

ผลกระทบของตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ต่อความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**THE EFFECT OF BATTERY MODULE LOCATION ON
ELECTRICAL BUS STRENGTH**



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

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

ผลกระทบของตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ต่อความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.วรรณวนัช บุ่งสุด)

ประธานกรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.ธีระชาติ พรพิบูลย์)

กรรมการ

(อ. ดร.ปิยมณ พัวพงศกร)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

วรกิจติ ปราสาททรัพย์ : ผลกระทบของตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ต่อความแข็งแรงของรถ
โดยสารไฟฟ้า (THE EFFECT OF BATTERY MODULE LOCATION ON
ELECTRICAL BUS STRENGTH) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก
ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์, 103 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่และวิเคราะห์ความแข็งแรงของ
โครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำรุ่น CBL.EV ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทั้งนี้ใน
การออกแบบและผลิตรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำ จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญ
ซึ่งน้ำหนักของแบตเตอรี่เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของรถ
โดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำ จึงต้องมีการออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่เหมาะสม
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ทั้งหมด 3 รูปแบบ การวิเคราะห์ความแข็งแรง
ของโครงสร้างรถโดยสารจะใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรม ANSYS 14.5 โดยผล
การวิเคราะห์นี้สามารถคาดการณ์ความแข็งแรงของโครงสร้างจากค่าความเค้น ความเครียด และ
ระยะการเสียรูป ภายใต้ภาระกรรมและเงื่อนไขการคัดของโครงสร้าง เนื่องจากความเร่งโน้มถ่วง
การบิดของโครงสร้างเนื่องจากสภาพพื้นผิวถนนที่ไม่เรียบ และการเบรก เพื่อแสดงให้เห็นถึงการทำงาน
จริงของรถโดยสาร จากผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าพบว่า
ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่บนเพลาหน้า และเพลาหลังจะส่งผลกระทบต่อโครงสร้างรถโดยสาร
น้อยที่สุด ผลการศึกษาของงานวิจัยนี้คาดหวังว่าจะสามารถลดค่าใช้จ่าย และนำไปช่วยในการปรับปรุง
พัฒนาโครงสร้างของรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมการผลิต
ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

WORAKIAT PRASATSUP : THE EFFECT OF BATTERY MODULE

LOCATION ON ELECTRICAL BUS STRENGTH. THESIS ADVISOR :

ASSOC. PROF. FLT. LT. KONTORN CHAMNIPRASART, Ph.D., 103 PP.

FINITE ELEMENT/ELECTRIC BUS/LOW FLOOR BUS/STRENGTH ANALYSIS

The purpose of this research is to design the battery module location and analyze the structural strength of the low floor electric bus model CBL.EV using Finite Element Method. In the design and production processes of the low floor electric bus, the safety must be the first priority. The weight of battery module is a main subject to be effect of the low floor electric bus structure strength. This research has designed the three models of battery module location. The structural strength analysis of the low floor electric bus using computer aided engineering ANSYS 14.5. The results of analysis can forecast the structure strength in terms of stress, strain, and displacement under several load and constrain conditions in terms of bending case as the result of gravitational acceleration, torsion case as the result of uneven road and braking case, which reflect the actual duty cycle of the bus. The results of this analysis, the location of battery module on the front axle and rear axle to be minimum effect of the bus structure. The results are expected to reduce the cost of actual test and effectively enhance the improvement of the low floor electric bus structure.

School of Manufacturing Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พิจิตรา เอื้องไพโรจน์ ผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการ และช่วยตรวจทานบทความทางวิชาการจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภกิจ รูปจันทร์ ผู้ให้คำแนะนำด้านการประยุกต์ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ในการดำเนินงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ จิตติมา วระกุล ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และแนะนำแนวทางจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ บริษัทอุเชิศจัยอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล ตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อพิรพัฒน์ ปราสาททรัพย์ และคุณแม่ปัสกร ปราสาททรัพย์ ที่ให้การอบรม เลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษามาเป็นอย่างดี สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

วรเกียรติ ปราสาททรัพย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	๗
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย.....	3
1.5 สถานที่ทำงานวิจัย.....	3
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	5
2.2.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์.....	6
2.2.2 เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์	7
2.2.3 สมการเชิงอนุพันธ์.....	11
2.2.4 หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด.....	14
2.2.5 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์.....	16
2.3 ทฤษฎีความเสถียร.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.1	ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress Theory)	20
2.3.2	ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปสูงสุด (Maximum distortion energy theory)	21
2.3.3	บทสรุปความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว	26
2.4	สถานะที่ใช้ในการพิจารณาและออกแบบโครงสร้างรถโดยสาร	27
2.4.1	สถานะโมเมนต์คด (Bending Case)	27
2.4.2	สถานะแรงบิด (Torsion Case)	29
2.4.3	สถานะรวมของแรงคดและแรงบิด (Combined Bending and Torsion Case)	31
2.4.4	สถานะแรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Loads)	31
2.4.5	สถานะแรงกระทำในแนวด้านข้าง (Lateral Loads).....	32
2.5	ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	33
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	35
3.1	กล่าวนำ	35
3.2	การทดสอบสมบัติวัสดุ	37
3.2.1	การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	37
3.2.2	การทดสอบแรงดึง	38
3.2.3	ผลการทดสอบสมบัติวัสดุ	38
3.3	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	41
3.3.1	การออกแบบวิธีตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม	41
3.3.2	การทดสอบชิ้นงานจริง	43
3.3.3	การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	46
3.4	การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์	49
3.4.1	การสร้างแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า	50
3.4.2	การออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3	การพิจารณากำหนดเอลิเมนต์	55
3.4.4	การกำหนดสมบัติวัสดุ	56
3.4.5	การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส	57
3.4.6	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์	57
4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	66
4.1	กล่าวนำ	66
4.2	ผลการตรวจสอบความถูกต้องของ โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	66
4.2.1	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบระยะ การเสีขรูปของชิ้นงาน	67
4.2.2	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การทดสอบระยะ การเสีขรูปของชิ้นงาน	68
4.2.3	ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบค่าความเค้น ของชิ้นงาน	70
4.2.4	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การทดสอบค่าความเค้น ของชิ้นงาน	72
4.2.5	พิจารณาผลการตรวจสอบความถูกต้องของ โปรแกรม ไฟไนต์เอลิเมนต์	73
4.3	ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของ โครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า ประเภทชานต่ำ	74
4.3.1	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตำแหน่งการวางเบดเตอร์ รูปแบบที่ 1	74
4.3.2	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตำแหน่งการวางเบดเตอร์ รูปแบบที่ 2	79
4.3.3	ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตำแหน่งการวางเบดเตอร์ รูปแบบที่ 3	83
4.3.4	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี	88

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	91
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	92
	รายการอ้างอิง.....	93
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	95
	ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	97
	ประวัติผู้เขียน	103



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	Bending Load Factor.....	29
2.2	Torsion Bump Height	31
2.3	Load Factors for Braking	32
3.1	ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8	38
3.2	ค่าสมบัติวัสดุที่กำหนดให้กับแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า.....	56
3.3	ภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า	62
3.4	ภาระกรรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า.....	63
ก.1	ข้อมูลภาระกรรมต่าง ๆ ของรถโดยสารไฟฟ้า.....	96

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เอลิเมนต์ใน 1 มิติ	8
2.2	ตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ใน 1 มิติ สำหรับการแก้ปัญหา.....	8
2.3	เอลิเมนต์ใน 2 มิติ	9
2.4	ตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ใน 2 มิติ สำหรับการแก้ปัญหา.....	9
2.5	เอลิเมนต์ใน 3 มิติ	10
2.6	ตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ใน 3 มิติ สำหรับการแก้ปัญหา.....	10
2.7	การเปรียบเทียบเอลิเมนต์ชนิดต่าง ๆ	10
2.8	เอลิเมนต์ทรงสี่หน้าใน 3 มิติ.....	11
2.9	ความสมดุลตามตำแหน่งใด ๆ ในของแข็ง 3 มิติ.....	13
2.10	ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของเทรסקา.....	21
2.11	สถานะของความเครียด	22
2.12	ความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของวอนมิสเชส.....	25
2.13	การเปรียบเทียบทฤษฎีความเสียหายกับการทดลอง	26
2.14	สภาวะแรงดัด (Bending Case).....	27
2.15	ตัวอย่างพฤติกรรมที่ทำให้เกิดสภาวะแรงดัดแบบพลศาสตร์.....	28
2.16	สภาวะแรงบิด (Torsion Case).....	29
2.17	ตัวอย่างพฤติกรรมที่ทำให้เกิดสภาวะแรงบิด.....	30
2.18	ลักษณะแรงกระทำที่ทำให้เกิดสภาวะแรงบิดเพียงอย่างเดียว	30
2.19	สภาวะรวมของแรงดัดและแรงบิด	31
2.20	สภาวะแรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Loads)	32
2.21	สภาวะแรงกระทำในแนวด้านข้าง (Lateral Loads)	33
3.1	แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	36
3.2	ลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8.....	37
3.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม ของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400..... 40
3.5	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงและความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กแผ่น 40
3.6	ลักษณะการเชื่อมต่อของ โครงสร้างตัวถัง..... 41
3.7	ขนาดของชิ้นงานที่นำมาเชื่อมต่อกัน 42
3.8	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองการเปรียบเทียบระยะการเสียดรูป..... 42
3.9	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองการเปรียบเทียบค่าความเค้น 43
3.10	การทดสอบการเสียดรูปของชิ้นงานเนื่องจากแรงกระทำในทิศทางตามแนวแกนต่าง ๆ 44
3.11	ตำแหน่งที่ทำกรวัดระยะการเสียดรูปของชิ้นงาน 44
3.12	การทดสอบการเสียดรูปของชิ้นงานเนื่องจากโมเมนต์ดัดรอบแกน X..... 45
3.13	การทดสอบค่าความเค้นของชิ้นงาน 46
3.14	การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Beam Element Rigid Joint 46
3.15	การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Beam Element Stiffness Joint 47
3.16	การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Surface..... 48
3.17	การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Solid 48
3.18	การวิเคราะห์ปัญหาแบบ Solid welding 49
3.19	แผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 50
3.20	ส่วนประกอบหลักของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำ 51
3.21	โครงสร้างหลักของรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำ 51
3.22	แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 52
3.23	ขนาดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 53
3.24	ขนาดของรางใส่แบตเตอรี่ 53
3.25	ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 1 54
3.26	ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 2 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27 ตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3	55
3.28 การหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม.....	56
3.29 ลักษณะรอยเชื่อมของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า	57
3.30 การกำหนดภาระกรรมในกรณีการตัด	58
3.31 การกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการตัด	58
3.32 การกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการบิด	59
3.33 การกำหนดภาระกรรมในกรณีการเบรก.....	60
3.34 การกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการเบรก.....	61
3.35 ภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า	62
3.36 ภาระกรรมแบบกระจายที่กระทำในแต่ละพื้นที่.....	62
3.37 การกำหนดภาระกรรมและทิศทางที่กระทำกรณีการตัดใน โพรแกรมวิเคราะห์.....	64
3.38 การกำหนดภาระกรรมและทิศทางที่กระทำกรณีการบิดใน โพรแกรมวิเคราะห์	64
3.39 การกำหนดภาระกรรมและทิศทางที่กระทำกรณีการเบรกใน โพรแกรมวิเคราะห์	65
4.1 ลักษณะการเสียรูปในแนวแกน X, Y และ Z ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ Solid	67
4.2 เปรียบเทียบลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบในแนวแกน X	68
4.3 กราฟเปรียบเทียบระยะการเสียรูปของชิ้นงานในแนวแกน X	68
4.4 กราฟเปรียบเทียบระยะการเสียรูปของชิ้นงานในแนวแกน Y	69
4.5 กราฟเปรียบเทียบระยะการเสียรูปของชิ้นงานในแนวแกน Z.....	70
4.6 ค่าความเค้นวอนมิสเชสของชิ้นงานจากการวิเคราะห์แบบ Solid.....	71
4.7 ค่าความเค้นวอนมิสเชสของชิ้นงานจากการวิเคราะห์แบบ Solid Welding	71
4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของชิ้นงานที่ระยะ 100 มิลลิเมตร	72
4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของชิ้นงานที่ระยะ 100 มิลลิเมตร	73
4.10 ระยะการเสียรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณี การตัดของโครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง	75
4.11 ค่าความเค้นวอนมิสเชสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณีการตัดของโครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง.....	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	ระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณี การบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน	76
4.13	ค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณีการบิดตัวของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน	77
4.14	ระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณีการเบรก	78
4.15	ค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณีการเบรก	78
4.16	ระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการคัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่ง ไน้มถ่วง.....	79
4.17	ค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการคัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่ง ไน้มถ่วง.....	80
4.18	ระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการบิดตัวของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน.....	81
4.19	ค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการบิดตัวของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน.....	81
4.20	ระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการเบรก	82
4.21	ค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการเบรก	83
4.22	ระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3 กรณีการคัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่ง ไน้มถ่วง.....	84
4.23	ค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3 กรณีการคัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่ง ไน้มถ่วง.....	84
4.24	ระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3 กรณีการบิดตัวของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน.....	85
4.25	ค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3 กรณีการบิดตัวของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน.....	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.26	ระยการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอรืรูปแบบที่ 3 กรณืการเบรก	87
4.27	ค่าความเค้นวอนมืสเซสจากตำแหน่งการวางเบตเตอรืรูปแบบที่ 3 กรณืการเบรก	87
4.28	กราฟเปรืยบเปรืยบผลการวืเคราะห้ของระยการเสีรูปในแต่ละกรณื	88
4.29	กราฟเปรืยบเปรืยบผลการวืเคราะห้ของค่าความเค้นวอนมืสเซสในแต่ละกรณื.....	89
4.30	กราฟเปรืยบเปรืยบผลการวืเคราะห้ของค่าความปลอดกัยในแต่ละกรณื	90



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ε	=	ความเครียด
γ	=	ความเครียดเฉือน
σ	=	ความเค้นในแนวแกน
σ_u	=	Ultimate stress
σ_y	=	Yield stress
σ_{VM}	=	ความเค้นวอนมิสเซส
τ	=	ความเค้นเฉือน
ν	=	Poisson's ratio
E	=	Young's modulus
J	=	พลังงานศักย์รวม
U	=	พลังงานความเครียดภายในวัตถุ
V	=	พลังงานศักย์ที่เกิดจากแรงภายนอก
K	=	ค่าความแข็งเกร็ง
u_d	=	พลังงานความเครียดของการเปลี่ยนรูป
u_v	=	พลังงานความเครียดของการเปลี่ยนปริมาตร
m	=	มวล
g	=	ความเร่งโน้มถ่วง
a	=	ความเร่ง
L	=	ระยะฐานล้อ
F	=	แรงกระทำในแนวแกน
v	=	ความเร็ว
t	=	เวลา

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันระบบขนส่งมวลชนประเภทรถโดยสารสาธารณะกำลังเป็นที่นิยมอย่างมากในประเทศไทย โดยเฉพาะกรุงเทพมหานคร จากสถิติจำนวนผู้ใช้บริการรถโดยสารสาธารณะในการเดินทางมีจำนวนเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ ปี และจากสถิติการจดทะเบียนรถโดยสารใหม่ที่เพิ่มขึ้นทุกปี แสดงให้เห็นถึงปริมาณรถโดยสารบนท้องถนนที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งในปัจจุบันรถโดยสารสาธารณะที่ใช้ในการให้บริการ ยังคงใช้น้ำมันเป็นพลังงานเชื้อเพลิงในการขับเคลื่อน ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงถือเป็นพลังงานสิ้นเปลือง เป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดสิ้นไป และมีปริมาณจำกัด และการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงยังก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ ภาวะอุตสาหกรรมยานยนต์จึงได้ศึกษาและพัฒนาเครื่องยนต์พลังงานทางเลือก ซึ่งเครื่องยนต์พลังงานไฟฟ้าถือเป็นอีกหนึ่งพลังงานทางเลือกที่ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อแก้ไขปัญหาด้านมลพิษที่เกิดขึ้น

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (PEA) จึงได้ร่วมมือกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และบริษัท อูเชิดซ์อุตสาหกรรม จำกัด จัดทำโครงการ “รถโดยสารไร้มลพิษ” ซึ่งเป็นรถโดยสารประเภทขานต่ำ (Low Floor Bus) ที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า สามารถให้บริการแก่ผู้พิการที่ต้องใช้เก้าอี้รถเข็น (Wheelchair) การจัดสร้างรถโดยสารไร้มลพิษนี้จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารที่ใช้บริการเป็นอันดับแรก เนื่องจากสถิติการเกิดอุบัติเหตุของรถโดยสารจากข้อมูลของสำนักงานตำรวจแห่งชาติยังมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นจำนวนมาก เพื่อลดอุบัติเหตุและการสูญเสียชีวิตที่เกิดขึ้นบนท้องถนน ดังนั้น โครงสร้างหลักของรถโดยสารจะต้องมีความแข็งแรง ได้รับการออกแบบและการวิเคราะห์ความแข็งแรงตามหลักวิศวกรรม ซึ่งในปัจจุบันการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Design) และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม (Computer Aided Engineering) ได้มีบทบาทที่สำคัญมากขึ้น เนื่องจากมีความสะดวก รวดเร็ว และช่วยลดต้นทุนได้ โดยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขทางวิศวกรรมที่มีประสิทธิภาพและใช้กันอย่างแพร่หลาย สำหรับรถโดยสารไร้มลพิษนี้จะใช้ชุดแบตเตอรี่ชนิดลิเทียม ไอออน (Lithium-Ion Battery Module) จำนวน 11 ชุด เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนชุดแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออน

นี้มีน้ำหนักชุดละ 230 กก. จึงต้องมีการออกแบบตำแหน่งการจัดวางแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับโครงสร้างรถโดยสารและส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างน้อยที่สุด

งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษา ออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ และวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของรถโดยสารไว้มลพิษนี้ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้แรงกระทำและเงื่อนไขแบบต่าง ๆ เพื่อสะท้อนให้เห็นรอบการทำงานจริงที่เกิดขึ้น และคาดการณ์ลักษณะการเสียรูป ค่าความเค้น และค่าความเครียดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง ซึ่งผลการศึกษาของงานวิจัยนี้ คาดหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถนำไปเป็นข้อมูลในการจัดทำรถโดยสารไว้มลพิษนี้ได้ และสามารถนำข้อมูลมาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยในการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนานต่ำ รุ่น CBL.EV นี้ มีวัตถุประสงค์หลัก ๆ ในการวิจัย ดังต่อไปนี้

1. เพื่อออกแบบตำแหน่งการวางชุดแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนานต่ำ รุ่น CBL.EV
2. เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนานต่ำ และผลกระทบของตำแหน่งการวางชุดแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลของรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนานต่ำ รุ่น CBL.EV ที่ได้รับจากบริษัทผู้ผลิตชุดอุตสาหกรรม จำกัด ในการดำเนินงานวิจัย
2. ออกแบบตำแหน่งการวางชุดแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนที่เหมาะสมต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนานต่ำ รุ่น CBL.EV
3. วิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการวางชุดแบตเตอรี่ลิเทียม ไอออนที่ส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบสถิตยศาสตร์
4. พิจารณารอยเชื่อมของโครงสร้างเป็นการเชื่อมต่อแบบสมบูรณ์ กำหนดให้เป็นแบบยึดติดกันแน่น (Rigid joint)
5. ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 14.5

1.4 วิธีดำเนินการศึกษาวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. รวบรวมข้อมูลและขนาดโครงสร้างต่าง ๆ ของรถโดยสารไฟฟ้าประเภทชานต่ำรุ่น CBL.EV
3. ออกแบบตำแหน่งการวางชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน
4. สร้างแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทชานต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SolidWorks 2013
5. วิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทชานต่ำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS 14.5
6. วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย
7. จัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์และแก้ไขปรับปรุงงานวิจัย
8. เผยแพร่งานวิจัย

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1. อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2. บริษัทอยู่เขตชัยอุตสาหกรรม จำกัด

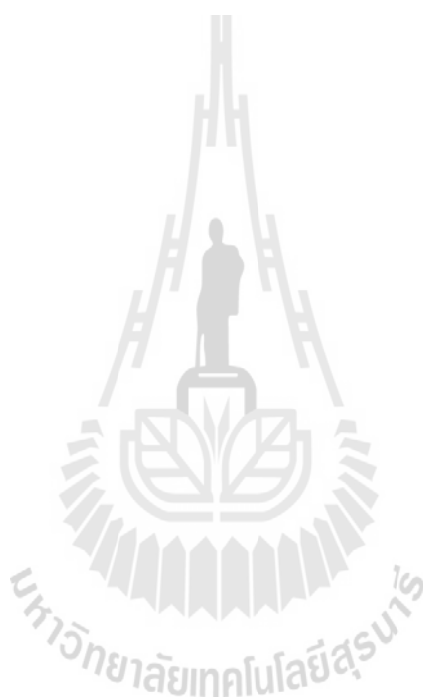
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. คอมพิวเตอร์
2. โปรแกรมสำหรับการสร้างแบบจำลอง SolidWorks 2013
3. โปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 14.5
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine (UTM)
5. เครื่องบันทึกค่าความเครียด Strain Indicator and Recorder

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถคาดการณ์ตำแหน่งและบริเวณที่จะเกิดความเค้นและการเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสารมากที่สุด
2. สามารถนำข้อมูลการออกแบบและวิเคราะห์ตำแหน่งการวางชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมาใช้งานได้จริง

3. สามารถนำข้อมูลการวิเคราะห์โครงสร้างของรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนต่ำไปเป็นแนวทางสู่การพัฒนาโครงสร้างให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
4. ช่วยลดระยะเวลาและลดต้นทุนสำหรับการทดสอบจริง



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ต่อความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้า เพื่อให้มีความรู้และความเข้าใจที่สามารถนำมาใช้ในการกำหนดขอบเขตและเงื่อนไขต่าง ๆ ของการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้อย่างถูกต้องมากที่สุด

ในส่วนแรกนี้เป็นส่วนที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยจะแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการนำมาประยุกต์ใช้งาน สำหรับในส่วนที่สองผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีความเสียหายเบื้องต้นของวัสดุ และในส่วนสุดท้ายนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของการเกิดสถานะต่าง ๆ ที่กระทำต่อรถโดยสาร เพื่อใช้ในการพิจารณาและออกแบบการวิเคราะห์แรงกระทำที่กระทำต่อโครงสร้างของรถโดยสาร

สำหรับส่วนที่สองของบทนี้ ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและจะนำเสนอบทความทางวิชาการ รายงานการวิจัย และวิทยานิพนธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ได้ดำเนินการอยู่

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า โดยการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยที่เรียกว่า เอลิเมนต์ และในแต่ละชิ้นส่วนย่อยจะเชื่อมกันที่จุดต่อเรียกว่า Nodes ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เราต้องการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้สำหรับแก้ปัญหาเชิงอนุพันธ์และกำลังเป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางมากในทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งและโครงสร้างที่ซับซ้อนประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่าง ๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์ได้ ดังนั้นจึงได้ประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สามารถประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้สมการเชิงพีชคณิตแทนการแก้สมการอนุพันธ์ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงได้ถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัญหา

ทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบ และให้ผลคำตอบที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป

ขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน สามารถจัดเรียงลำดับขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการขั้นต้น (Pre-Processor) คือการแบ่งรูปทรงหรือโครงสร้างของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย ๆ จะต้องคำนึงถึงโครงสร้างเดิมให้มากที่สุด แล้วจึงกำหนดสมบัติวัสดุให้กับเอลิเมนต์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับการกระจัด และความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด

2. กระบวนการวิเคราะห์ (Analysis) จะใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ให้สอดคล้องกับจำนวนจุดต่อของเอลิเมนต์ หรือสอดคล้องกับระดับความอิสระของเอลิเมนต์ และสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับแต่ละเอลิเมนต์จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่สอดคล้องกับปัญหานั้น แล้วจึงรวมสมการจากแต่ละเอลิเมนต์นี้เข้าด้วยกัน ก่อให้เกิดระบบสมการรวมขนาดใหญ่ของระบบ ซึ่งอธิบายสถานะโดยรวมของปัญหานั้น จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาที่กำหนดให้ ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่นี้เพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อต่าง ๆ ทั่วทั้งโดเมนของปัญหาต่อไป

