

การวิเคราะห์ความแข็งแรงและปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งสำหรับ
รถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**STRENGTH ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF
THE SEAT STRUCTURE FOR LARGE
PASSENGER VEHICLES USING
FINITE ELEMENT METHOD**

Pakorn Burakorn



**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

การวิเคราะห์ความแข็งแรงและปรับปรุงโครงสร้างที่นั้งสำหรับ
รถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ

(อ. ดร.สมศักดิ์ ศิวคำรังพงศ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ปกรณ บวรนคร : การวิเคราะห์ความแข็งแรงและปรับปรุง โครงสร้างที่นั่งสำหรับ
รถโดยสารขนาดใหญ่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ (STRENGTH ANALYSIS
AND IMPROVEMENT OF THE SEAT STRUCTURE FOR LARGE PASSENGER
VEHICLES USING FINITE ELEMENT METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา :
อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ สีวงศ์, 87 หน้า.

การเดินทางโดยใช้ระบบขนส่งมวลชนเป็นที่นิยมในการคมนาคมอย่างมาก เนื่องจากให้
ความสะดวกและประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินทาง แต่อย่างไรก็ตามรถโดยสารมีความเสี่ยงที่จะเกิด
อุบัติเหตุและความสูญเสียได้สูงเช่นกัน ระบบความปลอดภัยจึงมีความจำเป็นเพื่อป้องกัน
การบาดเจ็บและสูญเสียชีวิตของผู้โดยสาร ดังนั้นความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งโดยสารจึงมี
ความสำคัญในการช่วยป้องกันการบาดเจ็บของผู้โดยสาร กรมการขนส่งทางบกจึงได้กำหนด
มาตรฐานการทดสอบ การทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งโดยสารโดยอ้างอิงตามมาตรฐานยุโรป
ECE Regulation No.17 ในกระบวนการออกแบบในปัจจุบันได้ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยใน
การออกแบบและการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ มีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดต้นทุน งานวิจัยนี้จึง
มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ตามมาตรฐานการทดสอบโดยประยุกต์ใช้
ระเบียบวิธีทางไฟไนท์อิลลิเมนต์ โดยวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างที่นั่ง เพื่อออกแบบและ
ปรับปรุงโครงสร้างที่นั่ง

จากผลการศึกษาวิเคราะห์พบว่าโครงสร้างที่นั่งเกิดความเสียหายที่บริเวณเปลี่ยนหน้าตัด
ของพนักพิงและ โครงสร้างเหล็กกล่องของฐานที่นั่ง จึงได้ปรับปรุงโดยออกแบบการทดลอง ได้ผล
เป็นปัจจัยที่มีผลทำให้ค่าความเค้นของพนักพิงลดลงคือ ขนาดของเหล็กกล่องที่โครงสร้างพนักพิง
หลัก ระยะการเปลี่ยนหน้าตัดของเหล็กกล่องพนักพิง และความหนาของเหล็กกล่องตามลำดับ และ
การปรับปรุงขนาด ความหนาของเหล็กกล่องที่โครงสร้างฐานที่นั่ง และการลบมุมของส่วนเสริม
ของฐานที่นั่งส่งผลต่อความเค้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าความเค้นของฐานที่นั่งตามลำดับ จึง
ได้นำตัวแปรต่าง ๆ มาใช้ในการปรับปรุงและเพิ่มขนาดของส่วนเสริมของฐานที่นั่ง เพื่อให้ได้
โครงสร้างที่นั่งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบของกรมการขนส่งทางบก และได้ต้นแบบของ
โครงสร้างที่นั่งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้คาดหวังว่าจะสามารถ
ลดค่าใช้จ่าย และเวลาในการออกแบบโครงสร้างที่นั่งรถโดยสารได้เป็นอย่างดี

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

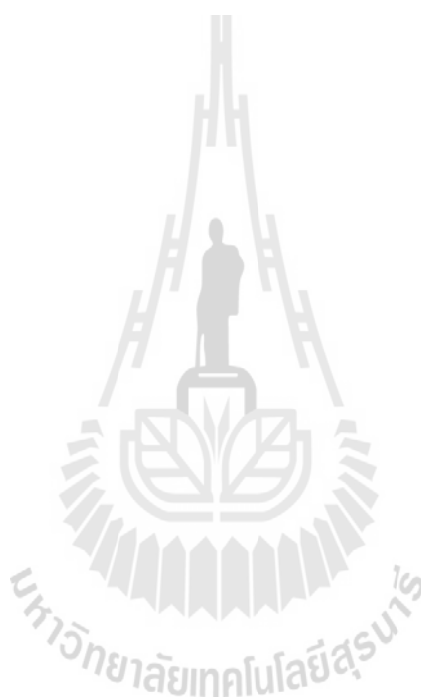
PAKORN BURAKORN : STRENGTH ANALYSIS AND IMPROVEMENT
OF THE SEAT STRUCTURE FOR LARGE PASSENGER VEHICLES
USING FINITE ELEMENT METHOD. THESIS ADVISOR :
SOMSAK SIWADAMRONGPONG, D.Eng., 87 PP.

ECE REGULATION NO.17/ FINITE ELEMENT/ STRENG ANALYSIS/
SEAT STRUCTURE/ BUS

Traveling with public buses is convenient and economical. However, large passenger vehicles are known to have high risk of an injury due to accident and insufficient of safety regulation. The strength of seat structure is one of important issues that affect to injury level of passenger. Therefore, suitable structure strength and design of the seat are very important to prevent injuries and passenger life. The seat strength must be tested following the preliminary regulation from Department of Land Transport according to strength of the seat structure test for large passenger vehicles referenced ECE Regulation No.17. On the design processes, design and experiment of seat structure were a waste of cost and time. There are more cost and time saving to apply Computer Aided Engineering technology to the design processes. This study was to evaluate strength of the seat structure for bus according to preliminary safety regulation of Department of Land Transport.

The finite element results shows that the seat structure was damaged at change the cross section of seat back and rectangular tubes of base seat. The seat was not satisfied according to the regulation. Design of Experiment was employed to analyze the factors of improvement. For the seat back, stress was influenced by the following factors; size of tube, distance for change the cross section of tube and thickness of

tube. On the other hand, stress of base seat was significantly affected by size of tube, thickness of tube and fillet for patch of base seat. The notified factors were improved to the new model that conformed to the regulation. This research is expected to provide the appropriated seat model and guideline to design the bus seat.



School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูง และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ ศิวดำรงพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำในการดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ ความสำเร็จในครั้งนี้ถือเป็นพระคุณอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และคุณเสฏฐวรราช สุจริตภักดีสกุล วิศวกรกลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและการออกแบบ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความรู้และแนะนำ ให้คำปรึกษาในการประยุกต์ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการดำเนินงานวิจัยตลอดจนแล้วเสร็จ

ขอขอบคุณ บริษัท อู๋เซ็คซ์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในเรื่องของข้อมูลของที่นั่งและวัสดุที่ใช้ทำเป็นโครงสร้างที่นั่ง ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการดำเนินงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบุคลากรของศูนย์เครื่องมือที่ให้ความรู้และช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการดำเนินงานวิจัย

สุดท้ายนี้คุณงามความดีอันพึงมีจากผลที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอขอบแต่คุณแม่จำลอง บุราคร ที่อบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมตลอดมา อันเป็นที่เคารพยิ่ง ที่ให้โอกาสในการศึกษาในระดับมหาวิทยาลัย และคณาจารย์ผู้ประสพวิชาความรู้ ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่ให้ความสนใจช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ปกรณ์ บุราคร

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ที่นั่งรถโดยสาร.....	5
2.2 มาตรฐานการทดสอบตาม ECE Regulation No.17.....	6
2.1.1 วิธีการทดสอบและเกณฑ์การตัดสิน.....	7
2.1.2 เกณฑ์ตัดสินที่ถือว่าที่นั่งผ่านการทดสอบ.....	7
2.3 ระเบียบวิธีไฟไนท์ดอลิเมนต์.....	8
2.3.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์.....	9
2.3.2 อิลลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	10
2.3.3 สมการเชิงอนุพันธ์.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด	14
2.3.5	สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์	16
2.4	ทฤษฎีความเสียหาย.....	19
2.4.1	ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด	20
2.4.2	ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุด.....	22
2.4.3	บทสรุปความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว.....	26
2.5	การออกแบบการทดลอง	27
2.6	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	30
3.1	การสร้างแบบจำลอง	31
3.2	การพิจารณาแบ่งอิลลิเมนต์	32
3.3	การทดสอบสมบัติวัสดุ	34
3.3.1	การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง.....	34
3.3.2	การทดสอบแรงดึง	36
3.3.3	ผลการทดสอบค่าสมบัติวัสดุ.....	37
3.3.4	การกำหนดสมบัติวัสดุให้กับแบบจำลอง	39
3.4	การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง	40
3.4.1	เงื่อนไขการสัมผัส	41
3.4.2	เงื่อนไขการจับยึด	44
3.4.3	เงื่อนไขการให้ภาระกรรม	45
3.5	การทดสอบโปรแกรม	45
3.5.1	การทดสอบอย่างง่าย	46
3.5.2	การวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่าย	47
3.5.3	การทดสอบชนิดอิลลิเมนต์	49
4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	52
4.1	ผลการตรวจสอบโปรแกรม	52
4.1.1	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบอย่างง่าย.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2	การเปรียบเทียบผลการทดสอบอย่างง่าย	54
4.2	ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ โครงสร้างที่นั้ง	57
4.2.1	ผลค่าความเค้นของ โครงสร้างที่นั้ง	57
4.2.2	ผลค่าความเครียดของ โครงสร้างที่นั้ง.....	61
4.2.3	ผลการเสียรูปของ โครงสร้างที่นั้ง.....	62
4.3	การปรับปรุงแบบจำลอง โครงสร้างที่นั้ง	63
4.3.1	ปัจจัยที่ทำการปรับปรุง	63
4.3.2	การวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง	64
4.3.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้น	65
4.4	แบบจำลองที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ.....	67
4.4.1	การปรับปรุง โครงสร้างที่นั้งที่ผ่านการทดสอบ.....	67
4.4.2	การลดน้ำหนัก โครงสร้างที่นั้ง	69
4.4.3	ต้นแบบของ โครงสร้างที่นั้ง	73
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1	สรุปผลการวิจัย	75
5.2	ข้อเสนอแนะ	76
	รายการอ้างอิง	77
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	79
	ประวัติผู้เขียน	87

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ขนาดของชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงดึง.....	35
3.2	สมบัติวัสดุที่กำหนดให้กับแบบจำลอง.....	40
3.3	การสัมผัสของชิ้นส่วน โครงสร้างที่นิ่ง.....	43
3.4	การสัมผัสของชิ้นส่วนการทดสอบอย่างง่าย.....	48
4.1	ค่าปัจจัยที่ทำการปรับปรุง.....	65
4.2	การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่มีผลต่อค่าความเค้นวอนมิสเซส ที่พนักพิงหลัง.....	66
4.3	การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่มีผลต่อค่าความเค้นวอนมิสเซส ที่ฐานที่นิ่ง.....	66
4.4	ค่าปัจจัยปรับปรุงที่เปลี่ยนไปจากค่าเริ่มต้น.....	74

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ลักษณะและส่วนประกอบของโครงสร้างที่นั้งรถโดยสาร	6
2.2	แสดงการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งและระบบปรับตำแหน่งสำหรับที่นั่ง	7
2.3	อิลลิเมนต์ทรงสี่หน้าใน 3 มิติ	11
2.4	ความสมดุลตามตำแหน่งใด ๆ ในของแข็ง 3 มิติ	13
2.5	ความเสียนของวัสดุตามทฤษฎีของเทรסקา.....	21
2.6	สถานะของความเครียด	22
2.7	ความเสียนของวัสดุตามทฤษฎีของวอนมิสเซส	25
2.8	การเปรียบเทียบทฤษฎีความเสียหายกับการทดลอง	26
3.1	ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม	30
3.2	โครงสร้างแบบจำลองที่นั้ง.....	31
3.3	ส่วนประกอบของโครงสร้างที่นั้ง	32
3.4	การหาขนาดอิลลิเมนต์ที่เหมาะสม	33
3.5	แบบจำลองโครงสร้างที่นั้งที่ทำการแบ่งอิลลิเมนต์	34
3.6	ขนาดของชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงดึง.....	35
3.7	การติดเกจวัดความเครียด	36
3.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กกล่อง	37
3.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กแผ่นบาง	37
3.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับแรงของเหล็กกล่อง.....	38
3.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับแรงของเหล็กแผ่นบาง	38
3.12	กราฟสมบัติวัสดุที่กำหนดให้กับแบบจำลอง.....	40
3.13	การสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนพนักพิง.....	41
3.14	การสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนฐานที่นั่ง	42
3.15	การสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนระบบล้อคปรับเอน	42
3.16	การสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนจุดยึด	42
3.17	การสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของสลักเกลียวและเป็นเกลียว	44

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18	การกำหนดเงื่อนไขการจับยึดและการให้ภาระกรรม 45
3.19	ชิ้นงานทดสอบอย่างง่าย 46
3.20	การทดสอบอย่างง่าย 47
3.21	แบบจำลองและเงื่อนไขของแบบจำลองอย่าง 49
3.22	กราฟแสดงผลการจำลองเปรียบเทียบชนิดของอีลลิเมนต์ 50
3.23	ระยะยวบตัวของชิ้นงานทดสอบในช่วงยึดหย่อน 51
4.1	ความเค้นวอนมิตเซสของชิ้นทดสอบ 53
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะยวบตัวที่ปลายของชิ้นทดสอบ 54
4.3	เปรียบเทียบจุดที่เกิดความเสียหายของชิ้นทดสอบ 55
4.4	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะยวบตัวที่ปลาย ของชิ้นทดสอบ 55
4.5	เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเครียด 56
4.6	ค่าความเค้นวอนมิตเซสของโครงสร้างที่นิ่ง 57
4.7	บริเวณที่เกิดความเสียหายของ โครงสร้างพนักพิงหลัง 58
4.8	ความเค้นที่เกิดกับพนักพิงหลังบริเวณที่เกิดความเสียหาย 59
4.9	บริเวณที่เกิดความเสียหายของ โครงสร้างฐานที่นิ่ง 60
4.10	ค่าความเครียดของ โครงสร้างที่นิ่ง 61
4.11	การเสียรูปของ โครงสร้างที่นิ่ง 62
4.12	ปัจจัยที่ทำการปรับปรุงพนักพิงหลัง 63
4.13	ปัจจัยที่ทำการปรับปรุงฐานที่นิ่ง 64
4.14	ค่าความเค้นวอนมิตเซสของการปรับเพิ่มค่าปัจจัย 68
4.15	การพิจารณาเพิ่มส่วนเสริมของฐานที่นิ่ง 68
4.16	ค่าความเค้นวอนมิตเซสของแบบจำลองที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ 69
4.17	พิจารณาลดน้ำหนักแบบจำลองโครงสร้างที่นิ่ง 70
4.18	ค่าความเค้นวอนมิตเซสสูงสุดของแบบจำลองต้นแบบโครงสร้างที่นิ่ง 71
4.19	ความเครียดของต้นแบบ โครงสร้างที่นิ่ง 72
4.20	ต้นแบบโครงสร้างที่นิ่ง 73

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

σ	=	ความเค้นในแนวแกน
τ	=	ความเค้นเฉือน
ε	=	ความเครียด
γ	=	ความเครียดเฉือน
E	=	Modulus of Elastic
ν	=	Poisson's ratio
J	=	พลังงานศักย์รวม
U	=	พลังงานความเครียดภายใน
V	=	พลังงานศักย์ภายนอก
K	=	สทิเฟนสมทริกซ์
u_d	=	พลังงานความเครียดของการเปลี่ยนรูปร่าง
u_v	=	พลังงานความเครียดของการเปลี่ยนปริมาตร
σ_{VM}	=	ความเค้นวอนมิสเชส

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเดินทางคมนาคมทางบกในประเทศส่วนใหญ่เป็นการเดินทางด้วยรถยนต์ เนื่องจากสามารถช่วยให้ผู้เดินทางมีความสะดวก รวดเร็วและมีความคล่องตัวในการเดินทางสูง การเดินทางโดยใช้ระบบขนส่งมวลชนก็เป็นที่ยอมรับมาก ซึ่งนับได้จากมีรถโดยสารจดทะเบียนใหม่เพิ่มขึ้นทุกปี และจำนวนผู้ใช้บริการรถเมล์ ขสมก. เฉลี่ยต่อวันมีจำนวนมาก การใช้บริการรถโดยสารมีความสะดวกสบายและราคาประหยัดทำให้รถโดยสารมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในการคมนาคม แต่อย่างไรก็ตามรถโดยสารอาจมีความเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุได้ตลอดเวลา เนื่องจากรถโดยสารเป็นรถที่ใช้สำหรับบรรทุกผู้โดยสารจำนวนมาก จากสถิติการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารจากข้อมูลของสำนักงานตำรวจแห่งชาติยังมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นจำนวนมาก ดังนั้นระบบความปลอดภัยจึงมีความจำเป็นเพื่อป้องกันการบาดเจ็บและการสูญเสียชีวิตของผู้โดยสาร แต่รถโดยสารกลับมีความปลอดภัยค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับรถยนต์ส่วนบุคคล เนื่องจากไม่สามารถติดตั้งระบบถุงลมนิรภัยได้ในทุกที่นั่งและระบบเข็มขัดนิรภัยมีเพียง 2 จุดยึด แม้กระทั่งความปลอดภัยของโครงสร้างที่นั่งโดยสาร เนื่องด้วยอุตสาหกรรมการผลิตรถโดยสารนั้น ยังเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กและยังไม่มีมาตรฐานรับรองการผลิต

ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารและชิ้นส่วนอื่น ๆ มีส่วนช่วยป้องกันการบาดเจ็บของผู้โดยสาร ที่นั่งรถโดยสารต้องมีความปลอดภัยและแข็งแรงมากเช่นกัน เนื่องจากสัมผัสกับผู้โดยสารโดยตรง เมื่อเกิดอุบัติเหตุแรงกระแทกจากการชนจะส่งผลต่ออาการบาดเจ็บของผู้โดยสาร ซึ่งจากข้อมูลการสืบค้นสาเหตุการเกิดอุบัติเหตุ เมื่อเกิดอุบัติเหตุกับรถโดยสารมีผู้โดยสารได้รับบาดเจ็บจากสาเหตุที่เบาะหรือที่นั่งหลุดออกจากตัวรถและความเสียหายที่เกิดกับที่นั่งส่งผลต่อผู้นั่งกรมการขนส่งทางบกจึงได้กำหนดมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสาร โดยมาตรฐานความปลอดภัยรถโดยสารสาธารณะจะเป็นไปตามแนวทางข้อกำหนดของ United Nations Economic Commission for Europe (UN/ECE) มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสาร ECE Regulation No.17 ทำให้ผู้ประกอบการด้านอุตสาหกรรมรถโดยสารให้ความสำคัญกับความปลอดภัยของที่นั่งมากยิ่งขึ้น ผู้ประกอบการในเขตจังหวัดนครราชสีมา บริษัท อู๋เซิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด ได้ให้ความสำคัญกับความปลอดภัยเช่นกัน จึงได้ร่วมกับผู้วิจัยในการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งโดยสาร โดยจะออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งต่อไป

การออกแบบและการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งในอดีตนั้นจะสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมาก เนื่องจากขั้นตอนการออกแบบ จำเป็นต้องสร้างที่นั่งต้นแบบเพื่อนำมาทำการทดสอบ แต่ปัจจุบันได้มีการประยุกต์เทคโนโลยีการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Engineering) เข้ามาช่วยในการออกแบบและการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ ซึ่งมีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดต้นทุนกว่า โดยสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบทางวิศวกรรม และนำมาวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) วิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมการขนส่งทางบก อ้างอิงตามมาตรฐานยุโรป ข้อกำหนดมาตรฐาน ECE Regulation No.17 ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยวิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นและการเสียรูปของโครงสร้างที่นั่ง เพื่อออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างที่นั่ง ลดความเสียหายที่เกิดกับโครงสร้างที่นั่ง และเพื่อให้ได้โครงสร้างที่นั่งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบของกรมการขนส่งทางบก ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้คาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถนำไปปรับใช้ในการออกแบบโครงสร้างที่นั่ง เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการออกแบบ โครงสร้างที่นั่ง โดยสารของผู้ประกอบการอุทธรณ์โดยสารต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งที่ใช้ในรถโดยสารตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่

1.2.2 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งรถโดยสารให้ได้ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ดำเนินการวิจัยโดยใช้ข้อมูล และวัสดุ ของบริษัท อุเชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด

1.3.2 วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งสำหรับที่นั่งคู่ของรถโดยสารขนาดใหญ่ ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่ง โดยกรมการขนส่งทางบก ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3.3 วิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสถิตศาสตร์

1.3.4 พิจารณารอยเชื่อเป็นการเชื่อมต่อแบบสมบรูณ์ กำหนดเป็นแบบยึดติดกันแน่น

1.3.5 การปรับปรุงจะไม่มีปรับเปลี่ยน แบบและตำแหน่งของจุดยึดที่นั่ง

1.3.6 ไม่พิจารณาความเค้นที่มีผลกระทบต่อจุดยึดที่นั้ง พิจารณาความเค้นที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างที่นั้ง

1.3.7 เกณฑ์การตัดสินจะพิจารณาเฉพาะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับที่นั้ง โดยพิจารณาจากความเค้นของโครงสร้างที่นั้ง

1.3.8 ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ MSC Marc 2011

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาบริบทนวัตกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาโครงสร้างที่นั้งและระบบปรับเอนของพนักพิงสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ของบริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด

1.4.3 ศึกษามาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั้งของกรมการขนส่งทางบก อ้างอิงมาตรฐานยุโรป ECE Regulation No. 17

1.4.4 สร้างแบบจำลองและลดทอนรายละเอียดให้เป็นโครงสร้างอย่างง่ายโดยยังมีรายละเอียดที่ครบถ้วน เพื่อทำการวิเคราะห์

1.4.5 ทำการจำลองการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั้งของโครงสร้างที่นั้งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่

1.4.6 กำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จะทำการศึกษาและออกแบบวิธีการทดลอง

1.4.7 ทำการทดลองและเก็บข้อมูล

1.4.8 วิเคราะห์ผลการทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิจัย

1.4.9 ออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างที่นั้งที่ไม่ผ่านการจำลองตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั้ง เพื่อให้แบบจำลองผ่านมาตรฐานการทดสอบ

1.4.10 สรุปผลการทดลอง

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือ 4 และ 6 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.5.2 บริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด

1.6 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1.6.1 คอมพิวเตอร์สมรรถนะสูง
- 1.6.2 โปรแกรมสร้างแบบจำลอง SolidWorks 2011
- 1.6.3 โปรแกรมเตรียมแบบจำลอง MSC Patran 2011
- 1.6.4 โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ MSC Marc 2011
- 1.6.5 โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ Minitab 16
- 1.6.6 เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine (UTM)
- 1.6.7 เครื่องบันทึกค่าความเครียด Strain indicator and recorder

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 ตำแหน่งและบริเวณที่เกิดความเค้นที่มากที่สุดของ โครงสร้างที่นั่งด้วยภาระกรรมตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่
- 1.7.2 ปัจจัยสำหรับการปรับปรุง โครงสร้างที่นั่ง ที่ส่งผลต่อการลดค่าความเค้นที่เกิดจากการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่
- 1.7.3 ต้นแบบของโครงสร้างที่นั่ง ที่ผ่านการจำลองตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่
- 1.7.4 ได้ข้อมูลที่น่าไปสู่การพัฒนาโครงสร้างที่นั่งสำหรับรถโดยสารต่อไป

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งนั้นสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายมาก เนื่องจากจำเป็นต้องสร้างที่นั้งต้นแบบเพื่อนำมาทำการทดสอบ ในกระบวนการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างที่นั้งสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบทางวิศวกรรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งช่วยให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้มาก งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบที่นั้งรถโดยสาร ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงที่นั้งของรถโดยสารขนาดใหญ่ที่นำมาใช้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง กระบวนการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งตามมาตรฐาน ECE Regulation No.17 ที่เป็นมาตรฐานการวิเคราะห์ความแข็งแรงการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ การวิเคราะห์ความเสียหายของวัสดุที่เกิดขึ้นหลังการทดสอบของโครงสร้างที่นั้ง และตลอดจนไปถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ที่นั้งรถโดยสาร

ที่นั้งหรือเบาะที่ดีจะต้องมีความแข็งแรง ทำให้ผู้โดยสารนั่งแล้วรู้สึกสะดวกสบาย ซึ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่นั้ง จุดยึดที่นั้ง และพนักพิงศีรษะของยานยนต์ (มอก. 896) ให้ความหมายของที่นั้งไว้ว่า ที่นั้ง หมายถึง โครงสร้างพร้อมเบาะวัสดุหุ้มสภาพสมบูรณ์สำหรับผู้ใหญ่ที่นั่งหนึ่งคน ซึ่งโครงสร้างของที่นั้งอาจเป็นหรือไม่เป็นส่วนหนึ่งของโครงสร้างของยานยนต์ก็ได้ โดยโครงสร้างของที่นั้งจะประกอบด้วยชิ้นส่วนต่าง ๆ ดังนี้ โครงเบาะซึ่งเป็นส่วนด้านล่างของโครงสร้างสำหรับวางเบาะ โครงเบาะพนักพิงซึ่งเป็นโครงสร้างของพนักพิงหลัง จุดยึดที่นั้งเป็นระบบสำหรับยึดจุดที่นั้งเข้ากับโครงสร้างของยานยนต์ ระบบปรับตำแหน่งพนักพิงเป็นอุปกรณ์กลไกที่ใช้ปรับตำแหน่งที่นั้งหรือปรับเอนของพนักพิงเพื่อให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะของผู้นั่ง และพนักพิงศีรษะเป็นชิ้นส่วนของที่นั้งที่มีความสำคัญเพื่อช่วยลดการบาดเจ็บของกระดูกสันคอของผู้โดยสาร โดยเกิดจากอุบัติเหตุเกิดการชนกระแทกจากด้านหลัง ชิ้นส่วนทั้งหมดประกอบเป็นที่นั้งหนึ่งหรือเป็นที่นั้งคู่สำหรับรถโดยสาร ซึ่งโครงสร้างที่นั้งที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงในงานวิจัยนี้ใช้ที่นั้งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ที่เป็นที่นั้งคู่ เป็นที่นั้งใช้สำหรับรถที่ไม่มีเครื่องปรับอากาศ ของบริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด โครงสร้างที่นั้งที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงในรูป 2.1

ที่นั่งรถโดยสารเป็นชิ้นส่วนของรถโดยสารที่อยู่ติดกับผู้โดยสารมากที่สุด ฉะนั้นเมื่อเกิดอุบัติเหตุ โครงสร้างที่นั่งจะต้องแข็งแรง ไม่เกิดความเสียหายก่อให้เกิดอันตรายกับผู้โดยสาร ที่นั่งที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นที่นั่งคู่ที่มีเบาะนั่งรวม พนักพิงทั้งสองด้านแยกกันสามารถปรับเอนมุมเอียงของพนักพิงแยกกันได้ และมีพนักพิงศีรษะรวมเป็นชิ้นเดียวกับพนักพิงหลัง ระบบปรับตำแหน่งปรับเอนของพนักพิงหลังเป็นระบบแบบกลไก ลักษณะกลไกใช้เหยียบเพื่อปรับตำแหน่งมุมพนักพิงของพนักพิงหลังในแต่ละด้านได้



รูปที่ 2.1 ลักษณะและส่วนประกอบของ โครงสร้างที่นั่งรถโดยสาร

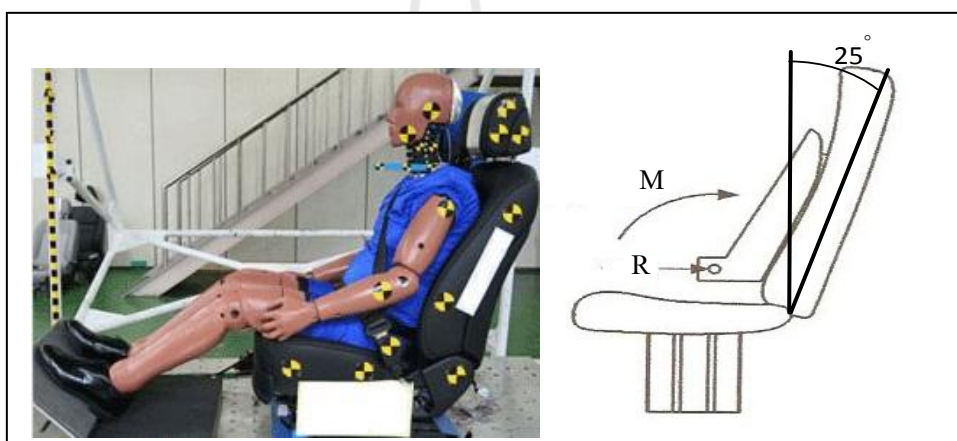
2.2 มาตรฐานการทดสอบตาม ECE Regulation No.17

หน่วยงานคณะกรรมการชื่อ United Nations Economic Commission for Europe โดยใช้ตัวย่อ UNECE หรือ ECE เป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่สร้างข้อบังคับที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบยานพาหนะภาคพื้น เพื่อให้เป็นแนวทางการปฏิบัติสำหรับผู้สร้างยานพาหนะภาคพื้นและมีการซื้อขายกันในกลุ่มประเทศยุโรป ซึ่งหน่วยงานนี้ได้สร้างมาตรฐานที่ครอบคลุมถึงความปลอดภัยของยานพาหนะ การกำหนดมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อม ด้านพลังงาน ตลอดจนการออกแบบระบบป้องกันการจลาจลต่าง ๆ เพื่อให้ผู้ผลิตมีแนวทางการผลิตที่คุ้มครองสิทธิของผู้บริโภคและผู้ใช้งานพาหนะ ซึ่งกรมการขนส่งทางบกกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยรถโดยสารสาธารณะ ซึ่งจะเป็นไปตามแนวทางข้อกำหนดของ ECE

ข้อบังคับข้อที่ 17 ของ ECE จะเป็นระเบียบปฏิบัติที่ว่าด้วยเรื่องรูปแบบข้อกำหนดเกี่ยวกับการมาตรฐานความแข็งแรงที่นั่งโดยสาร โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อป้องกันผู้โดยสารจากการบาดเจ็บขณะเกิดอุบัติเหตุ ในการทดสอบกรมการขนส่งทางบกได้ยกเอาการทดสอบแบบสถิตยศาสตร์ของ ECE มากำหนดใช้เพื่อทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งโดยสาร ซึ่งได้กำหนดให้ใช้เครื่องมือทดสอบทางสถิตยศาสตร์สำหรับที่นั่ง

2.1.1 วิธีการทดสอบและเกณฑ์การตัดสิน

- (1) ถ้านั่งสามารถเลื่อนปรับมุมพนักพิงหลังได้ ให้ปรับที่นั่งอยู่ในตำแหน่งที่มุมพนักพิงหลังทำมุมให้ใกล้เคียง 25 องศามากที่สุด เมื่อวัดจากแนวดิ่ง
- (2) ให้แรงที่ทำให้เกิดโมเมนต์ขนาดเท่ากับ 530 นิวตันเมตรรอบจุด R โดยกระทำผ่านทางชิ้นส่วนจำลองหลังไปที่พนักพิงหลังดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งและระบบปรับตำแหน่งสำหรับที่นั่ง

2.1.2 เกณฑ์ตัดสินที่ถือว่าที่นั่งผ่านการทดสอบ

- (1) ระบบล็อกต้องไม่คลายหรือหลุดออกในระหว่างและหลังการทดสอบ
- (2) ต้องไม่เกิดความเสียหายใด ๆ ปรากฏที่โครงสร้างที่นั่งหรือจุดยึดที่นั่ง ระบบปรับตำแหน่ง และระบบเคลื่อนที่หรืออุปกรณ์ล็อก ในระหว่างและหลังการทดสอบ การเสียรูปถาวร รวมถึงรอยแตกร้าว อาจเป็นที่ยอมรับได้ ถ้าความเสียหายเหล่านี้ไม่เพิ่มความเสี่ยงของการบาดเจ็บในกรณีที่เกิดการชนและสามารถรองรับแรงตามที่กำหนด
- (3) หลังการทดสอบ ถ้ามีระบบปรับเลื่อนซึ่งมีเพื่ออำนวยความสะดวกต่อการเข้าออกของผู้โดยสารจะต้องทำงานได้ตามปกติ โดยระบบต้องสามารถ

