

การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งสำหรับรถโดยสาร
ขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

นางสาวณัฐชา มุราชัย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**DESIGN AND STRENGTH ANALYSIS OF
THE SEAT ANCHORAGES FOR LARGE
PASSENGER VEHICLES USING
FINITE ELEMENT METHOD**

Natchaya Murachai



**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 2013

การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นํ้าสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีรุต คณวิชัย)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิ๋นจันท์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐชา มุราชัย : การออกแบบและวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งสำหรับ
รถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ (DESIGN AND STRENGTH
ANALYSIS OF THE SEAT ANCHORAGES FOR LARGE PASSENGER VEHICLES
USING FINITE ELEMENT METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา :
อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์, 80 หน้า.

ปัจจุบันการใช้รถโดยสารในการคมนาคมขนส่งมีบทบาทมากยิ่งขึ้น เนื่องจากมีความสะดวกสบายและราคาประหยัด แต่รถโดยสารนั้นกลับมีระบบความปลอดภัยในระดับค่อนข้างต่ำ เนื่องจากเข็มขัดนิรภัยเป็นแบบชนิด 2 จุดยึด รวมไปถึงปัญหาความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งจากข้อมูลการสืบค้นสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุ เมื่อรถโดยสารได้รับอุบัติเหตุ ผู้โดยสารที่ได้รับบาดเจ็บส่วนหนึ่งเกิดจากสาเหตุที่เบาะหรือที่นั่งหลุดออกจากจุดยึด ทำให้เบาะหรือที่นั่งเคลื่อนที่มารวมกัน ส่งผลให้ผู้โดยสารได้รับบาดเจ็บสาหัสจนถึงขั้นเสียชีวิต กรมการขนส่งทางบกจึงได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่ง อ้างอิงตามมาตรฐานยุโรป ECE Regulation No. 80 งานวิจัยนี้จึงได้นำการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาช่วยในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งเพื่อลดเวลาในการทดสอบจริง อีกทั้งยังประหยัดและง่ายต่อการปรับปรุงจุดยึดที่นั่งให้มีความแข็งแรงตามมาตรฐานก่อนนำไปทดสอบจริง ซึ่งจากการศึกษาวิจัยพบว่าจุดยึดที่นั่งของรถโดยสารยังมีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ซึ่งจุดยึดที่นั่งเข้ากับพื้นมีค่าความเค้นวอนมีสเปซมากกว่าค่าความเค้นคราก จึงได้ปรับปรุงจุดยึดที่นั่งรถโดยสารด้วยวิธีออกแบบการทดลอง ทำให้ได้ปัจจัยในการปรับปรุงจุดยึดที่นั่งที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นวอนมีสเปซของจุดยึดที่นั่ง การปรับปรุงโดยใช้ปัจจัยเหล่านั้นทำให้จุดยึดที่นั่งมีความแข็งแรงผ่านตามาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั่งของรถโดยสารขนาดใหญ่

NATCHAYA MURACHAI : DESIGN AND STRENGTH ANALYSIS OF
THE SEAT ANCHORAGES FOR LARGE PASSENGER VEHICLES
USING FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR :
SOMSAK SIWADAMRONGPONG, D.Eng., 80 PP.

BUS/ SEAT ANCHORAGES/ FINITE ELEMENT/ ECE REGULATION NO. 80

In the present, large numbers of people in Thailand uses the large passenger vehicles for land transportation due to its convenient and save. However, the safety issue is also important to consider. Refer to Thailand Accident Research Center (TARC) information, when the large passenger vehicle has an accident, some of passenger was injured due to damage of the seat anchorage. It is know that the safety regulation on large passenger vehicle is under consideration and still currently insufficient. Department of Land Transport has proposed new safety regulations for the large passenger vehicle to ensure more safety for people when traveling with land transportation such as bus. The ECE Regulation were brought to consider as existing reliable regulation in the world. Therefore, the aim of this study was strength analysis of the seat anchorages, according to ECE Regulation No. 80 by using finite element method. The result of this study, the maximum von Mises stress was occurred on the floor anchorages which over the yield strength of material. The DOE teaching was employed to indicate significant factors to the seat anchorage strength. The improved model was found to conform the regulation.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้ หากไม่ได้รับความกรุณาจากบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่งในทุกๆด้าน ดังนี้

อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ คอยให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการทำวิจัยอีกทั้งยังเป็นแบบอย่างที่ดีให้แก่ผู้วิจัย จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ คุณเสกฐาวรธ สุจริตภักต์สกุล วิศวกร กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและการออกแบบ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความรู้และคำแนะนำรวมถึงคอยให้คำปรึกษาแนะนำในการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการทำงานวิจัยด้วยความเมตตาตลอดมา

บริษัท เชดชัยอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในส่วนของวัสดุและข้อมูลที่สำคัญในการทำงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบุคลากรศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้ความรู้และคำแนะนำในการใช้เครื่องมือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อวิเชียร - คุณแม่สุคนธ์ มุราชัย และเครือญาติทุกท่านที่คอยอบรมสั่งสอนเลี้ยงดู และให้โอกาสทางการศึกษาและคณาจารย์ผู้ประสาทวิชาความรู้ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่ให้อำลัใจช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงด้วยดี

ณัฐชา มุราชัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงาน	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชณวกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งคู่ ECE R80	5
2.3 วิธีการไฟไนท์อลลิเมนต์	7
2.3.1 สมการเชิงอนุพันธ์	8
2.3.2 ฟังก์ชันแปรผัน	10
2.3.3 สมการไฟไนท์อลลิเมนต์.....	12
2.4 ทฤษฎีความเสียหาย.....	15
2.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป	17
2.5	การออกแบบการทดลอง	21
2.5.1	การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ	21
2.5.2	การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ	22
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	24
3.1	กล่าวนำ	24
3.2	การทดสอบสมบัติวัสดุ.....	26
3.2.1	การเตรียมชิ้นทดสอบ.....	26
3.2.2	การทดสอบแรงดึง	28
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	31
3.3.1	การออกแบบการทดสอบ.....	31
3.3.2	ผลการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว	33
3.3.3	การวิเคราะห์การรับแรงเฉือนเดี่ยวของสลัก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	34
3.3.4	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	37
3.4	การวิเคราะห์ความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสาร ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	40
3.4.1	การสร้างแบบจำลอง	41
3.4.2	การกำหนดขนาดเอลิเมนต์	43
3.4.3	การกำหนดสมบัติวัสดุ.....	45
3.4.4	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส.....	46
3.4.5	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล	51
4.1 กล่าวนำ	51
4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งของรถโดยสาร ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์	51
4.2.1 ค่าระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบในแนวนานกับพื้น	52
4.2.2 ค่าความเค้นวอลุ่มสูงสุดที่จุดยึดที่นั่งรถโดยสาร	53
4.3 การออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั่ง	56
4.3.1 ปัจจัยของการออกแบบการทดลอง	56
4.3.2 ผลการศึกษาการออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั่ง	58
4.4 การออกแบบจุดยึดที่นั่งจากการออกแบบการทดลอง	61
4.4.1 แบบจำลองจุดยึดที่นั่งที่ปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	61
4.4.2 ค่าความเค้นวอลุ่มของจุดยึดที่นั่งที่ปรับปรุง ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	63
4.4.3 การลดน้ำหนักของแบบจำลองที่นั่งที่ปรับปรุง ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	65
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	72
ประวัติผู้เขียน	80

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงาน	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งคู่ ECE R80	5
2.3 วิธีการไฟไนท์อลลิเมนต์	7
2.3.1 สมการเชิงอนุพันธ์	8
2.3.2 ฟังก์ชันแปรผัน	10
2.3.3 สมการไฟไนท์อลลิเมนต์.....	12
2.4 ทฤษฎีความเสียหาย.....	15
2.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป	17
2.5	การออกแบบการทดลอง	21
2.5.1	การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ	21
2.5.2	การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ	22
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	24
3.1	กล่าวนำ	24
3.2	การทดสอบสมบัติวัสดุ.....	26
3.2.1	การเตรียมชิ้นทดสอบ.....	26
3.2.2	การทดสอบแรงดึง	28
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	31
3.3.1	การออกแบบการทดสอบ.....	31
3.3.2	ผลการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว	33
3.3.3	การวิเคราะห์การรับแรงเฉือนเดี่ยวของสลัก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	34
3.3.4	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	37
3.4	การวิเคราะห์ความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสาร ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	40
3.4.1	การสร้างแบบจำลอง	41
3.4.2	การกำหนดขนาดเอลิเมนต์	43
3.4.3	การกำหนดสมบัติวัสดุ.....	45
3.4.4	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส.....	46
3.4.5	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล	51
4.1 กล่าวนำ	51
4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งของรถโดยสาร ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์	51
4.2.1 ค่าระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบในแนวนานกับพื้น	52
4.2.2 ค่าความเค้นวอลุ่มสูงสุดที่จุดยึดที่นั่งรถโดยสาร	53
4.3 การออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั่ง	56
4.3.1 ปัจจัยของการออกแบบการทดลอง	56
4.3.2 ผลการศึกษาการออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั่ง	58
4.4 การออกแบบจุดยึดที่นั่งจากการออกแบบการทดลอง	61
4.4.1 แบบจำลองจุดยึดที่นั่งที่ปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	61
4.4.2 ค่าความเค้นวอลุ่มของจุดยึดที่นั่งที่ปรับปรุง ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	63
4.4.3 การลดน้ำหนักของแบบจำลองที่นั่งที่ปรับปรุง ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	65
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	72
ประวัติผู้เขียน	80

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงาน	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ปรัชสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งคู่ ECE R80	5
2.3 วิธีการไฟไนท์อลลิเมนต์	7
2.3.1 สมการเชิงอนุพันธ์	8
2.3.2 ฟังก์ชันแปรผัน	10
2.3.3 สมการไฟไนท์อลลิเมนต์.....	12
2.4 ทฤษฎีความเสียหาย.....	15
2.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป	17
2.5	การออกแบบการทดลอง	21
2.5.1	การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ	21
2.5.2	การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ	22
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	24
3.1	กล่าวนำ	24
3.2	การทดสอบสมบัติวัสดุ.....	26
3.2.1	การเตรียมชิ้นทดสอบ.....	26
3.2.2	การทดสอบแรงดึง	28
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	31
3.3.1	การออกแบบการทดสอบ.....	31
3.3.2	ผลการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว	33
3.3.3	การวิเคราะห์การรับแรงเฉือนเดี่ยวของสลัก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	34
3.3.4	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์.....	37
3.4	การวิเคราะห์ความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสาร ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์	40
3.4.1	การสร้างแบบจำลอง	41
3.4.2	การกำหนดขนาดเอลิเมนต์	43
3.4.3	การกำหนดสมบัติวัสดุ.....	45
3.4.4	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส.....	46
3.4.5	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4 ผลลัพธ์และการอภิปรายผล	51
4.1 กล่าวนำ	51
4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งของรถโดยสาร ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์	51
4.2.1 ค่าระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบในแนวนานกับพื้น	52
4.2.2 ค่าความเค้นวอลุ่มสูงสุดที่จุดยึดที่นั่งรถโดยสาร	53
4.3 การออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั่ง	56
4.3.1 ปัจจัยของการออกแบบการทดลอง	56
4.3.2 ผลการศึกษาการออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั่ง	58
4.4 การออกแบบจุดยึดที่นั่งจากการออกแบบการทดลอง	61
4.4.1 แบบจำลองจุดยึดที่นั่งที่ปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	61
4.4.2 ค่าความเค้นวอลุ่มของจุดยึดที่นั่งที่ปรับปรุง ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	63
4.4.3 การลดน้ำหนักของแบบจำลองที่นั่งที่ปรับปรุง ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	65
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการวิจัย	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	70
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	72
ประวัติผู้เขียน	80

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

1.1 สถิติจำนวนการเกิดอุบัติเหตุ จำนวนผู้เสียชีวิตและจำนวนผู้ได้รับบาดเจ็บ ของรถโดยสารขนาดใหญ่ ในปีพ.ศ. 2545-2549	2
2.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^2 แฟกทอเรียล	21
3.1 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐานทดสอบแรงดึง ASTM E8.....	27
3.2 สมบัติวัสดุของชิ้นส่วนการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว.....	36
3.3 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว.....	36
3.4 จำนวนอิลลิเมนต์ของแต่ละชิ้นส่วนของที่นั่งรถโดยสาร	44
3.5 ค่าสมบัติวัสดุของโครงสร้างที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่ชนิดเบาะคู่แยกพนักพิง.....	46
3.6 เงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างที่นั่งรถโดยสาร	49
4.1 ค่าความเค้นวอนมิตสูงสุดของจุดยึดที่นั่ง.....	54
4.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง	58
4.3 ค่า p-value ของปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response	60
4.4 ค่า Effect ของปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response.....	60
4.5 ค่าความเค้นสูงสุดของจุดยึดที่นั่งระหว่างก่อนและหลังปรับปรุง.....	63
4.6 เพอร์เซ็นต์ค่าความเค้นวอนมิตที่เปลี่ยนไป หลังลดน้ำหนักจากการปรับปรุงจุดยึด	67

สารบัญรูปภาพ

รูปที่

หน้า

2.1	การทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นํ้าสำหรับที่นั่งคู่.....	6
2.2	อุปกรณ์ทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นํ้า.....	6
2.3	ความสมดุลของตำแหน่งใด ๆ ในของแข็งสามมิติ	8
2.4	ขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	17
2.5	ขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป.....	20
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	25
3.2	ลักษณะขึ้นทดสอบแรงดึง ASTM E8	26
3.3	ตำแหน่งการติดเกจวัดความเครียดเพื่อหาค่าอัตราส่วนของปัวซอง.....	27
3.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดจริงและ ความเค้น – ความเครียดวิศวกรรมของเหล็กแผ่น	29
3.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น – ความเครียดจริงและ ความเค้น – ความเครียดวิศวกรรมของเหล็กกล่อง.....	29
3.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางและ ค่าความเครียดในแนวยาวกับแรงกระทำของเหล็กแผ่น	30
3.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางและ ค่าความเครียดในแนวยาวกับแรงกระทำของเหล็กกล่อง.....	30
3.8	การติดตั้งชิ้นส่วนทดสอบ	31
3.9	ตำแหน่ง strain gauge ที่เหล็กแผ่น	32
3.10	ขนาดของชิ้นส่วนที่ทำการขึ้นรูป	33
3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำ ของการทดสอบ.....	34
3.12	ส่วนประกอบของแบบจำลองการทดสอบ	34
3.13	ค่าความเค้นวอนนิสเชสของสลักที่โอลิเมนต์ขนาด 0.9, 1 และ 1.1 มิลลิเมตร	35
3.14	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว.....	37

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

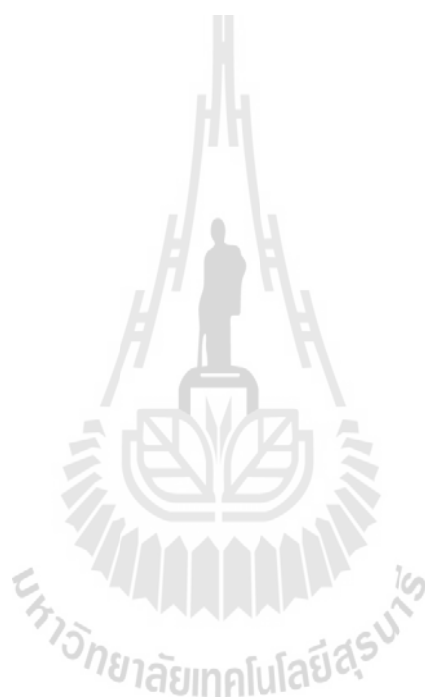
รูปที่

หน้า

3.15 กราฟแสดงการเทียบผลความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับ แรงกระทำของการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	38
3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับแรงกระทำของเหล็กแผ่นบน	39
3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับแรงกระทำของเหล็กแผ่นล่าง	39
3.18 แผนผังแสดงการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์	41
3.19 ที่นั่งคู่แยกพนักพิงของรถโดยสาร	42
3.20 แบบจำลองที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่ชนิดเบาะคู่แยกพนักพิง	42
3.21 ส่วนประกอบของที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่ชนิดที่นั่งคู่พนักพิงแยก	43
3.22 ค่าความเค้นวอนมิตเชสของจุดยึดที่นั่งที่เอลิเมนต์ขนาด 9,10 และ 11 มิลลิเมตร	44
3.23 การแบ่งเอลิเมนต์ของแบบจำลองที่นั่ง	45
3.24 ชั้นส่วนที่สัมผัสกับพนักพิง	46
3.25 ชั้นส่วนที่สัมผัสกับฐานนั่ง	47
3.26 ชั้นส่วนที่สัมผัสกับจุดยึดที่นั่ง	47
3.27 ชั้นส่วนที่สัมผัสกับพื้นรถโดยสาร	48
3.28 ชั้นส่วนที่สัมผัสกับสลัก (จุดยึดที่นั่ง – พื้นรถโดยสาร)	48
3.29 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่นั่ง	50
4.1 ชั้นแถบสีค่าการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Z ของที่นั่งรถโดยสาร	52
4.2 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมิตเชสของที่นั่งรถโดยสาร	53
4.3 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมิตเชสที่จุดยึดที่นั่งเข้ากับพื้นรถ	55
4.4 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมิตเชสที่จุดยึดที่นั่งเข้ากับผนัง	55
4.5 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมิตเชสที่สลักยึดที่นั่ง	56
4.6 ปัจจัยในการออกแบบการทดลอง	57
4.7 ตำแหน่งที่ใช้ในการพิจารณาการส่งผลของปัจจัยต่อค่าความเค้นวอนมิตเชส	59
4.8 ปัจจัยที่ใช้ในการปรับปรุงจุดยึดที่นั่งเข้ากับพื้นรถ	61
4.9 ปัจจัยที่ใช้ในการปรับปรุงจุดยึดที่นั่งเข้ากับผนัง	62
4.10 ปัจจัยที่ใช้ในการปรับปรุงสลักยึดที่นั่ง	62

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 เปรียบเทียบแถบสีค่าความเค้นของจุดยึดที่นั้งก่อนและหลังการปรับปรุง	64
4.12 ชั้นแถบสีค่าความเค้นของจุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นจากการปรับปรุง ด้วยวิธีออกแบบการทดลอง	65
4.13 ขนาดและตำแหน่งในการเจาะจุดยึดที่นั้งกับพื้นรถเพื่อลดน้ำหนักโครงสร้าง	66



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

γ	=	ความเครียดเฉือน
ε	=	ความเครียด
ν	=	อัตราส่วนปัวซอง
σ	=	ความเค้นในแนวแกน
τ	=	ความเค้นเฉือน
ECE	=	Economic Commission for Europe
F_1	=	แรงกระทำที่อุปกรณ์ทดสอบขึ้นบน
F_2	=	แรงกระทำที่อุปกรณ์ทดสอบขึ้นล่าง
H_1	=	ความสูงของอุปกรณ์ทดสอบขึ้นบน
H_2	=	ความสูงของอุปกรณ์ทดสอบขึ้นล่าง
J	=	พลังงานสักรวม
K	=	ค่าความแข็งแกร่ง
T	=	ความเค้นที่ผิว
U	=	พลังงานที่เกิดขึ้นจากความเครียดในวัตถุ
U_v	=	พลังงานความเครียดของการเปลี่ยนรูป
U_D	=	พลังงานความเครียดของการเปลี่ยนปริมาตร
V	=	พลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงวัตถุ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รถโดยสารขนาดใหญ่นอกจากจะให้บริการเป็นรถโดยสารสาธารณะแล้วปัจจุบันยังเป็นหนึ่งในสวัสดิการรับ-ส่งของพนักงานโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย ทำให้มีปริมาณรถโดยสารบนท้องถนนเพิ่มมากขึ้นเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงพบว่ามีข่าวอุบัติเหตุบนท้องถนนจากรถโดยสารมากยิ่งขึ้นและพบว่าการเกิดอุบัติเหตุจากรถโดยสารนั้นจะมีผู้บาดเจ็บอาการสาหัสและเสียชีวิตเป็นจำนวนมาก ดังแสดงในตารางที่ 1.1 เนื่องจากโดยสารนั้นมีระบบความปลอดภัยในระดับที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากรถโดยสารเป็นรถที่ใช้สำหรับบรรทุกผู้โดยสารจำนวนมาก จึงไม่สามารถติดตั้งระบบถุงลมนิรภัยได้ในทุกที่นั่งและระบบเข็มขัดนิรภัยมีเพียง 2 จุดยึด แม้กระทั่งความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสาร โครงสร้างที่นั่ง รวมถึงจุดยึดต่าง ๆ เนื่องด้วยอุตสาหกรรมการผลิตรถโดยสารประจำทางนั้น ยังเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กและยังไม่มีมาตรฐานรับรองการผลิต นอกจากตัวโครงสร้างรถโดยสารภายนอกที่ต้องการความแข็งแรงและความปลอดภัยเป็นอย่างมากแล้ว ที่นั่งรถโดยสารยังต้องการความแข็งแรงและความปลอดภัยมากเช่นกัน เนื่องจากสัมผัสกับผู้ขับขี่และผู้โดยสารโดยตรงเมื่อเกิดอุบัติเหตุการชนกระแทกไม่ว่าจะเป็นทางด้านหน้า ด้านหลังและด้านข้างของตัวรถโดยสาร ซึ่งจากข้อมูลการสืบค้นสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุ เมื่อเกิดอุบัติเหตุกับรถโดยสาร มีผู้โดยสารได้รับบาดเจ็บจากสาเหตุที่เบาะหรือนั่งหลุดจากจุดยึด จึงเป็นผลให้กรมการขนส่งทางบก ได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั่งรถโดยสาร ทำให้ผู้ประกอบการทางด้านอุตสาหกรรมรถโดยสาร หันมาให้ความสำคัญกับความปลอดภัยของจุดยึดที่นั่งมากยิ่งขึ้น เช่นเดียวกับบริษัท อู่เซดชัยอุตสาหกรรม จำกัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดโครงสร้างที่นั่งสำหรับที่นั่งคู่ของรถโดยสารขนาดใหญ่ ตามมาตรฐานยุโรป ชื่อ ECE Regulation No. 80 ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยผลการศึกษานี้คาดว่าจะสามารถปรับปรุงจุดยึดโครงสร้างที่นั่งให้มีความแข็งแรงและเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ

ตารางที่ 1.1 สถิติจำนวนการเกิดอุบัติเหตุ จำนวนผู้เสียชีวิตและจำนวนผู้ได้รับบาดเจ็บของ
รถโดยสารขนาดใหญ่ ในปีพ.ศ. 2545-2549

พ.ศ.	จำนวนการเกิดอุบัติเหตุ		จำนวนผู้เสียชีวิต		จำนวนผู้ได้รับบาดเจ็บ	
	รถ บขส.	รถร่วม	รถ บขส.	รถร่วม	รถ บขส.	รถร่วม
2545	298	83	28	77	165	589
2546	389	96	57	89	160	602
2547	264	142	21	138	210	897
2548	307	166	48	125	216	956
2549	368	220	45	173	344	1,600

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งรถโดยสารตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่
- 2) เพื่อออกแบบวิธีการยึดที่นั่งที่สามารถรับภาระโหลดได้ตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ดำเนินการวิจัยโดยใช้ข้อมูล และวัสดุ ของบริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด
- 2) วิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดโครงสร้างที่นั่งสำหรับที่นั่งคู่ของรถโดยสารขนาดใหญ่ ตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั่งรถโดยสาร โดยกรมการขนส่งทางบกอ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐานยุโรปข้อ ECE Regulation No. 80 ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อีลิเมนต์แบบสถิตยศาสตร์
 - 3) วิเคราะห์ความแข็งแรงเฉพาะจุดยึดที่นั่งรถโดยสาร
 - 4) พิจารณาจุดเชื่อมต่อมีการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์
 - 5) ไม่พิจารณาเบาะ, วัสดุหุ้ม และชุดกลไกปรับเอน
 - 6) ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนท์อีลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Marc2011

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
- 2) ศึกษาโครงสร้างที่นิ่งและจุดยึดของรถโดยสารขนาดใหญ่ ของบริษัท อุ๋เชิดชัย

อุตสาหกรรม จำกัด

- 3) ศึกษามาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นิ่ง วิธีการและเงื่อนไขการทดสอบจุดยึดที่นิ่ง
- 4) ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ ด้วยแบบจำลองอย่างง่าย
- 5) สร้างแบบจำลองและทำการจำลองการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นิ่ง ของโครงสร้างที่นิ่งสำหรับที่นิ่งคู่ของรถโดยสารขนาดใหญ่
- 6) ปรับปรุงและแก้ไขโครงสร้างที่นิ่งและจุดยึดที่นิ่งที่ไม่ผ่านการจำลองตามมาตรฐาน การทดสอบจุดยึดที่นิ่ง
- 7) กำหนดค่าปัจจัยต่างๆในการปรับปรุงจุดยึดที่นิ่งที่จะทำการศึกษาและออกแบบ วิธีการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ
- 8) ทำการทดลองและเก็บข้อมูล
- 9) วิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบผลจากโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิจัย
- 10) สรุปผลการทดลอง

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

- 1) ศูนย์เครื่องมือ 4 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- 2) บริษัท อุ๋เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ระบบปฏิบัติการ Windows 7
- 2) โปรแกรมสร้างแบบจำลอง SolidWorks 2011
- 3) โปรแกรมแบ่งอิลลิเมนต์ Patran 2011
- 4) โปรแกรมจำลองทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ MSC Marc 2011
- 5) โปรแกรมทางวิเคราะห์สถิติ Minitab 16
- 6) เครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Universal Testing Machine
- 7) เครื่องบันทึกค่าความเครียด Strain Indicator and Recorder

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ตำแหน่งที่เกิดความเค้นที่เกินจุดครากของจุดยึดที่นั้งด้วยแรงกระทำตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั้งรถโดยสาร
- 2) ได้วิธีการยึดที่นั้งที่สามารถรับภาระโหลดตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั้งรถโดยสารได้



บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งเพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับมาตรฐานการทดสอบและสามารถนำไปใช้ในการกำหนดขอบเขตการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์อย่างถูกต้องมากที่สุดและทั้งนี้ยังได้กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อให้เข้าใจเกี่ยวกับงานวิจัยมากยิ่งขึ้น

