

## การศึกษาคุณลักษณะการเสียหายของเหล็กกล่องที่เติมโฟมโพลียูรีเทนภายใต้แรงกด

ปิยะวุฒิ ป້องเพชร<sup>\* 1)</sup> นิรุต อ่อนสลุ<sup>2)</sup> และ ชวลิต ถินวงศ์พิทักษ์<sup>3)</sup>

### บทคัดย่อ

ในโครงสร้างยานยนต์นั้นมักประกอบไปด้วยชิ้นส่วนที่ประกอบขึ้นจากวัสดุหลายชนิด เช่น เหล็กหรืออลูมิเนียม เป็นต้น สำหรับรถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถยนต์โดยสารมักใช้เหล็กกล่องเป็นวัสดุหลักในการประกอบ ในโครงสร้างยานพาหนะโดยทั่วไปมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกหรือเพิ่มความแข็งแรงโดยที่โครงสร้างมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่มากจนเกินไป เพื่อหาวิธีดังกล่าวนี้การเติมโฟมให้กับโครงสร้างก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ตามต้องการ โดยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่มากนัก สำหรับบทความนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมขนาด  $25.4 \times 50.8 \text{ mm}^2$  และ  $50.8 \times 50.8 \text{ mm}^2$  เหล็กแต่ละตัวอย่างมีความหนา 3 ขนาด คือ 1.2, 1.5 และ 1.8 mm ตามลำดับ ในการศึกษาได้นำเหล็กแต่ละความหนาดังกล่าวมาเติมโฟมชนิดโพลียูรีเทนที่ความหนาแน่นโฟมเท่ากับ 50, 100, 150, 200, 250 และ  $300 \text{ kg/m}^3$  โดยนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine ภายใต้การทดสอบการกดในแนวแกนแบบ Quasi - Static โดยใช้ความเร็วในการกด 50 mm/min ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงกดของเหล็กกล่องดังกล่าวภายใต้อิทธิพลการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟม และความหนาของชิ้นงานที่ต่างกัน และยังพบว่าเหล็กกล่องที่ทำการเติมโฟมด้วยความหนาแน่นสูงจะสามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่ามากที่สุดถึง 116.04 %

**คำสำคัญ:** พลังงานดูดซับ, โครงสร้างเติมโฟม, การกดในแนวแกน

<sup>\* 1)</sup> นักศึกษาปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, จังหวัดอุบลราชธานี 34190,  
อีเมล: piyawoot007@hotmail.com

<sup>2)</sup> นักศึกษาปริญญาเอก, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, จังหวัดอุบลราชธานี 34190,  
อีเมล: bignirut@yahoo.com

<sup>3)</sup> ผู้ช่วยศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, จังหวัดอุบลราชธานี 34190,  
อีเมล: Chawalit@rocketmail.com

## The Study on the Crush Characteristic of Polyurethane Foam-filled Rectangular Steel Tubes Under Compressive Load

Piyawoot Pongphet <sup>1)</sup> Nirut Onsalung <sup>2)</sup> and Chawalit Thinwongpituk <sup>3)</sup>

### Abstract

A Vehicle structure is generally built from various materials such as steels and aluminum. In cases of large vehicles, such as a bus, square steel tubes are used for main structural components. Generally, a vehicle structure was targeted to absorb more impact energy without increasing too much weight. In order to meet such requirement, filling foam in the steel tube may be a choice. In this paper, the study on foam-filled in the square tubes to improve its energy absorption capacity was conducted. The study was carried out with a number of 25.4x50.8 mm<sup>2</sup> and 50.8x50.8 mm<sup>2</sup> tubes as experimental specimens. The thickness of tube was varied from 1.2, 1.5 and 1.8 mm. The specimen was filled with polyurethane foam. The density of foam was varied from 50,100,150,200,250 and 300 kg/m<sup>3</sup>. The specimens were, then, tested by quasi-static axial crushing with the universal testing machine. The speed of crushing was 50 mm/min. The experimental results revealed the crush characteristic of steel tubes with various foam densities. It was found that the foam-filled tube can absorb more energy than the empty tube. In the ultimate case, the foam-filled tube with 300 kg/m<sup>3</sup> can absorb higher energy than the empty tube by 116.04 %

**Keywords:** Energy absorption, Foam-filled tube, Axial load

---

<sup>1)</sup> Post graduated Students, Department of Mechanical Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, 34190, E-mail: piyawoot007@hotmail.com

