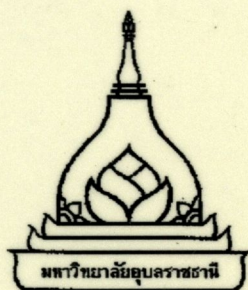




190931



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างรถยนต์โดยสาร
ที่ผลิตภายในประเทศ ภายใต้แรงกระแทก

โดย

ผศ.ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และคณะ

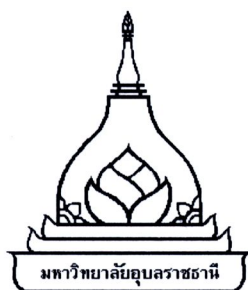
กรกฎาคม 2555

๖๐๐๒๕๖๐๑๕

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



190831



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

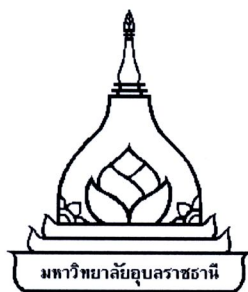
การศึกษาการเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างรถยนต์โดยสาร
ที่ผลิตภายในประเทศ ภายใต้แรงกระแทก



โดย

ผศ.ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และคณะ

กรกฎาคม 2555



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาการเสียหายของชิ้นส่วนโครงสร้างรถยนต์โดยสาร
ที่ผลิตภายในประเทศ ภายใต้แรงกระแทก

(The Study on the Crashworthiness of an Auto-Body Structure
Manufactured in Thailand)

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1. ผศ.ดร.ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 2. นายชาคริต โพธิ์งาม | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |

โครงการนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ประจำปีงบประมาณ 2548-2549

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย มหาวิทยาลัยอุบลราชธานีไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยการให้ความร่วมมือ การสนับสนุน และความอนุเคราะห์จากบุคลากรหลายฝ่าย และหน่วยงานหลายองค์กร ซึ่งคณะผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ดังนี้

ขอขอบคุณผู้ต่อรถยนต์โดยสารต่างๆที่เปิดโอกาสให้คณะวิจัยเข้าพบและเก็บข้อมูล ซึ่งจะขอลำถึงในที่นี้ได้แก่ สมาคมผู้ต่อรถบัสบ้านโป่ง อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง บ.อู๋มีแสง จก. บ.สหกิจยนต์ (1986) จก. (อู๋วิจิศิลป์) หจก.บ้านโป่งเล่าจงเฮง บ.ก้าวหน้าแอร์บัส จก. หจก. เอกวัตร (1994) เป็นต้น นอกจากนี้ยังขอขอบคุณ อู๋สามัคคี จ. อุบลราชธานี และผู้ต่อรถบัสอื่นๆ ซึ่งไม่มีชื่ออย่างเป็นทางการ ตลอดจนขอขอบคุณสถาบันยานยนต์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลอันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุริยา โชคสวัสดิ์ Mr.Lee Meng Fuk ที่อำนวยความสะดวกในการทดสอบและช่วยเหลือในการปรับปรุงเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine จนสำเร็จ และขอขอบคุณบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนการทำงานตลอดการวิจัย อีกทั้งขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่อนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบเพิ่มเติม

ขอขอบคุณทีมงานผู้วิจัยทุกท่านที่ทุ่มเททำงานวิจัยอย่างเต็มที่ แม้ว่าบางท่านไม่ได้มีชื่อในข้อเสนอก็ตาม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายนิรุต อ่อนสูง ที่ได้ทำงานในรายละเอียดจำนวนมาก และท้ายที่สุดขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ทุนในการศึกษาวิจัยนี้

คณะผู้วิจัย

เมษายน 2553

บทคัดย่อ

190931

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการรับแรงกระแทกจากการชนของ โครงสร้างรถยนต์โดยสารที่ต่อขึ้นในประเทศไทย โดยมุ่งทำการศึกษาชิ้นส่วนหลักของโครงสร้าง ได้แก่ แผลด้านข้างลำตัว โครงสร้างหลังคา โครงสร้างประกอบและรูปแบบการยึดต่อต่างๆ การศึกษาเริ่มตั้งแต่การเก็บข้อมูลพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง จากนั้นมีการทำการทดลองเพื่อการสอบเทียบ โปรแกรมและยืนยันผล ซึ่งโปรแกรมที่ใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัยนี้คือโปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEA) ชื่อ ABAQUS แล้วจึงได้นำโปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวซึ่งยืนยันผลแล้วมาใช้ในการสร้างแบบจำลองโครงสร้างหลัก เพื่อขยายขอบเขตการศึกษาให้สามารถทำการศึกษ โครงสร้างขนาดเท่าจริง และมีความซับซ้อนขึ้นได้