2.2 มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งคู่ตาม

ECE Regulation No. 80

ECE เป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่สร้างข้อบังคับที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบยานพาหนะภาคพื้น เพื่อให้เป็นแนวทางการปฏิบัติสำหรับผู้สร้างยานพาหนะภาคพื้นและมีการซื้อขายกันในกลุ่มประเทศยุโรป ซึ่งหน่วยงานนี้ได้สร้างมาตรฐานที่ครอบคลุมถึงความปลอดภัยของยานพาหนะ การกำหนดมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม ด้านพลังงาน ตลอดจนการออกแบบระบบป้องกันการจารกรรมต่าง ๆ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ผลิตมีแนวทางการผลิตที่คุ้มครองสิทธิของผู้บริโภคและผู้ขายยานพาหนะทั่วไป ซึ่งกรรมการขนส่งทางบก ได้ออกข้อกำหนดแบบที่นั้ง การยึดที่นั้ง และแบบเข็มขัดนิรภัย โดยการรับรองมาตรฐานตาม ECE

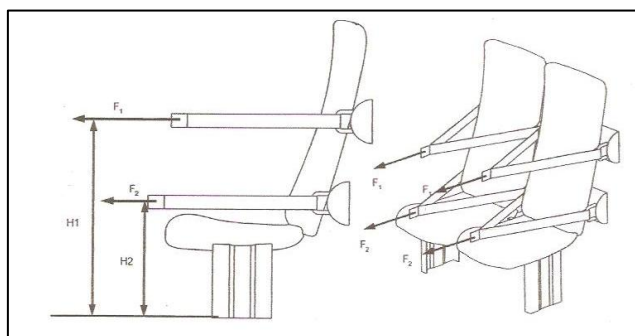
ข้อบังคับ 80 ว่าด้วยเรื่อง การทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้ง (เฉพาะรถที่ใช้ในการขนส่งผู้โดยสารที่มีที่นั้งตั้งแต่สิบหกที่นั้งขึ้นไป) ใช้เครื่องทดสอบทางสถิติศาสตร์ โดยวิธีการทดสอบการตัดสินดังต่อไปนี้

1) ถ้าที่นั้งสามารถเลื่อนปรับมุมพนักพิงหลังได้ ให้ปรับที่นั้งอยู่ในตำแหน่งที่มุมพนักพิงหลังทำมุมให้ใกล้เคียง 25 องศามากที่สุด โดยทำมุมกับแนวดิ่ง

2) ให้แรง F_1 และ F_2 ขนานกับแนวนอนกระทำที่อุปกรณ์ทดสอบดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดยกำหนดระยะความสูงของอุปกรณ์ทดสอบถึงพื้น H_1 และ H_2 ให้มีค่าความสูงอยู่ในช่วงระหว่าง 0.70-0.80 เมตรและ 0.45-0.55 เมตรตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

$$F_1 = \left(\frac{1,000}{H_1} \right) \pm 50 \text{ N} \quad (2.1)$$

$$F_2 = \left(\frac{2,000}{H_2} \right) \pm 100 \text{ N} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.1 การทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งสำหรับที่นั่งคู่

ซึ่งกรมการขนส่งทางบกได้ออกแบบการทดสอบโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั่งของ ECE ซึ่งให้แรงกระทำผ่านอุปกรณ์ทดสอบซึ่งเป็นพลาสติกแข็งมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งอุปกรณ์ทดสอบจะถูกให้แรงกระทำจากกระบอกสูบไฮดรอลิกและส่งแรงกระทำต่อไปยังพนักพิงของที่นั่งรถโดยสารที่ถูกติดตั้งไว้กับฐานโดยมีลักษณะการจับยึดเช่นเดียวกับที่ติดตั้งจริงในรถโดยสาร



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่ง

เกณฑ์ตัดสินที่ถือว่าจุดยึดที่นั่งดีอยู่ผ่านการทดสอบ ผลการทดสอบจะต้องเป็นดังนี้

- 1) ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่ง H_1 ต้องไม่น้อยกว่า 100 มิลลิเมตร
- 2) ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่ง H_2 ต้องไม่น้อยกว่า 50 มิลลิเมตร
- 3) ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดที่ตำแหน่ง H_1 และ H_2 ต้องไม่มากกว่า 400 มิลลิเมตร
- 4) ไม่มีชิ้นส่วนของที่นั่ง จุดยึดที่นั่ง หรืออุปกรณ์เสริมแยกตัวออกอย่างสมบูรณ์ในการ

ทดสอบ

5) ที่นั่งยังยึดอยู่อย่างมั่นคง แม้ว่าจะมีจุดยึดหนึ่งหรือมากกว่าแยกตัวออกบางส่วนและระบบล็อกทั้งหมดยังคงล็อกในตลอดระยะเวลาการทดสอบ

6) หลังการทดสอบ ระบบปรับตำแหน่ง และระบบล็อกอาจจะไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ถือว่าผ่านการทดสอบ

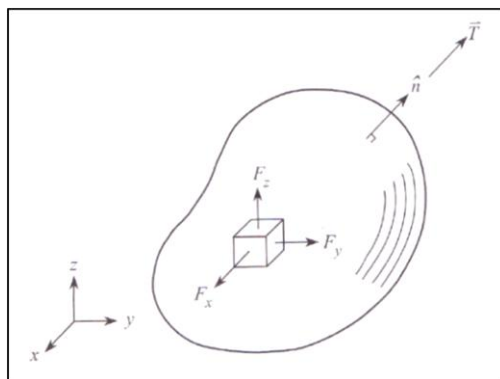
2.3 วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method) เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ชนิดหนึ่งที่ใช้ขั้นตอนการคำนวณเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ สำหรับปัญหาต่าง ๆ ในงานทางวิศวกรรมหรือวิทยาศาสตร์ซึ่งส่วนใหญ่มักประกอบด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่อธิบายความเป็นจริงของปัญหานั้นภายใต้เงื่อนไขขอบเขตที่แตกต่างกัน โดยรูปทรงของปัญหาอาจมีความซับซ้อนเช่นใดก็ได้

ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เริ่มต้นจากการแบ่งรูปทรงของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ จากนั้นจึงสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้น แล้วจึงรวมสมการจากแต่ละเอลิเมนต์นี้เข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการรวมขนาดใหญ่ซึ่งอธิบายสถานะโดยรวมของปัญหานั้น จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดให้ ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่นี้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อต่าง ๆ ทั่วทั้งโดเมนของปัญหา

2.3.1 สมการเชิงอนุพันธ์

ความสมดุลของของแข็งที่มีการยึดหยุ่นได้ในสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสมดุลของตำแหน่งใด ๆ ในของแข็งสามมิติ

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0\end{aligned}\tag{2.3}$$

โดย $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ แทนความเค้นในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ
 $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ แทนความเค้นเฉือนในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ
 F_x, F_y, F_z แทนแรงวัตถุ (body force) ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ

เงื่อนไขขอบเขตอาจจะประกอบไปด้วยหลายรูปแบบ เช่น การกำหนดระยะการเคลื่อนที่ที่ผิวบนผิวบางส่วน ในขณะที่ผิวส่วนอื่น ๆ มีการกำหนดเงื่อนไขของความเค้นที่ผิว (surface traction) ในรูปแบบทั่วไป คือ

$$\vec{T} = T_x \hat{i} + T_y \hat{j} + T_z \hat{k} \quad (2.4)$$

โดย T_x, T_y, T_z คือ ความเค้นที่ผิวในทิศทางแกน x, y, z ตามลำดับ จากสมการที่ 2.4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของความเค้นย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

โดย n_x, n_y, n_z เป็นทิศทางโคไซน์ของเวกเตอร์

$$n = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k} \quad (2.6)$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิว ณ จุดที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น นอกจากเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวแล้วของแข็งในสามมิติอาจมีความเครียดขั้นต้น (prestrain) ที่เกิดขึ้นอยู่ก่อน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยทั่วไปคือ

$$\{\sigma\} = [C] \{\varepsilon - \varepsilon_0\} \quad (2.7)$$

โดย

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz}] \quad (2.8)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}] \quad (2.9)$$

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

และ $\{\varepsilon_0\}$ แทนเวกเตอร์ของความเครียดขั้นต้นซึ่งอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจากอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ กัน $T(x, y, z)$ นั้นมีค่าไม่เท่ากันในกรณีเช่นนี้เวกเตอร์นี้ คือ

$$\{\varepsilon_0\}^T = [\alpha\Delta T \quad \alpha\Delta T \quad \alpha\Delta T \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (2.11)$$

โดย α แทนสัมประสิทธิ์การขยายตัว และ ΔT แทนอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิ T_0 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่วัตถุนั้นไม่มีความเค้น ดังนี้

$$\Delta T = T(x, y, z) - T_0 \quad (2.12)$$

2.3.2 ฟังก์ชันแปรผัน

ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาทางด้านของแข็งโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.3 และใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างหรืออาจจะใช้วิธีการแปรผัน ซึ่งหากเลือกใช้วิธีแปรผันจำเป็นต้องหาฟังก์ชันที่เมื่อทำการหาค่าต่ำสุดแล้วจะก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์ฟังก์ชันดังกล่าวคือพลังงานศักย์รวม นั่นคือ

$$J = U^* + V^* \quad (2.13)$$

โดย U^* คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากความเครียดในวัตถุ

$$U^* = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon - \varepsilon_0] \{\sigma\} dv \quad (2.14)$$

แทน $\{\sigma\}$ จากสมการ 2.7

$$U^* = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon - \varepsilon_0][C]\{\varepsilon - \varepsilon_0\} dv \quad (2.15)$$

ซึ่งหลังจากกระจายออกแล้วจัดพจน์ต่าง ๆ จะได้

$$U^* = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon\} dv - \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon_0\} dv + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\} dv \quad (2.16)$$

ในสมการที่ 2.11 โดย V^* คือพลังงานศักย์อันเกิดจากแรงวัตถุ (body force) ที่ปริมาตร V และแรงที่ผิว (surface traction) บนผิวที่มีพื้นที่ S ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} V^* &= - \int_V (F_x u + F_y v + F_z w) dv - \int_S (T_x u + T_y v + T_z w) ds \\ &= - \int_V \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} dv - \int_S \begin{bmatrix} u & v & w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} ds \\ &= - \int_V [\bar{\delta}] \{F\} dv - \int_S [\bar{\delta}] \{T\} ds \end{aligned} \quad (2.17)$$

โดย $[\bar{\delta}]$ แทนเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าเคลื่อนตัว u, v, w ในทิศทางแกน x, y, z ตามลำดับ $\{F\}$ แทนเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยแรงวัตถุในทิศทางแกน x, y, z จากนั้นแทนสมการ 2.14 และ 2.15 ลงในสมการ 2.13 จะหาพลังงานศักย์รวมในรูปแบบ ดังนี้

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon\} dv - \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon_0\} dv + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\} dv - \int_V [\bar{\delta}] \{F\} dv \\ &\quad - \int_S [\bar{\delta}] \{T\} ds \end{aligned} \quad (2.18)$$

ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับเอลิเมนต์ชนิด ต่าง ๆ ได้

2.3.3 สมการไฟไนต์อิลลิเมนต์

หลังจากทราบฟังก์ชันแปรผันดังแสดงในสมการ 2.18 สำหรับวัตถุทั่วไปในสามมิติแล้ว สามารถสร้างสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์สำหรับอิลลิเมนต์ในสามมิติทั่วไปได้

ขั้นตอนแรกคือสมมติลักษณะการกระจายของค่าเคลื่อนตัวในสามทิศทาง โดยค่าเคลื่อนตัวในแต่ละทิศทางสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ และค่าการเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งจุดต่อได้ดังนี้

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{u\} \\ v(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{v\} \\ w(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{w\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

หรือเขียนรวมกันได้ว่า

$$[\bar{\delta}] = [N(x, y, z)][\delta] \quad (2.20)$$

โดย

$$[\bar{\delta}]^T = [u \quad v \quad w]$$

$$[\delta]^T = [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad \dots \quad u_n \quad v_n \quad w_n]$$

เวกเตอร์ความเครียดดังแสดงในสมการ 2.9 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของการเคลื่อนตัวได้คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B(x, y, z)]\{\delta\} \quad (2.21)$$

โดย $[B(x, y, z)]$ แทนเมตริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและการเคลื่อนตัว หากแทน
สมการ 2.20 และ 2.21 ลงในสมการของพลังงานศักย์รวม 2.18 จะได้

$$J = \frac{1}{2} \int_V [\delta]^T [B]^T [C] [B] \{\delta\} dv - \int_V [\delta]^T [B]^T [C] \{\varepsilon_0\} dv \\ + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0]^T [C] \{\varepsilon_0\} dv - \int_V [\delta]^T [N]^T \{F\} dv - \int_S [\delta]^T [N]^T \{T\} ds$$

หรือเขียนย่อได้ว่า

$$J = \frac{1}{2} [\delta]^T [K] \{\delta\} - [\delta]^T \{F_0\} + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0]^T [C] \{\varepsilon_0\} dv - [\delta]^T \{F_B\} - [\delta]^T \{F_t\} \quad (2.22)$$

โดย

$$[K] = \int_V [B]^T [C] [B] dv$$

$$\{F_0\} = \int_V [B]^T [C] \{\varepsilon_0\} dv$$

$$\{F_B\} = \int_V [N]^T \{F\} dv$$

$$\{F_t\} = \int_S [N]^T \{T\} ds$$

ในที่นี้ $[K]$ คืออิลลิเมนต์ของความแข็งแรง $\{F_0\}$, $\{F_B\}$, $\{F_t\}$ คือโหนดเวกเตอร์เนื่องมาจากความเค้นต้น, แรงวัตถุ และแรงที่ผิว ตามลำดับ ซึ่งเราสามารถสร้างสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์ได้โดยการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมดังแสดงในสมการ 2.22 นั่นคือ

$$\frac{\partial J}{\partial \{\delta\}} = 0 \quad (2.23)$$

ซึ่งจะก่อให้เกิดสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์รวมทั้งสิ้น 12 สมการย่อยสำหรับหนึ่งอิลลิเมนต์ของอิลลิเมนต์ทรงสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วยแปดจุดต่อ ทั้ง 12 สมการย่อยนี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$[K]\{\delta\} = \{F_0\} + \{F_B\} + \{F_t\} \quad (2.24)$$

อนึ่งค่าอนุพันธ์ที่เกิดขึ้นจากพจน์ที่สามทางด้านขวามือของสมการ 2.22 นั้นมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากพจน์ดังกล่าวไม่เป็นฟังก์ชันของการเคลื่อนตัวที่จุดต่อ หลังจากประกอบสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์จากทุก ๆ อิลลิเมนต์ขึ้นเป็นสมการระบบรวมของวัตถุสามมิติ แล้วทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและแก้สมการระบบรวมเพื่อหาผลลัพธ์ของค่าเคลื่อนตัวที่ทุก ๆ จุดต่อได้แล้ว ค่าความเค้นในทิศทางต่าง ๆ สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ 2.7 และ 2.21 ดังนี้

$$\{\sigma\} = [C][B]\{\delta\} - [C]\{\epsilon_0\} \quad (2.25)$$

สมการไฟไนต์อิลลิเมนต์และอิลลิเมนต์เมตริกซ์ต่าง ๆ เหล่านี้ในสามมิติสามารถดัดแปลงเพื่อนำไปสร้างสมการไฟไนต์อิลลิเมนต์และอิลลิเมนต์เมตริกซ์ต่าง ๆ สำหรับอิลลิเมนต์ในหนึ่ง สอง หรือ สามมิติชนิดอื่น ๆ ได้โดยง่าย

2.4 ทฤษฎีความเสียหาย

ในการออกแบบชิ้นงานทางวิศวกรรมในทางสถิติศาสตร์จำนวนมากนั้นชิ้นงานจะรับภาระกรรมหลายอย่างพร้อมกัน เช่น ความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือน จึงมีการนำชิ้นงานทดสอบมาดึง ดัด และบิด พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลผลการทดลอง เพื่อศึกษาแนวคิดเกี่ยวกับความเครียดในชิ้นงาน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียด และขีดจำกัดความยืดหยุ่นของวัสดุและสร้างเป็นทฤษฎีขึ้นมา ซึ่งค่าทั้งหมดได้จากการทดลองดึงขึ้นทดสอบในแนวแกนหรือแบบมิติเดียว ทฤษฎีเหล่านี้เรียกว่า ทฤษฎีความเสียหาย (Failure criterion theorem) และเนื่องจากวัสดุเหนียว (Ductile material) และวัสดุเปราะ (Brittle material) เกิดความเสียหายที่แตกต่างกัน โดยวัสดุเหนียวจะเกิดความเสียหายเมื่อค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในวัสดุถึง Yield point ซึ่งเป็นสิ่งที่เราไม่ต้องการ เพราะเมื่อความเค้นเกินค่านี้ไปแล้ววัสดุจะเสียรูปอย่างถาวรไม่สามารถคืนรูปกลับสู่สภาพเริ่มต้นได้ ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความเสียหายของวัสดุเหนียวก็ต้องพูดถึง Yield stress ซึ่งคือค่าความเค้น ณ Yield point ส่วนวัสดุเปราะจะไม่มี Yield point ความเสียหายจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อวัสดุรับความเค้นจนเกิดการแตกหรือแยกของเนื้อวัสดุ ดังนั้นเมื่อกล่าวถึงความเสียหาย (Failure) ของวัสดุเปราะก็ต้องพูดถึง Ultimate stress ซึ่งเป็นค่าความเค้นที่ทำให้วัสดุเกิดการแตกหักอย่างไรก็ตามยังไม่มีทฤษฎีความเสียหายสากลที่ใช้กับวัสดุโดยทั่วไปสำหรับวัสดุที่มีสมบัติแตกต่างกันในสภาวะความเค้นต่าง ๆ แต่ได้มีการตั้งสมมติฐานโดยการพิจารณาโครงสร้างของวัสดุ โดยมีการจำแนกวัสดุตามพฤติกรรมความยืดหยุ่นของวัสดุออกมาเป็นวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

ทฤษฎีพิจารณาความเสียหายของวัสดุเหนียวที่นิยมใช้มีอยู่ 2 ทฤษฎีคือ Maximum shear stress theory และ Maximum distortion energy theory

2.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear-stress theory) หรือ Tresca theory สำหรับทฤษฎีนี้กำหนดไว้ว่า การครากจะเกิดขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดใดในวัสดุมีค่าเท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีการทดสอบแรงดึงปกติ สำหรับความเค้นในหลายแกนความเค้นเฉือนสูงสุดจะเป็นดังสมการที่ 2.26

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (2.26)$$

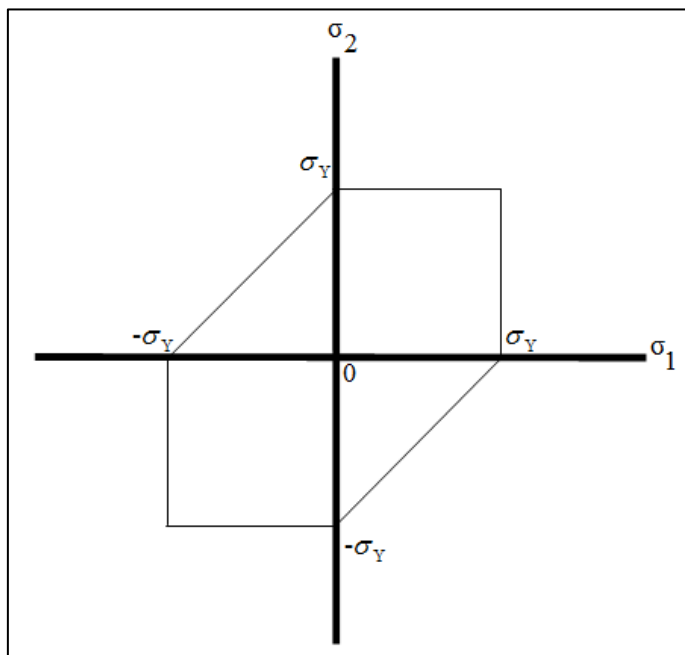
โดย $\sigma_{\max}$ และ $\sigma_{\min}$ คือ ค่าความเค้นหลักที่มีค่าสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ หากพิจารณาในกรณีความเค้นในแกนเดียว $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ จะได้ว่า

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_y}{2} \quad (2.27)$$

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดนี้พิจารณาว่าการครากตัวของวัสดุเกิดขึ้นบนระนาบ สลิป (slip plan) เมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดมีค่าสูงถึงค่าสูงสุดที่กำหนดไว้ในสมการที่ 2.26 ดังนั้นจากสมการ 2.27 พบว่า

$$\sigma_Y = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2.28)$$

สำหรับสภาวะของความเค้นสองแกนของวัสดุหนึ่ง ๆ เมื่อแสดงลงบนกราฟ $\sigma_1 - \sigma_2$ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดจะกำหนดบริเวณที่ไม่ได้รับความเสียหายไว้ภายในบริเวณพื้นที่รูปหกเหลี่ยมของเทรסקา ทฤษฎีนี้จะให้ผลสอดคล้องอย่างมากกับโลหะเหนียวบางประเภท ซึ่งส่วนนี้สามารถพิจารณาได้หากพิจารณาถึงพื้นฐานของการครากของโลหะ เพราะการที่โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นอย่างถาวรนั้นจะเกิดขึ้นบนระนาบ ๆ หนึ่ง ซึ่งเรียกว่าระนาบลีน ซึ่งการเกิดระนาบนี้จะเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับแรงเฉือนในส่วนหนึ่ง



รูปที่ 2.4 ขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด

พิจารณาความเป็นไปได้ในกรณีของการเกิดความเค้นหลักดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ถ้า $\sigma_1 > \sigma_2 > 0$ และ $\sigma_3 = 0$ (ในที่นี้ $\sigma_{\max} = \sigma_1$ และ $\sigma_{\min} = \sigma_3 = 0$)

ความเสียหายจะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อ $\sigma_1 - 0 = \sigma_1 = \sigma_Y$

กรณีที่ 2 ถ้า $\sigma_1 > 0 > \sigma_2$ ความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_Y$

กรณีที่ 3 ถ้า $\sigma_1 < \sigma_2 < 0$ ความเสียหายจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma_2 = \sigma_Y$

2.4.2 ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป

ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Maximum distortion energy theory) หรือ ทฤษฎี von Mises (von Mises theory) ซึ่งกำหนดทฤษฎีไว้ว่า การครากจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานของการเปลี่ยนรูปต่อหน่วยปริมาตรของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ความเค้นรวมมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ พลังงานของการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการครากที่เกิดขึ้นในการทดสอบด้วยการดึงอย่างง่าย ค่าพลังงานที่ทำให้เกิดวิบัติภายใต้แรงดึง

$$U = \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x + \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y + \frac{1}{2} \sigma_z \epsilon_z \quad (2.29)$$

จากความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียดและอัตราส่วนปัวซอง

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E}\end{aligned}\quad (2.30)$$

เมื่อแทนค่าความเครียดสมการ 2.30 ลงในสมการ 2.31 จะได้สมการของพลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ คือ

$$U = \frac{1}{2E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)) \quad (2.31)$$

พลังงานความเครียดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะปริมาตร (U_v) หาได้โดยแทนค่า σ_{av} สำหรับ σ_1 , σ_2 และ σ_3 ในสมการ 2.31

$$U_v = \frac{3(1-2\nu)}{2E} \sigma_{av}^2 \quad (2.32)$$

ซึ่ง

$$U_v = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (2.33)$$

ดังนั้น จะสามารถหาพลังงานของการเปลี่ยนรูป (U_D) ได้จากการนำสมการ 2.31 ลบออกจากสมการ 2.33

$$U_D = U - U_v = \frac{1+\nu}{3E} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (2.34)$$

สำหรับการทดสอบทฤษฎีนี้ ขั้นแรกพิจารณาการกระกรรมภายใต้ความเค้นแกนเดียวนั้นคือ $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ จะได้ว่า

$$U_D = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2 \quad (2.35)$$

สำหรับระบบความเค้นเฉือนเพียงอย่างเดียว $\sigma_1 = -\sigma_2 = \sigma, \sigma_3 = 0$ จะได้ว่า

$$U_D = \frac{1+\nu}{3E} (\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2) \quad (2.36)$$

ดังนั้นการเกิดการครากจะเท่ากับ

$$\sigma_y^2 = (\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2) \quad (2.37)$$

บริเวณพื้นที่รูปวงรีในรูป 2.5 จะเป็นไปตามสมการ 2.37 ซึ่งเส้นโค้งขอบเขตจะตัดแกน σ_1 ที่ $\pm \sigma_y$ และตัดแกน σ_2 ที่ $\pm \sigma_y$ เช่นกัน เมื่อจัดรูปสมการ 2.37 ใหม่จะได้ความเค้นวอนมิสเชส ดังสมการที่ 2.38

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (2.38)$$

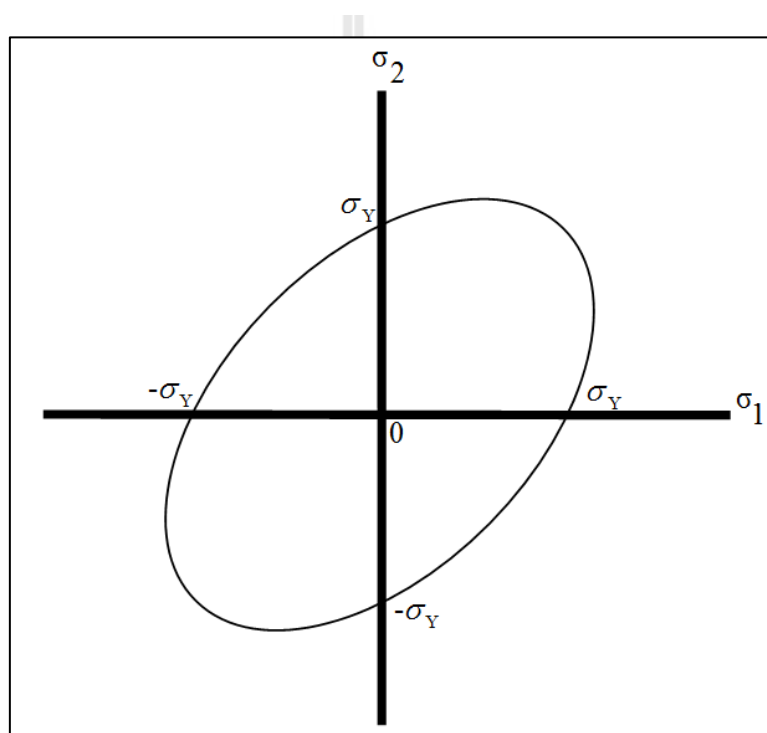
ซึ่งหากพิจารณาความเค้นในลักษณะความเค้นเฉือนกระทำอย่างเดียวกึ่งจะพบว่า $\tau_{\max} = \sigma_1 = -\sigma_2$ เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.36 ค่าความเค้นวอนมิสเชสจะหาได้จากสมการ 2.39

$$\sigma_y = \sqrt{3\tau_{\max}^2} = \sqrt{3} \tau_{\max} \quad (2.39)$$

ความเสียหายอันเกิดจากการครากตัวจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$\tau_{\max} = 0.577\sigma_y \quad (2.40)$$