3. กระบวนการขั้นท้าย (Post-Processor) ผลเฉลยโดยประมาณที่ได้จากการวิเคราะห์ส่วนอยู่ในรูปแบบของตัวเลขในแต่ละจุดต่อ เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายต่อการแสดงผลเฉลย จะสามารถแสดงได้ในหลายรูปแบบ เช่น การแสดงด้วยระดับชั้นสีต่าง ๆ ซึ่งผลคำตอบที่ได้สามารถอธิบายถึงปัญหาที่มีรูปร่างที่ซับซ้อนและยากต่อการทดลองได้

2.2.1 ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นจะต้องแบ่งโครงสร้าง ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อย และจะต้องสมมติฟังก์ชันการกระจัดโดยการประมาณของแต่ละเอลิเมนต์ ที่จะประกอบเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างรวมการกระจัดโดยประมาณที่สมมติขึ้น ฟังก์ชันการกระจัดที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเป็นฟังก์ชันพอลิโนเมียล ในกรณีของปัญหาสามมิติ

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5zx + \dots + a_mx^n \\ v(x, y, z) &= a_{m+1} + a_{m+2}x + a_{m+3}y + a_{m+4}z + a_{m+5}zx + \dots + a_{2m}z^n \\ w(x, y, z) &= a_{2m+1} + a_{2m+2}x + a_{2m+3}y + a_{2m+4}z + a_{2m+5}zx + \dots + a_{3m}z^n \end{aligned} \quad (2.1)$$

เมื่อ u, v และ w คือ ส่วนประกอบของการกระจัดทิศทางในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

และ
$$m = \sum_{i=1}^{n+1} i(n+2-i)$$

พอลิโนเมียลที่มีหลายเทอมหรือกำลังสูง ๆ จะให้การกระจัดที่สมมติขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับผลเฉลยแม่นยำมากยิ่งขึ้น แต่การแก้สมการค่อนข้างทำได้ยาก อย่างไรก็ตามการที่จะเลือกใช้ฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังเท่าไรนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา และความละเอียดของผลเฉลยที่ต้องการ เช่น ในกรณีของปัญหามิติเดียว ฟังก์ชันพอลิโนเมียลกำลังสอง สามเทอม จะให้ผลเฉลยดีกว่าฟังก์ชันพอลิโนเมียลเทอมเดียวและสองเทอม

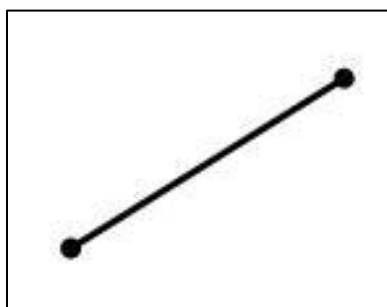
ฟังก์ชันการกระจัดของเอลิเมนต์เชิงซ้อน จะประกอบด้วยพอลิโนเมียลที่มีเทอมค่าคงตัว เทอมเชิงเส้น เทอมกำลัง กำลังสาม และเทอมที่มีกำลังสูงกว่านั้นเท่าที่จำเป็น รูปร่างของเอลิเมนต์ในกรณีของปัญหามิติเดียว เอลิเมนต์เชิงซ้อนจะประกอบด้วย 2 จุดต่อภายนอกและจุดต่อภายในอย่างน้อย 1 จุดต่อ ฟังก์ชันเชิงซ้อนของปัญหา 3 มิติ จะมีรูปร่างแบบสามเหลี่ยมทรงสี่หน้ากำลัง 2 ที่ประกอบด้วย 10 จุดต่อ จากสมการที่ (2.1) ฟังก์ชันพอลิโนเมียลสำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมทรงสี่หน้าเชิงซ้อนกำลังสอง คือ

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

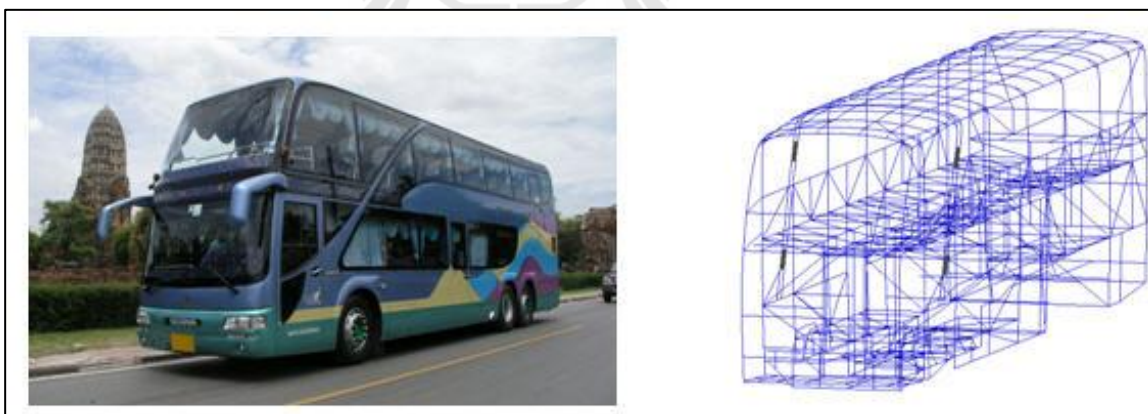
2.2.2 เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

การแก้ปัญหาทางวิศวกรรมในด้านกลศาสตร์ของแข็งด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นจะต้องเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ให้เหมาะสมกับปัญหา เนื่องจากการเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะมีผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองรูปร่าง (CAD Model) แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) เวลาในการคำนวณ (Solving Time) เวลาในการแสดงผล (Post Processing Time) ปริมาณการใช้เนื้อที่ของหน่วยความจำสำรอง (Disk Usage for Solving) และหน่วยความจำหลัก (Memory Usage for Solving) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งโดยทั่วไปชนิดของเอลิเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบได้แก่ เอลิเมนต์ใน 1 มิติ, เอลิเมนต์ใน 2 มิติ และเอลิเมนต์ใน 3 มิติ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. เอลิเมนต์ใน 1 มิติ เป็นเอลิเมนต์ที่มีรูปแบบง่ายที่สุด ได้แก่ Rod Element, Bar Element และ Beam Element ใน 1 เอลิเมนต์ โดยส่วนมากจะประกอบด้วย 2 จุดต่อ (Node) เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับแก้ปัญหาทางด้านโครงสร้างหรืองานอื่น ๆ ที่มีลักษณะเป็นคาน ซึ่งนิยมเรียกว่า บีม (Beam) ซึ่งมีการวางตัวตามแนวยาว คุณสมบัติเพิ่มเติมที่ต้องกำหนดให้กับเอลิเมนต์ได้แก่ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน สำหรับข้อดีของเอลิเมนต์ชนิดนี้ คือ การใช้เนื้อที่ของหน่วยความจำเพียงเล็กน้อย ใช้เวลาในการเตรียมข้อมูลและการคำนวณไม่มากนัก ส่วนข้อจำกัดได้แก่ ความไม่สมจริง บริเวณจุดต่อของโครงสร้างและไม่สามารถแสดงการกระจายตัวของความเค้นบริเวณจุดต่อได้



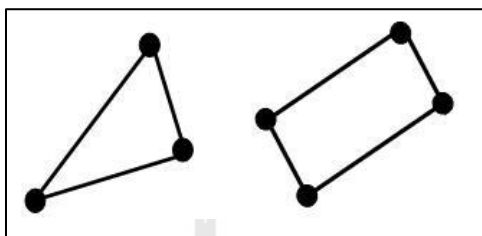
รูปที่ 2.1 แสดงเอลิเมนต์ใน 1 มิติ



รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ใน 1 มิติ สำหรับการแก้ปัญหา

2. เอลิเมนต์ใน 2 มิติ โดยทั่วไปจะมีสองลักษณะ คือ แบบสามเหลี่ยมที่ประกอบด้วย 3 จุดต่อ และแบบสี่เหลี่ยมที่ประกอบด้วย 4 จุดต่อ ได้แก่ Plane Stress Element, Plane Strain Element และ Shell Element เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับแก้ปัญหาทางด้านที่สามารถจำลองรูปร่างเป็นพื้นผิว

(Surface) สำหรับคุณสมบัติที่ต้องกำหนดเพิ่มเติมคือความหนาของชิ้นงาน ข้อดีของเอลิเมนต์ชนิดนี้คือ สามารถแก้ไขปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้มากกว่าเอลิเมนต์ใน 1 มิติ เวลาที่ใช้คำนวณแม้จะมากขึ้นเมื่อเทียบกับเอลิเมนต์ใน 1 มิติ แต่เมื่อเทียบเวลาการคำนวณกับเอลิเมนต์ใน 3 มิติ ยังถือว่าใช้เวลา น้อยมาก อีกทั้งผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้ยังมีความถูกต้องสูงอีกด้วย

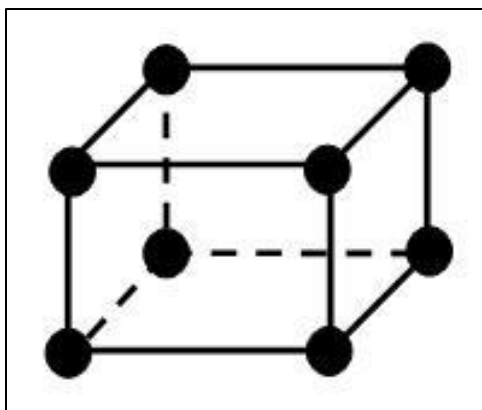


รูปที่ 2.3 แสดงเอลิเมนต์ใน 2 มิติ

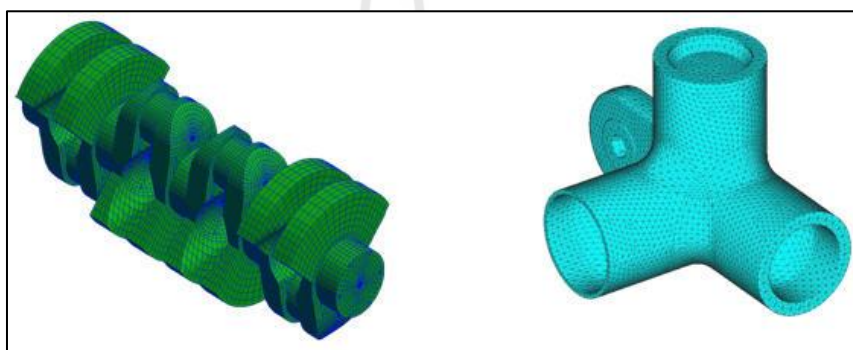


รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ใน 2 มิติ สำหรับการแก้ปัญหา

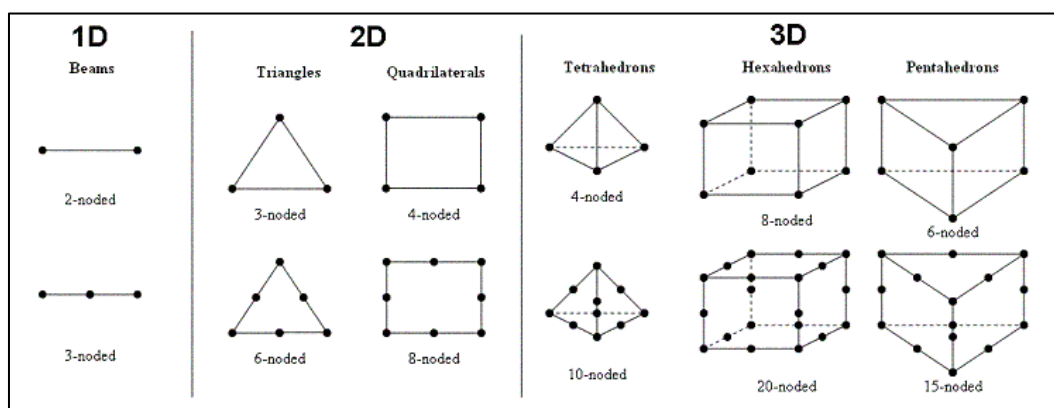
3. เอลิเมนต์ใน 3 มิติ โดยทั่วไปจะมีรูปทรงเป็นแบบ 3 มิติ (Solid Element) รูปร่างของเอลิเมนต์นี้โดยทั่วไปจะมีรูปทรงแบบ Tetrahedral, Pentahedral, Hexahedral หรือเป็นแบบปริซึม (Prisms) สำหรับเอลิเมนต์ชนิดนี้สามารถใช้แก้ปัญหาศาสตร์ของแข็งได้หลากหลายรูปแบบ แต่ปัญหาหลักของการใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้คือ การใช้หน่วยความจำมาก รวมทั้งใช้ระยะเวลาในการคำนวณนาน ซึ่งมักจะเป็นปัญหาสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาที่ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล



รูปที่ 2.5 แสดงเอลิเมนต์ใน 3 มิติ

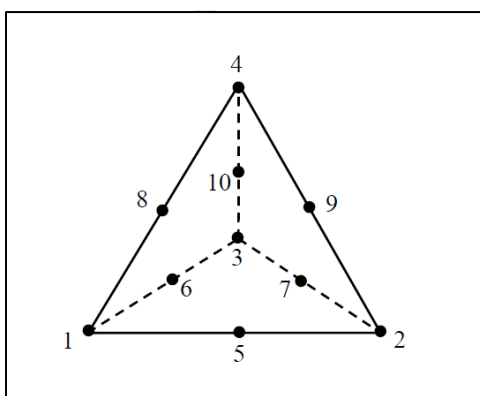


รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างการใช้เอลิเมนต์ใน 3 มิติ สำหรับการแก้ปัญหา



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบเอลิเมนต์ชนิดต่าง ๆ

เอลิเมนต์แบบสามมิติที่นิยมใช้กันมากในทางปฏิบัติมีอยู่สองแบบคือ เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า (Tetrahedral element) และเอลิเมนต์ทรงหกหน้า (Hexahedral element) ซึ่งในหัวข้อนี้จะพิจารณาการแบบจำลองโครงสร้างที่แบ่งเป็นเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าที่มีจุดต่อ 10 จุดต่อใช้ ในการแบ่งโครงสร้างที่แบ่ง เอลิเมนต์ทรงสี่หน้านั้นเป็นเอลิเมนต์ที่ง่ายต่อการแบ่งปัญหาแบบ 3 มิติ เนื่องจากสามารถแบ่งเอลิเมนต์ได้ครอบคลุมโครงสร้างของปัญหาในสามมิติได้ง่าย ซึ่งจุดต่อแต่ละจุดของเอลิเมนต์นั้นจะมี 3 ดีกรีออฟฟรียดอม (Degree of freedom) ฟังก์ชันการกระจัดการประมาณภายในเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อน ดังสมการที่ (2.2)



รูปที่ 2.8 แสดงเอลิเมนต์ทรงสี่หน้าใน 3 มิติ

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

$$\delta(x, y, z) = N_1\delta_1 + N_2\delta_2 + N_3\delta_3 + \dots + N_{30}\delta_{30} = [N]\{\delta\} \quad (2.3)$$

เมื่อ $N_i, i=1, \dots, 10$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายใน

2.2.3 สมการเชิงอนุพันธ์

ความสมดุลของของแข็งที่มีการยึดหยุ่นได้ในสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.9 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\
\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z &= 0
\end{aligned}
\tag{2.4}$$

โดย $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ แทนความเค้นในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ และ τ_x, τ_y, τ_z แทนความเค้นเฉือน F_x, F_y, F_z แทนแรงวัตถุ (Body Force) ในแนวแกน x, y, z ตามลำดับ ตลอดผิวรอบนอกของของแข็งดังแสดงในรูป 2.9 อาจประกอบด้วยเงื่อนไขขอบเขตหลาย ๆ ชนิด อาทิเช่น การกำหนดระยะเคลื่อนตัวบนผิวบางส่วน ในขณะที่ผิวส่วนอื่น ๆ อาจมีการกำหนดเงื่อนไขของความเค้นที่ผิว (Surface Traction) ในรูปแบบทั่วไป คือ

$$\bar{T} = T_x \hat{i} + T_y \hat{j} + T_z \hat{k} \tag{2.5}$$

เมื่อ T_x, T_y, T_z คือ ความเค้นที่ผิวในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ

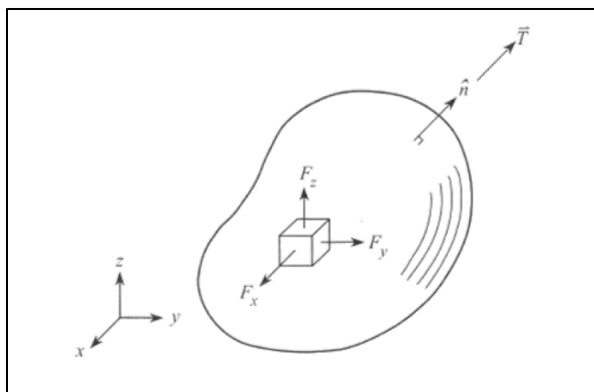
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของความเค้นย่อยต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix} \tag{2.6}$$

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

$$n = n_x \hat{i} + n_y \hat{j} + n_z \hat{k} \tag{2.7}$$

ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิว ณ จุดที่กำลังพิจารณาอยู่นั้น



รูปที่ 2.9 แสดงความสัมพันธ์ตามตำแหน่งใด ๆ ในของแข็ง 3 มิติ

นอกจากเงื่อนไขของเขตที่ผิวเหล่านี้แล้ว ของแข็งในสามมิติในรูป 2.9 อาจมีความเครียดขั้นต้น (Prestrain) ที่เกิดขึ้นอยู่ก่อน ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยทั่วไปคือ

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon - \varepsilon_0\} \quad (2.8)$$

โดย

$$\{\sigma\}^T = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{xz}] \quad (2.9)$$

$$\{\varepsilon\}^T = [\varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z \quad \gamma_{xy} \quad \gamma_{yz} \quad \gamma_{xz}] \quad (2.10)$$

$$[C] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

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

$$\{\varepsilon_0\}^T = [\alpha\Delta T \quad \alpha\Delta T \quad \alpha\Delta T \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (2.12)$$

เมื่อ α แทนสัมประสิทธิ์ของการขยายตัว

ΔT แทนอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิ

T_0 แทนอุณหภูมิที่วัสดุนั้นไม่มีความเค้น

ความเครียดเริ่มต้นอาจเกิดมาจากกรณีที่โครงสร้างนั้นมีความเครียดอยู่ก่อนแล้วและอยู่ในภาวะสมดุลก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำ ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์โดยไม่พิจารณาความเครียดเริ่มต้นที่เกิดกับโครงสร้างที่หนึ่ง โดยจะพิจารณาโครงสร้างที่หนึ่งอยู่ในภาวะสมดุลก่อนที่จะมีแรงภายนอกมากระทำตามมาตรฐานการทดสอบ

2.2.4 หลักการของพลังงานศักย์ต่ำสุด

การแก้ปัญหาที่โดเมนมีสถานะต่อเนื่อง (Continuum Problems) มีหลักการสำคัญในการใช้หลักการพลังงานคือ เราต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อเราทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว ยังคงก่อให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่ทำการวิเคราะห์ห้อยู่

ปัญหาที่วิเคราะห์กันส่วนใหญ่เป็นปัญหาทางด้านโครงสร้าง โดยฟังก์ชัน J นั้นมีความหมายทางกายภาพ กล่าวคือ เป็นค่าพลังงานศักย์รวม (Total Potential Energy) ค่าพลังงานศักย์รวมสำหรับวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ประกอบด้วย พลังงานความเครียดที่เกิดขึ้นในเนื้อวัสดุ (Internal Strain Energy) หลังจากเกิดการยืดหยุ่น และพลังงานศักย์อันเกิดจากแรงภายนอกที่มากระทำ (Potential Energy Due to External Forces) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

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

ค่าพลังงานศักย์ภายนอก (V) มีค่าเป็นค่าลบของงานที่เกิดขึ้น (W) ซึ่งสามารถคำนวณหาได้ง่าย ในขณะที่วัสดุอยู่ในสภาวะที่สมดุลค่าพลังงานศักย์รวม J นั้นมีค่าต่ำที่สุด จากหลักการของค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวม (Principle of Total Minimum Potential Energy)

$$\frac{\partial J}{\partial \delta} = 0 \quad (2.14)$$

ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาทางด้านของแข็ง เราสามารถเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ดังแสดงในสมการ (2.4) เราจำเป็นต้องหาฟังก์ชันที่เมื่อทำการหาค่าต่ำสุดแล้วจะก่อให้เกิดสมการอนุพันธ์ ฟังก์ชันดังกล่าวคือ พลังงานศักย์รวมเช่นเดียวกับที่ได้แสดงในสมการ (2.13) นั่นคือ

$$J = U + V$$

เมื่อ U คือ พลังงานที่เกิดขึ้นจากความเครียดในวัตถุ

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

เมื่อแทน $\{\sigma\}$ จากสมการที่ (2.8) ลงไปจะได้

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

ซึ่งหลังจากกระจายออกแล้วจัดพจน์ จะได้

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

ในสมการ (2.13) V คือ พลังงานศักย์อันเกิดจากแรงวัตถุที่มีปริมาตร V และแรงที่ผิวบนผิวที่มีพื้นที่ S ซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้

$$V = - \int_V (F_x u + F_y v + F_z w) dV - \int_S (T_x u + T_y v + T_z w) dS$$

$$\begin{aligned}
&= -\int_V [u \quad v \quad w] \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} dV - \int_S [u \quad v \quad w] \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} dS \\
&= -\int_V [\bar{\delta}] \{F\} dV - \int_S [\bar{\delta}] \{T\} dS
\end{aligned} \tag{2.16}$$

เมื่อ $[\bar{\delta}]$ คือ เวกเตอร์ที่ประกอบด้วยค่าเคลื่อนตัว u, v, w ในทิศทาง x, y, z ตามลำดับ
 $\{F\}$ คือ เวกเตอร์ที่ประกอบด้วยแรงวัตถุในทิศทาง x, y, z
 $\{T\}$ คือ เวกเตอร์ที่ประกอบด้วยแรงที่ผิวในทิศทาง x, y, z

จากนั้นทำการแทนค่าสมการ (2.15) และ (2.16) ลงในสมการ (2.13) ก่อให้เกิดพลังงานศักย์รวมในรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned}
J = & \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon\} dV - \int_V [\varepsilon][C]\{\varepsilon_0\} dV + \frac{1}{2} \int_V [\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\} dV \\
& - \int_V [\bar{\delta}]\{F\} dV - \int_S [\bar{\delta}]\{T\} dS
\end{aligned} \tag{2.17}$$

สามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับเอลิเมนต์ชนิดต่าง ๆ ได้

2.2.5 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์

สมการไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในรูปแบบของสมการที่ประกอบด้วยค่าเคลื่อนตัวซึ่งไม่รู้ค่าที่จุดต่อนั้นคือ เราจะสมมติการกระจัดการเคลื่อนตัวของเอลิเมนต์เป็นฟังก์ชันการกระจัดเชิงซ้อนในสามทิศทางและค่าเคลื่อนตัว ณ ตำแหน่งจุดต่อทั้งสิบจุดดังแสดงในสมการ (2.2) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
u(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{u\} \\
v(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{v\} \\
w(x, y, z) &= [N(x, y, z)]\{w\}
\end{aligned} \tag{2.18}$$

หรือเขียนรวมกันดังแสดงสมการ (2.3) ได้ว่า

$$\{\bar{\delta}\} = [N(x, y, z)]\{\delta\} \tag{2.19}$$

โดย $[\bar{\delta}] = [u \ v \ w]$

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

เวกเตอร์ของความเครียดแสดงในสมการ (2.10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าเคลื่อนตัวได้ คือ

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_x \\ \gamma_y \\ \gamma_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B(x, y, z)]\{\delta\} \quad (2.20)$$

เมื่อ $[B(x, y, z)]$ แทนเมทริกซ์ความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและการเคลื่อนตัว

หากแทนสมการ (2.19) และ (2.20) ลงในสมการที่ (2.17) สมการของพลังงานศักย์รวมจะได้

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

หรือเขียนสมการย่อ ๆ ได้ว่า

$$J = \frac{1}{2}[\delta][K]\{\delta\} - [\delta]\{F_0\} + \frac{1}{2}[\varepsilon_0][C]\{\varepsilon_0\}dV - [\delta]\{F_B\} - [\delta]\{F_t\} \quad (2.21)$$

โดย

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

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

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

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

ในที่นี้ $[K]$ คือเอลิเมนต์สติฟเนสเมทริกซ์ $\{F_0\}, \{F_B\}, \{F_t\}$ คือโหนดเวกเตอร์ เนื่องจากความเค้นต้น แรงวัตถุ และแรงที่ผิวตามลำดับ จากสมการที่ (2.21) สามารถสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากการหาค่าต่ำสุดของพลังงานศักย์รวมตั้งสมการ (2.14) ซึ่งจะก่อให้เกิดสมการไฟไนต์เอลิเมนต์รวม ค่าอนุพันธ์ที่เกิดจากพจน์ของที่เกี่ยวข้องกับความเครียดขั้นต้น ε_0 ของสมการ (2.21) มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากพจน์ดังกล่าวไม่เป็นฟังก์ชันของค่าเคลื่อนตัว สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ ดังนี้

$$[K]\{\delta\} = \{F_0\} + \{F_B\} + \{F_t\} \quad (2.22)$$

หลังจากประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากทุก ๆ เอลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบสมการรวมของโครงสร้างสามมิตินั้น แล้วทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตและแก้ระบบสมการรวม เพื่อหาผลลัพธ์ของค่าเคลื่อนตัวที่ทุก ๆ จุดต่อได้แล้ว สามารถหาค่าความเค้นในทิศทางต่าง ๆ ได้ต่อไป