การเก็บข้อมูลจากอยู่ต่อรถยนต์โดยสารต่างๆ และพบว่าลักษณะแผลโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารที่นิยมใช้งานมี 3 รูปแบบ คือ 1) การต่อโครงสร้างแบบขนาน 2) การต่อโครงสร้างแบบทแยงมุมและ 3) การต่อโครงสร้างแบบสลัฟพื้นปลา ส่วนโครงสร้างหลังคาพบว่ามักนิยมต่อใน 2 ลักษณะ คือการต่อแบบขนานและการต่อแบบเฉียง คณะวิจัยได้ทำการสอบเทียบโปรแกรม FEA โดยใช้สร้างแผลด้านข้างทั้ง 3 แบบ แต่ในขนาดเพียง 1 ช่อง ไปทำการทดลองรับภาระแบบกดในแนวแกน ภาระดัด และภาระบิด ด้วยความเร็วต่ำ และนำไปทดลองรับแรงกระแทกด้วยความเร็วสูงในแนวแกน แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม FEA ภายได้เงื่อนไขเดียวกัน พบว่าโปรแกรมที่ใช้งานสามารถให้ผลการทำนายได้ใกล้เคียงกับการทดลอง จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำลองโครงสร้างขนาดจริงได้ นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างที่ต่อแบบขนานมีแนวโน้มรับภาระจากการกดในแนวแกนและการดัดได้ดีที่สุด แต่โครงสร้างแบบทแยงมุมและสลัฟพื้นปลากลับสามารถดูดซับพลังงานจากการบิดได้ดีกว่าโครงสร้างด้านข้างที่ต่อแบบขนาน

ในการจำลองการชนของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารที่ต่อแบบเต็มแผงด้วยวิธี FEA สำหรับการชนในแนวแกนและการชนในแนวตั้งฉากนั้น พบว่าโครงสร้างด้านข้างที่ต่อแบบขนานสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่าโครงสร้างที่ต่อแบบทแยงมุมและต่อแบบสลัฟพื้นปลา ผลการทดสอบโครงสร้างหลังคาแบบเต็มแผงภายใต้ภาระการชนในแนวแกน พบว่าภายใต้การทดสอบด้วยภาระการชนในแนวแกนและภาระการชนแบบดัด การต่อเสริมโครงสร้างหลังคาแบบขนานสามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้ดีกว่าโครงสร้างที่ต่อแบบเฉียง แต่การทดสอบภายใต้ภาระแบบบิด พบว่าโครงสร้างที่ต่อแบบเฉียงสามารถดูดซับพลังงานได้ดีกว่า จากนั้นได้ทำการทดสอบโครงสร้างหลังคาที่มีชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงหน้าตัดต่างๆด้วยภาระการชนในแนวแกน โดย

เปลี่ยนหน้าตัดของชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรง 4 แบบ คือหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยม หน้าตัดรูปตัวยู หน้าตัดรูปวงกลมและหน้าตัดรูปตัวแอล ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างหลังคาที่ต่อเสริมด้วยเหล็กหน้าตัดรูปวงกลม สามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้ดีกว่าการต่อเสริมด้วยหน้าตัดแบบอื่นๆ สำหรับการทดสอบโครงสร้างประกอบที่ประกอบจากโครงสร้างหลังคา กับแผงด้านข้างของรถยนต์โดยสารแบบต่างๆกัน 6 แบบ พบว่าโครงสร้างประกอบที่ต่อจากแผงด้านข้างแบบขนานกับโครงสร้างหลังคาแบบขนาน สามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้มากกว่าการต่อสลับคู่กันของโครงสร้างแบบอื่นๆ นอกจากนี้ในการทดสอบลักษณะของชิ้นส่วนยึดต่อโครงสร้างหลังคา กับโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร พบว่าการต่อโครงสร้างแบบที่ 3 สามารถดูดซับพลังงานจากการชนได้ดีกว่าการยึดต่อแบบอื่นๆ รายละเอียดของความสามารถในการดูดซับพลังงาน ลักษณะกราฟภาระ-ระยะยุบตัว และลักษณะการเสียหายของชิ้นส่วน โครงสร้างรถยนต์โดยสารแต่ละชิ้นส่วนได้แสดงและอภิปรายโดยรายละเอียดในรายงาน