ปลดล็อกและเลื่อนที่นั่งหรือส่วนใดส่วนหนึ่งของที่นั่งได้อย่างน้อยหนึ่งครั้ง ระบบเลื่อนอื่น ๆ รวมถึงระบบปรับตำแหน่งและระบบล็อกของระบบปรับตำแหน่งไม่จำเป็นต้องทำงานได้ตามปกติ

จากโครงการศึกษาวิจัยเพื่อกำหนดมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับที่นั่งรถโดยสาร ซึ่งศูนย์บริการปรึกษาออกแบบวิศวกรรม ได้รับการสนับสนุนจาก กองทุนเพื่อความปลอดภัยในการใช้รถใช้ถนน (กปถ.) กรมการขนส่งทางบก เพื่อร่างมาตรฐานการทดสอบที่นั่งรถโดยสารสาธารณะ โดยศึกษามาตรฐานการทดสอบของสหประชาชาติ จากนั้นทำการสร้างต้นแบบเครื่องทดสอบที่นั่ง และนำมาทดสอบที่นั่ง โดยเปรียบเทียบผลการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งใน 3 ส่วน นั่นคือ ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ความแข็งแรงของจุดต่อที่นั่งกับโครงสร้างรถ และความแข็งแรงของจุดต่อที่นั่งกับเข็มขัดนิรภัย

2.3 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า โดยการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่เรียกว่า เอลิเมนต์ และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันที่จุดต่อเรียกว่า Nodes ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เราต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และกำลังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง และโครงสร้างที่ซับซ้อนประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่าง ๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์ได้ ดังนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการอนุพันธ์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ และให้ผลคำตอบที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานในการวิเคราะห์ปัญหาทางสถิติศาสตร์ ตามข้อกำหนดในมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งสำหรับรถโดยสาร

ขั้นตอนของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งเป็นขั้นตอน 3 ขั้นตอน เริ่มต้นจากขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-processor) คือการแบ่งรูปทรงหรือ โครงสร้างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ จะต้องคำนึงถึงโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด แล้วจึงกำหนดสมบัติวัสดุให้กับเอลิเมนต์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด จากนั้นขั้นตอนการวิเคราะห์ (Analysis) จะใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับ

ระดับความอิสระของอิลลิเมนต์ และสร้างสมการไฟในที่อิลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้น แล้วจึงรวมสมการจากแต่ละอิลลิเมนต์นี้เข้าด้วยกันก่อให้เกิดระบบสมการรวมขนาดใหญ่ของระบบ ซึ่งอธิบายสถานะโดยรวมของปัญหานั้น จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่กำหนดให้ ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่นี้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อต่าง ๆ ทั่วทั้งโดเมนของปัญหาต่อไป ขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนกระบวนการขั้นท้าย (Post-processor) ผลเฉลยโดยประมาณล้วนอยู่ในรูปแบบของตัวเลขในแต่ละจุดต่อ เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่าย ซึ่งสามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ เช่น การแสดงด้วยชั้นสีต่าง ๆ ผลคำตอบที่ได้สามารถอธิบายถึงปัญหาที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนและยากต่อการทดลอง

2.3.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟในที่อิลลิเมนต์นั้นจะต้องแบ่งโครงสร้างออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อย และจะต้องสมมติฟังก์ชันการกระจัดโดยการประมาณของแต่ละอิลลิเมนต์ที่จะประกอบเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างรวมการกระจัด โดยประมาณที่สมมติขึ้น ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันทั่ว ๆ ไป จะเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียล ในกรณีของปัญหาสามมิติ

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5zx + \dots + a_mz^n \\ v(x, y, z) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \\ w(x, y, z) &= a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n \end{aligned} \quad (2-1)$$

ซึ่ง u , v และ w คือส่วนประกอบของการกระจัดทิศทางในทิศทาง x , y , z ตามลำดับ และ

$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i)$$

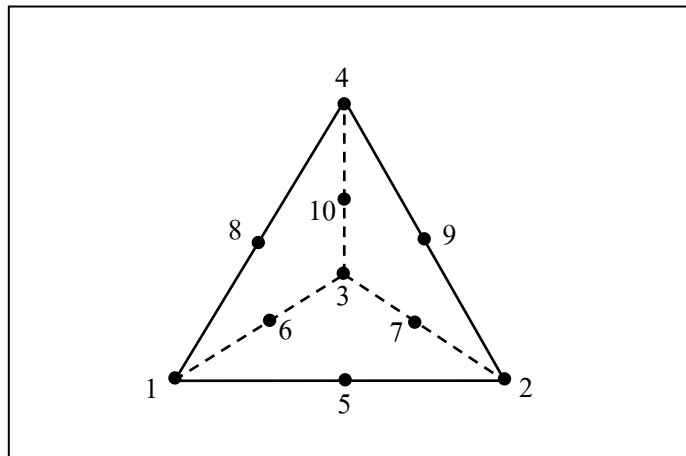
พอลิโนเมียลที่มีหลายเทอมหรือกำลังสูง ๆ จะให้การกระจัดที่สมมติขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำมากขึ้น แต่การแก้สมการค่อนข้างทำได้ยาก อย่างไรก็ตามการที่จะเลือกใช้ฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังเท่าไรนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา และความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการ เช่น ในกรณีของปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังสอง สามเทอม จะให้ผลเฉลยดีกว่าฟังก์ชันพอลิโนเมียลเทอมเดียวและสองเทอม

ฟังก์ชันการกระจัดของอีลิเมนต์เชิงซ้อน จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลที่มีเทอมค่าคงตัว เทอมเชิงเส้น เทอมกำลัง กำลังสาม และเทอมที่มีกำลังสูงกว่านั้นเท่าที่จำเป็น รูปร่างของอีลิเมนต์ในกรณีของปัญหามิติเดียว อีลิเมนต์เชิงซ้อนจะประกอบด้วย 2 จุดต่อภายนอกและจุดต่อภายในอย่างน้อย 1 จุดต่อ ฟังก์ชันเชิงซ้อนของปัญหา 3 มิติ จะมีรูปร่างแบบสามเหลี่ยมทรงสี่หน้ากำลัง 2 ที่ประกอบด้วย 10 จุดต่อ จากสมการที่ 2-1 ฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับอีลิเมนต์สามเหลี่ยมทรงสี่หน้าเชิงซ้อนกำลังสองคือ

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6yz + a_7xz + a_8x^2 \\
 &\quad + a_9y^2 + a_{10}z^2 \\
 v(x, y, z) &= a_{11} + a_{12}x + a_{13}y + a_{14}z + a_{15}xy + a_{16}yz + a_{17}xz + a_{18}x^2 \\
 &\quad + a_{19}y^2 + a_{20}z^2 \\
 w(x, y, z) &= a_{21} + a_{22}x + a_{23}y + a_{24}z + a_{25}xy + a_{26}yz + a_{27}xz + a_{28}x^2 \\
 &\quad + a_{29}y^2 + a_{30}z^2
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

2.3.2 อีลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

อีลิเมนต์แบบสามมิติที่นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติมีอยู่สองแบบคือ อีลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) และอีลิเมนต์ทรงหกหน้า (Hexahedral element) ซึ่งในหัวข้อนี้จะพิจารณาการแบบจำลองโครงสร้างที่หนึ่ง โดยแบ่งเป็นอีลิเมนต์ทรงสี่หน้าที่มีจุดต่อ 10 จุดต่อใช้ในการแบ่งโครงสร้างที่หนึ่ง อีลิเมนต์ทรงสี่หน้านั้นเป็นอีลิเมนต์ที่ง่ายต่อการแบ่งปัญหาแบบ 3 มิติ เนื่องจากสามารถแบ่งอีลิเมนต์ได้ครอบคลุมโครงสร้างของปัญหาในสามมิติได้ง่าย ซึ่งจุดต่อแต่ละจุดของอีลิเมนต์นั้นจะมี 3 ดีกรีออฟฟรียดอม (Degree of freedom) ฟังก์ชันการกระจัดประมาณภายในอีลิเมนต์เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน ดังสมการที่ 2-2



รูปที่ 2.3 อิลลิเมนต์ทรงสี่หน้าใน 3 มิติ

โดย a_i , $i=1,\dots,30$ เป็นค่าคงที่ที่หาได้จากเงื่อนไขของค่าที่จุดต่อ ซึ่งหลังจากทำการหาค่าคงที่นั้นได้แล้ว เราสามารถเขียนลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณให้อยู่ในรูปของค่าที่จุดต่อได้ดังนี้

$$\delta(x, y, z) = N_1\delta_1 + N_2\delta_2 + N_3\delta_3 + \dots + N_{30}\delta_{30} = [N]\{\delta\} \quad (2-3)$$

โดย N_i , $i=1,\dots,10$ คือฟังก์ชันการประมาณภายใน

2.3.3 สมการเชิงอนุพันธ์

ความสมดุลของของแข็งที่มีการยึดหยุ่นได้ในสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned} \quad (2-4)$$

โดย $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ แทนความเค้นในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ และ $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ แทนความเค้นเฉือน F_x, F_y, F_z แทนแรงวัตถุ (body force) ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ ตลอดผิวรอบนอกของของแข็งดังแสดงในรูป 2.4 อาจประกอบด้วยเงื่อนไขขอบเขตหลาย ๆ ชนิด อาทิเช่น การกำหนดระยะเคลื่อนตัวบนผิวบางส่วน ในขณะที่ผิวส่วนอื่น ๆ อาจมีการกำหนดเงื่อนไขของความเค้นที่ผิว (Surface traction) ในรูปแบบทั่วไปคือ

$$\vec{T} = T_x \hat{i} + T_y \hat{j} + T_z \hat{k}$$

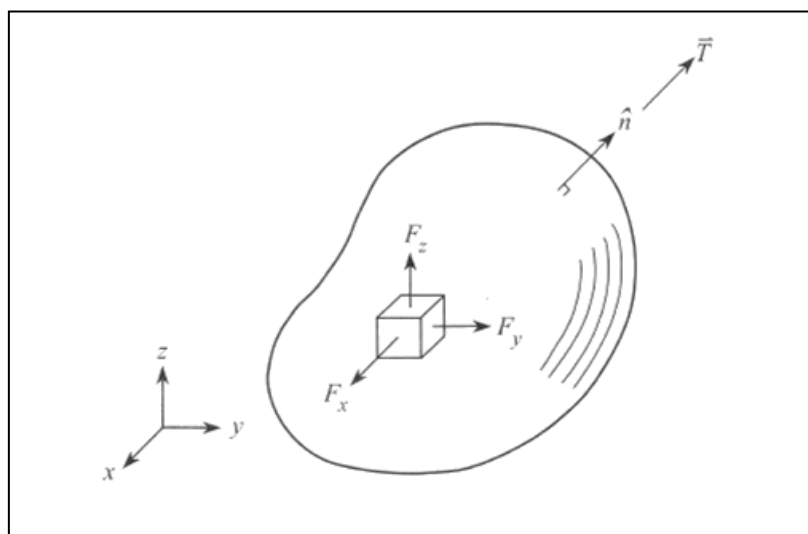
โดย T_x, T_y, T_z แทนความเค้นที่ผิวในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของความเค้นย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix} \quad (2-5)$$

โดย n_x, n_y, n_z เป็นทิศทางโคไซน์ (Direction cosines) ของเวกเตอร์

$$\hat{n} = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k}$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิว ณ จุดที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น



รูปที่ 2.4 ความสมดุลตามตำแหน่งใด ๆ ในของแข็ง 3 มิติ

นอกจากเงื่อนไขของเขตที่ผิวเหล่านี้แล้ว ของแข็งในสามมิติในรูป 2.4 อาจมีความเครียดขั้นต้น (Prestrain) ที่เกิดขึ้นอยู่ก่อน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด โดยทั่วไปคือ

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon - \varepsilon_0\} \quad (2-6)$$

โดย

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz}] \quad (2-7)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}] \quad (2-8)$$

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2-9)$$

เมทริกซ์ $[C]$ เรียกว่าเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด และ $\{\varepsilon_0\}$ แทนเวกเตอร์ของความเครียดเริ่มต้นซึ่งอาจเกิดมาจากหลายสาเหตุ เช่น อาจเกิดจากอุณหภูมิ $T(x, y, z)$ ตามตำแหน่งต่าง ๆ นั้นมีค่าไม่เท่ากัน ในกรณีเช่นนี้เวกเตอร์คือ

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

โดย α แทนสัมประสิทธิ์ของการขยายตัว และ ΔT แทนอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิ T_0 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่วัสดุนั้นไม่มีความเค้น

ความเครียดเริ่มต้นอาจเกิดมาจากกรณีที่โครงสร้างนั้นมีความเครียดอยู่ก่อนแล้ว และอยู่ในภาวะสมดุลก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำ ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาความเครียดเริ่มต้นที่เกิดกับโครงสร้างที่หนึ่ง โดยจะพิจารณาโครงสร้างที่หนึ่งอยู่ในภาวะสมดุลก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำตามมาตรฐานการทดสอบ

2.3.4 หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด

การแก้ปัญหาที่โดเมนมีสถานะต่อเนื่อง (Continuum problems) มีหลักการสำคัญในการใช้หลักการพลังงานคือ เราต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อเราทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว ยังคงก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ห้อยู่

ปัญหาที่วิเคราะห์กันส่วนใหญ่เป็นปัญหาทางด้านโครงสร้าง โดยฟังก์ชัน J นั้นมีความหมายทางกายภาพ กล่าวคือ เป็นค่าพลังงานศักย์รวม (Total potential energy) ค่าพลังงานศักย์รวมสำหรับวัสดุที่ยึดหยุ่นได้ประกอบด้วย พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ (Internal strain energy) หลังจากเกิดการยึดหยุ่น และพลังงานศักย์อันเกิดจากแรงภายนอกที่มากระทำ (Potential energy due to external forces) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$J = U + V \quad (2-10)$$

ค่าพลังงานศักย์ภายนอก (V) มีค่าเป็นค่าลบของงานที่เกิดขึ้น (W) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ง่าย ในขณะที่วัตถุอยู่ในสถานะที่สมดุลค่าพลังงานศักย์รวม J นั้นมีค่าต่ำที่สุด จากหลักการของค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวม (Principle of total minimum potential energy)

$$\frac{\partial J}{\partial \delta} = 0 \quad (2-11)$$

ในการสร้างสมการไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาทางด้านของแข็ง เราสามารถเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในสมการ 2-4 เราจำเป็นต้องหาฟังก์ชันที่เมื่อทำการหาค่าต่ำสุดแล้วจะก่อให้เกิดสมการอนุพันธ์ ฟังก์ชันดังกล่าวคือพลังงานศักย์รวมเช่นเดียวกับที่ได้แสดงในสมการ 2-10 นั่นคือ

$$J = U + V$$

โดย U คือพลังงานที่เกิดขึ้นจากความเครียดในวัตถุ

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon - \varepsilon_0] \{\sigma\} dV$$

เมื่อแทน $\{\sigma\}$ จากสมการที่ 2-6 ลงไปจะได้

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon - \varepsilon_0] [C] \{\varepsilon - \varepsilon_0\} dV$$

ซึ่งหลังจากกระจายออกแล้วจัดพจน์ จะได้

$$U = \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon\} dV - \int_V [\varepsilon] [C] \{\varepsilon_0\} dV + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0] [C] \{\varepsilon_0\} dV \quad (2-12)$$

ในสมการ 2-10 V คือพลังงานศักย์อันเกิดจากแรงวัตถุที่มีปริมาตร V และแรงที่ผิวบนผิวที่มีพื้นที่ S ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned}
 V &= -\int_V (F_x u + F_y v + F_z w) dV - \int_S (T_x u + T_y v + T_z w) dS \\
 &= -\int_V [u \quad v \quad w] \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} dV - \int_S [u \quad v \quad w] \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} dS \\
 &= -\int_V [\bar{\delta}] \{F\} dV - \int_S [\bar{\delta}] \{T\} dS
 \end{aligned} \tag{2-13}$$

โดย $[\bar{\delta}]$ แทนเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าเคลื่อนตัว u, v, w ในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ $\{F\}$ แทนเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยแรงวัตถุในทิศทาง x, y, z และ $\{T\}$ แทนเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยแรงที่ผิวในทิศทาง x, y, z จากนั้นทำการแทนค่าสมการ 2-12 และ 2-13 ลงในสมการ 2-10 ก่อให้เกิดพลังงานศักย์รวมในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon\} dV - \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon_0\} dV + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\} dV \\
 &\quad - \int_V [\bar{\delta}] \{F\} dV - \int_S [\bar{\delta}] \{T\} dS
 \end{aligned} \tag{2-14}$$

ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์สำหรับอิลลิเมนต์ชนิดต่าง ๆ ได้

2.3.5 สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์

สมการไฟไนท์อิลลิเมนต์อยู่ในรูปแบบของสมการที่ประกอบด้วยค่าเคลื่อนตัวซึ่งไม่รู้ค่าที่จุดต่อ นั่นคือ เราจะสมมติการกระจัดเคลื่อนตัวบนอิลลิเมนต์เป็นฟังก์ชันการกระจัดเชิงซ้อนในสามทิศทางและค่าเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งจุดต่อทั้งสิบจุดดังแสดงในสมการ 2-2 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 u(x, y, z) &= [N(x, y, z)] \{u\} \\
 v(x, y, z) &= [N(x, y, z)] \{v\} \\
 w(x, y, z) &= [N(x, y, z)] \{w\}
 \end{aligned} \tag{2-15}$$

หรือเขียนรวมกันดังแสดงสมการ 2-3 ได้ว่า

$$\{\bar{\delta}\} = [N(x, y, z)]\{\delta\} \quad (2-16)$$

โดย $[\bar{\delta}] = [u \ v \ w]$

$$[\delta] = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ \dots \ u_{10} \ v_{10} \ w_{10}]$$

เวกเตอร์ของความเครียดดังแสดงในสมการ 2-8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าเคลื่อนตัวได้คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B(x, y, z)]\{\delta\} \quad (2-17)$$

โดย $[B(x, y, z)]$ แทนเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัว หากแทนสมการ 2-16 และ 2-17 ลงในสมการของพลังงานศักย์รวม สมการที่ 2-14 จะได้

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

หรือเขียนย่อได้ว่า

$$J = \frac{1}{2} [\delta][K] \{\delta\} - [\delta] \{F_0\} + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C] \{\varepsilon_0\} dV \\ - [\delta] \{F_B\} - [\delta] \{F_t\} \quad (2-18)$$

โดย

$$[K] = \int_V [B]^T [C][B] dV \quad (2-19ก)$$

$$\{F_0\} = \int_V [B]^T [C] \{\varepsilon_0\} dV \quad (2-19ข)$$

$$\{F_B\} = \int_V [N]^T \{F\} dV \quad (2-19ค)$$

$$\{F_t\} = \int_S [N]^T \{T\} ds \quad (2-19ง)$$

ในที่นี้ $[K]$ คืออิลลิเมนต์สติฟเนสเมทริกซ์ $\{F_0\}, \{F_B\}, \{F_t\}$ คือ โหลดเวกเตอร์
 เนื่องจากความเค้นต้น แรงวัตถุ และแรงที่ผิวตามลำดับ จากสมการที่ 2-18 สามารถสร้างสมการ
 ไฟไนต์อิลลิเมนต์จากการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมดังสมการ 2-11 ซึ่งจะก่อให้เกิดสมการ
 ไฟไนต์อิลลิเมนต์รวม ค่าอนุพันธ์ที่เกิดจากพจน์ของที่เกี่ยวข้องกับความเครียดขั้นต้น ε_0 ของ
 สมการ 2-18 มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากพจน์ดังกล่าวไม่เป็นฟังก์ชันของค่าเคลื่อนตัว สามารถเขียน
 ให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ ดังนี้

$$[K]\{\delta\} = \{F_0\} + \{F_B\} + \{F_i\} \quad (2-20)$$

หลังจากประกอบสมการไฟไนท์เอลิเมนต์จากทุก ๆ อิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบสมการรวมของโครงสร้างสามมิตินั้น แล้วทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลลัพธ์ของค่าเคลื่อนตัวที่ทุก ๆ จุดต่อได้แล้ว สามารถหาค่าความเค้นในทิศทางต่าง ๆ ได้ต่อไป

2.4 ทฤษฎีความเสียหาย

การประเมินผลที่ได้จากการวิเคราะห์หรือการตีความผลลัพธ์ที่ได้ เพื่อการวิเคราะห์ผลจากการจำลองโครงสร้างที่หนึ่งนั้นมีส่วนที่เสียหายบริเวณใดของโครงสร้าง จำเป็นต้องทราบถึงทฤษฎีความเสียหายของวัสดุเพื่อนำมาตีความวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างที่หนึ่ง จึงได้มีการตั้งสมมติฐานโดยการพิจารณาโครงสร้างของวัสดุ และมีการจำแนกวัสดุตามพฤติกรรมความยืดหยุ่นของวัสดุออกเป็นวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

วัสดุจะมีความยืดหยุ่นก็ต่อเมื่อวัสดุนั้นมีการกลับคืนรูปทรง หรือมีความยาวเท่ากับ ความยาวเริ่มต้น เมื่อแรงที่กระทำต่อวัสดุถูกเคลื่อนย้ายออกไปแล้ว พฤติกรรมความยืดหยุ่นนี้จะเกิดขึ้นในขณะที่ความเค้นยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด หรือพูดได้ว่าวัสดุจะมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elastic) ถ้าความเค้นมีมากเกินขีดจำกัดของสัดส่วน (Proportional Limit) วัสดุจะยังมีการตอบสนองต่อความยืดหยุ่น แต่จะก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเครียดอย่างต่อเนื่อง เมื่อเพิ่มความเค้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งถึงขีดจำกัดของความยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งเป็นจุดสุดท้ายที่เมื่อนำแรงภายนอกออกแล้ววัสดุจะกลับมามีขนาดเท่าเดิม

การเพิ่มความเค้นขึ้นอีกเพียงเล็กน้อย จะทำให้ขีดจำกัดของความยืดหยุ่นมีค่าต่ำลงและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร พฤติกรรมนี้เรียกว่า การคราก (Yielding) ความเค้นที่ก่อให้เกิดการครากเรียกว่า ความเค้นคราก หรือจุดคราก (Yield Stress or Yield Point) - σ_y ความเค้น ณ จุดนี้ถือเป็นหลักในการออกแบบโดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (Plastic Deformation) สำหรับวัสดุที่ไม่มีจุดคราก เช่น เหล็กหล่อ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุเปราะ ก็อาจใช้ความต้านแรงดึง (Ultimate Stress) - σ_u เป็นหลักในการออกแบบ

วัสดุใด ๆ ที่ถูกแรงกระทำแล้วเกิดความเครียดที่มีค่ามากๆ ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เรียกว่า วัสดุเหนียว เช่น เหล็กเหนียว โดยทั่วไปวิศวกรจะเลือกวัสดุเหนียวในการออกแบบ เนื่องจากวัสดุสามารถดูดซับพลังงานหรือแรงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันได้ และถ้าวัสดุถูกกระทำด้วยแรงมากเกินไป

จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างมากก่อนที่จะเกิดการแตกหัก วัสดุเหนียวจะมีค่า $\epsilon_f \geq 0.05$ และมีค่าความต้านแรงครากอย่างชัดเจน ซึ่งมักจะมีค่าเดียวกันสำหรับการดึงและการอัด

สำหรับวัสดุที่มีจุดครากต่ำมาก หรือไม่มีจุดครากก่อนเกิดการแตกหัก และ $\epsilon_f < 0.05$ จะเรียกว่า วัสดุเปราะ เช่น อลูมิเนียม โดยมาก $\sigma - \epsilon$ diagram จะแสดงเป็นรูปโค้งที่ไม่มีจุดครากที่แน่ชัด ดังนั้นจึงนิยามความต้านแรงคราก (Yield Strength) จากวิธีทางกราฟิกที่เรียกว่า Offset Method โดยเลือกใช้จุดที่มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.2 % (0.002) และวัดจากจุดนี้ที่อยู่บนแกน ϵ แล้วลากเส้นขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงไปจนตัดกับส่วน โค้งของกราฟ ก็จะได้ค่าความเค้นที่เป็นความต้านแรงคราก

การออกแบบชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเหนียวและรับภาระกรรมแบบสถิตยศาสตร์ ชิ้นงานจะรับภาระกรรมหลายอย่างพร้อมกันเช่น ความเค้นดึง ความเค้นกด และความเค้นเฉือน และเป็นแบบสามมิติ โครงสร้างต่าง ๆ จะเกิดความเสียหายเมื่อมีความเค้นมากเกินไปที่วัสดุนั้นจะรับได้ เมื่อมีความเค้นรวมที่ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นจะเป็นการยากที่จะวิเคราะห์ได้ถูกต้อง ดังนั้นจึงมีทฤษฎีความเสียหายที่นิยมกล่าวถึงมากที่สุดคือ ทฤษฎีของ H. Tresca ซึ่งเป็นทฤษฎีของค่าความเค้นเฉือนสูงสุด และทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุดเป็นทฤษฎีของ R. Von Mises

2.4.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress theory)

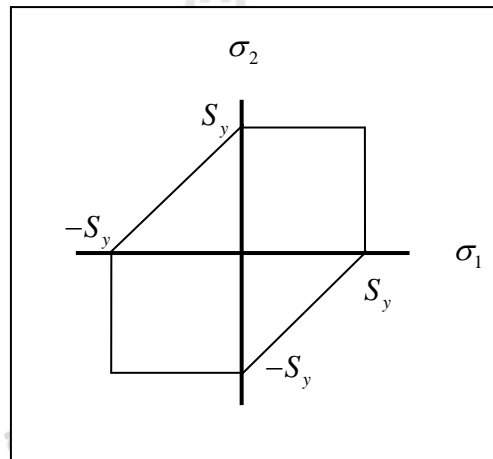
ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด นี้กำหนดให้ใช้เกณฑ์ การพิจารณาการครากของวัสดุเหนียวซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดระนาบสลิป (Slip plane) ภายใต้การดึงทดสอบชิ้นงานที่ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกัน ทฤษฎีนี้กล่าวว่า ความเสียหายอันเกิดจากการครากจะเริ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดภายในเนื้อวัสดุภายใต้ภาระกระทำทั่วไปนั้น เท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นบนระนาบสลิปของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันภายใต้การดึงทดสอบจนถึงจุดครากของวัสดุดังกล่าว สำหรับการทดสอบแรงดึงความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นบนระนาบที่ทำมุม 45° กับระนาบของการดึง ความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดครากจะมีค่า $\tau_{\max} = S_y / 2$ สำหรับสภาวะความเค้นใน 3 มิติ ความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $\tau_{\max} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$ ดังนั้น สำหรับสภาวะความเค้นโดยทั่วไปจะได้

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad (2-21)$$

สมการนี้บอกให้ทราบว่าความต้านทานแรงครากในการเฉือนมีค่าดังนี้

$$\tau_{\max} = 0.5S_y \quad (2.22)$$

สำหรับสภาวะของความเค้นของวัสดุหนึ่ง ๆ สามารถวิเคราะห์ได้โดยกำหนดให้ ความเค้นหลักในระนาบใดระนาบหนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อพล็อตลงบนกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดจะกำหนดบริเวณที่ไม่ได้รับความเสียหายไว้ภายในบริเวณพื้นที่รูป หกเหลี่ยมของเทรสกา (Henri Edouard Tresca) ถ้าออกแบบให้สภาวะของความเค้นอยู่ภายใน บริเวณพื้นที่รูปหกเหลี่ยมดังกล่าว ชิ้นส่วนนั้นจะ ไม่ได้รับความเสียหายเนื่องจากการคราก



รูปที่ 2.5 ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของเทรสกา

พิจารณาความเป็นไปได้ในกรณีของการเกิดความเค้นหลักดังต่อไปนี้

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

ความเสียหายจะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อ $\sigma_1 - 0 = \sigma_1 = S_y$

กรณีที่ 2 ถ้า $\sigma_1 > 0 > \sigma_2$ ความเสียหายจะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อ $\sigma_1 - \sigma_2 = S_y$

กรณีที่ 3 ถ้า $\sigma_2 < \sigma_1 < 0$ ความเสียหายจะเกิดขึ้นกับวัสดุเมื่อ $\sigma_2 = S_y$

จะเห็นได้ว่าการพิจารณาความเสียหายนั้นจะตั้งอยู่บนพื้นฐานการทำนายตาม ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด การสร้างเส้นขอบเขตบนพื้นที่รูปหกเหลี่ยมของเทรสกาจะพิจารณา จากการเกิดความเค้นหลักทั้ง 3 กรณีข้างต้นนั่นเอง ส่วนกรณีที่วัสดุอยู่ภายใต้สภาวะของ

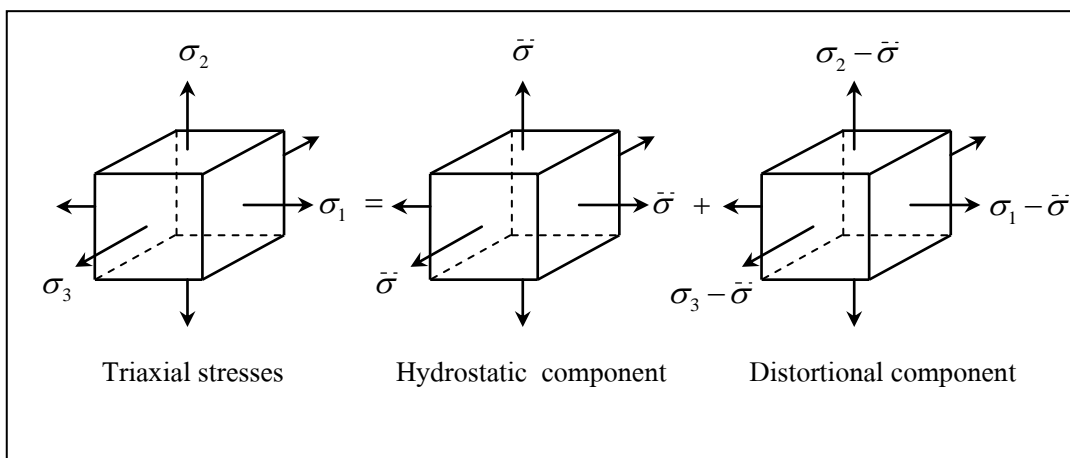
ความเค้นเฉือนอย่างเดียว เช่น เพล่าที่รับทอร์คอย่างเดียว ความเค้นเฉือนสูงสุดตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดพิจารณาจาก

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_y}{2} - \left(\frac{-\sigma_y}{2} \right) \right] = \frac{S_y}{2} \tag{2.23}$$

2.4.2 ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุด (Maximum distortion energy theory)

ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุด ใช้เกณฑ์พิจารณาความเสียหายของวัสดุบนพื้นฐานของพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Distortion energy) ซึ่งก็คือพิจารณาจากพลังงานอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุนั้น เกณฑ์กำหนดความเสียหายนี้เป็นที่รู้จักกันดีและมีชื่อเรียกว่า ทฤษฎีวอนมิสเสส เรียกชื่อตามของนักคณิตศาสตร์ประยุกต์ชื่อ Richard Von Mises ทฤษฎีนี้อาศัยผลจากการทดสอบวัสดุภายใต้ความเค้นที่กระทำต่อวัสดุทุกทิศทาง ความเค้นครากที่ได้จะมีค่ามากกว่าความเค้นครากที่ได้จากการดึงทดสอบอย่างง่ายในทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด โดยพลังงานของการเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้จะคำนึงถึงการเปลี่ยนรูปเชิงเส้นและเชิงมุมไปพร้อม ๆ กัน

พลังงานที่เกิดจากการเปลี่ยนรูปของวัสดุเหนียว โดยทฤษฎีนี้กล่าวว่า วัสดุจะเริ่มคราก เมื่อพลังงานของการเปลี่ยนรูปต่อหน่วยปริมาตรของชิ้นงานที่อยู่ภายใต้ความเค้นรวม มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับพลังงานของการเปลี่ยนรูปเนื่องจากการครากที่เกิดขึ้นในการทดสอบด้วยการดึงอย่างง่าย ในการพัฒนาสมการสำหรับทฤษฎีนี้ ให้พิจารณาพลังงานของการเปลี่ยนรูปในชิ้นส่วนรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็ก ๆ ที่อยู่ภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ σ_1 , σ_2 และ σ_3



