

**อิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมต่อความสามารถในการรับแรงกด
ของเหล็กกล่องที่เติมโฟม**

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

ปิยะวุฒิ ป້องเพชร*, 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

ในโครงสร้างยานยนต์นั้นมักประกอบไปด้วยโครงสร้างชิ้นส่วนที่ประกอบขึ้นจากวัสดุหลายชนิด เช่น เหล็ก หรืออลูมิเนียมเป็นต้น สำหรับรถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถยนต์โดยสารมักใช้เหล็กกล่องเป็นวัสดุหลัก ในโครงสร้างยานพาหนะโดยทั่วไปมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกหรือเพิ่มความแข็งแรง โดยที่โครงสร้างมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นไม่มากจนเกินไป เพื่อหาวิธีดังกล่าวนั้นการเติมโฟมให้กับโครงสร้างก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงได้ตามต้องการโดยมีน้ำหนักไม่มากนัก ในบทความนี้ได้มีการศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นของโฟมที่เติมในท่อเหล็ก เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานของเหล็กกล่อง ซึ่งในการทดสอบได้นำเอาเหล็กกล่องตัวอย่าง 2 ขนาดคือ 25.4x50.8 mm และ 50.8x50.8 mm เหล็กแต่ละตัวอย่างมีความหนา 3 ขนาดคือ 1.2, 1.5 และ 1.8 mm ตามลำดับ จากนั้นนำเหล็กแต่ละความหนาดังกล่าวมาเติมโฟมชนิดโพลียูรีเทนที่ ความหนาแน่น 100, 200 และ 300 kg/m³ และนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ Compressive Testing Machine โดยการทดสอบการกดในแนวแกนแบบ Quasi - Static โดยใช้ความเร็วในการกด 50 mm/min ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงกดของเหล็กกล่อง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมดังกล่าวและยังพบว่าเหล็กกล่องที่ทำการเติมโฟมด้วยความหนาแน่นสูงจะสามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่า ในกรณีที่โครงสร้างสามารถดูดซับพลังงานได้สูงสุดการเติมโฟมที่ 300 kg/m³ จะช่วยให้โครงสร้างสามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่าถึง 64.19%

คำหลัก: พลังงานดูดซับ, การเติมโฟม, การกดในแนวแกน

Abstract

Vehicle structure is generally built from various materials such as steels and aluminum. In case of large vehicle, such as bus, square steel tubes are used for main structural components. Generally, vehicle structure is targeted to absorb more impact energy without increasing too much weight. In order to meet that requirement, filling foam in the steel tube may be a choice. In this paper, the study on foam-

filled in the square tube to improve their energy absorption capacity is conducted. The study is conducted with a number of 25.4x50.8 mm and 50.8x50.8 mm tubes as experimental specimens. The thickness of tube is varied from 1.2, 1.5 and 1.8 mm. The specimen is filled with polyurethane foam. The density of foam is varied from 100, 200 and 300 kg/m³. The specimens are, then, tested by quasi-static axial crushing with the universal testing machine. The speed of crushing is 50 mm/min. The experimental results reveal the crush characteristic of steel tube with various foam densities. It is 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/m³ can absorb higher energy than the empty tube by 64.19%.

Keywords: Energy absorption, Foam-Filled, Axial crushing

1. บทนำ

เนื่องจากยานพาหนะนั้นจะต้องมีโครงสร้างที่แข็งแรงรับแรงกระแทกได้ดีสามารถป้องกันห้องผู้โดยสารได้เมื่อเกิดอุบัติเหตุ จึงมีการศึกษามากมายเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทกของโครงสร้าง เช่นการศึกษาการชนด้านหน้ารถยนต์ที่รับแรงกระแทกในแนวแกน [1] การศึกษาแนวทางการเพิ่มความหนาที่เหมาะสมและรูปแบบการยึดต่อโครงสร้างที่เหมาะสม [2] ตลอดจนการยึดฐานที่เหมาะสม [3, 4] แต่วิธีการที่กล่าวมาล้วนทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักมากขึ้นทั้งสิ้น จึงมีการนำแนวคิดการเติมโฟมลงในโครงสร้าง ซึ่งจากการศึกษาของ Zarei HR, Kroger M. [5] พบว่าการเติมโฟมลงในท่ออลูมิเนียมสามารถดูดซับพลังงานจากการทดสอบการกดในแนวแกนได้เพิ่มขึ้น 91.1% และดูดซับพลังงานจากการทดสอบการกดด้านในแนวนอนได้เพิ่มขึ้น 28% [6] และผลการศึกษาของ M. Guden, H. Kavia พบว่าการเติมโฟมลงในท่อเปล่าสามารถรับแรงกดได้สูงกว่าท่อเปล่าและโฟมเปล่า [7]

