

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

**อิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมต่อความสามารถในการรับแรงกด
ของท่อเหล็กกลมที่เติมโฟม**

**The influence of foam density on the crush characteristic of foam-filled
circular steel tubes**

ปิยะวุฒิ ป้องเพชร*, นิรุต อ่อนสลง และ ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ
จ.อุบลราชธานี 34190

*ติดต่อ: E-mail: piyawoot007@hotmail.com โทรศัพท์: (045)353309, โทรสาร: (045)353308

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดให้แก่โครงสร้างทรงกระบอก การศึกษานี้ดำเนินการด้วยวิธีการทดลองโดยใช้ชิ้นงานที่เป็นท่อเหล็กทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 ขนาด คือ 38.1mm และ 50.8mm เหล็กแต่ละตัวอย่างมีความหนา 2 ขนาด คือ 1.8mm และ 2.0mm ตามลำดับ ในการศึกษาได้นำเอาเหล็กแต่ละความหนาเติมโฟมชนิดโพลียูรีเทน ที่ความหนาแน่นต่างกัน 6 ค่า ได้แก่ 50, 100, 150, 200, 250 และ 300kg/m³ เพื่อเปรียบเทียบกับกรณีของชิ้นงานที่ไม่เติมโฟม จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Compressive Testing Machine โดยทดสอบกดในแนวแกนแบบ Quasi - Static ใช้ความเร็วในการกด 50 mm/min ค่าภาระและระยะยุบตัวของชิ้นงานแต่ละชิ้นถูกบันทึกและใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับเพื่อทำการเปรียบเทียบ ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่า เนื่องจากมีปริมาณโลหะมากกว่า และยังพบว่าโครงสร้างที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่นสูงกว่าจะมีแนวโน้มดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโฟมที่มีความหนาแน่นสูงมีส่วนช่วยในการรับแรงกดกระแทกไว้ได้ ในกรณีที่โครงสร้างสามารถดูดซับพลังงานได้สูงสุด การเติมโฟมที่มีความหนาแน่น 300 kg/m³ จะช่วยให้โครงสร้างสามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่าถึง 61.92% นอกจากนี้บทความนี้ยังได้แสดงลักษณะและพฤติกรรมการเสียหายของท่อทรงกระบอกที่เติมโฟมและไม่เติมโฟมอีกด้วย

คำหลัก: พลังงานดูดซับ, การเติมโฟม, การกดในแนวแกน

Abstract

This study was aimed to investigate the crush characteristic of circular tubes with foam-filled. This was in order to enhance the energy absorption capacity of circular tube. The specimens were made of steel tubes with diameter of 38.1 mm and 50.8 mm. The thickness of specimens were 1.8mm and 2.0 mm. The specimens were filled with polyurethane foam of 6 different densities ie. 50,100,150,200,250 and 300 kg/m³. Then, they were crushed quasi-statically with the speed of 50mm/min in axial direction. Load and displacement were recorded and energy absorption value of cashed specimen was calculated and compared. The result revealed that the thicker tube can absorb more energy because of high volume of material. In addition, the result also indicated that the tubes with higher density of foam provide higher energy absorption value. In the ultimate case, the foam-filled tube with 300 kg/m³ can absorb higher energy than the empty tube by 61.92%. Failure mode and crush behavior of foam-filled tube were also presented and disused in this paper.