ซึ่งหากนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎีของเทรסקาที่ความเค้นเท่ากันแล้วทฤษฎีของเทรסקาจะประมาณการครากด้วยความเค้นเฉือนอย่างเดียวที่ $\tau_{\max} = 0.5\sigma_y$ ซึ่งทำให้ทฤษฎีวอนมิสเซนนั้นมีค่าสูงกว่าของเทรסקาอยู่ประมาณ 15%



รูปที่ 2.5 ขอบเขตของความเค้นจากทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป

การใช้ทฤษฎีของเทรסקาจะสะดวกและคาดการณ์การครากได้ง่ายกว่าทฤษฎีของวอนมิสเซน อย่างไรก็ตามเนื่องจากฟังก์ชันการครากของเทรסקาไม่ใช่ฟังก์ชันต่อเนื่อง ซึ่งดูได้จากรูปที่ 2.3 แต่ทฤษฎีวอนมิสเซนจะให้ฟังก์ชันการครากที่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงสามารถที่หาอนุพันธ์ได้ทุกจุดของฟังก์ชัน ด้วยเหตุนี้เองทฤษฎีนี้จึงเป็นที่นิยมใช้เมื่อศึกษาในเรื่องการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร

2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experimental) เป็นวิธีการศึกษาถึงผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านี้ที่ส่งผลพร้อม ๆ กันต่อตัวแปรตอบสนอง (Response) ที่สนใจ แบบการทดลองจะประกอบด้วยชุดของการทดลองหรือรายการทดสอบ (Run) ที่มีเป้าหมายในการศึกษาการเปลี่ยนระดับปัจจัยเพื่อบันทึกค่าตอบสนองของแต่ละรายการทดสอบซึ่งการออกแบบการทดลองจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการออกแบบมาก่อน เพื่อให้การทดลองแต่ละครั้งให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุดในทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด

2.5.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) คือ การทดลองแบบแฟกทอเรียลที่มีจำนวนปัจจัยเท่ากับ k และจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยมีเพียง 2 ระดับเท่านั้น ซึ่งระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ระดับต่ำสุดและระดับสูงสุด ดังนั้นการทดลองจึงเป็นแบบ $2 \times 2 \times \dots \times 2$ (จำนวน k ครั้ง) เพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อตัวแปรตอบสนองเมื่อทำการทดลอง ซึ่งสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย โดยวิธีนี้จะสมมติว่าผลคำตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง

กรณีที่ยากที่สุดของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ คือ $k = 2$ หรือ 2^2 แฟกทอเรียล ถ้าให้ A และ B แทนปัจจัยทั้งสอง ปัจจัยแต่ละตัวจะมีระดับต่ำและระดับสูงซึ่งจะแทนด้วยเครื่องหมาย “-” และ “+” โดยการทดลองแต่ละรายการทดสอบจะมีทุก ๆ ค่าระดับของทุก ๆ ปัจจัย ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^2 แฟกทอเรียล

Factor		Treatment Combination
A	B	
-	-	A low, B low
+	-	A high, B low
-	+	A low, B high
+	+	A high, B high

2.5.2 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ

การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลสองระดับ (2^{k-p} Fractional Factorial Design) คือ การคัดเลือกปัจจัยเพราะว่ามีการลดจำนวนรายการทดสอบจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้ โดยจำนวนรายการที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรายการทดสอบที่อยู่ในชุดการทดลองของ 2^k แฟกทอเรียล ซึ่งนิยมใช้เมื่อจำนวนปัจจัยในการทดลองมีจำนวนมาก ทำให้ต้องใช้หน่วยทดลองจำนวนมาก ซึ่งเมื่อการทดลองอาจมีราคาแพง หรือเป็นการทดลองที่ต้องใช้เวลาในการทดลองเป็นเวลานาน การทำการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลจะช่วยลดจำนวนหน่วยทดลองลงไปได้มากพอสมควรจึงต้องใช้แผนการทดลองหนึ่งในสิบหกของแฟกทอเรียล คือ 2^{7-4} แฟกทอเรียล

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการวิจัยวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งรถโดยสารขนาดใหญ่มีความคล้ายคลึงกันกับงานวิจัยการชนกระแทกด้านหน้าของยานพาหนะ รวมถึงการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งรถยนต์ในรูปแบบอื่น ๆ จึงขอนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังกล่าว ซึ่งจะได้ประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย

สุรเชษฐ์ ชูติมา และคณะ (2547) ได้นำเสนอการออกแบบและการวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเบาะสำหรับการแข่งขันด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบสถิตยศาสตร์ ตามมาตรฐาน FMVSS 207 จากการศึกษาผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์พบว่า โครงหลักเกิดรอยความเสียหายบริเวณจุดยึดหน้าและจุดยึดหลังซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดสอบจริง

Kang, S.J., and Chun, B.K. (2000) ได้ศึกษาความเสียหายของรางเลื่อนรถยนต์ในกรณีเกิดการชนกระแทกด้านหน้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์โดยได้ใช้แบบจำลอง 3 แบบคือแบบจำลองที่มีเบาะและพนักพิง, แบบจำลองที่มีเฉพาะเบาะ และ แบบจำลองที่มีเฉพาะโครงรางเลื่อน และทำการทดสอบจริงเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่มีเฉพาะ โครงนั้นแม้ผลจะมีค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบแต่ก็มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองที่มีเบาะและพนักพิงและยังใช้เวลาในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ที่น้อยกว่าแบบจำลองที่มีเบาะและพนักพิงเป็นอย่างมากและจากผลการทดสอบความเสียหายของรางเลื่อนจากการทดสอบจริงมีความเสียหายที่จุดยึดเข็มขัดนิรภัยซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์

Zolthn, T., and Sandor, V. (2005) ได้ศึกษาความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสารและความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งรถโดยสารโดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ECE R80 และ ECE R14 ซึ่งทำการทดสอบจริงตามมาตรฐานการทดสอบและวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม ANSYS จากการศึกษาพบว่า การทดสอบด้วยมาตรฐานการทดสอบ ECE R14 นั้นให้ผลการทดสอบครอบคลุมไปถึงการทดสอบด้วยมาตรฐานการทดสอบ ECE R80 ซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบที่รวดเร็วและราคาต่ำกว่า

Mayrhofer, E., et al. (2005) ได้ศึกษาการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารทั้งการชนกระแทกด้านหน้า ด้านหลัง และการพลิกคว่ำ ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงรถโดยสารและผู้โดยสารให้มีความปลอดภัยมากขึ้น จากผลการศึกษาในส่วนของการชนกระแทกด้านหน้าที่อ้างอิงการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ECE R80 พบว่า การใช้เข็มขัดนิรภัยแบบ 3 จุดยึดจะให้ความปลอดภัยกับผู้โดยสารมากกว่าเข็มขัดนิรภัยแบบ 2 จุดยึด และพื้นรถโดยสารจะไม่มี การดูดซับพลังงานระหว่างเกิดการชนกระแทก จึงสามารถกำหนดให้พื้นของรถโดยสารเป็นวัตถุแข็งเกร็งได้

Heo, U., et al. (2011) ได้ศึกษาความแข็งแรงของสลักยึด รางเลื่อนรวมถึงชุดแท่นรองรับที่นั่งและค่าความผิดพลาดของผลการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดเข็มขัดนิรภัยระหว่างการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์โดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ECE R14 โดยการวิเคราะห์แบบกึ่งสถิติศาสตร์ด้วยโปรแกรม LS-DYNA จากการศึกษาพบว่าจากการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบการพิสูจน์ความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีความน่าเชื่อถือเนื่องจากผลจากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และชิ้นส่วนของที่นั่งมีความแข็งแรงในการรับแรงกระทำที่อ้างอิงตามกฎหมายทดสอบ

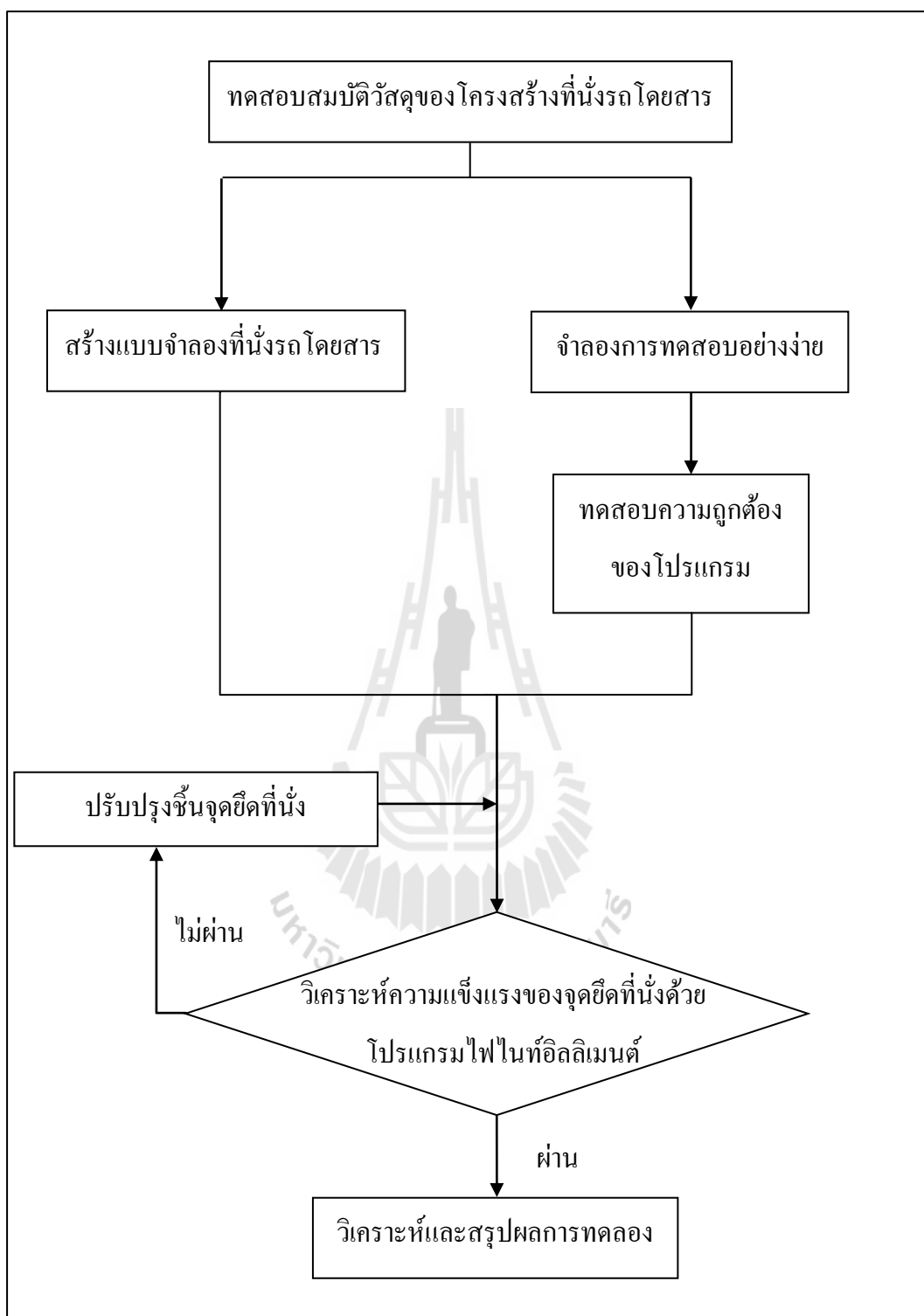
Caputo, F., et al. (2012) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบการทดสอบผลการทดสอบเข็มขัดนิรภัยของที่นั่งรถไฟกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้แบบจำลองอย่างง่ายโดยลดความซับซ้อนของแบบจำลองเพื่อให้ลดเวลาในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้แรงกระทำอ้างอิงตามมาตรฐาน ECE R80 จากการศึกษาพบว่าค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณจุดต่อที่ยึดด้วยสลักซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองซึ่งในบริเวณจุดนั้นก็เป็นจุดวิกฤติเช่นกันซึ่งจากผลสามารถยืนยันได้ว่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผล

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

การศึกษาวิจัยวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งของรถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ เป็นการศึกษาเพื่อทดสอบความแข็งแรงของจุดที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่ชนิดเบาะคู่พนักพิงแยกโดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์เพียงอย่างเดียวเพื่อเป็นการลดต้นทุนและระยะเวลาการทดสอบโดยอ้างอิงวิธีการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่ ECE Regulation No. 80 ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้ได้ใช้รูปแบบและขนาดของที่นั่งรวมถึงวัสดุของโครงสร้างที่นั่งโดยได้ข้อมูลจากบริษัท เชดชัยอุตสาหกรรม จำกัด เพื่อสร้างและกำหนดสมบัติวัสดุของแบบโครงสร้างที่นั่งจำลองในกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ให้มีลักษณะใกล้เคียงกับที่นั่งต้นแบบมากที่สุด จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยไฟไนท์เอลิเมนต์ในกรณีจุดยึดที่นั่งไม่ผ่านตามเกณฑ์ของมาตรฐาน จะมีการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งให้มีความแข็งแรงผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานการทดสอบ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of experimental) เพื่อศึกษาหาตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าความเค้นที่โครงสร้างที่นั่งเพื่อนำไปปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งต่อไป ดังแสดงในแผนผังในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

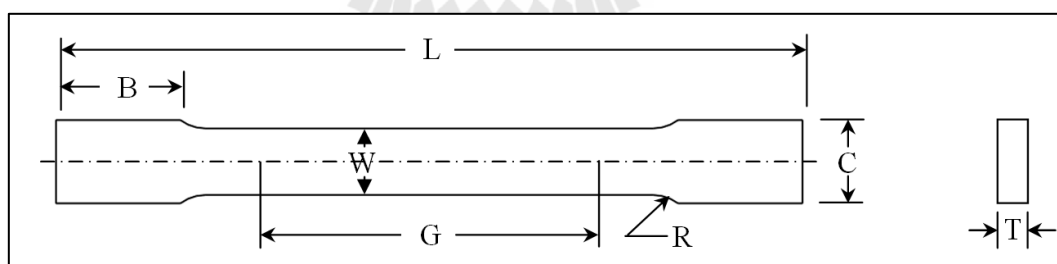
3.2 การทดสอบสมบัติวัสดุ

กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นต้องระบุค่าสมบัติเชิงกลวัสดุให้กับแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ให้สอดคล้องกับการทดลองจริงมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุของโครงสร้างที่นักรถโดยสาร ซึ่งได้อ้างอิงรูปทรง ขนาด และวิธีการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของโลหะ ASTM E8

ค่าสมบัติเชิงกลที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะประกอบไปด้วยโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of elasticity) ความเค้นคราก (Yield stress) และ ค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio)

3.2.1 การเตรียมชิ้นทดสอบ

โครงสร้างที่นักรถโดยสาร ประกอบด้วยเหล็ก 2 ชนิด คือเหล็กแผ่นและเหล็กกล่อง ในการศึกษาครั้งนี้การเตรียมชิ้นทดสอบให้มีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของโลหะ ASTM E8 ให้มีรูปร่าง ดังแสดงรูปที่ 3.1 จะต้องมีการใช้ขนาดของชิ้นทดสอบที่ต่างกัน เนื่องจากข้อจำกัดของความกว้างของวัสดุ โดยชิ้นทดสอบจากเหล็กกล่องแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะมีขนาดตาม (1) และชิ้นทดสอบจากเหล็กชนิดอื่นนั้นจะมีขนาดตาม (2) ซึ่งเป็นการลดขนาดชิ้นงานตามมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งตัดด้วยเครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (EDM Wire Cut)

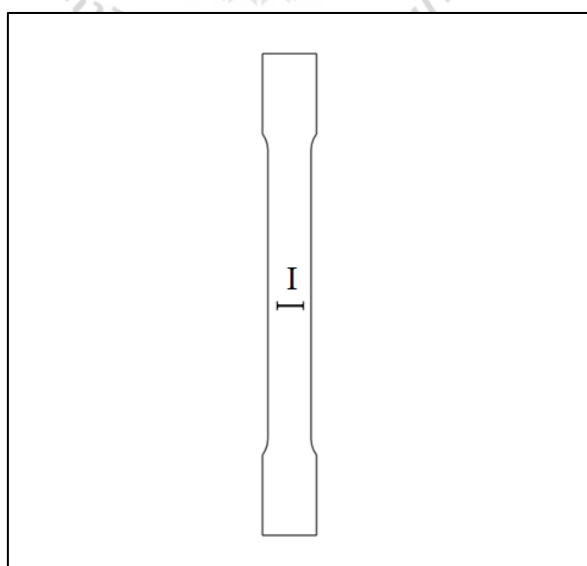


รูปที่ 3.2 ลักษณะชิ้นทดสอบแรงดึง ASTM E8

ตารางที่ 3.1 ขนาดชิ้นทดสอบตามมาตรฐานทดสอบแรงดึง ASTM E8

ตัวแปร	ขนาด (mm)	
	(1)	(2)
ความยาวเกจ (G-Gage length)	50.0 ± 0.2	25.0 ± 0.1
ความกว้าง (W-Width)	12.5 ± 0.2	6.0 ± 0.1
ความหนา (T-Thickness)	ความหนาของวัสดุ	
รัศมีของส่วนโค้ง (R-Radius of fillet)	12.5	6
ความยาวทั้งหมด (L-Overall length)	200	100
ความยาวส่วนค้ำจับ (B-Length of grip section)	50	30
ความกว้างของส่วนค้ำจับ (C-Width of grip section)	20	10

จากนั้นติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain gages) เพื่อหาค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ตามมาตรฐานการทดสอบหาค่าอัตราส่วนปัวซองที่อุณหภูมิห้อง ASTM E132 ในงานวิจัยนี้ใช้ เกจวัดความเครียด ยี่ห้อ KYOWA รุ่น KFG-2-120-C1-11L1M2R ความยาวเกจ (Gage Length) 2 มิลลิเมตร มีค่าความต้านทาน 120 โอห์ม ติดตั้งในชิ้นงานทดสอบ 2 ทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 3.3 โดยใช้กาว KYOWA Adhesive การติดเกจวัดความเครียดที่ชิ้นงานนั้น จะติดก่อนวันทำการทดลอง 1 วัน เพื่อให้กาวแห้งสนิท



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งการติดเกจวัดความเครียดเพื่อหาค่าอัตราส่วนของปัวซอง

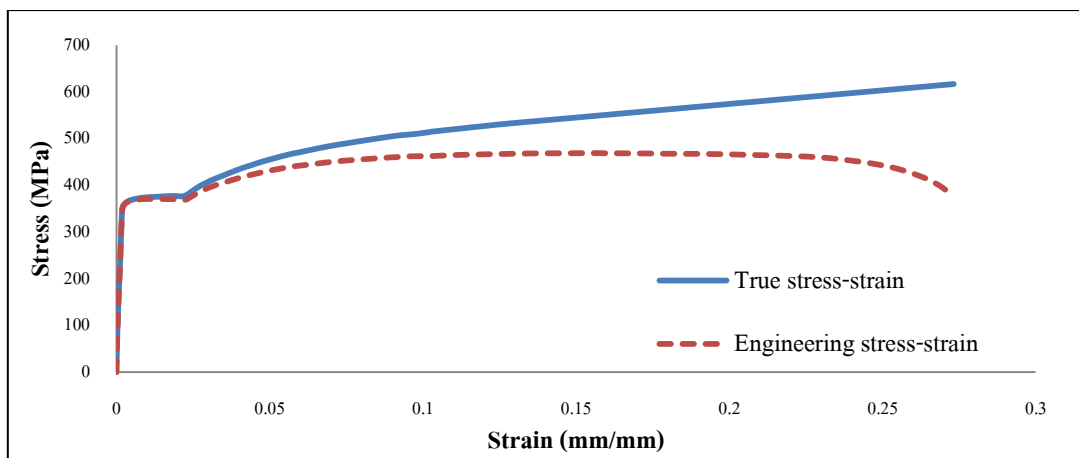
3.2.2 การทดสอบแรงดึง

เมื่อได้ชิ้นทดสอบที่มีขนาดตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8 ของ เหล็กแผ่นและเหล็กกล่อง และติดเกจวัดวัดความเครียดตามมาตรฐานการทดสอบหาค่า อัตราส่วนปัวซองที่อุณหภูมิห้อง ASTM E132 และต่อสายสัญญาณไฟฟ้าจากเกจวัดความเครียด เข้ากับเครื่องอ่านค่าและบันทึกค่าความเครียด (Strain Indicator and Recorder) ยี่ห้อ Vishay รุ่น model P3 เพื่อเก็บค่าความเครียดจากเกจวัดความเครียดทุก ๆ 1 วินาที จากนั้นนำชิ้นทดสอบ มาทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ของ INSTRON ขนาด 100 กิโลนิวตัน ด้วยความเร็ว 0.75 มิลลิเมตรต่อวินาทีและ 0.375 มิลลิเมตรต่อวินาทีสำหรับชิ้นทดสอบที่ลดขนาด จนชิ้นทดสอบขาด

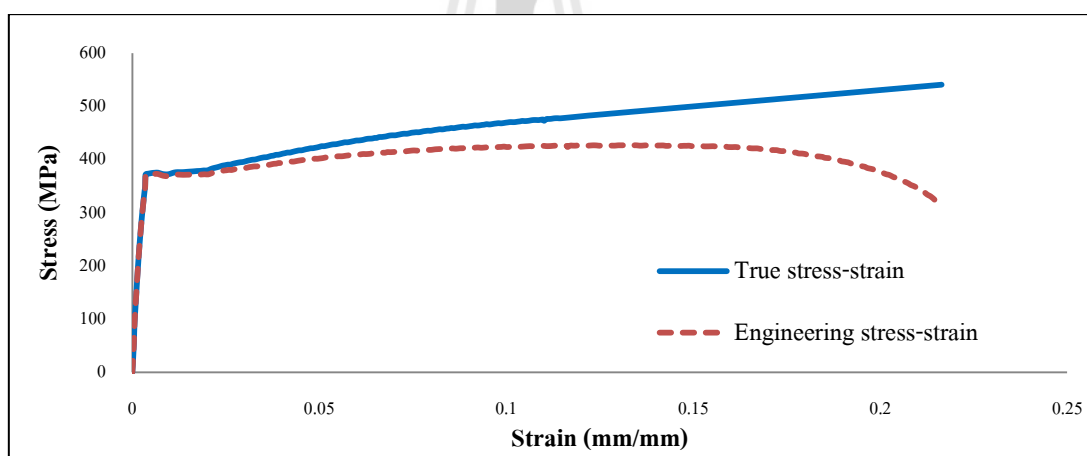
จากการทดสอบแรงดึงได้ข้อมูลจากการทดสอบเป็นค่าความเค้นและระยะยืดของการทดสอบ เพื่อนำมาคำนวณหาค่าสมบัติของวัสดุจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ประกอบไปด้วยโมดูลัสความยืดหยุ่นและค่าความเค้นคราก โดยค่าความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบนั้นเป็นค่าความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering stress-strain) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดค่าสมบัติวัสดุช่วงพลาสติกนั้นจะต้องกำหนดให้เป็นค่าความเค้นและความเครียดจริง (True stress-strain) ซึ่งสามารถหาค่าความเค้น-ความเครียดจริงได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2

$$\sigma_T = \sigma_E (1 + \varepsilon_E) \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E) \quad (3.2)$$



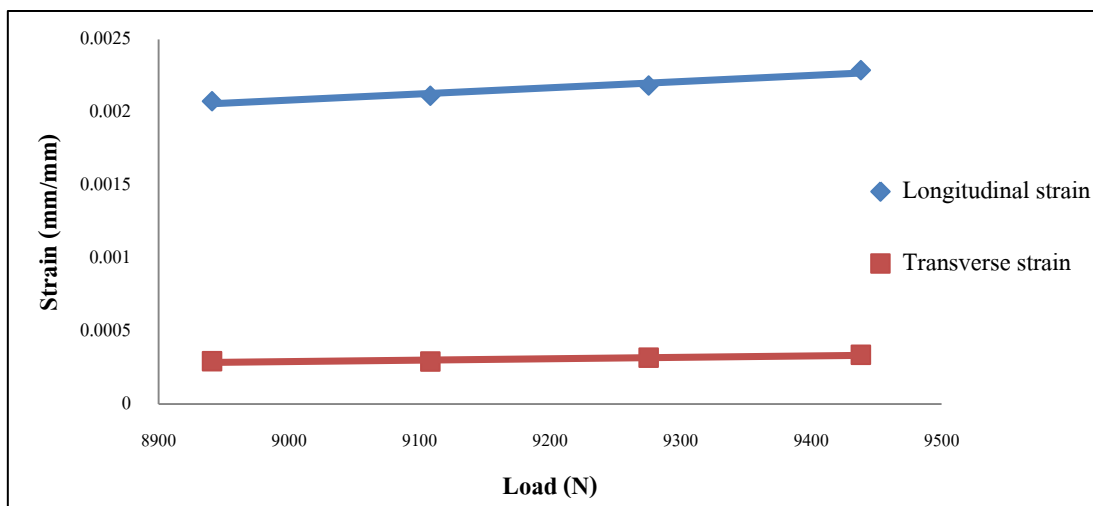
รูปที่ 3.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดจริงและความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม ของเหล็กแผ่น



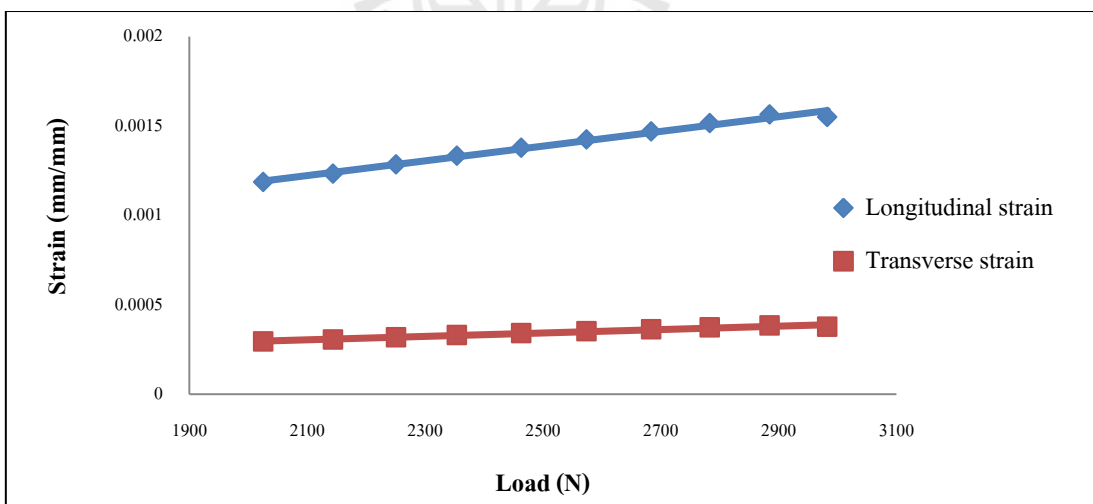
รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความเค้น-ความเครียดจริงและความเค้น-ความเครียดวิศวกรรม ของเหล็กกล่อ่ง