ABSTRACT

190931

This research was aimed to study the crashworthiness of Thai-manufactured bus body and its energy absorption capacity. The study focused on only main components of the body i.e. the bus side wall, roof structure, assembled body and some joint patterns. The study was begun by surveying for data from Thai bus manufacturers. Then, experimental work was conducted in order to verify the commercial computer package (Finite Element Analysis, namely ABAQUS). Then, the verified FEA program was used to model the actual size structures in order to investigate their behaviors subjected to various crashing loads.

According to the survey, it was found that there are three patterns of the side wall generally used in Thailand, which are the horizontally-parallel pattern, the diagonally-parallel pattern and the head-to-tail diagonal pattern. For the roof structure, two patterns were generally used i.e. the horizontally-parallel and the diagonally-parallel patterns. The three patterns of side wall were manufactured and tested under quasi-static axial crushed, bending load and twisting load, as well as under dynamic impact axial crush. The results revealed that the horizontally-parallel pattern tends to absorb more crush energy than other two patterns. However, in case of twisting load, the diagonally-parallel and the head-to-tail diagonal patterns seem to absorb more energy. The experimental result was also compared with the simulation result by FEA program. Good agreement with acceptable error was achieved. Therefore, the program was used for investigating further on the behavior of actual size and more complex components.

Considering the actual size and whole bus side frame under axial and side impact, it was revealed that the horizontally-parallel pattern provides higher energy absorption than that of the diagonally-parallel and head-to-tail diagonal patterns. In cases of the bus roof frame, the result suggested that under axial and bending loads the parallel pattern provides more energy absorption than that of the diagonal one. In contrast, for the twisting load, the diagonal pattern has more energy absorption. This study also investigated the crush capacity of the roof with various sections of supplementary elements. These sections were circular, square, L-shape and U-shape. The results revealed that the roof with circular supplementary elements provides highest energy absorption and highest specific energy absorption. The assembled bus bodies, which were composed of different patterns of bus side frames and roof frames, were tested under axial crush

in order to investigate their crush characteristic. It was found that the parallel side wall pattern combined with the parallel roof pattern gives higher energy absorption than that of other combinations. In addition, the different types of joint elements between the roof and side wall were also tested. It was found that the joint type 3 provides highest energy absorption. Detail of energy absorption capacity, load-displacement curve and deformation mode of each element of the bus body were reported and discussed in the report.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ด

