รหัสโครงการ SUT7-707-56-12-56

# รายงานการวิจัย

# การออกแบบโครงสร้างและวิเคราะห์ความปลอดภัยของรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขสภาวะการชนกระแทกด้านหน้าและการพลิกคว่ำ

# (The structural design and safety analysis of passenger bus under frontal crashworthiness and rollover conditions)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-707-56-12-56

# รายงานการวิจัย

# การออกแบบโครงสร้างและวิเคราะห์ความปลอดภัยของรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขสภาวะการชนกระแทกด้านหน้าและการพลิกคว่ำ

# (The structural design and safety analysis of passenger bus under frontal crashworthiness and rollover conditions)

**หัวหน้าโครงการ**

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปขันธ์**

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

**ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556**

**ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว**

กันยายน 2559

# กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ซึ่งงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็ด้วยความช่วยเหลือจากทีมงานวิจัยห้องปฏิบัติการด้านการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม และความร่วมมือของบริษัท อู่เชิดชัย อุตสาหกรรม จำกัด ตลอดจนบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ทำให้โครงงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

กันยายน 2559

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทคัดย่อ

ความแข็งแรงของโครงสร้างหลักรถโดยสารเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการออกแบบและผลิตรถโดยสาร สำหรับประเทศไทยกรมขนส่งทางบกเป็นหน่วยงานที่ควบคุมมาตรฐานความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสาร โดยที่มาตรฐานความความปลอดภัยที่กรมขนส่งทางบกซึ่งได้อ้างอิงมาจากเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยของยุโรปประกอบไปด้วยมาตรฐานความปลอดภัยภายใต้การพลิกคว่ำ (ECE Regulation No. 66) และมาตรฐานความปลอดภัยการชนกระแทกด้านหน้า (ECE Regulation No. 29) ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความแข็งแรงโครงสร้างรถโดยสารประเภทหนึ่งชั้น (รุ่น CB280 บริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด) ภายใต้เงื่อนไขมาตรฐานความปลอดภัยการพลิกคว่ำและการชนกระแทกด้านหน้า โดยทำการศึกษาและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างรถโดยสารที่ได้ทำการวิเคราะห์ไม่เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการทดสอบพลิกคว่ำ โดยที่ในขณะโครงสร้างรถสารเกิดการพลิกคว่ำบริเวณห้องโดยสารมีความเสียหายล้ำเกิดพื้นที่ปลอดภัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณชิ้นส่วนโครงสร้างเสาหลักและชิ้นส่วนเหล็กด้านข้าง อย่างไรก็ตามโครงสร้างรถโดยสารดังกล่าวมีความปลอดภัยและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า ซึ่งเมื่อทำการออกแบบเปลี่ยนแปลงขนาดและเพิ่มความหนาโครงสร้างเสาข้างและหลังคาหลักจะส่งผลทำให้โครงสร้างมีการเสียรูปที่ลดลงและไม่มีชิ้นส่วนใดล้ำเข้าไปในพื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสาร รวมไปถึงการเพิ่มชิ้นส่วนโครงสร้างช่วยในการดูดซับแรงกระแทกด้านหน้าจะส่งผลทำให้โครงสร้างรถโดยสารมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจลน์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับการทดสอบปล่อยมวลตกกระแทกชิ้นงานรูปทรงท่อกลมผนังบาง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# Abstract

The strength of bus superstructure is an especially consideration role in the design and production of coach. In Thailand, the department of land transport is the authority that controls the standard safety of the bus structure. According to the security standards, the department of land transport which has references coming from the European benchmark consists of safety standards under the rollover (ECE regulation no.66) and frontal impact (ECE regulation no.29). This research is to analyze the structural strength of decker bus (model CB280 Cherdchai Company Industrial co., Ltd) based on the rollover and frontal impact safety standard using computerized Finite Element Analysis (FEA) software. The results showed that the bus superstructure does not meet the rollover safety standard. During the rollover, the passenger cabin was damaged caused the deformation of safe area. The pillar and side frame of body structure are the main components absorbed the structural deformation. However, the bus structure is still safe and meets the benchmark of frontal impact test. Regard to the bus structure improvement, the increasing of cross sectional area in the main pillar as well as the roof structure (such as size and thickness) reveal that no any part penetrate in the safety zone of the passenger cabin. In addition, the impact absorber will enhance the absorbed kinetic energy performance of the bus structure. Finally, the FEA simulation was validated using the impact drop test of thin wall tube. The result obtained from tests and simulation are in the same trend.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญ

**หน้า**

กิตติกรรมประกาศ ก
บทคัดย่อภาษาไทย ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ค
สารบัญ ง
สารบัญภาพ ช
สารบัญตาราง ฌ

**บทที่ 1 บทนำ** 1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน และ/หรือ กรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย 2
1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.6 วิธีการดำเนินงาน 4
1.7 แผนการบริหารและแผนการดำเนินงาน 5
1.8 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย 6

**บทที่ 2 ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง** 7
2.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับรถโดยสาร 7
2.1.1 มาตรฐานของรถโดยสารและข้อกำหนดทางกฎหมายภายในประเทศ 7
2.1.1.1 ขนาดของรถโดยสาร 7
2.1.1.2 ข้อกำหนดรัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ 9
2.1.1.3 ข้อกำหนดพิกัดสูงสุดและน้ำหนักลงเพลา 10
2.1.1.4 การกำหนดเกณฑ์การทรงตัวของรถโดยสาร 10
2.1.1.5 การทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างตัวรถของรถโดยสารขนาดใหญ่ 11
2.1.2 มาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง 11
2.1.2.1 มาตรฐาน UNECE Regulation No.66 11
2.1.2.1 มาตรฐาน UNECE Regulation No.29 14
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 16
2.2.1 การชนกระแทกแบบกึ่งสถิต 16

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.2 พลังงานดูดซับจากการชนกระแทกความเร็วต่ำ 17
2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างยานยนต์ 19

**บทที่ 3 ผลการดำเนินงานวิจัย** 20
3.1 การออกแบบและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร 20
3.1.1 แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร 21
3.1.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 22
3.1.3 การกำหนดสมบัติวัสดุ 23
3.1.4 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง 24
3.1.5 เกณฑ์การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสาร 25
3.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร 25
3.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบการพลิกคว่ำ 25
3.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า 26
3.3 แนวทางในการปรับปรุงความแข็งแรงโครงสร้างรถโดยสาร 28
3.3.1 มาตรฐานการทดสอบการพลิกคว่ำ 28
3.3.1.1 แนวทางปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 1 28
3.3.1.2 แนวทางปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 2 29
3.3.1.3 แนวทางปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 3 30
3.3.2 มาตรฐานการทดสอบการการชนกระแทกด้านหน้า 31
3.3.2.1 การออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก 31
3.3.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารเสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก 33
3.4 สรุปผลการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างหลักของรถโดยสาร 35
3.4.1 มาตรฐานการทดสอบการพลิกคว่ำ 35
3.4.2 มาตรฐานการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า 36

**บทที่ 4 การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง** 37
4.1 การทดสอบปล่อยมวลตกกระแทกชิ้นส่วนท่อผนังบาง 37
4.1.1 ชุดทดสอบการตกกระแทก 37
4.1.2 โปรแกรมวัดค่าในการทดสอบ 38
4.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิมเมนต์ 39

# สารบัญ (ต่อ)

**หน้า**

4.3 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์แบบจำลอง ..... 40

**บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย** ..... 42

5.1 มาตรฐานความปลอดภัยการพลิกคว่ำ ..... 42

5.2 มาตรฐานความปลอดภัยการชนกระแทกด้านหน้า ..... 42

5.3 ข้อเสนอแนะ ..... 43

**บรรณานุกรม** ..... 44

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญภาพ

**รูปที่** **หน้า**

รูปที่ 1.1 กรอบแนวทางในการศึกษาวิจัย 3
รูปที่ 2.1 จำนวนรถโดยสารแยกตามมาตรฐานรถ ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2557 และ 2558 8
รูปที่ 2.2 รายละเอียดของรถโดยสารมาตรฐาน 1, 2(ก), 2(ข), 3(ก), 3(ข) และ 7 8
รูปที่ 2.3 รัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ 9
รูปที่ 2.4 การทดสอบการทรงตัวของรถโดยสารขนาดใหญ่ที่มีความสูงตั้งแต่ 3.60 เมตร 10
รูปที่ 2.5 พื้นที่ปลอดภัยภายในห้องโดยสารตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66 12
รูปที่ 2.6 ลักษณะของเครื่องทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66 13
รูปที่ 2.7 รายละเอียดการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐาน ECE Regulation No.29 14
รูปที่ 2.8 การติดตั้งโครงสร้างรถสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ECE Regulation No.29 15
รูปที่ 2.9 หุ่นจำลองบุคคลที่ใช้ในการทดสอบตามข้อกำหนด ECE Regulation No.29 16
รูปที่ 3.1 แผนผังกระบวนการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างรถโดยสาร 21
รูปที่ 3.2 แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร 3 มิติ 22
รูปที่ 3.3 รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ 23
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจากการทดสอบ 23
รูปที่ 3.5 เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองในแต่ละการทดสอบ 25
รูปที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบพลิกคว่ำ 26
รูปที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบชนกระแทก 27
รูปที่ 3.8 แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 1 28
รูปที่ 3.9 ผลการวิเคราะห์การออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 1 29
รูปที่ 3.10 แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 2 29
รูปที่ 3.11 ผลการวิเคราะห์การออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 2 30
รูปที่ 3.12 แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 3 30
รูปที่ 3.13 ผลการวิเคราะห์การออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 3 31
รูปที่ 3.14 แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทก 32
รูปที่ 3.15 ชิ้นส่วนอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกที่ได้ทำการออกแบบ 32
รูปที่ 3.16 ประสิทธิภาพการชนกระแทกของรูปทรงแต่ละหน้าตัดที่ความหนาต่าง ๆ 33
รูปที่ 3.16 ประสิทธิภาพการชนกระแทกของรูปทรงแต่ละหน้าตัดที่ความหนาต่าง ๆ 33
รูปที่ 3.18 ผลการวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้าง (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) หลังการการปรับปรุง 34
รูปที่ 3.19 ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้น (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) หลังการการปรับปรุง 34

# สารบัญภาพ

**รูปที่** **หน้า**

รูปที่ 3.20 พลังงานจลน์และพลังงานภายใน (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) หลังการการปรับปรุง ..... 35
รูปที่ 4.1 รายละเอียดเครื่องทดสอบการตกกระแทกแบบอิสระ ..... 37
รูปที่ 4.2 หน้าต่างแสดงผลบนโปรแกรมที่ใช้ในการวัดค่าความเร่งและค่าแรง (ก) และ ..... 38
รายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้า (ข)
รูปที่ 4.3 รายละเอียดอุปกรณ์ในชุดทดสอบ (ก) และ ชิ้นทดสอบที่ถูกยึดแน่นที่ด้านล่าง (ข) ..... 38
รูปที่ 4.4 รายละเอียดเงื่อนไขขอบเขต (ก) และสมบัติวัสดุของแบบจำลอง (ข) ..... 39
รูปที่ 4.5 ผลการเสียรูปของชิ้นทดสอบจากการทดสอบ (ซ้าย) และจากการวิเคราะห์แบบจำลอง (ขวา) ..... 40
รูปที่ 4.6 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาที่ได้จากการทดสอบจริงและการจำลอง ..... 40

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# สารบัญตาราง

**ตารางที่** **หน้า**

ตารางที่ 2.1 ขนาดสัดส่วนรถตามมาตรฐาน 2 (2ก และ 2ข) และมาตรฐาน 3 (3ก และ3ข) 8
ตารางที่ 2.2 กำหนดรัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ 9
ตารางที่ 2.3 พิกัดน้ำหนักสูงสุดและน้ำหนักลงเพลาตามที่กรมทางหลวงกำหนดสำหรับรถเดี่ยว 10
ตารางที่ 4.1 ผลระยะการเสียรูป แรงสูงสุด และแรงเฉลี่ย 41

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 1
# บทนำ

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การเดินทางขนส่งผู้โดยสารภายในประเทศเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและความเป็นอยู่อย่างยิ่ง สำหรับประเทศไทยจากข้อมูลกระทรวงคมนาคมเปิดเผยให้เห็นข้อมูลทางสถิต ในปี พ.ศ. 2558 จำนวนรวมของการเดินทางด้วยรถโดยสารองค์การขนส่งมวลชนกรุงเทพและบริษัทขนส่งจำกัดประมาณ 330 ล้านคนต่อปี โดยแบ่งเป็นรถโดยสารธรรมดาและรถโดยสารปรับอากาศ ซึ่งในจำนวนนี้เป็นผู้โดยสารที่ใช้บริการสถานีขนส่งผู้โดยสารทั่วประเทศจำนวน 35 ล้านคนต่อเดือน ทั้งนี้จากรายงานสถิติของกรมขนส่งบกประจำปี 2558 พบว่ารถโดยสารที่จดทะเบียนสะสมมีจำนวน 152,857 คัน (ข้อมูล ณ วันที่ 31 ธ.ค. 2558) ซึ่งเป็นรถโดยสารประจำทางร้อยละ 56 รถโดยสารไม่ประจำทางร้อยละ 36 และรถโดยสารส่วนบุคคลร้อยละ 8 นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนรถโดยสารจดทะเบียนใหม่ตามกฎหมายในปี พ.ศ. 2558 (จำนวน 17,343 คัน) เทียบกับปี พ.ศ. 2557 (จำนวน 11,712 คัน) โดยคิดเป็นจำนวนที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 48.08 ซึ่งพบว่าเป็นรถโดยสารประเภทมาตรฐาน 3 ที่มีจำนวนสัดสวนมากที่สุดถึงร้อยละ 52.58 ของจำนวนรถโดยสารทั้งหมด จากที่ได้กล่าวข้างต้นสะท้อนให้เห็นถึงจำนวนรถโดยสารที่มีจำนวนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

สำหรับข้อมูลรายงานเกี่ยวกับสถิติการเกิดอุบัติเหตุจราจรทางบกของทางสำนักงานตำรวจแห่งชาติ (ณ วันที่ 16 ตุลาคม 2558) โดยกรมขนส่งทางบก พบว่าจำนวนการเกิดอุบัติเหตุในช่วง 5 ปีตั้งแต่ปี 2554 ถึงปี 2558 มีจำนวนเฉลี่ยถึง 55,880 ครั้ง โดยที่ในปี 2558 เป็นอุบัติเหตุที่เกิดจากรถโดยสารขนาดใหญ่มีจำนวนสูงถึง 665 ครั้ง ซึ่งมีสัดส่วนการเกิดอุบัติเหตุอยู่ในอันดับ 9 หรือร้อยละ 1.13 เมื่อเทียบกับยานพาหนะทุกประเภทที่เกิดอุบัติเหตุ อย่างไรก็ตามการเกิดอุบัติเหตุจากรถโดยสารขนาดใหญ่นั้นจะส่งผลต่อจำนวนผู้บาดเจ็บและผู้เสียชีวิตมากกว่าการเกิดอุบัติเหตุจากยานพาหนะอื่น ซึ่งสาเหตุของการเกิดอุบัติเหตุทั้งหมดมีอยู่หลากหลายปัจจัย โดยที่ปัจจัยพื้นฐานสำคัญหนึ่งก็คือปัญหามาตรฐานความปลอดภัยของรถโดยสาร โดยที่สาเหตุสำคัญซึ่งส่งผลให้มาตรฐานด้านความปลอดภัยด้อยลง ได้แก่ การกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยรถโดยสารที่ยังไม่ครอบคลุมดีเพียงพอ การดัดแปลงโครงสร้างรถโดยสารจากทางผู้ประกอบ การขาดการตรวจสภาพการใช้งานและการบำรุงรักษาที่ดี ตลอดจนการขาดแคลนเทคโนโลยีด้านการออกแบบโครงสร้างตัวถังรถโดยสารตามหลักการทางวิศวกรรม เป็นต้น

ในประเทศไทยมาตรฐานของรถโดยสารจะถูกกำหนดและควบคุมตามกฎกระทรวงฉบับที่ 60 ออกตามความในพระราชบัญญัติการขนส่งทางบก ปี 2552 ซึ่งได้กำหนดขนาดสัดส่วนของรถโดยสารแต่ละมาตรฐาน รวมไปถึงมาตรฐานความแข็งแรงและปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสารซึ่งถือว่าเป็นสิ่งสำคัญมาก โดยพบว่าจะเกี่ยวข้องกับการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสาร 2 เรื่อง ได้แก่ มาตรฐานสำหรับการทดสอบการพลิกคว่ำ (อ้างอิงตาม ECE Regulation No. 66) และมาตรฐานสำหรับการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (อ้างอิงตาม ECE Regulation No. 29) ทั้งนี้ผู้ประกอบการที่ผลิตรถโดยสารจะผ่านต้อง

ทดสอบโครงสร้างตามมาตรฐานทั้งสองดังกล่าว จึงจะสามารถจดทะเบียนรับรองความปลอดภัยได้ โดยปัจจุบันจากการสำรวจข้อมูลผู้ประกอบการรถโดยสารในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะเป็นวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดเล็ก (กำลังการผลิตประมาณ 4,000 คัน ถึง 5,000 คัน ต่อปี) โดยกลุ่มหลัก ๆ ของอุตสาหกรรมนี้จะอยู่ที่จังหวัดนครปฐม ราชบุรี และนครราชสีมา รวมไปถึงยังพบว่าการออกแบบพัฒนาโครงสร้างรถโดยสารจะเป็นในรูปแบบการนำเข้าโครงสร้างหลักจากต่างประเทศและทำการดัดแปลงประกอบขึ้นเป็นโครงสร้างตัวถังรถ อย่างไรก็ตามการดัดแปลงโครงสร้างหรือการออกแบบโครงสร้างหลักรถโดยสารตามหลักการในเชิงวิศวกรรมนั้นยังคงไม่ได้มีการพบเห็นในอุตสาหกรรมเท่าที่ควร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการใช้เทคโนโลยีด้านการออกแบบในทางวิศวกรรมด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์และออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารให้มีความปลอดภัยตามมาตรฐานการทดสอบ ตลอดจนเป็นการถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่บุคลากรในอุตสาหกรรมดังกล่าวให้มีความชำนาญในกระบวนการออกแบบโครงสร้างรถโดยสารในประเทศไทย

**1.2 วัตถุประสงค์**

1.2.1 เพื่อสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารตามมาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการพลิกคว่ำ (อ้างอิงตาม ECE Regulation No. 66)

1.2.2 เพื่อสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารตามมาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (อ้างอิงตาม ECE Regulation No. 29)

1.2.3 เพื่อเสนอแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ให้ได้ตามมาตรฐานความปลอดภัยสากล

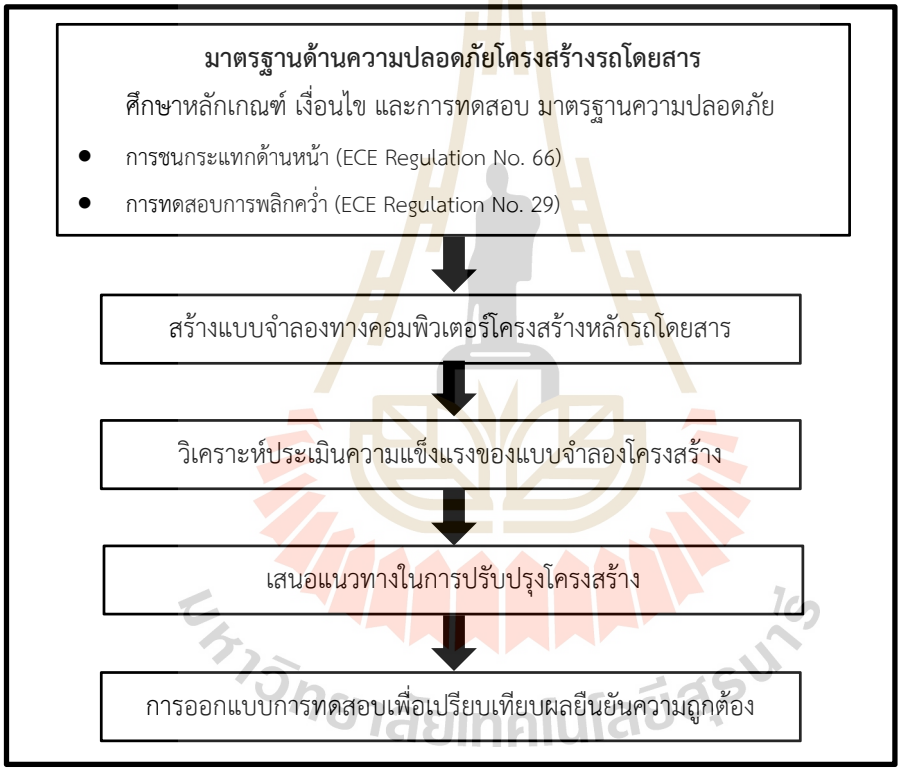
**1.3 ทฤษฎี สมมติฐาน และ/หรือ กรอบแนวความคิดของแผนงานวิจัย**