ค่าความเครียดจากगेजวัดความเครียดที่วัดได้เมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างความเครียดในแนวขวางกับแรงกระทำและความเครียดในแนวยาวกับแรงกระทำ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 สามารถคำนวณหาอัตราส่วนปัวซองได้จากสมการ 3.3 ซึ่งชั้นทดสอบทั้ง 2 ชนิดนี้มีอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.25

$$U = (d\mathcal{E}_i/dF)/(d\mathcal{E}_l/dF) \quad (3.3)$$



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางและค่าความเครียดในแนวยาวกับแรงกระทำของเหล็กแผ่น



รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดในแนวขวางและค่าความเครียดในแนวยาวกับแรงกระทำของเหล็กกล่อง

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้ศึกษาเพียงการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นํ้าด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์เท่านั้น โดยไม่ได้ทำการทดสอบจริงเนื่องจากการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นํ้าจำเป็นต้องใช้งบประมาณมากมีค่าใช้จ่ายที่สูงและการทดสอบจริงขั้นตอนมีความยุ่งยากซับซ้อน เพราะฉะนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ จึงสร้างชุดทดสอบอย่างง่ายเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์

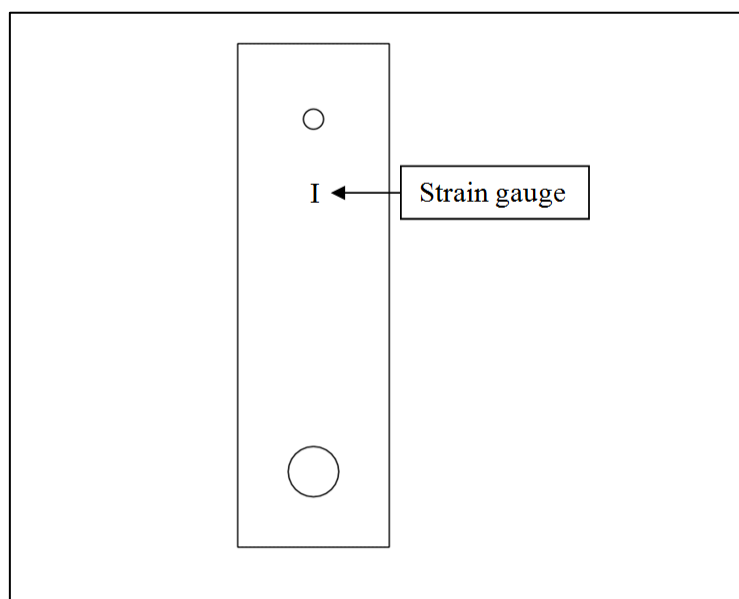
3.3.1 การออกแบบการทดสอบ

การตรวจสอบความถูกต้องของงานวิจัยนี้ได้ทดสอบการรับแรงเฉือนเดี่ยวของสลัก โดยวิธีการทดสอบได้ใช้เหล็กแผ่น 2 แผ่น ประกบกันและยึดติดด้วยสลัก แล้วใช้อุปกรณ์จับยึดเข้ากับเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Universal Testing Machine ของ INSTRON ขนาด 50 กิโลนิวตัน ซึ่งตำแหน่งที่แผ่นเหล็กประกบกันจะอยู่ในแนวศูนย์กลางของแรงดึง เพื่อให้สลักได้รับแรงเฉือนเดี่ยวดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ โดยให้ความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อวินาที จนสลักขาด



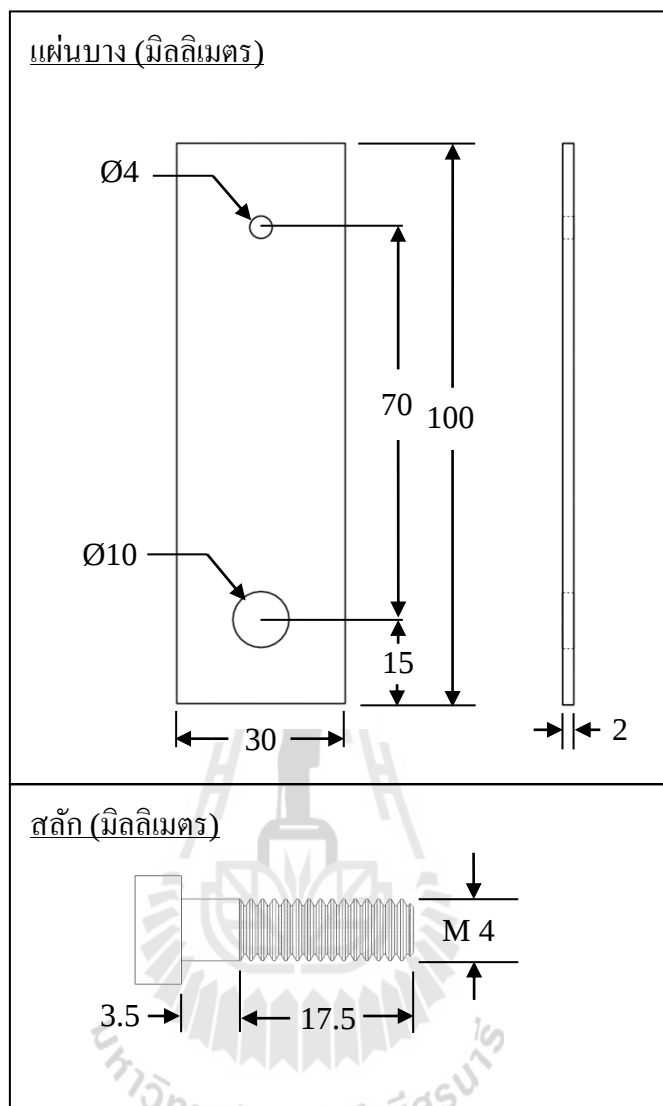
รูปที่ 3.8 การติดตั้งชิ้นส่วนทดสอบ

การทดสอบการรับแรงเฉือนเดี่ยวยของสลัก ได้ติดตั้งความเครียดขนาดความยาวเกจ 2 มิลลิเมตร ยี่ห้อ KYOWA รุ่น KFG-2-120-C1-11L1M2R ที่เหล็กแผ่นทั้ง 2 แผ่น โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งต่อสายสัญญาณไฟฟ้าจากเกจวัดความเครียดเข้ากับเครื่องอ่านค่าและบันทึกค่าความเครียด (Strain Indicator and Recorder) ยี่ห้อ Vishay รุ่น model P3 เพื่อเก็บค่าความเครียดจากเกจวัดความเครียดทุก ๆ 1 วินาที เพื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดจากการทดสอบจริงกับค่าความเครียดจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.9 ตำแหน่ง strain gauge ที่เหล็กแผ่น

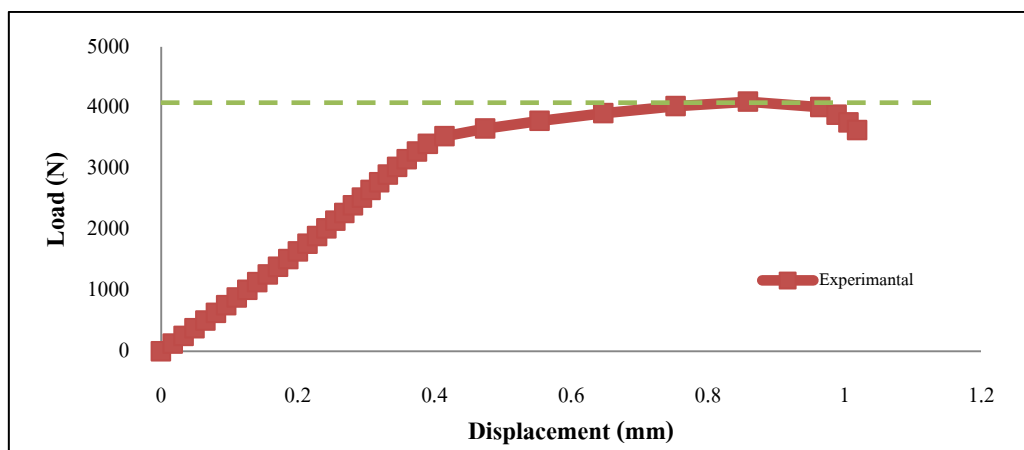
อุปกรณ์การทดสอบมีส่วนประกอบ คือ (1) เหล็กแผ่น (2) สลักเกลียว (3) แป้นเกลียว (4) แหวนรอง และ (5) อุปกรณ์จับยึด โดยเหล็กแผ่นถูกตัดโดยเครื่องตัดด้วยลวดไฟฟ้า (EDM Wire Cut) และสลักถูกขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึง เหล็กแผ่นและสลักมีขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.10 สลักที่ใช้ในการทดสอบจะทำเกลียวเพียงแค่ส่วนปลายเท่านั้น



รูปที่ 3.10 ขนาดของชิ้นส่วนที่ทำการขึ้นรูป

3.3.2 ผลการทดสอบแรงเฉือนเดียว

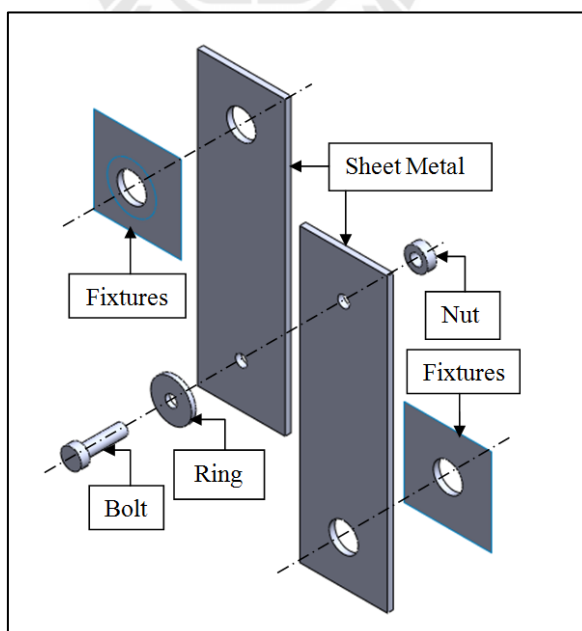
จากการทดสอบแรงเฉือนเดียวเมื่อให้แรงกระทำจนสลักขาด ผลของแรงกระทำกับระยะการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งที่ได้จากการทดสอบ เมื่อนำไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำ แสดงให้เห็นว่าสลักสามารถรับแรงเฉือนได้สูงสุดประมาณ 4,000 นิวตัน ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งจะนำค่าแรงกระทำนี้ไปกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MSC Marc 2011 ต่อไป



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำของการทดสอบ

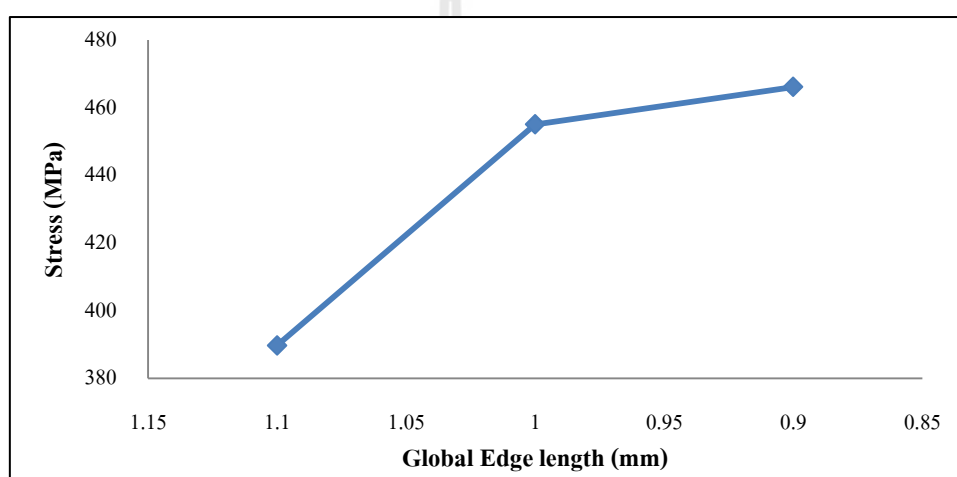
3.3.3 การวิเคราะห์การรับแรงเฉือนเดียวของสลักด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

แบบจำลองการทดสอบแรงเฉือนเดียวถูกสร้างโดยโปรแกรม SolidWorks 2011 โดยมีส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 3.12 และในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองสลักและเป็นแบบไม่มีเกลียวเพื่อลดความซับซ้อนและลดเวลาในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.12 ส่วนประกอบของแบบจำลองการทดสอบ

จากนั้นแบ่งอิลลิเมนต์ของแบบจำลองด้วยโปรแกรม Patran 2011 โดยใช้ อิลลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ (Tetrahedral element) ซึ่งได้ปรับขนาดอิลลิเมนต์จากค่าเริ่มต้นของ โปรแกรม โดยกำหนดไว้ที่ 3 มิลลิเมตร แล้วจึงลดขนาดของอิลลิเมนต์ลงครึ่งละ 0.1 มิลลิเมตร เพื่อ เปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดที่สลัก ซึ่งระหว่างอิลลิเมนต์ขนาด ความยาว 1 มิลลิเมตรกับ 0.95 มิลลิเมตร มีค่าความแตกต่างของค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุด เท่ากับ 2.37% ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และ จึงเลือกใช้อิลลิเมนต์ที่มีขนาด 1 มิลลิเมตร เนื่องจาก ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่น้อยและให้ค่าความถูกต้องอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ซึ่งมีจำนวน 78,534 อิลลิเมนต์ 20,510 จุดต่อ



รูปที่ 3.13 ค่าความเค้นวอนมิสเชสของสลักที่อิลลิเมนต์ขนาด 0.9, 1 และ 1.1 มิลลิเมตร

สมบัติวัสดุที่ใช้ในการกำหนดค่าวัสดุเพื่อวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์ อิลลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MSC Marc 2011 ได้จากการทดสอบแรงดึง ASTM E8 ซึ่งจะทำได้ ผลคำตอบที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากที่สุดโดยค่าสมบัติวัสดุที่ใช้ประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิดด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.2

กำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของการทดสอบแรงเฉือนเดียวโดยเงื่อนไขการสัมผัส มี 2 เงื่อนไขการสัมผัส คือ การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ (Glue Contact) และ การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นสามารถไถลได้แต่ไม่สามารถแยกจากกันได้ (Touching Contact) ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสของการทดสอบแรงเฉือนเดียวได้แสดงดังใน ตารางที่ 3.3

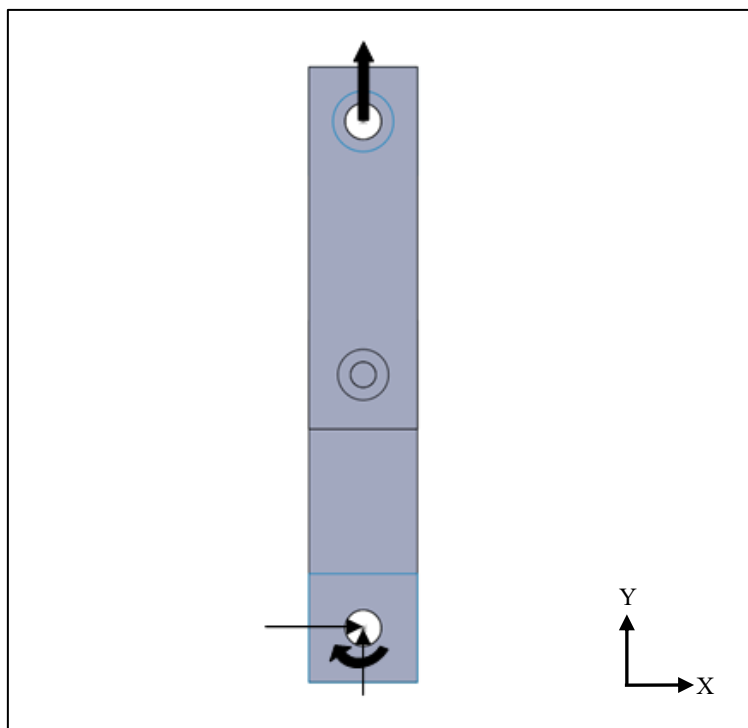
ตารางที่ 3.2 สมบัติวัสดุของชิ้นส่วนการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว

ชนิดเหล็ก	Young's Modulus (E : GPa)	Yield strength (Y : MPa)	Tensile strength (MPa)	Poisson's ratio (ν)
เหล็กแผ่น 2 มิลลิเมตร	193.392	370.0	465	0.25
AISI 1020	9.483	360.0 – 376.7	488-41	0.25

ตารางที่ 3.3 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยว

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	เงื่อนไขการสัมผัส
เหล็กแผ่น(บน)	เหล็กแผ่น(ล่าง)	Touching
	สลัก	Touching
	แหวนรอง	Touching
	อุปกรณ์จับยึด(บน)	Touching
เหล็กแผ่น(ล่าง)	สลัก	Glue
	แป้น	Touching
	อุปกรณ์จับยึด(ล่าง)	Glue
สลัก	แหวนรอง	Touching
	แป้น	Glue

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการทดสอบแรงเฉือนเดียวนั้น จะให้แรงกระทำที่วัตถุแข็งเกร็งโดยผ่านอุปกรณ์จับยึด แรงที่กระทำจะถูกส่งไปยังเหล็กแผ่น เพราะฉะนั้นในการศึกษาการทดสอบแรงเฉือนแบบเดียวจะให้แรงกระทำแบบจุด (Point load) ที่อุปกรณ์จับยึด(บน) ขนาด 4,000 นิวตัน ในเฉพาะทิศทางพุ่งขึ้นและจับยึดที่อุปกรณ์จับยึด(ล่าง)ไม่ให้เคลื่อนที่และหมุนในทุกทิศทาง (Fixed displacement) ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการทดสอบแรงเค้นเดียว

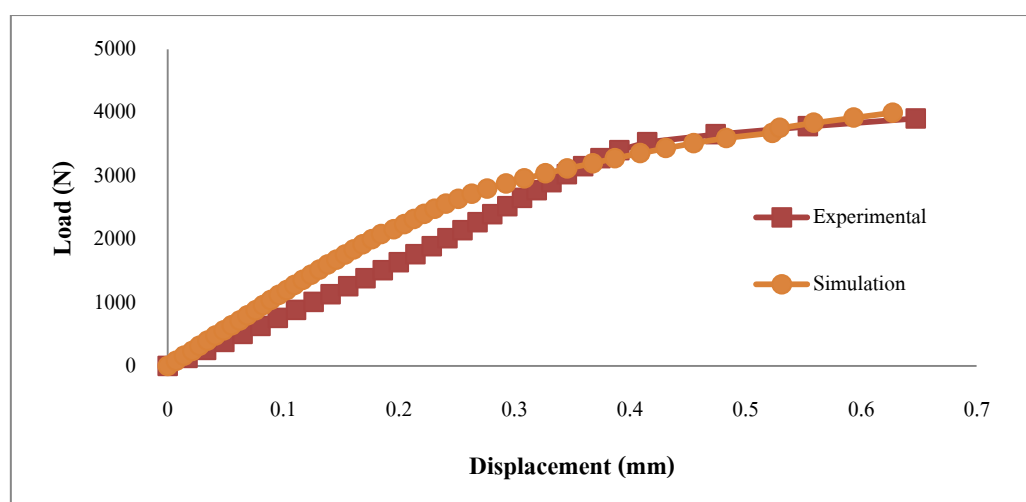
3.3.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการทดสอบการรับแรงเค้นเดียวด้วยเครื่องทดสอบเอนกประสงค์ Universal Testing Machine (UTM) ขนาด 50 กิโลนิวตัน ที่ให้แรงกระทำกับชิ้นทดสอบจนกระทั่งสัณฐานการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำ และการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่เหล็กแผ่นของการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1) ผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำของการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

เมื่อนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำเพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดสอบจริง ดังแสดงในรูปที่ 3.15 โดยวัฏระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์จับยึด(บน) ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำพบว่าแนวโน้มของการเคลื่อนที่ต่อแรงกระทำของการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ

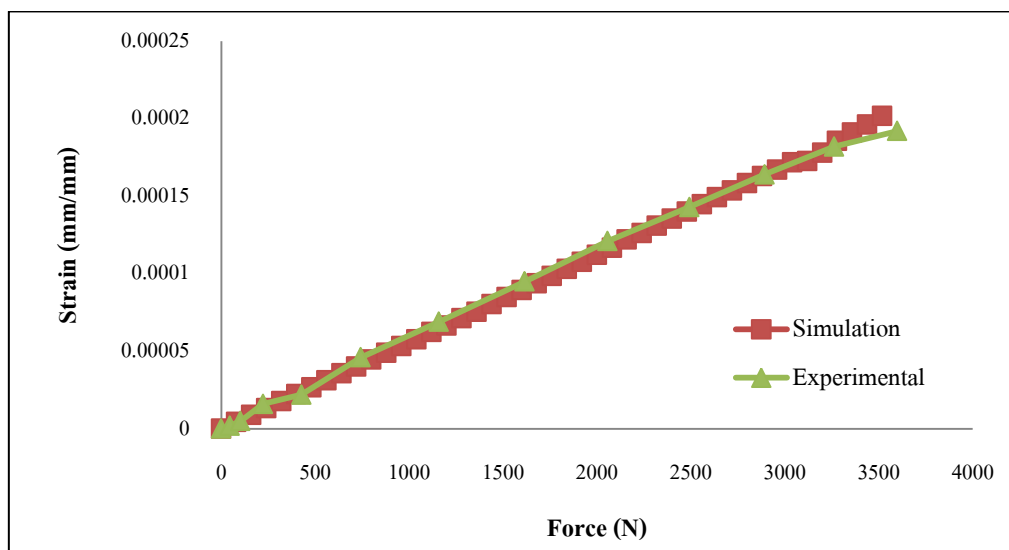
เอนกประสงค์กับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีผลที่สอดคล้องกัน ซึ่งได้เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในช่วงที่ความชันของกราฟเป็นเชิงเส้น ซึ่งมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่ 26.12% ซึ่งถือว่าเป็นค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้ เนื่องจากแบบจำลองของการทดสอบได้ให้ขนาดที่สวมเข้ากันพอดี แต่การทดสอบจริงนั้นมีค่าความเผื่อของการสวมรูสลักและระบบการทดสอบมีจุดต่อ 3 จุด ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาด



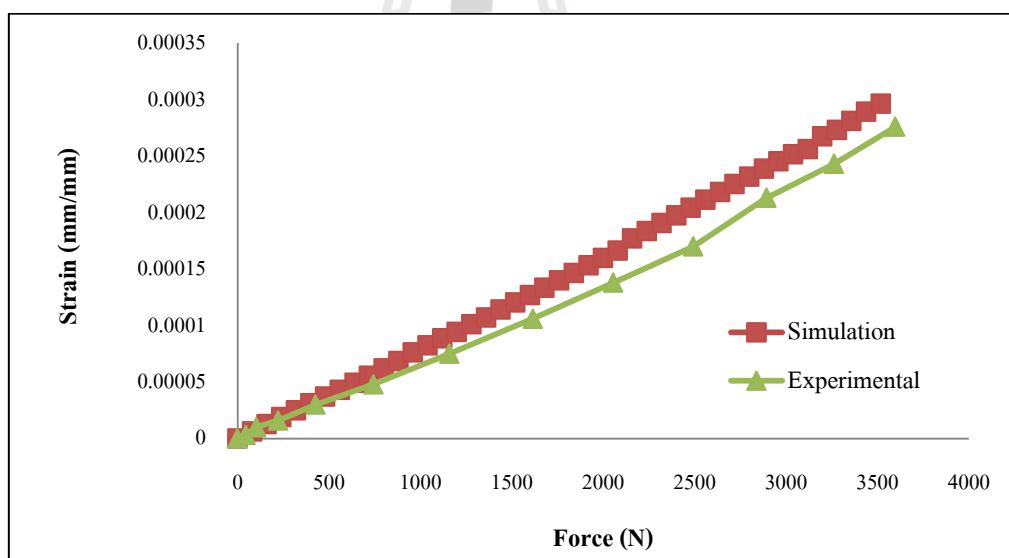
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงการเทียบผลความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำของการทดสอบจริงและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2) การเปรียบเทียบค่าความเครียด

ในการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวของสลัก ได้ติดตั้งเกจวัดความเครียดเพื่อวัดค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบกับค่าการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะพิจารณาค่าความเครียดในช่วงที่เป็นการเสีรูปเชิงเส้น ซึ่งจากรูปที่ 4.1 กราฟของการทดลองเปลี่ยนความชันที่แรงประมาณ 3,500 นิวตัน จึงเลือกพิจารณาที่แรงประมาณ 3,000 นิวตัน ซึ่งจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับแรงกระทำของเหล็กแผ่นบนและแผ่นล่าง ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่าความเครียดของการทดสอบและการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีการเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นและมีแนวโน้มค่าที่สอดคล้องกัน