2.3 ทฤษฎีความเสียหาย

เพื่อที่จะสามารถประเมินผลและอภิปรายผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลจากการจำลองความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้านั้น ว่ามีส่วนที่เสียหายบริเวณใดของโครงสร้างจำเป็นต้องทราบถึงทฤษฎีความเสียหายของวัสดุเพื่อนำมาตีความผลการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า จึงได้มีการตั้งสมมติฐานโดยการพิจารณาโครงสร้างของวัสดุ และมีการจำแนกวัสดุตามพฤติกรรมความยืดหยุ่นของวัสดุออกเป็นวัสดุเหนียวและวัสดุเปราะ

วัสดุจะมีความยืดหยุ่นก็ต่อเมื่อวัสดุนั้นมีการกลับคืนรูปทรง หรือมีความยาวเท่ากับความยาวเริ่มต้น 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 ความเค้นจุดนี้ถือเป็นหลักในการออกแบบโดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร หรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (Plastic Deformation) สำหรับวัสดุที่ไม่มีจุดคราก เช่น เหล็กหล่อ ซึ่งถือว่าเป็นวัสดุเปราะ ก็อาจใช้ความต้านแรงดึง (Ultimate Stress) - σ_u เป็นหลักในการออกแบบ

วัสดุใด ๆ ที่ถูกแรงกระทำแล้วเกิดความเครียดที่มีค่ามาก ๆ ก่อนที่จะเกิดการแตกหัก เรียกว่า วัสดุเหนียว เช่น เหล็กเหนียว โดยทั่วไปวิศวกรจะเลือกวัสดุเหนียวในการออกแบบ เนื่องจากวัสดุสามารถดูดซับพลังงานหรือแรงที่เกิดขึ้นอย่างฉับพลันได้ และถ้าวัสดุถูกกระทำด้วยแรงมากเกินไป จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปอย่างมากก่อนที่จะเกิดการแตกหัก วัสดุเหนียวจะมีค่า $\epsilon_f \geq 0.05$ และมีค่าความต้านแรงครากอย่างชัดเจน ซึ่งมักจะมีค่าเดียวกันสำหรับการดึงและการอัด

สำหรับวัสดุที่มีจุดครากต่ำมาก หรือไม่มีจุดครากก่อนเกิดการแตกหัก และ $\epsilon_f \leq 0.05$ จะเรียกว่า วัสดุเปราะ เช่น อลูมิเนียม โดยมาก $\sigma - \epsilon$ Diagram จะแสดงเป็นรูปโค้งที่ไม่มีจุดครากที่แน่ชัด ดังนั้นจึงนิยามความต้านแรงคราก (Yield Strength) จากวิธีทางกราฟิกที่เรียกว่า Offset Method โดยเลือกใช้จุดที่มีค่าความเครียดเท่ากับ 0.2 % (0.002) และวัดจากจุดนี้ที่อยู่บนแกน ϵ แล้วลากเส้น

ขนานกับส่วนที่เป็นเส้นตรงไปจนถึงกับส่วนโค้งของกราฟ ก็จะได้อค่าความเค้นที่เป็นความต้านแรงคราก

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

2.3.1 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum Shear Stress Theory)

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดนี้ กำหนดให้ใช้เกณฑ์การพิจารณาการครากของวัสดุเหนียวซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดระนาบสลลิป (Slip Plane) ภายใต้การดึงทดสอบชิ้นงานที่ทำมาจากวัสดุชนิดเดียวกัน ทฤษฎีนี้กล่าวว่า ความเสียหายอันเกิดจากการครากจะเริ่มขึ้นเมื่อความเค้นเฉือนสูงสุดภายในเนื้อวัสดุภายใต้ภาระกระทำทั่วไปนั้น เท่ากับความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งเกิดขึ้นบนระนาบสลลิปของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันภายใต้การดึงทดสอบจนถึงจุดครากของวัสดุดังกล่าว สำหรับการทดสอบแรงดึงความเค้นเฉือนสูงสุดจะเกิดขึ้นบนระนาบที่ทำมุม 45° กับระนาบของการดึง ความเค้นเฉือนสูงสุดที่จุดครากจะมีค่า $\tau_{\max} = S_y / 2$ สำหรับสภาวะความเค้นใน 3 มิติ ความเค้นเฉือนสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $\tau_{\max} = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$ ดังนั้น สำหรับสภาวะความเค้นโดยทั่วไปจะได้

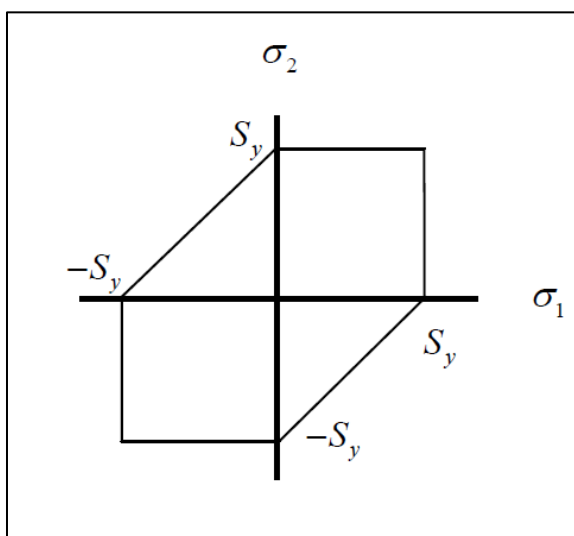
$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \geq \frac{S_y}{2} \quad (2.23)$$

สมการนี้บอกให้ทราบว่าความต้านทานแรงครากในการเฉือนมีค่าดังนี้

$$\tau_{\max} = 0.5S_y \quad (2.24)$$

สำหรับสภาวะของความเค้นของวัสดุหนึ่ง ๆ สามารถวิเคราะห์โดยกำหนดให้ความเค้นหลักในระนาบใดระนาบหนึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อพล็อตลงบนกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดจะกำหนดบริเวณที่ไม่ได้รับความเสียหายไว้ภายในบริเวณพื้นที่

รูปหกเหลี่ยมของเทรสกา (Henri Edouard Tresca) ถ้าออกแบบให้สภาวะของความเค้นอยู่ภายในบริเวณพื้นที่รูปหกเหลี่ยมดังกล่าว ชิ้นส่วนนั้นจะไม่ได้รับความเสียหายเนื่องจากการคราก



รูปที่ 2.10 แสดงความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของเทรสกา

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 $\sigma_2 = S_y$

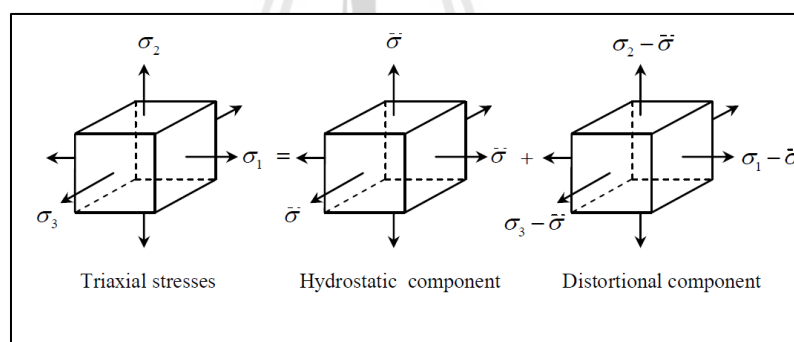
จะเห็นได้ว่าการพิจารณาความเสียหายนั้นจะตั้งอยู่บนพื้นฐานการทำนายตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด การสร้างเส้นขอบเขตบนพื้นที่รูปหกเหลี่ยมของเทรสกาจะพิจารณาจากการเกิดความเค้นหลักทั้ง 3 กรณีข้างต้นนั่นเอง ส่วนกรณีที่วัสดุอยู่ภายใต้สภาวะของความเค้นเฉือนอย่างเดียว เช่น เฟลาที่รับทอร์คอย่างเดียว ความเค้นเฉือนสูงสุดตามทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดพิจารณาจาก

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_y}{2} - \left(\frac{-\sigma_y}{2} \right) \right] = \frac{S_y}{2} \quad (2.25)$$

2.3.2 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 ในการพัฒนาสมการสำหรับทฤษฎีนี้ให้พิจารณาพลังงานของการเปลี่ยนรูปในชิ้นส่วนรูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์เล็ก ๆ ที่อยู่ภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ σ_1, σ_2 และ σ_3



รูปที่ 2.11 แสดงสถานะของความเค้น

ดังนั้นชิ้นส่วน Hydrostatic เเทมนี้เกิดความเค้นที่เท่ากันทุกทิศทางทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรโดยการขยายตัว แต่ไม่มีการบิดเบือนรูปร่างเชิงมุมไปจากเดิม จึงไม่ทำให้เกิดการคราก และชิ้นส่วน Distortional ส่วนนี้ไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรแต่ทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปเนื่องจากความเค้นเฉือนและเกิดการคราก

พลังงานความเครียดต่อหน่วยปริมาตรภายใต้ความเค้นใน 3 มิติ

$$u = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (2.26)$$

จากความสัมพันธ์ของความเค้น ความเครียด และอัตราส่วนปัวซอง

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_y &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} + \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} \\ \varepsilon_z &= -\nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} + \frac{\sigma_z}{E} \end{aligned} \quad (2.27)$$

เมื่อแทนสมการ Total elastic energy ในสมการพลังงานความเครียด และจัดรูปใหม่จะได้

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (2.28)$$

พลังงานความเครียดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร u_v ส่วน Hydrostatic จะถือว่า $\bar{\sigma}$ เป็นองค์ประกอบของ σ_1, σ_2 และ σ_3 องค์ประกอบนี้ก็จะสามารถนำไปลบออกจากเทอมของพลังงานรวม ซึ่งจะได้องค์ประกอบที่อยู่ภายใต้การเปลี่ยนรูปร่างเชิงมุม โดยที่ปริมาตรไม่มีการเปลี่ยนแปลง $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ สามารถแทน $\bar{\sigma}$ สำหรับ σ_1, σ_2 และ σ_3 ในสมการที่ (2.28) ซึ่งจะได้

$$u_v = \frac{3\bar{\sigma}^2}{2E}(1-2\nu) = \frac{1-2\nu}{6E}(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_1\sigma_2 + 2\sigma_2\sigma_3 + 2\sigma_3\sigma_1) \quad (2.29)$$

ดังนั้นสามารถหาพลังงานของการเปลี่ยนรูปได้จากนำสมการ (2.5) ไปลบออกจากสมการ (2.29) จะได้

$$u_d = u - u_v = \frac{1-\nu}{3E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.30)$$

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

$$u_d = \frac{1+\nu}{3E} S_y^2 \quad (2.31)$$

ดังนั้น สำหรับสถานะความเค้นในสมการที่ (2.30) จะทำให้สามารถทำนายจุดครากของชิ้นงานได้ ถ้าสมการที่ (2.30) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสมการที่ (2.31) จะได้

$$\left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \geq S_y \quad (2.32)$$

ในการทดสอบแรงดึงอย่างง่าย จะเกิดความเค้นครากของชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อ $\sigma \geq S_y$ ดังนั้น เทอมทางซ้ายของสมการ (2.32) จะเป็นค่าความเค้นที่มีผลต่อพลังงานของการเปลี่ยนรูป (Effective Stress) ซึ่งนิยมเรียกว่า “von Mises Stress” ตามชื่อของผู้คิดค้นทฤษฎีนี้ โดยใช้สัญลักษณ์ σ_{VM} ดังนั้น จึงสามารถเขียนสมการที่ (2.32) ได้เป็น

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

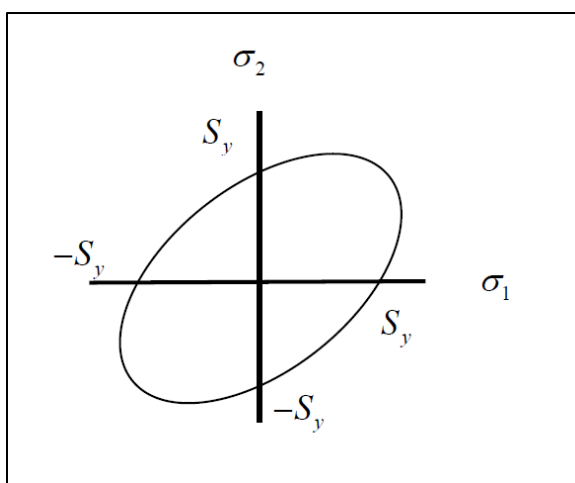
เมื่อ

$$\sigma_{VM} = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2.33)$$

สำหรับความเค้นในระนาบ ความเค้นหลักซึ่งมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ดังนั้น

$$\sigma_{VM} = (\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2)^{1/2} \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) เมื่อนำไปพล็อตกราฟ จะได้เป็นกราฟรูปวงรี พื้นที่วงรีแสดงถึงย่านปลอดภัยที่ไม่เกิดความเสียหายเนื่องจากการคราก ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงความเสียหายของวัสดุตามทฤษฎีของวอนมิสเชส

การใช้องค์ประกอบของความเค้นใน 3 มิติ x, y, z จะสามารถเขียนสมการ von Mises Stress ได้ดังนี้

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2} \quad (2.35)$$

กรณีชิ้นส่วนโครงสร้างที่รับความเค้นเฉือนกระทำอย่างเดียวก จากวงกลมของมอร์พบว่า $\tau = \tau_{\max}$, $\sigma_1 = \tau_{\max}$ และ $\sigma_2 = -\tau_{\max}$ ความเค้นของวอนมิสเชสคำนวณได้จาก

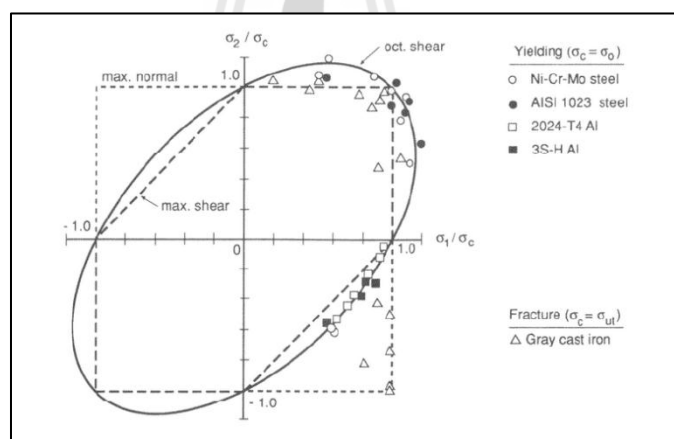
$$\sigma_{VM} = \sqrt{3\tau_{\max}^2} = \sqrt{3}\tau_{\max}$$

ความเสียหายอันเกิดจากการครากจะเกิดเมื่อ

$$\sigma_{VM} = \sqrt{3}\tau_{\max} = S_y \quad \text{หรือ} \quad \tau_{\max} = 0.577S_y \quad (2.36)$$

2.3.3 บทสรุปความเสียหายสำหรับวัสดุเหนียว

จากการศึกษาทฤษฎีความเสียหายสำหรับวัสดุที่มีพฤติกรรมความยืดหยุ่นเป็นวัสดุเหนียว ทำให้วิศวกรผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้ทฤษฎีต่าง ๆ ตามความเหมาะสม เพื่อประเมินความเสียหาย ความเสียหายในบางจุดที่แสดงในรูปที่ 2.13 จะช่วยให้วิศวกรผู้ออกแบบตัดสินใจได้อย่างถูกต้อง จากรูปแสดงให้เห็นว่าทั้งทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปเป็นทฤษฎีที่สามารถยอมรับได้ในการออกแบบและวิเคราะห์ความเสียหายที่จะเกิดในชิ้นงานที่มีพฤติกรรมความยืดหยุ่นเป็นวัสดุเหนียว นอกจากนี้ ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูปยังสามารถทำนายผลการครากของชิ้นงานได้ดีในทุกสภาวะความเค้น จึงมีขอบเขตสูงกว่าการใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ซึ่งจะให้ผลการออกแบบที่นำเชื่อถือมากกว่า สำหรับวัสดุเหนียวที่มีความต้านแรงดึงคราก S_{yr} ต่างจากความต้านแรงกดคราก S_{yc} ก็มีทฤษฎีของมอร์ในรูปแบบต่าง ๆ ให้เลือกใช้ อย่างไรก็ตามทฤษฎีนี้ต้องการผลการทดสอบชิ้นงานอย่างง่าย 3 ประเภท คือ การทดสอบแรงดึง การทดสอบแรงกด และการทดสอบแรงเฉือน เพื่อนำมากำหนดเส้นขอบเขตของความเสียหาย



รูปที่ 2.13 แสดงการเปรียบเทียบทฤษฎีความเสียหายกับการทดลอง

ที่มา N.E. Dowling (1993) Mechanical Behavior of Materials.

Prentice-Hall, pp. 252.

จากรูปจะพบว่าผลการทดสอบวัสดุมีค่าที่สอดคล้องกันเมื่อเทียบกับทฤษฎีความเสียหาย และสำหรับโลหะประเภทเหล็กเหนียว ซึ่งเป็นวัสดุเหนียว ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป (ทฤษฎี von Mises) จะให้ค่าที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับความเป็นจริง ในขณะที่ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (ทฤษฎีของ Tresca) จะให้ค่าเป็นเชิงอนุรักษ์มากกว่าคือกำหนดการครากไว้ต่ำกว่า

2.4 สถานะที่ใช้ในการพิจารณาและออกแบบโครงสร้างรถโดยสาร

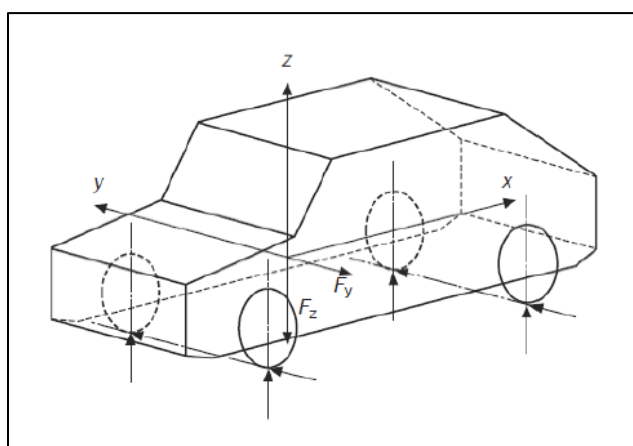
สำหรับการออกแบบโครงสร้างของรถโดยสารนั้น จำเป็นจะต้องทำการศึกษาและพิจารณาสถานะของภาระกรรมที่มากกระทำในรูปแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจริง เพื่อให้โครงสร้างของรถโดยสารมีความแข็งแรงสามารถรองรับภาระกรรมต่าง ๆ ที่มากกระทำได้นั้น จะต้องได้รับการออกแบบทางวิศวกรรมที่ดี และทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง เพื่อหาจุดบกพร่องแล้วทำการแก้ไข ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวมสถานะที่เกิดขึ้นกับรถโดยสารดังต่อไปนี้

สำหรับการออกแบบการคำนวณภาระกรรมที่เกิดขึ้นจริงกับโครงสร้างรถโดยสารนั้น ภาระกรรมแบบพลศาสตร์ (Dynamic load) ที่เกิดขึ้นจริงทางด้านยานยนต์นั้น มักจะถูกแทนด้วยค่า Factored static loading เนื่องจากการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์นั้นทำได้ค่อนข้างยากและซับซ้อน ดังนั้นในการวิเคราะห์โดยส่วนมากจะวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์และทำการใส่ค่าการวิเคราะห์แบบพลศาสตร์ ดังสมการที่ (2.37)

$$\text{Dynamic load} = (\text{Static load}) \times (\text{Dynamic load factor}) \quad (2.37)$$

2.4.1 สถานะโมเมนต์ดัด (Bending Case)

ลักษณะของสถานะ โมเมนต์ดัดนี้ จะเกิดจากภาระของแรงกระทำในระนาบแนวตั้ง (x-z plane) เมื่อเทียบกับโครงสร้างแชสซี ซึ่งภาระของแรงกระทำนี้มาจากน้ำหนักของอุปกรณ์และส่วนประกอบต่าง ๆ ที่ติดตั้งไว้บนโครงสร้างแชสซี ซึ่งแรงกระทำนี้เป็นผลให้เกิดโมเมนต์ดัดบนโครงสร้างแชสซี



รูปที่ 2.14 แสดงสถานะแรงดัด (Bending Case)

สภาวะโมเมนต์ดัดจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของอุปกรณ์หลักที่ติดตั้งบน โครงสร้างแชสซี และน้ำหนักบรรทุกของรถโดยสาร การพิจารณาขั้นแรกคือ สภาวะสถิตยศาสตร์ (Static Condition) โดยการคำนวณหาแรงกระจายที่เกิดขึ้นกับ โครงสร้างแชสซี น้ำหนักลงเพลสามารถคำนวณได้จาก แรงกระทำและหาค่าโมเมนต์จากตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์นั้น ๆ โครงสร้างถูกพิจารณาในลักษณะ 2 มิติ โดยสมมาตรตามแนวยาวของตัวรถโดยสาร แรงกระจายถูกประมาณค่าจากน้ำหนักของตัวถัง ต่อความยาวของตัวรถ ซึ่งรวมรายละเอียดต่าง ๆ ของตัวรถโดยสารไว้ด้วย แต่ไม่คินน้ำหนักของล้อ ระบบเบรก และระบบช่วงล่าง ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่เกิดการกระทำต่อโครงสร้าง สำหรับสภาวะ พลศาสตร์ (Dynamics Condition) กรณีนี้จะพิจารณาอุปสรรคที่เกิดขึ้นจากการใช้รถโดยสาร ตัวอย่างเช่น เมื่อรถโดยสารแล่นผ่านเนินชะลอความเร็วหรือที่เรียกกันว่า เนินลูกระนาด ล้อทั้งสอง ของเพลหน้าและเพลหลังจะมีระดับที่แตกต่างกัน ทำให้เกิดสภาวะโมเมนต์ดัดที่ โครงสร้าง เป็นต้น ผลจากสภาวะลักษณะนี้จะทำให้เกิดแรงกระทำต่อ โครงสร้างของรถโดยสาร จึงต้องพิจารณาแรง กระทำที่มากกว่าสภาวะสถิตยศาสตร์



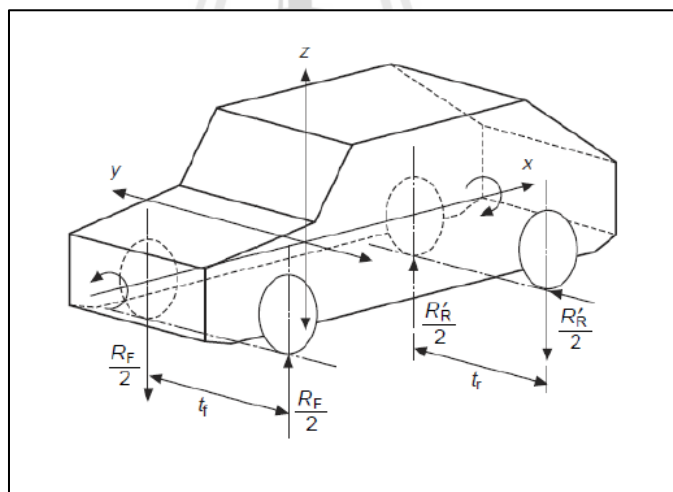
รูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมที่ทำให้เกิดสภาวะแรงดัดแบบพลศาสตร์

ตารางที่ 2.1 Bending Load Factor

	Commonly Used	Erz (1957)	Pawlowski (1969)
Dynamic Factor	3	2	2.5
Additional Safety Factor	1.5		1.4-1.6 (away from stress concentrations) 1.5-2.0 (engine and suspension mountings)

2.4.2 สภาวะแรงบิด (Torsion Case)

ลักษณะของสภาวะแรงบิดนี้ จะเกิดจากภาระอันเนื่องมาจากผลของโมเมนต์บิดรอบแกนในแนวยาวของโครงสร้าง โมเมนต์แรงบิดอาจเกิดขึ้นตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกาจะขึ้นอยู่กับอุปสรรคที่เกิดขึ้นระหว่างการเคลื่อนที่ของรถโดยสาร ตัวอย่างเช่น เมื่อรถโดยสารตกหลุมหรือขึ้นเนินลูกกระพอนของล้อด้านใดด้านหนึ่ง เป็นต้น