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการเติมโฟมลงในเหล็กกล่องนั้นจะสามารถเพิ่มความสามารถในดูดซับพลังงานของโครงสร้างได้มากน้อยเพียงใด โดยในการศึกษาจะใช้วิธีการทดลองเป็นหลัก และใช้ค่าพลังงานดูดซับเป็นตัวชี้วัดหลักในการศึกษา

2. ชิงงานทดลองและวิธีการศึกษา

2.1 การจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ

โฟมที่ใช้ในการศึกษาคือ โพลียูรีเทนโฟมชนิดแข็ง (Rigid Polyurethane Foam) มีคุณสมบัติเด่นคือ เป็นฉนวนที่ติดไฟแต่ไม่ลามไฟ ไม่มีสารละลายเคือง หรือสารที่ทำให้เกิดอาการแพ้ มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง มีประสิทธิภาพ สามารถ ใช้งานได้ในอุณหภูมิ ระหว่าง -70 ถึง 100 °C มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปีโดยไม่ต้องบำรุงรักษาแต่อย่างใด และไม่มีการเสีรูปร่าง โฟมชนิดนี้เกิดจากการผสมกันของของเหลว 2 ชนิด คือ ชนิดที่ 1 มีสีเหลืองคล้ายโพลีเอสเตอร์เรซิน เรียกว่า โฟมขาวหรือ โพลีอล (Polyol) ชนิดที่ 2 มีสีน้ำตาลไหม้เกือบดำ ซึ่งเรียกว่าโฟมดำหรือไดไอโซไซยาเนต (Diisocyanate) ดังแสดงในรูปที่ 1 ในการให้กำเนิดโฟมจะนำเอาของเหลวทั้ง 2 ชนิดมาผสมกันในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร แล้วคนให้เข้ากันจึงจะเกิดการขยายตัว อัตราส่วนการขยายตัวในที่โล่งเท่ากับ 1:27 เท่า ความหนาแน่นของโฟมในเหล็กกล่องมีทั้งหมด 3 ค่าความหนาแน่น คือ 100 kg/m³, 200 kg/m³ และ 300 kg/m³ การเติมโฟมลงในเหล็กกล่องจะใช้กระบอกฉีดยาดูดสารทั้ง 2 ชนิดในปริมาตรตามค่าความหนาแน่นที่ต้องการแล้วเติมลงในเหล็กกล่องที่เตรียมไว้ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นใช้อุปกรณ์ควบคุมความหนาแน่นดังแสดงในรูปที่ 3 ปิดเพื่อบังคับให้ความหนาแน่นของโฟมเป็นไปตามต้องการ

เหล็กที่ใช้ในการทดลองเป็นเหล็กชนิด AISI 1020 เป็นเหล็กกล่องที่มีหน้าตัดขนาด 25.4x50.8 mm และ 50.8x50.8 mm โดยแต่ละตัวอย่างมีความหนา 3 ขนาด คือ 1.2, 1.5 และ 1.8 mm ตามลำดับ การขึ้น

รูปชิ้นงานจะตัดเหล็กให้มีความสูงเริ่มต้นที่ 200 mm และหลังจากเติมโฟมที่ความหนาแน่นต่างๆ แล้วจะตัดชิ้นงานให้มีความยาว 150 mm เท่ากันทุกชิ้น



รูปที่ 1 แสดงของเหลว 2 ชนิด โพลีออลและไดไอโซไซยาเนต ซึ่งผสมกันแล้วจะได้เป็นโพลียูรีเทนโฟม



รูปที่ 2 แสดงการเตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์เติมโฟม



รูปที่ 3 แสดงอุปกรณ์ควบคุมความหนาแน่นของโฟมขณะใช้งาน

ในการทดสอบชิ้นงานแต่ละขนาดและที่ความหนาแน่นต่างๆ จะทำการทดสอบ 3 ครั้ง เช่น เหล็กกล่องขนาด 25.4x50.8 mm หนา 1.2 mm ความหนาแน่น 100 kg/m³ จะทดสอบ 3 ครั้ง จากนั้นหา