<sup>2)</sup> Post graduated Students, Department of Mechanical Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, 34190, E-mail: bignirut@yahoo.com

<sup>3)</sup> Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Ubonratchathani University, Ubonratchathani, 34190, E-mail: Chawalit@rocketmail.com

## 1. บทนำ

ในโครงสร้างของยานพาหนะไม่ว่าจะเป็นรถยนต์ ส่วนบุคคลหรือรถยนต์โดยสารขนาดใหญ่ นั้นมักจะประกอบขึ้นจากวัสดุชนิดต่างๆ เช่น เหล็กหรืออลูมิเนียม ซึ่งเมื่อเกิดการชนโครงสร้างที่ทำจากวัสดุชนิดดังกล่าวก็จะเกิดความเสียหาย โดยเฉพาะโครงสร้างตัวถังซึ่งเป็นชิ้นส่วนสุดท้ายที่จะมีผลต่อผู้โดยสารเมื่อเกิดการชนสำหรับรถยนต์โดยสารขนาดใหญ่ ซึ่งมีผู้โดยสารเป็นจำนวนมากโครงสร้างตัวถัง หรือโครงสร้างห้องผู้โดยสาร จะประกอบขึ้นจากเหล็กกล่องเป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งเมื่อเกิดการชนก็จะส่งผลกระทบต่อผู้โดยสารที่อยู่ภายใน และจากสาเหตุดังกล่าว จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้าง โดยพยายามศึกษาเพื่อหาวิธีในการเพิ่มความสามารถในการรับแรงจากการชนของโครงสร้างอย่างกว้างขวาง (Zhang *et al.*,2008, Grujicic *et al.*, 2009, Mamalis *et al.*,1996) อย่างไรก็ตามในการเพิ่มความสามารถด้านการชนแก่โครงสร้างนั้นจะต้องไม่ทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นจนเกินไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการประหยัดเชื้อเพลิง ซึ่งวิธีการดังกล่าวได้แก่การใช้ตัวนำการกดของโครงสร้าง (Zhang, Su and Yu.,2009) หรือการตัดบางชิ้นส่วนออก (Haipeng Han *et al.*,2007) เพื่อบังคับรูปแบบการเสียหายให้ได้รูปแบบการดูดซับพลังงานที่ดีขึ้น ส่วนอีกวิธีที่กำลังได้รับความนิยมคือ เทคนิคการเติมโฟมชนิดต่างๆ ลงในโครงสร้าง เนื่องจากการเติมโฟมโลหะลงในโครงสร้าง สามารถช่วยลดความหนาและน้ำหนักของโครงสร้างได้ดี (Hanssen *et al.*,2000, Hanssen *et al.*,2000) นอกจากนี้ยังมีรายงานของ Zarei และคณะ (Zarei, and Kroger.,2008) ที่พบว่า การเติมโฟมอลูมิเนียม สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดในแนวแกนของท่ออลูมิเนียมได้ถึง 91.1% นอกจากนี้ยังพบว่า การศึกษาส่วนใหญ่ในต่างประเทศนิยมใช้อลูมิเนียมโฟม ซึ่งเป็นโฟมโลหะที่มีราคาสูงในการวิจัย (Santosa *et al.*, 2000, Seitzberger *et al.*,2000) โดยมีการทำการศึกษาทั้งในแง่ความเร็วคงที่ (Chen and Wierzbiccki.,2001) และความเร็วสูง (Rajendran, Moorthi and Basu.,2009,

Gupta *et al.*,2007) ด้วย

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการเติมโฟมลงในโครงสร้างเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกดเช่นกัน แต่ได้เลือกใช้โฟมชนิดโพลียูรีเทนโฟม ซึ่งเป็นโฟมที่หาง่าย และมีใช้ในอุตสาหกรรมการต่อรถโดยสารอยู่แล้ว โดยส่วนใหญ่ใช้ในการดูดซับเสียง และจัดเก็บสายไฟในโครงสร้าง โฟมโพลียูรีเทนนั้นมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีน้ำหนักเบา ไม่ลามไฟเมื่อเกิดอุบัติเหตุอายุการใช้งานนาน และมีความเป็นฉนวนความร้อนอีกด้วย