ในการพัฒนาโครงสร้างชิ้นส่วนหลักตัวถังรถโดยสารจำเป็นต้องศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับประเภทและมาตรฐานความปลอดภัย เพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์กำหนดในการออกแบบโครงสร้างให้ได้ตามมาตรฐาน โดยที่ตามกฎกระทรวงฉบับที่ 4 (ปี 2524) พระราชบัญญัติการขนส่งทางบก พ.ศ. 2522 ได้แบ่งมาตรฐานรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสารออกเป็น 7 มาตรฐานตามลักษณะของรถ และจากข้อมูลรายงานสถิติการขนส่งประจำปี 2558 พบว่ารถโดยสารที่จดทะเบียนสะสม (ข้อมูล ณ วันที่ 31 ธ.ค. 2558) เป็นอันดับสูงสุดก็คือรถโดยสารขนาดใหญ่ประเภทชั้นครึ่ง (มาตรฐาน 3 และมาตรฐาน 2) โดยมีจำนวนสัดส่วนร้อยละ 52.58 และร้อยละ 35.32 ของรถโดยสารทั้งหมดตามลำดับ

สำหรับมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารที่สอดคล้องกับข้อมูลสถิติของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในประเทศไทยนั้นจะเกี่ยวข้องกับมาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (ECE Regulation No. 29) และมาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการพลิกคว่ำ (ECE Regulation No. 66) ซึ่งเป็นกฎข้อบังคับเกี่ยวกับมาตรฐานรถยนต์ของสหภาพยุโรปที่กำหนดขึ้นมาโดยคณะกรรมาธิการเศรษฐกิจของยุโรปแห่งสหประชาชาติ (United Nations Economic Commission for

Europe, UNECE) โดยที่ในการทดสอบความปลอดภัยของโครงสร้างตามมาตรฐานจะประกอบไปด้วยข้อกำหนดและเกณฑ์เงื่อนไขในการทดสอบ อย่างไรก็ตามในกระบวนการในการทดสอบภาคจริงสนามนั้นจะมีความยุ่งยากซับซ้อนและต้นทุนในการทดสอบ เพื่อปรับปรุงให้โครงสร้างผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยซึ่งผู้ประกอบการผลิตรถโดยสารจำเป็นต้องคำนึงถึงประเด็นนี้ด้วย

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ได้มีบทบาทสำคัญอย่างมากในทางด้านงานทางวิศวกรรม กล่าวคือการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ผลสามารถช่วยลดเวลาในการลองผิดลองถูกและลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบจริง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการนำเอาเทคนิคการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในกระบวนการออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสาร เพื่อเป็นการปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารก่อนการทดสอบจริง โดยมีกรอบแนวทางในการวิจัยดังแสดงตามรูปที่ 1.1




**รูปที่ 1.1** กรอบแนวทางในการศึกษาวิจัย

## 1.4 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.4.1 ออกแบบและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่ประเภทหนึ่งชั้น (มาตรฐาน 2 หรือ มาตรฐาน 3) จำนวน 1 รุ่น ภายใต้เงื่อนไขการชนด้านหน้าและพลิกคว่ำของรถโดยสาร โดยอ้างอิงตามมาตรฐานยุโรป ECE-R29 และ ECE-R66 ตามลำดับ

1.4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองชนกระแทกด้านหน้าจะทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างหลักส่วนด้านหน้าและโครงสร้างส่วนอื่นที่มีผลต่อการชนกระแทก

1.4.3 การวิเคราะห์การพลิกคว่ำจะทำการสร้างแบบจำลองเฉพาะส่วนของตัวถังไม่รวมโครงสร้างหลักของรถโดยสาร

1.4.4 ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

1.4.5 ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยได้จากบริษัทผู้ประกอบการตัวถังรถ

**1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1.5.1 แบบจำลองโครงสร้างหลักและตัวถังรถโดยสารที่ผ่านการออกแบบและการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมและมีความแข็งแรงตามมาตรฐานสากล

1.5.2 พัฒนาบุคลากรให้มีความชำนาญด้านการตรวจสอบคุณภาพของโครงสร้างชิ้นส่วนหลักและและตัวถังรถโดยสารตามมาตรฐานสากล

1.5.3 แนวทางการออกแบบและการปรับปรุงการผลิตตัวถังรถโดยสารสำหรับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมให้ได้มาตรฐานความปลอดภัยตามที่กฎหมายกำหนด

1.5.4 สามารถช่วยเหลือผู้ประกอบการในการให้คำปรึกษา วิเคราะห์ และทดสอบโครงสร้างรถโดยสารเพื่อลดต้นทุนในการผลิตและได้รถโดยสารที่เป็นไปตามมาตรฐานความปลอดภัยตามที่กฎหมายกำหนด

**1.6 วิธีการดำเนินงาน**

1.6.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1.6.2 รวบรวมข้อมูลจากบริษัทผู้ประกอบการ เช่น ขนาด วัสดุที่ใช้ และรายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องของโครงสร้างรถโดยสาร

1.6.3 สร้างแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ วิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์โครงสร้างรถโดยสารตามข้อกำหนดบังคับ ECE-R29 และ ECE-R66 บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

1.6.4 ออกแบบและทำการปรับปรุงโครงสร้าง เพื่อให้มีความแข็งแรงและปลอดภัยตามมาตรฐาน ECE-R29 และ ECE-R66

1.6.5 วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา

1.6.6 จัดทำเอกสารและรายงานการวิจัย

**สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล**

- สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- แผนกแชสซีสและตัวถัง บริษัทอู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด จ.นครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โครงการวิจัยนี้จะใช้เวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัยประมาณ 12 เดือน โดยมีรายละเอียดดังนี้

| กิจกรรม | เดือน | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง | | | | | | | | | | | | |
| 2) รวบรวมข้อมูลจากบริษัทผู้ประกอบการ | | | | | | | | | | | | |
| 3) สร้างแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ | | | | | | | | | | | | |
| 4) วิเคราะห์แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ | | | | | | | | | | | | |
| 5) ออกแบบและปรับปรุงโครงสร้าง | | | | | | | | | | | | |
| 6) วิเคราะห์และสรุปผลการศึกษา | | | | | | | | | | | | |
| 7) จัดทำเอกสารและรายงานการวิจัย | | | | | | | | | | | | |

**1.7 แผนการบริหารและการดำเนินงาน**

เพื่อติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการให้สามารถดำเนินการได้ต่อเนื่องและประสบผลสำเร็จตามเป้าหมายเวลาที่กำหนด และมีการเชื่อมโยงองค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยในแต่ละโครงการย่อยอันทำให้บรรลุเป้าหมายของแผนงานวิจัย แผนการบริหารและการดำเนินงาน ประกอบด้วยการประชุมต่าง ๆ และการกำกับงานโดยกลุ่มคณะวางแผนงานวิจัย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

| ลำดับ | การประชุม | ผู้เข้าร่วมประชุม | ช่วงเวลา |
|---|---|---|---|
| 1. | การจัดประชุมเพื่อให้นักวิจัยที่รับผิดชอบในโครงการย่อย รับทราบการกำหนดกรอบการบริหารและติดตามผล เพื่อเป็นมติร่วมที่คณะผู้วิจัยทุกฝ่ายยอมรับและต้องปฏิบัติตาม | ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย<br>หัวหน้าโครงการวิจัย<br>ผู้ร่วมงานวิจัย | เมื่อเริ่มโครงการ |
| 2. | ผู้อำนวยการแผนงานวิจัยประชุมกับหัวหน้าโครงการวิจัย เพื่อแจ้งให้ทราบรายละเอียดของแผนงานวิจัยและกำหนดภาระหน้าที่ของผู้ร่วมวิจัยทุกคนอย่างชัดเจน | ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย<br>หัวหน้าโครงการวิจัย<br>ผู้ร่วมงานวิจัย | เมื่อเริ่มโครงการ |
| 3. | การประชุมกำกับงานเพื่อติดตามความก้าวหน้าของงานพร้อมทั้งรับทราบปัญหาอุปสรรค การร่วมมือหาทางแก้ไขปัญหาและการอนุมัติงบประมาณ | ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย<br>หัวหน้าโครงการวิจัย<br>ผู้ร่วมงานวิจัย | ประชุมประจำเดือน |
| 4. | รายงานความก้าวหน้าของผลงานในแต่ละโครงการวิจัยย่อย : กำหนดให้แต่ละโครงการวิจัยย่อยแสดงผลการศึกษาให้ผู้เข้าร่วมวิจัยทุกท่าน ในแผนงานวิจัยทราบโดยจัดในรูปแบบของการประชุมสัมมนา | ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย<br>หัวหน้าโครงการวิจัย<br>ผู้ร่วมงานวิจัย | ก่อนนำเสนอรายงานความก้าวหน้าต่อ วช. 1 เดือน |

| ลำดับ | การประชุม | ผู้เข้าร่วมประชุม | ช่วงเวลา |
|---|---|---|---|
| | นำเสนอ (โครงการย่อยละ 30 นาที) | | |
| 5. | การประชุมกำกับงานเพื่อปิดโครงการ | ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย<br>หัวหน้าโครงการวิจัย<br>ผู้ร่วมงานวิจัย | ก่อนปิดรายงานฉบับสมบูรณ์ |

**1.8 แผนการสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จากการทำการวิจัยตามแผนงานวิจัย**

แผนงานวิจัยนี้ มีแผนที่สร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ ทั้งที่เป็นอาจารย์ที่จบใหม่ นักศึกษาที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโท และนักศึกษาที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาเอก ซึ่งทั้งแผนงานวิจัยนี้ มีแผนที่จะสร้างนักวิจัยรุ่นใหม่ ดังนี้

1. อาจารย์และนักวิจัยรุ่นใหม่เข้าร่วมโครงการ จำนวน 3 คน
2. ผลิตมหาบัณฑิต จำนวน 3 คน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 2
# ปริทรรศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการออกแบบและวิเคราะห์ความปลอดภัยโครงสร้างหลักและตัวถังรถโดยสารจำเป็นต้องศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับรถโดยสารเพื่อนำมาใช้เป็นเกณฑ์กำหนดในการออกแบบโครงสร้าง ทั้งนี้ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวิเคราะห์และปรับปรุงความแข็งแรงของโครงสร้างให้เป็นไปตามมาตรฐานที่สากลยอมรับ เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานและงานวิจัยที่ที่เกี่ยวข้องกับรถโดยสาร ซึ่งส่วนแรกจะกล่าวถึงข้อกำหนดทางกฎหมายและมาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบรถโดยสาร ทั้งนี้เนื้อหารายละเอียดที่สำคัญของมาตรฐานที่จะกล่าวถึงในโครงการวิจัยนี้จะเกี่ยวข้องกับการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66 และ ECE Regulation No.29 ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็นเนื้อหาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ความแข็งแรงและความปลอดของรถโดยสาร ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

## 2.1 มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับรถโดยสาร

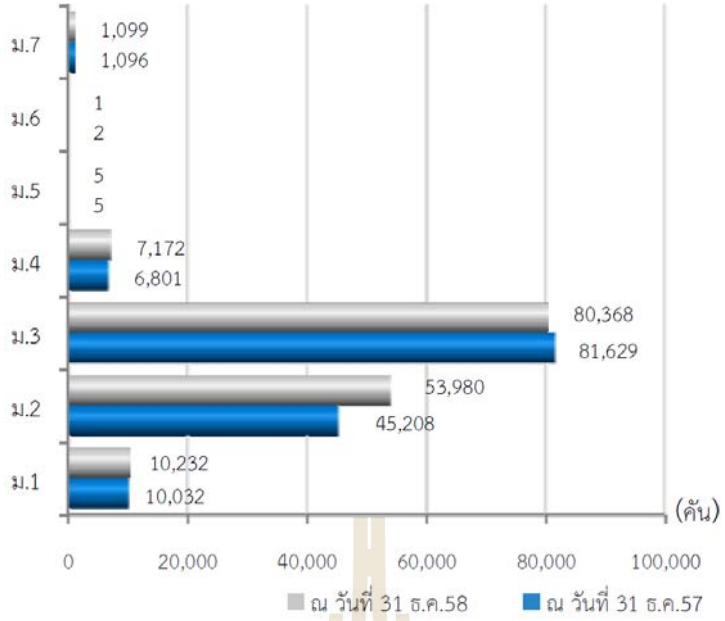
### 2.1.1 มาตรฐานของรถโดยสารและข้อกำหนดทางกฎหมายภายในประเทศ

การกำหนดนโยบายเกี่ยวกับรถโดยสารในประเทศไทยนั้น กรมการขนส่งทางบกเป็นหน่วยงานหลักที่มีอำนาจหน้าที่ตามพระราชบัญญัติการขนส่งทางบก พ.ศ. 2522 ซึ่งในการดำเนินการด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับรถโดยสาร เช่น การจัดระเบียบรถโดยสารประจำทางด้านเส้นทางและการออกใบอนุญาตประกอบการ การกำกับดูแลการกำหนดมาตรฐานของรถโดยสาร ตลอดจนการกำกับดูแลด้านความปลอดภัย ซึ่งที่ผ่านมาได้กำหนดข้อบังคับในการควบคุมมาตรฐานรถโดยสารและประกาศบังคับใช้โดยมีรายละเอียดที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 2.1.1.1 ขนาดของรถโดยสาร

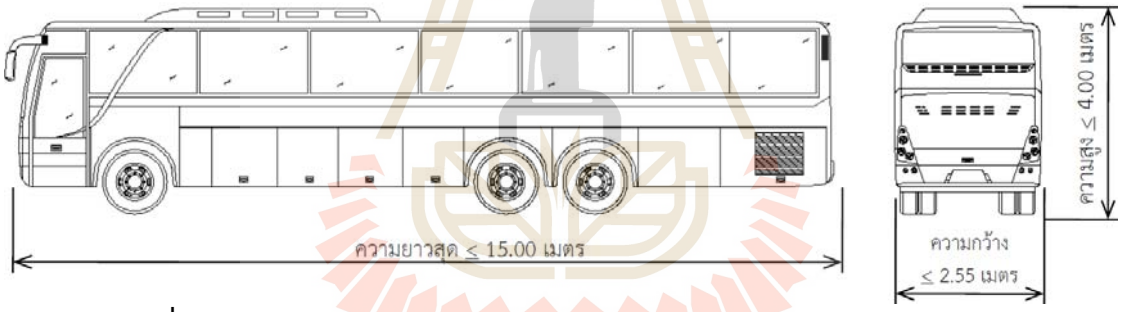
รถโดยสารประจำทางที่อยู่ภายใต้พระราชบัญญัติขนส่งทางบกสามารถแบ่งออกเป็น 7 มาตรฐาน ดังนี้ 1) มาตรฐาน 1 คือ รถปรับอากาศพิเศษ, 2) มาตรฐาน 2 คือ รถปรับอากาศ, 3) มาตรฐาน 3 คือ รถที่ไม่มีเครื่องปรับอากาศ, 4) มาตรฐาน 4 คือ รถสองชั้น, 5) มาตรฐาน 5 คือ รถพ่วง, 6) มาตรฐาน 6 คือ รถกึ่งพ่วง, และ 7) มาตรฐาน 7 คือ รถโดยสารเฉพาะกิจ โดยที่ในโครงการวิจัยนี้จะมุ้งเน้นศึกษาโครงสร้างรถโดยสารชั้นครึ่งที่ครอบคลุมเฉพาะมาตรฐาน 2 และมาตรฐาน 3 ซึ่งเป็นประเภทรถโดยสารที่มีจำนวนสัดสวนสูงถึงร้อยละ 35.32 และร้อยละ 52.58 ของจำนวนรถโดยสารตามมาตรฐานทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 2.1

สำหรับการกำหนดขนาดสัดส่วนของรถโดยสารแต่ละมาตรฐานตามกฎกระทรวง ฉบับที่ 60 (พ.ศ. 2552) ออกตามความในพระราชบัญญัติการขนส่งทางบก พ.ศ. 2552 ซึ่งรายละเอียดขนาดสัดส่วนของรถโดยสารที่ครอบคลุมมาตรฐาน 2 และมาตรฐาน 3 สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.2 และมีรายละเอียดดังแสดงตามตารางที่ 2.1




**รูปที่ 2.1** จำนวนรถโดยสารแยกตามมาตรฐานรถ ณ วันที่ 31 ธันวาคม 2557 และ 2558

*ที่มา: รายงานสถิติการขนส่ง ประจำปี 2558 กลุ่มสถิติการขนส่ง, กรมการขนส่งทางบก*




**รูปที่ 2.2** รายละเอียดของรถโดยสารมาตรฐาน 1, 2(ก), 2(ข), 3(ก), 3(ข) และ 7

**ตารางที่ 2.1** ขนาดสัดส่วนรถตามมาตรฐาน 2 (2ก และ 2ข) และมาตรฐาน 3 (3ก และ3ข)

| ขนาดสัดส่วน (เมตร) | กฎกระทรวง ฉบับที่ 60 |
|---|---|
| กว้าง | ไม่เกิน 2.55 เมตร |
| ยาว | ไม่เกิน 15.00 เมตร[1,2,3] |
| สูง | ไม่เกิน 4.0 เมตร[4] |

[1]กรณีรถที่มีความยาวมากกว่า 12 เมตร ต้องมีเพลาล้อไม่น้อยกว่า 3 เพลาล้อ และต้องมีระบบบังคับเลี้ยวที่เพลาท้าย

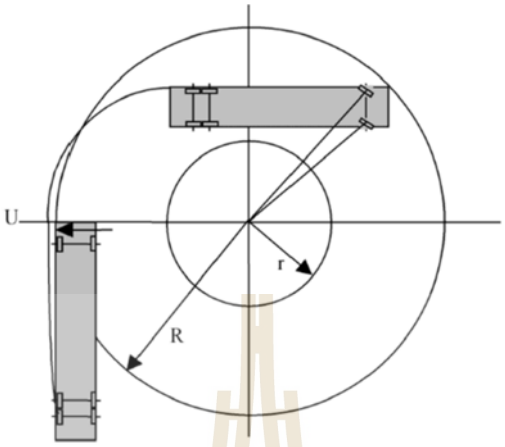
[2]รถต้องมีรัศมีวงเลี้ยวไม่มากกว่า 12.50 เมตร และเมื่อเคลื่อนที่โดยมีรัศมีวงเลี้ยวด้านนอกเท่ากับ 12.50 เมตร จะต้องมีรัศมีวงเลี้ยวด้านในไม่น้อยกว่า 5.30 เมตร

[3]สำหรับรถที่มีความยาวมากกว่า 10 เมตร จะต้องมีระยะท้ายปัดไม่มากกว่า 0.60 เมตร

[4]ความสูงของรถต้องไม่ทำให้การทรงตัวของรถต่ำกว่าเกณฑ์ที่อธิบดีประกาศกำหนด

**2.1.1.2 ข้อกำหนดรัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ**

ตามประกาศกรมการขนส่งเรื่องข้อกำหนดรัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ พ.ศ. 2552 ลงวันที่ 24 มิถุนายน 2552 ได้กำหนดเกี่ยวกับรัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถโดยสาร (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) ซึ่งมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 2.2




**รูปที่ 2.3** รัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ

**ตารางที่ 2.2** กำหนดรัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ[1]

| **รัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัด** | **รถหรือแชสชีสรถโดยสาร** |
|---|---|
| รัศมีวงเลี้ยวด้านนอก (R) | วัดที่ตัวถังด้านนอกวงเลี้ยว ต้องไม่มากกว่า 12.50 เมตร |
| รัศมีวงเลี้ยวด้านใน (r) | วัดที่ตัวถังด้านในวงเลี้ยว ต้องไม่น้อยกว่า 5.30 เมตร |
| ระยะท้ายปัด (U) | รถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสารที่มีความยาวมากกว่า 12 เมตร จะมีระยะท้ายปัดได้ไม่เกิน 0.60 เมตร |

[1]อ้างอิง ประกาศกรมการขนส่งทางบก เรื่อง กำหนดรัศมีวงเลี้ยวและระยะท้ายปัดของรถ

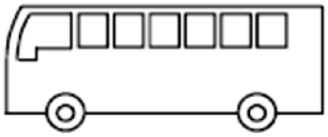
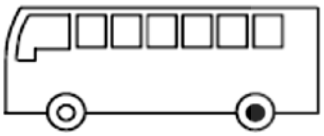
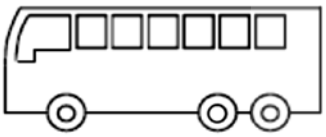
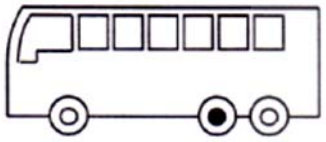
**2.1.1.3 ข้อกำหนดพิกัดสูงสุดและน้ำหนักลงเพลา**

กรมทางหลวงได้กำหนดพิกัดน้ำหนักสูงสุดและน้ำหนักลงเพลาสำหรับรถเดี่ยว (Single Unit) ที่สามารถนำมาวิ่งบนถนนของกรมทางหลวงได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