รูปที่ 2.6 สถานะของความเครียด

ดังนั้นชิ้นส่วน Hydrostatic เเทมนี้เกิดความเค้นที่เท่ากันทุกทิศทางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยการขยายตัว แต่ไม่มีการบิดเบือนรูปร่างเชิงมุมไปจากเดิม จึงไม่ทำให้เกิดการคราก และชิ้นส่วน Distortional ส่วนนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรแต่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเค้นเฉือนและเกิดการคราก

พลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ

$$u = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3)$$

จากความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียด และอัตราส่วนปัวซอง

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

เมื่อแทนสมการ Total elastic energy ในสมการพลังงานความเครียด และจัดรูปใหม่จะได้

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (2-24)$$

พลังงานความเครียดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร u_v ส่วน Hydrostatic จะถือว่า $\bar{\sigma}$ เป็นองค์ประกอบของ σ_1 , σ_2 และ σ_3 องค์ประกอบนี้ก็จะสามารถนำไปลบออกจากเทมของพลังงานรวม ซึ่งจะได้องค์ประกอบที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนรูปร่างเชิงมุม โดยที่ปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ สามารถแทน $\bar{\sigma}$ สำหรับ σ_1 , σ_2 และ σ_3 ในสมการที่ (2-24) ซึ่งจะได้

$$u_v = \frac{3\bar{\sigma}^2}{2E} (1-2\nu) = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_3\sigma_1) \quad (2.25)$$

ดังนั้นสามารถหาพลังงานของการเปลี่ยนรูปได้จากนำสมการ 2-5 ไปลบออกจากสมการ 2-25 จะได้

$$u_d = u - u_v = \frac{1+\nu}{3E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2-26)$$

พลังงานการเปลี่ยนรูปมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อ $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ สำหรับการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย ที่จุดคราก $\sigma_1 = S_y$ และ $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ดังนั้นพลังงานของการเปลี่ยนรูปจะมีค่าเท่ากับ

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (2-27)$$

ดังนั้น สำหรับสภาวะความเค้นในสมการที่ 2-26 จะทำให้สามารถทำนายจุดครากของชิ้นงานได้จากสมการที่ 2-26 มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสมการที่ 2-27 ซึ่งจะได้

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y \quad (2-28)$$

ในการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย จะเกิดความเค้นครากของชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma \geq S_y$ ดังนั้น เทอมทางซ้ายของสมการ (2-28) จะเป็นค่าความเค้นที่มีผลต่อพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Effective Stress) ซึ่งนิยมเรียกว่า “von Mises Stress” ตามชื่อของผู้คิดค้นทฤษฎีนี้ โดยใช้สัญลักษณ์ σ_{VM} ดังนั้น จึงสามารถเขียนสมการที่ 2-28 ได้เป็น

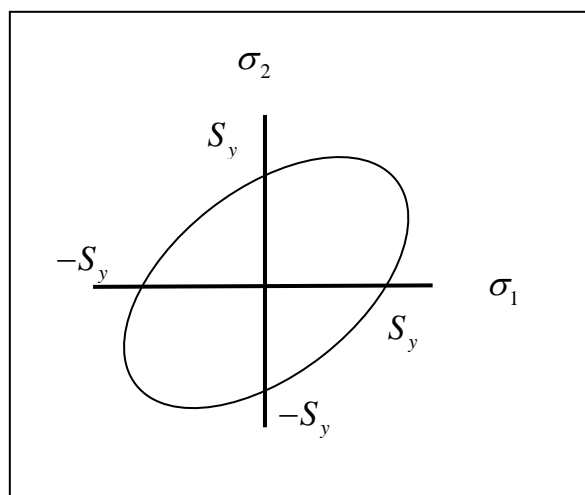
$$\sigma_{VM} \geq S_y$$

$$\text{เมื่อ} \quad \sigma_{VM} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2-29)$$

สำหรับความเค้นในระนาบ ความเค้นหลักซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\sigma_{VM} = (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (2-30)$$

จากสมการที่ (2-30) เมื่อนำไปพล็อตกราฟ จะได้เป็นกราฟรูปวงรี พื้นที่วงรีแสดงถึงย่านปลอดภัยที่ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการคราก ดังแสดงในรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของวอนมิสเซส

การใช้องค์ประกอบของความเค้นใน 3 มิติ xyz จะสามารถเขียน von Mises Stress ได้ดังนี้

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]^{1/2} \quad (2-31)$$

กรณีชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับความเค้นเฉือนกระทำอย่างเดียวก จากวงกลมของมอร์ พบว่า $\tau = \tau_{\max}$, $\sigma_1 = \tau_{\max}$ และ $\sigma_2 = -\tau_{\max}$ ความเค้นของวอนมิสเซสคำนวณได้จาก

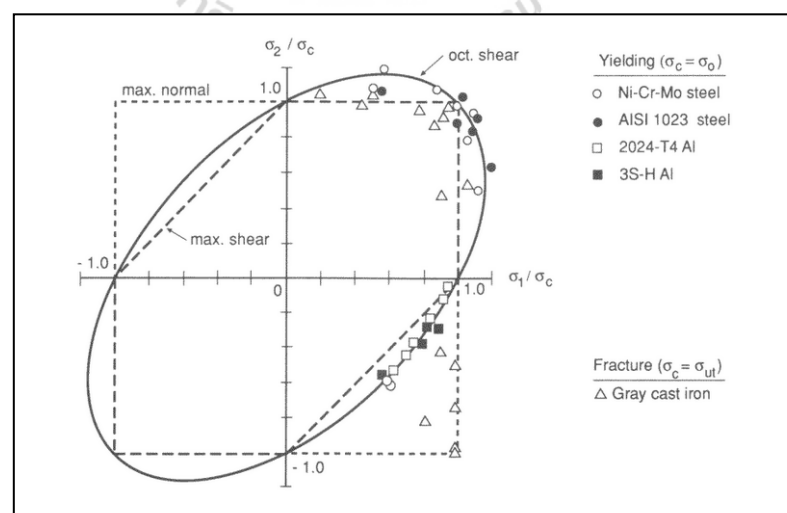
$$\sigma_{VM} = \sqrt{3\tau_{\max}^2} = \sqrt{3}\tau_{\max}$$

ความเสียหายอันเกิดจากการครากจะเกิดเมื่อ

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3}\tau_{\max} = S_y \quad \text{หรือ} \quad \tau_{\max} = 0.577S_y \quad (2-32)$$

2.4.3 บทสรุปความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว

จากการศึกษาทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมความยืดหยุ่นเป็นวัสดุเหนียว ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ทฤษฎีต่าง ๆ ตามความเหมาะสม เพื่อประเมินความเสียหาย ความเสียหายในบางจุดที่แสดงในรูปที่ 2.8 จะช่วยให้วิศวกรผู้ออกแบบตัดสินใจได้อย่างถูกต้อง จากรูปแสดงให้เห็นว่าทั้งทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป เป็นทฤษฎีที่สามารถยอมรับได้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความเสียหายที่จะเกิดขึ้นในงานที่มีพฤติกรรมความยืดหยุ่นเป็นวัสดุเหนียว นอกจากนั้น ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปยังสามารถทำนายผลการครากของชิ้นงานได้ดีในทุกสภาวะความเค้น จึงมีขอบเขตสูงกว่าการใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ซึ่งจะให้ผลการออกแบบที่น่าเชื่อถือมากกว่า สำหรับวัสดุเหนียวที่มีความต้านแรงดึงคราก S_{yr} แตกต่างจากความต้านแรงกดคราก S_{yc} ก็มีทฤษฎีของมอร์รีในรูปแบบต่าง ๆ ใช้เลือกใช้ อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ต้องการผลการทดสอบชิ้นงานอย่างง่าย 3 ประการ คือ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกด และการทดสอบแรงเฉือน เพื่อนำมากำหนดเส้นขอบเขตของความเสียหาย



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบทฤษฎีความเสียหายกับการทดลอง

ที่มา N.E. Dowling (1993) Mechanical Behavior of Materials. Prentice-Hall. pp. 252.

จากรูปจะพบว่าผลการทดสอบวัสดุมีค่าที่สอดคล้องกับเทียบกับทฤษฎี ความเสียหาย และสำหรับโลหะประเภทเหล็กเหนียว ซึ่งเป็นวัสดุเหนียว ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป (ทฤษฎีวอนมิสเซส) จะให้ค่าที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับความเป็นจริง ในขณะที่ ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (ทฤษฎีของเทรסקา) จะให้ค่าเป็นเชิงอนุรักษ์มากกว่าคือกำหนด การครากไว้ต่ำกว่า

2.5 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลอง เป็นการใช้หลักการทางสถิติมาช่วยในการวิเคราะห์ผลปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองที่สนใจ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น “ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง” หมายถึง การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้น ๆ ซึ่งเรียกว่า ผลหลัก (Main Effect) เนื่องจากความเกี่ยวข้องกับปัจจัยเบื้องต้นของการทดลอง ในการทดลองบางอย่างอาจจะพบว่าความแตกต่างของผลคำตอบที่เกิดขึ้นบนระดับต่าง ๆ ของปัจจัยหนึ่งจะมีค่าไม่เท่ากันที่ระดับอื่น ๆ ทั้งหมดของปัจจัยอื่น ซึ่งหมายถึงว่า ผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่น ๆ นั่นเอง และเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ กรณีที่ปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ ระดับของปัจจัยจะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่ง ๆ หรืออาจจะเป็นการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้น ๆ ก็ได้ สำหรับใน 1 เรพลิเคตที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k สำหรับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยมาก การลดจำนวนการทดลองน่าจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า เรียกการทดลองนี้ว่า การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียล 2^{k-p}

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิด ได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้นการออกแบบ 2^k จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่จำนวนมากให้เหลือน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ จะสมมติว่าผลตอบสนองที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานเช่นนี้เป็นสิ่งที่ยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อ

กรองปัจจัยเมื่อเริ่มต้นทำการศึกษา ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อออกแบบหาปัจจัยในการปรับปรุงโครงสร้างที่นั่ง โดยปัจจัยการออกแบบคือตัวแปรที่จะปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างที่นั่ง และผลตอบสนองที่สนใจคือค่าความเค้นวอนมิสเสสของโครงสร้างที่นั่งที่ได้จากการวิเคราะห์ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ECE Regulation No.17

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรเชษฐ์ ชูติมา และคณะ (2547) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ความเสียหาย โดยวิเคราะห์ค่าของความเค้นที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่นั่ง Non Recliner Race-1 ซึ่งเป็นเบาะที่นั่งรถยนต์สำหรับแข่งขันด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ ภาระกรรมแบบสถิตยศาสตร์ตามมาตรฐาน FMVSS 207 โดยเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดสอบตามมาตรฐาน FIA ที่ผู้ผลิตที่นั่งส่งไปทดสอบแบบจำลองภาระกรรมแบบสถิตยศาสตร์ FMVSS นั้น ไม่มีภาระกรรมจากน้ำหนักหุ่นกระทำกับที่นั่ง จึงได้ทำการเปรียบเทียบภาระกรรมโดยอ้างอิง SAE กระทำโดยเปรียบเทียบจากผลการทดสอบที่นั่งมาตรฐาน และระยะการโก่งตัวของนักพิง จะได้ค่าโมเมนต์กระทำรอบจุดอ้างอิงที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์เท่ากับ 150 kg_rm จากนั้นนำไปคูณกับความเร่ง 20 g ตามมาตรฐาน FIA จะได้ค่าภาระกรรมแบบสถิตยศาสตร์ที่กระทำกับที่นั่ง ผลการจำลอง ตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นสูงเกิดจุดครากของวัสดุ คือจุดยึดด้านหน้าและจุดยึดหลัง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ผลการทดลองเกิดความเสียหาย ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

Abhinand Chelikani (2007) ศึกษาการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างนักพิงที่นั่งจากการให้ภาระกรรมโมเมนต์กระทำกับนักพิงแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยการให้ภาระกรรม 2 กรณีคือการให้แรงขนานกับพื้น และการให้ความเร็วเชิงมุมกับอุปกรณ์ทดสอบ ผลการวิเคราะห์ในกรณีการให้แรงตามแนวพื้น ได้ผลของโมเมนต์สูงสุดที่โครงสร้างที่นั่งสามารถรับได้ ในการวิเคราะห์ในกรณีนี้ที่นั่ง ผ่านมาตรฐานการทดสอบ ในการให้ภาระกรรมความเร็วเชิงมุมกับอุปกรณ์ทดสอบ โครงสร้างที่นั่งเกิดความเสียหาย จึงได้ทำการปรับปรุงโดยการเปลี่ยนสมบัติวัสดุ ใช้วัสดุที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดน้อย กลาง และมาก ในการปรับปรุง ผลการปรับปรุงการปรับสมบัติวัสดุมีอิทธิพลต่อการเพิ่มความแข็งแรงของที่นั่ง

Kitti Wirotrattanaphaphisan et al. (2008) ได้ศึกษาการกระบวนการพัฒนาปรับปรุงที่นั่ง โดยวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ในกระบวนการทดสอบจะทำการทดสอบโดยการให้ภาระกรรมเป็นแรงกระแทกขนาด 490.5 นิวตัน กระทำที่โครงสร้างเบาะซึ่งได้ผลของการกระจายตัวของความเค้นและการเคลื่อนตัวของโครงสร้างที่นั่ง

สามารถทำผลการวิเคราะห์มาทำการปรับปรุงโครงสร้างของที่นั่งโดยใช้วิธีการ Digital Mock Up ในกระบวนการปรับปรุง ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถลดเวลาในการออกแบบ ผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงโครงสร้างที่นั่ง และพัฒนารูปลักษณ์แบบของที่นั่งให้เป็นที่นิยมต่อไปได้

Brian R. Herbst et al. (2009) ได้ทำการศึกษาทดสอบความแข็งแรงของพนักพิงที่นั่ง โดยอ้างอิงการทดสอบการชนด้านหลังตามมาตรฐาน FMVSS 301 เปรียบเทียบกับการทดสอบแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ ผลการทดสอบแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ผลที่ได้จะเริ่มเกิดการผิครูปของพนักพิงที่มุม 60 องศา หุ่นทดสอบยังคงอยู่กับที่นั่งไม่หลุดออกไป ผลการทดสอบการเลื่อนชนกระแทกในกรณีที่เกิดเข็มขัด การผิครูปของพนักพิงและการเคลื่อนที่ของหุ่นทดสอบมีความสอดคล้องกับการทดสอบแบบกึ่งสถิตยศาสตร์ ส่วนในกรณีที่ไม่มีการคาดเข็มขัดหุ่นทดสอบเคลื่อนที่หลุดออกจากที่นั่ง ไปด้านหลังภายในห้องโดยสาร จากผลการทดสอบสามารถนำมาวิเคราะห์ห้ออกแบบที่นั่งเพื่อช่วยลดการบาดเจ็บที่กระดูกสันหลังของผู้โดยสารได้ต่อไป

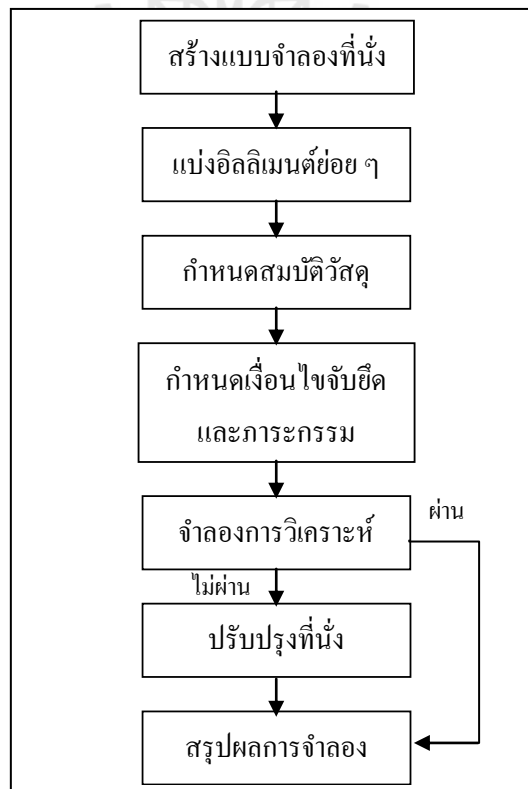
Li-Xin Guo et al. (2011) ได้ศึกษาการดูดซับพลังงานจากการกระแทกของศีรษะผู้ขับขี่กับที่นั่ง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์แบบพลศาสตร์ ซึ่งจำลองศีรษะเป็นรูปร่างอย่างง่าย และแบบจำลองจากที่นั่งจริง แต่ใช้เพียงโครงสร้างที่นั่งในการจำลอง ในการวิเคราะห์ได้จำลองสถานการณ์ที่ศีรษะของผู้ขับขี่กระแทกกับพนักพิงศีรษะ และกรณีที่ศีรษะของผู้โดยสารด้านหลังกระแทกกับพนักศีรษะของที่นั่งคนขับ จากผลการศึกษาพบว่าแผ่นที่เป็นโครงสร้างหลักของพนักพิงและก้านที่เป็นส่วนยึดพนักพิงศีรษะนั้น เป็นส่วนสำคัญในการดูดซับพลังงานจากการกระแทกของศีรษะของทั้งสองกรณี ผลของการดูดซับพลังงานของพนักพิงศีรษะเป็นที่น่าพึงพอใจ และสามารถนำข้อกำหนดในการจำลองเพื่อไปใช้ในการอ้างอิงในการออกแบบพนักพิงศีรษะได้

Mohan D Karambe et al. (2013) ได้ทำการศึกษาการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างพนักพิงของที่นั่ง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ เพื่อวิเคราะห์หาค่าความเค้นและการเคลื่อนตัวของที่นั่งหลังได้รับการทดสอบ โดยการทดสอบโมเมนต์กับพนักพิงหลังตามมาตรฐานการทดสอบซึ่งใช้ภาระกระทำที่ขึ้นส่วน โครงสร้างด้านบนของพนักพิง และการทดสอบการชนกระแทกด้านหลังจะให้ภาระกรรมกับชิ้นส่วนทั้งหมดของพนักพิงตามมาตรฐานการทดสอบการชนกระแทกด้านหลัง ผลการวิเคราะห์จากการทดสอบโมเมนต์ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุดมีค่าไม่เกินค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด ดังนั้นจากการวิเคราะห์โครงสร้างที่นั่งจึงผ่านมาตรฐานความปลอดภัยตามมาตรฐาน ECE Regulation No.17 ส่วนการวิเคราะห์การชนกระแทกด้านหลังผลของความเค้นมีค่ามากเกินค่าความต้านทานแรงดึงจึงทำให้ไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ จึงได้ทำการปรับปรุงด้วยการเพิ่มความหนาของโครงสร้าง ผลที่ได้ค่าความเค้นลดลงน้อยกว่าค่าความต้านทานแรงดึง โครงสร้างที่นั่งผ่านมาตรฐานการทดสอบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยศึกษาการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้ง โดยจำลองสถานการณ์ที่ผู้โดยสารกระแทกกับพนักงานที่นั่ง ภาระที่กระทำกับพนักงานกำหนดให้เป็นแบบสถิตยศาสตร์ตามมาตรฐานการทดสอบ ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ มีขั้นตอนการเตรียมแบบจำลองโครงสร้างที่นั้งก่อนที่จะนำไปการวิเคราะห์ จะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองการแบ่งเอลิเมนต์เป็นส่วนย่อย ๆ การกำหนดเงื่อนไขค่าสมบัติวัสดุและเงื่อนไขภาระกระทำของแบบจำลองที่สอดคล้องกับข้อกำหนดการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งตามมาตรฐาน ECE Regulation No.17 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรมจะสร้างและแก้ระบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะใช้โปรแกรม MSC Marc 2011 ขั้นตอนในกระบวนการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 3.1

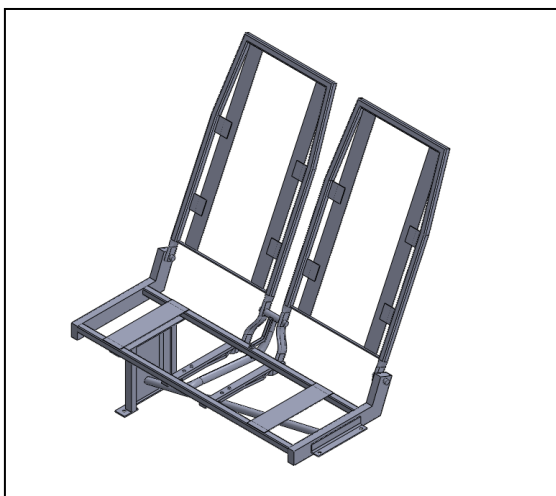


รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

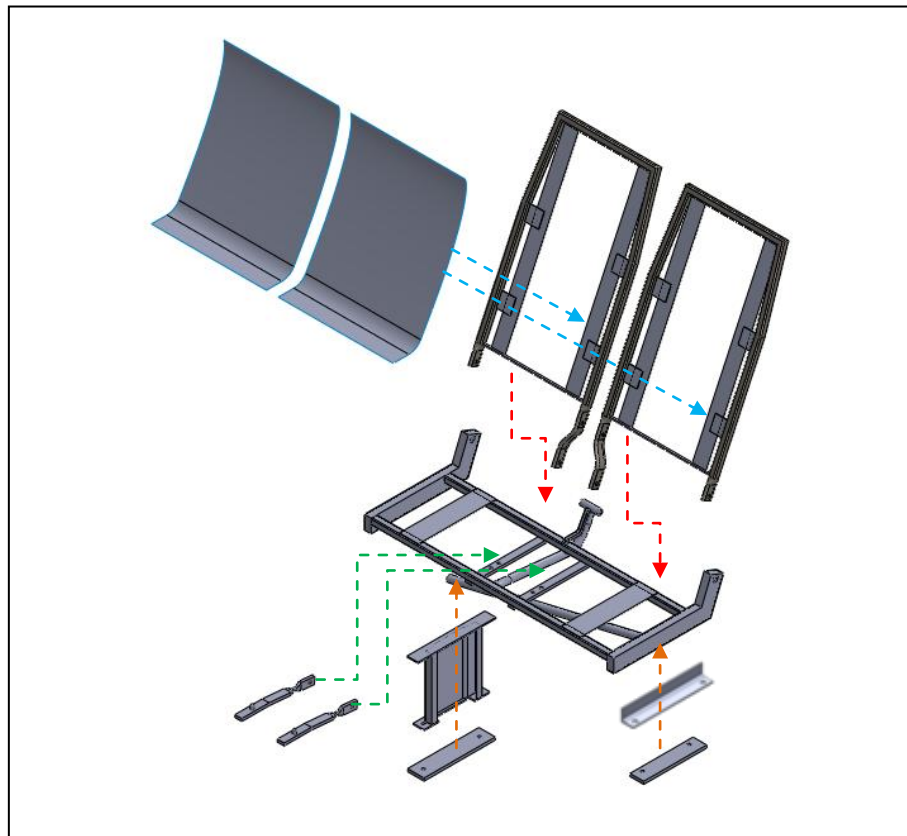
ผลจากการจำลองจะถูกนำมาวิเคราะห์หาจุดที่เกิดความเสียหาย แล้วทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างที่นั่นเพื่อให้ที่นั่นผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่นต่อไป และในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองในส่วนท้ายของบท ซึ่งจะแสดงในรายละเอียดต่อไป

3.1 การสร้างแบบจำลอง

โครงสร้างที่นั่งของรถโดยสารที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เป็นโครงสร้างที่นั่งของบริษัท อู่เชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด เป็นที่นั่งแบบมีเบาะนั่งร่วมกัน พนักพิงหลังแยกกันสองข้าง และมีพนักพิงศีรษะรวมอยู่กับพนักพิงหลังเป็นชิ้นเดียวกัน ซึ่งที่นั่งเป็นที่นั่งที่ใช้สำหรับรถโดยสารมาตรฐาน 3 หรือรถโดยสารที่ไม่มีเครื่องปรับอากาศ ในกระบวนการสร้างแบบจำลอง CAD model ใช้โปรแกรม SolidWork 2011 ขึ้นรูปชิ้นงานและประกอบเป็นโครงสร้างที่นั่ง ซึ่งส่วนประกอบของโครงสร้างที่นั่ง สามารถแบ่งส่วนประกอบหลักของโครงสร้างออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ พนักพิงหลังฐานที่นั่ง ระบบปรับเอน และจุดยึดที่นั่ง ซึ่งชิ้นส่วนรูปพรรณจะเชื่อมติดกันด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองแต่ละส่วนจึงกำหนดให้มีการเชื่อมต่อกันแบบยึดติดแน่น และในการประกอบส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกันนั้นใช้สลักเกลียว ประกอบเป็นโครงสร้างที่นั่งหนึ่งชุด และจะทำการจับยึดโครงสร้างที่นั่งเข้ากับโครงสร้างของรถ โดยใช้สลักเกลียวยึดที่นั่งเข้ากับตัวรถ ส่วน โครงสร้างตัวรถที่ใช้เป็นจุดยึดที่นั่งนั้นสร้างเป็นชิ้นส่วนที่มีขนาดเพียงพอที่จะจับยึดเท่านั้นเพื่อไม่ให้มีจำนวนอิลลิเมนต์มากเกินไป และช่วยลดเวลาในการวิเคราะห์ ลักษณะของโครงสร้างและส่วนประกอบแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3



รูปที่ 3.2 โครงสร้างแบบจำลองที่นั่ง



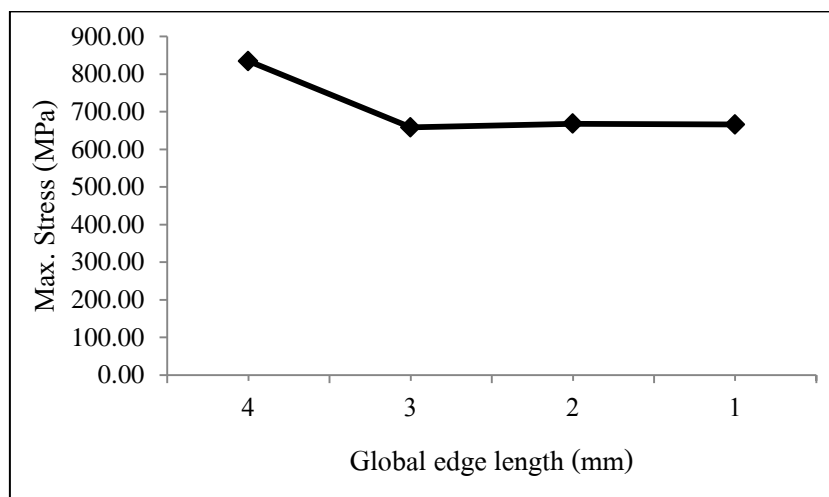
รูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของ โครงสร้างที่นั่ง

จากรูปที่ 3.3 ส่วนประกอบของ โครงสร้างที่นั่ง ได้มีการลดทอนความซับซ้อนของแบบจำลอง เพื่อให้ง่ายและลดเวลาในการวิเคราะห์ โดยจะการวิเคราะห์เฉพาะส่วนที่เป็น โครงสร้างหลักของที่นั่ง จะไม่พิจารณาถึงเบาะหุ้มที่นั่ง และพิจารณาตัดส่วนที่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งออก เช่น ส่วนที่เป็นแป้นเหยียบเพื่อปรับระดับเอนพนักพิง ซึ่งแบบจำลองจะปรับพนักพิงโดยกำหนดให้พนักพิงทำมุม 25 องศาเมื่อวัดเทียบกับแนวตั้ง ในการกำหนดจุดหมุนของอุปกรณ์ทดสอบหรือจุด R ซึ่งเป็นจุดเฉพาะของแต่ละที่นั่งแต่ละผู้ผลิตที่นั่ง อ้างอิงตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่นั่ง จุดยึดที่นั่ง และพนักพิงศีรษะของยานยนต์ แผ่นจำลองหลังจะประกอบเข้ากับโครงสร้างที่นั้งผ่านจุด R ซึ่งจะทำให้แผ่นจำลองหลังประกอบแนบกับพนักพิง

3.2 การพิจารณาแบ่งอิลลิเมนต์

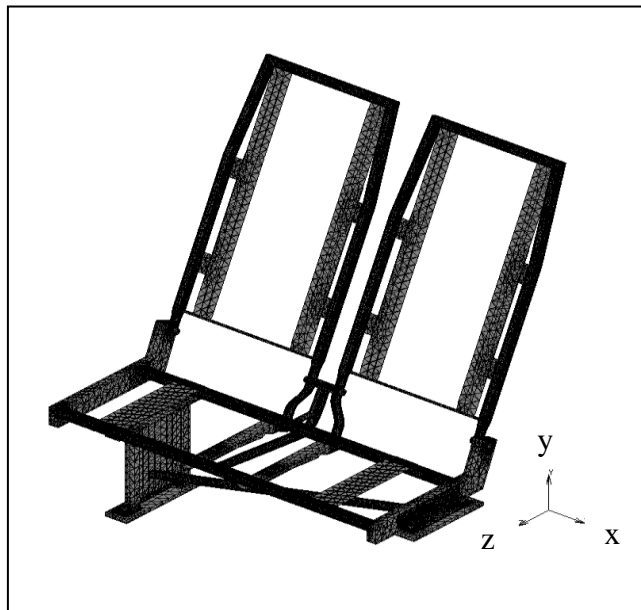
การแบ่งอิลลิเมนต์ของโครงสร้างที่นั้งนั้นจะใช้อิลลิเมนต์แบบทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ (Quadratic tetrahedron elements : TET10) ซึ่งเป็นอิลลิเมนต์สำหรับปัญหาสามมิติที่ใช้ได้ง่ายที่สุด เนื่องจากสามารถแบ่งอิลลิเมนต์ได้ครอบคลุมโดเมนของปัญหาได้มากที่สุด ในการแบ่งอิลลิเมนต์

ใช้โปรแกรม MSC Patran 2011 โดยนำแบบจำลองไปทำการแบ่งอิลลิเมนต์ซึ่งต้องพิจารณาถึงส่วนที่ซับซ้อนของแบบจำลองเพื่อพิจารณาถึงขนาดอิลลิเมนต์ที่เหมาะสม การหาขนาดอิลลิเมนต์ที่เหมาะสมนั้น ได้ทำการปรับขนาด Global edge length ของอิลลิเมนต์ เพื่อให้ได้ขนาดของอิลลิเมนต์ที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ไม่มีความแตกต่างกันที่ขนาดอิลลิเมนต์ต่างกัน



รูปที่ 3.4 การหาขนาดอิลลิเมนต์ที่เหมาะสม

จากรูปที่ 3.4 ทำการหาขนาดอิลลิเมนต์ โดยได้ขนาด Global edge length ที่ไม่ทำให้เกิดความแตกต่างของผลลัพธ์เกิน 5 % ขนาด Global edge length ที่เล็กกว่า 3 มิลลิเมตรเป็นต้นไป จะให้ผลลัพธ์ที่มีความแตกต่างกันไม่เกิน 5 % ดังนั้นแบบจำลองโครงสร้างที่นี้จึงเลือกใช้ขนาด Global edge length ขนาด 3 มิลลิเมตร ทำให้แบบจำลองโครงสร้างที่นี้สามารถแบ่งอิลลิเมนต์ได้ 153,878 อิลลิเมนต์ และ 304,148 จุดต่อ หลังจากแบ่งอิลลิเมนต์เรียบร้อยแล้วจะทำการแบ่งกลุ่มของอิลลิเมนต์เป็นกลุ่มตามส่วนประกอบของโครงสร้างที่นี้ เพื่อจัดเป็นกลุ่มของชิ้นส่วนต่างๆ ของแบบจำลองและส่งออกไปเป็นที่ละส่วน เพื่อนำเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3.5 แบบจำลองโครงสร้างที่นั่งที่ทำการแบ่งอิลลิเมนต์