ค่าเฉลี่ยของผลการทดลอง ดังนั้นในการทดสอบจะใช้ชิ้นงานทั้งหมด 72 ชิ้น

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้ เครื่องทดสอบการกด (Compressive Testing Machine) มีชื่อว่า CHUN YEN Testing Machine ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นเครื่องทดสอบที่ใช้ระบบคอมพิวเตอร์กับระบบ Hydraulic ในการควบคุมการทำงาน พร้อมอุปกรณ์วิเคราะห์ผลและเก็บข้อมูล ซึ่งมีความสามารถทำงานได้ถึง 1000 kN และมีระยะกดได้สูงสุด 200 mm สามารถบันทึกผลการทดลอง ได้ทั้งค่า ภาระ (Load) และระยะยุบตัวอย่างละเอียดถึงทุกๆ 0.01 mm ของระยะกด ซึ่งถือว่าเป็นความละเอียดที่เพียงพอสำหรับการทดสอบแบบแรงกระทำช้าๆ (Quasi-Static) พร้อมทั้งแสดงผลเป็นตัวเลขและเขียนกราฟได้ทันที



รูปที่ 4 แสดงเครื่องทดสอบ Compressive Testing Machine

การทดสอบชิ้นงานเป็นการทดสอบการกดในแนวแกนแบบ Quasi-Static ที่ความเร็ว 50 mm/min ชิ้นงานถูกวางบนเครื่องทดสอบโดยไม่มีอุปกรณ์จับยึดฐาน ในการกดจะกำหนดให้ชิ้นงานยุบ 60% จากความยาวทั้งหมดของชิ้นงาน เดิม หรือเท่ากับ 90 mm ระหว่างการทดสอบจะทำการบันทึกค่าภาระและระยะยุบตัวของชิ้นงาน ข้อมูลจากการบันทึกจะนำไปคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับที่ชิ้นงานแต่ละแบบสามารถดูดซับได้ จากนั้นทำการเปรียบเทียบ

ความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานแต่ละขนาดที่ความหนาแน่นต่าง ๆ

3. ผลการศึกษา

จากการทดสอบการรับแรงกดของเหล็กกล่องที่ไม่เติมโฟมและเหล็กกล่องที่เติมโฟมที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมที่ 100 kg/m^3 , 200 kg/m^3 และ 300 kg/m^3 โดยการทดสอบการกดในแนวแกน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการรับแรงกดและพฤติกรรมของเหล็กกล่องที่เติมโฟมที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโฟมดังกล่าว ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 ลักษณะการเสียหาย



(ก) เหล็กกล่องที่เติมโฟม

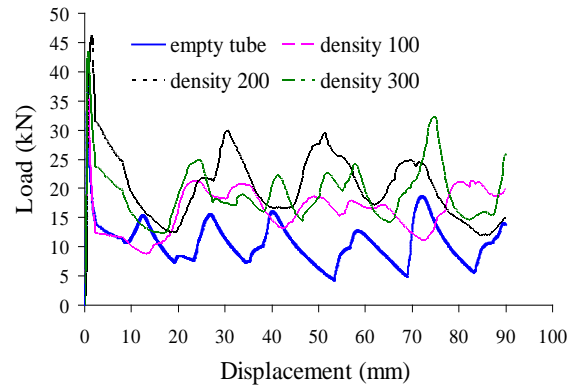


(ข) เหล็กกล่องเปล่า

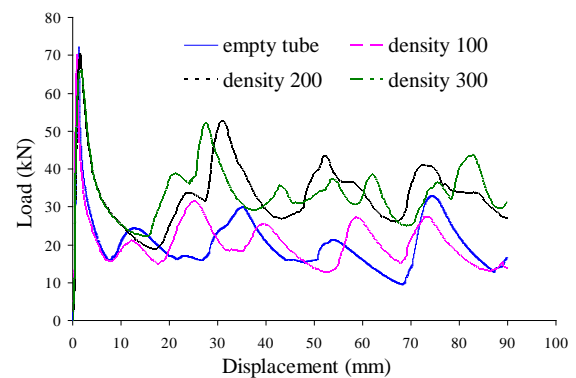
รูปที่ 5 แสดงรูปแบบการเสียหายของเหล็กกล่องภายใต้การกดในแนวแกน

จากรูปที่ 5 เป็นรูปที่แสดงลำดับการเสียหายของชิ้นงานทั้ง 2 แบบ คือ รูปที่ 5 (ก) เหล็กกล่องที่เติมโฟม รูปที่ 5 (ข) เหล็กกล่องเปล่า โดยในรูปแบบการเสียหายจะเกิดการยุบตัวในแนวแกนเป็นหลักเพราะชิ้นงานนี้จะรองรับแรงกดในแนวแกนโดยตรง ในช่วงเริ่มแรกจะเกิดการยุบตัวช้ามากเนื่องจากเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เกิดการเสียรูป หลังจากนั้นเมื่อแรงกดเพิ่มขึ้นชิ้นงานก็จะเกิดการยุบตัวอย่างเห็นได้ชัดจากพับ 1 ชั้น เป็น 2 ชั้น และ 3 ชั้นตามลำดับ ซึ่งจะเห็น

