

การออกแบบชิ้นส่วนจุดจับแรงกระแทกด้านหน้ารถด้วยวัสดุที่อะลูมิเนียม  
เสริมโพลีเอทิลีนโฟมสำหรับรถโดยสารสาธารณะ



นายศรานนท์ สาเมะบงา

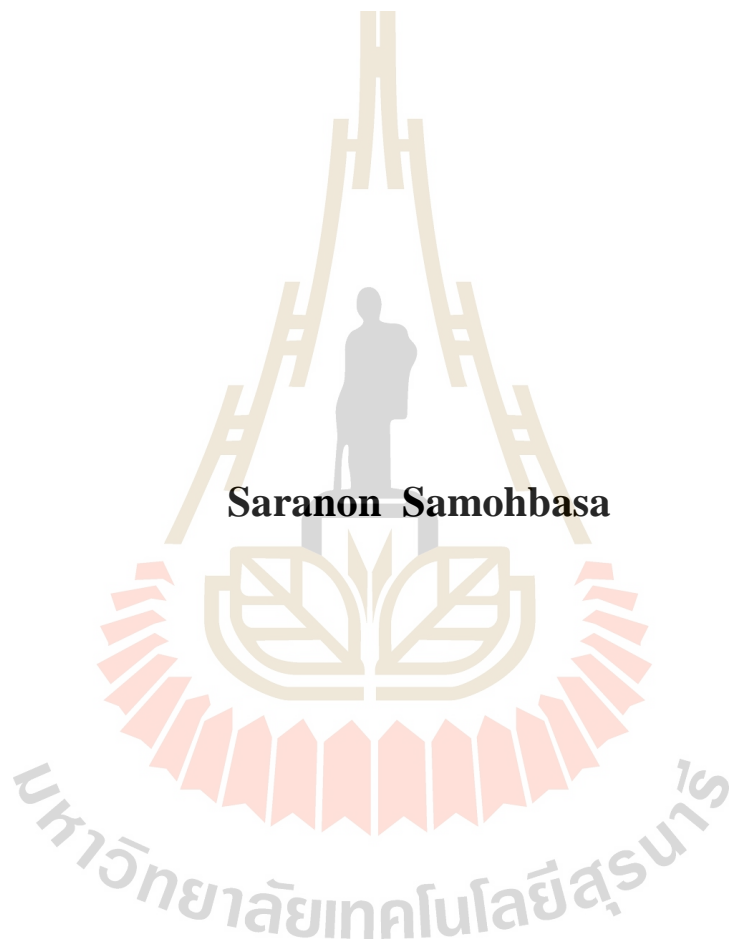
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2561

**THE DESIGN OF FRONTAL BUMPER COMPONENT  
USING POLYURETHANE FOAM-FILLED ALUMINUM  
TUBE MATERIAL FOR PASSENGER BUS**



**Saranon Samohbasa**

**A Thesis submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Master of Engineering in Manufacturing Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2018**

การออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถด้วยวัสดุท่ออะลูมิเนียมเสริม  
โพลียูรีเทนโฟมสำหรับรถโดยสารสาธารณะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
\_\_\_\_\_

(นายเสฏฐวรธร สุจริตภวัตสกุล)

ประธานกรรมการ

  
\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.สุกกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

  
\_\_\_\_\_

(อ. ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

  
\_\_\_\_\_

(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)  
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ  
และพัฒนาความเป็นสากล

  
\_\_\_\_\_

(รศ. ร.อ. ดร.กนดัชร ชานีประศาสน์)  
คณบดีสำนักวิศวกรรมศาสตร์

ศรานนท์ สามะบาศา : การออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถด้วยวัสดุท่อ  
อะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟมสำหรับรถโดยสารสาธารณะ (THE DESIGN OF  
FRONTAL BUMPER COMPONENT USING POLYURETHANE FOAM-FILLED  
ALUMINUM TUBE MATERIAL FOR PASSENGER BUS) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์, 72 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแรงกระแทกของวัสดุท่อ  
อะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟมสำหรับใช้ออกแบบชิ้นส่วนรับแรงกระแทกด้านหน้าโครงสร้าง  
ของรถโดยสารตามมาตรฐานความปลอดภัยที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรป  
แห่งสหประชาชาติ โดยมุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของค่าความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม และ  
จำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมซึ่งอยู่ภายใต้ภาระแรงกดในแนวแกนต่อสมรรถนะทางกล ได้แก่  
ค่าพลังงานดูดซับ แรงสูงสุด-ต่ำสุด และแรงเฉลี่ยรวมไปถึงประสิทธิภาพการชนกระแทก  
ในการศึกษาได้ทำการออกแบบและวิเคราะห์แบบจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีชื่อว่า  
ANSYS Workbench LS-DYNA ผลการศึกษาพบว่าอิทธิพลจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของ  
โพลียูรีเทนโฟมนั้นส่งผลต่อค่าพลังงานดูดซับและประสิทธิภาพการชนกระแทก กล่าวคือในกรณี  
ที่ท่ออะลูมิเนียมไม่มีการรีดลอนที่ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร  
จะมีค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงสุดเท่ากับ 12.31 กิโลจูล และประสิทธิภาพการชน  
กระแทกเท่ากับ 78.04 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่การเพิ่มจำนวนลอนนั้นส่งผลให้ค่าความสามารถ  
ในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการชนกระแทกนั้นลดลง และเมื่อทำการวิเคราะห์  
แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้มีการยืนยันผลความถูกต้องด้วยการเปรียบเทียบกับ  
ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 17 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้  
ผลการออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกสำหรับโครงสร้างรถโดยสารพบว่า โครงสร้างยวบตัว  
สูงสุดลดลงจากโครงสร้างแบบเดิมเท่ากับ 45.56 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่  
นั่งผู้ขับขี่ไม่เกินค่าความเครียดเสียหายของวัสดุ และใช้เวลาในการสลายพลังงานลดลงจาก  
โครงสร้างแบบเดิมเท่ากับ 59 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่มีการติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกจำนวน  
5 ชิ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต  
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา ศตวรรษ  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [ลายมือ]



SARANON SAMOHBASA : THE DESIGN OF FRONTAL BUMPER  
COMPONENT USING POLYURETHANE FOAM-FILLED ALUMINUM  
TUBE MATERIAL FOR PASSENGER BUS. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. SUPAKIT ROOPPAKHUN, Ph.D., 72 PP.

POLYURETHANE FOAM/ENERGY ABSORPTION/ALUMINUM TUBE/  
CRASHING FORCE EFFICIENCY

The purpose of this research is to study the energy absorption behavior of aluminum tube reinforced with polyurethane foam used design energy absorb parts for front impact of passenger bus according to United Nations Economic Commission for Europe Regulation-29 (ECE R-29). This study focuses on the effect of polyurethane foam density and corrugated number of aluminum tube under axial compression to the mechanical performance including energy absorption, maximum-minimum force, mean force and crashing force efficiency. The design and analysis were performed using finite element software called ANSYS Workbench LS-DYNA. The finite element results revealed that the increase of polyurethane foam density effected to the energy absorb as well as crashing force efficiency. The aluminum tube model without corrugated with the polyurethane foam density of 200 kilograms per cubic meter displayed the maximum energy absorption of 12.31 kilo Joule and crashing force efficiency of 78.04 percent. While the increase of the number corrugated on aluminum tube contributed to the decrease of the energy absorb and crashing force efficiency. According to the verification, the finite element result was then compared to the laboratory testing and the maximum error value displayed of 17 percent. The design of energy absorption component for front structure of passenger bus revealed that



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาด้วยการให้คำปรึกษาในด้านวิชาการและแนวทางการแก้ปัญหาในการดำเนินงานวิจัยจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคุณเสฏฐวรินทร์ สุจริตภักดี และอาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในการให้คำแนะนำสำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ บริษัท อู๋เซคซัยอุตสาหกรรม จำกัด ในการอนุเคราะห์ข้อมูลและการเตรียมชิ้นทดสอบสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณครอบครัว ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านจนประสบความสำเร็จในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ศรานนท์ สาเมะบาชา



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการสิทธิมนุษยชนยุโรปแห่งสหประชาชาติ.....	4
2.1.1 วิธีการทดสอบการกระแทกด้านหน้า.....	4
2.2 หลักการพื้นฐานการดูดซับพลังงาน.....	6
2.2.1 พลังงานย้อนกลับไม่ได้.....	6
2.2.2 ช่วงชน.....	6
2.2.3 รูปแบบการเสียรูปเสถียรและสามารถทำซ้ำได้.....	7
2.2.4 พารามิเตอร์สำคัญในการพิจารณา.....	7
2.3 สมบัติทางกลของวัสดุ.....	8
2.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์วัสดุในอุดมคติ.....	9
2.4 ระเบียบวิธีพลังงานสำหรับการเสียรูปแบบพลวัต.....	11
2.5 อัตราความเครียด.....	12

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	การดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง.....	13
2.7	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	14
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.8.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบสมบัติวัสดุ.....	16
2.8.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์.....	18
<b>3</b>	<b>ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย</b>	
3.1	กล่าวนำ.....	22
3.2	การทดสอบสมบัติวัสดุ.....	23
3.2.1	การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง.....	23
3.2.2	การทดสอบแรงดึง.....	23
3.2.3	การเตรียมชิ้นทดสอบแรงกด.....	24
3.2.4	การทดสอบแรงกด.....	25
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์.....	26
3.3.1	การทดสอบการเสีรูปร่างของท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทน โฟม.....	26
3.3.2	การวิเคราะห์แบบจำลองการเสีรูปร่างและการดูดซับพลังงานของท่ออะลูมิเนียม.....	28
3.4	การวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก.....	30
3.4.1	การออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก.....	30
3.4.2	การวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก.....	31
3.5	การวิเคราะห์การชนกระแทกด้านหน้ารถโดยสาร.....	33
3.5.1	การกำหนดสมบัติวัสดุ.....	34
3.5.2	การกำหนดเอลิเมนต์.....	35
3.5.3	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส.....	35
3.5.4	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	35
<b>4</b>	<b>ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล</b>	
4.1	กล่าวนำ.....	37
4.2	ผลการทดสอบค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุ.....	37



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมิเนียม .....	37
4.2.2	ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุโพลีเอทิลีน โฟม .....	39
4.3	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ .....	41
4.3.1	การเสียรูปของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียม .....	41
4.4	การวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนคูดซับแรงกระแทก .....	43
4.4.1	การเปรียบเทียบความสามารถในการคูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการ ชนกระแทก .....	49
4.5	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม .....	50
4.5.1	การเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสาร .....	51
4.5.2	ความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร .....	51
4.5.3	ความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร .....	52
4.5.4	ความเครียด ณ ตำแหน่งที่นั่งผู้ขับขี่ .....	53
4.5.5	พลังงาน .....	53
4.6	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนคูดซับแรง กระแทก .....	54
4.6.1	การเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสาร .....	55
4.6.2	ความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร .....	56
4.6.3	ความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร .....	56
4.6.4	ความเครียด ณ ตำแหน่งที่นั่งผู้ขับขี่ .....	57
4.6.5	พลังงาน .....	58
<b>5</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	59
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	60
	รายการอ้างอิง .....	61
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	63
	ประวัติผู้เขียน .....	72

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 .....23
4.1	ผลการทดสอบและวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ..... 43
4.2	การเสีรูปของแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ..... 44
4.3	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์..... 49

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าตามข้อกำหนด ECE R-29 .....5
2.2	การติดตั้งโครงสร้างรถเพื่อทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า.....5
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างและตัวแปรต่างๆ .....8
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดภายใต้ภาระกรรมแรงดึง.....9
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในอุดมคติภายใต้ภาระกรรมแรงดึง ..... 10
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในอุดมคติในช่วงการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่น ภายใต้ภาระกรรมแรงดึง..... 11
2.7	รูปแบบของเอลิเมนต์ชนิดต่างๆ ..... 15
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....22
3.2	ขั้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E-8.....23
3.3	การติดตั้งขั้นทดสอบแรงดึง .....24
3.4	ขนาดขั้นทดสอบโพลียูรีเทนโฟมตามมาตรฐาน ISO 844.....25
3.5	เครื่องทดสอบ INSTRON 5582 100 kN .....26
3.6	ท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น $50 \text{ kg/m}^3$ .....27
3.7	การติดตั้งหัวกดสำหรับการทดสอบแรงกด.....27
3.8	การตั้งค่าโปรแกรมสำหรับการทดสอบแรงกด .....28
3.9	แบบจำลองวิเคราะห์การเสียรูปของท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟม.....29
3.10	รายละเอียดการออกแบบท่ออะลูมิเนียม .....31
3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงแบบไอโซทรอปิกเชิงหลายเส้นของ วัสดุอะลูมิเนียม .....32
3.12	แบบจำลองโครงสร้างส่วนหน้ารถโดยสารมินิบัส .....34
3.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแบบ bilinear Isotropic Hardening ของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400.....35
3.14	เงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสาร .....36
4.1	ขั้นทดสอบอะลูมิเนียมหลังจากการทดสอบแรงดึง .....37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุอะลูมิเนียม.....	38
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุอะลูมิเนียม.....	39
4.4 ชิ้นทดสอบโพลีเอทิลีน โฟมหลังการทดสอบ.....	39
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุโพลีเอทิลีน โฟมที่ความ หนาแน่นต่าง ๆ.....	41
4.6 การเสียรูปของการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม.....	42
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของ การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วย โปรแกรม .....	42
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการ รีดลอน .....	45
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการรีดลอน .....	45
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 2 ลอน .....	46
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 2 ลอน .....	46
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 3 ลอน .....	47
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 3 ลอน .....	47
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 4 ลอน .....	48
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 4 ลอน .....	48
4.16 แผนภาพการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลอง .....	50
4.17 แผนภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชนกระแทกของแบบจำลอง .....	50
4.18 แผนภาพการเสียรูปของ โครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม .....	51
4.19 แผนภาพความเค้นของ โครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม .....	52
4.20 แผนภาพความเครียดของ โครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม .....	52
4.21 แผนภาพความเครียดที่เกิดขึ้นของที่นั่งผู้ขับขี่ .....	53

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของ โครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม.....	54
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกที่จำนวนต่าง ๆ.....	55
4.24 แผนภาพการเสียรูปของ โครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก.....	55
4.25 แผนภาพความเค้นของ โครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก .....	56
4.26 แผนภาพความเครียดของ โครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก.....	57
4.27 แผนภาพความเครียดที่เกิดขึ้นของที่นั่งผู้ขับขี่หลังติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก .....	57
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของ โครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก .....	58





## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ECE R-29	=	ข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ
$MCR$	=	สัดส่วนการยุบตัวสูงสุด
$H$	=	ความหนาเดิมของโครงสร้างที่ถูกชน
$\Delta_{max}$	=	ระยะกอดัดสูงสุด
$E_a$	=	ค่าการดูดซับพลังงาน
$P_{mean}$	=	ค่าภาระแรงเฉลี่ย
$s$	=	ระยะการยุบตัว
$P$	=	ภาระแรงตลอดการยุบตัว
$E_s$	=	ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ
$mass$	=	มวลของโครงสร้าง
$E$	=	ค่าโมดูลัสของยัง
$v$	=	สัดส่วนของบิวส์ซง
$Y$	=	ความเค้นคราก
$\varepsilon_y$	=	ความเครียดคราก
$\sigma_u$	=	ความเค้นแรงดึงสูงสุด
$\sigma_f$	=	ความเค้นเสียหาย
$\varepsilon_f$	=	ความเครียดเสียหาย
$K$	=	โมดูลัสความแข็ง
$q$	=	เลขชี้กำลังความแข็ง

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอัตราการเกิดอุบัติเหตุทางท้องถนนของรถโดยสารได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะจากรถโดยสารขนาดใหญ่ซึ่งมีอัตราการเกิดอุบัติเหตุเป็นอันดับ 2 รองจากรถตู้ ซึ่งสถิติจากเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม 2558 มีการเกิดอุบัติเหตุทั้งสิ้น 104 ครั้ง มีผู้ได้รับบาดเจ็บทั้งสิ้น 1,528 ราย และมีผู้เสียชีวิตทั้งสิ้น 82 ราย โดยสาเหตุที่แสดงในสถิติเกี่ยวข้องกับการชนกระแทกด้านหน้า เช่น ชนสิ่งกีดขวาง ตัดหน้าระยะกระชั้นชิด และอื่น ๆ ประมาณร้อยละ 68 ของอุบัติเหตุทั้งหมด (อ้างอิงจาก กองบังคับการตำรวจจราจร (2557) สถิติการเกิดอุบัติเหตุจราจรทางบกในเขตพื้นที่สำนักงานตำรวจแห่งชาติ) ดังนั้นหากมีการออกแบบโครงสร้างให้มีความแข็งแรงและมีความปลอดภัยพอ ก็อาจช่วยลดความเสียหายลงได้ไม่มากนัก

ทั้งนี้กระบวนการออกแบบและผลิตโครงสร้างรถโดยสารในประเทศไทยนั้น พบว่ายังขาดแคลนเทคโนโลยีการออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง โครงสร้างรถโดยสารมีน้ำหนักไม่เหมาะสม ขาดความน่าเชื่อถือ ตลอดจนไม่ได้มาตรฐานความปลอดภัย ซึ่งหน่วยงานของภาครัฐโดยกรมการขนส่งทางบก ได้เข้ามามีบทบาทในการวางแผนทางเพื่อกำหนดมาตรฐานการผลิตและการทดสอบรถโดยสาร เรียกว่า มาตรฐานความปลอดภัยของรถโดยสารสาธารณะ โดยจะถูกบังคับใช้ในปี 2558 (สุริยัน ปัญญาไว, 2557) ความสำคัญส่วนหนึ่งของเนื้อหาเน้นที่เรื่องความแข็งแรงโครงสร้างในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุภายใต้เงื่อนไขการชนกระแทกด้านหน้า อ้างอิงการทดสอบจากข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรป แห่งสหประชาชาติ (United Nations Economic Commission for Europe Regulation-29, ECE R-29) อย่างไรก็ตามการทดสอบชนกระแทกโครงสร้างรถโดยสารจริงมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมก่อนการทดสอบภาคสนามจึงมีความสำคัญมาก เพื่อช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ส่งผลให้รถโดยสารมีความปลอดภัยเป็นไปตามมาตรฐานสากล

การออกแบบชิ้นส่วนสำหรับการดูดซับพลังงานและลดแรงกระแทกสำหรับรถโดยสาร ไม่ว่าจะเป็น การออกแบบชิ้นส่วนในรูปทรงต่าง ๆ หรือการออกแบบโดยใช้วัสดุผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานและลดน้ำหนักของชิ้นส่วนดูดซับพลังงาน ซึ่งวัสดุที่ได้รับการยอมรับในการนำมาทำชิ้นส่วนดูดซับพลังงานได้แก่ วัสดุอะลูมิเนียม โดยในงานวิจัยนี้ได้นำ

เทคนิคของวัสดุผสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงาน โดยการนำวัสดุท่ออะลูมิเนียมมาทำการเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่มีน้ำหนักเบาและมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง

ปัจจุบันการวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในทางวิศวกรรม โดยวิธีการดังกล่าวสามารถวิเคราะห์แบบจำลองปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้แบบแม่นยำตรง ตลอดจนช่วยลดข้อจำกัดในเรื่องการลองผิดลองถูกจากการทดสอบจริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้าโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่ตามมาตรฐานยุโรป ECE R-29 เพื่อเป็นแนวทางการออกแบบและวิเคราะห์ปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารเบื้องต้นก่อนการผลิตและทดสอบจริงต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและวิเคราะห์ชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้าโดยใช้วัสดุท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟมสำหรับใช้ในรถโดยสารสาธารณะตามข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบอิทธิพลของจำนวนลอนและความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมต่อคุณลักษณะเชิงกลในการดูดซับแรงกระแทกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.2.3 เพื่อทดสอบเปรียบเทียบยืนยันผลความถูกต้องการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ภายใต้เงื่อนไขกึ่งสถิตศาสตร์

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 วิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารมินิบัส (อ้างอิงข้อมูลจาก บริษัท อู่เจ็ดชัย อุตสาหกรรม จำกัด)

1.3.2 พิจารณาแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารส่วนหน้าที่มีผลภายใต้เงื่อนไขการทดสอบการกระแทกด้านหน้าตามข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ

1.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบอิทธิพลของจำนวนลอน 3 ค่า ได้แก่ 2, 3 และ 4 ลอน และความหนาแน่นของวัสดุโพลียูรีเทนโฟม 3 ค่า ได้แก่ 50, 100 และ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเดียวกัน เท่ากับ 1.62

1.3.4 สมบัติวัสดุของแบบจำลองได้มาจากผลการทดสอบสมบัติทางกลในห้องปฏิบัติการ และพิจารณาในรูปแบบไอโซทรอปิกเชิงหลายเส้น

1.3.5 การวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์แบบกึ่งสถิตศาสตร์และแบบพลวัต

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบ

1.4.2 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบและวิเคราะห์ให้ได้มาตรฐานก่อนการทดสอบจริง

1.4.3 เพื่อเพิ่มความปลอดภัยของรถโดยสารขนาดใหญ่ให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ



## บทที่ 2

### พิธีสนั้ววรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

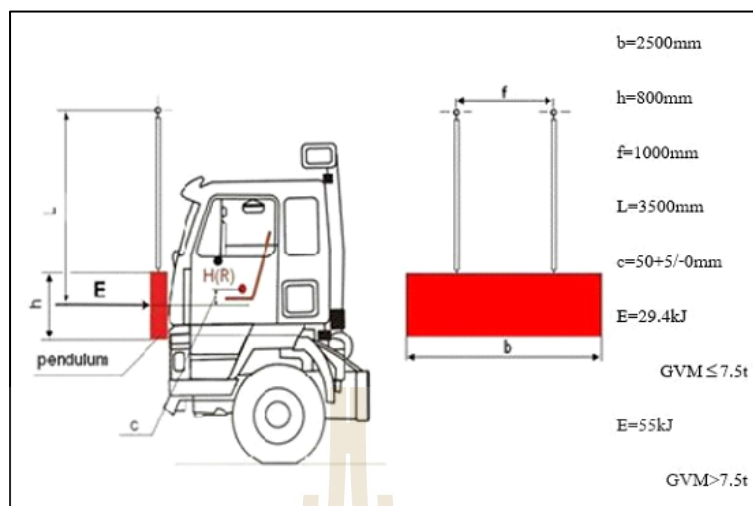
#### 2.1 ข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ

UNECE Information Document (2012) ข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ หรือ United Nations Economic Commission for Europe Regulation-29 หรือเรียกชื่อย่อว่า ECE R-29 เป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างส่วนหน้ายานพาหนะที่ใช้ขนส่งสินค้า เช่น รถพ่วง และรถบรรทุก ซึ่งไม่รวมถึงรถแทรกเตอร์และรถจักรกลเกษตร โดยพิจารณาความปลอดภัยของผู้โดยสารในพื้นที่โดยสารเมื่อยานพาหนะได้รับภาระการชนกระแทกด้านหน้า การใช้ข้อกำหนดการทดสอบนี้กับรถโดยสารขนาดใหญ่ได้ถูกระบุไว้ใน ECE R-29 ย่อหน้าที่ 2.2 “Vehicle type” ว่าสามารถใช้กับยานพาหนะที่มีขนาด รูปร่าง และวัสดุไม่แตกต่างกับยานพาหนะที่กล่าวมาข้างต้น หรือใช้กับยานพาหนะที่มีพื้นที่โดยสารประกอบเข้ากับแชสซี วิธีการทดสอบในภาคผนวกที่ 3 ของ ECE R-29 มีทั้งหมด 3 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (test A) ความแข็งแรงของหลังคา (test B) และความแข็งแรงของผนังด้านหลัง (test C) ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะขอกกล่าวเพียงวิธีการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (test A) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการทดสอบที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตขนส่งสินค้าหรือรถโดยสารขนาดใหญ่ต้องปฏิบัติตาม

##### 2.1.1 วิธีการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า

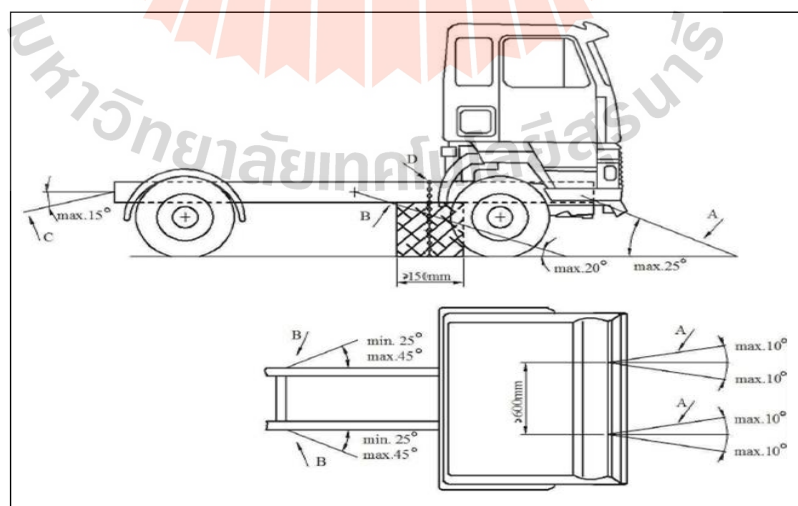
การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าดำเนินการโดยใช้ลูกตุ้มมวล  $1500 \pm 250$  กิโลกรัม ขนาดพื้นที่ชนกระแทกซึ่งเป็นรูปที่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 2500 มิลลิเมตร ยาว 800 มิลลิเมตร ที่มุมทั้งสี่มีรัศมีความโค้งไม่เกิน 1.5 มิลลิเมตร โดยลูกตุ้มถูกแขวนห่างจากคานเป็นระยะ 3500 มิลลิเมตร โดยวัดจากเส้นแนวแกนของคานถึงจุดศูนย์กลางมวลของลูกตุ้ม และจุดศูนย์กลางมวลอยู่ต่ำกว่าสะโพกผู้ขับขี่  $50+5-0$  มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เงื่อนไขการทดสอบ คือ โครงสร้างต้องได้รับพลังงานชนกระแทก 29.4 กิโลจูล สำหรับยานพาหนะที่มีมวลรวมไม่เกิน 7500 กิโลกรัม หรือโครงสร้างต้องได้รับพลังงานชนกระแทก 55.0 กิโลจูล สำหรับยานพาหนะที่มีมวลรวมมากกว่า 7500 กิโลกรัม