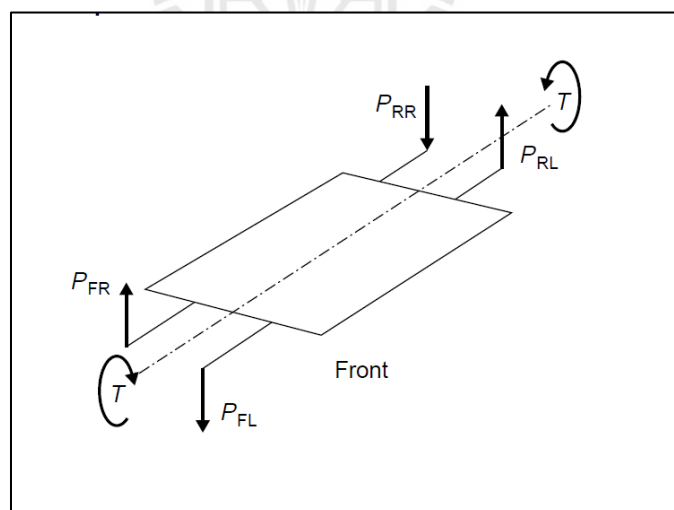


รูปที่ 2.16 แสดงสภาวะแรงบิด (Torsion Case)



รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมที่ทำให้เกิดสภาวะแรงบิด

เมื่อพิจารณาแต่สภาวะแรงบิดเพียงอย่างเดียว แรงกระทำจะกระทำต่อล้อข้างใดข้างหนึ่ง ส่งผลให้เกิดแรงปฏิกิริยาขึ้นกับเพลอื่น ๆ ซึ่งค่าโมเมนต์แรงบิดสูงสุดสามารถคำนวณได้จากแรงกระทำที่ล้อคุณระยะห่างของฐานล้อ ดังนั้นการออกแบบเพื่อรับภาระแรงบิดนั้นจึงค่อนข้างซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับการคำนวณทางทฤษฎี



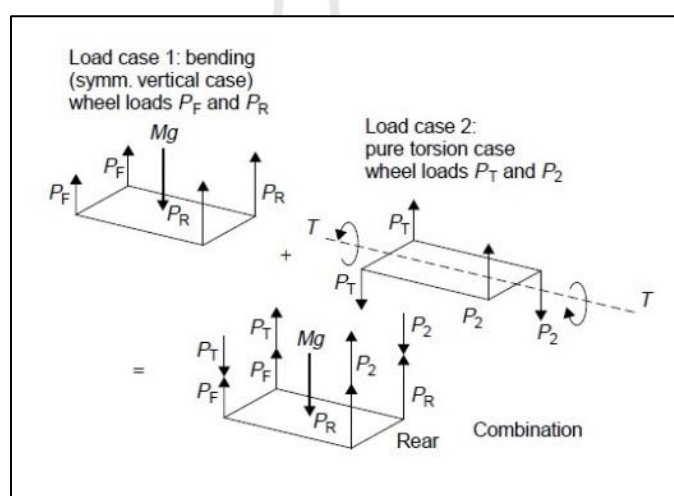
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะแรงกระทำที่ทำให้เกิดสภาวะแรงบิดเพียงอย่างเดียว

ตารางที่ 2.2 Torsion Bump Height

	Pawlowski (1969)	Erz (1957)
Bump height	0.2 m	0.2 m
Inertial factor	1.3	
Inertial factor (off road)	1.8	

2.4.3 สภาวะรวมของแรงดัดและแรงบิด (Combined Bending and Torsion Case)

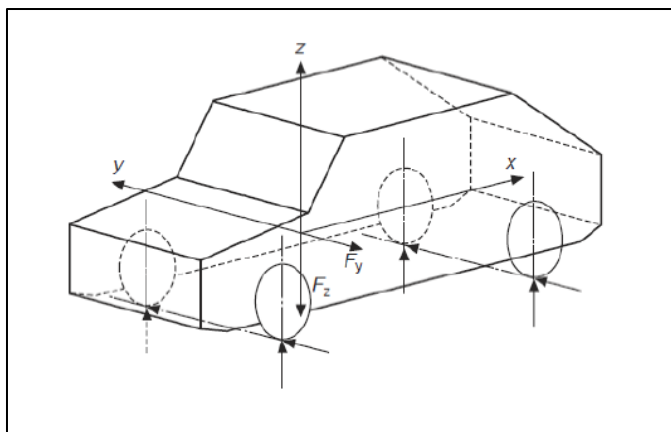
สำหรับสภาวะจริงที่เกิดขึ้น สภาวะแรงบิดนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นเพียงอย่างเดียวได้ จะต้องมีสภาวะแรงดัดเกิดขึ้นด้วยเสมอ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกล้วนๆ ดังนั้นในการวิเคราะห์จะต้องรวมทั้งสองสภาวะนี้เข้าด้วยกันเพื่อให้เหมือนกับสภาวะจริงที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน



รูปที่ 2.19 แสดงสภาวะรวมของแรงดัดและแรงบิด

2.4.4 สภาวะแรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Loads)

สภาวะแรงกระทำในแนวยาวนี้ เป็นสภาวะอันเนื่องมาจากความเฉื่อยของวัตถุ ภายใต้ความเร่งหรือความหน่วงในแนวยาวของโครงสร้างตัวรถที่เกิดขึ้นจากการเบรก



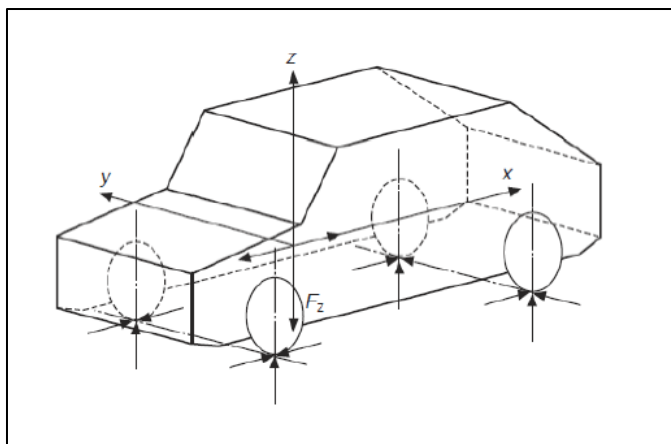
รูปที่ 2.20 แสดงสถานะแรงกระทำในแนวยาว (Longitudinal Loads)

ตารางที่ 2.3 Load Factors for Braking

	Pawlowski (1969)	Cranfield tests (Tidbury 1966)	Garrett (1953)
Cars	1.1g	1.84g	1.75g
Trucks	0.75g		

2.4.5 สถานะแรงกระทำในแนวด้านข้าง (Lateral Loads)

สถานะแรงกระทำในแนวด้านข้างนี้ เป็นสถานะอันเนื่องมาจากความเฉื่อยของวัตถุ ภายใต้ผลของความเร่งในแนวด้านข้างของโครงสร้างรถ ตัวอย่างเช่น กรณีขณะรถเลี้ยวโค้ง จะเกิดแรงกระทำจากด้านข้างและแรงกระทำที่ตำแหน่งของล้อสัมผัสกับพื้นถนน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) สถานะนี้จะทำให้รถเกิดการพลิกคว่ำได้



รูปที่ 2.21 แสดงสภาวะแรงกระทำในแนวด้านข้าง (Lateral Loads)

2.5 ปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในส่วนของหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องหรือมีความใกล้เคียงกับการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ โดยผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมและสรุปสาระสำคัญของงานวิจัยต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

Lin and Nian (2006) ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบโครงสร้างของตัวถังรถโดยสารโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวไว้ว่าจุดศูนย์กลางของรถโดยสารมักจะอยู่สูงกว่ายานพาหนะชนิดอื่น ๆ เมื่อเกิดอุบัติเหตุการพลิกคว่ำเนื่องจากความสูงของผู้โดยสาร จะก่อให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรง ดังนั้นความแข็งแรงของโครงสร้างจึงเป็นสิ่งแรกที่ต้องได้รับการพิจารณา โดยได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะการเสียรูปที่ได้จากการทดสอบจริงกับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และได้ออกแบบโครงสร้างบางส่วนใหม่ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายมาก ซึ่งการออกแบบใหม่นี้สามารถทำให้การเสียรูปลดลงได้ถึง 50%

Ko et al., (2009) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการพลิกคว่ำของรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ ภายใต้มาตรฐานการพลิกคว่ำของยุโรป ECE R-66 และการชนกระแทกด้านหน้ากับกำแพง โดยโครงสร้างของรถโดยสารได้ใช้วัสดุแซนวิสคอมโพสิต ที่ถูกออกแบบเป็นลักษณะฮันนิคอมบ์ ซึ่งมีน้ำหนักเบา แต่มีความแข็งแรงสูง สำหรับการวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ LS-DYNA3D พบว่าโครงสร้างยังคงมีความปลอดภัยภายใต้เงื่อนไขการพลิกคว่ำและการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐานยุโรป

Croccolo et al., (2011) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์โครงสร้างของรถโดยสารแบบกึ่งพวง (Articulated Bus) มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นการประกอบ 2 แชสซี เข้าด้วยกัน มีความยาว 18 เมตร

โดยได้จำลองสถานการณ์และคาดการณ์การตอบสนองของโครงสร้าง เพื่อวิเคราะห์ความถี่ ความเครียด และการกระจัดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง ภายใต้แรงกระทำและเงื่อนไขที่กำหนด ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อสะท้อนให้เห็นรอบการทำงานจริงที่เกิดขึ้นกับรถโดยสาร

Lapo et al., (2011) ทำการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างหลักของรถโดยสารประเภทสองชั้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความแข็งแรงทางกลของโครงสร้างหลักของรถโดยสาร โดยทำการวิเคราะห์การเสีรูปร่าง ความถี่ และความเครียด ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จากการวิเคราะห์พบว่า มีจุดที่อาจทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายมาก จึงได้มีการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างในจุดที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายใหม่ เพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัยตามที่กฎหมายกำหนดและสามารถให้บริการสาธารณะได้

Meznar และ Lazovic (2010) ได้ทำการศึกษาโครงสร้างแบบโมโนค็อก (Monocoque Structure) ของรถโดยสารสามชั้น โดยได้ทำการวิเคราะห์จุดวิกฤต (Critical Points) ของโครงสร้างรถโดยสารด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยพบว่า จะเกิดขึ้นบริเวณ โครงสร้างตรงขอบด้านบนของประตูโดยสาร ซึ่งได้ทำการทดลองวัดค่าเพื่อตรวจสอบการเสีรูปร่างตามสมมติฐานการเสีรูปร่างที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกำหนดความเร็วสูงสุดในการขับเท่ากับ 40 กิโลเมตร/ชั่วโมง ขับเป็นวงกลมด้วยรัศมีวงเลี้ยวที่ต่ำสุด และมีการเปลี่ยนแปลงความเร่งและการเบรกแบบฉุกเฉิน เพื่อนำค่าที่ได้มาทำการปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็งแรงตามเกณฑ์ที่กำหนด

Belsare et al., (2012) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพลิกคว่ำของรถโดยสารในประเทศอินเดีย ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมยานยนต์ AIS-031 โดยได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 4 ส่วน คือ การทดสอบการพลิกคว่ำจริงของรถโดยสารทั้งคัน การทดสอบการพลิกคว่ำเฉพาะ โครงสร้างตัวถัง การทดสอบโครงสร้างตัวถังด้วยลูกตุ้ม และการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้ตรวจสอบการพลิกคว่ำของโครงสร้างในอนาคตได้

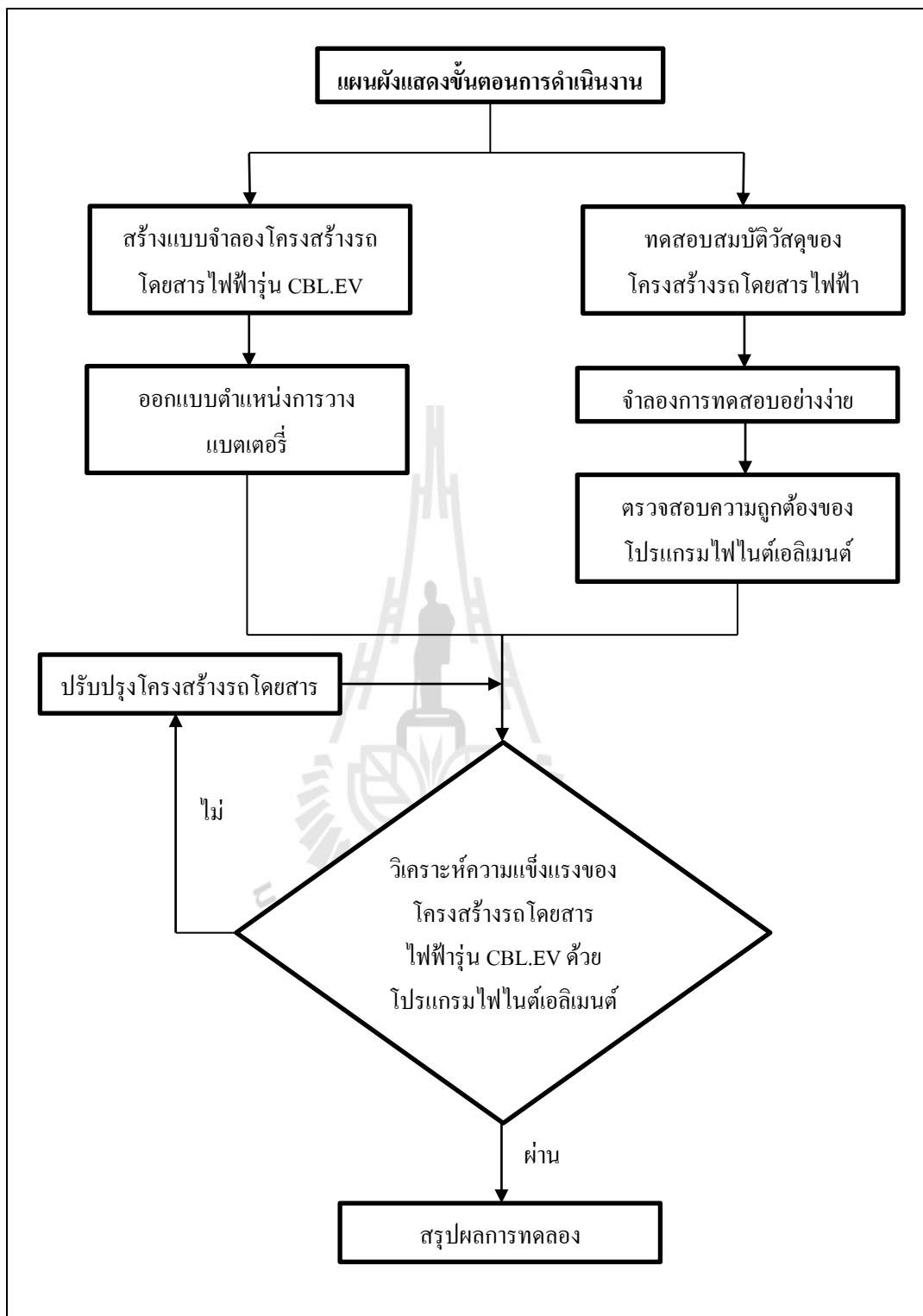
Wen-wei Wang et al., (2012) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความเสียหายของโครงสร้างรถโดยสารเมื่อเกิดการชน โดยได้จำลองสถานการณ์เมื่อรถโดยสารที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนถูกชนจากทางด้านข้างด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตร/ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์ที่ได้พบว่า โครงสร้างบริเวณห้องโดยสารและที่วางเบาะเตออร์เกิดความเสียหาย จึงได้เสนอให้มีการปรับปรุงแก้ไขเพื่อความปลอดภัย เนื่องจากเบาะเตออร์ที่ใช้เป็นประเภทแรงดันสูง ซึ่งอาจก่อให้เกิดการระเบิดได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 กล่าวนำ

การดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาผลกระทบของตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ต่อความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมจำลองสถานการณ์ที่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของรถโดยสารไฟฟ้า เพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ที่กำหนด การวิเคราะห์ความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ได้นำข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตชุดอุตสาหกรรม จำกัด มาใช้ในการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าและการกำหนดสมบัติวัสดุ เพื่อให้มีลักษณะใกล้เคียงกับโครงสร้างจริงมากที่สุด จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมที่จะนำมาใช้งาน ก่อนที่จะเริ่มกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ต่อความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้าจริง สำหรับขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยนี้ จะมีขั้นตอนดังแสดงในแผนผังในรูปที่ 3.1



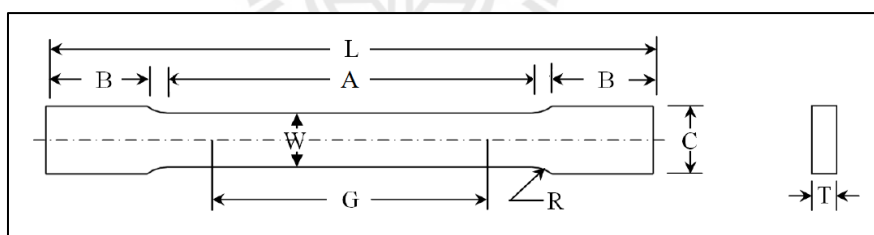
รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2 การทดสอบสมบัติวัสดุ

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จำเป็นจะต้องกำหนดสมบัติเชิงกลของวัสดุให้กับแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องและสอดคล้องกับการทดสอบจริงมากที่สุด ดังนั้นจึงต้องมีการนำวัสดุที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้ามาทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของโลหะ ASTM E8 : Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials

3.2.1 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

เนื่องจากวัสดุที่นำมาใช้สำหรับผลิตโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้ามักมีด้วยกันหลากหลายประเภท ประกอบไปด้วยเหล็กกล่อง สแตนเลสกล่อง และเหล็กแผ่น ซึ่งมีสมบัติเชิงกลของวัสดุที่แตกต่างกันไป จึงต้องทำการทดสอบสมบัติของวัสดุโดยใช้มาตรฐานการทดสอบแรงดึง ASTM E8 เพื่อให้ได้ค่าสมบัติของวัสดุที่ถูกต้องจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขการทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบแรงดึงของโลหะที่อุณหภูมิห้อง ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.2 และมีขนาดดังแสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งทำการตัดชิ้นงานโดยใช้การตัดด้วยลวดไฟฟ้า (EDM Wire Cut)



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8

ตารางที่ 3.1 ขนาดชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8

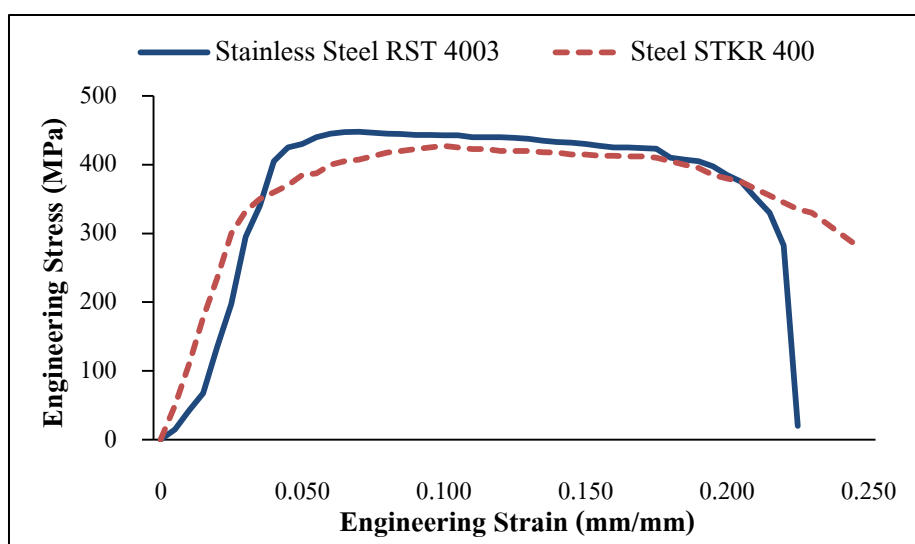
ตัวแปร	ชิ้นงานมาตรฐาน (มิลลิเมตร)	ชิ้นงานลดขนาด (มิลลิเมตร)
G – ความยาวเกจ (Gage length)	50±0.1	25±0.1
W – ความกว้าง (Width)	12.5±0.2	6±0.1
T – ความหนา (Thickness)	ความหนาของวัสดุ	
R – รัศมีส่วนโค้ง (Radius of fillet)	12.5	6
L – ความยาวทั้งหมด (Overall length)	200	100
A – ความยาวส่วนที่ลดขนาด (Length of reduced)	57	32
B – ความยาวส่วนจับยึด (Length of grip)	50	30
C – ความกว้างส่วนจับยึด (Width of grip)	20	10

3.2.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเพื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุชิ้นนั้น จะทดสอบด้วยการดึงชิ้นงานทดสอบให้ยืดออกจนเกิดความเสียหาย โดยใช้ความเร็วต่ำในขณะที่ทำการดึงและคงที่ตลอดการทดสอบ การทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุเหล็กแผ่นในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดทดสอบแรงดึงของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Universal Testing Machine : UTM ยี่ห้อ INSTRON รุ่น 5582 วัดแรงขนาดสูงสุด 100 กิโลนิวตัน โดยใช้ความเร็วสำหรับการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานมาตรฐานที่ความเร็ว 0.75 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้ความเร็วสำหรับการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานลดขนาดที่ความเร็ว 0.375 มิลลิเมตรต่อนาที ส่วนการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400 ใช้ชุดทดสอบแรงดึงของเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ Shimadzu UH-2000 k ใช้ความเร็วสำหรับการทดสอบแรงดึงที่ความเร็ว 0.9 มิลลิเมตรต่อนาที

3.2.3 ผลการทดสอบสมบัติวัสดุ

จากผลการทดสอบแรงดึงของวัสดุจะได้ข้อมูลการทดสอบเป็นค่าความเค้นและระยะยืดตัวของวัสดุ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าสมบัติของวัสดุที่ประกอบไปด้วยโมดูลัสความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ค่าความเค้นคราก (Yield Strength) และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate Tensile Strength) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดได้ โดยค่าความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบนั้น เป็นค่าความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรม (Engineering Stress – Strain) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400



รูปที่ 3.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400

สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดค่าสมบัติของวัสดุในช่วงพลาสติกนั้น จะต้องกำหนดให้เป็นค่าความเค้นกับความเครียดจริง (True Stress – Strain) เนื่องจากในภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตชิ้นงานของรถยนต์ส่วนใหญ่จะเป็นการขึ้นรูปวัสดุที่มีการเสียรูปอย่างถาวร ตัวอย่างเช่น การบีบขึ้นรูปของประตูรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งวัสดุจะมีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดขณะที่ได้รับแรงกระทำนั้น ๆ เมื่อทำการดึงทดสอบวัสดุพื้นที่หน้าตัดจะลดลงทำให้ค่าความเค้นเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งวัสดุเกิดการขาด ดังนั้นจึงเลือกพิจารณาที่ค่าความเค้นกับความเครียดจริง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ โดยนำค่าความเค้นกับความเครียดจริงที่ได้จากการคำนวณมาแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400 ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ส่วนในรูปที่ 3.5 จะเป็นกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมและความเค้นกับความเครียดจริงของเหล็กแผ่น

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (3.1)$$

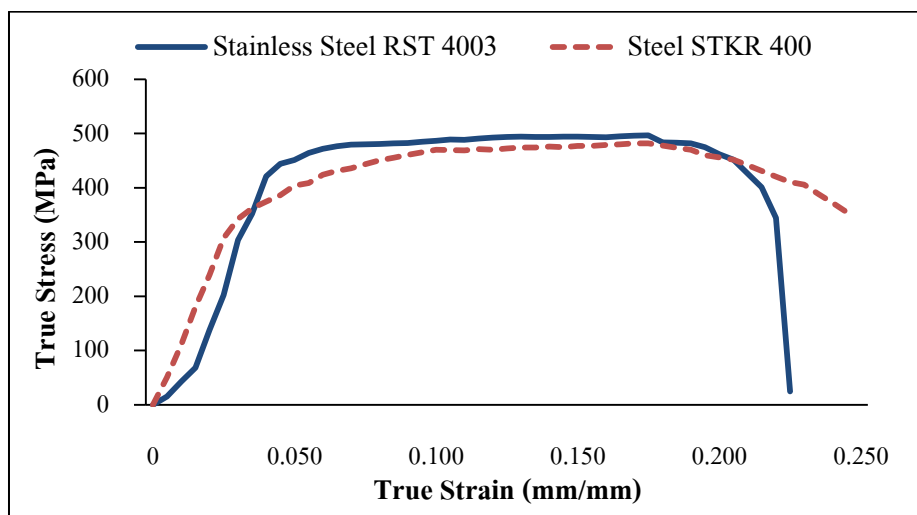
$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (3.2)$$

