

การออกแบบวิเคราะห์และทดสอบโครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง  
ให้รองรับความเสียหายในกรณีทดสอบการพลิกคว่ำ



นางสาวรัตติพร กล่อมแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2557

**DESIGN, ANALYSIS AND TESTING OF A HIGH  
DECKER BUS STRUCTURAL TO WITHSTAND THE  
DAMAGE UNDER ROLL OVER TEST**



**Rattiporn Klomkaew**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2014**

การออกแบบวิเคราะห์และทดสอบโครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง  
ให้รองรับความเสียหายในกรณีทดสอบการพลิกคว่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

---

(ผศ. ดร.กิริติ สุลักษณ์)

ประธานกรรมการ

---

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

---

(อ. ดร.ชโลธร ธรรมแท้)

กรรมการ

---

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

---

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รัตติพร กล่อมแก้ว : การออกแบบวิเคราะห์และทดสอบโครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง  
ให้รองรับความเสียหายในกรณีทดสอบการพลิกคว่ำ (DESIGN, ANALYSIS AND  
TESTING OF A HIGH DECKER BUS STRUCTURAL TO WITHSTAND THE  
DAMAGE UNDER ROLL OVER TEST) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์  
เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 183 หน้า.

การผลิตรถโดยสารในประเทศไทยได้มีการดำเนินการต่อตัวถังมาระยะเวลาหนึ่งแล้ว โดยกระบวนการผลิตจะมีการนำโครงสร้างบางส่วนเข้ามาจากต่างประเทศ ต่างจากประเทศจีนที่ได้ผลิตชิ้นส่วนทุกชิ้นในประเทศทำให้มีราคาถูก ดังนั้นหากจะพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศ เราจึงมีความจำเป็นที่ต้องใช้เทคโนโลยีการผลิตสมัยใหม่และความรู้ด้านวิศวกรรม และเนื่องจากการสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่มีผลกระทบต่อชีวิตผู้โดยสารจำนวนมาก ดังนั้นภาครัฐจึงได้เข้ามามีบทบาทในการกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของรถโดยสารมากขึ้น โดยเน้นความแข็งแรงของโครงสร้างในกรณีที่รถโดยสารเกิดอุบัติเหตุขึ้น ในการวิจัยนี้จึงได้มีการออกแบบและวิเคราะห์โดยสร้างแบบจำลองของส่วนตัวถังในช่วงห้องโดยสารด้วยคอมพิวเตอร์ แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้น และปรับเปลี่ยนแบบจนมั่นใจว่าตัวถังมีความแข็งแรงและปลอดภัยต่อผู้โดยสาร ถึงแม้ว่าผลการวิเคราะห์จะไม่เหมือนจริงทุกประการ แต่การวิเคราะห์นี้ก็สามารถให้ข้อมูลและยกระดับความปลอดภัยได้มากขึ้น โดยใช้ต้นทุนที่ไม่สูงผู้วิจัยหวังว่าจะช่วยให้การผลิตรถโดยสารในประเทศมีมาตรฐานและสร้างความปลอดภัยในการเดินทางให้ผู้โดยสารด้วย

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

RATTIPORN KLOMKAEW : DESIGN, ANALYSIS AND TESTING OF  
A HIGH DECKER BUS STRUCTURAL TO WITHSTAND THE DAMAGE  
UNDER ROLL OVER TEST. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.  
FLT. LT. KONTORN CHAMNIPRASART, Ph.D., 183 PP.

ANALYSIS/ROLL OVER/FINITE ELEMENT METHOD

Bus production in Thailand has been going on for some time now. The chassis come from abroad. Building the bus body in this country is one way to reduce the cost of production. But to build an efficient product, design and engineering calculations are absolutely essential. Since the creation of the bus, it has had an impact on many people's lives. The government has to play a role in determining safety standards of buses by emphasizing the strength of the structure in the case bus has an accident. The collapse of bus structure will not reach a level where passengers are harmed. To test the structural strength, calculations will be based on mathematical modeling and software packages to help solve this problem. Although not completely identical to a real accident test, it can provide information and raise the level of safety at a much lower cost.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2014

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ที่ได้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง และให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งเสมอมา ดังนี้

บริษัท อู่เซ็คซ์ อุตสาหกรรม จำกัด และบุคลากรของบริษัททุกท่านที่ได้ให้การสนับสนุน และให้ข้อมูลในการทำโครงการวิจัยนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ให้คำปรึกษา ชี้แนะข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการวิจัย และแนวทางการแก้ปัญหาต่าง ๆ ด้วยความเมตตากรุณาเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ อาจารย์ ดร.ชโลธร ธรรมแท้ และคณาจารย์ทุกท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรม แนะนำแนวทางแก้ปัญหาและให้ข้อมูลในการทำโครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณปริณานันท์ มหาขันตรี คุณณัฐธิดา ละจัด คุณวันชัย ป่าขมื่น และเพื่อนบัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมด้านการศึกษา ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจตลอดมาในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนประสบความสำเร็จ

รัตติพร กล่อมแก้ว

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	จ
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ต
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 ปรีทศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	5
2.2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	9
2.2.2 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	10
2.2.3 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สองมิติ.....	13
2.2.4 การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	17
2.3 สภาวะที่ใช้ในการพิจารณาและออกแบบโครงสร้างรถ.....	22
2.3.1 สภาวะโมเมนต์คัต.....	22
2.3.2 สภาวะแรงบิด.....	23
2.3.3 สภาวะของแรงคัตและแรงบิด.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

### หน้า

2.3.4	สภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง .....	24
2.4	ECE Regulation No.66.....	24
2.5	คุณสมบัติเชิงกลของโลหะ .....	28
2.5.1	ความเค้นและความเครียด.....	28
2.5.2	ความยืดหยุ่น .....	30
2.5.3	การเสียรูปถาวร .....	32
<b>3</b>	<b>วิธีการดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>34</b>
3.1	ศึกษาโครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง.....	34
3.2	การวิเคราะห์โครงสร้างเดิมของรถโดยสารช่วงก่อนกระทบพื้น .....	36
3.2.1	Part.....	36
3.2.2	Property.....	39
3.2.3	Assembly .....	41
3.2.4	Step .....	41
3.2.5	Interaction.....	42
3.2.6	Load.....	42
3.2.7	Mesh .....	44
3.2.8	Visualization.....	44
3.3	การวิเคราะห์โครงสร้างเดิมของรถโดยสารช่วงกระทบพื้น .....	45
3.3.1	Part.....	45
3.3.2	Assembly .....	45
3.3.3	Predefined Field.....	46
3.3.4	Residual Space.....	47
3.4	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 1 .....	47
3.5	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 2.....	50
3.6	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 3.....	52
3.7	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 4.....	55



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.8	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 5.....	57
3.9	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 6.....	59
3.10	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 7.....	62
3.11	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 8.....	64
3.12	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 9.....	66
3.13	ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 10.....	67
<b>4</b>	<b>ผลการทดลอง.....</b>	<b>69</b>
4.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเดิมของรถโดยสาร .....	69
4.2	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 1 .....	72
4.3	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 2 .....	74
4.4	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 3 .....	76
4.5	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 4 .....	78
4.6	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 5 .....	80
4.7	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 6 .....	82
4.8	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 7 .....	84
4.9	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 8 .....	86
4.10	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 9 .....	88
4.11	ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 10 .....	90
4.12	ผลการคำนวณความเสียหายของพื้นที่ปลอดภัย.....	92
<b>5</b>	<b>สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>93</b>
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	93
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	93
	รายการอ้างอิง .....	94
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวกก. ทดสอบวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง .....	95
	ภาคผนวกข. ตัวอย่างการวิเคราะห์.....	177
	ภาคผนวกค. วิธีการใช้โปรแกรม ABAQUS .....	107

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ .....	99
ประวัติผู้เขียน .....	183



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างหลัก .....38
3.2	ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุ Steel STKR 400 ช่วง Plastic .....39
4.1	แสดงน้ำหนัก ความสูง และความเสียหายของพื้นที่ปลอดภัยของโครงสร้างแบบต่าง ๆ.....92



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผ่นอะลูมิเนียมที่ประกอบด้วยขอบโค้งและขอบตรงรวมทั้งรูปกลมสองขนาดภายใน .....6
2.2	การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม .....7
2.3	การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ .....8
2.4	รูปร่างลักษณะทั่วไปและขอบเขตของปัญหาที่กำหนดมาให้ .....10
2.5	การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นตารางสี่เหลี่ยมเพื่อใช้กับ ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ..... 11
2.6	แผนภาพสมการ .....12
2.7	การประยุกต์ใช้รูปแบบของแผนภาพสมการลงบนทุกจุดต่อภายใน ขอบเขตของปัญหา ..... 13
2.8	ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม .....14
2.9	เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสูงที่ประกอบด้วยหลายจุดต่อ .....15
2.10	ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม ผืนผ้าแบบสี่จุดต่อ ..... 15
2.11	เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสี่จุดต่อ .....16
2.12	การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายที่เกิดขึ้นจากการใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม และสามเหลี่ยมเมื่อมีจำนวนจุดต่อเท่ากัน .....16
2.13	รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับก้านเบรกมือรถยนต์ .....17
2.14	รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกะโหลกศีรษะ .....18
2.15	การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการยุบตัวของรถบัส ในขณะเกิดการชน ..... 19
2.16	รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับรถกระบะ .....20
2.17	รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสภาวะอากาศรอบกระสวยอวกาศ ทั้งก่อนและหลังการแยกตัวจากถังเชื้อเพลิงภายนอก .....21
2.18	สภาวะแรงคัต .....22
2.19	สภาวะแรงบิด .....23

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20	สถานะรวมแรงคัตและแรงบิด .....24
2.21	แสดงสถานะค่าแรงกระทำจากด้านข้าง.....24
2.22	พื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสารรูปด้านหน้า.....25
2.23	พื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสารรูปด้านข้าง .....26
2.24	การทดสอบรถโดยสารพลิกคว่ำ .....27
2.25	การทดสอบการพลิกคว่ำส่วนของตัวถังรถของ INSIA.....27
2.26	พื้นเอียงที่ใช้ในการทดสอบรถพลิกคว่ำ.....28
2.27	ความเค้นแบบต่าง ๆ .....29
2.28	ความเครียดแบบต่าง ๆ.....30
2.29	ขีดจำกัดความยืดหยุ่น ขีดจำกัดสัดส่วนและความแข็งแรงจํานน .....31
2.30	จุดจํานนบนและล่างของวัสดุ .....32
2.31	กราฟแรงเค้นความเครียดของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ .....33
3.1	แบบจําลองรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง.....35
3.2	แบบจําลองตัวถังรถโดยสารชนิดชั้นครึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์.....35
3.3	Reference Point ที่ CG ของโครงสร้างรถโดยสาร .....36
3.4	Reference Point ที่พื้น .....37
3.5	จุด CG ของแผ่นคอนกรีต .....37
3.6	น้ำหนักภาระกรรมที่กระจายอยู่บนโครงสร้างรถโดยสาร .....38
3.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400 .....39
3.8	โครงสร้างรถโดยสารพร้อมพื้นตกกระทบ .....41
3.9	Interaction ระหว่างโครงสร้างรถโดยสารกับพื้น.....42
3.10	Boundary Condition ของพื้นแบบ Encastre .....43
3.11	Boundary Condition ที่ขอบของโครงสร้างรถโดยสาร .....43
3.12	การ Mesh โครงสร้างรถโดยสารและพื้นตกกระทบ .....44
3.13	ค่า VR3 ณ เวลา 2.14 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างเดิมก่อนกระทบพื้น .....45

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 โครงสร้างรถโดยสารช่วงก่อนกระทบพื้น.....	46
3.15 ค่าความเร็วเชิงมุม.....	46
3.16 พื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสาร.....	47
3.17 โครงสร้างเดิมเสาหลัก หน้า 3.2 มิลลิเมตร.....	47
3.18 Support 1 เหล็กกล่องขนาด 50x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร.....	48
3.19 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 1.....	49
3.20 ค่า VR3 ณ เวลา 2.1 วินาทีที่จุด reference point ของ โครงสร้างแบบที่ 1 ก่อนกระทบพื้น.....	50
3.21 โครงหลังคาหลักเหล็กคัต โคงเป็นเหล็กกล่องขนาด 50x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตรและการแบ่ง section ของรถโดยสารให้มีขนาดเท่า ๆ กัน.....	51
3.22 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 2.....	51
3.23 ค่า VR3 ณ เวลา 2.465 วินาทีที่จุด reference point ของ โครงสร้างแบบที่ 2 ก่อนกระทบพื้น.....	52
3.24 โครงหลังคาหลักเหล็กคัต โคง เหล็กกล่องขนาด 50x 75 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร.....	53
3.25 โครงหลังคาข้อยเหล็กคัต โคง เหล็กกล่องขนาด 50x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร.....	53
3.26 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 3.....	54
3.27 ค่า VR3 ณ เวลา 2.40 วินาทีที่จุด reference point ของ โครงสร้างแบบที่ 3 ก่อนกระทบพื้น.....	55
3.28 Support 2 เหล็กกล่องขนาด 50x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร.....	55
3.29 Support 2 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 4.....	56
3.30 ค่า VR3 ณ เวลา 2.40 วินาทีที่จุด reference point ของ โครงสร้างแบบที่ 4 ก่อนกระทบพื้น.....	57
3.31 หลังคาเหล็กท่อนขนาด 50x 50 มิลลิเมตร หน้า 2 มิลลิเมตร.....	58
3.32 เหล็กด้านข้างขนาด 50x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร.....	58

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 ค่า VR3 ณ เวลา 2.45 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 5 ก่อนกระทบพื้น.....	59
3.34 โครงหลังคาเหล็กคัตโค้ง ขนาดเหล็ก 50x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร .....	60
3.35 โครงหลังคาข้อยเหล็กคัตโค้ง ขนาดเหล็ก 50x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร.....	60
3.36 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของโครงสร้างแบบที่ 6 .....	61
3.37 ค่า VR3 ณ เวลา 2.05 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 6 ก่อนกระทบพื้น.....	62
3.38 Support 2 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของโครงสร้างแบบที่ 7 .....	63
3.39 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 7 ก่อนกระทบพื้น.....	64
3.40 Support 3 เหล็กกล่องขนาด 50x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร .....	65
3.41 Support 3 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของโครงสร้างแบบที่ 8 .....	65
3.42 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 8 ก่อนกระทบพื้น.....	66
3.43 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 9 ก่อนกระทบพื้น.....	67
3.44 โครงหลังคาหลักและ โครงหลังคาข้อยเหล็กคัตโค้ง ขนาดเหล็ก 50x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร .....	68
3.45 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 10 ก่อนกระทบพื้น.....	69
4.1 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างเดิม ณ เวลา 0.5 วินาที.....	70
4.2 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างเดิม ณ เวลา 0.5 วินาที.....	71
4.3 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 1ณ เวลา 0.5 วินาที .....	72
4.4 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 1ณ เวลา 0.5 วินาที .....	73
4.5 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 2ณ เวลา 0.28 วินาที .....	74
4.6 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 2ณ เวลา 0.28 วินาที .....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 3 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 76
4.8	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 3 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 77
4.9	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 4 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 78
4.10	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 4 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 79
4.11	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 5 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 80
4.12	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 5 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 81
4.13	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 6 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 82
4.14	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 6 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 83
4.15	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 7 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 84
4.16	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 7 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 85
4.17	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 8 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 86
4.18	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 8 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 87
4.19	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 9 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 88
4.20	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 9 ณ เวลา 0.5 วินาที ..... 89
4.21	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 10 ณ เวลา 0.75 วินาที ..... 90
4.22	ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 10 ณ เวลา 0.75 วินาที ..... 91
ก.1	รูปร่างชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกล..... 96
ก.2	เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu UH – 2000 k..... 97
ก.3	Steel STKR 400..... 97
ก.4	ผลการทดสอบแรงดึงของ Steel STKR 400 ..... 98
ข.1	ตัวอย่างวิเคราะห์การตกกระทบ ..... 100
ข.2	ชิ้นงานตัวอย่าง Bracket ..... 100
ข.3	ชิ้นงานตัวอย่าง rigid surface ..... 101
ข.4	การ assembly ตัวอย่างการวิเคราะห์..... 101
ข.5	การกำหนดช่วงเวลากการวิเคราะห์ ..... 102
ข.6	การกำหนด interaction properties ..... 102



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.7 การกำหนด interaction .....	103
ข.8 การกำหนด boundary condition .....	103
ข.9 การกำหนด predefined field .....	104
ข.10 การ mesh .....	104
ข.11 ค่าพลังงานที่ได้จากการวิเคราะห์ .....	105
ข.12 ค่าพลังงานของตัวอย่างที่เป็นผลสำเร็จ .....	105
ค.1 วิธีการ import โครงสร้าง (1) .....	108
ค.2 วิธีการ import โครงสร้าง (2) .....	109
ค.3 วิธีการรวมโครงสร้าง (1) .....	110
ค.4 วิธีการรวมโครงสร้าง (2) .....	110
ค.5 วิธีการรวมโครงสร้าง (3) .....	111
ค.6 การหาจุด CG(1) .....	111
ค.7 การหาจุด CG(2) .....	112
ค.8 การใส่จุด Reference Point .....	113
ค.9 การสร้างพื้นตกระทบ (1) .....	114
ค.10 การสร้างพื้นตกระทบ (2) .....	114
ค.11 การสร้างพื้นตกระทบ (3) .....	115
ค.12 การสร้างพื้นตกระทบ (4) .....	115
ค.13 การสร้างคอนกรีต (1) .....	116
ค.14 การสร้างคอนกรีต (2) .....	116
ค.15 การสร้างคอนกรีต (3) .....	117
ค.16 การสร้างคอนกรีต (4) .....	117
ค.17 การสร้างคอนกรีต (5) .....	118
ค.18 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (1) .....	118
ค.19 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (2) .....	119
ค.20 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (3) .....	120

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.21 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (4).....	120
ค.22 การสร้างความหนาของชิ้นงาน (1).....	121
ค.23 การสร้างความหนาของชิ้นงาน (2).....	121
ค.24 การสร้างความหนาของชิ้นงาน (3).....	122
ค.25 การกำหนดความหนาของชิ้นงาน (1).....	122
ค.26 การกำหนดความหนาของชิ้นงาน (2).....	123
ค.27 การกำหนดความหนาของชิ้นงาน (3).....	123
ค.28 การเปลี่ยนชนิดของโครงสร้างรถ (1).....	124
ค.29 การเปลี่ยนชนิดของโครงสร้างรถ (2).....	124
ค.30 การหาค่า Moment of inertia ของโครงสร้างรถ (1).....	125
ค.31 การหาค่า Moment of inertia ของโครงสร้างรถ (2).....	125
ค.32 การกำหนดน้ำหนักกรดและค่า Moment of inertia (1).....	126
ค.33 การกำหนดน้ำหนักกรดและค่า Moment of inertia (2).....	126
ค.34 การกำหนดน้ำหนักกรดและค่า Moment of inertia (3).....	127
ค.35 การกำหนดน้ำหนักกรดและค่า Moment of inertia (4).....	127
ค.36 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (1).....	128
ค.37 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (2).....	128
ค.38 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (3).....	129
ค.39 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (4).....	129
ค.40 การ Assembly ฝั่งตกระทบและคอนกรีต (1).....	130
ค.41 การ Assembly ฝั่งตกระทบและคอนกรีต (2).....	130
ค.42 การ Assembly ฝั่งตกระทบและคอนกรีต (3).....	131
ค.43 การ Assembly ฝั่งตกระทบและคอนกรีต (4).....	131
ค.44 การกำหนด Reference Point ที่ขอบของโครงสร้าง (1).....	132
ค.45 การกำหนด Reference Point ที่ขอบของโครงสร้าง (2).....	132
ค.46 การเอียงโครงสร้างรถ (1).....	133

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.47 การเอียงโครงสร้างรถ (2) .....	133
ค.48 การเอียงโครงสร้างรถ (3) .....	134
ค.49 การเอียงโครงสร้างรถ (4) .....	134
ค.50 การสร้าง Step (1).....	135
ค.51 การสร้าง Step (2).....	135
ค.52 การสร้าง Step (3).....	136
ค.53 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (1) .....	136
ค.54 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (2) .....	137
ค.55 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (3) .....	137
ค.56 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (4) .....	138
ค.57 การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (1).....	138
ค.58 การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (1).....	139
ค.59 การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (1).....	139
ค.60 การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (4).....	140
ค.61 การสร้าง Interaction (1).....	140
ค.62 การสร้าง Interaction (2) .....	141
ค.63 การสร้าง Interaction (3) .....	141
ค.64 การสร้าง Interaction (4) .....	142
ค.65 การสร้าง Interaction (5) .....	142
ค.66 การสร้าง Interaction (6) .....	143
ค.67 การสร้าง Interaction (7) .....	143
ค.68 การสร้าง Interaction (8) .....	144
ค.69 การสร้าง Interaction (9) .....	145
ค.70 การสร้างแรงโน้มถ่วง (1) .....	145
ค.71 การสร้างแรงโน้มถ่วง (2) .....	146
ค.72 การสร้าง Boundary Condition (1).....	146

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.73 การสร้าง Boundary Condition (2).....	147
ค.74 การสร้าง Boundary Condition (3).....	147
ค.75 การสร้าง Boundary Condition (4).....	148
ค.76 การสร้าง Boundary Condition (5).....	148
ค.77 การสร้าง Boundary Condition (6).....	149
ค.78 การสร้าง Boundary Condition (7).....	149
ค.79 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ (1).....	150
ค.80 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ (2).....	150
ค.81 การกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์ (1).....	151
ค.82 การกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์ (2).....	151
ค.83 การกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์ (3).....	152
ค.84 การ Mesh (1).....	152
ค.85 การ Mesh (2).....	153
ค.86 การสร้างไฟล์เพื่อรันงาน (1).....	153
ค.87 การสร้างไฟล์เพื่อรันงาน (2).....	154
ค.88 การเปิดไฟล์งาน (1).....	154
ค.89 การเปิดไฟล์งาน (2).....	155
ค.90 การดูผลการวิเคราะห์ (1).....	155
ค.91 การดูผลการวิเคราะห์ (2).....	156
ค.92 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (1).....	156
ค.93 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (2).....	157
ค.94 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (3).....	157
ค.95 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (4).....	158
ค.96 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (5).....	158
ค.97 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (6).....	159
ค.98 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (7).....	159

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.99 การแก้ไข Part (1) .....	160
ค.100 การแก้ไข Part (2) .....	160
ค.101 การ Suppress ค่า Inertia.....	161
ค.102 การสร้างพื้นที่ปลอดภัย (1).....	162
ค.103 การสร้างพื้นที่ปลอดภัย (2).....	162
ค.104 การสร้าง Section ของ Beam (1).....	163
ค.105 การสร้าง Section ของ Beam (2).....	163
ค.106 การสร้าง Section ของ Beam (3).....	164
ค.107 การสร้าง Section ของ Beam (4).....	164
ค.108 การ Assign Section ของ Beam (1).....	165
ค.109 การ Assign Section ของ Beam (2).....	165
ค.110 การ Assign Section ของ Beam (3).....	166
ค.111 การ Assembly Beam .....	166
ค.112 การสร้างผิวสัมผัสระหว่าง Beam กับ โครงสร้าง .....	167
ค.113 ลักษณะการเอียงรถของการวิเคราะห์ช่วงกระทบพื้น .....	167
ค.114 การแก้ไข Interaction ระหว่างพื้นกับ โครงสร้างรถ .....	168
ค.115 การ Suppress Constraint ในส่วนที่เป็น MPC.....	168
ค.116 การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (1) .....	169
ค.117 การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (2) .....	169
ค.118 การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (3) .....	170
ค.119 การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (4) .....	170
ค.120 การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (5) .....	171
ค.121 การแก้ไข Time Period.....	171
ค.122 การ Suppress boundary condition.....	172
ค.123 การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (1) .....	172
ค.124 การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (2) .....	173

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.125 การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (3) .....	173
ค.126 การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (4) .....	174
ค.127 การ Mesh โครงสร้างทั้งหมด .....	174
ค.128 การตั้งชื่อไฟล์ .....	175
ค.129 การเปิดไฟล์งาน (1) .....	175
ค.130 การเปิดไฟล์งาน (2) .....	176



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\phi$	=	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า
$\Omega$	=	ขอบเขตภายใน
$\Gamma$	=	ขอบเขตภายนอก
$\alpha$	=	ค่าคงตัว
$N$	=	ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์
%	=	Percent
°C	=	Degree Celsius
$\Delta$	=	Delta
Pa	=	Pascal
MPa	=	Mega Pascal
GPa	=	Giga Pascal
lb	=	pound
in	=	inch
Kg	=	Kilogram
N	=	Newton
mm	=	Millimeter
m	=	Meter
s	=	Second
FEM	=	Finite Element Method
UNECE	=	United Nations Economic Commission for Europe
ECE	=	Economic Commission for Europe
CG	=	Center of Gravity
RP	=	Reference Point
ER	=	Reference Energy

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตรถโดยสารในประเทศไทยได้มีการดำเนินการต่อตัวถังขึ้นในประเทศเป็นระยะเวลายาวนานมาระยะหนึ่งแล้ว โดยกระบวนการผลิตจะเป็นการนำโครงสร้างหลักเข้ามาจากต่างประเทศ ทั้งในลักษณะของใหม่และแบบที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว จากนั้นจะนำมาประกอบเป็นตัวถังอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งรถเหล่านี้จะได้รับการจดทะเบียนเป็นรถใหม่ อย่างไรก็ตามปัจจุบันนี้ในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศจีน ได้มีการนำรถโดยสารขนาดใหญ่เข้ามาจำหน่ายในประเทศไทยและประเทศใกล้เคียงในราคาถูกเมื่อเทียบกับการผลิตในประเทศ ทั้งนี้เนื่องจากจีนได้ผลิตขึ้นส่วนทุกชิ้นในประเทศ ต่างจากประเทศไทยที่มีการนำเข้าชิ้นส่วนต่าง ๆ จากต่างประเทศ ดังนั้นหากจะพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศ ทั้งการปกป้องตลาดในประเทศ และการขยายตลาดออกสู่ต่างประเทศ เราจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้เทคโนโลยีการผลิตสมัยใหม่และความรู้ด้านวิศวกรรม ซึ่งหลายปีที่ผ่านมาแล้วยังพึ่งพาความรู้ทางด้านวิศวกรรมน้อยกว่าการพึ่งพาประสบการณ์ของช่างที่ชำนาญงาน

การสร้างตัวถังรถโดยสารเป็นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตได้ แต่การจะสร้างตัวถังรถได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยการออกแบบและการคำนวณทางวิศวกรรมที่แม่นยำ ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตและการประกอบอีกด้วย ทางคณะผู้วิจัยได้เล็งเห็นว่าการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่จะสามารถเข้ามาช่วยในการผลิตเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตรถโดยสาร ซึ่งมีความปลอดภัยและเป็นไปตามมาตรฐานสากลของรถโดยสารขนาดใหญ่อีกด้วย

เนื่องจากการสร้างรถโดยสารขนาดใหญ่มีผลกระทบต่อชีวิตผู้โดยสารจำนวนมาก ดังนั้นในขณะนี้ภาครัฐได้เข้ามามีบทบาทในการกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยของรถโดยสารมากขึ้น โดยเน้นความแข็งแรงของโครงสร้างในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุขึ้น การยุบตัวของโครงสร้างจะต้องอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้ผู้โดยสารได้รับอันตราย อย่างไรก็ตามการที่จะทำการทดสอบรถที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว ยังถือว่าเป็นต้นทุนที่สูงสำหรับผู้ประกอบการในประเทศไทย ดังนั้นภาครัฐจึงได้มีความคิดที่จะกำหนดให้ทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างและตัวถังรถยนต์ โดยการคำนวณจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการแก้ปัญหา ซึ่งแม้ว่าจะไม่ถูกต้องสมบูรณ์เหมือนกับการทดสอบรถด้วยอุบัติเหตุจริง แต่ก็ยังสามารถให้ข้อมูลและเพิ่มมาตรฐานความปลอดภัยได้ระดับหนึ่งโดยมีค่าใช้จ่ายไม่มากนัก



การที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีตั้งอยู่ในเขตพื้นที่ของจังหวัดนครราชสีมา ซึ่งเป็นจังหวัดหนึ่งที่มีการสร้างตัวถังของรถโดยสารอยู่หลายราย ดังนั้นการทำวิจัยร่วมกับผู้ประกอบการในเขตจังหวัดนครราชสีมาจึงถือเป็นภารกิจหนึ่งของมหาวิทยาลัย ผู้วิจัยจึงได้ร่วมกับบริษัทผู้ผลิตชุดอุตสาหกรรมจำกัด ที่จะทำการออกแบบและวิเคราะห์ตัวถังของรถโดยสารขนาดใหญ่ โดยจะพิจารณาในกรณีความเสียหายที่เกิดจากการพลิกคว่ำของรถโดยสาร โดยเลือกที่จะใช้รถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง รุ่น CG 280 เป็นตัวอย่างและทดสอบตามมาตรฐานของยุโรป

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้ ผู้วิจัยหวังว่าจะช่วยให้การผลิตรถโดยสารในประเทศมีมาตรฐานและความปลอดภัยสูงขึ้น ช่วยผู้ประกอบการในการแข่งขันกับต่างประเทศและสร้างความปลอดภัยในการเดินทางโดยรถโดยสารขนาดใหญ่ให้กับคนไทยด้วย

## 1.2 การวิจัย

งานวิจัยในการออกแบบและทดสอบรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง รุ่น CG 280 นี้มีวัตถุประสงค์หลัก ๆ ในการวิจัย ดังต่อไปนี้

1.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง รุ่น CG 280 โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ผล

1.2.2 สามารถออกแบบโครงสร้างรถทั้งคันให้ได้มาตรฐานความปลอดภัยทั้งในกรณีภาวะกรรมสถิตย์และการพลิกคว่ำตามที่กรมการขนส่งและมาตรฐานยุโรปกำหนด

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้จะกำหนดขอบเขตการวิจัยเพื่อสามารถกำหนดเป้าหมายและวิธีการในการแก้ปัญหาได้อย่างเป็นระบบ ขอบเขตของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย

1.3.1 วิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างรถโดยสารที่เกิดจากการพลิกคว่ำโดยโครงสร้างรถโดยสารที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง รุ่น CG 280

1.3.2 การวิเคราะห์การพลิกคว่ำ จะสร้างเฉพาะส่วนของตัวถัง ตั้งแต่ระดับพื้นขึ้นมา ไม่รวมโครงสร้างหลัก (Chassis) ของรถโดยสาร

1.3.3 การวิเคราะห์อ้างอิงตามมาตรฐานของยุโรป

1.3.4 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ABAQUS 6.12 สร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างรถ

#### 1.4 สถานที่ทำงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ บริษัทอู่เซคชัยอุตสาหกรรม จำกัด

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

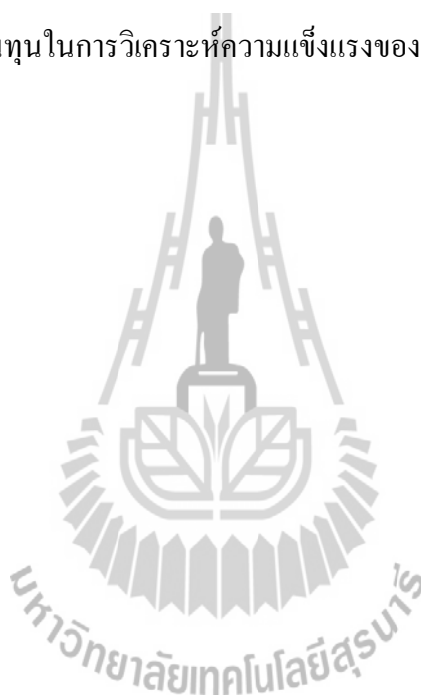
ประโยชน์ที่ทางผู้วิจัยและทางบริษัทคาดว่าจะได้จากงานวิจัยนี้ มีสิ่งที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.5.1 สามารถลดการนำเข้าชิ้นส่วน โครงสร้างรถโดยสารจากต่างประเทศ

1.5.2 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตรถโดยสารให้มีความปลอดภัยตามมาตรฐานของ

กรมการขนส่ง

1.5.3 เพื่อลดต้นทุนในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง



## บทที่ 2

### ปริทรรศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ปริทรรศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการคำนวณที่ค่อนข้างใหม่ ซึ่งการพัฒนาเริ่มมาจากแรงผลักดันของงานวิจัยทางด้านอวกาศและการบิน ทั้งนี้เพราะว่ารูปร่างชิ้นงานต่าง ๆ ของงานทางด้านนี้ค่อนข้างที่จะสลับซับซ้อน ทำให้การคำนวณออกแบบเป็นไปด้วยความยากลำบาก ความสามารถของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์หลังจากที่ได้ประยุกต์ขึ้นเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้พิสูจน์ให้เห็นเด่นชัดในการออกแบบชิ้นงานและโครงสร้างที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในปัจจุบันนี้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ได้เริ่มนำมาประยุกต์กับงานทางด้านอื่น ๆ โดยมีจุดประสงค์หลักคือ เพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ปกติจำเป็นต้องใช้ไปในการทดลองหรือเพื่อใช้กับงานที่ไม่สามารถทำการทดลองอย่างสมบูรณ์ได้ เช่น การคำนวณสถานะของอากาศผ่านลำตัวรถยนต์ เครื่องบินและกระสวยอวกาศ การคำนวณอุณหภูมิบนเครื่องยนต์ของรถยนต์ เครื่องบินและสถานีอวกาศ เป็นต้น จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถแก้ปัญหาต่าง ๆ ดังกล่าว ทำให้วิธีการนี้เริ่มเป็นที่ยอมรับในหมู่วิศวกรนักออกแบบทั่วไป อย่างไรก็ตามการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างเพียงพอ

Yu-Cheng Lin and Hong-Chi Nian (2006) ทำการวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างของส่วนตัวถังรถโดยสาร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้กล่าวไว้ว่า จุดศูนย์กลางของรถบัสมักจะอยู่สูงกว่ายานพาหนะชนิดอื่น เมื่อเกิดอุบัติเหตุการพลิกคว่ำเนื่องจากความจุของผู้โดยสารจะเกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ความแข็งแรงของโครงสร้างจึงเป็นสิ่งแรกที่ต้องพิจารณา ผู้วิจัยได้ทำเปรียบเทียบระหว่างการเสีรูปที่ได้จากการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และออกแบบโครงสร้างบางส่วนใหม่ที่อาจทำให้เกิดความเสียหายมาก โดยการออกแบบใหม่นี้ทำให้การเสีรูปลดลงถึง 50%

Abdullah et al. (2011) ได้ทำการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์แบบไดนามิกของปีกนกรถยนต์ โดยใช้การทดสอบและเทคนิคเชิงตัวเลข การวิจัยนี้ได้ดำเนินการตรวจสอบคุณลักษณะแบบไดนามิกและการทดลองเชิงตัวเลขของปีกนกโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบความถี่จากการสั่นสะเทือนของปีกนกและดำเนินการเพิ่มประสิทธิภาพต่อไป การศึกษานี้ได้เน้นความจำเป็นสำหรับงานทดลองเพื่อตรวจสอบการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งส่วนที่สำคัญที่สุดของการวิเคราะห์ความถี่จากการสั่นสะเทือนคือการคำนวณฟังก์ชันการถ่ายโอน

Lapo, et al. (2011) ได้ทำการวิจัยเรื่องการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างหลักของรถโดยสารประเภทสองชั้น โดยงานวิจัยนี้ได้มุ่งศึกษาความแข็งแรงทางกลของโครงสร้างหลักรถโดยสาร ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์การเสถียรภาพ ความเค้นและความเครียดด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการวิเคราะห์จะพบว่ามียางจุดที่อาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายมากเกินไป จึงได้มีการออกแบบและปรับเปลี่ยน โครงสร้างบางจุดใหม่ เพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัยตามที่กฎหมายกำหนดและสามารถให้บริการต่อสาธารณะได้

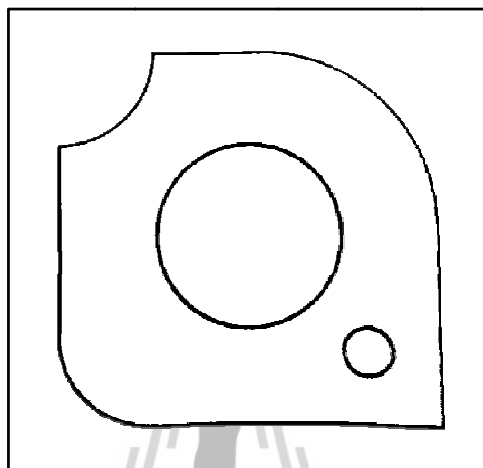
## 2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ความสามารถในการแก้ปัญหาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์มีส่วนอย่างมากในการสร้างเสริมปรับปรุงความเป็นอยู่ของมนุษย์ให้ดียิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นรอบตัวสามารถอธิบายได้โดยกฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์และทำการประดิษฐ์ขึ้นในลักษณะของสมการต่าง ๆ ซึ่งอาจจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equations) หรือในรูปแบบของสมการอินทิกรัล (Integral Equations) เป็นต้น ยกตัวอย่างเช่น การคำนวณหาการกระจายอุณหภูมิในเครื่องยนต์ของรถยนต์อาจเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะภาพความสมดุลของการถ่ายเทความร้อน การคำนวณออกแบบ โครงสร้างปีกเครื่องบินอาจเริ่มมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะภาพความสมดุลของโครงสร้างนั้นภายใต้แรงกดดันของอากาศในขณะที่บิน รวมไปถึงการทำนายทิศทางและความเร็วของกระแสลมจากพายุใต้ฝุ่นเพื่อออกข่าวเตือนประชาชนให้อพยพออกจากพื้นที่ที่ใต้ฝุ่นจะเคลื่อนตัวไปถึง ก็อาจเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายสถานะภาพความสมดุลของการไหล เป็นต้น

สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาต่าง ๆ นั้น ปกติจะประดิษฐ์ขึ้นได้โดยไม่ยาก แต่ผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ที่ต้องการและจำเป็นต้องประดิษฐ์ขึ้นโดยระเบียบวิธีวิเคราะห์ (Analytical Method) นั้นทำได้ยากมากหรืออาจจะหาไม่ได้เลยก็ได้ เหตุผลดังกล่าวก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate Solution) ขึ้น ระเบียบวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนี้มีหลาย ๆ แบบ วิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

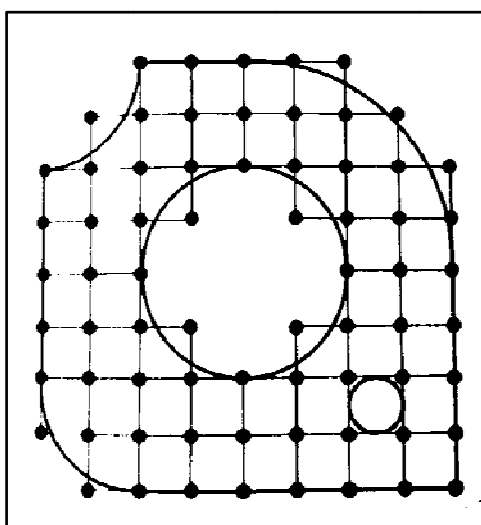
หลักการที่สำคัญของระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ โดยเริ่มจากการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบของระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยม (System of Difference Equations) ที่ประกอบด้วยการทำวอก ลบ คูณและหาร ข้อดีของระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมคือ เป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงความสะดวกในการประดิษฐ์ขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณ ส่วนข้อเสียของการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนี้ก็มีหลายประการ เช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

(Application of Boundary Conditions) และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์ระเบียบวิธีนี้เข้าวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อน ซึ่งการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนมากยิ่งขึ้นได้กลายเป็นความจำเป็นเพื่อการพัฒนาปรับปรุงคุณภาพผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ในปัจจุบัน



รูปที่ 2.1 แผ่นอะลูมิเนียมที่ประกอบด้วยขอบโค้งและขอบตรงรวมทั้งรูกลมสองขนาดภายใน

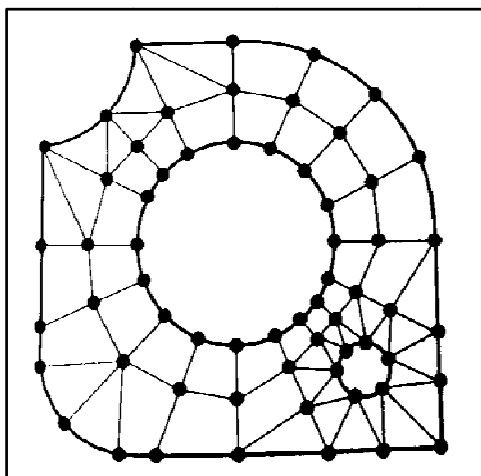
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะแผ่นโลหะอะลูมิเนียมรูปแบบหนึ่งที่ใช้เสริมความแข็งแรงของโครงสร้างภายในปีกเครื่องบิน แผ่นโลหะนี้ประกอบด้วยขอบรอบนอกที่ประกอบด้วยขอบตรงและขอบโค้งโดยภายในมีรูกลมสองขนาดในตำแหน่งต่างกัน การวิเคราะห์การกระจายของความเค้น (Stress Distribution) บนแผ่นอะลูมิเนียมนี้ภายใต้แรงกระทำที่กำหนดให้ด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method) เริ่มจากการแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยมดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.2 โดยตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้ต่อกันที่จุดต่อ (Grid Points) ตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ ซึ่งขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวไม่รู้ค่า (Number of Unknowns) จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนี้เอง



รูปที่ 2.2 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า ตารางสี่เหลี่ยมที่ใช้ในระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมไม่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงของแผ่นอะลูมิเนียมดังกล่าวได้อย่างเที่ยงตรง หากสร้างตารางสี่เหลี่ยมให้มีขนาดเล็กลงซึ่งหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้นก็จะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกัน จำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสี่เหลี่ยมมากขึ้นตามไปด้วย อีกทั้งกระบวนการแก้ปัญหาจำเป็นต้องใช้หน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้น รวมถึงเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็จะสูงมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

อุปสรรคและความไม่สะดวกดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดระเบียบวิธีหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งซึ่งเรียกว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งนิยมเรียกด้วยคำย่อกันว่า FEM ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้เป็นอย่างดี สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงเที่ยงตรงกว่า หลักการของระเบียบวิธีนี้ในขั้นต้นก็คล้ายกับระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม กล่าวคือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้น ๆ ที่เรียกว่าเอลิเมนต์ เช่น ในตัวอย่างอะลูมิเนียมเดิมนี้สามารถแบ่งแผ่นอะลูมิเนียมออกเป็นชิ้นของเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างกัน ในรูปแบบของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การวิเคราะห์หาผลเฉลยบนแผ่นอะลูมิเนียมด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ข้อดีอย่างแรกที่เราเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปที่ 2.3 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมในรูปที่ 2.2 ก็คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วยเอลิเมนต์ขนาดต่างกันที่สามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของแผ่นอะลูมิเนียมได้ดีกว่า ซึ่งหมายความว่าปัญหานี้จะถูกแก้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ที่มีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงมากกว่า ดังนั้นค่าผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณออกมาได้จึงควรมีค่าความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงขึ้น

วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า เช่น ความดัน ความเร็ว อุณหภูมิ เป็นต้น โดยทำการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ ที่เรียกว่า เอลิเมนต์ (Element) และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันที่จุดต่อเรียกว่า Nodes ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เราต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณนั่นเอง วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และกำลังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งวิธีนี้สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้างของเครื่องบิน โครงสร้างของอาคารและโครงสร้างอื่น ๆ นอกจากนั้นยังใช้คำนวณการกระจายความร้อน การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง ดังนั้นการคำนวณที่ซับซ้อนเหล่านี้สามารถเริ่มต้นด้วยสมการเชิงอนุพันธ์อธิบายสถานะต่าง ๆ และสภาพปัญหา

ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่ว ๆ ไปที่ไม่ซับซ้อน เราสามารถหาสมการความสัมพันธ์ที่ต้องการได้ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และได้ผลเฉลยที่แม่นยำ แต่ถ้านั้นมีรูปร่างที่ซับซ้อนพื้นที่หน้าตัดไม่

เท่ากัน ไม่สามารถหาผลเฉลยที่แม่นยำได้ ดังนั้นจึงเกิดวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นมา ซึ่งวิธีนี้สามารถจะประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต ชิ้นส่วนจะถูกแบ่งเป็นส่วนย่อยอย่าง ต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน ทำให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนี้ขึ้น ซึ่งก็มีหลายวิธีการ แต่วิธีที่นิยมอย่างมากในอดีต คือ วิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Method)

หลักการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณเริ่มจากการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยม ข้อดีของวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายต่อการเข้าใจรวมไปถึงสะดวกในการเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณหาผลเฉลย แต่ก็มีข้อเสียคือไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตความยากลำบากในการประยุกต์ใช้ในปัญหาที่ซับซ้อน

### 2.2.1 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการวิเคราะห์ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นมักประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ ผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาได้ จะประกอบด้วยค่าของตัวแปรตามตำแหน่งต่าง ๆ กันบนรูปร่างลักษณะของปัญหานั้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ผลเฉลยแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ ทั้งหมดนับเป็นจำนวนอนันต์ค่า แทนที่จะทำการหาผลเฉลยแม่นยำที่ประกอบด้วยค่าต่าง ๆ จำนวนมากมายเช่นนี้ซึ่งสำหรับปัญหาในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปได้ หลักการก็คือทำการลดค่าทั้งหมดที่มีจำนวนอนันต์ค่านั้นมาเป็นค่าโดยประมาณในจำนวนที่นับได้ (Finite) ด้วยการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ (Elements) ซึ่งมีขนาดต่าง ๆ กัน

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ยังบ่งชี้เป็นนัยว่า ผลเฉลยของแต่ละเอลิเมนต์นั้น จำเป็นต้องสอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้สำหรับปัญหานั้น ๆ ซึ่งหมายความว่า หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องเริ่มต้นจากการพิจารณาเอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ โดยทำการสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่พิจารณาอยู่นั้น จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นได้มาประกอบกันเข้าก่อให้เกิดระบบสมการรวม ซึ่งในความหมายทางกายภาพก็คล้ายกับการนำทุกเอลิเมนต์มาประกอบรวมเข้าด้วยกันก่อให้เกิดเป็นรูปร่างลักษณะทั้งหมดของปัญหาที่แท้จริง แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมาให้ลงไปในระบบสมการรวมนี้ก่อนทำการแก้ทั้งระบบสมการดังกล่าว เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณที่ต้องการตามตำแหน่งต่าง ๆ ของปัญหานั้น

ความแม่นยำของผลเฉลยโดยประมาณที่คำนวณได้นั้นขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา นอกจากนี้ความแม่นยำของผลเฉลยยังขึ้นอยู่กับการสมมุติรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน (Interpolation Functions) ที่ใช้สำหรับแต่ละเอลิเมนต์ กล่าวคือฟังก์ชันการประมาณภายในที่ใช้มีความใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำของปัญหานั้นมากน้อยเพียงใด ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์อาจสมมุติให้

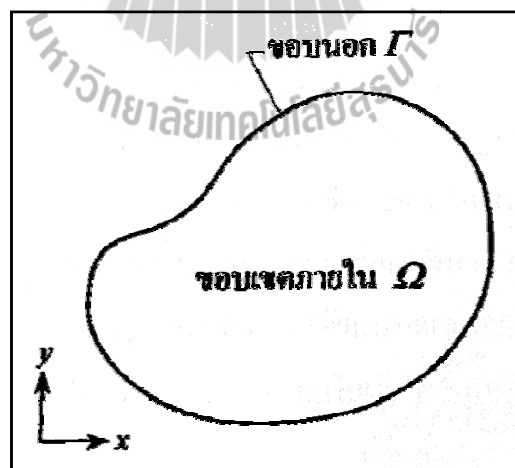


อยู่ในหลายรูปแบบ อาทิเช่น รูปแบบของการกระจายเชิงเส้น (Linear Distribution) เป็นต้น ส่วนขนาด (Magnitude) ของฟังก์ชันการประมาณภายในนั้นขึ้นอยู่กับค่าที่จุดต่อ (Nodes) ของเอลิเมนต์ ยกตัวอย่างเช่น หากค่าอุณหภูมิของจุดต่อที่อยู่ปลายมุมทั้งสามของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม มีค่าเท่ากับ 30, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และหากเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้ใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบของลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นตรงแล้ว อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนี้จะแปรผันเป็นรูปเชิงเส้นตรงคล้ายแผ่นเรียบ โดยมีการกระจายของอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 50 องศาเซลเซียส เป็นต้น

### 2.2.2 ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

แนวทางที่จะทำให้เกิดความเข้าใจในลำดับขั้นตอนของการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณโดยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการใช้ตัวอย่าง มีหลายปัญหาในงานวิศวกรรมซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์นั้นอยู่ในรูปแบบของสมการลาปลาซ (Laplace's Equation) อาทิเช่น สมการความสมดุลของของแข็ง สมการความสมดุลของการถ่ายเทความร้อน รวมไปถึงสมการความสมดุลของการไหลบางชนิด สมการลาปลาซสำหรับปัญหาใน 2 มิติบนระนาบ x-y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั่วไปได้ คือ

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2.1)$$



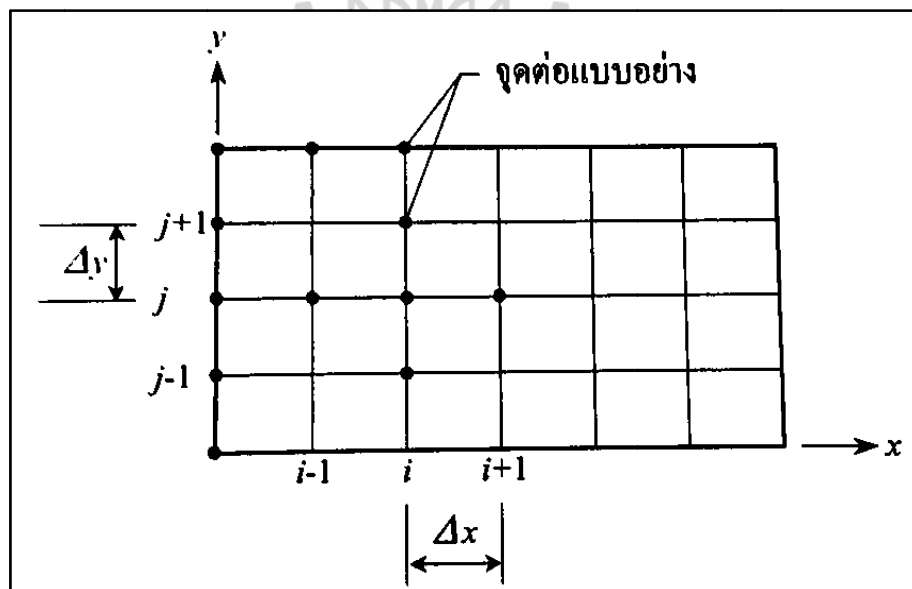
รูปที่ 2.4 รูปร่างลักษณะทั่วไปและขอบเขตของปัญหาที่กำหนดมาให้

โดย 
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (2.2)$$

แทนสัญลักษณ์ของตัวดำเนินการ (operator notation);  $\phi = \phi(x, y)$  เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ซึ่งต้องการหาภายในขอบเขตของ  $\Omega$  (เช่น  $\phi$  อาจแทนการกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง  $x, y$  ใด ๆ) และ  $\phi = f(x, y)$  ตลอดขอบนอก  $\Gamma$  (เช่น  $\phi$  ตลอดขอบนอกอาจเป็นอุณหภูมิที่กำหนดมาให้เท่ากับ  $30^\circ\text{C}$ ) จุดประสงค์ของการวิเคราะห์ปัญหานี้ก็คือ ต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ  $\phi(x, y)$  ภายในขอบเขต  $\Omega$  ด้วยการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

ขั้นตอนการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหา เช่นนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. ทำการสร้างตารางสี่เหลี่ยมลงในรูปร่างลักษณะของปัญหาที่กำหนดมาให้ สมมติว่ารูปร่างลักษณะของปัญหาเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งอยู่ในระนาบ  $x-y$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ทั้งหมดที่สร้างขึ้นมานี้ มีขนาด  $\Delta x$  และ  $\Delta y$  ในทางแกน  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ และต่อกันที่จุดต่อ (Grid Points) ตามตำแหน่งต่าง ๆ กัน เช่น จุดต่อ ณ ตำแหน่ง  $i, j$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นี้ไปถึงจุดต่อที่  $x = i$  และ  $y = j$  เป็นต้น และที่จุดต่อเหล่านี้เองเป็นตำแหน่งที่เราจะหาค่าของผลเฉลยโดยประมาณ นั่นคือเป็นตำแหน่งของตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) เช่น สมมติว่าเรากำลังแก้ปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อเหล่านี้ก็คือ ค่าของอุณหภูมิที่ต้องการ เป็นต้น

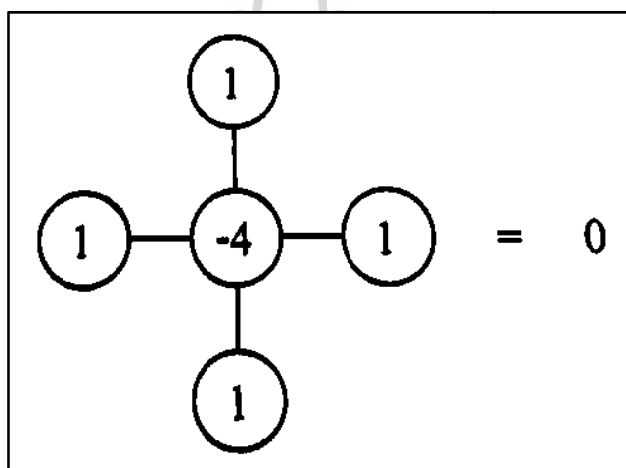


รูปที่ 2.5 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นตารางสี่เหลี่ยมเพื่อใช้กับระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

1. ทำการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อต่าง ๆ ในที่นี้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยคือสมการลาปลาซ

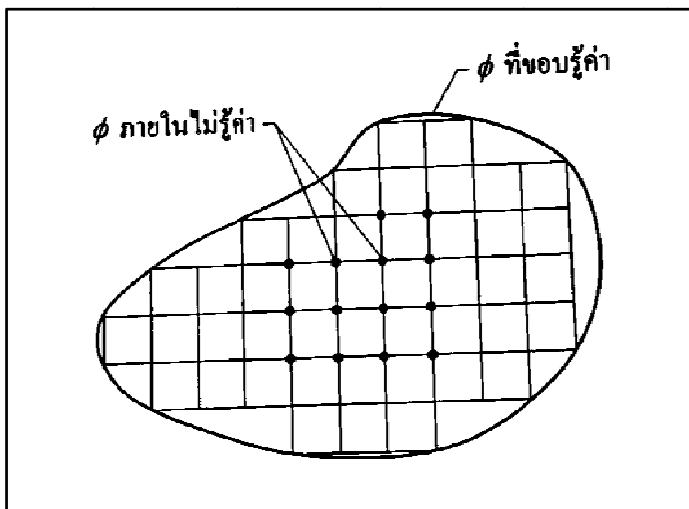
$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \tag{2.3}$$

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของตัวไม่รู้ค่าที่จุดต่อได้ด้วยการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) เช่น ค่าอนุกรมที่จุดต่อ  $i+1$  สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของอนุกรมที่จุดต่อ  $i$  ได้ จากการแทนค่าโดยประมาณซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของแผนภาพสมการ (Stencil Form) เพื่อสะดวกในการประยุกต์ใช้ได้ ดังนี้



รูปที่ 2.6 แผนภาพสมการ

ในการแก้ปัญหาที่กำหนดมาให้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ เราจะประยุกต์รูปแบบของแผนภาพสมการนี้ลงในทุก ๆ จุดต่อที่อยู่ภายในขอบเขตของปัญหา ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การประยุกต์ใช้รูปแบบของแผนภาพสมการลงบนทุกจุดต่อภายในขอบเขตของปัญหา

3. ทำการประยุกต์รูปแบบของแผนภาพสมการลงในทุก ๆ จุดต่อที่อยู่ในขอบเขตภายในของปัญหานั้น ก่อให้เกิดระบบของสมการรวม (A Set of Simultaneous Equations) ขึ้น โดยมีตัวที่ไม่รู้ค่า เช่น  $\phi_i, \phi_{i+1}$  ตามจุดต่อต่าง ๆ ภายในขอบเขตของปัญหานั้น
4. ทำการแก้ระบบของสมการที่เกิดขึ้นมานั้นเพื่อหาค่าโดยประมาณของตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) ตามจุดต่อต่าง ๆ

**2.2.3 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์สองมิติ**

1. เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม

เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมเป็นเอลิเมนต์ที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยมจำนวนมากสามารถสร้างขึ้นมาได้ง่ายโดยอัตโนมัติ เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วยสามจุดต่อและได้ทำการสร้างฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมนั้น โดยเริ่มจากการสมมุติลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในลักษณะของแผ่นเรียบ (Flat Plane) นั่นคือ

$$\phi(x,y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \tag{2.4}$$

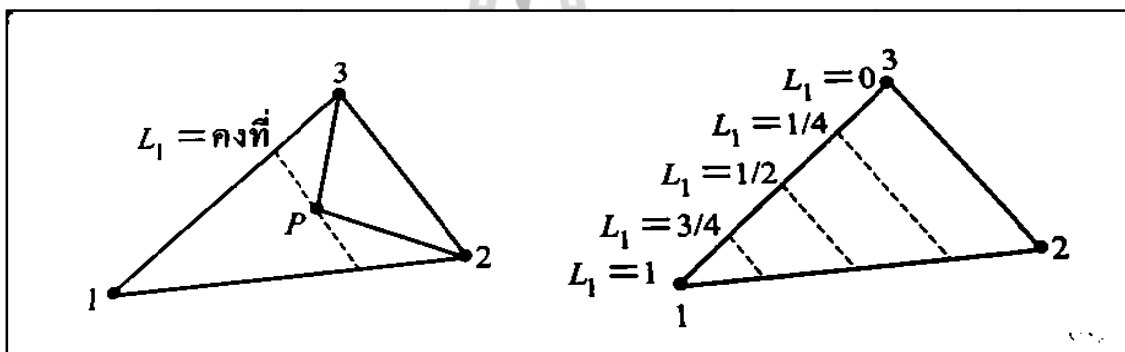
โดย  $\alpha_i, i=1,2,3$  เป็นค่าคงตัวที่หาได้จากเงื่อนไขของค่าที่ตำแหน่งจุดต่อทั้งสาม จากนั้นเราสามารถเขียนลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปแบบของค่าที่จุดต่อ  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  ได้คือ

$$\phi = N_1\phi_1 + N_2\phi_2 + N_3\phi_3 \tag{2.5}$$

โดย  $N_i, i=1,2,3$  แทนฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ซึ่งอยู่ในรูปแบบของพิกัด  $x, y$  และต่างมีลักษณะการกระจายในรูปแบบของแผ่นเรียบเช่นเดียวกับเอลิเมนต์ในหนึ่งมิติ การกระจายของผลเฉลยโดยประมาณของเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดธรรมชาติได้คือ