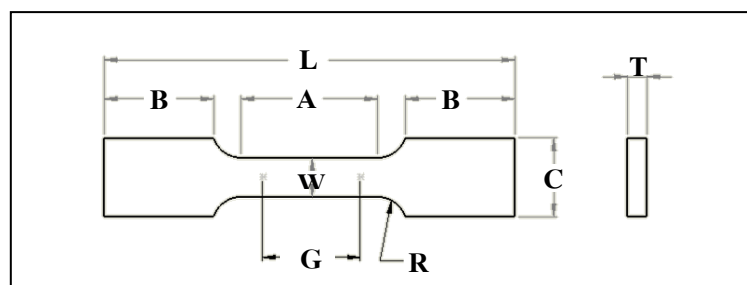
3.3 การทดสอบสมบัติวัสดุ

โครงสร้างที่นั่งที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นทำจากเหล็กรูปพรรณที่นำมาเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้าง ประกอบไปด้วยเหล็กกล่อง และเหล็กแผ่นบาง ซึ่งมีสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน ในการจำลองการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ จำเป็นต้องทราบค่าสมบัติวัสดุที่ประกอบเป็นโครงสร้างที่นั่งที่จะนำไปวิเคราะห์ เพื่อนำค่าสมบัติวัสดุนั้นไปกำหนดให้กับแบบจำลอง ซึ่งค่าสมบัติวัสดุจะเป็นตัวกำหนดลักษณะการเคลื่อนตัวเมื่อรับภาระกระทำและการเสียรูปของโครงสร้าง เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมีค่าใกล้เคียงกับการผลการทดสอบจริงมากที่สุด

3.3.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง

จากวัสดุที่ใช้เพื่อนำมาประกอบทำเป็นโครงสร้างที่นั่งนั้น ประกอบไปด้วยเหล็กรูปพรรณ 2 ชนิดคือ เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสและเหล็กแผ่นบาง ในการทดสอบสมบัติของวัสดุนั้น ใช้มาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8 ในการทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าสมบัติวัสดุที่ถูกต้องเป็นไปตามเงื่อนไขการทดสอบ ตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของโลหะที่อุณหภูมิห้อง ในการเตรียมชิ้นงานเพื่อทำการทดสอบแรงดึงนั้นมีลักษณะเป็นรูปร่างเป็นดัมเบล (Dumbbell shape) หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมดังแสดงรูปที่ 3.6 ซึ่งการตัดชิ้นงานทำโดยการตัดด้วยลวดไฟฟ้า (EDM Wire cut) หลังจากนั้นนำไปทดสอบแรงดึง และนำผลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Curve) เพื่อหาสมบัติทางกลของวัสดุ เช่น ค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่น

(Modulus of elasticity, Young's modulus) จุดคราก (Yield point) ความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Tensile strength)



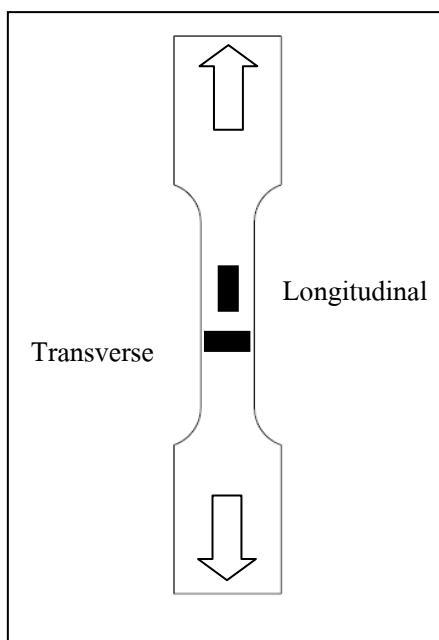
รูปที่ 3.6 ขนาดของชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานที่ทำการทดสอบแรงดึง

	ชิ้นงานมาตรฐาน (มิลลิเมตร)	ชิ้นงานลดขนาด (มิลลิเมตร)
G - ความยาวเกจ	50±0.1	25±0.1
W - ความกว้าง	12.5±0.2	6±0.1
R - รัศมีการลบมุม	12.5	6
L - ความยาวชิ้นงาน	200	100
A - ความยาวส่วนที่ลดขนาด	57	32
B - ความยาวส่วนจับยึด	50	30
C - ความกว้างส่วนจับยึด	20	10

ขนาดชิ้นงานจะตัดตามขนาดดังตารางที่ 3.1 โดย T คือความหนาของชิ้นงานจะขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็ก เหล็กแผ่นบางจะใช้ขนาดชิ้นงานมาตรฐาน ส่วนเหล็กกล่องจะใช้ขนาดชิ้นงานลดขนาด เนื่องจากความกว้างของเหล็กกล่องไม่สามารถที่จะตัดขนาดของชิ้นงานมาตรฐานได้ ซึ่งจะได้ชิ้นงานเพื่อนำไปทดสอบแรงดึงต่อไป จากนั้นจะทำการติดเกจวัดความเครียด (Stain gage) เพื่อวัดค่าความเครียดในแนวแกนที่แรงกระทำ และแนวขวางหรือตั้งฉากกับแนวแรงกระทำ ตามมาตรฐานการทดสอบหาอัตราส่วนปัวซองของที่อุณหภูมิห้อง ASTM E132 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เพื่อวัดค่าความเครียดนำไปหาอัตราส่วนปัวซองต่อไป สำหรับชิ้นงานทดสอบมาตรฐานใช้เกจวัดความเครียด ชนิด KFG-2-120-C1-11L1M2R เกจวัดความเครียดมีความยาวเกจ 2 มิลลิเมตร และ

ชิ้นงานลดขนาดใช้เกจวัดความเครียด ชนิด KFG-02-120-C1-11L1M2R เกจวัดความเครียดมีความยาวเกจ 0.2 มิลลิเมตร ยี่ห้อ KYOWA ติดเกจวัดความเครียดเข้ากับชิ้นงานทดสอบ



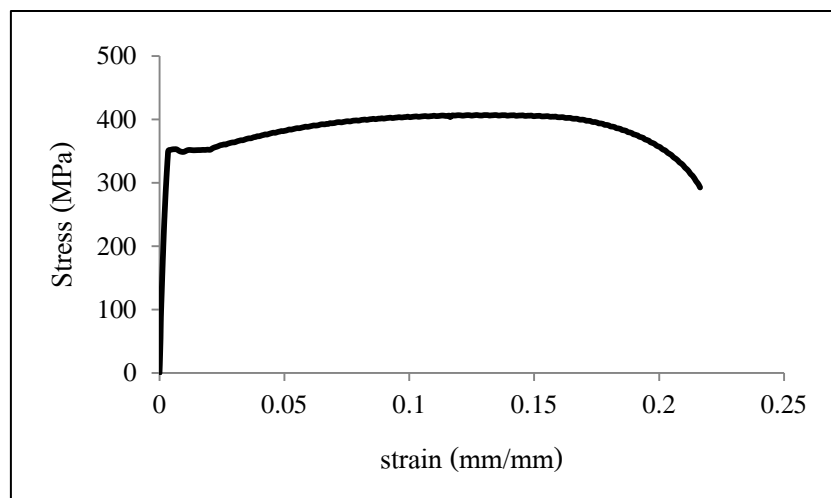
รูปที่ 3.7 การติดเกจวัดความเครียด

3.3.2 การทดสอบแรงดึง

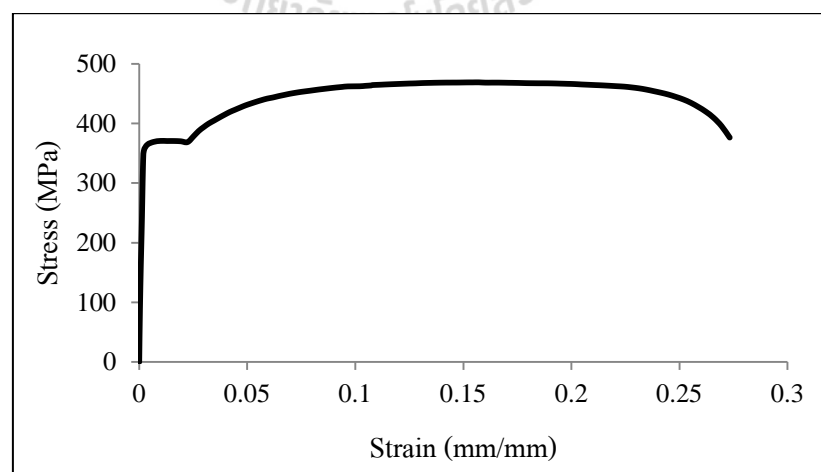
การทดสอบแรงดึงนั้นทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM E8 หลังจากเตรียมชิ้นงานเสร็จแล้ว จะทำการทดสอบ โดยใช้ชุดทดสอบแรงดึงของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine : UTM ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 5582 ที่มี load cell วัดแรงขนาดสูงสุดขนาด 100 กิโลนิวตัน ในการทดสอบทำการจับยึดชิ้นงานด้วยชุดทดสอบแรงดึง และต่อสายสัญญาณของเกจวัดความเครียดเข้ากับเครื่องอ่านค่าและบันทึกค่าความเครียด (strain indicator and recorder) ยี่ห้อ Vishay รุ่น model P3 เมื่อเตรียมการเรียบร้อยแล้วทำการทดสอบโดยใช้ความเร็วในการดึงทดสอบ (Cross Head Speed) ที่ความเร็ว 0.75 มิลลิเมตรต่อวินาทีสำหรับชิ้นงานมาตรฐาน และ 0.375 มิลลิเมตรต่อวินาทีสำหรับชิ้นงานลดขนาด ทำการทดสอบและบันทึกค่าแรงที่กระทำ และการเปลี่ยนแปลงค่าความเครียด เมื่อทำการดึงจนวัสดุขาดแล้ว นำผลที่บันทึกไว้จากการทดสอบมาวิเคราะห์ผลเพื่อหาค่ายังมอดูลัส จุดคราก และความต้านทานความแรงดึงสูงสุด จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด อัตราส่วนปัวซอง สามารถหาได้จากการวัดค่าความเครียดในแนวแรงดึงและความเครียดขวางแนวแรงดึง

3.3.3 ผลการทดสอบค่าสมบัติวัสดุ

จากผลการทดสอบแรงดึงสามารถนำค่าที่ได้บันทึกไว้มาหาค่าสมบัติของวัสดุ โดยเหล็กที่ใช้ทำการทดสอบคือเหล็กกล่องรูปพรรณ และเหล็กแผ่นบาง ซึ่งสามารถหาค่ายังมอดูลัสได้ จากความสัมพันธ์ของความเค้นกับความเครียดในช่วงยืดหยุ่น ส่วนจุดครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุดนั้นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับ ของทั้งเหล็กกล่องและเหล็กแผ่นบางแสดงในรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

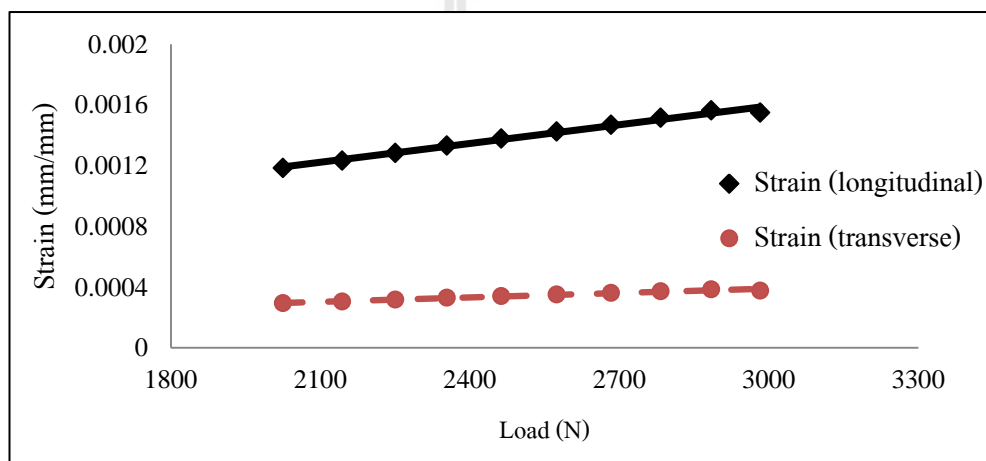


รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กกล่อง

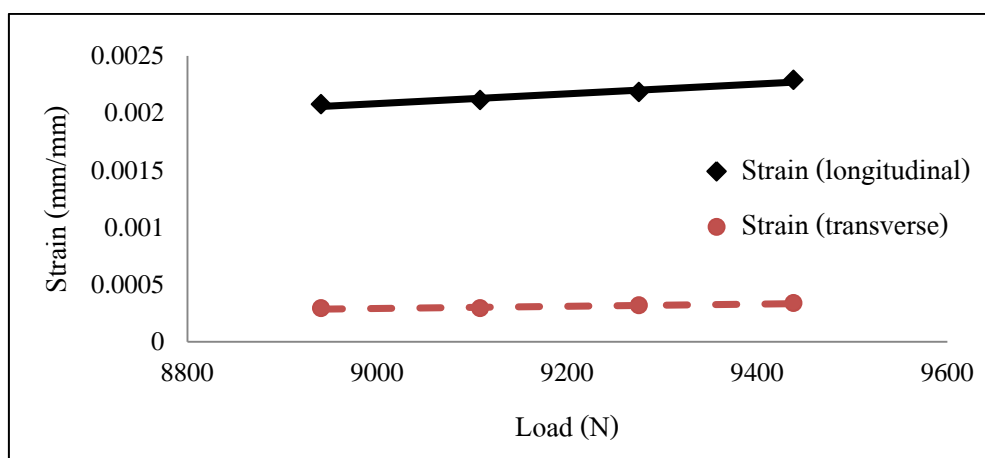


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเหล็กแผ่นบาง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด สามารถหาค่าสมบัติทางกลของวัสดุได้ ค่า Young's Modulus สามารถหาได้จากกฎของฮุก (Hooke's Law) : $\sigma = E\varepsilon$ ในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น ซึ่งค่า Young's Modulus ของเหล็กกล่องและเหล็กแผ่นบางมีค่าเท่ากับ 122.334 GPa และ 193.392 GPa ตามลำดับ ส่วนจุดครากมีค่าเท่ากันทั้งสองวัสดุอยู่ที่ 370 MPa และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของเหล็กกล่องและเหล็กแผ่นบางเท่ากับ 406.87 MPa และ 469.04 MPa ตามลำดับ ค่าสมบัติของวัสดุที่ได้กล่าวมาในข้างต้นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด ส่วนอัตราส่วนปัวซองนั้นสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับแรงที่กระทำของทั้งสองวัสดุซึ่งแสดงได้จากรูปที่ 3.10 และ 3.11



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นของเหล็กกล่อง



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับความเค้นของเหล็กแผ่นบาง

$$\nu = \left(\frac{d\varepsilon_t}{dF} \right) / \left(\frac{d\varepsilon_l}{dF} \right) \quad (3-1)$$

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับแรงกระทำสามารถหาอัตราส่วนปัวซองได้จากสมการที่ 3-1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความเครียดทั้งสองแกน ค่าอัตราส่วนปัวซองของเหล็กกล่องและเหล็กแผ่นบางกับ 0.25 เท่ากันทั้งสองวัสดุ ในการทดสอบสมบัติของวัสดุสามารถนำค่าจากการทดสอบไปกำหนดให้กับแบบจำลองเพื่อให้ได้การเสวยรูปของโครงสร้างที่นั้งในแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับวัสดุจริง

3.3.4 การกำหนดสมบัติวัสดุให้กับแบบจำลอง

ในการกำหนดค่าสมบัติวัสดุให้กับแบบจำลองจะกำหนดค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยจะกำหนดให้มีสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (Elastic Plastic Isotropic Material) กำหนดมอดูลัสความยืดหยุ่นในช่วงการเสวยรูปแบบยืดหยุ่น และเมื่อความเค้นที่โครงสร้างมีค่าถึงจุดคราก โครงสร้างจะเกิดการเสวยรูปในช่วงพลาสติก ซึ่งจะกำหนดการสมบัติวัสดุเป็นมอดูลัสช่วงพลาสติก (Tangent's Modulus) เป็นความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียดช่วงที่สอง แต่ค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุนั้นเป็นค่าความเค้นทางวิศวกรรม ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะเห็นว่าค่าความเค้นหลังค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดจะมีค่าลง แต่ในความเป็นจริงค่าความเค้นจะไม่ลดลงเนื่องจากการเสวยรูปของหน้าตัดชิ้นงานทดสอบแรงดึง เมื่อพื้นที่หน้าตัดลดลงทำให้ค่าความเค้นยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งวัสดุขาด แต่ในการทดสอบวัสดุนั้นจะกำหนดให้พื้นที่หน้าตัดมีขนาดคงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเปลี่ยนความเค้นทางวิศวกรรมให้เป็นความเค้นและความเครียดจริงก่อน หลังจากนั้นจึงหาความชันช่วงพลาสติก การเปลี่ยนความเค้นและความเครียดทางวิศวกรรมเป็นความเค้นและความเครียดจริงสามารถทำได้โดย

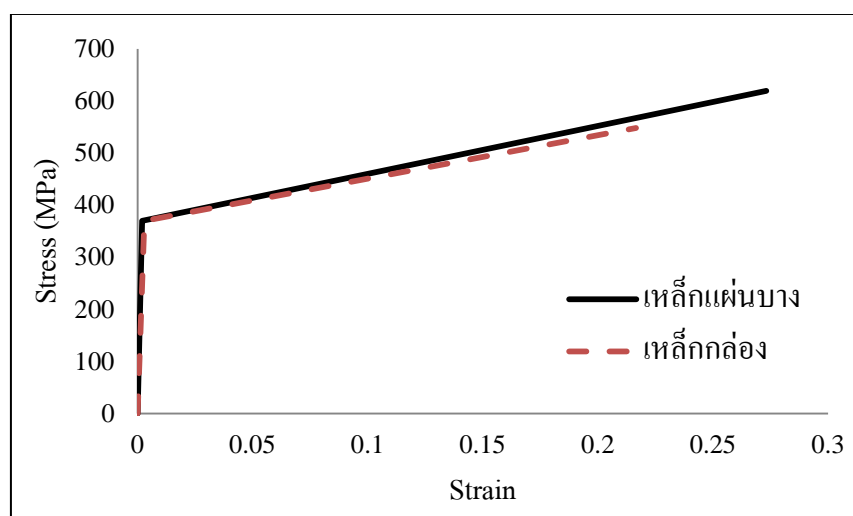
$$\varepsilon_{\text{true}} = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad (3-2)$$

$$\sigma_{\text{true}} = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \quad (3-3)$$

จากสมการที่ 3-2 และ 3-3 สามารถที่จะหาความเค้นความเครียดจริงได้ หลังจากนั้นจึงหาค่ามอดูลัสช่วงพลาสติก ในการกำหนดค่ามอดูลัสช่วงพลาสติกนั้นจากความสัมพันธ์ของความเค้นจริงกับความเครียดจริง โดยทำการตัดกราฟช่วงยืดหยุ่นออกให้เหลือเพียงช่วงพลาสติก ซึ่งค่าที่กำหนดให้กับแบบจำลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติวัสดุที่กำหนดให้กับแบบจำลอง

สมบัติวัสดุ	เหล็กกล่อง	เหล็กแผ่นบาง
Young's Modulus (GPa)	122.334	193.392
Poisson's ratio	0.25	0.25
Yield strength (MPa)	370	370
Tangent's Modulus (MPa)	833.41	906.93



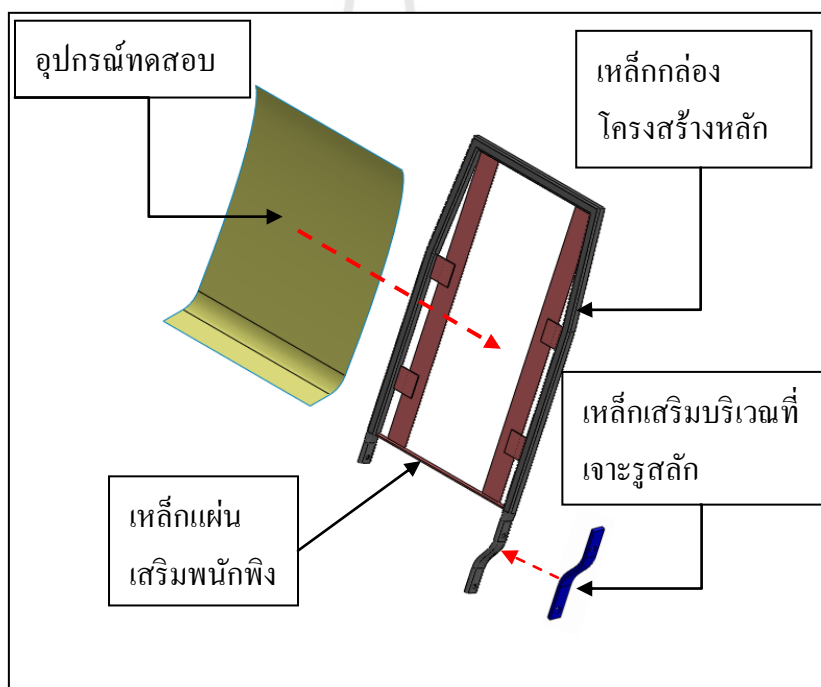
รูปที่ 3.12 กราฟสมบัติวัสดุที่กำหนดให้กับแบบจำลอง

3.4 การกำหนดเงื่อนไขการจำลอง

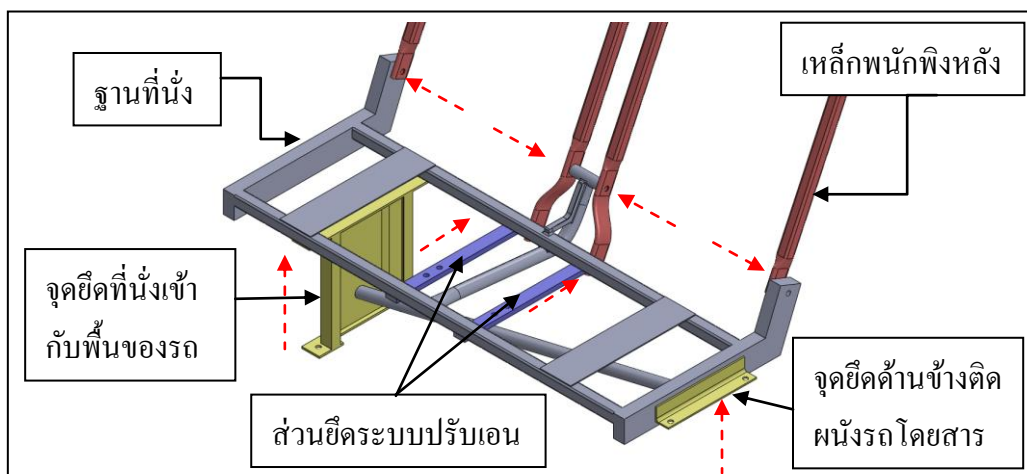
กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ในการแก้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบนั้นจะใช้วิธีกำหนดเงื่อนไขให้กับแบบจำลอง ซึ่งจะทำได้ผลลัพธ์ของจุดต่อได้ในบางจุดจึงทำให้แก้สมการได้ ในกระบวนการวิเคราะห์นั้นใช้โปรแกรม MSC Marc 2011 ทำการวิเคราะห์ ในขั้นตอนการวิเคราะห์นั้นเริ่มจากนำแบบจำลองที่ทำการแบ่งเอลิเมนต์เข้าสู่โปรแกรมทีละชิ้นส่วน ซึ่งจะนำเข้าเพียงเอลิเมนต์และจุดต่อของชิ้นส่วนประกอบนั้น ๆ หลังจากนั้นกำหนดสมบัติวัสดุให้กับแบบจำลองตามหัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้น และขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขจะทำการกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนประกอบ เงื่อนไขการจับยึดของโครงสร้างที่นิ่ง และเงื่อนไขการให้ภาระกรรมตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นิ่ง ซึ่งจะแสดงในรายละเอียดต่อ

3.4.1 เงื่อนไขการสัมผัส

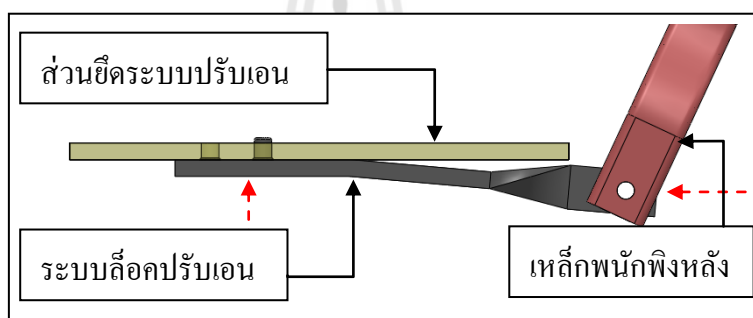
การนำชิ้นส่วนแต่ละชิ้นของโครงสร้างเข้าสู่โปรแกรมทีละชิ้น จะทำให้แต่ละชิ้นนั้นมีจุดต่อแต่ละจุดไม่เป็นจุดเดียวกัน อิทธิพลของแต่ละชิ้นส่วนจะไม่มี การเชื่อมต่อกัน ดังนั้น ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นไม่เป็นชิ้นเดียวกัน จึงจำเป็นที่จะต้องกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสให้แก่ชิ้นส่วนนั้น เพื่อให้ทราบว่าชิ้นส่วนนั้นสัมผัสติดกับชิ้นส่วนใดบ้างและลักษณะการสัมผัสเป็นอย่างไร ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนนั้นส่งผ่านภาระกรรมที่เกิดขึ้นต่อไปยังชิ้นส่วนที่สัมผัสกันต่อไป ลักษณะของการสัมผัสนั้นได้กำหนดเป็นสองลักษณะคือ การสัมผัสกันแบบยึดติดแน่น (Glue contact) ซึ่งจะทำให้ชิ้นส่วนที่สัมผัสกันยึดติดกันเคลื่อนที่ไปพร้อมกันหรือเปรียบเสมือนเป็นชิ้นเดียวกัน ส่วนลักษณะที่สองคือการสัมผัสแบบเลื่อนไถล (Touching contact) คือชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นที่สัมผัสกันสามารถเลื่อนไถลในหน้าสัมผัสกันได้ ซึ่งการสัมผัสกันแต่ละชิ้นมีดังที่จะกล่าวต่อไป



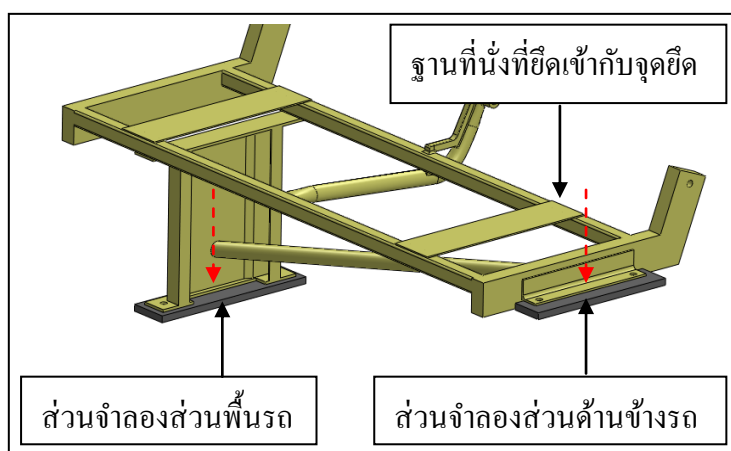
รูปที่ 3.13 การสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนพนักพิง



รูปที่ 3.14 การสัมพันธ์กันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนฐานที่นั่ง



รูปที่ 3.15 การสัมพันธ์กันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนระบบล๊อคปรับเอน



รูปที่ 3.16 การสัมพันธ์กันระหว่างชิ้นส่วนของชิ้นส่วนจุดยึด

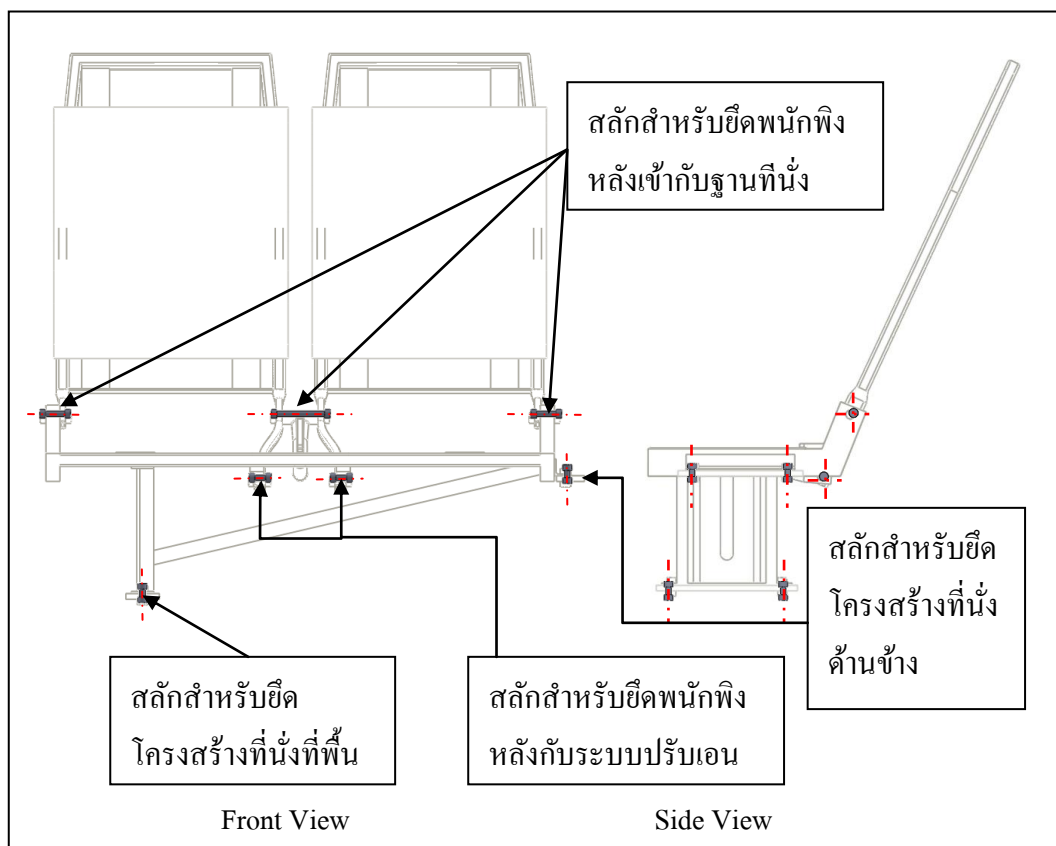
จากรูปที่ 3.13-3.16 ส่วนที่เป็นชิ้นส่วนแรกคือชิ้นส่วนสี่เหลี่ยม สัมผัสชิ้นส่วนอื่นที่เป็นสี่เหลี่ยม ๑ ตามรูป ซึ่งจะทำได้คู่สัมผัสดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การสัมผัสของชิ้นส่วนโครงสร้างที่นิ่ง

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	ลักษณะการสัมผัส
เหล็กโครงสร้างหลักปีก	อุปกรณ์ทดสอบ (แผ่นจำลองหลัง)	Touching
	เหล็กแผ่นเสริมปีก	Glue
	เหล็กเสริมบริเวณที่เจาะรูสลัก	Glue
ฐานที่นิ่ง	ปีกหลัง	Touching
	ส่วนยึดระบบปรับเอน	Glue
	จุดยึด	Glue
ระบบล้อปรับเอน	ส่วนยึดระบบปรับเอน	Touching
	ปีกหลัง	Touching
จุดยึด	โครงสร้างตัวรถ	Touching

จากรูปที่ 3.13-3.16 คือรูปตำแหน่งของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่จะสัมผัสกัน ซึ่งลักษณะการสัมผัสจะแสดงในตารางที่ 3.3 ส่วนบริเวณที่เป็นรูเจาะที่ใช้ยึดชิ้นส่วนทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกัน โครงสร้างจะยึดด้วยสลักเกลียวและแป้นเกลียว (Bolt and Nut) ซึ่งจุดที่ทำการยึดนั้นจะแสดงในรูปที่ 3.17 โดยมีสลักสำหรับยึดปีกหลัง 3 ตัวทำหน้าที่เป็นจุดหมุนของปีก สลัก 2 ตัวที่เป็นส่วนยึดระบบปรับเอนเพื่อกำหนดมุมเอียงของปีกหลัง และสลักที่ใช้ยึดโครงสร้างที่นิ่ง เพื่อให้ที่นิ่งอยู่กับที่จำนวน 4 ตัว ซึ่งจะกำหนดให้สลักเกลียวกับแป้นเกลียวสัมผัสกันเป็นแบบยึดแน่น และสลักเกลียวกับแป้นเกลียวทุกชิ้นสัมผัสกับส่วนอื่นที่สลักเกลียวและแป้นเกลียวสัมผัสนั้นจะกำหนดให้เป็นแบบ Touching