**2.1.1.4 การกำหนดเกณฑ์การทรงตัวของรถโดยสาร**

ตามประกาศกรมการขนส่งทางบก เรื่อง กำหนดเกณฑ์การทรงตัวของรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสาร พ.ศ. 2555 ลงวันที่ 20 เมษายน 2555 โดยที่กำหนดเกณฑ์มาตรฐานการทรงตัวของรถโดยสารขนาดใหญ่ที่มีความสูงตั้งแต่ 3.60 เมตรขึ้นไป ต้องมีเกณฑ์การทรงตัวไม่ต่ำกว่า 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมีผลใช้บังคับใช้กับรถที่จดทะเบียนใหม่และรถที่ได้จดทะเบียนไว้ก่อนเดือนมกราคม 2556 ตั้งแต่ 1 มกราคม 2556 และวันที่ 1 มกราคม 2561 ตามลำดับ

**ตารางที่ 2.3** พิกัดน้ำหนักสูงสุดและน้ำหนักลงเพลาตามที่กรมทางหลวงกำหนดสำหรับรถเดี่ยว

| ประเภทรถโดยสาร | พิกัดน้ำหนักสูงสุด (กิโลกรัม) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | หมวดที่ 1* | | หมวดที่ 2** | |
| | น้ำหนักลงเพลาท้าย/คู่เพลาท้าย | น้ำหนักรวมสูงสุด | น้ำหนักลงเพลาท้าย/คู่เพลาท้าย | น้ำหนักรวมสูงสุด |
|  | 6,800 | 8,500 | 7,000 | 9,500 |
|  | 9,100 | - | 11,000 | - |
|  | 12,200 | - | 13,000 | - |
|  | 14,300 | - | 16,500 | - |

◎ เพลาเดียว ยางเดี่ยว ◉ เพลาเดียว ยางคู่

* สำหรับทางหลวงสัมปทาน, ทางหลวงยกระดับบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 31 และทางหลวงยกระดับบนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 1

** สำหรับใช้เดินบนทางหลวงพิเศษและทางหลวงแผ่นดินสายอื่น เว้นแต่กำหนดในหมวดที่ 1

**รูปที่ 2.4** การทดสอบการทรงตัวของรถโดยสารขนาดใหญ่ที่มีความสูงตั้งแต่ 3.60 เมตร

**2.1.1.5 การทดสอบความแข็งแรงโครงสร้างตัวรถของรถโดยสารขนาดใหญ่**

หน่วยงานกรมการขนส่งทางบกได้ทำการศึกษาโครงสร้างชิ้นส่วนของตัวถังรถโดยสารประเภท 1 ชั้น และ 2 ชั้น เพื่อกำหนดรูปแบบและแนวทางในการตรวจสอบคุณภาพโครงสร้างหลักและรองของตัวถังรถโดยสารที่มีอยู่ตามมาตรฐานสากล ซึ่งได้มีการพัฒนาบุคลากรให้มีองค์ความรู้ในการตรวจสอบคุณภาพโครงสร้างหลักและรองของตัวถังรถโดยสารในเชิงวิศวกรรม และการปรับปรุงและออกแบบโครงสร้างหลักและรองของตัวถังรถโดยสารโดยคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารเป็นหลักและกำหนดมาตรฐานของการผลิตรถโดยสารในประเทศไทยให้อยู่ในระดับสากล ซึ่งที่ผ่านมาข้อกำหนดความแข็งแรงโครงสร้างตัวรถโดยสารขนาดใหญ่ในประเทศไทยจะอ้างอิงมาตรฐานสากลในการทดสอบ 3 การทดสอบ ได้แก่ 1) การทดสอบการพลิกคว่ำ 2) การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า และ 3) การทดสอบจุดยึดที่นั่งและจุดยึดเข็มขัดนิรภัย และอยู่ในระหว่างการพิจารณามีผลบังคับใช้กับรถโดยสารประจำทางขนาดใหญ่ที่จดทะเบียนใหม่ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2557

**2.1.2 มาตรฐานสากลที่เกี่ยวข้อง**

เกี่ยวกับข้อตกลงการกำหนดมาตรฐานสากลด้านความปลอดภัยของรถโดยสารยุโรปนั้น ได้มีการประสานความร่วมมือระหว่างประเทศในสหภาพยุโรปเพื่อสร้างภาคีเครือข่ายทั้งภาควิชาการ ภาครัฐ และเอกชน เพื่อสร้างข้อตกลงด้านมาตรฐานความปลอดภัยของยานพาหนะในการผลิตเพื่อการนำเข้าและส่งออกและการให้บริการรถโดยสารข้ามพรมแดนระหว่างประเทศ โดยสร้างข้อตกลงปี 1958 ข้อตกลงเพิ่มเติมปี 1997 และข้อตกลงปี 1998 ว่าด้วยการนำไปใช้ของการตรวจสอบสภาพมาตรฐานรถตามระยะเวลาและเป็นการสร้างการยอมรับซึ่งกันและกันระหว่างประเทศ ทั้งนี้ประเทศไทยได้เป็นหนึ่งในประเทศที่ทำสัญญาข้อตกลงตามกฎข้อบังคับของ UNECE ซึ่งมีผลได้เฉพาะข้อบังคับเป็นข้อกฎหมาย โดยที่การรับรองมาตรฐานความแข็งแรงของโครงสร้างและอุปกรณ์ส่วนควบของรถโดยสารตามข้อกำหนดของ UNECE นั้น มีรายละเอียดดังนี้

**2.1.2.1 มาตรฐาน UNECE Regulation No.66**

ข้อกำหนด UNECE Regulation No.66 เป็นมาตรฐานด้านความปลอดภัยของตัวรถด้านโครงสร้างความแข็งแรงของรถโดยสาร ซึ่งครอบคลุมเงื่อนไขการรับรองรถโดยสารชั้นเดียวและรถพ่วงที่มีที่นั่งมากกว่า 22 ที่นั่ง (รถโดยสาร 2 ชั้น) ให้แก่ผู้ออกแบบและผู้ผลิต โดยมีขั้นตอนในข้อกำหนด ได้แก่ ขอบเขต การขอการรับรอง การรับรอง ข้อกำหนด การแก้ไขและเพิ่มเติมการรับรองชนิดยานพาหนะ และการผลิตที่ตรงกัน ซึ่งรายละเอียดทั่วไปดังนี้

***ข้อบังคับ***

โครงสร้างรถโดยสารจะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อให้พื้นที่ปลอดภัยไม่ได้รับอันตรายในขณะดำเนินการทดสอบและภายหลังจากการทดสอบ หมายความว่า ไม่ส่วนหนึ่งส่วนใดของโครงสร้างที่อยู่ภายนอกพื้นที่ปลอดภัย (ก่อนเริ่มการทดสอบ) ล้ำเข้ามาภายในพื้นที่ปลอดภัยในขณะดำเนินการทดสอบ

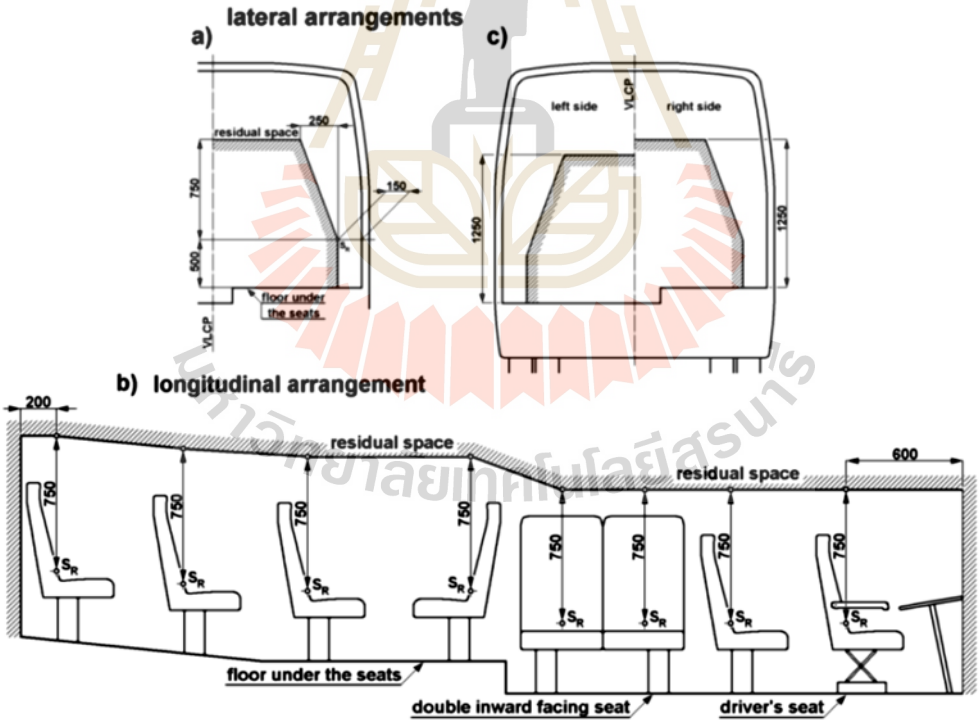
***พื้นที่ปลอดภัย***

สำหรับขนาดของพื้นที่ปลอดภัยถูกกำหนดโดยพื้นระนาบที่มีขนาดเส้นรอบวงดังรูปที่ 2.5 ที่ขยายพื้นที่ไปตลอดตามความยาวของรถโดยสารตามวิธีการดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ตำแหน่ง $S_R$ ซึ่งเป็นตำแหน่งอ้างอิงที่อยู่บนพนักพิงหลังของที่นั่งด้านนอกมีระยะความสูงจากพื้นใต้ที่นั่งเป็นระยะ 500 มิลลิเมตร และมีระยะห่างจากผนังด้านข้าง(ด้านในตัวรถ) เป็นระยะ 150 มิลลิเมตร

2. ในกรณีการจัดวางตำแหน่งพื้นรถโดยสารสองด้านไม่เท่ากันดังรูปที่ 2.5 ความสูงของตำแหน่ง $S_R$ ของพื้นที่ปลอดภัยจะแตกต่างกัน สำหรับระดับความสูงที่แตกต่างของพื้นที่ปลอดภัยนี้จะกำหนดที่ระนาบศูนย์กลางตามยาวในแนวดิ่ง

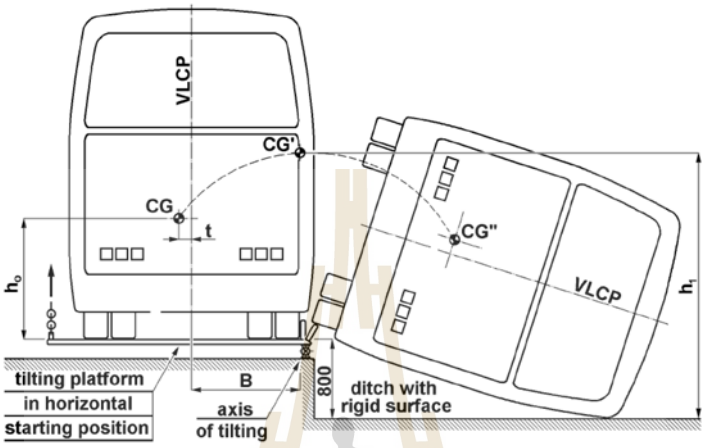
3. ด้านท้ายของพื้นที่ปลอดภัยเป็นพื้นระนาบในแนวดิ่งจะมีระยะห่างจากตำแหน่ง $S_R$ ของที่นั่งด้านท้ายไปทางด้านหลังเป็นระยะ 200 มิลลิเมตร หรือมีระยะห่างจากผนังด้านท้ายรถเป็นระยะ 200 มิลลิเมตร ในกรณีที่มีระยะห่างระหว่างผนังด้านท้ายรถและตำแหน่ง $S_R$ ของที่นั่งด้านท้ายน้อยกว่า 200 มิลลิเมตร ถ้าที่ทั้งสองข้างของที่นั่งด้านหน้าและด้านหลังไม่ได้วางอยู่ในตำแหน่งของระนาบแนวขวางเดียวกันความยาวของพื้นที่ปลอดภัยของแต่ละด้านจะแตกต่างกัน




**รูปที่ 2.5** พื้นที่ปลอดภัยภายในห้องโดยสารตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66

4. พื้นที่ปลอดภัยเป็นพื้นที่ที่ต่อเนื่องตลอดตัวรถตั้งแต่ส่วนของที่นั่งพนักงานขับรถรถจนถึงที่นั่งผู้โดยสาร ซึ่งถูกกำหนดจากการเลื่อนระนาบขวางแนวดิ่งที่มีขนาดเป็นไปตามเงื่อนไขไปตามแนวเส้นตรงที่ลากผ่านจุด $S_R$ ทั้งสองข้างของรถโดยสาร

5. ผู้ผลิตสามารถกำหนดพื้นที่ปลอดภัยให้มีขนาดใหญ่กว่าตามข้อกำหนดเพื่อเป็นการจำลองกรณีร้ายแรงที่สุดของรถโดยสารแต่ละประเภท และสามารถนำไปพัฒนาการออกแบบในอนาคตต่อได้




**รูปที่ 2.6** ลักษณะของเครื่องทดสอบการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE Regulation No.66

***รายละเอียดการทดสอบการพลิกคว่ำขั้นพื้นฐานของรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์***

ชุดทดสอบพลิกคว่ำ คือ ชุดพื้นเอียงยกรถในแนวขวางตามรูปที่ 2.6 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. รถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์วางอยู่บนพื้นเอียงยกรถที่มีตัวรองรับล้อกันการลื่นไถล จากนั้นชุดพื้นเอียงยกตัวขึ้นอย่างช้าๆ โดยความเร็วเชิงมุมไม่เกิน 5 องศาต่อวินาที จนกระทั่งรถอยู่ในตำแหน่งที่ไม่มีเสถียรภาพ

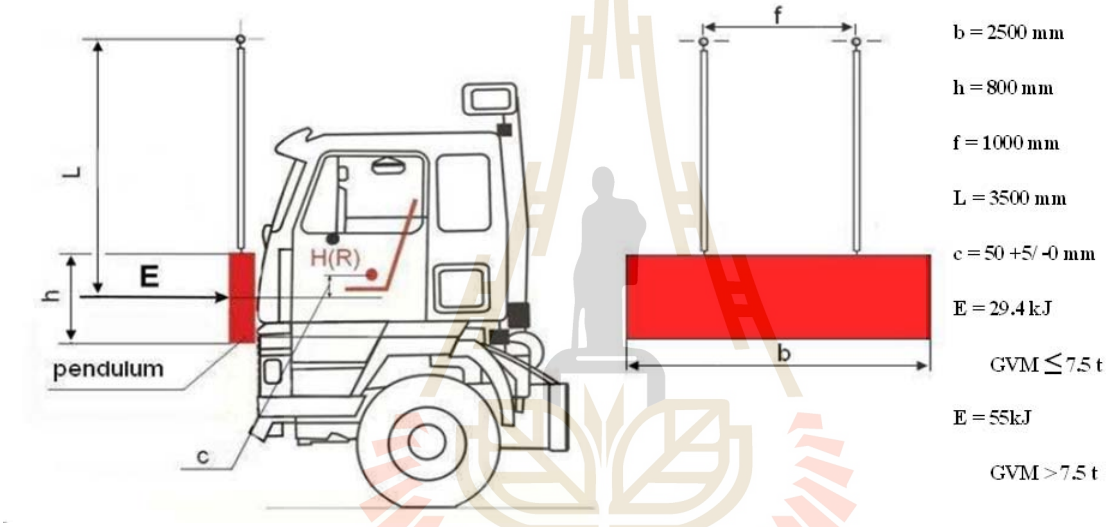
2. การทดสอบพลิกคว่ำอย่างอิสระจะเริ่มต้นขึ้นเมื่อรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่มีเสถียรภาพ หรือ อยู่ตำแหน่งเริ่มตกอย่างอิสระจากพื้นเอียง

3. การกระแทกจะเกิดขึ้นจากรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์ตกลงสู่พื้นรองรับการพลิกคว่ำที่อยู่ต่ำกว่าเป็นระยะ 800 มิลลิเมตร เทียบกับระยะของพื้นล้อก่อนเริ่มยกพื้นเอียง โดยพื้นผิวกระแทกจะมีลักษณะเป็นคอนกรีตเรียบและแห้งในแนวนอน

อย่างไรก็ตามในมาตรฐานการทดสอบดังกล่าวยังได้อนุญาตให้สามารถใช้การทดสอบเทียบเท่ากับการทดสอบพลิกคว่ำของรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์ โดยวิธีการทดสอบเทียบเท่าที่สามารถทำการทดสอบพลิกคว่ำของโครงสร้างบางส่วนที่ใช้เป็นตัวแทนของรถโดยสารทั้งคันสมบูรณ์ รวมไปถึงสามารถใช้วิธีการวิเคราะห์จำลองเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในงานวิจัยได้เลือกใช้วิธีดังกล่าวในการวิเคราะห์คำนวณทางด้านพลศาสตร์ของการทดสอบการพลิกคว่ำโครงสร้างรถโดยสาร

**2.1.2.1 มาตรฐาน UNECE Regulation No.29**

ข้อกำหนด UNECE Regulation No.29 เป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างส่วนหน้ายานพาหนะที่ใช้ขนส่งสินค้า เช่น รถพ่วง และรถบรรทุก แต่ไม่ครอบคลุมถึงรถแทรกเตอร์และรถจักรกลเกษตร โดยในงานวิจัยนี้ได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับการทดสอบความปลอดภัยในการชนกระแทกด้านหน้าของรถโดยสาร ซึ่งในมาตรฐานจะเป็นการพิจารณาความปลอดภัยในพื้นที่โดยสารเมื่อยานพาหนะได้รับภาระการชนกระแทกด้านหน้า ซึ่งวิธีการทดสอบทั้งหมดจะประกอบไปด้วย 3 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (Test A) ความแข็งแรงของหลังคา (Test B) และความแข็งแรงของผนังด้านหลัง (Test C) อย่างไรก็ตามในส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้จะขอกล่าวเพียงวิธีการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (Test A) เพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นการทดสอบที่ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมการผลิตรถขนส่งสินค้าหรือรถโดยสารขนาดใหญ่ต้องปฏิบัติตาม โดยมีรายละเอียดทั่วไปดังนี้

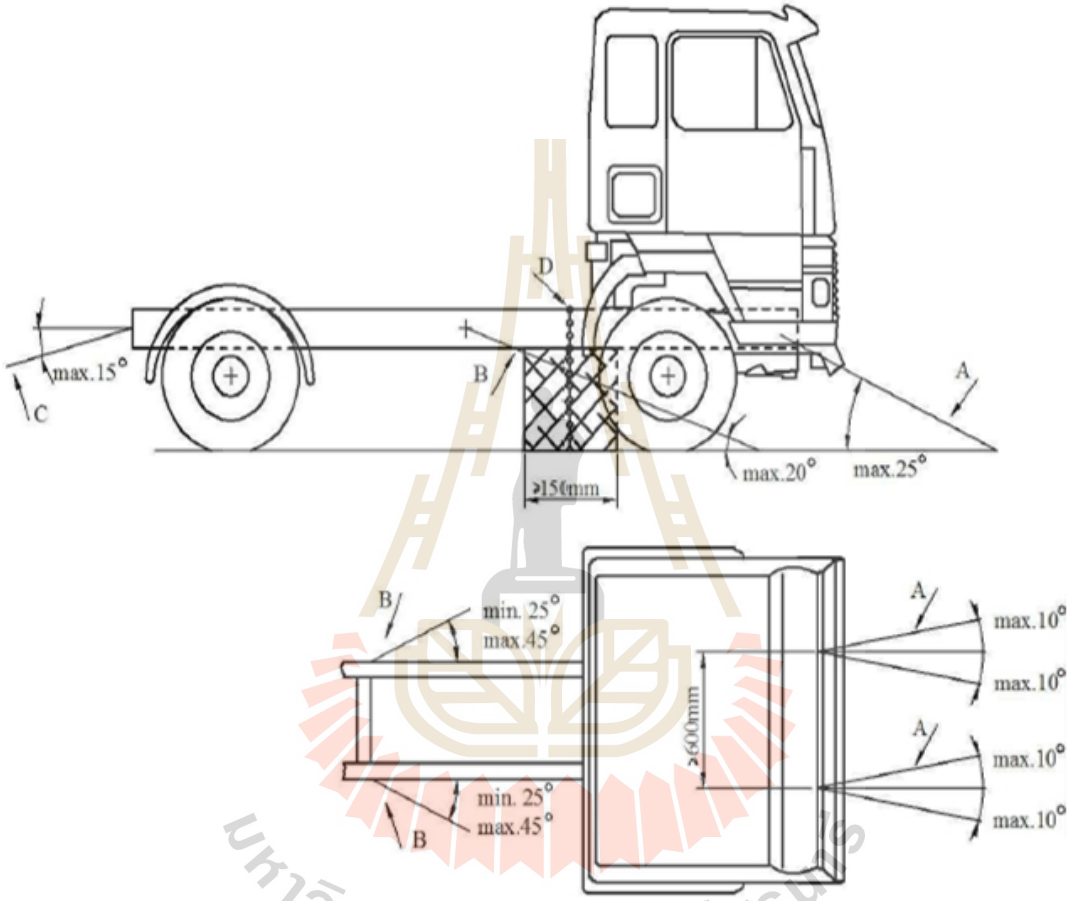



**รูปที่ 2.7** รายละเอียดการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐาน ECE Regulation No.29

***วิธีการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า***

การทดสอบแบบกระแทกด้านหน้าที่มีผลต่อความแข็งแรงโครงสร้างที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ECE Regulation No.29 ซึ่งมาตรฐานได้กำหนดการตรวจสอบโดยให้ใช้การแกว่งของมวลเข้ากระแทกกับโครงสร้างและพิจารณาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างตัวถัง ซึ่งกำหนดให้วัสดุมวลกระแทกมีน้ำหนัก 1,500 ± 250 กิโลกรัม และมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและหน้าสัมผัสแบนราบ รวมทั้งมีการกำหนดขนาดมิติความกว้าง 2,500 มิลลิเมตร และสูง 800 มิลลิเมตร บริเวณขอบมีรัศมีอย่างน้อย 1.5 มิลลิเมตร โดยตุ้มน้ำหนักถูกแขวนห่างจากคานเป็นระยะ 3,500 มิลลิเมตร โดยวัดจากเส้นแนวแกนของคานถึงจุดศูนย์กลางมวลของตุ้มน้ำหนักและจุดศูนย์กลางมวลอยู่ต่ำกว่าสะโพกผู้ขับขี่ 50+5/-0 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่ในมาตรฐานดังกล่าวได้กำหนดพลังงานทดสอบได้จากการแกว่งมวลเข้ากระแทกโครงสร้างมีค่าเป็น 29.4 กิโลจูล สำหรับรถมีน้ำหนักรวมไม่เกิน 7,500 กิโลกรัมและ 55 กิโลจูล สำหรับรถที่มีน้ำหนักเกินกว่าที่กำหนดไว้

สำหรับการติดตั้งโครงสร้างรถเพื่อทดสอบการชนกระแทกด้านหน้ากำหนดให้ใช้โซ่ที่สามารถรับแรงได้ 10 ตัน และที่ฐานของโครงสร้างรองด้วยกล่องไม้ที่มีขนาดความกว้าง 150 มิลลิเมตร และความยาวเท่ากับความกว้างของโครงสร้างรถ โดยที่ด้านหน้าของโครงสร้างรถยึดด้วยโซ่ทำมุมไม่เกิน 25 องศากับแนวระดับ และทำมุมกับแกนตามยาวของโครงสร้างรถไม่เกิน 10 องศาเมื่อมองจากด้านบน ส่วนด้านข้างยึดด้วยโซ่ทำมุมไม่เกิน 20 องศากับแนวระดับ และทำมุมกับแกนตามยาวของโครงสร้างรถในช่วง 25 องศา ถึง 45 องศา เมื่อมองจากด้านบน และด้านท้ายยึดด้วยโซ่ทำมุมไม่เกิน 15 องศากับแนวระดับดังแสดงในรูปที่ 2.8




**รูปที่ 2.8** การติดตั้งโครงสร้างรถสำหรับการทดสอบตามมาตรฐาน ECE Regulation No.29

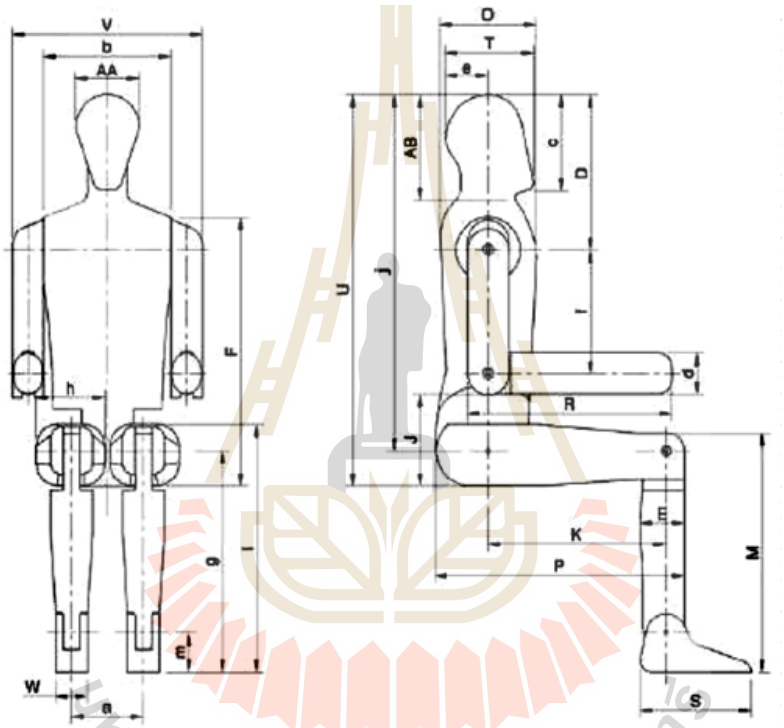
***พื้นที่ปลอดภัยของผู้ขับขี่รถโดยสาร***

UNECE Information Document. (2009) เป็นบทความเกี่ยวกับการปกป้องผู้ขับขี่และผู้โดยสารจากความเสียหายอันเนื่องจากการชนด้านหน้าของรถโดยสาร ซึ่งเกี่ยวข้องกับพื้นที่ปลอดภัยของผู้ขับขี่ยานพาหนะตามข้อกำหนด ECE Regulation No.29 โดยมีเนื้อหาหลัก ๆ ดังนี้

1) เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีชิ้นส่วนโครงสร้างรุกล้ำพื้นที่ปลอดภัย
2) เพื่อรักษาตำแหน่งของผู้ขับขี่ให้อยู่ในพื้นที่ปลอดภัยตลอดเวลา

3) เพื่อลดพลังงานส่งถ่ายถึงผู้ขับขี่ให้เหลือไม่เกินร้อยละ 30 ของพลังงานชนกระแทกทั้งหมดที่ระบุไว้ตามข้อกำหนด
4) เพื่อให้มั่นใจได้ว่าผู้ขับขี่จะสามารถออกจากที่นั่งคนขับได้หลังจากเกิดอุบัติเหตุ

ดังนั้นพื้นที่ปลอดภัยจึงเป็นเครื่องมือสำคัญเพื่อบ่งชี้ความปลอดภัยแก่ผู้ขับขี่และผู้โดยสาร ตามข้อกำหนด ECE Regulation No.29 ระบุให้พิจารณารูปทรงหุ่นจำลองบุคคลพื้นฐานขนาดเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 50 ดังแสดงตามรูปที่ 2.9 โดยที่ในงานวิจัยได้มีการพิจารณาแบบจำลองที่นั่งคนขับ ก้านพวงมาลัยและพวงมาลัย รวมไปถึงแบบจำลองหุ่นบุคคล ซึ่งรายละเอียดต่างๆ สามารถค้นหาได้จากเอกสารมาตรฐาน ECE Regulation No.29




**รูปที่ 2.9** หุ่นจำลองบุคคลที่ใช้ในการทดสอบตามข้อกำหนด ECE Regulation No.29

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการทดสอบความปลอดภัยโครงสร้างรถโดยสารตามมาตรฐานสามารถจำแนกหัวข้อและมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.1 การชนกระแทกแบบกึ่งสถิต

B. P. DiPaolo., and J. G. Tom. (2006) ได้ศึกษาพฤติกรรมการชนกระแทกแบบกึ่งสถิตที่มีผลต่อการเสียรูปของท่อผนังบางหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้วัสดุเหล็กแตกต่างกันสี่ชนิด ได้แก่ ASTM A36 ASTM A513 Type 1 AISI 316 และ AISI 304 ขนาดชิ้นทดสอบยาว 305 mm ความยาวด้านประกอบหน้าสี่เหลี่ยมจัตุรัส 50 mm ความหนาผนังบาง 1.40 mm 1.51 mm 1.47 mm และ 1.49 mm ตามลำดับ

ตามชนิดวัสดุที่ได้กล่าวมาข้างต้น ชิ้นทดสอบทุกชิ้นสามารถวางแบบสนิทและยึดกับอุปกรณ์จับทดสอบแบบร่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสได้ดีทั้งสองด้าน ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกดขนาด โหลดเซลล์ 500 kN ความเร็วหัวกด 2.5 mm/min พฤติกรรมการเสียรูปเป็นลักษณะการพับและยุบตัวแบบไม่ยืดหยุ่นสมมาตรตามแนวแกน กระบวนการเสียรูปสามารถแสดงในความสัมพันธ์ระหว่างแรงกดและระยะยุบตัว พบว่าความแข็งแรงของเหล็กที่ต่างกันไม่ทำให้แนวโน้มพฤติกรรมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สามารถดูดซับพลังงานได้แตกต่างกันและแปรผันตรงกับความแข็งแรงของวัสดุ

Fan et al., (2011) ได้ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแรงกระแทกภายใต้ภาระกรรมแบบกึ่งสถิต ของท่อผนังบางหน้าตัดหกเหลี่ยม-S6 แปดเหลี่ยม-S8 สิบสองเหลี่ยม-S12 และสิบหกเหลี่ยม-S16 โดยที่ชิ้นทดสอบมีความยาว 100 mm หนา 1.5 mm และวัสดุเป็นเหล็ก ASTM A36 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกดที่มีความเร็วหัวกด 5 mm/min และเทียบเคียงผลการทดสอบด้วยผลการจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ “ABAQUS/Explicit” ทั้งนี้ในการวิเคราะห์แบบจำลองการชนของทั้งสี่ใช้เอลิเมนต์สองมิติรูปสี่เหลี่ยม (quadrilateral element) ชิ้นทดสอบถูกจำลองให้อยู่ระหว่างแผ่นปะกบสองแผ่นซึ่งมีความเสียดทาน และกำหนดให้ชิ้นทดสอบถูกกดเป็นระยะ 80 mm พบว่าผลการศึกษาทั้งสองวิธีมีแนวโน้มเหมือนกันเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัว จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงสัณฐานในชิ้นทดสอบ S6 และ S8 ใกล้เคียงกับโหมดวงแหวน (ring mode) สมมาตรตามแกนปะทะ โดยที่ส่วนชิ้นทดสอบ S12 และ S16 เป็นโหมดผสมในการทดสอบ แต่ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการเสียรูปสมมาตรตามแนวแกนทั้งหมด

Z. Tang., and D. Li., (2012) ได้ศึกษาพฤติกรรมการโก่งตัวของวัสดุความยืดหยุ่นสูงนิเกิลไทเทเนียม (Nickel Titanium-NiTi) โดยเป็นส่วนประกอบ Ni-wt % 56.1 Ti-balance ความหนาแน่น 6,450 kg/m$^3$ ที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างผนังบางรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 6.3 mm ความหนาผนังบาง 0.15 mm ส่วนความยาวชิ้นทดสอบถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขอัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1.5 2.0 และ 2.5 ตามเงื่อนไขการทดสอบ ชิ้นทดสอบถูกยึดหรือยึดตรึงด้วยอุปกรณ์จับชิ้นทดสอบแบบร่องรูปวงกลม ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกดซึ่งหัวกดมีความเร็ว 0.28 mm/min ให้ภาระกรรมกระทำกับชิ้นทดสอบจนกระทั่งถึงวัสดุเกือบจะเสียรูปแบบไม่ยืดหยุ่น แล้วปล่อยภาระกรรมจนกระทั่งชิ้นทดสอบกลับคือภาวะปกติ จากการผลทดสอบเปรียบเทียบกับ ผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ “LS-DYNA” พบว่าได้ผลใกล้เคียงกันทั้งรูปร่างและความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดขนาดเล็ก เป็นการเสียรูปโหมดข้าวหลามตัด (diamond mode) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการเสียรูปไม่สมมาตรตามแนวแกนที่เกิดในโครงสร้างผนังบางรูปทรงกระบอกเมื่อได้รับภาระกรรมแบบกดอัด

### 2.2.2 พลังงานดูดซับจากการชนกระแทกความเร็วต่ำ

M. Miyazaki., and H. Negishi., (2003) ได้ทำการศึกษาการดูดซับพลังงานของท่ออลูมิเนียม JIS A6063-T5 หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งรับภาระการชนกระแทกความเร็วต่ำในแนวแกน ทดสอบด้วยเครื่องทิ้ง

ค้อนมวล 7.92 kg ความเร็วปะทะขึ้นอยู่กับความสูงโดยเปรียบเทียบความเร็วต่างๆ ได้แก่ 1.4 m/s , 2.8 m/s , 3.7 m/s , 5.4 m/s และ 7.5 m/s โดยที่ชิ้นทดสอบมีความยาว 100 และ150 mm และขนาดของหน้าตัดด้านสี่เหลี่ยมจัตุรัส 40 mm ความหนาของผนังบาง 1 และ 1.5 mm ชิ้นทดสอบได้ถูกเปรียบเทียบผลกับการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ “Marc 2000” จากผลการศึกษาพบว่าความยาวของชิ้นทดสอบไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงาน ความสามารถการดูดซับพลังงานแปรผกผันกับความหนาของผนังบาง และชิ้นทดสอบที่มีความหนามากกว่าจะส่งคลื่นความเค้นไปสู่ด้านตรงข้ามบริเวณที่ถูกภาระกรรมกระทำได้ดีกว่า จึงทำให้เกิดการโก่งตัวที่ฐานชิ้นทดสอบหนา 2 mm ส่วนชิ้นทดสอบหนา 1 mm เกิดการโก่งตัวที่บริเวณกลางชิ้นงาน

Marzbanrad et al., (2009) จำลองการดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกกึ่งสถิตและความเร็วต่ำของท่อผนังบางหน้าตัดสี่เหลี่ยม วงกลม และวงรี ของเหล็กและอลูมิเนียมเตรียมแบบจำลองสองมิติด้วยโปรแกรม “ANSYS” แล้ววิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ “LS-DYNA/Explicit” ความหนา ความยาวด้านสี่เหลี่ยมจัตุรัส และชนิดของวัสดุ เป็นตัวแปรต้นเพื่อศึกษาการดูดซับพลังงานเทียบกับผลการทดสอบของ Aljawi et al., (2004) ซึ่งทดสอบการชนกระแทกกึ่งสถิต พบว่าเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและระยะยุบตัวแตกต่างกันที่จุดยอดเริ่มแรกประมาณ 17% แนวโน้มมีลักษณะคล้ายกัน ค่าเฉลี่ยความแตกต่างหลังจาก จุดยอดเริ่มแรกประมาณ 22% และรูปร่างการเสียรูปเหมือนกัน จากนั้นได้จำลองการชนกระแทกความเร็วต่ำของท่อผนังบางสามรูปแบบ โดยจำลองให้มวล 100 kg ชนกระแทกชิ้นทดสอบด้วยความเร็ว 9.396 m/sโดยชิ้นงานมีความหนา 1.5 mm เท่ากัน พบว่าเกิดการพับเสียรูปที่ปลายทั้งสองของท่อ เปรียบเทียบความสามารถดูดซับพลังงาน ท่อหน้าตัดวงกลมและท่อหน้าตัดวงรีสูงกว่าท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมประมาณ 17% และ 33% ตามลำดับของท่อเหล็ก ในท่ออลูมิเนียม 33% และ 50% ตามลำดับ

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

Lee et al., (2010) ศึกษาพฤติกรรมการชนกระแทกความเร็วต่ำของกระป๋องน้ำอัดลม อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางกับความหนา 1 ต่อ 20 ซึ่งคืออัตราส่วนโครงสร้างผนังบางของถังเอ็นจีวีและถังแก๊สหุงต้ม วัสดุที่ประกอบเป็นกระป๋องได้แก่ส่วนลำตัว 3004-H19 และฝาบน 5182-H19 โดยที่ทำการศึกษาบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อ “ANSYS LS-DYNA” และใช้เอลิเมนต์สองมิติรูปสี่เหลี่ยม ส่วนการทดสอบใช้วิธีปล่อยมวล 7.5 kg ตกอย่างอิสระจากความสูง 7 ฟุต จับภาพด้วยกล้องความเร็วสูง 3000 เฟรมต่อวินาทีจากการศึกษาพบว่าผลการจำลองและผลการทดสอบคล้ายกันเมื่อพิจารณารูปร่างการเสียรูป คือเกิดการดัดบริเวณส่วนบนสุดที่ได้รับภาระกรรมกระแทกโดยตรง เนื่องจากเป็นโครงสร้างผนังบางมากจึงส่งถ่ายคลื่นความเค้น

ไปสู่ส่วนล่างได้น้อย ความสัมพันธ์ระหว่างระยะยุบตัวเทียบกับเวลาที่ได้จากการทดสอบไม่เป็นเชิงเส้น เหมือนกับผลจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

**2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างยานยนต์**

Deb et al., (2004) ได้ทำการศึกษาและออกแบบโครงสร้างรถยนต์ขนาดเล็กด้วยวัสดุอลูมิเนียม SAPA 6060 T6 ซึ่งอ้างอิงตาม Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) No. 208 และกำหนดความเร็วปะทะโครงสร้าง 30 mph โดยที่กำหนดการวิเคราะห์แบบจำลองการชนในรูปแบบพลวัตด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ “LS-DYNA” รวมไปถึงในการศึกษาได้ทำการสร้างชิ้นทดสอบรอยเชื่อมแบบ T-joint เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดัดที่บริเวณรอยเชื่อมโดยได้ทดสอบแรงกดด้วยความเร็ว 2 m/s เพื่อเทียบผลกับการจำลองชิ้นทดสอบนั้น

Y. C. Lin., and H. C. Nian. (2006) ได้ทำการศึกษาปรับปรุงประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างของส่วนตัวถังรถโดยสารโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพบว่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารส่วนใหญ่จะอยู่สูงกว่ายานพาหนะชนิดอื่น และเมื่อเกิดอุบัติเหตุการพลิกคว่ำจะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง โดยที่ความแข็งแรงของโครงสร้างเป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณาถึง ซึ่งผู้วิจัยได้เปรียบเทียบการเสียรูประหว่างผลที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ รวมไปถึงได้แสนอแนวทางในการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างบางส่วนและสามารถลดการการเสียรูปของโครงสร้างได้ถึง 50%

Ko et al., (2009) ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารประเภทที่มีความสูงพื้นรถต่ำซึ่งมีใช้ในประเทศเกาหลีบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภายใต้เงื่อนไขการพลิกคว่ำตามมาตรฐานยุโรป ECE R-66 และการชนกระแทกด้านหน้ากับกำแพง ทั้งนี้โครงสร้างพื้นรถได้ถูกออกแบบและผลิตด้วยฮันนีโคมบ์ ซึ่งที่มีน้ำหนักเบาแต่มีค่าความแข็งตึงสูง พบว่าการออกแบบผลิตโครงสร้างพื้นรถด้วยวัสดุประกอบนั้น ห้องขับขี่และพื้นที่โดยสารยังคงมีความปลอดภัยภายใต้การชนกระแทกด้านหน้าและการพลิกคว่ำตามมาตรฐานยุโรป

Cerit et al., (2010) ได้วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารส่วนหน้าภายใต้เงื่อนไขการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐานยุโรป ECE R-29 ด้วยการวิเคราะห์จำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างโมเดลกันชนเดิมทรงกรวยและโมเดลกันชนที่ปรับปรุงทรงลูกฟูกโครงสร้างหน้าให้มีความสามารถการดูดซับพลังงานขณะที่รับภาระกรรมการชนกระแทกด้านหน้า พบว่าทั้งสองโมเดลสามารถดูดซับพลังงานโดยการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นการโกงเสียหายของโมเดลกันชนเอง แต่ไม่มีการเปรียบเทียบพลังงานดูดซับให้เห็น การดูดซับพลังงานถูกแสดงในรูปการเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสารและผู้ขับขี่ ซึ่งผู้ขับขี่จะได้รับอันตรายในโครงสร้างรถโดยสารที่ไม่มีโมเดลกันชน

Lapo et al., (2011) ได้ทำการศึกษาออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างหลักของรถโดยสารประเภทสองชั้น โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษาความแข็งแรงทางกลของโครงสร้างหลักรถโดยสาร ซึ่งจะทำการวิเคราะห์การเสียรูป ความเค้น และความเครียด ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการวิเคราะห์จะพบว่ามีบางจุดที่อาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายมากเกินไป จึงได้มีการออกแบบและปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางจุดใหม่ เพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัยตามที่กฎหมายกำหนดและสามารถใช้บริการต่อสาธารณะได้