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	3
1.6 โครงสร้างของรายงาน	4

บทที่ 2 ข้อมูลพื้นฐาน ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะและข้อมูลของรถยนต์โดยสาร	6
2.1.1 มาตรฐานที่ 1 รถปรับอากาศพิเศษ	6
2.1.2 มาตรฐานที่ 2 รถปรับอากาศทั่วไป	6
2.1.3 มาตรฐานที่ 3 รถยนต์โดยสารที่ไม่มีเครื่องปรับอากาศ	7
2.1.4 มาตรฐานที่ 4 รถยนต์โดยสารสองชั้น	7
2.1.5 มาตรฐานที่ 5 รถยนต์โดยสารแบบพ่วง	7
2.1.6 มาตรฐานที่ 6 รถยนต์โดยสารแบบกึ่งพ่วง	8
2.1.7 มาตรฐานที่ 7 รถยนต์โดยสารแบบเฉพาะกิจ	8
2.2 มาตรฐานสากลในการทดสอบรถยนต์	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1 มาตรฐานความปลอดภัยของสหพันธ์ยานยนต์ (FMVSS)	13
2.2.2 มาตรฐานการประเมินและการทดสอบรถยนต์ใหม่ (NCAP)	13
2.2.3 มาตรฐานความปลอดภัยบนทางด่วน (IIHS)	15
2.3 การศึกษาชิ้นส่วนรับแรงกระแทก	15
2.3.1 ภาวะวิกฤติหรือภาวะเสียหาย	15
2.3.2 ภาวะสูงสุด	16
2.3.3 ภาวะเฉื่อย	16
2.3.4 พลังงานดูดซับ	16
2.3.5 พลังงานดูดซับจำเพาะ	17
2.3.6 ประสิทธิภาพการยุบตัว	18
2.3.7 ประสิทธิภาพพลังงานดูดซับ	19
2.3.8 ประสิทธิภาพของภาวะ	20
2.4 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา	20
2.4.1 ความเค้นทางวิศวกรรม	20
2.4.2 ความเครียดทางวิศวกรรม	21
2.4.3 โมดูลัสความยืดหยุ่น	22
2.4.4 ความเค้นที่เกิดขึ้นจริง	22
2.4.5 ความเครียดที่เกิดขึ้นจริง	22
2.4.6 Plastic Strain	23
2.5 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	23
2.5.1 พื้นฐานทางไฟไนต์เอลิเมนต์	23
2.5.2 วิธีการคำนวณในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	25
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	25
2.6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาการชนของชิ้นส่วน โครงสร้างรถยนต์	27
2.6.2 การศึกษาเกี่ยวกับการบาดเจ็บจากการกระแทก	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การสำรวจข้อมูลและข้อมูลโครงสร้างรถยนต์โดยสาร	
3.1 วิธีการเก็บข้อมูล	37
3.2 การบริหารการผลิตรถยนต์โดยสารในประเทศไทย	37
3.3 ข้อมูลโครงสร้างรถยนต์โดยสาร	38
3.3.1 โครงสร้างด้านข้างลำตัวรถยนต์โดยสาร	38
3.3.2 โครงสร้างหลังคาของรถยนต์โดยสาร	43
3.3.3 โครงสร้างด้านหน้ารถยนต์โดยสาร	44
3.3.4 โครงสร้างด้านหลังรถยนต์โดยสาร	45
บทที่ 4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและรายละเอียดวิธีการศึกษา	
4.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	46
4.1.1 เครื่องทดสอบการกดและการดึง	46
4.1.2 เครื่องทดสอบการกระแทก	47
4.1.3 เครื่องคอมพิวเตอร์	49
4.1.4 เครื่องมือและอุปกรณ์อื่นๆ	49
4.2 คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการประกอบโครงสร้างรถยนต์โดยสาร	49
4.3 โปรแกรม FEA ที่ใช้ในการศึกษา (ABAQUS)	52
4.3.1 ส่วนของการสร้างแบบจำลอง	52
4.3.2 ส่วนของการคำนวณผล	53
4.3.3 ส่วนของการแสดงผลของโปรแกรม	53
4.4 การสอบเทียบโปรแกรม FEA กับการทดลอง	54
4.4.1 รายละเอียดของการสอบเทียบภายใต้ภาระการชนด้วยความเร็วต่ำ	55
4.4.2 รายละเอียดของการสอบเทียบภายใต้ภาระการชนด้วยความเร็วสูง	59
4.5 การหาจำนวนเอลิเมนต์อิสระ (Mesh Independence)	61

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6 การทดสอบการชนของโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสาร	62
4.6.1 โครงสร้างและส่วนประกอบรถยนต์โดยสาร	62
4.6.2 ลักษณะแบบจำลองโครงสร้างด้านข้างที่ใช้ในการศึกษา	63
4.6.3 การทดสอบโครงสร้างด้านข้างแบบเต็มโครงสร้าง	64
4.7 การทดสอบการชนของโครงสร้างหลังการยนต์โดยสาร	65
4.7.1 การทดสอบโครงสร้างหลังคาแบบที่ใช้ในปัจจุบัน	66
4.7.2 การทดสอบโครงสร้างหลังคาที่มีการเสริมความแข็งแรงด้วยเหล็กหน้าตัดต่างๆ	66
4.8 การทดสอบการชนในแนวแกนของโครงสร้างประกอบที่ต่อระหว่างโครงสร้างหลังคา กับ โครงสร้างด้านข้าง	67
4.9 การทดสอบลักษณะการยึดต่อระหว่างโครงสร้างหลังคา กับ แผงโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสาร	68
บทที่ 5 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผล	
5.1 ผลการสอบเทียบระหว่างการทดลองกับการทดสอบด้วยโปรแกรม FEA	70
5.1.1 ผลการสอบเทียบภายใต้ภาระการชนด้วยความเร็วต่ำ	70
5.1.2 ผลการสอบเทียบภายใต้ภาระการชนด้วยความเร็วสูง	78
5.2 ผลการทดสอบการชนของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารแบบเต็มแผง	83
5.2.1 การตอบสนองของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้การชนในแนวตั้งฉาก	84
5.2.2 การตอบสนองของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้การชนในแนวแกน	86
5.2.3 ค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างด้านข้างทั้ง 3 แบบ	87
5.3 ผลการทดสอบการชนของโครงสร้างหลังการยนต์โดยสาร	89