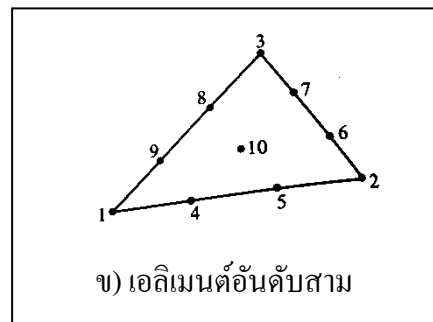
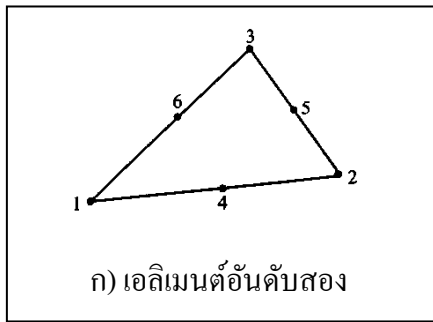
$$\phi = L_1\phi_1 + L_2\phi_2 + L_3\phi_3 \tag{2.6}$$

โดย  $L_i, i=1,2,3$  และสามารถอธิบายได้จากการพิจารณารูปที่ 2.8



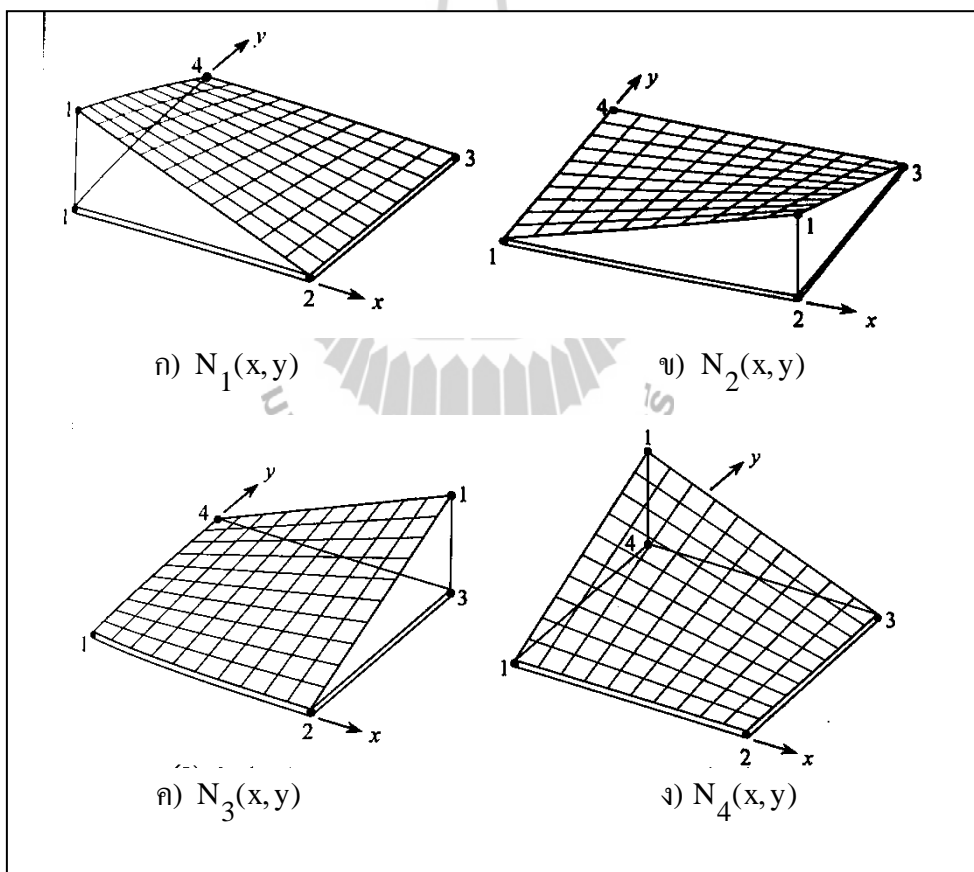
รูปที่ 2.8 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยม

เอลิเมนต์รูปสามเหลี่ยมอาจประกอบด้วยจุดต่อมากกว่าสามจุดต่อ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งประกอบด้วยเอลิเมนต์อันดับสอง (Quadratic) และอันดับสาม (Cubic)

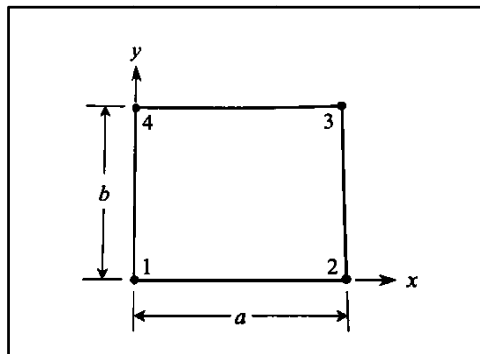


รูปที่ 2.9 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมอันดับสูงที่ประกอบด้วยหลายจุดต่อ

2. เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยม

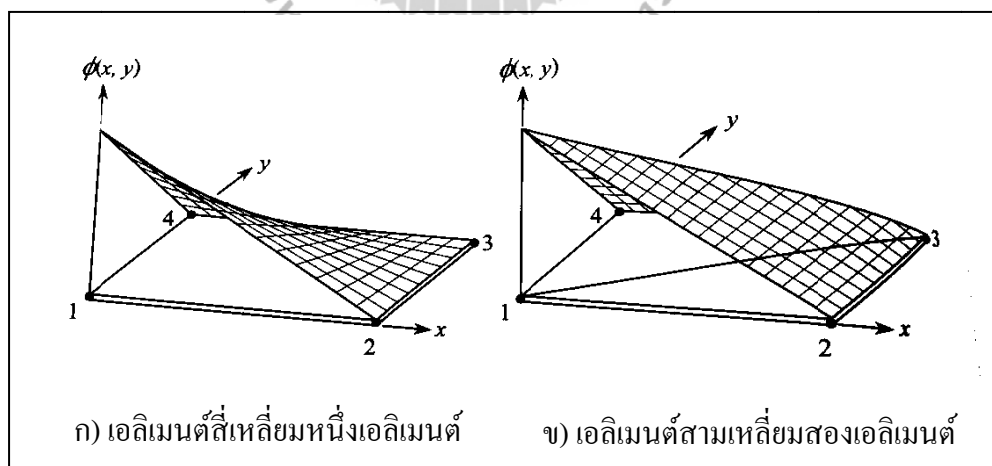


รูปที่ 2.10 ลักษณะการกระจายของฟังก์ชันการประมาณภายในของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสี่จุดต่อ



รูปที่ 2.11 เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสี่จุดต่อ

ฟังก์ชันการประมาณภายในต่าง ๆ ในรูปที่ 2.10 มีลักษณะการกระจายที่เรียกว่าเชิงเส้นคู่ (Bilinear) กล่าวคือ แปรผันเชิงเส้นตรงทั้งในแนวแกน  $x$  และ  $y$  แต่ไม่ใช่เป็นแผ่นเรียบ (Flat Plane) ตลอดทั้งแผ่น รูปที่ 2.10 ก) แสดงลักษณะของการกระจายซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าเป็นผิวโค้ง ในขณะที่รูปที่ 2.10 ข) แสดงการกระจายโดยใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมจำนวน 2 เอลิเมนต์ ซึ่งแต่ละเอลิเมนต์ให้การกระจายแบบแผ่นเรียบ สาเหตุเช่นนี้เองทำให้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมเป็นที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ห้มากกว่าเอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยม เพราะสามารถให้ลักษณะการกระจายได้โค้งมนที่ซับซ้อนกว่า ทั้ง ๆ ที่ใช้จำนวนจุดต่อเท่ากัน ซึ่งมีจำนวนสมการหรือตัวไม่รู้ค่าที่เท่ากัน

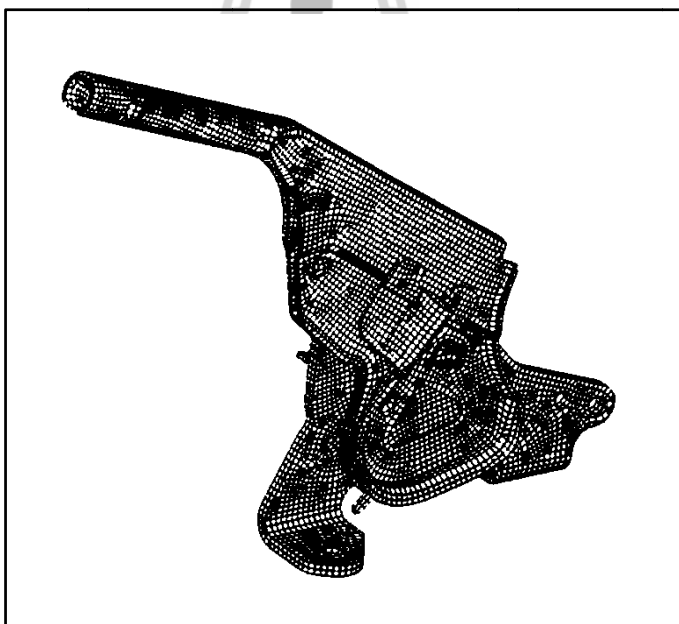


รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบลักษณะการกระจายที่เกิดขึ้นจากการใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมเมื่อมีจำนวนจุดต่อเท่ากัน

เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบสี่จุดตอนนี้ นำไปสู่ฟังก์ชันการประมาณภายในที่อยู่ในรูปแบบสั้น ๆ ทำให้ไฟไนต์เอลิเมนต์เมทริกซ์ต่าง ๆ สามารถประดิษฐ์ขึ้นได้โดยง่ายเช่นกัน อย่างไรก็ตามรูปร่างของปัญหาโดยทั่วไปในทางปฏิบัติ มักประกอบด้วยส่วนเว้าและส่วนโค้ง ทำให้การจำลองรูปแบบโดยใช้เอลิเมนต์รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้านี้ไม่สามารถแทนรูปแบบที่แท้จริงได้อย่างถูกต้องนัก

#### 2.2.4 การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เนื่องจากรูปแบบผลิตภัณฑ์งานทางวิศวกรรมทั่วไปมักมีรูปร่างซับซ้อน ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน เช่น ปัญหาการยืดหยุ่นของของแข็ง การถ่ายเทความร้อนในวัตถุ ตลอดจนการไหลของของไหล การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กันไปกับวิวัฒนาการและประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวกและในขณะเดียวกันช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เคยต้องใช้ไปในการทดลอง



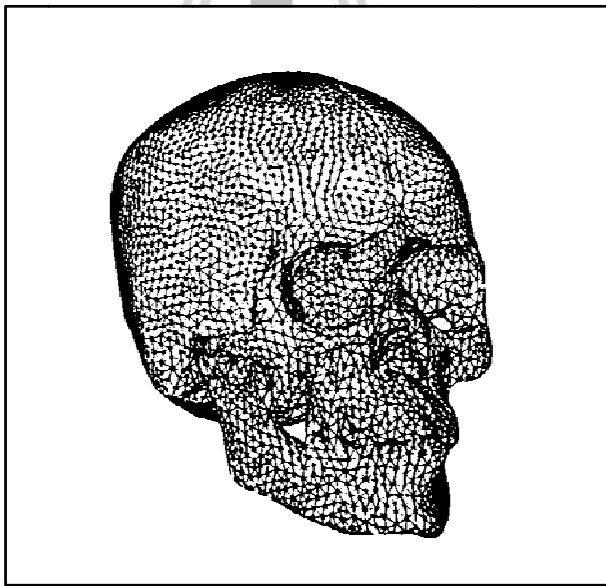
รูปที่ 2.13 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับก้านเบรคมือรถยนต์

การวิเคราะห์ปัญหาคำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในยุคแรก เริ่มจากงานทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง (Solid Mechanics) และโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในงานทางด้านนี้สามารถทำความเข้าใจได้โดยไม่ยากนัก วิวัฒนาการของระเบียบวิธีไฟ



ไฟไนต์เอลิเมนต์ทางด้านของแข็งในปัจจุบันนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน เช่น ก้านเบรกมือของรถยนต์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 เพื่อคำนวณหาการเสียรูปความเครียด และความเค้นที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ ในขณะที่ใช้งาน รูปภาพแสดงถึงการใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์จำนวนมาก ที่มีขนาดต่าง ๆ กันประกอบกันขึ้นเพื่อให้สามารถจำลองรูปแบบของก้านเบรกมือได้อย่างเที่ยงตรง

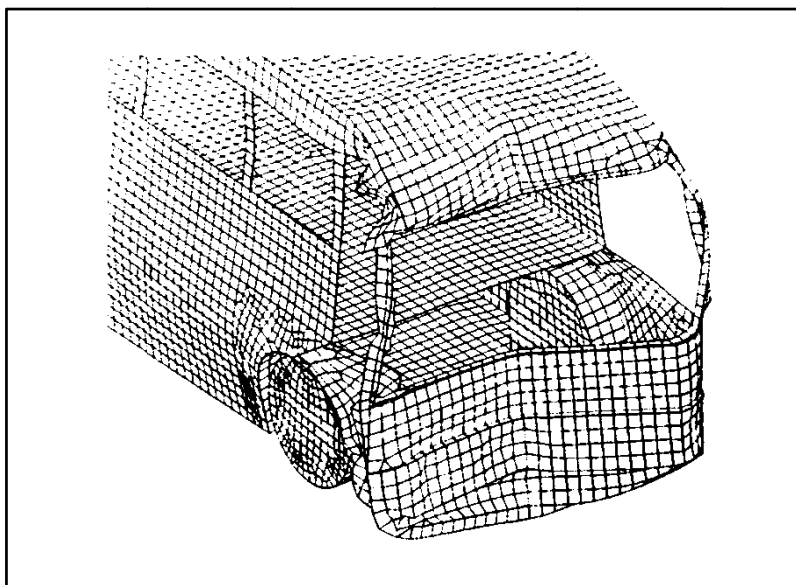
เนื่องจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ขยายวงกว้างออกไปในงานที่นอกเหนือไปจากงานทางด้านวิศวกรรม เช่น นำไปประยุกต์ใช้ในงานทางการแพทย์ รูปที่ 2.14 แสดงรูปแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้ในการกระจายของความเค้นของกะโหลกศีรษะหากถูกแรงกระแทก นอกเหนือจากนั้นระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางการแพทย์ในรูปแบบอื่น ๆ อาทิเช่น การคำนวณหาลักษณะการไหลของเลือดในเส้นเลือดและภายในหัวใจ รวมทั้งความดันที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ ในเส้นเลือดในขณะการสูบฉีดของหัวใจ เป็นต้น



รูปที่ 2.14 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกะโหลกศีรษะ

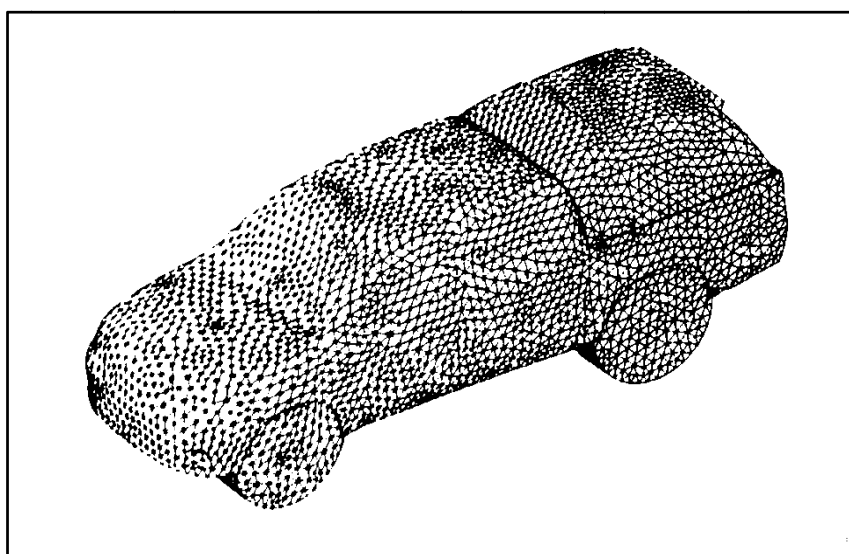
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์และออกแบบยานพาหนะเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นที่จะก่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุด ในขณะที่เดียวกันก็ช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เคยต้องใช้ไปในการทดลอง รูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และการยุบตัวของโครงสร้างรถบัสในขณะเกิดการชนขึ้นทางซีกหนึ่งตอนด้านหน้า การออกแบบโครงสร้าง

เพื่อให้มีน้ำหนักเบาแต่จำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยนั้นเป็นสิ่งสำคัญที่วิศวกรผู้ออกแบบต้องตระหนัก การออกแบบด้วยการทดลองเพื่อให้ทราบถึงปรากฏการณ์จะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมากเมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบด้วยการคำนวณ ผู้ออกแบบสามารถทำการเปลี่ยนรูปแบบได้โดยง่ายก่อนตัดสินใจนำรูปแบบที่แข็งแรงที่สุดไปสร้างจริง



รูปที่ 2.15 การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการคำนวณการขยุตัวของรถบัส  
ในขณะเกิดการชน

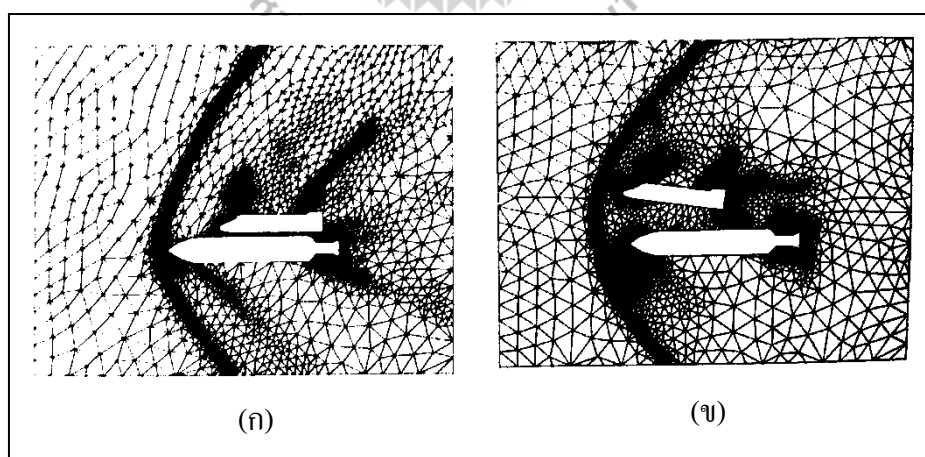
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังได้นำไปประยุกต์เพื่อออกแบบรูปร่างของยานพาหนะเพื่อลดแรงต้านของอากาศ ส่งผลสู่การประหยัดเชื้อเพลิง รูปที่ 2.16 แสดงรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ผิวนอกของรถกระบะเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics) หาภาวะอากาศผ่านตัวรถที่ความเร็วต่าง ๆ กัน ในปัจจุบันสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวกับการไหลและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้เพื่อคำนวณหาภาวะของการไหลรวมทั้งความกดดันที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่าง ๆ ของตัวรถได้ ผู้ออกแบบสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปแบบตัวรถได้โดยง่ายอย่างรวดเร็วเพื่อให้ได้รูปแบบที่ก่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดก่อนนำไปสร้างจริงเพื่อใช้ในการทดลองและการผลิตต่อไป



รูปที่ 2.16 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับรถกระบะ

การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะอีกแขนงหนึ่งซึ่งใช้กันมากในปัจจุบันก็คือการคำนวณหาอุณหภูมิตามตำแหน่งต่าง ๆ บนเครื่องยนต์ อุณหภูมิที่สูงและมีการเปลี่ยนแปลงมากตามตำแหน่งใด ๆ บนเครื่องยนต์จะก่อให้เกิดความเค้นที่สูงตามมา กระบวนการคำนวณความเค้นอันเนื่องมาจากอุณหภูมิต่อเครื่องยนต์ของรถยนต์เป็นการรวมสมการทางด้านการยืดหยุ่นของของแข็งและการถ่ายเทความร้อนภายในของแข็งนั้นเข้าด้วยกัน โดยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพียงวิธีการเดียว กระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการคำนวณสูงเนื่องจากสมการต่าง ๆ ที่ประดิษฐ์ขึ้นมาจากทั้งสองแขนงนั้นสอดคล้องกัน อีกทั้งการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างปัญหาต่างแขนงกันนั้นสามารถทำได้โดยสะดวก หลักการดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องบินสมัยใหม่ ซึ่งต้องทำการบินด้วยความเร็วสูงก่อให้เกิดผลกระทบซึ่งกันและกันระหว่างการไหลของอากาศกับโครงสร้างของเครื่องบินในขณะที่บินด้วยความเร็วสูง การไหลของอากาศก่อให้เกิดความกดดันสูงบนปีกของเครื่องบินทำให้ปีกเกิดการเสียรูปไปจากรูปร่างเดิม การที่ปีกเกิดการเสียรูปไปนั้นมีผลกระทบย้อนกลับไปทำให้สภาวะการไหลผ่านปีกนั้นเปลี่ยนแปลงไป การคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างและสภาวะการไหลของอากาศจึงต้องกระทำควบคู่กันไป การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาหลายแขนงที่มีผลกระทบซึ่งกันและกันเช่นนี้จึงก่อให้เกิดความสะดวกเป็นอย่างมากในการลดขั้นตอนและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวอย่างของผลกระทบซึ่งขึ้นตรงต่อกันและกันระหว่างสภาวะของการไหลและลักษณะรูปแบบ โครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปที่เห็นได้ชัดอีกตัวอย่างหนึ่งก็คือ ตัวอย่างของการแยกตัวของกระสวยอวกาศ (Space Shuttle) ออกจากถังเชื้อเพลิงภายนอก (External Fuel Tank) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 การแยกตัวเกิดขึ้นหลังจากที่ทั้งระบบได้ถูกยิงขึ้นไปจากพื้นดิน 8 นาทีครึ่ง ที่ความสูงประมาณ 110 กิโลเมตร และมีความเร็วประมาณ 2 เท่าของความเร็วเสียง ที่ความเร็วสูงเช่นนี้จะเกิดสภาวะการไหลผ่านของอากาศที่ค่อนข้างซับซ้อนอันประกอบด้วยคลื่นช็อกในลักษณะต่าง ๆ กัน เพื่อให้เกิดความแม่นยำของผลลัพธ์จากการคำนวณ รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จึงจำเป็นต้องประกอบด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กเป็นจำนวนมากในตำแหน่งของคลื่นช็อกและตามบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศโดยนับพลันดังแสดงในรูปที่ 2.17 ก) ในขณะเดียวกันเอลิเมนต์ที่มีขนาดใหญ่กว่าสามารถนำมาใช้ได้บริเวณที่สภาวะอากาศมีการเปลี่ยนแปลงน้อยเพื่อช่วยลดเวลาในการคำนวณ การจัดเอลิเมนต์ที่มีขนาดที่เหมาะสมแตกต่างกันตามตำแหน่งต่าง ๆ นั้น จำเป็นต้องทำโดยอัตโนมัติ เพราะสภาวะของอากาศที่เกิดขึ้นกับปัญหาเช่นนี้จะมีลักษณะที่ซับซ้อนและไม่สามารถทราบได้ก่อนล่วงหน้า รูปที่ 2.17 ข) แสดงรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสภาวะอากาศรอบกระสวยอวกาศหลังเกิดการแยกตัวจากถังเชื้อเพลิงภายนอก ตำแหน่งของเอลิเมนต์ขนาดเล็กล้วนแตกต่างไปจากรูปที่ 2.17 ก) โดยเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศที่เกิดขึ้น เพื่อก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่แม่นยำและในขณะเดียวกันเพื่อให้ใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยที่สุด



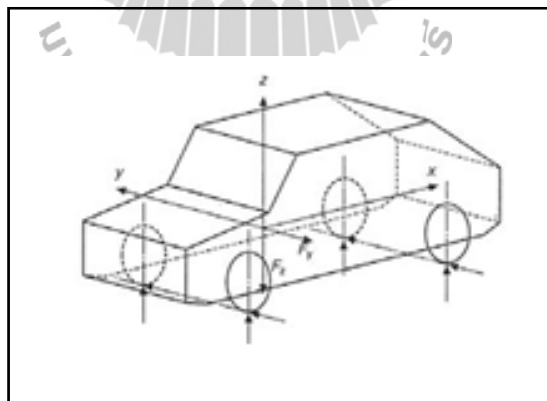
รูปที่ 2.17 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของสภาวะอากาศรอบกระสวยอวกาศทั้งก่อนและหลังการแยกตัวจากถังเชื้อเพลิงภายนอก

ในปัจจุบัน การพัฒนาระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังคงรุดหน้าไปอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากระเบียบวิธีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์ปัญหาต่าง ๆ กันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปใช้ประยุกต์กับงานหลาย ๆ แขนง โดยเฉพาะแขนงต่าง ๆ ที่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน (Interdisciplinary Problem) อาทิเช่น ในการออกแบบเครื่องยนต์ของยานอวกาศข้ามทวีปที่บินเร็วกว่าเสียงเกินสิบเท่าขึ้นไป ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้ถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาสภาวะอากาศที่เกิดขึ้นที่หน้าเครื่องยนต์ ความร้อนบนเครื่องยนต์อันเกิดจากการเสียดสีกับอากาศ อุณหภูมิของเครื่องยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไป การเสีรูปร่างและความเค้นของเครื่องยนต์ที่เกิดขึ้นตามมา รวมทั้งผลกระทบซึ่งกันและกัน เช่น การเสีรูปร่างไปจากเดิมของเครื่องยนต์หลังจากที่เครื่องยนต์มีอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลย้อนกลับทำให้สภาวะการแปรปรวนของอากาศเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม เป็นต้น

## 2.3 สภาวะที่ใช้ในการพิจารณาและออกแบบโครงสร้างรถ

### 2.3.1 สภาวะโมเมนต์ดัด (Bending Case)

ลักษณะภาระที่กระทำแบบนี้จะเกิดจากภาระของแรงกระทำระนาบแนวตั้ง ( $x-z$  plane) เมื่อเทียบกับ โครงค้ำซี่ ซึ่งภาระของแรงกระทำมาจากน้ำหนักของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ติดตั้งไว้บน โครงค้ำซี่ ซึ่งแรงกระทำนี้เป็นผลให้เกิด โมเมนต์ดัดบน โครงค้ำซี่



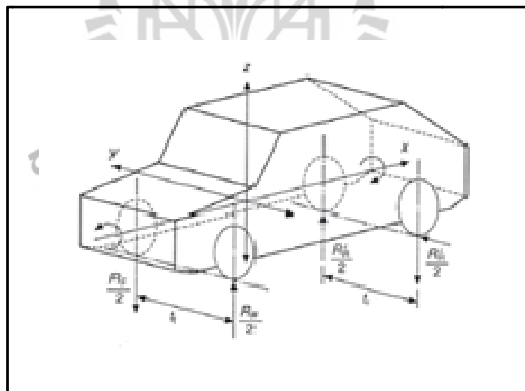
รูปที่ 2.18 สภาวะแรงดัด (Bending Case)

สภาวะโมเมนต์ดัดขึ้นอยู่กับน้ำหนักของอุปกรณ์หลักและน้ำหนักบรรทุกของรถ โดยสาร การพิจารณาขั้นแรกคือ สภาวะสถิต (Static Condition) โดยการคำนวณหาแรงกระจายที่เกิดขึ้นตามโครงรถ น้ำหนักลงเพลาสามารถคำนวณได้จากแรงกระทำและหาค่าโมเมนต์จาก

ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์นั้น โครงสร้างถูกพิจารณาในลักษณะ 2 มิติ โดยสมมาตรตามแนวยาวของตัวรถโดยสาร แรงกระจายถูกประมาณค่าจากน้ำหนักของตัวถังต่อความยาวของตัวรถ ซึ่งรวมรายละเอียดต่าง ๆ ของตัวรถโดยสารไว้ด้วย แต่ไม่คานน้ำหนักของล้อ ระบบเบรก และระบบช่วงล่าง ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่เกิดภาระกระทำต่อ โครงสร้างรถ สำหรับสภาวะพลศาสตร์ (Dynamics Condition) ของกรณีนี้ พิจารณาอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการใช้รถโดยสาร ตัวอย่างเช่น รถโดยสารแล่นผ่านหลุมที่เกิดบนถนน เป็นต้น ผลจากสภาวะลักษณะนี้ทำให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างรถ จึงต้องพิจารณาแรงกระทำที่มากกว่าสภาวะสถิต

### 2.3.2 สภาวะแรงบิด (Torsion Case)

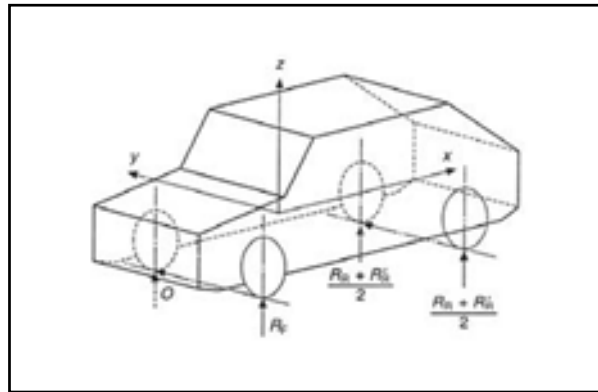
การออกแบบเพื่อรับภาระแรงบิดค่อนข้างซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับทฤษฎี ซึ่งต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยการคำนวณ โครงสร้างรับภาระแรงบิดจากโมเมนต์บิดตามแนวยาวของรถโดยสาร โมเมนต์แรงบิดอาจเกิดขึ้นตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกาขึ้นอยู่กับอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของรถโดยสาร เมื่อพิจารณาแต่แรงบิดเพียงอย่างเดียว แรงกระทำจะกระทำต่อล้อข้างใดข้างหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาขึ้นกับเพลอื่น ค่าสูงสุดที่เกิดโมเมนต์บิดสามารถคำนวณได้จากแรงกระทำที่ล้อคู่ระยะห่างของฐานล้อ (Track)



รูปที่ 2.19 สภาวะแรงบิด (Torsion Case)

### 2.3.3 สภาวะรวมของแรงคัตและแรงบิด (Combined Bending and Torsion)

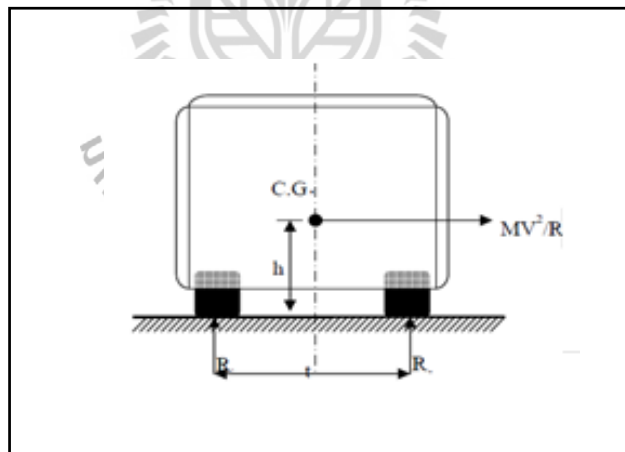
สำหรับสภาวะจริง สภาวะแรงบิดไม่สามารถเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวได้ ต้องมีสภาวะคัตเกิดขึ้นร่วมด้วยเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกนั่นเอง ดังนั้นสภาวะทั้งสองกรณีต้องรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้เสมือนกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน



รูปที่ 2.20 สภาวะรวมแรงค้ดและแรงบิด (Combined Bending and Torsion Case)

### 2.3.4 สภาวะแรงกระทำจากด้านข้าง (Lateral Loading)

ขณะที่รถกำลังแล่นในทางโค้ง แรงกระทำจากด้านข้างเกิดขึ้นและกระทำที่ตำแหน่งของล้อสัมผัสกับพื้นถนน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) สภาวะนี้รถจะเกิดการพลิกคว่ำ โครงค้ดซีรับภาระแบบค้ดในระนาบ x-y สภาวะของล้อพลิกคว่ำ



รูปที่ 2.21 แสดงสภาวะค่าแรงกระทำจากด้านข้าง (Lateral Loading)

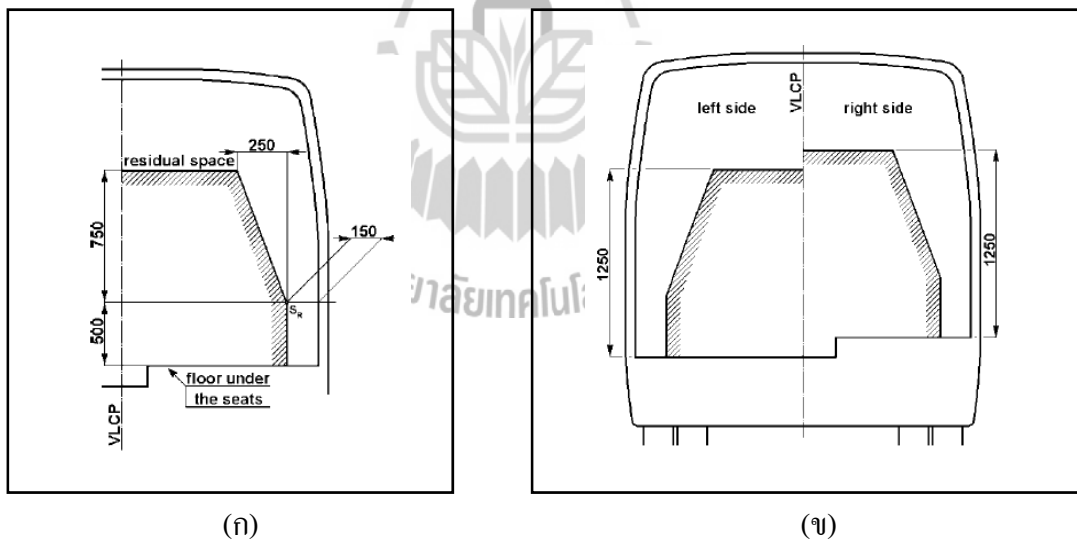
## 2.4 ECE Regulation No.66

หน่วยงานขององค์การสหประชาชาติเป็นคณะกรรมการชื่อ United Nations Economic Commission for Europe โดยใช้ตัวย่อ UNECE หรือ ECE เป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่สร้างข้อบังคับที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบยานพาหนะภาคพื้น เพื่อให้เป็นแนวทางการปฏิบัติสำหรับผู้สร้าง

ยานพาหนะภาคพื้นและมีการซื้อขายกันในกลุ่มประเทศยุโรป ซึ่งหน่วยงานนี้ได้สร้างมาตรฐานที่ครอบคลุมถึงความปลอดภัยของยานพาหนะ การกำหนดมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม ด้านพลังงาน ตลอดจนการออกแบบระบบป้องกันการจากรถต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ผลิตมีแนวทางการผลิตที่คุ้มครองสิทธิของผู้บริโภคและผู้ใช้นานพาหนะทั่วไป

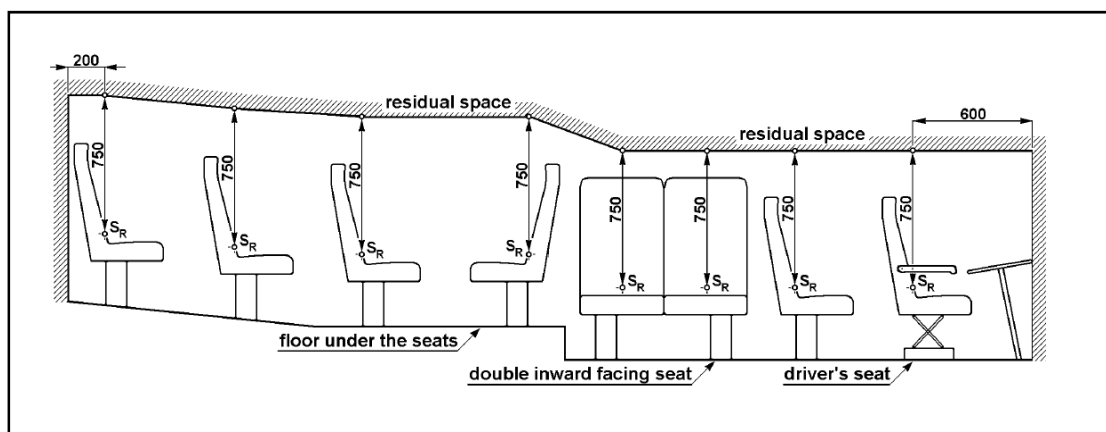
สำหรับ ECE R66 จะเป็นระเบียบปฏิบัติที่ว่าด้วยเรื่องรูปแบบข้อกำหนดทางเทคนิคเกี่ยวกับการอนุมัติมาตรฐานความแข็งแรงห้องโดยสารของรถโดยสารขนาดใหญ่ที่เกี่ยวกับโครงสร้างตัวถัง โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันห้องโดยสารระหว่างการเกิดอุบัติเหตุแบบพลิกคว่ำ ซึ่งรูปแบบทางเทคนิคและชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งต้องมีโครงสร้างความแข็งแรงมากพอที่เมื่อเกิดอุบัติเหตุการพลิกคว่ำแล้ว พื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสารไม่เกิดความเสียหายหรือไม่ทำให้ผู้โดยสารเกิดอันตราย

ข้อกำหนด ECE R66 นี้จะกำหนดพื้นที่ปลอดภัยภายในห้องโดยสารของรถโดยสารขนาดใหญ่ โดยเริ่มจากการกำหนดขนาดพื้นที่ว่างของโครงสร้างภายในห้องโดยสาร ตามที่แสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งเป็นการแสดงรูปด้านหน้าของห้องโดยสาร



รูปที่ 2.22 พื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสารรูปด้านหน้า





รูปที่ 2.23 พื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสารรูปด้านข้าง

ในรูปที่ 2.23 จะเป็นการแสดงพื้นที่ปลอดภัยและการจัดเรียงที่นั่ง ตามมาตรฐาน ECE โดยแสดงรูปด้านข้างของรถโดยสารตลอดทั้งคัน

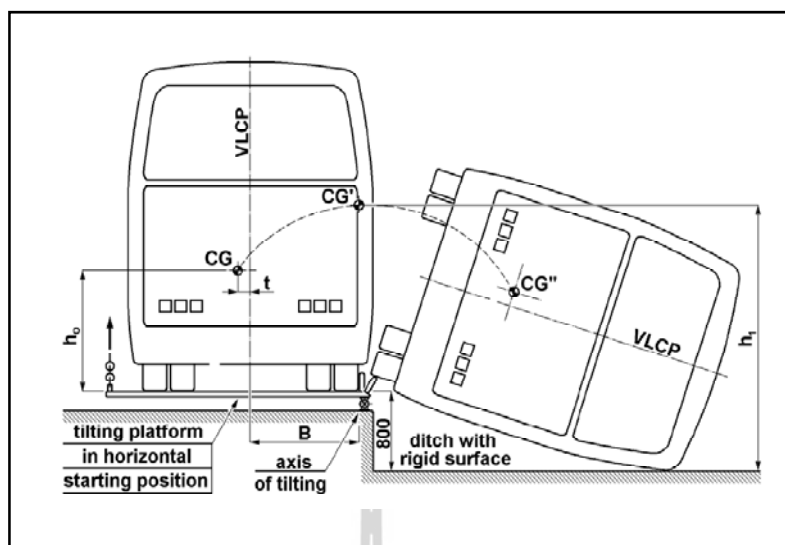
สำหรับมาตรฐาน ECE R66 ได้กำหนดขั้นตอนทดสอบรถพลิกคว่ำ (Roll-Over Test) ซึ่งมีมาตรฐานดังนี้

1. รถโดยสารทั้งคันจะนำไปจอดไว้บนพื้นที่สามารถเอียงได้ โดยจะทำการควบคุมระบบกันสะเทือนและทำการเอียงพื้นวางอย่างช้า ๆ เพื่อให้จุดศูนย์กลางมวล (CG) ค่อย ๆ เคลื่อนที่เข้าสู่สถานะที่ไม่สมดุลของโครงสร้างรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 2.24 ในการทดสอบนี้หากว่ารุ่นของรถโดยสารมีน้ำหนักมากเกินไป มากกว่าที่พื้นเอียงจะรับได้พอดี การทดสอบจะทำที่สภาพที่รถโดยสารไม่มีน้ำหนักบรรทุก แต่หากว่ารุ่นของรถโดยสารเหมาะสมกับพื้นเอียง การทดสอบจะทำที่น้ำหนักบรรทุกของรถนั้น

2. การทดสอบการพลิกจะเริ่มจากตำแหน่งที่ไม่สมดุลของรถโดยสาร ด้วยความเร็วเชิงมุมเริ่มต้นเท่ากับศูนย์ และให้แกนของการหมุนผ่านจุดสัมผัสของยางรถและพื้น ที่ตำแหน่งนี้จะกำหนดให้เป็นตำแหน่งพลังงานอ้างอิง (Reference Energy, ER)

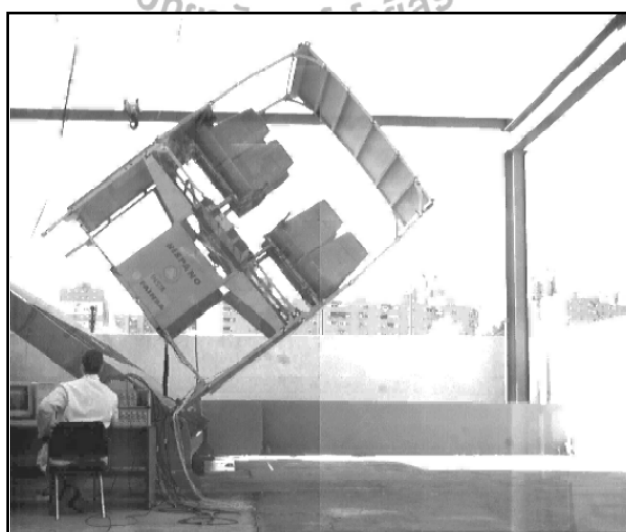
3. รถโดยสารจะพลิกลงด้านข้างที่อยู่ในแนวระดับ ทำด้วยพื้นคอนกรีตเรียบและเป็นพื้นผิวแห้ง มีความสูงต่างกัน 800 มิลลิเมตร

สำหรับรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบการพลิกคว่ำนั้น จะมีรายละเอียดมาก ซึ่งสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงในเรื่อง ECE Regulation 66



รูปที่ 2.24 การทดสอบรถโดยสารพลิกคว่ำ

สำหรับการทดสอบการพลิกคว่ำของรถโดยสารตามมาตรฐาน ECE R66 นั้น ผู้ทดสอบอาจไม่จำเป็นต้องนำรถทั้งคันมาทำการทดสอบก็ได้ เช่น การทดสอบที่แสดงในรูปที่ 2.25 เป็นการทดสอบของ The University Institute for Automobile Research (INSIA) ประเทศสเปน ซึ่งเป็นสถาบันที่วิจัยในเรื่องการขนส่งทางถนนและรถยนต์ประเภทต่าง ๆ โดยแสดงให้เห็นการทดสอบรถโดยสารเฉพาะส่วนของห้องโดยสารเพียงบางส่วน เพื่อเก็บข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 2.25 การทดสอบการพลิกคว่ำส่วนของตัวถังรถของ INSIA



รูปที่ 2.26 พื้นเอียงที่ใช้ในการทดสอบรถพลิกคว่ำ

ในการทดสอบรถโดยสารนั้นจะต้องมีการออกแบบพื้นทดสอบที่สามารถจะปรับมุมเอียงได้ สำหรับพื้นทดสอบที่ใช้เป็นพื้นเอียงในการพลิกรถโดยสารที่ใช้ในงานจริง ดังแสดงในรูปที่ 2.26

นอกเหนือจากการทดสอบด้วยการพลิกรถโดยสารจริงแล้ว ข้อกำหนด ECE R66 ได้ยอมให้มีการใช้การวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์ไว้ด้วย โดยมาตรา 9 ของข้อกำหนดนี้ ได้กำหนดมาตรฐานของการวิเคราะห์และจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ ว่าจะต้องใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ประเภทใด การกำหนดวัสดุ ตลอดจนแนวปฏิบัติที่ผู้ทำการคำนวณต้องปฏิบัติในระหว่างการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์

## 2.5 คุณสมบัติเชิงกลของโลหะ

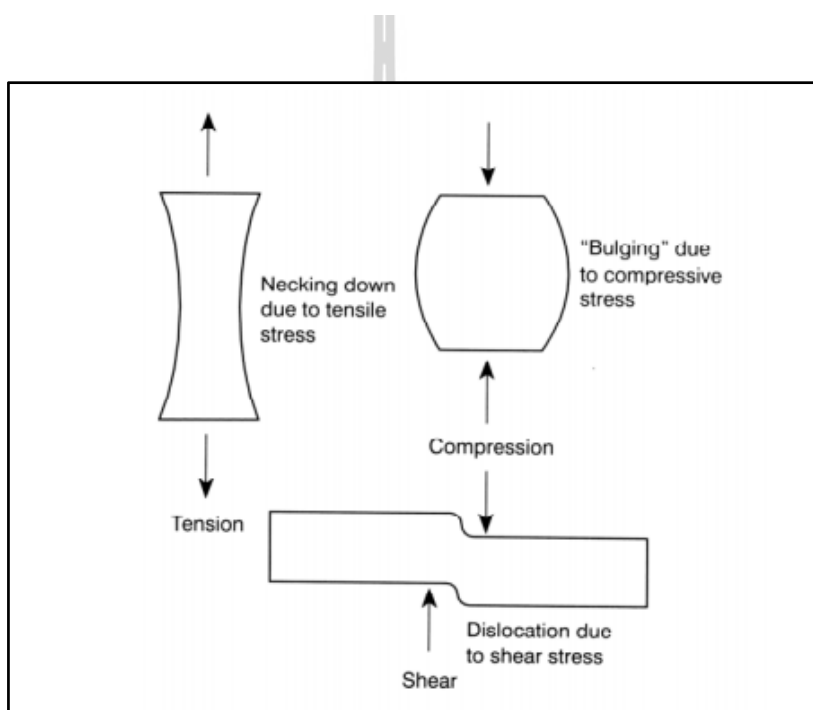
คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้น ๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรงหรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเราเลือกใช้วัสดุใด ๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือคุณสมบัติเชิงกลของมัน การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใด ๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักรอุปกรณ์นั้น ๆ เป็นสำคัญ

### 2.5.1 ความเค้นและความเครียด (Stress and Strain)

ความเค้น (Stress) นิยามได้เป็นความเข้มของแรงที่กระจายอยู่ภายในหรือส่วนประกอบของแรงที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของวัสดุ ความเค้นปกติจะวัดในหน่วยของ

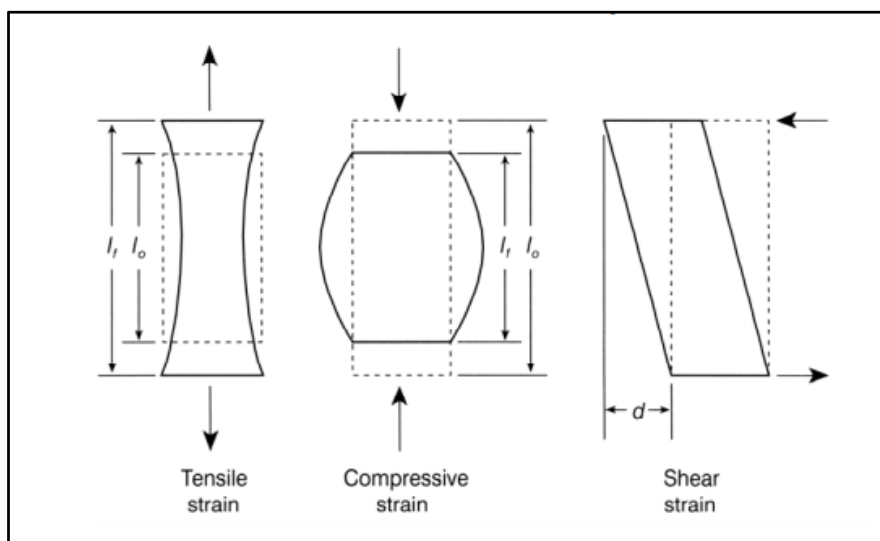
แรงต่อหน่วยพื้นที่ ได้แก่ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ( $lb/in^2$ ) หรือเมกะพาสกาล (MPa) โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดวัสดุให้มีขนาดสั้นลง
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกัน



รูปที่ 2.27 ความเค้นแบบต่าง ๆ

ความเครียด (Strain) นิยามได้เป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดเชิงเส้นของวัสดุที่สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของแรงเค้นต่อหน่วยความยาว ดังนั้นความเครียดเป็นการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพในรูปร่างของชิ้นทดสอบที่เป็นผลมาจากการใส่น้ำหนักให้กับชิ้นทดสอบ ซึ่งคำนวณได้โดยการวัดอัตราส่วนระหว่างความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเริ่มต้น



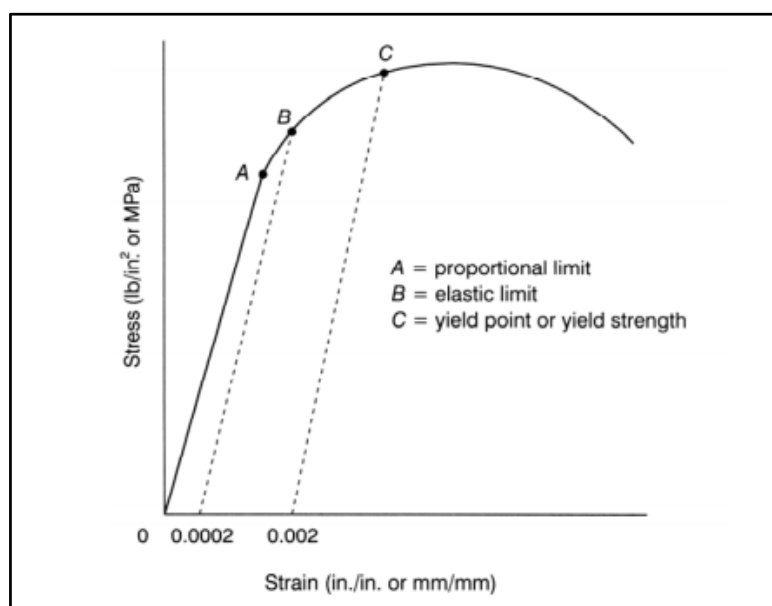
รูปที่ 2.28 ความเครียดแบบต่าง ๆ

### 2.5.2 ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ความยืดหยุ่นเป็นสมบัติของวัสดุที่นิยามได้เป็นความสามารถในการกลับคืนสู่สภาพเดิมได้อย่างสมบูรณ์หลังจากที่นำแรงเค้นที่ทำให้เกิดการเสียรูปออกไป ไม่มีวัสดุใดที่สามารถแสดงความยืดหยุ่นได้อย่างสมบูรณ์ตลอดทุกช่วงแรงเค้นที่กระทำตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเกิดการแตกหัก วัสดุบางอย่างเช่นเหล็กกล้าจะมีความยืดหยุ่นเหนือช่วงค่าแรงเค้นค่อนข้างสูง แต่จะหมดไปเมื่อแรงเค้นมีค่าสูงขึ้นถึงค่าหนึ่ง ส่วนวัสดุอื่น ๆ เช่นเหล็กหล่อและคอนกรีตเมื่อมีแรงกระทำจะมีความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ

ความยืดหยุ่นของวัสดุอาจเปลี่ยนไปจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ การยืดออกหรือการใส่แรงกระทำอย่างรวดเร็ว เช่น วัสดุไม้หรือคอนกรีตอาจจะสามารถรับแรงกระทำและคืนสภาพได้อย่างสมบูรณ์ในการรับแรงช่วงเวลาสั้น ๆ แต่จะอ่อนลงหรือแตกร้าวถ้าปล่อยให้รับแรงเป็นระยะเวลานาน

ในเรื่องของความแข็งแรงช่วงยืดหยุ่น (Elastic Strength) สามค่าที่ต้องทำการวัดได้แก่ ขีดจำกัดความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วน (Proportional Limit) และความแข็งแรงจำนน (Yield Strength) ดังแสดงในรูปที่ 2.29

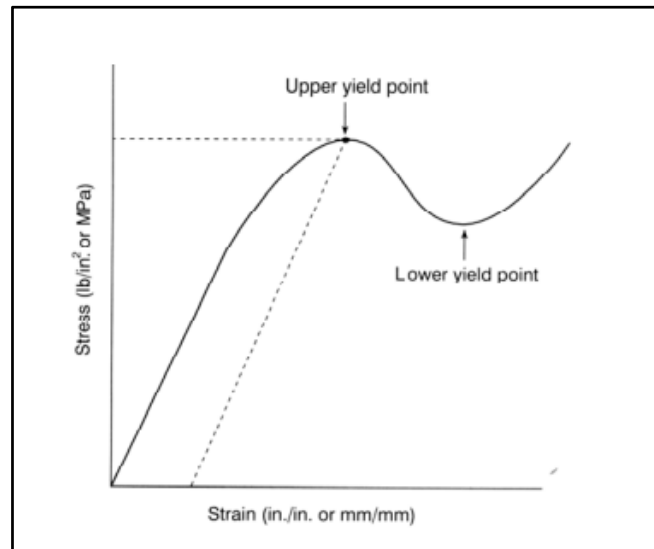


รูปที่ 2.29 ขีดจำกัดความยืดหยุ่น ขีดจำกัดสัดส่วนและความแข็งแรงจํานน

ขีดจำกัดความยืดหยุ่นคือค่าแรงเค้นสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในวัสดุ โดยไม่มีการเสียรูปถาวร กรรมวิธีที่จะสามารถวัดขีดจำกัดความยืดหยุ่นได้อย่างแม่นยำนั้นต้องเป็นกรรมวิธีที่สามารถทำการทดสอบกับวัสดุได้อย่างต่อเนื่อง ด้วยการเพิ่มแรงกระทำทีละน้อยจนกระทั่งวัสดุเสียรูปถาวร

ขีดจำกัดการยืดสัดส่วนคือแรงเค้นสูงสุดของวัสดุที่สามารถเกิดขึ้นโดยปราศจากการเบนออกจากเส้นตรงของกราฟแรงเค้นกับความเครียด วัสดุส่วนใหญ่จะแสดงส่วนที่เป็นกราฟเส้นตรงในช่วงยืดหยุ่น (Elastic Range) ขีดจำกัดความยืดหยุ่นกับขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วนบ่อยครั้งที่ไม่ค่อยชัดเจน เพราะขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วนสามารถใช้เป็นตัวบ่งบอกขีดจำกัดความยืดหยุ่นได้ ส่วนขีดจำกัดการยืดแบบสัดส่วนบ่อยครั้งยากต่อการหาค่า ทั้งนี้เนื่องจากกราฟแรงเค้นกับความเครียดเบนหรือโค้งออกจากแนวเส้นตรง ดังนั้นในบ่อยครั้งที่ใช้ความแข็งแรงจํานนเป็นตัววัดความแข็งแรงยืดหยุ่น

ความแข็งแรงจํานนส่วนใหญ่จะวัดด้วยวิธีออฟเซต (Offset Method) ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ที่ได้นิยามความแข็งแรงจํานนเป็นแรงเค้น ณ จุดที่วัสดุแสดงการเสียรูปถาวรจํากัดจําเพาะ (Specified Limiting Permanent Set) (ASTM E6) วิธีการนี้ขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ออฟเซตหรือการจํานนต่อการเสียรูปถาวร (Plastic Yield) ซึ่งการวัดค่าความแข็งแรงจํานนต้องเลือกใช้ออฟเซตหรือค่าความเครียด เนื่องจากความถูกต้องของวิธีแบบออฟเซตจะลดลงเมื่อค่าออฟเซตลดลง ค่าความเครียดโดยทั่วไปของวัสดุเชิงโครงสร้างจะอยู่ในช่วง 0.0001 ถึง 0.001



รูปที่ 2.30 จุดจำนนบนและล่างของวัสดุ

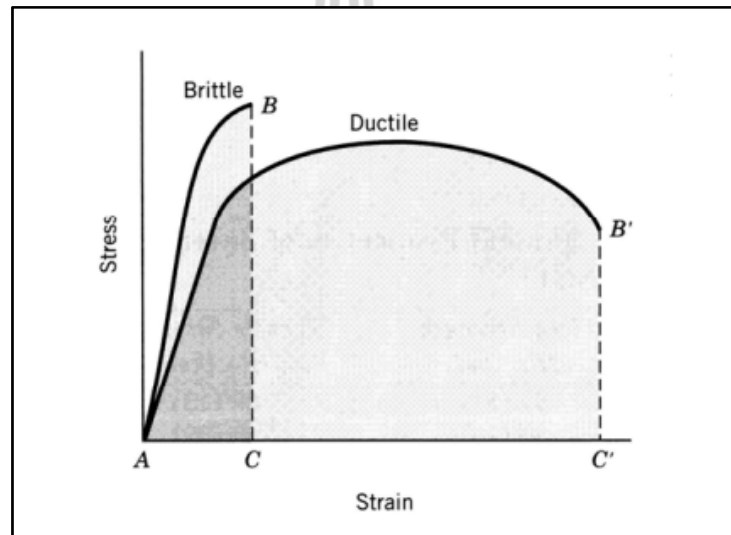
ในช่วงของการจำนนของวัสดุเหนียวจะมีสองจุดวิกฤตคือ จุดจำนนด้านบน (Upper Yield Point, UYP) และจุดจำนนด้านล่าง (Lower Yield Point, LYP) การจำนนของวัสดุถือว่าเป็นการเกิดขึ้นเมื่อความเครียดของวัสดุเพิ่มขึ้นโดยปราศจากการเพิ่มขึ้นของแรงเค้น จุดจำนนด้านบนและด้านล่าง ดังรูปที่ 2.30 ใช้ในการระบุช่วงของการเสีรูปลถาวรของวัสดุและใช้เป็นมาตรฐานในการออกแบบ