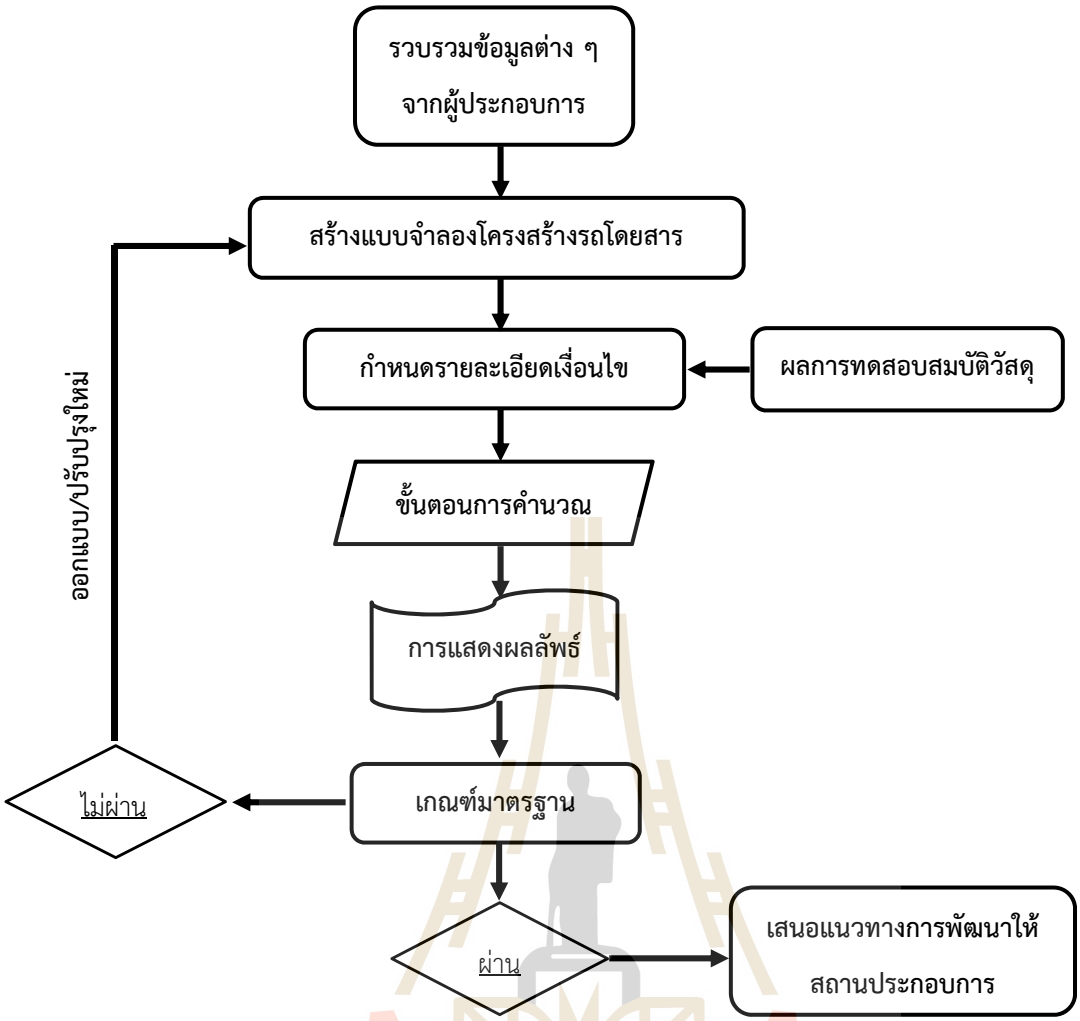
# บทที่ 3
# ผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยในโครงการจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังนี้คือ 1) การออกแบบวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสาร 2) ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารตามมาตรฐานการทดสอบ ECE Regulation No.66 และECE Regulation No.29 และ 3) แนวทางในการออกแบบพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างสำหรับเสนอแนะต่อผู้ประกอบการ โดยมีรายละเอียดเนื้อหาดังต่อไปนี้

## 3.1 การออกแบบและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร

จากที่เนื้อหาที่ผ่านมาในบทที่ 2 เกี่ยวกับข้อกำหนดมาตรฐาน ECE Regulation No.66 ในเรื่องของการตรวจสอบความแข็งแรงโครงสร้างรถโดยสารที่สามารถใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขได้ กล่าวคือการจำลองพฤติกรรมการพลิกคว่ำหรือการชนกระแทกด้านหน้าเพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างหลักมีความแข็งแรงเพียงพอโดยพื้นที่ปลอดภัยไม่ได้รับอันตราย ในงานวิจัยได้อ้างอิงข้อกำหนดที่สำคัญบางประการของมาตรฐานและผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ได้จะสามารถอธิบายพฤติกรรมทางกายภาพจริงของการทดสอบการพลิกคว่ำขั้นพื้นฐานได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการสร้างและวิเคราะห์แบบจำลองเพื่อใช้ในขั้นตอนการออกแบบวิเคราะห์และปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารเบื้องต้นเท่านั้น ในส่วนของการทดสอบโครงสร้างจริงผู้ประกอบการยังคงจำเป็นต้องคำถึงกระบวนการยืนยันผลความถูกต้องของแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์และสมมุติฐานที่กำหนดขึ้น

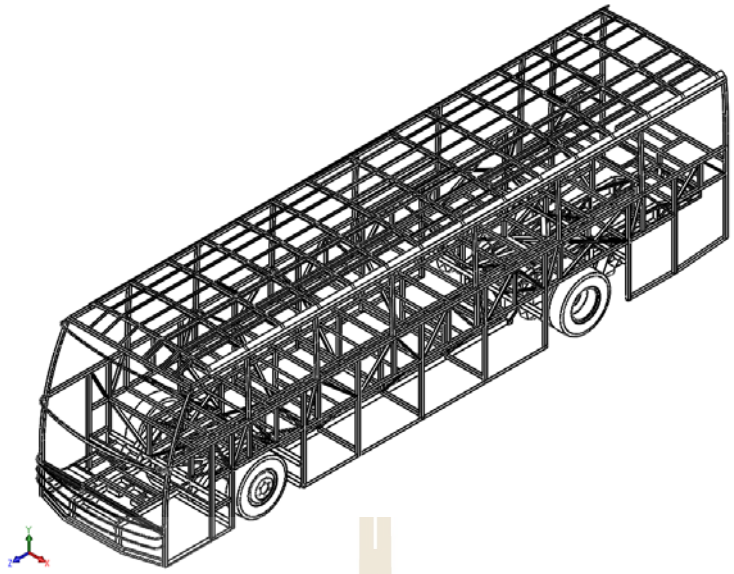
สำหรับแนวทางในการออกแบบและวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างหลักรถโดยสารในงานวิจัยนี้จะดำเนินการโดยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยหลักการวิธีระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis - FEA) บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์เชิงวิศวกรรม ซึ่งจะประกอบไปด้วยขั้นตอนขบวนการดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนเริ่มต้นด้วยรวมรวมข้อมูลต่าง ๆ จากผู้ประกอบการ จากนั้นจะเป็นขั้นตอนของการออกแบบโครงสร้างรถโดยสารบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จากนั้นจะเป็นกระบวนการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ซึ่งก็จะมีรายละเอียดในการกำหนดเงื่อนไขของการจำลองและสมบัติวัสดุ โดยกระบวนการที่กล่าวมานี้เป็นขั้นตอนก่อนการคำนวณ (Pre-Processing) จากนั้นก็จะเข้าสู่กระบวนการคำนวณประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และก็เข้าสู่ประบวนการแสดงผลลัพธ์หลังการคำนวณ (Post-Processing) โดยที่ขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการตรวจสอบผลที่ได้โดยพิจารณาจากเกณฑ์ที่กำหนดมาตรฐานการทดสอบ ซึ่งหากไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดจะทำการออกแบบโครงสร้างรถโดยสารและดำเนินการตามขั้นตอนเดิมอีกครั้ง จนกระทั่งผลที่คำนวณได้จะผ่านเกณฑ์ตามที่กำหนดไว้




**รูปที่ 3.1** แผนผังกระบวนการออกแบบและพัฒนาโครงสร้างรถโดยสาร

### 3.1.1 แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร

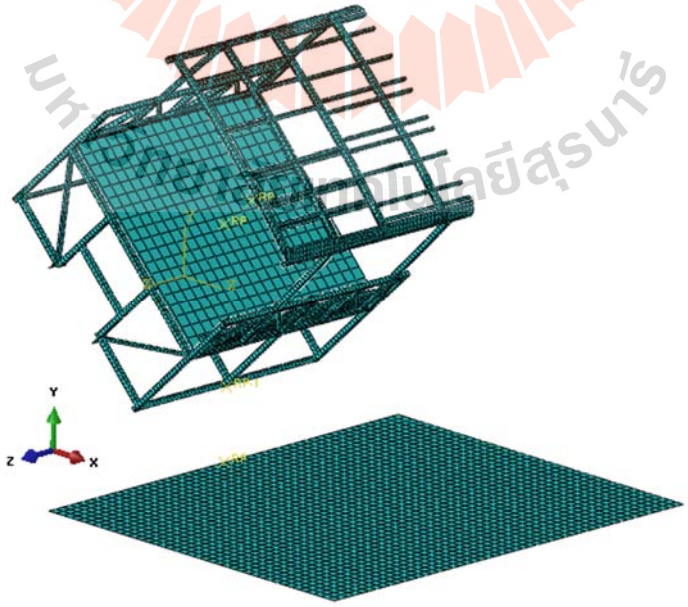
จากการรวบรวมข้อมูลปัจจุบันต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบบรถโดยสารของผู้ประกอบการสามารถนำมาสร้างแบบจำลองรถโดยสาร 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งสถานประกอบการที่ได้เข้าร่วมโครงการวิจัยนี้คือ บริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทในลักษณะอู่ประกอบโครงสร้างหลักและตัวถังทั่วไปที่มีความชำนาญและประสบการณ์มาเป็นระยะเวลานาน แต่มีรูปแบบของกระบวนการผลิตที่ยังไม่แน่นอน รวมไปถึงยังขาดทักษะและความรู้ทางด้านการออกแบบในทางวิศวกรรม สำหรับโครงการวิจัยนี้มีแนวทางการวิเคราะห์และออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารเพื่อให้ผ่านเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยใน 2 รูปแบบ คือ 1) ปรับปรุงด้วยการเสริมหรือเพิ่มชิ้นส่วนโครงสร้าง และ/หรือ 2) เพิ่มขนาดของเหล็กโครงสร้างหรือความหนา (ตามคำแนะนำของผู้ผลิตที่ยอมรับได้)



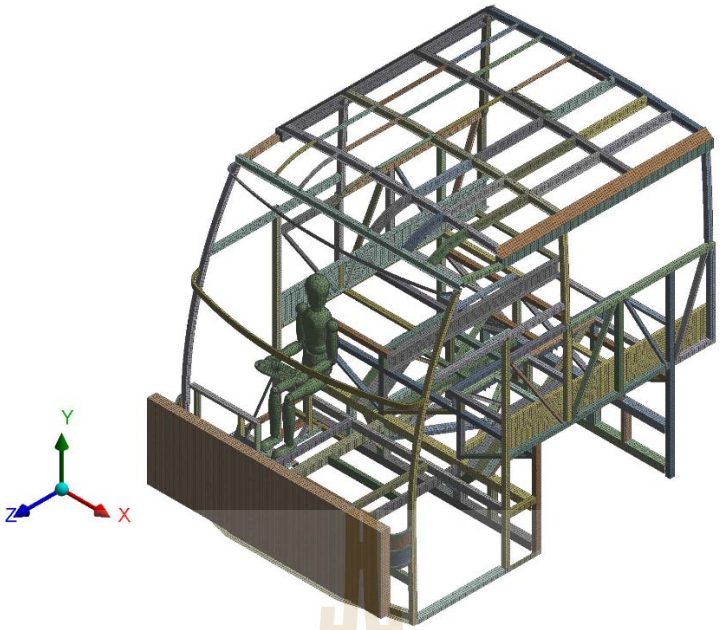
**รูปที่ 3.2** แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร 3 มิติ

### 3.1.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะพิจารณาเลือกใช้เอลิเมนต์แบบพื้นผิว (surface elements) โดยที่ในการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบพลิกคว่ำจะทำการสร้างจำลองโครงสร้างรถ แบบจำลองขอบเขตพื้นที่ปลอดภัย และแบบจำลองพื้นตกกระทบ โดยที่กำหนดให้ระยะตกกระทบพื้นมีขนาดความสูงเท่ากับ 800 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.3(ก) ในขณะที่การวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าจะทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างส่วนหน้า แบบจำลองของมวลชนกระแทก และแบบจำลองที่นั่งและหุ่นจำลองบุคคลดังแสดงในรูปที่ 3.3(ข)




(ก) แบบจำลองการทดสอบพลิกคว่ำ

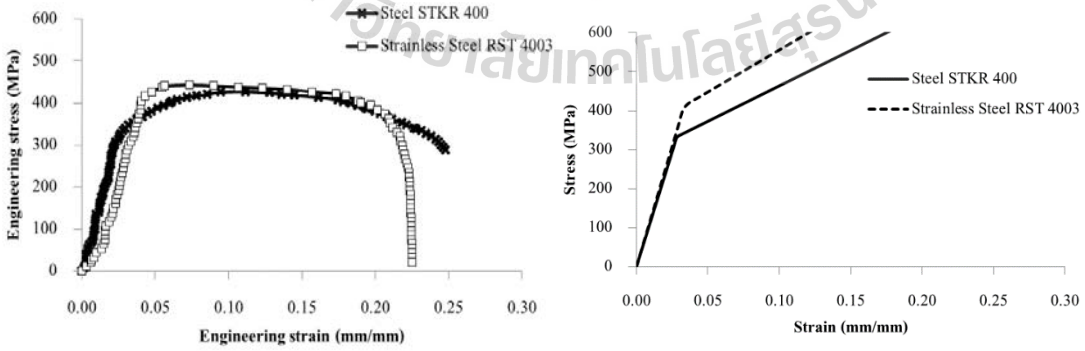



(ข) แบบจำลองการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า

**รูปที่ 3.3** รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

### 3.1.3 การกำหนดสมบัติวัสดุ

จากข้อมูลของบริษัทวัสดุที่ใช้ผลิตโครงสร้างตัวถังรถและโครงสร้างแชสซี คือ เหล็กโครงสร้างคุณภาพเกรด STKR 400 และสแตนเลส SS-RST4003 ตามลำดับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบสมบัติทางกลของวัสดุเพื่อที่จะใช้ในการกำหนดในแบบจำลอง โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8 และทดสอบด้วยเครื่องเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Shimadzu UH-2,000K ซึ่งผลการทดสอบสามารถแสดงความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมได้ตามรูปที่ 3.4(ก)




(ก) ความเค้น-ความเครียดทางวิศวกรรม (ข) แบบจำลองวัสดุแบบ bilinear hardening

**รูปที่ 3.4** กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุจากการทดสอบ

สำหรับข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมจากการทดสอบวัสดุจะถูกนำไปพิจารณาในรูปแบบของความเค้นและความเครียดจริง เพื่อกำหนดในแบบจำลองสมบัติทางกลของโครงสร้างรถโดยสารตามความสัมพันธ์ในสมการที่ 3-1 และ 3-2 ตามลำดับ โดยที่ในการวิจัยนี้ได้เลือกกำหนดแบบจำลองสมบัติทางกลของวัสดุในรูปแบบ bilinear hardening และสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.4(ข)

$$\sigma_t = \sigma_e\left(1+\varepsilon_e\right) \tag{3-1}$$

$$\varepsilon_t = \ln\left(1+\varepsilon_e\right) \tag{3-2}$$

โดยที่ $\sigma_e$ คือ ความเค้นทางวิศวกรรม

$\sigma_t$ คือ ความเค้นจริง

$\varepsilon_e$ คือ ความเครียดทางวิศวกรรม

$\varepsilon_t$ คือ ความเครียดจริง

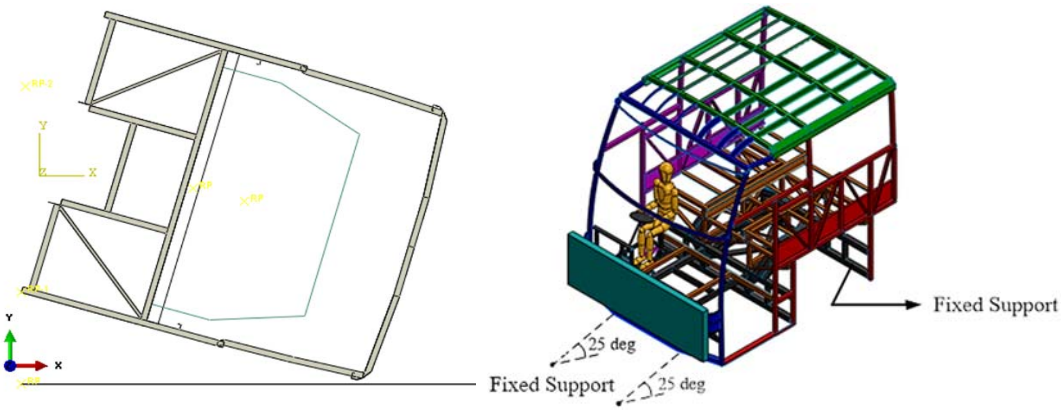
**3.1.4 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง**

*- การวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบการพลิกคว่ำ*

สำหรับการกำหนดเงื่อนไขแบบจำลองในการทดสอบการพลิกคว่ำของรถโดยสารจะประอบประกอบด้วยแบบจำลองพื้นเอียงยกรถ แบบจำลองพื้นรองรับการพลิกคว่ำ แบบจำลองพื้นที่ปลอดภัย และแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารหลัก ซึ่งในแบบจำลองขณะที่เกิดการพลิกคว่ำจะกำหนดให้มีความเร็วในการหมุนพื้นเอียงยกรถอยู่ที่ 0.08 เรเดียนต่อวินาที ที่สภาวะความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก เท่ากับ 9.81 m/s$^2$ และเวลารวมในการจำลองเท่ากับ 2.5 วินาที โดยที่น้ำหนักรวมของโครงสร้างส่วนกลางกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 2,397 กิโลกรัม ซึ่งพิจารณาจากการกระจายน้ำหนักรวมทั้งคันเท่ากับ 16,000 กิโลกรัม (น้ำหนักรวมสูงสุดที่ได้ทดสอบและอ้างอิงจากของรถโดยสารมาตรฐาน) ในขณะที่มวลที่เพิ่มในการจำลองสภาวะการพลิกคว่ำจะถูกกระจายตามจุดต่อดังแสดงในรูปที่ 3.5(ก)

*- การวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า*

การกำหนดเงื่อนไขแบบจำลองการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าโครงสร้างรถโดยสาร ซึ่งอ้างอิงจากข้อกำหนด ECE R-29 นั้น แบบจำลองจะประกอบไปด้วยโครงสร้างส่วนหน้า แบบจำลองมวลกระทบขนาด 1,500 กิโลกรัม และแบบจำลองของหุ่นบุคคล ซึ่งจะกำหนดให้มีการยึดตรึงส่วนหน้า 2 จุดทำมุม 25 องศากับพื้นระดับและยึดส่วนหลังแบบตรึงแน่น โดยที่กำหนดให้มีมวลกระทบ เคลื่อนที่เข้าชนกระแทกโครงสร้างด้วยความเร็วต้น 8.56 เมตรต่อวินาที ในทิศทางแกนแนวยาว (พลังงานจลน์เท่ากับ 55 กิโลจูล) ดังแสดงในรูปที่ 3.5(ข)




(ก) การทดสอบพลิกคว่ำ (ข) การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า

**รูปที่ 3.5** เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองในแต่ละการทดสอบ

### 3.1.5 เกณฑ์การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสาร

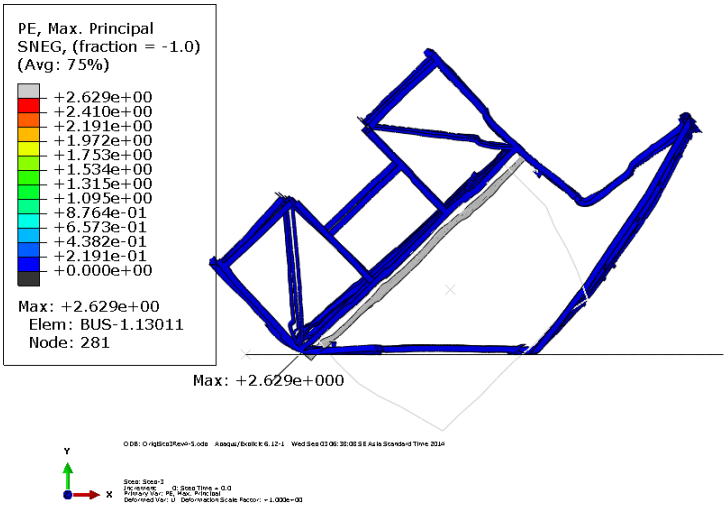
ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างหลังการคำนวณจะทำการประเมินจากระยะของการเสียรูปและพฤติกรรมของพลังงานภายในที่เกิดขึ้น โดยที่เกณฑ์ในการประเมินสำหรับการทดสอบการพลิกคว่ำนั้นจะพิจารณาจากความเสียหายของโครงสร้างและพื้นที่ปลอดภัย กล่าวคือโครงสร้างที่ผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานนั้น พื้นที่ปลอดภัยจะต้องไม่เกิดความเสียหายใด ๆ หรือไม่มีชิ้นส่วนโครงสร้างของรถโดยสารยื่นเข้าไปในพื้นที่ปลอดภัยในขณะกระแทก

ในขณะที่เกณฑ์ในการประเมินสำหรับการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าจะพิจารณาจากความเสียหายของโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับแรงกระแทกหรือพลังงานภายในที่ส่งถ่ายไปยังแบบจำลองหุ่นบุคคล กล่าวคือจะต้องไม่มีชิ้นส่วนโครงสร้างที่เสียหายล้ำเข้าไปในบริเวณห้องผู้ขับ รวมไปถึงจะต้องไม่มีพลังงานภายในที่ส่งถ่ายไปบริเวณที่นั่งและแกนพวงมาลัยยังแบบจำลองหุ่นบุคคลมากจนเกินไป

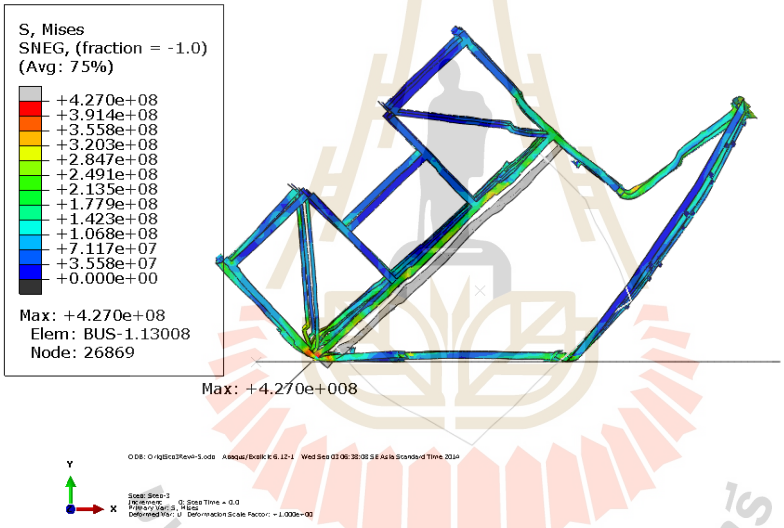
## 3.2 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร

### 3.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบการพลิกคว่ำ

รูปที่ 3.6(ก) และรูปที่ 3.6(ข) แสดงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การเสียรูปและการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการพลิกคว่ำ ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าลักษณะของความเสียหายของโครงสร้างล้ำเข้ามาในพื้นที่ปลอดภัย ซึ่งจะไม่ผ่านตามเกณฑ์การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างดังที่ได้กล่าวข้างต้น ทั้งนี้จะพบว่ามีค่าความเค้นสูงสุดกระจายบริเวณตำแหน่งโครงสร้างส่วนพื้นผู้โดยสารและแผงด้านข้าง ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวไม่มีโครงสร้างเสาเชื่อมต่อส่งผลให้เกิดเป็นจุดตำแหน่งวิกฤตโดยไม่สามารถดูดซับและกระจายส่งถ่ายแรงภายในที่เกิดขึ้นไปยังโครงสร้างส่วนอื่นได้ ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างสามารถเพิ่มโครงสร้างเสาตอนบริเวณดังกล่าวได้




(ก) ผลการวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสาร



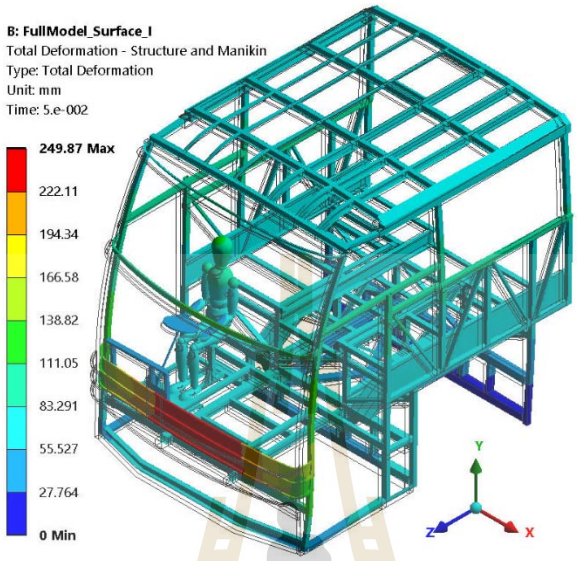

(ข) ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นบนโครงสร้างรถโดยสาร

**รูปที่ 3.6** ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบพลิกคว่ำ

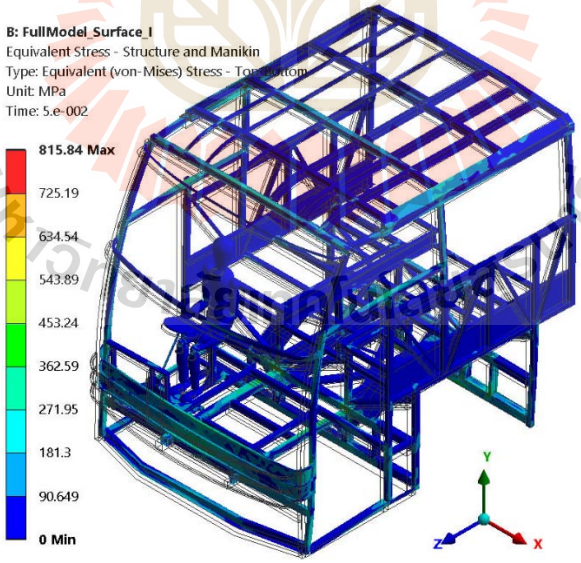
### 3.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า

รูปที่ 3.7(ก) และรูปที่ 3.7(ข) แสดงผลลัพธ์จากการวิเคราะห์การเสียรูปและการกระจายความเค้นที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารและหุ่นจำลองบุคคลภายใต้เงื่อนไขการชนกระแทกด้านหน้าตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าลักษณะของความเสียหายของโครงสร้างจะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งโครงสร้างส่วนคานขวางด้านหน้าที่เชื่อมต่อกับโครงสร้างแชสซีและไม่มีส่วนที่ล้ำเข้ามาในพื้นที่ผู้ขับขี่ส่วนหน้า ซึ่งจะผ่านตามเกณฑ์การประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างดังที่ได้กล่าวข้างต้น รวมไปถึงจะพบว่าการกระจายความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณตำแหน่งโครงสร้างส่วนคานขวางด้านหน้าและชิ้นส่วนโครงสร้างแชสซีบริเวณเสาคู่

เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่มีการดูดซับแรงกระแทกมากที่สุด อย่างไรก็ตามหากพิจารณาลักษณะของการกระจายความเค้นจะพบว่าโครงสร้างดังกล่าวยังคงไม่สามารถส่งถ่ายพลังงานไปยังโครงสร้างส่วนอื่นได้ดีเท่าที่ควร ดังนั้นแนวทางในการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างอาจพิจารณาให้มีโครงสร้างเสริมในการดูดซับและกระจายพลังงานไปยังโครงสร้างส่วนอื่น




(ก) ผลการวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสารและหุ่นจำลองบุคคล




(ข) ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นบนโครงสร้างรถโดยสารและหุ่นจำลองบุคคล

**รูปที่ 3.7** ผลการวิเคราะห์แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบชนกระแทก

## 3.3 แนวทางในการปรับปรุงความแข็งแรงโครงสร้างรถโดยสาร

### 3.3.1 มาตรฐานการทดสอบการพลิกคว่ำ

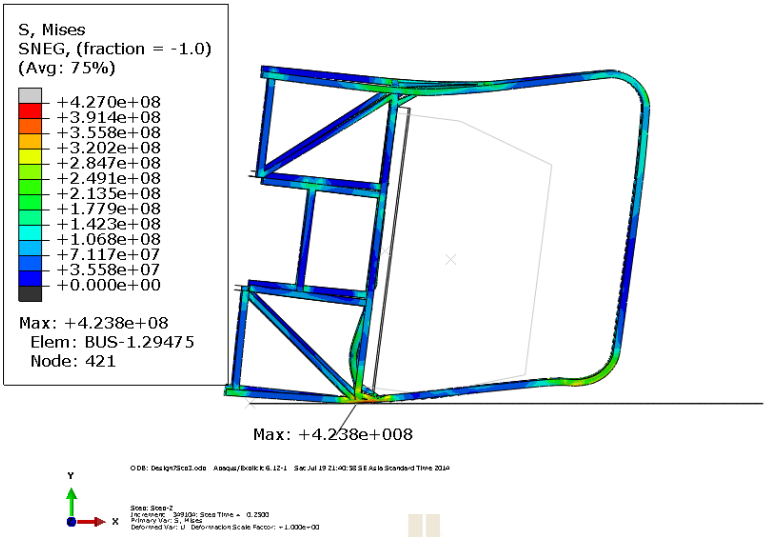
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบการพลิกคว่ำ พบว่าโครงสร้างดังกล่าวไม่สามารถดูดซับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นจากการพลิกคว่ำได้ โดยที่ชิ้นส่วนโครงสร้างไม่สามารถส่งถ่ายพลังงานภายในที่เกิดจากการกระแทกไปยังชิ้นส่วนโครงสร้างอื่นได้ ทั้งนี้พบว่าชิ้นส่วนหลักที่ควรมีการออกแบบปรับปรุงก็คือโครงสร้างเสาแผงข้างและหลังคา ในงานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางในการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสาร 3 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.1.1 แนวทางปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 1

สำหรับแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 1 เป็นการออกแบบปรับเปลี่ยนขนาดโครงสร้างเสาแผงข้างหลักจากเดิมขนาด 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร เป็น 50 x 75 x 3.2 มิลลิเมตร และขนาดโครงสร้างหลังคาย่อยจากเดิม 50 x 50 x 2 มิลลิเมตร เป็น 50 x 50 x 3.2 มิลลิเมตร รวมทั้งมีการออกแบบชิ้นส่วนเสริมจุดรองรับระหว่างเสาข้างกับโครงสร้างพื้นห้องโดยสารเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 x 3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8

รูปที่ 3.9 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นและพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างที่ปรับปรุงในรูปแบบที่ 1 ซึ่งจะพบว่าการเพิ่มขนาดของโครงสร้างเสาแผงข้างหลักและเสริมชิ้นส่วนรองรับบริเวณห้องโดยสารจะส่งผลให้โครงสร้างมีความแข็งแรงและสามารถส่งถ่ายแรงกระแทกไปยังโครงสร้างส่วนอื่นได้ แต่อย่างไรก็ตามแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างแบบนี้ยังมีความเสียหายของโครงสร้างล้ำเข้าใกล้ถึงพื้นที่ปลอดภัย ดังนั้นแนวทางในการปรับโครงสร้างยังคงจำเป็นที่ต้องมีการออกแบบและปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นต่อไป

**รูปที่ 3.8** แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 1

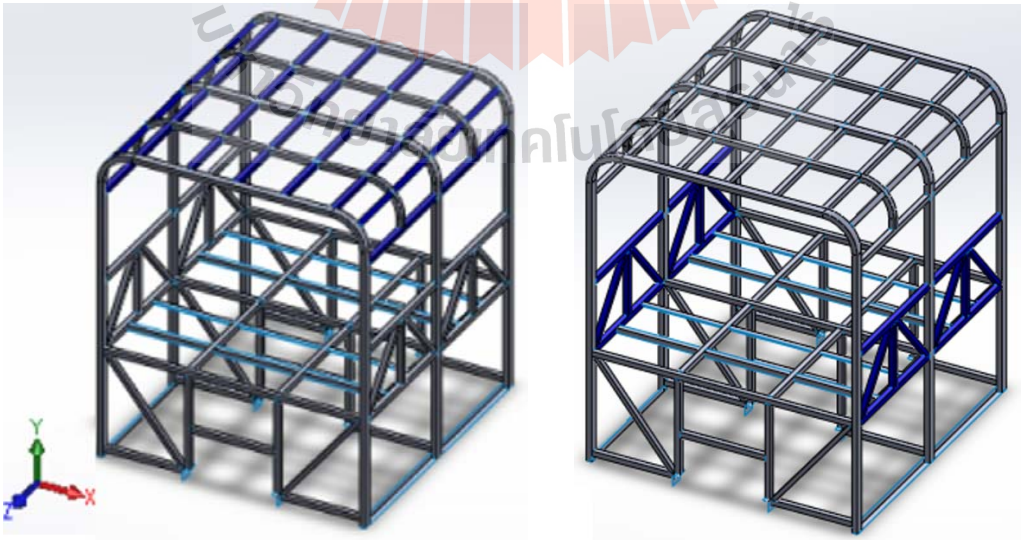



**รูปที่ 3.9** ผลการวิเคราะห์การออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 1

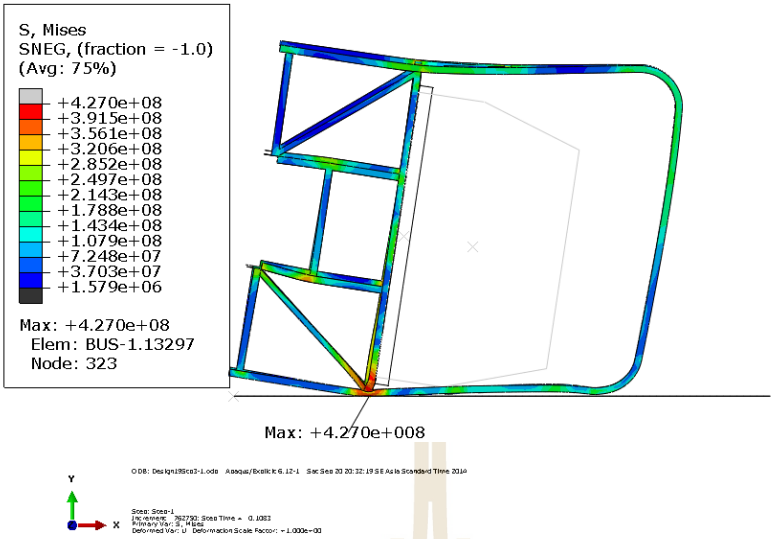
### 3.3.1.2 แนวทางปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 2

สำหรับแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 2 เป็นการออกแบบปรับปรุงจากรูปแบบที่ 1 โดยมีการเพิ่มเติมเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของโครงสร้างหลังคาจากขนาดเดิม 1.5 มิลลิเมตร เป็น 2 มิลลิเมตร และเปลี่ยนแปลงขนาดความหนาของโครงสร้างเหล็กแผงข้างจากเดิมมีขนาด 2.3 มิลลิเมตร เป็น 3.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.11 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นและพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างที่ปรับปรุงในรูปแบบที่ 2 ซึ่งจะพบว่าการเพิ่มขนาดของโครงสร้างหลังคาและการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้างเหล็กแผงข้างจะส่งผลให้โครงสร้างห้องโดยสารมีความแข็งแรงกว่ารูปแบบการปรับปรุงที่ 1 แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีความเสียหายของโครงสร้างล้ำเข้าใกล้ถึงพื้นที่ปลอดภัยเล็กน้อย



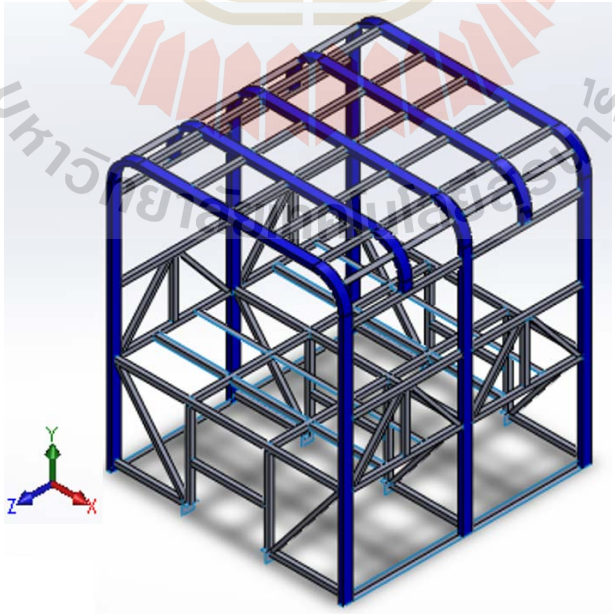
**รูปที่ 3.10** แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 2




**รูปที่ 3.11** ผลการวิเคราะห์การออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 2

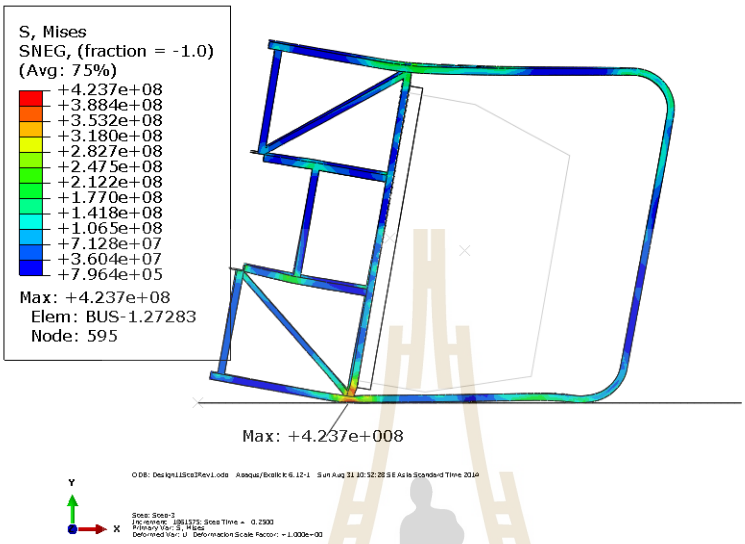
### 3.3.1.3 แนวทางปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 3

จากผลการวิเคราะห์การออกแบบปรับปรุงโครงสร้างในรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 พบว่ายังคงมีโอกาสที่โครงสร้างเกิดความเสียหายล้ำเข้าบริเวณพื้นที่ปลอดภัย ดังนั้นการแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 3 จึงได้ทำการพิจารณาออกแบบโดยนำเอารูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 เปลี่ยนแปลงเพิ่มขนาดของโครงสร้างเสาข้างและโครงหลังคาหลักด้วยเหล็กขนาด 50 x 100 x 3.2 มิลลิเมตร และขนาดความหนาของโครงสร้างหลังคาและโครงสร้างเหล็กแผงข้างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ 3.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ (รูปที่ 3.12)



**รูปที่ 3.12** แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 3

รูปที่ 3.13 แสดงผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้นและพฤติกรรมการเสียรูปของโครงสร้างที่ปรับปรุงในรูปแบบที่ 3 ซึ่งจะพบว่าการเพิ่มขนาดของโครงสร้างเสาข้างและการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้างเหล็กหลังคาหลักจะส่งผลให้โครงสร้างห้องโดยสารมีความแข็งแรงกว่ารูปแบบการปรับปรุงที่ 1 และรูปแบบที่ 2

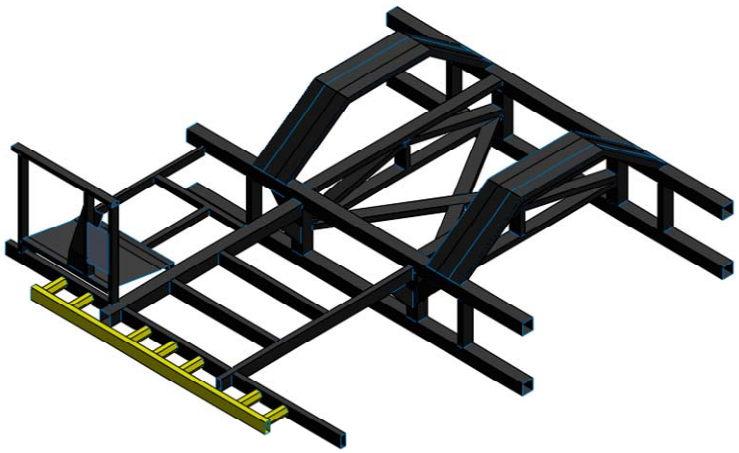



**รูปที่ 3.13** ผลการวิเคราะห์การออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรูปแบบที่ 3

### 3.3.2 มาตรฐานการทดสอบการการชนกระแทกด้านหน้า

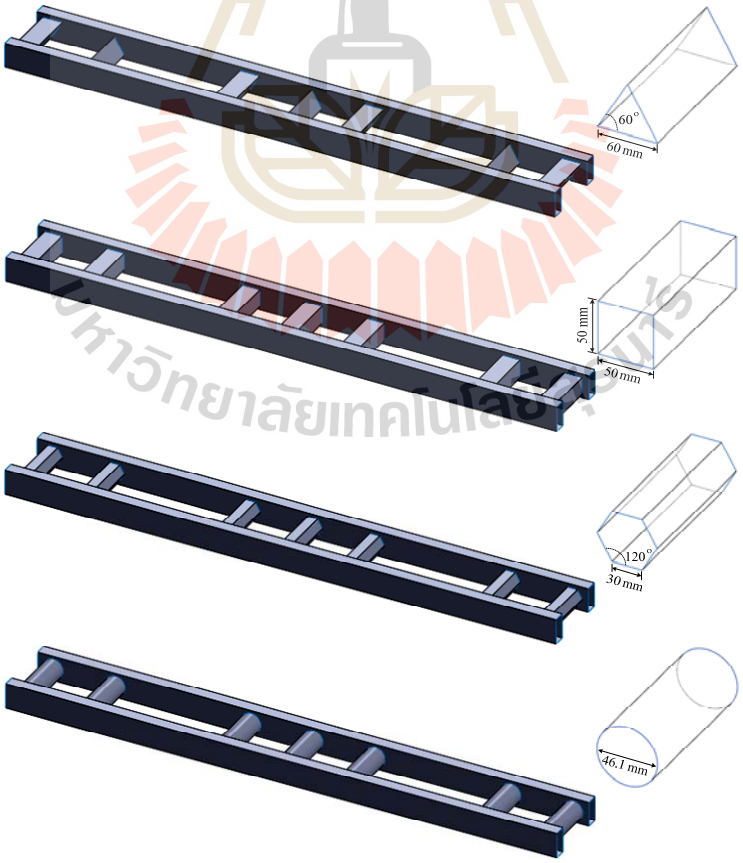
#### 3.3.2.1 การออกแบบชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