## 2. ชิ้นงานทดลองและวิธีการศึกษา

### 2.1 การจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ

โฟมที่ใช้ในการศึกษาคือ โพลียูรีเทนโฟมชนิดแข็ง (Rigid Polyurethane Foam) มีคุณสมบัติเด่นคือ เป็นฉนวนที่ติดไฟแต่ไม่ลามไฟ ไม่มีสารระคายเคือง หรือสารที่ทำให้เกิดอาการแพ้ มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง มีประสิทธิภาพ สามารถใช้งานได้ในอุณหภูมิระหว่าง -70 ถึง 100 °C มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปีโดยไม่ต้องบำรุงรักษาแต่อย่างใดและไม่มีการเสียรูป ซึ่งคุณสมบัติทางกลของโฟมที่ได้จากการทดสอบ Uniaxial Test ภายใต้การขยายตัวของโฟมในที่โล่งมีดังนี้ คือ  $E = 260 \text{ MN/m}^2$ ,  $\nu = 0.02$ ,  $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$  โฟมชนิดนี้เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิด คือ ชนิดที่ 1 มีสีเหลืองคล้ายโพลีเอสเตอร์เรซิน เรียกว่า โฟมขาวหรือ โพลียอล (Polyol) ชนิดที่ 2 มีสีน้ำตาลไหม้เกือบดำ ซึ่งเรียกว่าโฟมดำหรือ ไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการให้กำเนิดโฟมจะนำเอาของเหลวทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากันจึงจะเกิดการขยายตัว อัตราส่วนการขยายตัวในที่โล่งเท่ากับ 1:27 เท่า ในการศึกษาที่กำหนดให้ความหนาแน่นของโฟมในเหล็กกล่องมีทั้ง หก ค่าความหนาแน่น คือ 50,100,150,200,250 และ 300  $\text{kg/m}^3$  การเติมโฟมลงในเหล็กกล่องจะใช้กระบอกฉีดยาดูดสารทั้ง 2 ชนิดในปริมาตรตามค่าความหนาแน่นที่ต้องการแล้วเติมลงในเหล็กกล่องที่เตรียมไว้ จากนั้นกวนให้เข้ากันแล้วนำไปติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมความหนาแน่นดังแสดงใน

รูปที่ 2 เพื่อบังคับให้ความหนาแน่นของโฟมให้เป็นไปตามต้องการ

เหล็กกล่องที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กชนิด AISI 1020 ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลที่ได้จากการทดสอบ Tensile Test ได้แก่ ค่าความหนาแน่น ( $\rho$ )=7800 kg/m<sup>3</sup>, Elastic(E) =200 GN/m<sup>2</sup>, Poisson Ratio ( $\nu$ )=0.27 และ Yield Strength( $\sigma_y$ ) =295 MN/m<sup>2</sup> เป็นเหล็กกล่องที่มีหน้าตัดขนาด 25.4x50.8 mm<sup>2</sup> และ 50.8x50.8 mm<sup>2</sup> ซึ่งเป็นขนาดของเหล็กกล่องที่ใช้ในการสร้างตัวรถโดยสารทั่วไป ชิ้นงานแต่ละตัวอย่างมีความหนา 3 ขนาด คือ 1.2, 1.5 และ 1.8 mm ตามลำดับ การขึ้นรูปชิ้นงานจะตัดเหล็กให้มีความสูงเริ่มต้น 200 mm และหลังจากเติมโฟมที่มีความหนาแน่นต่างๆ แล้วจะตัดชิ้นงานให้มีความยาวลดลงเหลือ 150 mm เท่ากันทุกชิ้นเพื่อให้ได้แท่งเหล็กที่มีโฟมกระจายสม่ำเสมอ



รูปที่ 1 แสดงการเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์เติมโฟม



รูปที่ 2 แสดงอุปกรณ์ควบคุมความหนาแน่นของโฟมขณะใช้งาน

ในการทดสอบชิ้นงานแต่ละขนาดและที่ความหนาแน่นต่างๆ จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง จากนั้นหา

ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง ดังนั้นในการทดสอบจะใช้ชิ้นงานทั้งหมดจำนวน 126 ชิ้น