### 2.5.3 การเสีรูปลถาวร (Plasticity)

การเสีรูปลถาวรคือความสามารถของวัสดุต่อการเสีรูปลแบบคงรูปโดยไม่เกิดการแตกร้าว การเกิดการเสีรูปลถาวรจะเกี่ยวข้องกับเวลา เนื่องจากวัสดุในช่วงการเสีรูปลถาวร ความเครียดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องภายใต้แรงเค้นค่าหนึ่ง และการเกิดการเสีรูปลถาวรนี้จะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเสีรูปลแบบคงรูปก่อนแตกร้าวหรือขีดจำกัดความเครียดก่อนการแตกร้าว การเสีรูปลถาวรสามารถแสดงได้ด้วยลักษณะเฉพาะของการเกิดการจำนน (Yield) การเลื่อนในช่วงการเสีรูปลถาวร (Plastic Flow) และการคราก (Creep)

ความเครียดช่วงเสีรูปลถาวร (Plastic Strain) เป็นผลของแรงเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ โดยแรงเค้นเฉือนสูงสุดสำหรับการทดสอบแรงดึงเกิดขึ้นที่ระนาบ 45 องศากับทิศทางการดึง แต่การเคลื่อนตัวของระนาบที่อยู่ใกล้กันหรือการเคลื่อนตัวของระนาบเข้าไปในวัสดุจะไม่เกิดตามแนวระนาบ 45 องศา ทั้งนี้เนื่องจากอะตอมจะมีการจัดทิศทางในการเคลื่อนที่ภายในโครงผลึกใหม่ โดยจะเคลื่อนไปในทิศทางที่มีแรงต้านน้อยที่สุด ส่วนความเครียดที่เกิดขึ้นช่วงการเสีรูปลถาวรขณะที่วัสดุอยู่ภายใต้แรงกระทำนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของระนาบการเคลื่อนที่ทิศทางการจัดเรียงตัวของผลึกและขนาดของแรงเค้นที่กระทำ

สมบัติสองอย่างที่สำคัญมากต่อการทดสอบการเสียรูปถาวรของวัสดุคือความเหนียว (Ductility) และความเปราะ (Brittleness) ความเหนียวคือความสามารถของวัสดุในการถูกดึงยืดให้ยาวออกหรือความสามารถในการเสียรูปถาวรก่อนเกิดการแตกหักภายใต้แรงกระทำดังกราฟ B' ในรูปที่ 2.31 ตัวอย่างวัสดุเหนียว เช่น เหล็กอ่อน (Mild Steel) ซึ่งสามารถใช้ทำลวดหรือเคเบิลได้ แต่สำหรับวัสดุที่เกิดการแตกหักโดยมีการยืดออกเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลยถือว่าเป็นวัสดุเปราะ ดังกราฟ B ในรูปที่ 2.31 ตัวอย่างวัสดุเปราะ เช่น เหล็กหล่อกับคอนกรีต เป็นต้น ปกติความแข็งแรงดึงของวัสดุเปราะจะมีค่าต่ำกว่าความแข็งแรงอัดอย่างเห็นได้ชัด ความเหนียวของวัสดุบ่อยครั้งจะวัดเป็นร้อยละการยืด (Percent Elongation) และร้อยละการลดลงของพื้นที่หน้าตัด (Percent Reduction) ภายใต้การทดสอบแรงดึง



รูปที่ 2.31 กราฟแรงเค้นความเครียดของวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ



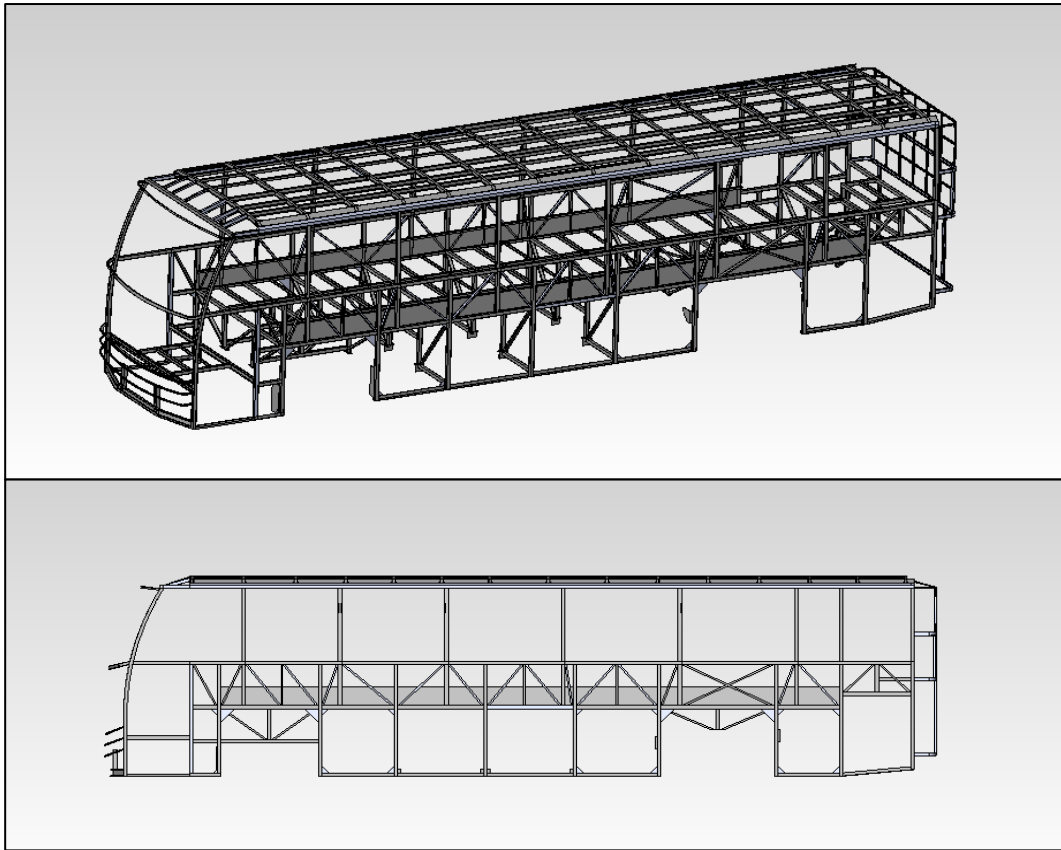
## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

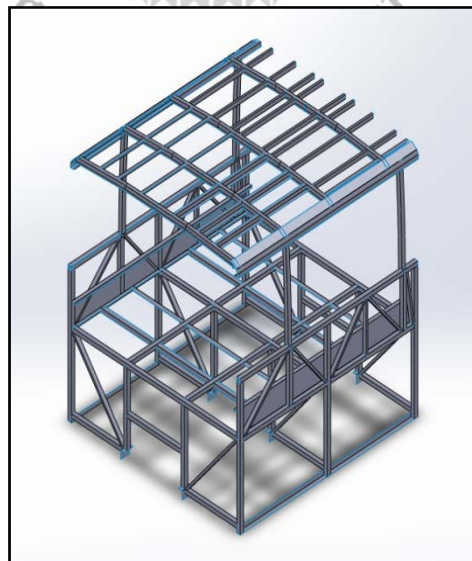
งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่งในกรณีการพลิกคว่ำ โดยเริ่มต้นด้วยการเตรียมแบบจำลองในโปรแกรม SolidWorks ซึ่งขนาดต่าง ๆ ของโครงสร้างนี้ได้รับความร่วมมือจากบริษัทผู้ผลิตชุดสาหรณรจำกัดในการให้ข้อมูลขนาด โครงสร้างจริง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างในโปรแกรมสำเร็จรูป ABAQUS โดยแบ่งการวิเคราะห์โครงสร้างออกเป็น 2 ช่วงคือ วิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารช่วงก่อนกระทบพื้นและ วิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารช่วงกระทบพื้น ความเสียหายจากการวิเคราะห์โครงสร้างเพื่อนำไปปรับปรุงเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีความแข็งแรงมากขึ้นเพื่อให้มีความปลอดภัยต่อผู้โดยสารมากที่สุด และนำไปสู่มาตรฐานโลกอีกด้วย

#### 3.1 ศึกษาโครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง

โครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่งรุ่น CG 280 นี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทผู้ผลิตชุดสาหรณรจำกัดในการให้แบบรถ ทางผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแบบโครงสร้างรถ คุณสมบัติของเหล็กที่ใช้และนำมาขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรม SolidWorks เพื่อช่วยในสร้างชิ้นส่วน โครงสร้างต่าง ๆ โครงสร้างรถโดยสารนี้มีขนาดความกว้าง 2.55 เมตร ความยาว 11.8 เมตร และความสูง 3.03 เมตร ดังรูปที่ 3.1 ทำจากวัสดุ Steel STKR 400 ความหนาของชิ้นงานในโครงสร้างแต่ละส่วนแตกต่างกันไปตามการใช้งาน ประกอบกันด้วยวิธีการเชื่อม ซึ่งส่วนที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ไม่ได้เป็นการวิเคราะห์รถทั้งคันแต่เป็นการวิเคราะห์โครงสร้างบางส่วน (โครงสร้างช่วงกลางของรถโดยสาร) โดยการขึ้นรูปนั้นใช้การขึ้นรูปแบบ Surface เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์และมีขนาดของโครงสร้างตรงตามขนาดจริงดังรูปที่ 3.2 มีขนาดความกว้าง 2.55 เมตร ความยาว 2.63 เมตร และความสูง 3.03 เมตร



รูปที่ 3.1 แบบจำลองรถโดยสารชนิดชั้นครึ่ง



รูปที่ 3.2 แบบจำลองตัวถังรถโดยสารชนิดชั้นครึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์

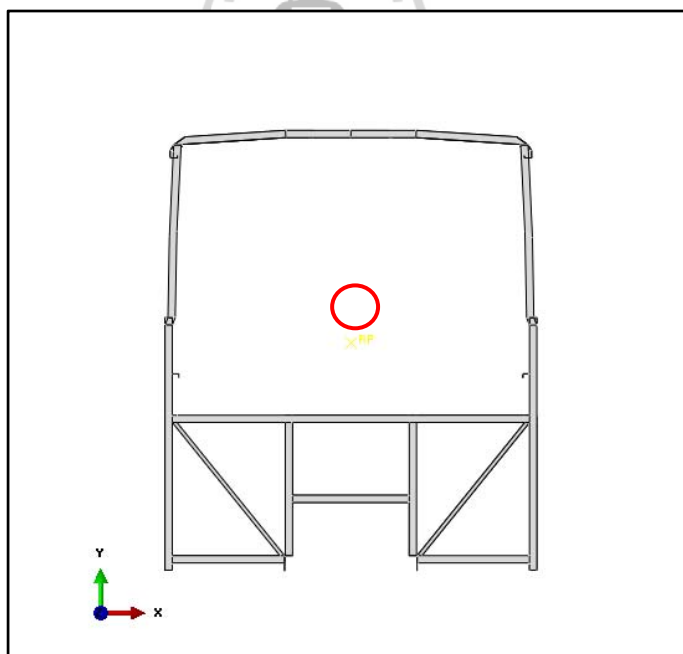
### 3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างเดิมของรถโดยสารช่วงก่อนกระทบพื้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างช่วงก่อนกระทบพื้นนี้จะกำหนดให้โครงสร้างให้เป็นแบบ Rigid เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการวิเคราะห์

#### 3.2.1 Part

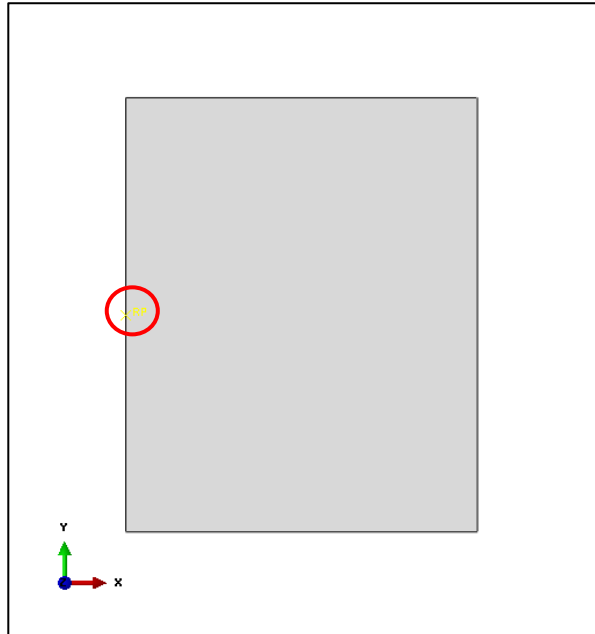
• Import โครงสร้างรถโดยสารที่ได้เตรียมไว้จากโปรแกรม SolidWorks เข้ามาในโปรแกรม ABAQUS สกุลไฟล์ที่สามารถ import เข้ามาได้มีดังนี้

1. Assembly Neutral (\*.eaf\*)
  2. CATIA V4 (\*.model\*, \*.catdata\*, \*.exp\*)
  3. Parasolid (\*.x\_t\*, \*.x\_b\*, \*.xmt\*)
  4. ProE/NX/IDEAS/CATIA V5 Elysium Neutral (\*.enf\*)
- กำหนด Reference Point (RP)
1. Reference Point ที่จุด CG ของโครงสร้างรถโดยสาร



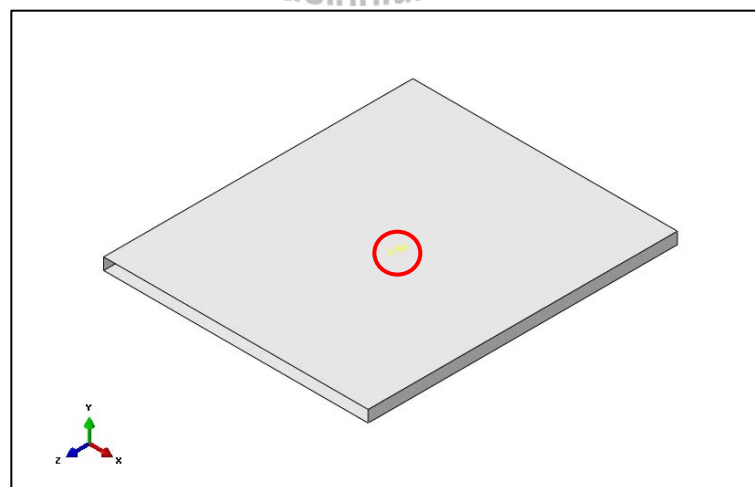
รูปที่ 3.3 Reference Point ที่ CG ของโครงสร้างรถโดยสาร

2. สร้างพื้นและกำหนด Reference Point ที่พื้นตกระทบ



รูปที่ 3.4 Reference Point ที่พื้น

3. สร้างคอนกรีตเพื่อแทนภาระกรรมในการบรรทุกที่โครงสร้างรถโดยสาร  
ได้รับและกำหนดจุด Reference Point ที่จุดกึ่งกลางของคอนกรีต



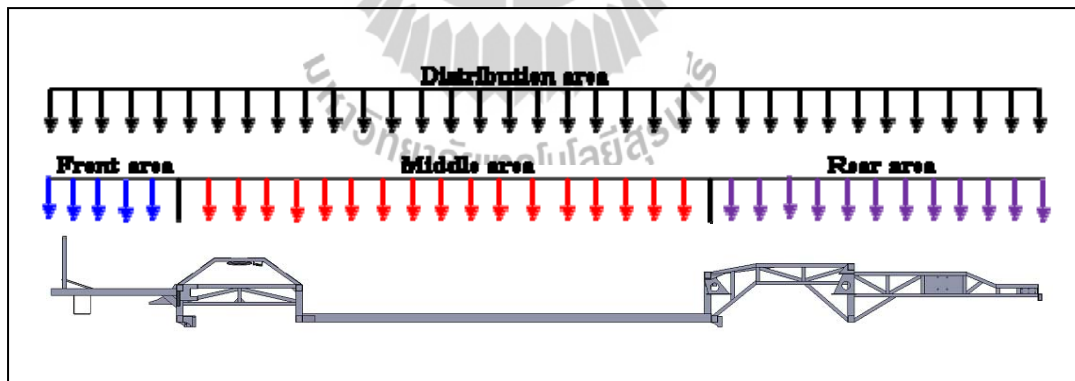
รูปที่ 3.9 จุด CG ของแผ่นคอนกรีต

น้ำหนักรวมสูงสุดของรถโดยสารรุ่น CG 280 ถูกกำหนดไว้ที่ 18,000 กิโลกรัม น้ำหนักโครงสร้างทั้งหมด 2,914.23 กิโลกรัม ดังนั้นน้ำหนักที่กระทำลงบนโครงสร้างรถโดยสารมีค่าสูงสุด 15,085.77 กิโลกรัม โดยกำหนดให้ภาระกรรมในแต่ละส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างหลัก

Area	Load (kg.)	Load (N)	Load/Unit Area (Pa)
Front area	450.00	4,414.50	9,596.74
Middle area	2,846.00	27,919.26	10,264.43
Rear area	1,061.00	10,408.41	4,196.94
Distribution area	10,728.77	105,141.95	18,576.31
Sum	15,085.77	147,884.12	42,634.42

โครงสร้างที่นำมาวิเคราะห์เป็น โครงสร้างส่วนกลางมีความยาว 2.63 เมตร ดังนั้นน้ำหนักที่กระทำลงบนโครงสร้างจะมีค่าเท่ากับ 2,397 กิโลกรัม

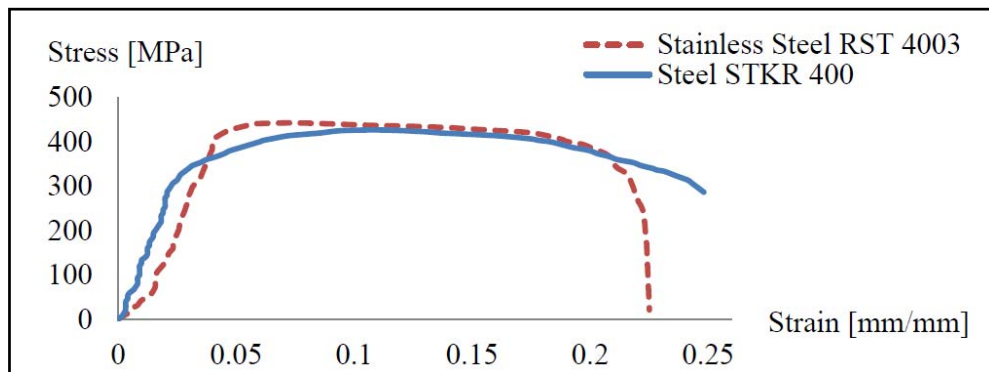


รูปที่ 3.6 น้ำหนักภาระกรรมที่กระจายอยู่บน โครงสร้างรถโดยสาร

### 3.2.2 Property

ตั้งชื่อวัสดุ กำหนดคุณสมบัติของวัสดุและกำหนดความหนาของโครงสร้าง โดยวัสดุของโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์นี้คือเหล็ก SS400 มีคุณสมบัติดังนี้

Density	7800	kg / m <sup>3</sup>
Young's Modulus	210	GPa
Poisson's Ratio	0.29	



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400

จากรูปที่ 3.7 สามารถนำค่าความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุ Steel STKR 400 ซึ่งเป็นเหล็กของโครงสร้างรถในช่วง Plastic มาแสดงดังตารางที่ 3.2 ได้ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress (Pa) และ Strain ของวัสดุ Steel STKR 400 ช่วง Plastic

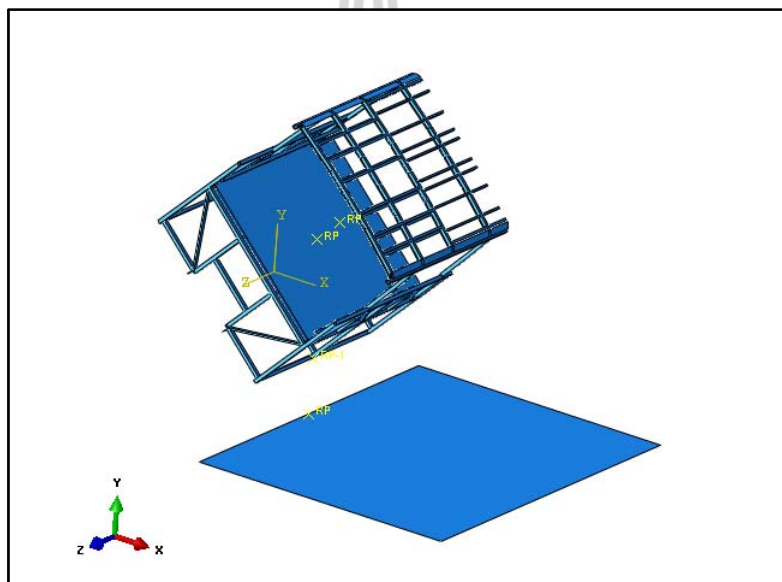
Stress (Plastic)	Strain (Plastic)	Stress (Plastic)	Strain (Plastic)	Stress (Plastic)	Strain (Plastic)	Stress (Plastic)	Strain (Plastic)
2.70E+08	0	3.60E+08	0.018	3.95E+08	0.036	4.15E+08	0.054
2.90E+08	0.002	3.65E+08	0.020	3.95E+08	0.038	4.15E+08	0.056
3.10E+08	0.004	3.65E+08	0.022	4.00E+08	0.040	4.15E+08	0.058
3.20E+08	0.006	3.70E+08	0.024	4.05E+08	0.042	4.15E+08	0.060
3.30E+08	0.008	3.75E+08	0.026	4.05E+08	0.044	4.15E+08	0.062
3.40E+08	0.010	3.80E+08	0.028	4.05E+08	0.046	4.18E+08	0.064

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง Stress และ Strain ของวัสดุ Steel STKR 400 ช่วง Plastic (ต่อ)

Stress (Plastic)	Strain (Plastic)	Stress (Plastic)	Strain (Plastic)	Stress (Plastic)	Strain (Plastic)	Stress (Plastic)	Strain (Plastic)
3.45E+08	0.012	3.85E+08	0.030	4.10E+08	0.048	4.19E+08	0.066
3.50E+08	0.014	3.85E+08	0.032	4.10E+08	0.050	4.20E+08	0.068
3.55E+08	0.016	3.90E+08	0.034	4.15E+08	0.052	4.20E+08	0.070
4.22E+08	0.072	4.22E+08	0.112	4.08E+08	0.152	3.60E+08	0.192
4.25E+08	0.074	4.22E+08	0.114	4.05E+08	0.154	3.55E+08	0.194
4.25E+08	0.076	4.20E+08	0.116	4.05E+08	0.156	3.55E+08	0.196
4.25E+08	0.078	4.20E+08	0.118	4.05E+08	0.158	3.52E+08	0.198
4.27E+08	0.080	4.18E+08	0.120	4.02E+08	0.160	3.50E+08	0.200
4.27E+08	0.082	4.18E+08	0.122	4.00E+08	0.162	3.45E+08	0.202
4.27E+08	0.084	4.18E+08	0.124	3.98E+08	0.164	3.42E+08	0.204
4.27E+08	0.086	4.15E+08	0.126	3.95E+08	0.166	3.40E+08	0.206
4.27E+08	0.088	4.15E+08	0.128	3.95E+08	0.168	3.35E+08	0.208
4.27E+08	0.090	4.15E+08	0.130	3.92E+08	0.170	3.35E+08	0.210
4.27E+08	0.092	4.15E+08	0.132	3.90E+08	0.172	3.32E+08	0.212
4.27E+08	0.094	4.15E+08	0.134	3.85E+08	0.174	3.30E+08	0.214
4.25E+08	0.096	4.13E+08	0.136	3.83E+08	0.176	3.25E+08	0.216
4.25E+08	0.098	4.13E+08	0.138	3.83E+08	0.178	3.20E+08	0.218
4.25E+08	0.100	4.13E+08	0.140	3.80E+08	0.180	3.15E+08	0.220
4.25E+08	0.102	4.12E+08	0.142	3.75E+08	0.182	3.12E+08	0.222
4.25E+08	0.104	4.12E+08	0.144	3.73E+08	0.184	3.05E+08	0.224
4.23E+08	0.106	4.12E+08	0.146	3.70E+08	0.186	2.99E+08	0.226
4.23E+08	0.108	4.10E+08	0.148	3.68E+08	0.188	2.90E+08	0.228
4.22E+08	0.110	4.09E+08	0.150	3.65E+08	0.190	2.85E+08	0.230

### 3.2.3 Assembly

เนื่องจากการนำโครงสร้างเข้ามาในโปรแกรมการวิเคราะห์ ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นยังไม่ มีรูปแบบกำหนดสำหรับการยึดติดกัน ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ทุกชิ้นส่วนเชื่อมต่อกันเป็นชิ้น เดียวเปรียบเสมือนการเชื่อมเพื่อลดข้อผิดพลาดในการกำหนดเงื่อนไขสำหรับการวิเคราะห์ การกำหนดค่าภาระเพิ่มเติมและหาจุดศูนย์กลางของโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์จะสามารถหาได้ จากเครื่องมือสำเร็จรูปในโปรแกรมการวิเคราะห์ เอียงโครงสร้างรถโดยสารโดยให้จุดศูนย์กลางเกิน ขอบโครงสร้างออกมาเล็กน้อยเพื่อให้โครงสร้างนี้สามารถตกลงมาโดยใช้แรงโน้มถ่วงได้ จากนั้น สร้างพื้นเพื่อรองรับการตกกระทบของโครงสร้างรถโดยสาร โดยโครงสร้างรถโดยสารและพื้นตก กระทบมีระยะความสูงเท่ากับ 800 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.8 โครงสร้างรถโดยสารพร้อมพื้นตกกระทบ

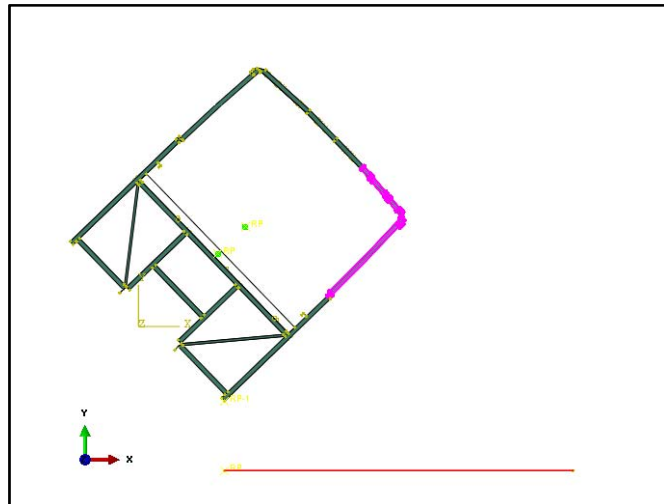
### 3.2.4 Step

เนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างในกรณีการพลิกคว่ำนี้ การเคลื่อนที่ของ โครงสร้างมีอัตราความเร็วของภาระที่กระทำต่อระบบนั้นเร็วหรือการเคลื่อนที่ของระบบนั้น มีความเร็วสูง การสร้าง Step การเคลื่อนที่ของโครงสร้างนี้จึงเลือกใช้แบบ Dynamic Explicit และ ใช้ช่วงเวลาที่ต้องการวิเคราะห์ผล



### 3.2.5 Interaction

Interaction จะเป็นการกำหนดปฏิกริยาของพื้นผิวที่สัมผัสกันคือพื้นผิวของโครงสร้างที่จะกระทบกับพื้นว่าเป็นอย่างไร ซึ่งในที่นี้การสัมผัสกันระหว่างโครงสร้างเมื่อตกกระทบพื้นคอนกรีตจะกำหนดให้มีค่าประมาณ 0.3

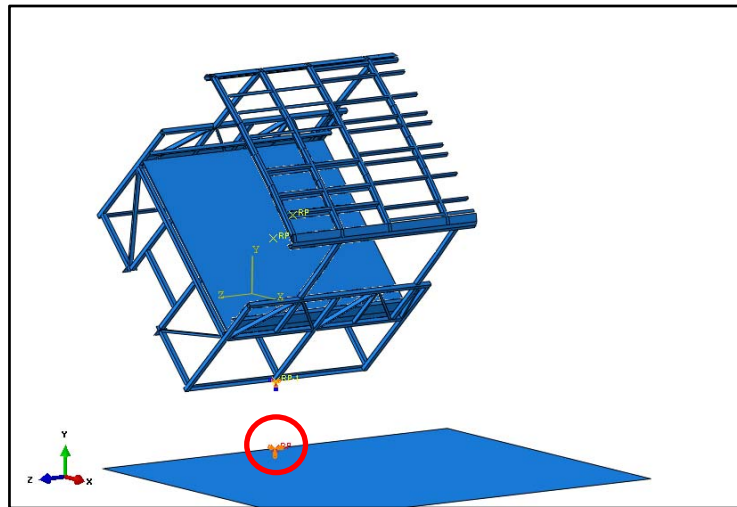


รูปที่ 3.9 Interaction ระหว่าง โครงสร้างรถโดยสารกับพื้น

### 3.2.6 Load

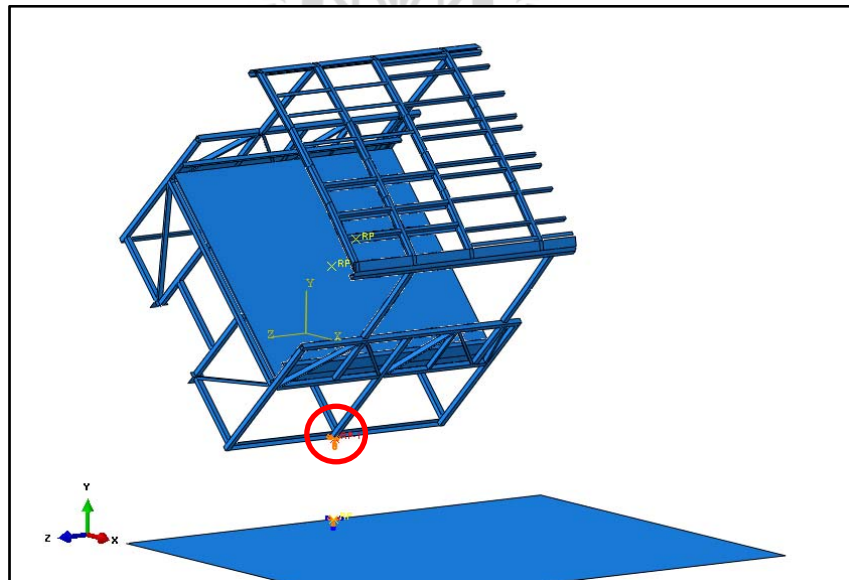
ใส่แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อวัตถุ โดยแบ่งออกเป็นดังนี้

1. Gravity ใส่ค่าแรงโน้มถ่วงของโลกเพื่อให้โครงสร้างสามารถตกลงมากระทบพื้นได้อย่างอิสระ โดยค่าแรงโน้มถ่วงนี้มีค่าเท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$
2. กำหนด boundary condition ใน initial step ของพื้นให้เป็นแบบ Encastre เพื่อให้พื้นยึดติดอยู่กับที่



รูปที่ 3.10 Boundary Condition ของพื้นแบบ Encastre

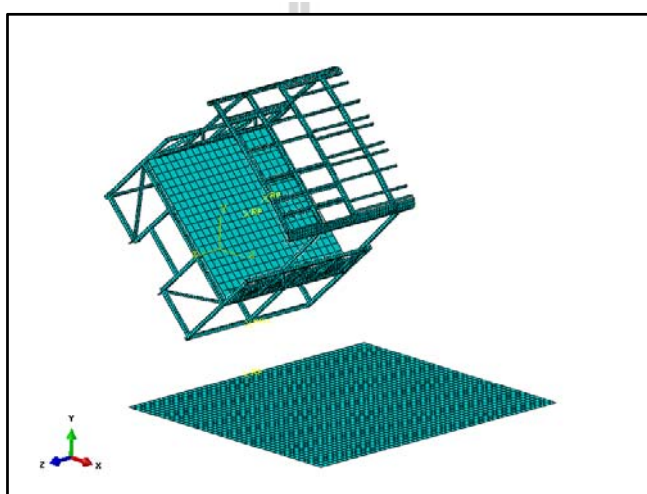
3. กำหนด boundary condition ใน initial step ของโครงสร้างโดยให้ค่า  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $UR_1$  และ  $UR_2$  มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อให้โครงสร้างตกลงมากระทบพื้นในแนวที่ต้องการ



รูปที่ 3.11 Boundary Condition ที่ขอบของโครงสร้างรถโดยสาร

### 3.2.7 Mesh

การกำหนดเอลิเมนต์ของโครงสร้างมีทั้งแบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมจะนิยมใช้กันมากเนื่องจากสามารถทำได้ง่าย แต่เอลิเมนต์ที่เหมาะสมแก่การวิเคราะห์คือเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมเนื่องจากสามารถให้ลักษณะการกระจายได้โค้งมนที่ซับซ้อนกว่า ในงานวิจัยนี้จะมีเอลิเมนต์ทั้งแบบสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมเพราะ โครงสร้างบางจุดไม่สามารถใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมได้ จึงมีการปรับแต่งเอลิเมนต์จุดต่าง ๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ จากนั้นตั้งชื่อไฟล์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล



รูปที่ 3.12 การ Mesh โครงสร้างรถโดยสารและพื้นตกกระทบ

### 3.2.8 Visualization

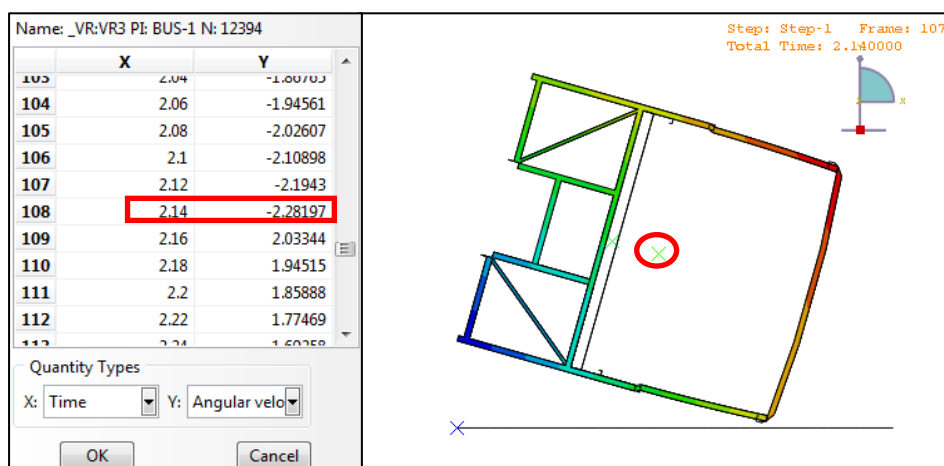
Module นี้เป็น Module ไว้สำหรับดูค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ข้างต้น ซึ่ง VR ที่จุด reference point ของโครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.28197 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.14 วินาที



รูปที่ 3.13 ค่า VR3 ณ เวลา 2.14 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างเดิมก่อนกระทบพื้น

### 3.3 การวิเคราะห์โครงสร้างเดิมของรถโดยสารช่วงกระทบพื้น

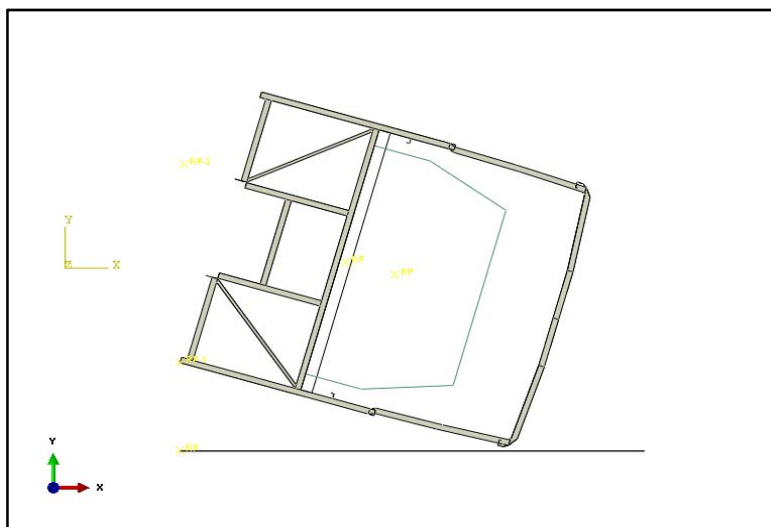
การวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารช่วงกระทบพื้นนี้ การใส่เงื่อนไขข้อกำหนดในการวิเคราะห์ต่าง ๆ มีรายละเอียดค่อนข้างคล้ายกันกับการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารช่วงก่อนกระทบพื้น แต่จะมีการปรับเปลี่ยนรายละเอียดเล็กน้อยเพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อลักษณะของการวิเคราะห์

#### 3.3.1 Part

ในการวิเคราะห์โครงสร้างช่วงก่อนกระทบพื้นนั้นเรากำหนดโครงสร้างให้เป็นแบบ Rigid เพื่อความรวดเร็วในการวิเคราะห์เนื่องจากช่วงก่อนกระทบพื้นยังไม่มีแรงที่มากระทำต่อโครงสร้างให้เกิดความเสียหาย แต่เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างช่วงกระทบพื้น โครงสร้างจะได้รับแรงกระทำที่ก่อให้เกิดการเสียรูปต่อโครงสร้าง ดังนั้นเราจึงต้องเปลี่ยนชนิดของโครงสร้างจากแบบ Rigid ให้เป็นแบบ Deformable เพื่อให้สามารถมองเห็นลักษณะของการเสียรูปได้

#### 3.3.2 Assembly

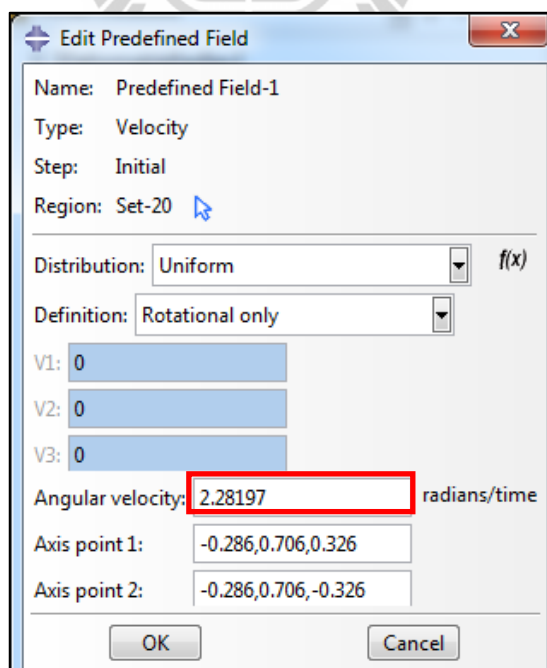
การวิเคราะห์โครงสร้างเดิมช่วงกระทบพื้นนี้เป็นการวิเคราะห์ต่อเนื่องจากการวิเคราะห์โครงสร้างเดิมช่วงก่อนกระทบพื้น ดังนั้นค่าเริ่มต้นของการเอียงรถในการวิเคราะห์นี้จึงจำเป็นต้องเอียงรถให้เท่ากับหรือใกล้เคียงค่าสุดท้ายก่อนรถกระทบพื้นของการวิเคราะห์ช่วงก่อนกระทบพื้น



รูปที่ 3.14 โครงสร้างรถโดยสารช่วงก่อนกระทบพื้น

### 3.3.3 Predefined Field

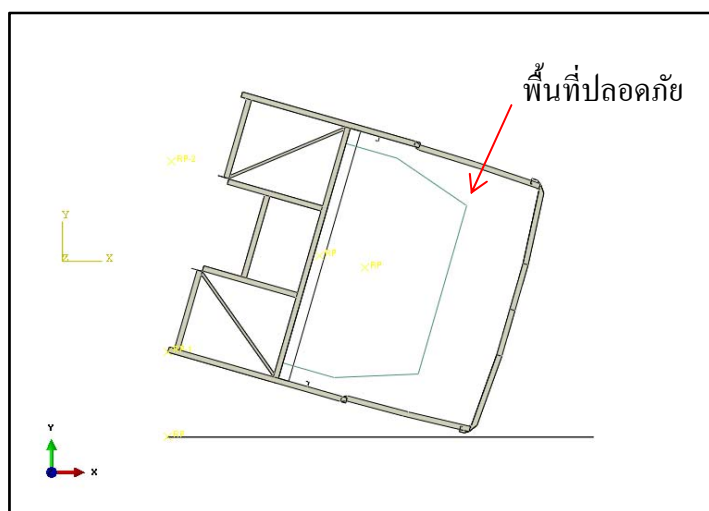
กำหนดค่าความเร็วเชิงมุมที่หาได้จากการวิเคราะห์ช่วงก่อนกระทบพื้น มีค่าเท่ากับ 2.28197 radians/time



รูปที่ 3.15 ค่าความเร็วเชิงมุม

### 3.3.4 Residual Space

ห้องโดยสารเป็นบริเวณที่มีคนขับและผู้โดยสารอาศัยอยู่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างพื้นที่ปลอดภัยเพื่อคูโครงสร้างที่วิเคราะห์ได้ว่ามีชิ้นส่วนใดยุบหรือเสียหายเข้าไปในพื้นที่ปลอดภัยที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้โดยสารหรือไม่ โดยขนาดของพื้นที่ปลอดภัยสามารถดูได้จาก ECE R66 จากนั้นตั้งชื่อไฟล์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล

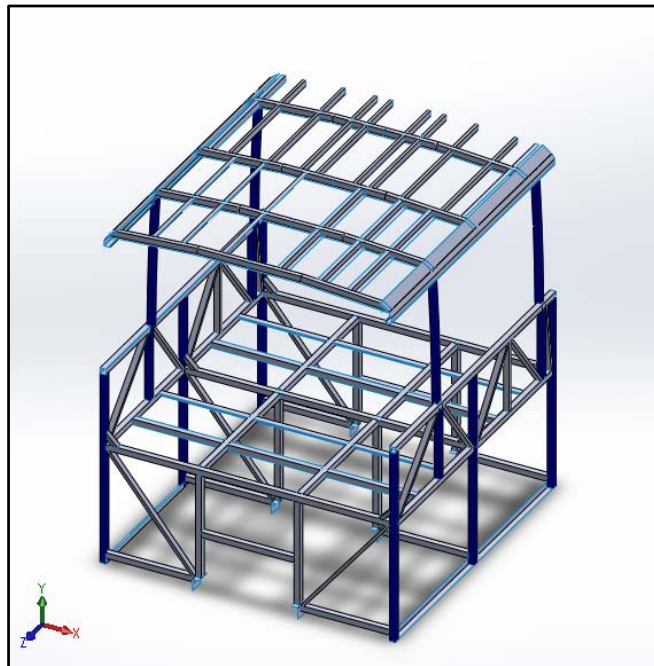


รูปที่ 3.16 พื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสาร

## 3.4 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 1

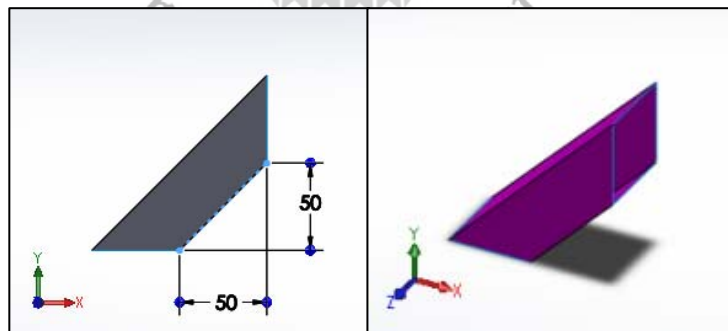
จากการวิเคราะห์โครงสร้างเดิมเพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างเกิดความเสียหายสูงที่สุด ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

- 3.4.1 เปลี่ยนขนาดความหนาหลักของเสาทั้งสิบเสาจาก 2.3 มิลลิเมตรเป็น 3.2 มิลลิเมตร

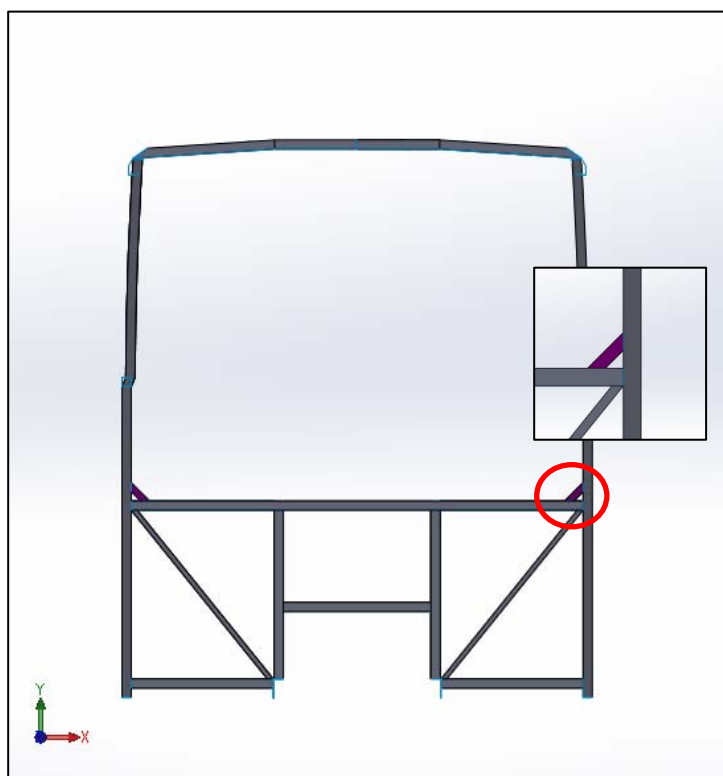


รูปที่ 3.17 โครงสร้างเดิมเสาหลัก หน้า 3.2 มิลลิเมตร

- 3.4.2 เพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร เพื่อช่วยรองรับแรงกระทำทั้งหมดทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.18 Support 1 เหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.19 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระทำที่เสาตั้งหกลเสาของโครงสร้างแบบที่ 1

### 3.4.3 Visualization

ค่า VR ที่จุด reference point ของโครงสร้างมีค่าดังนี้

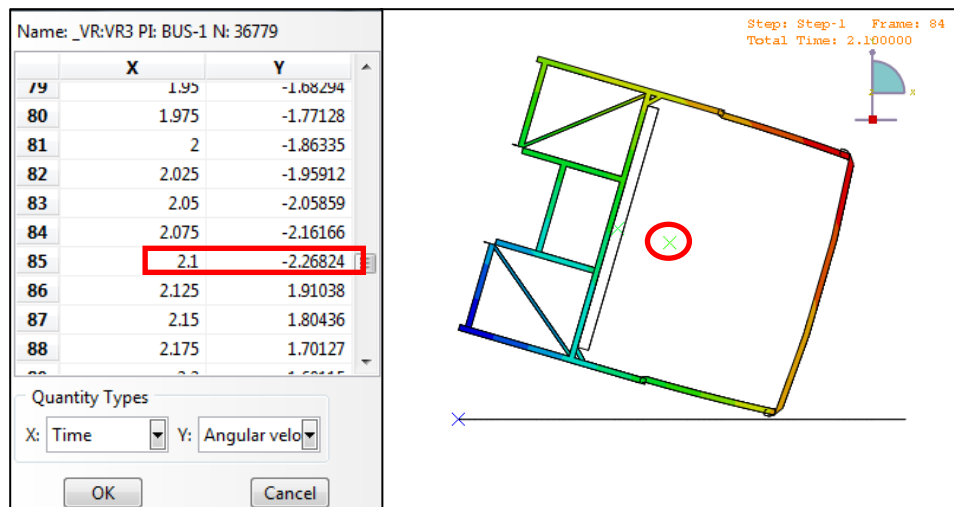
$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.26824 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อนโครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.1 วินาที





รูปที่ 3.20 ค่า VR3 ณ เวลา 2.1 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 1 ก่อนกระทบพื้น

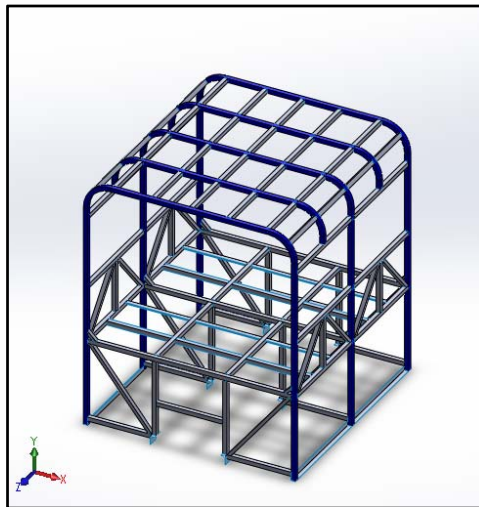
### 3.5 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 2

จากการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างใหม่ครั้งที่ 1 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่ยวบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัย ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

#### 3.5.1 เปลี่ยนแปลงโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาจากการต่อกันของเหล็กหลาย ๆ ชิ้นเป็นแบบโครงหลังคาในลักษณะเหล็กเส้นเดียวตัดโค้ง

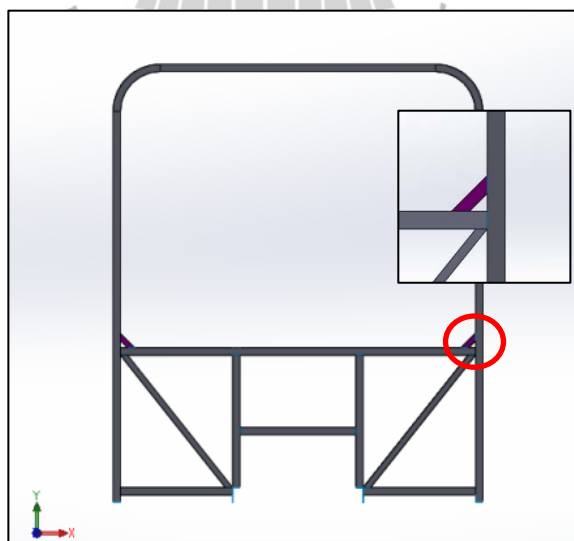
เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร เพื่อให้โครงหลังคามีความแข็งแรงจากการถูกกระแทกมากขึ้น

#### 3.5.2 แบ่ง section ให้มีขนาดเท่า ๆ กัน



รูปที่ 3.21 โครงหลังคาหลักเหล็กตัดโค้งเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตรและการแบ่ง section ของรถโดยสารให้มีขนาดเท่า ๆ กัน

- 3.5.3 เพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.18) เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.22 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของโครงสร้างแบบที่ 2

### 3.5.4 Visualization

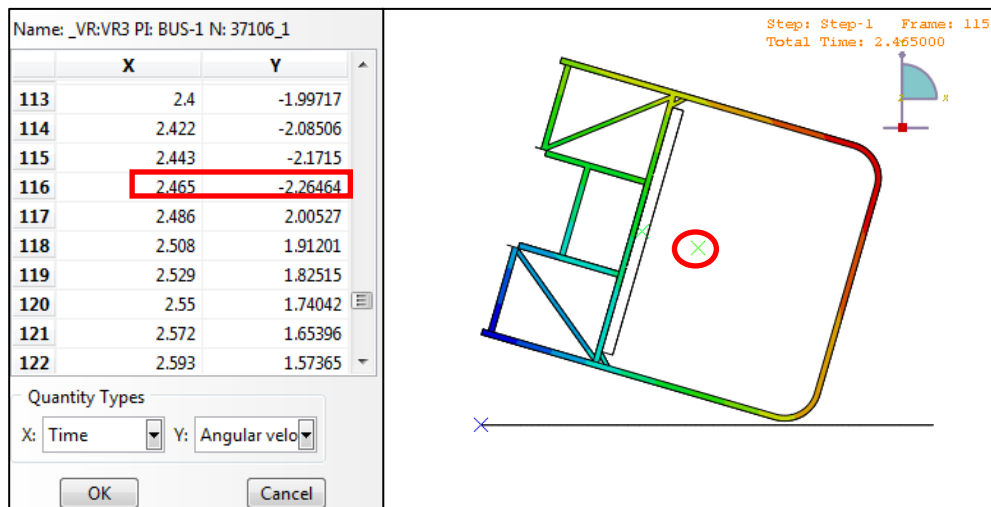
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.26464 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.465 วินาที

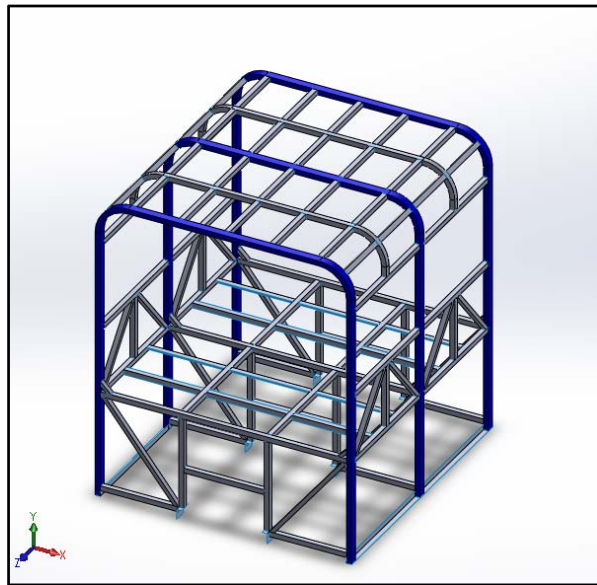


รูปที่ 3.23 ค่า VR3 ณ เวลา 2.465 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 2 ก่อนกระทบพื้น

### 3.6 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 3

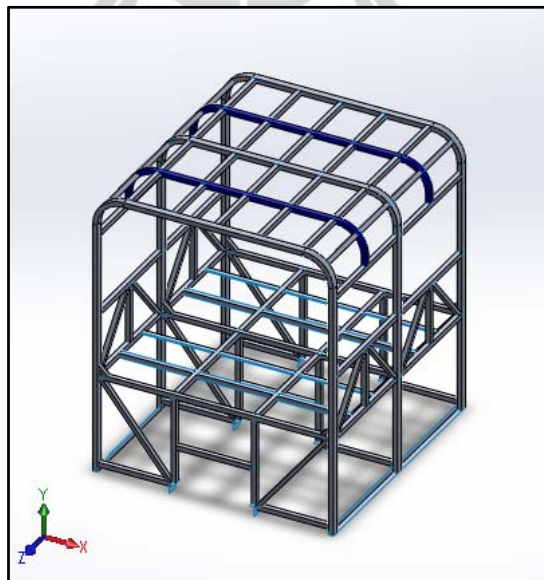
จากการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างใหม่ครั้งที่ 2 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่ยุบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

3.6.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักจากเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตรเป็น 50 x 75 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร



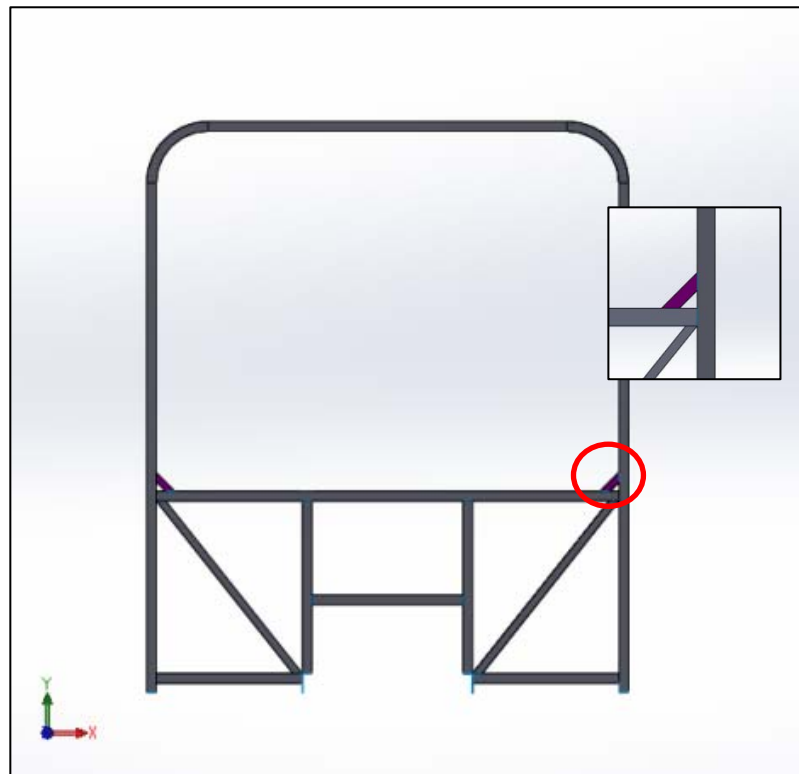
รูปที่ 3.24 โครงหลังคาหลักเหล็กตัดโค้ง เหล็กกล่องขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร

- 3.6.2 โครงหลังคาย่อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร เปลี่ยนแปลงความหนา จาก 2 มิลลิเมตรเป็น 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.25 โครงหลังคาย่อยเหล็กตัดโค้ง เหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร

- 3.6.3 เพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.18) เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.26 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 3

#### 3.6.4 Visualization

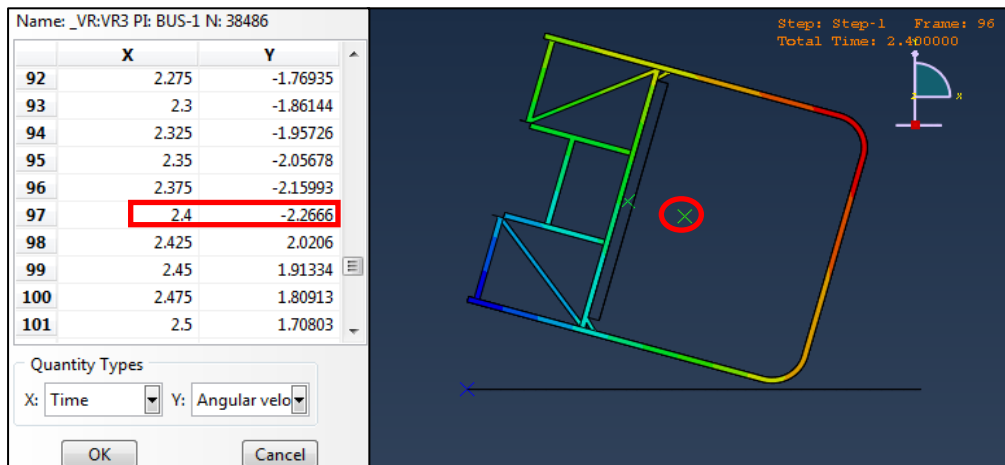
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.2666 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.40 วินาที

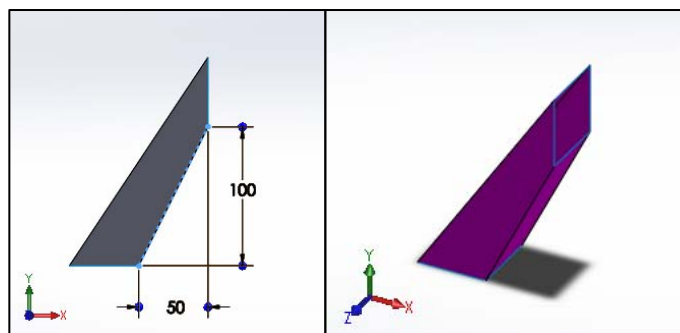


รูปที่ 3.27 ค่า VR3 ณ เวลา 2.40 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 3 ก่อนกระทบพื้น