ในการหาจุดสัมผัสของอิลลิเมนต์ในแต่ละชิ้นส่วนนั้น จะกำหนดให้หาจุดสัมผัสแบบจุดต่อสัมผัสกับผิวของอิลลิเมนต์ (Node to Segment) นั่นคือจุดต่อของชิ้นส่วนที่แรกไปสัมผัสกับผิวของอิลลิเมนต์ใด ๆ ของชิ้นที่สอง ซึ่งกำหนดให้เป็นการหาการสัมผัสเป็นแบบอัตโนมัติ โดยโปรแกรมจะทำการหาจุดสัมผัสจากชิ้นที่หนึ่งไปสัมผัสกับชิ้นที่สอง และหาจากชิ้นที่สองไปสัมผัสกับชิ้นที่หนึ่ง ซึ่งจะทำได้คู่สัมผัสกันระหว่างสองชิ้นส่วนดังในตารางที่ 3.3 การสัมผัสกันทั้งสองชิ้นส่วนจะสัมผัสกันโดยมีจุดต่อสัมผัสกับผิวอิลลิเมนต์จากทั้งสองด้านของชิ้นส่วนที่มาสัมผัสกัน



รูปที่ 3.17 การสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของสลักเกลียวและเป็นเกลียว

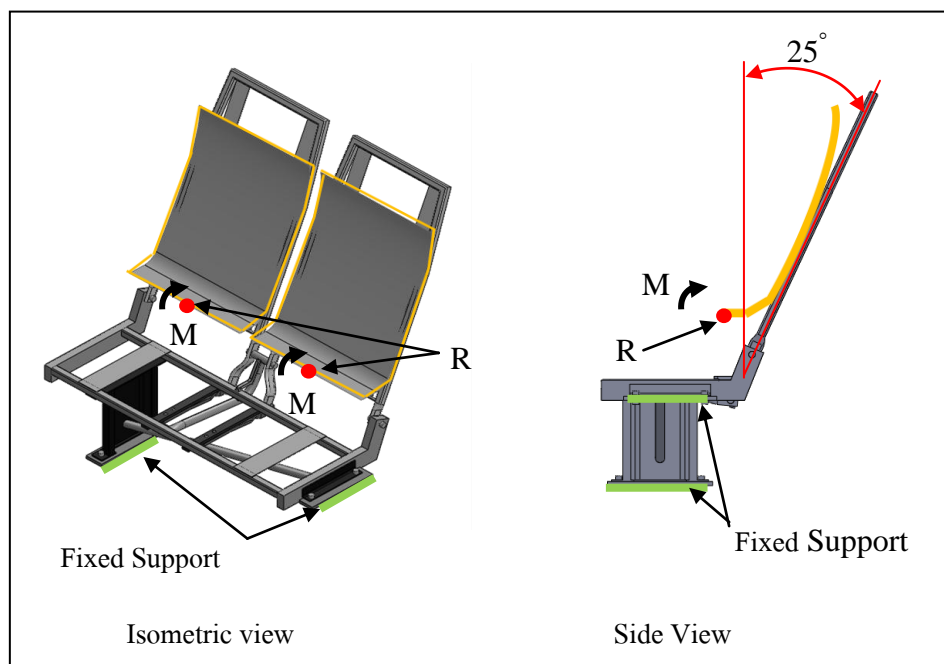
3.4.2 เงื่อนไขการจับยึด

การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งตามมาตรฐาน ECE R17 การทดสอบ โดยจะทำการจับยึดโครงสร้างที่นั่งให้สอดคล้องกับการยึดที่นั่งตามที่ติดตั้งที่นั่งในรถโดยสารจริง ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขของการจับยึดโครงสร้างที่นั่งจะต้องมีลักษณะการจับยึดโครงสร้างที่นั่งจริง จึงได้ทำการจับยึดโดยการกำหนดให้โครงสร้างตัวรถในส่วนที่เป็นพื้นรถและผนังด้านข้างที่เป็นจุดยึดที่นั่งให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทางและไม่มีการหมุนรอบแกนใด ๆ ในทุกทิศทาง และเมื่อโครงสร้างที่นั่งสัมผัสกันกับโครงสร้างตัวรถจึงทำให้โครงสร้างที่นั่งไม่มีการเคลื่อนที่และหมุนรอบแกนใด ๆ ไปด้วย

การกำหนดจุดหมุนของอุปกรณ์ทดสอบนั้น จะทำการกำหนดโดยให้จุดหมุนของอุปกรณ์ทดสอบที่จุด R นั้นไม่มีการเคลื่อนที่ในทุกทิศทาง และจะกำหนดให้สามารถหมุนได้ในทิศทาง x หรือหมุนเข้าหาพนักพิงหลังได้เพียงทิศทางเดียว ทิศทางอื่นไม่สามารถหมุนได้ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทดสอบสามารถส่งภาระกรรมที่กระทำไปยังโครงสร้างที่นั่งได้ตามเงื่อนไขการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.18

3.4.3 เงื่อนไขการให้ภาระกรรม

ตามมาตรฐานการทดสอบนั้น การให้ภาระกรรมจะให้ผ่านอุปกรณ์ทดสอบเป็นโมเมนต์ขนาดเท่ากับ 530 นิวตันเมตร ซึ่งเกิดโมเมนต์รอบจุดหมุนของอุปกรณ์ทดสอบ โดยภาระกรรมนั้นจะให้ที่อุปกรณ์ทดสอบทั้งสองด้าน โดยจะให้ภาระกรรมแบบสถิตยศาสตร์ ภาระกรรมที่กระทำจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึง 530 นิวตันเมตร ดังแสดงในรูป 3.18

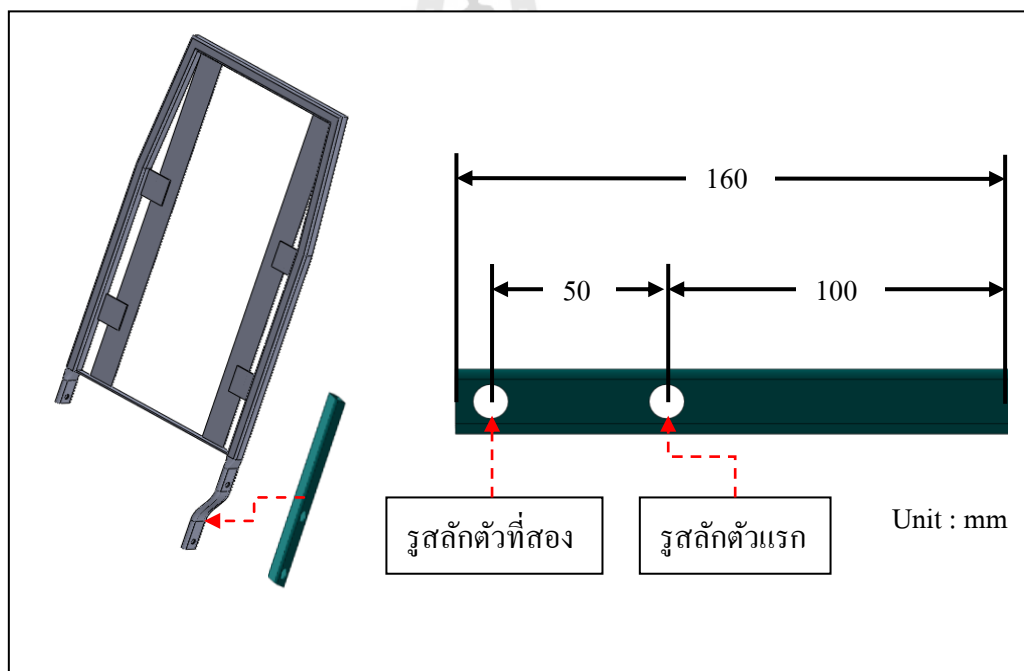


รูปที่ 3.18 การกำหนดเงื่อนไขการจับยึดและการให้ภาระกรรม

3.5 การทดสอบโปรแกรม

แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะให้ผลวิเคราะห์ออกมาเป็นเชิงตัวเลขและสามารถตีความหมายของค่านั้น ๆ ออกมาเป็นสิ่งที่อยากทราบเพื่อวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างหรือค่าอื่นตามที่ต้องการ แต่อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จำเป็นต้องมีการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบจริง ในกระบวนการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่นนั้น ได้มีการออกแบบและทำการทดลองอย่างง่ายเพื่อทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ซึ่งได้จำลองลักษณะของพนักพิงหลังที่มีการประกอบเข้ากับฐานที่นิ่ง โดยการยึดด้วยสลักเกลียวสองจุด ทำให้พนักพิงหลังสามารถปรับเอนได้ตามความต้องการของผู้นั่ง โดยจะย่อขนาดให้เล็กลง เพื่อให้ง่ายต่อการจำลองและการทดสอบ แต่ยังมีลักษณะต่าง ๆ สอดคล้องกับพนักพิงหลัง

การออกแบบการทดลองนั้นตัวชิ้นงานทดสอบได้ออกแบบให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับพนักพิงในส่วนของจุดหมุนระบบปรับเอน ซึ่งรูสลักตัวแรกจะทำหน้าที่เป็นจุดหมุนของพนักพิง และรูปที่สองจะเป็นจุดที่พนักพิงเชื่อมต่อกับระบบปรับเอน โดยระบบปรับเอนจะเป็นตัวที่ทำให้พนักพิงนั้นอยู่ในตำแหน่งที่ผู้นั่งต้องการ เมื่อมีการปรับพนักพิงหลังระบบปรับจะเลื่อนด้วยกลไกทำให้พนักพิงเปลี่ยนตำแหน่งโดยหมุนรอบรูสลักตัวแรก รูของสลักทั้งสองจะใช้สลักเกลียวและเป็นเกลียวในการยึดประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน ชิ้นงานทดสอบอย่างง่ายนั้นมีลักษณะคล้ายกับพนักพิงหลังซึ่งมีรูสลักสองรูเช่นกัน ต่างเพียงขนาดและรูปลักษณ์ที่ไม่ซับซ้อนเท่ากับพนักพิงหลัง รวมไปถึงการไม่มีระบบปรับเอน ซึ่งได้กำหนดให้เป็นเพียงจุดยึดเท่านั้น ซึ่งในสถานการณ์การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งจริงได้มีการกำหนดให้ปรับพนักพิงให้มีมุม 25 องศาเมื่อวัดจากแนวดิ่ง ซึ่งระบบปรับเอนทำหน้าที่เพียงเป็นอุปกรณ์ยึดพนักพิงหลังเพียงเท่านั้น ชิ้นงานทดสอบอย่างง่ายจึงจำลองลักษณะของพนักพิงในส่วนนี้ แสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ชิ้นงานทดสอบอย่างง่าย

3.5.1 การทดสอบอย่างง่าย

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองของชิ้นทดสอบอย่างง่าย ชิ้นทดสอบนั้นใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 25×25 มิลลิเมตร ขนาดดังรูป 3.19 ซึ่งเป็นเหล็กชนิดเดียวกับโครงสร้างที่นั้ง ชิ้นทดสอบจะยึดด้วยสลักเกลียวยึดเข้ากับอุปกรณ์จับยึด ซึ่งจะเป็นชิ้นส่วนที่ยึดรูสลักทั้งสองของ

ชิ้นทดสอบ การประกอบชิ้นทดสอบเข้ากับอุปกรณ์จับยึดจะทำให้ชิ้นงานทดสอบมีลักษณะเหมือนกับพนักงานหลัง อุปกรณ์จับยึดนั้นจะมีขนาดความหนาที่มากกว่าชิ้นทดสอบ เพื่อไม่ให้ อุปกรณ์จับยึดเกิดความเสียหาย ในการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบโดยให้ภาระกรรมที่ปลายอีก ด้านของชิ้นทดสอบ โดยภาระกรรมที่ให้ เป็นแบบสถิตยศาสตร์ ภาระกรรมจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไปจน ชิ้นทดสอบเกิดความเสียหาย

ในการทดสอบจะทำการให้ภาระกรรมโดยใช้เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine : UTM ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 5569 ขนาด 50 กิโลนิวตัน ทำการยึดชุด อุปกรณ์ทดสอบเข้ากับเครื่อง โดยให้ตำแหน่งของหัวกดอยู่บริเวณปลายของชิ้นทดสอบดังแสดงใน รูปที่ 3.20 หัวกดจะกดลงด้วยความเร็ว 1 มิลลิเมตรต่อนาที เพื่อให้เป็นการให้ภาระกรรมแบบ สถิตยศาสตร์ และกดลงมาเรื่อย ๆ จนชิ้นทดสอบเกิดความเสียหาย โดยค่าที่ทำการวัดนั้นจะทำการติดเกจวัดความเครียดชนิด KFG-2-120-C1-11L1M2R ยี่ห้อ KYOWA ติดที่บริเวณเหนือรูสลัก แรกเพื่อวัดค่าความเครียดที่บริเวณนั้น วัดค่าแรงที่เกิดขึ้นที่หัวกดกระทำกับชิ้นงานและระยะยุบตัว ของชิ้นงานบริเวณปลายของชิ้นทดสอบ ซึ่งเป็นจุดเดียวกับจุดที่ให้ภาระกรรมกระทำกับชิ้น ทดสอบ จากนั้นนำข้อมูลที่วัดได้มาทำการวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 3.20 การทดสอบอย่างง่าย

3.5.2 การวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่าย

การวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่ายจะทำการสร้างแบบ CAD Model ให้มีรูปร่าง เหมือนกันการทดสอบจริง ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นทดสอบ อุปกรณ์จับยึด สลักเกลียวและ แป้นเกลียวประกอบเข้าด้วยกัน และทำการแบ่งอิลลิเมนต์ ซึ่งอิลลิเมนต์ที่ใช้เป็นอิลลิเมนต์ ทรงสี่หน้า 10 จุดต่อ (TET10) ดังเช่นเดียวกับแบบจำลอง โครงสร้างที่นึ่ง และเพื่อหาขนาดอิลลิเมนต์

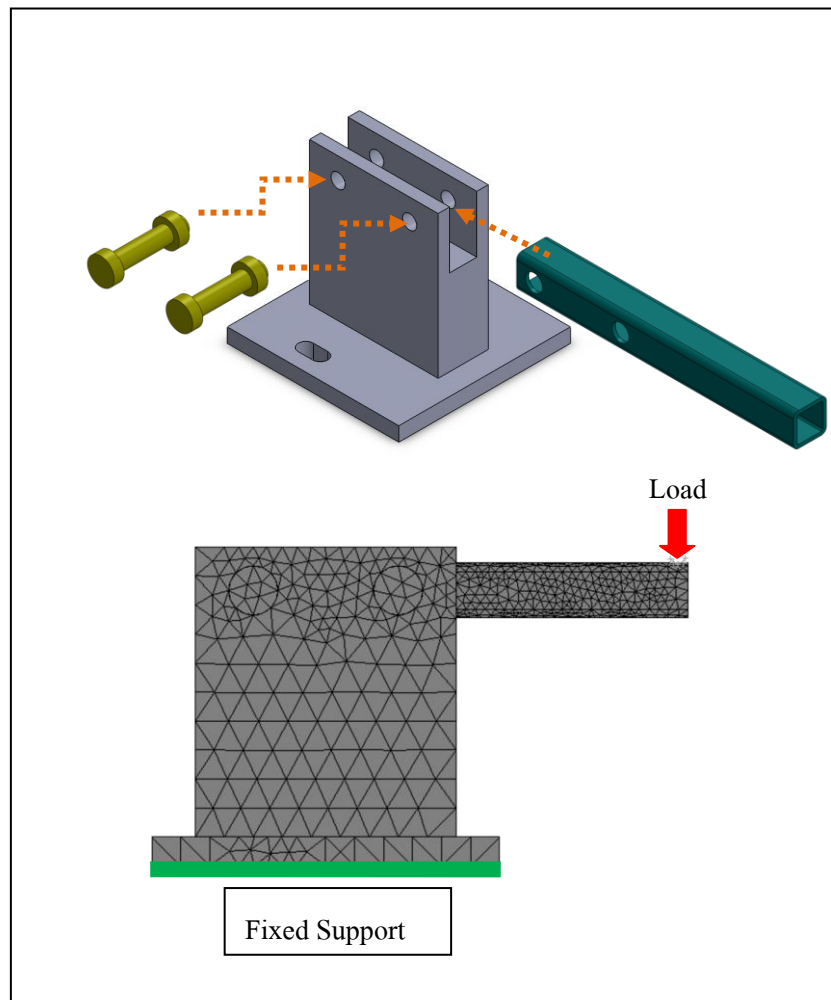
ที่เหมาะสมได้หาขนาดอิลลิเมนต์ที่ไม่ทำให้ค่าความเค้นวอนมิสเซสของแต่ละแบบจำลองมีค่าความใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับโครงสร้างที่หนึ่ง ได้ขนาด Global edge length ของอิลลิเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 3 มิลลิเมตร แบบจำลองจึงมีอิลลิเมนต์ 15,310 อิลลิเมนต์และจุดต่อ 28,725 จุด

ตารางที่ 3.4 การสัมผัสของชิ้นส่วนการทดสอบอย่างง่าย

ชิ้นส่วนที่ 1	ชิ้นส่วนที่ 2	ลักษณะการสัมผัส
ชิ้นทดสอบ	อุปกรณ์จับยึด	Touching
	หัวกด	Touching
	สลักเกลียว	Touching
อุปกรณ์จับยึด	สลักเกลียว	Touching
	แป้นเกลียว	Touching
สลักเกลียว	แป้นเกลียว	Glue

เมื่อประกอบกันแล้วจะมีส่วนที่มีการสัมผัสกันของส่วนประกอบ โดยกำหนดการหาคู่สัมผัสเป็นจุดต่อสัมผัสกับผิวอิลลิเมนต์ลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลอง โครงสร้างที่หนึ่ง การสัมผัสกันนั้นแสดงในตารางที่ 3.4 ค่าสมบัติวัสดุของแบบจำลองอย่างง่ายนั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบวัสดุจากหัวข้อที่ผ่านมา

สำหรับเงื่อนไขการจับยึดนั้นจะกำหนดเป็นแบบยึดติดแน่นบริเวณส่วนล่างของอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานโดยกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่และหมุนในทิศทางใด ๆ ซึ่งมีลักษณะเป็นเช่นเดียวกันกับการยึดอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเข้ากับเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ UTM และการให้ภาระกรรมได้กำหนดให้หัวกดเคลื่อนที่ลงเป็นระยะ 16 มิลลิเมตรเนื่องจากการทดสอบจริงชิ้นงานจะเสียหายเมื่อหัวกดเคลื่อนที่ลงมาประมาณ 16 มิลลิเมตร เป็นระยะสูงสุดของการทดสอบจริง โดยกำหนดการเคลื่อนของหัวกดเคลื่อนที่ลงเป็นแบบสถิตยศาสตร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 จากผลการวิเคราะห์จะได้แรงที่กระทำของหัวกดกระทำกับชิ้นทดสอบ ซึ่งสามารถนำผลมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับระยะของการเคลื่อนที่ของหัวกดและหาผลลัพธ์อื่น ๆ ได้ต่อไป

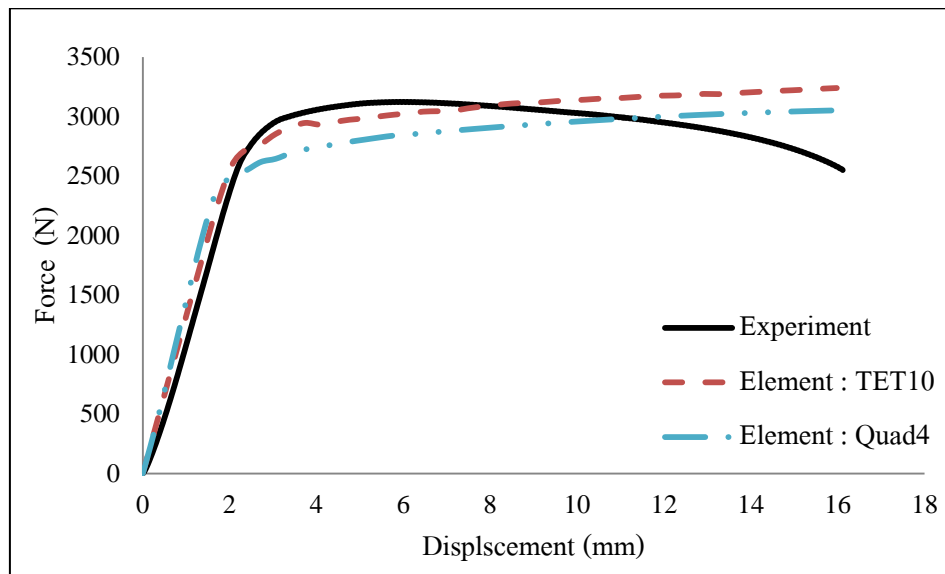


รูปที่ 3.21 แบบจำลองและเงื่อนไขของแบบจำลองอย่างง่าย

จากรูปที่ 3.21 เป็นลักษณะการสัมผัสกันของชิ้นส่วนต่าง ๆ ในแบบจำลองอย่างง่าย และเงื่อนไขการจำลองของแบบจำลองอย่างง่ายที่สอดคล้องกับการทดสอบจริง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์และผลการทดสอบเปรียบเทียบจะแสดงในบทต่อไป

3.5.3 การทดสอบชนิดของอิทธิพล

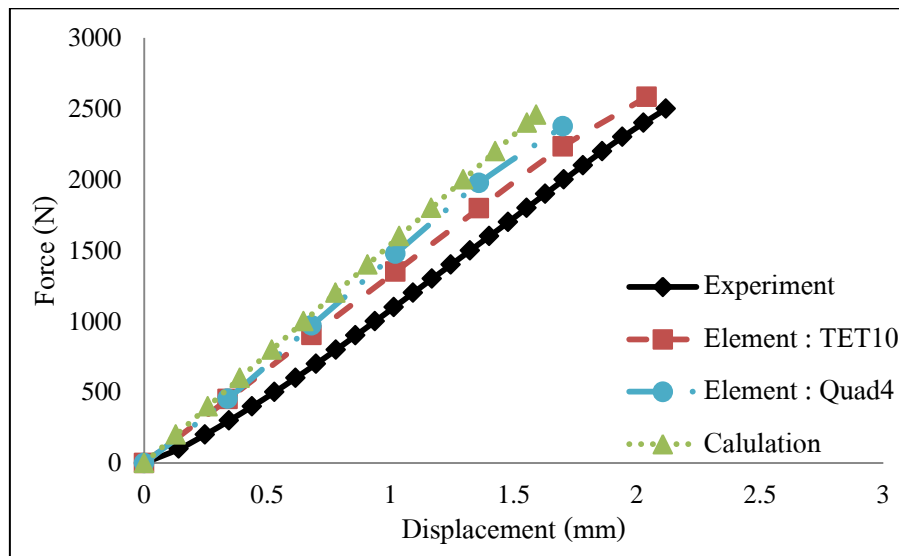
แบบจำลองที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องทำการแบ่งอิทธิพล การเลือกชนิดของอิทธิพลจะขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแบบจำลอง ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการทดสอบเพื่อหาชนิดที่เหมาะสมที่จะให้กับแบบจำลอง โครงสร้างที่นิ่ง โดยทำการทดสอบอย่างง่ายในการทดสอบ ซึ่งจะเลือกใช้อิทธิพลแบบ 2 มิติและ 3 มิติ ในการทดสอบ การเปรียบเทียบจะนำผลที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง วิเคราะห์เปรียบเทียบผลของแรงกระทำและระยะยุบตัวที่บริเวณปลายของชิ้นงานทดสอบ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 กราฟแสดงผลการจำลองเปรียบเทียบชนิดของอิลลิเมนต์

จากรูปที่ 3.22 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทดสอบจริง ผลที่ได้จากการใช้อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากกว่าอิลลิเมนต์แบบ 2 มิติในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่น และในการเสียรูปช่วงพลาสติกอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติได้ผลที่ใกล้เคียงสอดคล้องกว่า อิลลิเมนต์แบบ 2 มิติที่มีการเสียรูปเข้าสู่ช่วงพลาสติกเร็วกว่าการทดสอบจริงและอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อเปรียบเทียบระยะขยับตัวที่ส่วนปลายในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นของการจำลอง การทดสอบ และทฤษฎี โดยคำนวณการขยับตัวของชิ้นทดสอบจากสมการ 3-4 โดย L คือระยะจากปลายถึงรูสลักตัวแรกของชิ้นงานทดสอบ ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 3.23

$$\delta = \frac{-4FL^3}{EI} \quad (3-4)$$



รูปที่ 3.23 ระยะยวบตัวของชิ้นงานทดสอบในช่วงยืดหยุ่น

จากรูปที่ 3.23 เมื่อเปรียบเทียบการจำลองกับการทดสอบจริงพบว่าอิลลิเมนต์แบบ 3 มิติมีการเสียรูปที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงกว่าอิลลิเมนต์แบบ 2 มิติ แต่เมื่อเปรียบกับการคำนวณอิลลิเมนต์แบบ 2 มิติมีความใกล้เคียงมากกว่า ในการทดสอบนั้นมีความคลาดเคลื่อนจากทฤษฎี เนื่องจากการประกอบชุดทดสอบต้องมีระยะเพื่อ ทำให้มีช่องว่างจึงมีการยวบตัวที่มากกว่า ทฤษฎี งานประกอบโครงสร้างส่วนให่จำเป็นต้องมีระยะเพื่อการประกอบ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงเลือกใช้อิลลิเมนต์แบบ 3 มิติที่ให้ผลใกล้เคียงกับการทดสอบมากกว่า แบบจำลองโครงสร้างที่นั้น มีความซับซ้อนของรูปร่าง อิลลิเมนต์ 3 มิติ สามารถแบ่งอิลลิเมนต์ได้ครอบคลุมรูปร่างของปัญหา ได้ดีกว่า จึงใช้อิลลิเมนต์ 3 มิติ อิลลิเมนต์ทรงสี่หน้าสี่จุดต่อในการจำลองโครงสร้างที่นั้น

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

บทนี้จะเป็นการนำเสนอผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการตามบทที่ 3 ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นึ่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์จะอยู่ในรูปของตัวเลขในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ ในการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านของแข็งค่าผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าการเคลื่อนตัวของจุดต่อในเอลิเมนต์นั้น ๆ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์เป็นค่าความเครียดและความเค้นได้ ซึ่งจะพิจารณาค่าความเค้นของแบบจำลองตามทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุดหรือทฤษฎีความเสียหายของวอนมิสเชส ในการวิเคราะห์ค่าความเค้นเพื่อพิจารณาจุดที่เกิดความเสียหาย และแสดงผลในรูปแบบชั้นแถบสีเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือของโปรแกรมและแบบจำลอง ในบทนี้จึงได้นำเสนอผลการตรวจสอบโปรแกรมเทียบกับการทดลองอย่างง่าย และในส่วนผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นึ่งจะแสดงค่าความเค้น ความเครียดและการเสียรูปที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่นึ่ง และบริเวณที่เกิดความเค้นสูงเพื่อพิจารณาความเสียหาย เมื่อโครงสร้างที่นึ่งมีส่วนที่เกิดความเสียหายจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างที่นึ่ง โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ในการหาปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างที่นึ่งและนำเสนอแบบจำลองที่ทำการปรับปรุงให้โครงสร้างที่นึ่งผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นึ่ง ซึ่งจะแสดงในรายละเอียดต่อไป

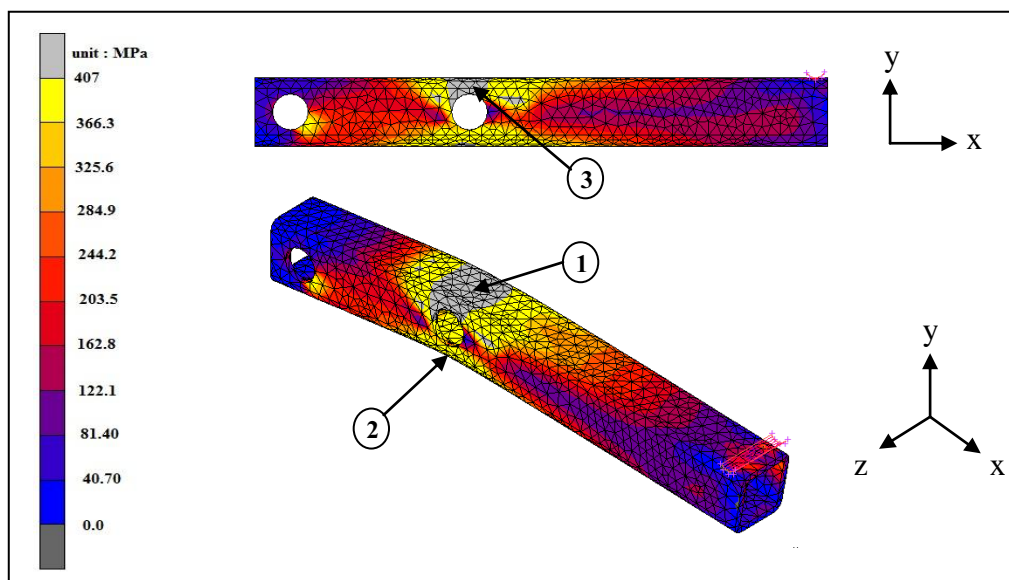
4.1 ผลการตรวจสอบโปรแกรม

จากการออกแบบการทดลองอย่างง่ายเพื่อที่จะทำการทดลองและจำลองจากที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 เมื่อนำค่าที่ทำการทดสอบมาทำการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบกับระหว่างการทดลองและการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบแบบจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นผลที่ได้มีความสอดคล้องกับการทดลองเพียงกัน ซึ่งผลที่นำมาเปรียบเทียบนำเสนอต่อไป

4.1.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบอย่างง่าย

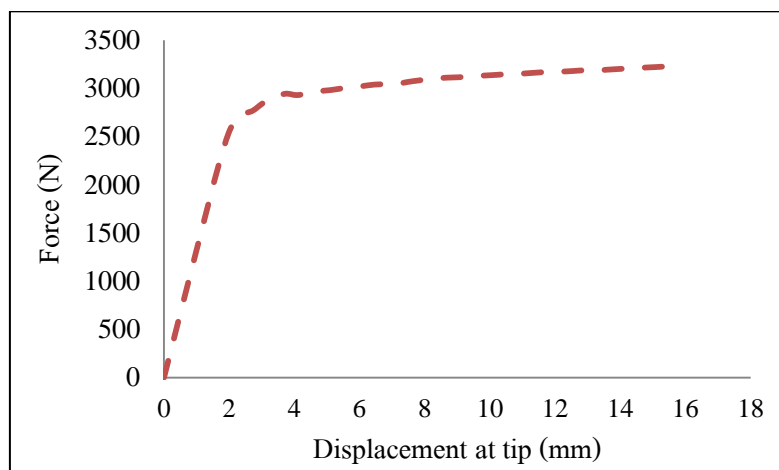
ผลลัพธ์ที่ได้จากวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์จะได้ค่าเชิงตัวเลขเป็นค่าของการเคลื่อนตัวของแต่ละจุดต่อ ผลการวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่ายด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เมื่อนำมาพิจารณาหาความเค้นวอนมิสเชส ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นทดสอบดังแสดงรูปที่ 4.1 บริเวณที่เกิดความเค้นวอนมิสเชสเกินค่าความเค้นครากของวัสดุ ซึ่ง

แสดงเป็นแถบสีเทาและเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างภาระกรรมที่หักคกระทำกับชิ้นงานเทียบกับกับระยะขุดตัวในทิศทาง y ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นทดสอบในช่วงของแรงต่าง ๆ ได้



รูปที่ 4.1 ความเค้นวอนมิสเซสของชิ้นทดสอบ

จากรูปที่ 4.1 ความเค้นวอนมิสเซสเกิดขึ้นสูงสุดมีค่าเป็น 668.20 MPa เกิดขึ้นที่บริเวณเหนือรูสลักตัวแรกซึ่งค่าความเค้นวอนมิสมีค่ามาก ชิ้นทดสอบจึงเกิดความเสียหายและชิ้นทดสอบเกิดการเสียรูปอย่างชัดเจน ความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณด้านบนบริเวณหมายเลข 1 ด้านล่างของรูสลักตัวแรกหมายเลข 2 และบริเวณขอบรูหมายเลข 3 ที่รูสลักตัวแรกเช่นกัน ตำแหน่งของความเค้นที่ชิ้นทดสอบ ความเค้นในแนวแกน x ค่าของความเค้น บริเวณด้านบนและด้านล่างมีค่าสูงเป็นผลเนื่องจากโมเมนต์ดัดจึงทำให้ด้านบนเกิดความเค้นดึงและด้านล่างเกิดความเค้นอัด และบริเวณหมายเลข 3 ซึ่งเป็นบริเวณขอบรูสลักด้านบนเกิดความเค้นในแนวแกน x มากที่สุดเช่นกัน และความเค้นเฉือนที่บริเวณนี้เป็นผลมาจากแรงปฏิกิริยาย้อนกลับที่เกิดจากสลักเกลียวกระทำกับชิ้นงานทดสอบ