โดยที่ σ_e คือ ค่าความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Stress)

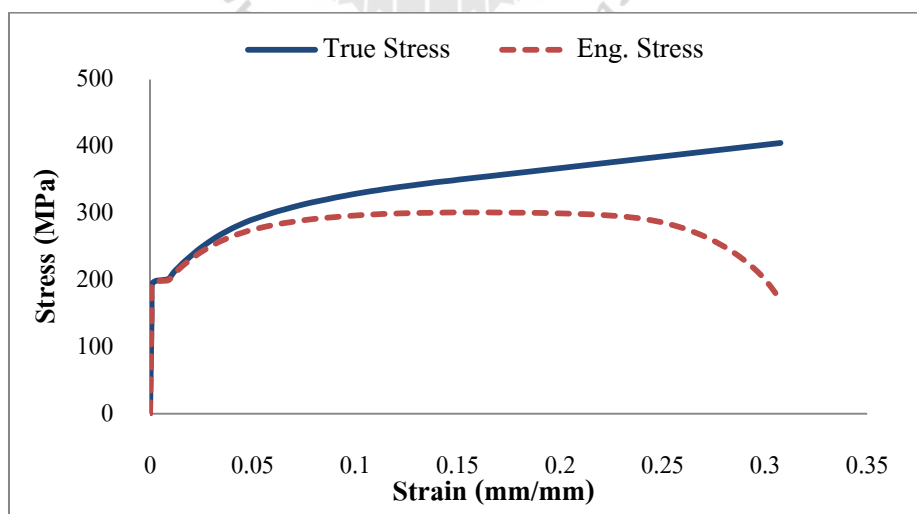
σ_t คือ ค่าความเค้นจริง (True Stress)

ϵ_e คือ ค่าความเค้นทางวิศวกรรม (Engineering Strain)

ϵ_t คือ ค่าความเค้นจริง (True Strain)



รูปที่ 3.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงของวัสดุ Stainless Steel RST 4003 และ Steel STKR 400



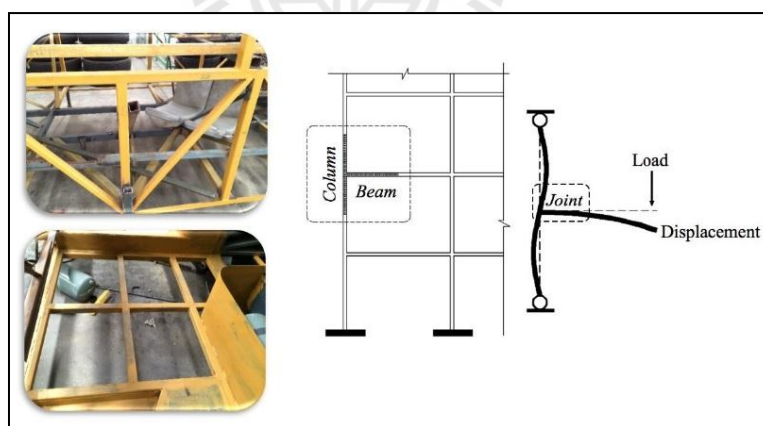
รูปที่ 3.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจริงและความเค้นกับความเครียดทางวิศวกรรมของเหล็กแผ่น

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ จำเป็นจะต้องตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือและถูกต้องแม่นยำที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ANSYS 14.5 แต่เนื่องจากการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้านั้นมีค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง จึงได้เลือกการทดสอบการเสถียรของโครงสร้างในบางจุด เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะนำมาใช้งาน

3.3.1 การออกแบบวิธีตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

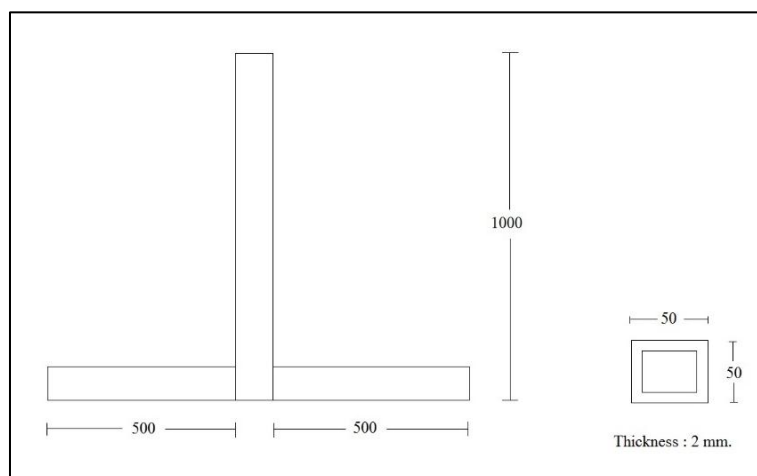
การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเปรียบเทียบระยะการเสถียรของโครงสร้างและความเค้นที่ได้จากการทดสอบจริงกับผลจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยลักษณะของชิ้นงานที่นำมาทดสอบจะเป็นแบบ T-Joint เนื่องจากการเชื่อมต่อโครงสร้างตัวถังของรถโดยสารไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกันในรูปแบบ T-Joint ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการเชื่อมต่อของโครงสร้างตัวถัง

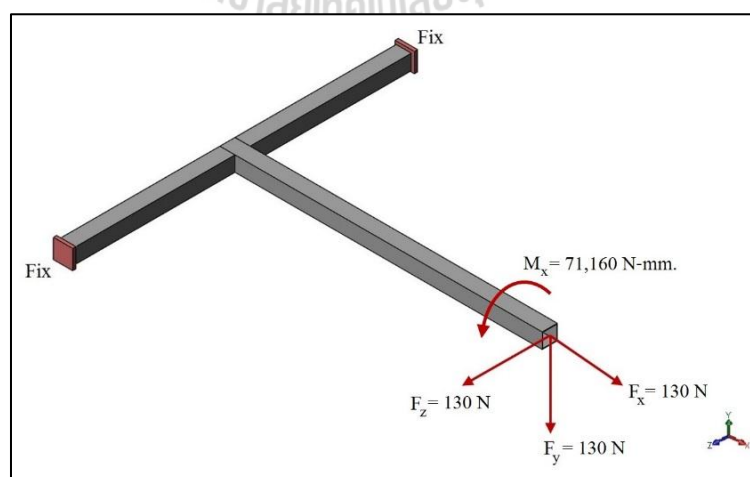
สำหรับวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบนั้นจะอ้างอิงจากวัสดุที่นำมาใช้กับโครงสร้างตัวถังจริง ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นเหล็กกล่อง Steel STKR 400 ขนาด $50 \times 50 \times 2$ มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร จำนวน 1 ชิ้น และเหล็กกล่อง Steel STKR 400 ขนาด $50 \times 50 \times 2$ มิลลิเมตร ความยาว 500

มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น เชื่อมต่อกันแบบ T-Joint ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยจะกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการตรวจสอบออกเป็น 2 แบบ ดังนี้



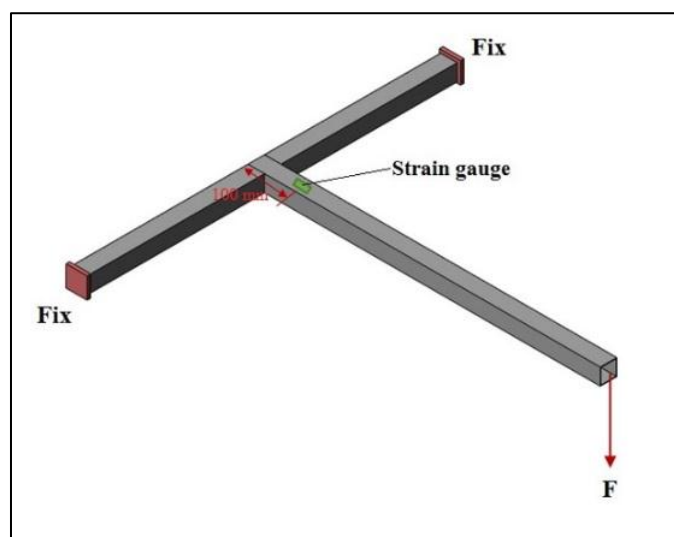
รูปที่ 3.7 แสดงขนาดของชิ้นงานที่นำมาเชื่อมต่อกัน

1). เงื่อนไขขอบเขตในการทดลองการเปรียบเทียบระยะการเสียรูป จะทำการจับยึดชิ้นงานที่ปลายทั้งสองด้านให้แน่น และมีภาระกระทำที่ปลายชิ้นงานด้านที่ยาวที่สุด โดยกำหนดให้ภาระกระทำที่กระทำกับชิ้นงานในแนวแกน X, Y และ Z มีค่าเท่ากับ $F_x = F_y = F_z = 130 \text{ N}$. และค่าโมเมนต์ดัดรอบแกน X มีค่าเท่ากับ $71,160 \text{ N-mm}$. ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองการเปรียบเทียบระยะการเสียรูป

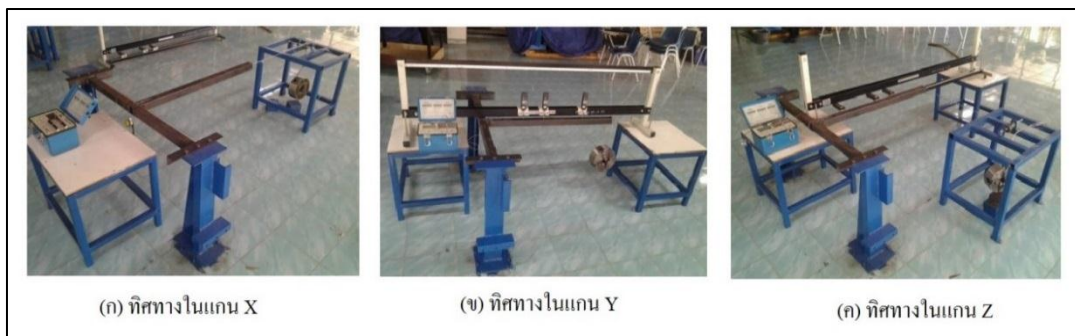
2). เส้นใยขอบเขตในการทดลองการเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้น จะทำการจับยึดชิ้นงานที่ปลายทั้งสองด้านให้แน่น ติดเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) ที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร จากปลายขอบด้านที่ทำการจับยึด โดยกำหนดให้มีภาระที่กระทำกับชิ้นงานเท่ากับ 130 N. ในทิศทางแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 3.9



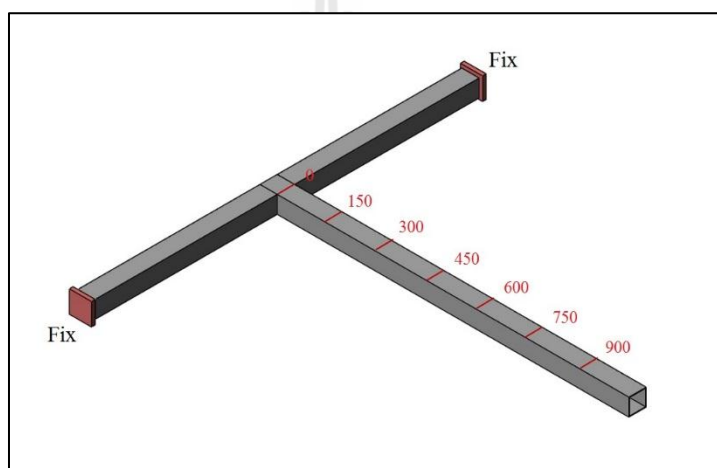
รูปที่ 3.9 แสดงการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการทดลองการเปรียบเทียบค่าความเค้น

3.3.2 การทดสอบชิ้นงานจริง

1). การทดสอบระยะการเสีรูปของชิ้นงาน สำหรับการทดสอบชิ้นงานจริงนั้น จะทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยใช้เครื่องเลื่อยสายพานในการตัดวัสดุเหล็กกล่องขนาด $50 \times 50 \times 2$ มิลลิเมตร และทำการเชื่อมต่อชิ้นงานให้เป็นรูปแบบ T-Joint ด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้า เมื่อเตรียมชิ้นงานทดสอบเสร็จเป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำมาทำการทดสอบ โดยชุดทดสอบนั้นจะมีชุดจับยึดชิ้นงานทั้งสองด้าน จากนั้นจึงนำวัตถุที่มีมวล 13 กิโลกรัม กระทำที่ส่วนปลายของชิ้นงานในทิศทางตามแนวแกน X ทิศทางตามแนวแกน Y และทิศทางตามแนวแกน Z ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 แล้วจึงทำการวัดระยะการเสีรูปของชิ้นงานที่ตำแหน่ง 0, 150, 300, 450, 600, 750 และ 900 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 แสดงการทดสอบการเสีรูปของชิ้นงานเนื่องจากแรงกระทำในทิศทางตามแนวแกนต่าง ๆ



รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งที่ทำการวัดระยะการเสีรูปของชิ้นงาน

2). การทดสอบการเสีรูปจากการบิดตัวของชิ้นงานนั้น จะทำการทดสอบโดยนำ วัตถุมวล 13 กิโลกรัม ยึดติดกับแขนจับที่ตรงส่วนปลายของชิ้นงาน เพื่อให้เกิดค่าโมเมนต์ดัดใน แนวแกน X โดยแขนจับจะมีความยาวเท่ากับ 500 มิลลิเมตร ยื่นออกมาในทิศทางตามแกน Z ซึ่ง ลักษณะการจับยึดชิ้นงานและการกำหนดแรงกระทำแบบแรงบิดจะแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงการทดสอบการเสียรูปของชิ้นงานเนื่องจากโมเมนต์ดัดรอบแกน X

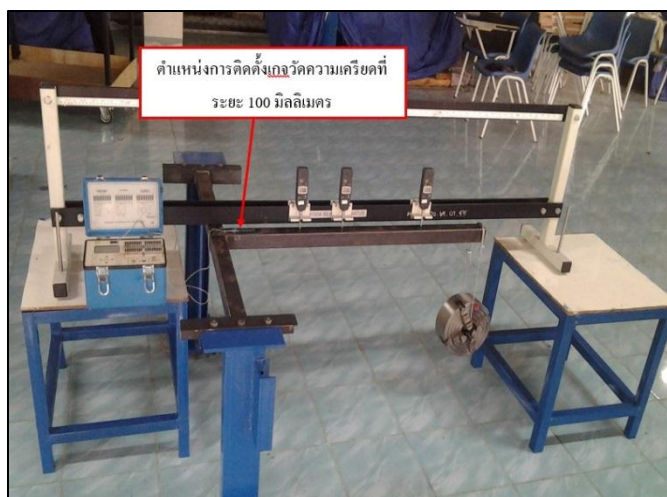
3). การทดสอบค่าความเค้นของชิ้นงาน ในการทดสอบค่าความเครียดที่ได้จากชิ้นงาน จะทำการติดตั้งเกจวัดความเครียดที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ 2) และทำการกำหนดภาระกระทำที่ตำแหน่งตรงส่วนปลายของชิ้นงานด้วยมวล 13 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และทำการวัดค่าความเครียดด้วยเครื่องอ่านค่าและบันทึกค่าความเครียด (Strain Indicator and Recorder) ยี่ห้อ Vishay Model P3 จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าความเค้น โดยใช้สมการของ Young's modulus ในการหาค่าความเค้นของชิ้นงานดังสมการที่ (3.3) ซึ่งค่า Young's modulus ที่ใช้เป็นค่า Young's modulus ของ Steel STKR 400 มีค่าเท่ากับ 201.60 GPa

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

เมื่อ E คือ Young's modulus

σ คือ ความเค้น

ε คือ ความเครียด

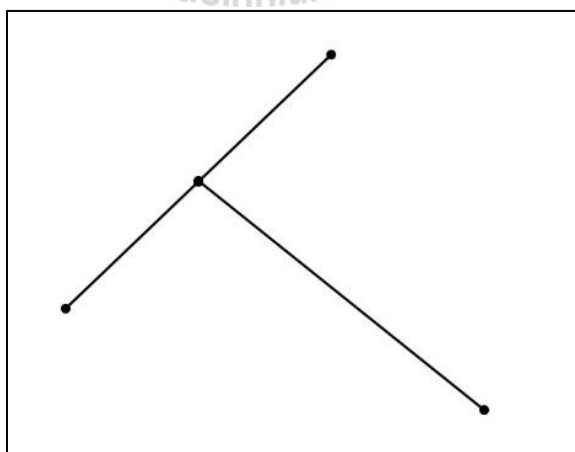


รูปที่ 3.13 แสดงการทดสอบค่าความเค้นของชิ้นงาน

3.3.3 การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์การเสียรูปของชิ้นงานด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้โปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS 14.5 ในการวิเคราะห์ปัญหา โดยได้ทำการสร้างแบบจำลองชิ้นงานแบบ T-Joint ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2013 ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น ได้ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 4 รูปแบบ คือ

1). การวิเคราะห์แบบ Beam Element Rigid Joint เป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเอลิเมนต์ใน 1 มิติ ซึ่งกำหนดให้จุดต่อของชิ้นงานเป็นแบบ Rigid joint



รูปที่ 3.14 แสดงการวิเคราะห์ปัญหาแบบ Beam Element Rigid Joint

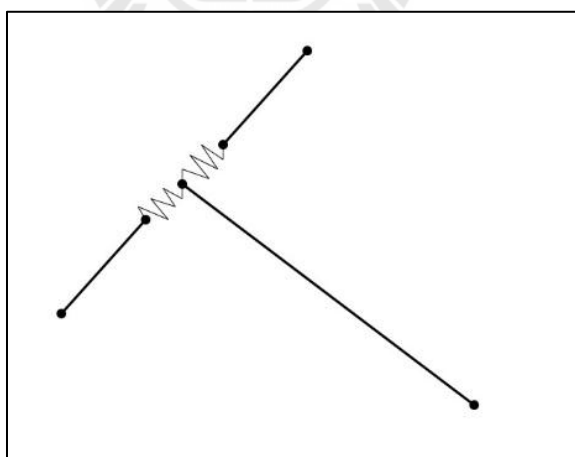
2). การวิเคราะห์แบบ Beam Element Stiffness Joint เป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้วย
 เอลิเมนต์ใน 1 มิติ ซึ่งกำหนดให้จุดต่อของชิ้นงานเป็นแบบ Stiffness Joint โดยคำนวณค่าความแข็ง
 ตึงต่อการดัด (Bending Stiffness: K_B) ในทิศทางตามแนวแกนได้จากสมการที่ (3.3) และค่าความ
 แข็งตึงต่อการบิด (Torsion Stiffness: K_T) ในทิศทางตามแนวแกนได้จากสมการที่ (3.4)

$$K_{Bi} = \frac{W_i}{\delta_i} \quad ; i = x, y, z \quad (3.3)$$

เมื่อ W_i คือ ภาระกระทำในแนวแกน
 δ_i คือ ระยะการเสยรูปในแนวแกน

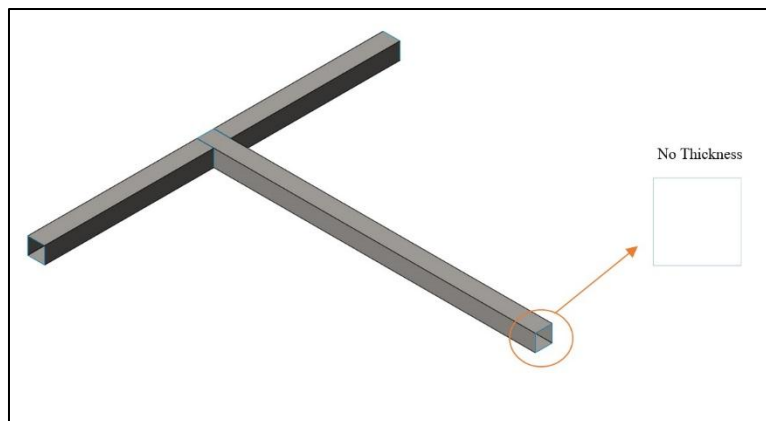
$$K_{Ti} = \frac{T_i}{\theta_i} \quad ; i = x, y, z \quad (3.4)$$

เมื่อ T_i คือ โมเมนต์บิดในแนวแกน
 θ_i คือ มุมบิดในแนวแกน



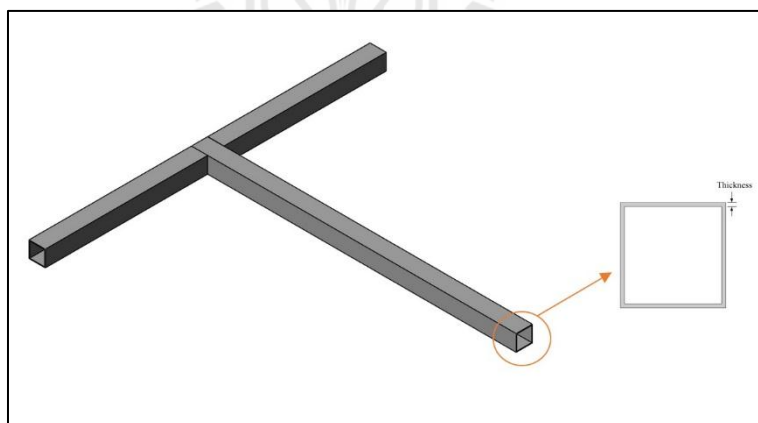
รูปที่ 3.15 แสดงการวิเคราะห์ปัญหาแบบ Beam element stiffness joint

3). การวิเคราะห์แบบ Surface เป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเอลิเมนต์ใน 2 มิติ ใน
 กรณีนี้จะทำการสร้างแบบจำลองในลักษณะผนังบาง เป็นการจำลองรูปร่างชิ้นงานแบบพื้นผิว และ
 ทำการกำหนดความหนาของชิ้นงานในโปรแกรมวิเคราะห์



รูปที่ 3.16 แสดงการวิเคราะห์ปัญหาแบบ Surface

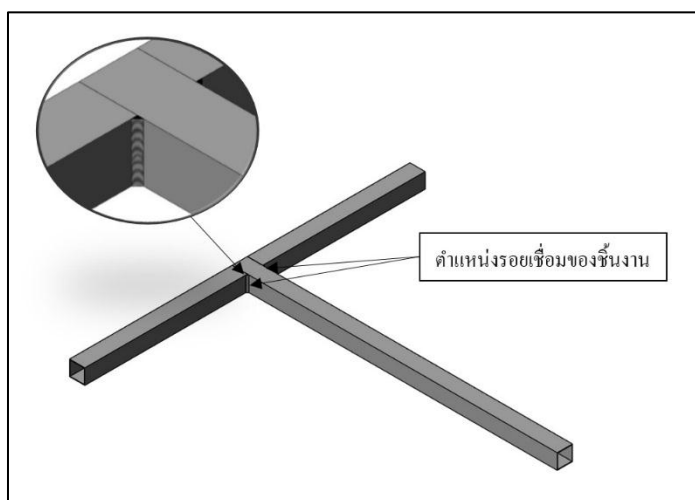
4). การวิเคราะห์แบบ Solid เป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเอลิเมนต์ใน 3 มิติ โดยจะทำการสร้างแบบจำลองแบบสามมิติ ในกรณีนี้จะสามารถแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งได้หลากหลายรูปแบบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความถูกต้องสูง แต่จะใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ที่มากกว่าการวิเคราะห์แบบ Surface



รูปที่ 3.17 แสดงการวิเคราะห์ปัญหาแบบ Solid

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความเค้นจะทำการสร้างแบบจำลอง 2 แบบ คือ แบบจำลอง Solid เป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเอลิเมนต์ใน 3 มิติ โดยที่บริเวณรอยต่อของชิ้นงานจะไม่มีรอยเชื่อมแต่กำหนดให้เป็นการเชื่อมต่อกันแบบยึดติดแน่น แบบที่สองจะเป็นแบบจำลอง Solid Welding