รูปที่ 2.1 การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าตามข้อกำหนด ECE R-29

การติดตั้งโครงสร้างรถเพื่อทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า ให้ใช้โซ่ซึ่งรับแรงได้ 10 ตัน ที่ฐานของโครงสร้างรองด้วยกลองไม้ยาวเท่ากับความกว้างของโครงสร้างรถด้านหน้า โครงสร้างรถยึดด้วยโซ่ทำมุมไม่เกิน  $25^\circ$  กับแนวระดับ และทำมุมกับแกนตามยาวของโครงสร้างรถไม่เกิน  $\pm 10^\circ$  เมื่อมองจากด้านบน ส่วนด้านข้างยึดด้วยโซ่ทำมุมไม่เกิน  $20^\circ$  กับแนวระดับ และทำมุมกับแกนตามยาวของโครงสร้างรถในช่วง  $25^\circ$  ถึง  $45^\circ$  เมื่อมองจากด้านบน และด้านท้ายยึดด้วยโซ่ทำมุมไม่เกิน  $15^\circ$  กับแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การติดตั้งโครงสร้างรถเพื่อทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า

## 2.2 หลักการพื้นฐานของการดูดซับพลังงาน

โครงสร้างธรรมดาที่ได้รับผลกระทบ เช่น โครงสร้างวิศวกรรมโยธา เครื่องจักรกล จะมีการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเพียงเล็กน้อย การออกแบบโครงสร้างเหล่านี้จึงต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเป็นหลัก ความเสียหายที่เกิดขึ้นมักมีสาเหตุเนื่องจากความล้าและการกัดกร่อนของวัสดุตามอายุการใช้งาน ในทางกลับกันการออกแบบโครงสร้างดูดซับพลังงาน (พลังงานจากการชนกระแทก) แตกต่างจากการออกแบบโครงสร้างธรรมดา ปัจจัยที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การเสียรูปแบบการตัดและยืดออก การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างเด่นชัด การต้านทานความเครียด อัตราความเครียด วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างดูดซับพลังงานคือวัสดุเหนียวจำพวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ อะลูมิเนียม ส่วนพวกที่ไม่ใช่โลหะ ได้แก่ พลาสติก โพลีเอทิลีน เหล่านี้เป็นวัสดุพื้นฐานที่สามารถดูดซับพลังงานได้ดี

จากการศึกษาทางวิศวกรรมเกี่ยวกับโครงสร้างดูดซับพลังงานและการเลือกวัสดุดูดซับพลังงาน ซึ่งเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น คือพลังงานจลน์หลังการชนบางส่วนหรือทั้งหมดเปลี่ยนสภาพไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นๆ หลักการพื้นฐานในที่นี้เสมือนว่ามีผู้โดยสารอยู่ในรถที่มีความเร็วที่พุ่งเข้าชนกำแพงแข็งเกร็ง โดยมีโครงสร้างดูดซับพลังงานติดตั้งที่ส่วนหน้าของรถสามารถสรุปเป็นหลักการพื้นฐานเพื่ออธิบายการกระจายพลังงานจลน์ได้ดังนี้

### 2.2.1 หลักการพลังงานย้อนกลับไม่ได้

เมื่อโครงสร้างหรือวัสดุได้รับพลังงานจลน์จะเปลี่ยนเป็นการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นหรือการกระจายในรูปแบบอื่น ๆ มากกว่าการสะท้อนกลับแบบยืดหยุ่น จึงกล่าวได้ว่าพลังงานจลน์ที่สททางเข้าชนไม่เปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ที่สททางพุ่งออกโดยสมบูรณ์

### 2.2.2 ช่วงชน

จากแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการชนคงที่และจำกัดงานที่เกิดจากแรงนั้นเท่ากับช่วงเวลาที่กระทำให้เกิดการยุบตัวสูงสุด กล่าวคือเมื่อถูกชนจะเกิดการยุบตัวเพียงหนึ่งจังหวะจนกระทั่งยุบตัวสูงสุด สัดส่วนการยุบตัวสูงสุด หรือ Maximum Compression Ratio-MCR ดังสมการ 2.1

$$MCR = \frac{\Delta_{\max}}{H} \quad (2.1)$$

โดยที่  $H$  คือ ความหนาเดิมของโครงสร้างในทิศทางที่ถูกชน  
 $\Delta_{\max}$  คือ ระยะกดอัดสูงสุด

ค่า MCR จะแปรผกผันกับความแข็งแรงของวัสดุ สามารถกล่าวได้ว่าเป็นพารามิเตอร์บ่งชี้ความต้านทานการกดอัดจำเพาะของวัสดุ โดยภาพรวมแล้ว MCR ของวัสดุของแข็ง โลหะและพอลิเมอร์ มีค่าไม่สูงเมื่อเทียบกับวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นโพรง เช่น ฮันนีคอมบ์ และโฟม

### 2.2.3 รูปแบบการเสียรูปเสถียรและสามารถทำซ้ำได้

โครงสร้างที่ออกแบบเพื่อดูดซับพลังงานควรมีขนาดการเสียรูป รูปร่างการเสียรูป ทิศทางและการกระจายพลังงานจนกระทั่งเสถียรและสามารถทำซ้ำได้ เพื่อรับภาระกรรมพลวัตที่ไม่เสถียร

### 2.2.4 พารามิเตอร์สำคัญในการพิจารณา

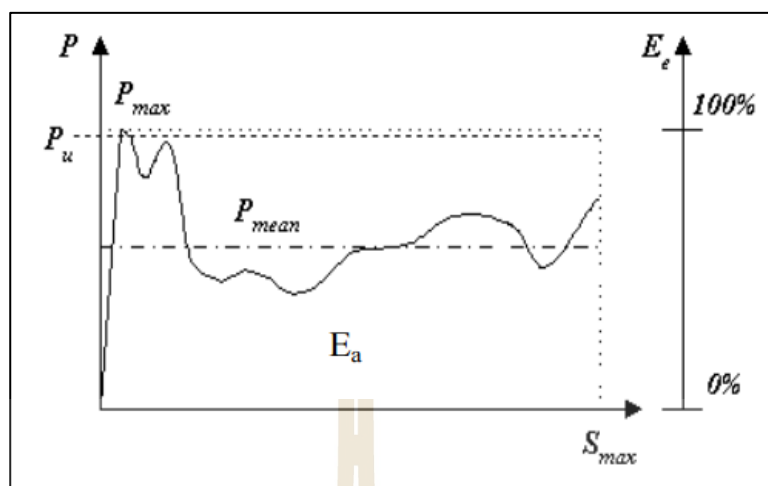
ตัวแปรและสมการที่ใช้อยู่ในการศึกษาเกี่ยวกับการต้านการเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชนนั้นมักศึกษาจากลักษณะของกราฟภาระและระยะยวบตัวของชิ้นงาน ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญหลายตัว ตัวแปรหลักที่สำคัญ ได้แก่ ภาระวิกฤติ (Critical load,  $P_{cr}$ ) หมายถึงภาระแรกที่กระทำทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายอย่างสังเกตเห็นได้ชัด ค่าการดูดซับพลังงาน ( $E_a$ ) ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ ( $E_s$ ) ค่าภาระเฉลี่ย ( $P_{mean}$ ) สำหรับการหาค่าพลังงานดูดซับและค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ตามลำดับ

$$E_a = \int Pds \approx P_{mean}s \quad (2.2)$$

โดยที่	$E_a$	คือ	ค่าการดูดซับพลังงาน
	$P_{mean}$	คือ	ค่าภาระเฉลี่ย
	$s$	คือ	ค่าระยะการยวบตัว
	$P$	คือ	ค่าภาระตลอดการยวบตัว

$$E_s = \frac{\int Pds}{mass} \approx \frac{P_{mean}s}{mass} \quad (2.3)$$

โดยที่	$E_s$	คือ	ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ
	$mass$	คือ	มวลของโครงสร้าง



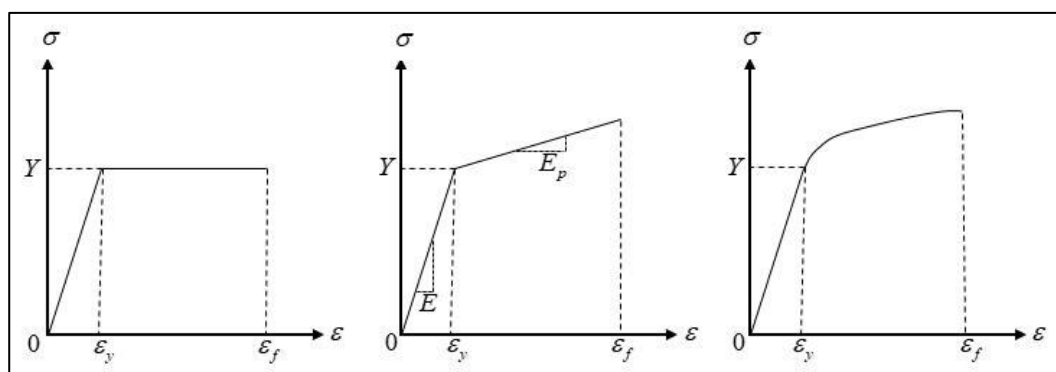
รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างและตัวแปรต่างๆ

### 2.3 สมบัติทางกลของวัสดุ

การทดสอบแรงดึงกระทำกับชิ้นทดสอบทรงกระบอกหรือแผ่นราบ แล้วสังเกตพฤติกรรม แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเหล็กเหนียว อลูมิเนียมและเส้นใยคอมโพสิต ดังรูปที่ 2.4 วัสดุวิศวกรรมโดยมากจะเสียรูปแบบยืดหยุ่นเมื่อได้รับแรงกระทำขนาดค่อนข้างเล็ก จากรูปที่ 2.4 มีวัสดุเพียงสองชนิดที่แสดงพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเป็นเชิงเส้น ได้แก่ เหล็กเหนียวและอลูมิเนียม ซึ่งความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดในช่วงนี้เรียกว่า โมดูลัสของยัง (Young's modulus - E) และอัตราส่วนระหว่างความเครียดตามขวางซึ่งมีค่าเป็นลบกับความเครียดแรงดึงตามยาวเรียกว่า สัดส่วนของปัวส์ซอง (Poisson's ratio -  $\nu$ ) สำหรับโลหะและพอลิเมอร์เมื่อได้รับภาระกรรมถึงระดับหนึ่งจะเกิดการคราก ซึ่งจุดที่แบ่งระหว่างช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นและการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นเรียกว่า ความเค้นครากก่อให้เกิดความเครียดครากในช่วงการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นของโลหะ จุดที่ได้รับภาระกรรมได้สูงสุดโดยไม่เปลี่ยนแปลงความหนาเรียกว่า ความเค้นแรงดึงสูงสุด ( $\sigma_u$ ) และเมื่อให้แรงกระทำต่อไปจะเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดจนขนาดในที่สุดจุดสุดท้ายนี้เรียกว่า ความเค้นเสียหาย ( $\sigma_f$ ) และความเครียดเสียหาย ( $\epsilon_f$ ) เมื่อวัสดุตกอยู่ภายใต้ภาระกรรมอื่น ๆ เช่น แรงกดอัดแรงเฉือน ก็จะแสดงพฤติกรรมทำนองเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น เพียงแต่ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องจะแตกต่างกันไป







(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในอุดมคติภายใต้ภาระกรรมแรงดึง

(ก) Elastic perfectly (ข) Plastic linear hardening และ (ค) Power hardening

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_y = Y/E \\ Y & \text{for } \varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_f \end{cases} \quad (2.4ก)$$

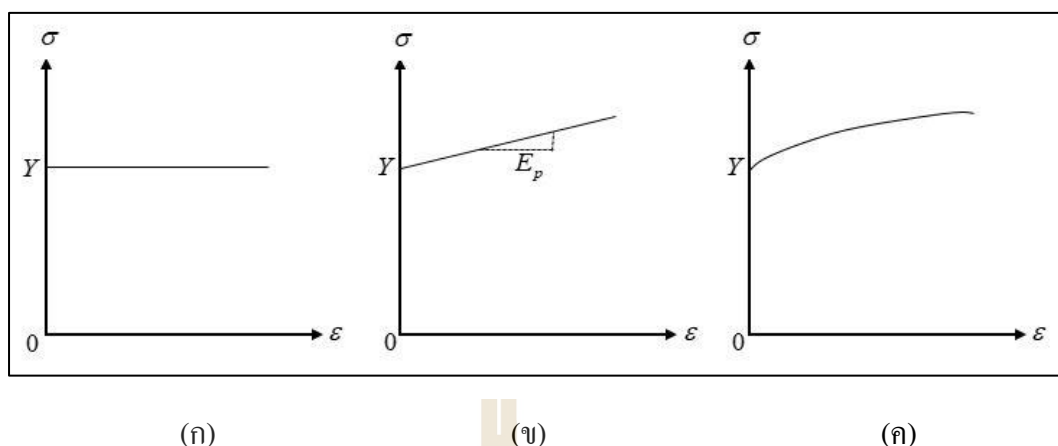
$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_y = Y/E \\ Y + E_p(\varepsilon - \varepsilon_y) & \text{for } \varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_f \end{cases} \quad (2.4ข)$$

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & \text{for } \varepsilon \leq \varepsilon_y = Y/E \\ Y + K(\varepsilon - \varepsilon_y)^q & \text{for } \varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_f \end{cases} \quad (2.4ค)$$

โดยที่  $\varepsilon_y$  คือ ความเครียดคราก  
 $E_p$  คือ โมดูลัสความแข็งแรงเชิงเส้น  
 $K$  คือ โมดูลัสความแข็งแรง  
 $q$  คือ เลขชี้กำลังความแข็งแรง

ถ้าตั้งเกณฑ์สมการ 2.4ข และ 2.4ค linear hardening เทียบกับ power hardening มีความคล้ายกัน กล่าวคือถ้า  $q=1$  และ  $K = E_p$  power hardening ก็จะกลายเป็น linear hardening

เมื่อวัสดุเกิดการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นที่ใหญ่กว่าการเสียรูปแบบยืดหยุ่นมากจนแทบจะไม่เห็นพฤติกรรมการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเลย เสมือนว่ากลายเป็นการเสียรูปแบบแข็งเกร็งแทน เรียกพฤติกรรมเหล่านี้ว่า rigid-perfectly plastic, rigid-linear plastic และ rigid-power plastic แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในอุดมคติในช่วงการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นภายใต้ภาระกรรมแรงดึง (ก) rigid-perfectly plastic (ข) rigid-linear hardening และ (ค) rigid-power hardening

สามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 2.5

$$\begin{cases} \sigma \leq Y & \text{for } \epsilon = 0 \\ \sigma = Y & \text{for } 0 < \epsilon < \epsilon_f \end{cases} \quad (2.5ก)$$

$$\begin{cases} \sigma \leq Y & \text{for } \epsilon = 0 \\ \sigma = Y + E_p \epsilon & \text{for } 0 < \epsilon < \epsilon_f \end{cases} \quad (2.5ข)$$

$$\begin{cases} \sigma \leq Y & \text{for } \epsilon = 0 \\ \sigma = Y + K \epsilon^n & \text{for } 0 < \epsilon < \epsilon_f \end{cases} \quad (2.5ค)$$

## 2.4 ระเบียบวิธีพลังงานสำหรับการเสียรูปแบบพลาสติก

ในกรณีการเสียรูปแบบพลาสติกเนื่องจากแรงภายนอกโดยกำหนดช่วงเวลากระทำ การคำนวณพลังงานจลน์ของโครงสร้างโดยสมมูลพลังงาน ดังสมการที่ 2.6

$$E_{in} = D + W^e + K \quad (2.6)$$

โดยที่  $E_{in}$  คือ งานเนื่องจากแรงกระทำ  $F(t)$   
 $D$  คือ พลังงานกระจายเนื่องจากการเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่นเกิดจากการตัดการเสียรูปที่ผิว ความฝืด และการแตกหัก

$W^e$  คือ งานที่ถูกกระทำในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น  
 $K$  คือ พลังงานจลน์ของโครงสร้าง

ถ้าช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นเกิดขึ้นน้อยจนสามารถประมาณได้ว่าไม่เกิดขึ้น เช่น การชนกันของวัตถุแข็งเกร็งสองชิ้น จะสามารถแสดงสมการได้ดังสมการที่ 2.7

$$E_{in} = D + W^e + K \quad (2.7ก)$$

$$K_o = \frac{1}{2} m_1 v_o^2 \quad (2.7ข)$$

$$K_{loss} = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} v_o^2 \quad (2.7ค)$$

โดยที่  $K_o$  คือ พลังงานจลน์สูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้  
 $K_{loss}$  คือ พลังงานจลน์สูญเสีย ( $0 < K_{loss} < K_o$ )  
 $m_1 / m_2$  คือ มวลที่พุ่งเข้าชน/มวลที่ถูกพุ่งชน  
 $v_o$  คือ ความเร็วต้น

## 2.5 อัตราความเครียด

อัตราความเครียด ( $\dot{\epsilon}$  - strain rate) คือการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อเวลาที่เปลี่ยนไป แสดงได้ดังสมการที่ 2.8

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{l - l_o}{l_o} \right) = \frac{1}{l_o} \frac{dl}{dt} = \frac{v}{l_o} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\dot{\epsilon}$  คือ อัตราความเครียด  
 $l$  คือ ความยาวโครงสร้างภายใต้ภาวะความเค้น  
 $l_o$  คือ ความยาวเดิมของโครงสร้าง  
 $v$  คือ ความเร็วที่ทำให้เสียรูป

## 2.6 การดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง

การดูดซับพลังงาน คือ ความสามารถของชิ้นส่วน โครงสร้างที่ทำหน้าในการดูดซับพลังงานจลน์ที่มากระทำกับ โครงสร้างให้เบาบางหรือลดลงน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้โครงสร้างหลักเกิดความเสียหาย ดังนั้นในการหาค่าการดูดซับพลังงานภายใน โครงสร้างสามารถหาได้จากกฎสมดุลกำลังงาน (power balance) กล่าวว่่า “กำลังงานภายนอกที่มากระทำเท่ากับกำลังงานภายในตัวดูดซับพลังงาน” ดังสมการที่ 2.9 และสมการ 2.10

$$\dot{E}_{ext} = \dot{E}_{int} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $\dot{E}_{ext}$  คือ พลังงานภายนอก

$$\dot{E}_{ext} = F \dot{u} + M \dot{\varphi} \quad (2.10)$$

โดยที่  $F$  คือ แรงภายนอก

$M$  คือ โมเมนต์

$u$  คือ ความเร็วเคลื่อนที่ตามแนวแกน

$\varphi$  คือ ความเร็วเชิงมุมของแกนหมุน

สำหรับกำลังงานภายในตัวดูดซับพลังงาน  $\dot{E}_{int}$  สามารถหาได้โดยสมมติว่ากำลังงานภายในตัวดูดซับพลังงานจะเกิดขึ้นตามเส้นการพับตัว (hinge line) ของตัวดูดซับพลังงานเท่านั้น ดังสมการที่ 2.11

$$\dot{E}_{int} = \int_a (M_{\alpha\beta} \dot{K}_{\alpha\beta} + N_{\alpha\beta} \dot{\varepsilon}_{\alpha\beta}) ds + \sum_{i=1}^n \int_l M_n^i [\dot{\varphi}_i] dl^i \quad (2.11ก)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนทั้งหมดของเส้นการพับตัว

$s$  คือ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับพลังงาน

$l$  คือ ความยาวของเส้นการพับตัว

$\varphi$  คือ ความเร็วเชิงมุมของเส้นการพับตัว

$\dot{K}_{\alpha\beta}$  คือ อัตราการหมุน

$\dot{\varepsilon}_{\alpha\beta}$  คือ อัตราการยืด

$M_{\alpha\beta}$  คือ โมเมนต์คัต

$N_{\alpha\beta}$  คือ แรงยึด

$$\text{และ } M_n = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \frac{\sigma_0 t^2}{4} \quad (2.11\text{ข})$$

โดยที่  $M_n$  คือ โมเมนต์คัตบนระนาบความเครียดช่วงพลาสติก

$t$  คือ ความหนา

$\sigma_0$  คือ ความเค้นจุดคราก

## 2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

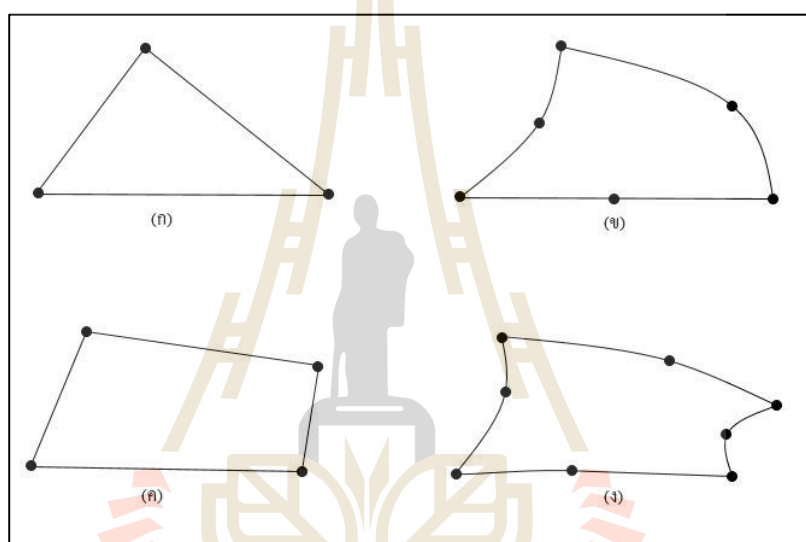
ในการแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรมจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขต หากแก้ปัญหาเพื่อหาค่าผลเฉลยแม่นยำ (exact solution) จะประกอบด้วยค่าตัวแปรต่าง ๆ บนรูปร่างของปัญหาซึ่งถ้ารูปร่างของปัญหาซับซ้อนจะทำให้มีตัวแปรจำนวนอนันต์ค่าและไม่สามารถหาค่าแม่นยำได้ จึงมีหลักการเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีจำนวนอนันต์เป็นค่าโดยประมาณที่สามารถนับได้ (finite) ด้วยหลักการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (element) โดยความแม่นยำของค่าผลเฉลยโดยประมาณนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหา นอกจากนี้ยังขึ้นกับการสมมติรูปแบบฟังก์ชันการประมาณภายใน (interpolation function) ที่ใช้กับเอลิเมนต์

ขั้นตอนการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลักได้แก่

1. ก่อนการประมวลผล (Pre-Processing)
2. หาคำตอบ (Solver)
3. แสดงผล (Post-Processing)
4. ออกแบบ (Redesign)

ขั้นตอนที่สำคัญที่สุด คือ ขั้นตอนก่อนการประมวลผลซึ่งประกอบด้วยเตรียมรูปร่างของปัญหา (geometry) จากนั้นจะแทนรูปร่างของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (element) ตามความเหมาะสมกับลักษณะปัญหา แล้วจึงกำหนดเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ เช่น วัสดุ (materials) เงื่อนไขการสัมผัส (contacts) และภาระกระทำ (loading) เมื่อเสร็จสิ้นจากขั้นตอนดังกล่าวแล้วจึงหาคำตอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และแสดงผลที่ได้จากการคำนวณ หลังจากนั้นอาจจะมีการออกแบบใหม่แล้วกระทำตามขั้นตอนเดิมอีกครั้งเมื่อต้องการปรับปรุงรูปร่างของปัญหา

การประมาณรูปร่างในระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เกิดจากการประกอบขอบเขตจำลองหลาย ๆ ชิ้นเข้าด้วยกัน ฟังก์ชันการเชื่อมต่อถูกกำหนดโดยจำนวนกับจุดต่อ (node) ในเอลิเมนต์ ยิ่งเอลิเมนต์มีจำนวนจุดต่อมากก็ยิ่งทำให้สามารถใช้เอลิเมนต์สร้างขอบเขตจำลองที่เหมือนกับขอบเขตจริงมาก แต่ก็ยังทำให้ฟังก์ชันเชื่อมต่อซับซ้อนมากขึ้น ในทางปฏิบัติเอลิเมนต์ที่นิยมใช้จะมีจำนวนจุดต่อไม่มากและมีฟังก์ชันการเชื่อมต่อที่ไม่ซับซ้อนเพื่อความสะดวกต่อการใช้ วิธีขอบเขตเอลิเมนต์ (boundary element) ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงเอลิเมนต์พื้นผิวเพียง 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 รูปแบบของเอลิเมนต์ชนิดต่างๆ (ก) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ  
(ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 6 จุดต่อ (ค) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ  
(ง) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ

1. เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ (3-node triangular element) เป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีด้านสามด้านเป็นเส้นตรง ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่จุดยอดสามจุดของรูป
2. เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 6 จุดต่อ (6-node triangular element) เป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีด้านสามด้านเป็นเส้นโค้งพาราโบลา โดยทั้ง 6 จุดต่ออาจจะไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่จุดยอดสามจุดของรูป และอีก 3 จุดต่อบนด้านทั้งสามด้าน
3. เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ (4-node quadrilateral element) เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีด้านสี่ด้านเป็นเส้นตรง ประกอบด้วย 4 จุดต่อที่จุดยอดสี่จุดของรูป

4. เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ (8-node quadrilateral element) เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีด้านสี่ด้านเป็นเส้นโค้งพาราโบลา โดยทั้ง 8 จุดต่ออาจจะไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน ประกอบด้วย 4 จุดต่อที่จุดยอดสี่จุดของรูป และอีก 4 จุดต่อบนด้านทั้งสี่ด้าน แต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ในรูปจะมีตัวเลขกำกับอยู่ ตัวเลขนี้เรียกว่า เลขที่จุดต่อเฉพาะ (local node number) ใช้อ้างอิงถึงจุดต่อในเอลิเมนต์ เลขที่จุดต่อเฉพาะนิยมเรียกทวนเข็มนาฬิกา

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ ECE R-29 โดยแบ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็นสองส่วน คือในส่วนของงานวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบเพื่อหาสมบัติเชิงกลของวัสดุ ดังต่อไปนี้

### 2.8.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบวัสดุ

นิรุต อ่อนสลุง (2017) ศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองต่อการดูดซับพลังงานของท่อไฟเบอร์กลาสที่เติมโพลีเอทิลีนภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน ชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาเป็นชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยระบบสุญญากาศ (Vacuum Infusion) ที่มีการเรียงทับซ้อนและมุมไขว้ที่แตกต่างกัน 5 รูปแบบ ได้แก่ ชิ้นงาน A มีมุมไขว้ [0/90/0/90] ชิ้นงาน B มีมุมไขว้ [90/0/90/0] ชิ้นงาน C มีมุมไขว้ [45/-45/45/-45] ชิ้นงาน D มีมุมไขว้ [90/0/45/-45] และชิ้นงาน E มีมุมไขว้ [45/45/90/0] ตามลำดับ ชิ้นงานขึ้นรูปจาก E-glass/polyester และถูกเติมโพลียูรีเทน (Polyurethane, PU) ความหนาแน่นคือ  $100 \text{ kg/m}^3$  ขนาดของท่อมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกคือ 47 มิลลิเมตร และมีความยาว 100 มิลลิเมตร ในการทดสอบชิ้นงานทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบการกระแทก (Vertical Impact Testing Machine) แบบตกกระแทกอิสระด้วยความเร็วที่  $6.26 \text{ m/s}$  ผลการศึกษาพบว่าชิ้นงาน E มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจำเพาะมากที่สุด นอกจากนี้ในบทความยังได้แสดงถึงรูปแบบและลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นอีกด้วย

ฐิติมา ตะสุวรรณ (2011) ศึกษาผลกระทบบขององค์ประกอบในพอลิเอทิลเรซิน เช่น อัตราส่วนระหว่าง Base polyol และ Co-polymer polyol ปริมาณ Crosslink, Surfactant, Gelling catalyst, Blowing catalyst และ Blowing agent ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของโพลียูรีเทนโฟม เช่น Cream time, Set time, End of rise และความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม ซึ่งค่าต่างๆเหล่านี้มีบทบาทที่สำคัญกับคุณสมบัติของโพลียูรีเทนโฟมได้ โดยจากการทดลองพบว่าปริมาณของ Base polyol และ Crosslink agent ทำให้ค่า Cream time, Set time และ End of rise มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งตรงข้ามกับ Co-polymer polyol, Gelling catalyst, Blowing catalyst และ Blowing agent แต่ Surfactant ส่งผลกับ rise time ของปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว โดยผลการผลิตโพลียูรีเทนโฟมให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวอย่าง ได้ค่าปฏิกิริยาดังนี้ คือ Cream time 13



วินาที, Set time 46 วินาที และ End of rise 64 วินาที โดยสูตรการผลิตโพลียูรีเทนโฟมจะใช้ ส่วนผสมของพอลิออลเรซิน 100 กรัม : ไอโซไซยาเนต 81.38 กรัม

Lorenzo, P. (2009) งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบเทคนิคการต่อขึ้นส่วน โครงสร้างที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการสลายพลังงานจากการกระแทก โดยใช้การ ทดสอบการกดขึ้นงานเพื่อวัดอัตราการสลายพลังงาน อีกทั้งยังพบว่ามีการศึกษาผลกระทบของการ เสียรูปแบบถาวรและสภาพแวดล้อมที่ประกอบไปด้วยการแพร่ผ่านคลื่นแบบยืดหยุ่นที่ส่งผล เสี่ยงต่อโครงสร้างดูดซับแรงกระแทกของรถยนต์

Miyazaki and Negishi (2003) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการดูดซับพลังงานของท่อ อลูมิเนียม JIS A6063-T5 หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งรับภาระกรรมกรชนกระแทกความเร็วต่ำใน แนวแกน ทดสอบด้วยเครื่องที่ก้อนมวล 7.92 กิโลกรัม ความเร็วปะทะขึ้นอยู่กับความสูงโดย เปรียบเทียบความเร็ว 1.4 2.8 3.7 5.4 และ 7.5 มิลลิเมตร/วินาที ขึ้นทดสอบมีความ ยาว 100 และ 150 มิลลิเมตร ความยาวด้านสี่เหลี่ยมจัตุรัส 40 มิลลิเมตร ความหนาของผนัง บาง 1 และ 1.5 มิลลิเมตร ขึ้นทดสอบถูกตีตารางไว้เพื่อเปรียบเทียบผลกับการจำลองทางไฟไนต์ เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ “Marc 2000” จากผลการศึกษาพบว่าความยาวของขึ้นทดสอบ ไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงาน ความสามารถในการดูดซับพลังงานแปรผกผันกับความหนาของผนัง บาง และขึ้นทดสอบที่มีความหนามากกว่าจะส่งคลื่นความเค้นไปสู่ด้านตรงข้ามบริเวณที่ถูกภาระ กรรมกระทำได้ดีกว่า จึงทำให้เกิดการโก่งตัวที่ฐานขึ้นทดสอบหนา 2 มิลลิเมตร ส่วนขึ้นทดสอบ หนา 1 มิลลิเมตร เกิดการโก่งตัวที่บริเวณกลางขึ้นงาน

Nirut Onsalung. (2010) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาเทคนิคต่างๆเพื่อเพิ่มการดูดซับ พลังงานด้วยมวลที่น้อยลง โดยใช้เทคนิคการเติมโฟมเข้ากับโครงสร้างท่อสี่เหลี่ยมที่มีความหนา 1x2 และ 2x2 นิ้ว โดยมีความหนาที่แตกต่างกันตั้งแต่ 1.2, 1.5 และ 1.8 มิลลิเมตร เติมด้วยโฟมที่ความ หนาแน่น 100, 200 และ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทดสอบโดยการกดในแนวแกนด้วย ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยผลที่ได้พบเห็นว่าโครงสร้างที่เติมโฟมที่ความหนาแน่น 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นั้นสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าโครงสร้างที่เติมโฟมที่ความ หนาแน่น 200 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แต่เมื่อคำนึงถึงมวลของโครงสร้างแล้ว โครงสร้างที่เติมโฟมที่ความหนาแน่น 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร นั้นมีความสามารถในการดูด ชับพลังงานที่เหมาะสมที่สุด

Brian J. Ramirez. (2019) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโพลียูรีเทนโฟม (PU) ที่ความ หนาแน่น 140-220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เพื่อดูพฤติกรรมความเค้นและความเครียด การดูดซับ พลังงาน และประสิทธิภาพการชนกระแทก โดยทำการทดสอบแบบกึ่งสถิตศาสตร์และแบบการกด กระแทกด้วยพลังงาน 5 และ 7 จูล โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASTM ทำการเปรียบเทียบกับ Ethylene

vinyl acetate (EVA) และ Thermoplastic polyurethane (TPU) ที่ความหนาแน่นเดียวกัน พบว่า PU มีประสิทธิภาพการชนกระแทกภายใต้การทดสอบกึ่งสถิตศาสตร์เพิ่มขึ้น 5 และ 30 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ TPU และ EVA ตามลำดับ และสามารถลดโหลดสูงสุดภายใต้การทดสอบแบบตกกระแทกเท่ากับ 28.6 และ 36.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับ TPU และ EVA ตามลำดับ

Ghasemnejed, H. (2008) งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบโครงสร้างคูดซับแรงกระแทกของรถยนต์ให้มีความสามารถในการรับแรงกระแทกให้มากที่สุดภายใต้เงื่อนไขความบางของวัสดุ อีกทั้งได้ทำการทดสอบกับวัสดุประเภทอะลูมิเนียมหลายชนิด เพื่อทำการเปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงกระแทก มากไปกว่านั้นรูปทรงแบบรังผึ้งถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ

Satosa, S. (1998) ได้นำเอารูปทรงรังผึ้งมาปรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างคูดซับแรงกระแทกของรถยนต์ โดยการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่ทำจากอะลูมิเนียมแผ่นบาง และ โครงสร้างที่ทำจากโฟม ซึ่งวัสดุทั้งสองมีคุณสมบัติที่คล้ายกันคือ น้ำหนักเบา ในขณะที่มีความสามารถสลายพลังงานจากการกระแทกได้ดี

Hakim, S. (2002) งานวิจัยนี้ได้มีแนวคิดที่จะนำเอาวัสดุผสมระหว่างไฟเบอร์กลาสและอีพอกซีมาขึ้นรูปเป็นลักษณะท่อเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรง ซึ่งวัสดุที่ได้ทำการขึ้นรูปขึ้นมานั้นจะถูกทำการทดสอบด้วยการอัดทำลายโดยใช้เครื่องทดสอบการอัดตัว นอกจากนี้ อะลูมิเนียมก็เป็นวัสดุที่มองข้ามไม่ได้ทางวิศวกรรม

## 2.8.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

Belingardi G and TekalignBeyene A. (2015) ในบทความนี้ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับรูปทรงของกันชนของรถ โดยใช้โปรแกรม ABAQUS ในการทดสอบแบบจำลอง โดยขั้นตอนแรกได้กำหนดรูปทรงของกันชนมาสี่ลักษณะ คือ รูปทรงแรกเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมคางหมู รูปทรงที่สองเพิ่มรอยหยักจากรูปทรงแรกหนึ่งรอย รูปทรงที่สามคือเพิ่มรอยหยักจากรูปทรงแรกสองรอย และรูปทรงสุดท้ายคือเพิ่มรอยหยักจากรูปแรกสามรอย แล้วใช้โปรแกรมวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงาน แล้วเลือกรูปทรงที่มีค่าการดูดซับพลังงานที่ดีที่สุดมาทำการปรับปรุงต่อไปซึ่งจากการวิเคราะห์รูปทรงที่มีค่าการดูดซับพลังงานดีที่สุดคือ รูปทรงที่สามคือรูปทรงที่เพิ่มรอยหยักจากรูปแรกสองรอย แล้วนำมาปรับแต่งรอยหยักของรูปทรงที่สามอีกสี่แบบคือ แบบที่ห้าให้รอยหยักหลังลึกกว่ารอยหยักด้านหน้า แบบที่หกคือให้รอยหยักด้านหน้าลึกกว่ารอยหยักด้านหลัง และแบบที่เจ็ดคือเพิ่มความหนาแน่นด้านหน้าของกันชน และแบบที่แปดคือเพิ่มความหนาแน่นด้านหลังของกันชน ซึ่งเปรียบเทียบแบบที่ห้ากับแบบที่หกพบว่าแบบที่ห้ามีค่าการดูดซับพลังงานที่ดีกว่า และทำการเปรียบเทียบแบบที่เจ็ดกับแบบที่แปดพบว่า แบบที่เจ็ดมีค่าการดูดซับพลังงานที่ดีกว่า แล้วนำรูปทรงทั้งสามที่มีค่าดีที่สุดมาเปรียบเทียบกันนั่นคือแบบที่สาม แบบที่ห้าและแบบที่เจ็ด พบว่าแบบที่เจ็ดมี

ค่าการดูดซับพลังงานที่ดีที่สุด จึงนำรูปทรงที่เจ็ดมาทำการปรับแต่งต่อไปคือนำมาปรับมุมความโค้งของกันชนซึ่งมุมรัศมี 3200 มิลลิเมตร มีค่าการดูดซับพลังงานดีที่สุด และขั้นตอนสุดท้ายคือนำมาเปลี่ยนวัสดุและกรรมวิธีการผลิตซึ่งมี Steel Fabric และ Pultruded ผลที่ได้คือ การใช้กรรมวิธี Pultruded ในการผลิตมีค่าการดูดซับพลังงานที่ใกล้เคียงกับอีกทั้งสองวัสดุ แต่มีค่า Peak Load ที่น้อยกว่าจึงเป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต

Marzbanrad et al. (2009) จำลองการดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกกึ่งสถิตและความเร็วต่ำของท่อผนังบางหน้าตัดสี่เหลี่ยม วงกลมและวงรี ของเหล็กและอลูมิเนียม เตรียมแบบจำลองสองมิติด้วยโปรแกรม “ANSYS” แล้ววิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ “LS-DYNA/Explicit” ความหนา ความยาวด้านสี่เหลี่ยมจัตุรัสและชนิดของวัสดุ เป็นตัวแปรต้นเพื่อศึกษาการดูดซับพลังงานเทียบกับผลการทดสอบของ (Aljawi, 2004) ซึ่งทดสอบการชนกระแทกกึ่งสถิต พบว่าเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวแตกต่างกันที่จุดยอดเริ่มแรก ประมาณ 17% แนวโน้มมีลักษณะคล้ายกัน ค่าเฉลี่ยความแตกต่างหลังจากจุดยอดเริ่มแรก ประมาณ 22% และรูปร่างการเสียรูปเหมือนกัน จากนั้นได้จำลองการชนกระแทกความเร็วต่ำของท่อผนังบางสามรูปแบบ โดยจำลองให้มวล 100 กิโลกรัม ชนกระแทกขึ้นทดสอบด้วยความเร็ว 9.396 เมตร/วินาที โดยชิ้นงานมีความหนา 1.5 มิลลิเมตรเท่ากัน พบว่าเกิดการพับเสียรูปที่ปลายทั้งสองของท่อ เปรียบเทียบความสามารถดูดซับพลังงาน ท่อหน้าตัดวงกลมและท่อหน้าตัดวงรีสูงกว่าท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมประมาณ 17% และ 33% ตามลำดับของท่อเหล็ก ในท่ออลูมิเนียม 33% และ 50% ตามลำดับ

Lee et al. (2010) ศึกษาพฤติกรรมการชนกระแทกความเร็วต่ำของกระป๋องน้ำอัดลม อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกับความหนา 1:20 ซึ่งเป็นอัตราส่วนโครงสร้างผนังบางของถังเอ็นจีวีและถังแก๊สหุงต้ม วัสดุที่ประกอบเป็นกระป๋องได้แก่ส่วนลำตัว 3004-19 และ ฝาบน 5182-19 เตรียมแบบจำลองด้วยโปรแกรม “ANSYS” และประมวลผลเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป “LS-DYNA” ใช้โอเลเมนต์สองมิติรูปสี่เหลี่ยม ส่วนการทดสอบใช้วิธีปล่อยมวล 7.5 kg ตกอย่างอิสระจากความสูง 7 feet จับภาพด้วยกล้องความเร็วสูง 3000 frame/second จากการศึกษาพบว่า ผลการจำลองและผลการทดสอบสอดคล้องกันเมื่อพิจารณารูปร่างการเสียรูปคือเกิดการดัดบริเวณส่วนบนสุดที่ได้รับภาระกระแทกโดยตรง เนื่องจากเป็นโครงสร้างผนังบางมากจึงส่งถ่ายคลื่นความเค้นไปสู่ส่วนล่างได้น้อย ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวเทียบกับเวลาที่ได้รับจากการทดสอบไม่เป็นเชิงเส้นเหมือนกับผลจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและใกล้เคียงกัน

Heung-Soo, K. (2002) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบของโครงสร้างดูดซับแรงกระแทกของรถยนต์โดยใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุ ด้วยเหตุผลจากความที่ต้องการเพิ่ม

ความสามารถในการสลายพลังงานจากการกระแทกภายใต้เงื่อนไขน้ำหนักของโครงสร้างที่ถูกจำกัด การออกแบบพื้นที่หน้าตัดให้เป็นแบบมัลติเซลล์หลากหลายรูปแบบจึงถูกนำมาศึกษาด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

Cerit et al. (2010) งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารส่วนหน้าภายใต้เงื่อนไขการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐานยุโรป ECE R-29 ด้วยการวิเคราะห์จำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโมเดลกันชนเดิมทรงกรวยและโมเดลกันชนที่ปรับปรุงทรงลูกฟูกโครงสร้างหน้าให้มีความสามารถดูดซับพลังงานขณะที่รับภาระกรรมการชนกระแทกด้านหน้า พบว่าทั้งสองโมเดลสามารถดูดซับพลังงานโดยการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นการโก่งเสียหายของโมเดลกันชนเอง แต่ไม่มีการเปรียบเทียบพลังงานดูดซับให้เห็น การดูดซับพลังงานถูกแสดงในรูปการเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสารและผู้ขับขี่ ซึ่งผู้ขับขี่จะได้รับอันตรายในโครงสร้างรถโดยสารที่ไม่มีโมเดลกันชน

Javad Marzbanrad (2009) ในงานวิจัยนี้กันชนหน้าทำจากวัสดุ 3 ชนิด คือ อะลูมิเนียม Glass mat thermoplastic (GTM) และ High-strength sheet molding compound (SMC) ศึกษาโดยการกระแทกจากแบบจำลองเพื่อหาการโก่งตัว แรงกระแทก การกระจายตัวของแรง และพฤติกรรมดูดซับพลังงานมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาวัสดุภายใต้เงื่อนไขการชนตามมาตรฐานที่ความเร็วต่ำของ Automotive stated in E.C.E. United Nations Agreement, Regulation no. 42, 1994 ส่วนโค้งและความหนาที่ดีที่สุด ผลปรากฏว่า SMC มีการโก่งตัวน้อย แรงกระแทก การกระจายตัวของแรง และความเครียดสูงในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น นอกจากนี้ผลกระทบต่อผู้โดยสารจากแรงกระแทกก็ถูกตรวจสอบด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีข้อดีอีกเช่นการผลิตรูปทรงง่าย ๆ โดยไม่ต้องมีส่วนเสริมแรง และในแง่ของการประหยัดคือใช้วัสดุผสมต้นทุนต่ำและลดน้ำหนักเนื่องจากสามารถทำจากวัสดุ SMC

Tai et al. (2010) ศึกษาพฤติกรรมและการดูดซับพลังงานการชนกระแทกความเร็วต่ำของท่อเหล็กผนังบางทรงกระบอกความแข็งแรงสูง ASTM E8-04 สมบัติวัสดุถูกจำลองด้วยสมการ Cowper-Symonds ซึ่งสมมติให้วัสดุมีพฤติกรรมแบบ rigid, perfectly plastic โดยตัวแปรต้นได้แก่ ประเภทวัสดุ ความยาว ความหนา เส้นผ่านศูนย์กลาง มวลที่เข้าชน และความเร็วเข้าชน วิเคราะห์เงื่อนไขขอบเขตเพื่อหาผลเฉลยเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ “LS-DYNA” พบว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงลักษณะของชิ้นทดสอบหลังการถูกชนกระแทกสามารถทำซ้ำได้แม้ว่าตัวแปรต้นจะเปลี่ยนแปลงไป แต่พลังงานดูดซับขึ้นอยู่กับขนาดและความเร็วของมวลที่เข้าชน และความหนาของวัสดุดูดซับพลังงาน

ศุภชัยและวรวิทย์ (2014) งานวิจัยนี้ได้ออกแบบโครงสร้างกันแรงกระแทกแบบกล่องสี่เหลี่ยม ลูกฟูกและรังผึ้ง เพื่อหาลักษณะทางกายภาพที่สามารถดูดซับแรงกระแทกด้วยวิธี

ไฟไนต์เอลิเมนต์โดยให้ระยะยวบตัวไม่เกินครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมด จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนวัสดุที่มีในท้องตลาด เช่น อลูมิเนียม อลูมิเนียมเสริมโพลีเมอร์ และเรซินเสริมไฟเบอร์กลาส ทดสอบทั้งแบบสถิตโดยการกดทดสอบที่ความเร็วการกดที่ 10 มิลลิเมตร/นาทีและพลวัตตามมาตรฐานสากล US NCAP และ ECE R-29 โดยจากผลการทดสอบพบว่าโครงสร้างดูดซับแรงกระแทกที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียมเสริมโพลีเมอร์สามารถดูดซับพลังงานต่อหน่วยมวลได้ 53.9 เมกกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งมากกว่าวัสดุอื่นและมีน้ำหนักที่เบากว่า ดังนั้นวัสดุอลูมิเนียมเสริมโพลีเมอร์จึงเป็นทางเลือกในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

สุภกิจและศราวุธ (2014) งานวิจัยนี้เป็นการจำลองพฤติกรรมการชนกระแทกด้านหน้าโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาพฤติกรรมของโครงสร้างเดิมเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ถูกติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับพลังงาน และมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์จากโปรแกรมด้วยการเทียบเคียงกับผลการทดลองการชนกระแทกของผนังบางโดยวิธีการใช้เครื่องทดสอบตกกระแทกที่ความสูง 116.85 เซนติเมตร หลังจากนั้นได้จำลองการทดสอบตามมาตรฐาน ECE R-29 โดยใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์โครงสร้างเดิม โดยไม่มีส่วนเสริมการดูดซับพลังงานพบว่ามีพลังงานตกค้างถึงหุ่นจำลองไม่เกินร้อยละ 30 ของพลังงานกระแทกทั้งหมด และเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับพลังงานที่มีหน้าตัดหกเหลี่ยมพบว่ามีความสามารถในการปกป้องผู้ขับขี่ได้ดีขึ้น

Babushankar Sambamoorthy (2001) งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบพฤติกรรมของโพลียูรีเทนโฟมโดยใช้โปรแกรม LS-DYNA เปรียบเทียบกับการทดสอบ โดยในการทดสอบใช้วิธีการทดสอบแรงกดเพราะในการใช้งานจริงจากการชนของรถ วัสดุจะได้รับแรงกด โดยวิธีการทดสอบขึ้นทดสอบมีความหนาแน่น 5 ปอร์นต่อฟุตที่ความหนา 18 และ 22 มิลลิเมตร ที่ความเร็วการกด 15 เมตรต่อชั่วโมง สำหรับการทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ต้องได้รับค่า Young's modulus Density และค่า Stress-Strain (จากการทดสอบสมบัติของวัสดุ) ทดสอบโดยเขียนวัตถุแข็งเกร็งโดยใช้วัสดุหลักที่ชนกับโมเดลโพลียูรีเทนโฟมด้วยความเร็ว 15 เมตรต่อชั่วโมง โดยจากผลการทดสอบจริงเปรียบเทียบกับการใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ปรากฏว่าวัสดุโฟม MAT57 มีค่าโหลดสูงสุดเท่ากับ 15,622 นิวตันซึ่งใกล้เคียงกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการซึ่งมีค่าโหลดสูงสุด 15,155 นิวตัน ส่วนวัสดุโฟม MAT83 มีค่าโหลดสูงสุดเท่ากับ 13,392 นิวตัน

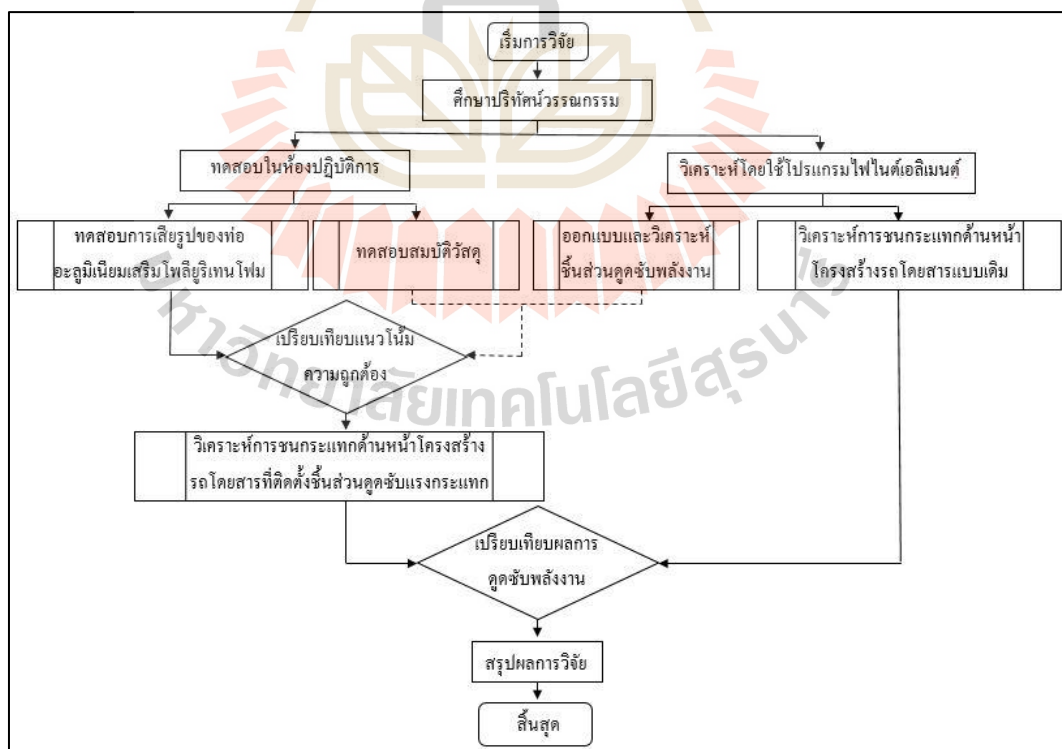


### บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 3.1 กล่าวนำ

การศึกษาวิจัยชิ้นส่วนคูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถโดยสารสาธารณะนี้ เป็นการจำลองพฤติกรรมของรถโดยสารรุ่นมินิบัส ซึ่งผลิตโดย บริษัท อุเชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด โดยการออกแบบชิ้นส่วนคูดซับแรงกระแทกด้านหน้าเพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิมอ้างอิงเงื่อนไขการทดสอบและเกณฑ์การประเมินความปลอดภัยตามข้อกำหนด ECE R-29 โดยงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เป็นเครื่องมือหลักในการศึกษาวิจัย ซึ่งมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ANSYS Workbench LS-DYNA ด้วยการนำผลการวิเคราะห์ไปเทียบเคียงกับผลการทดสอบการเสียรูปของท่อผนังบางเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟม ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