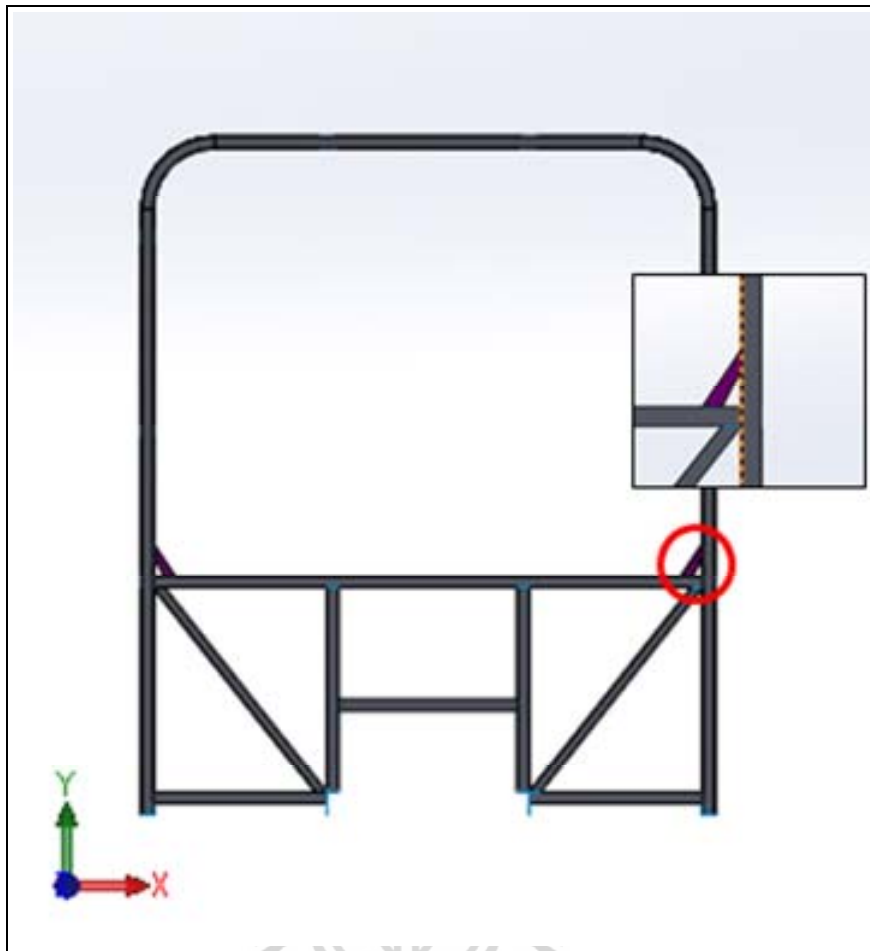
### 3.7 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 4

จากการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างใหม่ครั้งที่ 3 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่ยุบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

- 3.7.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักเป็น 50 x 75 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.24)
- 3.7.2 โครงหลังคาย่อยขนาดเหล็ก 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.25)
- 3.7.3 เพิ่ม support 2 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกทั้งหมดทำให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.28 Support 2 เหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.29 Support 2 เพื่อช่วยรองรับแรงกระทำที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 4

#### 3.7.4 Visualization

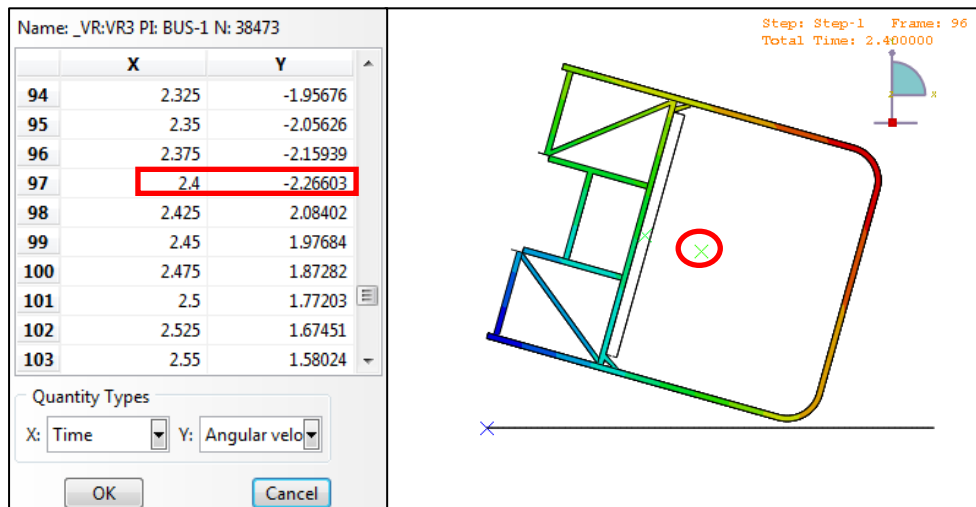
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.26603 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.40 วินาที



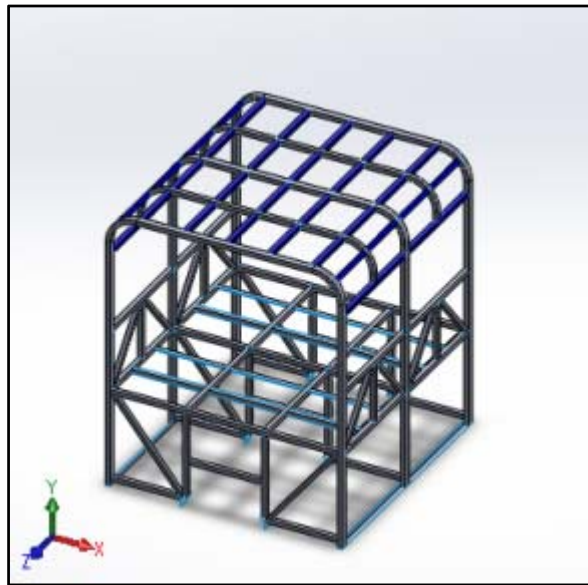
รูปที่ 3.30 ค่า VR3 ณ เวลา 2.40 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 4 ก่อนกระทบพื้น

### 3.8 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 5

จากการวิเคราะห์การออกแบบ โครงสร้างใหม่ครั้งที่ 4 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่บุบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

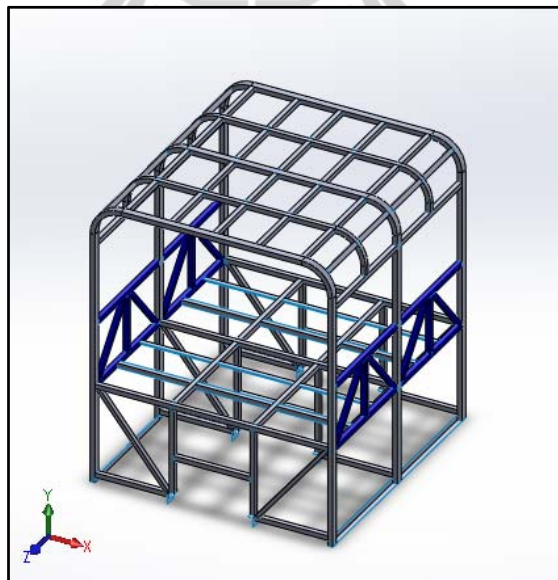
- 3.8.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักเป็น 50 x 75 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.24)
- 3.8.2 โครงหลังค้าย่อยขนาดเหล็ก 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.25)
- 3.8.3 หลังคาเหล็กท่อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร เปลี่ยนแปลงความหนาจาก 1.5 มิลลิเมตรเป็น 2 มิลลิเมตร





รูปที่ 3.31 หลังคาเหล็กท่อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร

- 3.8.4 เหล็กด้านข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร เปลี่ยนแปลงความหนาจาก 2.3 มิลลิเมตร เป็น 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.32 เหล็กด้านข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร

### 3.8.5 Visualization

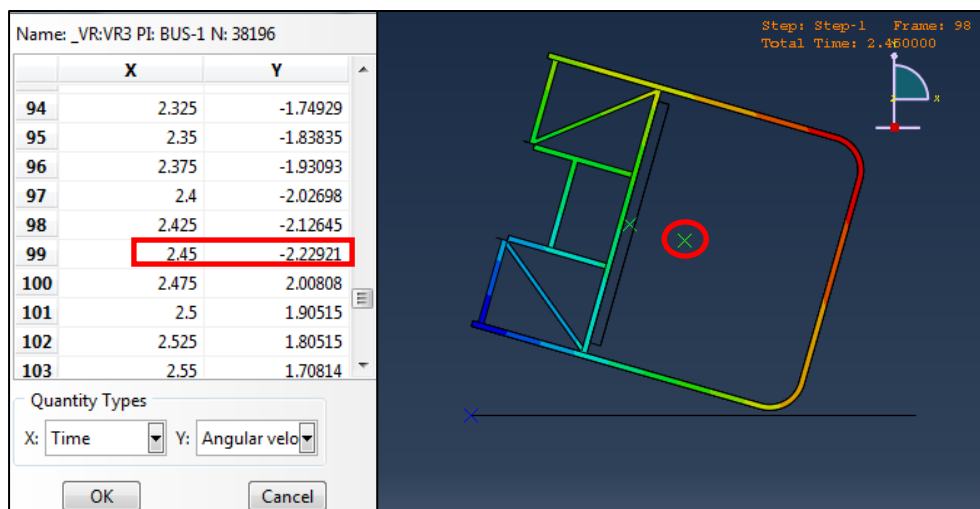
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.22921 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.45 วินาที

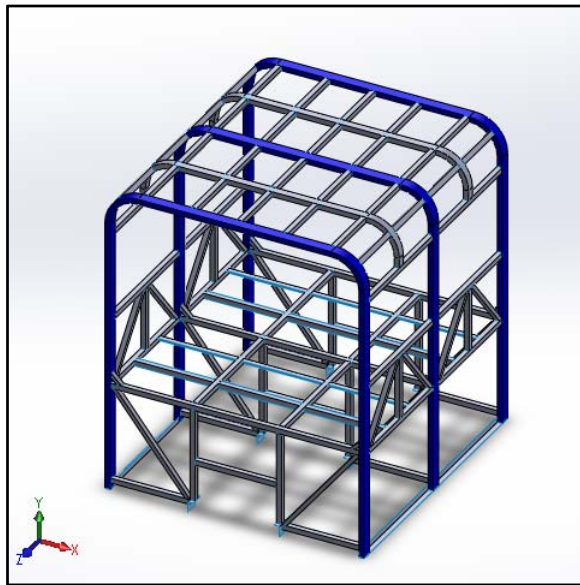


รูปที่ 3.33 ค่า VR3 ณ เวลา 2.45 วินาทีที่จุด reference point ของ โครงสร้างแบบที่ 5 ก่อนกระทบพื้น

### 3.9 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 6

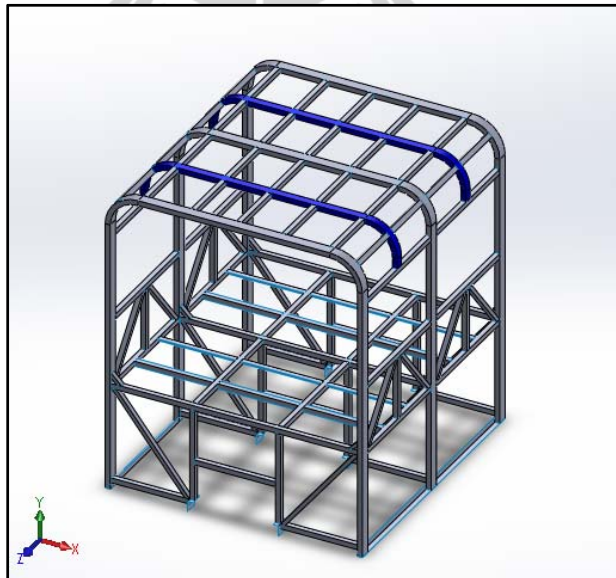
จากการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างใหม่ครั้งที่ 5 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่ยุบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

- 3.9.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักจาก 50 x 75 มิลลิเมตรเป็น 50 x 100 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร



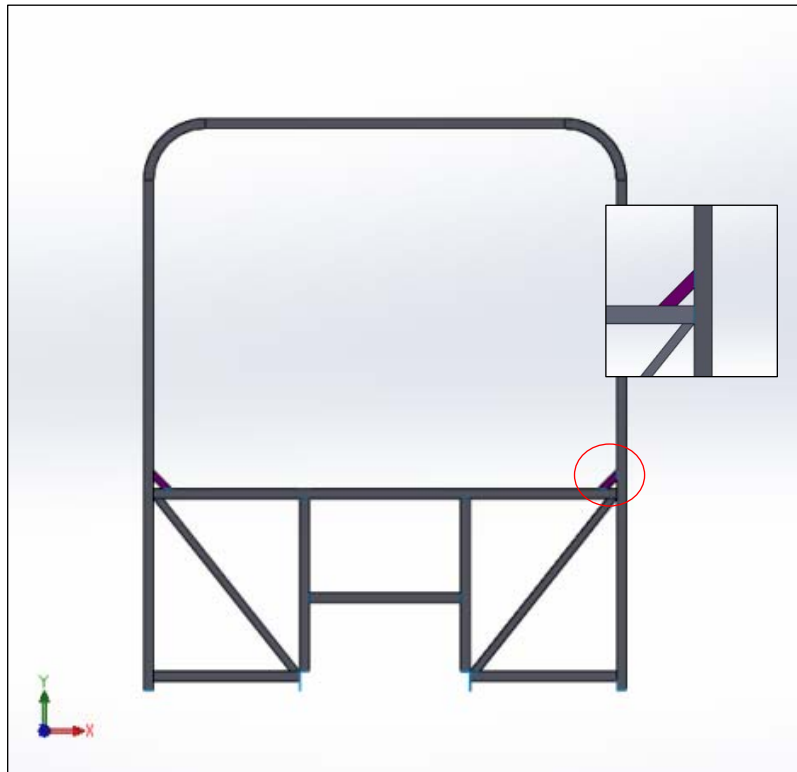
รูปที่ 3.34 โครงหลังคาหลักเหล็กตัดโค้ง ขนาดเหล็ก 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร

3.9.2 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาออกจาก 50 x 50 มิลลิเมตรเป็น 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.35 โครงหลังคาข้อยเหล็กตัดโค้ง ขนาดเหล็ก 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร

- 3.9.3 เพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.18) เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.36 Support 1 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของโครงสร้างแบบที่ 6

#### 3.9.4 Visualization

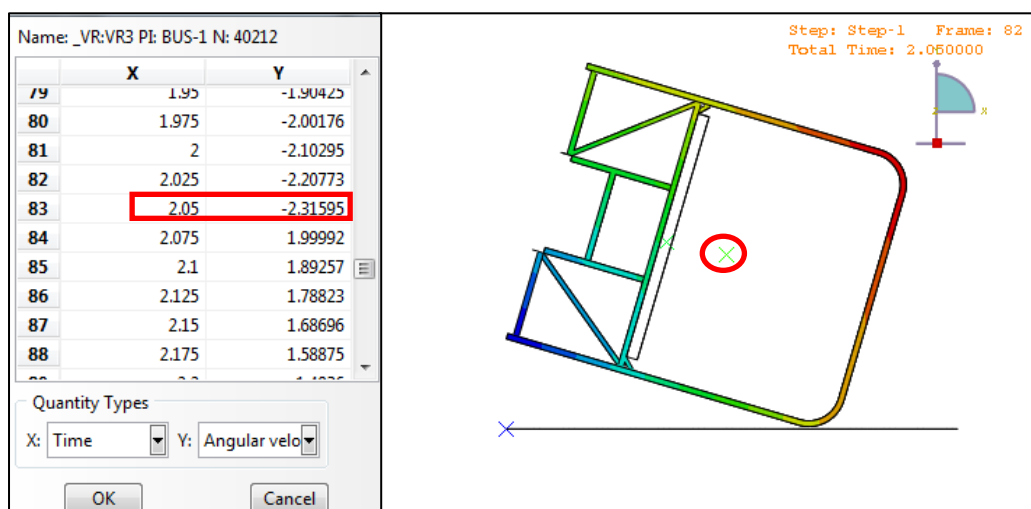
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.31595 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.05 วินาที



รูปที่ 3.37 ค่า VR3 ณ เวลา 2.05 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 6 ก่อนกระทบพื้น

### 3.10 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 7

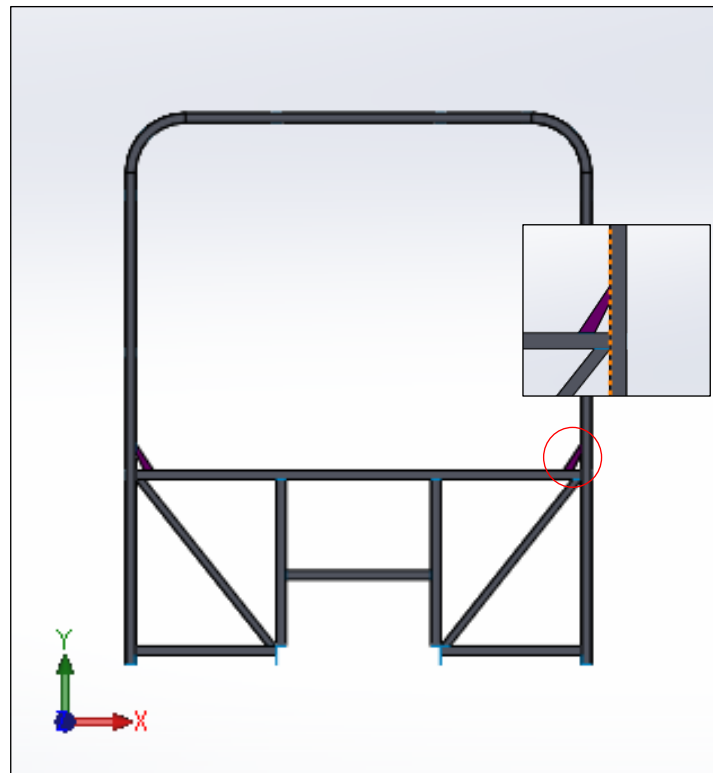
จากการวิเคราะห์การออกแบบ โครงสร้างใหม่ครั้งที่ 6 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่บุบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

3.10.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักเป็น

50 x 100 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.34)

3.10.2 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาย่อยเป็น 50 x 75 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.35)

3.10.3 เพิ่ม support 2 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.28) เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกทั้งหกเสาให้โครงสร้างมีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.38 Support 2 เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 7

#### 3.10.4 Visualization

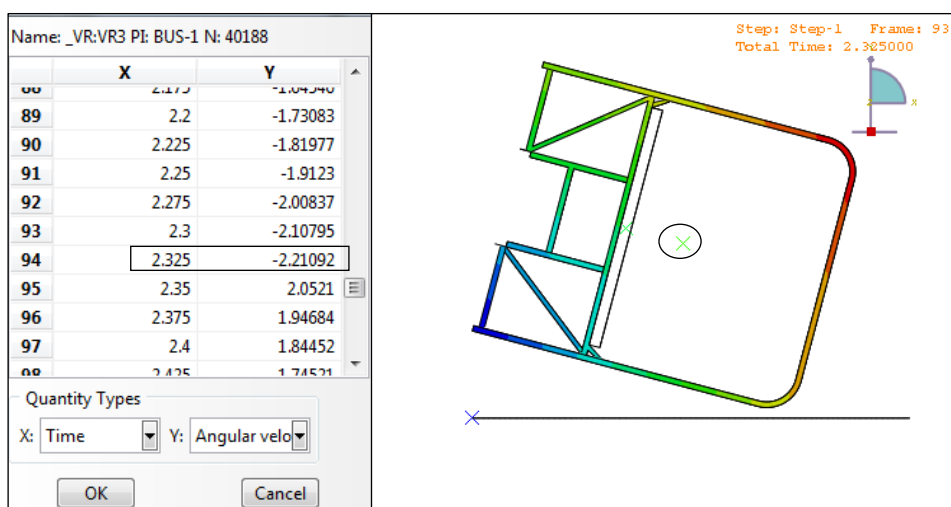
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.21092 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.325 วินาที



รูปที่ 3.39 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 7 ก่อนกระทบพื้น

### 3.11 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 8

จากการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างใหม่ครั้งที่ 7 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่ยุบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

3.11.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักเป็น

50 x 100 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.34)

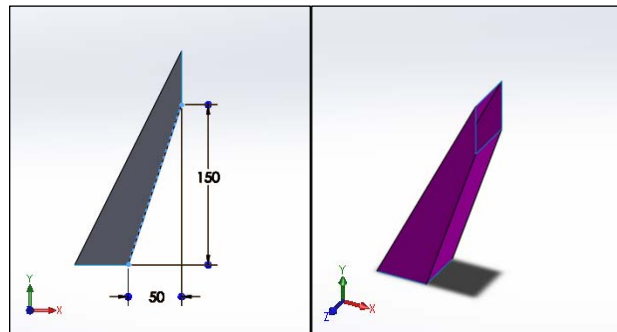
3.11.2 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังค้าย่อยเป็น 50 x 75

มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.35)

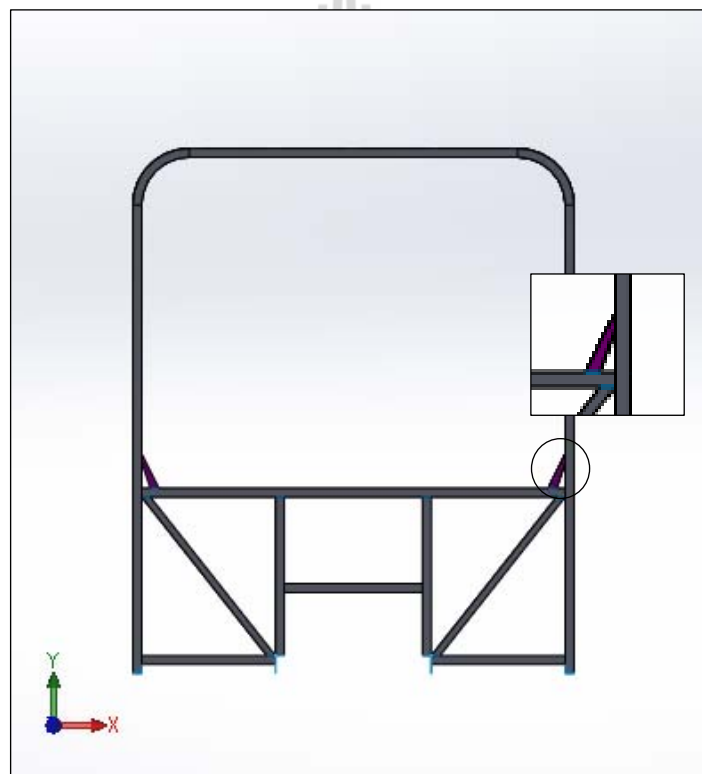
3.11.3 เพิ่ม support 3 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร

เพื่อช่วยรองรับแรงกระแทกทั้งหมดทำให้โครงสร้าง

มีความแข็งแรงมากขึ้น



รูปที่ 3.40 Support 3 เหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.41 Support 3 เพื่อช่วยรองรับแรงกระทำที่เสาทั้งหกเสาของ โครงสร้างแบบที่ 8



### 3.11.4 Visualization

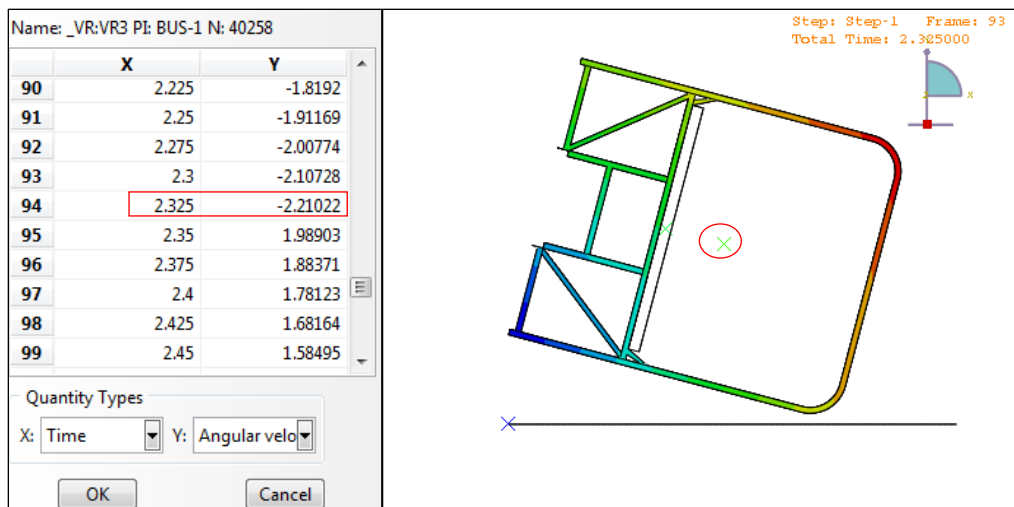
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.21022 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.325 วินาที



รูปที่ 3.42 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของ โครงสร้างแบบที่ 8 ก่อนกระทบพื้น

### 3.12 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 9

จากการวิเคราะห์การออกแบบ โครงสร้างใหม่ครั้งที่ 8 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของ โครงสร้างที่ขยับเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

3.12.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักเป็น

50 x 100 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.34)

3.12.2 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาย่อยเป็น 50 x 75

มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.35)

3.12.3 หลังคาเหล็กท่อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร เปลี่ยนแปลงความหนาจาก

1.5 มิลลิเมตรเป็น 2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.31)

3.12.4 เหล็กด้านข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร เปลี่ยนแปลงความหนาจาก 2.3 มิลลิเมตร เป็น 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.32)

### 3.12.5 Visualization

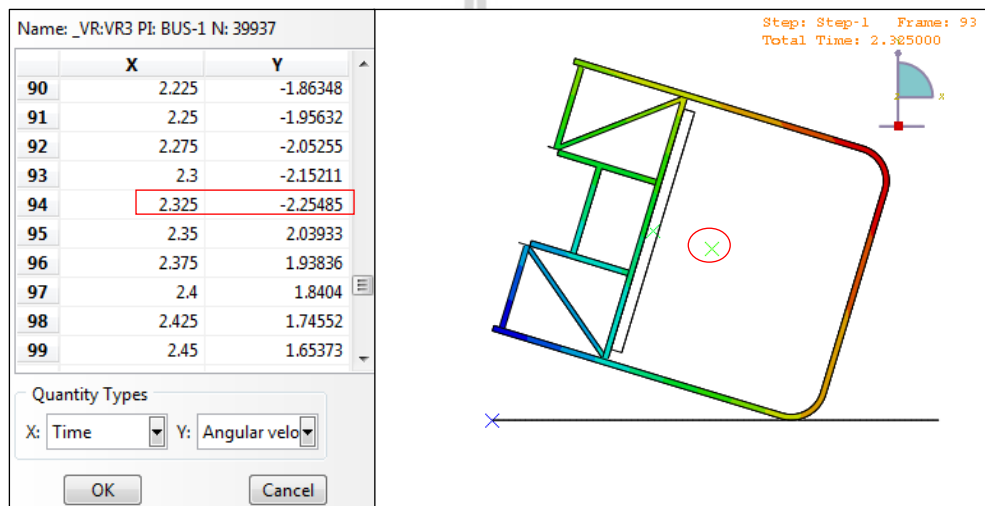
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.25485 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.325 วินาที

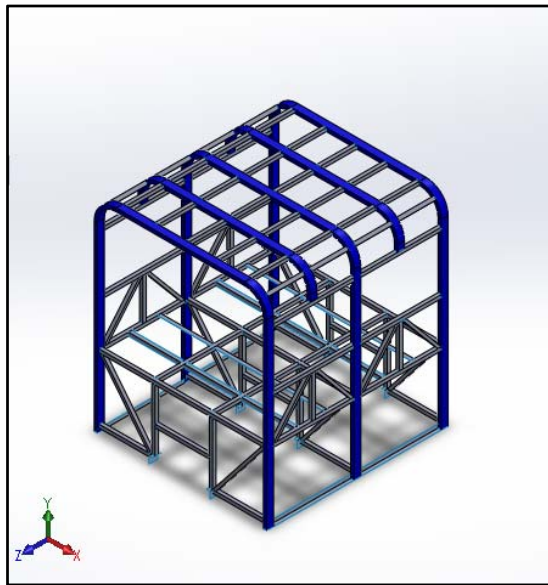


รูปที่ 3.43 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 9 ก่อนกระทบพื้น

## 3.13 ออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างใหม่ของรถโดยสารแบบที่ 10

จากการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างใหม่ครั้งที่ 9 เพื่อดูความเสียหายนั้นพบว่าบริเวณเสากลางของรถทั้งสองข้างยังเกิดความเสียหายของโครงสร้างที่ยุบเข้าไปถึงพื้นที่ปลอดภัยอยู่ ทางผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงบริเวณดังกล่าวดังนี้

3.13.1 เปลี่ยนแปลงขนาดเหล็กกล่องของโครงสร้างบริเวณโครงหลังคาหลักและโครงหลังค้าย่อยเป็น 50 x 100 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.44 โครงหลังคาหลักและโครงหลังคาย่อยเหล็กคัตโค้งขนาดเหล็ก 50 x 100 มิลลิเมตร  
หนา 3.2 มิลลิเมตร

- 3.13.2 หลังคาเหล็กท่อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร เปลี่ยนแปลงความหนาจาก 1.5 มิลลิเมตรเป็น 2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.31)
- 3.13.3 เหล็กคานข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร เปลี่ยนแปลงความหนาจาก 2.3 มิลลิเมตรเป็น 3.2 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.32)

3.13.4 Visualization

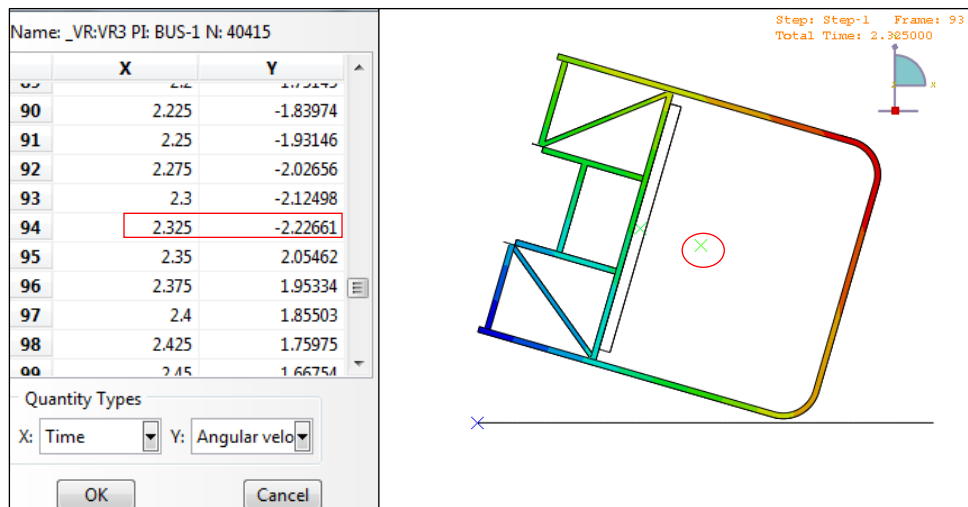
ค่า VR ที่จุด reference point ของ โครงสร้างมีค่าดังนี้

$$VR1 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR2 = 0 \quad \text{m/s}^2$$

$$VR3 = -2.22661 \quad \text{m/s}^2$$

และจากการวิเคราะห์นี้เวลาก่อน โครงสร้างตกกระทบพื้นอยู่ที่ 2.325 วินาที



รูปที่ 3.45 ค่า VR3 ณ เวลา 2.325 วินาทีที่จุด reference point ของโครงสร้างแบบที่ 10 ก่อนกระทบพื้น



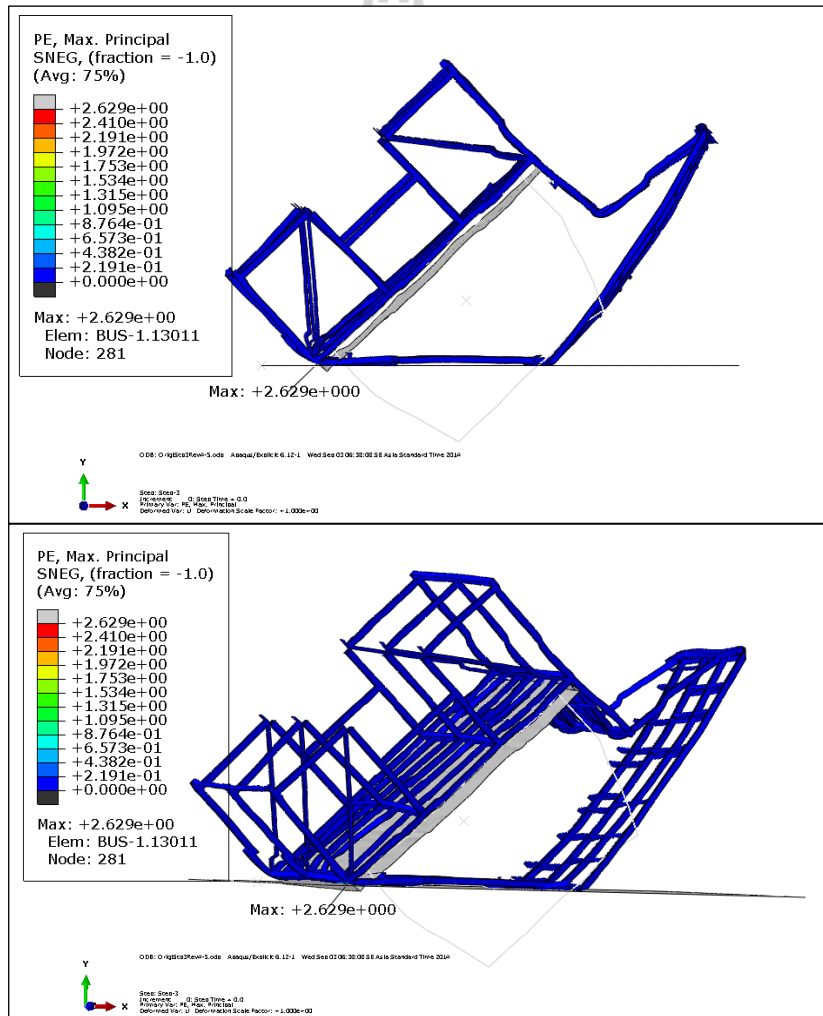
# บทที่ 4

## ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างเดิมของรถโดยสาร

#### 4.1.1 การขจัด

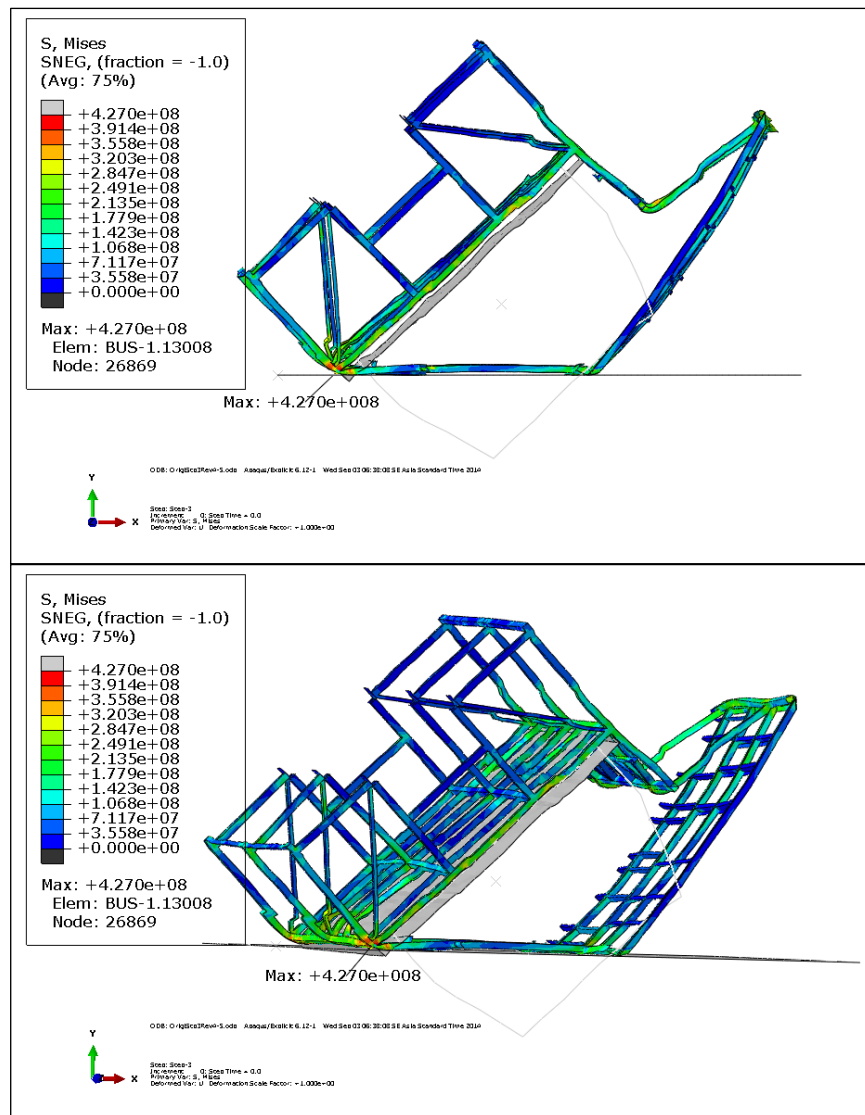
จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้ามีค่าเท่ากับ 2.629 mm. ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างเดิม ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.1.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณโครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลังมีค่าเท่ากับ 427 MPa ดังรูปที่ 4.2

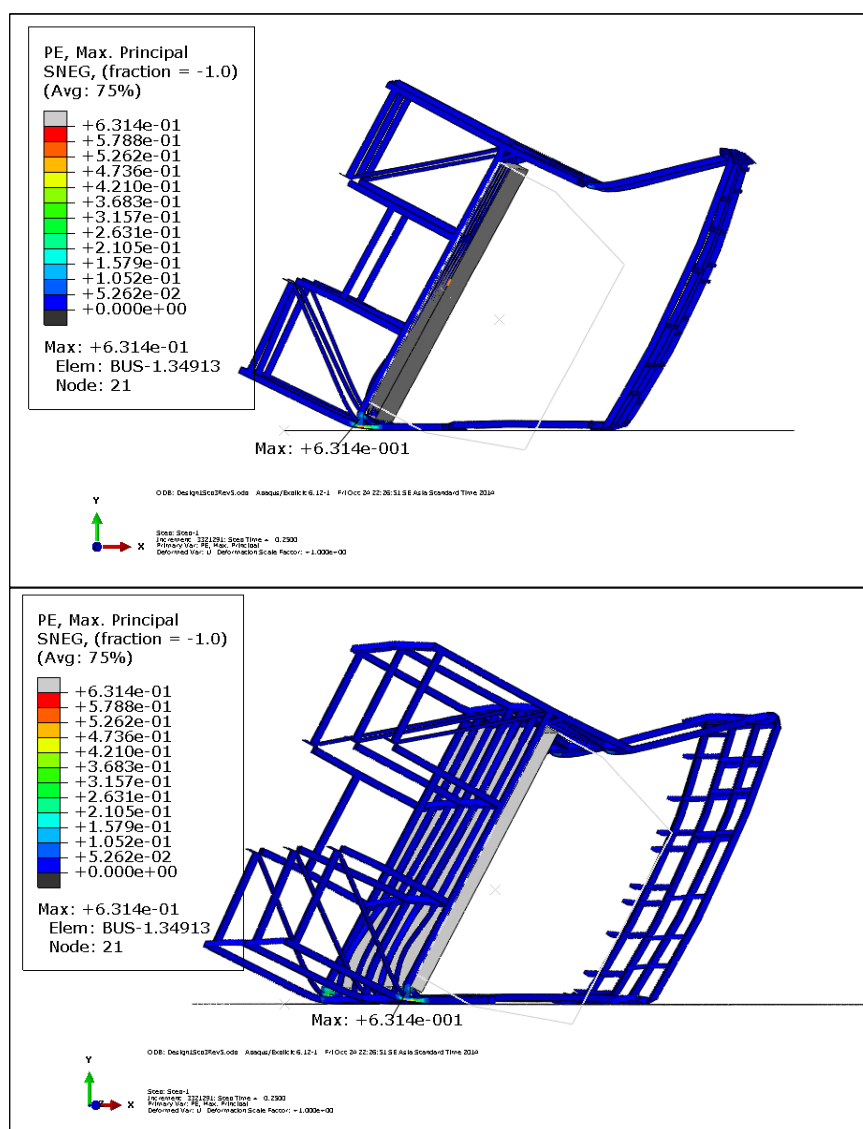


รูปที่ 4.2 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างเดิม ณ เวลา 0.5 วินาที

## 4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 1

### 4.2.1 การขจัด

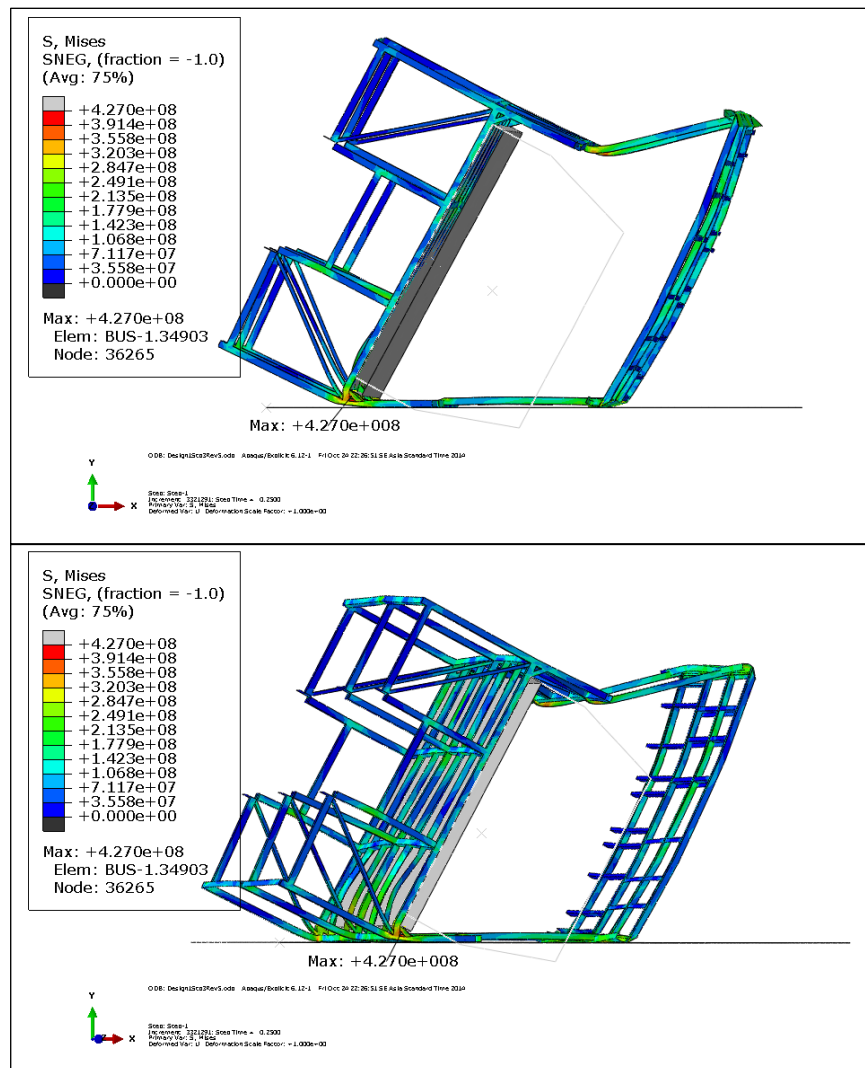
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารโดยการเพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรเพื่อช่วยรองรับแรงกระแทก ผลคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.25 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 0.6314 mm. ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 1 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.2.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.25 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 427 MPa ดังรูปที่ 4.4



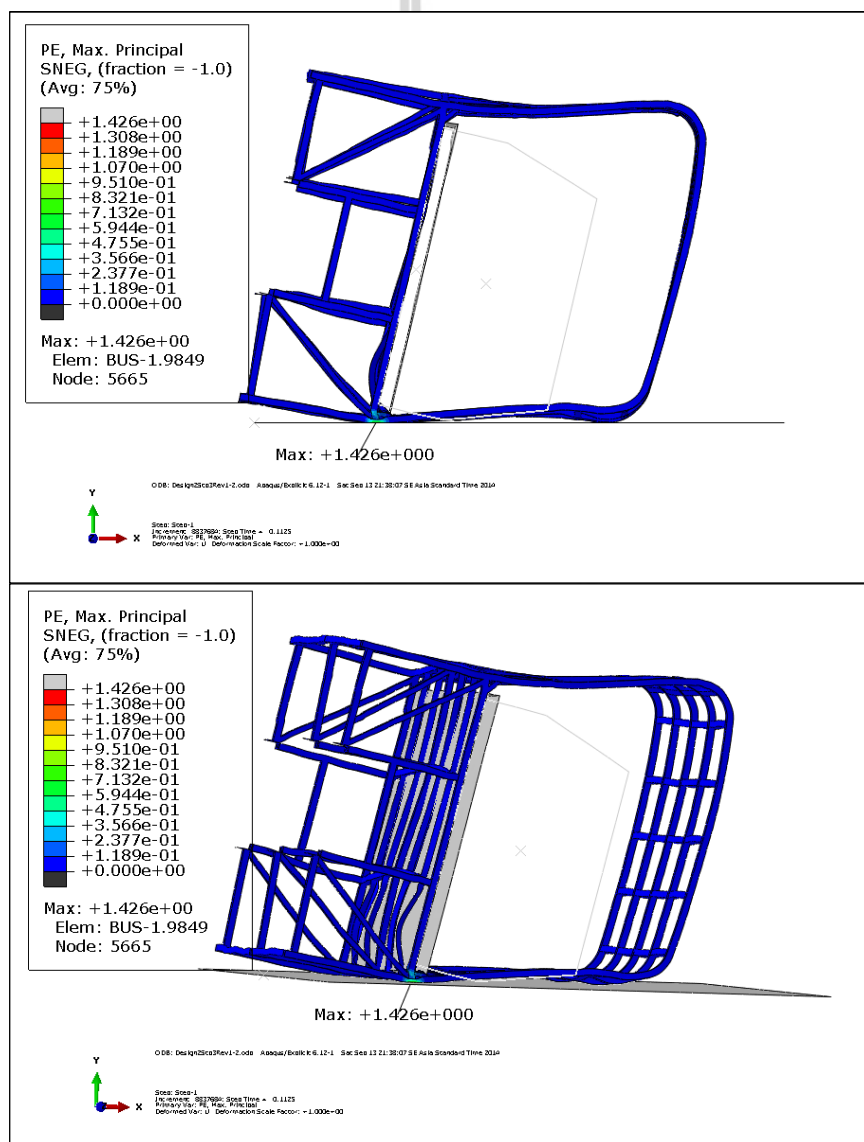
รูปที่ 4.4 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 1 ณ เวลา 0.5 วินาที



## 4.3 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 2

### 4.3.1 การขจัด

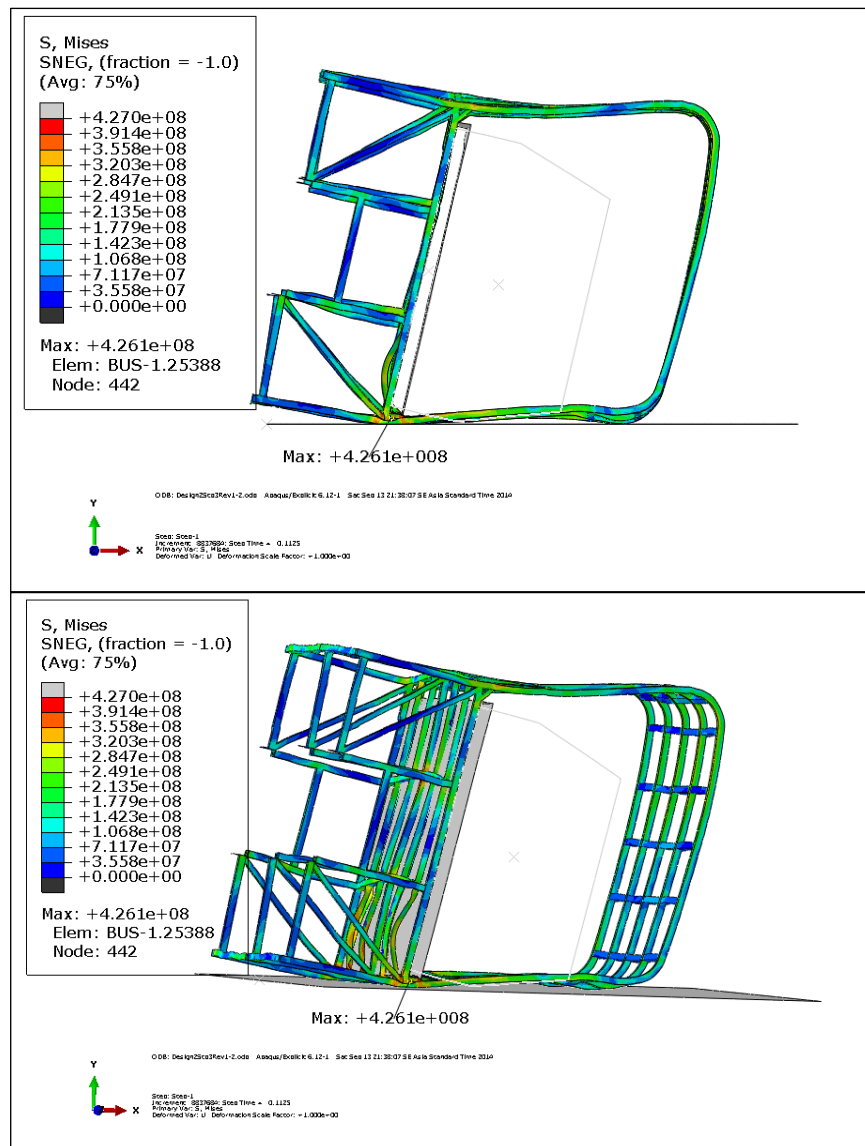
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณโครงหลังคาจากการต่อกันของเหล็กหลาย ๆ ชิ้นเป็นแบบโครงหลังคาในลักษณะเหล็กเส้นเดี่ยวตัดโค้ง เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรและเพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรเพื่อช่วยรองรับแรงกระแทก ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.25 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณโครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 1.426 mm. ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 2 ณ เวลา 0.25 วินาที

### 4.3.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.25 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 426.1 MPa ดังรูปที่ 4.6

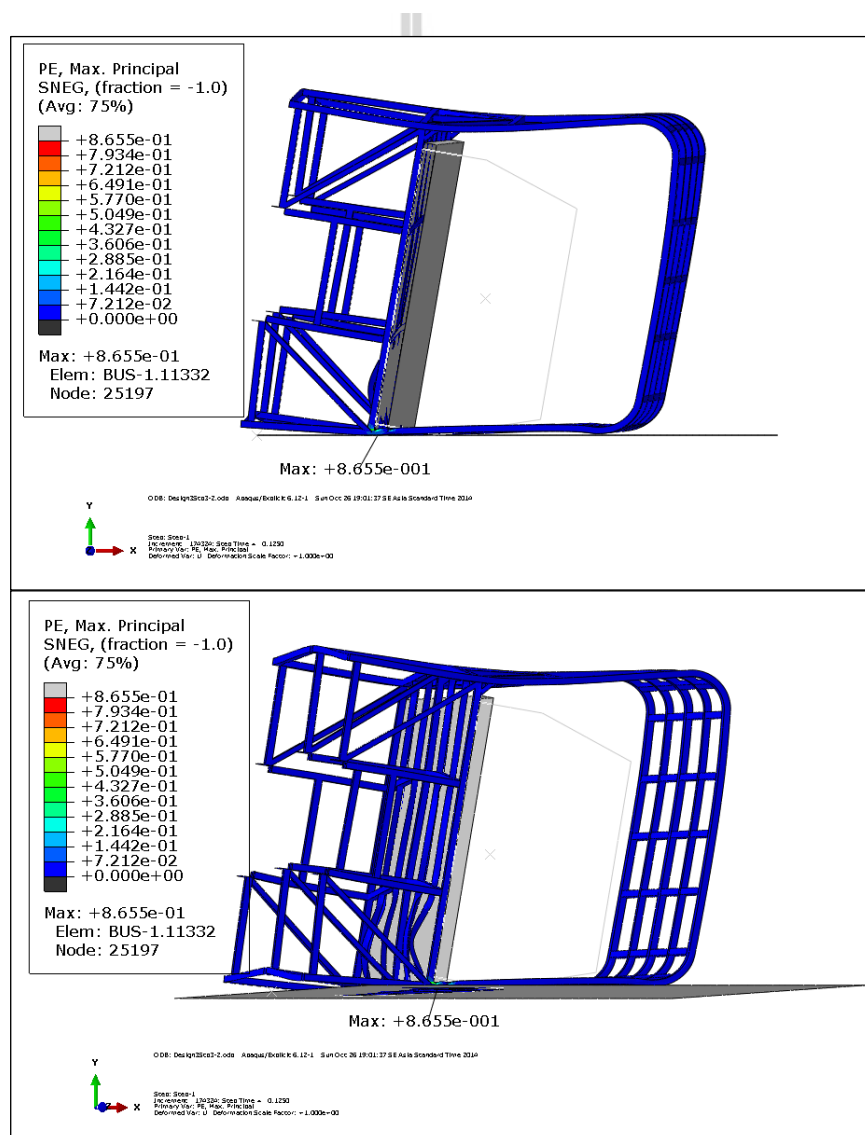


รูปที่ 4.6 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของ โครงสร้างแบบที่ 2 ณ เวลา 0.25 วินาที

## 4.4 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 3

### 4.4.1 การขจัด

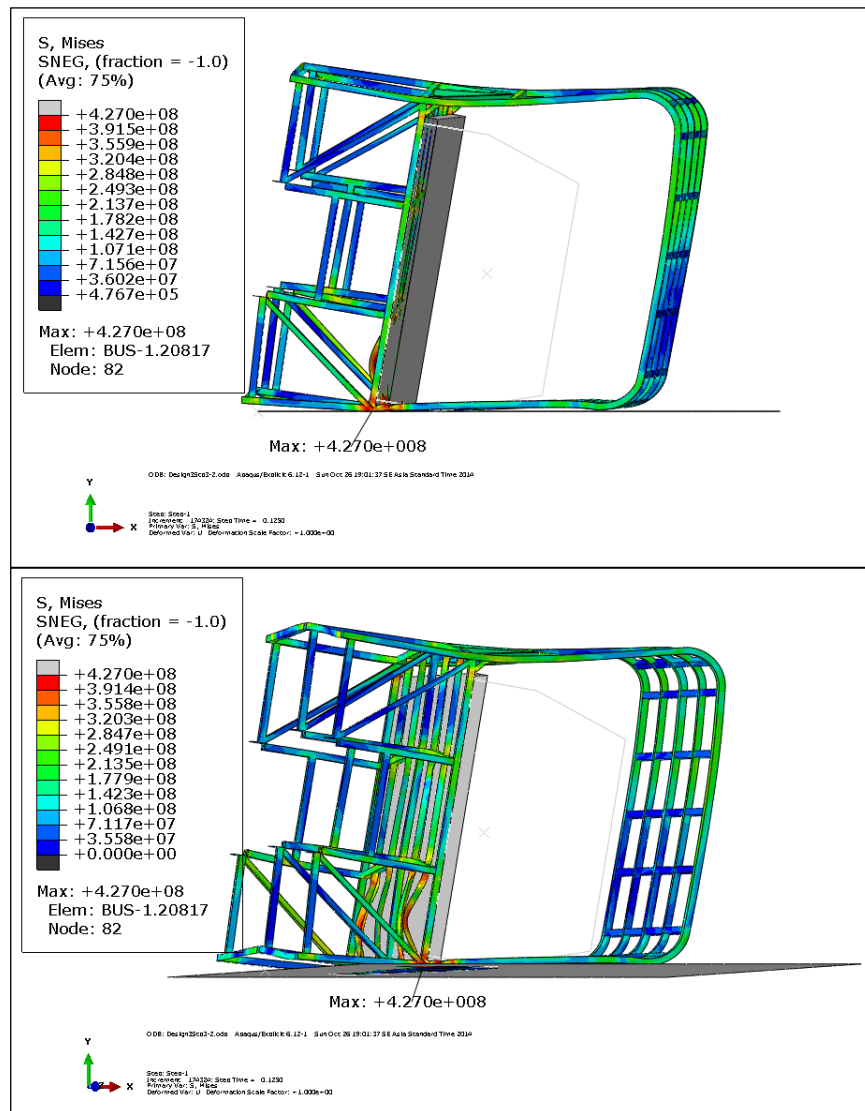
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณ โครงหลังคาหลักเป็นเหล็กกล่อง ขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร โครงหลังคาข้อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรและเพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรเพื่อช่วยรองรับแรงกระแทก ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 0.8655 mm. ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 3 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.4.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 427 MPa ดังรูปที่ 4.8

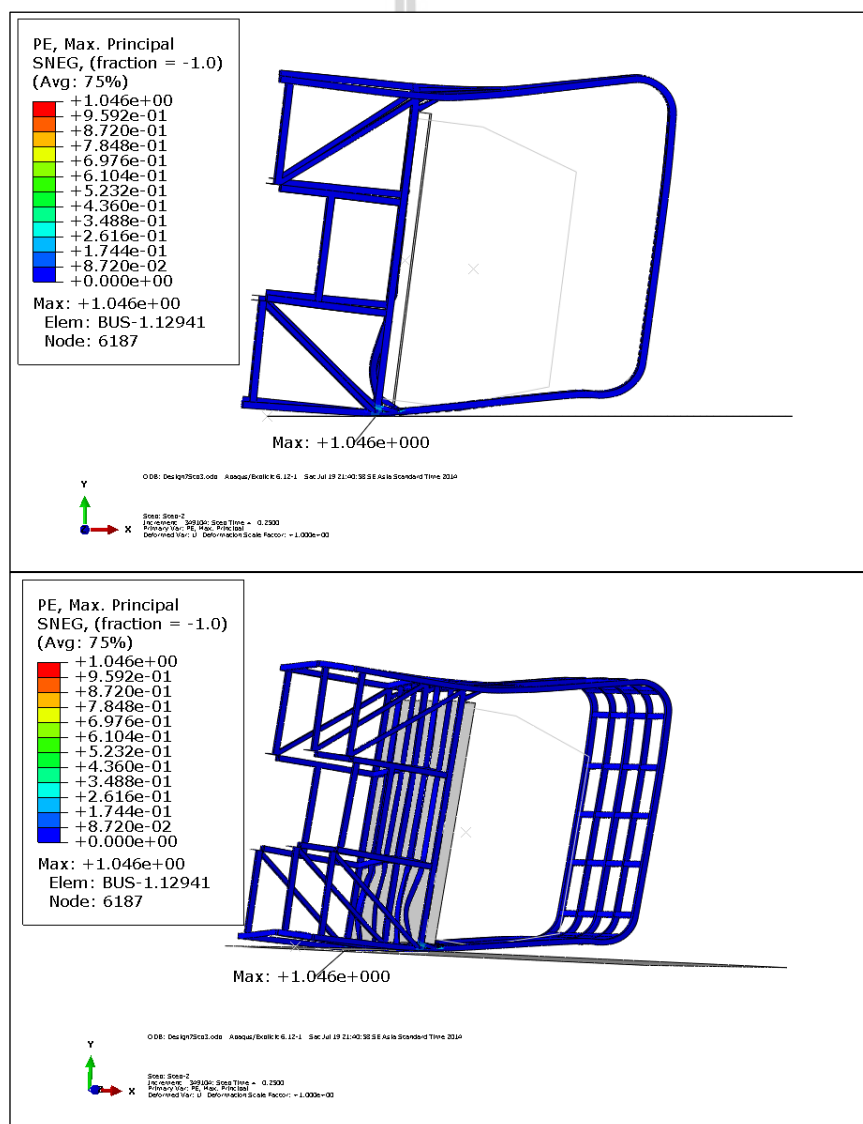


รูปที่ 4.8 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 3 ณ เวลา 0.5 วินาที