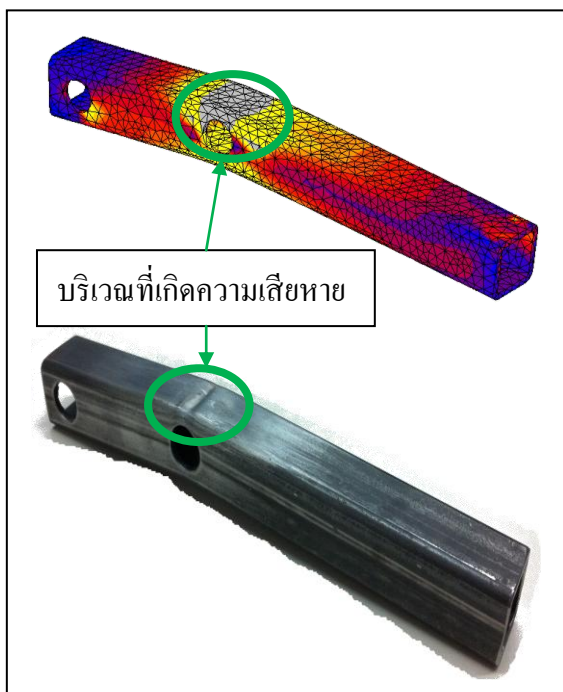


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะขยุบตัวที่ปลายของชิ้นทดสอบ

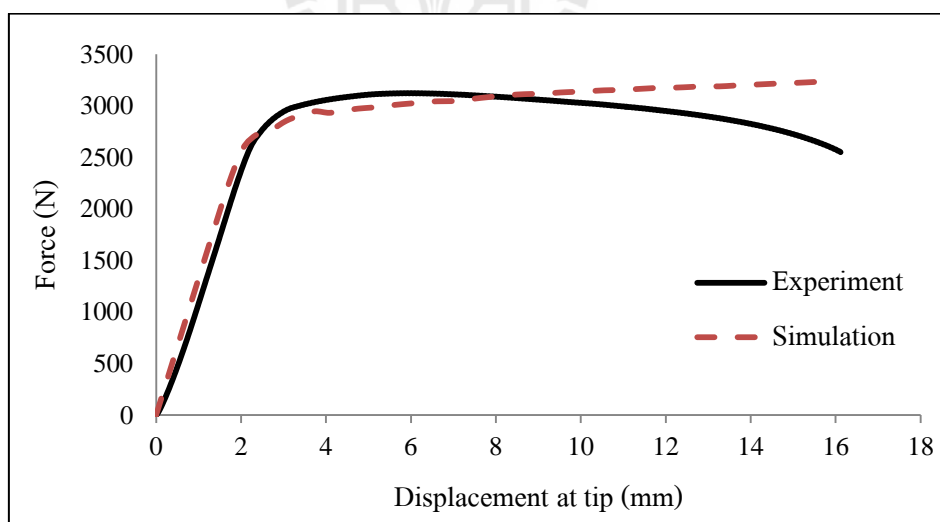
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะขยุบตัวที่ปลายพบว่าในช่วงแรกเกิดการขยุบตัวในแนวแกน y มีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้น และเมื่อแรงที่กระทำเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ลักษณะการขยุบตัวที่ปลายชิ้นทดสอบเปลี่ยนแปลงไป ในการเสียรูปในช่วงนี้เกิดการขยุบตัวมากขึ้น โดยแรงที่กระทำเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับช่วงแรก ซึ่งเกิดการเสียรูปในช่วงพลาสติก และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งการเคลื่อนที่ลงของหัวกดถึงระยะที่กำหนด และแรงที่หัวกดกระทำสูงสุดมีค่าเท่ากับ 3,239.54 นิวตัน ที่ระยะการขยุบตัวสูงสุดที่ปลายของชิ้นงานทดสอบ

4.1.2 การเปรียบเทียบผลการทดสอบอย่างง่าย

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยผลการวิเคราะห์ของแบบจำลองอย่างง่ายจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริงดังที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 ซึ่งเปรียบเทียบในส่วนบริเวณที่เกิดความเสียหายของชิ้นทดสอบพบว่าบริเวณที่เกิดความเสียหายจากการจำลองเกิดค่าความเค้นวอนมีสเตรสสูง มีค่าความเค้นมากเกิดความเค้นครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ บริเวณที่เกิดคือบริเวณเหนือรูสลักตัวแรกซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดสอบจริงที่เกิดร้าวของชิ้นทดสอบในบริเวณเหนือรูสลักตัวแรกเช่นกัน ความเสียหายเป็นผลมาจากโมเมนต์ดัดที่มีแรงกระทำที่ปลายของชิ้นทดสอบ ดังในรูป 4.3



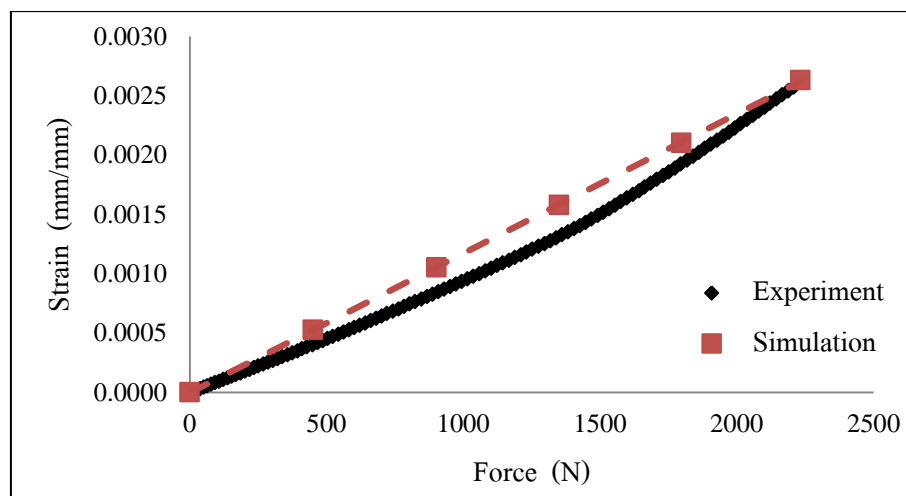
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบจุดที่เกิดความเสียหายของชิ้นทดสอบ



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะขยับตัวที่ปลายของชิ้นทดสอบ

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะขยับตัวที่ปลายชิ้นงานทดสอบของการจำลองและการทดสอบจริง ลักษณะกราฟของทั้งสองมีความใกล้เคียงสอดคล้องกัน ซึ่งในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นมีความที่ใกล้เคียง การขยับตัวที่ปลายของการทดสอบจริงมีการเสีย

รูปของเหล็กกล่องในช่วงพลาสติก เกิดการยืดตัวมากขึ้นทำให้พื้นที่หน้าตัดเสียรูปและรับแรงลดลง ซึ่งทำให้การยุบตัวในส่วนปลายสามารถรับใช้แรงกระทำได้น้อยลง ในการจำลองได้กำหนดสมบัติวัสดุให้กับชิ้นงานทดสอบให้เป็นความเค้นและความเครียดจริง จึงทำให้ผลจากการจำลองที่ได้ไม่มีการลดลงที่ส่วนท้ายของการเสียรูป แรงที่กระทำสูงสุดจากการทดลองเท่ากับ 3,123.31 นิวตัน และเมื่อเปรียบเทียบค่าความเครียดในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นบริเวณเหนือรูสลักแรกซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดความเครียดสูงสุดจะได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเครียด

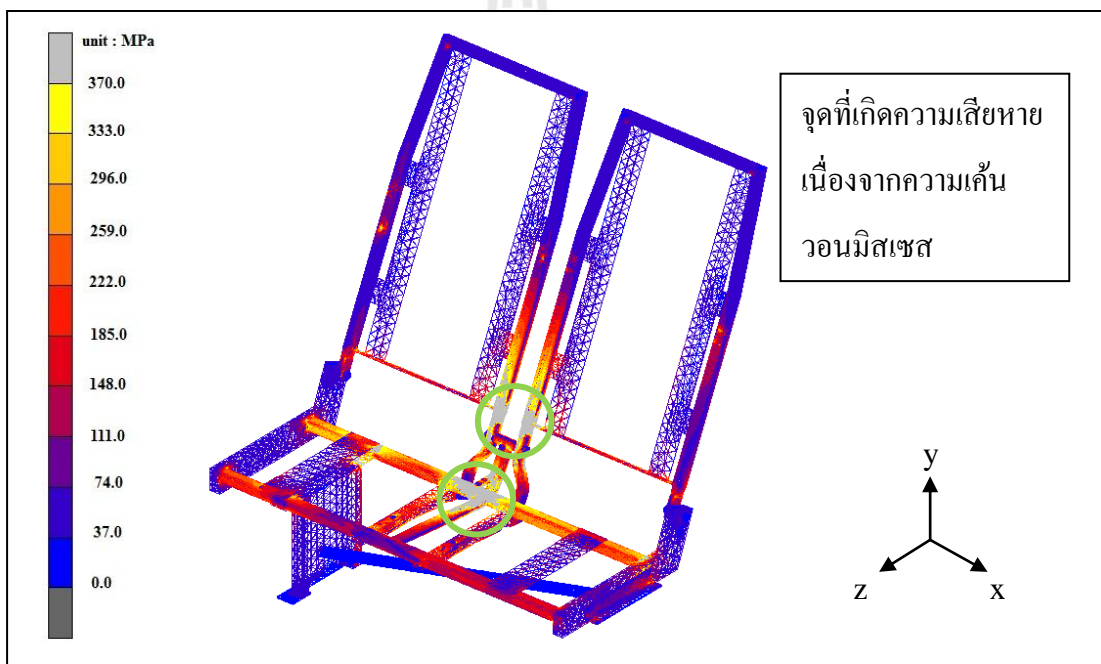
จากรูปที่ 4.5 ความเครียดบริเวณเหนือรูสลักตัวแรกของการทดสอบและการจำลองมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน ความเครียดมีค่าที่ใกล้เคียงกันที่แรงกระทำเท่ากัน และเมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองอย่างง่ายกับการทดสอบจริงพบว่าตำแหน่งที่เกิดความเสียหายของชิ้นทดสอบเป็นบริเวณเดียวกันและเป็นบริเวณที่เกิดความเครียดสูงสุด คือบริเวณเหนือรูสลักแรก จากการเปรียบเทียบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับระยะการยุบตัวที่ปลายของชิ้นทดสอบ กราฟมีลักษณะที่สอดคล้องกัน เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ดังกล่าวในช่วงการเสียรูปแบบยืดหยุ่นมีค่าความคลาดเคลื่อนต่อการทดลองจริง (Error) 3.94 % ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ ส่วนการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับค่าความเครียดที่บริเวณเหนือรูสลักแรก นั้นมีความคลาดเคลื่อน 4.53 % จากการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของโปรแกรม ผลการเปรียบเทียบมีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน แบบจำลองสามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของการเสียรูปของชิ้นงานและค่าความเค้นต่าง ๆ และสามารถนำไปใช้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งได้ ซึ่งมีค่าความถูกต้องที่เป็นที่ยอมรับได้

4.2 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในรูปแบบของตัวเลข ซึ่งเป็นค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อนั้น ๆ เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายจึงแสดงผลต่าง ๆ ในรูปแบบชั้นแถบสี ประกอบไปด้วยค่าความเค้น ความเครียด และการเสีรูปของ โครงสร้างที่นั่ง

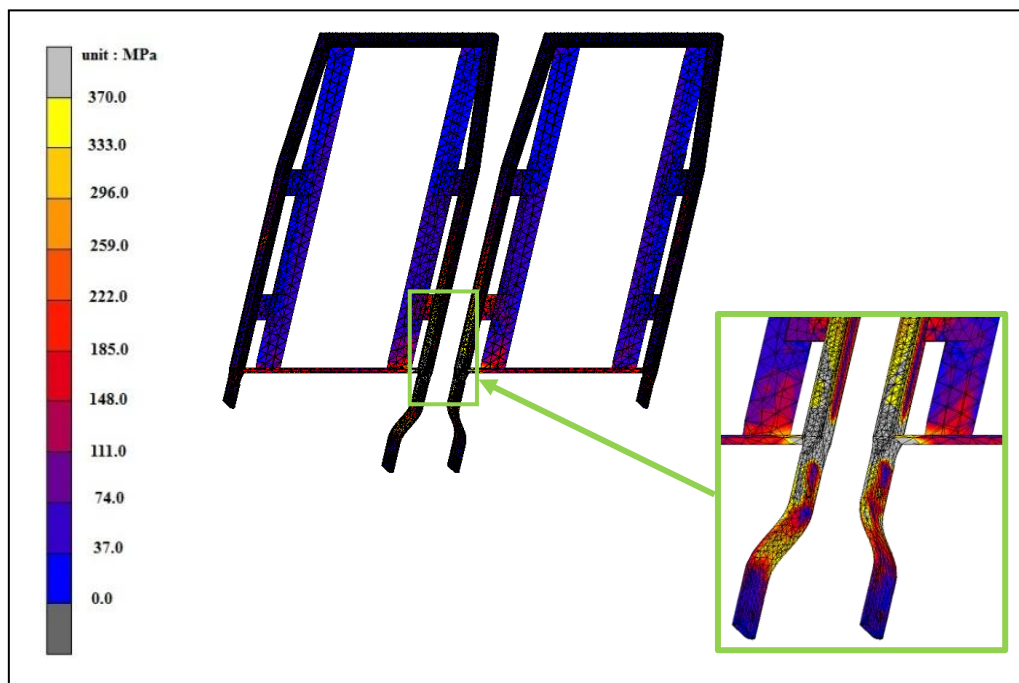
4.2.1 ผลค่าความเค้นของโครงสร้างที่นั่ง

จากผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข จะแสดงในรูปแบบค่าความเค้น โดยจะวิเคราะห์ค่าความเค้นเป็นค่าความเค้นวอนมิสเชส ซึ่งค่าความเค้นวอนมิสเชสของโครงสร้างที่นั่งนั้นมีจุดที่เกิดความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 4.6



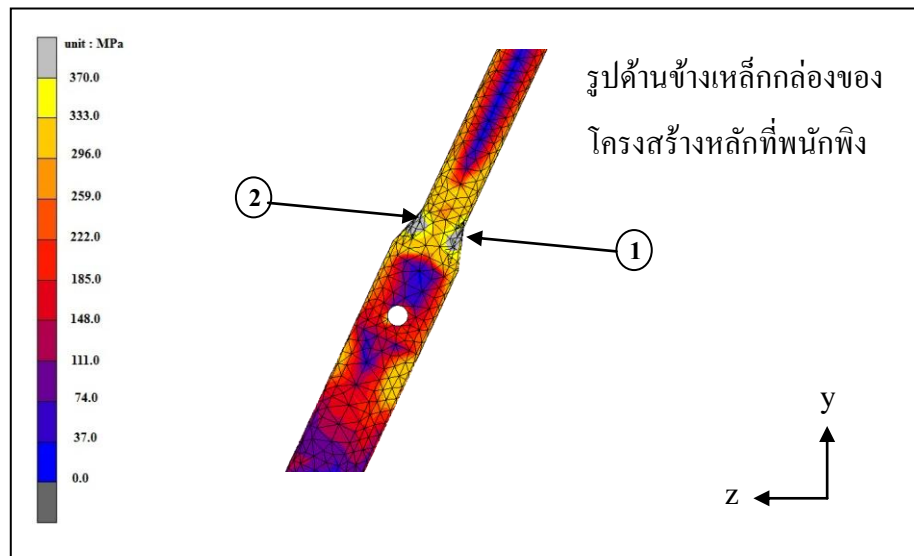
รูปที่ 4.6 ค่าความเค้นวอนมิสเชสของโครงสร้างที่นั่ง

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ค่าความเค้นวอนมิสเชสที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างที่นั่งสูงสุดเท่ากับ 579.10 MPa ที่บริเวณชิ้นส่วน โครงสร้างพนักพิงหลัง ซึ่งเป็นค่าที่มากเกินค่าความเค้นครากของวัสดุ ทำให้โครงสร้างที่นั่งเกิดการเสีรูปอย่างถาวร จนมีบางส่วนเกิดการฉีกขาดก่อให้เกิดความเสียหาย ชิ้นส่วนของที่นั่งที่มีค่าความเค้นมากเกินความเค้นครากของวัสดุและเกิดความเสียหายคือ ชิ้นส่วนพนักพิงหลังทั้งสองด้านและฐานของที่นั่งบริเวณส่วนตรงกลางของฐานที่นั่งดังแสดงต่อไป



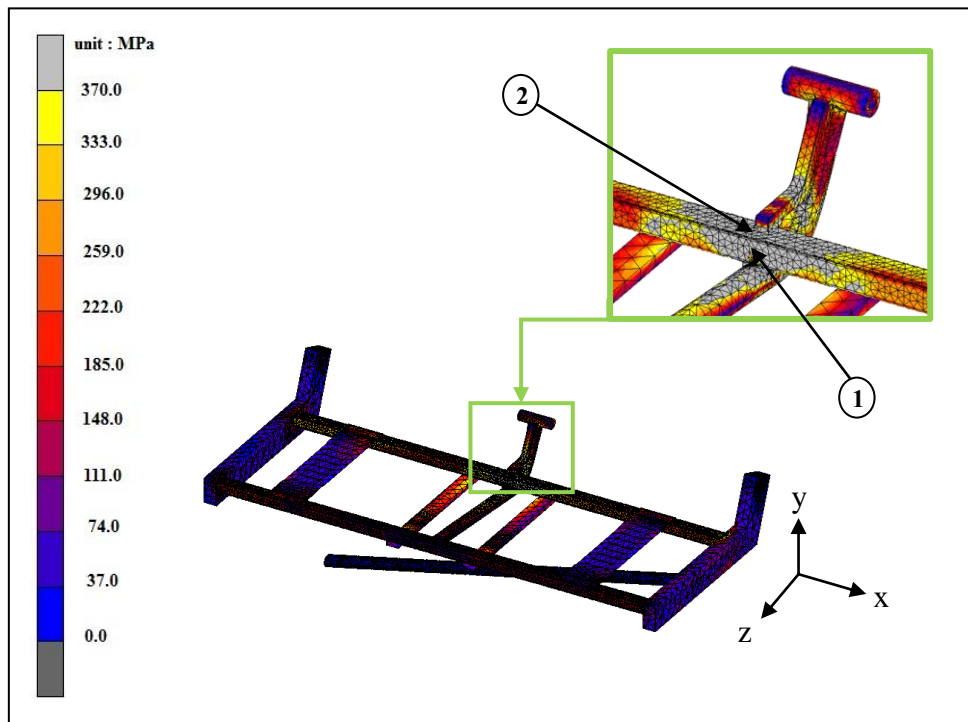
รูปที่ 4.7 บริเวณที่เกิดความเสียหายของ โครงสร้างพนักพิงหลัง

ค่าความเค้นวอนมิตเซสที่เกิดขึ้นกับ โครงสร้างพนักพิงหลัง เกิดขึ้นสูงสุดบริเวณที่มีการเปลี่ยนหน้าตัดของโครงสร้างหลักจากรูปที่ 4.7 แสดงในส่วนที่เป็นสีเทาคือส่วนที่เกิดความเสียหาย ซึ่งเป็นบริเวณที่เปลี่ยนจากหน้าตัดสี่เหลี่ยมมาเป็นหน้าตัดแบบวงรี การเปลี่ยนหน้าตัดนี้เพื่อให้ง่ายต่อการเจาะรูสลักในกระบวนการผลิต ค่าความเค้นวอนมิตเซสสูงสุดที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้มีขนาดเท่ากับ 579.10 MPa ซึ่งเป็นค่าความเค้นวอนมิตเซสสูงสุดของโครงสร้างที่นั่ง ความเค้นที่เกิดขึ้นกับพนักพิงที่นั่งในส่วนองบริเวณที่เกิดความเสียหายดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ความเค้นที่เกิดกับพนักงานหลังบริเวณที่เกิดความเสียหาย

ความเค้นที่เกิดกับโครงสร้างพนักงานเป็นผลมาจากโมเมนต์ที่กระทำกับชิ้นส่วนโครงสร้างหลักที่เป็นเหล็กกล่องของพนักงาน ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นมาจากโมเมนต์ที่เป็นภาระกรรมกระทำกับพนักงานหลัง ที่อยู่เหนือบริเวณส่วนนี้ทำให้เกิดความเสียหาย จากรูปที่ 4.8 ค่าความเค้นในแนวแกน y และ z ก่อให้เกิดความเค้นกดลงในทิศทางเข้าหาพนักงานในตำแหน่งที่ 1 ซึ่งจากความเค้นในแนวแกนของตำแหน่งทั้งสองมีความเค้นที่เกิดจากโมเมนต์ดัด และความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากตำแหน่งทั้งสองก็มีผลต่อความเสียหายของโครงสร้างเช่นกัน ความเค้นวอนมีเสหสมค่ามากเกินความเค้นครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุดก่อให้เกิดความเสียหายในบริเวณนี้



รูปที่ 4.9 บริเวณที่เกิดความเสียหายของโครงสร้างฐานที่นั่ง

เมื่อพนักงานหลังรับภาระกรรมจากแผ่นจำลองหลังจากแล้วส่งผ่านภาระกรรมมายังฐานของที่นั่งโดยผ่านสลักเกลียว บริเวณที่รับภาระกรรมเป็นส่วนแรกของฐานที่นั่งคือ ส่วนที่เป็นจุดที่ใช้ยึดต่อกับพนักงาน จากโครงสร้างของพนักงานทั้งสองด้านจะมีจุดยึดเพื่อเป็นจุดหมุนสองจุดในแต่ละพนักงาน และจุดยึดที่ใช้เป็นตัวปรับเอนหนึ่งจุดต่อพนักงานหนึ่งตัว โดยพนักงานทั้งสองด้านจะมีจุดหมุนร่วมกันบริเวณตรงกลางของ โครงสร้างฐานที่นั่ง ซึ่งจะทำให้บริเวณนั้นรับภาระกรรมมากกว่าส่วนอื่น ทำให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเชสที่ส่วนนี้มีค่ามากกว่าส่วนอื่น และค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดที่ฐานที่นั่งมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 419.18 MPa ซึ่งมากกว่าความเค้นครากของวัสดุ ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหาย จากรูปที่ 4.9 ส่วนที่เกิดความเสียหายนั้นคือส่วนที่แสดงเป็นสีเทา ซึ่งเป็นบริเวณตรงกลางของฐานที่นั่ง มีเหล็กกล่องที่เป็น โครงสร้างหลัก และส่วนเสริมของฐานที่นั่งที่เกิดความเสียหาย

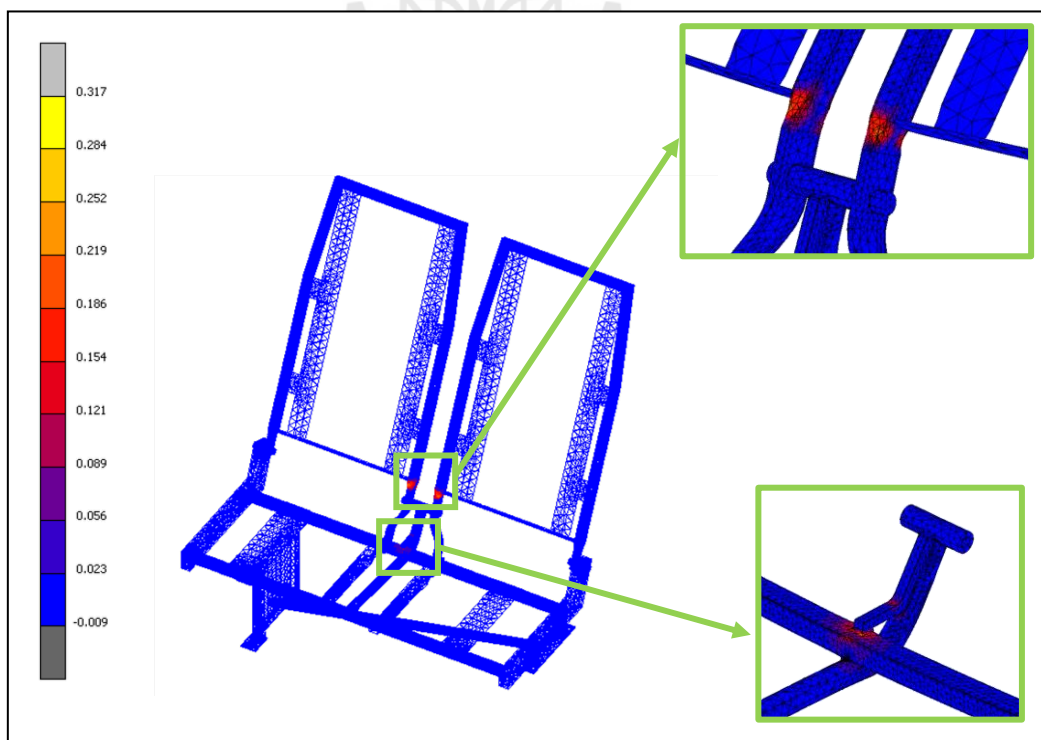
ความเค้นที่เกิดกับฐานที่นั่งจากรูปที่ 4.9 ความเค้นในแนวแกน x และ y ที่ตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นด้านข้างของเหล็กกล่อง โครงสร้างหลักของฐานที่นั่งเกิดความเค้นเนื่องจาก จุดยึดพนักงานส่วนกลางดึงเหล็กกล่อง โครงสร้างหลักของฐานที่นั่งไปด้านหลัง ซึ่งจะเกิดความเค้นเฉือนในหน้าตัดของเหล็กกล่อง ก่อให้เกิดความเค้นมีค่ามากเกินความเค้นครากของวัสดุตำแหน่งที่ 2 เป็นจุดที่ส่วนเสริมของฐานที่นั่งต่อเข้ากับ โครงสร้างหลักของฐานที่นั่งค่าความเค้นในแนวแกน x ซึ่งเป็น

แนวเดียวกับเหล็กกล่อง ซึ่งค่าความเค้นนั้นเกิดจากส่วนเสริมฐานที่นั่งดึงโครงสร้างเหล็กกล่องไปด้านหลังจึงทำให้เกิดความเค้นในแนวแกนมากขึ้นและเกิดความเค้นเฉือนในระนาบตัดนี้เช่นกัน ผลของความเค้นทั้งหมดส่งผลทำให้เกิดความเค้นวอนมีสเซอร์เกินค่าความเค้นครากและความต้านทานแรงดึงสูงสุดของวัสดุ จึงทำให้เกิดความเสียหายที่ฐานที่นั่ง

ความเค้นวอนมีสเซอร์ที่เกิดส่วนประกอบอื่น ๆ ของโครงสร้างที่นั้งนั้นจะมีค่าความเค้นวอนมีสเซอร์สูงสุดของแต่ละชิ้นส่วน มีค่าน้อยกว่าความเค้นครากของวัสดุจึงไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นส่วนที่เกิดความเสียหายจากความเค้นจึงมีสองส่วนนั้นคือ ชิ้นส่วนพนักพิงหลังและชิ้นส่วนฐานที่นั่งซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับปรุงในชิ้นส่วนนี้เพื่อลดค่าความเค้น ทำให้โครงสร้างไม่เกิดความเสียหายและผ่านมาตรฐานการทดสอบต่อไป

4.2.2 ผลค่าความเครียดของโครงสร้างที่นั่ง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขเมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าความเครียด จะได้บริเวณที่เกิดความเครียด ซึ่งจะแสดงเป็นชั้นแถบสี ค่าความเครียดและบริเวณที่มีการกระจุกตัวของพลังงานความเคียด เป็นบริเวณที่อาจจะเกิดความเสียหาย ค่าความเครียดของโครงสร้างที่นั้งนั้นแสดงในรูปที่ 4.10

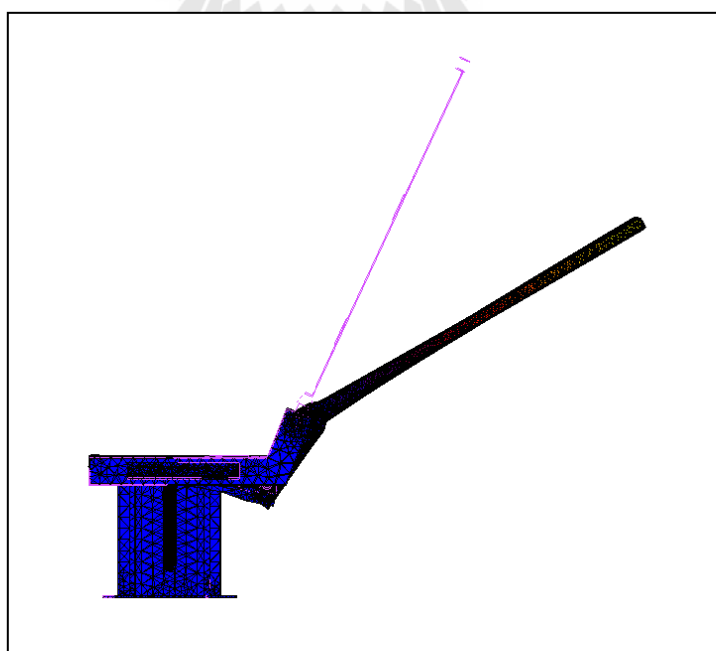


รูปที่ 4.10 ค่าความเครียดของโครงสร้างที่นั่ง

จากรูปที่ 4.10 ค่าความเครียดสูงสุดเท่ากับ 0.329 เกิดขึ้นที่ชิ้นส่วนปีกพิงในบริเวณส่วนที่เปลี่ยนหน้าตัดของเหล็กกล่อง ค่าความเครียดที่ฐานที่นั้งเท่ากับ 0.144 ซึ่งความเครียดมีค่าสูงมากกว่าความเครียดของวัสดุที่สามารถรับได้ เนื่องจากเหล็กกล่องที่นำมาใช้ประกอบเป็นโครงสร้างที่นั้งสามารถเกิดความเครียด 0.12 ก่อนที่จะเกิดการฉีกขาด ดังนั้น โครงสร้างที่นั้งที่เกิดความเครียดจะเกิดการฉีกขาดของเหล็กกล่อง ซึ่งทำให้โครงสร้างที่นั้งเกิดความเสียหาย บริเวณที่เกิดความเสียหายนั้นเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณที่เกิดความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดและความเค้นเกินความเค้นคราก ส่วนบริเวณที่มีพลังงานความเครียดกระจุกตัวกันอยู่มากคือบริเวณที่เกิดความเครียดสูงสุด และในส่วนของเหล็กส่วนเสริมของฐานที่นั้งก็มีการกระจุกตัวของความเครียดซึ่งมีโอกาสที่จะเกิดความเสียหายได้

4.2.3 ผลการเสีรูปของโครงสร้างที่นั้ง

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ พนักพิงเกิดการเคลื่อนที่สูงสุดที่พนักพิงด้านด้านบนสุด เนื่องจากโครงสร้างพนักพิงเกิดการเสีรูปไปในชิ้นส่วนเหล็กกล่องของโครงสร้างหลักที่พนักพิง ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเสีรูปมากที่สุด การเสีรูปโครงสร้างพนักพิงเสีรูปไปด้านหลังจากโมเมนต์ที่อุปกรณ์ทดสอบกระทำกับพนักพิง สอดคล้องกับค่าความเครียดและค่าความเค้น ที่มีค่ามากที่สุดที่บริเวณนี้เช่นกัน และโครงสร้างพนักพิงดึงส่วนยึดบริเวณตรงกลางไปด้านหลัง ทำให้ส่วนยึดพนักพิงของฐานที่นั้งเกิดการเสีรูปเช่นกัน