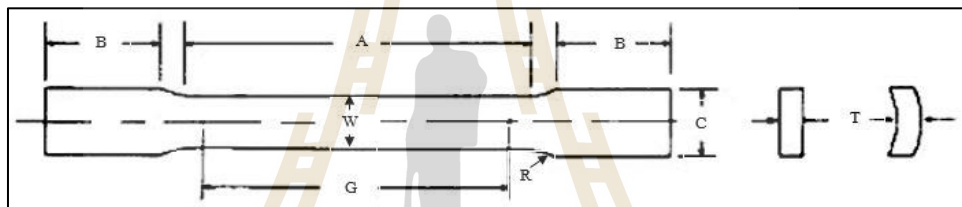
รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

### 3.2 การทดสอบสมบัติวัสดุ

ในงานวิจัยนี้มีวัสดุที่ใช้ในการออกแบบอยู่ 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุอะลูมิเนียมที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างคูดซับพลังงาน และวัสดุโพลียูรีเทนโฟมที่ใช้เป็นส่วนเสริมการคูดซับพลังงาน ในท่ออะลูมิเนียมผนังบาง โดยอ้างอิงการทดสอบแรงดึงของวัสดุอะลูมิเนียมตามมาตรฐาน ASTM E8 : Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials และมาตรฐาน ISO 844 : Rigid cellular plastic – Determination of compression properties สำหรับการทดสอบวัสดุโพลียูรีเทนโฟม

#### 3.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงดึง

ในการออกแบบชิ้นส่วนคูดซับแรงกระแทกด้านหน้าของรถโดยสารในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วัสดุอะลูมิเนียมซึ่งเป็นท่อผนังบาง ทำให้การเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8 นั้นต้องใช้วิธีการตัดด้วยเส้นลวด ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยมีขนาดตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.2 ชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8

ตารางที่ 3.1 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8

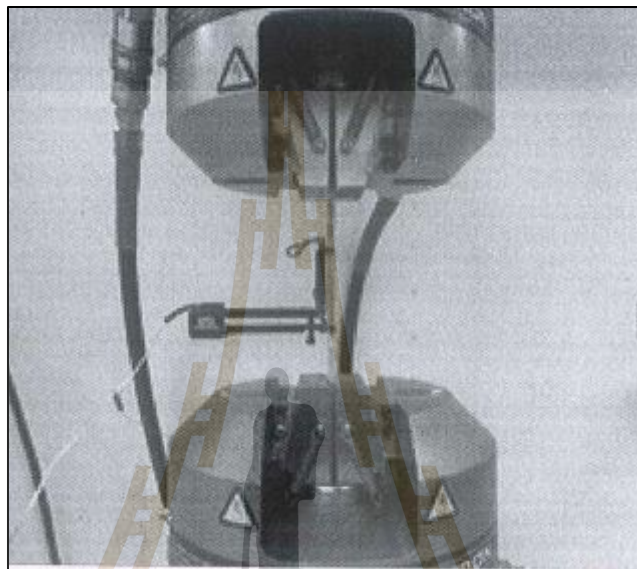
Names	Dimensions (mm)
G – Gage length	50
W – Width	12.5
T – Thickness	3
R – Radius	12.5
A – Length of reduced section	60
B – Length of grip section	75
C – Width of grip section	20

#### 3.2.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบสมบัติวัสดุเชิงกลด้วยการดึงชิ้นทดสอบให้ยืดออกในแนวแกนจนเสียหายโดยใช้ความเร็วต่ำและคงที่ตลอดกระบวนการ โดยการทดสอบสมบัติ



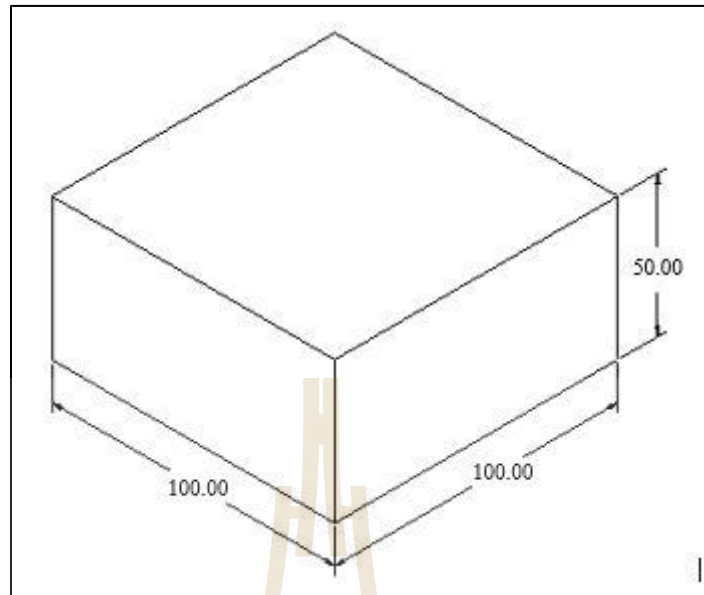
วัสดุอะลูมิเนียมในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบโดยงานทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ ฝ่ายสนับสนุนเทคนิค ด้านวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติโดยใช้เครื่องทดสอบ Instron 8801, S/N H2059 โดยการติดตั้งการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.3 ใช้ความเร็วในการดึงทดสอบ 5 mm/min



รูปที่ 3.3 การติดตั้งชิ้นทดสอบแรงดึง

### 3.2.3 การเตรียมชิ้นทดสอบแรงกด

ในส่วน of วัสดุโพลียูรีเทนโฟมที่ใช้เป็นส่วนเสริมในการดูดซับแรงกระแทกนั้น ได้ทำการเตรียมชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน ISO 844 โดยมีการผสมกันระหว่างสาร 2 ชนิด ได้แก่ สารโพลีออล (Polyol) หรือโฟมขาว และสารไดไอโซไซยานต (Diisocyanate) หรือโฟมดำ ในอัตราส่วน 1:1 โดยการชั่งน้ำหนักมวล โดยที่โพลียูรีเทน โฟมชนิดนี้มีอัตราการขยายตัวเท่ากับ 25 เท่า ทำการผสมสารทั้งสองชนิดเข้าด้วยกันแล้วทำการคนให้เข้ากันแล้วเทให้โพลียูรีเทน โฟมขยายตัวในแม่พิมพ์ที่มีขนาดเท่ากับ 100x100x50 มิลลิเมตร ตามมาตรฐาน ISO 844 ดังรูปที่ 3.4 แล้วทิ้งไว้ให้โฟมขยายตัวประมาณ 20 นาที



รูปที่ 3.4 ขนาดชิ้นทดสอบ โพลียูรีเทน โฟมตามมาตรฐาน ISO 844

โดยในส่วนของงานวิจัยนี้ได้ทำการควบคุมความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม 3 ค่า คือ 50, 100 และ 200  $kg/m^3$  ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของมวลและปริมาตรดังสมการที่ 3.1

$$\rho = m/v \quad (3.1)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ความหนาแน่น  
 $m$  คือ มวล  
 $v$  คือ ปริมาตร

#### 3.2.4 การทดสอบแรงกด

ในการทดสอบคุณสมบัติวัสดุเชิงกลของโพลียูรีเทนโฟมนั้นอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 844 ซึ่งเป็นการทดสอบแรงกดโดยใช้เครื่องทดสอบ INSTRON 5582 100 kN ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดังรูปที่ 3.5 โดยกดที่สอปด้วยความเร็ว 5 mm/min จนกระทั่งวัสดุเกิดการยุบตัวเป็นระยะ 85% ของความหนาเริ่มต้น ซึ่งเท่ากับ 42.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.5 เครื่องทดสอบ INSTRON 5582 100 kN

### 3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ชิ้นส่วนคูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถโดยสารโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench LS-DYNA เป็นเครื่องมือหลักในการวิจัย และเนื่องจากการทดสอบการคูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถโดยสารจริงนั้นมีค่าใช้จ่ายในการทดสอบที่สูง ทำให้ไม่สามารถทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ ดังนั้นจึงเลือกการทดสอบการเสีรูปและการคูดซับพลังงานของท่ออะลูมิเนียมที่มีการเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.3.1 การทดสอบการเสีรูปของท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟม

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีการทดสอบแบบกวดัดด้วยความเร็วคงที่เพื่อดูการเสีรูปและการคูดซับพลังงานของท่ออะลูมิเนียม เนื่องจากสามารถเห็นพฤติกรรมการเสีรูปของวัสดุได้ชัดเจน โดยใช้เครื่องทดสอบ INSTRON 5582 100 kN ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาคารเครื่องมือ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในการทดสอบ โดยวัสดุที่ใช้ทดสอบเพื่อยืนยัน

ผลความถูกต้องของโปรแกรมมีขนาดความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.86 และมีความหนา 1.5 มิลลิเมตร เสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่มีความหนาแน่น  $50 \text{ kg/m}^3$  ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่มีความหนาแน่น  $50 \text{ kg/m}^3$

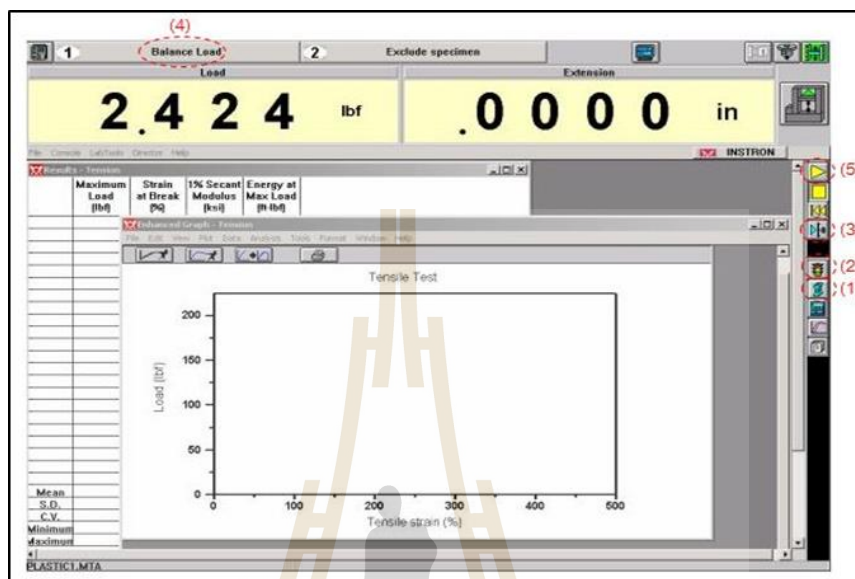
### 3.3.1.1 วิธีการทดสอบ

- 1) ติดตั้งหัวกดสำหรับการทดสอบแรงกดสำหรับเครื่อง INSTRON 5582 100 kN ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การติดตั้งหัวกดสำหรับการทดสอบแรงกด

2) ตั้งค่าโปรแกรมสำหรับการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 การตั้งค่าโปรแกรมสำหรับการทดสอบแรงกด

หมายเลข

- 1) ป้อนรายละเอียดของวัสดุ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตรและมีความสูงเท่ากับ 165 มิลลิเมตร
- 2) ตั้งค่าความเร็วในการกดทดสอบ โดยใช้ความเร็วในการกดที่ 10 mm/min เป็นระยะ 50 มิลลิเมตร
- 3) ตั้งค่าระยะเริ่มต้นก่อนเริ่มทำการทดสอบ
- 4) ตั้งค่าโหลดตกค้างก่อนเริ่มการทดสอบ
- 5) เริ่มการทดสอบ

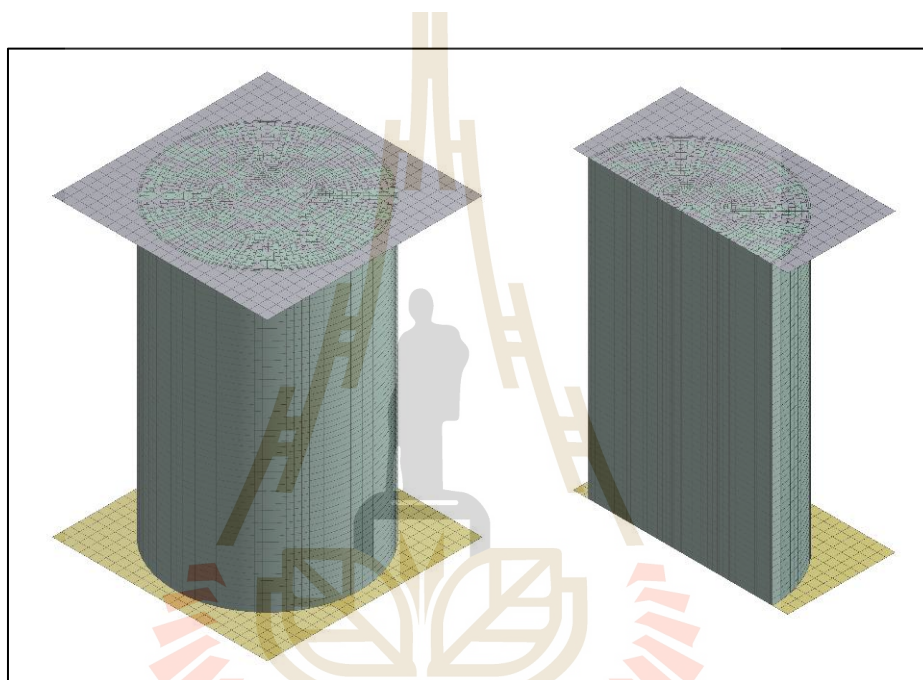
### 3.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองการเสียรูปและการดูดซับพลังงานของท่ออะลูมิเนียม

แบบจำลองการเสียรูปภายใต้แรงในแนวแกน โดยแบบทดสอบมีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.86 และมีความหนาเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้แผ่นกดเป็นวัตถุแข็งเกร็งกดท่ออะลูมิเนียมเป็นระยะ 82.5 มิลลิเมตร และฐานของท่ออะลูมิเนียมเป็นวัตถุแข็งเกร็งถูกยึดตรึงไว้ จากเงื่อนไขขอบเขตที่กล่าวมาจึงนำเนินกระบวนการทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังรายละเอียดต่อไปนี้



### 3.3.2.1 การสร้างแบบจำลองการเสียรูปของท่ออะลูมิเนียม

ทำการสร้างแบบจำลองการเสียรูปโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench LS-DYNA ประกอบด้วยแผ่นกดและฐานรองท่ออะลูมิเนียมขนาด 120 x 120 มิลลิเมตร โดยที่ไม่มี ความหนา และขึ้นทดสอบท่ออะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88.9 มิลลิเมตร โดยที่ไม่มี ความหนา และมีความสูงของขึ้นทดสอบ 165 มิลลิเมตร และเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น  $50 \text{ kg/m}^3$  ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แบบจำลองวิเคราะห์การเสียรูปของท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟม

### 3.3.2.2 การกำหนดสมบัติวัสดุ

การกำหนดสมบัติของวัสดุของแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วย โพลียูรีเทนโฟมได้ทำการกำหนดสมบัติของวัสดุของท่ออะลูมิเนียมเป็นแบบ multilinear Isotropic Hardening ซึ่งได้จากค่าความเค้นและความเครียดจริงของวัสดุในช่วงวัสดุไม่มีการยืดหยุ่น และ กำหนดสมบัติวัสดุของโพลียูรีเทนโฟมเป็นแบบ Isotropic Elasticity โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) วัสดุท่ออะลูมิเนียม กำหนดให้มีความโมดูลัสของยังเท่ากับ 69.343 GPa มีความหนาแน่น เท่ากับ  $2698.6 \text{ kg/m}^3$  สัดส่วนนัวส์ของเท่ากับ 0.33 และค่าความเค้นกับความเครียดจริงในช่วง วัสดุไม่มีการยืดหยุ่นดังแสดงในรูปที่ 3.15

2) วัสดุโพลียูรีเทน โฟม กำหนดให้มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 1.53 MPa ความหนาแน่นเท่ากับ  $50 \text{ kg/m}^3$  สัดส่วนปิวส์ของเท่ากับ 0.33

3) แผ่นกดและฐานรองท่ออะลูมิเนียม กำหนดให้เป็นเหล็กโดยใช้ค่าสมบัติวัสดุจากข้อมูลวัสดุในโปรแกรม มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 200 GPa ความหนาแน่นเท่ากับ  $7850 \text{ kg/m}^3$  และ สัดส่วนปิวส์ของเท่ากับ 0.3

### 3.3.2.3 การกำหนดเอลิเมนต์

การกำหนดเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองการเสีรูปร่างของท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทน โฟมแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1) เอลิเมนต์สำหรับแผ่นกดและฐานรองท่ออะลูมิเนียม กำหนดให้เป็นแบบสามมิติ โดยมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 5 มิลลิเมตร

2) เอลิเมนต์สำหรับท่ออะลูมิเนียม กำหนดให้เป็นแบบสามมิติ โดยมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

3) เอลิเมนต์สำหรับโพลียูรีเทน โฟม กำหนดให้เป็นแบบสามมิติ โดยมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

### 3.3.2.4 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองในการวิเคราะห์เป็นแบบมีความเสียดทาน (frictional) มีค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานเท่ากับ 0.3

### 3.3.2.5 การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์

การวิเคราะห์การเสีรูปร่างของท่ออะลูมิเนียมเสริม โพลียูรีเทน โฟม โดยกำหนดให้แผ่นกดเคลื่อนที่ในแนวแกน (remote displacement) เป็นระยะ 82.5 มิลลิเมตร และกำหนดให้ฐานรองถูกตรึงแน่น

## 3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

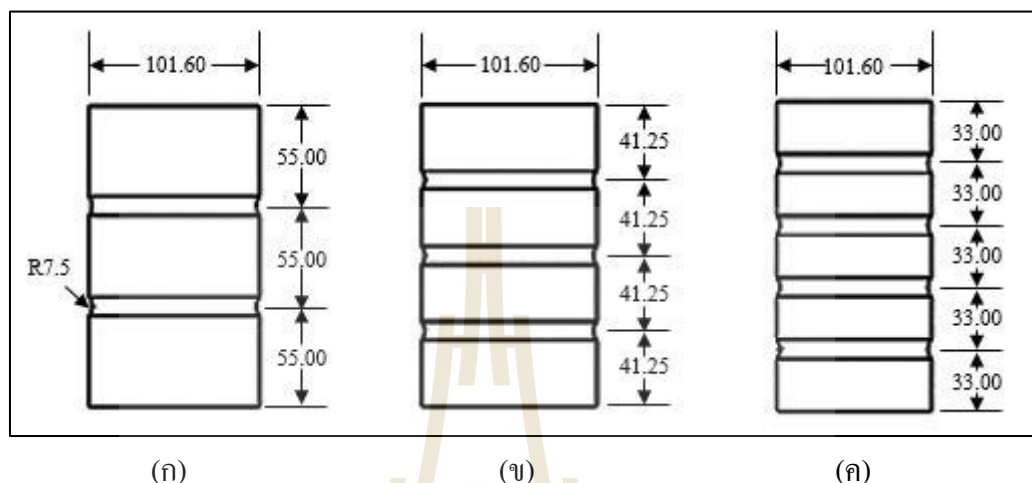
การวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถโดยสารนี้ ทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS Workbench LS-DYNA โดยใช้ค่าสมบัติวัสดุจากการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 3.4.1 การออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

ในการออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้านั้น ได้ทำการออกแบบจากพื้นที่การใช้งานจริงของรถมินิบัสซึ่งผลิตโดย บริษัท อุเชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรม ANSYS Workbench LS-DYNA ที่อัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.62 และมีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ทำการออกแบบโดยการเพิ่มจำนวนลอนของท่อ



อะลูมิเนียมที่จำนวน 2, 3 และ 4 ลอน ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และมีการเสริมโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น 50, 100 และ 200  $kg/m^3$



รูปที่ 3.10 รายละเอียดการออกแบบท่ออะลูมิเนียม (ก) ท่ออะลูมิเนียมจำนวน 2 ลอน  
(ข) ท่ออะลูมิเนียมจำนวน 3 ลอน (ค) ท่ออะลูมิเนียมจำนวน 4 ลอน

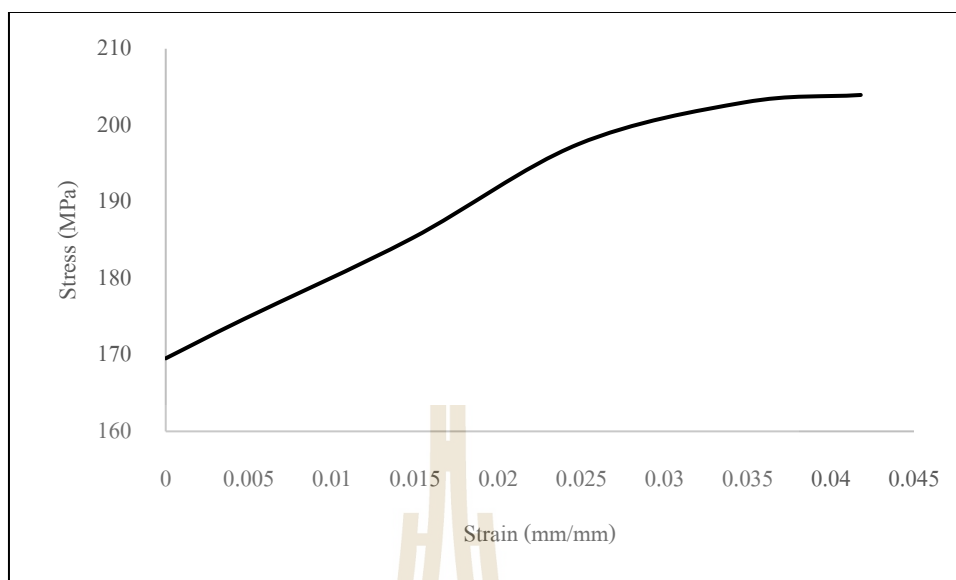
### 3.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

ในการวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกแบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 รูปแบบ และในแต่ละรูปแบบจะมีการเสริมโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น 50, 100, 200 และท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการเสริมโพลียูรีเทน รวมทั้งสิ้นจำนวน 16 แบบจำลอง

#### 3.4.2.1 การกำหนดสมบัติวัสดุ

สมบัติวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งหมด ได้รับจากการทดสอบสมบัติวัสดุในห้องปฏิบัติการ โดยกำหนดสมบัติของวัสดุอะลูมิเนียมเป็นแบบไอโซทรอปิกเชิงหลายเส้น (Multilinear Isotropic Hardening) และกำหนดสมบัติวัสดุของโพลียูรีเทนโฟมเป็นแบบไอโซทรอปิกยืดหยุ่น (Isotropic Elasticity)

1) วัสดุอะลูมิเนียม กำหนดให้มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 69.343 GPa มีความหนาแน่นเท่ากับ 2698.6  $kg/m^3$  สัดส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.33 และค่าความเค้นกับความเครียดจริงในช่วงวัสดุไม่มีการยืดหยุ่นดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงแบบไฮโซทรอปิกเชิงหลายเส้นของวัสดุอะลูมิเนียม

- 2) วัสดุโพลียูรีเทนโฟมที่มีความหนาแน่น  $50 \text{ kg/m}^3$  กำหนดให้มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ  $1.53 \text{ MPa}$  สัดส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.33
- 3) วัสดุโพลียูรีเทนโฟมที่มีความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  กำหนดให้มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ  $4.75 \text{ MPa}$  สัดส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.33
- 4) วัสดุโพลียูรีเทนโฟมที่มีความหนาแน่น  $200 \text{ kg/m}^3$  กำหนดให้มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ  $14.59 \text{ MPa}$  สัดส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.33
- 5) แผ่นกอดและฐานรองท่ออะลูมิเนียม กำหนดให้เป็นเหล็กโดยใช้ค่าสมบัติวัสดุจากข้อมูลวัสดุในโปรแกรม มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ  $200 \text{ GPa}$  ความหนาแน่นเท่ากับ  $7850 \text{ kg/m}^3$  และสัดส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.3

#### 3.4.2.2 การกำหนดเอลิเมนต์

การกำหนดเอลิเมนต์สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองการเสียรูปของท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟมแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- 1) เอลิเมนต์สำหรับแผ่นกอดและฐานรองท่ออะลูมิเนียม กำหนดให้เป็นแบบสามมิติ โดยมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 5 มิลลิเมตร
- 2) เอลิเมนต์สำหรับท่ออะลูมิเนียม กำหนดให้เป็นแบบสามมิติ โดยมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

3) เอลิเมนต์สำหรับโพลียูรีเทนโฟม กำหนดให้เป็นแบบสามมิติ โดยมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 3 มิลลิเมตร

#### 3.4.2.3 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

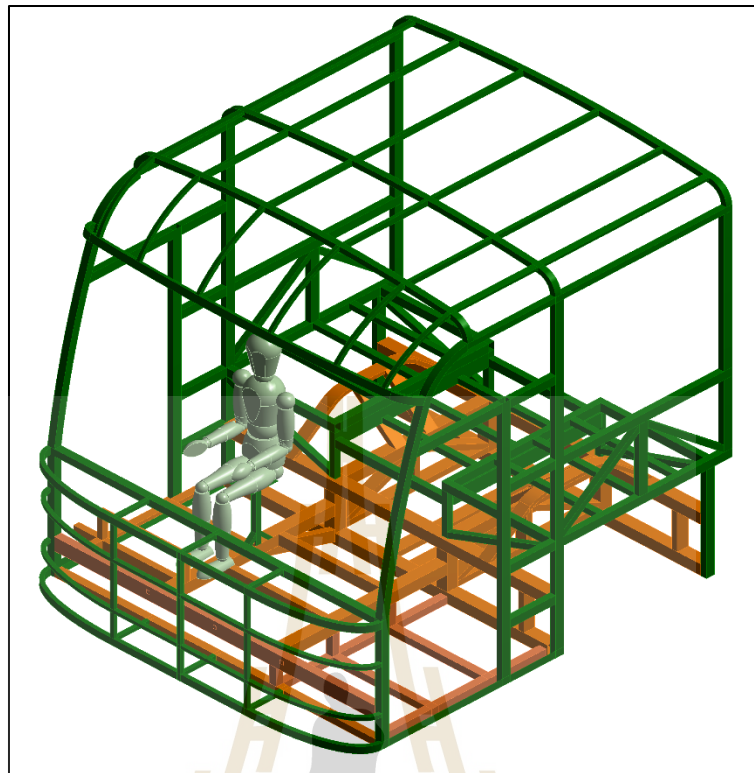
การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของแบบจำลองในการวิเคราะห์เป็นแบบมีความเสียดทาน (frictional) มีค่าสัมประสิทธิ์การเสียดทานเท่ากับ 0.3