## 4.5 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 4

### 4.5.1 การขจัด

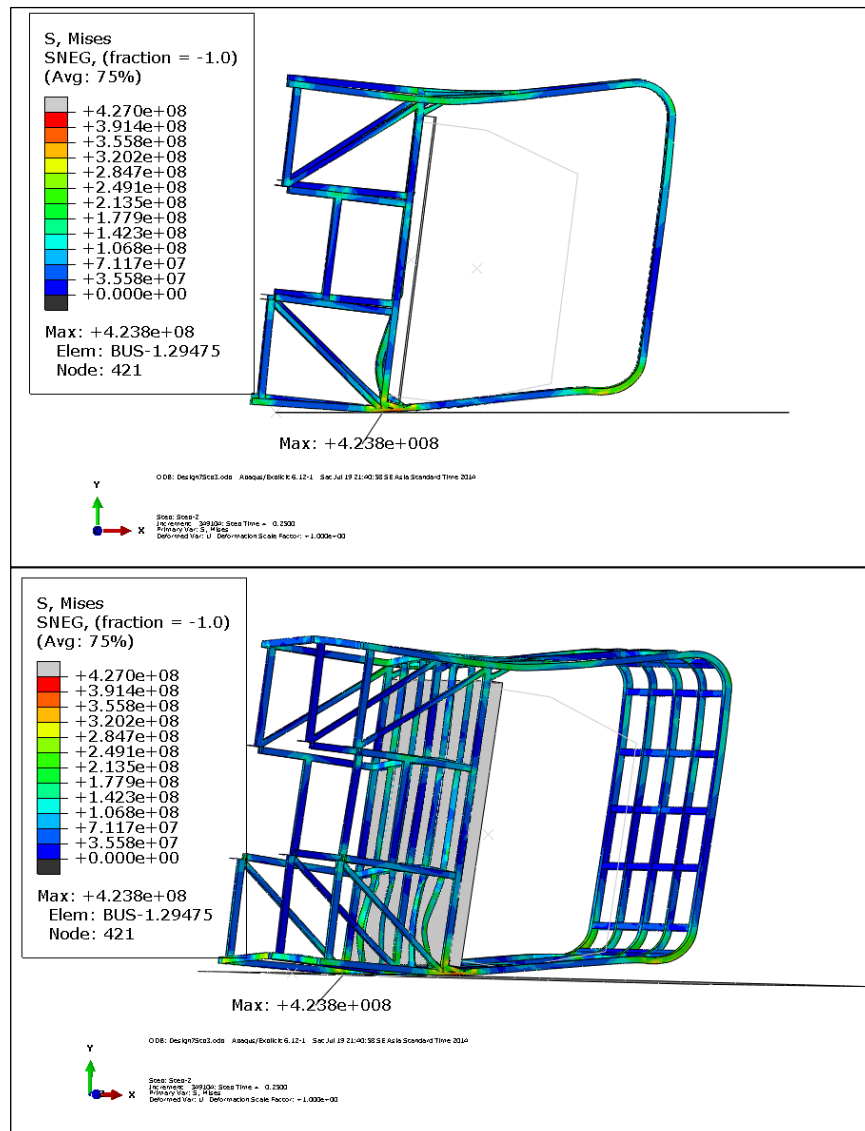
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณ โครงหลังคาหลักเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตร โครงหลังคาข้อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตรและเพิ่ม support 2 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หน้า 3.2 มิลลิเมตรเพื่อช่วยรองรับแรงกระแทก ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 1.046 mm. ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของ โครงสร้างแบบที่ 4 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.5.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 423.8 MPa ดังรูปที่ 4.10

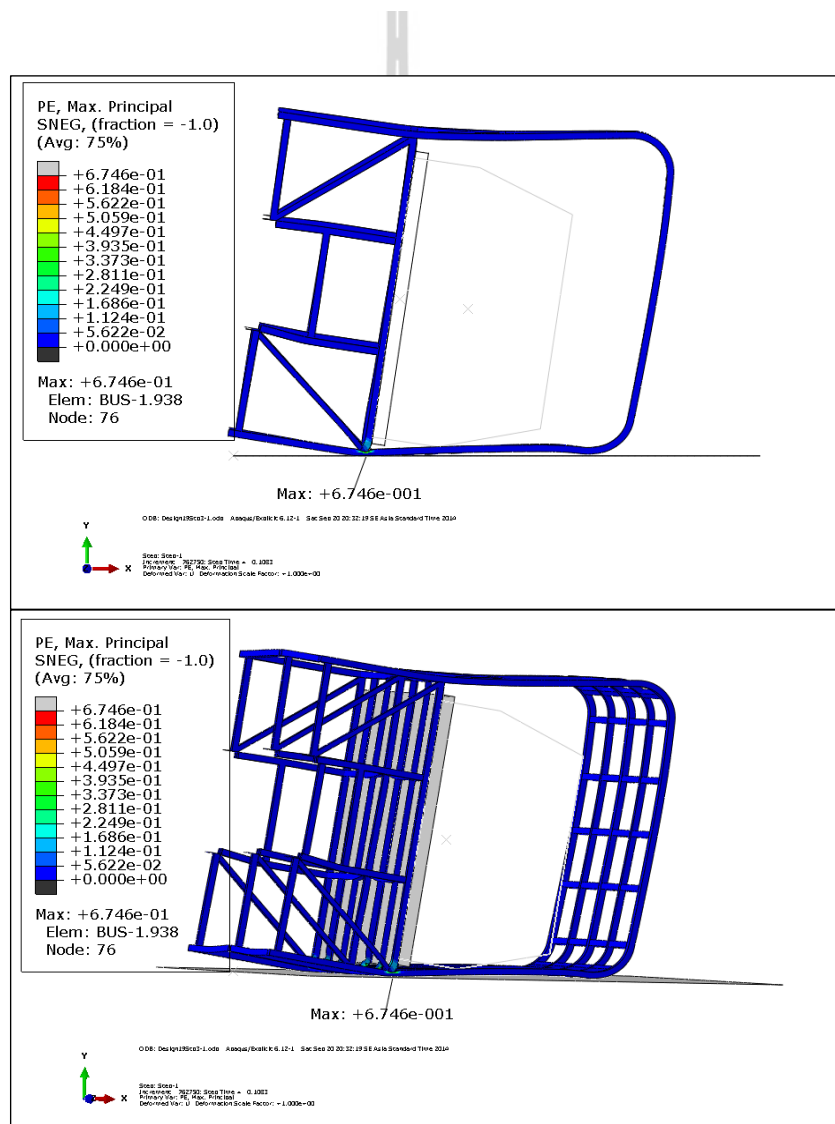


รูปที่ 4.10 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 4 ณ เวลา 0.5 วินาที

## 4.6 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 5

### 4.6.1 การขจัด

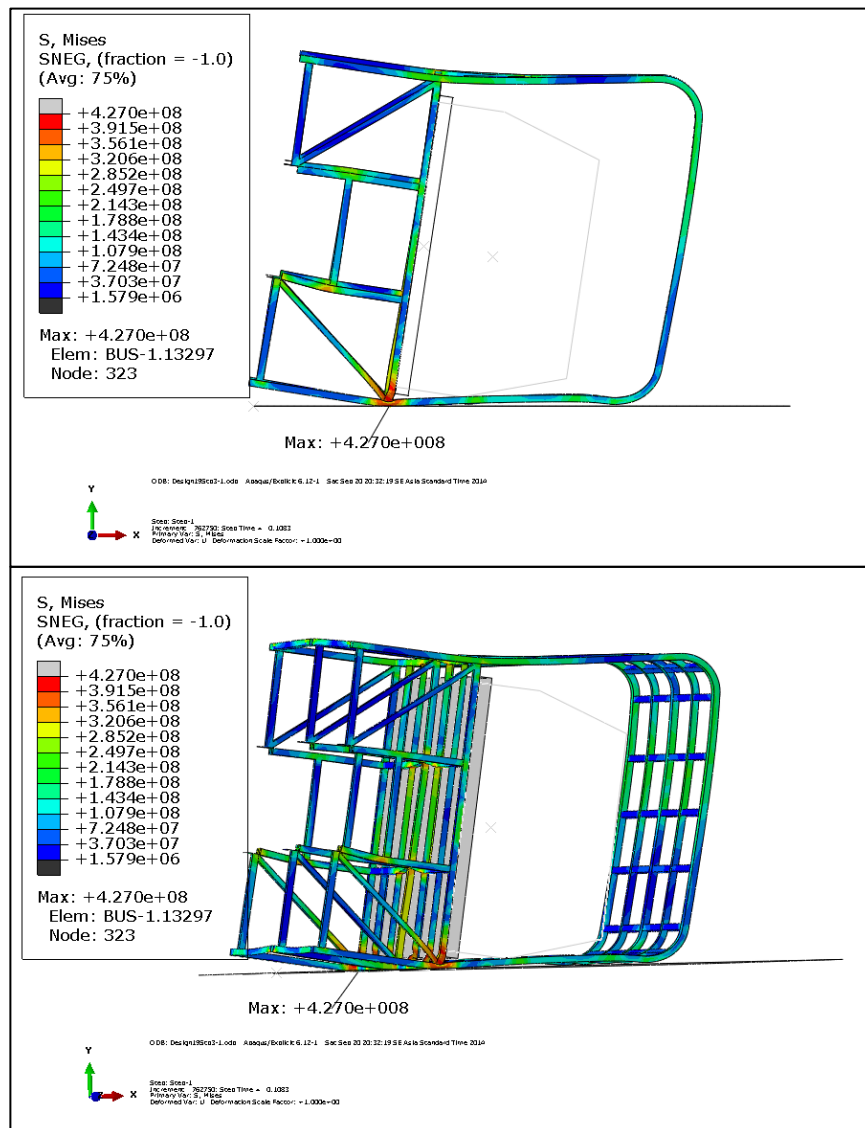
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณ โครงหลังคาหลักเป็นเหล็กกล่อง ขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร โครงหลังคาข้อย่อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร หลักคาเหล็กท่อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และ เหล็กด้านข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 0.6746 mm. ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 5 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.6.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 427 MPa ดังรูปที่ 4.12



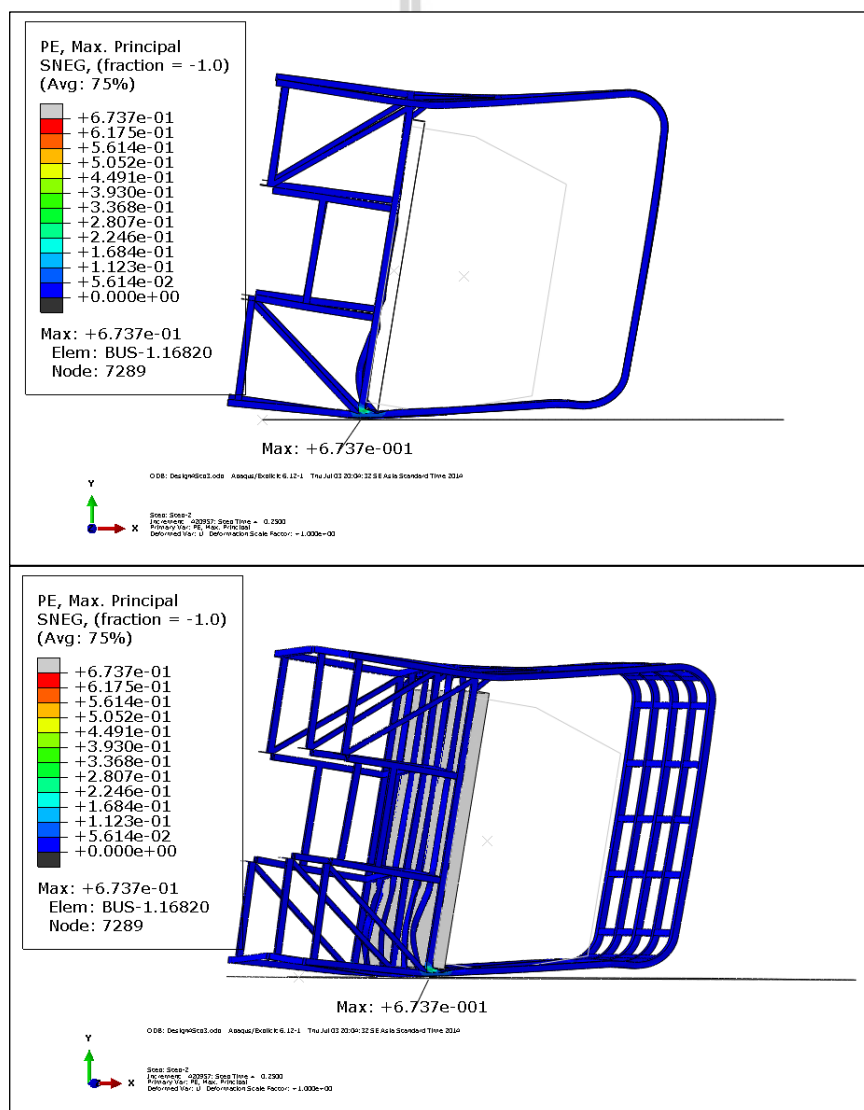
รูปที่ 4.12 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 5 ณ เวลา 0.5 วินาที



## 4.7 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 6

### 4.7.1 การขจัด

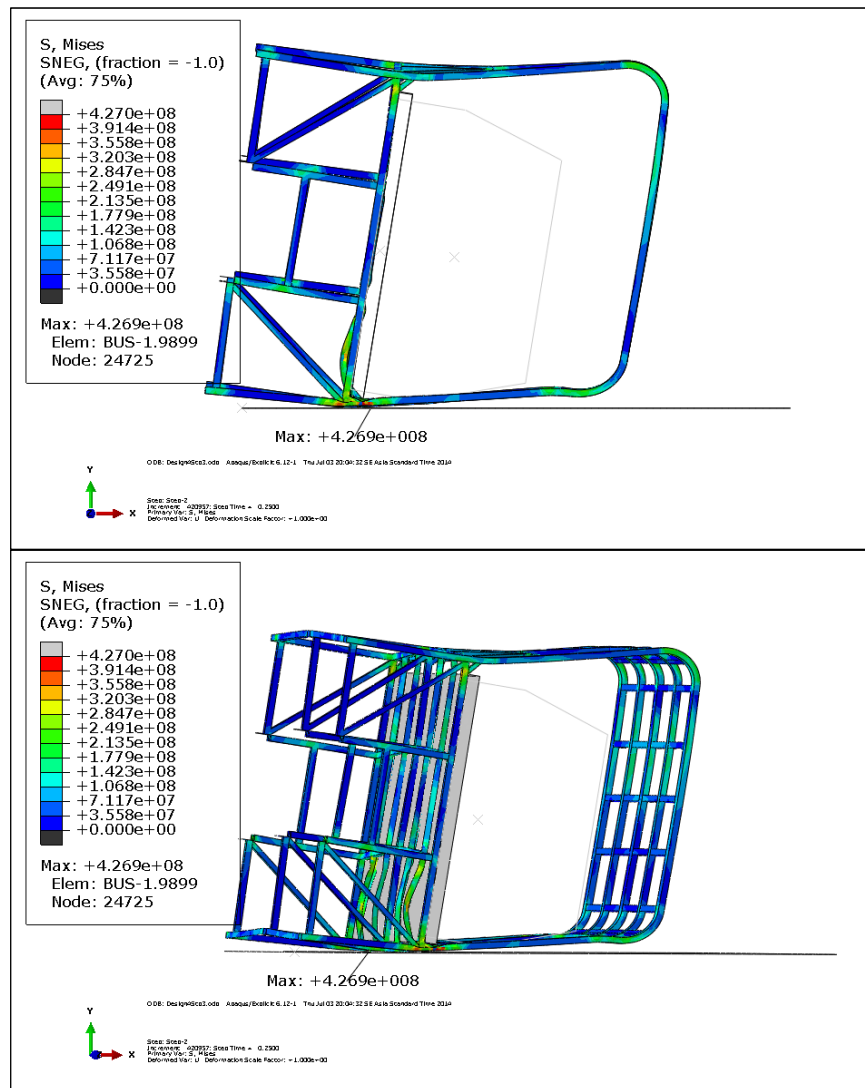
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณ โครงหลังคาหลักเป็นเหล็กกล่อง ขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร โครงหลังคาย่อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรและเพิ่ม support 1 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรเพื่อช่วยรองรับแรงกระแทก ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 0.6737 mm. ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 6 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.7.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 426.9 MPa ดังรูปที่ 4.14

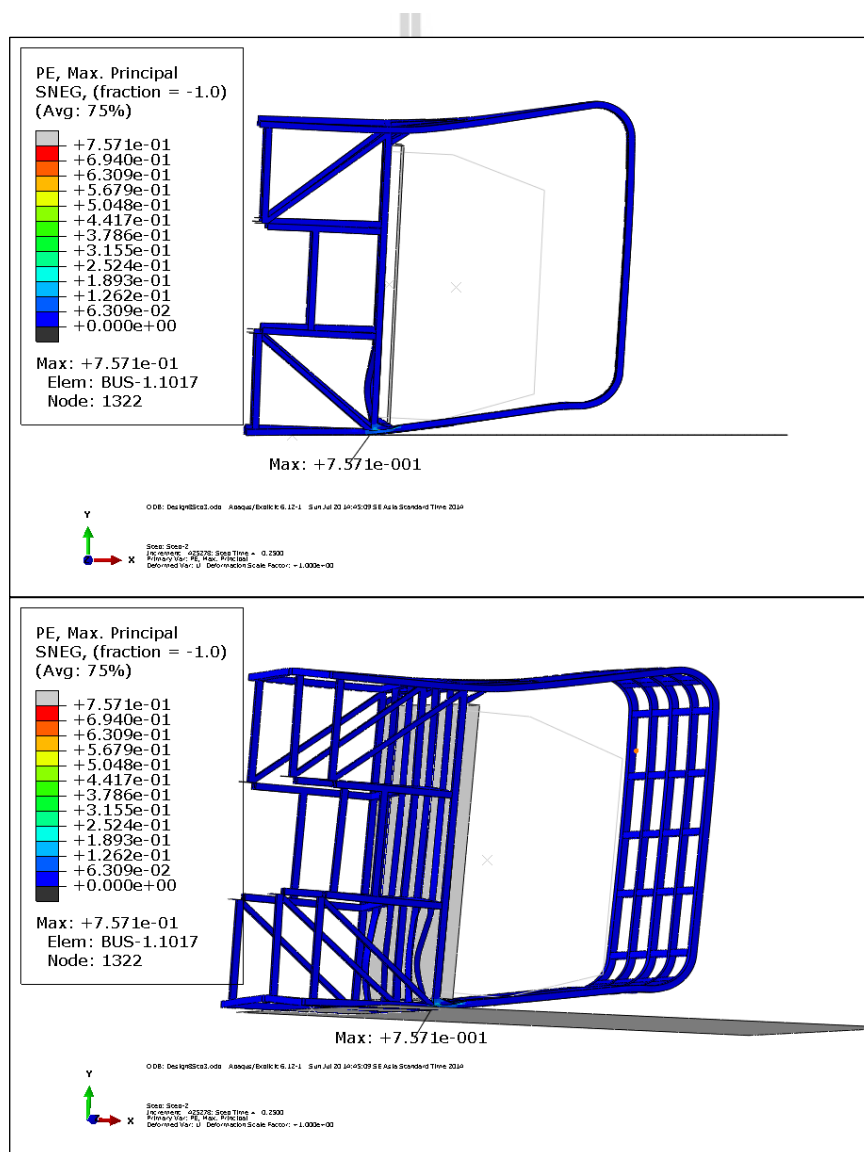


รูปที่ 4.14 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของ โครงสร้างแบบที่ 6 ณ เวลา 0.5 วินาที

## 4.8 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 7

### 4.8.1 การขจัด

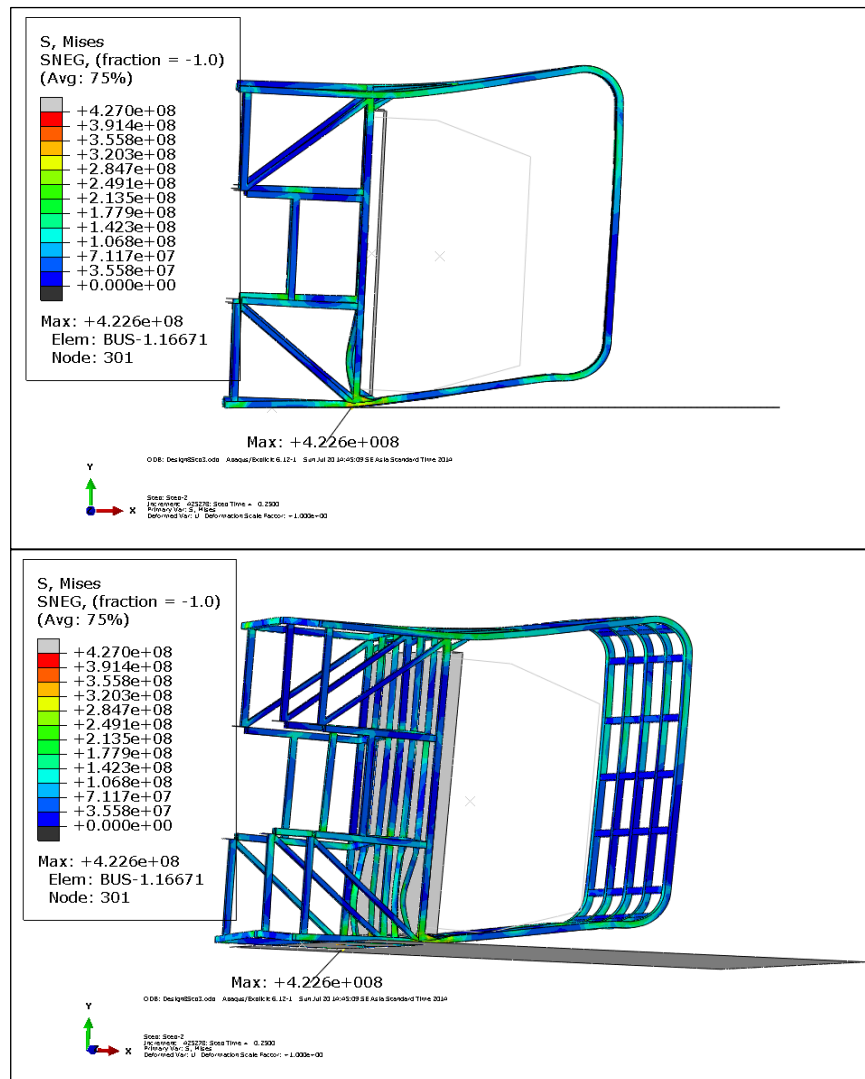
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณ โครงหลังคาหลักเป็นเหล็กกล่อง ขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร โครงหลังคาย่อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรและเพิ่ม support 2 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรเพื่อช่วยรองรับแรงกระแทก ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 0.7571 mm. ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 7 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.8.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 422.6 MPa ดังรูปที่ 4.16

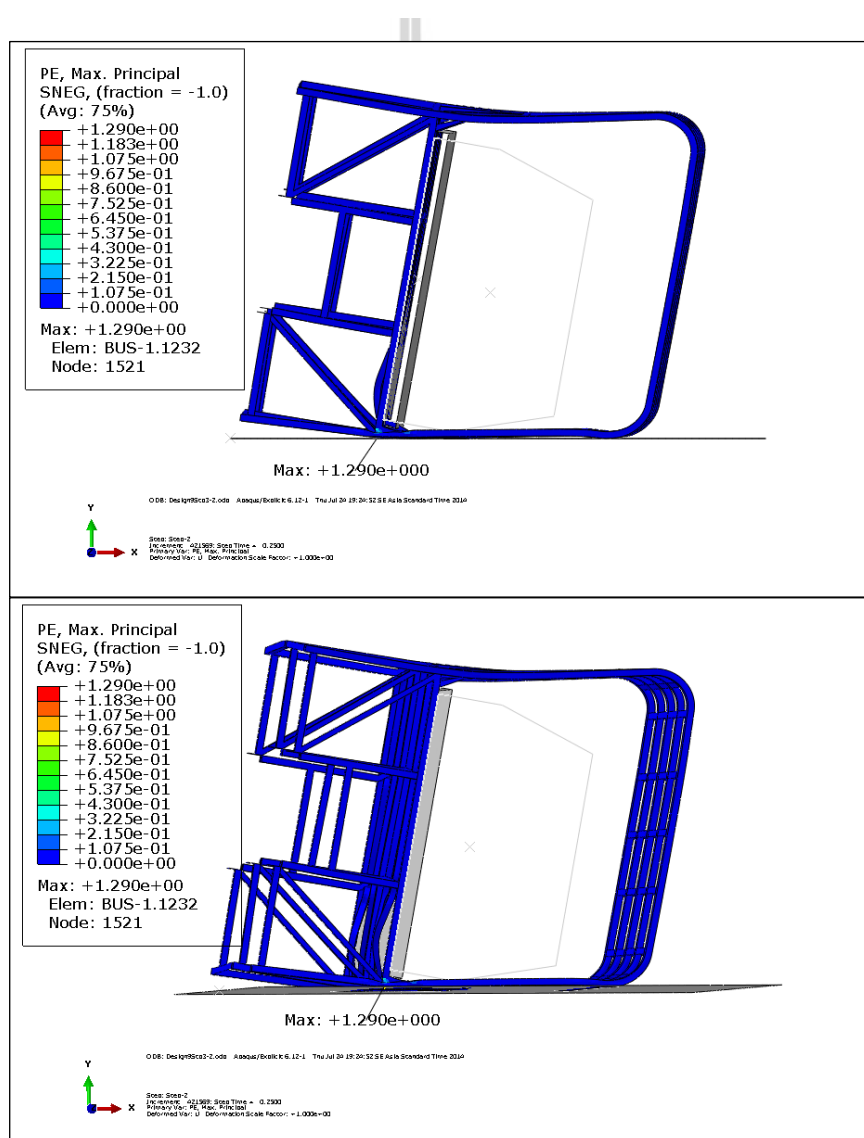


รูปที่ 4.16 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 7 ณ เวลา 0.5 วินาที

## 4.9 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 8

### 4.9.1 การขจัด

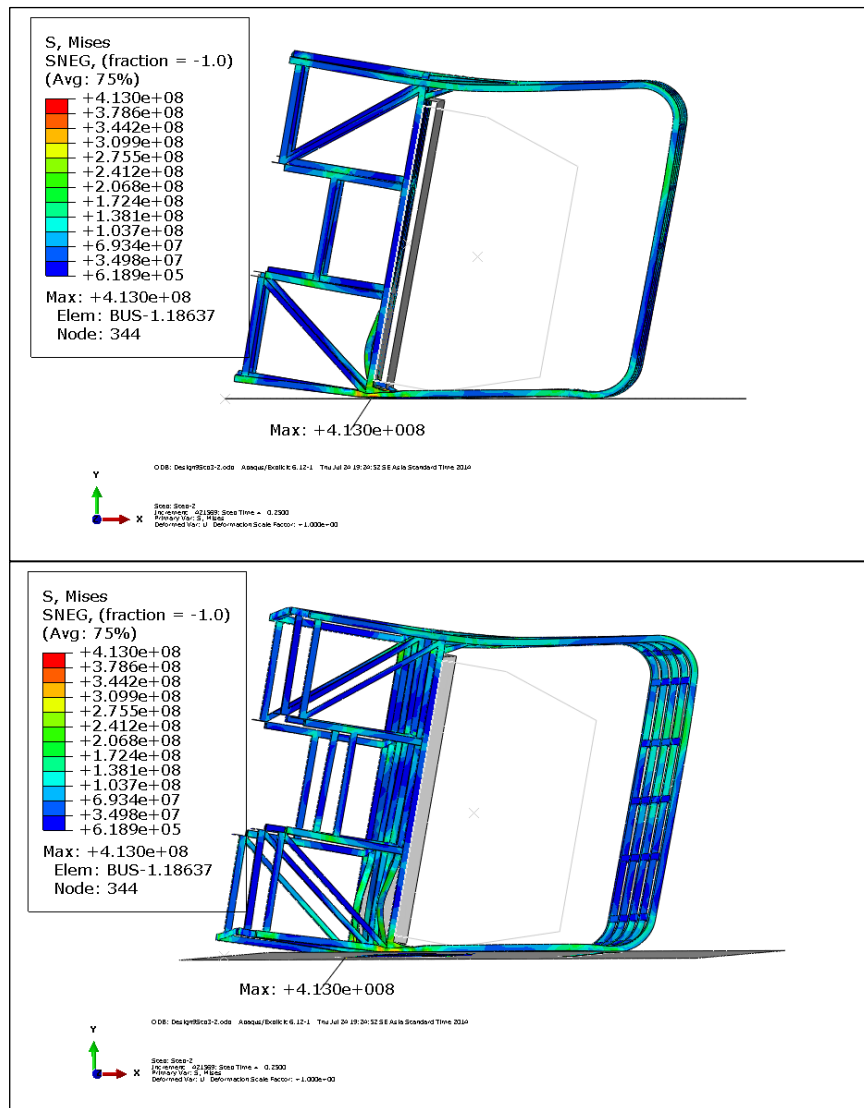
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณ โครงหลังคาหลักเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร โครงหลังคาย่อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรและเพิ่ม support 3 เป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรเพื่อช่วยรองรับแรงกระแทก ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 1.29 mm. ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 8 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.9.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 413 MPa ดังรูปที่ 4.18

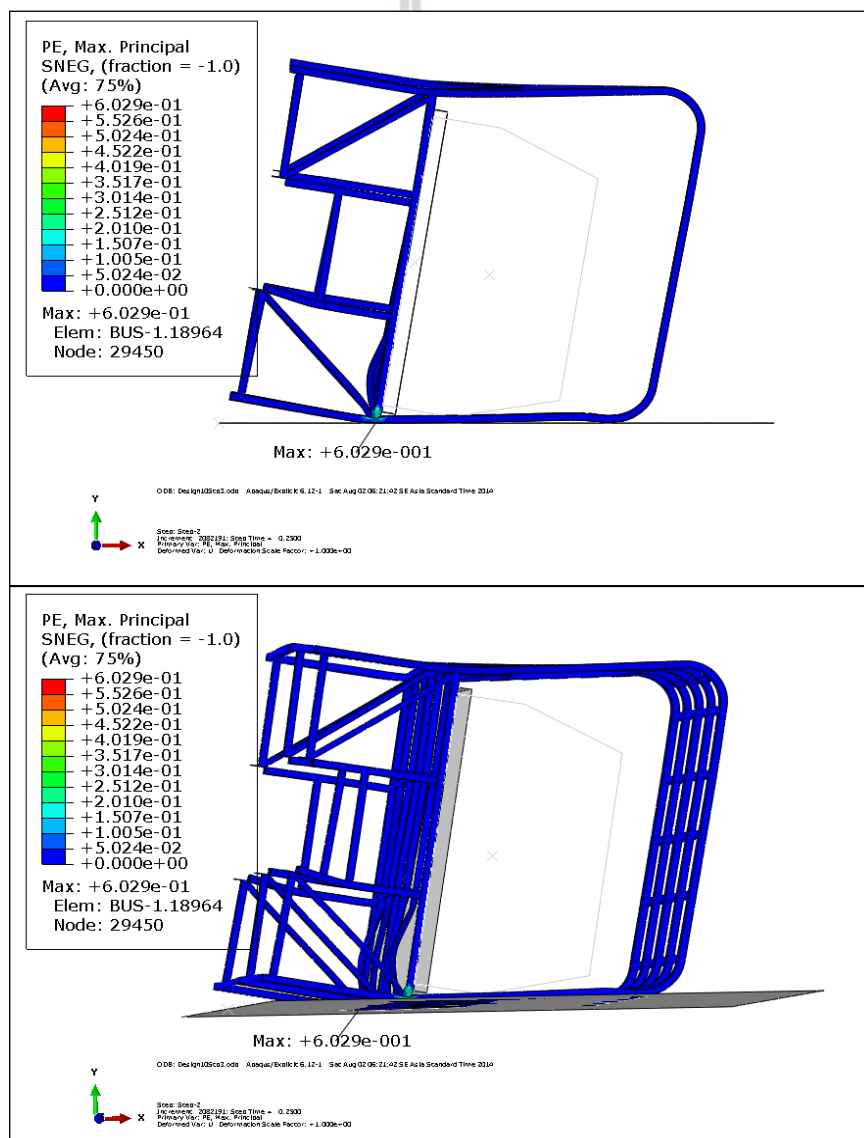


รูปที่ 4.18 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของ โครงสร้างแบบที่ 8 ณ เวลา 0.5 วินาที

## 4.10 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 9

### 4.10.1 การขจัด

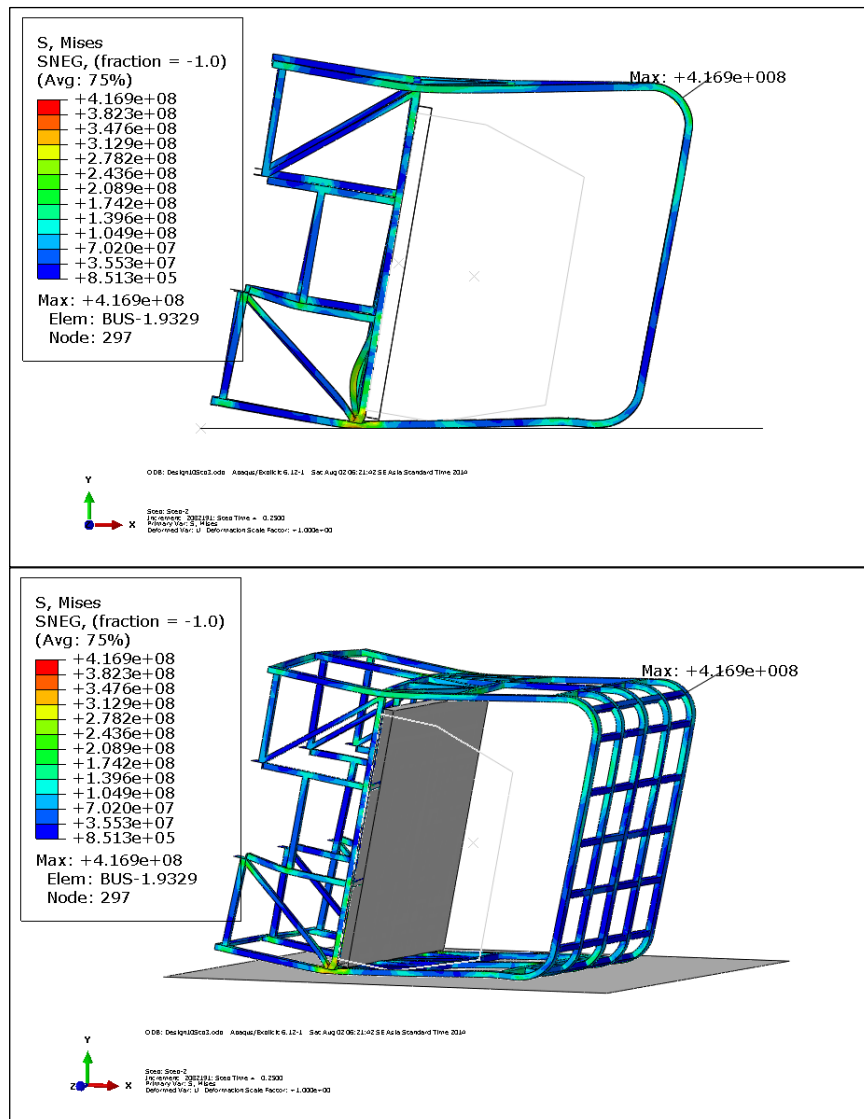
จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณ โครงหลังคาหลักเป็นเหล็กกล่อง ขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร โครงหลังคาย่อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 75 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร หลักคาเหล็กท่อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตรและเหล็ก ด้านข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณ โครงรถด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 0.6029 mm. ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 9 ณ เวลา 0.5 วินาที

#### 4.10.2 ความเค้น

จากการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.5 วินาที ความเค้นสูงสุด (Von Mises Stress) เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงหลังคาฝั่งขวาส่วนหลัง มีค่าเท่ากับ 416.9 MPa ดังรูปที่ 4.20



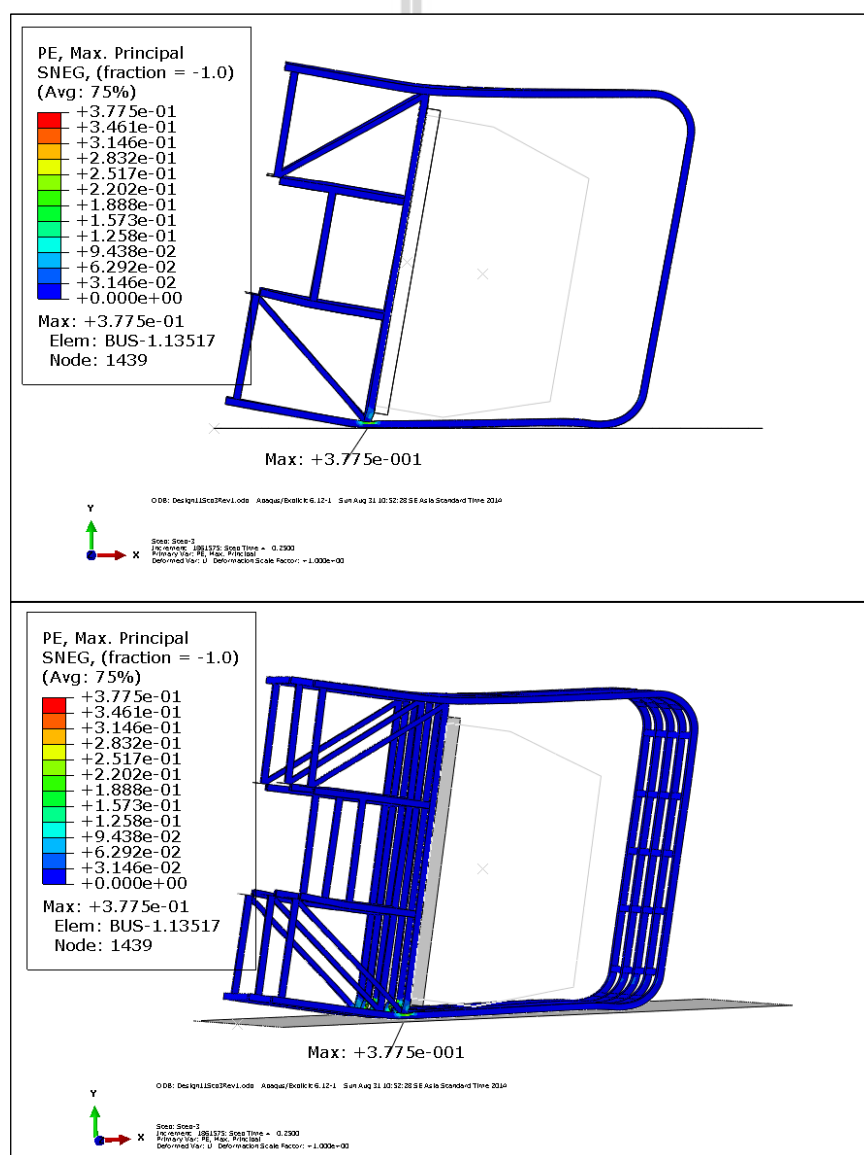
รูปที่ 4.20 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดความเค้นสูงสุดของ โครงสร้างแบบที่ 9 ณ เวลา 0.5 วินาที



## 4.11 ผลการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้างรถโดยสารแบบที่ 10

### 4.11.1 การขจัด

จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างรถโดยสารบริเวณโครงหลังคาหลักและโครงหลังคาย่อยเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร เหล็กคาเหล็กท่อนขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และเหล็กค้ำด้านข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร ผลการคำนวณพบว่า ณ เวลา 0.75 วินาที การขจัดสูงสุดเกิดขึ้นที่บริเวณโครงรถค้ำด้านข้างฝั่งซ้ายส่วนหน้า มีค่าเท่ากับ 0.3775 mm. ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ขนาดและตำแหน่งที่เกิดการขจัดสูงสุดของโครงสร้างแบบที่ 10 ณ เวลา 0.75 วินาที



#### 4.12 ผลการคำนวณความเสียหายของพื้นที่ปลอดภัย

จากการวิเคราะห์โครงสร้างเดิมและโครงสร้างที่ออกแบบใหม่สามารถหาค่าต่าง ๆ ได้ตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงน้ำหนัก ความสูง และความเสียหายของพื้นที่ปลอดภัยของโครงสร้างแบบต่าง ๆ

รูปแบบโครงสร้าง	น้ำหนัก (kg.)	น้ำหนักที่ เปลี่ยนไปจาก เดิม (kg.)	ความสูง ของ CG (m.)	ความเสียหาย ของพื้นที่ ปลอดภัย (%)
โครงสร้างเดิม	421.77	0	1.564	26.2
โครงสร้างแบบที่ 1	408.03	-13.74	1.594	5.6
โครงสร้างแบบที่ 2	450.04	+28.27	1.634	2.6
โครงสร้างแบบที่ 3	482.29	+60.52	1.644	1.03
โครงสร้างแบบที่ 4	483.26	+61.49	1.634	< 1
โครงสร้างแบบที่ 5	521.29	+99.52	1.644	< 1
โครงสร้างแบบที่ 6	518.19	+96.42	1.664	< 1
โครงสร้างแบบที่ 7	519.17	+97.40	1.664	< 1
โครงสร้างแบบที่ 8	520.21	+98.44	1.664	< 1
โครงสร้างแบบที่ 9	556.24	+134.47	1.664	< 1
โครงสร้างแบบที่ 10	562.75	+140.98	1.674	0

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารชนิดชั้นครึ่งรุ่น CG 280 เพื่อรองรับมาตรฐานความปลอดภัยในกรณีเกิดการพลิกคว่ำ โดยอ้างอิงจากมาตรฐาน ECE R66

ลักษณะโครงสร้างเดิมของรถโดยสาร บริเวณโครงหลังคาส่วนใหญ่เป็นเหล็กหลาย ๆ ชิ้นนำมาต่อกัน มีความหนา 1.5 มิลลิเมตรและ 2 มิลลิเมตร เหล็กด้านข้างเป็นเหล็กกล่องขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร และมีการแบ่ง section ไม่เท่ากัน จากการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างเกิดความเสียหายบริเวณโครงเสาหลักของรถมาก คือ มีชิ้นส่วน โครงสร้างรถยุบเข้าไปในพื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสาร ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้โดยสาร จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงหลักของรถโดยสารมีความแข็งแรงไม่มากพอเมื่อได้รับแรงกระแทก

ลักษณะการออกแบบโครงสร้างใหม่ ได้มีการเปลี่ยนแปลงบริเวณโครงหลังคาหลักและโครงหลังคาย่อยเป็นเหล็กคดโค้ง โดยใช้เหล็กกล่องขนาด 50 x 100 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร เหล็กคดหลักก่อนหน้าขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร และเหล็กด้านข้างขนาด 50 x 50 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างยุบตัวได้ดีโดยไม่มีชิ้นส่วน โครงสร้างใดยุบเข้าไปในพื้นที่ปลอดภัยของรถโดยสาร จึงสามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบใหม่นี้มีความแข็งแรงและปลอดภัยแก่ผู้โดยสาร ในกรณีที่เกิดการพลิกคว่ำตามมาตรฐาน ECE R66

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์ที่ใช้เวลาค่อนข้างนาน การเลือกรูปแบบเอลิเมนต์ในการวิเคราะห์และการเลือกกระบวนคอมพิวเตอร์มีผลต่อระยะเวลาการวิเคราะห์มาก จึงควรออกแบบเอลิเมนต์และเลือกคอมพิวเตอร์ให้มีความเหมาะสม ซึ่งรูปแบบเอลิเมนต์ที่มีความละเอียดมากย่อมใช้เวลาานาน แต่จะได้รูปแบบการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

5.2.2 ลักษณะการออกแบบโครงสร้างสามารถทำออกมาได้หลากหลายรูปแบบ แต่ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยพยายามปรับปรุงและออกแบบ โครงสร้างให้เปลี่ยนแปลงจากเดิมน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อผู้ประกอบการในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการผลิต

## รายการอ้างอิง

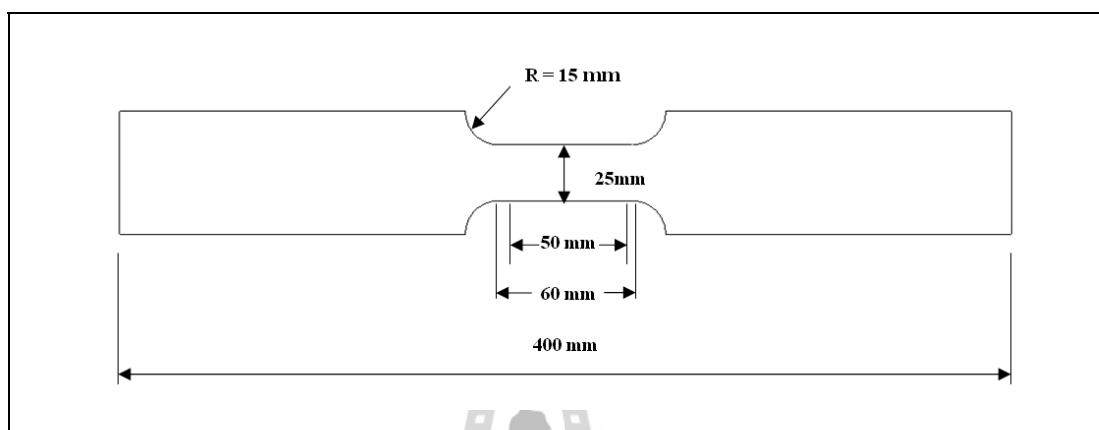
- คุณสมบัติเชิงกลของโลหะ (online). Available: [http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318\(51\)/MY318-1.pdf](http://e-book.ram.edu/e-book/m/MY318(51)/MY318-1.pdf)
- ปราโมทย์ เตชะอำไพ (2555). ไฟไฟต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม.
- ศักรินทร์ ชูดวง (2549). การออกแบบและพัฒนามาตรฐานการผลิตรถโดยสาร 2 ชั้น (มาตรฐาน 4). วิทยาลัยพณิชยวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมอุตสาหกรรม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- Hashemi, R. (2005). UN-ECE R66: Strength of Super-structure during Rollover. **APSN Workshop on Bus & Truck Passive Safety**. Praque, 24 March 2005
- 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.
- Lin, Y.C., and Nian, H.C. (2006). Structure Design Optimization of Body Section Using FEM. **SAE World Congress & Exhibition**.
- 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.
- Chompunut, L., Rattiporn, K., and Kontorn, C. (2011). Design and Analysis of Double Decker Bus Chassis. **5<sup>th</sup> SEATUC Symposium**. Vietnam.
- 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**.
- Abaqus 6.10. **Getting Started with Abaqus, Interactive Edition**: 12.14-12.25.
- United Nations. **Uniform Technical Prescriptions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of Their Superstructure (ECE R66)**. **Finite Element Method (online)**. Available: [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)



ภาคผนวก ก

ทดสอบวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้าง

ทดสอบความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ในการทำโครงสร้างเพื่อหาคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ ซึ่งการทดสอบนี้ได้ทดสอบภายใต้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) ได้กำหนดไว้ โดยมีรูปร่างของวัสดุสำหรับการทดสอบดังแสดงในรูปที่ ก.1 และชิ้นงานทดสอบได้นำมาจากวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างจริง

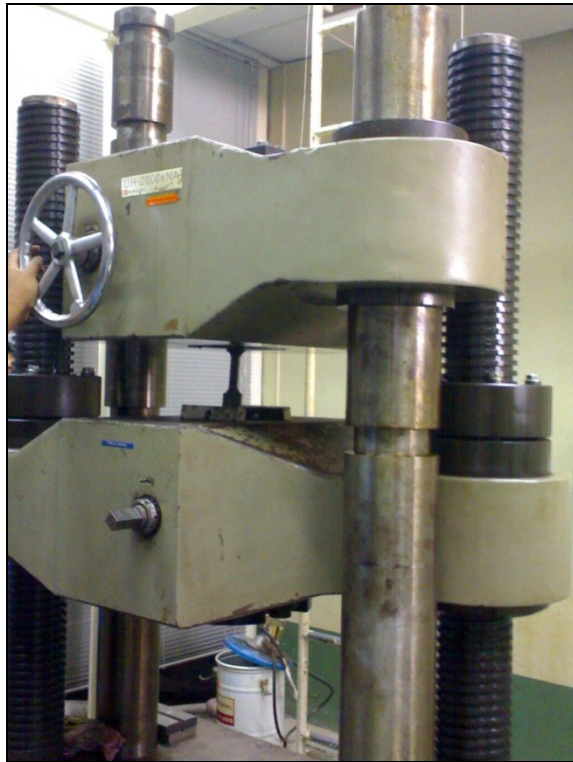


รูปที่ ก.1 รูปร่างชิ้นทดสอบสมบัติเชิงกล

นำชิ้นงานดังกล่าวซึ่งประกอบด้วยชิ้นงานที่เป็นวัสดุ Steel STKR 400 จำนวนอย่างละ 3 ชิ้น ทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu UH – 2000 k ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการทดสอบชนิดละ 3 ครั้ง

ผลจากการทดสอบแรงดึงทำให้สามารถหาค่า Yield Strength ของวัสดุได้เท่ากับ 548.83MPa ซึ่งจะได้หาค่า Yield Strength ไปใช้ในการหาค่าตัวประกอบความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสาร

เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu UH – 2000 k และชิ้นงาน Steel STKR 400 ก่อนและหลังการทดสอบผลการทดสอบแรงดึง ดังแสดงในรูปที่ ก.2, ก.3 และ ก.4 ตามลำดับ



รูปที่ ก.2 เครื่องทดสอบแรงดึง รุ่น Shimadzu UH – 2000 k



รูปที่ ก.3 Steel STKR 400



## Scientific and Technological Equipment Center Suranaree University of Technology

Customer:  
Operator:  
Machine Shimadzu UH-2000kNA

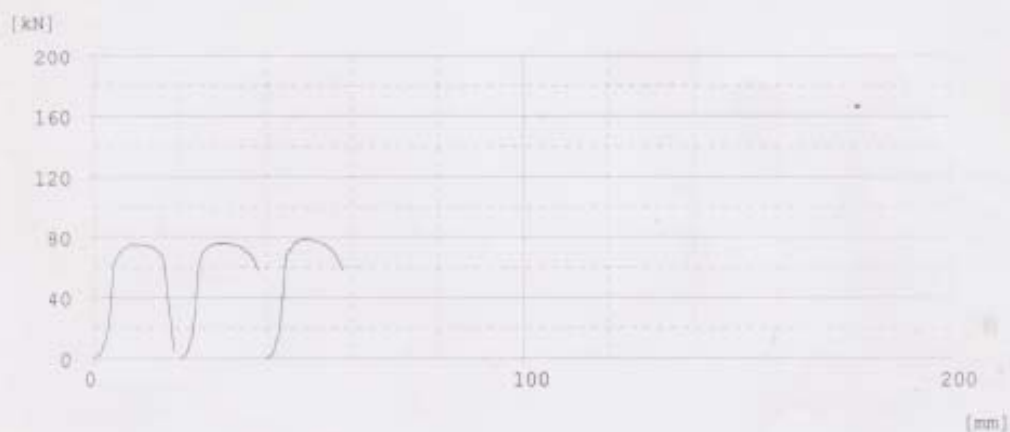
STANDARD  
Date/Time: 03-27-2009  
Project

Batch Name: pipe

Shape: Plate

Gauge Length: 60.00

Calc.	YIELD STRENGTH	TENSILE STR.	ELONGATION
CP1, CP2	0.100		
CP Unit	[%/Fullscale]		
Pass-Fail			
Unit	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	[%]
plate	5648.35	5696.79	23.3333
2	5708.89	5769.43	26.6666
3	5433.44	5948.02	24.6666
Mean	5596.89	5804.75	24.8888



Comment:

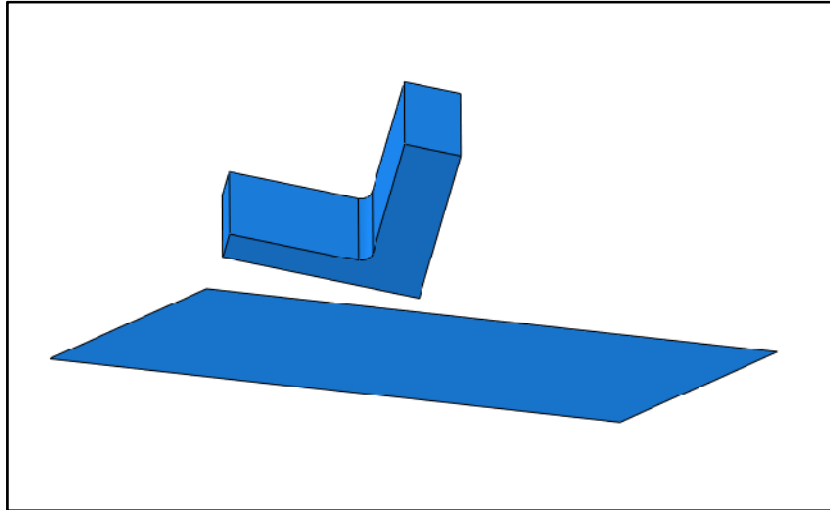
รูปที่ ก.4 ผลการทดสอบแรงดึงของ Steel STKR 400



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการวิเคราะห์

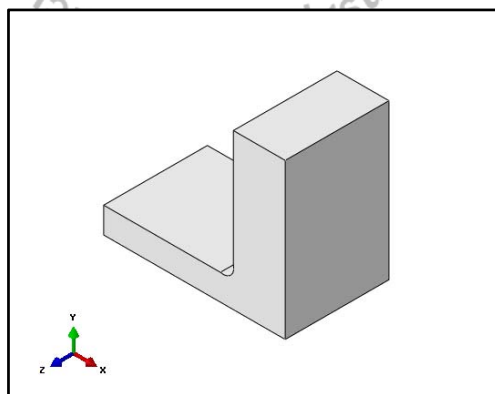
ตัวอย่างการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จาก Tutorial  
 ชิ้นงานอะลูมิเนียมตกระทอบพื้นผิวแข็ง



รูปที่ข.1 ตัวอย่างวิเคราะห์การตกระทอบ

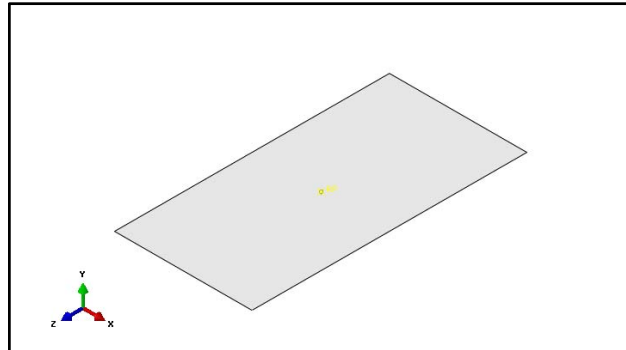
1. Module: Part

1.1 สร้าง Bracket



รูปที่ข.2 ชิ้นงานตัวอย่าง Bracket

## 1.2 สร้าง rigid surface



รูปที่ข.3 ชิ้นงานตัวอย่าง rigid surface

## 2. Module: Property

### 2.1 สร้าง material properties โดยวัสดุที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม

Density =  $2.6e-6 \text{ kg/m}^3$

Young's modulus =  $70e3 \text{ Pa}$

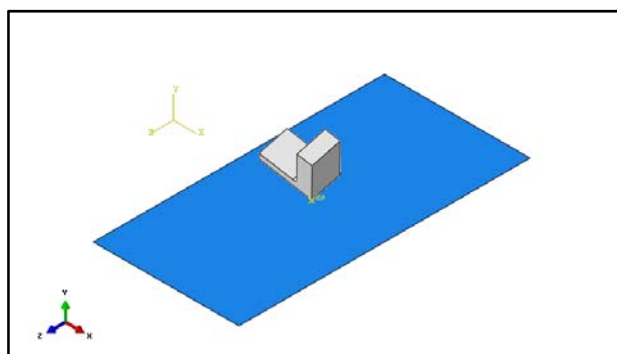
Poisson's ratio =  $0.33$

### 2.2 สร้าง section ของอะลูมิเนียม

### 2.3 Assign section ของอะลูมิเนียม

## 3. Module: Assembly

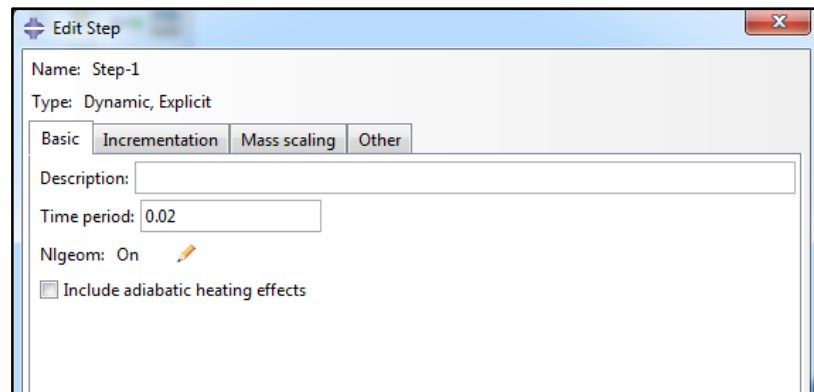
Assembly bracket กับ rigid surface เข้าด้วยกัน