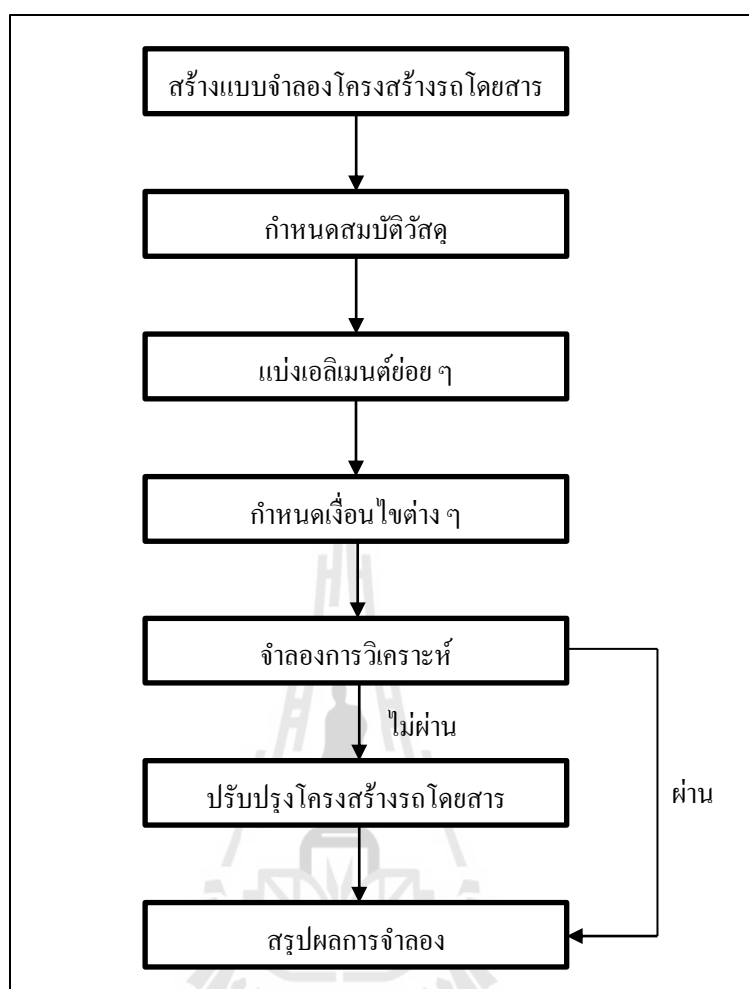
เป็นการวิเคราะห์ปัญหาด้วยเอลิเมนต์ใน 3 มิติ เช่นกัน แต่จะทำการวิเคราะห์โดยที่บริเวณรอยต่อของชิ้นงานจะมีรอยเชื่อมในแบบจำลองด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงการวิเคราะห์ปัญหาแบบ Solid welding

3.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งแบตเตอรี่ที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มจากการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าโดยอ้างอิงจากขนาดและข้อมูลจริง จากนั้นจึงทำการกำหนดสมบัติวัสดุให้กับโครงสร้าง แล้วทำการแบ่งเอลิเมนต์ย่อย ๆ ให้กับแบบจำลอง ทำการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงของรถโดยสาร เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า โดยมีขั้นตอนพอสังเขปดังแสดงในรูปที่ 3.19

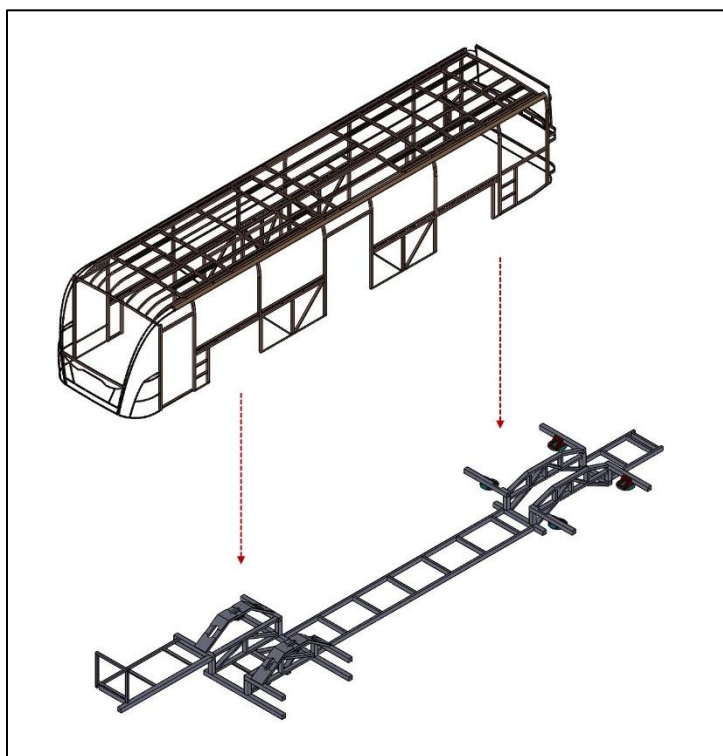


รูปที่ 3.19 แสดงแผนผังแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

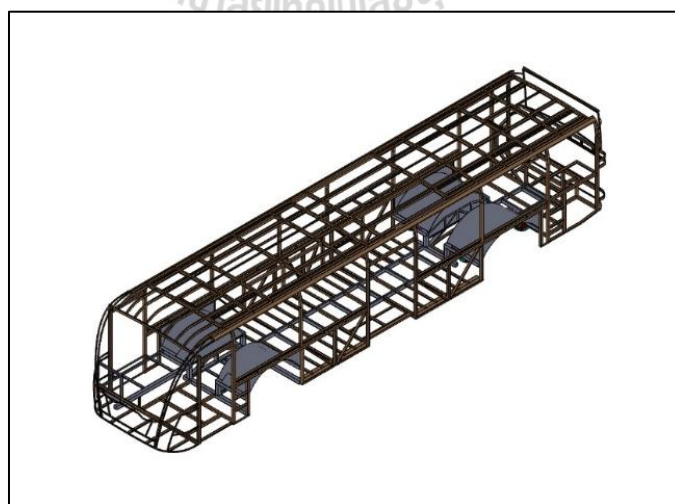
3.4.1 การสร้างแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า

โครงสร้างหลักของรถโดยสารที่นำมาใช้สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้เป็นโครงสร้างหลักของรถโดยสารไฟฟ้ารุ่น CBL.EV ของบริษัท อุเชิดชัยอุตสาหกรรม จำกัด เป็นรถโดยสารประเภทขานต่ำ (Low Floor Bus) ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน สำหรับกระบวนการสร้างแบบจำลองหรือ CAD Model ของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม SolidWorks 2013 ในการขึ้นรูปชิ้นงานและประกอบเป็นโครงสร้างรถโดยสาร ซึ่งส่วนประกอบหลักของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า สามารถแบ่งส่วนประกอบหลักของโครงสร้างออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ โครงฐานหรือที่เรียกว่า แชสซี (Chassis) และ โครงสร้างตัวถัง (Body Structure) ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งชิ้นส่วนของโครงสร้างแต่ละชิ้นจะเชื่อมติดกันด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองแต่ละส่วนจึงกำหนดให้มีการเชื่อมต่อกันในลักษณะแบบยึดติดแน่น และการ

ประกอบโครงสร้างแชสซีกับโครงสร้างตัวถังเข้าด้วยกันนั้น จะใช้วิธีการเชื่อมติดด้วยเครื่องเชื่อมไฟฟ้า เช่นกัน ซึ่งลักษณะของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.21



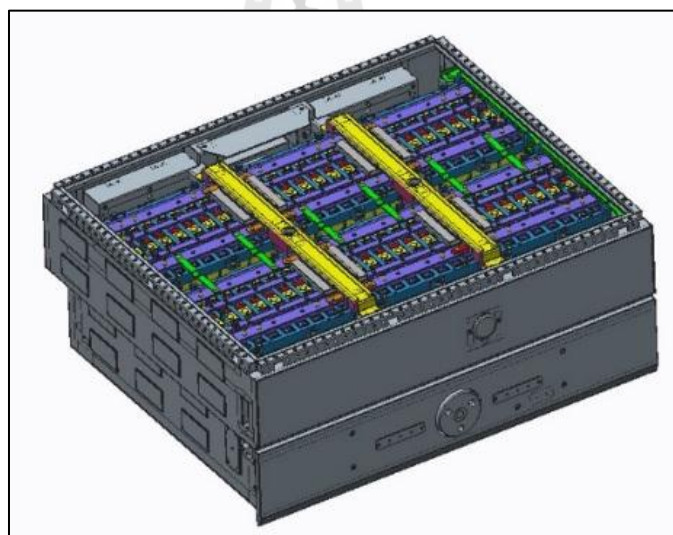
รูปที่ 3.20 แสดงส่วนประกอบหลักของ โครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำ



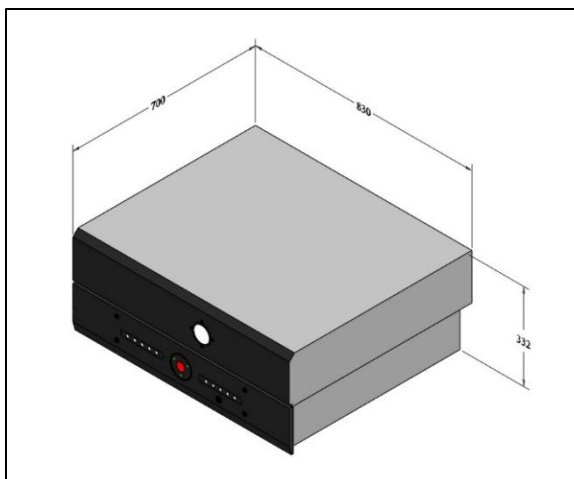
รูปที่ 3.21 แสดงโครงสร้างหลักของรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำ

3.4.2 การออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่

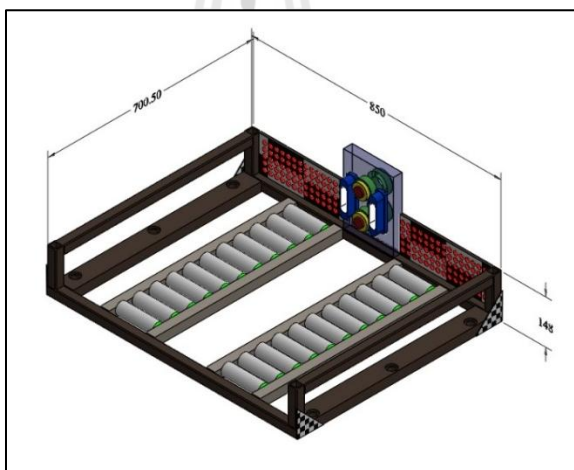
เนื่องจากรถโดยสารที่นำมาใช้วิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ เป็นรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ (Low Floor Bus) ใช้พลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนแทนพลังงานเชื้อเพลิงที่ได้จากเครื่องยนต์ ซึ่งชุดแบตเตอรี่ที่ใช้สำหรับเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบขับเคลื่อนของรถโดยสารนั้น เป็นแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน (Lithium-ion Battery Module) จำนวน 11 ชุด โดยชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ คือ ตัวแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และรางใส่แบตเตอรี่ ซึ่งขนาดของชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้ นั้น ถือว่ามีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก โดยที่ขนาดของตัวแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีความกว้าง 700 มม. ความยาว 830 มม. และความสูง 332 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.23 ส่วนขนาดของรางใส่แบตเตอรี่จะมีความกว้าง 700.5 มม. ความยาว 850 มม. และความสูง 148 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.24 ชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 230 กก. ต่อ 1 ชุด



รูปที่ 3.22 แสดงแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน



รูปที่ 3.23 แสดงขนาดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

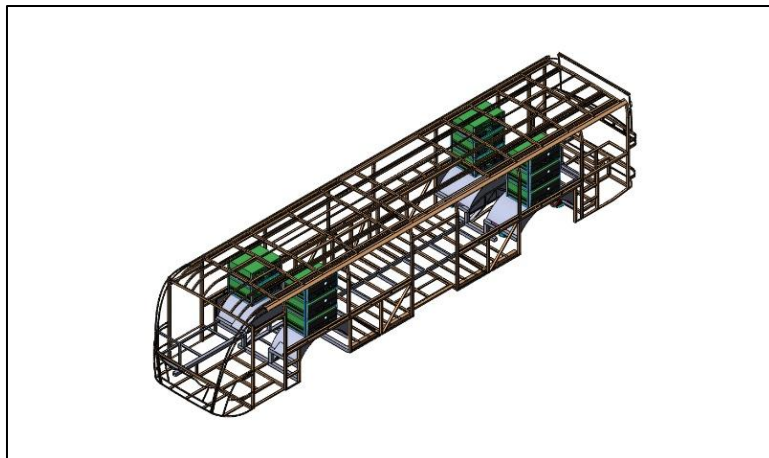


รูปที่ 3.24 แสดงขนาดของรางใส่แบตเตอรี่

ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ให้เหมาะสม ไม่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสาร และไม่ส่งผลกระทบต่อพื้นที่การใช้งานภายในรถโดยสาร ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ไว้ทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1). ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 1

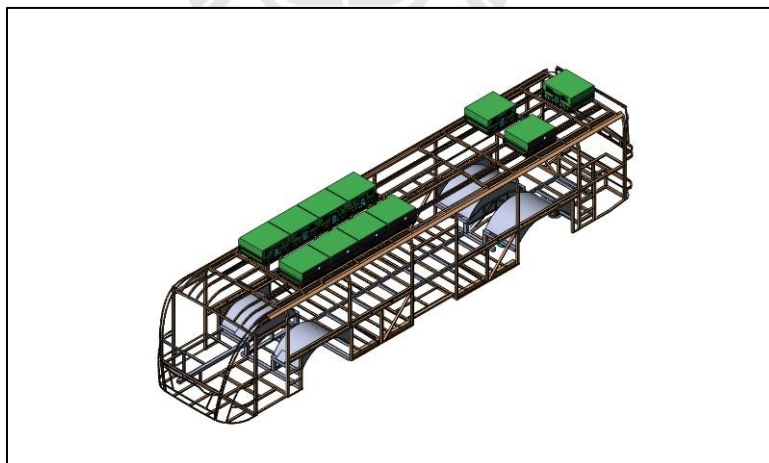
จะนำชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้งหมด 11 ชุด วางไว้ที่ตำแหน่งบนซุ้มล้อ โดยวางชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไว้ที่บนซุ้มล้อหน้าด้านซ้ายจำนวน 3 ชุด ซุ้มล้อหน้าด้านขวาจำนวน 2 ชุด ซุ้มล้อหลังด้านซ้ายจำนวน 3 ชุด และซุ้มล้อหลังด้านขวาจำนวน 3 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แสดงตำแหน่งการวางเบตเตอรีรูปแบบที่ 1

2). ตำแหน่งการวางเบตเตอรีรูปแบบที่ 2

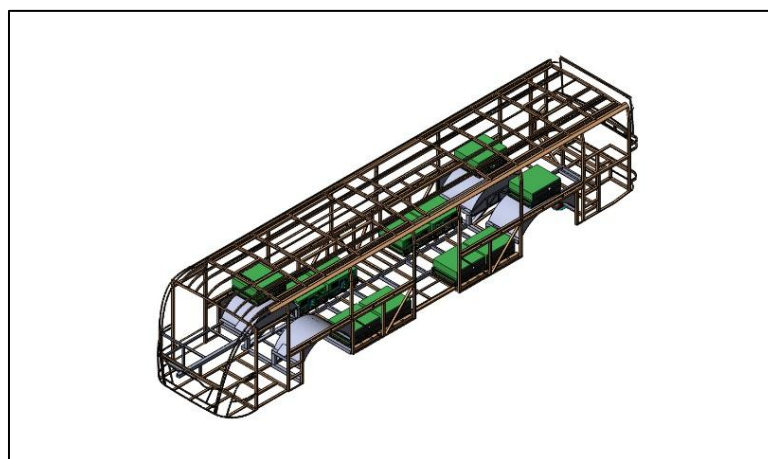
สำหรับตำแหน่งการวางเบตเตอรีรูปแบบที่ 2 นี้ จะนำชุดเบตเตอรีลิเทียมไอออน ทั้งหมด 11 ชุด วางไว้ที่ตำแหน่งบนหลังคา โดยมีลักษณะตำแหน่งการวางเบตเตอรีดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แสดงตำแหน่งการวางเบตเตอรีรูปแบบที่ 2

3). ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 3

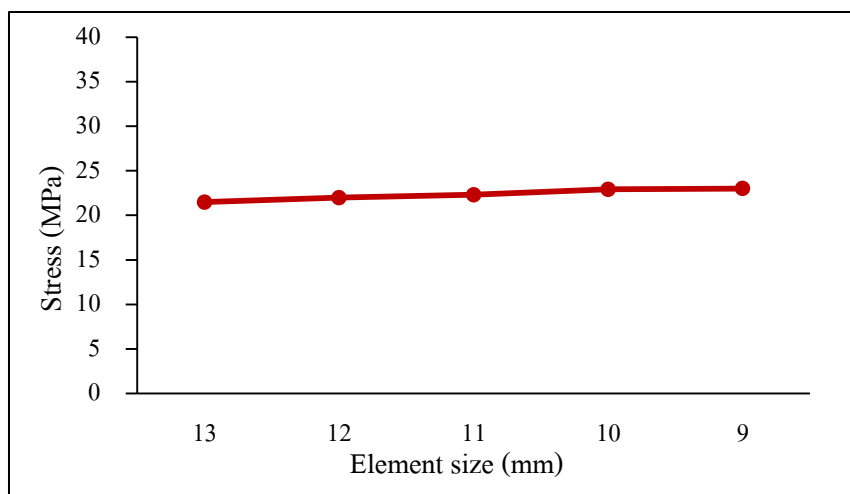
สำหรับตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 3 นี้ จะนำชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน จำนวน 8 ชุด วางไว้ที่พื้นรถโดยสารบริเวณห้องโดยสาร และชุดแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่เหลือ จำนวน 3 ชุด วางไว้ที่บนซุ้มล้อหน้าด้านขวา ซุ้มล้อหลังด้านซ้าย และซุ้มล้อหลังด้านขวาอย่างละ 1 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 แสดงตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 3

3.4.3 การพิจารณากำหนดเอลิเมนต์

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดมาจะเป็นการพิจารณากำหนดเอลิเมนต์ให้กับโครงสร้าง ซึ่งการแบ่งเอลิเมนต์ ผู้วิจัยได้เลือกการแบ่งเอลิเมนต์แบบสามมิติ โดยเลือกใช้เอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ (Tetrahedral Element) การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์นั้น โปรแกรม ANSYS 14.5 สามารถที่จะเลือกให้เป็น Program Control ได้ แต่อาจจะทำให้การวิเคราะห์ในแต่ละครั้งมีความคลาดเคลื่อนได้ จึงได้ทำการทดสอบหาขนาดของเอลิเมนต์ที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงผลการวิเคราะห์ที่น้อยที่สุด โดยได้นำการทดสอบการเปรียบเทียบค่าความเค้นของชิ้นงานที่ระยะ 100 มิลลิเมตร ในกรณีการวิเคราะห์แบบ Solid มาทำการหาขนาดซึ่งผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.28 จะพบว่า ขนาดของเอลิเมนต์ในช่วงที่ 12 มิลลิเมตร จะได้ค่าที่เหมาะสมและใกล้เคียงกับค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 3.28 แสดงการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

จากการแบ่งเอลิเมนต์ทรงสี่หน้า 4 จุดต่อ (Tetrahedral element) แบบสามมิติให้กับแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทพื้นต่ำ จะพบว่ามีจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดเท่ากับ 315,629 เอลิเมนต์ และจำนวนจุดต่อทั้งหมดเท่ากับ 123,570 จุดต่อ

3.4.4 การกำหนดสมบัติวัสดุ

การกำหนดสมบัติวัสดุให้กับแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้านั้น ได้กำหนดสมบัติวัสดุโดยอ้างอิงจากวัสดุจริงที่นำมาสร้างรถโดยสาร ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึงของวัสดุในหัวข้อที่ 3.2 สำหรับงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีค่าสมบัติวัสดุเท่ากันทุกทิศทาง (Elastic Plastic Isotropic Material) โดยค่าสมบัติวัสดุที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะประกอบไปด้วยวัสดุ 3 ชนิด คือ สแตนเลสกล่อง เหล็กกล่อง และเหล็กแผ่น ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าสมบัติวัสดุที่กำหนดให้กับแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า

สมบัติวัสดุ	สแตนเลสกล่อง (Stainless RST 4003)	เหล็กกล่อง (Steel STKR 400)	เหล็กแผ่น (Steel Sheet 400)
Young's Modulus (GPa)	200.56	201.60	204.09
Yield strength (MPa)	420	342.5	200
Tensile strength (MPa)	497	482	301.25
Poisson's ratio	0.30	0.26	0.25

3.4.5 การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัส

การกำหนดเงื่อนไขการสัมผัสระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างที่สัมผัสกันนั้น ซึ่งสมมติฐานการเชื่อมต่อกันระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างรถโดยสารส่วนมากจะเป็นการเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งดังแสดงในรูปที่ 3.29 ดังนั้นการสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าจึงกำหนดให้การเชื่อมต่อเป็นการเชื่อมต่อแบบยึดติดกันแน่น (Bonded) โดยสัมผัสกันระหว่างพื้นผิวกับพื้นผิว (Face to Face) และพื้นผิวกับขอบชิ้นงาน (Face to Edge)



รูปที่ 3.29 แสดงลักษณะรอยเชื่อมของ โครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า

3.4.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทชานต่ำ โดยได้ทำการวิเคราะห์จากสภาวะการใช้งานจริงของรถโดยสาร ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจะขึ้นอยู่กับการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี โดยได้กำหนดกรณีในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารดังต่อไปนี้

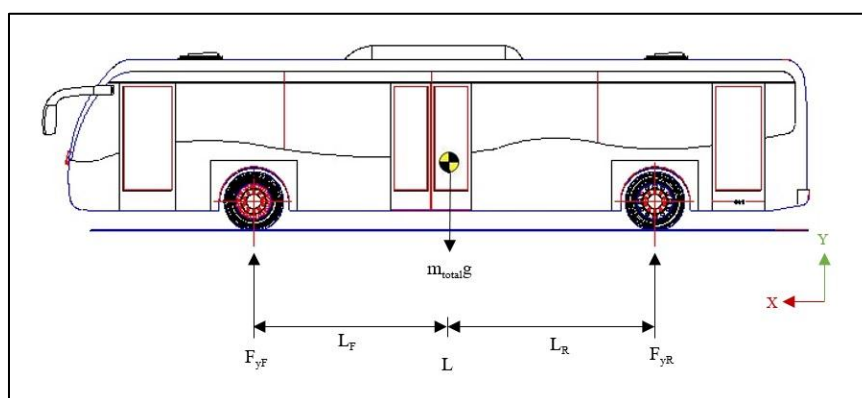
- 1). กรณีการตัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง

ในความเป็นจริงแม้ว่าภาระกรรมจากน้ำหนักที่บรรทุก จะไม่สามารถส่งผลรุนแรงต่อการเสียหายของโครงสร้างรถโดยสารในขณะที่หยุดอยู่บนพื้นเรียบ แต่ถ้าได้รับการออกแบบตำแหน่งการวางอุปกรณ์ที่ไม่เหมาะสม อาจจะทำให้เกิดผลกระทบและความไม่สมดุลของโครงสร้างได้ ในกรณีนี้เราสามารถทำการวิเคราะห์ได้จากมวลรวมและระยะห่างฐานล้อ เพื่อหาแรงกระทำที่ล้อ

ได้จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) ซึ่งการกำหนดภาระกรรมต่าง ๆ จะแสดงดังรูปที่ 3.30 สำหรับค่าความเร่งโน้มถ่วง (Gravitational acceleration) ที่ใช้มีค่าเท่ากับ $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

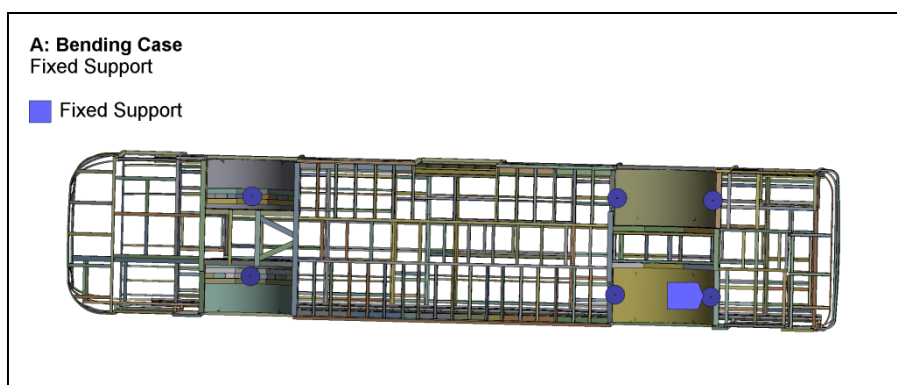
$$\Sigma F_x : F_{xF} + F_{xR} - m_{total}g = 0 \quad (3.5)$$

$$\Sigma M_{z,CG} : F_{xR}L_R - F_{xF}L_F = 0 \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.30 แสดงการกำหนดภาระกรรมในกรณีการตัด

การกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการตัดในโปรแกรมวิเคราะห์ จะกำหนดให้เป็นแบบ Fixed support ที่บริเวณจุดลมหน้าและจุดลมหลัง ทั้งหมด 6 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.31 เนื่องจากจุดลมที่เพลาหน้าและเพลาหลังเป็นจุดรองรับภาระกรรมที่กระทำกับรถโดยสาร



รูปที่ 3.31 แสดงการกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการตัด

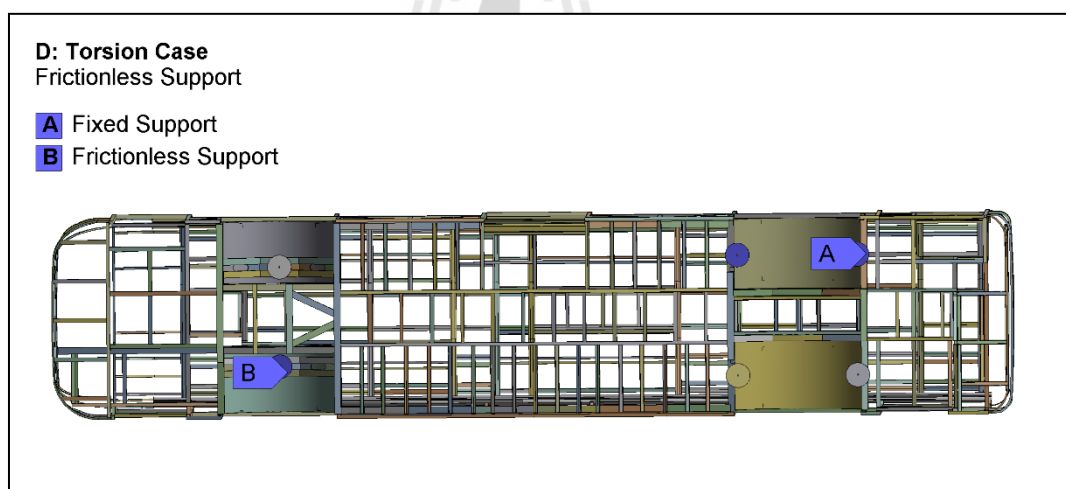
2). กรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวดน

สำหรับกรณีการบิดตัวของโครงสร้างนั้น จะเกิดขึ้นเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวดนที่ไม่เรียบ หรือการหยุดรถโดยที่ล้อใดล้อหนึ่งอยู่บนทางลาดชัน จะทำให้เกิดการบิดตัวของโครงสร้าง สำหรับการวิเคราะห์นั้นจะกำหนดจุดยึดของโครงสร้างรถโดยสารที่เพลานำในตำแหน่งตรงกันข้าม และกำหนดการกระกรรมรวมที่กระทำกับรถโดยสาร ซึ่งสามารถกำหนดจุดยึดได้ 2 แบบ คือ

- กำหนดจุดยึดของโครงสร้างรถโดยสารที่เพลานำด้านซ้ายและเพลาลังด้านขวา

- กำหนดจุดยึดของโครงสร้างรถโดยสารที่เพลานำด้านขวาและเพลาลังด้านซ้าย

การกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการบิดในโปรแกรมวิเคราะห์ จะทำการกำหนดที่ถูกลมหน้าด้านขวาเป็นแบบ Frictionless Support เนื่องจากถูกลมที่เพลานำสามารถที่จะเคลื่อนตัวได้ และกำหนดที่ถูกลมหลังด้านซ้ายเป็นแบบ Fixed Support ดังแสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 แสดงการกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการบิด

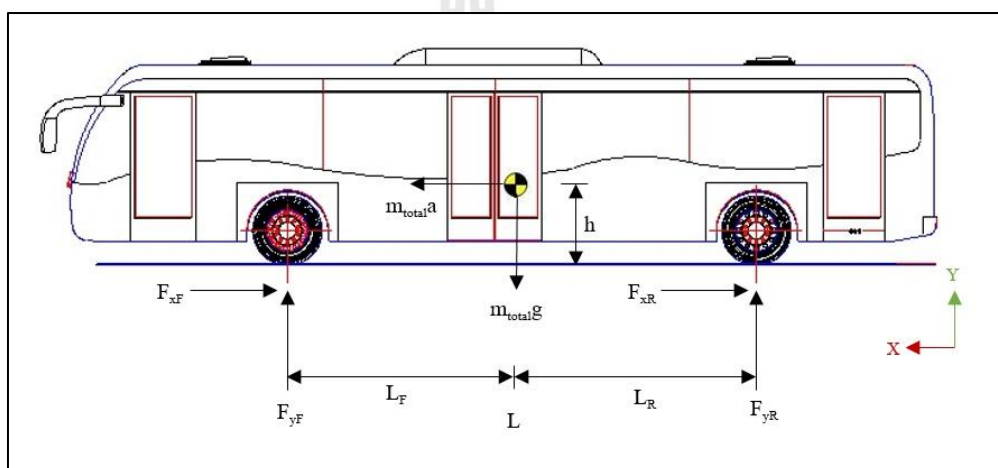
3). กรณีการเบรก

ในขณะที่รถโดยสารเกิดความเร่งและทำการชะลอตัวอย่างรวดเร็ว ภาระกรรมที่เกิดขึ้นจากมวลบรรทุกต่าง ๆ จะอยู่ถ่ายโอนน้ำหนักมาทางด้านหน้าของรถ ซึ่งส่งผลต่อพฤติกรรมของโครงสร้าง ดังนั้นในกรณีนี้จะต้องถูกนำมาพิจารณาในการออกแบบ โดยที่ความเร็วของรถโดยสารเท่ากับ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้ระยะเวลาในการชะลอตัวจนรถโดยสารหยุดนิ่งเท่ากับ 4 วินาที

สามารถหาค่าความเร่งได้จากสมการที่ (3.7) จะได้ความเร่งเท่ากับ 3.47 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ซึ่งการกำหนดภาระกรรมต่าง ๆ จะแสดงดังรูปที่ 3.33

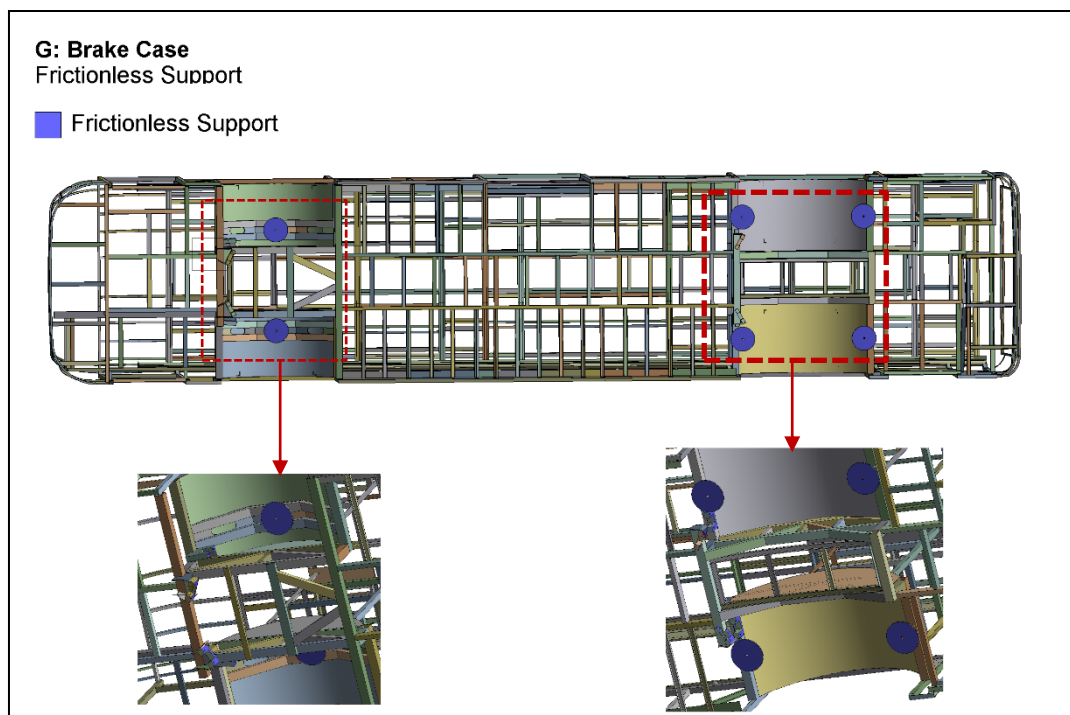
$$\bar{a} = \frac{\Delta \bar{v}}{\Delta t} \quad (3.7)$$

โดยที่ a คือ ความเร่ง (m/s^2)
 Δv คือ ความเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป (m/s)
 Δt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป (s)



รูปที่ 3.33 แสดงการกำหนดภาระกรรมในกรณีการเบรก

การกำหนดจุดยึดของโครงสร้างในกรณีการเบรกในโปรแกรมวิเคราะห์ จะทำการกำหนดที่ตุ้มลมหน้า ตุ้มลมหลัง และจุดยึดแขนเพลาคือเป็นแบบ Frictionless support ทั้งหมด 16 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.34 เนื่องจากการเบรกของรถโดยสารจะทำให้ตุ้มลมที่เพลาคู่หน้าและเพลาคู่หลัง รวมถึงจุดยึดแขนเพลาสองสามารถเคลื่อนตัวได้

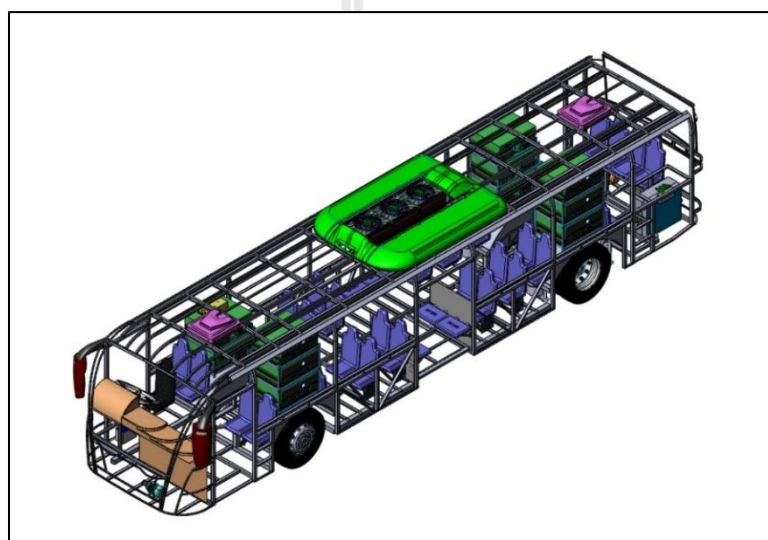


รูปที่ 3.34 แสดงการกำหนดจุดยึดของ โครงสร้างในกรณีการเบรก

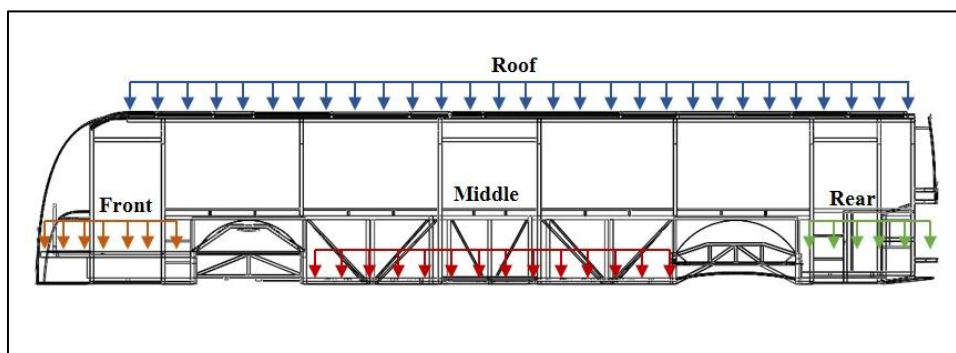
สำหรับการกำหนดภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าในการวิเคราะห์นั้น เป็นภาระกรรมที่กระทำกับ โครงสร้างจริง ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ ผู้โดยสาร เครื่องปรับอากาศ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.35 ซึ่งจะกำหนดให้เป็นภาระกรรมแบบกระจาย (Distribution Load) โดยแบ่งภาระกรรมแบบกระจายหลักออกเป็น 5 ส่วน คือ ภาระกรรมแบบกระจายด้านหน้า (Front Area) ภาระกรรมแบบกระจายตรงกลาง (Middle Area) ภาระกรรมแบบกระจายด้านหลัง (Rear Area) ภาระกรรมแบบกระจายบนหลังคา (Roof Area) และภาระกรรมแบบกระจายจากน้ำหนักแบตเตอรี่ (Battery Pack) ซึ่งมีภาระกรรมแบบกระจายที่กระทำในแต่ละพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 3.36 โดยภาระกรรมที่เกิดจากน้ำหนักแบตเตอรี่จะมีการเปลี่ยนตำแหน่งของภาระกรรมแบบกระจายตามตำแหน่งการออกแบบที่ผู้วิจัยได้นำเสนอในหัวข้อที่ 3.4.2

ตารางที่ 3.3 ภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า

Area	Load (kg)	Load (N)
Front area	545	5,348
Middle area	2,739	26,870
Rear area	907	8,898
Roof area	315	3,090
Battery pack	2,530	24,819
<u>Sum</u>	7,036	69,025



รูปที่ 3.35 แสดงภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า



รูปที่ 3.36 ภาระกรรมแบบกระจายที่กระทำในแต่ละพื้นที่

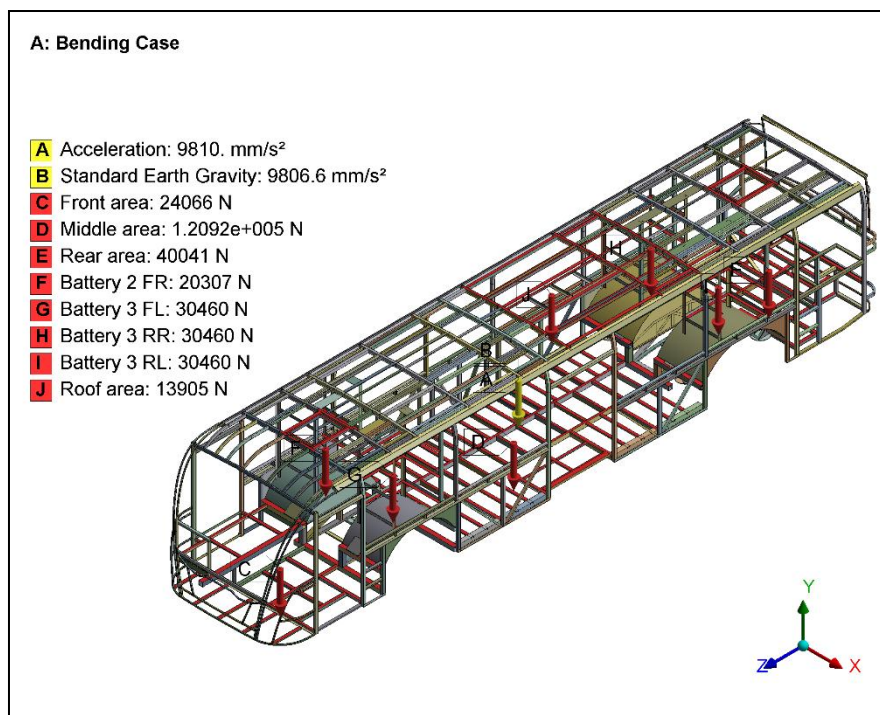
แต่ในความเป็นจริงนั้นการคำนวณภาระกรรมสำหรับการออกแบบ ภาระกรรมแบบพลศาสตร์ที่กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารมักจะถูกแทนด้วย “Factored static loading” ซึ่งจะสามารถคำนวณภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารได้ดังสมการที่ (3.8) ซึ่งค่า Dynamic Load Factor ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 3 และค่า Safety Factor มีค่าเท่ากับ 1.5 โดยค่า Dynamic Load Factor และค่า Safety factor ที่เลือกใช้นำมาจากตารางที่ 2.1

$$\text{Equivalent load} = (\text{static load}) \times (\text{dynamic load factor}) \times (\text{safety factor}) \quad (3.8)$$

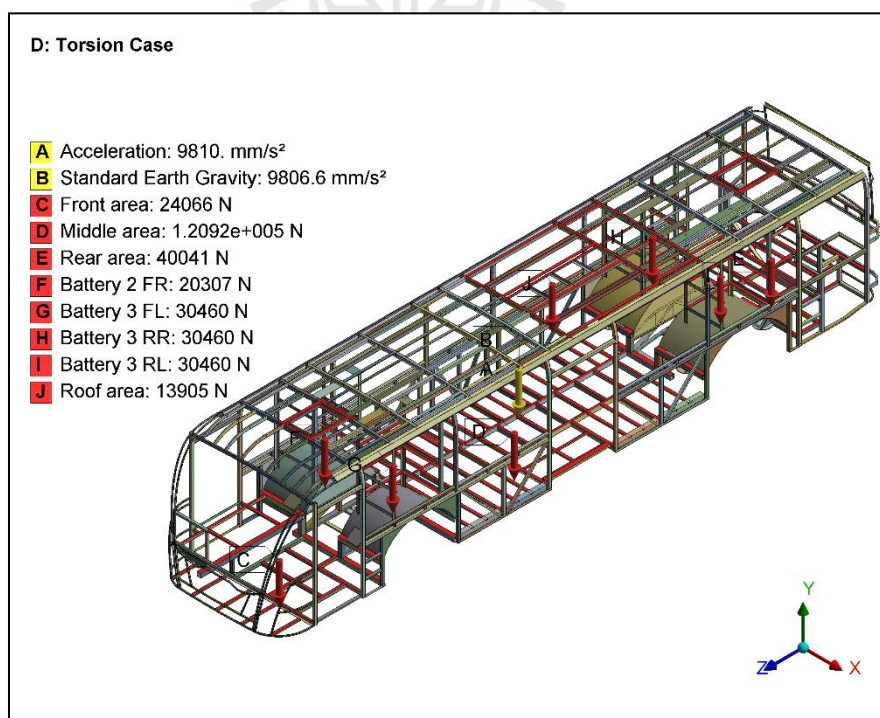
ตารางที่ 3.4 ภาระกรรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า

Area	Load (N)
Front area	24,066
Middle area	120,915
Rear area	40,041
Roof area	13,905
Battery pack	111,685
<u>Sum</u>	310,612

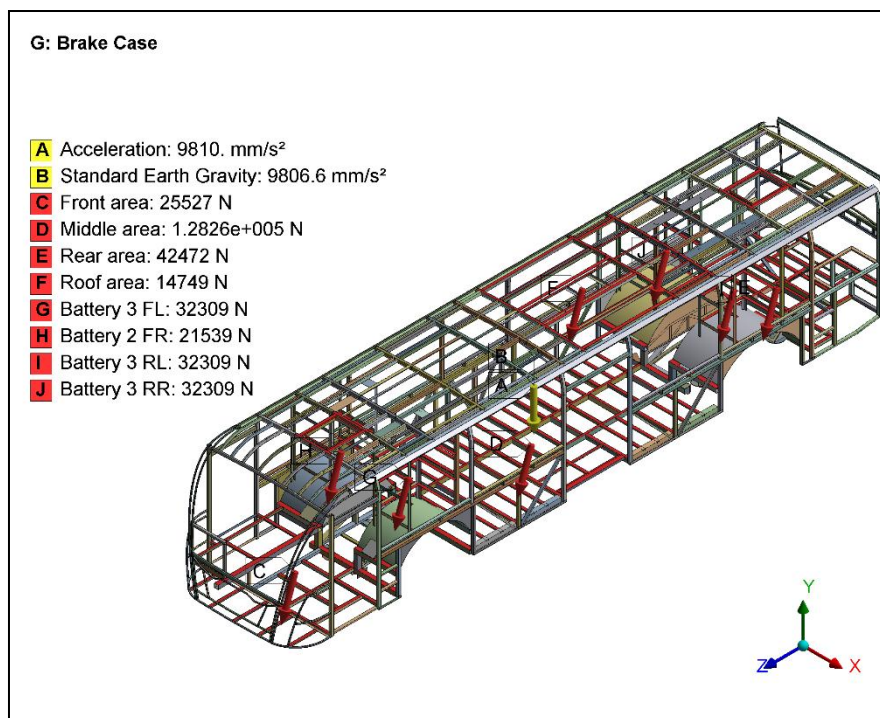
สำหรับการกำหนดพื้นที่รับภาระกรรมในโปรแกรมวิเคราะห์นั้น จะสามารถเลือกพื้นที่รับภาระกรรมต่าง ๆ ได้ตามที่เงื่อนไขกำหนดดังแสดงในรูปที่ 3.37 ถึงรูปที่ 3.39 จะมีความสะดวกและรวดเร็วกว่าการคำนวณภาระกรรมตามที่ได้กล่าวไปในหัวข้อ 3.4.6.1 – 3.4.6.3 ซึ่งจะทำให้การคำนวณภาระกรรมที่กระทำกับโครงสร้างให้เป็นภาระกรรมที่กระทำที่ล้อแต่ละล้อของรถโดยสาร เนื่องจากโปรแกรมวิเคราะห์นั้นจะทำการคำนวณภาระกรรมในแต่ละพื้นที่และสามารถคำนวณทิศทางที่กระทำได้



รูปที่ 3.37 แสดงการกำหนดภาระกรรมและทิศทางที่กระทำกรณีการคัตใน โปรแกรมวิเคราะห์



รูปที่ 3.38 แสดงการกำหนดภาระกรรมและทิศทางที่กระทำกรณีการบิดใน โปรแกรมวิเคราะห์



รูปที่ 3.39 แสดงการกำหนดภาระกรรมและทิศทางที่กระทำกรณีการเบรกในโปรแกรมวิเคราะห์



บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 กล่าวนำ

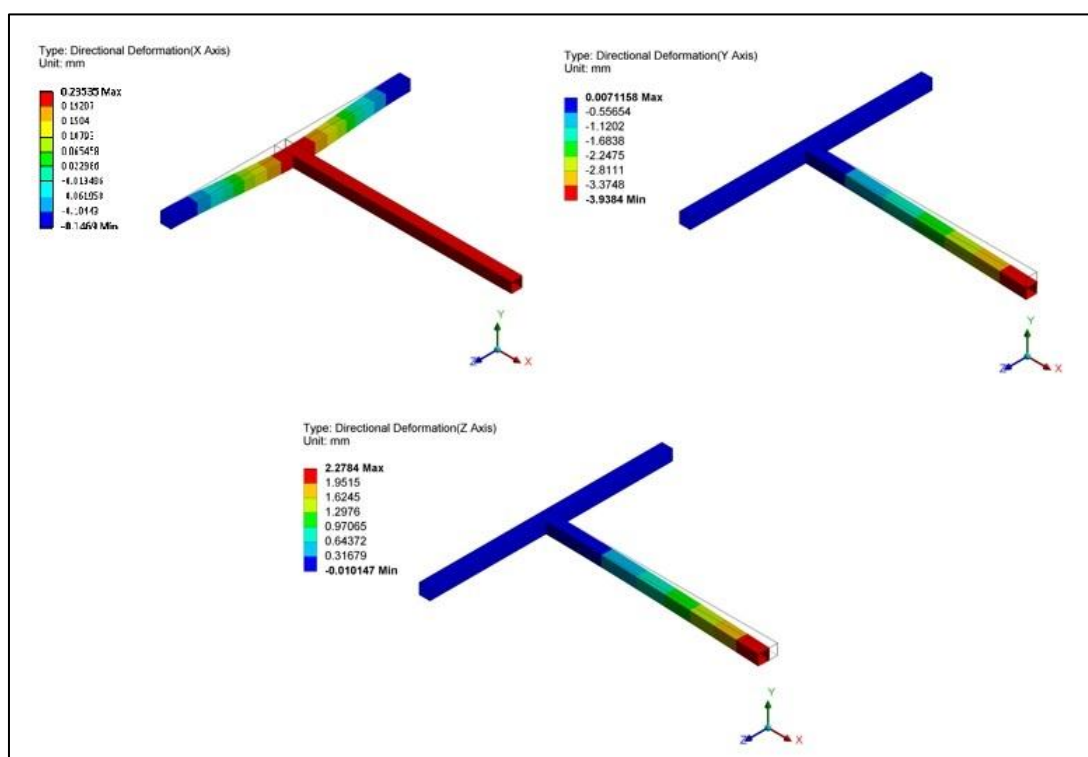
ในบทนี้ผู้วิจัยจะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นการนำเสนอการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 14.5 ด้วยการทดสอบการเสถียรภาพจากการตัดและการบิดของชิ้นงานแบบ T-Joint และการทดสอบค่าความเค้นจากการตัด สำหรับในส่วนที่สองจะเป็นการนำเสนอผลการวิจัยเรื่องการวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการวางแบบเตอรีต่อความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้าที่ได้ดำเนินงานตามบทที่ 3 ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะอยู่ในรูปของตัวเลขในแต่ละจุดต่อของเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำมาวิเคราะห์เป็นค่าความเครียดและค่าความเค้นที่เกิดขึ้นได้ โดยจะพิจารณาค่าความเครียดและค่าความเค้นของแบบจำลองตามทฤษฎีพลังงานการเปลี่ยนรูปสูงสุดหรือทฤษฎีความเสียหายอนมิสเชส เพื่อพิจารณาจุดที่โครงสร้างเกิดความเสียหายมากที่สุด ซึ่งจากการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของแถบชั้นสีและค่าเค้นที่เกิดขึ้น เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ผล จากนั้นจะนำข้อมูลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างมาพิจารณาเปรียบเทียบตำแหน่งของการวางแบบเตอรีที่ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างน้อยที่สุด