ว่าการเสียหายของชิ้นงานทั้ง 2 แบบจะมีการยุบตัวที่เป็นระเบียบ ซึ่งการเสียหายดังกล่าวเรียกว่าเป็นการเสียหายแบบ Square mode จากลักษณะการเสียรูปดังกล่าว เมื่อนำค่าภาระและระยะยุบตัวมาเขียนเป็นกราฟจะให้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6



(ก) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 25.4x50.8 mm



(ข) ชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8x50.8 mm

รูปที่ 6 กราฟแสดงภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงาน

จากรูปที่ 6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะยุบตัวของชิ้นงานทั้ง 2 แบบที่ได้จากการทดสอบเพื่อหาค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงานแต่ละแบบ โดยในแกนตั้งเป็นค่าของภาระและในแกนนอนเป็นค่าระยะยุบตัวของชิ้นงานจากเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการยุบตัว จากกราฟจะเห็นว่าในช่วงเริ่มต้นก่อนที่กราฟเริ่มเปลี่ยนแปลงความชันนั้นถือเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังไม่เสียรูป จากนั้นเมื่อชิ้นงานเกิดการเสียรูป กราฟก็จะตกลงมาอย่างรวดเร็ว ต่อจากนั้นกราฟก็จะเกิดการแกว่งตัวเป็นรูปคลื่นเนื่องจากการยุบตัวและการต้านของชิ้นงานอย่างต่อเนื่องจนถึงสิ้นสุดการยุบตัว ซึ่งพบว่า

ชิ้นงานที่มีความหนาแน่น 300 kg/m³ สามารถทนแรงกดได้มากกว่าชิ้นงานที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³, 100 kg/m³ และเหล็กกล่องเปล่าตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชิ้นงานขนาดหน้าตัด 50.8x50.8 mm จะสามารถทนแรงกดได้มากกว่าชิ้นงานขนาดหน้าตัด 25.4x50.8 mm ในทุกๆกรณี จากกราฟในรูปที่ 6 เมื่อนำไปคำนวณหาค่าพลังงานดูดซับจะได้ผลดังตารางที่ 1

3.2 ความสามารถในการดูดซับพลังงาน

การคำนวณเกี่ยวกับตัวแปรที่เกี่ยวข้องเพื่อหาค่าพลังงานดูดซับดังแสดงในสมการที่ 1 จะนำเอาค่าภาระเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบคูณกับระยะยุบของชิ้นงานโดยในการทดสอบซึ่งกำหนดให้ชิ้นงานทุกชิ้นยุบเท่ากันที่ 90 mm