#### 3.4.2.4 การกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์

การวิเคราะห์การเสียดรูปของท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟม โดยกำหนดให้แผ่นกดเคลื่อนที่ในแนวแกน (remote displacement) เป็นระยะ 82.5 มิลลิเมตร และกำหนดให้ฐานรองถูกตรึงแน่น

### 3.5 การวิเคราะห์การชนกระแทกด้านหน้ารถโดยสาร

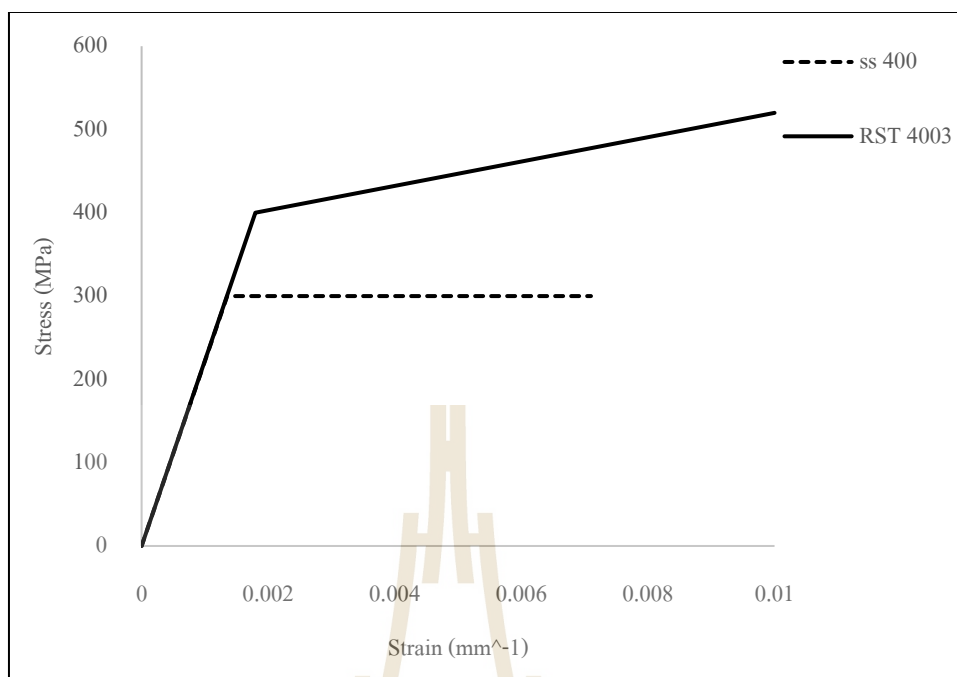
การวิเคราะห์การชนกระแทกโครงสร้างด้านหน้ารถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบตามข้อกำหนด ECE R-29 โดยโครงสร้างรถต้องได้รับการกระแทกจากลูกตุ้มมวล 1500 กิโลกรัม ชนกับโครงสร้างด้านหน้าด้วยพลังงานจลน์ 55 กิโลจูล โดยใช้แบบจำลองโครงสร้างส่วนหน้ารถโดยสารรุ่นมินิบัสจากบริษัท อู๋เซิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด โดยที่แบบประกอบไปด้วยโครงสร้างสีส้มแสดงถึงโครงสร้างในส่วนของแชสซีของรถโดยสาร โครงสร้างสีเขียวแสดงถึงโครงสร้างหลักของรถโดยสาร และแบบจำลองสีเขียวอ่อนแสดงถึงหุ่นจำลองของผู้ขับขี่ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench LS-DYNA โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.12 แบบจำลอง โครงสร้างส่วนหน้ารถโดยสารมินิบัส

### 3.5.1 การกำหนดสมบัติของวัสดุ

โครงสร้างรถโดยสารรุ่นมินิบัสใช้วัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุ Stainless Steel RST 4003 ซึ่งกำหนดให้กับโครงสร้างแชสซี และวัสดุ Steel STKR 400 กำหนดให้กับโครงสร้างหลักทั้งหมด ดังรูปที่ โดยกำหนดวัสดุทั้ง 2 ชนิด เป็นแบบ bilinear Isotropic Hardening ซึ่งวัสดุ Stainless Steel RST 4003 ดังรูปที่ 3.13 มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 200,56 GPa สัดส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.304 และความหนาแน่นเท่ากับ  $7940 \text{ kg/m}^3$  ส่วนวัสดุ Steel STKR 400 มีค่าโมดูลัสของยังเท่ากับ 201.6 GPa สัดส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.26 และความหนาแน่นเท่ากับ  $7850 \text{ kg/m}^3$



รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดแบบ bilinear Isotropic Hardening ของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400

### 3.5.2 การกำหนดเอลิเมนต์

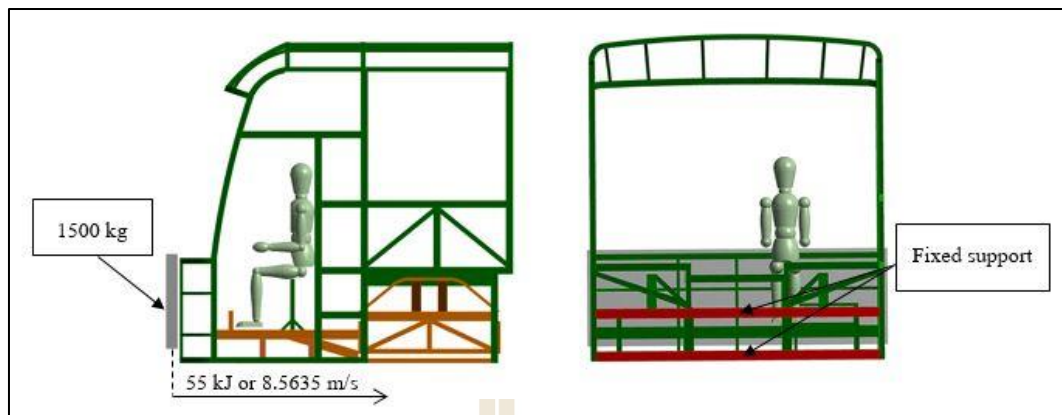
โครงสร้างรถโดยสารทั้งหมดถูกกำหนดเป็นเอลิเมนต์แบบสามมิติ และมีขนาดเอลิเมนต์เท่ากับ 10 มิลลิเมตร ทำให้มีจำนวนเอลิเมนต์ 101,192 เอลิเมนต์ และจำนวนจุดต่อ 99,761 จุด

### 3.5.3 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

การเชื่อมต่อระหว่างชิ้นส่วนโครงสร้างรถโดยสารเป็นแบบเชื่อมต่อแข็งเกร็ง โดยการกำหนดจุดเชื่อมต่อ (joint) โดยการสัมผัสระหว่างพื้นผิวและพื้นผิว ไม่มีการทะลุผ่านพื้นผิวซึ่งกันและกัน ส่วนการสัมผัสระหว่างลูกตุ้มกับ โครงสร้างรถโดยสารเป็นแบบไม่มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เนื่องจากโครงสร้างทั้งสองไม่ได้เป็นโครงสร้างที่เชื่อมต่อกัน

### 3.5.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การทดสอบตามข้อกำหนด ECE R-29 กำหนดให้มีการยึดตรึงส่วนหน้า 2 จุด ทำมุม 25° กับพื้นระนาบ โดยกำหนดการยึดตรึงเป็นแบบกำจัดการเคลื่อนที่ (remote displacement) และยึดส่วนหลังแบบตรึงแน่น (fixed support) ดังรูปที่ 3.14 โครงสร้างรถโดยสารจะต้องได้รับพลังงานจลน์จากการชนกระแทกตามข้อกำหนด ECE R-29 เท่ากับ 55 kJ ด้วยมวลลูกตุ้ม 1500 kg ทำให้พุ่งเข้าชนด้วยความเร็วต้น (initial velocity) เท่ากับ 8.5635 m/s



รูปที่ 3.14 เงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสาร

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 กล่าวนำ

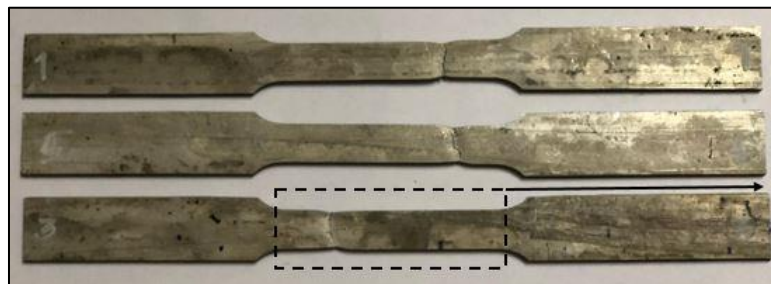
ในบทนี้จะนำเสนอผลการวิจัยโดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ผลการตรวจสอบความถูกต้องการทดสอบการเสียรูปของท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟม กับผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม ANSYS Workbench LS-DYNA จากนั้นนำมาสู่การออกแบบชิ้นส่วนคูดซับแรงกระแทกของโครงสร้างรถโดยสาร และในส่วนสุดท้ายคือการวิเคราะห์การชนกระแทกของโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิมเทียบผลการวิเคราะห์กับการชนกระแทกของโครงสร้างรถโดยสารที่เสริมชิ้นส่วนคูดซับแรงกระแทก โดยทั้งหมดอ้างอิงเงื่อนไขการทดสอบตามข้อกำหนด ECE R-29

#### 4.2 ผลการทดสอบค่าสมบัติเชิงกลของวัสดุ

ในส่วนของการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ นั้น มีวัสดุ 2 ชนิด ที่ทดสอบ คือ อะลูมิเนียมและโพลียูรีเทนโฟม โดยในส่วนของโพลียูรีเทนโฟมนั้นแบ่งออกเป็น 3 ค่าความหนาแน่น ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

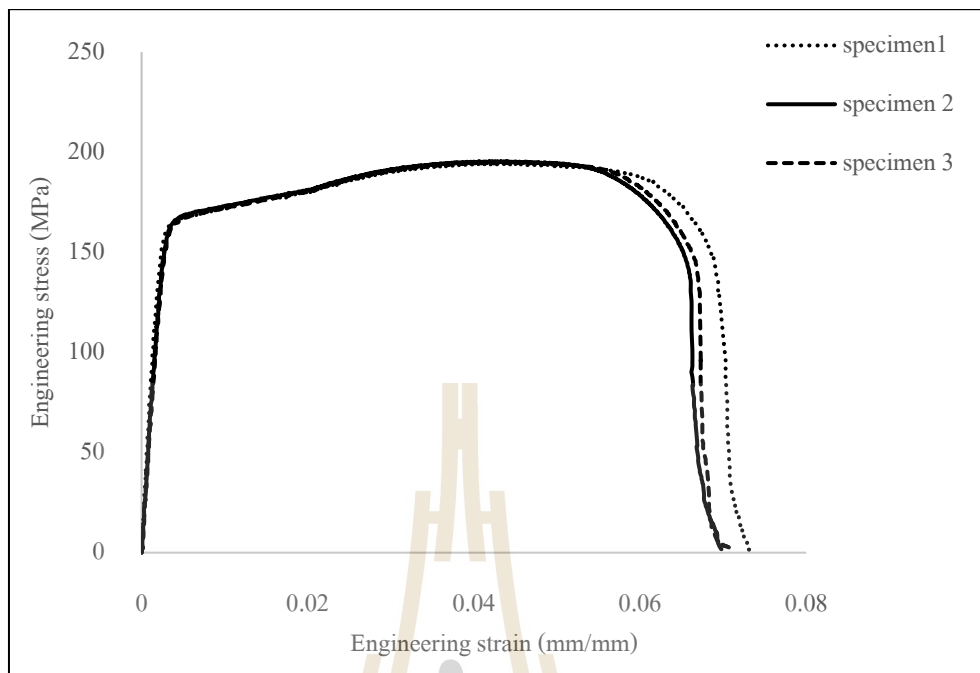
##### 4.2.1 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียมที่ใช้ในการทดสอบเป็นท่อผนังบาง จึงอ้างอิงการทดสอบจากมาตรฐาน ASTM E8 โดยขึ้นทดสอบหลังการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.1 และผลที่ได้จากการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 และนำขึ้นทดสอบทั้งหมดมาทำการหาค่าเฉลี่ย โดยสามารถคำนวณค่าโมดูลัสของยังได้เท่ากับ 69,343 MPa



รูปที่ 4.1 ชิ้นทดสอบอะลูมิเนียมหลังจากการทดสอบแรงดึง





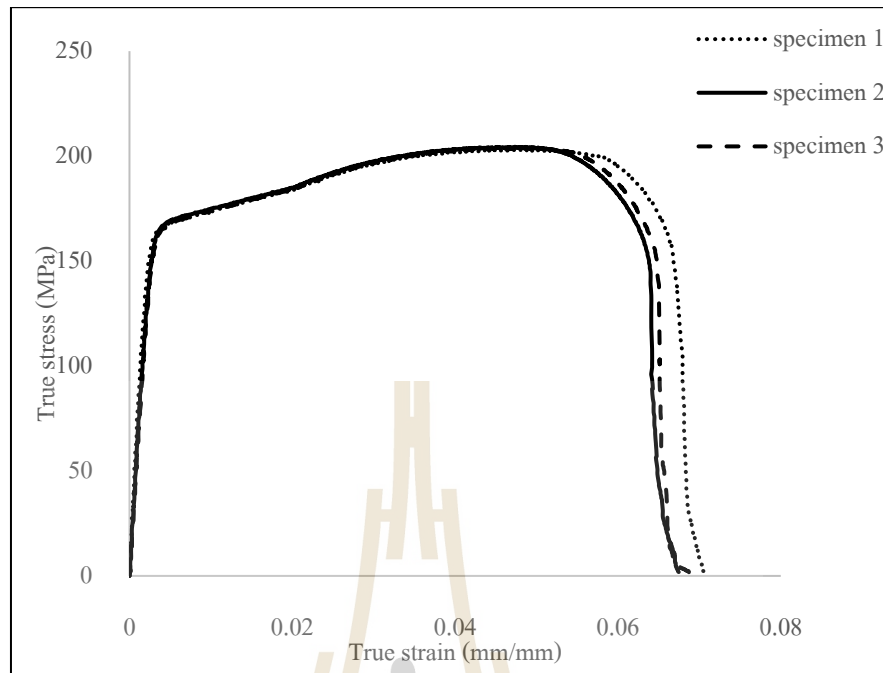
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุอะลูมิเนียม

จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมจากการทดสอบนั้น เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบและพัฒนาทางด้านวิศวกรรม ซึ่งค่าความเค้นทางวิศวกรรมนั้นพิจารณาจากแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงแล้วเมื่อวัสดุถูกแรงดึงทำให้พื้นที่หน้าตัดเปลี่ยนแปลงไป โดยสามารถคำนวณความเค้นจริงและความเครียดจริงจากสถานะที่วัสดุเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดไปดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (4.2)$$

โดยที่	$\varepsilon_e$	คือ	ความเครียดทางวิศวกรรม
	$\sigma_e$	คือ	ความเค้นทางวิศวกรรม
	$\varepsilon_t$	คือ	ความเครียดจริง
	$\sigma_t$	คือ	ความเค้นจริง



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุอะลูมิเนียม

#### 4.2.2 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลียูรีเทนโฟม

สมบัติเชิงกลของโพลียูรีเทน โฟมในงานวิจัยนี้ ได้อ้างอิงการทดสอบจากมาตรฐาน ISO844 แบ่งออกเป็น 3 ค่าความหนาแน่น คือ 50, 100 และ 200  $kg/m^3$  โดยผลที่ได้นำมาคำนวณหา ค่าโมดูลัสของยัง จากสมการ 4.3 และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 ชิ้นทดสอบโพลียูรีเทนโฟมหลังการทดสอบ

$$E = \frac{F_m h_0}{A \Delta h} \quad (4.3)$$

โดยที่	$E$	คือ	ค่าโมดูลัสของยัง
	$F_m$	คือ	แรง ณ จุดกลางของวัสดุ
	$h_0$	คือ	ความหนาเริ่มต้น
	$A$	คือ	พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้น
	$\Delta h$	คือ	ความหนาที่เปลี่ยนไป

#### 4.2.2.1 โพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น $50 \text{ kg/m}^3$

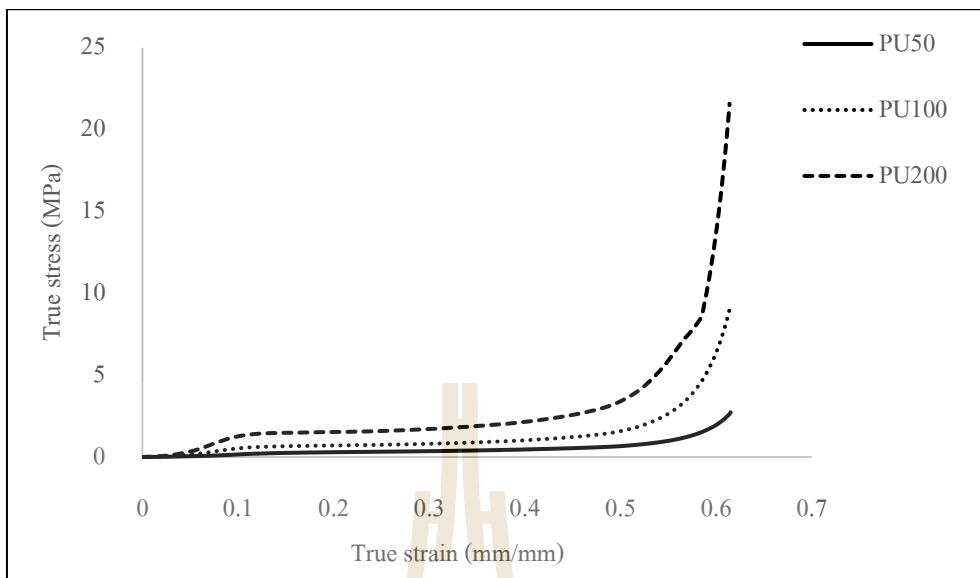
ผลการทดสอบโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น  $50 \text{ kg/m}^3$  สามารถคำนวณค่าโมดูลัสของยังได้เท่ากับ  $1.53 \text{ MPa}$  และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.5

#### 4.2.2.2 โพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น $100 \text{ kg/m}^3$

ผลการทดสอบโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น  $100 \text{ kg/m}^3$  สามารถคำนวณค่าโมดูลัสของยังได้เท่ากับ  $4.75 \text{ MPa}$  และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.5

#### 4.2.2.3 โพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น $200 \text{ kg/m}^3$

ผลการทดสอบโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น  $200 \text{ kg/m}^3$  สามารถคำนวณค่าโมดูลัสของยังได้เท่ากับ  $14.59 \text{ MPa}$  และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่นต่าง ๆ

### 4.3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

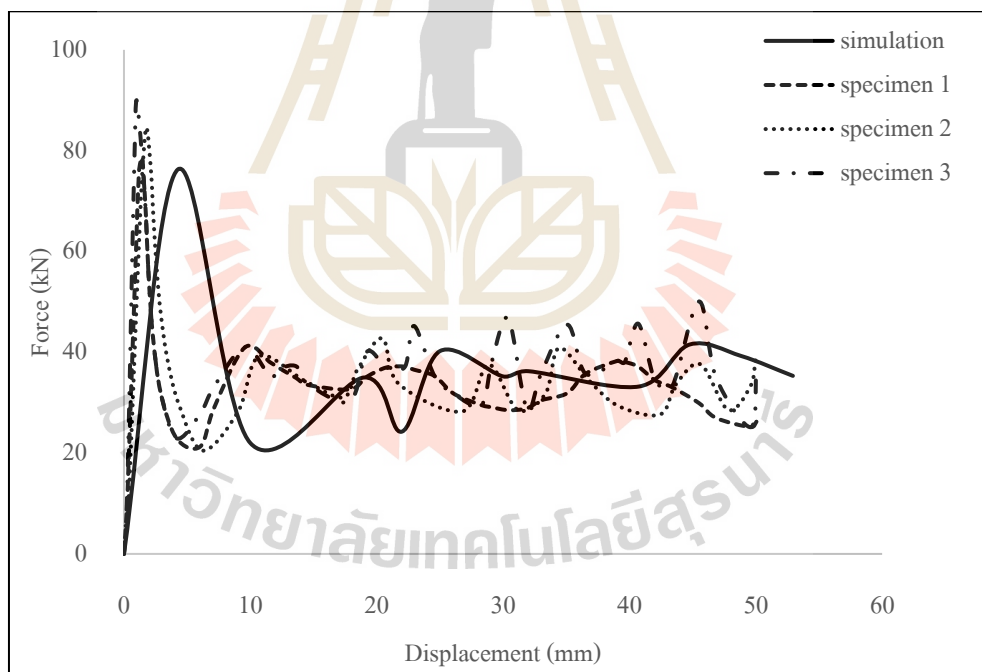
จากการทดสอบการเสีรูปร่างของท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น  $50 \text{ kg/m}^3$  ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์แบบจำลองการเสีรูปร่างของท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น  $50 \text{ kg/m}^3$  ผลเป็นดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การเสีรูปร่างของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียม

ลักษณะการเสีรูปร่างของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟม มีการเสีรูปร่างแบบวงแหวนซ้อนทับกัน (Concertina Mode) โดยขึ้นทดสอบทั้ง 3 ชั้น มีลักษณะการเสีรูปร่างในลักษณะเดียวกัน เทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมซึ่งมีลักษณะการเสีรูปร่างเป็นแบบวงแหวนซ้อนทับกันเช่นเดียวกับการทดสอบ ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระแรงที่กระทำกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 การเสียรูปของการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม



รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของ การทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์


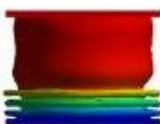



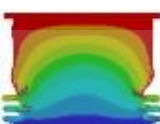
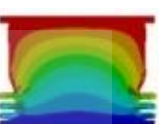

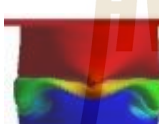
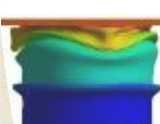


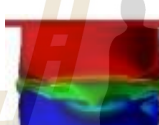
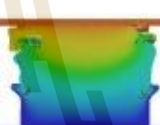
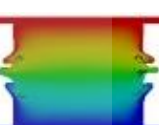
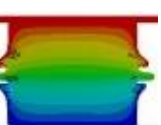



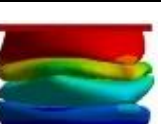
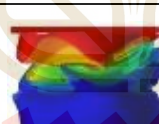
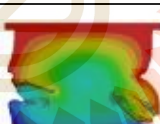
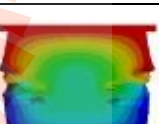
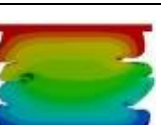
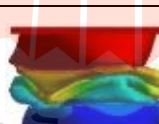




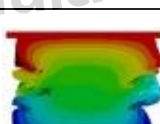
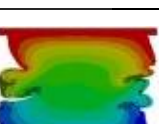
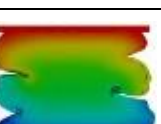
Specimen	Max Force (kN)	Mean Force (kN)	Energy (J)	
Experimenta	#1	79.70	33.25	1,664.53
	#2	81.52	32.09	1,606.44
	#3	84.83	33.53	1,677.03
Simulation	68.15	35.93	1,804.4	
Error (%)	16.91	9.01	9.40	

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดสอบเปรียบเทียบกับ การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม พบว่า การเสีรูปร่างของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยโพลียูรีเทน โฟมมีลักษณะการเสีรูปร่างอยู่ในโหมดวงแหวนซ้อนทับกัน (Concertina mode) เหมือนกัน แต่เกิดในทิศทางตรงกันข้าม ถึงแม้ว่าค่าแรงสูงสุดจะต่างกันพอสมควรแต่ค่าแรงเฉื่อยนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

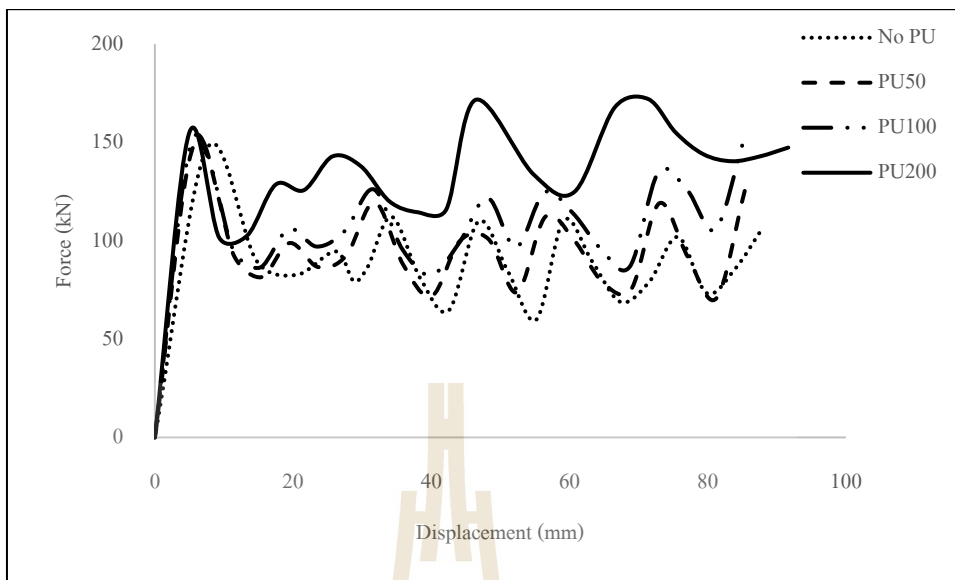
#### 4.4 การวิเคราะห์แบบจำลองชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

ชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกที่มีประสิทธิภาพนั้นจะต้องสามารถกระจายพลังงานจลน์จากการชนกระแทกได้ดีเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างรถและความปลอดภัยของผู้โดยสาร ซึ่งการออกแบบและวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการชนกระแทกของท่ออะลูมิเนียมทั้งหมด 4 รูปแบบ แต่ละรูปแบบมีการเสริมด้วยโพลียูรีเทน โฟมที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยผลของการเสีรูปร่างแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งแรงสูงสุด (Peak load) ในช่วงแรกนั้นค่อยๆลดลงตามจำนวนลอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนลอนนั้นทำให้การเสีรูปร่างง่ายขึ้นทำให้การดูดซับพลังงานลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ถึง 4.15

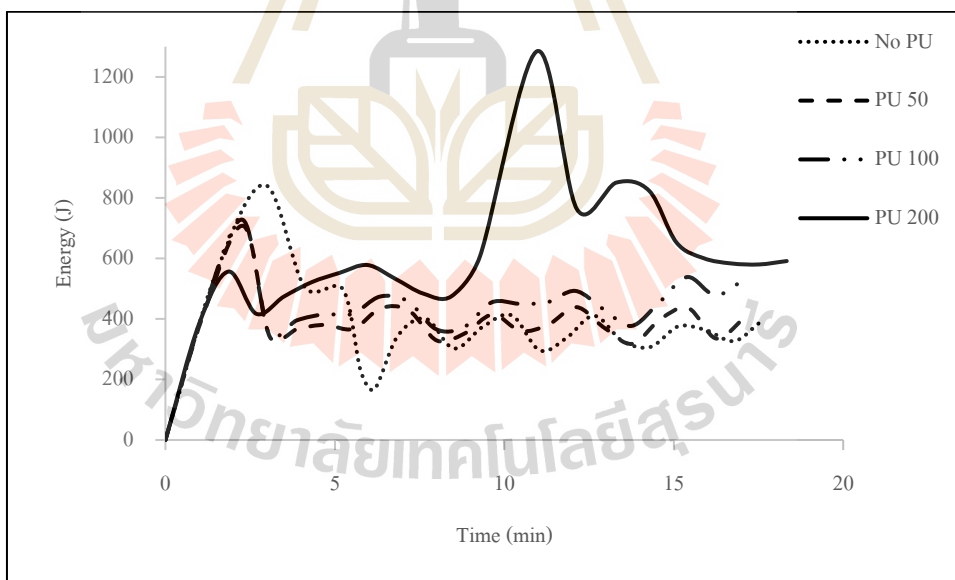
ตารางที่ 4.2 การเสีกรูปของแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

จำนวนลอน		ความหนาแน่น $kg/m^3$			
		0	50	100	200
ไม่มีลอน	ภาพเต็ม				
	ภาพตัดขวาง				
2	ภาพเต็ม				
	ภาพตัดขวาง				
3	ภาพเต็ม				
	ภาพตัดขวาง				
4	ภาพเต็ม				
	ภาพตัดขวาง				

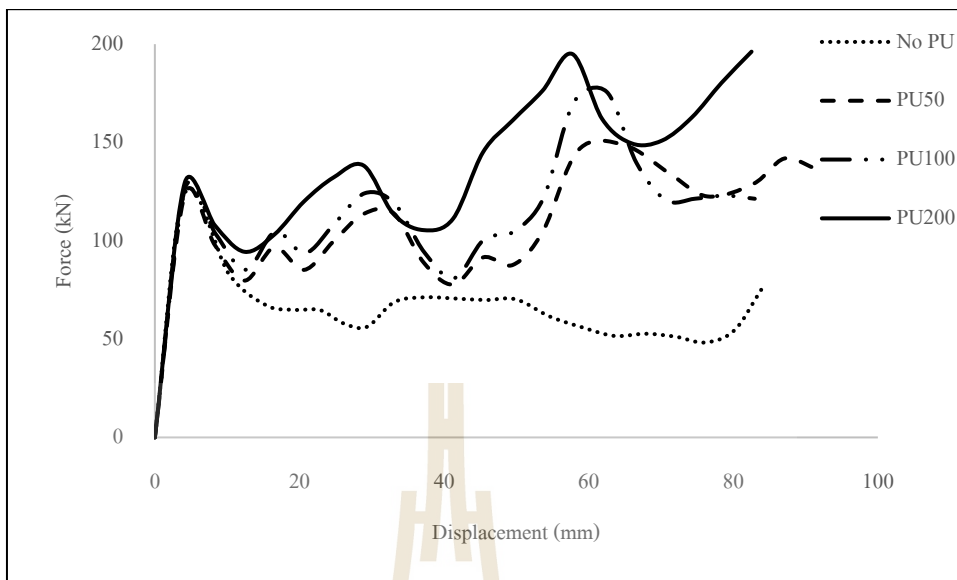




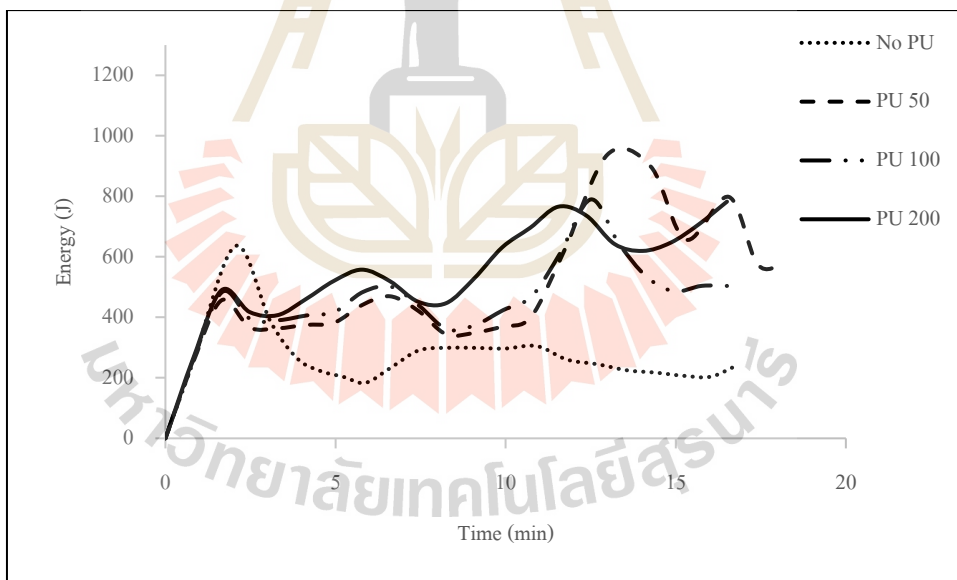
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียม ที่ไม่มีการรีดลอน



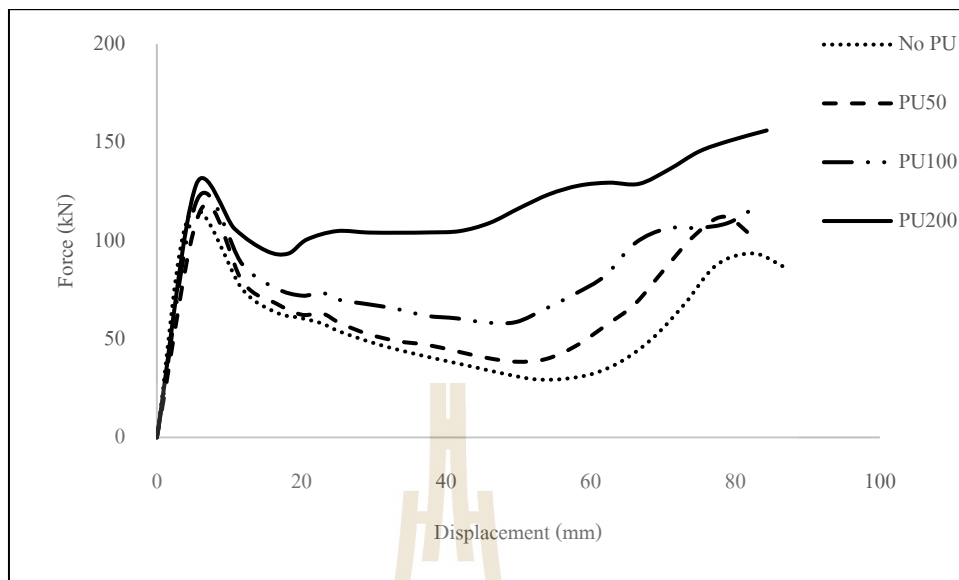
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของ โครงสร้างท่ออะลูมิเนียม ที่ไม่มีการรีดลอน



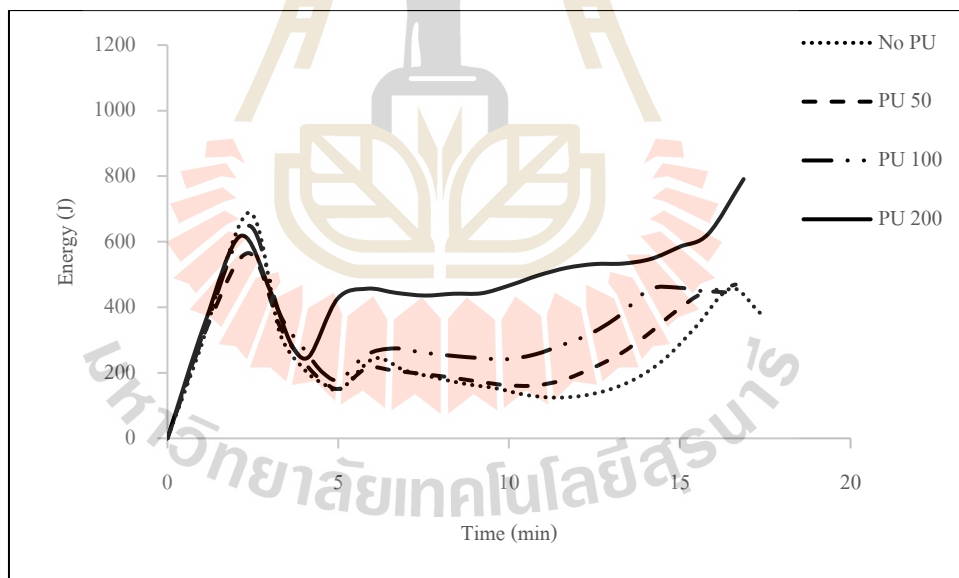
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 2 ลอน



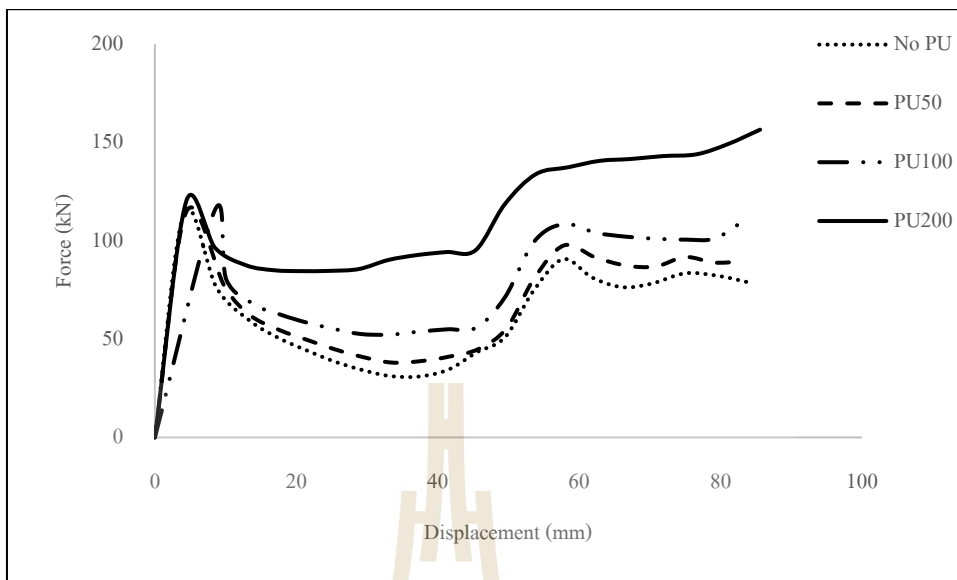
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 2 ลอน



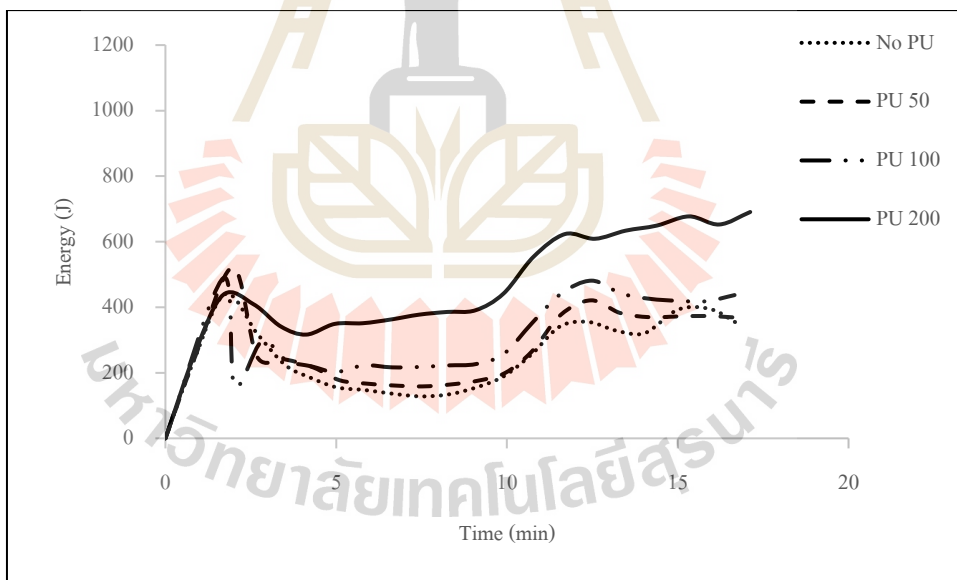
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 3 ชั้น



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 3 ชั้น



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 4 ลอน



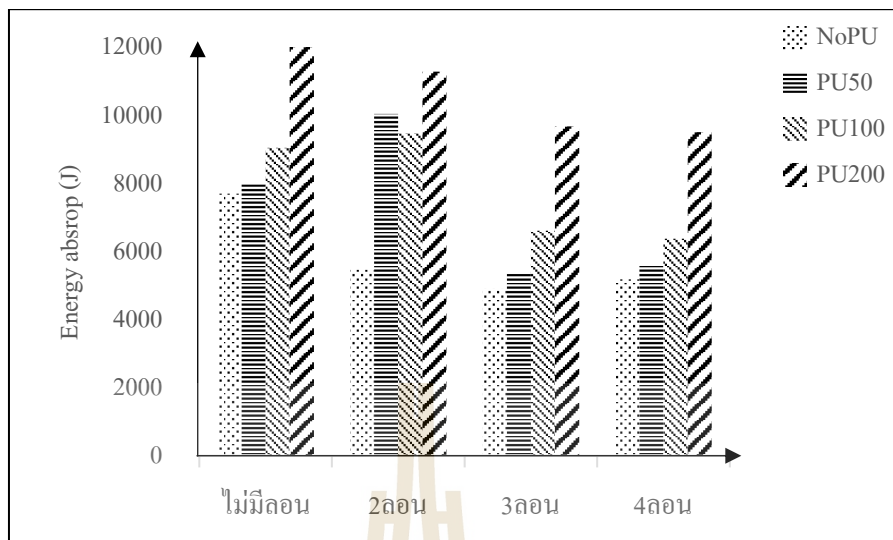
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของโครงสร้างท่ออะลูมิเนียมจำนวน 4 ลอน

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

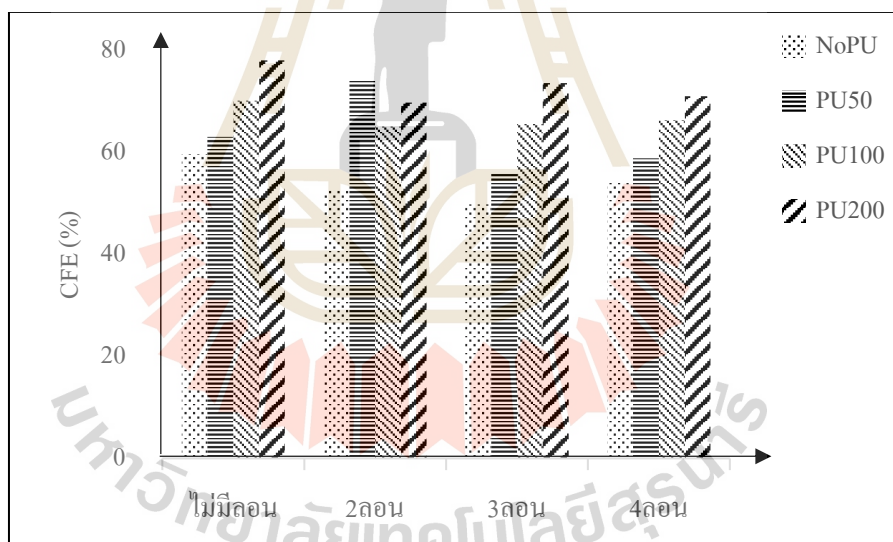
Corrugated	Density( $kg/m^3$ )	Max load (kN)	Mean load (kN)	Energy (J)
0	0	147.21	87.87	7,773.68
	50	148.32	93.49	7,980.76
	100	151.45	106.25	9,054.34
	200	172.112	134.32	12,313.14
2	0	124.10	65.26	5,472.58
	50	148.63	110.27	10,055.12
	100	175.68	114.26	9,481.13
	200	196.19	136.86	11,294.82
3	0	113.60	56.57	4,906.78
	50	115.98	64.74	5,349.85
	100	121.24	79.53	6,615.82
	200	156.11	114.89	9,691.34
4	0	114.10	61.62	5,183.74
	50	114.60	67.42	5,613.75
	100	115.47	76.61	6,383.01
	200	156.52	111.22	9,521.31

#### 4.4.1 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการชนกระแทก

ในการเลือกแบบจำลองในการนำไปออกแบบเป็นชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกในรถโดยสารนั้น พิจารณาจากความสามารถในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการชนกระแทก ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการรีดลอนโดยมีการเสริมโพลียูรีเทนโฟมที่มีความหนาแน่น  $200 kg/m^3$  มีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงที่สุดที่ 12.31 kJ และประสิทธิภาพการชนกระแทกสูงที่สุดที่ 78.04 % และพบว่า การเพิ่มจำนวนลอนของแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมนั้นทำให้แรงเฉลี่ยลดน้อยลงเนื่องจากแรงกระทำที่ลดลงที่ทำให้เกิดการเสียรูปเมื่อเทียบกับแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการรีดลอนที่ระยะการยุบตัวเท่ากัน โดยความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่ออะลูมิเนียมแสดงดังรูปที่ 4.16 และประสิทธิภาพการชนกระแทกแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.16 แผนภาพการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลอง



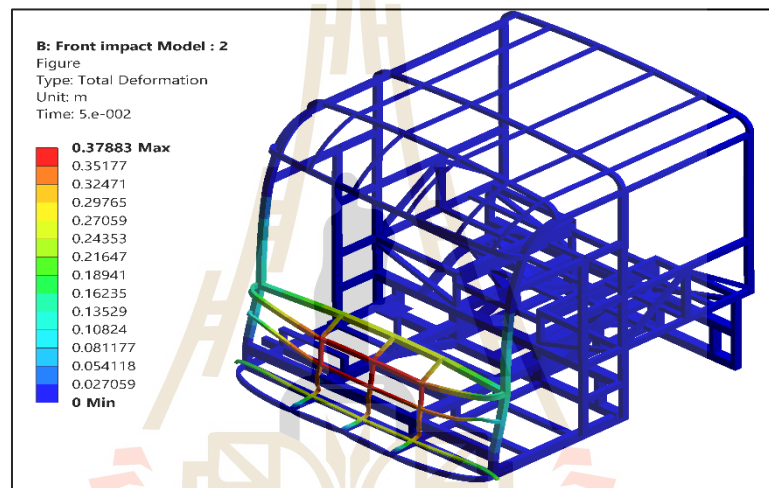
รูปที่ 4.17 แผนภาพการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชนกระแทกของแบบจำลอง

#### 4.5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม

จากข้อกำหนด ECE R-29 ซึ่งกำหนดให้โครงสร้างต้องได้รับพลังงานจลน์เท่ากับ 55 kJ คิดเป็นความเร็วต้น 8.5635 m/s โดยในส่วนของวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิมมีดังต่อไปนี้

#### 4.5.1 การเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสาร

เมื่อโครงสร้างรถโดยสารได้รับพลังงานจลน์จากการชนกระแทกของลูกตุ้ม พบว่า โครงสร้างกันชนส่วนหน้าซึ่งเป็นวัสดุ Steel STKR 400 เกิดการเสียรูปและถ่ายเทพลังงานไปยังโครงสร้างเสาค้ำหน้าต่อไปยังโครงสร้างส่วนหลังคา จนกระทั่งโครงสร้างกันชนส่วนหน้าสัมผัสกับแชสซี ทำให้พลังงานที่เหลือถูกถ่ายเทไปยังโครงสร้างของแชสซี โดยตำแหน่งที่เกิดการเสียรูปสูงเกิด ณ ตำแหน่งจุดเชื่อมค้ำบนตรงกลางของโครงสร้างกันชนส่วนหน้าเป็นระยะ 378.83 mm แสดงในรูปที่ 4.18

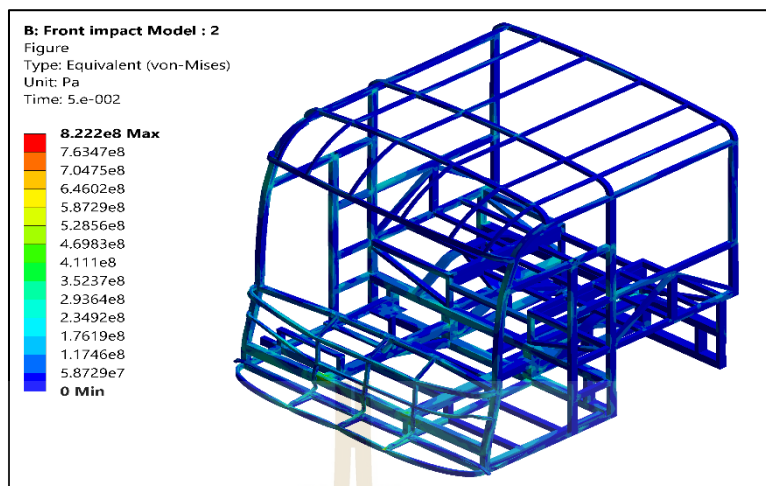


รูปที่ 4.18 แผนภาพการเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม

#### 4.5.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร

เมื่อโครงสร้างรถโดยสารได้รับพลังงานจลน์จากการชนกระแทก พบว่า ความเค้นเริ่มเกิดจากโครงสร้างกันชนส่วนหน้าและถูกถ่ายไปยังเสาค้ำหน้าเข้าสู่โครงสร้างส่วนหลังคา จนกระทั่งโครงสร้างกันชนส่วนหน้าเกิดการสัมผัสกับแชสซีทำให้ความเค้นนั้นกระจายเข้าสู่โครงสร้างของแชสซีและถูกถ่ายเทไปยังส่วนของโครงสร้างห้องโดยสารและโครงสร้างส่วนด้านข้างของรถโดยสารด้วยเช่นกัน โดยความเค้นสูงสุดเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งโครงสร้างแชสซีส่วนหน้าที่เกิดการสัมผัสกับโครงสร้างของกันชนมีค่าเท่ากับ 822.2 MPa แสดงในรูปที่ 4.19

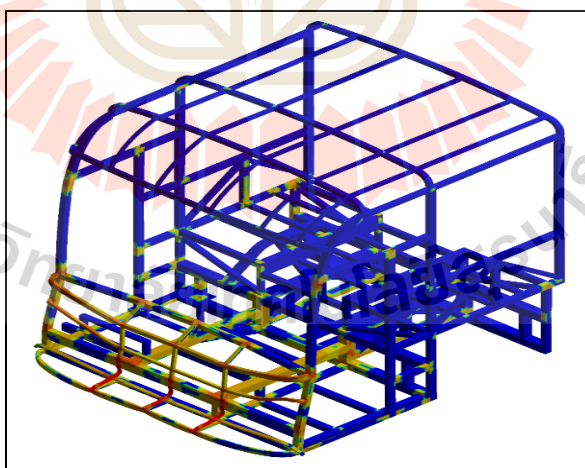




รูปที่ 4.19 แผนภาพความเค้นของโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม

#### 4.5.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร

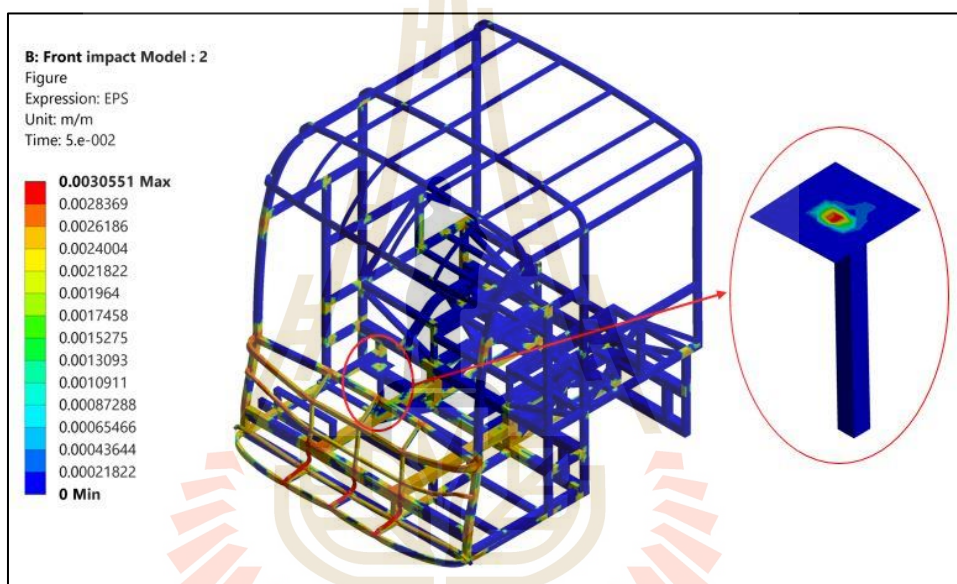
ความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสารนั้นมีความสอดคล้องกับความเค้นของโครงสร้างรถโดยสาร เห็นได้ว่ามีความเครียดเกิดขึ้นกับโครงสร้างกันชนด้านหน้าซึ่งได้รับการกระแทกจากมวลลูกค้อนและถูกถ่ายเทไปยังแชสซีและห้องโดยสารบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แผนภาพความเครียดของโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม

#### 4.5.4 ความเครียด ณ ตำแหน่งที่นั่งผู้ขับขี่

ในส่วนของการวิเคราะห์ความเครียด ณ ตำแหน่งของที่นั่งผู้ขับขี่เพื่อดูความเสียหายที่เกิดขึ้นกับที่นั่งผู้ขับขี่ซึ่งใช้วัสดุ Steel STKR 400 ว่าเกิดการเสียหายหรือไม่นั้น โดยการตรวจสอบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับวัสดุเทียบกับความเครียด ณ จุดแตกหักของวัสดุ พบว่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับที่นั่งผู้ขับขี่เกิดขึ้นสูงสุด ณ ตำแหน่งที่โครงสร้างของรถโดยสารเชื่อมต่อกับที่นั่งผู้ขับขี่ มีค่าเท่ากับ 0.0031 mm/mm ไม่เกินค่าความเครียด ณ จุดแตกหักของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

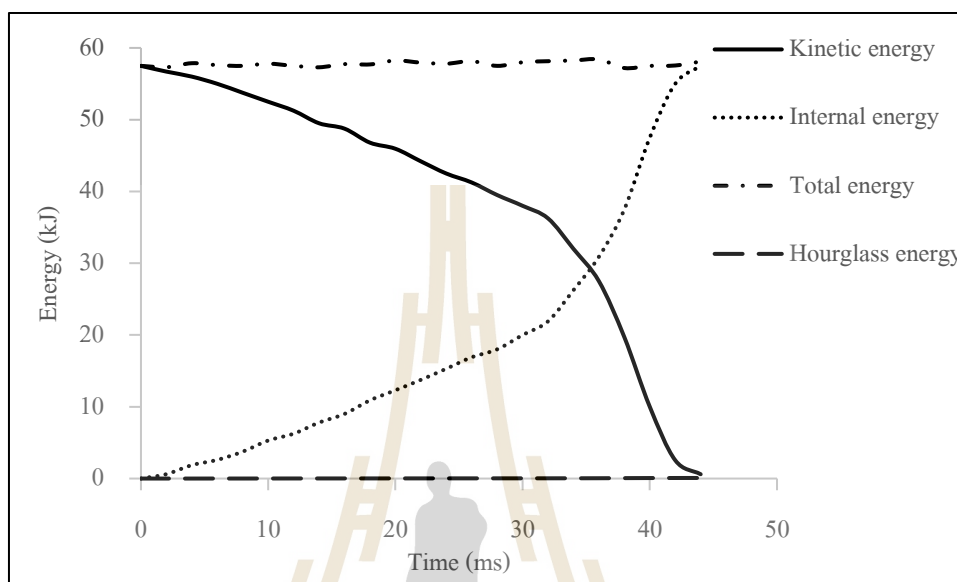


รูปที่ 4.21 แผนภาพความเครียดที่เกิดขึ้นของที่นั่งผู้ขับขี่

#### 4.5.5 พลังงาน

โครงสร้างรถโดยสารได้รับพลังงานจลน์จากการชนกระแทก 55 kJ ตามข้อกำหนด ECE R2-29 พบว่าพลังงานจลน์ลดลงอย่างช้าๆในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาที่ 32 ms และลดลงอย่างรวดเร็วจนสิ้นสุดกระบวนการที่เวลา 44 ms เนื่องจากในช่วงแรกเกิดการเสียรูปของโครงสร้างกันชนด้านหน้าซึ่งมีขนาดเล็ก ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ไม่มาก จนกระทั่งเกิดการยุบตัวจนสัมผัสกับแฮชชีทำให้พลังงานจลน์สลายจนหมด ในขณะที่โครงสร้างได้รับพลังงานจลน์จากการชนกระแทก ทำให้เกิดพลังงานภายในขึ้นเนื่องจากการเสียรูปของโครงสร้าง พบว่า พลังงานภายในเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆในช่วงแรกจนถึงระยะเวลาที่ 32 ms และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนสิ้นสุด

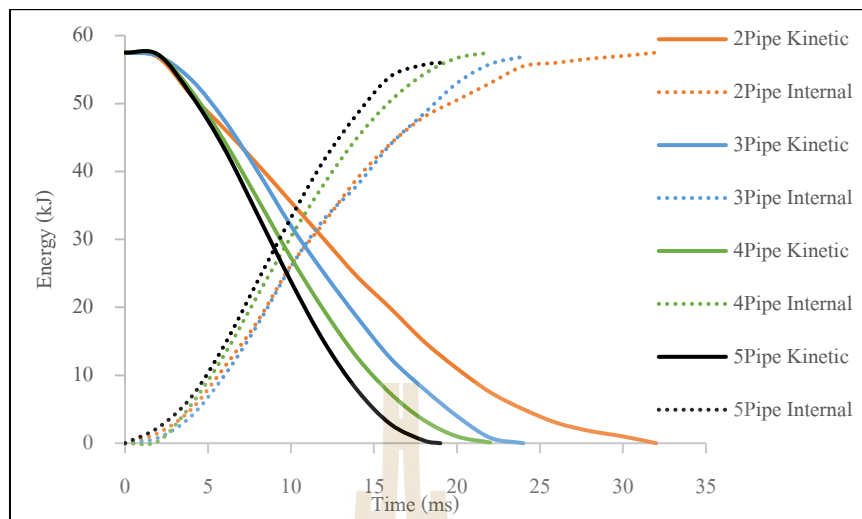
กระบวนการที่เวลา 44 ms ดังแสดงในรูปที่ 4.22 ซึ่งพลังงานทั้งสอง ณ เวลาเดียวกันนั้นรวมกันจะเท่ากันตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม

#### 4.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

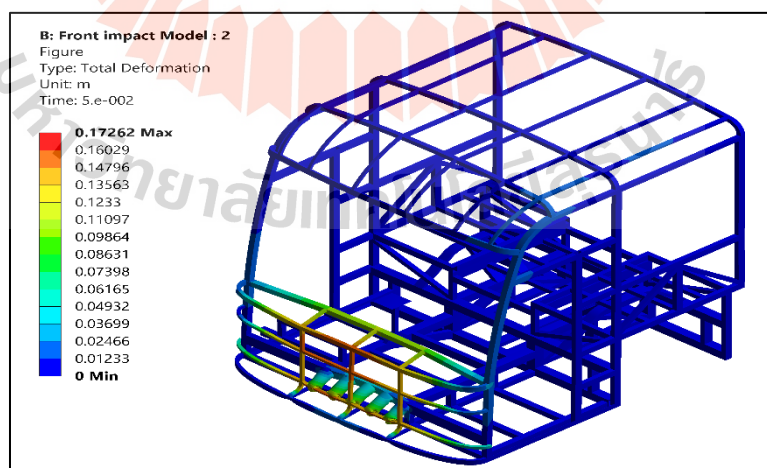
จากการวิเคราะห์แบบจำลองตามข้อกำหนด ECE R-29 ของโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิมที่มีความเค้นถูกถ่ายไปห้องโดยสาร ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างและการบาดเจ็บของผู้โดยสารได้ จึงได้มีการออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกเพื่อเสริมความแข็งแรงและลดความเสียหายที่อาจเกิดต่อโครงสร้างรถโดยสาร โดยการเลือกแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการรีดลอนเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่มีความหนาแน่น  $200 \text{ kg/m}^3$  ที่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการชนกระแทกสูงสุด ทำการวิเคราะห์ด้วยการติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับพลังงานตั้งแต่จำนวน 2 ชั้น จนกระทั่งเต็มพื้นที่สำหรับการติดตั้งซึ่งเท่ากับจำนวนชิ้นส่วนดูดซับพลังงาน 5 ชั้น โดยผลที่ได้นั้นเห็นได้ว่าการเพิ่มจำนวนของชิ้นส่วนดูดซับพลังงานนั้นสามารถดูดซับพลังงานและลดเวลาในการสลายพลังงานของโครงสร้างได้เร็วขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.23 จึงทำการเลือกชิ้นส่วนดูดซับพลังงานที่จำนวน 5 ชั้น ในการติดตั้งสำหรับโครงสร้างรถโดยสารเพื่อทำการวิเคราะห์



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของชิ้นส่วนดูดซับพลังงานที่จำนวนต่าง ๆ

#### 4.6.1 การเสีรูปของโครงสร้างรถโดยสาร

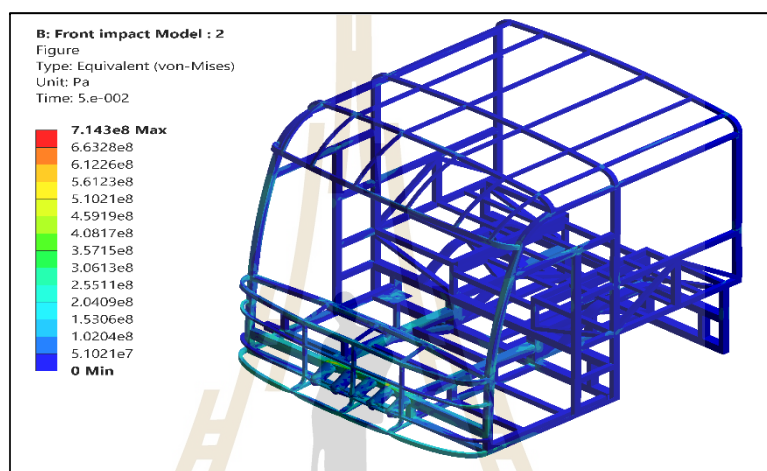
โครงสร้างรถโดยสารหลังจากการติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกนั้น พบว่า การเสีรูปของโครงสร้างกันชนส่วนหน้านั้นลดน้อยลงเนื่องจากชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกทำหน้าที่ดูดซับและกระจายพลังงานจากการชนกระแทกไปยังชิ้นส่วนอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีระยะการยุบเท่ากับ 172.62 mm ซึ่งลดลงจากโครงสร้างแบบเดิม 206.21 mm แสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผนภาพการเสีรูปของโครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

#### 4.6.2 ความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร

เมื่อโครงสร้างรถโดยสารได้รับพลังงานจลน์จากการชนกระแทก พบว่า ความเค้นถูกถ่ายเทผ่านชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกไปยังแชสซีด้านหน้าแล้วกระจายไปสู่โครงสร้างเสาข้างคู่น้ำของโครงสร้างทำให้ความเค้นที่ถูกถ่ายเทไปยังห้องโดยสารนั้นเหลือน้อยมาก โดยความเค้นลดลง 13.07% เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบเดิม แสดงในรูปที่ 4.25

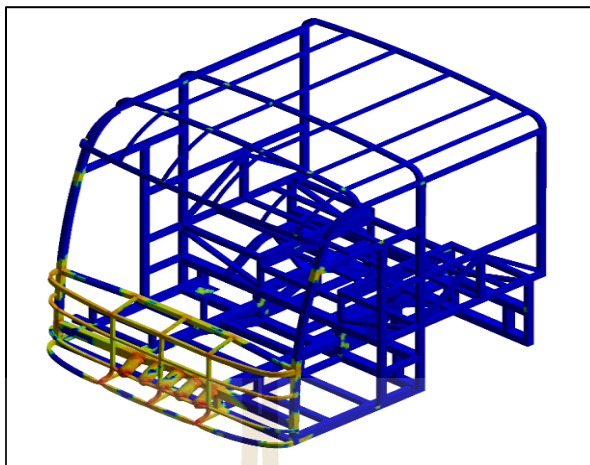


รูปที่ 4.25 แผนภาพการความเค้นของ โครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

#### 4.6.3 ความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสาร

เมื่อโครงสร้างรถโดยสารมีการติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับพลังงานนอกจากจะทำให้การยุบตัวของโครงสร้างนั้นลดลงแล้วยังสามารถกระจายความเครียดที่เกิดจากการชนกระแทกได้ดีขึ้น ทำให้ความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นลดลงจากโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม 73.61% ดังแสดงในรูปที่ 4.26

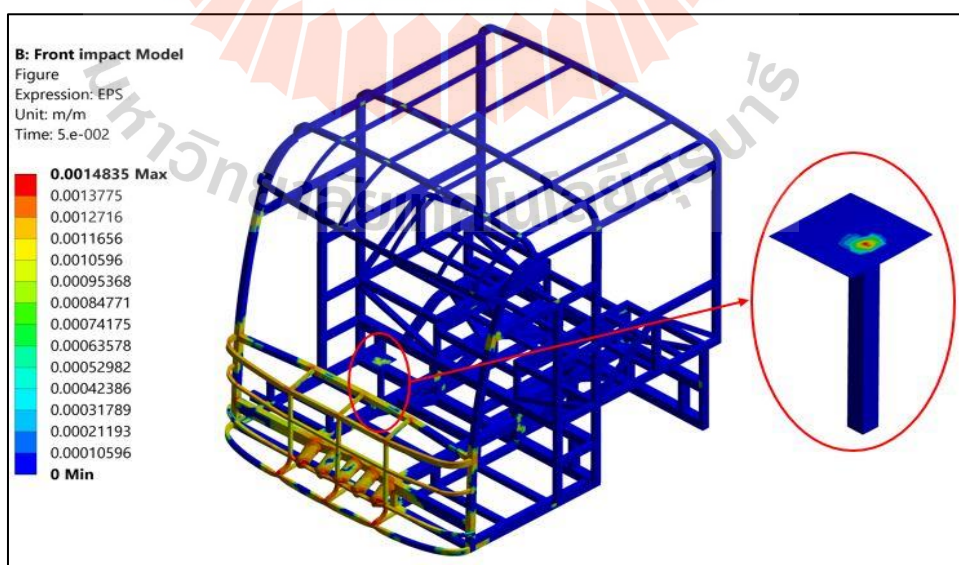




รูปที่ 4.26 แผนภาพความเครียดของโครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

#### 4.6.4 ความเครียด ณ ตำแหน่งที่นั่งผู้ขับขี่

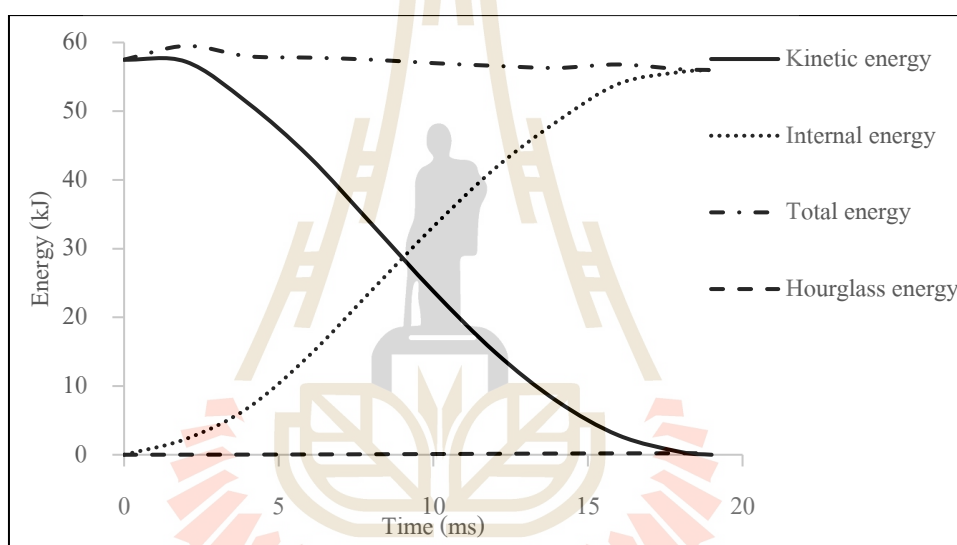
ความเครียด ณ ตำแหน่งที่นั่งผู้ขับขี่ในโครงสร้างแบบเดิมนั้นมีค่าความเครียดที่ต่ำกว่าค่าความเครียดของวัสดุที่ทำให้วัสดุเกิดการเสียหาย นั่นหมายถึงโครงสร้างนั้นได้รับความปลอดภัยอยู่แล้ว โดยในโครงสร้างที่นั่งผู้ขับขี่แบบจำลองโครงสร้างที่มีการเสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกนั้นมีค่าความเครียดลดลงจากเดิม 0.0016 mm/mm คิดเป็น 51.61% ของโครงสร้างแบบเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 แผนภาพความเครียดที่เกิดขึ้นของที่นั่งผู้ขับขี่หลังติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

#### 4.6.5 พลังงาน

โครงสร้างรถโดยสารหลังติดตั้งชิ้นส่วนจุดซับแรงกระแทก พบว่าพลังงานจลน์จากการชนกระแทกนั้นถูกสลายได้เร็วกว่าโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม โดยมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ช่วงเวลา 4 ms และสิ้นสุดกระบวนการในเวลา 18 ms ใช้เวลารวมในการสลายพลังงานจลน์ลดลงจากโครงสร้างแบบเดิม 59% และเมื่อโครงสร้างเกิดการเสียรูปของโครงสร้างทำให้เกิดพลังงานภายในขึ้น ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของพลังงานอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ช่วงเวลา 4 ms จนสิ้นสุดกระบวนการที่เวลา 18 ms เป็นตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน โดยที่ค่า Hourglass energy ในการวิเคราะห์นั้นไม่เกิน 10% ของพลังงานรวม ดังแสดงในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับเวลาของโครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนจุดซับแรงกระแทก



## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยเรื่อง การออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้ารถด้วยวัสดุท่ออะลูมิเนียมเสริมโพลียูรีเทนโฟมสำหรับรถโดยสารสาธารณะ ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบตามข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ โดยสรุปตามวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของจำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมและความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมต่อคุณลักษณะเชิงกลในการดูดซับแรงกระแทก พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการชนกระแทกเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มจำนวนลอนบนท่ออะลูมิเนียมส่งผลให้ค่าแรงสูงสุดในช่วงแรก (Peak load) ลดลงเนื่องจากโครงสร้างที่มีลอนนั้นเกิดการเสียรูปที่ง่ายกว่าทำให้ความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกและประสิทธิภาพการชนกระแทกมีแนวโน้มลดลง โดยที่ค่าความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกสูงสุดเท่ากับ 12.31 kJ และประสิทธิภาพการชนกระแทกสูงสุด 78.04 % ซึ่งทั้งสองพารามิเตอร์เกิดขึ้นในแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีการรีดลอนที่ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม  $200 \text{ kg/m}^3$

5.1.2 การเปรียบเทียบยืนยันผลความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ANSYS Workbench LS-DYNA กับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่า แบบจำลองมีรูปแบบความเสียหายในโหมดวงแหวนซ้อนทับกัน (Concertina Mode) เช่นเดียวกันกับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ โดยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ในช่วงไม่เกิน 17 %

5.1.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารมินิบัสแบบเดิมกับโครงสร้างรถมินิบัสที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก ตามข้อกำหนด ECE R-29 พบว่า ระยะการยุบตัวของโครงสร้างหลังติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกลดลงจากโครงสร้างแบบเดิม 45.56% นอกจากนี้ชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกนี้ยังสามารถช่วยกระจายความเค้นไปยังโครงสร้างต่างๆ ได้ดี ทำให้ความเค้นสูงสุดลดลงจากโครงสร้างแบบเดิม 13.07% และความเครียดที่เกิดขึ้นในโครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกนั้นลดลงจากโครงสร้างแบบเดิม 73.63% โดยที่ความเครียดที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่นั่งผู้ขับขี่ของโครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกนั้นลดลงจากโครงสร้างแบบเดิม 51.61% ซึ่งค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งที่นั่งผู้ขับขี่ของโครงสร้างทั้งสองนั้นไม่เกินค่าความเครียดที่ทำให้วัสดุเกิดการฉีกขาด ในขณะที่การสลาย

พลังงานจลน์ของ โครงสร้างรถโดยสารที่ติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกนั้นสามารถสลายพลังงานจลน์ได้เร็วกว่าโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม 59%

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 อัตราส่วนการผสมระหว่างสาร 2 ชนิด ของโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่นเดียวกันนั้นมีผลต่อความสามารถในการดูดซับแรงกระแทก ซึ่งสามารถนำมาเป็นแนวทางในการศึกษาแทนการเพิ่มความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม

5.2.2 ควรมีการทดสอบความสามารถในการดูดซับพลังงานของชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกในรูปแบบภาระการชนกระแทกแบบพลวัต

5.2.3 ควรมีการศึกษาแบบจำลองในการสัมผัสของวัสดุที่เป็นคอมโพสิต

5.2.4 การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าของรถโดยสาร ควรมีการทดสอบจริงเพื่อยืนยันผลการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเพื่อใช้เป็นแนวทางอ้างอิงในการวิเคราะห์กับรถโดยสารในรุ่นต่อไป

## รายการอ้างอิง

- นิรุต อ่อนสลุง (2560). พฤติกรรมการเสียหายของท่อไฟเบอร์กลาสเติมโฟมภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 31 จังหวัดนครนายก. 4-7 กรกฎาคม 2560.
- จิตติมา ตะสุวรรณ (2554). การพัฒนาพอลิออลเรซินสำหรับการผลิตพอลิยูรีเทนโฟมแบบยืดหยุ่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร.: หน้า 10-12.
- ศุภชัย หลักคำ และ วรวิทย์ วรรณานันท์ (2557). การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานของวัสดุทางเลือกสำหรับโครงสร้างดูดซับแรงกระแทกรถยนต์.
- สุภกิจ รูปจันทร์ และ สราวุธ บัวงาม การศึกษาพฤติกรรมการชนกระแทกด้านหน้าโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่ภายใต้มาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.: หน้า 33-50
- สำนักงานตำรวจแห่งชาติ (2557). จำนวนรถโดยสารขนาดใหญ่ที่เกิดอุบัติเหตุจำแนกตามปีงบประมาณ กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก. (หน้า 2)
- Miyazaki, M., and Negishi, H. (2003). Deformation and Energy Absorption of Aluminum Square Tubes with Dynamic Axial Compressive Load. *Materials Transactions*, June 2003; vol.44(8): pp.1566-1570.
- Giovanni Belingardi. (2013). Geometrical optimization of bumper beam profile made of pultruded composite by numerical simulation, March 7, 2013; pp.217-225
- Marzbanrad J., Mehdikhanlo, M., and Saeedi Pour, A. An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2009; vol.33; pp.159-166.
- Lee, Y. S., Ali, A., Sanuddin, A. B. and Afshar, R. (2010) Simulation and experimental work on a thin-walled structure under crushing. *Journal of Failure and Analysis and Prevention*, January 2010; vol.10(2): pp.143-151.
- Nirut Onsalung, Chawalit Thinwongpituk and Kulachate Painthong. (2010). The Influence of Foam Density on Specific Energy Absorption of Rectangular Steel Tubes. *Energy Research Journal*. vol.1(2): pp.135-140

- B. J. Ramirez, V. Gupta. (2019). Energy Absorption and Low Velocity Impact Response of Open-Cell Polyurea Foams. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, June 2019; vol.5(2): pp.132-142
- Lorenzo, P., Massimiliano, A., and Giovanni, B. (2009). Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques. *International Journal of impact Engineering*. vol.36(3): pp.498-511.
- Cerit, M.E., Guler, M.A., Bayram, B., and Yolum, U. (2010) Improvement of the Energy Absorption Capacity of an Intercity Coach for Frontal Crash Accident. The 11<sup>th</sup> International LS-DYNA User Conference, Dearborn: U.S.A., June 6, 2010; pp.13-23.
- Marzbanrad J. , Alijanpour M. , Saeid Kiasat M. (2009). Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes. *Journals of Thin-walled Structures*, July 27, 2008; pp.902-911.
- Heung-Soo, K. (2002). New extruded multi-cell aluminum profile for maximum crash energy absorption and weight efficiency. *Thin-walled Structures*. vol.40(4): pp.311-327.
- Tai, Y.S., Huang, M.Y., and Hu, H.T. (2010) Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinder under impact load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. February 2010; vol.53(1): pp.1-8.
- Babushankar Sambamoorthy. CHARACTERIZATION AND COMPONENT LEVEL CORRELATION OF ENERGY ABSORBING (EA) POLYURETHANE FOAM (PU) USING LS-DYNA MATERIAL MODEL
- Ghasemnejad, H., Hadavinia, H., Marchant, D., and Aboutorabi, A. (2008). Energy absorption of thin-walled corrugated crash box in axial crushing. *Structural Durability & Health Monitoring*.; Vol.4(1): pp.29-46
- Satosa, S. and Wierzbicki, T. (1998). Crash behavior of box columns filled with aluminum honeycomb or foam. *Computer & Structures*.; vol.68(4): pp.343-367.
- Hakim, S. (2002). Energy absorption characteristics and crashing parameter of filament glass fiber/epoxy composite tube. *European Journal of scientific research*.; vol.39(1): pp.111-121.



## รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Samohbasa, S., Rooppakhun, S. (2019). **The Impact of Foam Density and Number of Corrugation to Crashworthiness in Aluminum Tube filled Polyurethane Foam under Axial Compressive Loading.** The 33<sup>rd</sup> Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand 2019 (MENETT 2019), Mahasarakham University:Thailand; July 2-5, 2019.





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33  
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุตรธานี

AMM – 019



ผลกระทบของค่าความหนาแน่นวัสดุและจำนวนลอนต่อคุณลักษณะการดูดซับพลังงานในท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยวัสดุโพลียูรีเทนโฟมภายใต้แรงกดในแนวแกน

The Impact of Foam Density and Number of Corrugation to Crashworthiness in Aluminum Tube filled Polyurethane Foam under Axial Compressive Loading

ศรานนท์ สามะบาชา<sup>1</sup>, สุภกิจ รูปจันทร์<sup>2</sup>\*

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111, ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

<sup>2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111, ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

\*ติดต่อ Email: Supakit@sut.ac.th

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการดูดซับพลังงานของท่ออะลูมิเนียมเสริมด้วยวัสดุโพลียูรีเทนโฟม โดยที่มุ่งเน้นศึกษาถึงผลกระทบของค่าความหนาแน่นวัสดุ และจำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมซึ่งอยู่ภายใต้ภาระแรงกดในแนวแกน ในการศึกษาได้ทำการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า ANSYS Workbench LS-DYNA โดยทำการกำหนดแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมมีค่าอัตราส่วนของความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 และมีความหนาเท่ากับ 3 มิลลิเมตร โดยที่ค่าสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบมาตรฐานทางกล ซึ่งพิจารณาความหนาแน่นของวัสดุโพลียูรีเทนโฟมแตกต่างกันจำนวน 4 ค่า และพิจารณาแบบจำลองจำนวนของลอนบนท่ออะลูมิเนียม จำนวน 4 รูปแบบ โดยกำหนดรูปแบบของภาระที่กระทำเป็นแบบระยะการเคลื่อนที่ของแผนกหน้าเท่ากับ 50% ของความสูงชิ้นงาน ผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงาน ในขณะที่จำนวนลอนที่เพิ่มขึ้นนั้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกลดลง ค่าพลังงานดูดซับสูงสุดเกิดขึ้นในกรณีท่ออะลูมิเนียมเสริมวัสดุโพลียูรีเทนโฟมที่ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และมีค่าเท่ากับ 18.2 กิโลจูล

**คำหลัก:** ความหนาแน่นโพลียูรีเทน, จำนวนลอน, การดูดซับพลังงาน, ประสิทธิภาพการรับแรงกระแทก

#### Abstract

The aim of research is to study the characteristic of energy absorption for aluminum tube filled polyurethane foam. The impact of foam density and corrugated number of aluminum tube under the axial load were considered. In the study, finite element (FE) model was created and analyzed by using computer program called ANSYS Workbench LS-DYNA. The aluminum tube model with a ratio of height to diameter of 1.5 and a thickness of 3 millimeter was established. The material properties was obtained from the mechanical laboratory testing data with Standard Universal Testing Machine (UTM). Consider the density of polyurethane foam in 4 difference density which including the four patterns of the corrugated aluminum tube were performed. The compressive displacement-controlled loading was carried on 50 percentage of tube height. The FE results showed the density of polyurethane foam affect the ability to energy absorb. While increasing the number of corrugations results in reduced crashing forced efficiency that the maximum energy absorption occurs in the





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33  
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

AMM – 019



case of aluminum tubes filled polyurethane foam density of 200 kilogram per cubic meter equal to 18.2 kilojoule.

**Keywords:** Polyurethane foam density, Number of corrugations, Energy absorption, Crashing forced efficiency.

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนนั้นเกิดขึ้นบ่อยครั้งซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายทั้งต่อชีวิตและทรัพย์สินโดยเฉพาะรถโดยสารสาธารณะ จากรายงานของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรระบุว่าอัตราการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารสาธารณะเป็นลำดับที่ 3 รองจาก รถจักรยานยนต์และรถยนต์ส่วนบุคคล โดยรถโดยสารสาธารณะที่เกิดอุบัติเหตุบ่อยที่สุดคือ รถแท็กซี่ รถตู้และรถโดยสารขนาดใหญ่ตามลำดับ เนื่องจากสาเหตุหลักๆคือความประมาทและระบบความปลอดภัยของห้องโดยสารไม่ได้รับมาตรฐาน โดยเฉพาะการเกิดอุบัติเหตุจากการชนกระแทกด้านหน้า ซึ่งจะทำให้เกิดพลังงานจากการชนกระแทกจนโครงสร้างของรถโดยสารเกิดการยุบตัวและเกิดการถ่ายเทพลังงานตามโครงสร้างไปยังห้องโดยสารส่งผลให้เกิดอันตรายต่อผู้โดยสาร ซึ่งความเสียหายจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับพลังงานที่ถูกถ่ายเทมาตามโครงสร้างของรถโดยสาร ทั้งนี้กระบวนการออกแบบผลิตโครงสร้างรถโดยสารในประเทศไทยนั้น พบว่ายังขาดแคลนเทคโนโลยีการออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง โครงสร้างรถโดยสารมีน้ำหนักไม่เหมาะสม ขาดความน่าเชื่อถือ ตลอดจนไม่ได้มาตรฐานความปลอดภัย ซึ่งหน่วยงานของภาครัฐโดยกรมการขนส่งทางบก ได้เข้ามามีบทบาทในการวางแนวทางเพื่อกำหนดมาตรฐานการผลิตและการทดสอบรถโดยสาร เรียกว่า มาตรฐานความปลอดภัยของรถโดยสารสาธารณะ โดยถูกบังคับใช้ในปี 2558 (สุริยัน ปัญญาโว, 2557) ความสำคัญส่วนหนึ่งของเนื้อหาเน้นที่เรื่องความแข็งแรงโครงสร้างในกรณีที่เกิดโดยสารประสบอุบัติเหตุภายใต้เงื่อนไขการชนกระแทก

ด้านหน้า อ้างอิงการทดสอบจากข้อกำหนดที่ 29 ของคณะกรรมการการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติ (United Nations Economic Commission for Europe Regulation-29, ECE R-29) อย่างไรก็ตามการทดสอบชนกระแทกโครงสร้างรถโดยสารจริงมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมก่อนการทดสอบภาคสนามจึงมีความสำคัญมาก เพื่อช่วยลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ส่งผลให้รถโดยสารมีความปลอดภัยเป็นไปตามมาตรฐานสากล

ในงานวิจัยนี้ผู้ออกแบบได้ออกแบบส่วนเสริมเพื่อลดพลังงานจากการชนกระแทกด้านหน้าจึงมีงานวิจัยเพื่อศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมและจำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมต่อคุณลักษณะการดูดซับพลังงานโดยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งได้เลือกรูปทรงหน้าตัดของท่ออะลูมิเนียมเป็นทรงกลม เนื่องจากมีงานวิจัยของ S.A. Yousefsani ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ซึ่งหน้าตัดรูปทรงวงกลมนั้น มีความสามารถในการดูดซับพลังงานที่ใกล้เคียงกับหน้าตัดรูปเจ็ดและแปดเหลี่ยม แต่กระบวนการผลิตนั้นง่ายกว่าและสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ส่วนวัสดุที่ใช้เสริมแรงนั้นได้เลือกเป็นวัสดุโพลียูรีเทนโฟมเนื่องจากมีความสามารถสูงในการดูดซับพลังงานและมีน้ำหนักเบา โดยมีงานวิจัยของ Nirut Onsalung ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับพลังงานของโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่นที่แตกต่างกัน ซึ่งผลการทดสอบคือ ที่ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น 200 และ 300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าการดูดซับพลังงานที่ใกล้เคียงกัน จึง



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33  
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

AMM – 019



เลือกความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมที่ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรเป็นค่าสูงสุดในการเปรียบเทียบ

## 2. การเตรียมวัสดุและวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุในห้องปฏิบัติการ และ 2) ส่วนของการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมและจำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมต่อความสามารถในการดูดซับพลังงาน

### 2.1 วัสดุและขั้นตอนทดสอบ

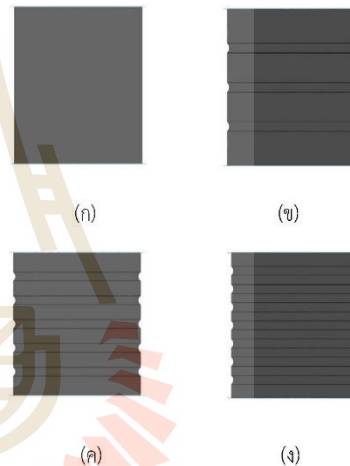
2.1.1 โพลียูรีเทนโฟม เป็นโฟมชนิดแข็งและมีน้ำหนักเบา โดยโฟมชนิดนี้เกิดจากการผสมกันระหว่างของเหลว 2 ชนิด คือ โพลีโอล (Polyol) หรือโฟมขาว และไดโซไซยาเนต (Diisocyanate) หรือโฟมดำนำมาผสมกันในอัตราส่วน 1:1 ซึ่งมีอัตราการขยายตัว 20 เท่า นำมาผสมให้เข้ากันแล้วเทใส่แม่พิมพ์ ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $100 \times 100 \times 50$  มิลลิเมตร ดังแสดงตามรูปที่ 1 ตามขนาดมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ โดยทำการควบคุมความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมได้แก่ 50, 100 และ 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 1 ขั้นตอนทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุโพลียูรีเทนโฟม

2.1.2 ท่ออะลูมิเนียม ทำการกำหนดสมบัติเชิงกลบนโปรแกรม ANSYS Workbench LS-DYNA และออกแบบขนาดของท่ออะลูมิเนียมตามพื้นที่และตำแหน่งการใช้งาน

ของรถโดยสารที่อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 และมีความหนาของท่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ทำการออกแบบให้มีรูปแบบจำนวนลอนที่แตกต่างกันทั้งสิ้น 4 แบบ ได้แก่ ไม่มี และมีจำนวน 3, 5 และ 7 ลอน ดังแสดงตามรูปที่ 2 โดยแต่ละลอนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 15 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างลอนในแต่ละรูปแบบมีระยะห่างที่เท่ากันตลอดทั้งท่ออะลูมิเนียม



รูปที่ 2 แบบจำลองท่ออะลูมิเนียมที่มีการขึ้นรูปด้วยจำนวนที่แตกต่างกัน (ก) ไม่มีลอน (ข) จำนวน 3 ลอน (ค) จำนวน 5 ลอน และ (ง) จำนวน 7 ลอน

### 2.2 วิธีการ

2.2.1 การทดสอบสมบัติเชิงกลของโพลียูรีเทนโฟมจากขั้นตอนที่เตรียมไว้ที่ความหนาแน่น 50, 100, 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบทางกลมาตรฐานตามการอ้างอิง ISO844 ซึ่งเป็น การทดสอบแบบกด (compression) โดยกดขั้นตอนที่ระยะ 85 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงขั้นตอนที่อัตราความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อทำการบันทึกข้อมูลแล้วนำไปแปลงเป็นความเค้นจริง (true stress)



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33  
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

AMM – 019



และความเครียดจริง (true strain) และนำไปใช้ในการกำหนดให้กับโปรแกรมในการวิเคราะห์ต่อไป

2.2.2 แบบจำลองการวิเคราะห์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS Workbench LS-DYNA ประกอบไปด้วยท่ออะลูมิเนียมที่มีวัสดุโพสิทีฟเทนโม่เสริมด้านในและแบบจำลองแผ่นกวดวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งในการกำหนดสมบัติเชิงกลของท่ออะลูมิเนียมและวัสดุโพสิทีฟเทนโม่เสริมภายในท่อใช้รูปแบบแบบไอโซโทรปิกเชิงหลายเส้น (Multilinear Isotropic Hardening) และในส่วนของแบบจำลองการสัมผัสได้กำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.3 โดยกำหนดให้มีขนาดของเอลิเมนต์แบบจำลองท่ออะลูมิเนียมเสริมโพสิทีฟเทนโม่ เท่ากับ 2 มิลลิเมตร ทั้งนี้การกำหนดภาวะกระทำในแนวแกนเป็นรูปแบบการควบคุมระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองแผ่นกวดวัตถุแข็งเกร็ง และจำกัดการเคลื่อนที่ทุกแนวแกนของแบบจำลองแผ่นรองวัตถุแข็งเกร็ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์คุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างระยะการยุบตัวของท่ออะลูมิเนียมและภาวะที่กระทำ เพื่อพิจารณาค่าแรงสูงสุด แรงเฉื่อย พลังงานดูดซับ และประสิทธิภาพการรับแรงกระแทก โดยที่ค่าแรงเฉื่อยนั้นพิจารณาจากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (1)

$$P_m = E_a / \Delta S \quad (1)$$

โดยที่  $P_m$  คือ ค่าแรงเฉื่อย  $E_a$  คือ ค่าพลังงานดูดซับ และ  $\Delta S$  ระยะการยุบตัวของแบบจำลอง ในขณะที่ค่าพลังงานดูดซับนั้นพิจารณาตามความสัมพันธ์สมการที่ (2)

$$E_a = \int P ds \quad (2)$$

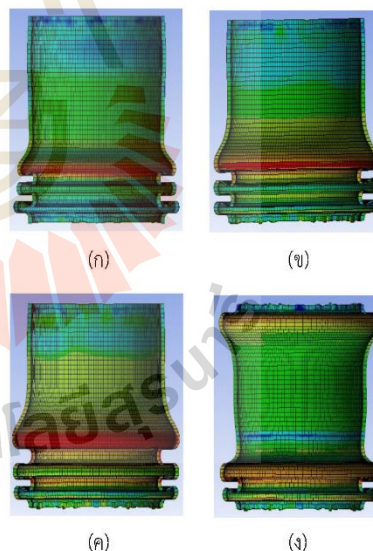
โดยที่  $E_a$  คือค่าพลังงานดูดซับ  $P$  คือภาวะที่กระทำ และ  $s$  คือระยะการยุบตัว และในส่วนของประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกนั้นหาได้จากสมการ (3)

$$\eta = P_m / P_{max} \quad (3)$$

โดยที่  $\eta$  คือ ประสิทธิภาพการรับแรงกระแทก  $P_m$  คือ แรงเฉื่อย และ  $P_{max}$  คือ แรงสูงสุด

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การศึกษาผลกระทบของค่าความหนาแน่นของวัสดุโพสิทีฟเทนโม่เสริมภายในท่อและรูปแบบจำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมต่อคุณลักษณะการดูดซับพลังงานด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำนวนทั้งสิ้น 16 แบบจำลอง โดยที่ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ลักษณะการเสียรูปของแบบจำลองท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีจำนวนลอนและเสริมภายในด้วยวัสดุโพสิทีฟเทนโม่ที่ค่าความหนาแน่นต่าง ๆ สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะการเสียรูปของแบบจำลองโครงสร้างท่อที่ไม่มีจำนวนลอนที่ค่าความหนาแน่นวัสดุโพสิทีฟเทนโม่แตกต่างกัน (ก) 0 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ข) 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ค)





การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33  
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

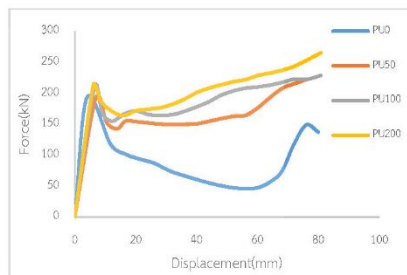
AMM – 019



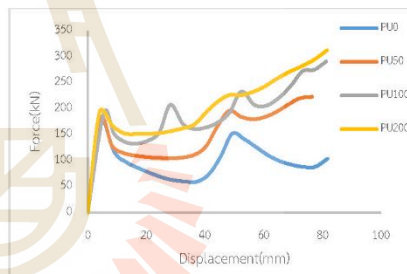
100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และ (ง) 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

อะลูมิเนียมเทียบกับความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมตามรูปที่ 4, 5, 6, 7

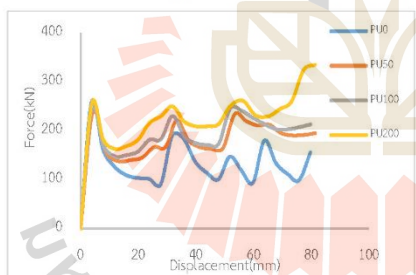
จากรูปที่ 3 เมื่อโครงสร้างแบบจำลองเกิดการยุบตัวทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาโดยที่แรงปฏิกิริยานี้สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับระยะการยุบตัวของแบบจำลอง (Load-Displacement) ดังรูปที่ 4 โดยพบว่าทุกรูปแบบหลังได้รับภาระที่กระทำนั้นเกิดความเสียหายแบบวงแหวนซ้อนทับกัน (Concertina Mode) โดยค่าการดูดซับพลังงานของท่ออะลูมิเนียมทั้ง 4 รูปแบบคือ ท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีลอน, ท่ออะลูมิเนียมที่มีจำนวนลอน 3 ลอน, ท่ออะลูมิเนียมที่มีจำนวนลอน 5 ลอน และท่ออะลูมิเนียมที่มีจำนวนลอน 7 ลอน จะมีค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดที่ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทั้ง 4 รูปแบบ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำและระยะการยุบตัวของแบบจำลองที่จำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียม 3 ลอน

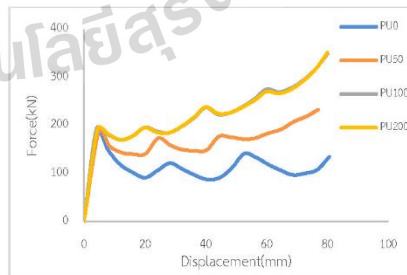


รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำและระยะการยุบตัวของแบบจำลองที่จำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียม 5 ลอน



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำและระยะการยุบตัวของแบบจำลองของท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีลอน

จากรูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างแบบจำลองภายใต้แรงกดในแนวแกน โดยการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลกระทบของความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น 0, 50, 100, 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมที่จำนวน 0, 3, 5, 7 ลอน ซึ่งผลที่ได้จำแนกตามจำนวนลอนของท่อ



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำและระยะการ



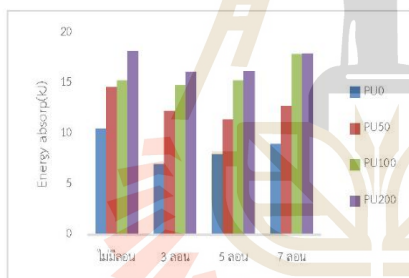
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33  
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

AMM – 019

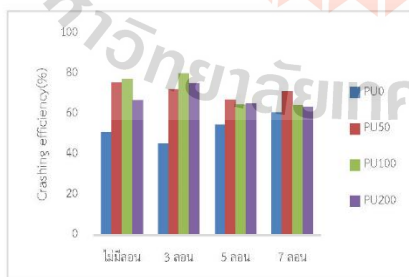


ยุดตัวของแบบจำลองที่จำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียม 7 ลอน

จากรูปที่ 4, 5, 6, 7 จะเห็นได้ว่าที่แบบจำลองที่ไม่มีการเสริมโพลียูรีเทนโฟมจะมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างภาระที่กระทำกับระยะการยุบตัวของโครงสร้างแบบจำลองที่ต่ำที่สุด นั่นหมายความว่า การดูดซับพลังงานของแบบจำลองที่ไม่มีการเสริมโพลียูรีเทนโฟมนั้นต่ำกว่าแบบจำลองที่มีการเสริมโพลียูรีเทนโฟม และเมื่อนำแบบจำลองของท่ออะลูมิเนียมทั้งหมดที่ทุกความหนาแน่นมาทำการคำนวณค่าการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกเปรียบเทียบกันจะได้ตามรูปที่ 8 และ 9 ดังนี้



รูปที่ 8 กราฟแสดงความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างแบบจำลองแต่ละรูปแบบ



รูปที่ 9 กราฟแสดงประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกของโครงสร้างแบบจำลองแต่ละรูปแบบ

จากรูปที่ 8 ท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีลอนที่ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าการดูดซับพลังงานสูงที่สุดเท่ากับ 18.22 กิโลจูล และแบบจำลองท่ออะลูมิเนียม 7 ลอน ที่ความหนาแน่น 200 และ 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 17.95 และ 17.86 กิโลจูล ตามลำดับ และในส่วนของรูปที่ 9 คือค่าประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกโดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่แบบจำลองท่ออะลูมิเนียม 3 ลอน ที่ความหนาแน่น 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 80.31 เปอร์เซ็นต์ และแบบจำลองที่ไม่มีลอนที่ความหนาแน่น 100 และ 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีค่าเท่ากับ 77.37 และ 75.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

#### 4. สรุปผล

การศึกษาผลกระทบค่าความหนาแน่นของวัสดุโพลียูรีเทนโฟม และจำนวนลอนของท่ออะลูมิเนียมต่อคุณลักษณะความสามารถในการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพการรับแรงกระแทก พบว่าค่าการดูดซับพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม และจำนวนของลอนบนท่ออะลูมิเนียม การเพิ่มจำนวนลอนส่งผลต่อค่าแรงเฉลี่ยในการดูดซับพลังงานที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดที่กรณีท่ออะลูมิเนียมที่ไม่มีลอนเสริมด้วยโพลียูรีเทนโฟมที่ความหนาแน่น 200 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 18.22 กิโลจูล โดยในส่วนของประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกนั้น พบว่าการเพิ่มจำนวนของลอนบนท่ออะลูมิเนียมจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลง โดยค่าประสิทธิภาพการรับแรงกระแทกสูงสุดเกิดขึ้นที่กรณีท่ออะลูมิเนียมที่มีจำนวนลอน 3 ลอน ที่ความหนาแน่นของโพลียูรีเทนโฟม 100 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 80.31 เปอร์เซ็นต์



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33  
วันที่ 2-5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 จังหวัดอุดรธานี

AMM – 019



### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ประจำเครื่องทดสอบ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่อำนวยความสะดวกและให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือในงานวิจัย

### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Beth A. Todd, PhD; S. Leeann Smith, BS; Thongsay Vongpaseuth, BS (1998). Polyurethane foam: Effects of specimen size when determining cushioning stiffness, *Journal of Rehabilitation Research and Development* vol. 35 No. 2, June 1998, pages 219-224.
- [2] Saeed Ebrahimi, Nader Vahdatazad, Gholamhossein Liaghat. (2018). Experimental Characterization of the Energy absorption of Functionally Graded Foam Filled Tube under Axial Crushing Load, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. Sofia. Vol. 48 No. 1, pages 76-89
- [3] Miller, L., Sawyer-Beaulieu, S., and Tam, E., Impacts of Non-Traditional Uses of Polyurethane Foam in Automotive Applications at End of Life," *SAE Int. J. Mater. Manf.* 7(3):2014.
- [4] Veronika Effinger, Paul DuBois, Markus Feucht, Andre Haufe, Manfred Bischoff. Nonlinear Ciskoelastic Modeling for foams, 13<sup>th</sup> International LS-DYNA User Conference
- [5] CUI, L., S. KIERNAN, M. D. GILCHRIST. Designing the Energy Absorption Capacity of Functionally Graded Foam Materials. *Mater. Sci. Eng.: A*, 507 (2009), pages 215-225.
- [6] Hanssen, A. G., M. Langseth, O. S. Hopperstad. Static and Dynamic Crushing of Circular Aluminium Extrusions with Aluminium Foam Filler. *Int. J. Impact Eng.*, 24 (2000), pages 475-507.
- [7] Ebrahimi, S, N. Vahdatazad, G. Liaghat. Crashworthiness Efficiency Optimization for Two-Directional Functionally Graded Foam-Filled Tubes under Axial Crushing Impacts. *Int. J. Crashworthiness*, 22 (2017), pages 307-32.
- [8] M. Avalle, G. Belingardi, R. Montanini, (2001). Characterization of polymeric structural foams under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram, *International Journal of Impact Engineering* 25 (2001), pages 455-472.
- [9] Sherwood JA, Frost CC. Constitutive modeling and simulation of energy absorbing polyurethane foam under impact loading. *Polym Engg Sci* (1992); 32(16): 1138-46.
- [10] ISO 844. International Standard, Rigid cellular plastic – Determination of compression properties
- [11] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร เรื่องรายงานการวิเคราะห์สถานการณ์อุบัติเหตุทางถนนของกระทรวงคมนาคม พ.ศ. 2560, แหล่งที่มา <http://www.otp.go.th/index.php/post/view?id=2597>

## ประวัติผู้เขียน

นายศรานนท์ สาเมะบาศา เกิดเมื่อวันที่ 10 กรกฎาคม 2531 ณ จังหวัดปัตตานี สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นจากโรงเรียนโพธิ์คีรีราชศึกษา อำเภอโคกโพธิ์ จังหวัดปัตตานี ในปีการศึกษา 2547 มัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเดชะปัตตณยานุกูล อำเภอเมือง จังหวัดปัตตานี ในปีการศึกษา 2550 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2554 หลังจกสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงาน ณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย เป็นเวลา 2 ปี แล้วจึงได้เข้ารับการศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2557 ในขณะที่กำลังศึกษาได้มีโอกาศเป็นผู้ช่วยสอนในสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ได้แก่รายวิชาดังนี้

- (1) ปฏิบัติการทางการผลิตและระบบควบคุมอัตโนมัติในโรงงาน
- (2) ปฏิบัติการเทคโนโลยีการผลิต
- (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 1
- (4) ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 2

และมีผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ระดับชาติ 1 บทความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี