

■ Research Article



การออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับพลังงานของตัวลดทอนแรงกระแทกที่ใช้สำหรับเครื่องทดสอบการชนโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดเจน

Design and Analyze the Energy Absorption Behavior of Impact Attenuator for Crash Tester by Using Explicit Nonlinear Finite Element Model

ชยานนท์ เสริฐริกุล¹, อัครพล รัตนจันทร์², กันตพัฒน์ รักภูมิ², ปุณภวัฒน์ บุษดี² และชาติชาย ชุมจันทร์^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนน ประชาราษฎร์ 1 แขวง วงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมยานยนต์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนน ประชาราษฎร์ 1 แขวง วงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)

บทความวิจัยฉบับนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงข้อมูลการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรองรับการชนที่ใช้สำหรับโครงสร้างทดสอบการชนของรถพยาบาลโดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดเจน โครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกนี้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ดูดซับแรงกระแทกจากมวลที่แข็งเกร็งขนาด 1,400 kg เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 30 km/h ตามมาตรฐาน EN 1789:2020 โดยเป็นรูปแบบโครงสร้างที่เรียบง่ายและมีต้นทุนการผลิตต่ำ ผลการออกแบบจะได้โครงสร้างที่มีลักษณะเป็นกลุ่มท่อตรง 15 ท่อ ถูกจัดเรียงขนานกันและมีระยะพิทซ์ 60 mm ทั้งนี้กลุ่มท่อดังกล่าวจะยอมให้เกิดการเสียรูปในแนวแกนได้ โดยแต่ละท่อจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 34 mm ความหนา 1.2 mm และมีความยาวรวม 600 mm อีกทั้งแต่ละท่อนั้นถูกเชื่อมกันด้วยสองวัสดุต่างกัน โดยส่วนปลายมีความยาว 100 mm ใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมเกรด AL5083-O และถูกเชื่อมกับท่อเหล็กเกรด SS400 ยาว 500 mm ในงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดเจนเพื่อวิเคราะห์การดูดซับพลังงานการชนเป็นความเร่งซึ่งวิธีการสร้างแบบจำลองดังกล่าวได้รับการตรวจสอบโดยการเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดสอบจริงซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องและมีแนวโน้มที่ดี อีกทั้งผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับพลังงานจากการชนยังพบว่าความเร่งที่ได้นั้นสอดคล้องกับแผนภูมิรูปร่างความเร่งที่ระบุในมาตรฐาน

คำสำคัญ: ตัวลดทอนแรงกระแทก การจำลองการชน แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พลศาสตร์แบบชัดเจน EN 1789:2020

Received:

1 August 2022

Revised:

12 January 2023

Accepted:

19 January 2023

Published:

20 January 2023

*Corresponding

Author:

chartchayc.y@cit.kmut

nb.ac.th

+66 2-555-2000

Copyright:

© Rajamangala

University of

Technology Lanna.

All right reserved

ISSN

Print: 2586-8500

Electronic: 2586-8632

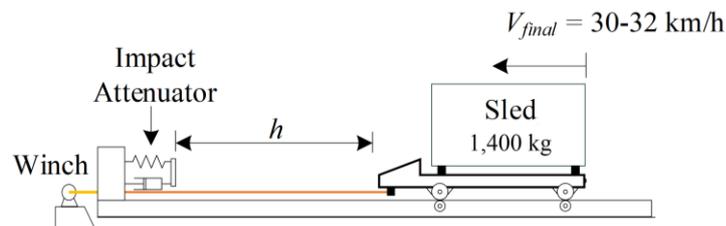
Abstract

The purpose of this work is to design and analyze the energy absorption behavior of an impact attenuator for an ambulance crash test machine using an explicit nonlinear finite element model. The impact attenuator structure can be used for the dynamic collision tester for an ambulance at about 30 km/h, according to the EN 1789:2020 standard. The design is intended to be simple with a low production cost. The impact attenuator structure was designed to absorb the collision of 1,400 kg of rigid mass at the standard crash speed. In addition, the geometry was designed by using the longitudinal arrangement of 15 tubes with a 60-mm pitch length, whose axial deformation is allowed. The outer diameter, thickness, and total length of the tube are 34 mm, 1.2 mm, and 600 mm, respectively. Each tube is welded with two different materials: a 100-mm aluminum AL5083-O tip and a 500-mm steel SS400 tube. In the study, an explicit nonlinear finite element model was used to analyze the absorption of collision energy as acceleration amplitude. The validation revealed that the experimental data were consistent with the numerical model by ANSYS/LS-DYNA, while the acceleration profile also corresponded with the standard.

Keywords: Impact Attenuator, Crash Simulation, Finite Element Method, Explicit Dynamics, EN 1789:2020

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันสถาบันการแพทย์ฉุกเฉินแห่งชาติ กระทรวงสาธารณสุขของประเทศไทยได้ตระหนักถึงความปลอดภัยในการใช้รถพยาบาล จึงได้ออกข้อกำหนดเกี่ยวกับความแข็งแรงการติดตั้งอุปกรณ์การแพทย์และรถพยาบาลให้เป็นไปตามมาตรฐาน EN 1789:2020 (European Committee for Standardization (CEN) 2020) โดยมาตรฐานได้ระบุคุณสมบัติในการเคลื่อนย้ายผู้ป่วยโดยใช้รถพยาบาล และการทดสอบความแข็งแรงเพื่อรองรับอุบัติเหตุการฉีกขาด เป็นสาเหตุให้บางบริษัทผู้ผลิตในประเทศไทยต้องสร้างชุดทดสอบการชนให้สอดคล้องตามที่มาตรฐานกำหนดและยังต้องออกแบบให้มีต้นทุนที่ต่ำกว่าการส่งรถพยาบาลไปทดสอบในต่างประเทศ โดยปัญหาที่พบจากการสร้างชุดทดสอบคือความเร่งจากการชนตามความเร็วที่กำหนดไว้ที่ประมาณ 30-32 km/h มีค่าเกินกว่าค่าระหว่าง 80-120 m/s² และต้องต่อเนื่องไปประมาณ 0.9 s และต้องสิ้นสุดการชนที่เวลาไม่เกิน 0.15 s จากปัญหาที่กล่าวมานี้จึงเป็นที่มาของงานวิจัยการออกแบบตัวลดทอนแรงกระแทกที่ใช้สำหรับโครงสร้างทดสอบการชน โดยรูปที่ 1 แสดงแผนภาพโครงสร้างทดสอบการชนแบบรางเลื่อน โดยที่ห้องโดยสารหรืออุปกรณ์การแพทย์จะถูกติดตั้งบนตัวเลื่อนติดล้อ (Sled) แล้วมีการลากด้วยลวดสลิงที่โยงกับควานไฟฟ้า (Winch) ให้เคลื่อนที่บนรางตามความเร็วที่กำหนดและเข้าชนสิ่งกีดขวางที่ทำหน้าที่เป็นตัวลดทอนแรงกระแทก (Impact attenuator) สำหรับในตัวเลื่อนติดล้อต้องมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และระบบเก็บข้อมูลตัวเลื่อน (Sled data acquisition system) เพื่อวัดขนาดความเร่งด้วย



รูปที่ 1 แผนภาพแนวคิดของโครงสร้างทดสอบการชนแบบรางเลื่อนและจุดติดตั้งตัวลดทอนแรงกระแทก (Impact attenuator)

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านพบว่ามีคำแนะนำการพัฒนาโครงสร้างดูดซับการกระแทกที่ใช้ในรถยนต์โดยมีวิธีการศึกษาทั้งการทดสอบและการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อให้ได้รูปทรงและวัสดุ เพื่อให้เข้าใจกระบวนการดูดซับพลังงานมากขึ้น สิ่งสำคัญคือต้องศึกษาสิ่งที่เรียกว่า Axial crushing ของส่วนประกอบหลักที่เป็นโลหะตั้งแต่ในทศวรรษที่ 1980 การศึกษาจำนวนมากได้วิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างก่อนทั่วไปภายใต้สภาวะการกระแทกตามแนวแกน (Abramowicz, W. and Jones, N., 1984; Abramowicz, W. and Jones, N., 1986) โมเดลบางรุ่นที่นำเสนอเป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบดูดซับพลังงานของรถยนต์ (EA) เพิ่มเติมโดยอิงตามการใช้โครงสร้างที่ทำโปรไฟล์ที่พบบ่อยที่สุดคือ "กล่องกันกระแทก (Crash box)" ซึ่งเชื่อมต่อแผงด้านหน้าของรถกับโครงสร้างรางด้านหน้าและส่วนใหญ่ทำจากเหล็ก (Ferdynus et al. 2018) และทำจากอลูมิเนียม (Feng et al., 2018; Yang et al., 2016; Marzbanrad et al., 2014) Santosa & Wierzbicki (1998) ได้นำเอารูปทรงรังผึ้งมาปรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างกันแรงกระแทกของรถยนต์ โดยการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่ทำจากอลูมิเนียมแผ่นบางและโครงสร้างที่ทำ

จากโฟม ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติที่คล้ายกันคือมีน้ำหนักเบาและมีความสามารถสลายพลังงานจากการกระแทกได้ดี Ghasemnejad *et al.* (2008) เสนอการออกแบบกล่องกันการกระแทกแบบลูกฟูก (Corrugated crash boxes) สำหรับกันรถยนต์ให้มีความสามารถในการรับแรงกระแทกด้านหน้าให้ราบเรียบมาก (Lower crush force fluctuation) ที่สุดโดยใช้กล่องภายในกลวงแบบลูกฟูกมีขนาดหน้าตัด ความยาว และหนาต่างกัน งานวิจัยนี้ได้ทำนายการดูดซับพลังงานและการบิดตามแกนของกล่องลูกฟูก 4 แบบโดยที่มีผนัง 2 ข้างเป็นคลื่นสี่เหลี่ยมที่ระยะพิทช์ (Pitch distance) ต่างกันและส่วนผนังด้านบน-ล่างเป็นผนังเรียบ โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดเจนด้วยโปรแกรม ANSYS/LS-DYNA บนพื้นฐาน Super folding element กับวัสดุอลูมิเนียมและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแรงกับระยะทางที่บดอัดทิศทางตามแกน (Crushing distance) ขณะชนที่ความเร็ว 25 m/s พบว่ากล่องกันการกระแทกลูกฟูกที่มีระยะพิทช์น้อยกว่ามีข้อดีคือแรงจากการยุบเริ่มต้นที่ต่ำกว่า ความผันผวนของขนาดของแรงขณะบดอัดด้วยคาบเวลาต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกล่องกันการกระแทกลูกฟูกที่มีระยะพิทช์มากกว่า Yang *et al.* (2020) ได้นำเสนอท่อหลายเซลล์ซึ่งช่วยเพิ่มการดูดซับพลังงานได้ดีมากขึ้นเมื่อเทียบกับการดูดกลืนของแบบท่อเดี่ยว (Single tube) ภายใต้สภาวะเดียวกันคือชนที่ความเร็ว 10 m/s การตรวจสอบลักษณะการดูดกลืนพลังงานภายใต้แรงกดทับหรือบดบีบตามแนวแกนของรูปทรงที่แปลกใหม่ซึ่งเรียกว่าท่อหกเหลี่ยมแบบหลายเซลล์ (Multi-cell hexagonal tube) โดยเปรียบเทียบการทดลองและแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบชัดเจน ทั้งนี้พบว่าจากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นเป็นการนำเสนอรูปแบบตัวรองรับแรงกระแทกและให้เสียรูปตามแนวแกนแต่ยังไม่ได้นำเสนอความเร่งที่ได้มาด้วย Segade *et al.* (2016) และ Vettorello *et al.* (2020) ได้ทำการพัฒนาต้นแบบน้ำหนักเบาของโครงสร้างกันแรงกระแทก (IA) ด้านหน้าของรถสูตรนักเรียน (Formula student) ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงแบบปิรามิดที่เชื่อมชิ้นรูปจากแผ่นอลูมิเนียมผสม รูปทรงบล็อกรังผึ้ง (Honeycomb crash-box) และรูปทรงแบบผสมภายในกลวงขึ้นรูปรีดขึ้น (Honeycomb) และเป็นชั้นของวัสดุเชิงประกอบ (Composite laminate) ของคาร์บอนไฟเบอร์ (Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP)) โดยอาศัยวิธีการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์แบบชัดเจน (Explicit finite element program) และตรวจสอบผลการจำลองด้วยการทดสอบเพื่อเข้ามาช่วยในการออกแบบในรูปทรงลูกฟูกเพื่อหยุดรถที่มีน้ำหนัก 300 kg และความเร็ว 7 m/s ผลการทดสอบทั้งหมดเป็นความเร่งและเวลาพบว่ามีค่าความเร่งสูงสุดอยู่ประมาณ 18-22g โดยมีการผันผวนเล็กน้อยและมีช่วงเวลาสิ้นสุดการชนอยู่ที่ 0.37-0.62 s และ Song *et al.*, (2016) ได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์ความไวและการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบให้มีความน่าเชื่อถือสำหรับโครงสร้างรับการกระแทกตามแนวแกนให้มีความแข็งแรงสูงโดยการขึ้นรูปด้วยวิธีการนำโลหะบางมาเชื่อมติดกันซึ่งเรียกโครงสร้างนี้ว่า Tailor welded blanks (TWB) และทดสอบการชนที่ความเร็ว 30 km/h พบว่าความเร่งที่เกิดขึ้นแต่ละเคสอยู่ที่ 18-37g จากการพิจารณาผลการทดสอบและแบบจำลองพบว่าความเร่งจากการชนกรณีต่างๆ แม้กระทั่งการชนหน้าเต็มคัน (Wang *et al.* 2018) จะมีขนาดของความเร่งจากการชนที่มากขึ้นไป เนื่องจากรูปแบบโครงสร้างของกล่องกันการกระแทกมีความแข็งแรง (Stiffness) มากเกินในตอนเริ่มชน ดังนั้นงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวลดทอนแรงกระแทกสำหรับระบบทดสอบการชนแบบรางเลื่อนเพื่อให้ได้ขนาดความเร่งตามที่มาตรฐานกำหนดและยังเพิ่มความน่าเชื่อถือในการออกแบบและวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิ

เมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดเจน ทั้งนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะถูกพิจารณาร่วมกับ
ผลการทดสอบจริง

2. วัตถุประสงค์

เพื่อแสดงข้อมูลการออกแบบและวิเคราะห์พฤติกรรมการดูดซับพลังงานของ
โครงสร้างรองรับการชนที่ใช้สำหรับโครงสร้างทดสอบการชนของรถพยาบาลโดยใช้
แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดเจน

3. แนวคิดทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 ค่าความแข็งแรงแรงตามแกน

การออกแบบรูปร่างของโครงสร้างลดทอนแรงกระแทกตามค่าคงที่สปริงช่วง
ยืดหยุ่น ค่าความแข็งแรงแรงของวัสดุเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถในการกลับคืน
สู่รูปร่างหรือรูปแบบเดิมของชิ้นส่วนเมื่อนำแรงกระทำมากระทำต่อชิ้นส่วนนั้นออก
แต่มีข้อแม้ว่าแรงกระทำกับชิ้นส่วนจะต้องมีค่าไม่เกินจุดครากหรือเรียกว่าการเสีย
รูปแบบไม่ถาวรของวัสดุ โดยหากแรงกระทำกับชิ้นส่วนมีค่ามากเกินกว่าที่วัสดุจะรับ
ไหว ก็จะส่งผลให้เกิดการเสียรูปแบบถาวรจนทำให้วัสดุไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพ
เดิมได้

ค่าคงที่สปริง (Stiffness, k) คือ ค่าความต้านทานการเสียรูปของชิ้นส่วนหนึ่งซึ่ง
เปลี่ยนแปลงไปตามวัสดุ และรูปร่างหน้าตัดทรงกลวงสามารถคำนวณค่าความ
แข็งแรงแรงตามแกน (Axial stiffness) ได้ดังสมการ (1)

$$k_{\text{axial}} = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

เมื่อ k_{axial} คือ ค่าความแข็งแรงแรง, N/m
 E คือ ค่ามอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น, GPa
 A คือ พื้นที่หน้าตัด, m^2
 L คือ ค่าความยาว, m

3.2 แบบจำลองการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

แนวคิดที่ใช้ในการออกแบบค่าความคงที่สปริงของโครงสร้างตัวลดทอนแรง
กระแทกนั้นได้ประยุกต์มาจากแบบจำลองการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Pawlus *et al.*,
2011; Deac *et al.*, 2018) โดยโมเดลการชนเป็นระบบมวล สปริงและตัวหน่วง เรา
สามารถเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของช่วงการชนแบบยืดหยุ่น
ได้ดังสมการที่ (2) และค่าคงที่ของสปริงหาได้จากสมการ (3)

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (2)$$

โดยที่ m คือ มวลรวมของระบบ, kg
 c คือ ค่าของตัวหน่วงการสั่นสะเทือน, N.s/m
 k คือ ค่าคงที่ของสปริง, N/m
 x คือ ระยะกระจัด, m
 F คือ แรงภายนอก, N

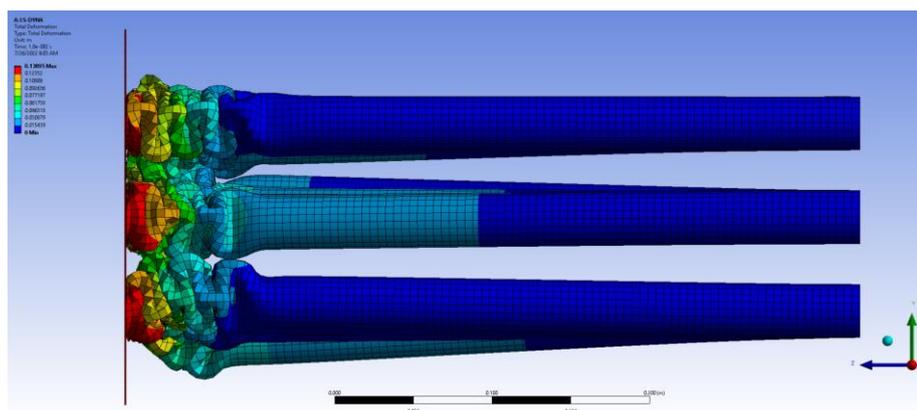
$$k = \frac{F}{X} \quad (3)$$

เพื่อกำหนดค่าความเป็นสปริงของตัวลดทอนแรงกระแทกและต้องจำกัดขนาดของ
ตัวลดทอนแรงกระแทก โดยสมมุติให้โครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกสามารถมีค่า
การเสียรูปเป็นระยะกระจัด 0.5 m เมื่อมวลเท่ากับ 1,400 kg ค่าความเร่งเฉลี่ยขณะ
ชนคือ 10g แรงเฉลี่ยขณะการชน (F_{avg}) สามารถประมาณได้จากสมการ (3) ค่าคงที่
ของสปริงคือ $137,340 \text{ N}/0.5 \text{ m} = 274,680 \text{ N/m}$

3.3 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) คือการใช้ระเบียบวิธีเชิง
ตัวเลขเพื่อการคำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณสำหรับปัญหาต่าง ๆ ในงานทาง
วิศวกรรม โดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากการแบ่งรูปทรงของปัญหา
ออกเป็นส่วนย่อย ๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (Elements) และเอลิเมนต์เหล่านี้มักมีการ
เชื่อมต่อกันโดยจุดต่อ (Nodes) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการคำนวณเพื่อหาค่าตัวแปร
ตามที่ต้องการ (Dependent variables) จากนั้นนำแต่ละเอลิเมนต์ย่อย ๆ รวมเข้า
ด้วยกันเพื่อก่อให้เกิดระบบสมการรวมขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถทำให้เราอธิบายถึง
สถานะหรือผลเฉลยโดยรวมของปัญหานั้นได้

การสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์มีขึ้นเพื่อช่วยสร้างการทดสอบซ้ำ และ
ตรวจสอบตัวเลือกการคำนวณที่เหมาะสมในการจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้นจากการชน
การออกแบบโมเดลของผิวของกล่องกันกระแทกถูกนำมาใช้เป็นรูปทรงเรขาคณิต
สำหรับ ANSYS Workbench/LS-Dyna ร่วมกับเงื่อนไขเริ่มต้นและขอบเขต
รวมถึงสมการควบคุมอื่น ๆ สำหรับการ Meshing (รูปที่ 2) ตัวแก้ปัญหา (Solver)
และกระบวนการหลังการประมวลผล (Post-processing) ได้ดำเนินการในโปรแกรม
ข้างต้น ซึ่งเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การชนที่เป็นเหตุการณ์ชั่วครู่
ในระยะเวลาสั้น ๆ (Short duration event) โดยการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ด้วย
โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS Workbench/LS-Dyna เป็นวิธีการอินทิเกรตเวลา
แบบชัดแจ้ง (Explicit time integration) (Gokhale *et al.*, 2008; Liu 2008)



รูปที่ 2 ลักษณะของเอลิเมนต์และการเสียรูปขณะถูกชน

4. วิธีดำเนินการวิจัย

การเริ่มต้นการดำเนินงานของงานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทก เช่น รูปแบบที่เรียบง่าย วิธีการออกแบบ การเลือกใช้คุณสมบัติของวัสดุ รวมไปถึงระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบชัดแจ้งหรือเรียกว่าพลศาสตร์แบบชัดแจ้ง (Explicit dynamics) จากนั้นจึงได้ทำการตรวจสอบวิธีการสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจสอบระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ว่ามีความถูกต้อง ความแม่นยำหรือใกล้เคียงกับผลทดสอบจากงานวิจัยอ้างอิงหรือไม่ เพื่อให้ง่ายต่อการผลิต การออกแบบโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกจึงได้ใช้รูปแบบของโครงสร้างแบบโลหะท่อกกลมรูปพรรณที่หาได้งานในท้องตลาด โดยได้เลือกศึกษาเฉพาะท่อโลหะกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm และใช้ความหนาที่น้อยที่สุด 1.2 mm สำหรับความยาวที่เหมาะสมนั้นถูกกำหนดให้มีความยาว 300 ถึง 500 mm วิธีการหาความยาวและวัสดุที่เหมาะสมของท่อนั้นประเมินจากค่าคงที่ของสปริงยึดหยุ่นแบบเชิงเส้น โดยเบื้องต้นคำนวณหาค่าความแข็งแรงแรงตามแกนของท่อแต่ละแบบ (Axial stiffness) ซึ่งค่าที่ได้นั้นต้องมากกว่าค่าคงที่ของสปริงที่ต้องการ ดังนั้นจึงใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดแจ้งวิเคราะห์หาค่าคงที่ของสปริงแบบไม่เชิงเส้นของตัวลดทอนแรงกระแทก 1 ท่อจากการชนของวัตถุเกร็งที่มีมวล 50 kg และความเร็ว 8.34 m/s ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์ของแรงเฉื่อยการชนและระยะยวบยวักที่เกิดขึ้นสุดท้ายและนำโครงสร้างชุดลดทอนแรงกระแทกนี้ไปใช้กับเครื่องทดสอบการชนเพื่อให้สามารถดูดซับพลังงานการชนจากวัตถุที่มีน้ำหนัก 1,400 kg และในมาตรฐานของ EN 1789:2020 ได้ระบุว่ารูปร่างความเร่งที่เกิดจากแรงกระแทกจากการชนที่ความเร็วประมาณ 30-32 km/h นั้นมีความเร่งสูงสุดระหว่าง 80-120 m/s² ภายในเวลา 0.9 s แรกและสิ้นสุดการชนภายในเวลา 0.15 s ซึ่งรูปร่างความเร่งตามเวลาจากการชนที่ระบุในมาตรฐานนี้ถูกใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินรูปแบบของโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกแบบหลายท่อเรียงกัน

5. ผลการวิจัย

5.1 คุณสมบัติของวัสดุ

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาความเค้นที่เกิดขึ้นและอยู่ในช่วงยืดหยุ่นของวัสดุและไม่เชิงเส้น ตารางที่ 1 ได้แสดงค่าคุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในแบบจำลองได้แก่ เหล็ก SS400 (JIS G 3101 S) และ Structural Steel NL เกรด SS400 ที่มีค่าคุณสมบัติไม่เชิงเส้นนั้นเป็นค่าที่มีในโปรแกรม ANSYS Workbench และ Aluminum 5083-O (Segade et al. 2016)

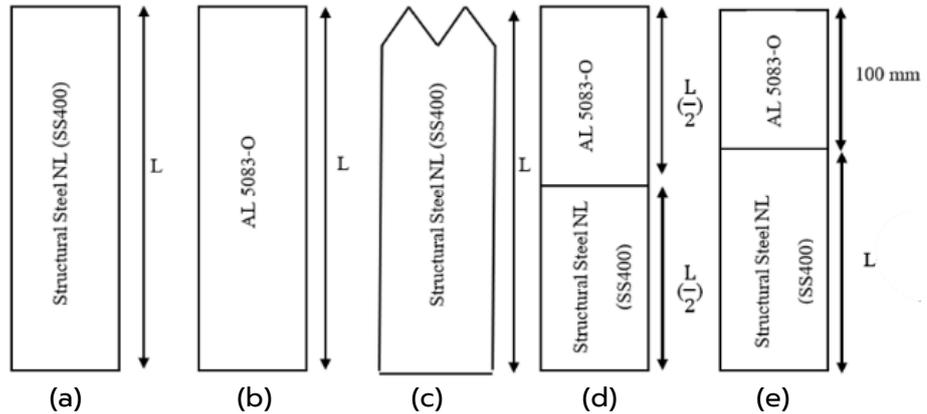
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของวัสดุ

วัสดุ	ความเค้นคราก (MPa)	ความเค้นสูงสุด (MPa)	มอดูลัสสภาพยืดหยุ่น (MPa)	Tangent modulus [MPa]	อัตราส่วนปัวซอง (ν)
5083-O	115	290	72,000	1,082	0.33
SS400	250	460	200,000	-	0.3
SS400 (NL)	250	560	200,000	1,450	0.3

5.2 การออกแบบ

ในการออกแบบโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกนี้โครงสร้างทุกรูปแบบได้ใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 mm และมีความหนา 1.2 mm โดยมีขนาดความยาว (L) 5 กรณีศึกษาสำหรับ 5 แบบโครงสร้างลดทอนแรงกระแทก ได้แก่ 300 mm

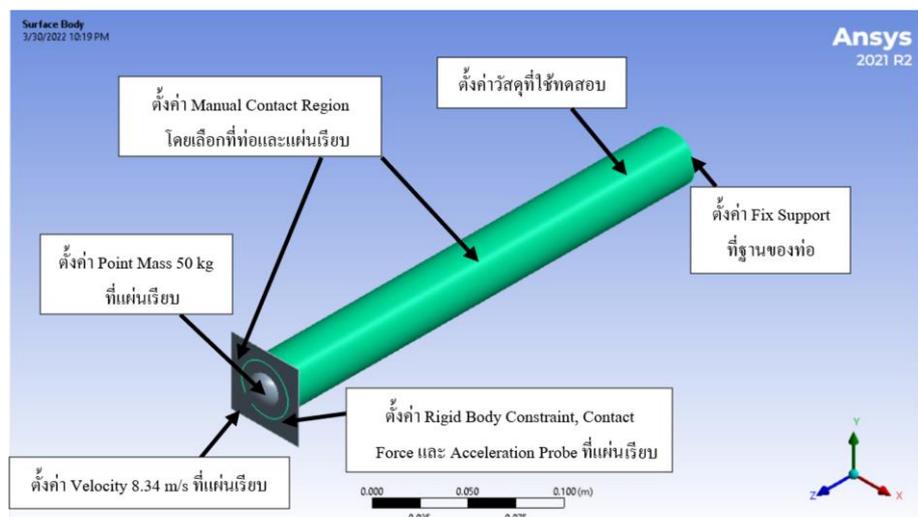
350 mm 400 mm 450 mm และ 500 mm แบบที่ 1 (รูปที่ 3a) ใช้วัสดุเป็น เหล็กเกรด SS400 แบบที่ 2 (รูปที่ 3b) ใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมเกรด AL 5083-O แบบที่ 3 (รูปที่ 3c) ใช้วัสดุ เหล็กเกรด SS400 โดยมีความแตกต่างจากแบบที่ 1 คือรูปทรงส่วนปลายเป็นแบบปากฉลามที่มีมุม 6 องศา เพื่อลดขนาดความเร่งขณะ เริ่มต้นชน แบบที่ 4 (รูปที่ 3d) ใช้วัสดุอลูมิเนียมเกรด AL 5083-O ในส่วนครึ่ง ปลายและเชื่อมติดกับเหล็กเกรด SS400 ในส่วนครึ่งกึ่งและสุดท้ายแบบที่ 5 (รูปที่ 3e) ใช้วัสดุอลูมิเนียมเกรด AL 5083-O ขนาดเดียวกันในส่วนปลายยาว 100 mm และเชื่อมติดกับเหล็กเกรด SS400 ในส่วนที่เหลือซึ่งมีความยาว L



รูปที่ 3 รูปแบบโครงสร้างลดทอนแรงกระแทก

5.3 เชื้อนไขขอบเขต

ขั้นตอนของการสร้างแบบจำลองนั้นสำหรับค่าวัสดุที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองนี้ สามารถพิจารณาได้จากตารางที่ 1 วัสดุเกรด SS400 ถูกนำไปกำหนดให้กับแผ่น เรียบ สำหรับน้ำหนักที่มาชนนั้นกำหนดโดย Point mass ซึ่งได้กำหนดน้ำหนักที่เข้า มาชนเป็น 50 kg และใช้ความเร็วเข้าชนที่ 8.34 m/s ขนาดเอลิเมนต์กำหนดที่ 2.5 มม. (2D Quad/Hex elements)



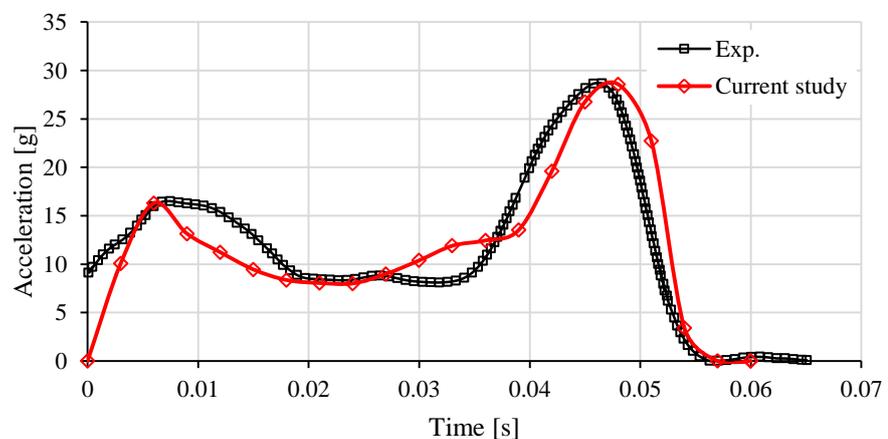
รูปที่ 4 เชื้อนไขขอบเขตของการจำลอง

โดยขนาดเอลิเมนต์ที่เล็กกว่าไม่มีผลในการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ ขั้นตอนต่อมาได้ตั้ง
ค่าเงื่อนไขขอบเขตแบบ Fixed support ที่ฐานของท่อทำให้ท่อไม่เกิดการหลุด
ระหว่างการชน อีกทั้งยังมีการตั้งค่า Manual contact region ที่ตัวท่อกับแผ่น
เรียบ เพื่อไม่ให้ตัวของท่อและแผ่นเรียบนั้นแยกออกจากกัน และในขั้นตอนสุดท้ายคือ
การตั้งค่า Rigid body constraint ค่า Contact force และค่า Acceleration
probe ที่จุดน้ำหนัก (Point mass)

6. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

6.1 การตรวจสอบแบบจำลอง

สำหรับงานวิจัยการใช้แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดแจ้งสำหรับ
วิเคราะห์การดูดซับพลังงานของโครงสร้างตัวลดทอนแรงประเภทที่ออกแบบซึ่ง
วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench/LS-Dyna ได้ถูกตรวจสอบความ
ถูกต้องสำหรับการสร้างแบบจำลองที่เกี่ยวกับการชนโดยทำการเปรียบเทียบกับผล
การทดสอบการชนของกล่องกันกระแทกที่ใช้กับรถแข่งสูตรนักศึกษา (Formula
student) จากงานวิจัยที่เสนอโดย Segade *et al.* (2016) โดยมีขั้นตอนเริ่มต้น
จากการสร้างโมเดลกล่องกันกระแทกตามแบบและวัสดุที่กำหนดในงานวิจัยดังกล่าว
 อีกทั้งมีกระบวนการสร้างเมช 2 มิติ แบบ Quadrilateral shell จำนวน 1,966 เอลิ
เมนต์ เงื่อนไขขอบเขตกำหนดให้ด้านล่างของกล่องกันกระแทกถูกยึดตรึงกับพื้นและ
มีตุ้มน้ำหนัก 348 kg ซึ่งมีสภาพความแข็งเกร็งเข้ามาชนด้านบนด้วยความเร็ว
เริ่มต้นที่ 6.47 m/s เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาทำการเปรียบเทียบ โดยนำผลการ
ตอบสนองความเร่งชั่วขณะ (Transient) ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับผล
การทดสอบแล้วพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีแนวโน้มและความสอดคล้องกันเป็นไปในทิศทาง
ที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 5 และเป็นการยืนยันว่าการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่
เชิงเส้นแบบชัดแจ้งนี้สามารถใช้วิเคราะห์โครงสร้างลดทอนแรงประเภทต่อไปได้



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาที่ถูกระหว่างผล
การทดสอบและผลการจำลอง

6.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวลดทอนแรงประเภทแบบ 1 ท่อ

จากค่าคงที่ของสปริงแบบยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นที่ต้องการนี้เท่ากับ 274.68 N/mm
ดังนิตารางที่ 2 แสดงค่าความแข็งเกร็งตามแกนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้
สมการที่ (1) และผลจากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองเฉพาะท่อที่มีความยาว L
เท่ากับ 500 mm เท่านั้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาผลของการคำนวณและวิเคราะห์ทุก
กรณีแล้วพบว่าได้ค่าความแข็งเกร็งตามแกนสูงกว่าค่าคงที่ของสปริงแบบยืดหยุ่น
แบบเชิงเส้นที่ต้องการมากเกินไป จากการวิเคราะห์ผลของแบบจำลองไฟไนต์เอลิ

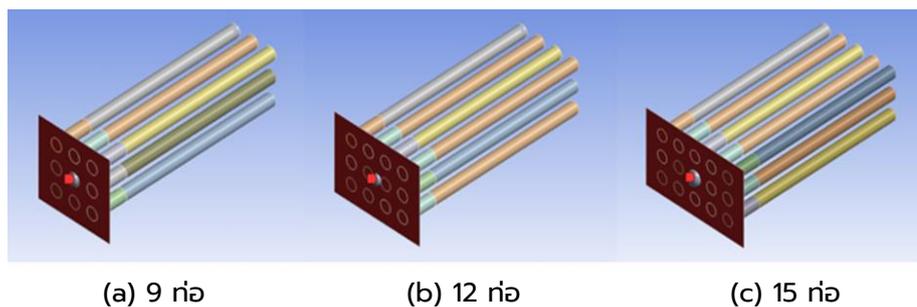
เมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดแจ้ง โดยผลของแรงสัมผัสเฉลี่ยของแต่ละแบบแล้วพบว่า
 แบบที่ 1 มีค่า 211,613 N แบบที่ 2 มีค่า 78,912 N แบบที่ 3 มีค่า 584,452 N แบบ
 ที่ 4 33,226 N และแบบที่ 5 มีค่า 55,171 N จากค่าในตารางพบว่าแบบที่ 2 และ
 แบบที่ 3 ได้ค่าความแข็งแรงแรงตามแกนเท่ากันที่ 294 N/mm ถึงแม้ว่าค่าที่คำนวณ
 จากสมการและค่าแรงสัมผัสเฉลี่ยไม่เท่ากันก็ตาม ซึ่งค่าความแข็งแรงแรงตามแกน
 มากกว่าค่าคงที่ของสปริงแบบยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นที่ต้องการนี้อยู่เพียง 6.57 %
 เมื่อคำนึงถึงต้นทุนของวัสดุของเหล็ก SS400 มีราคาที่ถูกและหาง่ายกว่าอลูมิเนียม
 เกรด AL 5083-O ดังนั้นแบบที่ 5 ได้ถูกเลือกเพื่อนำไปใช้ออกแบบโครงสร้างตัว
 ลดทอนแรงกระแทกสำหรับการชนจากวัตถุที่มีน้ำหนัก 1,400 kg ต่อไป

ตารางที่ 2 ค่าความแข็งแรงแรงตามแกนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการที่ (1) และผลการจำลองกรณีที่มีความ
 ยาว L เท่ากับ 500 mm

แบบ	ความยาว (mm)		E (MPa)		k_{axial} (N/mm)	Simulation (N/mm)
	SS400	AL	SS400	AL		
1	500	-	200,000	-	49,460	1,513
2	500	-	200,000	72,000	17,806	294
3	500	-	200,000	-	-	1,717
4	250	250	200,000	72,000	26,185	143
5	500	100	200,000	72,000	31,796	294

6.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกแบบหลายท่อ

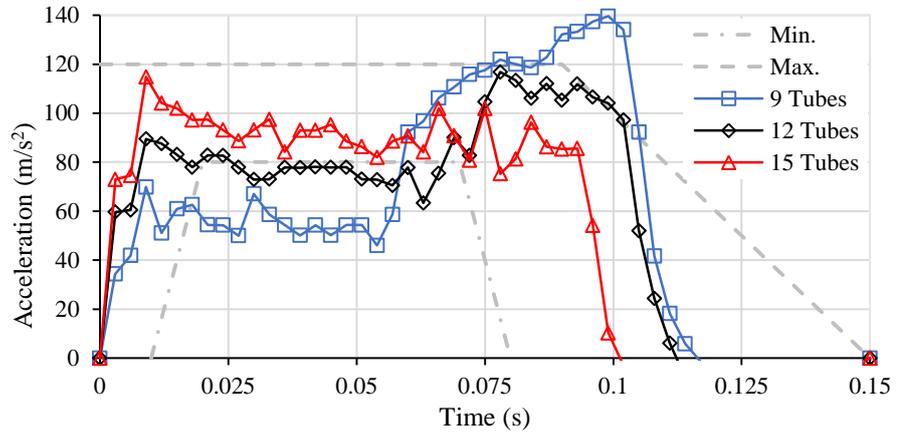
เมื่อนำโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกแบบ 1 ท่อ ตามแบบที่ 5 (รูปที่ 3e) มาใช้
 รองรับรถชนจากวัตถุที่มีน้ำหนักมากขึ้นเป็นตามการออกแบบกำหนดจุดน้ำหนักที่
 1,400 kg และชนที่ความเร็ว 8.34 m/s ตามมาตรฐาน EN 1789:2020 กำหนด
 ดังนั้นจำนวนท่อต้องมีการเพิ่มจำนวนให้เพียงพอและควบคุมความเร่งให้เป็นไปตาม
 มาตรฐานกำหนดดังแสดงรูปที่ 6 นี้คือผลออกแบบโครงสร้างตัวลดทอนแรง
 กระแทกแบบหลายท่อที่มีการจัดเรียงท่อแถวเรียงตามยาวและแต่ละท่อห่างกัน 60
 mm มีจำนวนตั้งแต่ 9 ท่อ 12 ท่อ และ 15 ท่อ