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับแรงกระทำของเหล็กแผ่นบน



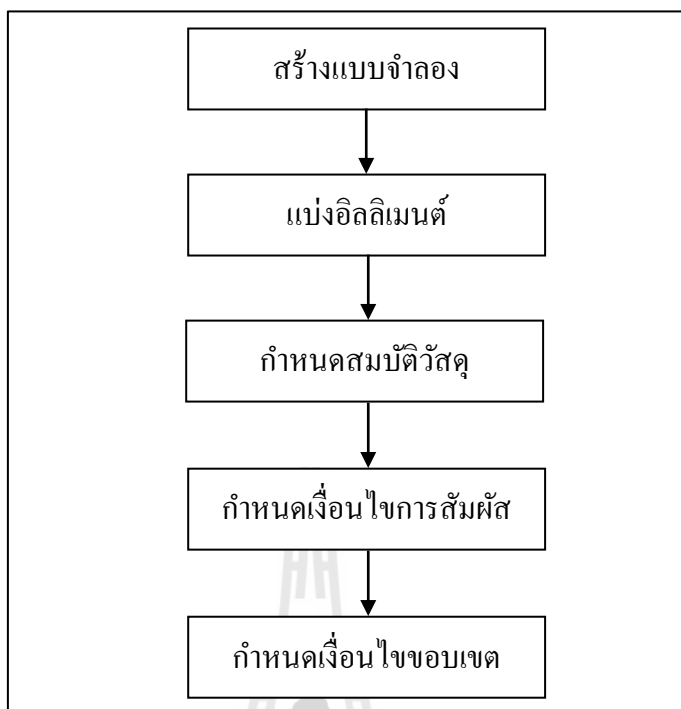
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับแรงกระทำของเหล็กแผ่นล่าง

จากผลการทดสอบเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ ทั้งผลการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบกับแรงกระทำและผลการเปรียบเทียบค่าความเครียดที่เกิดขึ้นที่เหล็กแผ่นของการทดสอบกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ พบว่าค่าจากการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวด้วยวิธีการทดสอบจริงและด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์มีผลที่สอดคล้องกันเป็นอย่างมาก ทำให้เชื่อได้ว่า โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์มีความน่าเชื่อถือและมีความถูกต้องเป็นที่ยอมรับสำหรับผลของการวิเคราะห์ปัญหา

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้อิลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ (Tetrahedral element) ซึ่งในทางทฤษฎีจะให้ผลที่ความถูกต้องน้อยกว่าอิลิเมนต์ทรงสี่หน้า 10 จุด แต่เนื่องจากผู้วิจัยมีข้อจำกัดในเรื่องสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ใช้งานจึงเลือกใช้อิลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ และจากการทดลองพบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มีผลที่สอดคล้องกับการทดสอบจริง และการใช้อิลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อยังช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผลเป็นอย่างมากอีกด้วย

3.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสารด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์นั้นเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของที่นั่งโดยอ้างอิงขนาดจากแบบที่นั่งจริง จากนั้นแบ่งแบบจำลองออกเป็นอิลิเมนต์เล็ก ๆ แล้วจึงกำหนดสมบัติวัสดุ เงื่อนไขการขอบเขตต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับปัญหาจริงเพื่อวิเคราะห์ในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ MSC Marc 2011 โดยจะวิเคราะห์ปัญหาแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Analysis) โดยขั้นตอนพอสังเขปได้แสดงในแผนผังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แผนผังแสดงการคำนวณทางไฟไนท์อิลลิเมนต์

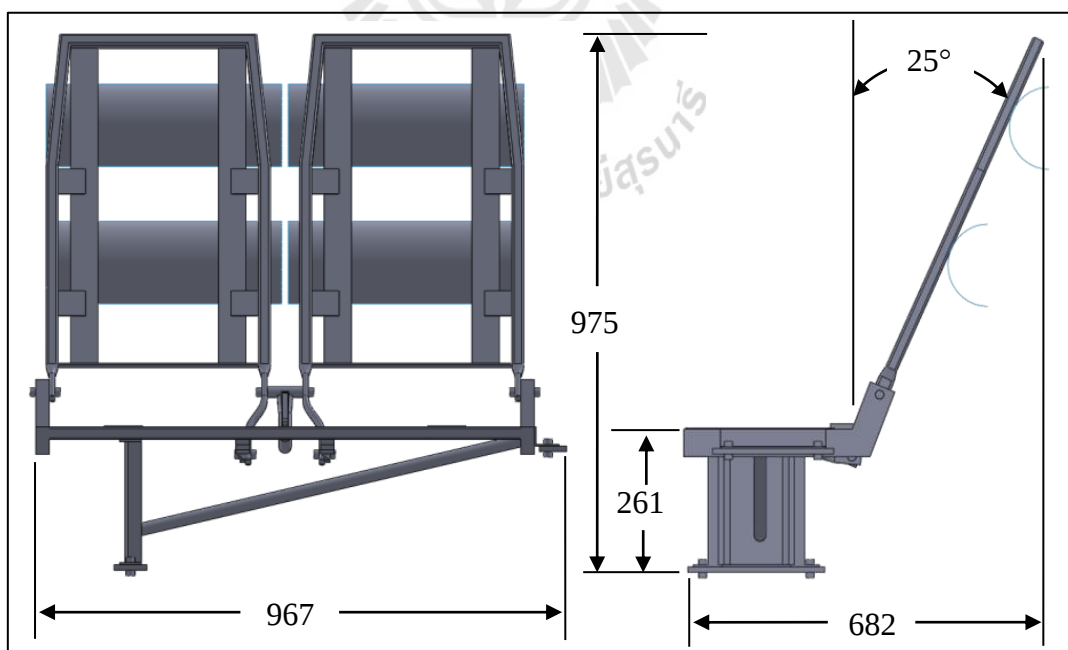
3.4.1 การสร้างแบบจำลอง

ที่นั่งรถโดยสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบที่นั่งคู่แยกพนักพิงของรถโดยสารที่มีระบบปรับเอนหลังของพนักพิงที่นั่งด้วยสปริงของบริษัทเซคซ์อุตสาหกรรมจำกัด ซึ่งได้ลดทอนความซับซ้อนของแบบจำลองด้วยการไม่วิเคราะห์ในส่วนของเบาะและวัสดุหุ้ม รวมถึงใช้สตั๊กยึดอย่างง่าย ไม่มีเกลิยวและไม่วิเคราะห์ชุดกลไกปรับเอนหลังพนักพิง เนื่องจากส่วนของที่ปรับเอนหลังนั้นไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของที่นั่ง ดังรูปที่ 3.19 โดยในแบบจำลองที่นั่งได้ปรับตำแหน่งพนักพิงทำมุม 25 องศากับแนวดิ่ง ตามเงื่อนไขของการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่



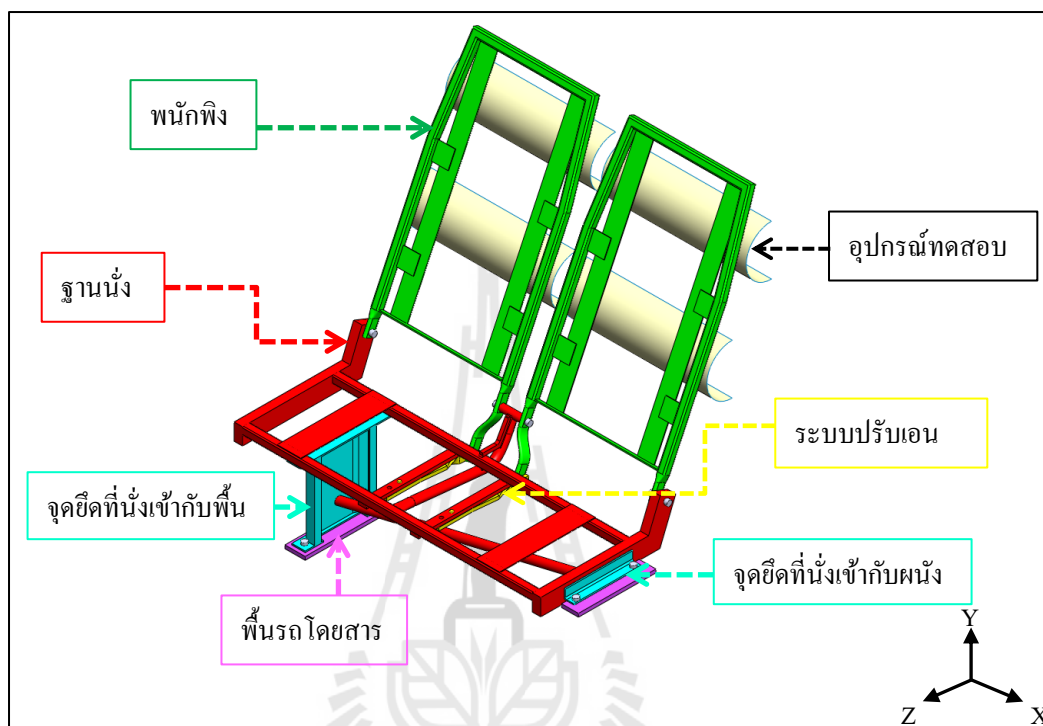
รูปที่ 3.19 ที่นั่งคู่แยกพนักงานฟิงของรถโดยสาร

แบบจำลองที่นั่งรถโดยสาร สร้างโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 2011 โดยมีรูปร่างและขนาดดังแสดงในรูปที่ 3.20 แบบจำลองที่นั่งจะถูกสร้างให้มีรูปร่างแบบ 3 มิติ และอุปกรณ์ทดสอบถูกสร้างให้มีรูปร่าง 2 มิติ



รูปที่ 3.20 แบบจำลองที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่ชนิดเบาะคู่แยกพนักงานฟิง

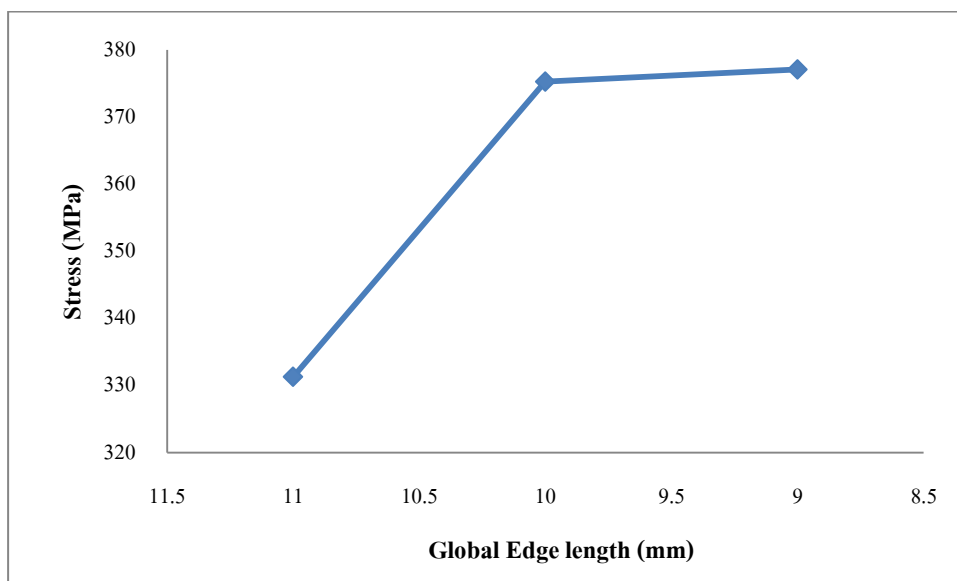
ชิ้นส่วนของโครงสร้างที่นึ่งประกอบด้วย (1) พนักพิง (2) ฐานนั่ง (3) ระบบปรับเอน (4) จุดยึดที่นึ่งเข้ากับพื้นรถ (5) จุดยึดที่นึ่งเข้ากับผนัง (6) พื้นรถโดยสาร และ (7) สลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยอุปกรณ์ทดสอบจะสร้างเป็นรูปทรงครึ่งทรงกระบอก



รูปที่ 3.21 ส่วนประกอบของที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่ชนิดที่นั่งคู่พนักพิงแยก

3.4.2 การกำหนดขนาดอิลลิเมนต์

เมื่อสร้างแบบจำลองที่นั่งรถโดยสารแล้ว จึงนำแบบจำลองเข้าไปแบ่งอิลลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Patran 2011 โดยแบ่งเป็นอิลลิเมนต์แบบสามมิติ ซึ่งเลือกใช้อิลลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ (Tetrahedral element) ทั้งนี้เพื่อสร้างความมั่นใจให้กับผลคำตอบที่ได้ จึงปรับขนาดของอิลลิเมนต์จากค่าเริ่มต้นของโปรแกรมซึ่งกำหนดไว้ที่ 17 มิลลิเมตร โดยลดขนาดของอิลลิเมนต์ลงครึ่งละ 1 มิลลิเมตร แล้วเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุด ซึ่งระหว่างอิลลิเมนต์ความยาว 9 กับ 10 มิลลิเมตร มีค่าความแตกต่างของค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดที่เปลี่ยนไปอยู่ที่ 3.81% ดังแสดงในรูปที่ 3.22 จึงเลือกใช้อิลลิเมนต์ที่มีขนาด 10 มิลลิเมตร ที่ให้ผลคำตอบค่าความเค้นใกล้เคียงกับผลคำตอบของการใช้อิลลิเมนต์ขนาด 9 มิลลิเมตร และยังใช้ CPU time ที่น้อยกว่า

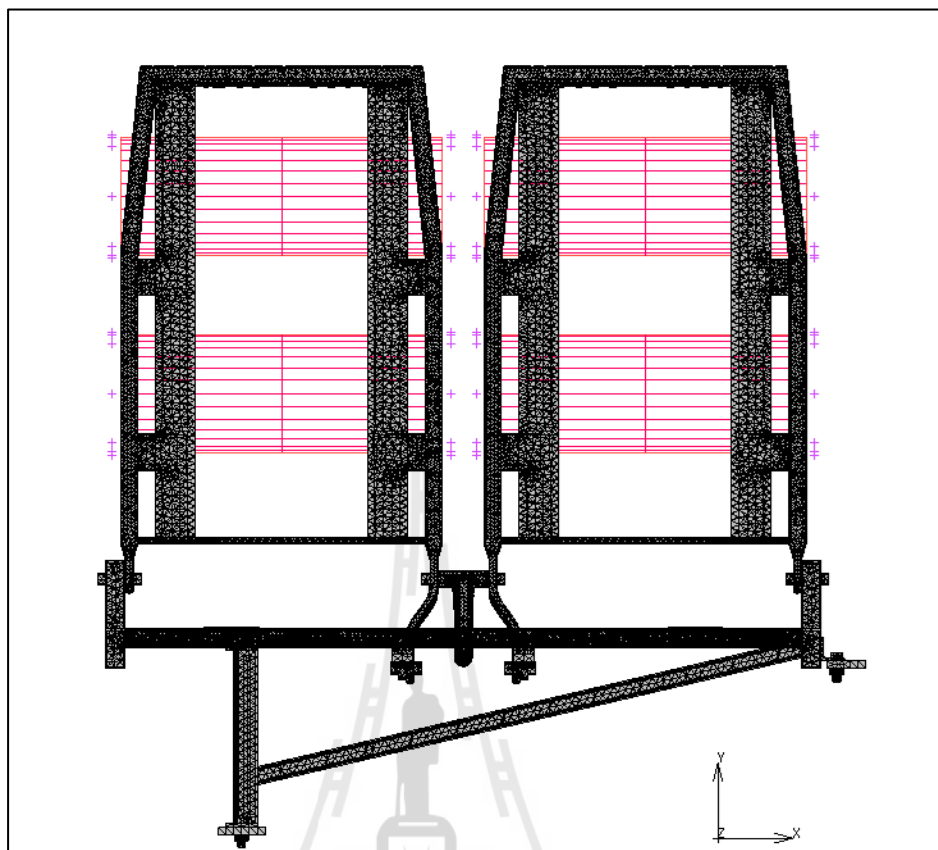


รูปที่ 3.22 ค่าความเค้นวอนมิตเซสของจุดยึดที่นั้งที่อิลลิเมนต์ขนาด 9, 10 และ 11 มิลลิเมตร

ซึ่งในแบบจำลองโครงสร้างที่นั้งมีจำนวน 268,898 อิลลิเมนต์ 81,826 จุดต่อดังแสดงในรูปที่ 3.23 ซึ่งแต่ละชิ้นส่วนของที่นั้งรถโดยสารจะมีจำนวนอิลลิเมนต์ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 จำนวนอิลลิเมนต์ของแต่ละชิ้นส่วนของที่นั้งรถโดยสาร

ชิ้นส่วน	จำนวนอิลลิเมนต์
พนักพิง	119,262
ฐานนั้ง	122,386
ชุดปรับตำแหน่ง	3,479
จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นรถ	7,105
จุดยึดที่นั้งเข้ากับผนังรถ	4,910
พื้นรถโดยสาร	6,190
สลัก	5,566



รูปที่ 3.23 การแบ่งอีลิเมนต์ของแบบจำลองที่นั่ง

3.4.3 การกำหนดสมบัติวัสดุ

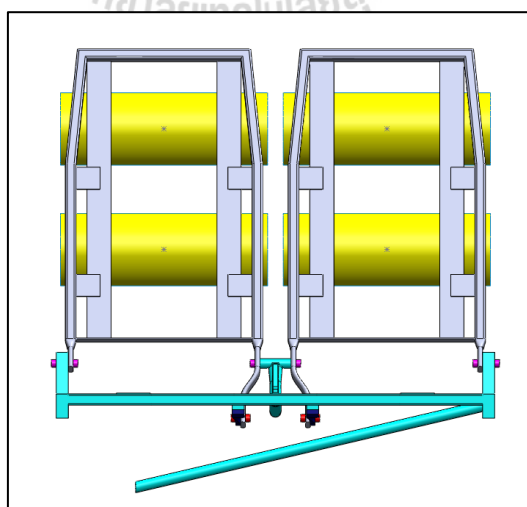
แบบจำลองที่นั่งรถโดยสารนั้น ได้กำหนดสมบัติวัสดุโดยอ้างอิงจากวัสดุจริงของที่นั่งรถโดยสาร ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงในหัวข้อ 3.2 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์สมบัติวัสดุโดยให้มีค่าสมบัติวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง (Elastic-Plastic Isotropic) เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์อีลิเมนต์ด้วยโปรแกรม MSC Marc 2011 ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุ 2 ชนิดด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ค่าสมบัติวัสดุของโครงสร้างที่นั้รกดโดยสารขนาดใหญ่นั้ชนิดเบาะคู่แยกพนักพิง

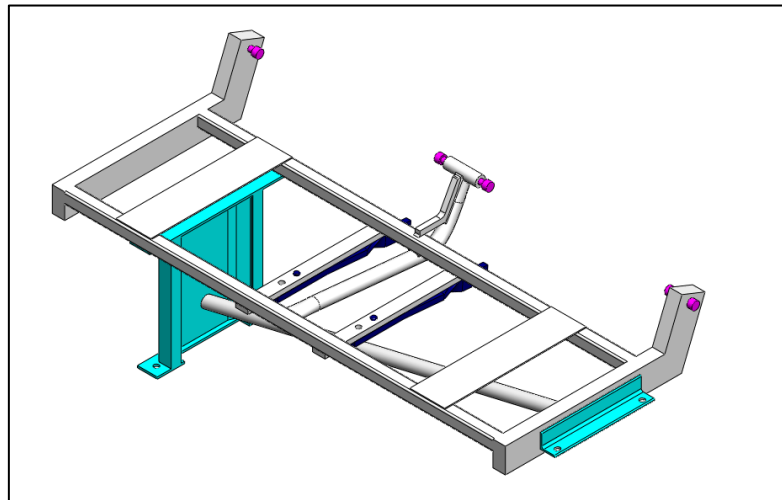
ชนิดวัสดุ	Young's Modulus (E : GPa)	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Poisson's ratio (ν)
เหล็กแผ่น	193.392	370	465	0.25
เหล็กกล่อง	122.334	370	407	0.25

3.4.4 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

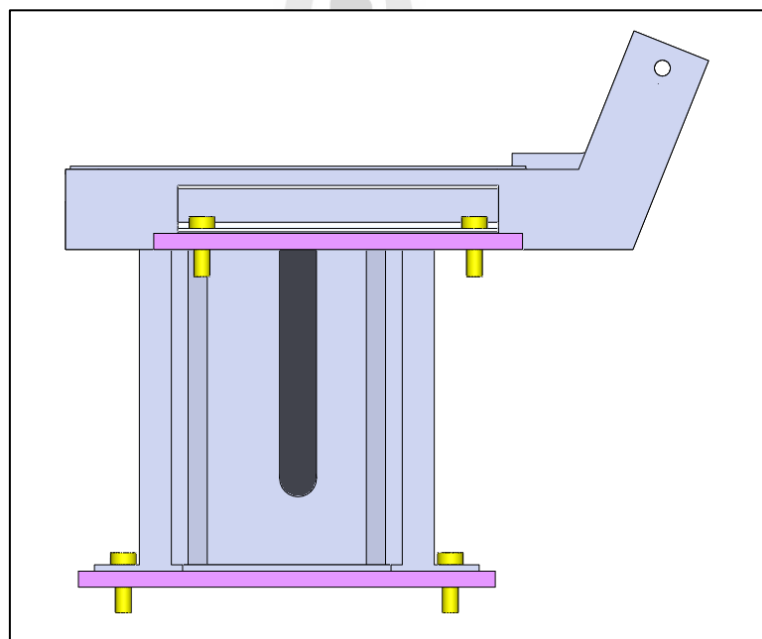
การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนที่สัมผัสกัน แบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไขการสัมผัส คือ (1) การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ (Glue Contact) (2) การสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นสามารถเลื่อนไถลได้แต่ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ (Touching Contact) ซึ่งระหว่างชิ้นส่วนที่ติดกันด้วยการเชื่อมจะพิจารณาให้เป็นการเชื่อมต่ออย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะถูกกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสแบบ Glue Contact และ ระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นส่วนที่ติดกันด้วยสลักเกลียวจะถูกกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสแบบ Touching Contact ซึ่งแสดงการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนดังรูปที่ 3.24 - 3.28 โดยชิ้นส่วนที่มีสีเทาคือชิ้นส่วนที่ 1 และชิ้นส่วนที่ 2 จะมีสีที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งมีเงื่อนไขการสัมผัสดังแสดงในตารางที่ 3.6 โดยกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสแบบ Node to Segment เป็นการหาการสัมผัสที่ใช้จุดต่อของชิ้นส่วนหนึ่งกับผิวอิลลิเมนต์ของอีกชิ้นส่วนหนึ่ง ซึ่งทั้งสองชิ้นส่วนที่สัมผัสกันจะมีเงื่อนไขการสัมผัสที่เหมือนกัน



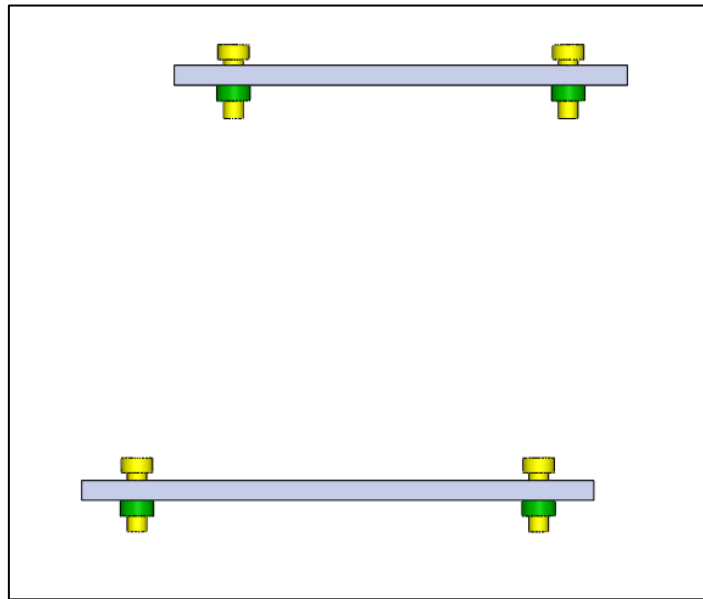
รูปที่ 3.24 ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับพนักพิง



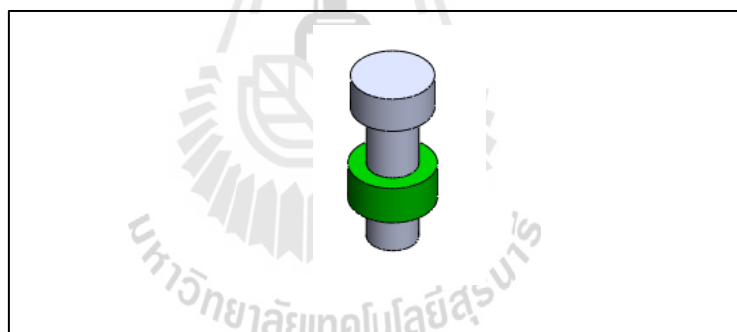
รูปที่ 3.25 ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับฐานนั่ง



รูปที่ 3.26 ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับจุดยึดที่นั่ง



รูปที่ 3.27 ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับพื้นรถโดยสาร



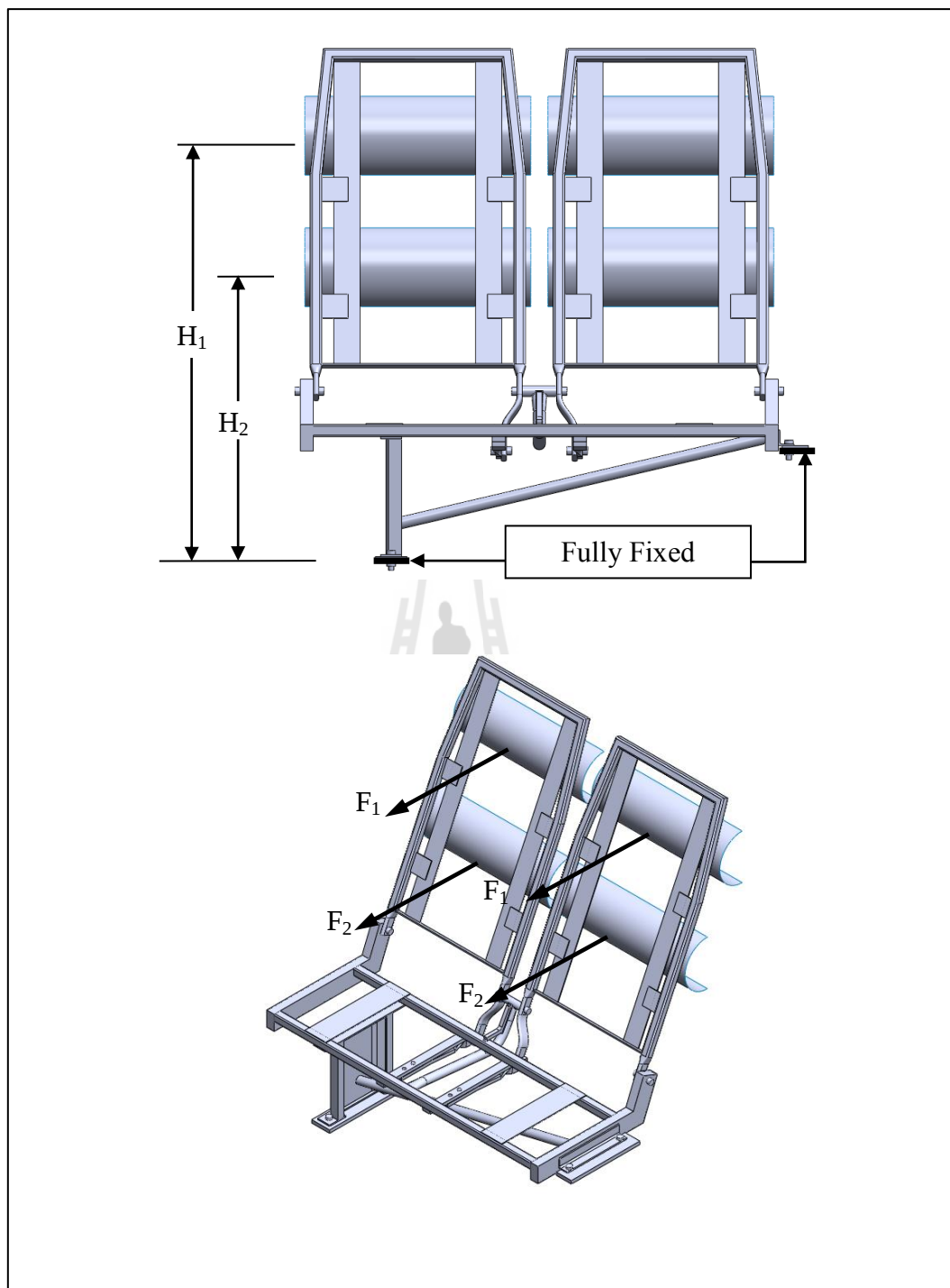
รูปที่ 3.28 ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับสลัก (จุดยึดที่นิ่ง – พื้นรถโดยสาร)