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.1 ผลการทดสอบโครงสร้างหลังคาแบบที่ใช้ในปัจจุบัน	89
5.3.2 ผลการทดสอบการชนของโครงสร้างหลังคาที่มีการเสริม ความแข็งแรงด้วยเหล็กหน้าตัดต่างๆ	94
5.4 ผลการทดสอบการชนของโครงสร้างประกอบที่ต่อระหว่าง โครงสร้างหลังคา กับ โครงสร้างด้านข้าง	98
5.4.1 การตอบสนองการชนของโครงสร้างประกอบที่ต่อระหว่าง โครงสร้างหลังคา กับ โครงสร้างด้านข้าง	98
5.4.2 ค่าการดูดซับพลังงานจากการชนของโครงสร้างประกอบ ที่ต่อระหว่างโครงสร้างหลังคา กับ โครงสร้างด้านข้าง	100
5.5 ผลการทดสอบลักษณะการยึดต่อระหว่างโครงสร้างหลังคา กับ แผง โครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสาร	101
5.5.1 การตอบสนองการชนของโครงสร้างประกอบที่ยึดต่อกับ ชิ้นส่วนยึดต่อลักษณะต่างๆ	101
5.5.2 ค่าการดูดซับพลังงานจากการชนของโครงสร้างประกอบ ที่ต่อระหว่างโครงสร้างหลังคา กับ โครงสร้างด้านข้าง	104
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
6.1 สรุปผลการศึกษา	105
6.1.1 ผลการสอบเทียบโปรแกรม FEA กับการทดลอง	105
6.1.2 การทดสอบการชนของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร แบบเต็มแผง	106
6.1.3 การทดสอบการชนของโครงสร้างหลังการยนต์โดยสาร	106
6.1.4 การทดสอบการชนของโครงสร้างประกอบที่ต่อระหว่าง โครงสร้างหลังคา กับ โครงสร้างด้านข้างแบบต่างๆ	107
6.1.5 การทดสอบลักษณะการยึดต่อระหว่างโครงสร้างหลังคา กับ โครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร	107
6.2 ข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไป	107

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.2.1 เกี่ยวกับกระบวนการผลิต	108
6.2.2 เกี่ยวกับมาตรฐานความปลอดภัยของรถยนต์โดยสาร ในประเทศ	108
6.2.3 เกี่ยวกับการศึกษาโครงสร้างรถยนต์โดยสารเพิ่มเติม	108
เอกสารอ้างอิง	109
ภาคผนวก	
ก ตัวอย่างการคำนวณจากการทดสอบ	116
ข รายการผลงานตีพิมพ์เนื่องจากการงานวิจัยนี้	123

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลและรายละเอียดของรถยนต์โดยสารแต่ละมาตรฐาน	8
2.1 (ต่อ) ข้อมูลและรายละเอียดของรถยนต์โดยสารแต่ละมาตรฐาน	9
2.2 ข้อมูลจำเพาะของขนาดรถยนต์โดยสารตามมาตรฐาน	10
2.3 พิกัดน้ำหนักรวมสูงสุดและน้ำหนักลงเพลาตามกรมทางหลวงกำหนด	11
2.4 สถิติจำนวนรถยนต์โดยสารที่จดทะเบียนใหม่ระหว่างปี 2534-2548	12
2.5 แสดงคำร้คมีส่วนโค้งของมุมขึ้นงานทดสอบที่ตำแหน่งต่างๆ ของกล่องอูมิเนียม	28
2.6 แสดงระยะเซาะร่องและพลังงานดูดซับที่ได้เมื่อเปลี่ยนระยะการเซาะร่องขึ้นงาน	29
3.1 ความหนาและขนาดของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสาร	39
4.1 คุณสมบัติเบื้องต้นจากการทดสอบวัสดุ	51
4.2 แสดงตัวอย่างค่าความเค้นจริง (True Stress) และความเครียดจริง (True Strain) และค่า Plastic Strain ที่ได้จากการทดสอบวัสดุ	51
5.1 ผลการคำนวณค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดสอบและตัวแปรที่เกี่ยวข้องภายใต้ภาวะความเร็วต่ำที่กระทำแบบกดในแนวแกน แบบค้ดและแบบบิด	77
5.2 ผลการคำนวณค่าการดูดซับพลังงานที่ได้จากการทดสอบและตัวแปรที่เกี่ยวข้องภายใต้ภาวะความเร็วสูง	82
5.3 แสดงผลการคำนวณค่าพลังงานดูดซับของโครงสร้างที่ได้จากการทดสอบ	88
5.4 ค่าพลังงานดูดซับ (E_a) และค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ (E_s) จากแบบจำลองทาง FEA ของโครงสร้างหลังคาภายใต้ภาระแบบต่างๆ	93
5.5 ค่าพลังงานดูดซับ (E_a) และค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ (E_s) จากแบบจำลองทาง FEA ของโครงสร้างหลังคาที่ใช้ชิ้นส่วนต่อเสริมหน้าค้ดที่ต่างกัน	97
5.6 ผลการคำนวณของการทดสอบการชนในแนวแกนของการต่อสลับระหว่างโครงสร้างด้านข้างกับโครงสร้างหลังการยนต์โดยสาร	100
5.7 ค่าพลังงานดูดซับของโครงสร้างประกอบที่มีชิ้นส่วนยึดต่อแบบต่างๆ	104

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่		
2.1	แสดงลักษณะการทดสอบการชนด้านหน้าตามมาตรฐานการทดสอบรถยนต์ใหม่	14
2.2	แสดงมาตรฐานการทดสอบการชนคนเดินเท้าของการทดสอบรถยนต์ใหม่	14
2.3	แสดงมาตรฐานการทดสอบการชนด้านข้างของการทดสอบรถยนต์ใหม่	15
2.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาระและระยะยุบตัว (Load - Displacement Curve)	16
2.5	แสดงระยะยุบตัวของชิ้นงานที่มีความหนาแตกต่างกันอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเดียวกัน	18
2.6	แสดงเส้นกราฟของการยุบตัวภายใต้ภาระการชนกระแทก	19
2.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด	21
2.8	แสดงกราฟของพลังงานภายในเทียบกับระยะยุบตัวเมื่อเกิดการชน	27
2.9	แสดงชิ้นส่วนที่ทดสอบและบริเวณจุดที่พิจารณา	28
2.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของภาระและระยะยุบตัว	29
2.11	แสดงรูปลักษณะของการเจาะร่องชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ	29
2.12	แสดงเส้นรอยพับของชิ้นงาน โลหะรูปสี่เหลี่ยมตามทฤษฎีของ Kecman's	30
2.13	กราฟแสดงความสามารถของร่างกายมนุษย์ในการรองรับแรงกระแทกจากเหตุการณ์ที่ต่างกัน เมื่อเกิดอัตราเร่ง	33
2.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน (a/g) กับเวลาในการรับแรงกระแทก	34
2.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบาดเจ็บของศีรษะ HIC กับความเร็วในการชนกระแทก v_2 และอัตราส่วนความเร่งกับแรงดึงดูดของโลก (a/g)	36
3.1	แสดงโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสารจริง และภาพจำลอง	38
3.2	แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสาร	39
3.3	แสดงลักษณะการเชื่อมต่อโครงสร้างด้านข้างกับแชสซี	40
3.4	แสดงชิ้นส่วนโครงสร้างด้านข้างบริเวณที่เสริมความแข็งแรง	41
3.5	แสดงการเชื่อมต่อชิ้นส่วนโครงสร้างบริเวณด้านล่างเพื่อเสริมความแข็งแรง	41
3.6	แสดงการต่อแบบเว้นช่องว่างของชิ้นส่วนโครงสร้างด้านข้างเพื่อเสริมรอยเชื่อม	42
3.7	แสดงการต่อโครงสร้างด้านข้างกับชิ้นส่วนโครงสร้างแนวตั้งและแนวนอน	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 แสดงการต่อโครงสร้างด้านข้างกับชิ้นส่วนที่เสริมความแข็งแรงแบบชนมุม	43
3.9 แสดงโครงสร้างหลังการถยนต์โดยสาร	44
3.10 แสดงการเชื่อมต่อ โครงสร้างด้านข้างกับ โครงสร้างหลังการถยนต์โดยสาร	44
3.11 แสดงโครงสร้างด้านหน้าของรถยนต์โดยสาร	45
3.12 แสดงโครงสร้างด้านหลังรถยนต์โดยสาร	45
4.1 เครื่องทดสอบ Compressive & Tensile Test Machine และชุดคอมพิวเตอร์ควบคุม	47
4.2 เครื่องทดสอบการกระแทกแบบ Drop Hammer Tower ที่ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อใช้ในการงานวิจัย	48
4.3 ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบหาค่าคุณสมบัติทางกลของวัสดุ	50
4.4 แสดงกราฟของระยะยืด (Extension) และภาระ (Load) ที่ได้จากการทดสอบวัสดุ	50
4.5 แสดงลักษณะหน้าจอของโปรแกรม ABAQUS\CAE	53
4.6 แสดงตัวอย่างของ Input Files ที่ใช้ในโปรแกรม ABAQUS	54
4.7 แสดงชิ้นส่วนของโครงสร้างที่สร้างขึ้นสำหรับการทดสอบ	55