รูปที่ข.4 การ assembly ตัวอย่างการวิเคราะห์

#### 4. Module: Step

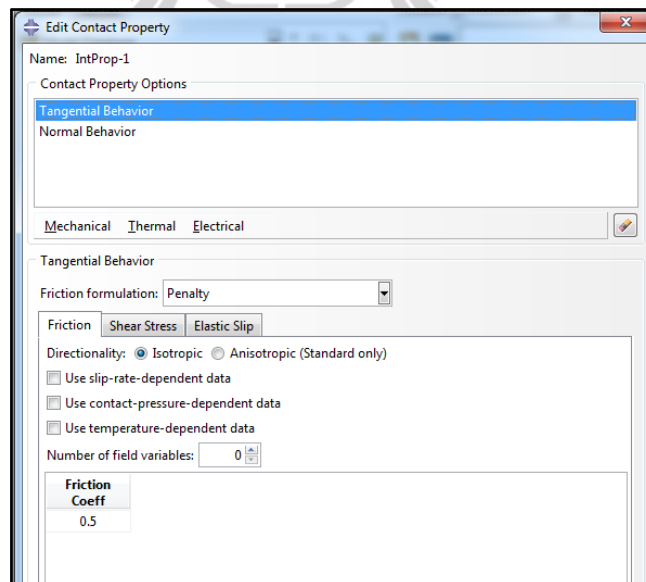
กำหนดช่วงเวลาการวิเคราะห์ 0.02 วินาที



รูปที่ 5.5 การกำหนดช่วงเวลาการวิเคราะห์

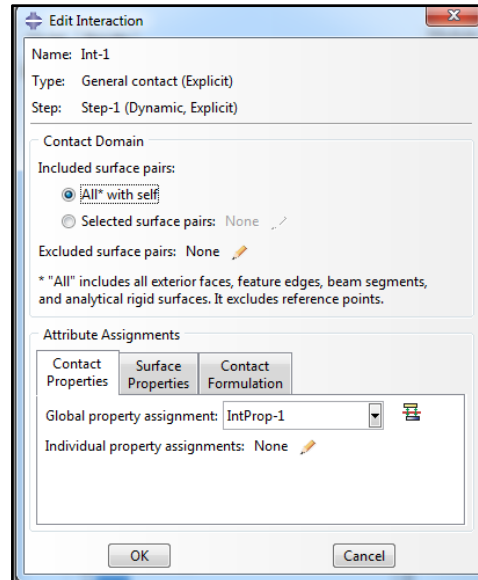
#### 5. Module: Interaction

5.1 กำหนด Interaction properties โดยมีค่าแรงเสียดทานเท่ากับ 0.5



รูปที่ 5.6 การกำหนด interaction properties

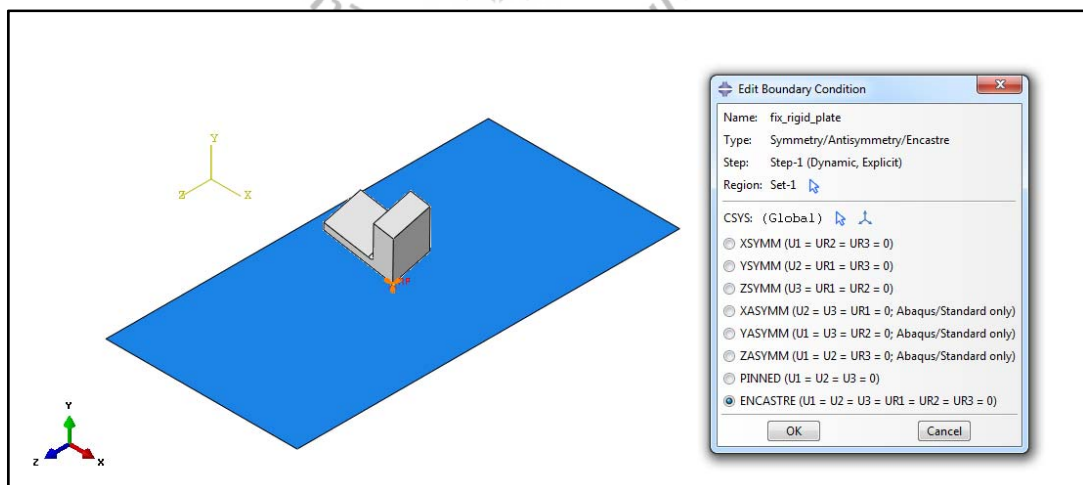
## 5.2 กำหนด Interaction ระหว่างผิวสัมผัส โดยใช้ general contact



รูปที่ 5.7 การกำหนด interaction

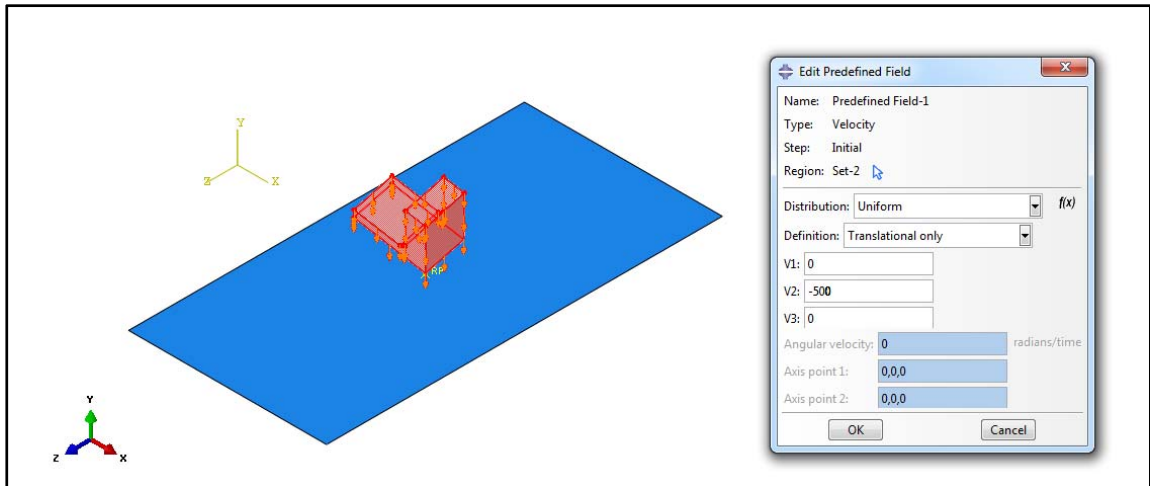
## 6. Module: Load

### 6.1 กำหนด boundary condition แบบ encastre



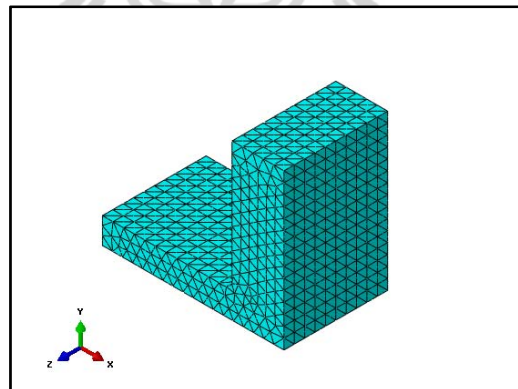
รูปที่ 5.8 การกำหนด boundary condition

## 6.2 กำหนด predefined field โดยแรงที่กระทำมีทิศทางพุ่งลง



รูปที่ข.9 การกำหนด predefined field

## 7. Module: Mesh



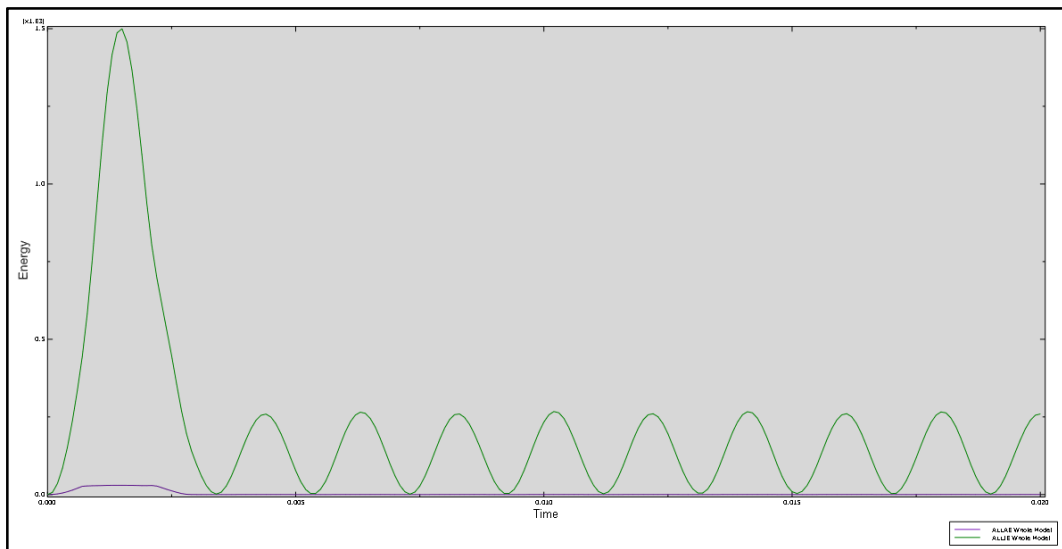
รูปที่ข.10การ mesh

## 8. Module: Job

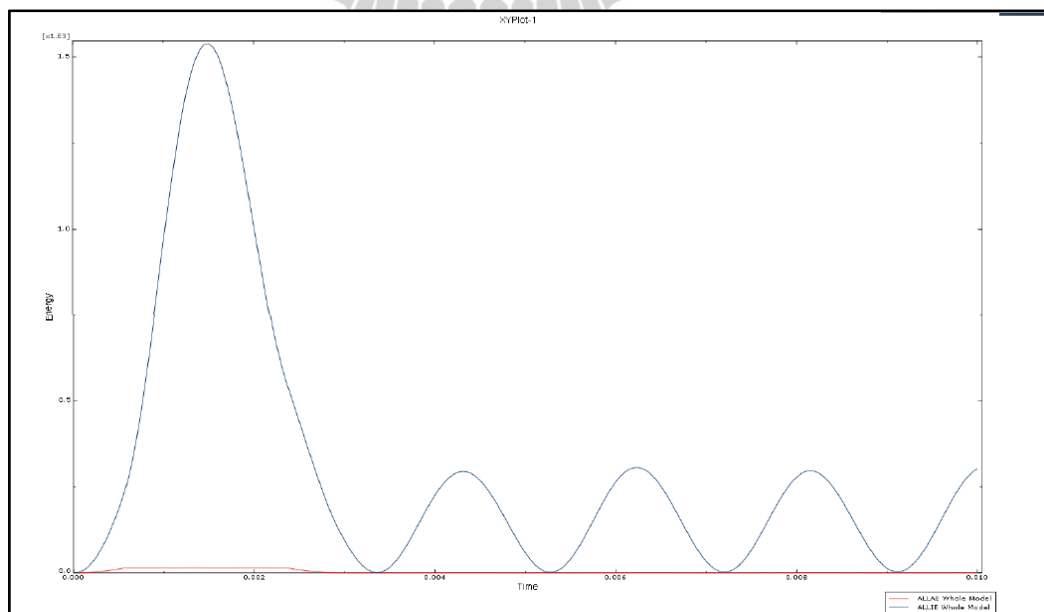
ตั้งชื่อไฟล์สำหรับการวิเคราะห์

### 9. Module: Visualization

ดูค่าพลังงานของวัตถุขณะกระทบพื้นที่ที่ได้จากการวิเคราะห์เทียบกับผลสำเร็จว่าเหมือนกันหรือไม่



รูปที่ข.11 ค่าพลังงานที่ได้จากการวิเคราะห์



รูปที่ข.12 ค่าพลังงานของตัวอย่างที่เป็นผลสำเร็จ



## 10. สรุปผล

จากการวิเคราะห์การตกกระทบของอะลูมิเนียมกับพื้นผิวแข็งนี้มีลักษณะการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับการวิเคราะห์โครงสร้างผลโดยสาร ผู้วิจัยจึงได้เลือกกรณีตัวอย่างนี้มาวิเคราะห์เพื่อทดสอบวิธีการวิเคราะห์โครงสร้างผลโดยสาร จากการวิเคราะห์พบว่าค่าพลังงานที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าพลังงานของตัวอย่างที่เป็นผลสำเร็จมีค่าเท่ากัน จึงสามารถสรุปได้ว่าวิธีการวิเคราะห์นี้มี ความถูกต้อง





ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

วิธีการใช้โปรแกรม ABAQUS

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

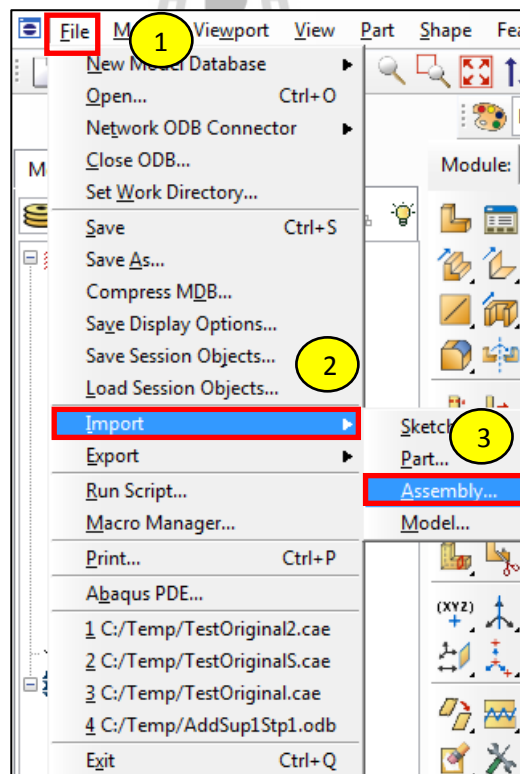
## 1. การวิเคราะห์ช่วงก่อนกระทบพื้น

### 1.1 Module: Part

1.1.1 Import โครงสร้างที่ต้องการวิเคราะห์เข้ามาในโปรแกรม ABAQUS สกุลไฟล์ที่สามารถ import เข้ามาได้มีดังนี้

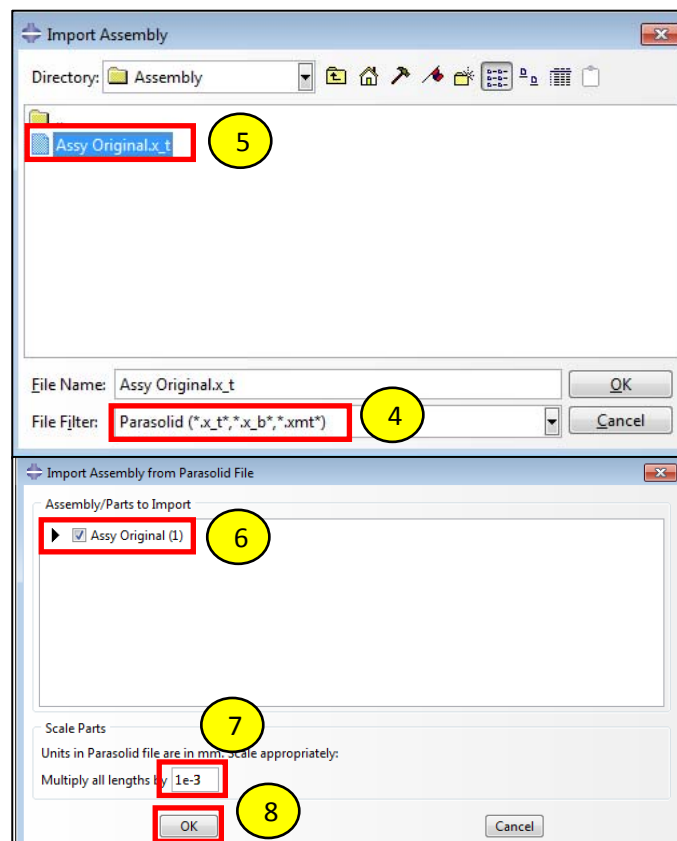
- Assembly Neutral (\*.eaf\*)
- CATIA V4 (\*.model\*, \*.catdata\*, \*.exp\*)
- Parasolid (\*.x.t\*, \*\_x\_b\*, \*.xmt\*)
- ProE/NX/IDEAS/CATIA V5 Elysium Neutral (\*.enf\*)

1. คลิก File
2. เลือก Import
3. เลือก Assembly...



รูปที่ ค.1 วิธีการ import โครงสร้าง (1)

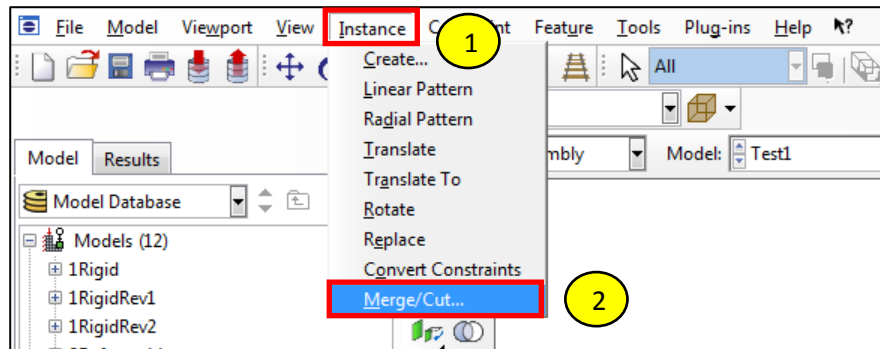
4. เลือกสกุลไฟล์
5. เลือกไฟล์งานที่ต้องการวิเคราะห์
6. คลิกชื่อไฟล์
7. กำหนดคสเกลของชิ้นงาน
8. OK



รูปที่ ค.2 วิธีการ import โครงสร้าง (2)

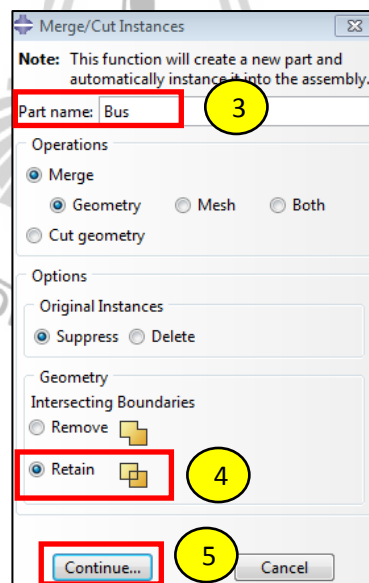
### 1.1.2 รวมโครงสร้างที่ import เข้ามาให้เป็นชิ้นเดียวกัน

1. คลิก Instance
2. เลือก Merge/Cut...



รูปที่ ค.3 วิธีการรวมโครงสร้าง (1)

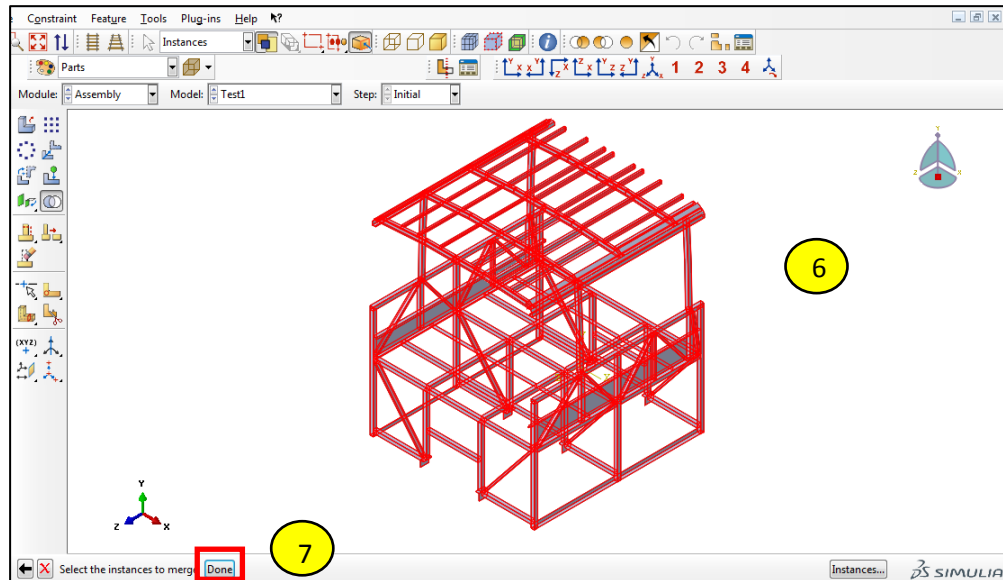
3. ตั้งชื่อ Part name: Bus
4. หัวข้อ Geometry เลือก Retain
5. Continue...



รูปที่ ค.4 วิธีการรวมโครงสร้าง (2)

6. เลือกโครงสร้างทั้งหมด

7. Done

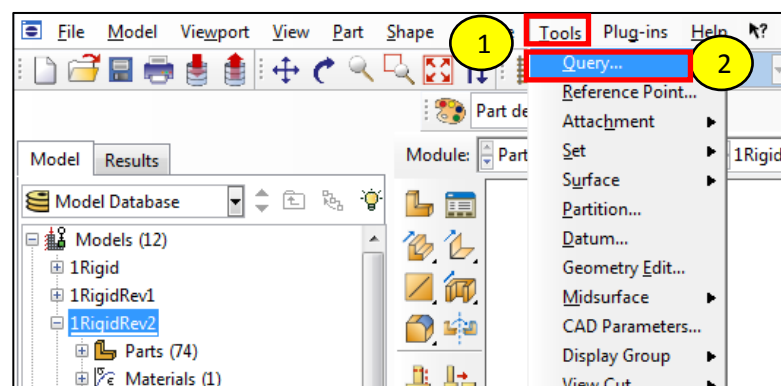


รูปที่ ค.5 วิธีการรวมโครงสร้าง (3)

1.1.3 หาจุด CG ของโครงสร้าง โดยค่า CG สามารถหาได้จากฟังก์ชันสำเร็จรูป

1. Tool

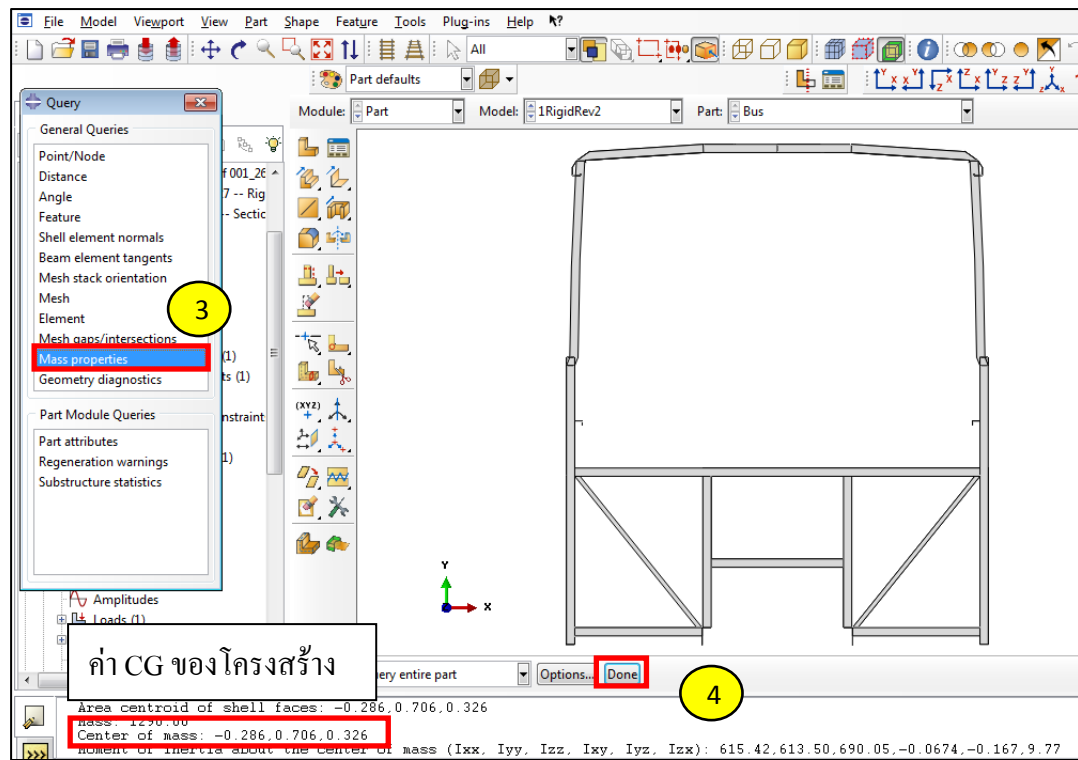
2. Query...



รูปที่ ค.6 การหาจุด CG(1)

3. Mass properties

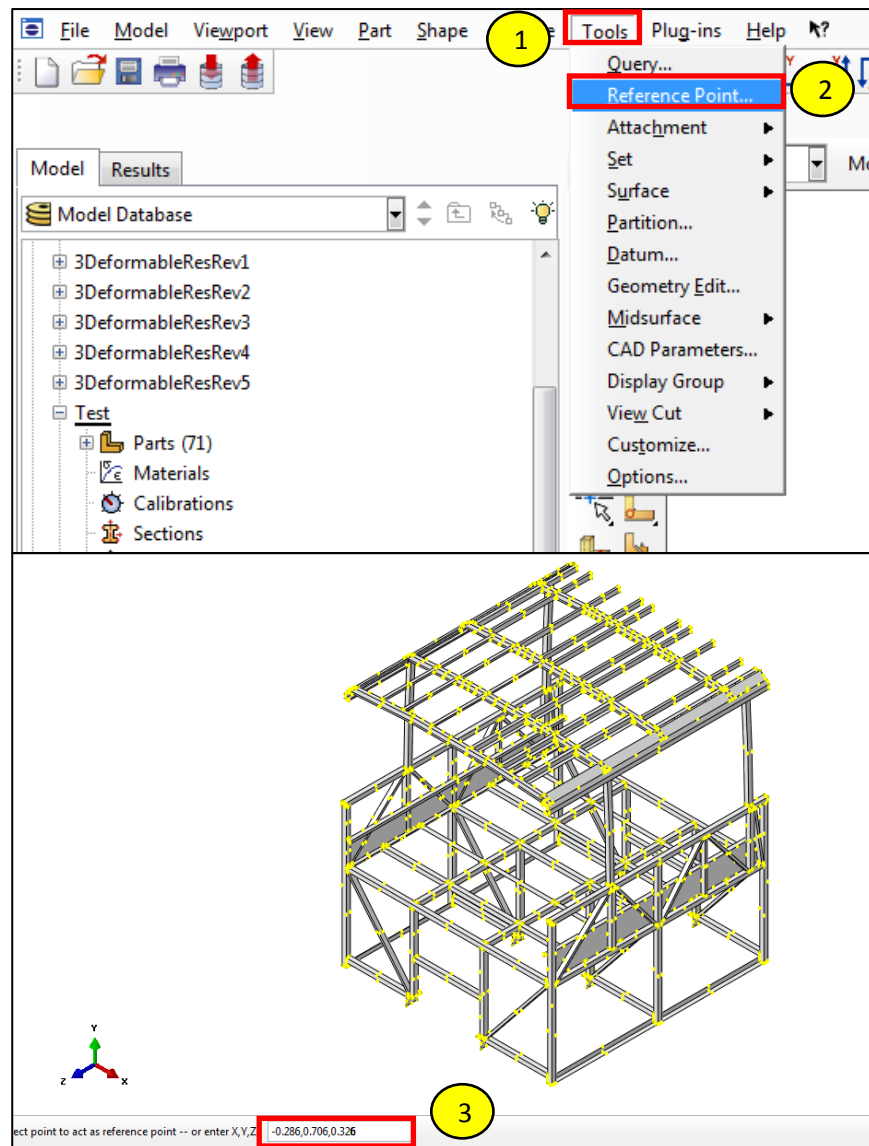
4. Done



รูปที่ ค.7 การหาจุด CG(2)

1.1.4 ใส่จุด Reference Point (RP) ที่ CG ของโครงสร้าง

1. คลิก Tools
2. เลือก Reference Point...
3. ใส่ค่าตำแหน่ง CG ที่หามาได้

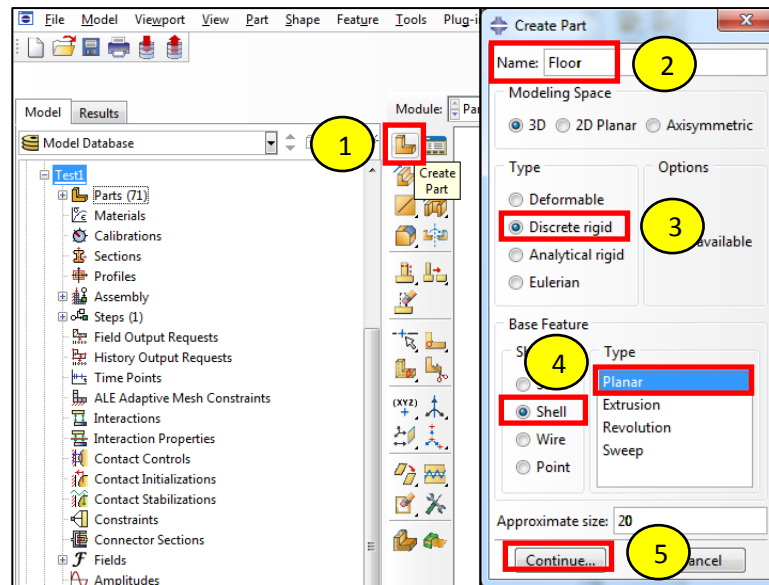


รูปที่ ค.8 การใส่จุด Reference Point

### 1.1.5 สร้างพื้นตกระทบและกำหนด Reference Point

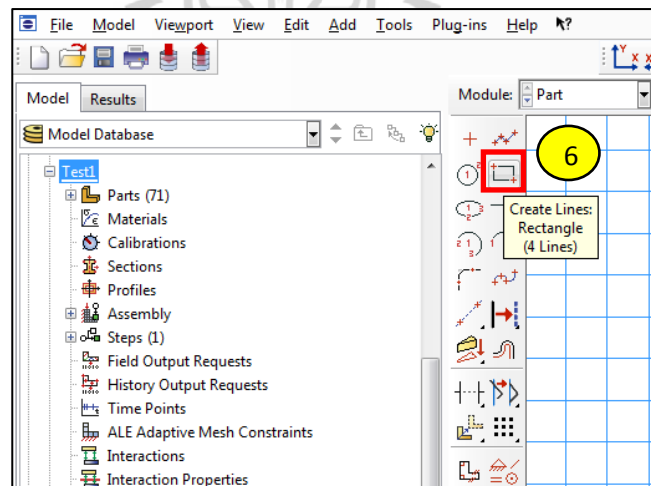
1. เลือก Create part
2. ตั้งชื่อชิ้นงาน Floor
3. หัวข้อ Type เลือกเป็นแบบ Discrete rigid
4. หัวข้อ Base Feature Shape: Shell, Type: Planer
5. Continue...





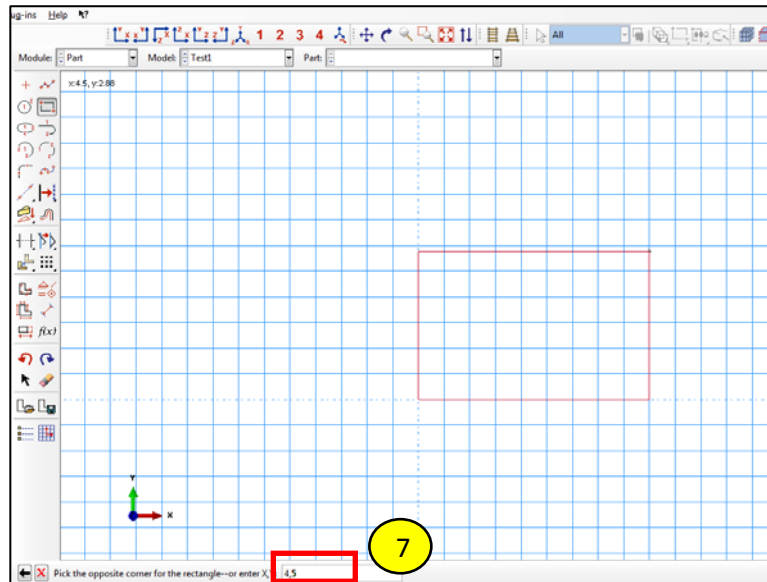
รูปที่ ค.9 การสร้างพื้นตกระทบ (1)

#### 6. เลือก Create Lines: Rectangle (4 Lines)



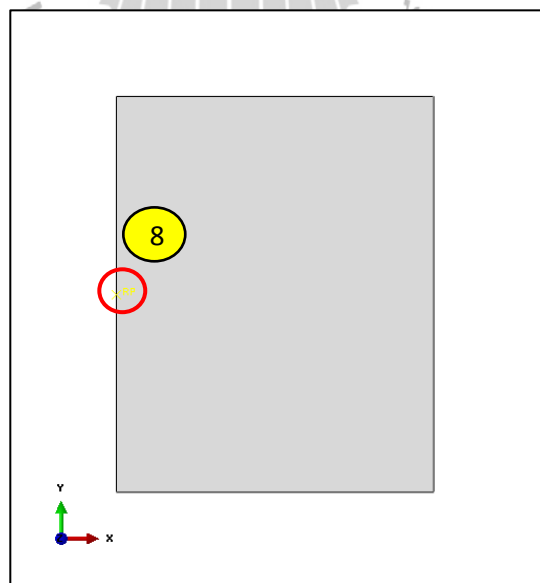
รูปที่ ค.10 การสร้างพื้นตกระทบ (2)

7. ใส่ขนาดพื้นที่กกระทบด้านแกน x และ y



รูปที่ ค.11 การสร้างพื้นที่กกระทบ (3)

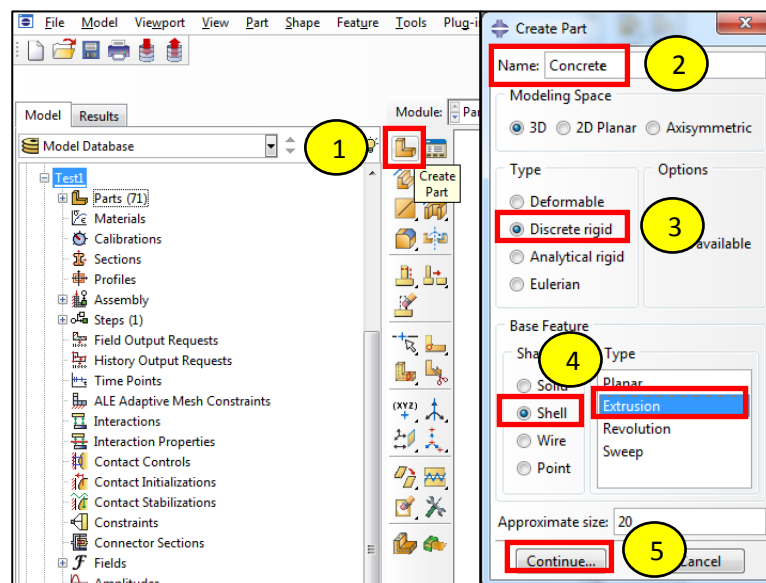
8. กำหนด Reference Point ของพื้นที่กกระทบ



รูปที่ ค.12 การสร้างพื้นที่กกระทบ (4)

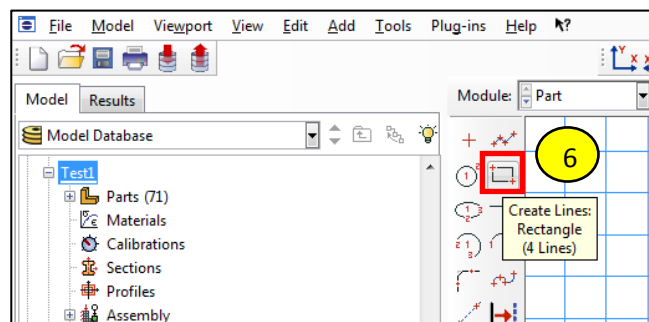
### 1.1.6 สร้างคอนกรีตและ Reference Point

1. เลือก Create part
2. ตั้งชื่อชิ้นงาน Concrete
3. หัวข้อ Type เลือกเป็นแบบ Discrete rigid
4. หัวข้อ Base Feature Shape: Shell, Type: Extrusion
5. Continue...



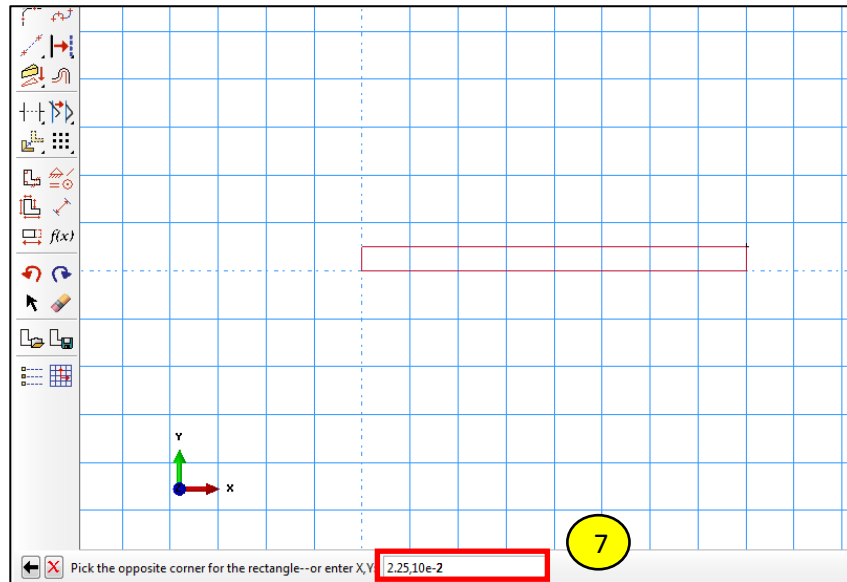
รูปที่ ก.13 การสร้างคอนกรีต (1)

6. เลือก Create Lines: Rectangle (4 Lines)



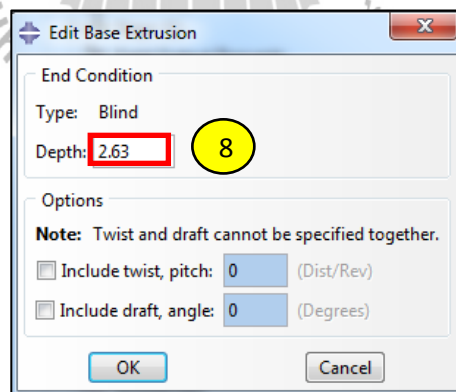
รูปที่ ก.14 การสร้างคอนกรีต (2)

7. ใส่ขนาดคอนกรีตด้านแกน x และ y



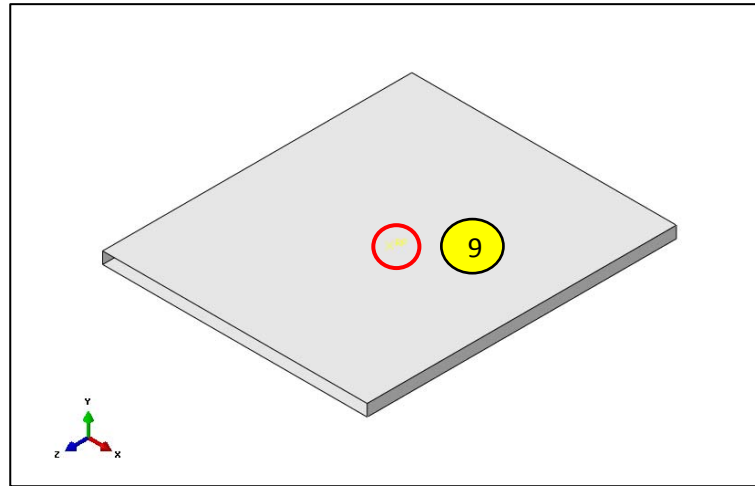
รูปที่ ค.15 การสร้างคอนกรีต (3)

8. ใส่ความลึกด้านแกน z ของคอนกรีต



รูปที่ ค.16 การสร้างคอนกรีต (4)

## 9. กำหนด Reference Point ของคอนกรีต

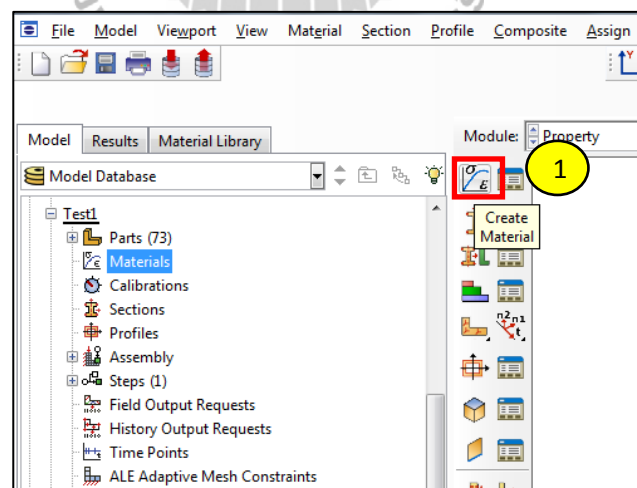


รูปที่ ค.17 การสร้างคอนกรีต (5)

### 1.2 Module: Property

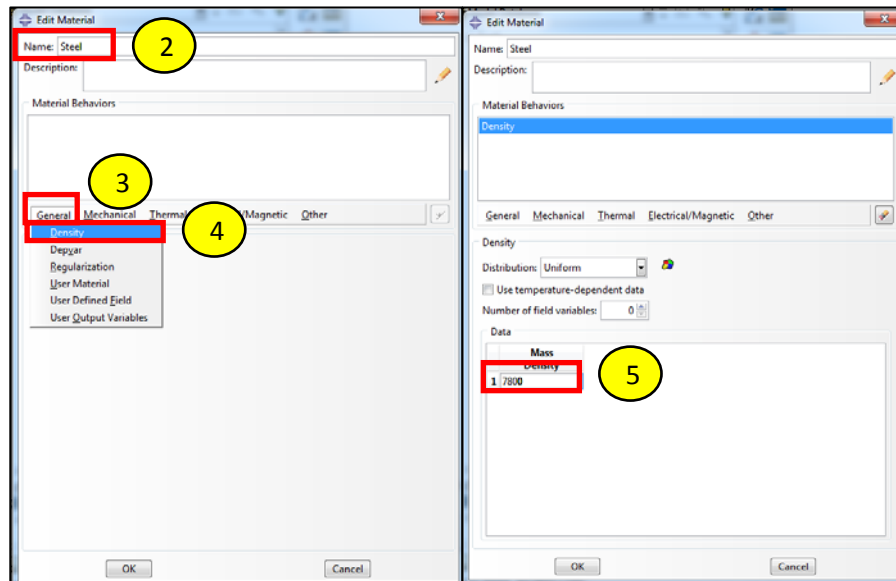
#### 1.2.1 สร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material

##### 1. คลิก Create Material



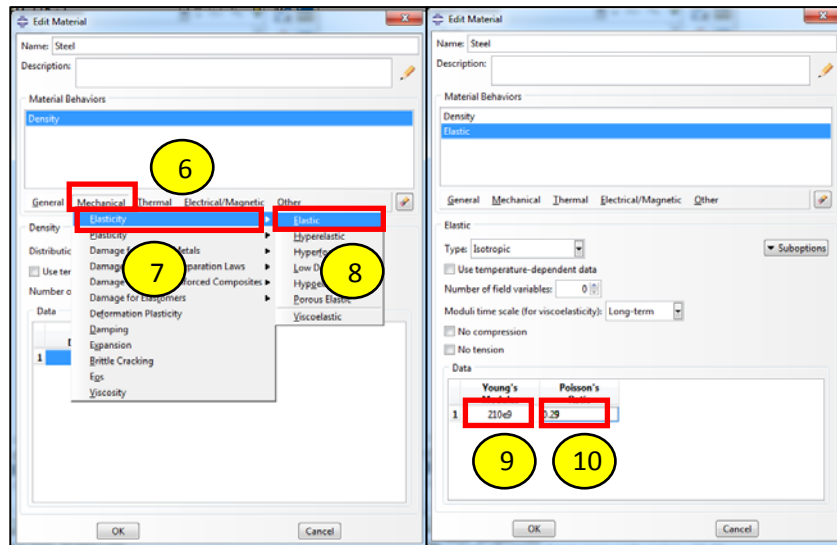
รูปที่ ค.18 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (1)

2. ใส่ชื่อ material: Steel
3. คลิก General
4. เลือก Density
5. ใส่ค่า Density ของเหล็ก มีค่าเท่ากับ  $7800 \text{ kg/m}^3$



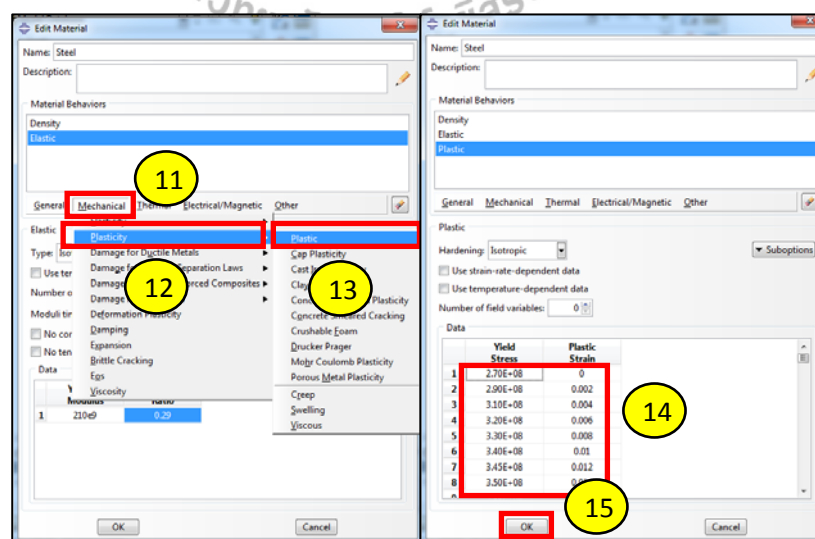
รูปที่ ค.19 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (2)

6. คลิก Mechanical
7. เลือก Elasticity
8. เลือก Elastic
9. ใส่ค่า Young's Modulus เท่ากับ 210 GPa
10. ใส่ค่า Poisson's Ratio เท่ากับ 0.29



รูปที่ ค.20 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (3)

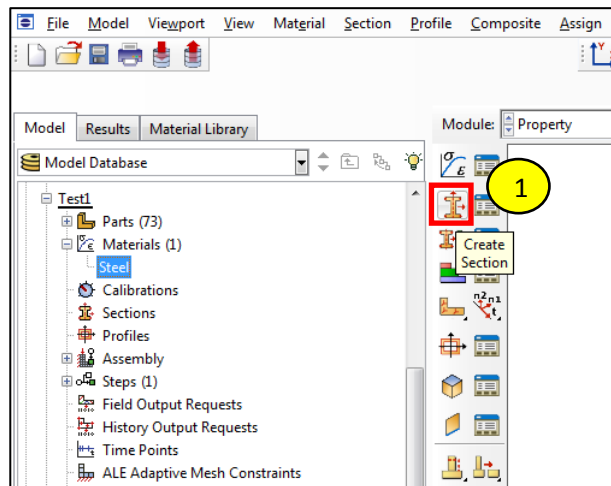
11. คลิก Mechanical
12. เลือก Plasticity
13. เลือก Plastic
14. ใส่ค่า Yield Stress และ Plastic Strain ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 3.2
15. OK



รูปที่ ค.21 การสร้างและกำหนดคุณสมบัติของ material (4)

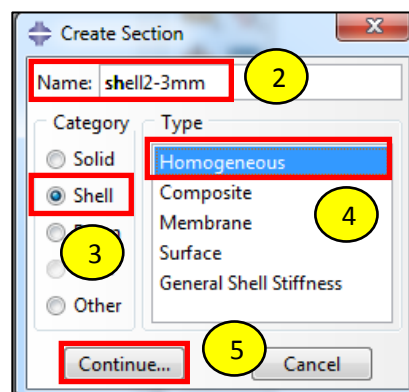
## 1.2.2 สร้างความหนาของชิ้นงาน

### 1. เลือก Create Section



รูปที่ ค.22 การสร้างความหนาของชิ้นงาน (1)

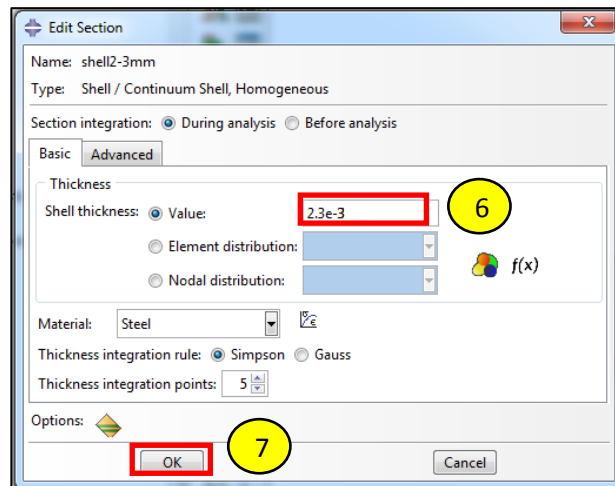
2. ตั้งชื่อความหนา
3. หัวข้อ Category เลือก Shell
4. หัวข้อ Type เลือก Homogeneous
5. Continue...



รูปที่ ค.23 การสร้างความหนาของชิ้นงาน (2)

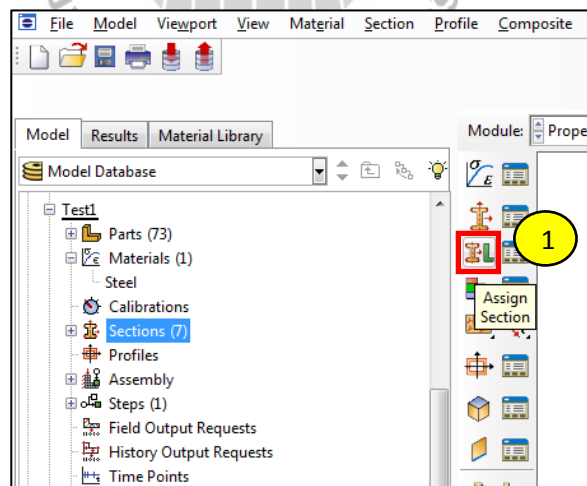


6. ใส่ความหนาที่ต้องการ
7. OK



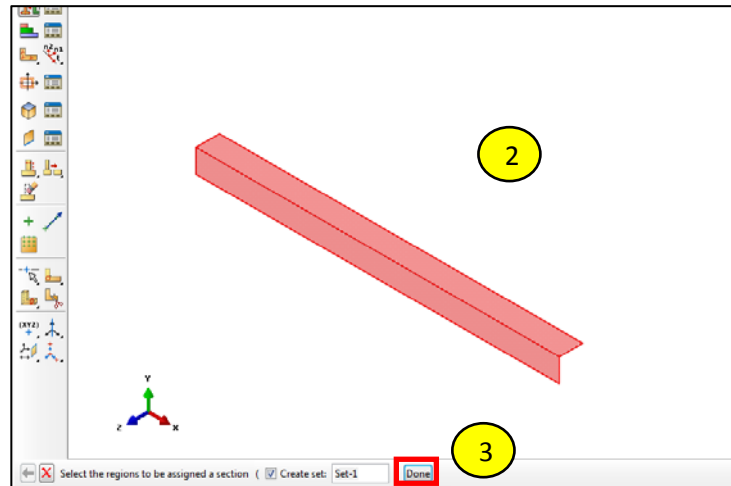
รูปที่ ค.24 การสร้างความหนาของชิ้นงาน (3)

- 1.2.3 การกำหนดความหนาของชิ้นงาน
  1. เลือก Assign Section



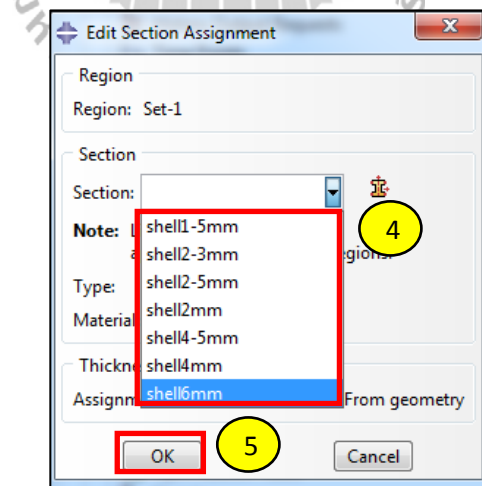
รูปที่ ค.25 การกำหนดความหนาของชิ้นงาน (1)

2. ลากกรอบชิ้นงานทั้งหมด
3. Done



รูปที่ ค.26 การกำหนดความหนาของชิ้นงาน (2)

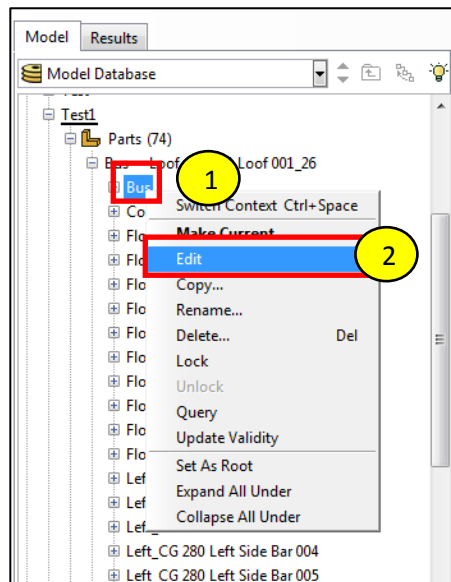
4. เลือกความหนาของชิ้นงาน
5. OK



รูปที่ ค.27 การกำหนดความหนาของชิ้นงาน (3)

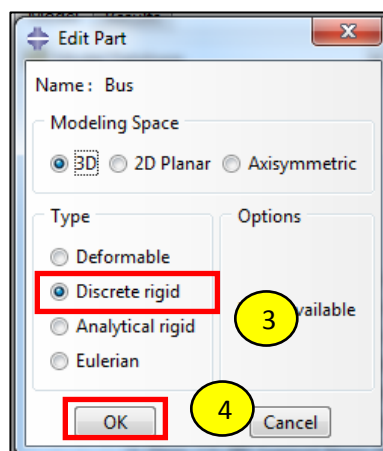
### 1.2.4 เปลี่ยนชนิดของโครงสร้างรถ

1. ที่ Model tree คลิกขวาที่ Bus
2. เลือก Edit



รูปที่ ค.28 การเปลี่ยนชนิดของโครงสร้างรถ (1)

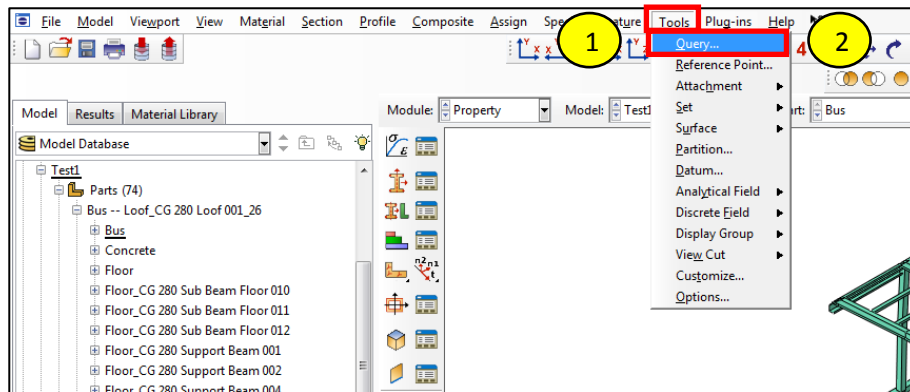
3. หัวข้อ Type เลือกเป็น Discrete rigid
4. OK



รูปที่ ค.29 การเปลี่ยนชนิดของโครงสร้างรถ (2)

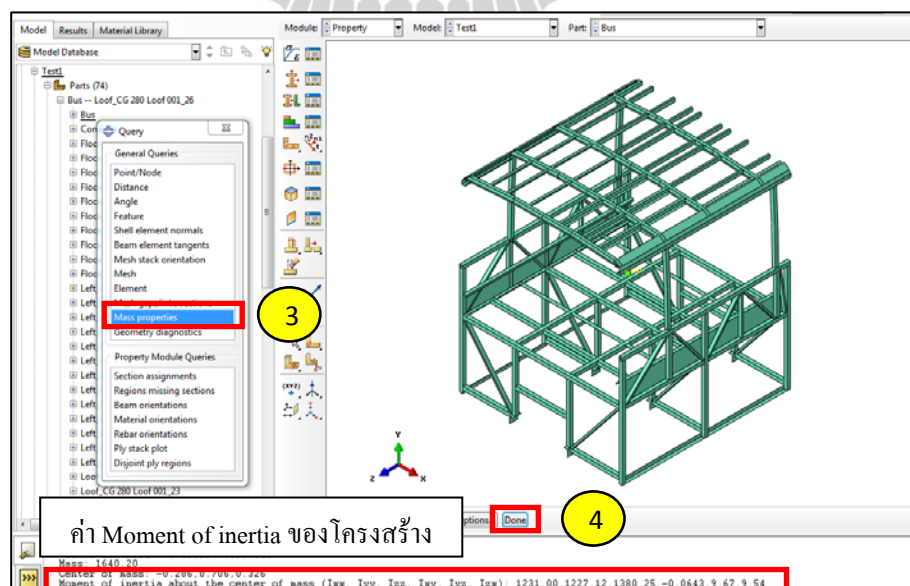
### 1.2.5 หาค่า Moment of inertia ของโครงสร้างรถ

1. คลิก Tools
2. เลือก Query...