## 2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่องทดสอบการกด (Compressive Testing Machine) มีชื่อว่า CHUN YEN Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับระบบไฮดรอลิกส์ในการควบคุมการทำงาน พร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ผลและเก็บข้อมูล ซึ่งมีความสามารถทำงานได้ถึง 1000 kN และมีระยะกดได้สูงสุด 200 mm สามารถบันทึกผลการทดลองได้ทั้งค่าภาระ (Load) และระยะยุบตัวอย่างละเอียดถึงทุกๆ 0.01 mm ของระยะกด ซึ่งถือว่าเป็นความละเอียดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบแบบแรงกระทำช้าๆ (Quasi-Static) พร้อมทั้งแสดงผลเป็นตัวเลขและเขียนกราฟได้ทันที



รูปที่ 3 แสดงเครื่องทดสอบ Compressive Testing Machine ที่ใช้ในการศึกษา

การทดสอบชิ้นงานเป็นการทดสอบการกดในแนวแกนแบบ Quasi-Static ที่ความเร็ว 50 mm/min ชิ้นงานถูกวางบนเครื่องทดสอบโดยไม่มีอุปกรณ์จับยึดฐาน ในการทดลองจะกดให้ชิ้นงานยุบตัวไป 60% ของความยาวเดิม หรือเท่ากับ 90 mm ระหว่างการทดสอบจะทำการบันทึกค่าภาระและระยะยุบตัวของชิ้นงาน ข้อมูลจากการบันทึกจะนำไปคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับที่ชิ้นงานแต่ละแบบสามารถดูดซับได้ จากนั้นทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานแต่ละขนาดที่ความหนาแน่นของโฟมต่างๆ

### 2.3 ตัวแปรที่พิจารณา

โดยทั่วไปการคำนวณหาตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับความสามารถด้านการชนของโครงสร้าง มักศึกษาจากลักษณะของกราฟภาระและระยะยุบตัวของชิ้นงาน ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญหลายตัว สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาตัวแปรหลักที่สำคัญ ได้แก่ ค่าการดูดซับพลังงาน ( $E_a$ ) หมายถึงค่าพลังงานจากการชน ที่โครงสร้างสามารถดูดซับไว้ได้ในขณะเกิดการเสียรูป ซึ่งใช้เป็นตัวชี้วัดระดับความสามารถในการรับแรงกระแทก หรือแรงชนของโครงสร้าง ค่าการดูดซับพลังงานสามารถคำนวณได้จากสมการที่(1)

$$E_a = \int PdS \approx P_{mean} \cdot S \quad (1)$$

โดยที่  $E_a$  คือค่าการดูดซับพลังงาน,  $P_{mean}$  คือค่าภาระเฉลี่ย,  $S$  คือค่าระยะการยุบตัว,  $P$  คือค่าภาระตลอดการยุบตัว

## 3. ผลการศึกษา

### 3.1 ลักษณะการเสียหายของโครงสร้าง

เป็นที่ทราบกันว่า รูปแบบการเสียหายของโครงสร้าง มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการรับแรงกดของโครงสร้าง ดังนั้นการศึกษาลักษณะการเสียหายของโครงสร้างจึงเป็นสิ่งจำเป็น สำหรับลักษณะการเสียหายของเหล็กกล่องเปล่าและเหล็กกล่องที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่นต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1 และ 2 สำหรับเหล็กที่มีหน้าตัด  $25.4 \times 50.8 \text{ mm}^2$  และเหล็กที่มีหน้าตัด  $50.8 \times 50.8 \text{ mm}^2$  ตามลำดับ จากตารางจะสังเกตเห็นว่า ชิ้นงานทั้งหมดเสียหายโดยการสร้างรอยพับที่เป็นระเบียบทับกันไปมาเป็นชั้นๆ ซึ่งรูปแบบการเสียหายแบบนี้เรียกว่า การเสียหายแบบ Squar Mode นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่า จำนวนชั้นของรอยพับมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อโครงสร้างมีการเติมโฟมที่ความหนาแน่นมากขึ้น
















### 3.2 ลักษณะแรงปฏิกิริยาของชิ้นงานตลอดการเสียหาย

ในระหว่างการทดลองได้ทำการบันทึกค่าแรงปฏิกิริยาและระยะยุบตัวของโครงสร้างเพื่อประกอบการพิจารณาและประกอบการคำนวณโดยรูปที่ 4 เป็นกราฟ

ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงานทั้ง 2 ขนาดหน้าตัดที่ได้จากการทดสอบ จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงแรกแรงปฏิกิริยาในโครงสร้างจะสูงมากในทุกๆ ชิ้นงาน ซึ่งแรงในจุดนี้เรียกว่า ภาวะวิกฤติ และหลังจากที่โครงสร้างเสียรูปแล้วเส้นกราฟนี้จะตกลงมาอย่างรวดเร็วเนื่องจากโครงสร้างเกิดการยุบตัวครั้งแรก และต่อจากนั้นเส้นกราฟจะแกว่งตัวเนื่องจากแรงกด และแรงต้านที่เกิดภายในชิ้นงานจนเกิดกราฟขึ้นลงเป็นรูปคลื่นจนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นลักษณะทั่วไปของกราฟที่ได้จากการทดสอบการกดในแนวแกน ผลจากการกดชิ้นงานดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างกัน ของเส้นกราฟที่เกิดจากความหนาแน่นของโฟม ที่เติมลงในท่อเหล็กที่มีความหนาแน่นต่างกัน ซึ่งพบว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่นของโฟมที่  $300 \text{ kg/m}^3$  สามารถทนแรงกดได้มากกว่าชิ้นงานอื่นๆทั้งหมด นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานขนาดหน้าตัด  $50.8 \times 50.8 \text{ mm}^2$  จะสามารถทนแรงกดได้มากกว่าชิ้นงานขนาดหน้าตัด  $25.4 \times 50.8 \text{ mm}^2$  ในทุกๆ กรณี

จากกราฟของภาระและระยะยุบตัวดังกล่าว ได้นำไปคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับ ( $E_a$ ) โดยใช้สมการที่ (1) และได้ผลการคำนวณดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะอภิปรายในหัวข้อถัดไป

**ตารางที่ 1** แสดงตัวอย่างการเสียหายของชิ้นงานขนาดหน้าตัด  $25.4 \times 50.8 \text{ mm}^2$  ภายใต้การกดในแนวแกน

ความหนา(mm)	1.2	1.5	1.8	
เหล็กเปล่า				
เหล็กกล่องที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่น	50			
	100			
	150			
	200			



3.3 คุณลักษณะการดูดซับพลังงาน

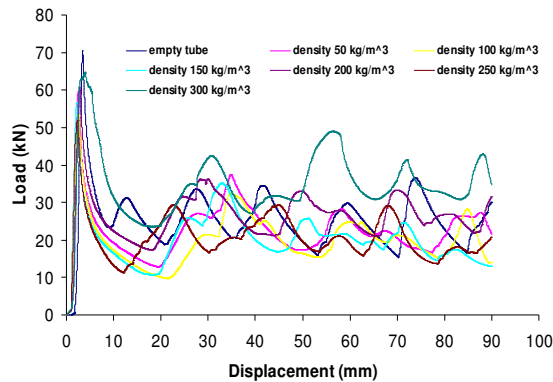
จากตารางที่ 3 เป็นผลการคำนวณของค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานแต่ละชิ้น และตารางที่ 4 คือค่าการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานในกรณีต่างๆ สำหรับชิ้นงานทั้ง 2 หน้าตัด ผลการศึกษาพบว่าในการทดสอบชิ้นงานภายใต้ภาวะแบบกดในแนวแกน พิจารณาที่ชิ้นงานหน้าตัดขนาด 25.4x50.8 mm<sup>2</sup> พบว่าชิ้นงานที่เติมโฟมที่มีความหนาแน่น 300 kg/m<sup>3</sup> สามารถดูดซับพลังงานได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่เติมโฟม และชิ้นงานที่เติมโฟมที่มีความหนาแน่น 50,100,150,200 และ 250 kg/m<sup>3</sup> ที่ทุกความหนาของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่มีความหนา 1.8 mm สามารถดูดซับพลังงานได้สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเหล็กเปล่า นอกจากนี้พบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 1.2 mm สามารถดูดซับพลังงานได้เพิ่มขึ้นมากที่สุดเท่ากับ 96.0% ที่ความหนาแน่นของโฟม 250 kg/m<sup>3</sup>

ตารางที่ 2 แสดงตัวอย่างการเสียหายของชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8x50.8 mm<sup>2</sup> ภายใต้การกดในแนวแกน

