาเป็นท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีค่าความสามารถการดูดซับพลังงานต่ำที่สุด[1]

คำสำคัญ: ท่อเติมโฟม, ความหนาแน่นโฟม, โมเมนต์บิด, ท่อหลายเหลี่ยม

[1*]รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University
E-mail: somya.p@ubu.ac.th
[2]ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University
E-mail: ratchada.s@ubu.ac.th
*Corresponding Author

Abstract

This investigation aimed to study the energy absorption capacity of thin-walled tubes with polygon cross-sections under torsional loading. The tube cross-sections included square, hexagonal, octagonal, decagonal, icosagonal, hexacontagonal, octacontagonal, and circular shapes. Foam densities of 50, 100, 150, 200, and 250 kg/m³ were considered**.** The analysis was conducted using experimental and finite element methods

The analysis results concluded that the relationship of the torsional moment-angle curves from the finite element agreed well with experimental results and has an average percentage error is 8.31%. Then, the result of foam densities was found that increasing the foam densities at 0 kg/m^3(empty tube) to 100 kg/m^3 increase the energy absorption capacity of foam-filled polygon tubes. After that, when the foam density exceeds 100 kg/m³, the energy absorption capacity tends to reach a saturation state (the energy absorption capacity exhibits minimal variation). Furthermore, the result of the polygonal shapes was found that the *octagonal, decagonal, icosagonal, hexacontagonal, octacontagonal*, and circle tube exhibit the highest and comparable levels of energy absorption capacity. This is followed by the hexagonal tube and the energy absorption capacity of the square tube is the lowest.

Keywords: Foam-Filled Tube, Foam Density, Torsional Loading, Polygon Tubes

1. บทนำ

การลดความเสียหายของโครงสร้างและการเพิ่มความปลอดภัยของผู้ขับขี่ยานพาหนะ เนื่องจากการชนภายใต้พลังงานจลน์มากระทำกับยานพาหนะ ท่อผนังบางจึงถูกนำมาใช้เพื่อเป็นตัวดูดซับพลังงานหรือกันชนเพื่อการปรับปรุงประสิทธิภาพความปลอดภัยในการชน การศึกษาท่อผนังบางที่มีรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ จึงเป็นที่สนใจสำหรับนักวิจัยส่วนใหญ่ เช่น ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม [1-6] ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม นอกจากนี้ยังมีท่อรูปดาว [7] ท่อวงรี [8] และท่อโอริกามิ [9] เป็นต้น การเพิ่มวัสดุโฟมเข้าไปภายในท่อเหล่านี้จะทำให้ความสามารถการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น [10-13] โดยตัวบ่งชี้ถึงความปลอดภัยในการชน ประกอบด้วย แรงเฉลี่ย แรงสูงสุด พลังงานดูดซับ และพลังงานดูดซับจำเพาะ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยที่ได้ศึกษาปัญหาของท่อผนังบางของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดเพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ โดยการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ได้แก่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยท่อทั้งหมดนี้ได้เติมโฟมเพื่อเพิ่มความสามารถการดูดซับพลังงาน

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาความหนาแน่นของโฟมที่เพิ่มขึ้นต่อความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

2.2 เพื่อศึกษาจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้นของท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

2.3 เพื่อเป็นแนวทางให้วิศวกรนำไปออกแบบและเลือกใช้ท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมต่าง ๆ เป็นตัวดูดซับพลังงานเนื่องจากการชน

3. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัญหาของท่อผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ได้แก่ Weigang Chen et al. (2000) [14] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อผนังบางรูปร่างสี่เหลี่ยมภายใต้โมเมนต์บิด การทำนายของแบบจำลองเป็นการพิจารณาความเสียหายในช่วงพลาสติกโดยใช้วิธีพลังงาน ผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ผลสอดคล้องไปในทางเดียวกัน Weigang Chen et al. (2001) [15] ได้ศึกษาการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อสี่เหลี่ยมและเติมโฟมภายในท่อภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด โดยแบบจำลองความเสียหายจะพิจารณาในช่วงพลาสติก โดยผลของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองคอมพิวเตอร์และผลจากการทดลองมีค่าสอดคล้องกันดี และงานวิจัยนี้ยังสรุปได้ว่าท่อสี่เหลี่ยมเติมด้วยโฟมอลูมิเนียมที่ความหนาแน่น 0.14-0.28 g/cm^3 ให้ค่าการดูดซับพลังงานเป็นสองเท่ากับท่อสี่เหลี่ยมไม่เติมโฟม นอกจากนั้นยังมีนักวิจัย Somya Poonaya et al. (2009) [16] ได้ศึกษาการเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมทรงเรียว (Tapered Tube) ภายใต้โมเมนต์บิด โดยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยมุมเรียว (Tapered Angle) ที่ได้ศึกษาเท่ากับ 0, 5 และ 10 องศา ผลการศึกษาพบว่า ความสามารถการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเรียวเพิ่มขึ้น และท่อรูปร่างวงกลม ที่มุมเรียว 10 องศา ให้ค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด ต่อมา Surasing Arayangkul et al (2014) [17] ได้ศึกษาการหาประสิทธิการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม (ไม่เติมโฟม) ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ประกอบด้วยท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยใช้วิธีการทดลองเปรียบเทียบกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้สอดคล้องกันดี และผลการวิเคราะห์ผลของรูปร่างของท่อหลายเหลี่ยม พบว่าที่ความหนาของท่อ 1 mm ท่อวงกลมมีความสามารถการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานมากที่สุด และที่ความหนาของท่อ 2 และ 3 mm ท่อแปดเหลี่ยมมีความสามารถการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานมากที่สุด และยังมีงานวิจัยของ Somya Poonaya (2024) [18] ได้ศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้แรงดัด พบว่าเมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้นความสามารถการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น ส่วนผลของรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของท่อพบว่าท่อทุกชนิดมีค่าการดูดซับพลังงานไม่ต่างกันมากนัก แต่พอสรุปได้ว่าท่อหกเหลี่ยมให้ค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด Somya Poonaya (2024) [19] ได้ศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิดโดยวิธีการทดลองเท่านั้น โดยวัสดุที่ใช้ในการทดลองเป็นอลูมิเนียม พบว่าท่อวงกลมมีค่าพลังงานดูดซับมากที่สุด Somya Poonaya et al. (2024) [20]

ได้ศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาส ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด โดยวิธีการจำลองคอมพิวเตอร์ ผลจากการจำลองคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับผลการทดลองให้ผลที่สอดคล้องกันดี วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียมและไฟเบอร์กลาสเป็นใยแก้วผสมเรซิน ผลการวิจัยสรุปได้ว่าท่อหกเหลี่ยมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสมีความสามารถการดูดซับพลังงานสูงสุด