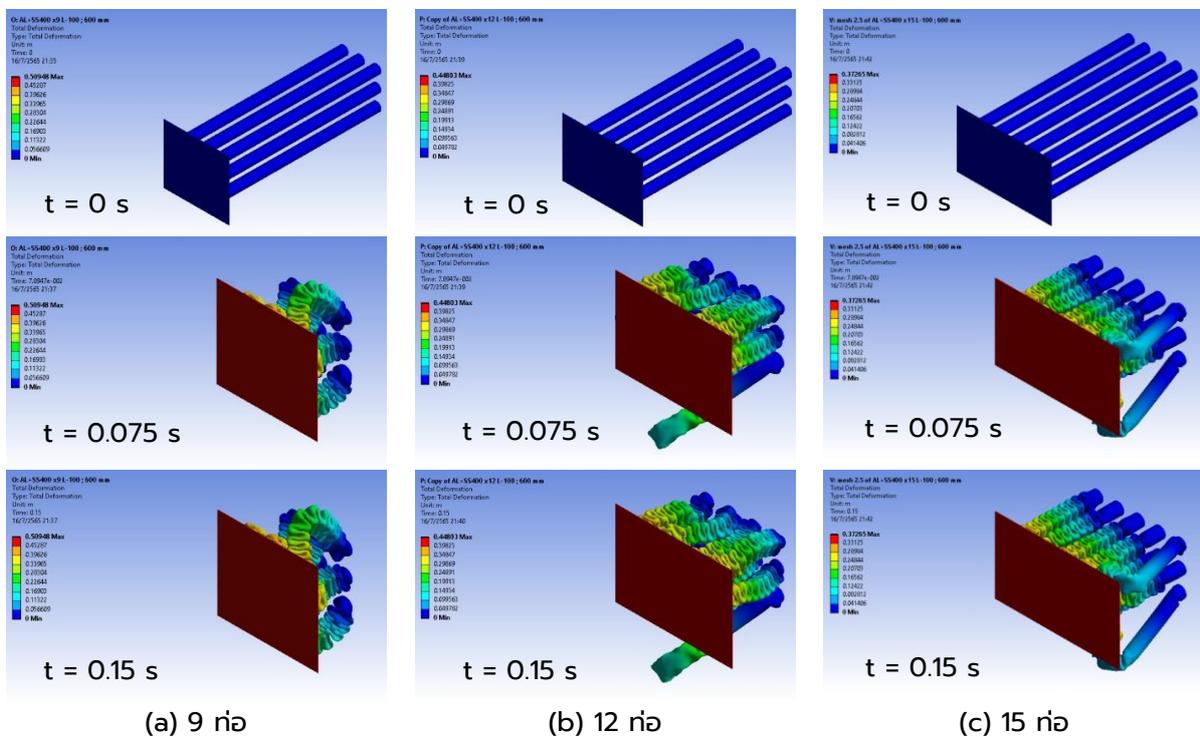
รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกที่มีการจัดเรียงท่อเป็นกลุ่ม 9 ท่อ
 12 ท่อ และ 15 ท่อ มีแผ่นเรียบด้านหน้าพร้อมด้วยจุดน้ำหนักที่ 1,400 kg และชนที่
 ความเร็ว 8.34 m/s

จากรูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาจากการชนของกลุ่ม 9 ท่อ
 12 ท่อ และ 15 ท่อ ภายใต้เกณฑ์ข้อกำหนดของมาตรฐาน EN 1789 จากการ
 วิเคราะห์ผลการจำลองพบว่าโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกแบบที่มี 9 ท่อ (ในรูป

ที่ 7 กราฟเส้นสีน้ำเงิน) นั้นในช่วงเวลา 0 ถึง 0.05 วินาทีแรกมีความเร่งต่ำกว่า
 เกณฑ์มาตรฐานและหลังจากนั้นความเร่งกลับมีค่าสูงขึ้นจนเกินเกณฑ์มาตรฐานไป
 ถึง 140 m/s² และการชนสิ้นสุดที่เวลา 0.117 วินาที โดยทั้ง 9 ท่อถูกบีบอัดจนมี
 ระยะการกระจัดเกินค่าที่ออกแบบไว้ที่ 0.5 m เนื่องจากการจำกัดขนาดของตัว
 ลดทอนแรงกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 8a ซึ่งแสดงให้เห็นการเสียรูปเป็นระยะกระจัด
 รวมทั้งหมดประมาณ 0.50984 m



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาจากการชนของ 9 ท่อ 12 ท่อ และ 15
 ท่อ ภายใต้เกณฑ์ข้อกำหนดของมาตรฐาน EN 1789



รูปที่ 8 การเสียรูปของโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทก 3 แบบที่เวลา 0 0.075 และ 0.15 s

สำหรับผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกแบบที่มี 12 ท่อ (ในรูปที่ 7 กราฟเส้นสีดำ) พบว่าที่เวลาประมาณ 0 ถึง 0.025 วินาทีแรกค่าความเร่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามที่เวลา 0.025 ถึง 0.069 วินาทีความเร่งที่ได้มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อยและที่เวลา 0.069 ถึง 0.114 วินาทีค่าความเร่งได้กลับมาอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานอีกครั้งและเมื่อพิจารณาและวิเคราะห์รูปที่ 8b แสดงให้เห็นว่าตัวลดทอนแรงกระแทกได้ถูกบีบอัด แต่การเสียรูปที่แสดงเป็นระยะกระจัดรวมทั้งหมดสูงสุดอยู่ที่ 0.448 m ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์การออกแบบ แต่ยังมี 1 ท่อด้านล่างที่โก่งตัวออกออกจากกลุ่ม

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกแบบที่มี 15 ท่อ (ในรูปที่ 7 กราฟเส้นสีแดง) พบว่าที่เวลาตั้งแต่ 0 ถึง 0.102 วินาทีนั้นความเร่งจากการชนอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานตลอดช่วงเวลาที่มีการชนจนถึงกระทั่งสิ้นสุดการชน เมื่อวิเคราะห์รูปที่ 8c แสดงให้เห็นว่าตัวลดทอนแรงกระแทกได้ถูกบีบอัดจนการเสียรูปเป็นระยะกระจัดรวมทั้งหมดสูงสุดอยู่ที่ 0.37265 m ถึงแม้ว่ายังมี 2 ท่อด้านขวาที่มีมีการโก่งตัวออกออกจากกลุ่ม

7. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้แสดงถึงวิธีการออกแบบโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกเพื่อนำไปใช้ประโยชน์กับเครื่องทดสอบการชนตามมาตรฐาน EN 1789:2020 สำหรับรถพยาบาลและอุปกรณ์การแพทย์ โดยวัตถุประสงค์ที่ต้องการทดสอบมีน้ำหนักไม่เกิน 1,400 kg และชนที่ความเร็วประมาณ 30 km/h โดยโครงสร้างตัวลดทอนแรงกระแทกต้องสามารถช่วยลดขนาดความเร่งจากการชนสอดคล้องกับแผนภูมิรูปร่างความเร่งตามมาตรฐานกำหนดและที่สำคัญคือต้องผลิตง่ายและราคาถูกกว่าระบบไฮดรอลิกแบบที่ใช้วาล์วควบคุมแบบเซอร์โว ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบและวิเคราะห์ในทางวิศวกรรมโดยใช้แบบจำลองทางไฟในต์เอลิเมนต์ไม่เชิงเส้นแบบชัดแจ้งและได้ตรวจสอบความถูกต้องของขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของงานวิจัยอื่นแล้วพบว่ามีความใกล้เคียงกัน

ผลที่ได้จากการออกแบบและวิเคราะห์การชนในงานวิจัยนี้ทำให้ได้ตัวลดทอนแรงกระแทกที่มีลักษณะเป็นท่อโลหะกลมเรียงกันตามยาวเป็นกลุ่ม 15 ท่อและมีระยะพิทซ์ 60 mm โดยแต่ละท่อนี้ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิดเชื่อมติดกันซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 34 mm ความหนา 1.2 mm และมีความยาวรวม 600 mm ซึ่งส่วนปลายมีความยาว 100 mm ใช้วัสดุเป็นอลูมิเนียมเกรด AL5083-O และส่วนที่เหลือมีความยาว 500 mm ใช้วัสดุเป็นเหล็กเกรด SS400 ข้อเสนอแนะจากการงานวิจัยนี้พบว่ารูปแบบของตัวลดทอนแรงกระแทกนี้ถูกออกแบบสำหรับการชนของวัตถุที่มีน้ำหนัก 1,400 kg และความเร็วมาตรฐาน EN 1789:2020 เท่านั้น สำหรับงานวิจัยในอนาคตยังสามารถนำวิธีการวิจัยนี้ไปพัฒนาตัวลดทอนแรงกระแทกในโครงสร้างทดสอบการชนของวัตถุที่มีความเร็ว น้ำหนัก ตามมาตรฐานแบบอื่น ๆ หรือนำแนวคิดไปออกแบบโครงสร้างดูดซับแรงกระแทกในรถยนต์ เป็นต้น

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (สัญญาเลขที่ Res-CIT0293/2022)

9. เอกสารอ้างอิง

- European Committee for Standardization (CEN). 2020. Medical Vehicles and Their Equipment - Road Ambulances Standard EN 1789:2020.
- Abramowicz, W. and Jones, N. 1986. Dynamic Progressive Buckling of Circular and Square Tubes. *International Journal of Impact Engineering* 4(4): 243–70.
- Abramowicz, W. and Norman J. 1984. Dynamic Axial Crushing of Circular Tubes. *International Journal of Impact Engineering* 2(3): 263–81. doi: 10.1016/0734-743X(84)90010-1.
- Ferdynus, M., Kotełko, M., and Kral, J. 2018. Energy Absorption Capability Numerical Analysis of Thin-Walled Prismatic Tubes with Corner Dents under Axial Impact. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 20(2):252–89. doi: 10.17531/ein.2018.2.10.
- Feng, Y., Xiao, S., Yang, B., Zhu, T., Yang, G., & Zhu, Z. 2018. Dynamic Constitutive Relation of 5083P-O Aluminium Alloy and Its Influence on Energy-Absorbing Structure. *Advances in Mechanical Engineering* 10(10): 1–13. doi: 10.1177/1687814018807334.
- Yang, C., Li, D., Zhu, T., and Xiao, S. 2016. Special Dynamic Behavior of an Aluminum Alloy and Effects on Energy Absorption in Train Collisions. *Advances in Mechanical Engineering* 8(5):1–9. doi: 10.1177/1687814016649527.
- Marzbanrad, J. A. V. A. D., and Keshavarzi, A. 2014. A Numerical and Experiment Study on the Crash Behavior of the Extruded Aluminum Crash Box with Elastic Support. *Latin American Journal of Solids and Structures* 11: 1329–48.
- Santosa, S., and Wierzbicki, T. 1998. Crash Behavior of Box Columns Filled with Aluminum Honeycomb or Foam. *Computers and Structures* 68(4): 343–67. doi: 10.1016/S0045-7949(98)00067-4.
- Ghasemnejad, H., Hadavinia, H., Marchant, D., & Aboutorabi, A. 2008. Energy Absorption of Thin-Walled Corrugated Crash Box in Axial Crushing. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring* 4(1): 29–45. doi: 10.3970/sdhm.2008.004.029.
- Yang, L., Yue, M., Li, Z., Shen, T., & Chongqing postdoctoral research project. 2020. An Investigation on the Energy Absorption Characteristics of a Multi-Cell Hexagonal Tube under Axial Crushing Loads. *PLoS ONE* 15(6). doi: 10.1371/journal.pone.0233708.
- Segade, A., López-Campos, J. A., Fernández, J. R., Casarejos, E., & Vilán, J. A. 2016. Finite Element Simulation for Analysing the Design and Testing of an Energy Absorption System. *Materials*

- 9(8): 1–13. doi: 10.3390/ma9080660.
- Vettorello, A., Campo, G. A., Goldoni, G., and Giacalone, M. 2020. Numerical-Experimental Correlation of Dynamic Test of a Honeycomb Impact Attenuator for a Formula Sae Vehicle. *Metals* 10(5). doi: 10.3390/met10050652.
- Song, X., Sun, G., and Li, Q. 2016. Sensitivity Analysis and Reliability Based Design Optimization for High-Strength Steel Tailor Welded Thin-Walled Structures under Crashworthiness. *Thin-Walled Structures* 109:132–42. doi: 10.1016/j.tws.2016.09.003.
- Wang, D., Zhang, S., Wang, C., and Zhang, C. 2018. Structure-Material-Performance Integration Lightweight Optimisation Design for Frontal Bumper System. *International Journal of Crashworthiness* 23(3):311–27. doi: 10.1080/13588265.2017.1317468.
- Pawlus, W., Robbersmyr, K. G., and Karimi, H. R. 2011. Mathematical Modeling and Parameters Estimation of a Car Crash Using Data-Based Regressive Model Approach. *Applied Mathematical Modelling* 35(10):5091–5107. doi: 10.1016/j.apm.2011.04.024.
- Deac, S. C., Perescu, A., Simoiu, D., Nyaguly, E., Crăștiu, I., and Bereteu, L. 2018. Modeling and Simulation of Cars in Frontal Collision. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 294(1). doi: 10.1088/1757-899X/294/1/012090.
- Gokhale, N. S. 2008. Practical finite element analysis. Finite to infinite.
- Liu, Y. 2008. ANSYS and LS-DYNA Used for Structural Analysis. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology* 1(1): 31–44. doi: 10.1504/IJCAET.2008.021254.