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างที่นั่งรถโดยสาร

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	เงื่อนไขการสัมผัส
พนักพิง	อุปกรณ์ทดสอบ	Touching
	ฐานนั่ง	Touching
	ชุดปรับตำแหน่ง	Touching
	สลัก(พนักพิง - ฐานนั่ง)	Touching
	สลัก (พนักพิง - ชุดปรับตำแหน่ง)	Touching
ฐานนั่ง	จุดยึดที่นั่ง	Glue
	ชุดปรับตำแหน่ง	Touching
	สลัก(พนักพิง - ฐานนั่ง)	Glue
จุดยึดที่นั่ง	พื้น	Touching
	สลัก(จุดยึดที่นั่ง - พื้นรถโดยสาร)	Touching
พื้นรถโดยสาร	สลัก (จุดยึดที่นั่ง - พื้นรถโดยสาร)	Glue
สลัก (จุดยึดที่นั่ง – พื้นรถโดยสาร)	แป้นรอง	Glue

3.4.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตนั้น จะกำหนดให้ชิ้นส่วนพื้นรถโดยสารถูกจับยึดไม่ให้เคลื่อนที่และหมุนในทุกทิศทาง (Fixed displacement) และให้แรงกระทำแบบจุด (Point load) กระทำที่อุปกรณ์ทดสอบทั้ง 4 ชิ้น โดยให้แรงกระทำที่อุปกรณ์ทดสอบที่มีความสูง 800 มิลลิเมตรจากพื้นรถโดยสาร 1,250 นิวตันต่อหนึ่งอุปกรณ์ทดสอบ (F_1) และให้แรงกระทำที่อุปกรณ์ทดสอบที่มีความสูง 550 มิลลิเมตรจากพื้นรถโดยสาร 3,640 นิวตันต่อหนึ่งอุปกรณ์ทดสอบ (F_2) ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่นิ่ง

บทที่ 4

ผลลัพธ์และการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งรถโดยสารขนาดใหญ่โดยใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ ซึ่งเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนท์อิลลิเมนต์ด้วยการทดสอบแรงเฉือนเดี่ยวของสลักเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ การวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งของรถโดยสารขนาดใหญ่ชนิดที่นั้งคู่ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณจุดยึดที่นั้งโดยให้แรงกระทำตามที่มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งรถโดยสารขนาดใหญ่และสุดท้ายทำการปรับปรุงจุดยึดที่นั้งรถโดยสารที่มีค่าความเค้นวอนมิสเชสมากเกินความเค้นครากเพื่อลดค่าความเค้นวอนมิสเชสและทำให้ที่นั้งมีความแข็งแรงตามมาตรฐานการทดสอบ ซึ่งให้มีขนาดและรูปร่างของที่นั้งที่เหมาะสมโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of experimental) ด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial design) เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งและนำไปปรับปรุงแบบจำลองจุดยึดที่นั้งที่สามารถรับแรงกระทำตามที่มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งของรถโดยสาร

4.2 ผลการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งของรถโดยสารด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

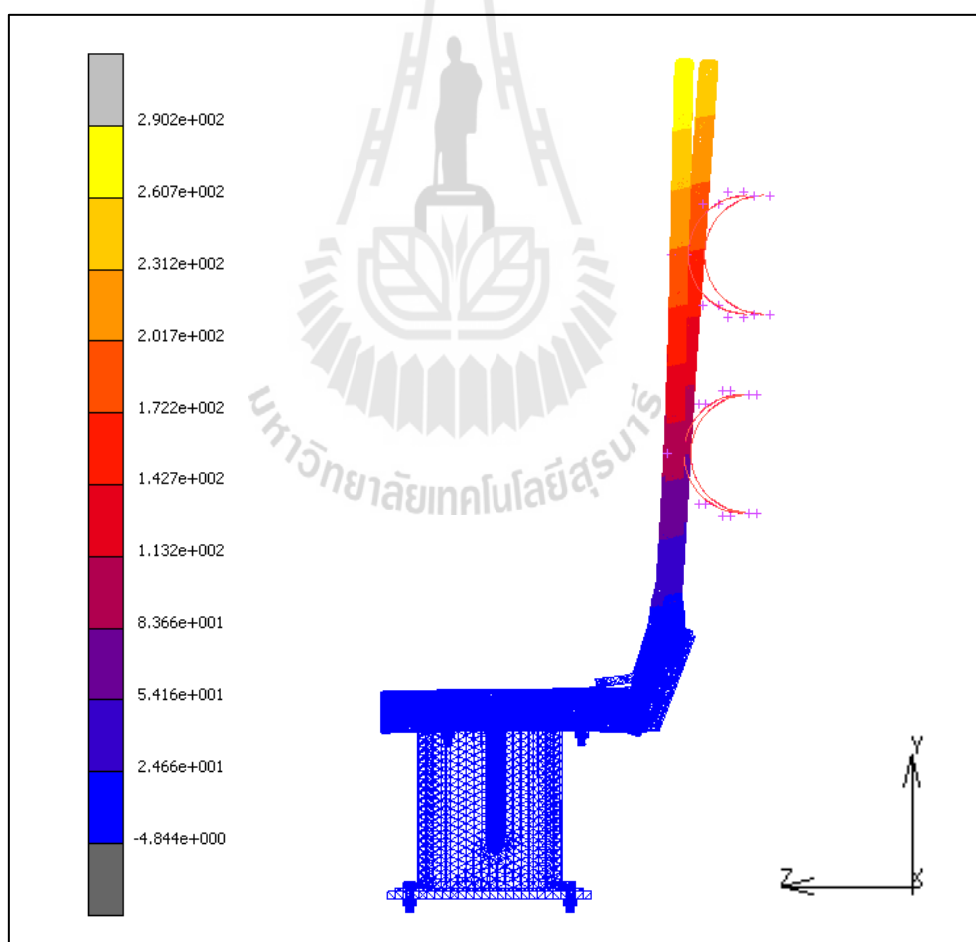
ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์นั้น จะมีเกณฑ์ตัดสินให้จุดยึดที่นั้งผ่านการทดสอบซึ่งมีเกณฑ์การตัดสิน 2 เกณฑ์ คือ

- 1) ค่าระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบในแนวนานกับพื้น
- 2) ค่าความเค้นสูงสุดของอิลลิเมนต์ตามเกณฑ์ของวอนมิสเชสที่จุดยึดที่นั้ง

ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ จะต้องผ่านเกณฑ์การตัดสินทั้ง 2 ข้อ พร้อมๆกัน จึงจะถือว่า จุดยึดที่นั้งของรถโดยสารมีความแข็งแรงผ่านการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั้งของรถโดยสาร

4.2.1 ค่าระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบในแนวนานกับพื้น

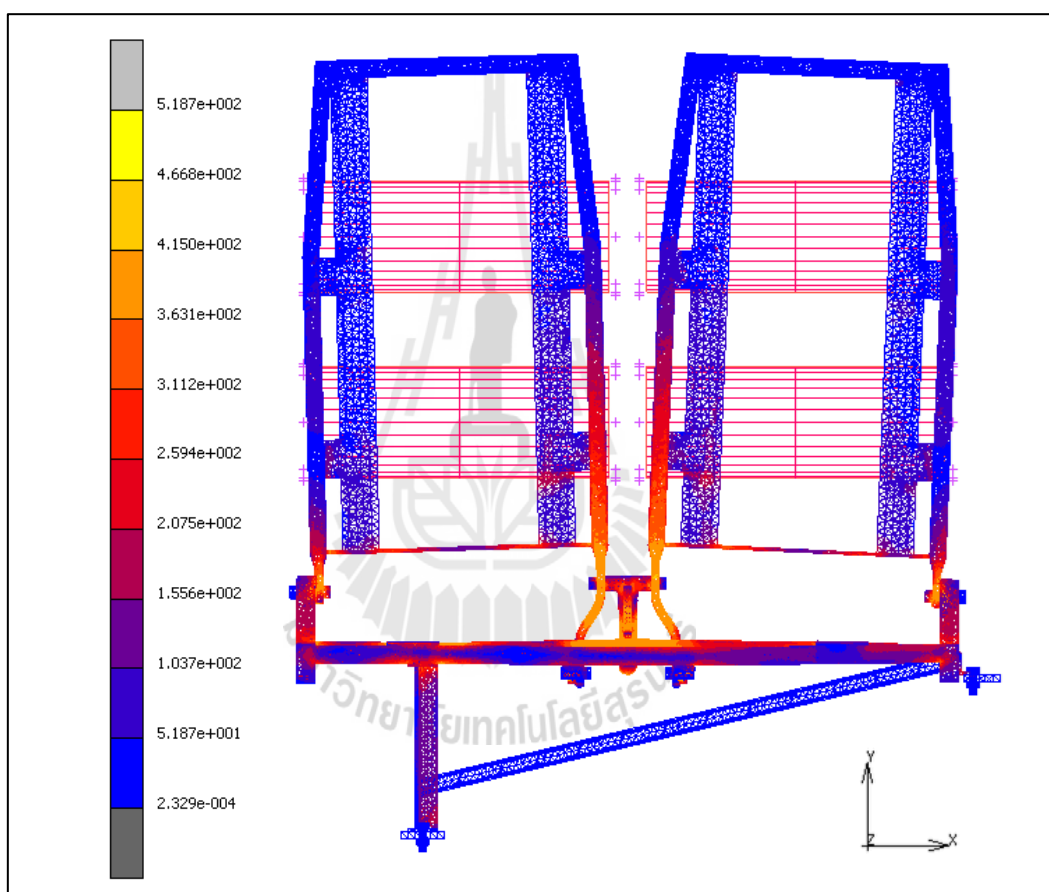
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแสดงให้เห็นถึงระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบในแนวนานกับพื้นทิศทางแกน Z หลังจากใส่แรงกระทำให้กับอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ทดสอบที่มีความสูง H_1 มีระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน Z สูงสุด 206.882 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การตัดสินการทดสอบที่กำหนดให้อุปกรณ์ทดสอบเคลื่อนที่ภายในระยะ 100 – 400 มิลลิเมตร และอุปกรณ์ทดสอบที่มีความสูง H_2 มีระยะเคลื่อนที่ในแกน Z สูงสุด 108.448 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์การตัดสินการทดสอบที่กำหนดให้อุปกรณ์ทดสอบเคลื่อนที่ภายในระยะ 50 – 400 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้ง เกณฑ์การตัดสินในส่วนของการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบได้ผ่านมาตรฐานการทดสอบ



รูปที่ 4.1 ชั้นแถบสีค่าการเคลื่อนที่ในทิศทางแกน Z ของที่นั่งรถโดยสาร

4.2.2 ค่าความเค้นวอนมีสเชสสูงสุดที่จุดยึดที่นั้งรถโดยสาร

ผลจากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์พบว่าค่าความเค้นวอนมีสเชสสูงสุดของที่นั่งรถโดยสารเกิดขึ้นที่สลักยึดระหว่างพนักพิงกับฐานนั่ง มีค่า 518.7 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาความเค้นวอนมีสเชสที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งเท่านั้น เนื่องจากบริเวณพนักพิงจะพิจารณาระยะการเคลื่อนที่ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.2 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมีสเชสของที่นั่งรถโดยสาร

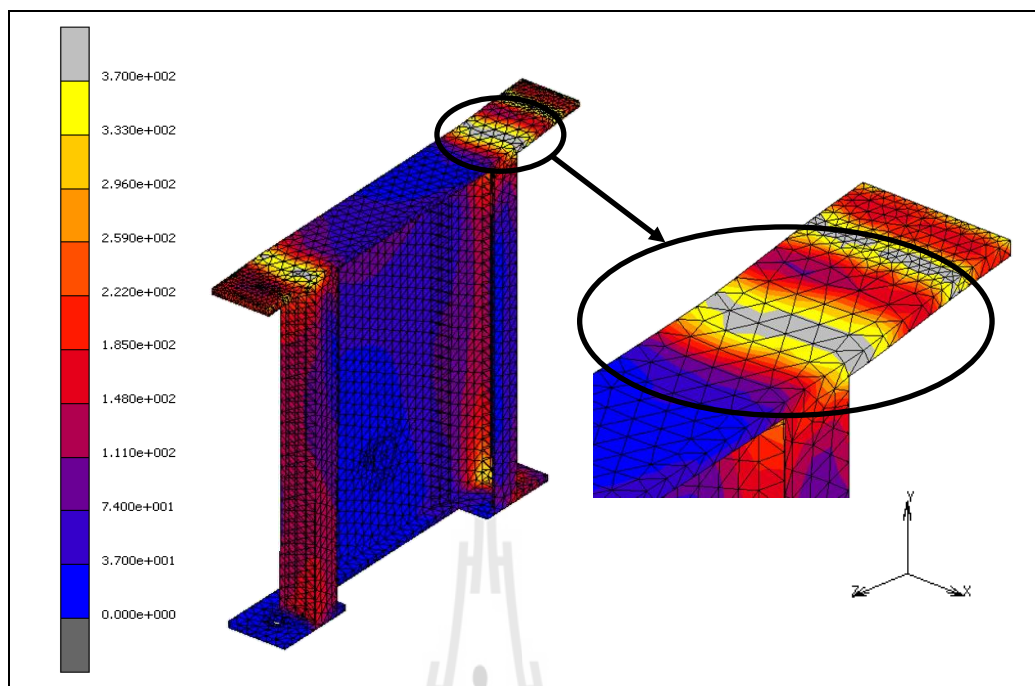
ชิ้นส่วนของจุดยึดที่นั้งรถโดยสารในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ

- 1) จุดยึดที่นั้งเข้ากับพนักรถ
- 2) จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นรถ
- 3) สลักยึดที่นั้งเข้ากับตัวรถ

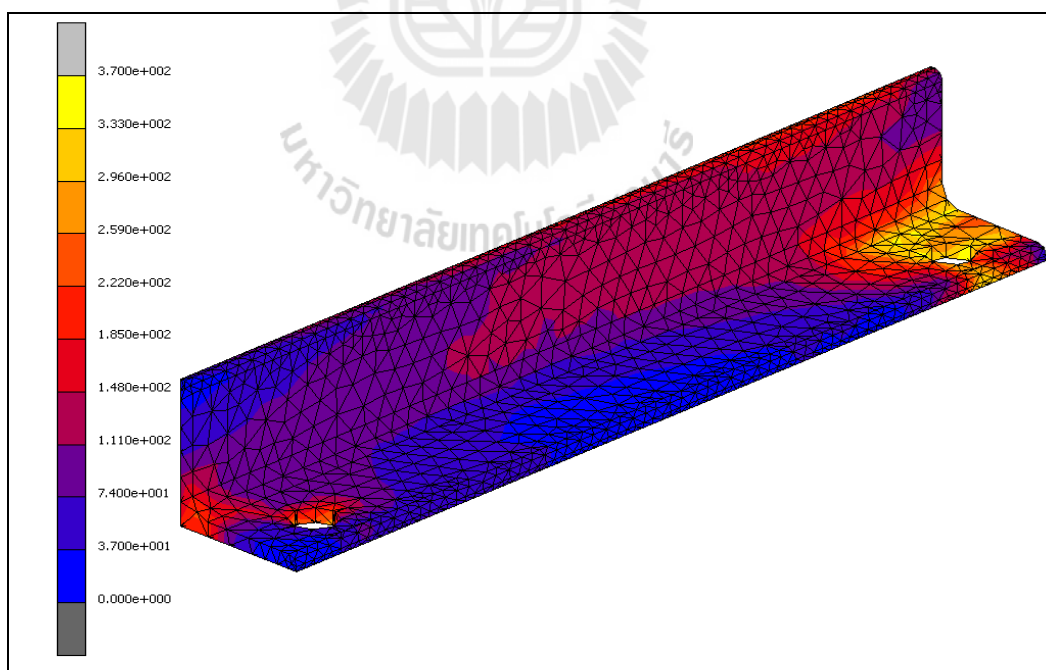
ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MSC Marc 2011 พบว่าเมื่อให้แรงกระทำกับอุปกรณ์ทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนด ค่าความเค้นวอนมิตเซตสูงสุดที่เกิดขึ้นกับจุดยึดที่นั่งรถโดยสารขนาดใหญ่นี้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจากค่าความเครียดที่เกิดขึ้นนั้นพบว่าจุดยึดทั้งสามชิ้นส่วนนั้นยังไม่เกิดการฉีกขาด แต่ค่าความเค้นวอนมิตเซตสูงสุดที่เกิดขึ้นที่จุดยึดที่นั่งเข้ากับพื้นรถนั้นมีค่าความเค้นเกินค่าความเค้นคราก (Yield stress) ของวัสดุ ซึ่งแสดงเป็นชั้นแถบสีค่าความเค้นของจุดยึดที่นั่งเข้ากับพื้น บริเวณที่แสดงแถบเทาถือคือบริเวณที่เกิดความเค้นวอนมิตเซตเกินค่าความเค้นคราก ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และแสดงชั้นแถบสีค่าความเค้นของจุดยึดที่นั่งเข้ากับผนังและสลักนั้น ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าค่าความเค้นคราก แต่ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ที่จุดยึดที่นั่งเข้ากับผนังรถมีค่าน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งถือว่าความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งยังไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ จึงต้องปรับปรุงและแก้ไขบริเวณที่เกิดค่าความเค้นวอนมิตเซตสูงสุดของแต่ละจุดยึดด้วยการออกแบบการทดลอง เพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นวอนมิตเซตที่จุดยึดที่นั่ง และนำไปใช้ออกแบบให้จุดยึดที่นั่งของรถโดยสารให้มีค่าความเค้นวอนมิตเซตสูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นครากของสมบัติวัสดุและมีค่าความปลอดภัยที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.1 ค่าความเค้นวอนมิตเซตสูงสุดของจุดยึดที่นั่ง

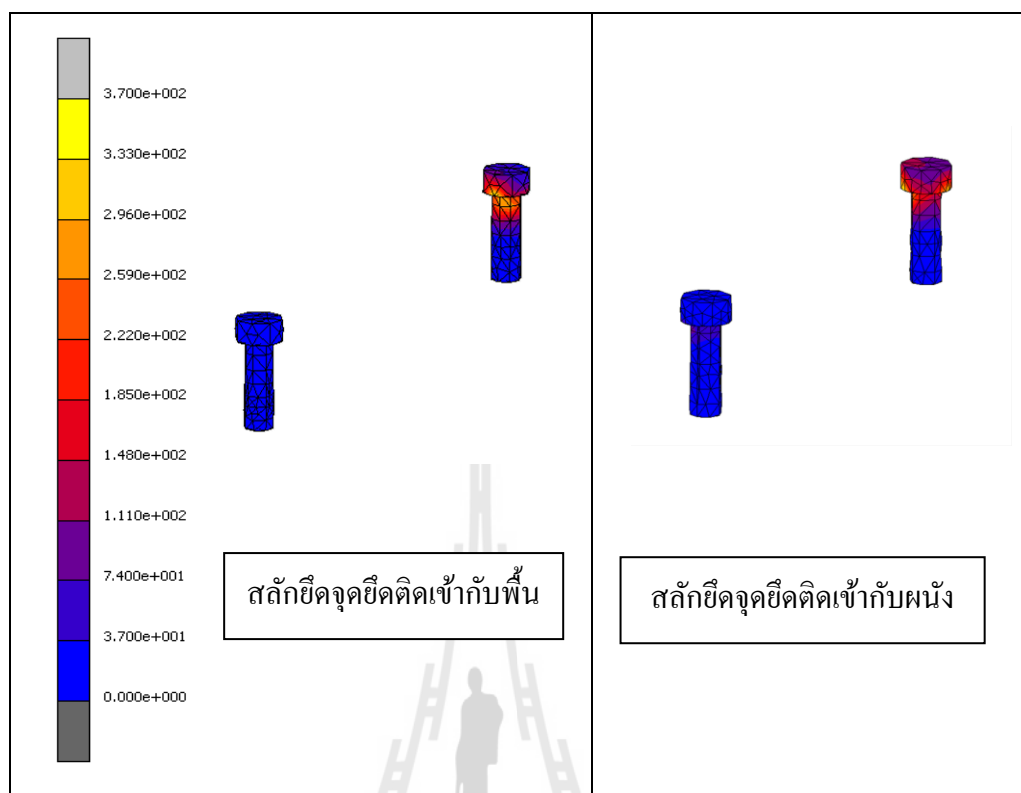
ชิ้นส่วน	ค่าความเค้นวอนมิตเซตสูงสุด (MPa)	ค่าความเค้นคราก (MPa)	ค่าความปลอดภัย	ค่าความเครียด
จุดยึดที่นั่งเข้ากับพื้นรถ	375.3	370	0.99	0.00489
จุดยึดที่นั่งเข้ากับผนังรถ	357.3	370	1.04	0.00201
สลักยึดที่นั่งเข้ากับโครงรถ	374.7	635	1.69	0.00669



รูปที่ 4.3 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมิสเชสที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นรถ



รูปที่ 4.4 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมิสเชสที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับผนัง



รูปที่ 4.5 ชั้นแถบสีค่าความเค้นวอนมิสเซสที่สลักยัดที่นั้ง

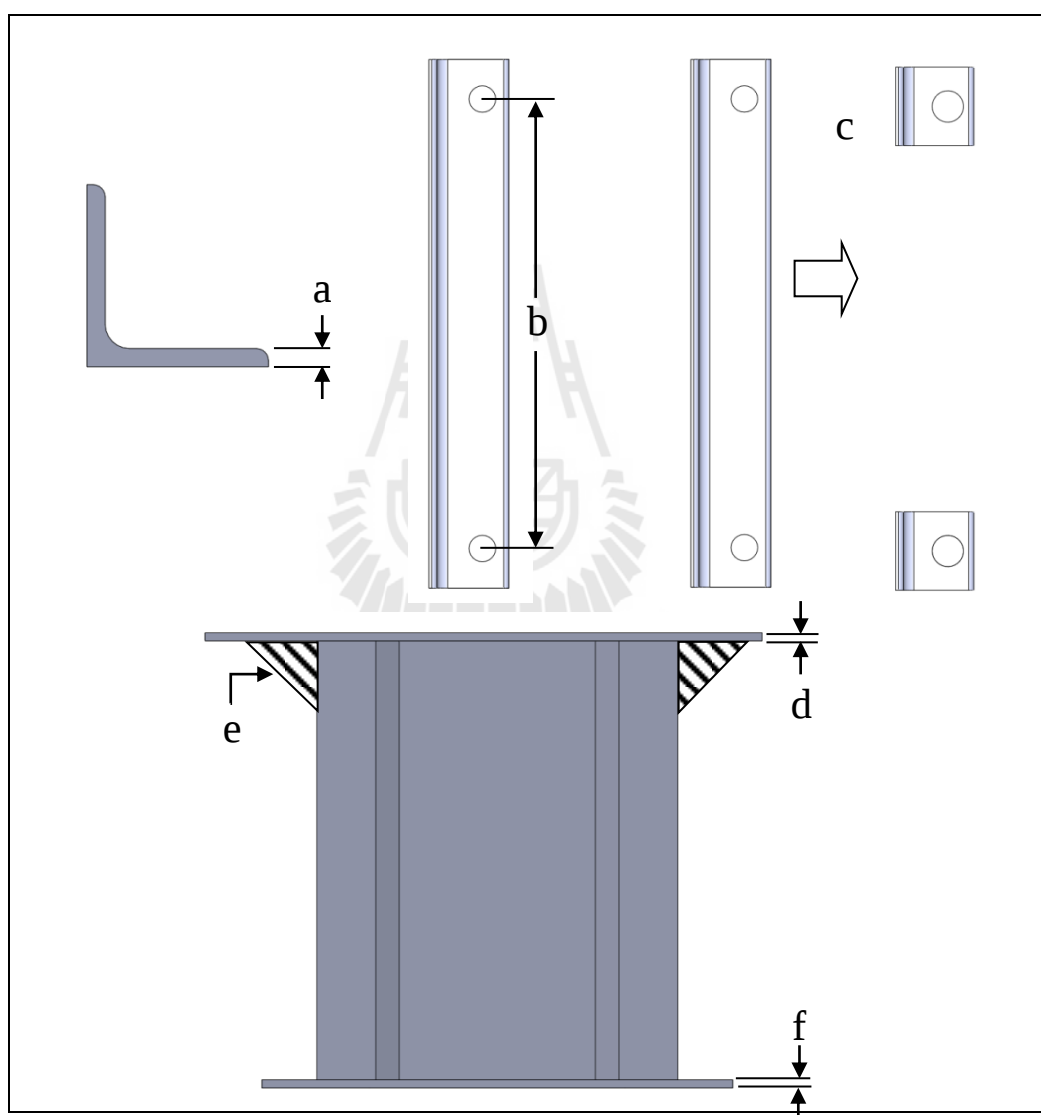
4.3 การออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั้ง