รูปที่ ค.30 การหาค่า Moment of inertia ของโครงสร้างรถ (1)

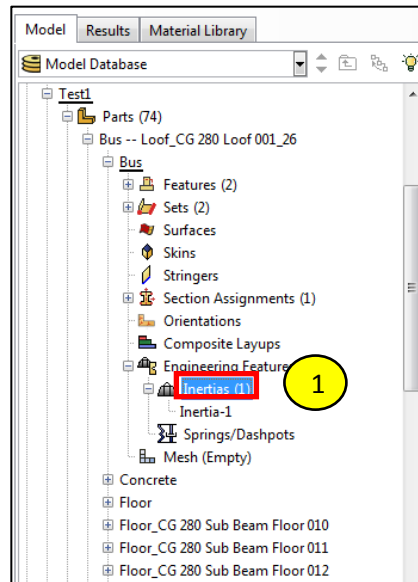
3. เลือก Mass properties
4. Done



รูปที่ ค.31 การหาค่า Moment of inertia ของโครงสร้างรถ (2)

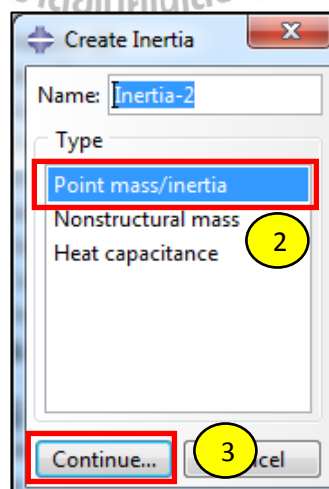
### 1.2.6 กำหนดน้ำหนักกรณและค่า Moment of inertia

1. ที่ Model tree ดับเบิลคลิกที่ Inertias



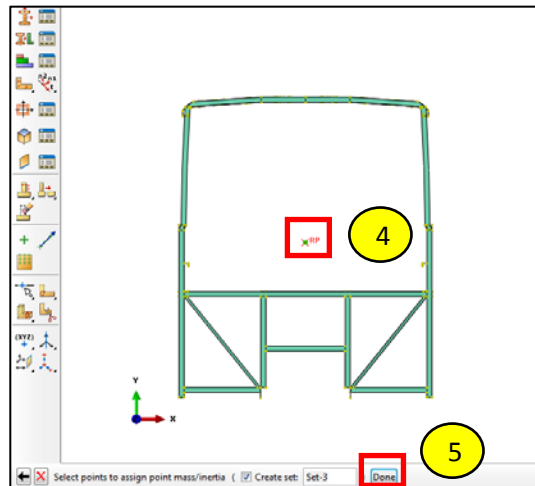
รูปที่ ค.32การกำหนดน้ำหนักกรณและค่า Moment of inertia (1)

2. หัวข้อ Type เลือก Point mass/inertia
3. Continue...



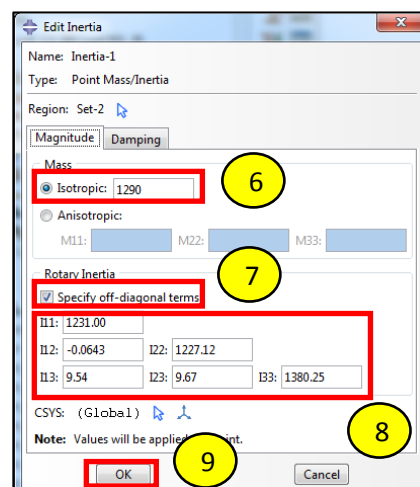
รูปที่ ค.33การกำหนดน้ำหนักกรณและค่า Moment of inertia (2)

4. เลือกจุด RP ของโครงสร้าง
5. Done



รูปที่ ค.34 การกำหนดน้ำหนักจุดและค่า Moment of inertia (3)

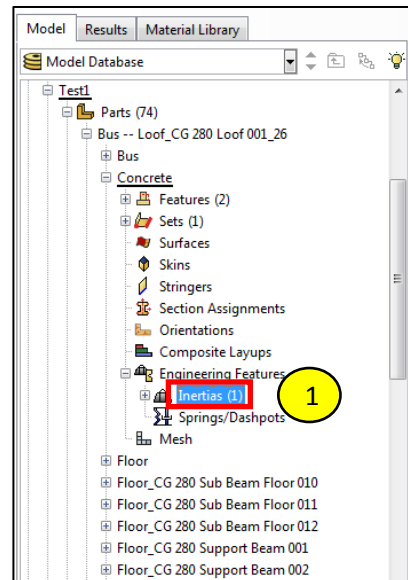
6. ใส่น้ำหนักของโครงสร้าง
7. หัวข้อ Rotary Inertia เลือก Specify off-diagonal terms
8. ใส่ค่า Moment of inertia ทั้ง 6 แกน
9. OK



รูปที่ ค.35 การกำหนดน้ำหนักจุดและค่า Moment of inertia (4)

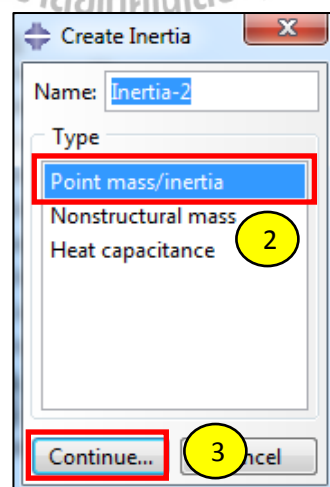
### 1.2.7 ใส่น้ำหนักคอนกรีต

1. ที่ Model tree ดับเบิลคลิกที่ Inertia



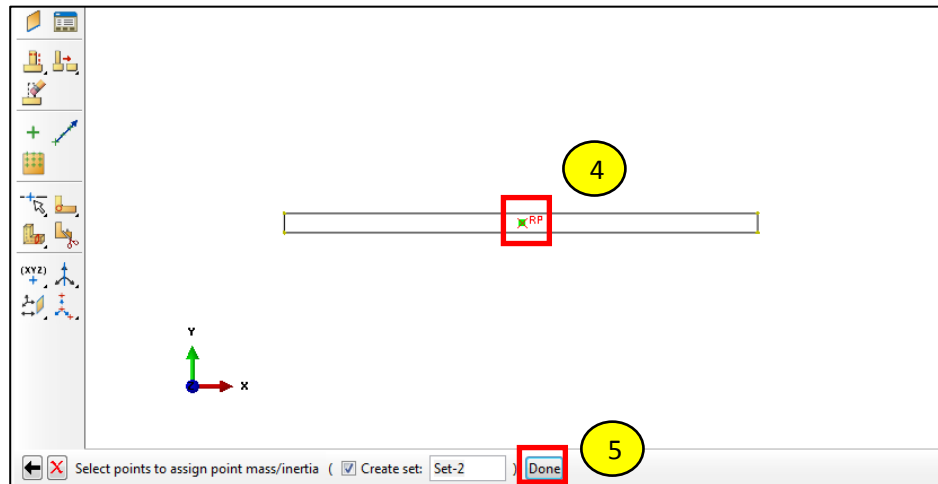
รูปที่ ค.36 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (1)

2. หัวข้อ Type เลือก Point mass/inertia
3. Continue...



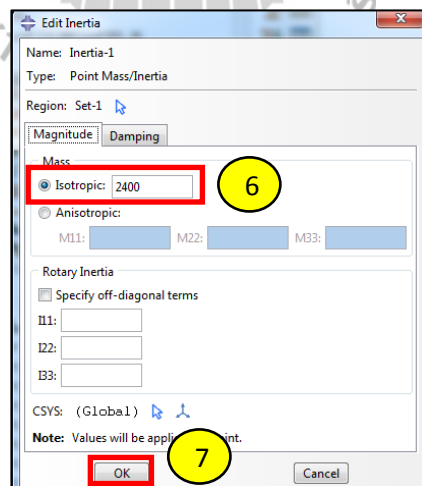
รูปที่ ค.37 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (2)

4. เลือก RP ของคอนกรีต
5. Done



รูปที่ ค.38 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (3)

6. ใส่น้ำหนักคอนกรีต
7. OK



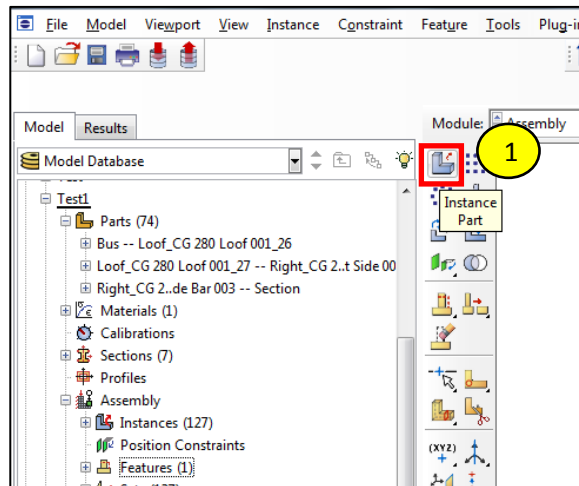
รูปที่ ค.39 การใส่น้ำหนักคอนกรีต (4)



### 1.3 Module: Assembly

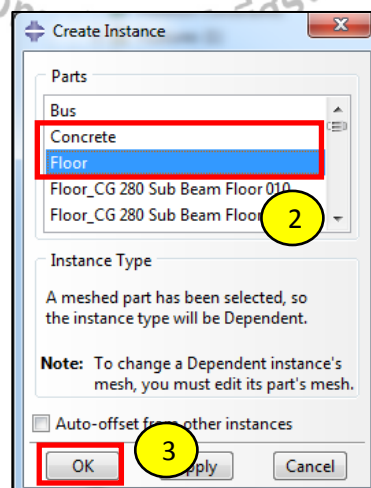
#### 1.3.1 Assembly ฟังก์ชันการประกอบและคอนกรีต

##### 1. เลือก Instance Part



รูปที่ ค.40 การ Assembly ฟังก์ชันการประกอบและคอนกรีต (1)

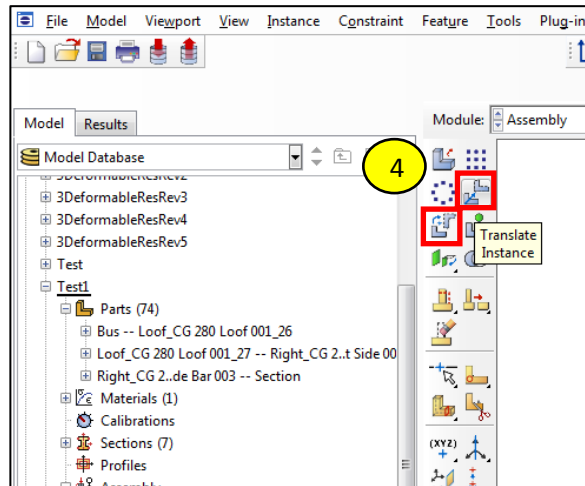
2. เลือกชิ้นงานที่ต้องการ Assembly คือ Concrete และ Floor
3. OK



รูปที่ ค.41 การ Assembly ฟังก์ชันการประกอบและคอนกรีต (2)

ชิ้นงาน

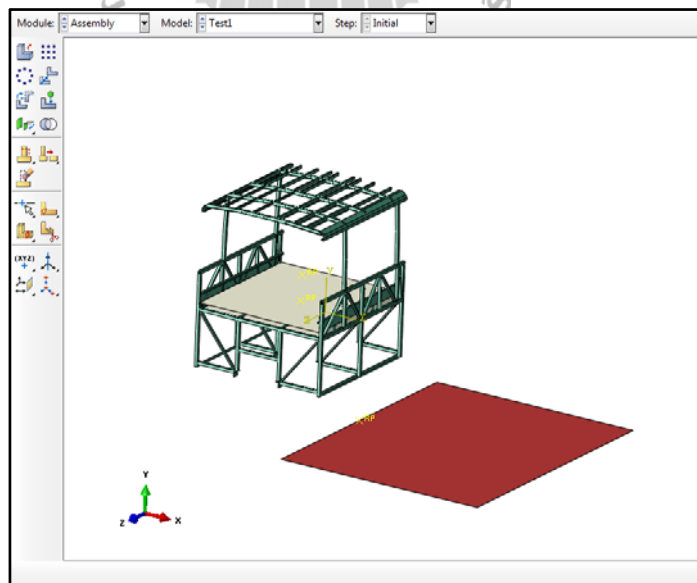
4. ใช้ Translate Instance หรือ Rotate Instance ในการเลื่อนหรือหมุน



รูปที่ ค.42การ Assembly ฟันตกระทาบและคอนกรีต (3)

การ Assembly ฟันตกระทาบและคอนกรีตที่สมบูรณ์แล้ว สามารถดูได้

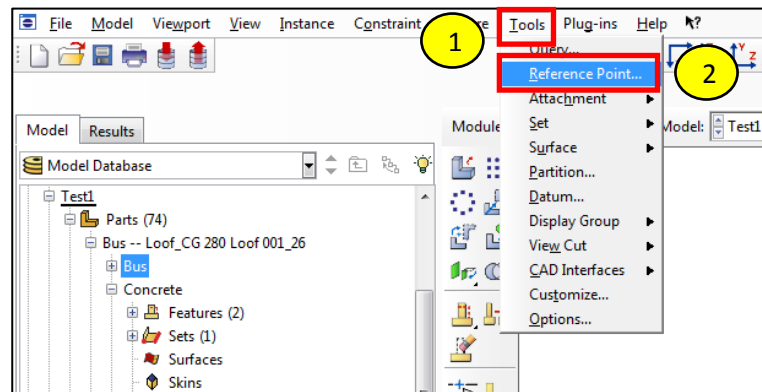
จากรูปที่ ค.43



รูปที่ ค.43การ Assembly ฟันตกระทาบและคอนกรีต (4)

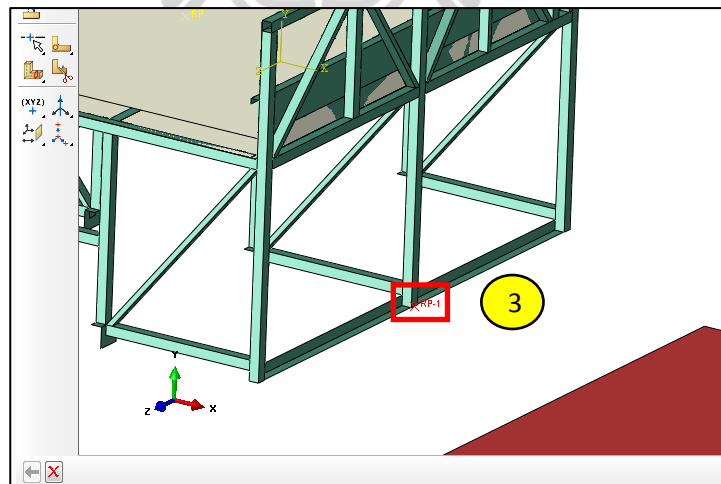
### 1.3.2 กำหนด Reference Point ที่ขอบของโครงสร้าง

1. คลิก Tools
2. เลือก Reference Point...



รูปที่ ค.44การกำหนด Reference Point ที่ขอบของโครงสร้าง (1)

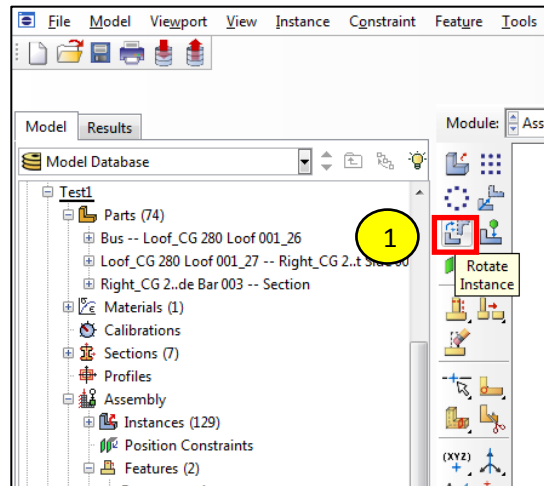
3. เลือกจุดกลางของขอบรูป



รูปที่ ค.45การกำหนด Reference Point ที่ขอบของโครงสร้าง (2)

### 1.3.3 เอียงรถให้จุด CG เกินขอบของโครงสร้างออกมาเล็กน้อย

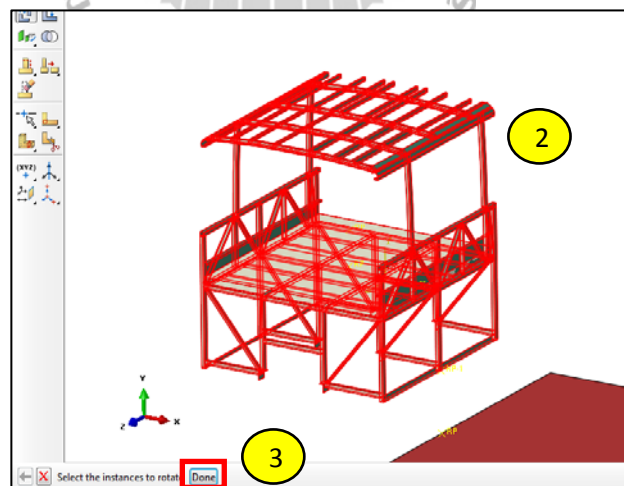
#### 1. เลือก Rotate Instance



รูปที่ ค.46 การเอียงโครงสร้างรถ (1)

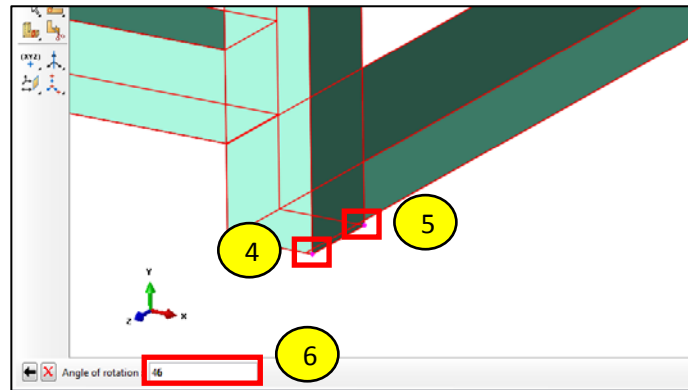
#### 2. เลือก โครงสร้างรถทั้งหมด

#### 3. Done

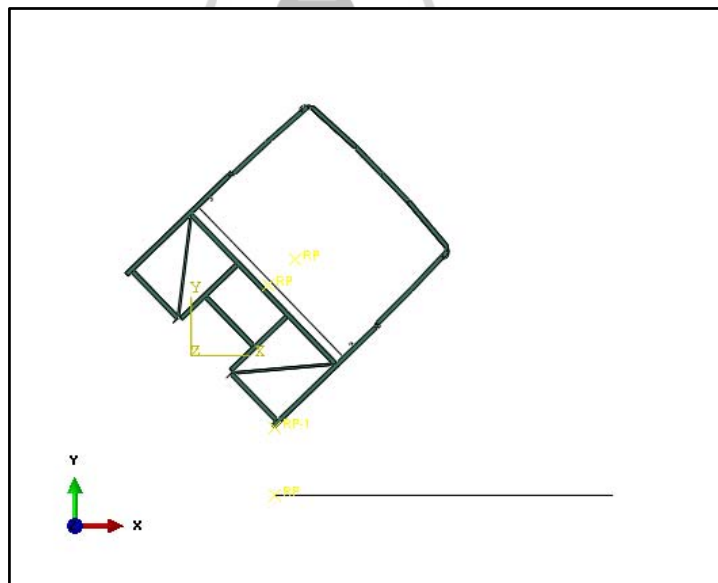


รูปที่ ค.47 การเอียงโครงสร้างรถ (2)

4. เลือกจุดเริ่มต้นของการเอียงรถ
5. เลือกจุดปลายของการเอียงรถ
6. ใส่องศาการเอียง



รูปที่ ค.48การเอียงโครงสร้างรถ (3)

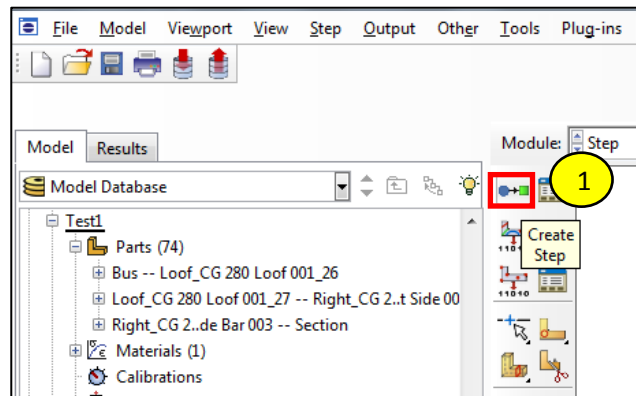


รูปที่ ค.49การเอียงโครงสร้างรถ (4)

## 1.4 Module: Step

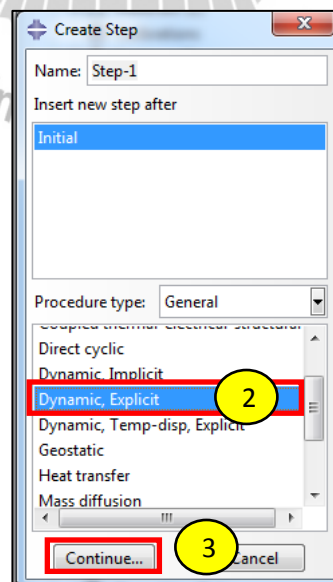
### 1.4.1 สร้าง Step การคำนวณ

#### 1. เลือก Create Step



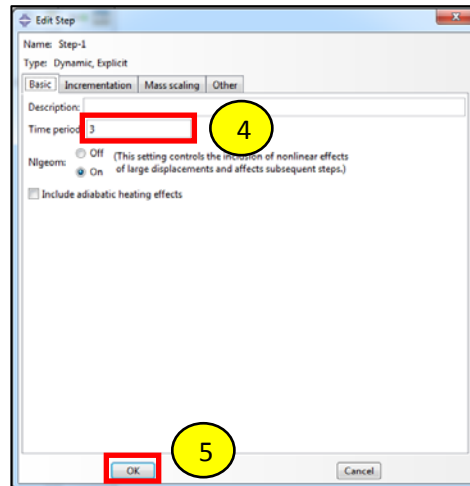
รูปที่ ค.50การสร้าง Step (1)

2. เลือก Dynamic, Explicit
3. Continue...



รูปที่ ค.51การสร้าง Step (2)

4. ใส่ว่า Time period
5. OK

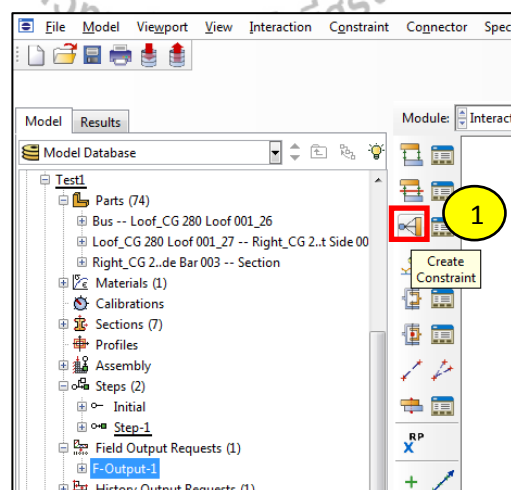


รูปที่ ค.52การสร้าง Step (3)

## 1.5 Module: Interaction

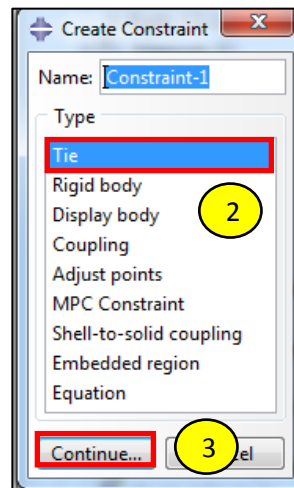
### 1.5.1 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ

1. เลือก Create Constraint



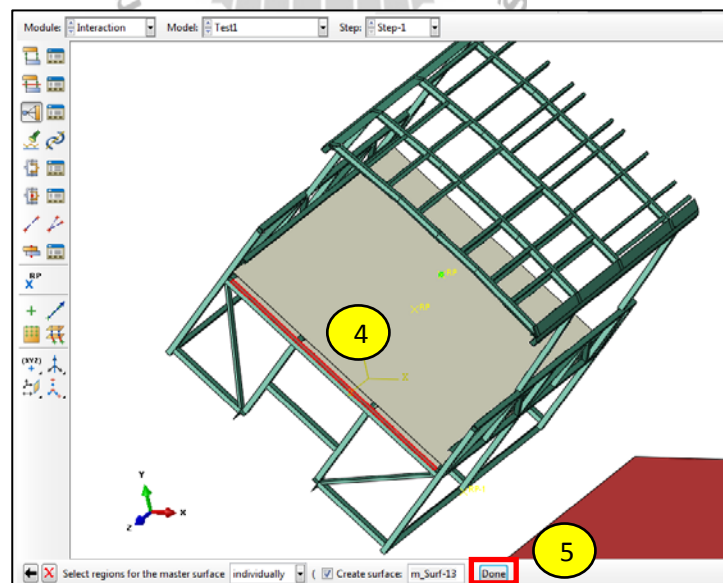
รูปที่ ค.53การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (1)

2. เลือก Tie
3. Continue...



รูปที่ ค.54 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (2)

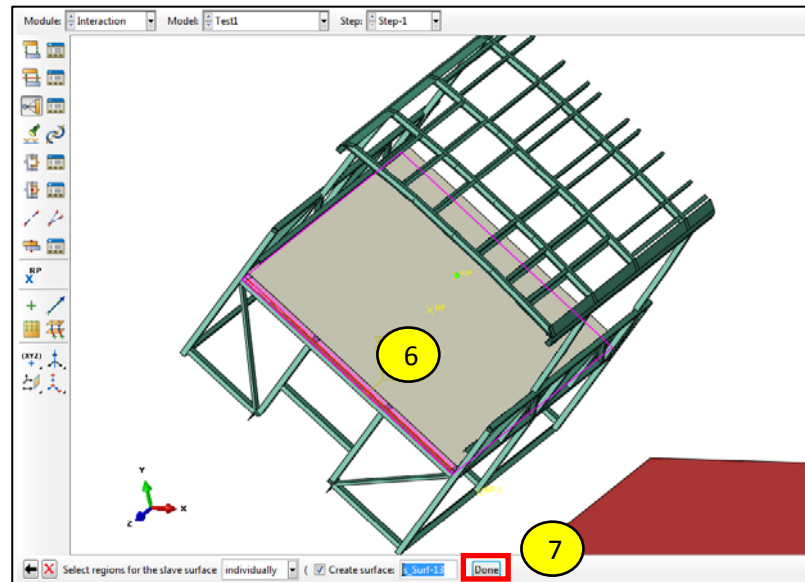
4. เลือกพื้นผิวของโครงสร้าง
5. Done



รูปที่ ค.55 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (3)



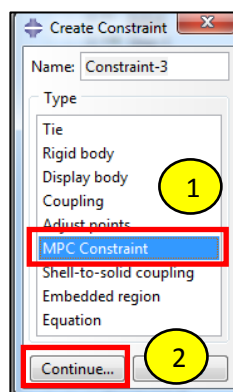
6. เลือกพื้นผิวคอนกรีต
7. Done



รูปที่ ค.56 การสร้างผิวสัมผัสของคอนกรีตกับโครงสร้างรถ (4)

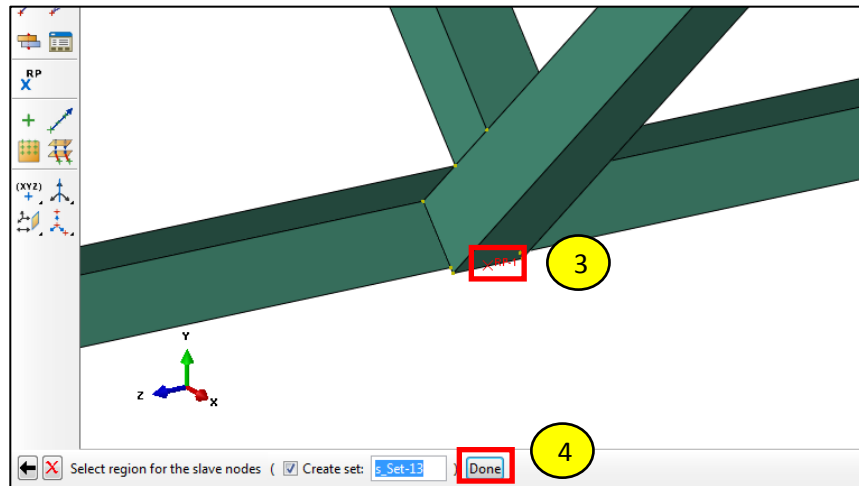
#### 1.5.2 การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ

1. คลิก Create Constraint แล้วเลือก MPC Constraint
2. Continue...



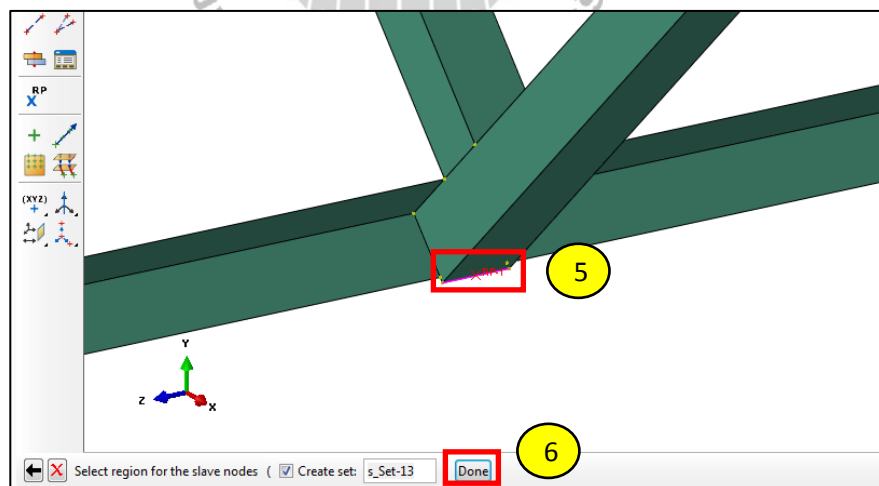
รูปที่ ค.57 การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (1)

3. เลือกจุด RP ที่ขอบของโครงสร้างรถ
4. Done



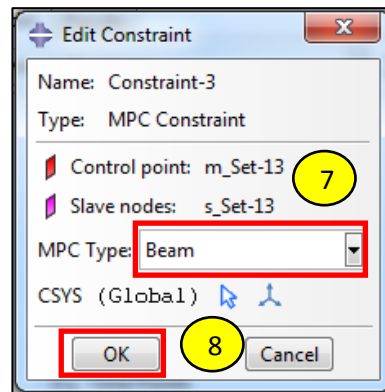
รูปที่ ค.58การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (2)

5. เลือกขอบของเสาถ
6. Done



รูปที่ ค.59การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (3)

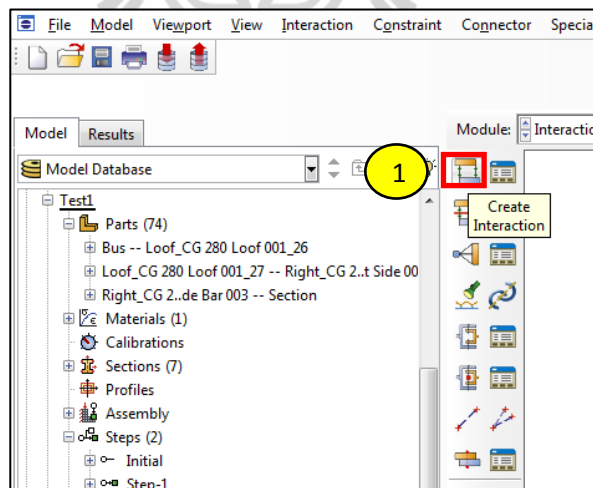
7. หัวข้อ MPC Type เลือก Beam
8. OK



รูปที่ ค.60การสร้างจุดหมุนของโครงสร้างรถ (4)

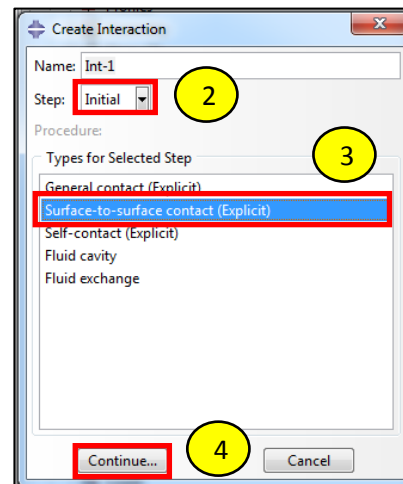
### 1.5.3 สร้าง Interaction ระหว่าง โครงสร้างกับพื้น

1. เลือก Create Interaction



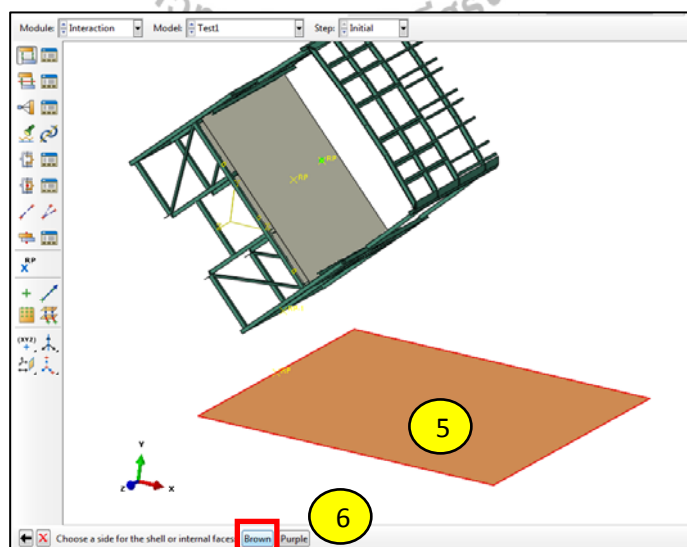
รูปที่ ค.61การสร้าง Interaction (1)

2. หัวข้อ Step เลือก Initial
3. หัวข้อ Types for Selected Step เลือก Surface-to-surface contact
4. Continue...



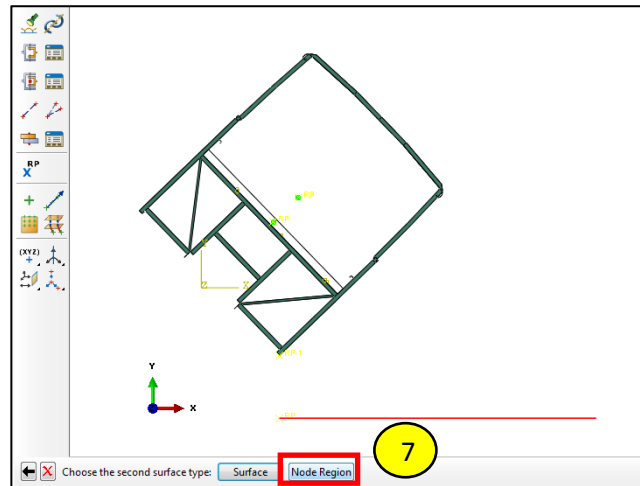
รูปที่ ค.62การสร้าง Interaction (2)

5. เลือกพื้นตกระทบ
6. เลือก Brown



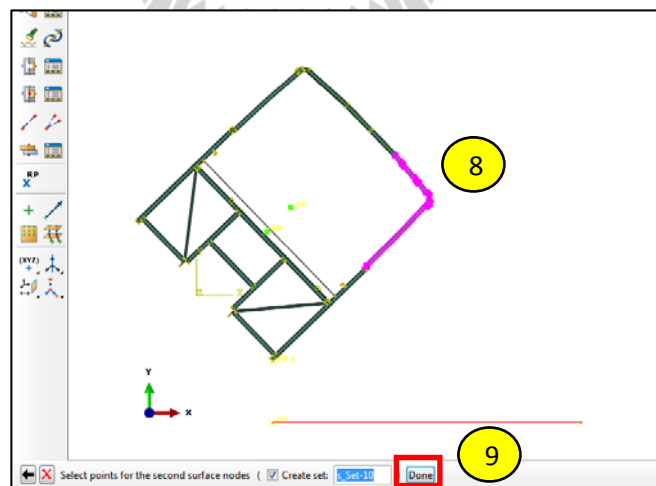
รูปที่ ค.63การสร้าง Interaction (3)

## 7. เลือก Node Region



รูปที่ ค.64การสร้าง Interaction (4)

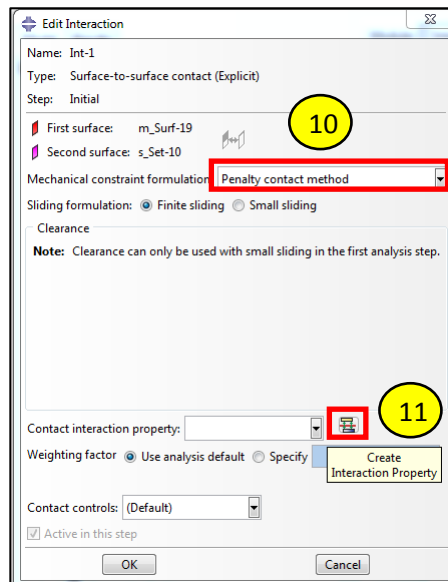
8. เลือกพื้นผิวโครงสร้างบริเวณที่จะกระทบพื้น
9. Done



รูปที่ ค.65การสร้าง Interaction (5)

10. หัวข้อ Mechanical constraint formulation เลือก Penalty contact method

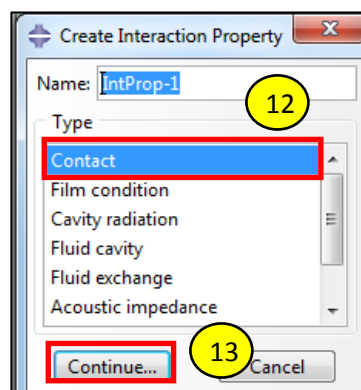
11. เลือก Create Interaction Property



รูปที่ ค.66การสร้าง Interaction (6)

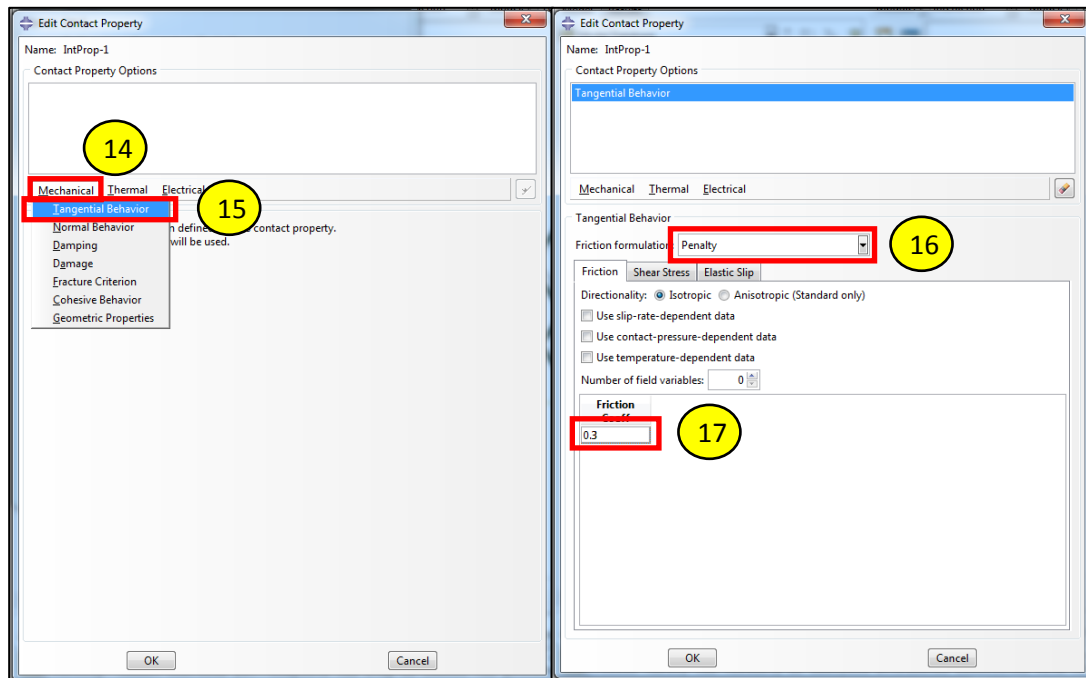
12. หัวข้อ Type เลือก Contact

13. Continue...



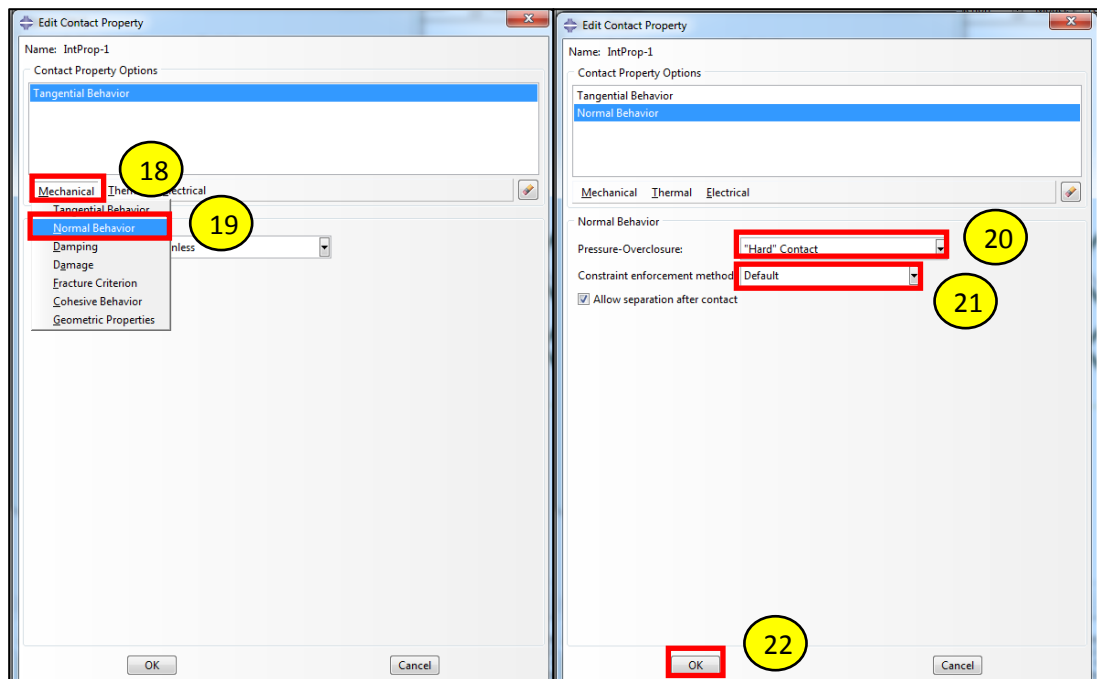
รูปที่ ค.67การสร้าง Interaction (7)

14. คลิก Mechanical
15. เลือก Tangential Behavior
16. หัวข้อ Friction Formulation เลือก Frictionless
17. ใส่ค่าแรงเสียดทานเท่ากับ 0.3



รูปที่ ค.68การสร้าง Interaction (8)

18. คลิก Mechanical
19. เลือก Normal Behavior
20. หัวข้อ Pressure-Overclosureเลือก “Hard” Contact
21. หัวข้อ Constraint enforcement method เลือก Default
22. OK

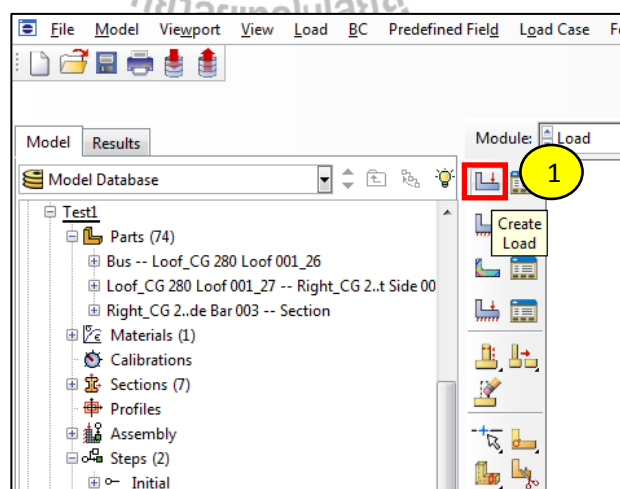


รูปที่ ค.69การสร้าง Interaction (9)

## 1.6 Module: Load

### 1.6.1 สร้างแรงโน้มถ่วง

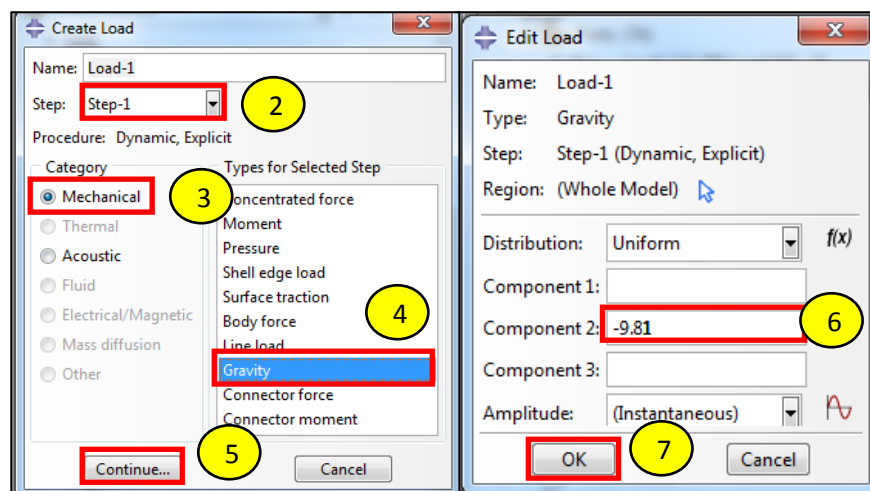
#### 1. เลือก Create Load



รูปที่ ค.70การสร้างแรงโน้มถ่วง (1)



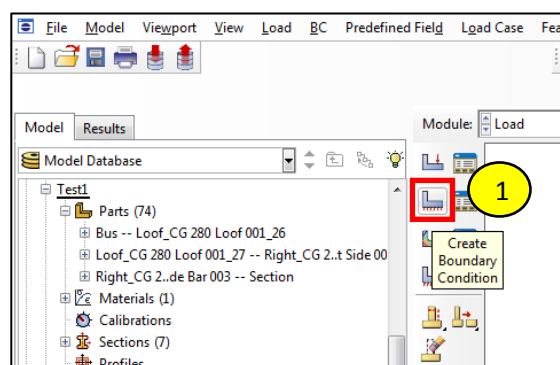
2. หัวข้อ Step เลือก Step-1
3. หัวข้อ Category เลือก Mechanical
4. หัวข้อ Types for Selected Step เลือก Gravity
5. Continue...
6. ใส่ค่า Component 2 เท่ากับ -9.81
7. OK



รูปที่ ค.71การสร้างแรงโน้มถ่วง (2)

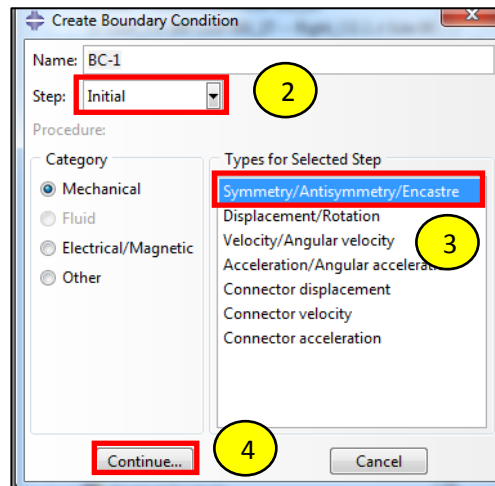
### 1.6.2 สร้าง Boundary Condition

1. เลือก Create Boundary Condition



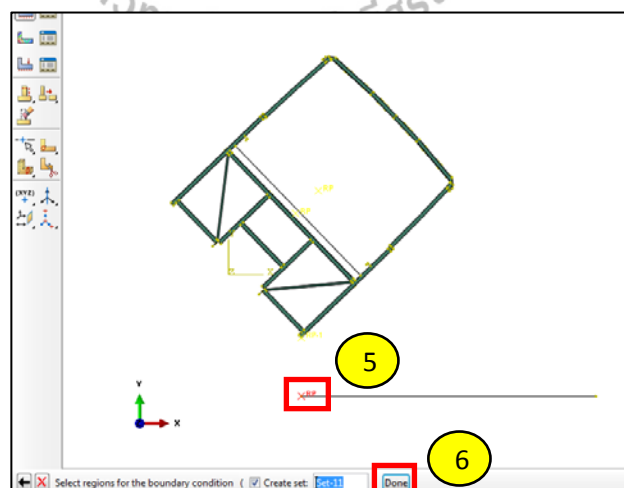
รูปที่ ค.72การสร้างBoundary Condition (1)

2. หัวข้อ Step เลือก Mechanical
3. เลือก Symmetry/Antisymmetry/Encastre
4. Continue...



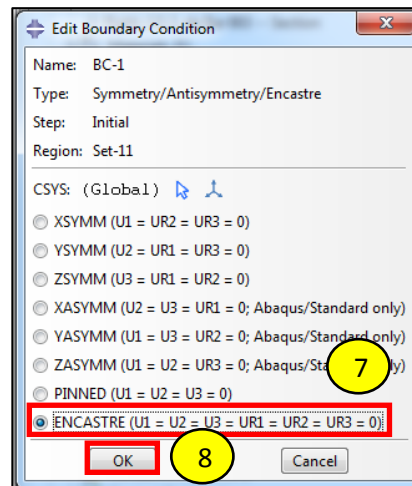
รูปที่ ค.73การสร้าง Boundary Condition (2)

5. เลือก RP ของพื้น
6. Done



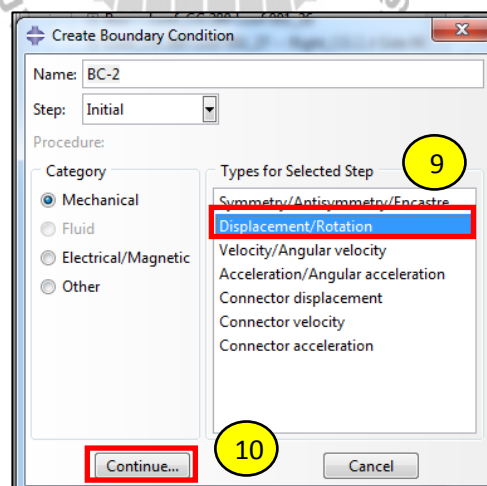
รูปที่ ค.74การสร้าง Boundary Condition (3)

7. เลือก Encastre
8. OK



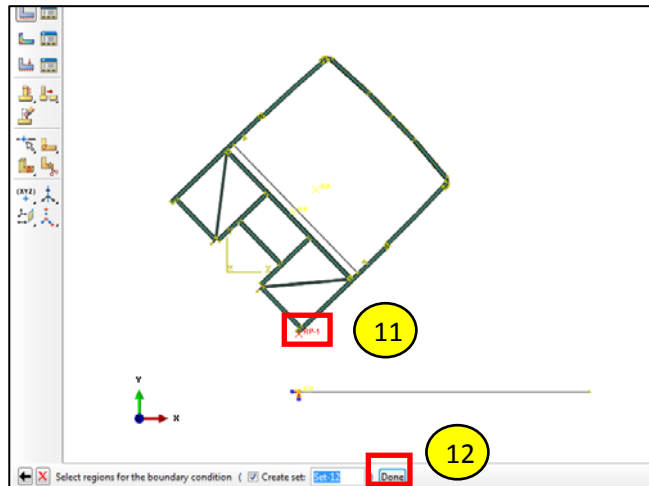
รูปที่ ก.75การสร้าง Boundary Condition (4)

9. เลือก Create Boundary Condition และเลือก Displacement/Rotation
10. Continue...



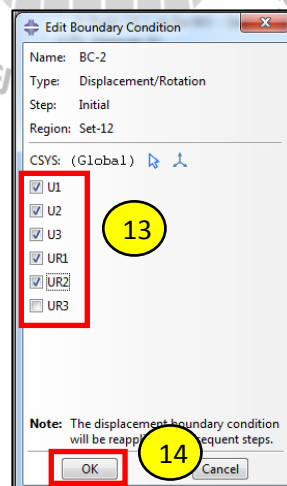
รูปที่ ก.76การสร้าง Boundary Condition (5)

11. เลือก RP ที่ขอบของโครงสร้างรถ
12. Done



รูปที่ ค.77การสร้าง Boundary Condition (6)

13. เลือก U1, U2, U3, UR1, UR2
14. OK

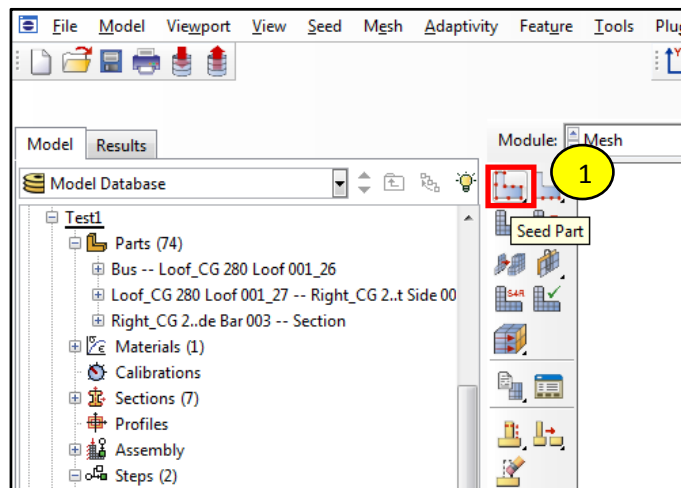


รูปที่ ค.78การสร้าง Boundary Condition (7)

## 1.7 Module: Mesh

### 1.7.1 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์

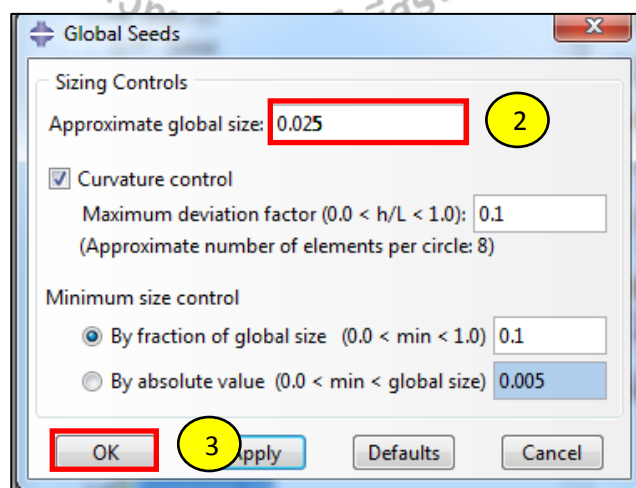
#### 1. เลือก Seed Part



รูปที่ ค.79 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ (1)

#### 2. กำหนดขนาดเอลิเมนต์

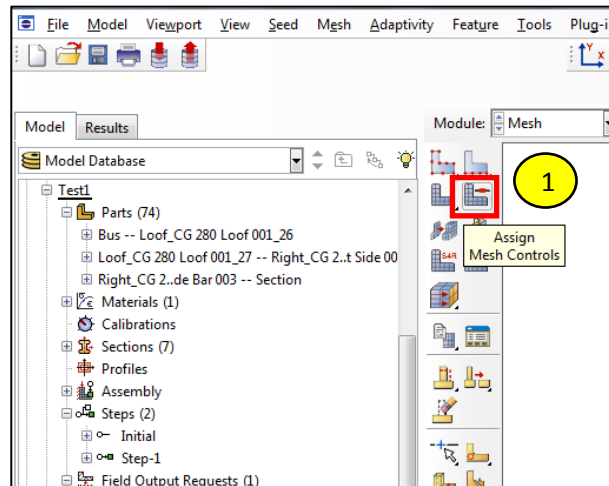
#### 3. OK



รูปที่ ค.80 การกำหนดขนาดเอลิเมนต์ (2)

## 1.7.2 การกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์

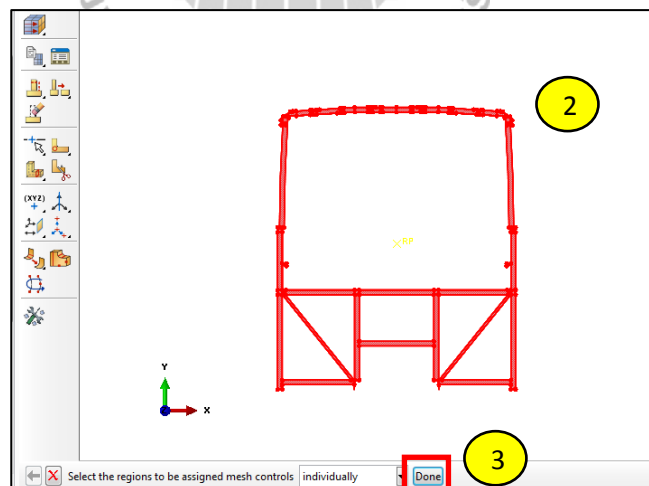
### 1. เลือก Assign Mesh Controls



รูปที่ ค.81 การกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์ (1)

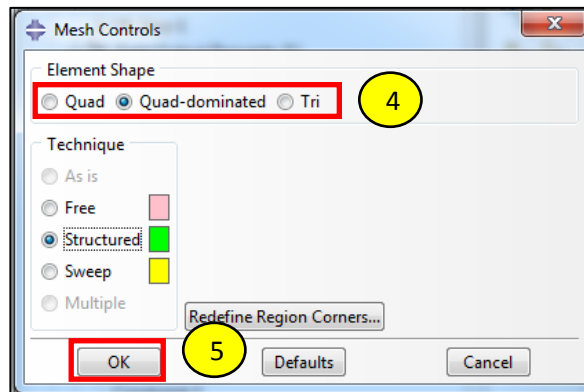
### 2. เลือกโครงสร้างทั้งหมด

### 3. Done



รูปที่ ค.82 การกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์ (2)

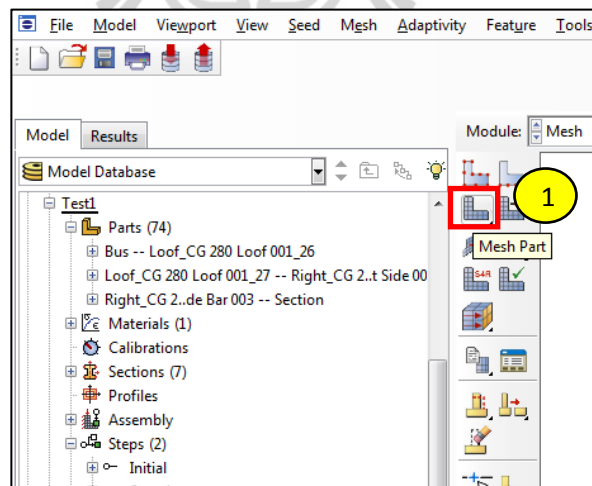
4. เลือกรูปแบบของเอลิเมนต์
5. OK



รูปที่ ค.83การกำหนดรูปแบบเอลิเมนต์ (3)

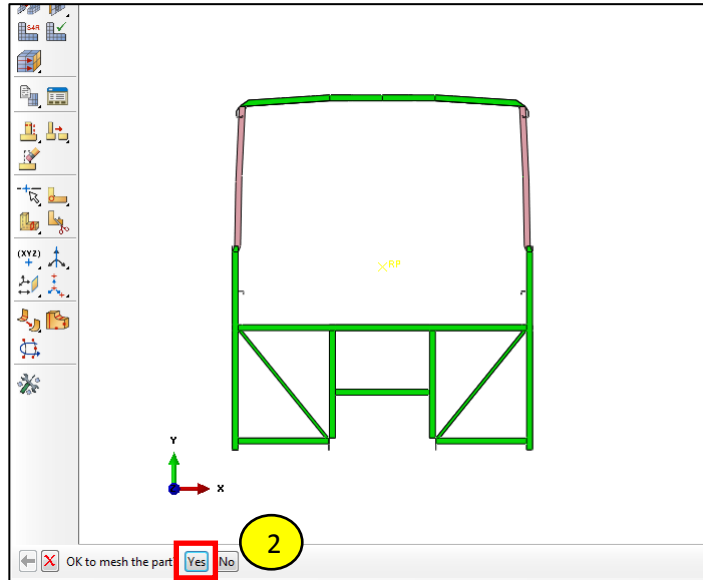
### 1.7.3 การ Mesh

1. เลือก Mesh Part



รูปที่ ค.84การ Mesh (1)

2. คลิก Yes

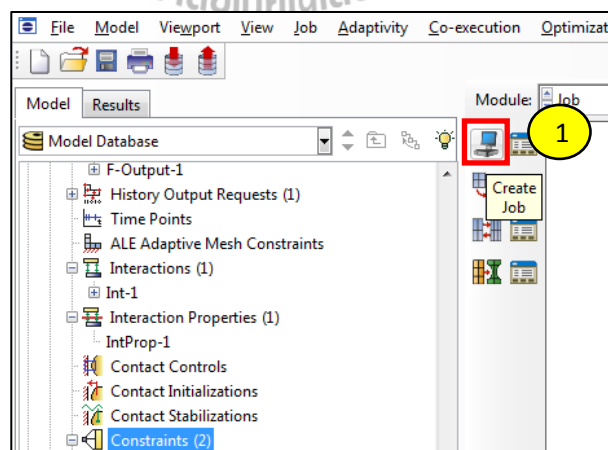


รูปที่ ค.85การ Mesh (2)

## 1.8 Module: Job

### 1.8.1 การสร้างไฟล์เพื่อรันงาน

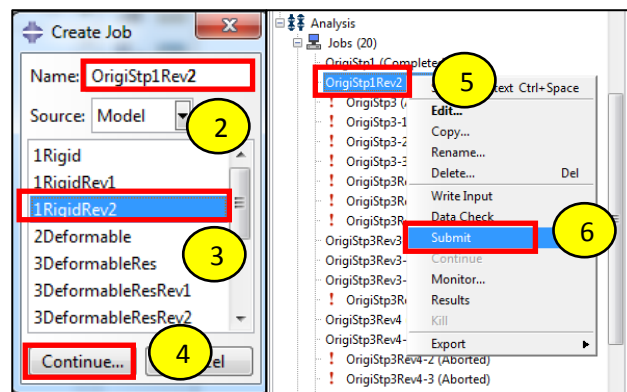
1. เลือก Create Job



รูปที่ ค.86การสร้างไฟล์เพื่อรันงาน (1)



2. ตั้งชื่อไฟล์ที่ใช้ในการรัน
3. เลือก Model ที่ต้องการรัน
4. Continue...
5. คลิกขวาที่ชื่อไฟล์
6. Submit

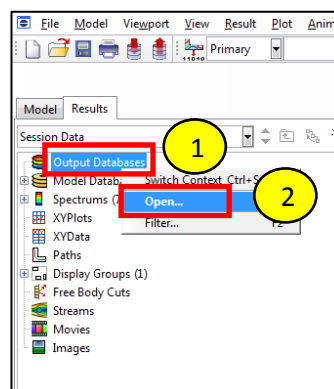


รูปที่ ค.87การสร้างไฟล์เพื่อรันงาน (2)

## 1.9 Visualization

### 1.9.1 การเปิดไฟล์งาน

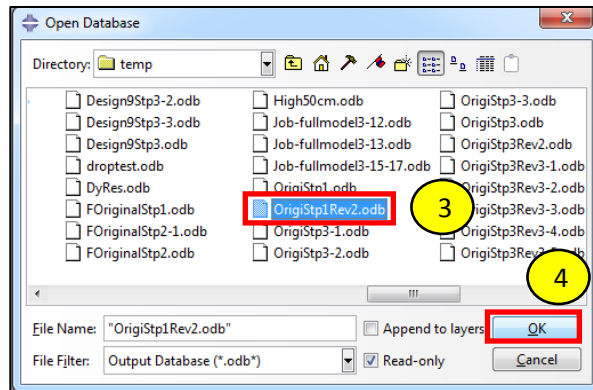
1. คลิกขวาที่ Output Databases
2. เลือก Open...