Keywords: Energy absorption, Foam-Filled, Axial crushing

1. บทนำ

การศึกษาการเสียหายของโครงสร้างรถยนต์ภายใต้การชนมีความสำคัญอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ เนื่องจากโครงสร้างเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะปกป้องอันตรายให้แก่ผู้โดยสารเมื่อเกิดอุบัติเหตุ ซึ่งในต่างประเทศได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับโครงสร้างรถยนต์อย่างกว้างขวางและได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เช่น การศึกษาการชนของชิ้นส่วนด้านหน้ารถยนต์ที่รับแรงกระแทกในแนวแกน [1] การศึกษาแนวทางการเพิ่มความหนาที่เหมาะสมและรูปแบบการยึดต่อโครงสร้างที่เหมาะสม [2] การใช้ตัวนำการกดของโครงสร้าง [3] การตัดบางชิ้นส่วนออกเพื่อบังคับรูปแบบการเสียหายให้ได้รูปแบบการดูดซับพลังงานดีขึ้น [4] อย่างไรก็ตามในการเพิ่มความสามารถด้านการชนแก่โครงสร้างนั้น จะต้องไม่ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นจนเกินไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง จึงมีการนำแนวคิดการเติมโฟมลงในโครงสร้างเพื่อช่วยในการดูดซับพลังงานและไม่เพิ่มน้ำหนักของโครงสร้างมากนัก ซึ่งจากการศึกษาของ Zarei HR และ Kroger M.[5] พบว่าการเติมโฟมอลูมิเนียมลงในท่ออลูมิเนียมสามารถดูดซับพลังงานจากการทดสอบการกดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้น 91.1% และดูดซับพลังงานจากการทดสอบการกดในแนวนอน

ได้เพิ่มขึ้น 28% [6] และผลการศึกษาของ M. Guden และ H. Kavia [7] พบว่าการเติม โฟมอลูมิเนียมลงในท่อเปล่าสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าท่อเปล่าและโฟมเปล่า เนื่องจากการเติมโฟมโลหะลงในโครงสร้างสามารถช่วยลดความหนาและน้ำหนักของโครงสร้างได้ดี

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการเติมโฟมลงในท่อเหล็กกลม เพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกด และได้เลือกใช้โฟมชนิดโพลียูรีเทนโฟมซึ่งเป็นโฟมที่หาง่าย และมีใช้ในอุตสาหกรรมการต่อรถโดยสารอยู่แล้ว โดยในการศึกษาจะใช้วิธีการทดลองเป็นหลักและใช้ค่าพลังงานดูดซับเป็นตัวชี้วัดหลักในการศึกษา

2. ชิ้นงานทดลองและวิธีการศึกษา

2.1 การจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ

โฟมที่ใช้ในการศึกษาคือ โพลียูรีเทนโฟมชนิดแข็ง (Rigid Polyurethane Foam) มีคุณสมบัติเด่นคือ เป็นฉนวนที่ติดไฟแต่ไม่ลามไฟ ไม่มีสารละลายเคือง หรือสารที่ทำให้เกิดอาการแพ้ มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง มีประสิทธิภาพสามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิระหว่าง -70 ถึง 100 °C มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปีโดยไม่ต้องบำรุงรักษาแต่อย่างใดและไม่มีการเสียรูป โฟมชนิดนี้เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิด คือ

ชนิดที่ 1 มีสีเหลืองคล้ายโพลีเอสเตอร์เรซิน เรียกว่า โฟมขาวหรือ โพลีออล (Polyol) ชนิดที่ 2 มีสีน้ำตาล ใ้หม้เกือบดำ ซึ่งเรียกว่าโฟมดำหรือไดไอโซยาเนต (Diisocyanate) ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการให้กำเนิด โฟมจะนำของเหลวทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากันจึงจะเกิดการ ขยายตัว อัตราส่วนการขยายตัวในที่โล่งเท่ากับ 1:27 เท่า ในการศึกษานี้ใช้ความหนาแน่นของโฟมในการ เติมน้ำในท่อเหล็กกลมมีทั้ง หด 6 ค่าความหนาแน่น คือ 50,100,150,200,250 และ 300 kg/m³ การเติม โฟมลงในท่อเหล็กกลมจะใช้กระบอกรัดยางดูดสารทั้ง 2 ชนิดในปริมาตรตามค่าความหนาแน่นที่ต้องการแล้ว เติมน้ำลงในท่อเหล็กกลมที่เตรียมไว้ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นใช้อุปกรณ์ควบคุมความหนาแน่นดังแสดงใน รูปที่ 3 ปิดเพื่อบังคับให้ความหนาแน่นของโฟมเป็นไป ตามต้องการ

เหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กชนิด AISI 1020 เป็นท่อเหล็กกลมที่มีหน้าตัดขนาด 38.1 mm และ 50.8 mm โดยแต่ละตัวอย่างมีความหนา 2 ขนาด คือ 1.8 mm และ 2.0 mm การขึ้นรูปชิ้นงานจะตัดเหล็กให้ มีความยาวเริ่มต้น 200 mm และหลังจากเติมโฟมที่ ความหนาแน่นต่างๆ แล้วจะตัดชิ้นงานให้มีความยาว ลดลงเหลือ 150 mm เท่ากันทุกชิ้นเพื่อป้องกันความ ไม่สม่ำเสมอของโฟมที่ปลายท่อ



รูปที่ 1 แสดงของเหลว 2 ชนิด โพลีออลและไดไอโซ -
ยาเนต ซึ่งผสมกันแล้วจะได้เป็น โพลียูรีเทนโฟม



รูปที่ 2 แสดงการเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์
เติมโฟม



รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ควบคุมความหนาแน่นของโฟม
ขณะใช้งาน

ในการทดสอบชิ้นงานแต่ละขนาดและที่ความ หนาแน่นต่างๆ จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง เช่น ท่อ เหล็กกลมขนาด 38.1 mm หนา 1.8 mm ความ หนาแน่นของโฟม 50 kg/m³ จะทดสอบ 3 ชิ้น จากนั้น หาค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง ดังนั้นในการทดสอบจะ ใช้ชิ้นงานทั้งหมด 84 ชิ้น

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบการ กด (Compressive Testing Machine) มีชื่อว่า CHUN YEN Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็น เครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับระบบ Hydraulic ในการควบคุมการทำงาน พร้อมอุปกรณ์ วิเคราะห์ผลและเก็บข้อมูล ซึ่งมีความสามารถทำงาน ได้ถึง 1000 kN และมีระยะกดได้สูงสุด 200 mm สามารถบันทึกผลการทดลองได้ทั้งค่าภาระ (Load) และระยะยุบตัว(Displacement) อย่างละเอียดถึงทุกๆ 0.01 mm ซึ่งถือว่าเป็นความละเอียดที่เพียงพอสำหรับ

การทดสอบแบบแรงกระทำช้าๆ (Quasi-Static) พร้อม
ทั้งแสดงผลเป็นตัวเลขและเขียนกราฟได้ทันที



รูปที่ 4 แสดงเครื่องทดสอบ Compressive Testing
Machine

การทดสอบชิ้นงานเป็นการทดสอบการกดใน
แนวแกนแบบ Quasi-Static ที่ความเร็ว 50 mm/min
ชิ้นงานถูกวางบนเครื่องทดสอบโดยไม่มีอุปกรณ์จับยึด
ฐาน ในการกดจะกำหนดให้ชิ้นงานยุบตัวลงไป 60%
จากความยาวทั้งหมดของชิ้นงานเดิม หรือเท่ากับ 90
mm ระหว่างการทดสอบจะทำการบันทึกค่าภาระและ
ระยะยุบตัวของชิ้นงาน ข้อมูลจากการบันทึกจะนำไป
คำนวณหาค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานแต่ละแบบ
จากนั้นทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับ
พลังงานของชิ้นงานแต่ละขนาดที่ความหนาแน่นต่างๆ

2.3 ตัวชี้วัดในการศึกษา

ตัวชี้วัดที่ใช้ในการศึกษาคือ ค่าพลังงานดูดซับ
(Energy Absorption; E_a) ซึ่งคำนวณได้จากพื้นที่ใต้
กราฟของกราฟภาระและระยะยุบตัว (Load-
Displacement Curve) ตลอดการยุบตัวของโครงสร้าง
หรือ สามารถประมาณได้โดยนำค่าภาระเฉลี่ย
(Mean Load; P_m) คูณกับระยะยุบตัว Stroke; S ของ
โครงสร้างเมื่อเสร็จสิ้นการทดลอง สมการที่ใช้ในการ
คำนวณค่าพลังงานดูดซับแสดงในสมการที่ (1)

$$E_a = \int PdS \approx P_m \cdot S \quad (1)$$

โดยที่ E_a = พลังงานดูดซับ
 P = ภาระที่ระยะเวลาต่างๆ
 S = ระยะยุบตัว
 P_m = ค่าภาระเฉลี่ย

3. ผลการศึกษา

จากการทดสอบการรับแรงกดของท่อเหล็กกลมที่
ไม่เติมโฟม และที่เติมโฟมที่มีการเปลี่ยนแปลงความ
หนาแน่นของโฟมที่ 50,100,150,200,250 และ 300
 kg/m^3 โดยการทดสอบการกดในแนวแกน ผล
การศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรง
กด และพฤติกรรมของท่อเหล็กกลมที่เติมโฟมที่มีการ
เปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมดังกล่าวดัง
รายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ลักษณะการเสียหาย



(ก) ท่อเหล็กกลมขนาด 38.1 mm หนา 2.0 mm
ที่ไม่เติมโฟม

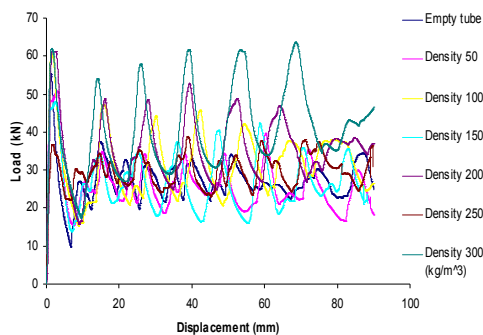


(ข) ท่อเหล็กกลมขนาด 38.1 mm หนา 2.0 mm
ที่เติมโฟมที่ค่าความหนาแน่น 300 kg/m^3

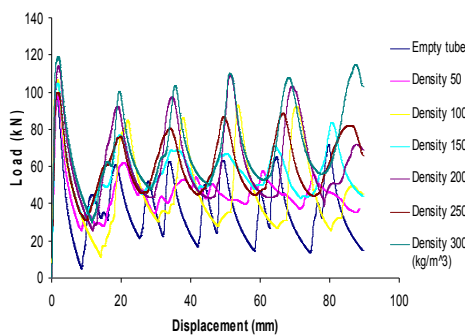
รูปที่ 5 แสดงรูปแบบการเสียหายของท่อเหล็กกลม
ภายใต้การกดในแนวแกน

จากรูปที่ 5 เป็นรูปที่แสดงลำดับการเสียหายของ
ชิ้นงานทั้ง 2 แบบ คือ รูปที่ 5 (ก) ท่อเหล็กกลมขนาด
38.1 mm หนา 2.0 mm ที่ไม่เติมโฟม รูปที่ 5 (ข)
ท่อเหล็กกลมขนาด 38.1 mm หนา 2.0 mm

ที่เติมโพลีที่ค่าความหนาแน่น 300 kg/m^3 ทั้งนี้เป็นการแสดงภาพเพื่อเป็นตัวอย่างเท่านั้น การเสียหายของท่อที่เงื่อนไขอื่น ๆ ก็เป็นลักษณะเดียวกัน โดยในรูปแบบการเสียหาย จะเกิดการยุบตัวในแนวแกนเป็นหลัก เพราะชิ้นงานนี้จะรองรับแรงกดในแนวแกนโดยตรง ในช่วงเริ่มแรกจะเกิดการยุบตัวช้ามาก เนื่องจากเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เกิดการเสียรูป หลังจากนั้นเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นชิ้นงานก็จะเกิดการยุบตัวอย่างเห็นได้ชัดจากพบ 1 ชั้น เป็น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าความเสียหายของชิ้นงานทั้ง 2 แบบจะมีการยุบตัวที่เป็นระเบียบทั้งนี้จะสังเกตเห็นว่าชิ้นงานที่เติมโพลีมีแนวโน้มที่จะมีจำนวนชั้นของการพับตัวน้อยกว่าชิ้นงานเปล่า ซึ่งการเสียหายดังกล่าวเรียกว่าเป็นการเสียหายแบบ Concertina mode จากลักษณะการเสียรูปดังกล่าว เมื่อนำค่าภาระและระยะยุบตัวตลอดการเสียหายมาเขียนเป็นกราฟจะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6



(ก) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 38.1 mm
หนา 1.8 mm



(ข) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8 mm
หนา 1.8 mm

รูปที่ 6 กราฟแสดงภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน

จากรูปที่ 6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงานทั้ง 2 หน้าตัดซึ่งในแต่ละหน้าตัดจะแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะยุบตัวของท่อที่ความหนา 1.8 mm ที่หน้าตัดต่างๆ และที่เติมโพลีที่ความหนาแน่นต่างๆกัน จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นก่อนที่จะกราฟเริ่มเปลี่ยนแปลงความชันนั้นถือเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูป จากนั้นเมื่อชิ้นงานเกิดการเสียรูป กราฟก็จะตกลงมาอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นกราฟก็จะเกิดการแกว่งตัวเป็นรูปคลื่นเนื่องจากการยุบตัว และการต้านของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดการยุบตัว ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่เติมโพลีความหนาแน่น 300 kg/m^3 จะมีการแกว่งตัวของกราฟสูงกว่าท่อที่เติมโพลีด้วยความหนาแน่นต่ำลงมาซึ่งแสดงให้เห็นว่าท่อที่เติมโพลีด้วยความหนาแน่นสูงกว่ามีแนวโน้มทนต่อแรงกดได้ดีมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8 mm จะสามารถทนแรงกดได้มากกว่าชิ้นงานขนาดหน้าตัด 38.1 mm ในทุกๆ กรณี

3.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

ผลการคำนวณค่าการดูดซับพลังงาน (E_a) ของชิ้นงานแต่ละชิ้นแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงค่าพลังงานดูดซับ (kJ) ของชิ้นงานในกรณีต่างๆ

เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)		38.1		50.8	
ความหนา (mm)		1.8	2.0	1.8	2.0
ท่อเหล็กกล่ที่เติมโพลีด้วย ความหนาแน่น (kg/m^3)	0	2.33	4.17	2.39	4.12
	50	2.37	4.20	2.60	4.81
	100	2.39	4.40	2.78	5.12
	150	2.44	4.56	3.04	5.10
	200	2.63	4.69	3.15	5.40
	250	2.67	4.79	3.75	5.73
	300	3.52	4.88	3.87	6.55

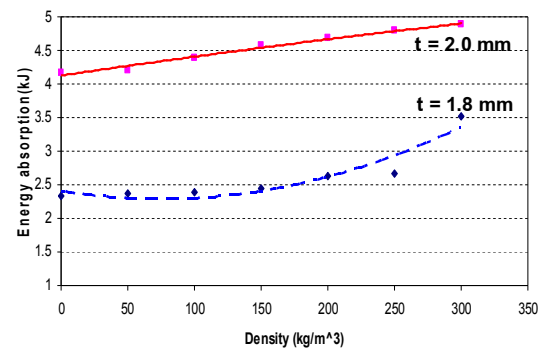
จากตารางที่ 1 เป็นผลการคำนวณค่าพลังงานดูดซับ (kJ) ของชิ้นงานทั้งสองหน้าตัดในกรณีต่างๆ พิจารณาที่ชิ้นงานขนาด 50.8 mm พบว่าชิ้นงานที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่น 300 kg/m^3 สามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้สูงถึง 3.87 kJ ที่ความหนา 1.8 mm และ 6.55 kJ ที่ความหนา 2.0 mm ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานเติมโฟมที่ความหนาแน่น 50,100,150,200 และ 250 kg/m^3 ที่ทุกความหนาของชิ้นงาน ลักษณะกรณีชิ้นงานขนาด 38.1 mm พบว่าชิ้นงานที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่น 300 kg/m^3 สามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้สูงถึง 3.87 kJ ที่ความหนา 1.8 mm และ 6.55 kJ ที่ความหนา 2.0 mm ซึ่งสูงกว่าชิ้นงานเติมโฟมที่ความหนาแน่น 50,100,150,200 และ 250 kg/m^3 ที่ทุกความหนาของชิ้นงาน จากตารางที่ 1 เมื่อนำค่าพลังงานดูดซับของท่อที่เติมโฟมมาเทียบกับท่อที่ไม่เติมโฟมพบว่าท่อที่เติมโฟมสามารถดูดซับพลังงานได้เพิ่มขึ้นในปริมาณที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่าการเพิ่มขึ้น (%) ของค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานในกรณีต่างๆ

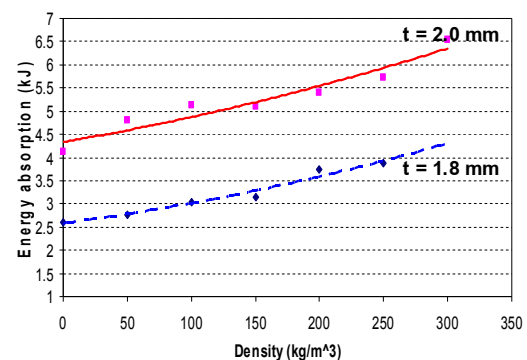
เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)		38.1		50.8	
ความหนา (mm)		1.8	2	1.8	2
ท่อเหล็กกลมที่เติมโฟมด้วย ความหนาแน่น (kg/m^3)	50	1.72	0.72	8.79	16.75
	100	2.58	5.52	16.32	24.27
	150	4.72	9.35	27.20	23.79
	200	12.88	12.47	31.80	31.07
	250	14.59	14.87	56.90	39.08
	300	51.07	17.03	61.92	58.98

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าโครงสร้างที่เติมโฟมจะสามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าโครงสร้างที่ไม่เติมโฟมในทุกกรณี โดยโครงสร้างสามารถดูดซับพลังงานได้เพิ่มขึ้นจากประมาณ

1% ถึง 60% เมื่อเติมโฟมที่ความหนาแน่นสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในกรณีของท่อที่ขนาด 50.8 mm ความหนา 1.8 mm นั้นเมื่อเติมโฟมที่ความหนาแน่น 300 kg/m^3 จะสามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าท่อเปล่าถึง 61.92% ส่วนชิ้นงานขนาด 38.1 mm ความหนา 1.8 mm เมื่อเติมโฟมที่ความหนาแน่น 300 kg/m^3 พบว่าสามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าท่อเปล่าถึง 51.07%



(ก) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 38.1 mm



(ข) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8 mm

รูปที่ 7 แสดงกราฟค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานที่ความหนาแน่นของโฟมต่างๆ

นอกจากนี้หากพิจารณารูปที่ 7 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างที่ความหนาแน่นของโฟมต่าง ๆ กัน จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า ความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นในทุกๆขนาดของท่อ

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่เติมโฟมทุกค่าความหนาแน่นมีแนวโน้มในดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นตามค่าความหนาแน่นของโฟมที่เติมลงในท่อเหล็กกลม โดยที่การเติมโฟม 300 kg/m^3 ลงในชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8 mm และความหนา 1.8 mm สามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่า 61.92% และที่ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 38.1 mm สามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่า 51.07% ดังนั้นการเติมโฟมโพลียูรีเทนลงในโครงสร้างจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของโครงสร้างได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี และสำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดอุบลราชธานีที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องทดสอบการกด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Wang Yong et.al (2003). A study on crashworthiness of mini-car front longitude member by computer simulation, *12th International Pacific Conference on Automotive Engineering*, Bangkok, Thailand.

[2] นิรุต อ่อนสูง และคณะ (2550). การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลองโครงสร้างด้าน ข้างของรถยนต์โดยสารภายใต้การชน, วารสารวิศวกรรม มข, ปีที่ 34, ฉบับที่ 3 ประจำเดือน พฤษภาคม-มิถุนายน, หน้า 343-354.

[3] X.W. Zhang, H. Su and T.X. Yu (2009). Energy absorption of an axially crushed square tube with a buckling initiator, *International Journal of Impact Engineering*. Vol.36, 402-417.

[4] Haipeng Han et al (2007). Quasi-static and dynamic crushing behaviors of aluminum and steel tubes with a cutout, *Thin-Walled structures*, Vol 45, 283-300.

[5] H.R. Zarei, M. Kroger (2008). Bending behavior of empty and foam-filled beams: Structural optimization, *International Journal of Impact Engineering*, Vol 35, 521–529.

[6] H.R. Zarei, M. Kroger (2008). Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application, *Thin-Walled Structures*, Vol 46, 214–221.

[7] M. Guden, H. Kavia (2006). Quasi-static axial compression behavior of constraint hexagonal and square-packed empty and aluminum foam-filled aluminum multi-tube, *Thin-Walled Structures*, Vol 44, 739–750.