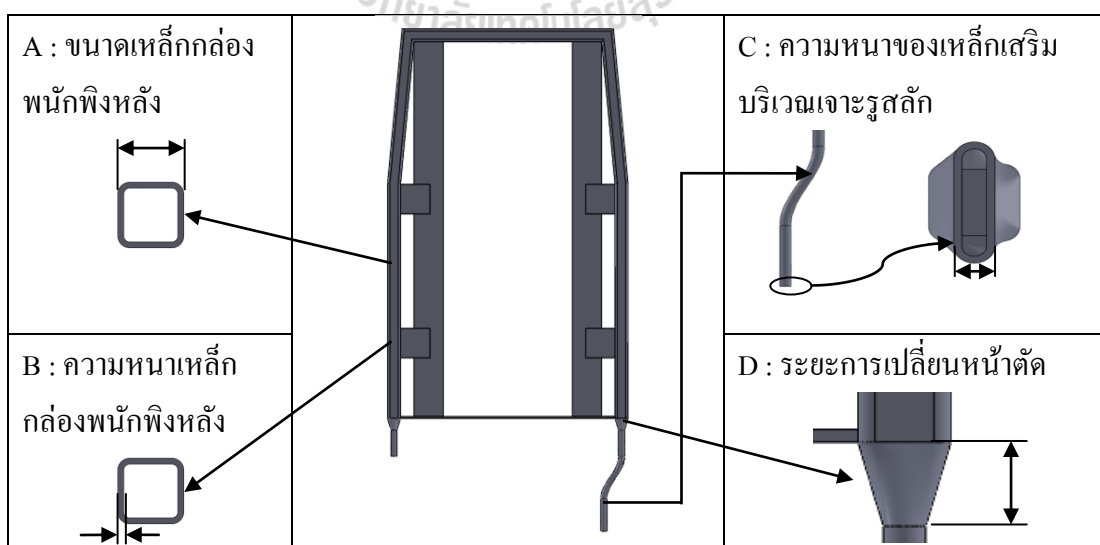
รูปที่ 4.11 การเสีรูปของ โครงสร้างที่นั้ง

4.3 การปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างที่นั้ง

จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้ง ค่าความเค้นวอนมีสเชสเกิดขึ้นสูงสุดที่พนักพิงหลังและฐานที่นั้งทำให้ชิ้นส่วนโครงสร้างเกิดความเสียหาย บริเวณโครงสร้างที่เกิดความเสียหายคือ เหล็กโครงสร้างหลักของพนักพิงหลังในบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดและเหล็กโครงสร้างหลักของฐานที่นั้ง เกิดความเสียหายที่บริเวณส่วนกลางของโครงสร้างที่ใช้สำหรับเป็นจุดยึดพนักพิงหลัง ความเสียหายที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการเสียรูปอย่างถาวรและเกิดความเสียหายกับเหล็ก ดังนั้นโครงสร้างที่นั้งที่ได้นำมาทำการวิเคราะห์นี้ไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของ โครงสร้างที่นั้ง จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงโครงสร้างที่เกิดความเสียหายจากภาระกรรมตามมาตรฐานการทดสอบ ในกระบวนการปรับปรุงจึงได้มีการเลือกปัจจัยที่จะทำการปรับปรุง ซึ่งคาดว่าปัจจัยเหล่านั้นจะส่งผลต่อค่าความเค้น และทำการเลือกปัจจัยเพื่อทำการปรับปรุงให้โครงสร้างที่นั้งให้ผ่านมาตรฐานการทดสอบต่อไป

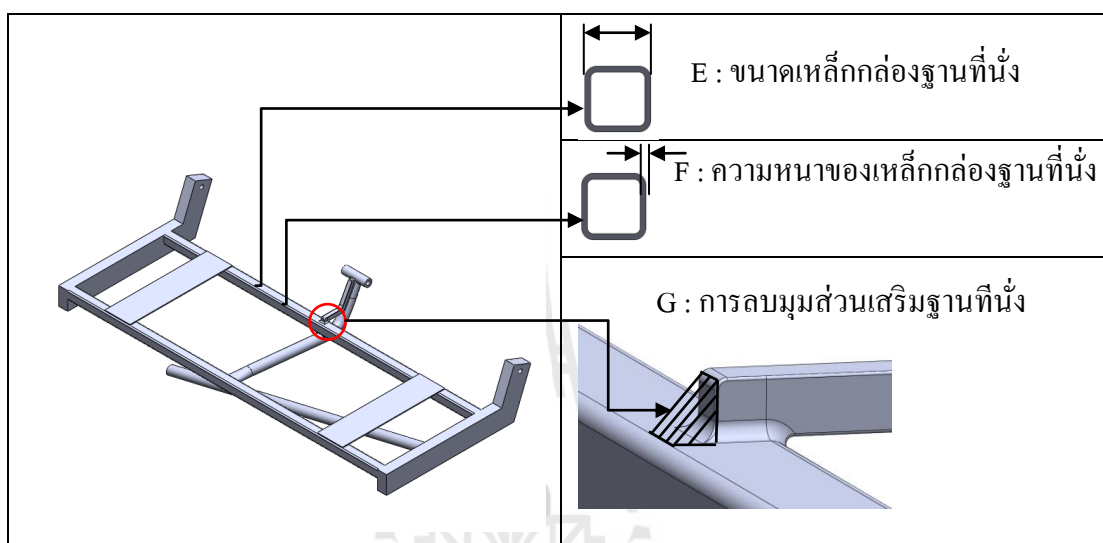
4.3.1 ปัจจัยที่ทำการปรับปรุง

จากชิ้นส่วนที่เกิดความเสียหาย ในส่วนของพนักพิงหลังจะเลือกปัจจัยที่ทำให้พื้นที่หน้าตัดที่บริเวณที่เกิดความเค้นวอนมีสเชสสูงสุดมีการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดรับแรง เพื่อทำให้ค่าความเค้นลดลง โดยปัจจัยที่จะทำการปรับปรุงในส่วนพนักพิงหลังนั้นจะเลือกทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของเหล็กกล่องที่เป็น โครงสร้างหลักของพนักพิง ความหนาของเหล็กกล่อง ความหนาของเหล็กเสริมบริเวณเจาะรูสลัก และระยะสำหรับการเปลี่ยนหน้าตัดของโครงสร้างหลักของพนักพิง ทั้งหมด 4 ปัจจัยดังแสดงในรูป 4.12



รูปที่ 4.12 ปัจจัยที่ทำการปรับปรุงพนักพิงหลัง

ชิ้นส่วนฐานของพนักงานึงเป็นอีกส่วนที่เกิดความเสียหายและจำเป็นต้องทำการปรับปรุง โดยจะเลือกปรับปรุงโครงสร้างที่เป็นเหล็กกล่องซึ่งเป็นโครงสร้างหลักที่รับแรงต่อจากส่วนที่เป็นจุดยึดพนักงานึงหลังตรงกลาง ซึ่งปัจจัยที่ได้เลือกมาปรับปรุงประกอบด้วย ขนาดของเหล็กกล่องชิ้นส่วนด้านหลังที่เป็นส่วนของโครงสร้างหลักของฐานที่นิ่ง ความหนาของเหล็กกล่อง และการเพิ่มการลวมส่วนเสริมบริเวณตรงกลางรวม 3 ปัจจัยดังแสดงในรูป 4.13



รูปที่ 4.13 ปัจจัยที่ทำการปรับปรุงฐานที่นิ่ง

ปัจจัยที่เลือกมาทำการปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างที่นิ่งมีทั้งหมด 7 ปัจจัย จึงจะทำการปรับปรุงแบบจำลองและวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นิ่งต่อไป

4.3.2 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง

กระบวนการวิเคราะห์การปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างที่นิ่งจะประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง เป็นการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ ในการวิเคราะห์ปัจจัย ซึ่งในแต่ละปัจจัยจะทำการปรับปรุงสองระดับคือ ค่าปัจจัยที่น้อยที่สุด (ค่าเริ่มต้นของปัจจัยที่ทำการปรับปรุง) และปัจจัยที่มากที่สุด ในการกระบวนการวิเคราะห์จะต้องทำการปรับปรุงปัจจัยทีละปัจจัย รวมไปถึงปรับปรุงปัจจัยที่มีผลร่วมกัน ซึ่งจะทำให้มีกรณีที่ต้องวิเคราะห์ 128 กรณี ทำให้ต้องใช้เวลาในการวิเคราะห์ จึงเลือกใช้การออกแบบการทดลอง โดยการลดกรณีศึกษาทำการออกแบบ 1 ใน 16 ของกรณีทั้งหมด ทำให้การทดลองลดลงเหลือ 8 กรณี เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นวอนมิสเสสสูงสุดของชิ้นส่วนนั้น ๆ และตัดปัจจัยที่ไม่มีส่งผลหรือส่งผลน้อยออกไปในกระบวนการปรับปรุง

จากการวิเคราะห์ปัจจัยแบบสองระดับ ได้ทำการเลือกค่าปัจจัยที่จะทำการปรับปรุง จากมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของเหล็กรูปพรรณในการกำหนดค่าปัจจัยของในส่วนของ ขนาดและความหนาของเหล็กกล่อง และขนาดปัจจัยในส่วนอื่นจะใช้ค่าที่มากที่สุดที่ทำให้รูปร่าง ของแบบจำลองไม่เปลี่ยนแปลงไปหรือเปลี่ยนไปน้อยที่สุด ซึ่งค่าปัจจัยต่าง ๆ ที่ปรับปรุง แบบจำลองแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าปัจจัยที่ทำการปรับปรุง

ปัจจัยปรับปรุง	ค่าน้อย (-) มิลลิเมตร	ค่ามาก (+) มิลลิเมตร
A : ขนาดเหล็กกล่องผนัง	25×25	32×32
B : ความหนาเหล็กกล่องผนัง	2	2.8
C : ความหนาของเหล็กเสริมบริเวณเจาะรูสลัก	6	9
D : ระยะการเปลี่ยนหน้าตัด	20	70
E : ขนาดเหล็กกล่องฐานที่นั่ง	25×25	32×32
F : ความหนาของเหล็กกล่องฐานที่นั่ง	2	2.8
G : การลบบวมส่วนเสริมฐานที่นั่ง	ไม่มีการลบบวม	มีการลบบวม

4.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเค้น

ผลของการวิเคราะห์การออกแบบทดลอง เมื่อพิจารณาการอิทธิพลของปัจจัย ปรับปรุงต่อค่าความเค้นวอนนิสเซตสูงสุดของผนังหลังและฐานที่นั่ง ซึ่งจะพิจารณาต่อค่า ความเค้นวอนนิสเซตทั้งสองชิ้นส่วนแยกกัน เมื่อวิเคราะห์การส่งผลต่อค่าความเค้นวอนนิสเซตสูง สุดที่ผนังหลังในช่วงความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่มีผลต่อค่าความเค้นวอนนิสเซสที่ปีกพิงหลัง

Source	F	Effect	p-value
A : ขนาดเหล็กกล่องปีกพิง	205.01	-109.02	0.005
B : ความหนาเหล็กกล่องปีกพิง	67.52	-62.56	0.014
C : ความหนาของเหล็กเสริมบริเวณเจาะรูสลัก	4.51	-16.17	0.168
D : ระยะการเปลี่ยนหน้าตัด	88.17	-71.50	0.011
E : ขนาดเหล็กกล่องฐานที่นั้ง	0.97	-7.46	0.487
F : ความหนาของเหล็กกล่องฐานที่นั้ง	1.08	-7.77	0.420
G : การลบมุมส่วนเสริมฐานที่นั้ง	1.59	-9.61	0.334

จากตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นสูงสุดของปีกพิงหลัง ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 % จากค่า p-value ของแต่ละปัจจัยที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัย A : ขนาดเหล็กกล่องปีกพิง, D : ระยะการเปลี่ยนหน้าตัด และ B : ความหนาเหล็กกล่องปีกพิง มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นวอนนิสเซสของปีกพิงหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตามลำดับ เมื่อปัจจัยเหล่านี้มีค่าปัจจัยเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นวอนนิสเซสสูงสุดลดลง

ผลของการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เมื่อพิจารณาการอิทธิพลของปัจจัยปรับปรุงต่อค่าความเค้นวอนนิสเซสสูงสุดของฐานที่นั้ง วิเคราะห์การมีอิทธิพลต่อค่าความเค้นวอนนิสเซสสูงสุดที่ช่วงความเชื่อมั่น 95 % ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์การออกแบบการทดลองที่มีผลต่อค่าความเค้นวอนนิสเซสที่ฐานที่นั้ง

Source	F	Effect	p-value
A : ขนาดเหล็กกล่องปีกพิง	1.86	-1.347	0.112
B : ความหนาเหล็กกล่องปีกพิง	11.20	3.953	0.079
C : ความหนาของเหล็กเสริมบริเวณเจาะรูสลัก	1.26	0.987	0.358
D : ระยะการเปลี่ยนหน้าตัด	3.11	2.083	0.220
E : ขนาดเหล็กกล่องฐานที่นั้ง	112.55	-12.533	0.009
F : ความหนาของเหล็กกล่องฐานที่นั้ง	39.91	-7.463	0.024
G : การลบมุมส่วนเสริมฐานที่นั้ง	24.46	-5.842	0.039

จากตารางที่ 4.3 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความเค้นสูงสุดของฐานที่นั้งที่ ช่วงความเชื่อมั่น 95 % จากค่า p-value ของแต่ละปัจจัยที่มีค่าน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ ปัจจัย E : ขนาดเหล็กกล่องฐานที่นั้ง, F : ความหนาเหล็กกล่องของฐานที่นั้ง และ G : การลบบวม ส่วนเสริมตรงกลางของฐานที่นั้ง ซึ่งมีอิทธิพลต่อค่าความเค้นวอนนิสเสสของฐานที่นั้งอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติตามลำดับ ซึ่งเมื่อค่าปัจจัยเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ความเค้นวอนนิสเสสสูงสุดที่ฐานที่นั้ง ลดลง

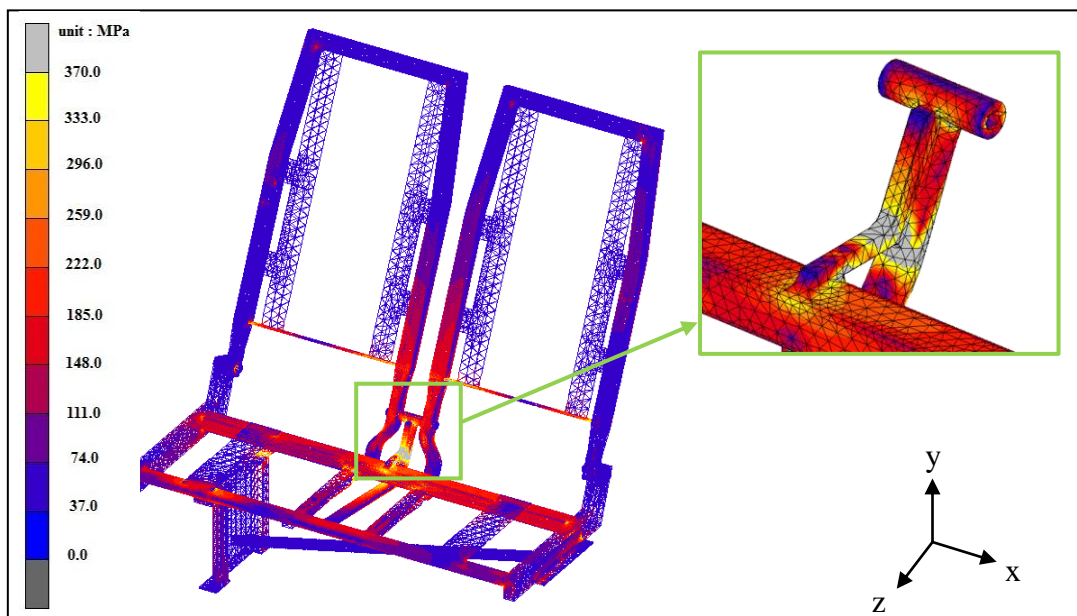
ปัจจัยที่มีอิทธิพลทำให้ค่าความเค้นวอนนิสเสสสูงสุดที่ผนังพังกมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญคือ ขนาดของเหล็กกล่องของผนัง ระยะการเปลี่ยนหน้าตัดของเหล็กโครงสร้างหลักของผนัง และความหนาของเหล็กกล่องตามลำดับ ปัจจัยปรับปรุงฐานที่นั้งคือ ขนาดเหล็กกล่องของฐานที่นั้ง ความหนาของเหล็กกล่องของฐานที่นั้ง และการลบบวมของส่วนเสริมของฐานที่นั้ง เป็นส่วนสำคัญในการช่วยลดค่าความเค้นวอนนิสเสสสูงสุดของฐานที่นั้ง ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ที่มีผลต่อการลดค่าความเค้นที่ขึ้นส่วนผนังหลังและฐานที่นั้ง ซึ่งจะนำปัจจัยเหล่านี้ไปทำการปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างที่นั้งต่อไป

4.4 แบบจำลองที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ

ในหัวข้อนี้จะปรับปรุงแบบจำลองโครงสร้างที่นั้งให้ผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้ง โดยใช้ปัจจัยจากการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง ปัจจัยที่มีอิทธิพลทำให้ค่าความเค้นลดลง และได้ทำการปรับค่าปัจจัยเหล่านั้นเป็นค่ามากที่สุด ผลที่ได้คือ โครงสร้างที่นั้งก็ยังมีค่าความเค้นมากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุอยู่ จึงได้มีการปรับปรุงเพิ่มค่าปัจจัยให้มีค่ามากขึ้น โดยเลือกขนาดเหล็กกล่องเป็น 38×38 มิลลิเมตร และมีความหนาของเหล็กกล่องเป็น 3.2 มิลลิเมตรในส่วนของเหล็กกล่องโครงสร้างหลักของทั้งสองชั้นส่วน ระยะการเปลี่ยนหน้าตัดจากเดิม 70 มิลลิเมตรเพิ่มเป็น 120 มิลลิเมตร ส่วนการลบบวมของส่วนเสริมตรงกลางของฐานที่นั้งนั้นไม่สามารถปรับเพิ่มได้ เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของระยะพื้นที่ในการลบบวม และทำการวิเคราะห์ผลและพิจารณาปรับเพิ่มต่อไป

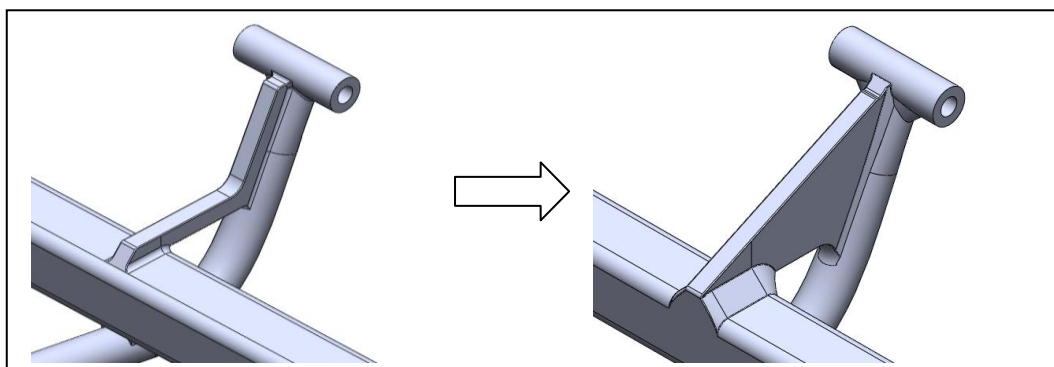
4.4.1 การปรับปรุงโครงสร้างที่นั้งที่ผ่านการทดสอบ

จากผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ได้ทำการปรับค่าปัจจัยที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความเค้นวอนนิสเสสสูงสุดที่เกิดกับผนังหลังมีค่าลดลง จนมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ ทำให้โครงสร้างผนังหลังไม่เกิดความเสียหาย แต่ในส่วนฐานที่นั้งนั้นยังมีความเค้นวอนนิสเสสสูงสุดเท่ากับ 407.71 MPa ซึ่งมีค่ามากเกินไปกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ โครงสร้างที่นั้งจึงยังเกิดความเสียหายในส่วนของชั้นฐานที่นั้ง ทำให้โครงสร้างที่นั้งยังไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ ดังแสดงในรูป 4.14



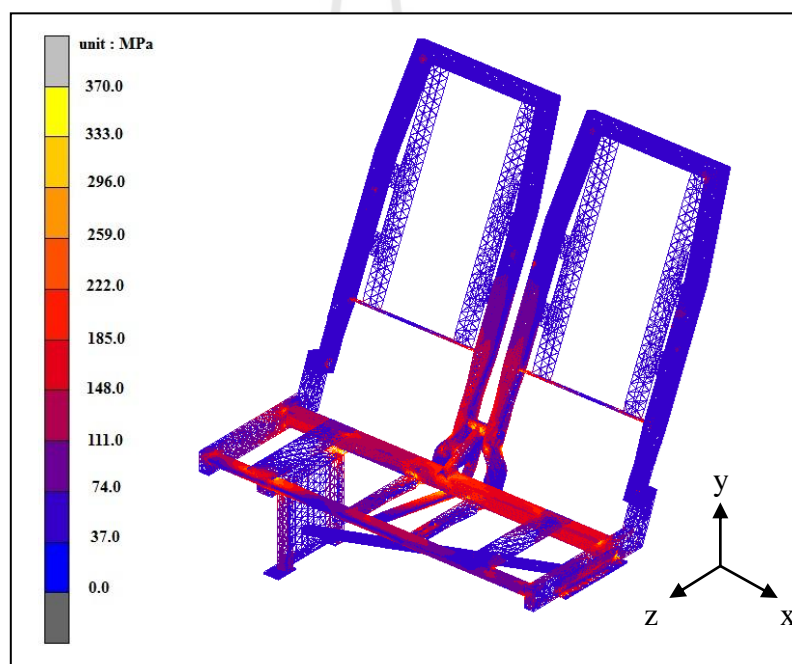
รูปที่ 4.14 ค่าความเค้นวอนมีสเสสของการปรับเพิ่มค่าปัจจัย

จากการรูปที่ 4.14 จะเห็นค่าความเค้นวอนมีสเสสสูงสุดที่ฐานที่นั่งยังมีค่ามากกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุจึงต้องปรับปรุงเพิ่ม แต่การเพิ่มขนาดของเหล็กกล่องของฐานที่นั่งมากเกินกว่า 38×38 มิลลิเมตรจะทำให้โครงสร้างที่ฐานที่นั่งมีขนาดที่ใหญ่จนเกินไปและน้ำหนักของโครงสร้างเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้การประกอบส่วนระบบปรับเอนเข้ากับฐานที่นั่งจะทำได้ลำบากมากยิ่งขึ้นด้วย เนื่องจากจำเป็นต้องเสริมเหล็กด้านล่างเพื่อให้ระยะการปรับเอนให้เท่าเดิม ดังนั้นการพิจารณาปรับปรุงในขั้นตอนต่อไป จึงได้ทำการเพิ่มขนาดชิ้นส่วนที่เป็นเหล็กเสริมตรงกลางของฐานที่นั่ง เพื่อให้เป็นส่วนช่วยรับแรงที่ส่งมาจากพนักพิงหลัง ได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 การพิจารณาเพิ่มส่วนเสริมของฐานที่นั่ง

จากผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดของฐานที่นั่งมีค่าลดลง และมีค่าไม่เกินค่าความเค้นครากของวัสดุ ซึ่งทำให้โครงสร้างที่นั่งทุกชิ้นส่วนมีค่าความเค้นไม่เกินค่าความเค้นคราก ที่นั่งผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรง โดยส่วนที่ได้มีการปรับเพิ่มขึ้นไปคือ ขนาดเหล็กกล่องของพนักพิงหลังและฐานที่นั่งเป็น 38×38 มิลลิเมตรหนา 3.2 มิลลิเมตร ระยะของการเปลี่ยนแปลงหน้าตัดเป็นระยะ 120 มิลลิเมตร และการเพิ่มขนาดในส่วนเสริมของฐานที่นั่ง การปรับปรุงในส่วนเหล่านี้เมื่อทำการวิเคราะห์ จะได้ผลของการกระจายตัวความเค้นวอนมิสเซสแสดงในรูปชั้นแถบสีดังในรูปที่ 4.16 ซึ่งมีค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดของโครงสร้างที่นั่งมีค่าเท่ากับ 304.24 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าความเค้นครากของวัสดุ ดังนั้นในการปรับปรุงโครงสร้างนี้ จึงได้แบบโครงสร้างที่นั่งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่งสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่

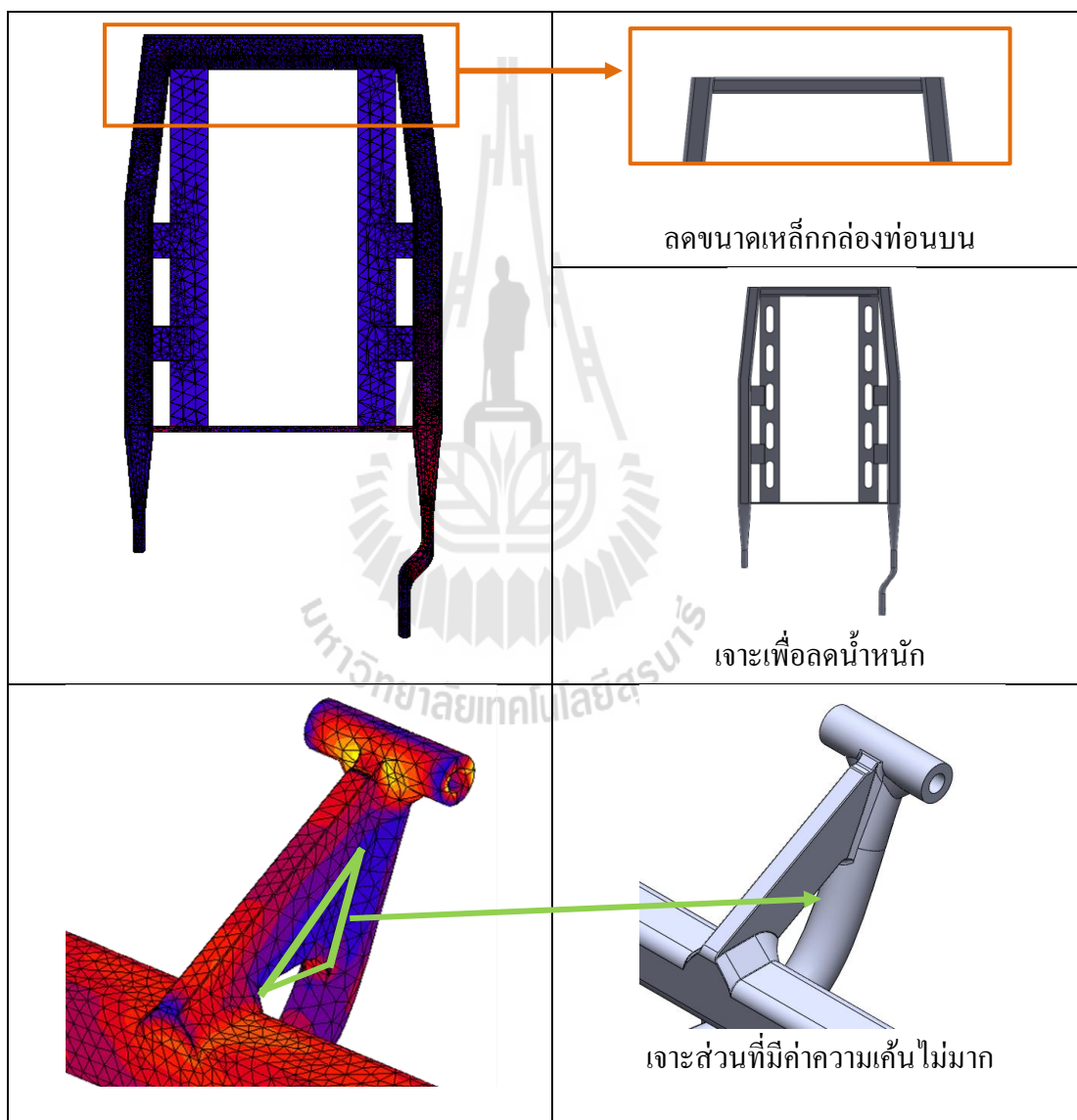


รูปที่ 4.16 ค่าความเค้นวอนมิสเซสของแบบจำลองที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ

4.4.2 การลดน้ำหนักของโครงสร้างที่นั่ง

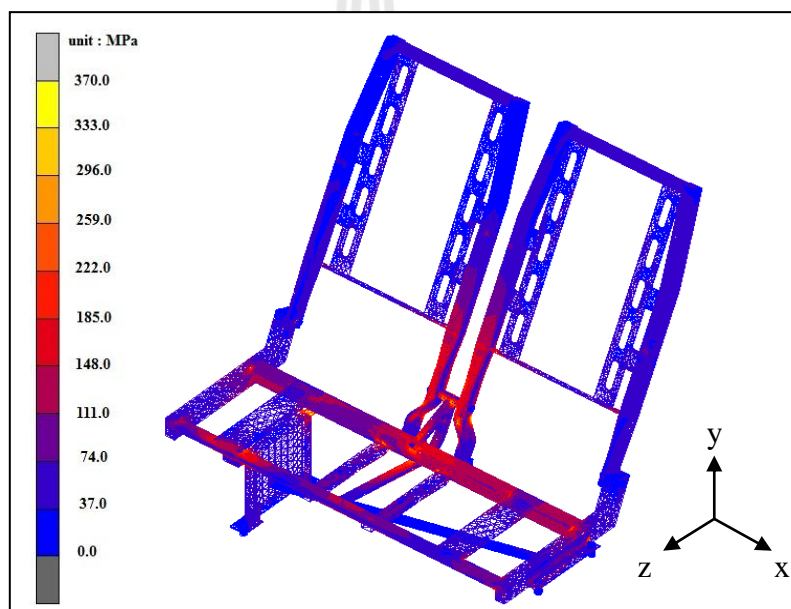
แบบจำลองที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ผ่านมาได้แบบจำลองที่นั่งที่มีความแข็งแรงผ่านมาตรฐานการทดสอบแบบจำลองได้มีการเสริมและเพิ่มขนาดของเหล็กในส่วนต่าง ๆ ประกอบเป็นโครงสร้างที่นั่ง ซึ่งทำให้น้ำหนักของโครงสร้างที่นั่งเพิ่มขึ้นจากเดิม 9.786 กิโลกรัม คิดเป็น 55 % ของน้ำหนักโครงสร้าง

ที่นั่งแบบเดิม เนื่องจากรถโดยสารมีชุดที่นั่งอยู่หลายชุดจึงทำให้รถโดยสารมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมาก ทำให้บรรทุกผู้โดยสารได้จำนวนคนที่น้อยลง และส่งผลต่อการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงอีกด้วย ดังนั้นเพื่อไม่ให้รถโดยสารมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นมากเกินไป จึงได้พิจารณาลดน้ำหนักจากแบบจำลองที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ จากรูปที่ 4.16 พิจารณานาชนิดชิ้นส่วนที่มีค่าความเค้นวอนมีเสษน้อย ๆ และเจาะรูเพื่อลดน้ำหนักบริเวณที่ไม่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ซึ่งจะพิจารณาดังแสดงในรูป 4.17



รูปที่ 4.17 พิจารณาลดน้ำหนักแบบจำลองโครงสร้างที่นั่ง

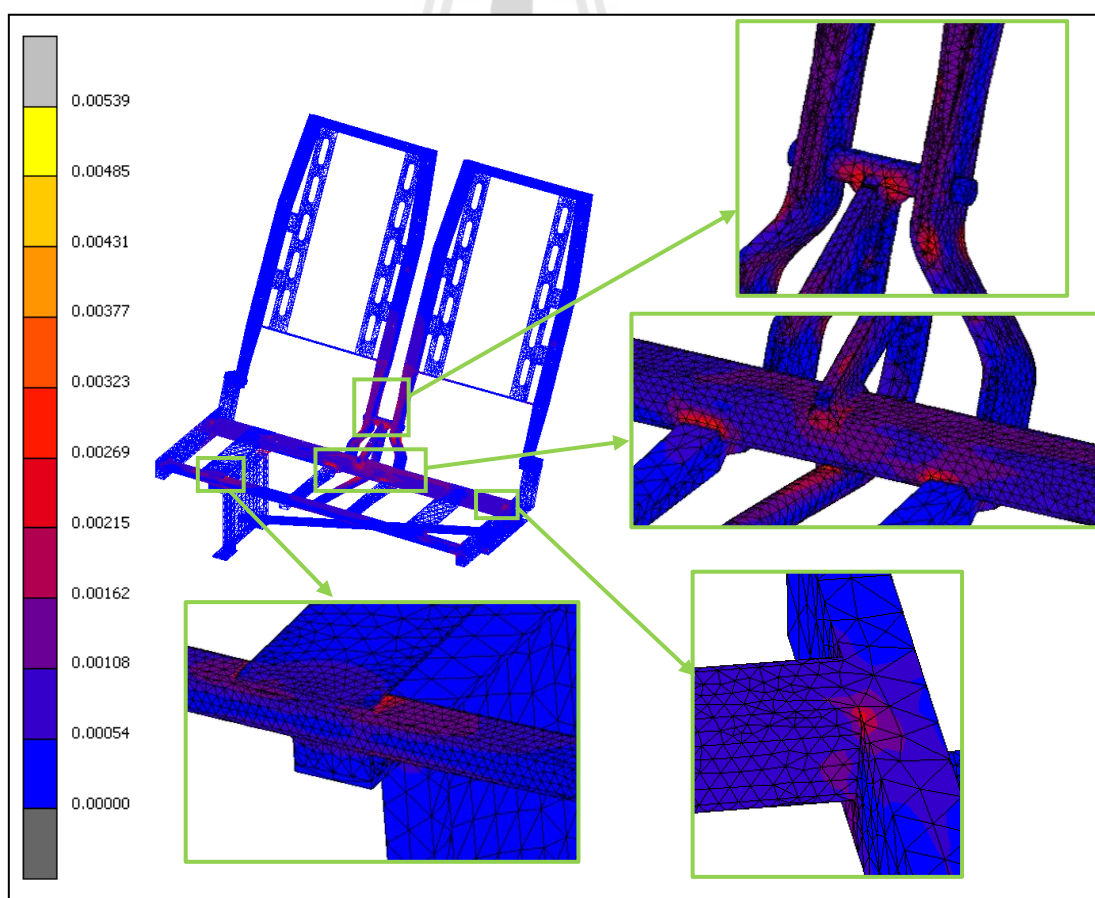
พิจารณาลดน้ำหนักโดยการลดขนาดของเหล็กกล่องที่เป็น โครงสร้างหลักของ พนักพิงให้เป็นขนาด 32×32 มิลลิเมตรและหนา 2.8 มิลลิเมตร ลดขนาดเหล็กกล่องส่วนบนสุด ของพนักพิงเนื่องจากเกิดความเค้นวอนมีสเซนส์น้อยมาก จึงลดเป็นขนาด 25×25 มิลลิเมตรและ หนา 2 มิลลิเมตรดั่งเช่นแบบจำลองเดิม และพิจารณาเจาะส่วนเสริมของ โครงสร้างพนักพิง ซึ่งส่วน นี้เป็นส่วนของ โครงสร้างพนักพิงที่ใช้สำหรับยึดเบาะหุ้มพนักพิงที่นั่ง ในส่วนของฐานที่นั่ง พิจารณาเจาะส่วนที่เสริมตรงกลางของฐานที่นั่งเนื่องจากในส่วนด้านล่างของส่วนเสริมของ ฐานที่นั่งเกิดความเค้นวอนมีสเซนส์น้อยจึงไม่จำเป็นต้องเสริมทั้งหมด การลดน้ำหนักนี้จะทำให้ได้ โครงสร้างมีน้ำหนักเพิ่มจากโครงสร้างเดิม 4.296 กิโลกรัมคิดเป็น 24.21 % ผลการวิเคราะห์ผ่าน มาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ค่าความเค้นวอนมีสเซนส์สูงสุดของแบบจำลองต้นแบบโครงสร้างที่นั่ง

จากรูปที่ 4.18 ความเค้นวอนมีสเซนส์สูงสุดของแบบจำลองมีค่าน้อยกว่าค่า ความเค้นครากของวัสดุ โดยเกิดค่าความเค้นวอนมีสเซนส์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 349.05 MPa ที่ส่วนยึด พนักพิงหลังบริเวณตรงกลางของฐานที่นั่ง ซึ่งค่าความปลอดภัยของโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 1.06 ใน การวิเคราะห์โครงสร้างในงานแบบสถิตยศาสตร์ถือว่าเป็นที่ยอมรับได้เนื่องจากแบบจำลองที่นำมา วิเคราะห์นั้น เป็นเพียงโครงสร้างไม่มีชิ้นส่วนเบาะหุ้มที่ช่วยรับภาระกรรม ดังนั้นจึงถือว่าการปรับปรุงเป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นแบบของ โครงสร้างที่นั่งที่ทำการลดน้ำหนักนี้ผ่านมาตรฐาน การทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั่ง

ค่าความเครียดของแบบจำลองที่นั่งที่ปรับปรุงมีค่าพลังงานความเครียดกระจุกตัวที่โครงสร้างที่นั่งตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีโอกาสที่โครงสร้างที่นั่งเกิดความเสียหายในบริเวณนั้น จึงอาจที่จะมีการปรับปรุงพัฒนาแบบจำลองโครงสร้างที่นั่งต่อไป โดยความเครียดมีค่าสูงสุด 0.0054 ซึ่งบริเวณที่เกิดความเครียดคือ โครงสร้างเหล็กกล่องของพนักพิง ส่วนยึดพนักพิงบริเวณตรงกลาง และโครงสร้างเหล็กกล่องของฐานที่นั่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดความเค้นสูง แต่ความเครียดที่เกิดขึ้นนั้น ยังเป็นความเครียดที่ทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูปในช่วงยืดหยุ่น โครงสร้างที่นั่งไม่เกิดการเสียรูปอย่างถาวร นอกจากบริเวณที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีบริเวณที่เกิดความเครียดส่วนอื่นด้วย ซึ่งเป็นส่วนที่อาจจะเกิดความเสียหายได้ นั่นคือ ส่วนของรอยเชื่อมต่อที่โครงสร้างเหล็กกล่องของฐานที่นั่งต่อเข้ากับเหล็กกล่องด้านข้างทั้งสองด้าน ส่วนของจุดยึดระบบปรับเอนเชื่อมต่อกับเหล็กกล่องโครงสร้างหลัก และส่วนของเหล็กแผ่นที่ใช้ยึดเบาะที่นั่งเชื่อมต่อกับโครงสร้างเหล็กกล่อง บริเวณที่กล่าวมานี้ อาจจะเกิดความเสียหายได้จึงอาจมีการปรับปรุงเพิ่มเติมในส่วนนี้

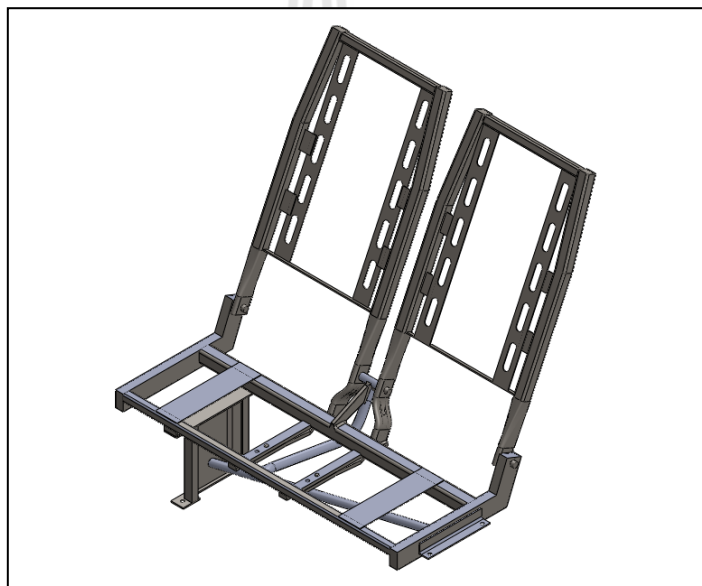


รูปที่ 4.19 ความเครียดของต้นแบบโครงสร้างที่นั่ง

การเสียรูปของ โครงสร้างที่นั่งที่ปรับปรุงเกิดความเสียรูปสูงสุดที่พนักพิงหลัง ใน บริเวณเปลี่ยนหน้าตัดของเหล็กกล่อง ซึ่งมีค่าคดน้อยกว่าแบบจำลองเดิม และมีการเสียรูปอยู่ในช่วงยืดหยุ่น โครงสร้างที่นั่งจึงยังกลับมาอยู่สภาพเดิมหลังการทดสอบ

4.4.3 ต้นแบบของโครงสร้างที่นั่ง

จากการปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งจนได้โครงสร้างที่นั่งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบ ความแข็งแรง และแบบจำลอง โครงสร้างที่นั่งมีน้ำหนักเป็นที่น่าพึงพอใจ ในงานวิจัยนี้จึงได้ ต้นแบบของ โครงสร้างที่นั่งที่ได้ทำการปรับปรุงจาก โครงสร้างเดิมแล้ว และได้ผลการวิเคราะห์ ความแข็งแรงที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรง ซึ่งมีลักษณะของ โครงสร้างรูปลักษณะที่ ปรับเปลี่ยนไปจากเดิมดังในรูป 4.20



รูปที่ 4.20 ต้นแบบโครงสร้างที่นั่ง

ในการปรับปรุงโครงสร้างที่นั่งนั้น ได้ปรับปรุงส่วนของพนักพิงหลัง โดยเพิ่มขนาดของเหล็กกล่องโครงสร้างหลักในแนวตั้งของพนักพิงหลังเป็นขนาด 32×32 มิลลิเมตรหนา 2.8 มิลลิเมตร ระยะการลดขนาดหน้าตัดจากกล่องสี่เหลี่ยมเป็นวงรีเป็นระยะ 120 มิลลิเมตรและเจาะเพื่อลดน้ำหนักในส่วนของแผ่นเสริมของพนักพิง

การปรับปรุงในส่วนองฐานที่นั่ง ได้ทำการเพิ่มขนาดเหล็กกล่องที่เป็น โครงสร้างหลักในชิ้นส่วนด้านหลังปรับเป็นขนาด 38×38 มิลลิเมตร ความหนา 3.2 มิลลิเมตร และเปลี่ยนลักษณะของส่วนเสริมของฐานที่นั่งให้เป็นแบบรับแรง โดยตรงจากบริเวณส่วนยึดพนักพิงโดยให้

แรงที่กระทำผ่านไปตามแนวของส่วนเสริม เมื่อประกอบโครงสร้างที่ปรับปรุงเข้ากับส่วนประกอบอื่น ๆ จะได้โครงสร้างที่นั้ดงในรูป 4.20 ซึ่งปัจจัยที่ปรับปรุงและค่าที่ปรับเปลี่ยนไปจากเดิม ซึ่งเป็นค่าของต้นแบบโครงสร้างที่นั้ดง แสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าปัจจัยปรับปรุงที่เปลี่ยนไปจากค่าเริ่มต้น

ตำแหน่งที่ปรับ	ค่าเดิม	ค่าที่ปรับปรุง
ขนาดเหล็กกล่องผนังหลัง	25×25 mm.	32×32 mm.
ความหนาเหล็กกล่องผนังหลัง	2 mm.	2.8 mm.
ระยะการเปลี่ยนหน้าตัด	20 mm.	120 mm.
ขนาดเหล็กกล่องฐานที่นั้ดง	25×25 mm.	38×38 mm.
ความหนาเหล็กกล่องฐานที่นั้ดง	2 mm.	3.2 mm.
การลบบุมบริเวณส่วนเสริมของฐานที่นั้ดง	ไม่มีการลบบุม	มีการลบบุม 10 mm.
ขนาดเหล็กเสริมของฐานที่นั้ดง	10 mm.	25 mm. และปรับให้เอียงมากขึ้น
เจาะเพื่อลดน้ำหนักในส่วนผนัง	ไม่มีการเจาะ	เจาะ

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ตามมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของที่นั่งรถโดยสาร ECE Regulation No. 17 ซึ่งเป็นการทดสอบแบบสถิตย์ศาสตร์ ได้ผลลัพธ์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์และสามารถสรุปผลการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างได้ดังนี้

5.1.1 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้งแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของพนักพิงหลังเป็นส่วนแรกที่ได้รับภาระกรรมจากแผ่นจำลองหลัง ทำให้เกิดความเสียหายในบริเวณส่วนที่เปลี่ยนหน้าตัดเพื่อเจาะรูสลักของพนักพิง เมื่อภาระกรรมส่งผ่านจากพนักพิงมายังฐานที่นั้งทำให้ฐานที่นั้งบริเวณส่วนยึดพนักพิงตรงส่วนกลางที่ทำหน้าที่ยึดพนักพิงทั้งสองข้างเข้ากับฐานที่นั้งนั้น เกิดความเสียหาย ค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 571.10 MPa ซึ่งเป็นการวิบัติจากการเกิดความเค้นสูงสุด โครงสร้างที่นั้งจึงไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่นั้ง

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเค้น จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงขนาดของเหล็กกล่องโครงสร้างหลักของพนักพิง ระยะของการเปลี่ยนหน้าตัดของเหล็กกล่อง และความหนาของเหล็กกล่องของพนักพิง มีอิทธิพลต่อการลดลงของค่าความเค้นที่พนักพิงหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ฐานที่นั้งมีการปรับปรุงขนาด ความหนาของเหล็กกล่องของโครงสร้างฐานที่นั้ง และการลบมุมของส่วนเสริมฐานที่นั้ง มีอิทธิพลต่อการลดลงของค่าความเค้นของฐานที่นั้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5.1.3 การเพิ่มขนาดในส่วนเสริมของฐานที่นั้งบริเวณตรงกลางส่งผลให้ค่าความเค้นลดลงด้วยเช่นกัน การปรับปรุงต้องปรับที่มีอิทธิพลปัจจัยเหล่านี้ร่วมกันเพื่อให้โครงสร้างที่นั้งมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ทำให้โครงสร้างที่นั้งมีความแข็งแรงผ่านมาตรฐานในการทดสอบ

5.1.4 แบบจำลองโครงสร้างที่นั้งที่ได้ทำการปรับปรุงโดยการปรับขนาดและความหนาของเหล็กกล่องที่โครงสร้างหลักของพนักพิงหลังและการปรับปรุงในส่วนของฐานที่นั้ง การปรับเพิ่มขนาดส่วนเสริมบริเวณตรงกลางของฐานที่นั้ง ทำให้โครงสร้างที่นั้งมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นมาก จึงเจาะเพื่อลดน้ำหนักในชิ้นส่วนเสริมของพนักพิงหลัง และชิ้นส่วนเสริมของฐานที่นั้ง ได้ต้นแบบของโครงสร้างที่นั้งที่มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากแบบโครงสร้างที่นั้งเดิม 4.296 กิโลกรัม คิดเป็น 24 % ต่อ

ชุด โครงสร้างที่หนึ่งหนึ่งชุด และมีค่าความเค้นวอนมีสเซต 349.05 MPa มีค่าความปลอดภัยเพิ่มขึ้นเป็น 1.06 โครงสร้างต้นแบบนั้นปลอดภัยผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างที่หนึ่งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างที่หนึ่งจริง เพื่อเปรียบเทียบยืนยันความถูกต้องของผลการจำลอง

5.2.2 แบบจำลองโครงสร้างที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรวิเคราะห์โครงสร้างที่หนึ่งในส่วนของเบาะหุ้มเข้าไปด้วย และคำนึงถึงค่าความเสียดทานระหว่างอุปกรณ์ทดสอบกับเบาะ หรือชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่สัมผัสกัน เพื่อให้ได้ผลที่ใกล้เคียงกับการทดสอบจริงมากขึ้น

5.2.3 แบบจำลองโครงสร้างที่หนึ่งควรคำนึงถึงอิทธิพลรอยเชื่อม ความแข็งแรงของรอยเชื่อม ซึ่งอาจมีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างที่หนึ่ง

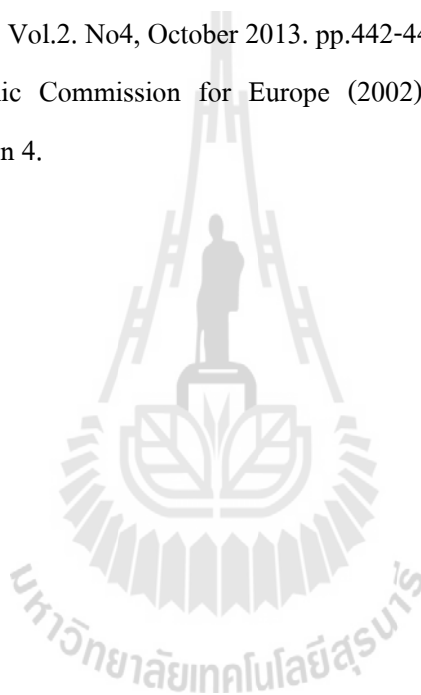
5.2.4 กระบวนการปรับปรุงเมื่อได้แบบของโครงสร้างที่หนึ่งที่ผ่านมาตรฐานการทดสอบความแข็งแรงแล้ว ควรที่จะทำการปรับปรุง โดยการเปลี่ยนวัสดุที่ทำโครงสร้างที่หนึ่งให้มีสมบัติวัสดุที่มีความแข็งแรงมากขึ้น เพื่อที่จะทำให้ค่าความปลอดภัยมีค่าเพิ่มมากขึ้น



รายการอ้างอิง

- เดช พุทธเจริญทอง (2541). การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. พิมพ์ดี. กรุงเทพฯ. 413 หน้า
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ (2555). ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 613 หน้า
- ปารเมศ ชูติมา (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. 543 หน้า
- มนตรี พิรุณเกษตร (2548). กลศาสตร์ของวัสดุ. วิทยพัฒน์. กรุงเทพฯ. 632 หน้า
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ที่นั่ง จุดยึดที่นั่ง และพนักพิงศีรษะของยานยนต์ (2549). มอก. 896 - 2549. 40 หน้า
- สุรเชษฐ์ ชูติมา ทศนพ กำเนิดทอง และ มนตรี ช่างประดิษฐ์ (2547). การวิเคราะห์โครงสร้างเบาะรถยนต์สำหรับหารแข่งขัน. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 18 จังหวัดขอนแก่น.
- Abhinand Chelikani (2007). Simulation of a Backrest Moment Test for an Automotive Front Seat Using Nonlinear Contract Finite Element Analysis. **All Thesis**, Clemson University. pp. 210
- 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
- Brian R. Herbst, Steven E. Meyer, Arin A. Oliver and Stephen M. Forrest, (2009). Rear Impact Test Methodologies : Quasistatic And Dynamic. **21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles**, Paper Number 09-0533. June 15-18, 2009. Stuttgart, Germany.
- Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke and Richard G. Budynas, (2011). **Shigley's Mechanical Engineering Design**. Edition 9. McGrawHill. pp.219-223

- Kitti Wirotrattanaphaphisan, Suthep Butdee and Chaiwat Noomtong, (2008). Finite Element Method of Automotive Car Seat. **Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008)**. Faculty of Engineering. Khon Kaen University, Thailand. 28-29 January 2008. pp.719-723
- Li-Xin Guo, Hui Chen and Jin-Li Li (2011). Endergonic Property Analysis of Vehicle Seat Pillow Under Heads Crash Loads. **Procedia Engineering 15**, 2011. pp.3046-3050
- Mohan D Karanbe, A V Karmankar and Y L Yennarkar, (2013). Stress Analysis of Seat Backrest of Car. **International Journal of Mechanical Engineering and Research**. ISSN 2278-0149, Vol.2. No4, October 2013. pp.442-448
- United Nations Economic Commission for Europe (2002). **Regulation No. 17**. Transport Division, Revision 4.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a circular emblem. At the top, it features a stylized tower or spire. Below this, a central figure of a person stands on a platform. The emblem is surrounded by a decorative border with a scalloped or sunburst-like pattern. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in Thai script along the bottom curve of the emblem.

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Siwadamrongpong, S., Rooppakhun, S., Burakorn, P. and Murachai, N., (2013).

Strength Analysis of Seat Structure for Large Passenger Vehicles by Using Finite Element

Method. International Conference on Materials and Manufacturing Research (IMMRC2012).

19-20 December, 2012. Hong Kong. pp. 335-339



Advanced Materials Research Vol. 658 (2013) pp 335-339
 Online available since 2013/Jan/25 at www.scientific.net
 © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.658.335

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

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

¹ School of Manufacturing Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, Thailand

² School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhonratchasima, 30000, Thailand

^asomsaksi@sut.ac.th, ^bsupakit@g.sut.ac.th, ^craykad_korn@hotmail.com, ^djana4_4@hotmail.com

Keywords: ECE Regulation, Finite element, Strength analysis, Seat, Bus

Abstract. Presently, large passenger vehicles are known to have high risk of an injury due to accident and insufficient of safety regulation. The strength of seat is one of important issues that affect to injury level of passenger. Therefore, suitable structure strength and design of the seat are very important to prevent injuries and passenger life. This study was to evaluate strength of the seat structure for bus according to preliminary safety regulation of Department of Land Transport. Finite element analysis is employed by using a static load. The seat model was simplified and simulated. Stress and impact scenario between seat-back and back of manikin will be investigated. The strength and deflection of the seat will be evaluated. This study is expected to provide the seat model which will be safe and satisfied according to the regulation.

Introduction

Traveling with public buses is convenient and economical. However, buses are at risk of an accident at any time. The suitable safety regulation has been necessary for prevent injury and deaths. Traffic accidents of large passenger vehicles cause to a large quantity of personnel casualty and loss. Besides the strength of chassis and other parts, strength of the seat structure also important to prevent injuries and prevent loss of life. Since the strength of the seat structure is very important to affect passenger life in case of accident, referred to information from Thai Accident Research Center [1]. Therefore, the seat strength must be tested following the preliminary regulation from Department of land Transport according to strength of the seat structure test for large passenger vehicles.

On the design processes, design and experiment of seat structure were a waste of price and time. There are more cost and time saving to apply Computer Aided Engineering (CAE) technology to the design processes. The CAE enable to perform more rapid, low cost and convenient to designers. Application of the finite element analysis (FEA) on Non Recliner Race-1 seat structure is also employed and reported by other researcher [2]. In this study, static FEA is employed by using equivalent impact load from the regulation.

The aim of this study was to evaluate strength of the seat structure, according to preliminary safety regulation of Department of Land Transport. The strength of the seat-back and adjustment systems of large passenger vehicles seat will be analyzed. Static FEA is employed by using a static load according to the regulation to indicate seat-back behavior during impact between seat-back and back of the manikin. This research is expected to provide the appropriated seat model and guideline to design the bus seat.

Materials and Methods

Regulation about Strength of test. Department of Land Transport have preliminary regulation about Strength of the seat structure test for large passenger vehicles referred to European standard ECE Regulation 17 [3]. The seat-back, if adjustable, will be locked in a position corresponding to a

rearward inclination as close as possible to 25° from the vertical of the torso reference line of the manikin. The moment load was applied by 530 Nm in relation to the R point and rearwards to the upper part of the seat-back frame as shown in Fig. 1.

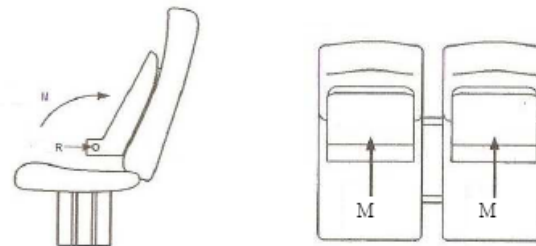


Fig. 1 Test of strength of the seat-back and its adjustment systems

The R point or seating reference point which means a design point defined by the vehicle manufacturer for each seating position and established with respect to the three-dimensional reference system of hip joint.

Seat modeling. In this study the seat model is simplified from a real vehicle seat and only the structural frame of the seat was modeled. The seat structure model was created using SolidWorks 2011. The model and components are showed in Fig. 2. The components of seat structure were modeled using shell elements while the back of the manikin and floor were represented by solid elements. The FEA simulation will be carried out and expected to achieve the appropriated model which is safe and satisfied to the regulation.

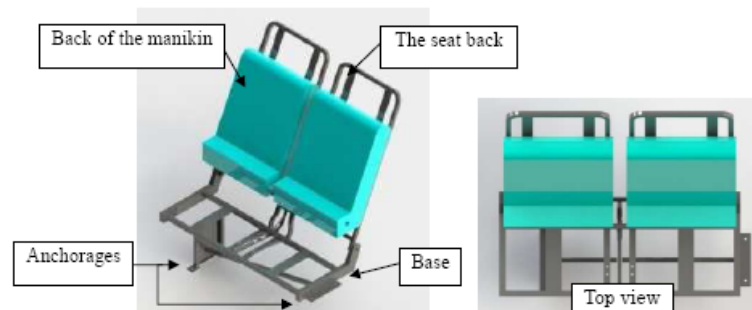


Fig. 2 Components of the seat model

The complementary of seat structure is consisted of various thickness part and material properties which obtained from standard ASTM E8 [4]. The seat structure consists of steel rectangular tubes and sheets material, which have the mechanical properties as (Elastic modulus/ Yield stress/ Poisson's ratio) 195 GPa/ 470 MPa/ 0.26 and 133 GPa/ 390 MPa/ 0.26, respectively. And the mild steel (ASTM A36) was assumed to be isotropic material.

Table 1 Components of the seat structure model

No.	Name parts	Thickness [mm]	Element type
1	Seat-back	2	Shell
2	Base	2	Shell
3	Anchorage	4	Solid
4	Back of the manikin		Solid

Finite Element Model

Boundary conditions and applied loads. Considering the simulation was to evaluate strength of seat structure. The seat-back locked in a position corresponding to a rearward inclination as close as possible to 25° from the vertical reference. A forces load was applied by 1325 N in relation vertical to the manikin from the R point 0.4 meters. The amount of moment can be computed Eq. 1.

$$M = F \times L \quad (1)$$

Where M is the moment load formed by the applied force and displacement in relation to the R point, F is the reaction forces applied to the manikin and L is length displacement between force and the R point.

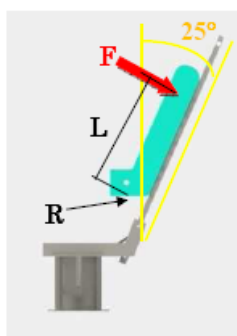


Fig. 3 Configuration of the finite element model

The contact regions of the seat and vehicle floor were set as actual fixation. The contact mode between the seat and the back frame of the manikin are face-to-face contact. A zero coefficient of friction is assumed, thus allowing free sliding and separation. The contact mode between the base and the seat-back were set as no separation contact, that separation of faces in contact is not allowed, but small amounts of frictionless sliding can occur along contact faces. Another contact set as bonded contact, which sliding and separation is not allowed. The joint connection between seat-back and base were set as revolute joint, which the relative rotation in axis of pin is allowed. The seat-back was adjusted position meet the requirements of passenger, but will be locked in a position corresponding to a rearward inclination follow the regulation of test. The finite element model is showed in Fig. 3.

Results and Discussion

In this study, strength of the seat structure was investigated using finite element analysis in term of maximum von Mises stress. The safety factor were used for decisions to the seat structure will be safe and satisfied according to the regulation. The FEA was performed based on ANSYS Workbench software. The stress distributions were presented in Fig. 4.

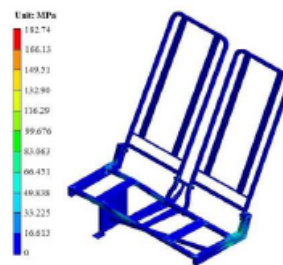


Fig. 4 Stress distribution of seat structure

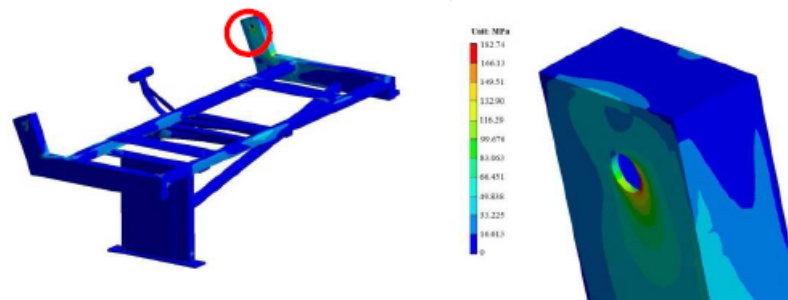


Fig. 5 Maximum von Mises stress

The result shows that the maximum von Mises stress was 182.74 MPa at the hole of joint. The maximum stress is not exceeded the yield stress limitation and safety factor was 2.58. The simulation results the maximum stress of seat-back equal to 158.36 MPa at the both joint hole. It could be considered the high stress occurred on the contact regions between base and seat-back. The seat was satisfied according to the regulation. However, the vehicle manufacturer who was competed on business, were saving investment cost in process. There were improving model of the seat structure.

To improve the model, material properties diversification and thickness increment of structure, were exhibited in this paper. There were affected to stress concentration reduction of structure and increase of safety factor. The 2^k factorial design of experiment was carried out. The material AISI 5000 series steel (ASTM A519) [5] with properties: Elastic modulus 205 GPa, Yield stress 635 MPa and Poisson's ratio 0.29, was applied to the base of seat structure. The material properties diversification yielded the changeless of maximum stress but safety factor was increased to 3.48. In the same way, the thickness of steel tubes was increased from 2 mm to 2.8 mm. The results of maximum stress and safety factor were shown in table 2.

Table 2 The results of 2^k factorial design of experiment

Material properties	Thickness of steel [mm]	Maximum Stress [MPa]	Safety Factor
ASTM A36	2	182.74	2.58
ASTM A519	2	182.94	3.48
ASTM A36	2.8	165.87	2.74
ASTM A519	2.8	166.60	3.69

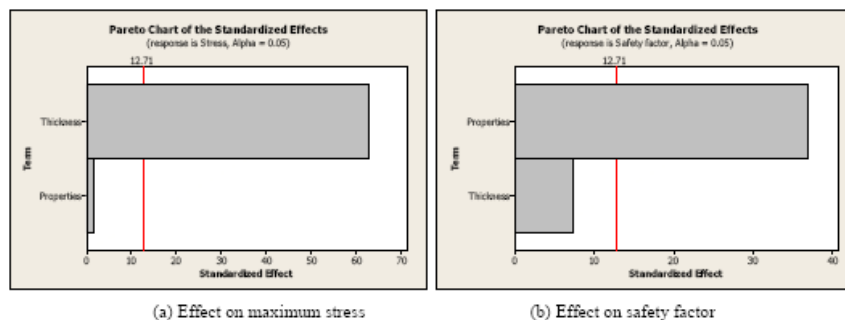


Fig. 6 The effect of main factor

Design of Experiment (DOE) was used to analyze the factor of improvement. Responses were maximum stress and safety factor. Regarding to Fig. 6 (a), it was found that the maximum stress was influenced by thickness significantly. On the other hand, the factor of safety was varied with material property significantly as show in Fig. 6 (b). So the thickness and material properties were considered as important factors to design the seat structure.

Conclusions

According to the requirements of regulation about strength of the seat structure, the finite element model was able to describe the behavior of seat derogation. The simulation results displayed the weak component which the maximum stress occurred. The 2^k factorial design of experiment results showed that the thickness increment influenced to the maximum stress and the factor of safety was dominated by the material properties diversification. In further study, the simulation results will be verified with experimental results. There are expected that these results will be used to design the appropriated seat structure for bus.

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/th>
- [2] Chutima, S., Kammerdtong, T. and Changpradit, M. (2004): An Analysis of Competition Seat for Racing Car, Thailand.
- [3] United Nations Economic Commission for Europe, Transport Division, United States of America (2002). *Regulation No. 17 Revision 4*
- [4] ASTM International Standard, Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, Designation: E8/E8M-11
- [5] Information on <http://www.matweb.com>

Materials and Manufacturing Research

10.4028/www.scientific.net/AMR.658

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

10.4028/www.scientific.net/AMR.658.335

ประวัติผู้เขียน

นายปกรณ์ บุรากร เกิดเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2531 ที่เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร เริ่มการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนอนุบาลลำโรงทาบ บริคุตต์วิทยาคุณ อำเภอลำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ ระดับมัธยมศึกษาตอนต้นที่โรงเรียนลำโรงทาบวิทยาคม อำเภอลำโรงทาบ จังหวัดสุรินทร์ ระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนศรีสะเกษวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2552 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษา ได้เข้ารับราชการทหาร ที่กองพันบริการ กรมยุทธบริการทหาร เขตดอนเมือง กรุงเทพมหานคร เป็นเวลา 1 ปี จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่สถาบันการศึกษาเดิม

ขณะที่ศึกษาในระดับมหาบัณฑิตนั้น ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอบปฏิบัติการของสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล และสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต จำนวน 4 วิชารายวิชาดังนี้

- วิชาเขียนแบบวิศวกรรม 1
- วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1
- วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3
- วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 3

และขณะที่ศึกษาได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการนำเสนอ และเผยแพร่ 1 บทความดังที่แสดงใน ภาคผนวก ก.