รูปที่ ค.88การเปิดไฟล์งาน (1)

3. เลือกไฟล์

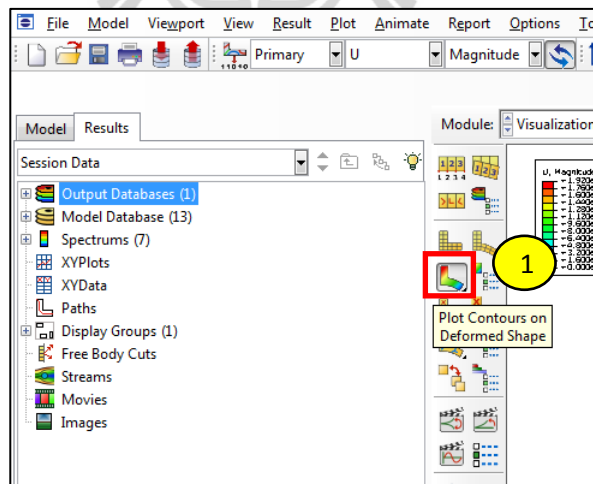
4. OK



รูปที่ ค.89การเปิดไฟล์งาน (2)

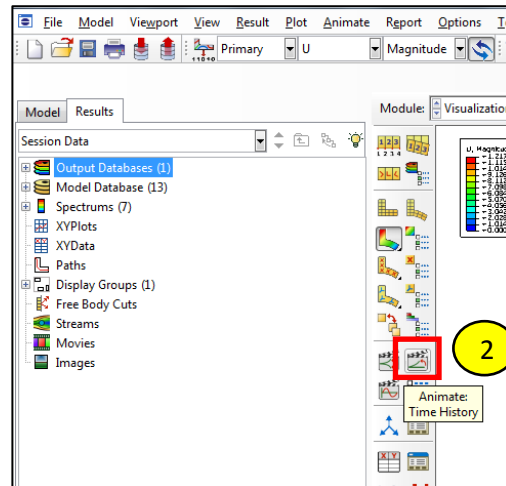
### 1.9.2 การดูผลการวิเคราะห์

1. เลือก Plot Contours on Deformed Shape



รูปที่ ค.90การดูผลการวิเคราะห์ (1)

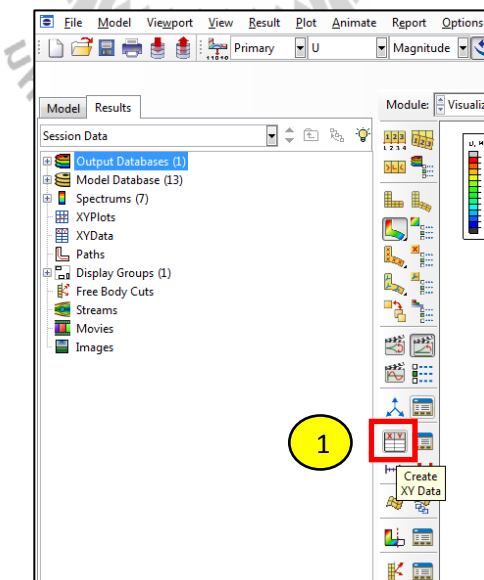
## 2. เลือก Animate Time History



รูปที่ ค.91การดูผลการวิเคราะห์ (2)

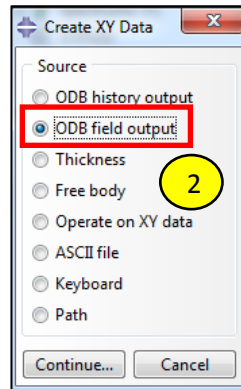
### 1.9.3 การดูค่าความเร็วเชิงมุม

#### 1. เลือก Create XY Data



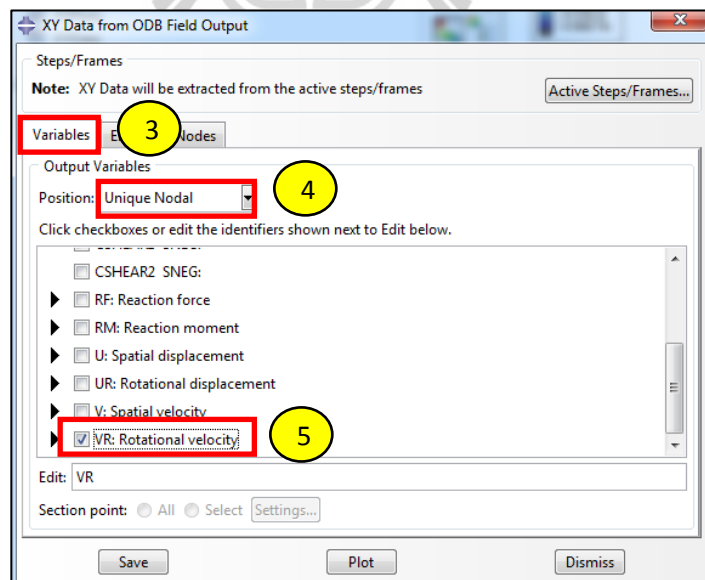
รูปที่ ค.92การดูค่าความเร็วเชิงมุม (1)

2. เลือก ODB field output



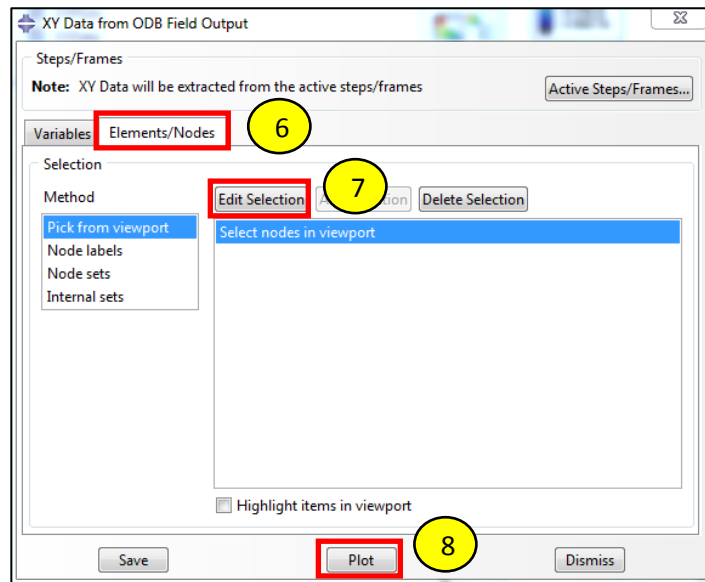
รูปที่ ค.93การดูค่าความเร็วเชิงมุม (2)

3. เลือก Tab Variables
4. หัวข้อ Position เลือก Unique Nodal
5. เลือก VR



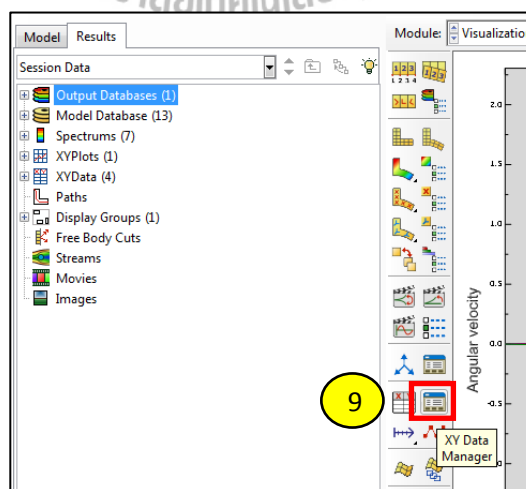
รูปที่ ค.94การดูค่าความเร็วเชิงมุม (3)

6. เลือก Tab Elements/Nodes
7. เลือก Edit Selection แล้วเลือกจุดที่ต้องการดูค่าความเร็วเชิงมุม
8. Plot



รูปที่ ค.95 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (4)

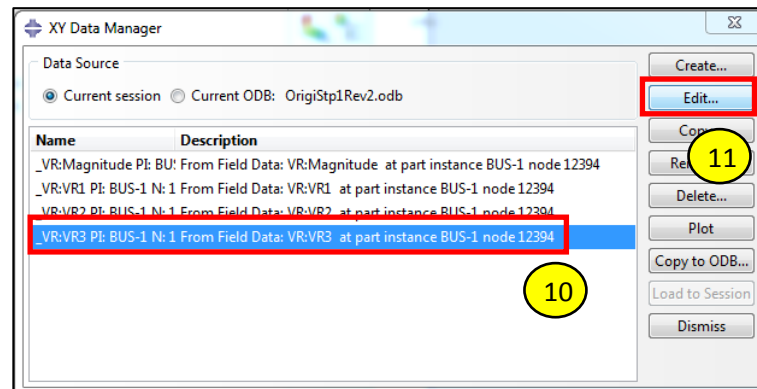
9. เลือก XY Data Manager



รูปที่ ค.96 การดูค่าความเร็วเชิงมุม (5)

10. เลือก VR3

11. Edit...



รูปที่ ค.97การดูค่าความเร็วเชิงมุม (6)

12. ดูค่าความเร็วเชิงมุมช่วงก่อนกระทบพื้น

Name: \_VR:VR3 PI: BUS-1 N: 12394

	X	Y
103	2.04	-1.80707
104	2.06	-1.94561
105	2.08	
106	2.1	
107	2.12	-2.1943
108	2.14	-2.28197
109	2.16	2.03344
110	2.18	1.94515
111	2.2	1.85888
112	2.22	1.77469
113	2.24	1.69259

Quantity Types  
 X: Time Y: Angular velo

OK Cancel

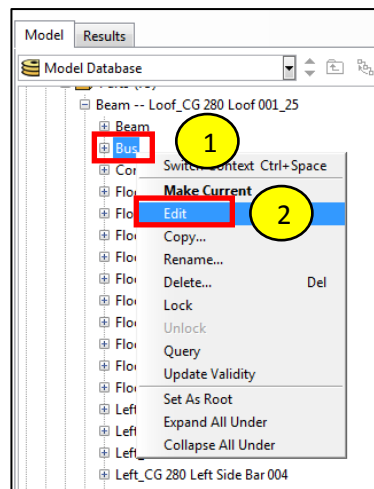
รูปที่ ค.98การดูค่าความเร็วเชิงมุม (7)

## 2. การวิเคราะห์ช่วงกระทบพื้น

### 2.1 Module: Part

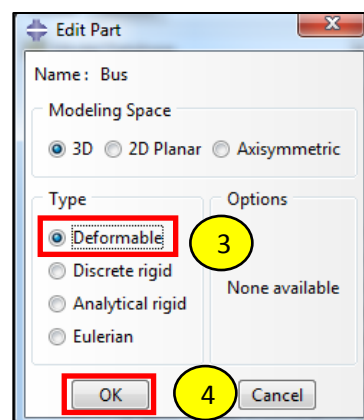
#### 2.1.1 การแก้ไข Part

1. คลิกขวาที่ Bus
2. เลือก Edit



รูปที่ ค.99 การแก้ไข Part (1)

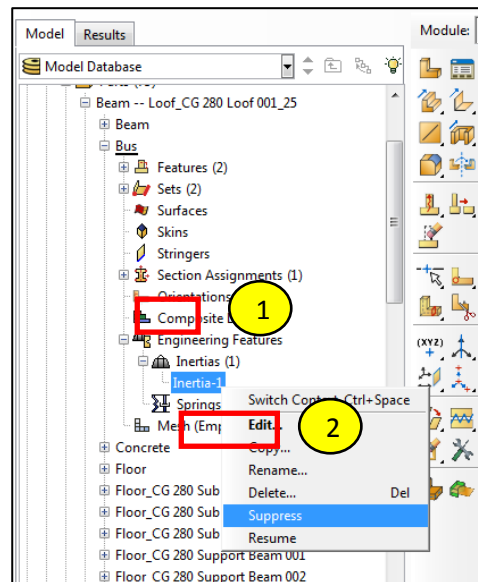
3. แก้ไข Part เป็น Deformable
4. OK



รูปที่ ค.100 การแก้ไข Part (2)

### 2.1.2 Suppress ค่า Inertia

1. คลิกขวาที่ Inertia
2. เลือก Suppress

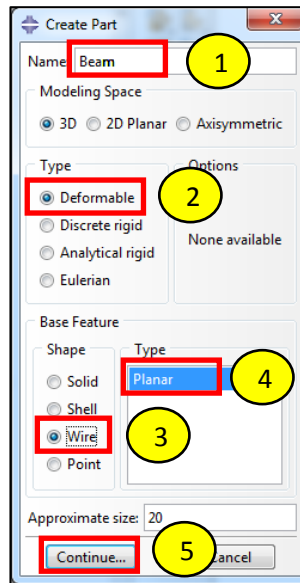


รูปที่ ค.101การ Suppress ค่า Inertia

### 2.1.3 สร้างพื้นที่ปิดกั้น

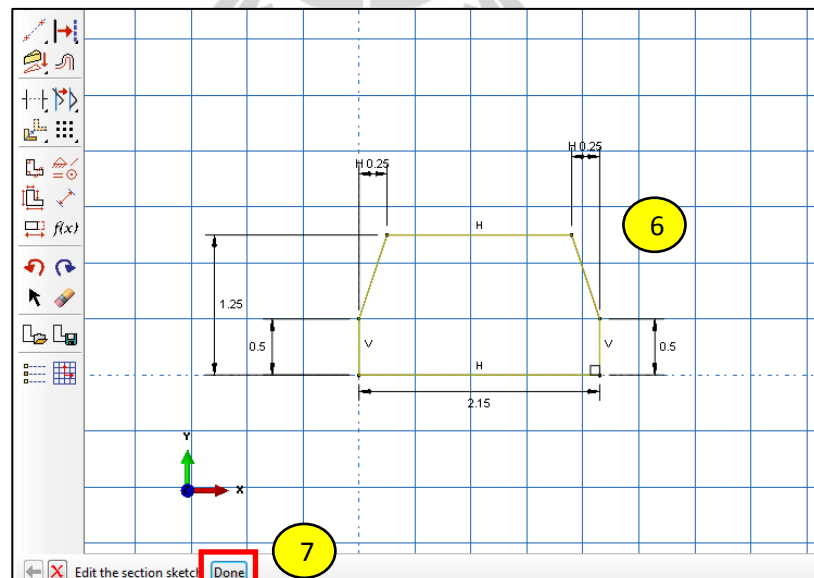
1. เลือก Create Part แล้วตั้งชื่อ
2. หัวข้อ Type เลือก Deformable
3. หัวข้อ Base Feature: Shape เลือก Wire
4. หัวข้อ Base Feature: Type เลือก Planar
5. Continue...





รูปที่ ค.102 การสร้างพื้นที่ปลอดภัย (1)

6. สร้างพื้นที่ปลอดภัย
7. Done

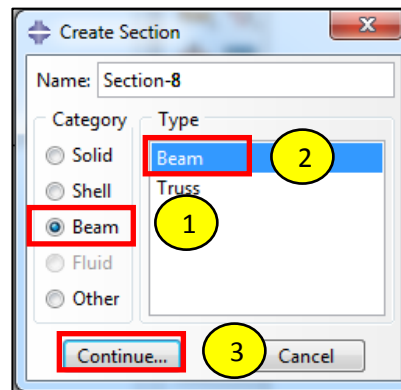


รูปที่ ค.103 การสร้างพื้นที่ปลอดภัย (2)

## 2.2 Module: Property

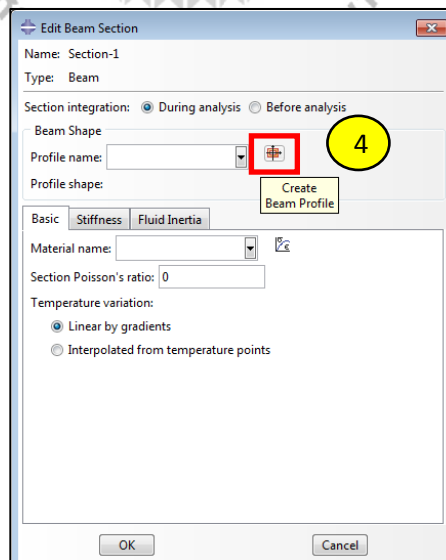
### 2.2.1 การสร้าง Section ของ Beam

1. Create Section หัวข้อ Category เลือก Beam
2. หัวข้อ Type เลือก Beam
3. Continue...



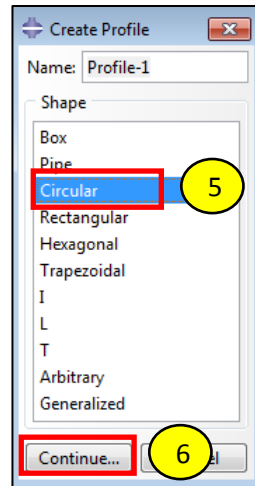
รูปที่ ก.104การสร้าง Section ของ Beam (1)

4. เลือก Create Beam Profile



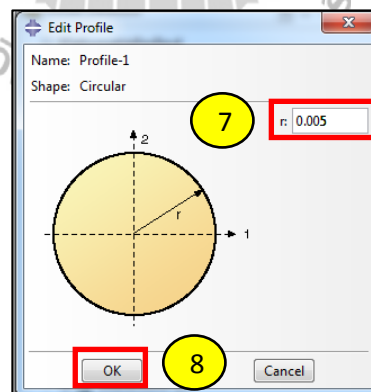
รูปที่ ก.105การสร้าง Section ของ Beam (2)

5. หัวข้อ Shape เลือก Circular
6. Continue...



รูปที่ ก.106การสร้าง Section ของ Beam (3)

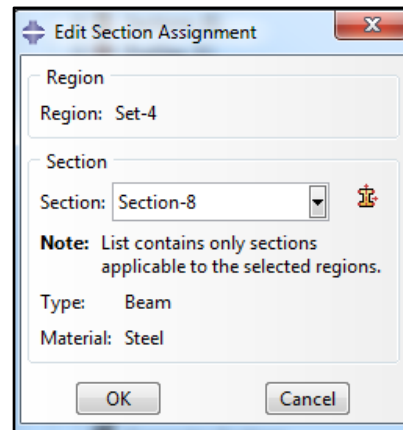
7. ใส่ค่ารัศมีของ Beam
8. OK



รูปที่ ก.107การสร้าง Section ของ Beam (4)

## 2.2.2 การ Assign Section ของ Beam

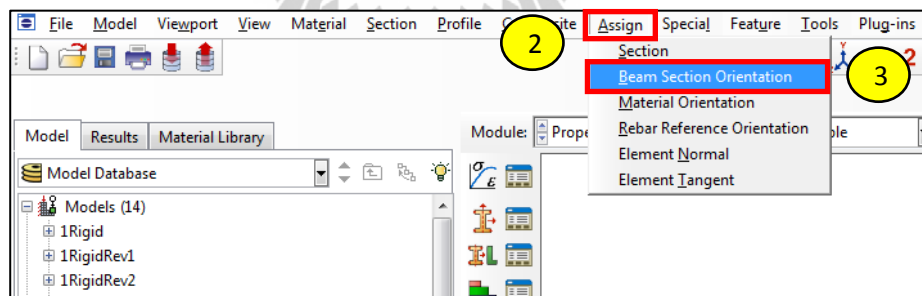
### 1. เลือก Assign Section



รูปที่ ค.108 การ Assign Section ของ Beam (1)

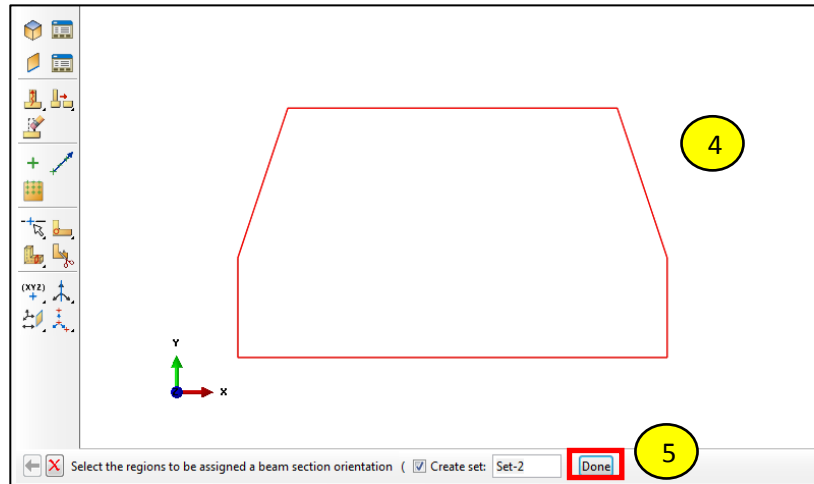
### 2. คลิก Assign

### 3. เลือก Beam Section Orientation



รูปที่ ค.109 การ Assign Section ของ Beam (2)

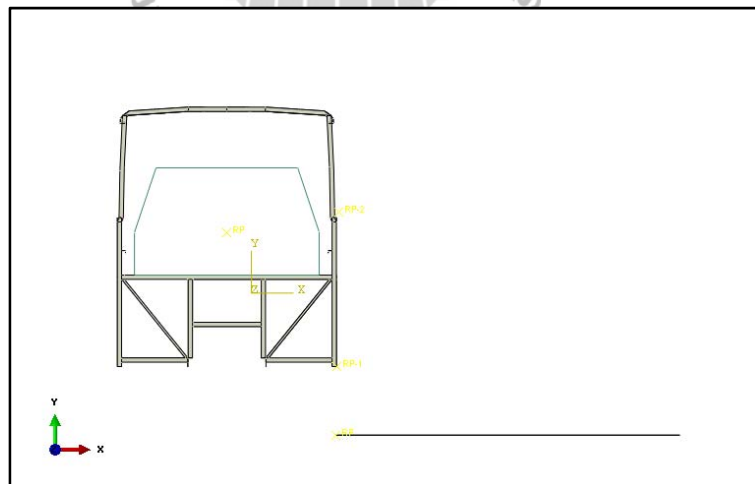
4. เลือกชิ้นงานทั้งหมด
5. Done



รูปที่ ค.110การ Assign Section ของ Beam (3)

### 2.3 Module: Assembly

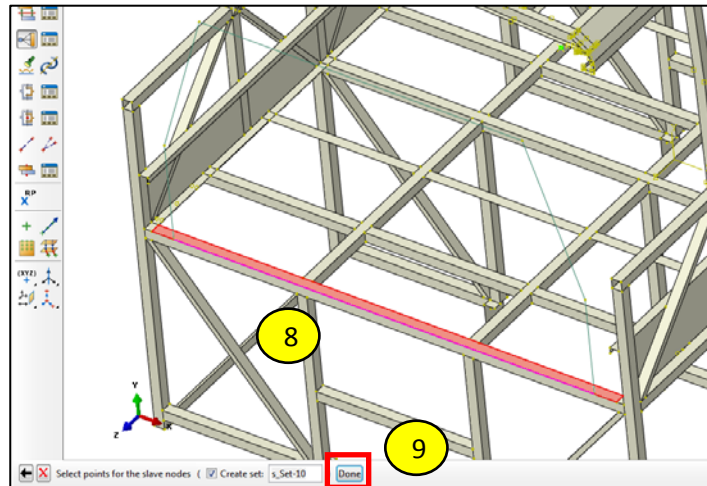
ลักษณะการ Assembly Beam สามารถดูได้จากรูปที่ ค.?



รูปที่ ค.111การ Assembly Beam

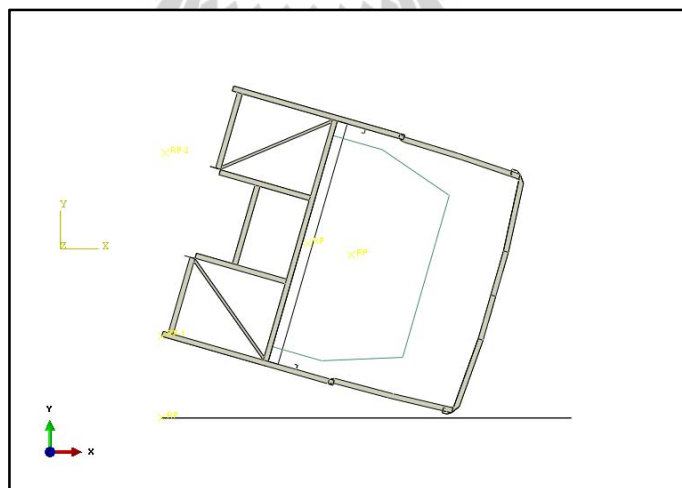
## 2.4 Module: Interaction

### 2.4.1 สร้างผิวสัมผัสระหว่าง Beam กับโครงสร้าง



รูปที่ ค.112 การสร้างผิวสัมผัสระหว่าง Beam กับโครงสร้าง

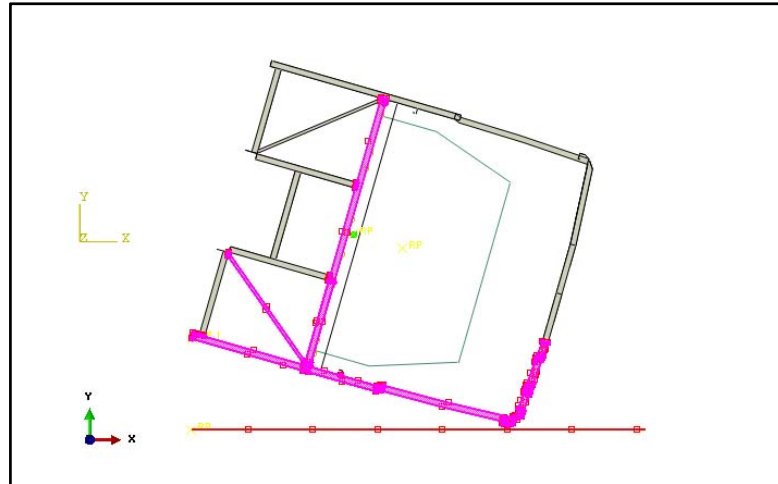
### 2.4.2 เอียงโครงสร้างรถให้อยู่ในลักษณะใกล้เคียงกับช่วงก่อนกระทบพื้น



รูปที่ ค.113 ลักษณะการเอียงรถของการวิเคราะห์ช่วงกระทบพื้น

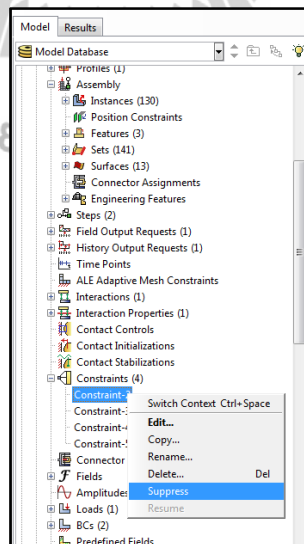
### 2.4.3 แก้ไข Interaction

ช่วงกระทบพื้น ผิวสัมผัสของโครงสร้างรถที่กระทบกับพื้นจะมีมากขึ้น



รูปที่ ค.114 การแก้ไข Interaction ระหว่างพื้นกับโครงสร้างรถ

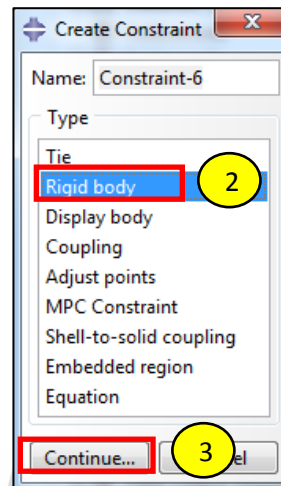
### 2.4.4 Suppress Constraint ในส่วนที่เป็น MPC



รูปที่ ค.115 การ Suppress Constraint ในส่วนที่เป็น MPC

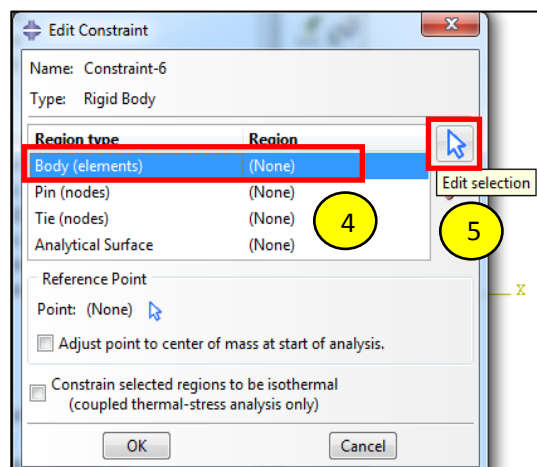
### 2.4.5 สร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body

1. เลือก Create Constraint
2. หัวข้อ Type เลือก Rigid body
3. Continue...



รูปที่ ค.116การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (1)

4. เลือก Body (elements)
5. คลิก Edit selection

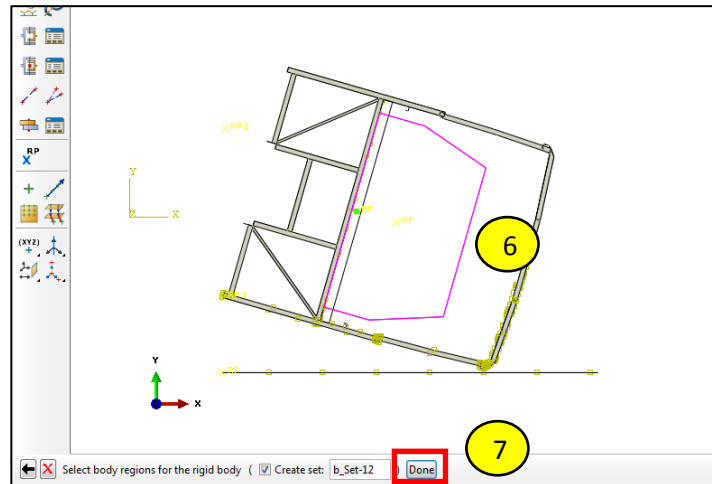


รูปที่ ค.117การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (2)



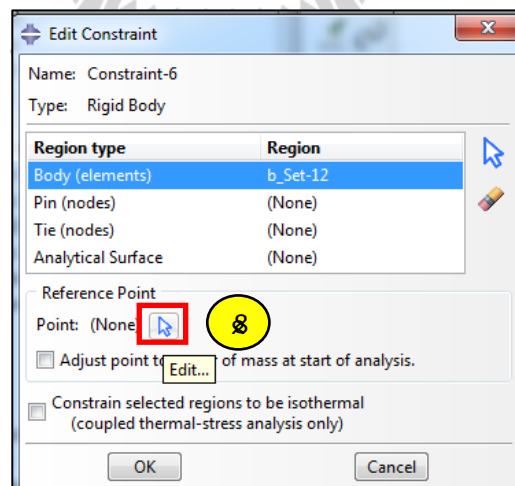
6. เลือก Beam

7. Done



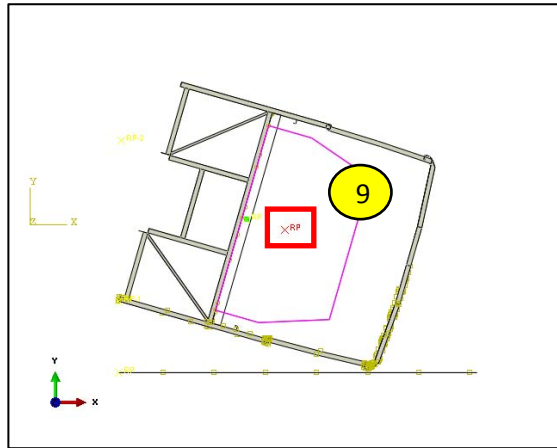
รูปที่ ค.118 การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (3)

8. เลือก Edit Point



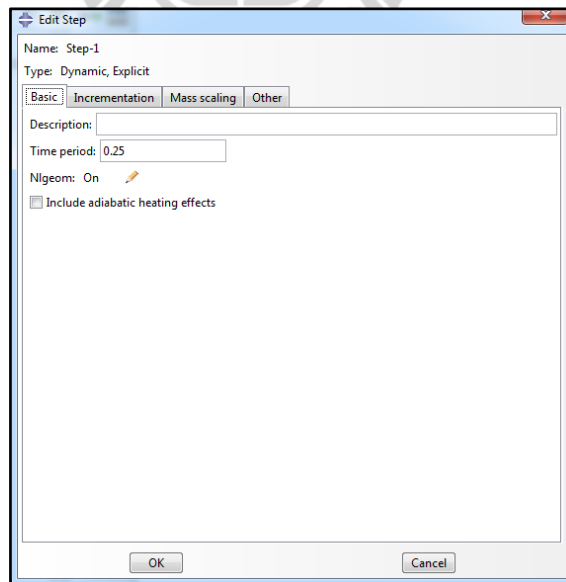
รูปที่ ค.119 การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (4)

## 9. เลือก RP ของโครงสร้าง



รูปที่ ค.120การสร้าง Beam ให้เป็น Rigid Body (5)

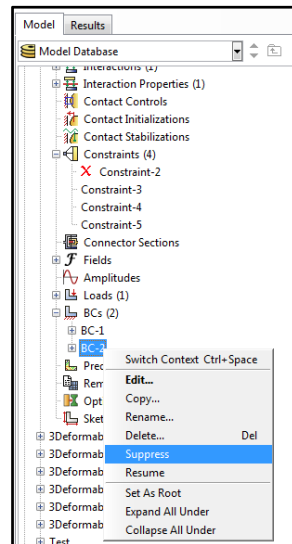
## 2.5 Module: Step แก้ไข Time Period



รูปที่ ค.121การแก้ไข Time Period

## 2.6 Module: Load

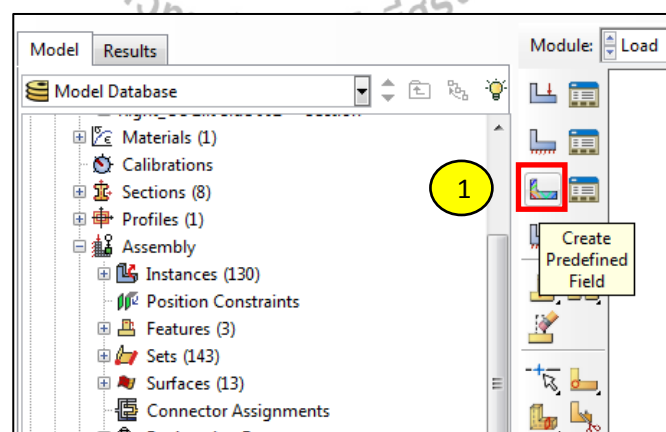
### 2.6.1 Suppress boundary condition ส่วนที่เป็น Displacement/Rotation



รูปที่ ค.122 การ Suppress boundary condition

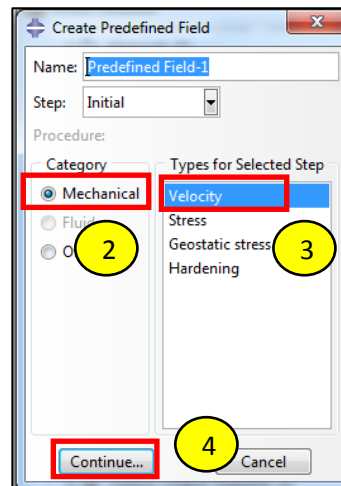
### 2.6.2 กำหนดค่าความเร็วเชิงมุม

#### 1. เลือก Create Predefined Field



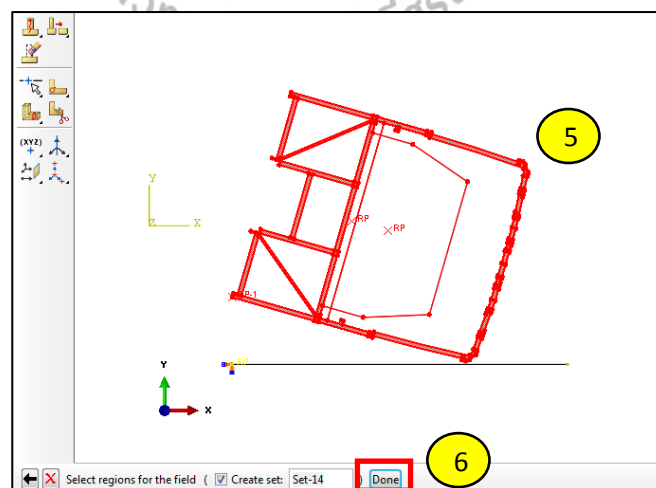
รูปที่ ค.123 การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (1)

2. หัวข้อ Category เลือก Mechanical
3. หัวข้อ Types for Selected Step เลือก Velocity
4. Continue...



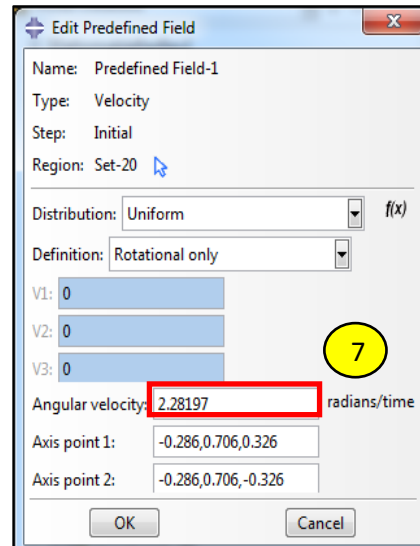
รูปที่ ค.124 การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (2)

5. เลือกโครงสร้างทั้งหมด
6. Done



รูปที่ ค.125 การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (3)

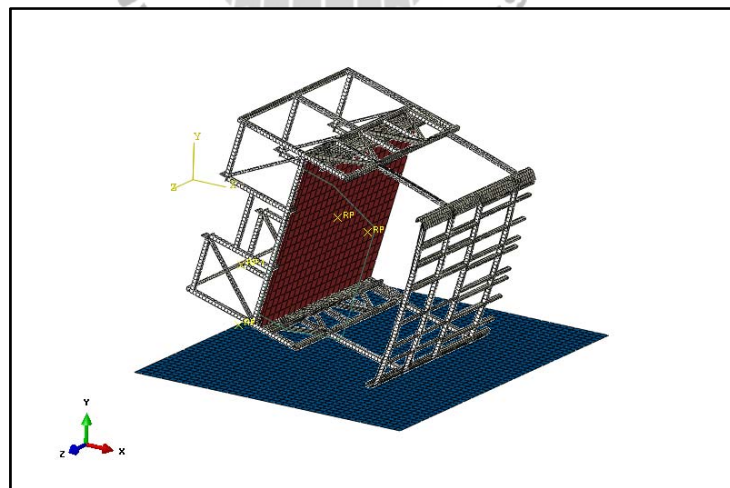
## 7. ใส่ค่าความเร็วเชิงมุมที่หาได้จากช่วงก่อนกระทบพื้น



รูปที่ ค.126การกำหนดค่าความเร็วเชิงมุม (4)

## 2.7 Module: Mesh

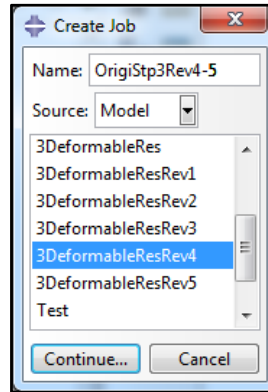
Mesh โครงสร้างทั้งหมด



รูปที่ ค.127การ Mesh โครงสร้างทั้งหมด

## 2.8 Module: Job

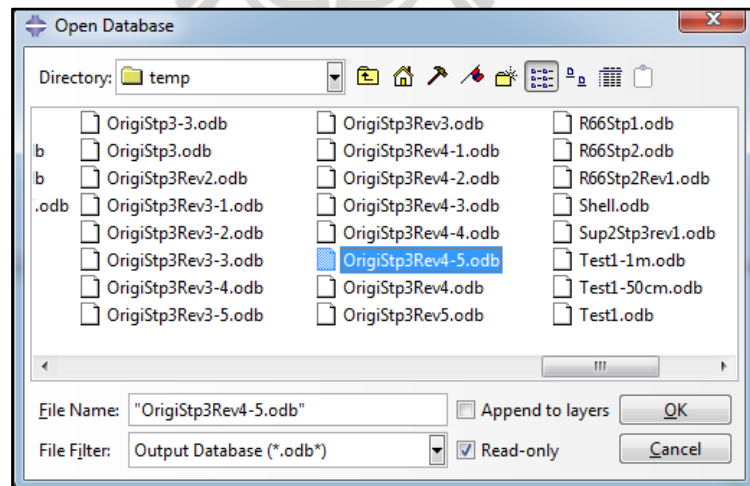
ตั้งชื่อไฟล์เพื่อรันงาน



รูปที่ ค.128 การตั้งชื่อไฟล์

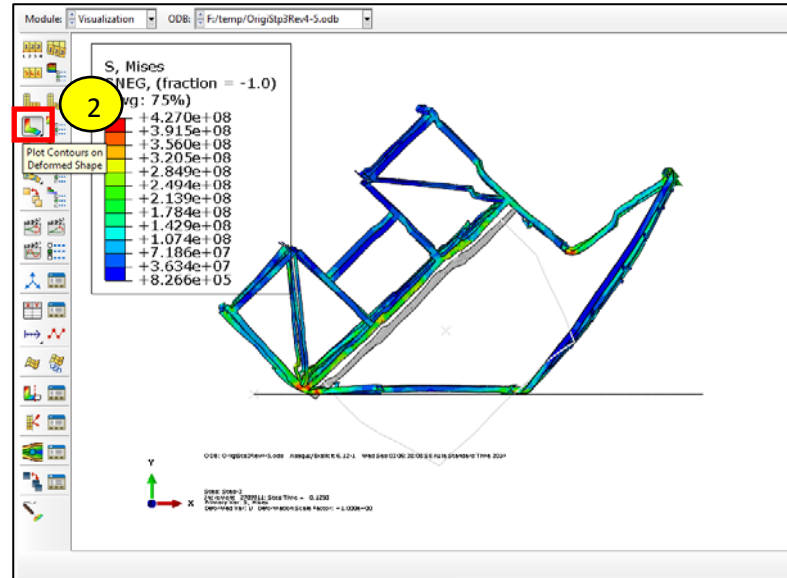
## 2.9 Module: Visualization

1. เปิดไฟล์งาน



รูปที่ ค.129 การเปิดไฟล์งาน (1)

## 2. เลือก Plot Contours on Deformed Shape



รูปที่ ค.130การเปิดไฟล์งาน (2)





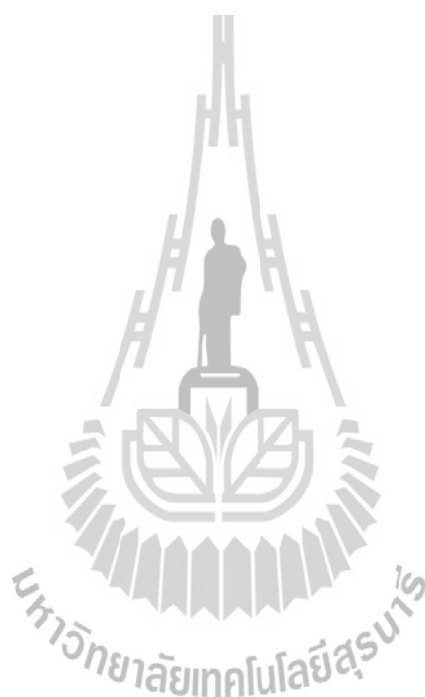
ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



## บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Klomkaew, R., and Chamniprasart, K., (2012). Design and Analysis of a High-Decker Bus Structure to Withstand the Damage under a Roll-Over Test. **2012 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials, Mechatronics and Automation (ICMMA 2012)**.Nanchang, China.



## **DESIGN AND ANALYSIS OF A HIGH-DECKER BUS STRUCTURE TO WITHSTAND THE DAMAGE UNDER A ROLL-OVER TEST**

Rattiporn Klomkaew<sup>1,a</sup> and Kontorn Chamniprasart<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue,  
Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

<sup>a</sup>zea\_lously@hotmail.com, <sup>b</sup>kontorn@sut.ac.th

**Keywords:** analysis, roll-over, Finite Element Method

**Abstract.** Up to now, industrial bus production in Thailand hasn't reached the international safety standard. So if we want to develop a domestic industry, we need to use modern technology and engineering knowledge because when accidents happen, it has an impact on many people's lives. Many years ago people had to rely on their own engineering knowledge and less on the experience of a qualified technician. So this accident research study is conducted on a high-decker bus in the case roll-over situation. The bus's structural damage will be analyzed using the Finite Element Method. This can help to reduce production costs and increase efficiency. It will also help the production of buses that will meet and comply with European standards.

### **1. Introduction**

Bus production in Thailand has been going on for some time now. The chassis come from abroad. Building the bus body in this country is one way to reduce the cost of production. But to build an efficient product, design and engineering calculations are absolutely essential. Since the creation of the bus, it has had an impact on many people's lives. The government has to play a role in determining safety standards of buses by emphasizing the strength of the structure in the case bus has an accident. The collapse of the bus structure will not reach a level where passengers are harmed. To test the structural strength, calculations will be based on mathematical modeling and software packages to help solve this problem. Although not completely identical to a real accident test, it can provide information and raise the level of safety at a much lower cost.

Suranaree University of Technology (SUT) is located in Nakhon Ratchasima province, which is one of many provinces that have bus production on an industrial scale. Our researchers worked together with Cherdchai Industrial Factory CO., LTD. for design and analysis improvements in accident situations, to try to meet European standards.

### **2. Principle and Theories**

#### **2.1 Finite Element Method**

The Finite Element Method 'FEM' (its practical application often known as Finite Element Analysis or FEA), is a numerical technique for finding approximate solutions of Partial Differential Equations (PDE) as well as integral equations. The solution approach is based either on eliminating the differential equation completely (steady state problems), or rendering the PDE into an approximating system of ordinary differential equations, which are then numerically integrated using standard techniques such as Euler's method, Runge-Kutta, etc.

#### **2.2 ECE Regulation No.66**

The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE or ECE), is a regulatory agency that is responsible for the design of road vehicles to provide a practical standard for road vehicle trade in Europe. The agency has created a standard that covers the safety of the vehicle, the energy

and environmental standards. In order to provide manufacturers with guidelines for the protection of consumer rights, and of vehicle users generally, ECE R66 is the required standard regarding the technical strength of the bus structure cabin. It aims to protect the passenger compartment during roll-over accidents. This form of technical strength, and equipment used in the production must have enough structural strength in a roll-over accident situation. The residual space does not cause passengers to be injured or harmed.

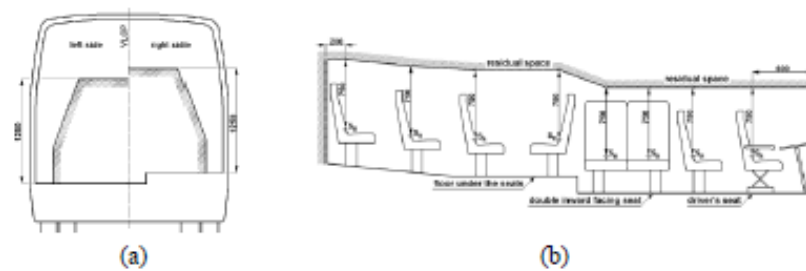


Fig. 1 Residual Space (a) Front View (b) Side View

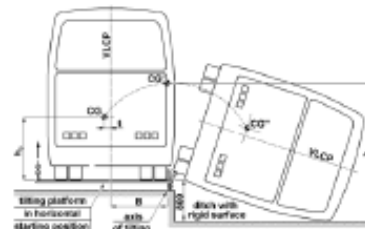


Fig. 2 Roll-Over Test

### 3. Experiment

#### 3.1 Design Process

Before designing the new structure, it is necessary to analyze the original structure first. In damage analysis, the computer program will analyze a section of the bus structure to comply with ECE R-66. Then change the structural design in areas where the structure has been damaged or is not safe for passengers. The design process began with Cherdchai's engineers and the SUT research team sharing their experience, and soon the first draft of the design of the bus structure was on the drawing board. Every component of the structure was designed keeping in mind safety, cost and ride comfort. The design process was first done on a SolidWorks computer program. Each part was given a notation and ID number for inventory purposes. This was also to ensure that customers would have good support from all the buses structural parts in case of an accident.

Stainless steel SS 400 was used to reduce overall weight and increase the overall strength of the bus structure. The designed bus structure is shown in Fig. 3

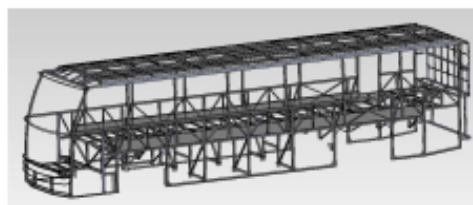


Fig. 3 High Decker Bus Structure

### 3.2 ABAQUS Software

The ABAQUS program uses the FEA analysis method. It can analyze problems from linear-static, dynamic and nonlinear as well as other complex problems. The results obtained are of high accuracy and can analyze and solve various problems such as structural problems and thermal problems. It can also analyze product details and impact on materials. This is an important factor in the process of product development. ABAQUS software is best known for performance, quality and the ability to analyze a variety of problems, and is more highly rated than other CAE software. ABAQUS software is divided into three main sections

- ABAQUS/Standard for analysis of common problems such as static, dynamics, thermal, contact and nonlinear problems.
- ABAQUS/Explicit for analysis of transient dynamics and quasi-static problems such as drop test and crushing problems.
- ABAQUS/CAE for creating and modeling and viewing analysis results.

## 4. Analysis

### 4.1 Part Module

Designs are first prepared using SolidWorks, and imported into the Abaqus program. Files can be imported in Parasolid, ACIS SAT, IGES, Assembly Neutral, etc. Enter material properties such as density, elastic modulus, Poisson's ratio, yield stress, and plastic strain. Then assign material properties into the experiment.

### 4.2 Analysis Step

There are two major sources of difficulty in Abaqus/Standard contact analyses: rigid body motion of the components before contact conditions constrain them, and sudden changes in contact conditions, which lead to severe discontinuity iterations as Abaqus/Standard tries to establish the exact condition of all contact surfaces. Therefore, wherever possible, take precautions to avoid these situations. The bus structure will be put on a platform and the platform will be raised 800 mm off the ground. Setup contact interactions between the bus body and platform and specify whether it has friction or not. Then set boundary conditions to make a slow tilt platform at 0.5 degrees per second, until the bus structure falls onto the ground.

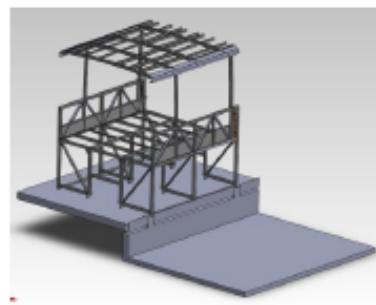


Fig. 4 Section of High Decker Bus Structure with Platform

### 4.3 Mesh creation

First select the type of element you want to use before designing the mesh. When choosing an element type, you must consider several aspects of your model such as the model's geometry, the type of deformation that will be seen, the loads being applied, etc. The following points are important to consider in this simulation:

- The contact between surfaces. Whenever possible, first-order elements (with the exception of tetrahedral elements) should be used for contact simulations. When using tetrahedral elements, modified second-order tetrahedral elements should be used for contact simulations.
- Significant bending of the blank structure is expected under the applied loading. Fully integrated first order elements exhibit shear locking when subjected to bending deformation. Therefore, either reduced-integration or incompatible mode elements should be used.

## 5. Conclusion

This high decker bus must be safe to use in land transportation so it must meet the requirement of the Department of Land Transportation of Thailand (DLT). Analysis with the computer program following the requirements of the ECE R66 can test either the whole bus, or just one section. When analyzing the structure, the residual space does not cause the passengers any injury or harm. This research in bus structural analysis is undertaken to obtain results which can be used to design a new structure that is both stronger and safer.

## 6. Acknowledgement

Financial support for this project is provided by Suranaree University of Technology. We would like to thank the Cherdchai Industrial Factory CO., LTD. for their support in this bus structure design.

## 7. References

- [1] R. Hashemi, UN-ECE R66 : Strength of Super-structure during Rollover, APSN Workshop on Bus & Truck Passive Safety, Prague, 24<sup>th</sup> March 2005, 2005
- [2] Mayrhofer E., Steffan H., and Hoschopf H., Enhanced Coach and Bus Occupant Safety, 19<sup>th</sup> International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Washington DC, United States, 2005
- [3] Yu-Cheng Lin, and Hong-Chi Nian, Structure Design Optimization of Body Section Using FEM, SAE World Congress & Exhibition, 2006
- [4] Somkiat Jongprasithporn, Sakkarin Choodoung, Design and Development the Production Standard for Double Deck-bus (Standard No. 4), King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 2007
- [5] Lapo, C., Klomkaew, R., and Chamniprasart, K., Design and Analysis of Double Decker Bus Chassis, 5<sup>th</sup> SEATUC Symposium, Vietnam, 2011
- [6] S. Abdullah, N.A. Kadhim, A.K. Ariffin, and M. Hosseini, Dynamic Analysis of an Automobile Lower Suspension Arm Using Experiment and Numerical Technique, New Trends and Developments in Automotive System Engineering, pp 231-248, 2011
- [7] Abaqus 6.10, Getting Started with Abaus, Interactive Edition, pp 12.14-12.25
- [8] Finite Element Method, [http://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_element\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Finite_element_method)
- [9] United Nations, Uniform Technical Prescriptions Concerning the Approval of Large Passenger Vehicles with Regard to the Strength of Their Superstructure (ECE R66).

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวรัตติพร กล่อมแก้ว เกิดเมื่อวันที่ 26 มีนาคม พ.ศ. 2531 ที่ประเทศคูเวต บิดาชื่อ นายเฉลิมพร กล่อมแก้ว มารดา ชื่อ นางวิไลรัตน์ เปรมาสวัสดิ์

เริ่มศึกษาระดับชั้นประถมที่โรงเรียนเซนต์โยเซฟระยอง ตั้งแต่ชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนระยองวิทยาคม จังหวัดระยอง สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมการผลิต) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2553 และได้สมัครเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ระหว่างศึกษาปริญญาโท ได้เป็นผู้สอนรายวิชาปฏิบัติการระดับปริญญาตรีของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จำนวน 10 รายวิชา ได้แก่

1. ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, 2 และ 3
2. ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 2 และ 3
3. ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 1
4. ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 2 และ 3
5. วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1
6. โปรแกรมเมทแลบสำหรับวิศวกรรมเครื่องกล

ผลงานวิจัย : ได้เสนอบทความเข้าร่วมในการประชุมวิชาการ 2012 2<sup>nd</sup> International Conference on Materials, Mechatronics and Automation (ICMMA 2012) เรื่อง “DESIGN AND ANALYSIS OF A HIGH-DECKER BUS STRUCTURE TO WITHSTAND THE DAMAGE UNDER A ROLL-OVER TEST” ระหว่างวันที่ 7-8 พฤษภาคม พ.ศ. 2557 ณ เมืองหนานชาง ประเทศจีน ดังแสดงในภาคผนวก ข.