4.8 แสดงเครื่องมือที่สร้างขึ้นเพื่อจับยึด โครงสร้างและการทดสอบที่ใช้ทั้ง 3 แบบ	56
4.9 แสดงชิ้นส่วนของโครงสร้างที่สร้างขึ้นในคอมพิวเตอร์	58
4.10 แสดงลักษณะการจับยึดโครงสร้างที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์	58
4.11 แสดงการจัดวางชิ้นงานทดสอบในเครื่องทดสอบการกระแทก	59
4.12 แสดงตัวอย่างแบบจำลองทาง FEA ของโครงสร้างภายใต้การกระแทกด้วยความเร็วสูง	60
4.13 แสดงกราฟการหาค่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม โดยใช้พลังงานดูดซับเป็นตัวชี้วัด	61
4.14 แสดงรูปแบบจำลองทาง FEA ของส่วนประกอบโครงสร้างรถยนต์โดยสาร	63
4.15 แสดงรูปแบบจำลองโครงสร้างแผงด้านข้างรถยนต์โดยสาร ที่มีการต่อชิ้นส่วนเสริม ความแข็งแรงแบบต่างๆ	64
4.16 แสดงวิธีเตรียมการก่อนทดสอบในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	65
4.17 แสดงรูปแบบการต่อโครงสร้างหลังการถยนต์โดยสาร	66
4.18 แสดงลักษณะหน้าตัดของชิ้นส่วนเสริมโครงสร้างหลังการถยนต์โดยสาร	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.19 แสดงรูปแบบการต่อประกอบกันของโครงสร้างด้านข้างกับโครงสร้างหลังคาของรถยนต์โดยสาร	68
4.20 แสดงรูปแบบการต่อเสริมความแข็งแรงของการยึดต่อโครงสร้างหลังคากับแผงโครงสร้างด้านข้างของรถยนต์โดยสาร	69
5.1 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างจากการทดลองภายใต้ภาระแบบกดในแนวแกน	71
5.2 แสดงกราฟค่าภาระที่กระทำกับระยะยุบตัวจากการทดลองของโครงสร้างที่ต่อทั้ง 3 แบบ ภายใต้ภาระการกดในแนวแกน	72
5.3 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างจากการทดสอบด้วยวิธี FEA ภายใต้ภาระการกดในแนวแกน	73
5.4 แสดงกราฟค่าภาระที่กระทำกับระยะยุบตัวจากการทดสอบด้วย FEA ของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ ภายใต้ภาระการกดในแนวแกน	73
5.5 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างจากการทดลอง ภายใต้ภาระแบบดัด	74
5.6 แสดงรูปแบบการเสียหายภายใต้ภาระการดัดโดยการทดสอบด้วยวิธี FEA	75
5.7 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างที่ได้จากการทดลองภายใต้ภาระกระทำแบบบิด	75
5.8 แสดงรูปแบบการเสียหายจากการทดสอบด้วยวิธี FEA ภายใต้ภาระที่กระทำแบบบิด	76
5.9 ลักษณะการเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 แบบจากการทดลองกระแทกด้วยความเร็วสูง	79
5.10 กราฟแรงปฏิกิริยาและเวลาของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ จากการทดลองกระแทกด้วยความเร็วสูง	80
5.11 ลักษณะการเสียหายของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ จากการจำลองด้วย FEA ภายใต้การกระแทกด้วยความเร็วสูง	80
5.12 กราฟแรงปฏิกิริยาและเวลาของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ จากการจำลองด้วย FEA ภายใต้การกระแทกด้วยความเร็วสูง	81
5.13 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้ภาระการชนในแนวตั้งฉาก	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
5.14 กราฟภาระและระยะขยุบตัวที่ได้จากแบบจำลองทาง FEA ของโครงสร้างภายใต้การชนในแนวตั้งฉาก	85
5.15 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้ภาระการชนในแนวแกน	86