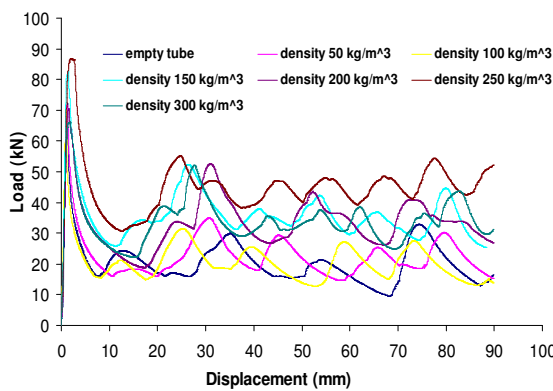
ความหนา(mm)	1.2	1.5	1.8
เหล็กเปล่า			
เหล็กกล่องที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	50		
	100		
	150		
	200		
	250		



พิจารณาชิ้นงานที่หน้าตัดขนาด 50.8x50.8 mm<sup>2</sup> พบว่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานมีแนวโน้มคล้ายกับในกรณีของชิ้นงานขนาดหน้าตัด 25.4x50.8 mm<sup>2</sup> คือชิ้นงานที่เติมโฟมที่มีความหนาแน่น 300 kg/m<sup>3</sup> สามารถดูดซับพลังงานดีที่สุดและมากกว่าชิ้นงานที่ไม่เติมโฟมและที่เติมโฟมทุกความหนาแน่น โดยชิ้นงานที่มีความหนา 1.8 mm สามารถดูดซับพลังงานได้สูงที่สุดและเมื่อเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานกับเหล็กเปล่าพบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 1.2 mm สามารถดูดซับพลังงานได้เพิ่มขึ้นมากที่สุดเท่ากับ 116.04% ที่ความหนาแน่นของโฟม 300 kg/m<sup>3</sup>



(ก) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 25.4x50.8 mm<sup>2</sup>

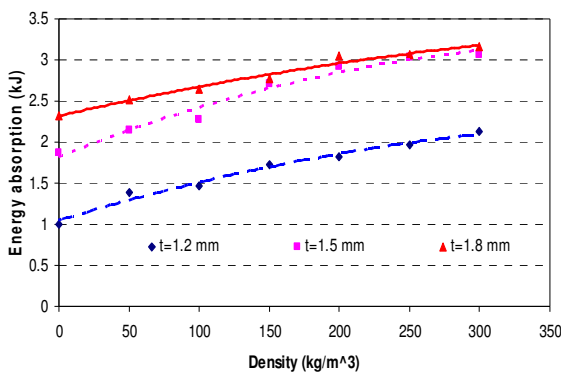


(ข) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8x50.8 mm<sup>2</sup>

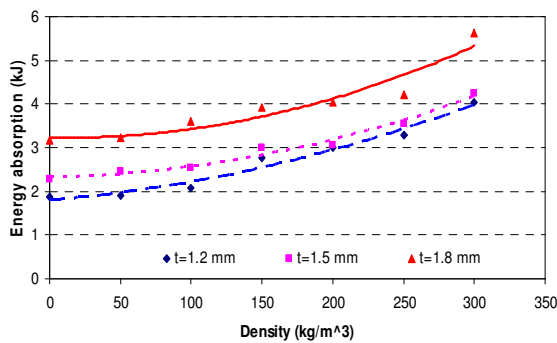
รูปที่ 4 กราฟแสดงการกระแทกกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน

จากผลการทดลองในตารางที่ 3 ได้นำมาเขียนเป็นกราฟเปรียบเทียบค่าพลังงานดูดซับและค่าความหนาแน่น

ของโฟม ที่เติมลงในเหล็กกล่องด้วยความหนาแน่นต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5 จากกราฟจะเห็นว่าแนวโน้มของข้อมูลสำหรับเหล็กกล่องทั้ง 2 หน้าตัดเป็นไปในทางเดียวกัน พบว่า โครงสร้างที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะสามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้มากกว่า เนื่องจากมีปริมาณโลหะมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่นสูงกว่า จะมีแนวโน้มดูดซับพลังงานเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากโฟมที่มีความหนาแน่นสูงมีส่วนช่วยรับแรงกดกระแทกไว้ได้



(ก) ชิ้นงานหน้าตัด 25.4x50.8 mm<sup>2</sup>



(ข) ชิ้นงานหน้าตัด 50.8x50.8 mm<sup>2</sup>

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ของค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างและความหนาแน่นของโฟมที่เติม

ตารางที่ 3 แสดงค่าพลังงานดูดซับ (Ea,kJ) ของชิ้นงานในกรณีต่างๆ

หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	25.4x50.8			50.8x50.8			
ความหนา (mm)	1.2	1.5	1.8	1.2	1.5	1.8	
เหล็กเปล่า	1.00	1.87	2.33	1.87	2.28	3.16	
เหล็กกล่องที่เติมโฟมด้วย ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	50	1.38	2.14	2.52	1.89	2.46	3.22
	100	1.47	2.27	2.64	2.07	2.54	3.16
	150	1.82	2.70	2.77	2.77	2.99	3.91
	200	1.83	2.99	3.05	3.00	3.07	4.03
	250	1.66	3.03	3.07	3.28	3.55	4.21
	300	1.73	3.07	3.16	4.04	4.24	5.61

ตารางที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบค่าการเพิ่มขึ้น (%) ของค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานในกรณีต่างๆ

หน้าตัด (mm <sup>2</sup> )	25.4x50.8			50.8x50.8			
ความหนา (mm)	1.2	1.5	1.8	1.2	1.5	1.8	
เหล็กกล่องที่เติมโฟมด้วย ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )	50	38.0	14.44	8.15	1.07	7.89	1.90
	100	47.00	21.39	13.30	10.70	11.40	14.24
	150	72.00	44.39	18.88	48.13	31.14	23.73
	200	83.00	56.15	30.90	60.43	34.65	27.53
	250	96.00	62.03	31.76	75.40	55.70	33.23
	300	62.03	64.17	34.65	116.04	85.96	77.53

#### 4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่เติมโฟมที่มีความหนาแน่น 300 kg/m<sup>3</sup> สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าเหล็กเปล่าและเหล็กที่เติมโฟมที่มีความหนาแน่น 50,100,150,200 และ 250 kg/m<sup>3</sup> โดยพิจารณาที่หน้าตัด 25.4x50.8 mm<sup>2</sup> พบว่าความหนาแน่นของโฟมที่ 300 kg/m<sup>3</sup> สามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่า 96.0 % และที่หน้าตัด 50.8x50.8 mm<sup>2</sup> สามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่า 116.04% นอกจากนี้ยังพบว่าที่ความหนาของชิ้นงานต่ำๆ อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าพลังงานดูดซับของชิ้นงานก็จะยิ่งสูงเนื่องจากอิทธิพลของความหนาน้อยลง ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการเติมโฟมโพลียูรีเทนลงในโครงสร้างจะสามารถช่วยให้โครงสร้างสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณสำนักงานโยธาธิการและผังเมือง จังหวัดอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องทดสอบการกด และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- A.G. Hanssen et al. (2000). Static and dynamic crushing of square aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 24, No. 4, 347–83.
- A.G. Hanssen et al. (2000). Static and dynamic crushing of circular aluminium extrusions with aluminium foam filler. *International Journal of Impact Engineering*. Vol. 24, No. 5, 475–507.
- A.G. Mamalis et al. (1996). The static and dynamic axial collapse of fiberglass composite automotive frame rails. *Composite Structure*. Vol.34, 77-90.
- Chen W, Wierzbicki T. (2001). Relative merits of single-cell, multi-cell and foam-filled thin-walled structures in energy absorption. *Thin-Walled Structures*. Vol.39, 287–306.
- 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.
- H.R. Zarei, M. Kroger. (2008). Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application. *International Journal of Impact Engineering*. Vol 35, 521–529.
- M. Grujicic et al. (2009). Seat-cushion and soft-tissue material modeling and a finite element investigation of the seating comfort for passenger-vehicle occupants. *Materials and Design*. Vol.30, 4273–4285.
- M. Seitzberger et al. (2000). Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam. *International Journal of Solids and Structures*. Vol.37, pp. 509-534.
- N.K. Gupta et al. (2007). Experimental and numerical investigations into collapse behavior of thin spherical shells under drop hammer impact. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 44, 3136-3155.
- R. Rajendran, A. Moorthi and S. Basu. (2009). Numerical simulation of drop weight impact behavior of closed cell aluminium foam. *International Journal Materials and Design*. Vol. 30, 2823–2830.
- S. P. Santosa et al. (2000). Experimental and numerical studies of foam-filled sections. *International Journal of Impact Engineering*. Vol.31, 509-534.
- 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.
- X. Zhang et al. (2008). Improved design of the main energy-absorbing automotive parts based on traffic accident analysis. *Materials and Design*. Vol.29, 403-410.