$$E_a = \int PdS \quad (1)$$

โดยที่ E_a = พลังงานดูดซับ

P = ภาระที่กระทำกับวัสดุชิ้นงาน

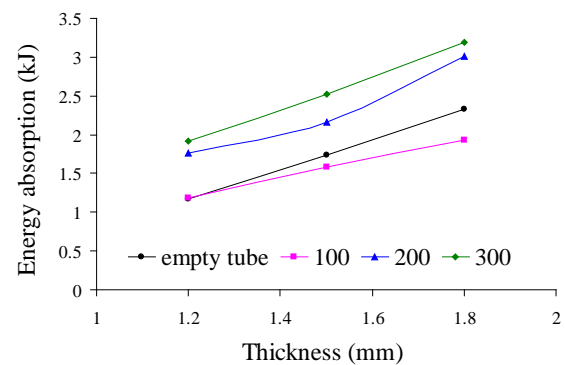
dS = การเปลี่ยนแปลงระยะยุบตัวของชิ้นงาน

ตารางที่ 1 แสดงค่าพลังงานดูดซับ (kJ) ของชิ้นงานในกรณีต่างๆ

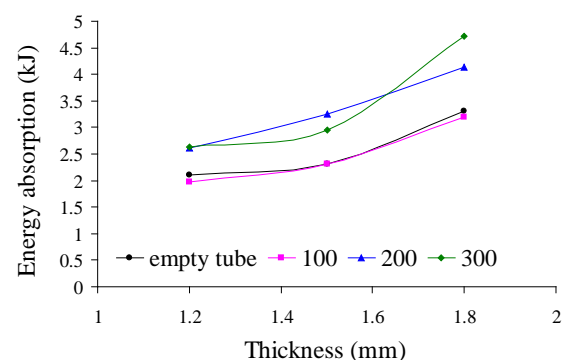
| หน้าตัด (mm) | ความหนา (mm) | ความหนาแน่นของโฟม | | | |
|--------------|--------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | เหล็กเปล่า | 100 kg/m ³ | 200 kg/m ³ | 300 kg/m ³ |
| 25.4x50.8 | 1.2 | 1.17 | 1.18 | 1.76 | 1.92 |
| | 1.5 | 1.74 | 1.58 | 2.17 | 2.52 |
| | 1.8 | 2.33 | 1.93 | 3.01 | 3.19 |
| 50.8x50.8 | 1.2 | 2.10 | 1.97 | 2.62 | 2.63 |
| | 1.5 | 2.31 | 2.30 | 3.24 | 2.96 |
| | 1.8 | 3.30 | 3.20 | 4.14 | 4.73 |

จากตารางที่ 1 เป็นผลการคำนวณของค่าพลังงานดูดซับ (kJ) ของชิ้นงานขนาดต่างๆ พิจารณาที่ชิ้นงาน

ขนาด 25.4x50.8 mm พบว่าชิ้นงานที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่น 300 kg/m³ สามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้ดีกว่าชิ้นงานเติมโฟมที่มีความหนาแน่น 100 และ 200 kg/m³ ที่ทุกความหนาของชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่มีความหนา 1.8 mm สามารถดูดซับพลังงานได้มากที่สุดและเมื่อเทียบกับเหล็กเปล่าจะมากกว่าประมาณ 64.19% พิจารณาที่หน้าตัดขนาด 50.8x50.8 mm พบว่าเหล็กเปล่าและเหล็กที่เติมโฟมกับทุกความหนาแน่นจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นตามความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบชิ้นงานที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³ และ 300 kg/m³ จะเห็นว่าในกรณีที่ชิ้นงานหนา 1.5 mm การเติมโฟมที่มีความหนาแน่น 200 kg/m³ สามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าที่ความหนาแน่น 300 kg/m³ และที่ความหนาชิ้นงาน 1.2 mm ยังสามารถดูดซับพลังงานได้เกือบเท่ากันซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่เกิดจากผลของการเติมโฟมในชิ้นงานดังกล่าว เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่หนา 1.8 mm และเติมโฟมกับความหนาแน่น 300 kg/m³ พบว่าสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าเหล็กเปล่าประมาณ 43.33%



(ก) ชิ้นงานหน้าตัด 25.4x50.8 mm



(ข) ชิ้นงานหน้าตัด 50.8x50.8 mm

รูปที่ 7 แสดงกราฟค่าพลังงานดุดซับของชิ้นงาน

จากรูปที่ 7 เป็นกราฟแสดงค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นงานของทั้งสองขนาดหน้าตัด จะเห็นว่าลักษณะกราฟของชิ้นงานที่เติมโฟมด้วยความหนาแน่น 100 kg/m^3 กับเหล็กกล่องเปล่าจะมีลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกัน จากกราฟของชิ้นงานที่เติมโฟม 200 kg/m^3 และ 300 kg/m^3 ของทุกขนาดหน้าตัดจะสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าเหล็กเปล่าที่ทุกความหนา

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่าชิ้นงานที่เติมโฟม 200 และ 300 kg/m^3 สามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าเหล็กเปล่า โดยที่การเติมโฟม 300 kg/m^3 สามารถดูดซับพลังงานได้สูงกว่าเหล็กเปล่าของขนาดหน้าตัด $25.4 \times 50.8 \text{ mm}$ และ $50.8 \times 50.8 \text{ mm}$ เท่ากับ 64.19% และ 43.33% ตามลำดับ ชิ้นงานทุกชิ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นความ สามารถการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ สำนักงานโยธาธิการและผังเมืองจังหวัดอุบลราชธานี ที่อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องทดสอบการกด

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang Yong et.al. "A study on crashworthiness of mini-car front longitude member by computer simulation" 12th International Pacific Conference on Automotive Engineering, 2003
- [2] นิรุต อ่อนสูง และคณะ "การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลองโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสารภายใต้การชน" วารสารวิศวกรรม มข. ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน พฤษภาคม-มิถุนายน หน้า 343-354, 2550.
- [3] Pariatmono, N and Chryssanthopoulos, M.K. "Asymmetric elastic buckling of axially impressed conical shells with various end conditions" AIAA Journals Vol 33(11): 218-227,1995.

[4] Thinwongpituk, C. and El-Sobky, H. "The effect of end conditions on the buckling load characteristic of conical shells subjected to axial loading" The ABAQUS 2003 Users' Conference Proceedings. Munich: Germany, 2003.

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

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

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