5.16 กราฟภาระและระยะขยุบตัวที่ได้จากแบบจำลองทาง FEA ของโครงสร้างภายใต้การชนในแนวแกน	87
5.17 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างหลังคาที่ต่อแบบขนานและต่อแบบเฉียงภายใต้ภาระการชน 3 แบบ	89
5.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับระยะขยุบตัวของโครงสร้างหลังคาที่ต่อแบบขนานและแบบเฉียงภายใต้การชนในแนวแกน	90
5.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับระยะขยุบตัวของโครงสร้างหลังคาที่ต่อแบบขนานและแบบเฉียงภายใต้ภาระการดัด	91
5.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงปฏิกิริยากับระยะขยุบตัวของโครงสร้างหลังคาที่ต่อแบบขนานและแบบเฉียงภายใต้ภาระการบิด	92
5.21 แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างหลังคาที่เสริมความแข็งแรงด้วยเหล็กหน้าตัด 4 แบบ ทดสอบภายใต้ภาระการกดในแนวแกน	95
5.22 แสดงผลการทดสอบการชนในแนวแกนของโครงสร้างหลังคาแบบขนานที่ติดตั้งส่วนเสริมความแข็งแรงแบบหน้าตัดต่างๆ	96
5.23 แสดงรูปแบบการเสียหายจากการชนของโครงสร้างประกอบที่ต่อจากแผงโครงสร้างด้านข้างและโครงสร้างหลังคาแบบต่างๆ	98
5.24 แสดงกราฟของแรงปฏิกิริยาและระยะขยุบตัวของโครงสร้างประกอบที่ต่อจากโครงสร้างด้านข้างกับโครงหลังคาแบบต่างๆ	99
5.25 แสดงรูปแบบการเสียหายจากการทดสอบการชนของโครงสร้างประกอบที่มีชิ้นส่วนยึดต่อแบบต่างๆ	102
5.26 กราฟแรงปฏิกิริยาและระยะขยุบตัวของโครงสร้างประกอบที่มีชิ้นส่วนยึดต่อแบบต่างๆ	103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
P_{cr}	ภาระวิกฤติ (Collapse load or Critical load)	[N], [N.m]
P_{min}	ภาระน้อยที่สุด (Minimum Load)	[N], [N.m]
P_{max}	ภาระสูงสุด (Maximum Load)	[N], [N.m]
P_{mean}	ภาระเฉลี่ย (Mean Crushing Load)	[N], [N.m]
P_e	ประสิทธิภาพเชิงภาระ (Load Efficiency)	[%]
E_{max}	พลังงานสูงสุด (Maximum Energy)	[N.m]
E_a	พลังงานดูดซับเฉลี่ย (Average Energy Absorption)	[N.m]
E_s	พลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific Energy Absorption)	[N.m/kg]
E_c	ประสิทธิภาพเชิงพลังงาน (Energy Efficiency)	[%]
SE	ประสิทธิภาพการยุบตัว (Stroke Efficiency)	[%]
Rad	มุม	[Radian]
$Stroke$	ระยะยุบตัว (Displacement)	[mm]
v	ความเร็ว (Velocity)	[m/s]
a	ความเร่ง (acceleration)	[m/s ²]
FEA	Finite Element Analysis	-
$Mass$	มวล	[kg]
A	พื้นที่ (Area)	[m ²]
σ	ความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)	[N/m ²]
F	ค่าแรงที่กระทำตามแนวแกน	[N]
ϵ	ค่าความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Strain)	-
l	ความยาวสุดท้าย	[m]
l_0	ความยาวเดิมของชิ้นทดสอบ	[m]
Δl	การเปลี่ยนแปลงความยาวจากการยืดตัว	[m]
E	ค่าโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)	[GN/m ²]
σ'	ค่าความเค้นจริง (True Stress)	[N/m ²]
ϵ'	ความเครียดจริง (True Strain)	-

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ϵ^{pl}	การเปลี่ยนแปลงความเครียด (Plastic Strain)	-
HIC	ค่าการบาดเจ็บของศีรษะและคอ (Head Injury Criterion)	-
(a/g)	อัตราส่วนความเร่งต่อค่าแรงดึงดูด	-