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด ทำให้มีการพัฒนาต่อยอดของงานวิจัยโดยบทความวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาคือการเพิ่มจำนวนของหนาแน่นของโฟมที่เติมภายในของท่อรูปร่างหน้าตัดหลายเหลี่ยมที่ 50, 100, 150, 200, 250 kg/m^3 เพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นโฟมที่มากขึ้นต่อความสามารถการดูดซับพลังงาน และจุดเด่นของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมที่มีการเพิ่มจำนวนเหลี่ยมของท่ออย่างละเอียด ตั้งแต่ ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกรผู้นำไปออกแบบด้านการชนในการเลือกใช้ท่อผนังบางรูปร่างหน้าตัดต่าง ๆ ที่มีความสามารถดูดซับพลังงานดีที่สุด

4. วิธีดำเนินการศึกษา

4.1 ขอบเขตงานวิจัย

4.1.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นอลูมิเนียมที่มีความหนา 1 mm ความยาวเส้นรอบวงของหน้าตัด 320 mm ความยาวของท่อ 150 mm

4.1.2 ท่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ท่อรูปร่างหกเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดเหลี่ยม ท่อรูปร่างสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างยี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างสี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างหกสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดสิบเหลี่ยม และท่อรูปร่างวงกลม

4.1.3 โฟมที่ใส่เข้าไปในท่อเป็นโฟมชนิดโพลียูรีเทน ที่มีความหนาแน่น 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m^3

4.1.4 ความเร็วที่ใช้ในการบิดท่ออย่างช้า ๆ เท่ากับ 10 mm/min

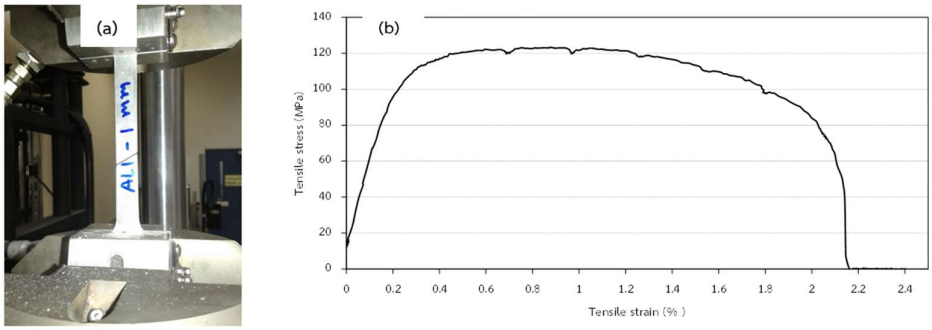
4.1.5 เงื่อนไขขอบเขตโดยปลายของท่ออีกด้านจะรับแรงบิด ส่วนอีกด้านจะถูกยึดแน่นไม่ให้เคลื่อนที่

4.1.6 ผลการทดลองจะนำมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของการจำลองทางคอมพิวเตอร์

4.1.7 ค่าที่ได้จากการวัดคือ โมเมนต์บิดกับมุมบิด เพื่อนำไปคำนวณหาตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์โมเมนต์บิดเฉลี่ย และความสามารถการดูดซับพลังงาน

4.2 คุณสมบัติวัสดุ

4.2.1 อลูมิเนียม มีความหนา 1 mm สามารถหาได้โดยใช้เครื่องทดสอบแรงดึง การทดสอบและผลการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดสอบจะได้คุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียมที่มีความหนาแน่น 2,700 kg/m^3 อัตราส่วนปัวซอง 0.3, ยังค์มอดูลัสเฉลี่ย 32 GigaPascals (GPa), ความเค้นที่จุดคราก 110.38 MP



รูปที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของอลูมิเนียม (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นดึงและความเครียดดึงของอลูมิเนียม

4.2.2 โฟม คุณสมบัติวัสดุของโฟมหาได้โดยการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกด กดโฟมขนาด 12x12x25.4 mm ดังแสดงในรูปที่ 2 (a) ในการทดสอบมีการทำซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่ได้จะนำมาหาค่าเฉลี่ย ดังนั้นจะได้ค่ายังค์มอดูลัสเฉลี่ย 7 GPa และอัตราส่วนปัวซอง 0.2 และผลการทดสอบแสดงเป็นกราฟระหว่างความเค้นกดและความเครียดกด ดังรูปที่ 2 (b)

ส่วนคุณสมบัติของโฟมที่ความหนาแน่น 150, 200, 250 kg/m^3 คำนวณได้จากสมการที่ (1) [21]

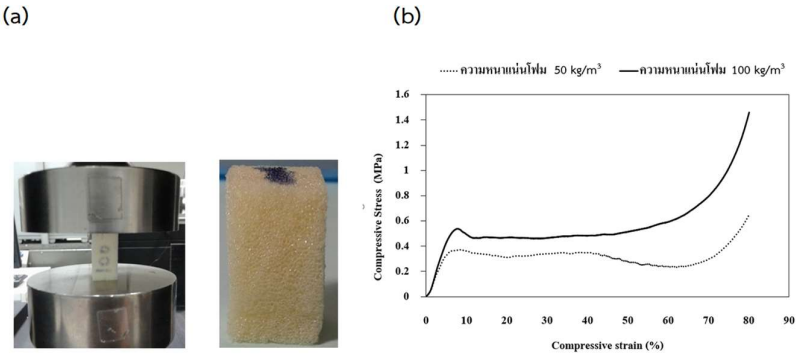
$$\sigma_p = c\left(\frac{\rho_f}{\rho_{f0}}\right)^m \tag{1}$$

เมื่อ σ_p คือ ความเค้นคร่ากตัว, MPa

ρ_f คือ ความหนาแน่นโฟม, kg/m^3

ρ_{f0} คือ ความหนาแน่นโฟมสภาวะเริ่มแข็งตัว เท่ากับ 38.35 kg/m^3

c และ m เป็นค่าคงที่ สามารถหาได้จากการทดลอง จะได้ค่า c = 0.3074 และ m = 0.503 คุณสมบัติวัสดุของโฟม แสดงในตารางที่ 1



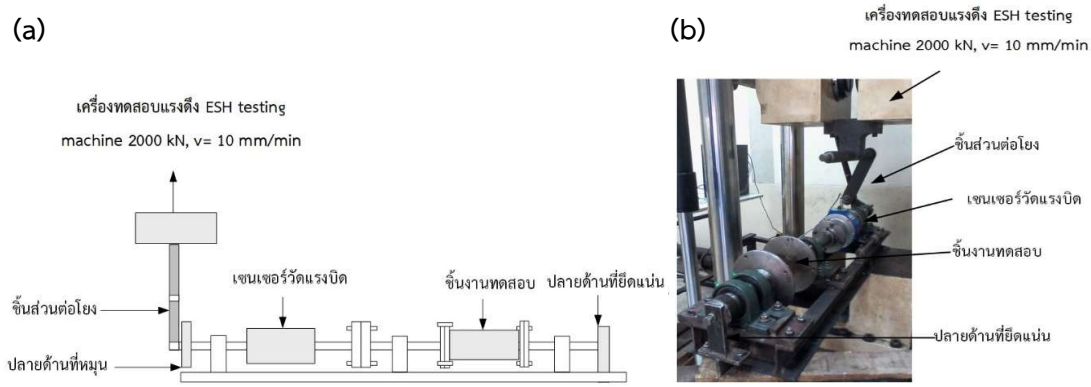
รูปที่ 2 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุโฟม (a) การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกด (b) ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกดกับความเครียดของโฟมความหนาแน่น 50 และ 100 kg/m^3

ตารางที่ 1 คุณสมบัติวัสดุของโฟม

ความหนาแน่นโฟม (kg/m^3)	ความเค้นที่จุดคราก (MPa)
50	0.35
100	0.50
150	0.61
200	0.70
250	0.78

4.3 ขั้นตอนการทดลอง

ชุดทดสอบแรงบิด ทำการออกแบบและสร้างเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 3 ประกอบด้วย เครื่องทดสอบแรงดึง เพื่อดึงชิ้นต่อโยง 2 ชิ้น ด้วยความเร็ว 10 mm/min หมุนรอบแกนเพลาเพื่อบิดชิ้นงาน มีเซนเซอร์วัดค่าโมเมนต์บิด โดยปลายด้านหนึ่งจะหมุนต่อกับเซนเซอร์ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งยึดแน่นไม่ให้เคลื่อนที่



รูปที่ 3 ชุดทดสอบโมเมนต์บิด (a) ส่วนประกอบเครื่องทดสอบ (b) ส่วนประกอบเครื่องใช้งานจริง

4.4 การขึ้นรูปชิ้นงาน

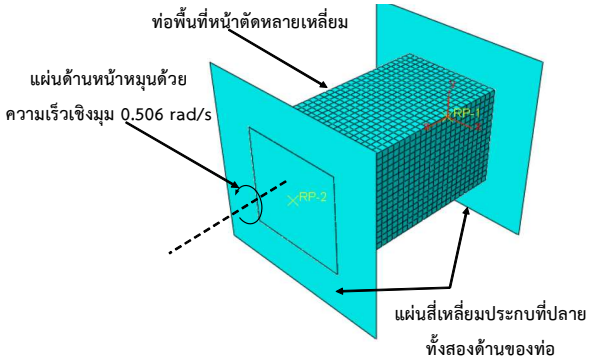
4.4.1 การขึ้นรูปท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมทำจากวัสดุอลูมิเนียมสำหรับการทดลอง โดยใช้วิธีการพับขึ้นรูปด้วยเครื่องพับสำหรับท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม และท่อแปดเหลี่ยม เป็นมุม 90, 60, และ 45 องศา ตามลำดับ ส่วนท่อวงกลมจะทำการขึ้นรูปด้วยการม้วนโดยเครื่องม้วน แล้วเชื่อมติดกันด้วยลวดอาร์กอนบริเวณรอยพับ

4.4.2 การเติมโฟมภายในท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ท่อทุก ๆ หน้าตัดจะทำการเติมโฟมด้วยความหนาแน่น 50 และ 100 kg/m^3 โดยโฟมที่เติมจะเป็นโพรียูรีเทนที่เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิด คือ โพลิออล (Polyol) และไดโซยาเนต (Diisocyanate) ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากันจึงจะเกิดการขยายตัวภายในท่อ ดังในรูปที่ 4 ประกอบด้วยท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม และท่อวงกลม ตามลำดับ

รูปที่ 4 ลักษณะของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟม

4.5 การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ ในการวิเคราะห์ตัวแปรที่ศึกษา คือ ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม และท่อหลายเหลี่ยมทุก ๆ ตัว เติมโฟมที่ความหนาแน่น 50, 100, 150, 200 และ 250 kg/m^3 แสดงดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การจำลองคอมพิวเตอร์ของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิด

การจำลองคอมพิวเตอร์ของท่อหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายใต้โมเมนต์บิดโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองเริ่มจากการเลือกลักษณะปัญหาเป็นแบบพลศาสตร์ชัดเจน (Explicit Dynamic) โดยมีการบิดท่อรอบแกนท่อด้วยความเร็วเชิงมุม 0.506 rad/s ในเวลา 1 วินาที ที่ปลายของท่อทั้งสองด้านยึดด้วยแผ่นสี่เหลี่ยม โดยมีเงื่อนไขขอบเขตที่จุดศูนย์กลางของแผ่นสี่เหลี่ยม ปลายที่รับโมเมนต์บิดให้หมุนได้เฉพาะรอบแกนของท่อเท่านั้น ส่วนอีกปลายด้านหนึ่งของท่อยึดแน่นไม่ให้มีการเคลื่อนที่ทุกทิศทาง ลักษณะของเอลิเมนต์ของแผ่นสี่เหลี่ยมเป็นแบบสี่เหลี่ยมมีสีโนดแบบแข็งเกร็ง (R3D4: A 4-node 3-D Bilinear Rigid Quadrilateral.) ส่วนชิ้นงานทดสอบเป็นท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเป็นวัตถุที่ยุบตัวได้ (Deformable body) และลักษณะเอลิเมนต์เป็นแบบเปลือก (Shell Elements) เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมมีสี่โนด (S4R) ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมวัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียม ซึ่งมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันทั้งหมด จึงกำหนดในโปรแกรมเป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) และ

คุณสมบัติของวัสดุของอลูมิเนียมจะมีค่าเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic) การสัมผัสของทุกชิ้นงานเป็นลักษณะการสัมผัสทุกชิ้นงานเป็นแบบทั่วไป (General Contact) ส่วนการสัมผัสกันระหว่างท่อรูปร่างหลายเหลี่ยมกับโฟม จะกำหนดลักษณะการสัมผัสกันแบบผิวต่อผิว (Surface to Surface) และการสัมผัสกันระหว่างท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมกับแผ่นสี่เหลี่ยมประกบที่ปลายทั้งสองด้านของท่อกำหนดให้ยึดติดกัน (Tie) และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.1 โดยชิ้นงานทดสอบไม่มีรอยเชื่อม ส่วนโฟมเป็นเอลิเมนต์ก้อนแข็ง (Solid Element) เสียรูปได้ (Deformable Body) ชนิดเอลิเมนต์เป็นแบบลูกบาศก์ทรงสี่เหลี่ยมมี 8 โนด (C3D8R: An 8-node Linear Brick) ส่วนในงานวิจัยนี้ ได้หาการวิเคราะห์การลู่เข้าของขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 5 mm เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดเอลิเมนต์

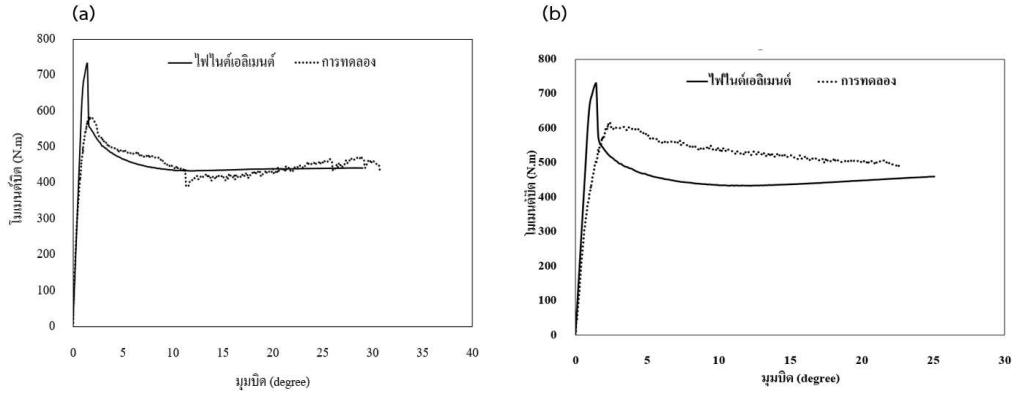
5. ผลการวิเคราะห์

5.1 เปรียบเทียบผลจากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

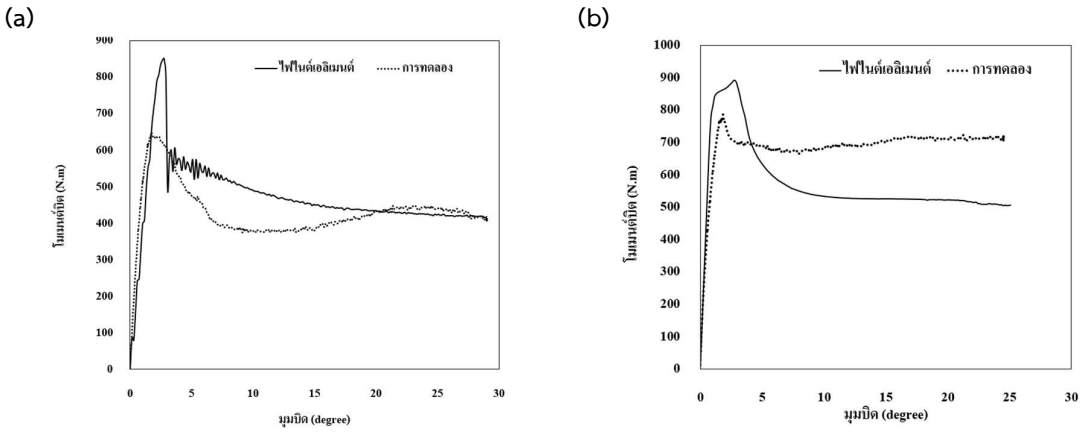
งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองท่อรูปร่างพื้นที่หลายเหลี่ยมเติมโฟม ประกอบด้วย ท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ท่อรูปร่างหกเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดเหลี่ยม และท่อรูปร่างวงกลม แล้วเติมโฟมภายในท่อภายใต้โมเมนต์บิดที่ความหนาแน่นโฟม 50 และ 100 kg/m^3 ตามลำดับ การทดลองในแต่ละท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมจะทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น จากผลการเปรียบเทียบระหว่างโมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังรูปที่ 6-9 พบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบและหาค่าความคลาดเคลื่อนจะแสดงในตารางที่ 2 พบว่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยทั้งหมดของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมทุกชนิดที่มุมบิด 23 องศา มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 8.31

ตารางที่ 2 โมเมนต์บิดเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลองกับวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

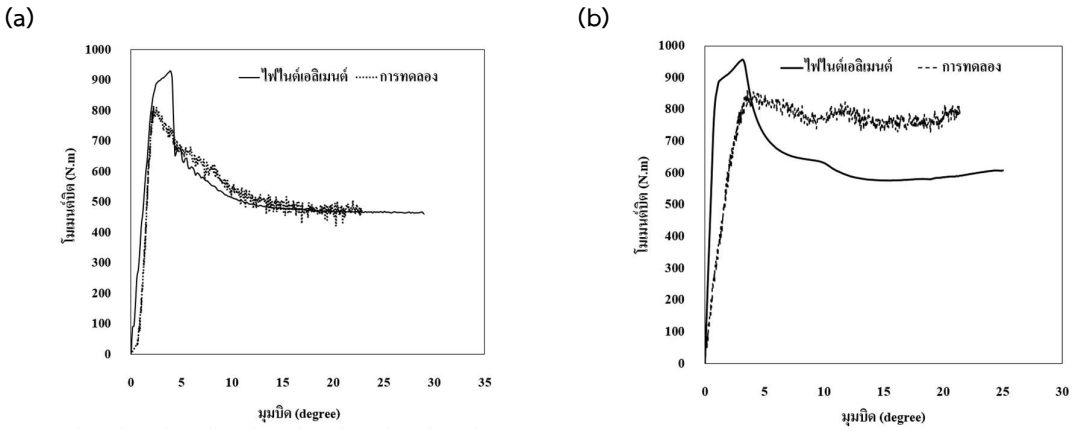
ชนิดท่อ	ความหนาแน่นโฟม (kg/m^3)	โมเมนต์บิดเฉลี่ย $(N \cdot m)$		
		การทดลอง	ไฟไนต์เอลิเมนต์	ร้อยละความคลาดเคลื่อน (%)
ท่อวงกลม	50	577.42	627.59	-8.69
	100	701.22	643.36	8.25
ท่อแปดเหลี่ยม	50	515.06	537.84	-4.42
	100	698.92	645.49	7.64
ท่อหกเหลี่ยม	50	425.75	482.17	-13.25
	100	654.08	573.34	12.34
ท่อสี่เหลี่ยม	50	438.63	448.80	-2.32
	100	499.94	452.02	9.59
ค่าเฉลี่ย				8.31



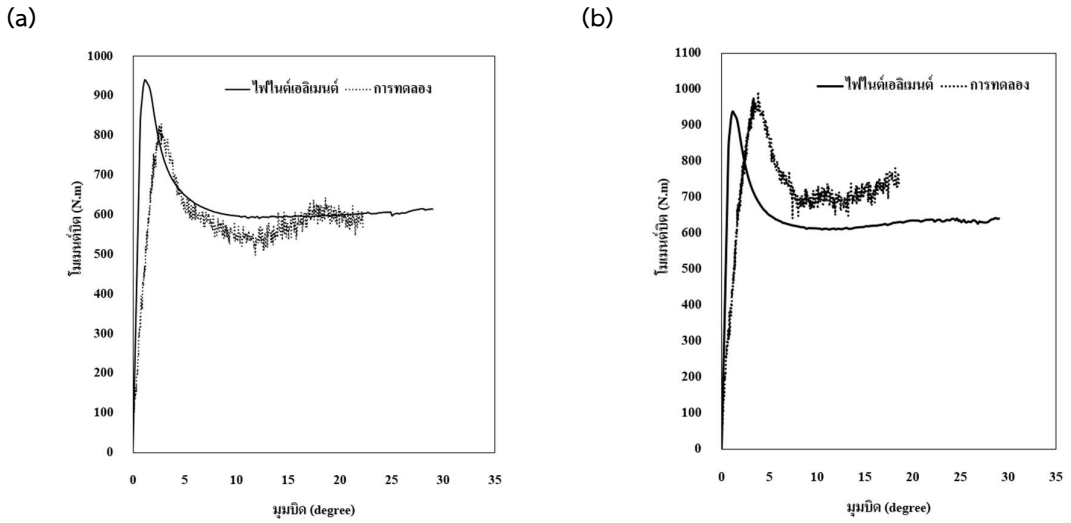
รูปที่ 6 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟม (a) 50 kg/m^3 (b) 100 kg/m^3



รูปที่ 7 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างหกเหลี่ยมความหนาแน่นโฟม (a) 50 kg/m^3 (b) 100 kg/m^3



รูปที่ 8 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างแปดเหลี่ยมที่ความหนาแน่นโฟม (a) 50 kg/m^3 (b) 100 kg/m^3



รูปที่ 9 โมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างวงกลม ที่ความหนาแน่นโฟม (a) 50 kg/m^3 (b) 100 kg/m^3

5.2 ผลของความหนาแน่นโฟม

ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ได้แก่ ท่อรูปร่างสี่เหลี่ยม ท่อรูปร่างหกเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดเหลี่ยม ท่อรูปร่างสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างยี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างสี่สิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างหกสิบเหลี่ยม ท่อรูปร่างแปดสิบเหลี่ยม และท่อรูปร่างวงกลม จะทำการเติมโฟมภายในท่อที่ความหนาแน่น 50, 100, 150, 200 และ 250 kg/m^3 โดยใช้การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และความสามารถในการดูดซับพลังงานคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$E_a = \int F ds = F_{ave} \times \theta_f \tag{2}$$

โดยที่ E_a = พลังงานดูดซับ, Joule

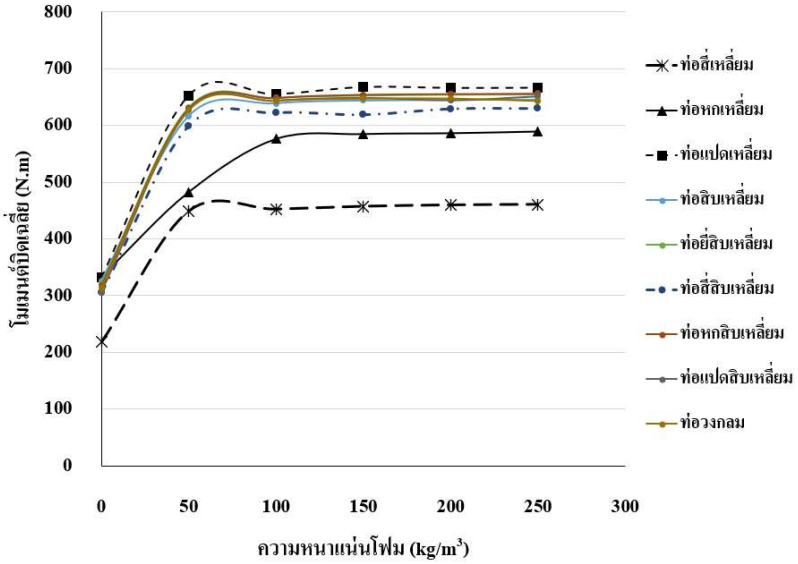
F = โมเมนต์บิดที่กระทำกับท่อเติมโฟม, N

ds = การเปลี่ยนแปลงระยะยุบตัวของชิ้นงาน, m

F_{ave} = โมเมนต์บิดเฉลี่ย, N

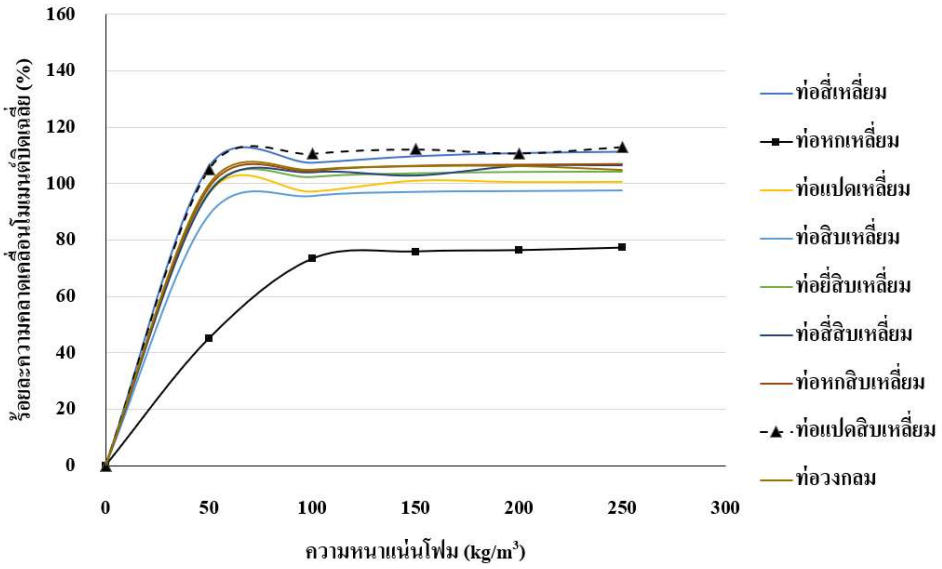
θ_f = มุมบิดสุดท้าย, rad

จากสมการที่ 2 พบว่าพลังงานดูดซับคำนวณได้จากโมเมนต์บิดเฉลี่ยคูณด้วยมุมบิดสุดท้าย เมื่อพิจารณาในเชิงเปรียบเทียบจึงกำหนดให้มุมบิดสุดท้ายมีค่าเท่ากันที่ 23 องศา ดังนั้นพลังงานดูดซับจึงขึ้นอยู่กับโมเมนต์บิดเฉลี่ยอย่างเดียว ผลการวิเคราะห์แสดงดังในรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉลี่ยกับความหนาแน่นโฟมในท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉลี่ยกับความหนาแน่นโฟมภายในท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมทุกชนิด ได้แก่ ความหนาแน่นโฟมเท่ากับ 0 (ไม่เติมโฟม), 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m^3 พบว่า เมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้นจาก 0 kg/m^3 (ท่อเปล่าไม่เติมโฟม) จนถึง 50 kg/m^3 จะทำให้โมเมนต์บิดเฉลี่ยเพิ่ม แต่เมื่อความหนาแน่นตั้งแต่ 100 kg/m^3 ขึ้นไป จนถึง 250 kg/m^3 โมเมนต์เฉลี่ยจะเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวหรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ดังนั้นความหนาแน่นโฟมที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม แต่จะเข้าสู่สภาะอิ่มตัวเมื่อความหนาแน่นโฟมมากกว่า 100 kg/m^3 ขึ้นไป ดังแสดงในรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบร้อยละคลาดเคลื่อนโมเมนต์บิดเฉลี่ยของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมกับท่อเปล่า (ไม่เติมโฟม) พบว่าท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมที่เติมโฟมจะให้ค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยมากกว่าท่อเปล่า (ไม่เติมโฟม) แสดงว่าท่อที่เติมโฟมจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานได้ดีกว่าท่อไม่เติมโฟม แต่ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมที่มีความหนาแน่นเท่ากับหรือมากกว่า 100 ขึ้นไป จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนโมเมนต์บิดเฉลี่ยไม่เปลี่ยนมากนัก ซึ่งจะเห็นได้จากตารางที่ 3 พบว่าท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมมีอัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บิดเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อไม่เติมโฟม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 109.09%, 69.54%, 99.20%, 95.30%, 102.24%, 103.27%, 104.60%, 110.38%, และ 104.37% ตามลำดับ



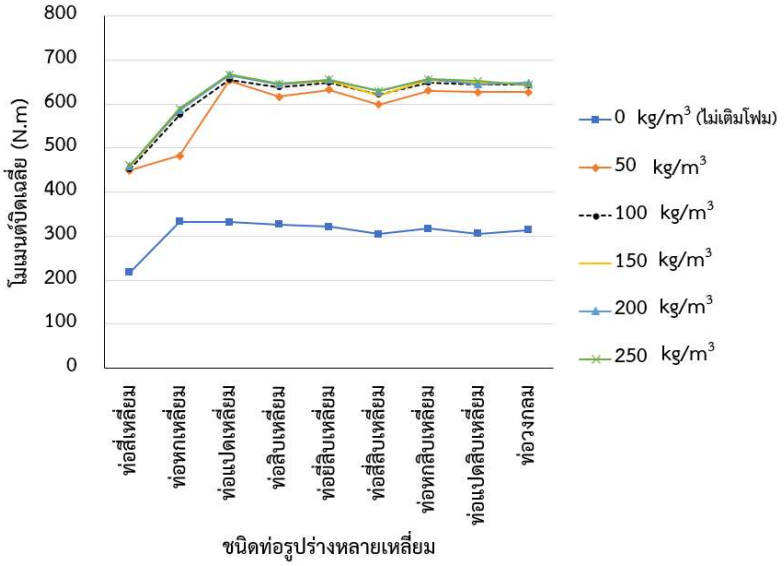
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละความคลาดเคลื่อนของโมเมนต์บิดเฉลี่ยกับความหนาแน่นโฟมของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมกับท่อไม่เติมโฟม

ตารางที่ 3 อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บิดเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อไม่เติมโฟม

ชนิดของท่อ	อัตราการเพิ่มขึ้นของโมเมนต์บิดเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับท่อไม่เติมโฟม (%)					
	50 (kg/m^3)	100 (kg/m^3)	150 (kg/m^3)	200 (kg/m^3)	250 (kg/m^3)	ค่าเฉลี่ย (%)
ท่อสี่เหลี่ยม	105.97	107.45	109.77	110.89	111.36	109.09
ท่อหกเหลี่ยม	45.01	73.27	75.87	76.32	77.21	69.54
ท่อแปดเหลี่ยม	96.55	97.19	101.06	100.56	100.67	99.20
ท่อสิบเหลี่ยม	88.80	95.61	97.09	97.38	97.61	95.30
ท่อยี่สิบเหลี่ยม	97.04	102.30	103.59	104.09	104.19	102.24
ท่อสี่สิบเหลี่ยม	96.56	104.05	102.89	106.31	106.54	103.27
ท่อหกสิบเหลี่ยม	98.58	104.50	106.31	106.68	106.94	104.60
ท่อแปดสิบเหลี่ยม	105.09	110.68	112.24	110.80	113.08	110.38
ท่อวงกลม	99.62	104.93	106.18	106.26	104.84	104.37

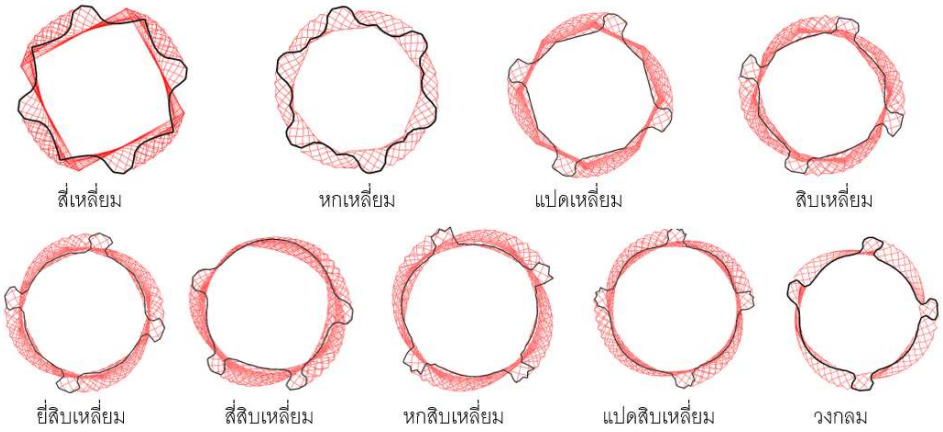
5.3 ผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ

งานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาผลของท่อรูปร่างหน้าตัดหลายเหลี่ยม ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ท่อทุกชนิดจะทำการเติมโฟมภายในท่อที่มีความหนาแน่น 0, 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m^3 ผลจากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 12