จากหัวข้อที่ผ่านมาเกี่ยวกับผลการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า พบว่าการเสียรูปของโครงสร้างจะเกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนคานขวางด้านหน้าซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่ได้รับอิทธิพลจากการชนกระแทกมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าการกระจายความเค้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่โครงสร้างแชสซีบริเวณเสาหน้าคู่เนื่องจากเป็นชิ้นส่วนที่ดูดซับแรงจากการกระแทกมากที่สุด ทั้งนี้แนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างให้มีประสิทธิภาพการดูดซับและกระจายแรงกระแทกได้ดีสามารถกระทำได้ด้วยการติดตั้งชิ้นส่วนช่วยดูดซับแรงกระแทกเพิ่มที่บริเวณตำแหน่งด้านหลังของโครงสร้างคานขวางด้านหน้าและโครงสร้างแชสซีบริเวณเสาหน้าคู่ดังแสดงในรูปที่ 3.14



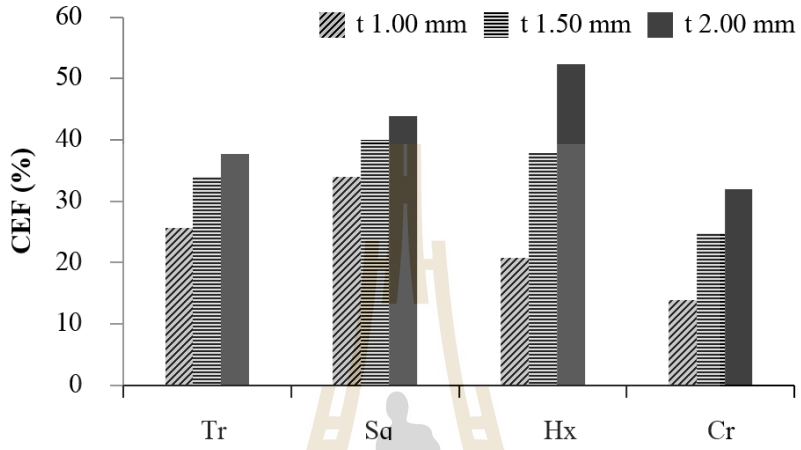
**รูปที่ 3.14** แนวทางการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทก

รูปที่ 3.15 แสดงชิ้นส่วนอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกที่ได้ออกแบบเบื้องต้น โดยที่ในการออกแบบได้ทำการพิจารณารูปทรงท่อหน้าตัดแบบต่าง ๆ ได้แก่ หน้าตัดท่อสามเหลี่ยม(Tr) หน้าตัดท่อสี่เหลี่ยม(Sq) หน้าตัดท่อหกเหลี่ยม(Hx) และหน้าตัดท่อวงกลม(Cr) และทำพิจารณาที่ขนาดความหนาแตกต่างกัน ได้แก่ 1 1.5 และ 2 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชนกระแทก (Crashing Force Efficiency-CFE) และความสามารถในการดูดซับพลังงานต่อหน่วยมวล (Specific Absorbtion Energy-SAE) ของแต่ละรูปทรง

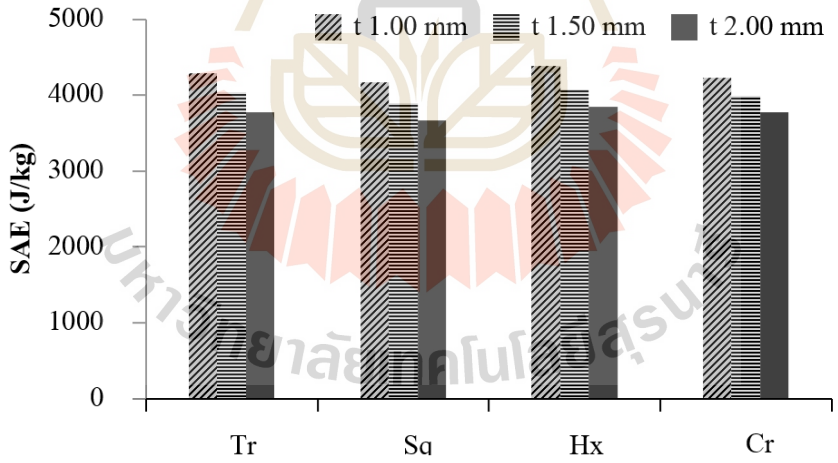



**รูปที่ 3.15** ชิ้นส่วนอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกที่ได้ทำการออกแบบ

จากรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพการชนกระแทกและความสามารถในการดูดซับพลังงานต่อหน่วยมวลของแบบจำลองอุปกรณ์ดูดซับพลังงานที่ได้ออกแบบ ซึ่งจะพบว่าว่าอุปกรณ์ดูดซับพลังงานรูปทรงท่อหน้าตัดหกเหลี่ยมที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร เป็นรูปทรงที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าหน้าตัดรูปทรงอื่น ดังนั้นแนวทางในการออกแบบจึงได้เลือกใช้รูปทรงหน้าตัดท่อดังกล่าวในการวิเคราะห์แบบจำลองการชนกระแทกด้านหน้าโครงสร้างรถโดยสารต่อไป




**รูปที่ 3.16** ประสิทธิภาพการชนกระแทกของรูปทรงแต่ละหน้าตัดที่ความหนาต่าง ๆ

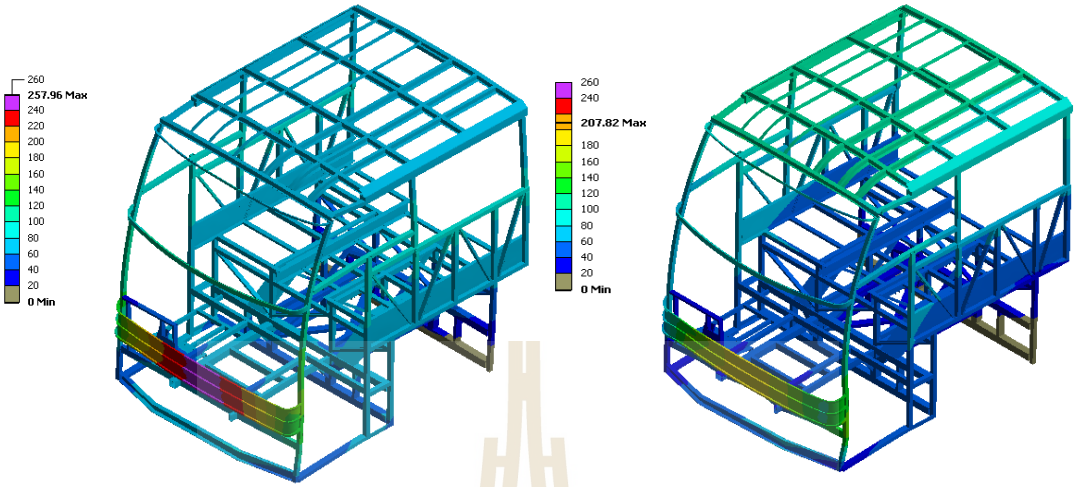



**รูปที่ 3.17** ความสามารถในการดูดซับพลังงานต่อหน่วยมวลแต่ละหน้าตัดที่ความหนาต่าง ๆ

### 3.3.2.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารเสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก

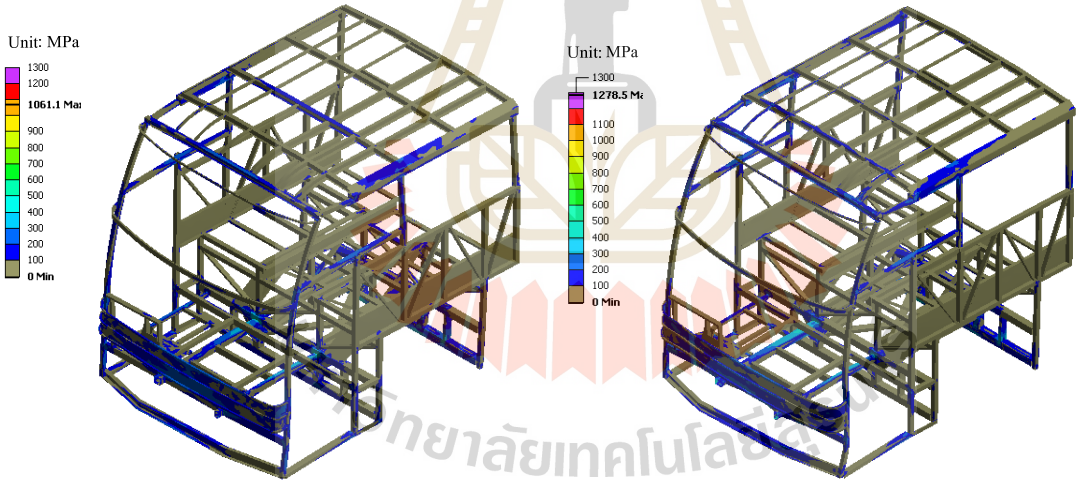
สำหรับในการวิเคราะห์ผลการจำลองโครงสร้างรถโดยสารที่เสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกนั้นจะทำการพิจารณาผลของการเสียรูปของโครงสร้าง การกระจายความเค้น และลักษณะของพลังงานภายในที่เกิดขึ้นเทียบกับแบบจำลองที่ไม่มีการเสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทก โดยที่ผลของการวิเคราะห์การเสียรูปของ

โครงสร้างและการกระจายความเค้นรถโดยสารก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงโครงสร้างสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 ตามลำดับ




(ก) (ข)

**รูปที่ 3.18** ผลการวิเคราะห์การเสียรูปของโครงสร้าง (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) หลังการการปรับปรุง



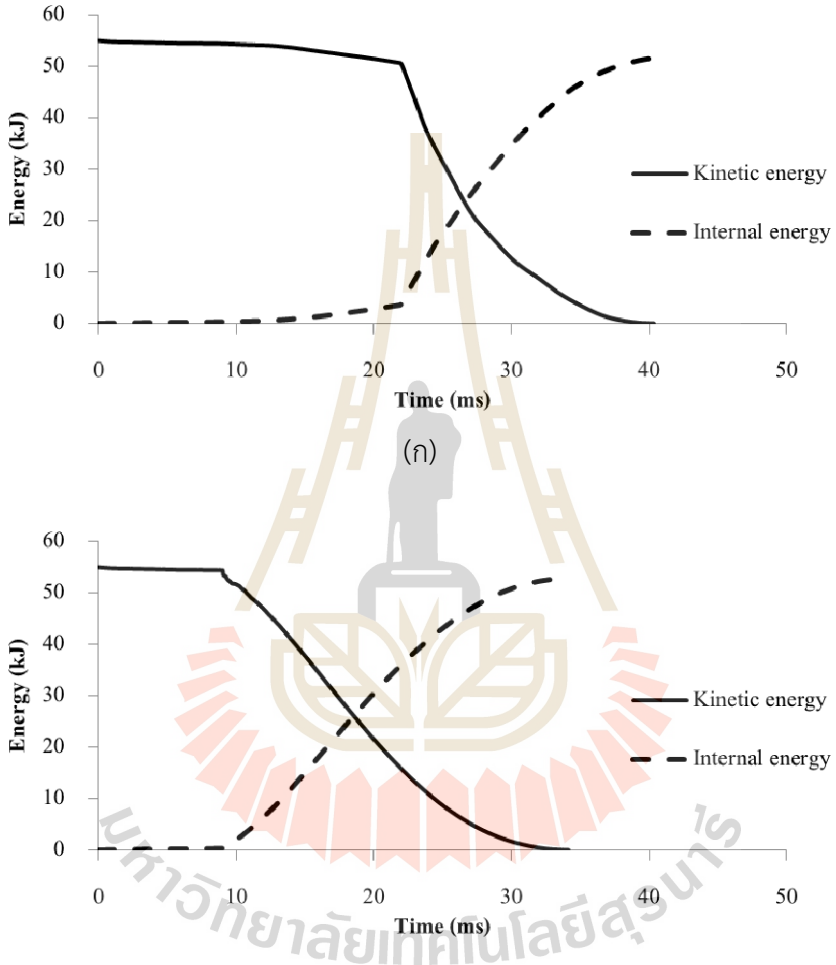

(ก) (ข)

**รูปที่ 3.19** ผลการวิเคราะห์การกระจายความเค้น (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) หลังการการปรับปรุง

จากรูปที่ 3.18 พฤติกรรมการเสียรูปภายใต้การชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างรถโดยสารก่อนและหลังการปรับปรุงจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันแต่มีขนาดที่แตกต่างกัน กล่าวคือโครงสร้างจะเริ่มต้นเกิดการเสียรูปที่ชิ้นส่วนโครงสร้างคานด้านหน้าและส่งต่อไปยังเสาคู่หน้าของโครงสร้างแชสซีในช่วงเวลาเดียวกัน โดยที่โครงสร้างรถโดยสารที่มีการปรับปรุงด้วยการเสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงจะสามารถลดความเสียหายของคานด้านหน้าและแชสซีได้ ซึ่งสามารถลดลงระยะการเสียรูปจากโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิมถึง 19.43 %

เช่นเดียวกับผลของการกระจายความเค้นในรูปที่ 3.19 ซึ่งจะพบว่าพฤติกรรมของคลื่นความเค้นจากการชนกระแทกสามารถกระจายไปยังโครงสร้างส่วนอื่นได้ดีขึ้น

นอกจากนี้หากพิจารณาถึงลักษณะพฤติกรรมของพลังงานจลน์และพลังงานภายในที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างก่อนและหลังการปรับปรุง (ดังแสดงรูปที่ 3.20) จะพบว่าโครงสร้างที่มีการเสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานจลน์เป็นพลังงานภายในโครงสร้างได้เร็วกว่าโครงสร้างที่ไม่มีการเสริมชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกถึง 10.04%




**รูปที่ 3.20** พลังงานจลน์และพลังงานภายใน (ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) หลังการการปรับปรุง

### 3.4 สรุปผลการพัฒนาปรับปรุงโครงสร้างหลักของรถโดยสาร

#### 3.4.1 มาตรฐานการทดสอบการพลิกคว่ำ

โครงสร้างรถโดยสารหนึ่งชั้นที่ได้ทำการศึกษาควรมีการปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางส่วนเพื่อให้มีมาตรฐานความปลอดภัยจากการทดสอบการพลิกคำ่ โดยมีรายละเอียดเนื้อสรุปได้ดังนี้

- การใช้เหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับชิ้นส่วนเสาแผงข้าง ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร จะไม่สามารถผ่านเกณฑ์มารตรฐานการทดสอบพลิกคว่ำ เนื่องจากมีขนาดเล็กเกินไป

- การใช้เหล็กรูปพรรณกลวงสี่เหลี่ยมจัตุรัสสำหรับโครงสร้างด้านข้างและโครงสร้างหลังคา ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 50 x 50 x 2 มิลลิเมตร จะไม่สามารถผ่านเกณฑ์มารตรฐานการทดสอบพลิกคว่ำ เนื่องจากมีขนาดเล็กเกินไป

ทั้งนี้ทางทีมวิจัยจึงได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารหนึ่งชั้นเพื่อให้เป็นไปตามเกณฑ์ความปลอดภัยด้วยการออกแบบให้เสาแผงข้างมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เช่น 50 x 75 x 3.2 มิลลิเมตร หรือ 50 x 100 x 2.3 มิลลิเมตร เป็นต้น รวมไปถึงโครงสร้าหลังคาและโครงสร้างแผงเหล็กข้างควรใช้ความหน้าที่มากขึ้นกว่าเดิมจาก 2 มิลลิเมตร เป็น 3.2 มิลลิเมตร เนื่องจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็ว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถผ่านการทดสอบการพลิกคว่ำ

**3.4.2 มาตรฐานการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า**

โครงสร้างรถโดยสารหนึ่งชั้นที่ได้ทำการศึกษามีความปลอดภัยภายใต้มาตรฐานในการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า โดยที่จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าไม่มีชิ้นส่วนโครงสร้างใดทำให้เกิดความเสียหายต่อผู้ขับขี่ อย่างไรก็ตามทางทีมวิจัยได้เสนอแนวทางในการปรับปรุงประสิทธิภาพการชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างด้วยการออกแบบให้มีการติดตั้งชิ้นส่วนดูดซับแรงกระแทกด้านหน้า โดยที่สามารถออกแบบด้วยการใช้โครงสร้างรูปทรงท่อหน้าตัดหกเหลี่ยมที่มีความหนาขนาด 2 มิลลิเมตร จำนวน 7 ชิ้น ติดตั้งบริเวณระหว่างแผงคานขวางด้านหน้ากับโครงสร้างเสาของแชสซี ซึ่งจะช่วยให้โครงสร้างรถโดยสารสามารถดูดซับแรงกระแทกได้อย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

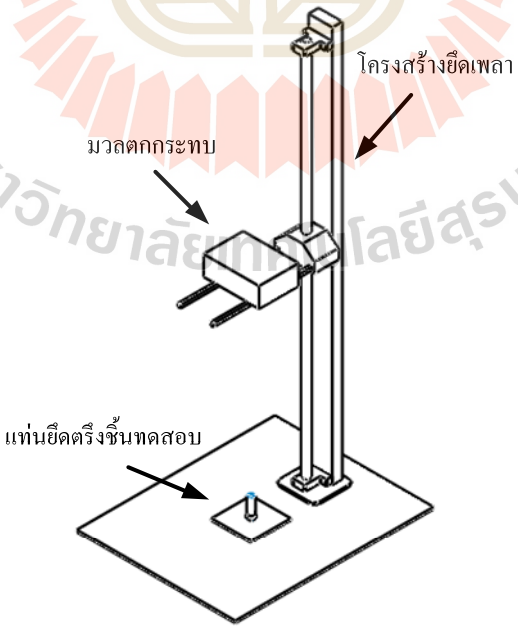
# บทที่ 4
# การตรวจสอบความถูกต้องแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมจำลองด้วยการออกแบบการทดสอบการปล่อยตกกระแทกอิสระและเปรียบเทียบผลที่ได้กับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยที่เนื้อหาในบทนี้จะประกอบไปด้วยรายละเอียดการทดสอบการชนกระแทกแบบปล่อยมวลตกกระแทกชิ้นส่วนท่อผนังบาง อุปกรณ์และผลการทดสอบ ตลอดจนผลการวิเคราะห์แบบจำลองการชนกระแทกชิ้นส่วนท่อผนังบาง ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของการใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 4.1 การทดสอบปล่อยมวลตกกระแทกชิ้นส่วนท่อผนังบาง

### 4.1.1 ชุดทดสอบการตกกระแทก

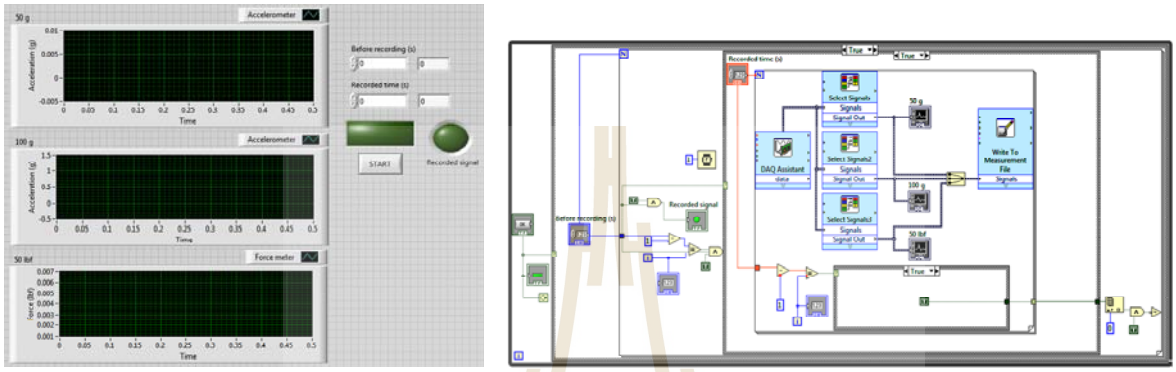
ในการทดสอบการตกกระแทกด้วยวิธีปล่อยมวลตกอิสระนั้นจะเป็นการกำหนดค่าพลังงานจลน์ในการกระแทกจากความสูงของมวลและความเร็วขณะชนกระทบชิ้นทดสอบ โดยที่เครื่องทดสอบการตกกระแทกสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ 1) โครงสร้างสำหรับยึดเพลาตรงซึ่งวางตัวในแนวดิ่ง โดยใช้เป็นแกนนำทางให้มวลตกกระทบขึ้นลงในแนวตั้งเท่านั้น 2) ชุดติดตั้งมวลตกกระทบซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับ 9.81 กิโลกรัม และ 3) แท่นยึดตรึงชิ้นทดสอบซึ่งวางอยู่ที่พื้นล่าง โดยที่รายละเอียดอุปกรณ์ชุดทดสอบการตกกระแทกสามารถแสดงได้ในดังรูปที่ 4.1




**รูปที่ 4.1** รายละเอียดเครื่องทดสอบการตกกระแทกแบบอิสระ

### 4.1.2 โปรแกรมวัดค่าในการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์วัดค่าความเร่งขนาดเท่ากับ ±100g และอุปกรณ์วัดค่าแรงแบบพลวัตขนาดเท่ากับ ±50 lbf โดยที่เชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูลคือ DAQ card และคอมพิวเตอร์ เพื่อทำการบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าจากอุปกรณ์ทั้งสองด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยที่หน้าต่างแสดงผลและรายละเอียดวงจรสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2(ก) และรูปที่ 4.2(ข) ตามลำดับ ซึ่งอุปกรณ์ในชุดทดสอบและชิ้นทดสอบสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 4.3