ในการปรับปรุงและออกแบบจุดยึดที่นั้งเพื่อให้มีค่าความเค้นลดลงมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ ได้ใช้วิธีออกแบบการทดลอง โดยใช้โปรแกรม Minitab 16 ด้วยวิธีการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) โดยใช้วิธีการลดกรณีศึกษาแบบ 1/16 fraction ด้วยปัจจัย 7 ปัจจัย ทำให้มีเงื่อนไขการทดลองทั้งหมด 8 เงื่อนไข ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติที่ช่วงความน่าเชื่อมั่น 95% เพื่อวิเคราะห์หาผลกระทบจากหลาย ๆ ปัจจัยที่ส่งผลพร้อม ๆ กันต่อตัวแปรตอบสนอง (Response) เพื่อนำไปปรับปรุงต่อไป

4.3.1 ปัจจัยของการออกแบบการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นครากส่งผลให้วัสดุเกิดการเสียรูปแบบถาวร รวมไปถึงค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับผนังยังมีค่าสูง ทำให้มีค่าความปลอดภัยน้อย เพื่อเพิ่มค่าความปลอดภัยให้กับจุดยึดที่นั้งที่ยึดเข้ากับผนังให้มากขึ้น และลดค่าความเค้นสูงสุดที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นให้มีย่าน้อยกว่าค่าความเค้นคราก การออกแบบ

การทดลองจึงได้เลือก พิจารณาปัจจัยจากค่าความเค้นในแนวระนาบต่าง ๆ ในจุดที่เกิดค่าความเค้นสูงสุดของจุดยึดที่นั้งทั้ง 3 ส่วน ซึ่งสามารถปรับปรุงได้ทั้งหมด 7 ปัจจัย แบ่งเป็นปัจจัยในการปรับปรุงในส่วนจุดยึดที่นั้งเข้ากับผนังรถ 3 ปัจจัย, ปัจจัยในการปรับปรุงจุดยึดที่นั้งเข้ากับผนังรถ 3 ปัจจัย และ ปัจจัยในการปรับปรุงสลักยึด 1 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยมีระดับปัจจัยของปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 ซึ่งปัจจัย (b) และ (c) เป็นปัจจัยที่เลือกเพิ่มเข้ามาเพื่อใช้พิจารณาในการช่วยลดการใช้วัสดุและช่วยลดน้ำหนักให้รถโดยสาร



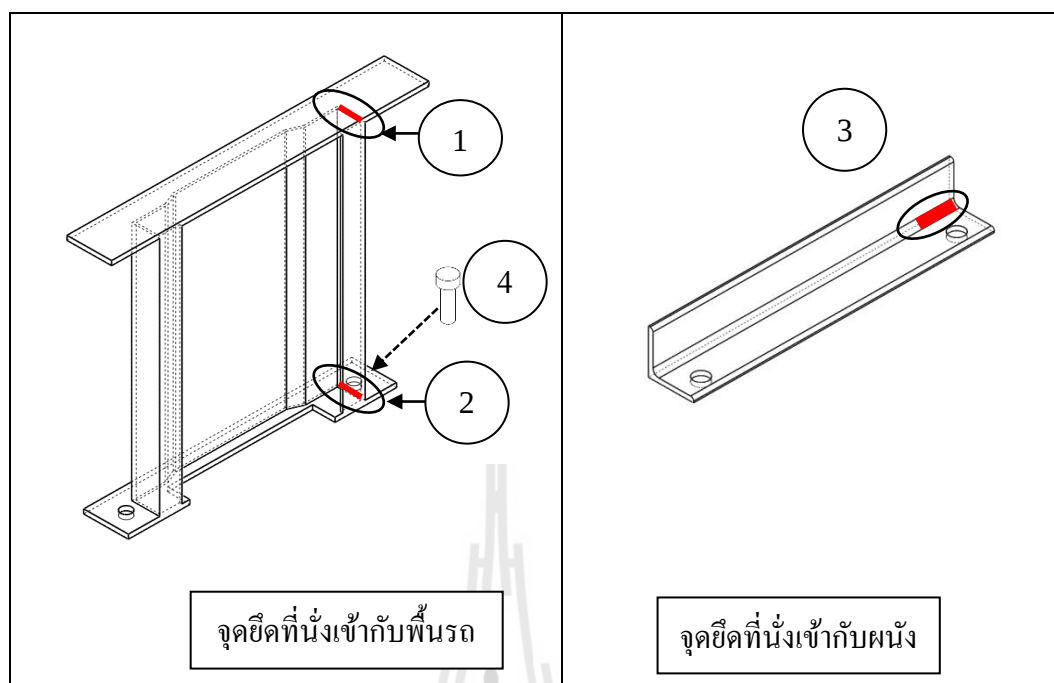
รูปที่ 4.6 ปัจจัยในการออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

ชิ้นส่วน	ปัจจัย	ระดับปัจจัย	
จุดยึดที่นั้งเข้ากับผนังรถ	a) ความหนาของเหล็กฉาก	3 มิลลิเมตร	5 มิลลิเมตร
	b) ระยะห่างของรูเจาะยึด	100 มิลลิเมตร	170 มิลลิเมตร
	c) รูปแบบจุดยึด	1 ชั้น	2 ชั้น
จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นรถ	d) ความหนาของเหล็กแผ่นด้านบน	4 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร
	e) การเพิ่มส่วนรองรับ	ไม่มี	มี
	f) ความหนาของเหล็กแผ่นด้านล่าง	4 มิลลิเมตร	6 มิลลิเมตร
สลัก	g) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสลัก	8 มิลลิเมตร	10 มิลลิเมตร

4.3.2 ผลการศึกษาการออกแบบการทดลองของจุดยึดที่นั้ง

จากผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ของกรณีศึกษาการปรับปรุงจุดยึดที่นั้งด้วยการออกแบบการทดลองเชิงสถิติทั้ง 8 กรณี จะพิจารณาถึงผลกระทบของปัจจัยต่อค่าความเค้นที่จุดยึด โดยกำหนดตัวแปรตอบสนองที่ตำแหน่งจุดยึดที่นั้งที่เกิดค่าความเค้นสูงสุดหรือมีความเสี่ยงต่อการเสียหาย ซึ่งเลือกพิจารณาตำแหน่งตัวแปรตอบสนองที่จุดยึดทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยตำแหน่งที่ 1, 3 และ 4 เป็นตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นสูงสุดของจุดยึดที่นั้งทั้ง 3 ส่วน และตำแหน่งที่ 2 เป็นตำแหน่งที่มีค่าความเค้นที่สูง เสี่ยงต่อการเสียหายที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นเช่นกัน และได้เลือกจุดพิจารณาเพิ่มอีก 1 ตำแหน่ง คือ ค่าระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบเนื่องจากระยะการเคลื่อนที่การทดสอบเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ร่วมของการตัดสินใจทดสอบจึงจะต้องพิจารณาผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งที่ใช้ในการพิจารณาการส่งผลของปัจจัยต่อค่าความเค้นวอนมิตเซส

เมื่อวิเคราะห์หาผลกระทบจากปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองด้วยวิธีทางสถิติที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% (Confidence Interval) ด้วยโปรแกรม Minitab 16 จะพิจารณาการส่งผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ต่อตัวแปรตอบสนองจากค่า p-value ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 และค่าอิทธิพล จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าที่ ปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นที่ตัวแปรตอบสนองต่าง ๆ โดยจะมีค่า p-value ต่ำกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 และจากตารางที่ 4.4 จะแสดงผลกระทบอิทธิพลของปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนอง โดยการเพิ่มขึ้นของปัจจัยที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่ตำแหน่งที่ 1, 2 และ 3 จะส่งผลให้ค่าความเค้นที่ตำแหน่งตัวแปรตอบสนองดังกล่าวลดลง (ค่าอิทธิพลที่ส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญมีค่าเป็นลบ) แต่ตัวแปรตอบสนองที่ตำแหน่ง 4 การเพิ่มขึ้นของปัจจัย (d) และ (c) จะส่งผลให้มีค่าความเค้นที่เพิ่มขึ้น เพราะฉะนั้นถ้าต้องการปรับปรุงปัจจัย (d) และ (c) ให้มีค่าเพิ่มขึ้น ควรเพิ่มขนาดของสลักเพื่อรองรับกับความเค้นที่จะเพิ่มมากขึ้น และปัจจัยต่างๆ ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งจะสามารถปรับปรุงจุดยึดที่นั้งจากค่าปัจจัยต่าง ๆ โดยจะไม่ส่งผลกระทบต่อระยะการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์ทดสอบ

ตารางที่ 4.3 ค่า p-value ของปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response

Response	P-value ($\alpha = 0.05$)						
	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
ตำแหน่งที่ 1	0.128	0.447	0.447	0.012	0.022	0.024	0.155
ตำแหน่งที่ 2	0.533	0.392	0.249	0.457	0.336	0.021	0.010
ตำแหน่งที่ 3	0.028	0.042	0.115	0.578	0.289	0.289	0.162
ตำแหน่งที่ 4	0.027	0.072	0.553	0.025	0.020	0.025	0.009
การเคลื่อนที่ของ อุปกรณ์ทดสอบ	0.926	0.553	0.524	0.532	0.598	0.972	0.664

ตารางที่ 4.4 ค่า Effect ของปัจจัยที่ส่งผลต่อ Response

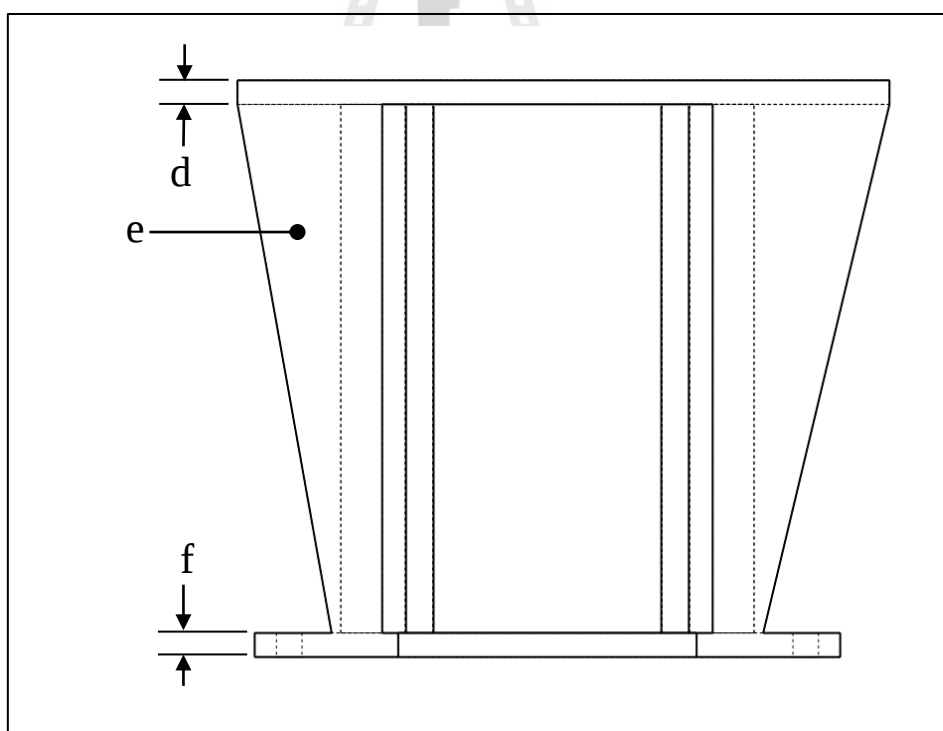
Response	Effect ($\alpha = 0.05$)						
	a)	b)	c)	d)	e)	f)	g)
ตำแหน่งที่ 1	-4.78	-0.98	-1.16	-50.65	-27.94	-26.09	-3.94
ตำแหน่งที่ 2	-4.39	-4.81	-7.15	4.48	5.57	-29.82	-43.54
ตำแหน่งที่ 3	-109.80	-73.12	26.18	-4.78	9.81	9.81	-18.33
ตำแหน่งที่ 4	-33.72	12.46	-0.98	35.33	36.30	-43.79	-99.89
การเคลื่อนที่ของ อุปกรณ์ทดสอบ	-1.525	10.975	-12.975	11.725	9.475	0.575	-7.575

4.4 การออกแบบจุดยึดที่นึ่งจากผลการออกแบบการทดลอง

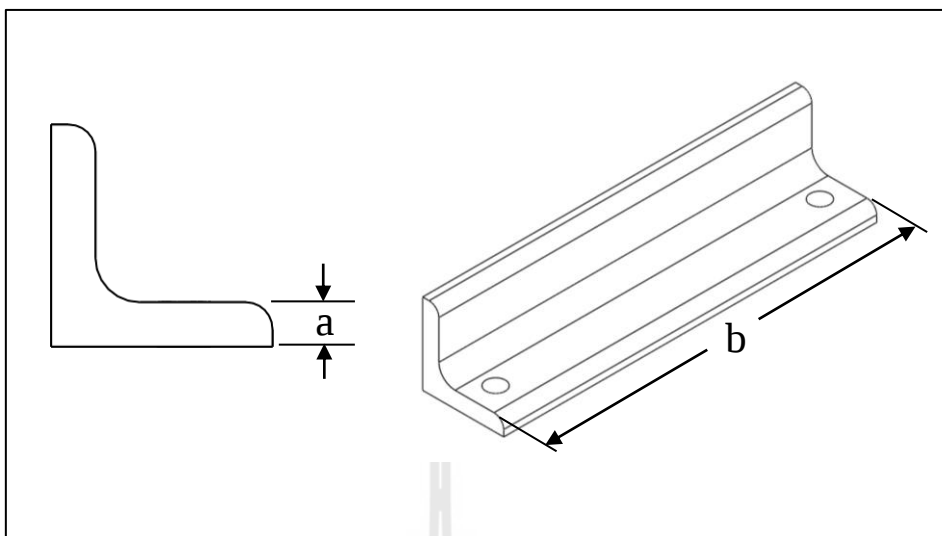
การออกแบบจุดยึดที่นึ่งจะเลือกปรับปรุงเฉพาะส่วนของปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการออกแบบการทดลองด้วยวิธีการออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ (2^{k-p} Factorial design) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งการออกแบบจุดยึดที่นึ่งจะให้ค่าความเค้นวอนมิสเชสที่ดีที่สุดจากการออกแบบการทดลอง

4.4.1 แบบจำลองจุดยึดที่นึ่งที่ปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง

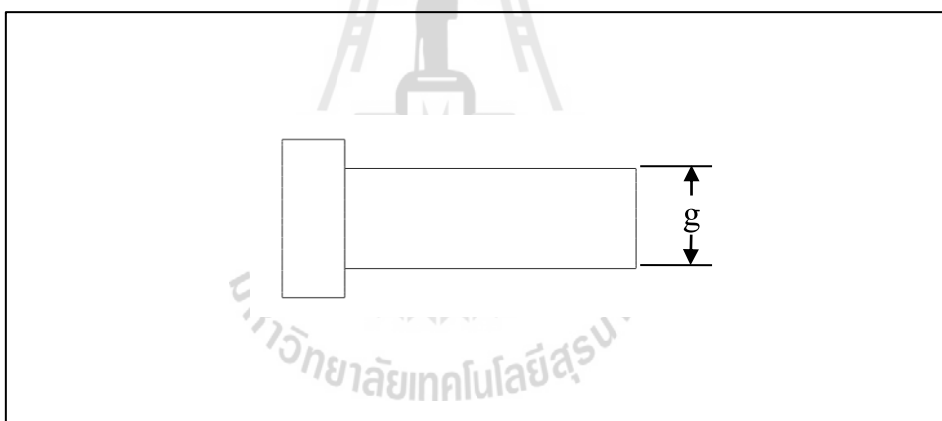
การปรับปรุงจุดยึดที่นึ่งได้เลือกใช้ปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความเค้นวอนมิสเชสที่จุดยึดที่นึ่ง ซึ่งได้ปรับปรุงจุดยึดที่นึ่งทั้ง 3 ชั้นส่วน เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับจุดยึดที่นึ่ง ซึ่งจากการทดลองปรับปรุงขนาดและรูปแบบของปัจจัยแต่ละตัวที่ส่งผลต่อค่าความเค้นอย่างมีนัยสำคัญ จนได้ปัจจัยที่ให้ค่าความเค้นสูงสุดอยู่ในช่วงที่ต้องการ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลและขนาดที่เลือกใช้ของปัจจัยนั้นได้แสดงในรูปที่ 4.8-4.10 จากรูปการเพิ่มส่วนรองรับจะเพิ่มจนเต็มความยาวของเหล็กแผ่นด้านบนเพื่อลดค่าความเค้นที่เกิดจากโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.8 ปัจจัยที่ใช้ในการปรับปรุงจุดยึดที่นึ่งเข้ากับพื้นรถ



รูปที่ 4.9 ป้ายที่ใช้ในการปรับปรุงจุดยึดที่นั้งเข้ากับผนัง



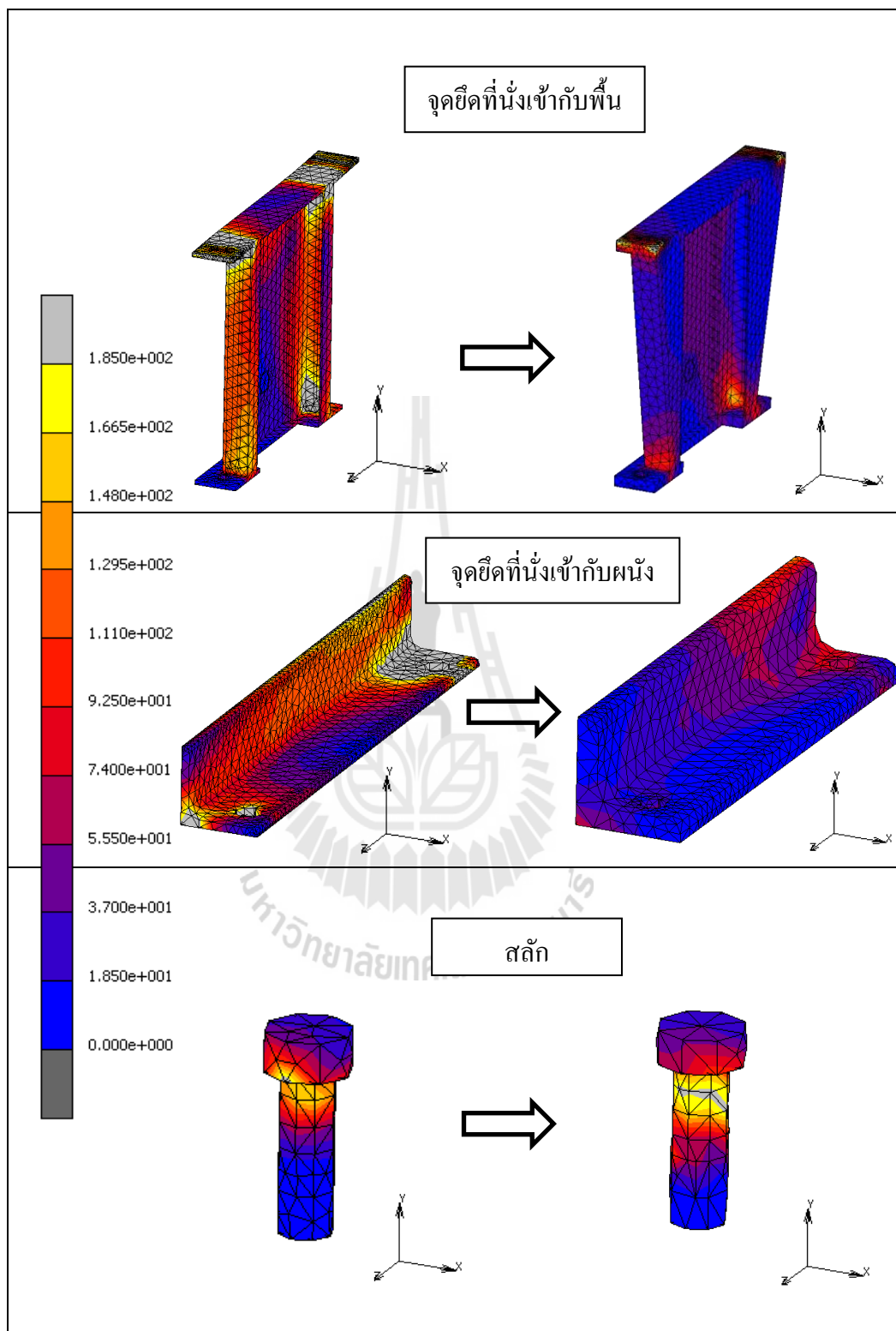
รูปที่ 4.10 ป้ายที่ใช้ในการปรับปรุงสลักยึดที่นั้ง

4.4.2 ค่าความเค้นวอนมิตเซสของจุดยึดที่นึ่งที่ปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง

เมื่อปรับปรุงแบบจำลองจุดยึดที่นึ่งด้วยปัจจัยจากการออกแบบการทดลอง (Design of experimental) จากรูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบแถบสีความเค้นวอนมิตเซสของจุดยึดที่นึ่งก่อนและหลังปรับปรุง จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขนาดของแผ่นเหล็กทั้ง 2 แผ่นที่จุดยึดที่นึ่งเข้ากับพื้นจะทำให้ค่าความเค้นวอนมิตเซสที่เหล็กแผ่นลดลง แต่บริเวณเหล็กแผ่นด้านบนของจุดยึดที่นึ่งเข้ากับพื้นยังมีความเค้นวอนมิตเซสสูงที่บริเวณด้านล่างเนื่องจากโมเมนต์ดัด จึงเพิ่มส่วนเสริมแรงให้เต็มเหล็กแผ่นบนซึ่งส่งผลให้ค่าความเค้นวอนมิตเซสลดลง และที่จุดยึดที่นึ่งเข้ากับผนัง เมื่อเพิ่มความหนาและเพิ่มระยะระหว่างของรูสลักจะสามารถลดค่าความเค้นได้ แต่ไม่สามารถเปลี่ยนจุดยึดที่นึ่งเข้ากับผนังให้เป็นแบบ 2 ชั้นได้ เนื่องจากจะเกิดค่าความเค้นวอนมิตเซสที่สูงจนเกินไป เพราะถึงแม้จากการออกแบบการทดลอง ปัจจัยนี้จะไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองที่บริเวณจุดยึดที่นึ่งเข้ากับผนัง แต่ก็มีค่าอิทธิพลสูงเป็นลำดับที่ 3 จากปัจจัยทั้ง 7 และจากตารางที่ 4.5 จะพบว่าค่าความเค้นวอนมิตเซสที่สลักหลังจากปรับปรุงจะเห็นได้ว่ามีค่าความเค้นวอนมิตเซสลดลงไม่มากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการออกแบบการทดลองที่การเพิ่มขึ้นในบางปัจจัยจะทำให้สลักมีค่าความเค้นวอนมิตเซสที่เพิ่มมากขึ้น และเมื่อเพิ่มขนาดของสลักขึ้นจึงทำให้ค่าความเค้นวอนมิตเซสที่สลักนั้นลดลงไม่มากนัก และจุดยึดที่นึ่งทั้ง 3 ชั้นส่วน มีค่าความเค้นต่ำกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุและจากค่าความเครียดจะพบว่าจุดยึดทั้งสามชั้นส่วนนั้นยังไม่เกิดการฉีกขาด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าหลังจากการปรับปรุงจุดยึดที่นึ่งด้วยการออกแบบการทดลองทำให้จุดยึดที่นึ่งมีความความแข็งแรงผ่านมาตรฐานการทดสอบ

ตารางที่ 4.5 ค่าความเค้นสูงสุดของจุดยึดที่นึ่งระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง

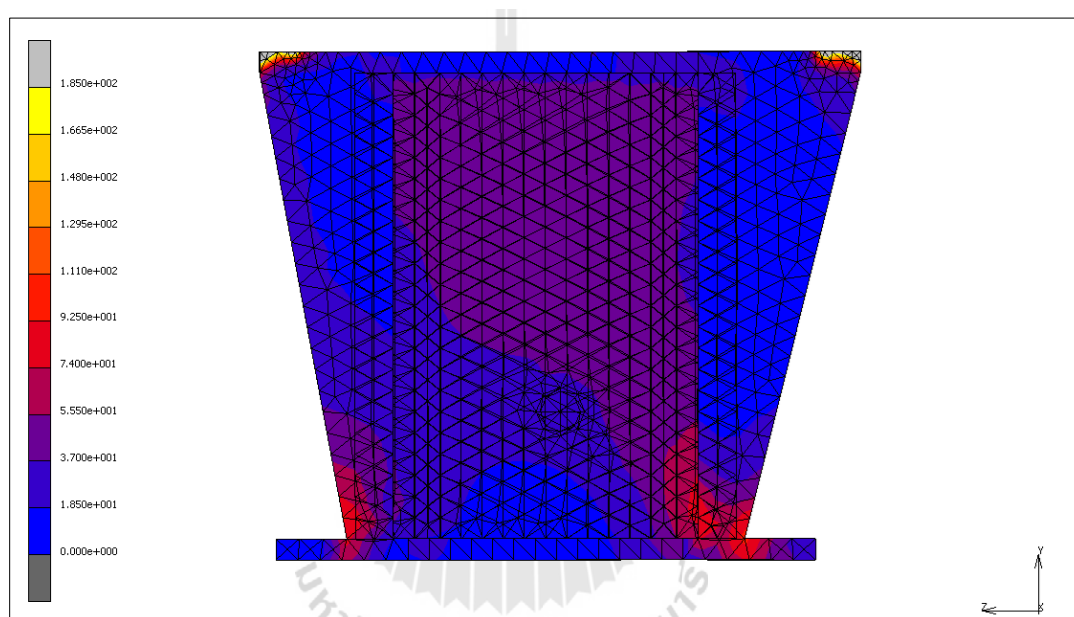
จุดยึดที่นึ่ง	ค่าความเค้นวอนมิตเซส สูงสุด		ค่าความปลอดภัย		ค่าความเครียด	
	ก่อน ปรับปรุง	หลัง ปรับปรุง	ก่อน ปรับปรุง	หลัง ปรับปรุง	ก่อน ปรับปรุง	หลัง ปรับปรุง
จุดยึดที่นึ่งเข้า กับพื้น	375.3	173.03	0.99	2.14	0.00489	0.00426
จุดยึดที่นึ่งเข้า กับผนัง	357.3	241.21	1.04	1.53	0.00201	0.00079
สลัก	374.7	357.25	1.69	1.78	0.00669	0.00908



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบแถบสีค่าความเค้นของจุดยึดที่นั้งก่อนและหลังการปรับปรุง

4.4.3 การลดน้ำหนักของแบบจำลองที่นิ่งที่ปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง

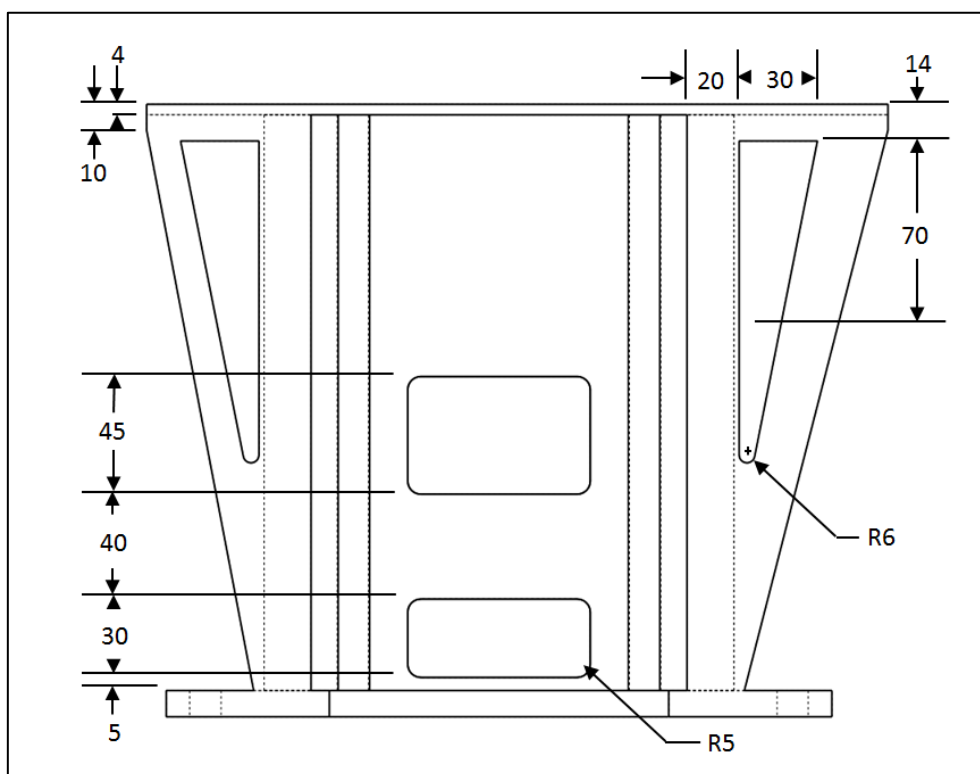
ผลการปรับปรุงที่นิ่งจากการออกแบบการทดลอง ได้มีการเพิ่มขนาดและเสริมความแข็งแรงให้กับจุดยึดที่นิ่ง เพื่อส่งผลให้ค่าความเค้นวอนมิสเชสที่จุดยึดที่นิ่งนั้นมีค่าลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามการปรับปรุงทำให้ที่นิ่งมีน้ำหนักเพิ่มมากขึ้นและเมื่อพิจารณาจากชั้นแถบสีความเค้นของจุดยึดที่นิ่งเข้ากับพื้นจากการปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง พบว่ามีบริเวณที่เกิดค่าความเค้นต่ำโดยแสดงในชั้นแถบสีเป็นสีน้ำเงินและสีม่วงดังซึ่งมีค่าความเค้นวอนมิสเชสประมาณ 18.5-55.0 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ชั้นแถบสีค่าความเค้นของจุดยึดที่นิ่งเข้ากับพื้นจากการปรับปรุงด้วยวิธีออกแบบการทดลอง

เพราะเหตุนี้จึงได้นำแบบจำลองที่ปรับปรุงจากการออกแบบการทดลองมาลดน้ำหนักด้วยการเจาะช่องในบริเวณที่มีค่าความเค้นวอนมิสเชสน้อย โดยจะต้องไม่ส่งผลต่อค่าความเค้นวอนมิสเชสที่บริเวณอื่น จึงลดขนาดในส่วนของเหล็กแผ่นด้านบนของจุดยึดที่นิ่งเข้ากับพื้น ซึ่งในการปรับปรุงครั้งแรกได้เปลี่ยนมาใช้เหล็กแผ่นจาก 4 มิลลิเมตร เพิ่มมาเป็น 10 มิลลิเมตร และจากผลค่าความเค้นวอนมิสเชสที่บริเวณนั้น จะเห็นได้บริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดคือบริเวณที่ได้รับโมเมนต์ดัด เพราะฉะนั้นจึงเพิ่มความหนาของเหล็กแผ่นจาก 4 มิลลิเมตรเพิ่มเป็น 10 มิลลิเมตรบริเวณที่รับโมเมนต์ดัดเท่านั้น และส่วนที่เสริมแรงจะมีตำแหน่งที่เกิดความเค้นต่ำ จึงได้

เจาะรูในบริเวณนั้นรวมไปถึงเจาะที่ตำแหน่งอื่นๆตามความเหมาะสม ซึ่งแสดงขนาดและตำแหน่งในการเจาะรูได้แสดงดังในรูปที่ 4.13 โดยไม่มีการลดน้ำหนักในส่วนของจุดยึดที่นั้งเข้ากับผนัง เนื่องจากค่าความเค้นวอนมิสเซลที่ตำแหน่งดังกล่าวมีค่าสูงถ้ามีการเจาะลดน้ำหนักในส่วนนี้

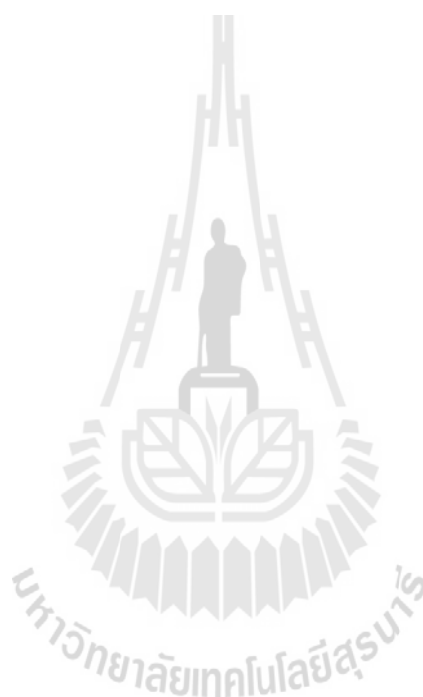


รูปที่ 4.13 ขนาดและตำแหน่งในการเจาะจุดยึดที่นั้งกับพื้นรถเพื่อลดน้ำหนักโครงสร้าง

จากการปรับปรุงแบบจำลองด้วยการออกแบบการทดลอง ทำให้น้ำหนักของจุดยึดที่นั้งเพิ่มขึ้นมาจากเดิม 4.49 กิโลกรัม เมื่อลดน้ำหนักของแบบจำลองที่ปรับปรุง ทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นมาจากเดิม 3.07 กิโลกรัม และการลดน้ำหนักของแบบจำลองทำให้ความเค้นที่จุดยึดที่นั้งมีการเปลี่ยนแปลงแต่ไม่ทำให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าเกินค่าความเค้นครากของวัสดุ ดังแสดงตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 เปอร์เซ็นค่าความเค้นวอนมิสเชสที่เปลี่ยนไปหลังลดน้ำหนักจากการปรับปรุงจุดยึด

จุดยึดที่นั้ง	ค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุด		ความเค้นวอนมิสเชสที่เปลี่ยนไป (เปอร์เซ็นต์)
	ก่อนลด น้ำหนัก	หลังลด น้ำหนัก	
จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้น	173.03	179.68	3.84%
จุดยึดที่นั้งเข้ากับผนัง	241.21	255.72	6.01%
สลัก	357.25	409.91	14.74%



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความแข็งแรงที่จุดยึดที่นั้งที่สามารถรับแรงกระทำตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั้งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่และเพื่อออกแบบวิธีการยึดที่นั้งที่สามารถรับแรงกระทำดังกล่าวได้ตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั้งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ จากการวิจัย พบว่า

5.1.1 ผลการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั้งของแบบจำลองต้นแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ การเคลื่อนตัวในแนวนานกับพื้นของอุปกรณ์ทดสอบผ่านมาตรฐานการทดสอบแต่ค่าความเค้นของจุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้นมีค่าเกินค่าความเค้นครากของวัสดุไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ

5.1.2 ผลจากการปรับปรุงจุดยึดที่นั้งด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง Design of experimental ด้วยวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับโดยใช้ 7 ปัจจัย พบว่า

- ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเค้นที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับพื้น ได้แก่ (1) ความหนาของเหล็กแผ่นด้านล่าง (2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (3) ความหนาของเหล็กแผ่นด้านบน และ (4) การเพิ่มส่วนรองรับ

- ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเค้นที่จุดยึดที่นั้งเข้ากับผนัง ได้แก่ (1) ความหนาของเหล็กฉาก และ (2) ระยะห่างของรูเจาะ

- ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเค้นที่สลักยึดที่นั้งเข้ากับรถ ได้แก่ (1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (2) การเพิ่มส่วนรองรับ (3) ความหนาของเหล็กแผ่นด้านบน (4) ความหนาของเหล็กแผ่นด้านล่าง และ (5) ความหนาของเหล็กฉาก

5.1.3 การปรับปรุงจุดยึดที่นั้งจากปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญส่งผลให้ได้แบบจำลองของจุดยึดที่นั้งที่ผ่านเกณฑ์การทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบจุดยึดที่นั้งของรถโดยสารขนาดใหญ่โดยมีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 3.07 กิโลกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางฟิสิกส์อิเล็กเมนต์ควรมีการวิเคราะห์ที่เน้นในส่วนของเบาะและวัสดุหุ้มเพิ่มเข้าไปด้วย ให้มีเงื่อนไขให้เหมือนกับที่นั่งของรถโดยสารจริงเพื่อให้ได้ผลที่มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

5.2.2 ควรเลือกใช้ประเภท element ที่มีคุณภาพที่สูงขึ้นเพื่อความถูกต้องแม่นยำของผลคำตอบที่มากขึ้น

5.2.3 ควรมีการศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อม เพื่อให้เงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนเหมือนกับการสัมผัสจริงและเพื่อสามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่จะเกิดกับรอยเชื่อม

5.2.4 ควรมีการทดสอบความแข็งแรงของจุดยึดที่นั่งของรถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยเครื่องทดสอบจริงที่อ้างอิงวิธีการทดสอบและการให้แรงกระทำตามมาตรฐานการทดสอบเพื่อเป็นเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลจากวิเคราะห์โปรแกรมวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางฟิสิกส์อิเล็กเมนต์



รายการอ้างอิง

- มนตรี พิรุณเกษตร (2548). **กลศาสตร์ของวัสดุ**. วิทย์พัฒน์. กรุงเทพฯ. 632 หน้า
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2555). **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 613 หน้า
- สุรเชษฐ์ ชูติมา ทศนพ กำเนิดทอง และ มนตรี ช่างประดิษฐ์ (2547). **การวิเคราะห์โครงสร้างเบาะรถยนต์สำหรับการแข่งขัน**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18 จังหวัดขอนแก่น. 18-20 ตุลาคม 2547
- Annual book of ASTM standard, (2004). **Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials**. ASTM E8, Vol.03.01. pp.62-85
- Annual book of ASTM standard, (2004). **Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature**. ASTM E132, Vol.03.01. pp.293-295
- Annual book of ASTM standard, (2004). **Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi Minimum Tensile Strength**. ASTM A325, Vol.01.08. pp.67-74
- Caputo, F., Lamanna, G., and Soprano, A. (2012). On the evaluation of the overload coming from the use of seat-belt on a passenger railway seat. **International Journal of Mechanics and Material in Design**. Vol.8, No.4. pp.335-348
- Heo, U., Kim, S.K., Song, M.J., Yang, I.Y., and Im, K.H. (2011). Effectiveness evaluation for seat part by seat belt anchorage strength analysis. **International Journal of Precision Engineer and Manufacturing**. Vol.12, No.6. pp.1031-1034
- Hu, Y., Burgess, I., Devison, B., and Plank, R. (2010). Multi-Scale Modelling of Flexible End Plate Connections under Fire Conditions. **The Open Construction and Building Technology Journal**. Vol.4. pp.88-104
- Kang, S.J., and Chun, B.K. (2000). An effective approach to prediction of the collapse mode in automotive seat structure. **Thin-Walled Structure**. Vol.37. pp.113-125

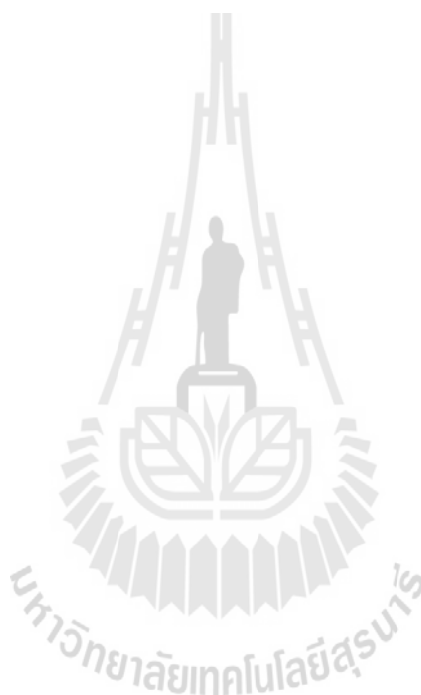
Mayrhofer, E., Steffan, H., and Hoschopf, H. (2005). Enhanced coach and bus occupant safety.

The 19th ESV Conference Proceedings. Paper number 05-0351

Sandor, V.P., and Zolthn, T., (2005) Simulations of Bus-Seat Impact Tests according to ECE

Regurations. **The 19th ESV Conference Proceedings.** Paper number 98-S4-P-19

United Nations Economic Commission for Europe, (2011). **Regulation No. 80.** Transport Division, Revision 1



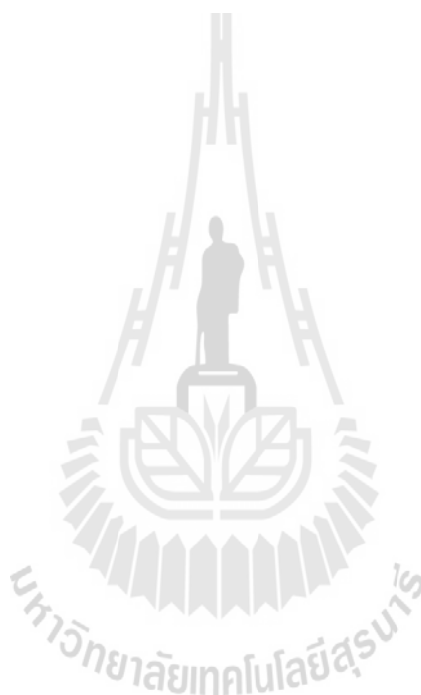
ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา



รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Siwadamrongpong, S., Rooppakhun, S., Murachai, N., and Burakorn, P., (2013). **Strength Analysis of the Seat Anchorages for Large Passenger Vehicles Using Finite Element Method.** International Conference on Materials and Manufacturing Research (IMMRC 2012). 19-20 December 2012. Hong Kong. pp.330-334



Advanced Materials Research Vol. 658 (2013) pp 340-344
 Online available since 2013/Jan/25 at www.scientific.net
 © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.658.340

Strength Analysis of the Seat Anchorages for Large Passenger Vehicles Using Finite Element Method

Somsak Siwadamrongpong^{1,a}, Supakit Rooppakhun^{2,b}, Natchaya Murachai^{2,c}
 and Pakorn Burakorn^{2,d}

¹ School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

² School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

^a somsaksi@sut.ac.th, ^b supakit@g.sut.ac.th, ^c jana4_4@hotmail.com, ^d raykad_korn@hotmail.com

Keywords: ECE Regulation, Finite element, Seat anchorages, Bus

Abstract. Since the vehicle accident is one of the major causes of dead and injury in Thailand, especially the large passenger vehicle. The seat anchorage was often damaged and lead to high number and critical of patient. To improve the safety of large passenger vehicle, seat anchorage should be investigated. The aim of this research was to analyze strength of seat anchorages for the bus according to European standard ECE Regulation 80 using finite element method and DOE (Design of Experimental) approach. In this study, the boundary conditions on finite element model of seat structure were defined according to the regulation. It is expected that the simulation techniques could be advantaged for seat anchorage analysis. This result will be used for further improvement of the bus seat anchorage design for safety and cost reduction in design processes.

Introduction

In the present, large numbers of people in Thailand uses the large passenger vehicles for land transportation due to its convenient and save. However, the safety issue is also important to consider. It is known that the safety regulation on large passenger vehicle is under consideration and still currently insufficient.

Department of Land Transport has proposed new safety regulations for the large passenger vehicle to ensure more safety for people when traveling with land transportation such as bus. The UN ECE Regulations were brought to consider as existing reliable regulation in the world. The regulations are consisted of several kind of determination such as front impact, rolling test and seat safety. The safety regulation of bus seat can be defined into 3 categories, belt pivot strength, seat structure strength and seat anchorage strength. Refer to Thailand Accident Research Center (TARC) [1] information, when the large passenger vehicle was impacted, some of passenger was injured due to damage of the seat anchorage. Beside the test that followed through the regulation, simulation method [2] also can be applied as alternative test method in compliance with dynamic test. Regarding to the safety regulation of seat anchorage that might be issued in the next few years, it may be defined according to ECE Regulation 80. Therefore, it should be the most advantage for bus industrial in Thailand if simulation techniques can provide reliable model of bus seat anchorage before testing the real prototype. There are cost saving and shorter time of design processes which is expected profit of this study.

The objective of this paper was to analyze the strength of seat anchorages for the large passenger vehicle according to European standard ECE Regulation 80 using finite element method. It is expected that this study could provide the improved model of seat anchorages which conform to the regulation.

Methods and Materials

ECE Regulation 80. The purpose of ECE Regulation 80 is specific vehicle for carrying more than sixteen passengers. The applied load is static load which is to test the seat anchorages to ensure that the superstructure of the seat anchorages has sufficient strength and harmlessness after a test on the complete vehicle. The test criteria were decided by no any parts damage or could make injury to the passengers. Moreover, the point of tested equipment at the height H_1 must move between 100 - 400 mm and at the height H_2 must move between 50 - 400 mm. The test configuration regarding to the regulation is to apply force at the height H_1 which shall be between 0.70 m and 0.80 m and at the height H_2 which shall be between 0.45 and 0.55 m as shown in Fig. 1. Then, the applied forces, F_1 and F_2 , can be calculated follow to Eq. 1 and Eq. 2 respectively.

$$F_1 = \frac{1,000}{H_1} \pm 50 \text{ N} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{2,000}{H_2} \pm 100 \text{ N} \quad (2)$$

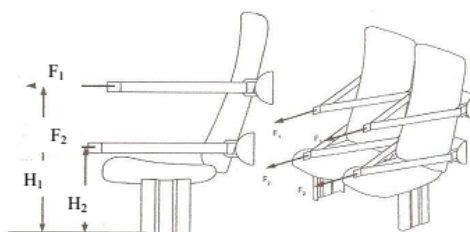


Fig. 1 Configuration of seat anchorages test according to ECE R80

Finite element method. In this study the seat structure model was created using Solid Works 2011. The seat structure and dimension was simplified from the real vehicle seat which was obsolete model of Cherdchai Industrial Co. Ltd. The model consists of seat-back, base, leg, the side anchorages and the ground anchorage. The tested seat model, equipment and floor were shown in Fig. 2. The components of seat structural were simulated as solid element and surface element as shown in Table 1. The simulation was carried out by using ANSYS Workbench software.

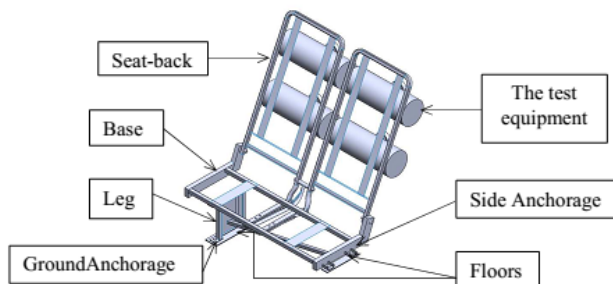


Fig. 2 Geometric modeling of the seat

Table 1 Components of the seat

No.	Parts	Element type	Thickness[mm]
1	Seat-back	Shell	2
2	Base	Shell	2
3	leg	Shell	2
3	Side/Ground Anchorages	Solid	4
4	The test equipments	Solid	150
5	Floors	Solid	5

Materials. The structural materials are consisted of rectangular steel tubes and sheet metal. The seat anchorages are located on the floor (the lowest part of base), that is assumed as an isotropic and linear elastic material properties. The material properties was referred to ASTM standard E8 [4] , standard for the tensile test under uniaxial tensile stresses. The material properties was shown in Table 2.

Table 2 Material properties

Thickness	Material properties		
	Tensile Strength [MPa]	Yield Strength [MPa]	Young's modulus [GPa]
rectangular tubes	564	470	195
sheet metal	494	390	133

Design of Experiment. In this study, the DOE approach was purposing on Minitab software. The maximum von Mises stress was occurred on the side anchorages. The method was using 2^k Factorial Design by determined 2 factors that were the thickness (t) and the distance (d) of the side anchorage as shown in Fig.3. The distance and thickness were varied between 100 to 160 mm and 2 to 4 mm, respectively.

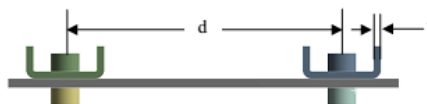


Fig. 3 The factors of DOE approach

Contacts condition In this study, the contact conditions was referred to an actual mechanics of structures as shown in Table 3.

Table 3 Contacts condition of model

Part contact	Behaviour
Seat-back - The test equipment	Slide but not allow separation
Seat-back - Base	Slide but not allow separation
Leg - Floors	Slide but not allow separation
Base - Leg	Perfect welding
Bolt - Nut	Perfect welding
Bolt - Another part	Rotation on the revolute axis

Boundary condition. The boundary condition at the floors were set as fully fixed. The height H_1 and H_2 were 0.8 m and 0.55 m, respectively. Therefore, the apply force F_1 and F_2 that was applied to the test equipments were calculated being 1,250 N and 3,640 N, respectively.

Results and Discussion

In this study, strength of the seat anchorages was carried out by using finite element analysis to describe the von Mises stress and deformation. Then the effects of the different geometric on the side seat anchorage was investigated in case thickness and distance using DOE (Design of Experiment) approach.

The seat anchorages strength. On the conventional model, the maximum von Mises stress of the side anchorage was 1,005.3 MPa which occurred on below corner of the anchorages (no.1) as shown in Fig.5 that was over the yield stress of material. So this geometry was improved to decrease the maximum stress. In this study, the 2 factors were used to compare 4 cases of the von Mises stress as shown in table 4. According to the result, the thickness and the distance were influencing to the stress on the side anchorage. The thickness was more significant effect than the distance by confidence level 95% as shown in Fig.6. Based on the results, thickness and distance should be increased for the reduction of von Mises stress.

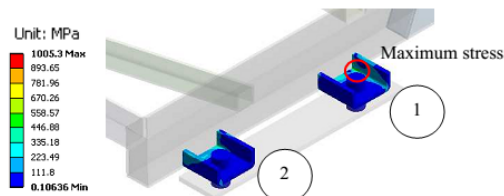


Fig. 5 Stress distribution of the side anchorages

Table 4 The comparison of the factors have an effect on the von Mises stress

case	Factors		Von Mises Stress [MPa]
	Thickness [mm]	Distance [mm]	
1	4	160	642.09
2	4	100	946.71
3	2	160	1,037.40
4	2	100	1,368.40

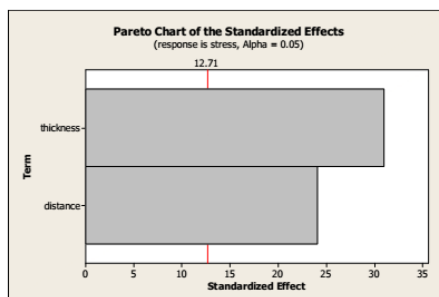


Fig.6 Chart to the standardized effect between thickness and effect

Deformation. The deformation of the seat-back was shown in Fig.7. According to the result of the DOE approach, the thickness and the distance of the side anchorage had not an influence in deformation of seat-back. The averagemaximum deformation of seat-back at H_1 and H_2 in Z direction was 284.05 and 104.63 mm. Agreeable to the result, the seat structure was accept in term of allowable deformation.

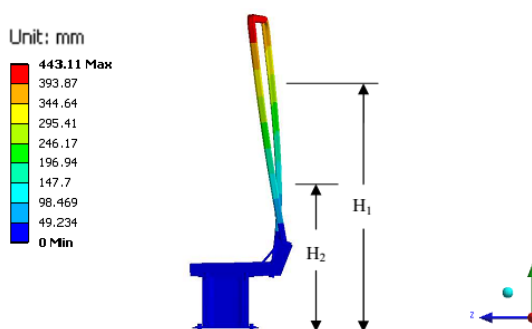


Fig. 7 Deformation of seat-back

Summary

The maximum von Mises occurred on the side anchorages was over the yield stress of material. It could be concluded that the seat structure was not safe enough for the passenger. However, please note that the other energy absorb material such as sponge, textile and leather are negligible in this study. The DOE approach was illustrated that the appropriated model should be optimized by changing of thickness and distance. In further study, the simulation results will be verified with experimental result. There are expected to achieve the appropriate design seat anchorages.

Acknowledgement

The authors actually appreciate and thank to Cherdchai Industrial Co. Ltd for information, and also thank you to Suranaree University of Technology for facility support.

References

- [1] Information on <http://www.tarc.ait.ac.th>
- [2] Zolthn, T., Sandor V.: *Simulations of Bus-Seat Impact Tests according to ECE Regulations* (The 19th ESV Conference Proceedings, United States of America 2005).
- [3] Information on <http://www.unece.org>
- [4] Information on <http://enterprise.astm.org>

Materials and Manufacturing Research

10.4028/www.scientific.net/AMR.658

Strength Analysis of the Seat Anchorages for Large Passenger Vehicles Using Finite Element Method

10.4028/www.scientific.net/AMR.658.340

ประวัติผู้เขียน

นางสาวณัฐชา มุราชัย เกิดเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2531 ที่จังหวัดร้อยเอ็ด เริ่มการศึกษา ระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลร้อยเอ็ด จังหวัดร้อยเอ็ด ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายที่โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม และสำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปีการศึกษา 2552 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ณ สถาบันการศึกษาเดิม เมื่อปีการศึกษา 2553 โดยได้รับทุนการศึกษา “ทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก” ขณะที่ยังศึกษาต่อในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและวิศวกรรมการผลิต จำนวน 10 รายวิชา ดังนี้

- ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, 3
- ปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 2, 3
- ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 1, 3
- ปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 1, 2, 3
- การเขียนแบบวิศวกรรม 1

และมีผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ 1 บทความ มีรายละเอียดดังปรากฏในภาคผนวก ก.