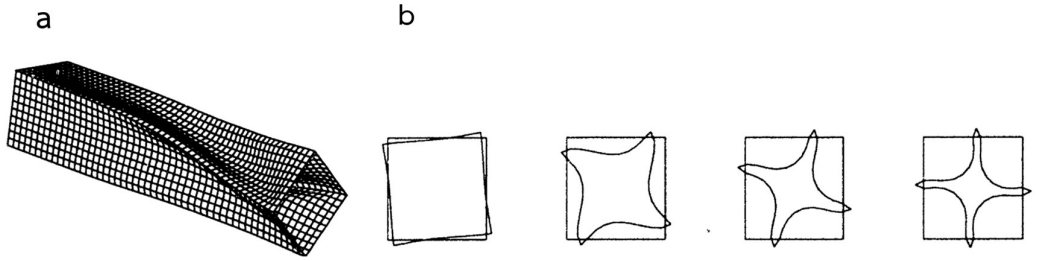
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉลี่ยกับท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟมต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์บิดเฉลี่ยกับท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม ที่ความหนาแน่นโฟมต่าง ๆ พบว่า ท่อที่มีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยสูงจะเริ่มจากท่อแปดเหลี่ยม เป็นต้นไป จนถึงท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ซึ่งท่อเหล่านี้จะให้ค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยใกล้เคียงกันที่ทุก ๆ ความหนาแน่นโฟมเดียวกัน รองลงมาคือท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมจะมีค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยต่ำสุด เหตุผลในทางทฤษฎีความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม จะกระจายไปตามเส้นการพับตัวของท่อ ท่อที่มีเส้นการพับตัวมากจะให้ความสามารถการดูดซับพลังงานมากขึ้น ดังตัวอย่างการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมที่ความหนาแน่น 50 kg/m^3 แสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 การบิดตัวของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมที่ความหนาแน่น 50 kg/m^3

จากรูปที่ 13 จะเห็นว่าท่อหกเหลี่ยมที่มีเส้นการพับตัวมากที่สุด (เส้นการพับ 6 เส้น) ส่วนท่อสี่เหลี่ยมและท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่แปดเหลี่ยมขึ้นไปจนถึงแปดสิบเหลี่ยมและท่อวงกลมมีเส้นการพับเท่ากับ 4 เส้น ซึ่งอาจจะสรุปว่าท่อหกเหลี่ยมมีการดูดซับพลังงานมากที่สุด แต่จากผลการวิเคราะห์ที่ผ่านมาไม่ได้เป็นเช่นนั้น พบว่าท่อแปดเหลี่ยมจนถึงท่อวงกลมให้การดูดซับพลังงานมากที่สุด เหตุผลอีกอย่าง เนื่องจากคุณสมบัติของพื้นที่หน้าตัดรวมถึงภายในท่อได้เติมโฟมเข้าไป ทำให้ความสามารถในการต้านการบิดตัวของท่อเพิ่มขึ้นอย่างมาก สังเกตจากค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จากงานวิจัยของ Weigang Chen et al. (2000) [14] ได้เขียนสมการทางทฤษฎี โดยใช้หลักของสมดุลกำลังงาน ผลรวมของกำลังงานเนื่องจากแรงภายนอกเท่ากับกำลังงานกระจายเข้าไปในแต่ละเส้นการพับ โดยเริ่มต้นวิเคราะห์กับท่อสี่เหลี่ยมผนังบางภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดดังรูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์จะได้สมการทั่วไปของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมไม่เติมโฟม แสดงดังสมการที่ 3



รูปที่ 14 รูปร่างความเสียหายภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดของท่อสี่เหลี่ยมผนังบาง (a) ท่อสี่เหลี่ยมบิดไปมุม 45 องศา (b) การเสียรูปของพื้นที่หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม [14]

จากการวิเคราะห์ได้สมการที่ 3

$$T = 2\tau\sigma_o tA \tag{3}$$

โดยที่ T = โมเมนต์บิดที่กระทำที่ปลายของท่อ, $\mathrm{N \cdot m}$

τ = โมเมนต์บิดไร้มิติ (Dimensionless twisting moment) สมการอยู่ในรูปอัตราส่วนความกว้างต่อความยาวของท่อ หาได้ตามเอกสารอ้างอิงข้อที่ 14

σ_o = ความเค้นไหลพลาสติก (Plastic flow stress), Pa

t = ความหนาของท่อ, m

A = พื้นที่หน้าตัดขวางของท่อ, m^2

จากสมการที่ 3 จะเห็นว่าโมเมนต์บิดของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม จะขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของท่อ (A) อย่างเดียว ภายใต้เงื่อนไข กำหนดให้โมเมนต์บิดไร้มิติ, (τ) ความเค้นไหลพลาสติก, (σ_o) และความหนาของท่อ, (t) มีค่าคงที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้กำหนดให้ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยม มีความยาวเส้นรอบวงเท่ากัน (320 mm) ทำให้ท่อที่มีจำนวนเหลี่ยมเพิ่มมากขึ้น จะมีพื้นที่หน้าตัดขวางเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้ค่าโมเมนต์บิดเฉลี่ยของท่อเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นเหตุผลว่า ท่อแปดเหลี่ยมจนถึงท่อวงกลมจึงมีค่าการดูดซับพลังงานสูงกว่าท่อหกเหลี่ยมและท่อสี่เหลี่ยม (มีพื้นที่หน้าตัดและการดูดซับพลังงานต่ำสุด)

6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างพื้นที่หน้าตัดของท่อ ประกอบด้วย ท่อสี่เหลี่ยม ท่อหกเหลี่ยม ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม ท่อทุกชนิดจะทำการเติมโฟมภายในท่อที่มีความหนาแน่น 50, 100, 150, 200, และ 250 kg/m^3 ภายใต้สภาวะโมเมนต์บิดรอบแกนท่อ โดยวิธีการศึกษาจะใช้วิธีการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังนี้

6.1 ผลเปรียบเทียบโมเมนต์บิดที่ได้จากการทดลองและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยร้อยละ 8.31 ซึ่งผลความคลาดเคลื่อนอาจจะเป็นผลมาจากท่อเติมโฟมมีการขึ้นรูปโดยการพับและม้วนพร้อมเชื่อมเข้าด้วยกันตรงบริเวณรอยพับ แต่การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ท่อเติมโฟมจะไม่มีรอยเชื่อมและผลจากการที่ชิ้นงานได้ถูกพับมาก่อนทำให้บริเวณรอยพับเกิดการเสียรูปในช่วงพลาสติกไปแล้ว

6.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟม พบว่า เมื่อความหนาแน่นโฟมเพิ่มขึ้น จะทำให้ความสามารถการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นจากความหนาแน่นเป็น 0 kg/m^3 (ไม่เติมโฟม) ไปจนถึงความหนาแน่นโฟม 100 kg/m^3 หลังจากความหนาแน่นโฟมมากกว่า 100 kg/m^3 ขึ้นไป ค่าความสามารถการดูดซับพลังงานเข้าสู่สภาวะอิ่มตัวหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