(ก) (ข)

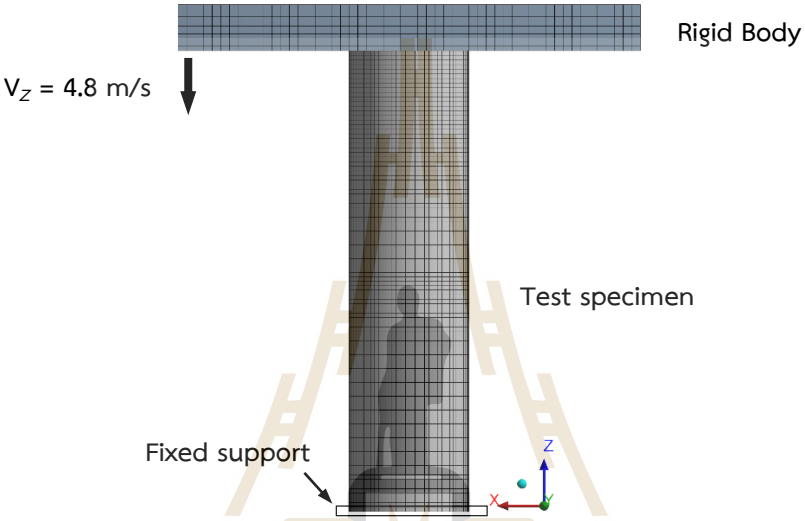
**รูปที่ 4.2** หน้าต่างแสดงผลบนโปรแกรมที่ใช้ในการวัดค่าความเร่งและค่าแรง (ก) และรายละเอียดของโปรแกรมที่ใช้ในการวัดแรงดันไฟฟ้า (ข)

(ก) (ข)

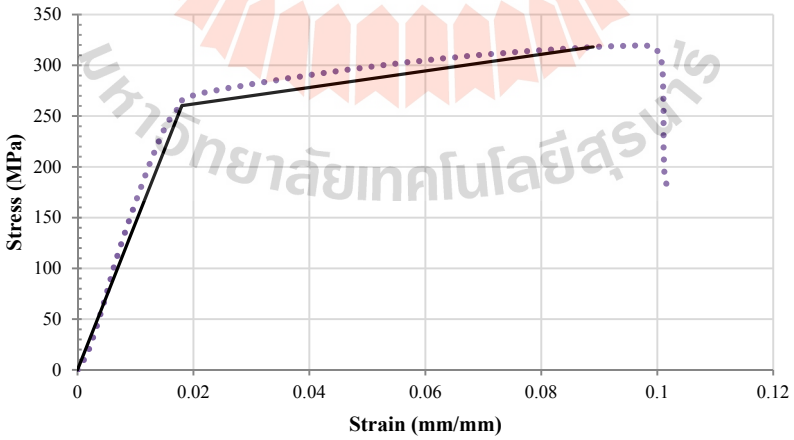
**รูปที่ 4.3** รายละเอียดอุปกรณ์ในชุดทดสอบ (ก) และ ชิ้นทดสอบที่ถูกยึดแน่นที่ด้านล่าง (ข)

## 4.2 แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

รายละเอียดแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์การชนกระแทกแบบปล่อยมวลตกอิสระจะประกอบไปด้วยแบบจำลองชิ้นทดสอบท่ออลูมิเนียมที่มีหน้าตัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร (ความหนาและความสูง เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร ตามลำดับ) และชิ้นวัตถุแข็งเกร็งตกกระทบที่มีขนาดเท่ากับ 100 x 100 x 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.4(ก) และกำหนดให้น้ำหนักเท่ากับ 10 กิโลกรัม และมีความเร็วขณะในการตกกระทบ เท่ากับ 4.8 เมตรต่อวินาที (พิจารณาที่ระยะความสูงปล่อยมวลเท่ากับ 117 เซนติเมตร) ทั้งนี้รายละเอียดเงื่อนไขขอบเขตและสมบัติวัสดุแสดงได้ตามรูปที่ และมีสมบัติวัสดุที่ได้จากการทดสอบรูปที่ 4.4(ข))




(ก)



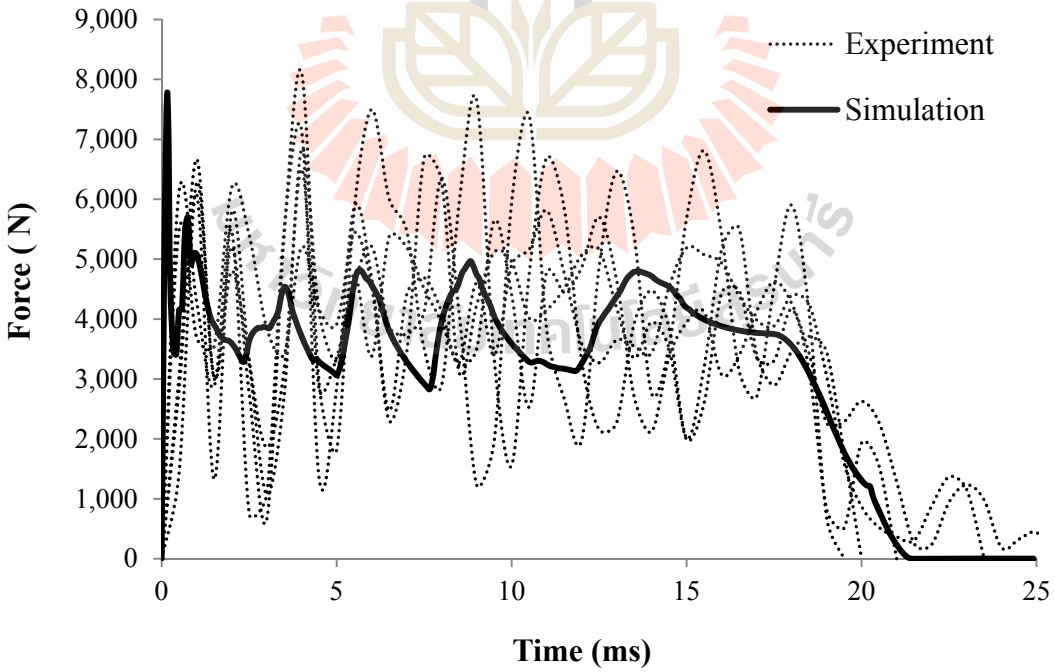

(ข)

**รูปที่ 4.4** รายละเอียดเงื่อนไขขอบเขต (ก) และสมบัติวัสดุของแบบจำลอง (ข)

### 4.3 ผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์แบบจำลอง

รูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบการชนกระแทกแบบปล่อยตกอิสระของชิ้นส่วนท่อผนังบางทั้งหมดจำนวน 5 ชิ้น และผลการวิเคราะห์แบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะพบว่าพฤติกรรมการเสียรูปของการเสียรูปที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน โดยที่ชิ้นส่วนท่อผนังบางจะมีลักษณะพับงอเป็นชั้น ๆ และระยะการยุบตัวเสียรูปหลังจากมวลตกกระทบเฉลี่ยประมาณ 40 มิลลิเมตร

**รูปที่ 4.5** ผลการเสียรูปของชิ้นทดสอบจากการทดสอบ (ซ้าย) และจากการวิเคราะห์แบบจำลอง (ขวา)




**รูปที่ 4.6** ผลของความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาที่ได้จากการทดสอบจริงและการจำลอง

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงและเวลาที่ได้จากการทดสอบจริงและการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะพบว่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะพฤติกรรมแบบขึ้นลงความสัมพันธ์กับจำนวนของการเสียรูปแบบพับงอของชิ้นส่วนผนังบางที่เวลาในช่วง 0 ถึง 25 ms โดยที่ค่าแรงสูงสุดจะอยู่ในช่วง 7,000 ถึง 8,000 นิวตัน และมีค่าแรงเฉลี่ยประมาณเท่ากับ 3,000 นิวตัน และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานดูดซับหรือพื้นที่ใต้กราฟเฉลี่ยจะมีใกล้เคียงกับพลังงานจลน์ของมวงตกกระทบค่าเท่ากับ 120 จูล

**ตารางที่ 4.1** ผลระยะการเสียรูป แรงสูงสุด และแรงเฉลี่ย

| Specimen | | Deformation (mm) | Max. Force (N) | Mean Force (N) |
|---|---|---|---|---|
| Experiment | #1 | 40.5 | 8,107.4 | 4,030.5 |
| | #2 | 39.5 | 7,401.5 | 4,003.2 |
| | #3 | 39.2 | 6,838.2 | 2,991.1 |
| | #4 | 39.8 | 7,137.2 | 3,486.5 |
| | #5 | 38.8 | 6,694.5 | 3,838.2 |
| | Avg. | 39.6±0.6 | 7,235.7±558.5 | 3,669.8±436.9 |
| Simulation | | 39.7 | 7,773.3 | 3,065.2 |

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบของระยะการเสียรูป แรงสูงสุด และแรงเฉลี่ยระหว่างวิธีการทดสอบปล่อยมวลตกกระแทกชิ้นทดสอบจริงและวิธีการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยที่จากผลการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะพบว่าระยะยุบตัวของชิ้นทดสอบ มีค่าเท่ากับ 39.7 มิลลิเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับผลทดสอบจริง นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์จำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าค่าแรงสูงสุดและค่าแรงเฉลี่ยที่มีค่าเท่ากับ 7,773.3 นิวตัน และ 3,065.2 นิวตัน ตามลำดับ ในขณะที่ผลจากการทดสอบจริงมีค่าเท่ากับ 7,235.7±558.5 นิวตัน และ 3,669.8±436.9 นิวตัน และเมื่อพิจารณาค่าเปอร์เซนต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับ 7.4 % และ 16.8 % ตามลำดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บทที่ 5
# สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาออกแบบโครงสร้างและวิเคราะห์ความปลอดภัยของรถโดยสารภายใต้เงื่อนไขสภาวะการชนกระแทกด้านหน้าและการพลิกคว่ำสามารถสรุปได้ตามรายละเอียดดังนี้

## 5.1 มาตรฐานความปลอดภัยการพลิกคว่ำ

สำหรับผลการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการพลิกคว่ำซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานยุโรป ECE Regulation No.66 ด้วยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโครงสร้างรถโดยสารประเภทหนึ่งชั้นรุ่น CG280 ไม่มีความปลอดภัยตามมาตรฐาน โดยที่ในขณะโครงสร้างรถสารเกิดการพลิกคว่ำบริเวณห้องโดยสารมีความเสียหายล้ำเกิดพื้นที่ปลอดภัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณชิ้นส่วนโครงสร้างเสาหลักและชิ้นส่วนเหล็กด้านข้าง โดยที่การออกแบบโครงสร้างเสาหลักด้วยการแบ่งช่วงแต่ละตอนไม่เท่ากันก็จะส่งผลให้ความแข็งแรงของโครงสร้างและประสิทธิภาพการส่งถ่ายแรงจากการกระแทกลดน้อยลงไป ทั้งนี้เมื่อทำการปรับปรุงโครงสร้างเสาข้างและโครงหลังคาหลักด้วยการเพิ่มขนาดและความหนาของเหล็กรูปพรรณหน้าตัดสี่เหลี่ยมจากเดิมขนาด 50 x 50 x 2.3 มิลลิเมตร ด้วยขนาด 50 x 100 x 3.2 มิลลิเมตร และเพิ่มขนาดความหนาของโครงสร้างหลังคาและโครงสร้างเหล็กแผงข้างเท่ากับ 2 มิลลิเมตร และ 3.2 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างมีการเสียรูปที่ลดลงโดยไม่มีชิ้นส่วนโครงสร้างใดล้ำเข้าไปในพื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสาร ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบใหม่นี้มีความแข็งแรงและปลอดภัยแก่ผู้โดยสารในกรณีที่เกิดการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน

## 5.2 มาตรฐานความปลอดภัยการชนกระแทกด้านหน้า

จากผลการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้าซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐานยุโรป ECE Regulation No.29 เมื่อพิจารณาถึงการเสียรูปของโครงสร้างและความสามารถในการดูดซับพลังงานตามเงื่อนไขการทดสอบดังกล่าวด้วยวิธีการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าโครงสร้างรถโดยสารประเภทหนึ่งชั้นรุ่น CG280 มีความปลอดภัยตามมาตรฐานการทดสอบ โดยที่ในขณะที่มีการชนกระแทกด้านหน้าไม่มีการเสียรูปของโครงสร้างหรือชิ้นส่วนใด ๆ รุกล้ำพื้นที่ปลอดภัยทำความเสียหายแก่ผู้ขับขี่ และมีพลังงานที่ส่งถ่ายถึงตำแหน่งโครงสร้างที่นั่งผู้ขับขี่เหลือเพียง 0.24 % ของพลังงานจลน์ชนกระแทกทั้งหมด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปรับปรุงโครงสร้างด้านหน้าด้วยการเพิ่มอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทก พบว่าสามารถปกป้องผู้โดยสารได้ดีกว่าโครงสร้างรถโดยสารแบบเดิม โดยที่สามารถลดค่าพลังงานความเครียดที่ส่งถ่ายไปยังตำแหน่งโครงสร้างที่นั่งผู้ขับขี่เหลือเพียง 0.08 % ของพลังงานจลน์ชนกระแทกทั้งหมด ทั้งนี้อุปกรณ์ดูดซับพลังงานรูปทรงท่อผนังบาง

หน้าตัดหกเหลี่ยมที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จะสามารถดูดซับพลังงานจากชนกระแทกและมีประสิทธิภาพการชนสูงมากกว่า 50%

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์แบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบกับการทดสอบปล่อยมวลตกกระแทกชิ้นงานรูปทรงท่อกลมผนังบาง โดยที่พบว่าพฤติกรรมการเสียรูปและขนาดของแรงในขณะมวลตกกระทบที่บันทึกได้จากการทดสอบจริงมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับการวิเคราะห์แบบจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

**5.3 ข้อเสนอแนะ**

1. ในงานวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวทางในการออกแบบปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารประเภทหนึ่งชั้น ซึ่งมุ้งเน้นให้มีการปรับเปลี่ยนจากกระบวนการผลิตเดิมให้น้อยที่สุด ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเดิมบางส่วน การใช้วัสดุในการผลิตเดิม เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อผู้ประกอบการในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนการผลิตการผลิต อย่างไรก็ตามหากผู้ประกอบการต้องการพัฒนาโครงสร้างให้มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพได้รับมาตรฐานความปลอดภัย ควรมีการขยายผลออกแบบปรับปรุงวัสดุใหม่ ๆ

2. การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ดูดซับแรงกระแทกสามารถขยายผลเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไปได้ เช่น การพัฒนารูปร่าง การเลือกวัสดุ และตำแหน่งการติดตั้งบนโครงสร้าง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานและปกป้องโครงสร้างโดยรวมให้ได้รับความเสียหายน้อยที่สุด

3. ควรมีการกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการพลิกคว่ำ (ECE Regulation No.66) และมาตรฐานความปลอดภัยในการทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า (ECE Regulation No.29) สำหรับการวิเคราะห์จำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างในขั้นตอนก่อนประบวนการผลิตจริง ตลอดจนเป็นการลดเวลาและต้นทุนในการทดสอบจริง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

# บรรณานุกรม


กลุ่มงานสถิติ (2558). รายงานสถิติการขนส่งประจำปี 2558. **กองแผนงาน กรมการขนส่งทางบก**.

กองบังคับการตำรวจจราจร (2557). สถิติคดีอุบัติเหตุจราจรทางบกในเขตพื้นที่สำนักงานตำรวจแห่งชาติ จำแนกตามพื้นที่ ตั้งแต่เดือน มกราคม 2557 ถึงเดือน สิงหาคม 2557. **สำนักงานตำรวจแห่งชาติ. (หน้า 2)**

ณรงค์ ป้อมหลักทอง (2555). มาตรฐานด้านความปลอดภัยของรถในระบบรถโดยสารประจำทาง : การกำหนดมาตรฐาน การบังคับใช้และการตรวจสอบ (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์). **สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย.**

ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน (2555). โครงการออกแบบโครงสร้างชิ้นส่วนหลักของตัวถังรถโดยสารหนึ่งชั้นและสองชั้น (รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์). **กองทุนเพื่อความปลอดภัยในการใช้รถใช้ถนน กรมการขนส่งทางบก**.

สุริยัน ปัญญาไว (2557). ยกมาตรฐานรถสาธารณะลดความรุนแรงอุบัติเหตุ. **หนังสือพิมพ์กรุงเทพธุรกิจ: วันที่ 6 มกราคม 2557.**

สำนักงานสถิติแห่งชาติ (2552). การสำรวจการประกอบการขนส่งด้วยรถโดยสารประจำทาง พ.ศ. 2552. **กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร**.

Abdullah, S., Kandhim, N.A., Ariffin, A.K., and Hosseini, M. (2011). Dynamic Analysis of an Automobile Lower Suspension Arm Using Experiment and Numerical Technique. **New Trends and Developments in Automotive System Engineering**: 231-248.

Alexander, J. M. (1960). An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. **The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics**. January 01, 1960; vol.13: pp.10-15.

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 Accidents. **The 11th International LS-DYNA® User Conference**, Dearborn: U.S.A., June 6, 2010; pp.13-23.

Deb, A., Mahendrakumar, M.S., Chavan, C., Karve, J., Blankenburg, D., and Storen, S. (2004). Design of an aluminium-based vehicle platform for front impact safety. **International Journal of Impact Engineering**. September-October 2004; vol.30(8-9): pp.1055–1079.

DiPaolo, B.P., and Tom, J.G. (2006). A study on an axial crush configuration response of thin-wall, steel box components: The quasi-static experiments. **International Journal of Solids and Structures**. Decmber 2006; vol.43(25-26): pp.7752-7775.

Fan, Z., Lu, G., and Liu, K. (2013). Quasi-static axial compression of thin-walled tubes with different cross-sectional shapes. **Engineering Structures**. October 2013; vol.55: pp.80-89.

Hashemi, R. (2005). UN-ECE R66: Strength of Super-structure during Rollover. **APSN Workshop on Bus & Truck Passive Safety.** Praque, 24 March 2005

Johnson, W., Mamalis, A.G., and Reid, S.R. (1982). Aspects of car design and human injury. **Chapter 4 in Human Body Dynamics, Impact, Occupational and Athletic**. Clarendon Press: Oxford; U.K.

Ko, H.Y., Shin, K.B., Jeon, K.W., and Cho, S.H. (2009). **A Study on the Crashworthiness and Rollover Characteristics of low-floor bus made of sandwich composites**. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009; vol.23(10): pp.2686-2693.

Lapo, C., Klomkaew, R., and Chamniprasart, K. (2011). **Design and Analysis of Double Decker Bus Chassis.** The 5th South East Asia Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, Hanoi: Vietnam; February 7-14, 2011.

Lee, L. 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.

Lin, Y. C., and Nian, H.C. (2006). **Structure Design Optimization of the Body Section Using the Finite Element Method**. SAE World Congress & Exhibition, U.S.A., April 3-6, 2006: 6 pp.

Marzbanrad, J., Mehdikhanlo, M., and Saeedi Pour, A. (2009). 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.

Mayrhofer, E., Steffan, H., and Hoschopf, H. (2005). Enhanced Coach and Bus Occupant Safety. **19 International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles.** Washington DC, United States.

Meyers, M. A. (1994). **Dynamic Behavior of Material**. New York: John Wiley & Sons, October 11, 1994: 668 pp.

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.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Perrone, N. (1972). Biomechanical problems related to vehicle impact. **Biomechanics: Its foundations and objectives,** Prentice Hall; Englewood Cliffs: U.S.A., pp.84-92.

Reid, S. R., and Reddy, T. Y. (1986). Static and dynamic crushing of tapered sheet metal tubes of rectangular cross-section. **International Journal of Mechanical Sciences**. January, 1986; vol.28(9): pp.295-322.

Supakit, R., and Sarawut, B. (2013). Finite Element Analysis of High-Decker Bus Frontal Impact based on ECE-Regulation No.29. **Advanced Materials Research** vol.658: pp. 464-470.

Tai, Y.S., Huang, M.Y., and Hu, H.T. (2010). Axial compression and energy absorption characteristics of high-strength thin-walled cylinders under impact load. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**. February 2010; vol.53(1): pp.1-8.

Tang, Z., and Li, D. (2012). Quasi-static axial buckling behavior of NiTi thin-walled cylindrical shells. **Thin-Walled Structures**. February 2012; vol.51: pp.130-138.

UNECE Informal Document. (2009). Driver and crew prediction in frontal collision of buses. **GRSG-96-19**.

UNECE Informal Document. (2012). Concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions. **Agreement Addendum 28: Regulation No. 29 Revision 2.**

UNECE Informal Document (2009). Uniform Technical Prescriptions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of Their Superstructure. **Regulation No. 66**.

Wierzbicki, T., and Abramowicz, W. (1983). On the crushing mechanics of thin-walled structures. **The American Society of Mechanical Engineers**, December 01, 1983; Vol.50(4a): pp.727-734.