6.3 ผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อ พบว่าความสามารถการดูดซับพลังงานมีค่าสูงและใกล้เคียงกันตั้งแต่ท่อแปดเหลี่ยม ท่อสิบเหลี่ยม ท่อยี่สิบเหลี่ยม ท่อสี่สิบเหลี่ยม ท่อหกสิบเหลี่ยม ท่อแปดสิบเหลี่ยม และท่อวงกลม รองลงมาเป็นท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยมมีความสามารถการดูดซับพลังงานต่ำสุด

6.4 ผลจากการศึกษาในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลให้วิศวกรในการออกแบบท่อที่มีรูปร่างพื้นที่หน้าตัดแปดเหลี่ยมและท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดวงกลมแล้วเติมโฟมที่ความหนาแน่น 100 kg/m^3 เพื่อใช้ในการออกแบบเป็นตัวซับพลังงานเนื่องจากการชน เพราะว่าท่อลักษณะนี้มีความสามารถการดูดซับพลังงานสูงภายใต้สภาวะโมเมนต์บิด

6.5 ในการประยุกต์การใช้งานจริง ท่อที่เกิดการบิดเนื่องจากโมเมนต์บิด จะไม่เกิดขึ้นอย่างเดี่ยว ๆ โดยส่วนใหญ่มีการต่อโยงกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่รับทั้งแรงกดและแรงดัด ดังนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] พบว่าเมื่อท่อรับแรงกด ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดวงกลมมีการดูดซับพลังงานสูงสุด ส่วนท่อที่รับแรงดัด ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดสี่เหลี่ยมมีการดูดซับพลังงานสูงสุด และยังพบอีกว่าท่อหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้การกระทำโมเมนต์บิด ท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหกเหลี่ยมให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด [20] ดังนั้นในการเพิ่มความสามารถการดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างพื้นที่หน้าตัดหลายเหลี่ยมเติมโฟมภายในท่อพร้อมหุ้มด้วยไฟเบอร์กลาสภายใต้โมเมนต์บิด ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดลอง โดยเฉพาะวิธีการทดลองท่อรูปร่างพื้นหน้าตัดหลายเหลี่ยมควรมีการขึ้นรูปด้วยวิธีอื่นที่ไม่มีรอยเชื่อมเหมือนงานวิจัยนี้ จึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยจากคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีและขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องทดสอบคุณสมบัติวัสดุ

เอกสารอ้างอิง

[1] Nagel GM, Thambiratnam DP. Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading. Int J Impact Eng. 2006 Oct;32(10):1595-620.

[2] Nagel GM, Thambiratnam DP. Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes. Thin-Walled Struct. 2005 Aug;43:1225-42.

[3] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under axial compression and bending loading. In: The 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2007 Oct 17-19; Chonburi, Thailand. p. 590-3.

[4] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under torsion loading. In: The 23th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2009 Nov 4-7; Chiang Mai, Thailand. p. 4-7.

[5] Yao S, Tian Y, Li Z, Yang F, Xu P. Crushing characteristic of polygonal tubes with hierarchical triangular cells. Thin-Walled Struct. 2020;157:107031. doi:10.1016/j.tws.2020.107031.

[6] Zhang J, Xie S, Zhou H, Li T, Li Y. Study and optimization of energy absorption characteristics of a new concave polygon tube. Structures. 2023;53:1030-45. doi:10.1016/j.istruc.2023.04.129.

[7] Goyal S, A CS, Sharma S, Sharma R. Crashworthiness analysis of foam filled star shape polygon of thin-walled structure. Thin-Walled Struct. 2019 Nov;144:106312.

[8] Ge C, Gao Q, Wang L, Hong Z. Theoretical prediction and numerical analysis for axial crushing behaviour of elliptical aluminium foam-filled tube. Thin-Walled Struct. 2020 Apr;149:106523. doi:10.1016/j.tws.2019.106523

[9] Ge C, Gao Q, Wang L, Hong Z. Theoretical prediction and numerical analysis for axial crushing behaviour of elliptical aluminium foam-filled tube. Thin-Walled Struct. 2020 Apr;149:106523. doi:10.1016/j.tws.2019.106523.

[10] Ahmad Z, Thambiratnam D. Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading. Comput Struct. 2009;87:186-97. doi:10.1016/j.compstruc.2008.10.003.

[11] Ahmad Z, Thambiratnam DP. Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading. Mater Des. 2009 Aug;30(7):2393-403. doi:10.1016/j.matdes.2008.10.017.

[12] Barzigar SS, Ahmadi H, Liaghat G. An analytical investigation on the crushing behavior of thin-walled tubes filled with a foam with strain hardening region. Thin-Walled Struct. 2023;182:110169. doi:10.1016/j.tws.2022.110169.

[13] Zheng G, Wu S, Sun G, Li G, Li Q. Crushing analysis of foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes. Int J Mech Sci. 2014;87:226-40. doi:10.1016/j.ijmecsci.2014.06.002.

[14] Chen W, Wierzbicki T. Torsional collapse of thin-walled prismatic columns. Thin-Walled Struct. 2000;36:181-96. doi:10.1016/S0263-8231(99)00043-9.

[15] Chen W, Wierzbicki T, Breuer O, Kristiansen K. Torsional crushing of foam-filled thin-walled square columns. Int J Mech Sci. 2001;43:2297-317. doi:10.1016/S0020-7403(01)00040-6.

[16] Poonaya S, Thinvongpituk C. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under torsion loading. In: The 23th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand; 2009 Nov 4-7; Chiang Mai, Thailand. p. 4-7.

[17] 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. doi:10.14456/nuej.2014.7.

[18] Poonaya S. Influence of foam density of foam-filled polygon tubes subjected to bending. RSU J Eng Technol. 2024;27(2):9-17. Available from: https://rsujet.rsu.ac.th/files/issues/V27N2/170_20241205223851.pdf.

[19] Poonaya S. Parametric analysis of foam-filled polygonal thin-walled tubes subjected to torque using experimental design. RMUTI J. 2024;17(2):63-75. Available from: https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rmutijo/article/view/256432.

[20] Poonaya S, Sopakayang R. The relationship of cross-sectional area shape with the energy absorption capacity of fiberglass composite polygon tubes under torsional moment. RTNA J Sci Technol. 2024;7(1):47-62. Available from: https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/rtna/article/view/256652/172661.

[21] Reyes A, Hopperstad OS, Langseth M. Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study. Int J Solids Struct. 2004 Mar;41(5-6):1645-75. doi:10.1016/j.ijsolstr.2003.09.053.