4.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการออกแบบการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และการสร้างแบบจำลอง T-Joint สำหรับการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้กล่าวมาในบทที่ 3 เมื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานจริงมาเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งจะทำให้การพิจารณาทั้งค่าระยะการเสถียรภาพของชิ้นงาน และค่าความเค้นสูงสุดตามทฤษฎีความเสียหายอนมิสเชส จะต้องมีผลลัพธ์ที่ได้ที่มีความสอดคล้องกัน จึงจะถือว่าโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิจัยนั้นมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยผลกระทบของตำแหน่งการวางแบบเตอรีต่อความแข็งแรงของรถโดยสารไฟฟ้าได้

4.2.1 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบระยะการเสถียรของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ระยะการเสถียรของชิ้นงานรูปแบบ T-Joint โดยการกำหนดภาระกรรมที่กระทำกับชิ้นงานตรงส่วนปลาย จะได้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นเชิงตัวเลขในแต่ละจุดต่อและแสดงเป็นแถบสีด้วยการไล่ระดับสีแบบสีรุ้ง ทำให้ง่ายต่อการพิจารณาระยะการเสถียร ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบจำลองพบว่าการเสถียรของชิ้นงานในแนวแกน X แกน Y และแกน Z จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.1

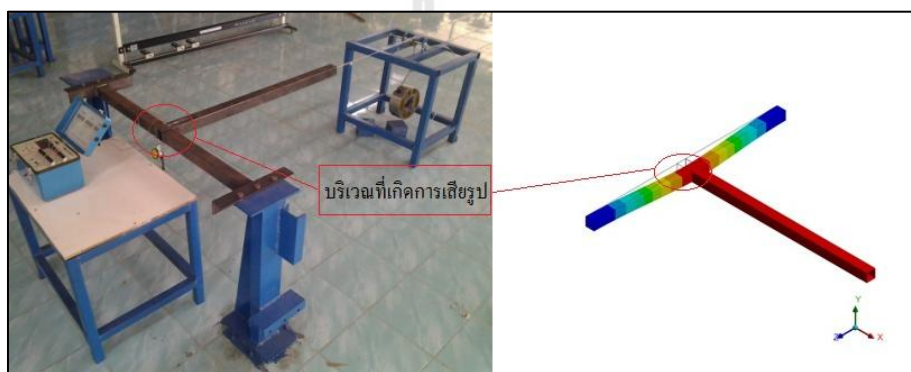


รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการเสถียรในแนวแกน X, Y และ Z ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ Solid

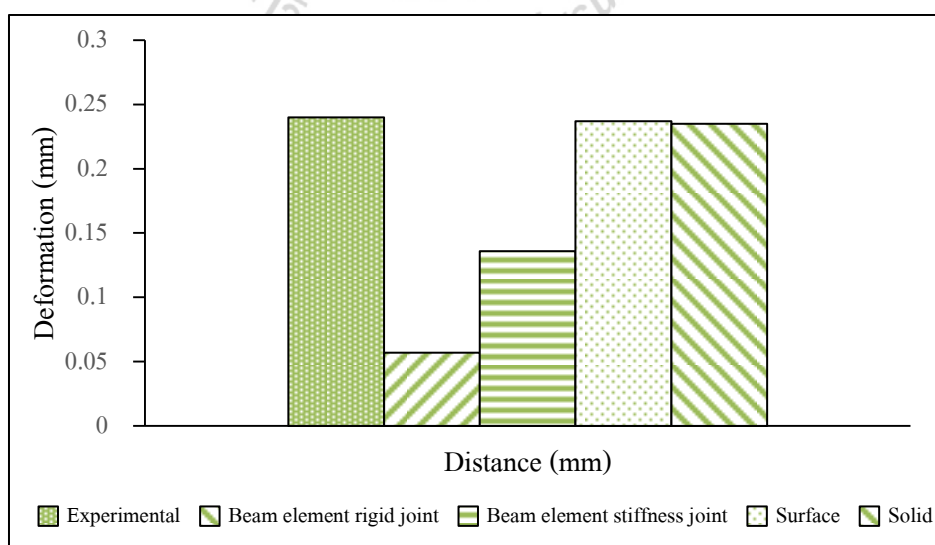
จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าเมื่อกำหนดภาระกรรมที่กระทำในแนวแกน X เท่ากับ 130 นิวตัน จุดที่เกิดการเสถียรมากที่สุดจะอยู่ที่จุดเชื่อมต่อของชิ้นงานตามแนวแกน X โดยแสดงเป็นแถบสีแดง เมื่อกำหนดภาระกรรมที่กระทำในแนวแกน Y เท่ากับ 130 นิวตัน ในทิศทาง -Y จะเห็นได้ว่าการเสถียรของชิ้นงานตรงส่วนปลายในทิศทาง -Y มากที่สุด และเมื่อกำหนดภาระกรรมที่กระทำในแนวแกน Z เท่ากับ 130 นิวตัน จะเกิดการเสถียรของชิ้นงานตรงส่วนปลายมากที่สุดเช่นกัน

4.2.2 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การทดสอบระยะการเสี้ยวรูปของชิ้นงาน

เมื่อทำการวิเคราะห์ระยะการเสี้ยวรูปของชิ้นงานแบบ T-Joint ทั้ง 4 การวิเคราะห์ ซึ่งประกอบด้วยวิเคราะห์แบบ Beam Element Rigid Joint, Beam Element Stiffness Joint, Surface และแบบ Solid เป็นที่เรียบร้อย จะนำผลการวิเคราะห์ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบระยะการเสี้ยวรูปของชิ้นงานจริง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะนำมาใช้งาน เมื่อนำผลที่ได้มาพล็อตกราฟจะได้กราฟเปรียบเทียบระยะการเสี้ยวรูปของชิ้นงานจากการทดสอบจริงกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ซึ่งจะเป็นกราฟเปรียบเทียบระยะการเสี้ยวรูปจากภาระการคัดในแต่ละแนวแกน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึงรูปที่ 4.5

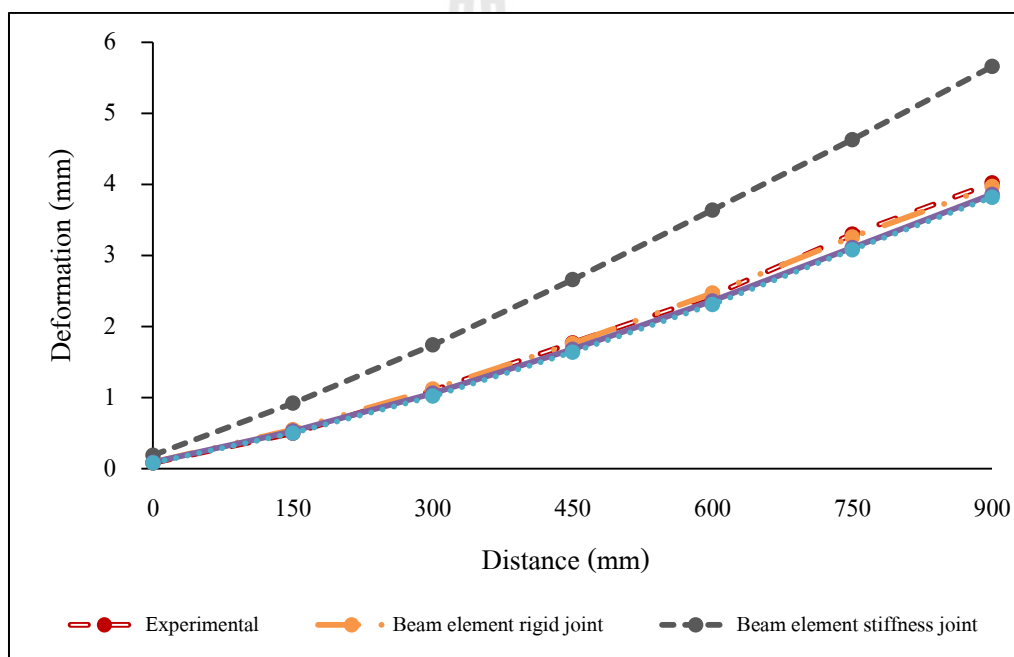


รูปที่ 4.2 แสดงเปรียบเทียบลักษณะการเสี้ยวรูปของชิ้นงานทดสอบในแนวแกน X



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟเปรียบเทียบระยะการเสี้ยวรูปของชิ้นงานในแนวแกน X

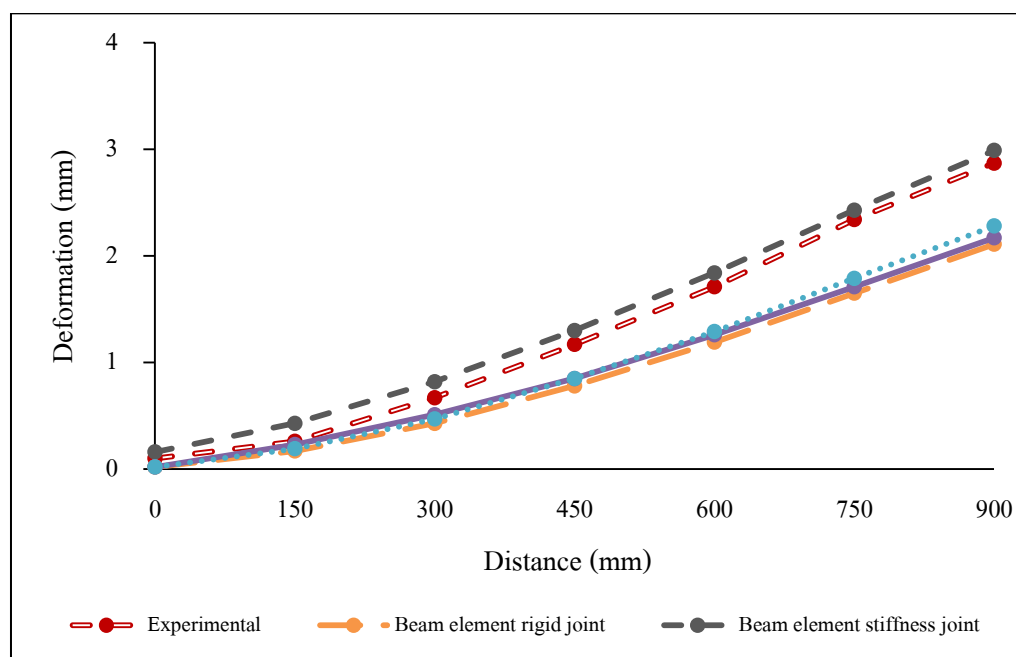
จากรูปที่ 4.3 เป็นการเปรียบเทียบระยะการเสยรูปของชิ้นงานในแนวแกน X ซึ่งพบว่าค่าระยะการเสยรูปของชิ้นงานจากการวิเคราะห์แบบ Beam Element Rigid Joint ด้วยโปรแกรมมีความคลาดเคลื่อนกับค่าที่ได้จากการทดสอบจริงพอสมควร โดยที่ระยะการเสยรูปจากการทดสอบจริงมีค่าเท่ากับ 0.24 มิลลิเมตร สำหรับการวิเคราะห์แบบ Surface และแบบ Solid นั้น จะมีระยะการเสยรูปใกล้เคียงกับการทดสอบจริงซึ่งมีระยะการเสยรูปเท่ากับ 0.237 มิลลิเมตร และ 0.235 มิลลิเมตร ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ส่วนการวิเคราะห์แบบ Beam Element Stiffness Joint จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน 43% เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของการเสยรูปที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมเทียบกับการทดสอบจริง จะมีแนวโน้มการเสยรูปที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟเปรียบเทียบระยะการเสยรูปของชิ้นงานในแนวแกน Y

จากกราฟเปรียบเทียบระยะการเสยรูปของชิ้นงานในแนวแกน Y ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยทำการวัดค่าระยะการเสยรูปของชิ้นงานที่ตำแหน่งความยาวเท่ากับ 0, 150, 300, 450, 600, 750 และ 900 มิลลิเมตร ดังที่กล่าวมาข้างต้นในหัวข้อที่ 3.3.2 จะพบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมแบบ Beam Element Rigid Joint, Surface และแบบ Solid มีแนวโน้มของระยะการเสยรูปที่ใกล้เคียงกับค่าระยะการเสยรูปที่ได้จากการทดสอบ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5%

แต่การวิเคราะห์แบบ Beam Element Stiffness Joint นั้น จะมีแนวโน้มของระยะการเสีรูปที่สูงกว่าการทดสอบจริง ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 41%



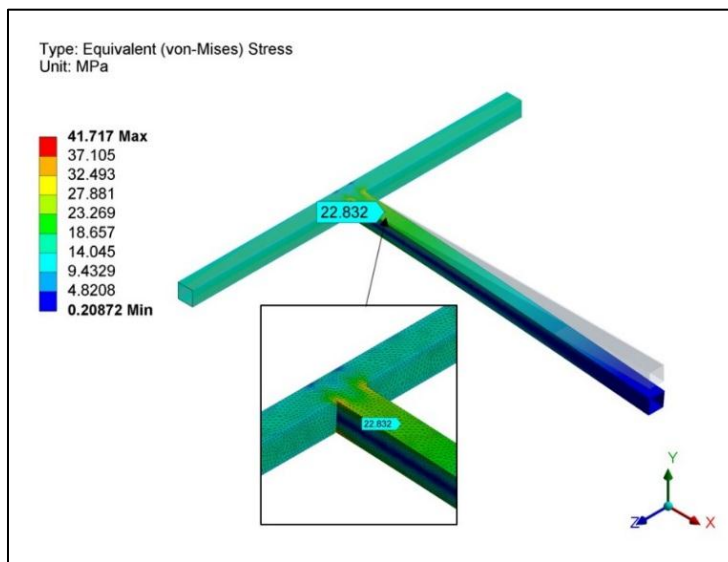
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบระยะการเสีรูปของชิ้นงานในแนวแกน Z

สำหรับการเปรียบเทียบระยะการเสีรูปของชิ้นงานในแนวแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 4.5 จะพบว่า แนวโน้มของระยะการเสีรูปในช่วงตำแหน่งที่ 0 ถึง 150 มิลลิเมตร ระยะการเสีรูปจากการวิเคราะห์แบบ Beam Element Rigid Joint, Surface และแบบ Solid จะมีแนวโน้มของการเสีรูปที่ใกล้เคียงจากการทดสอบจริง จนมาถึงช่วงตำแหน่งที่ 300 ถึง 900 มิลลิเมตร แนวโน้มของระยะการเสีรูปจากการทดสอบจริงจะมีค่าสูงขึ้น ใกล้เคียงกับระยะการเสีรูปจากการวิเคราะห์แบบ Beam Element Stiffness Joint ซึ่งเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะการเสีรูปจากการวิเคราะห์แบบ Beam Element Rigid Joint, Surface และแบบ Solid จะอยู่ในช่วง 20% ถึง 26%

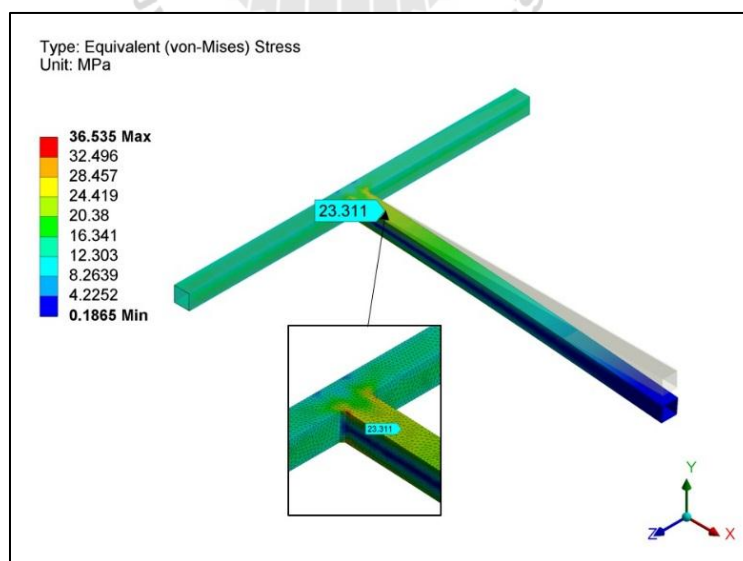
4.2.3 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทดสอบค่าความเค้นของชิ้นงาน

สำหรับผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม โดยการเปรียบเทียบค่าความเค้นที่เกิดขึ้น จะได้ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นเชิงตัวเลขในแต่ละจุดต่อ ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถหาค่าความเค้นได้จากการโปรแกรมโดยตรง แตกต่างจากการทดสอบจริงที่จะต้องหาค่าความเครียด แล้วนำค่าความเครียดที่ได้มาคำนวณเป็นค่าความเค้น เมื่อนำผลการวิเคราะห์มาพิจารณาค่าความเค้นอนนิสเชส จะได้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นแล้วทำการวัดค่า

ความเค้นที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นจุดที่ทำการติดตั้งเกจวัดความเครียด (Strain Gauge) ในการทดสอบจริง โดยการวิเคราะห์แบบจำลองจะทำการวิเคราะห์ 2 แบบ คือ การวิเคราะห์แบบ Solid และการวิเคราะห์แบบ Solid Welding ที่จะมีการใส่รอยเชื่อมของชิ้นงานในแบบจำลองด้วย ซึ่งจะได้ค่าความเค้นดังแสดงในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7 ตามลำดับ



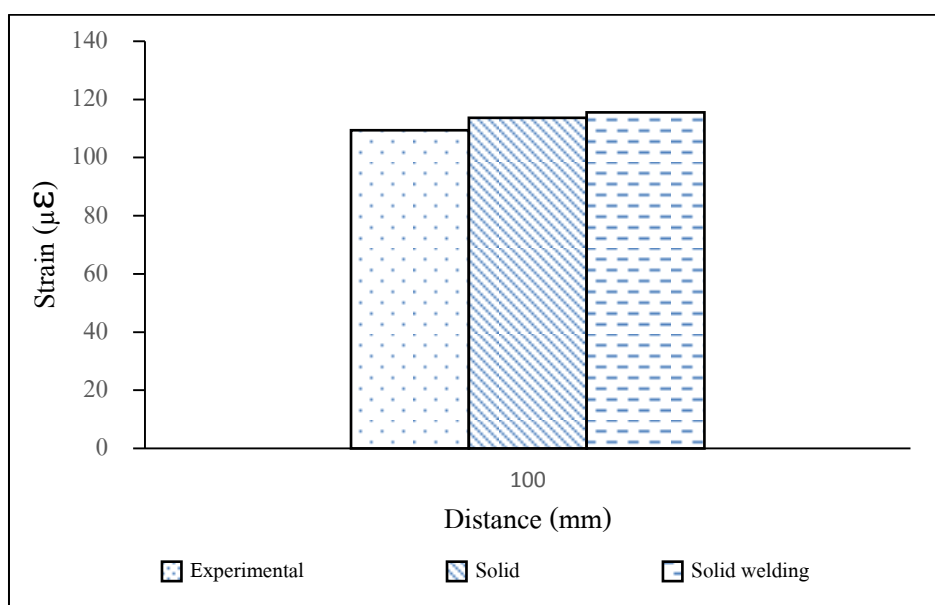
รูปที่ 4.6 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซอร์ของชิ้นงานจากการวิเคราะห์แบบ Solid



รูปที่ 4.7 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซอร์ของชิ้นงานจากการวิเคราะห์แบบ Solid Welding

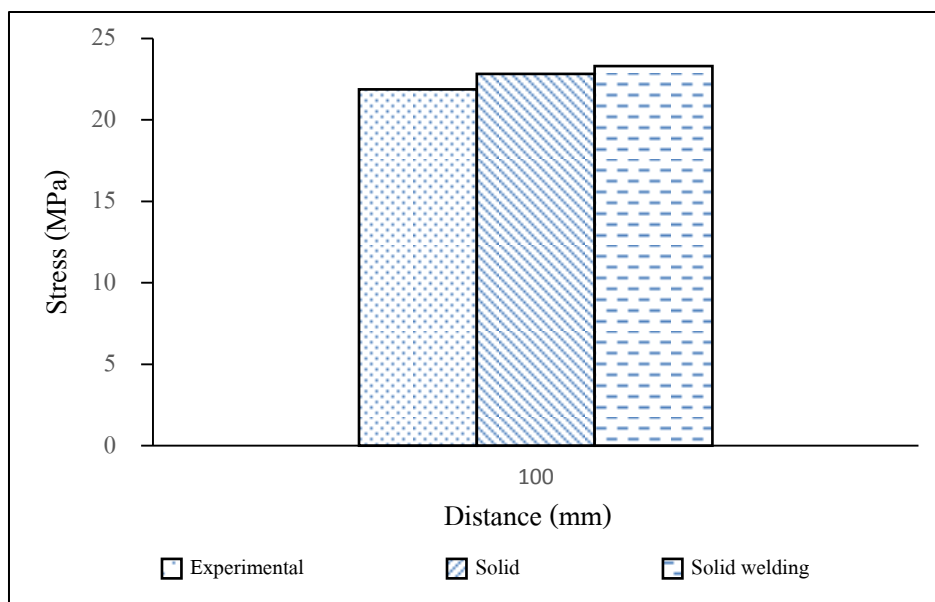
4.2.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นของชิ้นงาน

การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน จะทำการเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบจริงในหัวข้อที่ 3.3.2 ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจริงจะเป็นค่าความเครียด จากนั้นจะนำค่าความเครียดที่ได้มาคำนวณเป็นค่าความเค้น ดังนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลทั้งความเครียดและความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความเครียดของชิ้นงานที่ระยะ 100 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.8 ค่าความเครียดที่ได้จากการทดสอบจริงที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร จะมีค่าความเครียดเท่ากับ 109.42 $\mu\epsilon$ สำหรับค่าความเครียดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการวิเคราะห์แบบ Solid และ Solid Welding จะมีค่าความเครียดที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร เท่ากับ 113.74 $\mu\epsilon$ และ 115.56 $\mu\epsilon$ ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริงเพียงเล็กน้อย มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 6%



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของชิ้นงานที่ระยะ 100 มิลลิเมตร

เมื่อนำค่าความเครียดมาคำนวณหาความเค้นจากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด แล้วนำมาพล็อตกราฟจะได้กราฟเปรียบเทียบค่าความเค้นของชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งพบว่าค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบจริงที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร จะมีค่าความเค้นเท่ากับ 21.88 MPa และค่าความเค้นที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยการวิเคราะห์แบบ Solid และ Solid welding จะมีค่าความเค้นที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตร เท่ากับ 22.83 MPa และ 23.31 MPa ตามลำดับ ซึ่งถือว่ามีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบจริงเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกันกับค่าความเครียด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 6%

4.2.5 พิจารณาผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการเปรียบเทียบดังที่กล่าวมาข้างต้น ผลการวิเคราะห์ระยะการเสียรูปของชิ้นงานนั้น ถึงแม้จะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อย แต่เป็นค่าที่ยอมรับได้แบบจำลองชิ้นงานนั้นมีพฤติกรรมการเสียรูปที่สอดคล้องกับการทดสอบจริง เมื่อตรวจสอบหาสาเหตุของข้อผิดพลาดระหว่างการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมกับการทดสอบจริง พบว่าเกิดจากการสร้างชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ เนื่องจากวัสดุเหล็กกล่องมีความหนาเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการเชื่อมต่อชิ้นงานเข้าด้วยกันด้วยการเชื่อมจากเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ทำให้ตัวชิ้นงานเกิดการเสียรูป ไม่ได้แนวระนาบ จึงทำให้การวัดค่าเกิดความคลาดเคลื่อนได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สำหรับการทดสอบค่าความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน เมื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จะพบว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกัน สามารถนำโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ไปใช้ในการวิเคราะห์ความแข็งแรง

ของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำได้ ซึ่งถือว่าโปรแกรมนั้นมีความถูกต้องเป็นที่ยอมรับได้

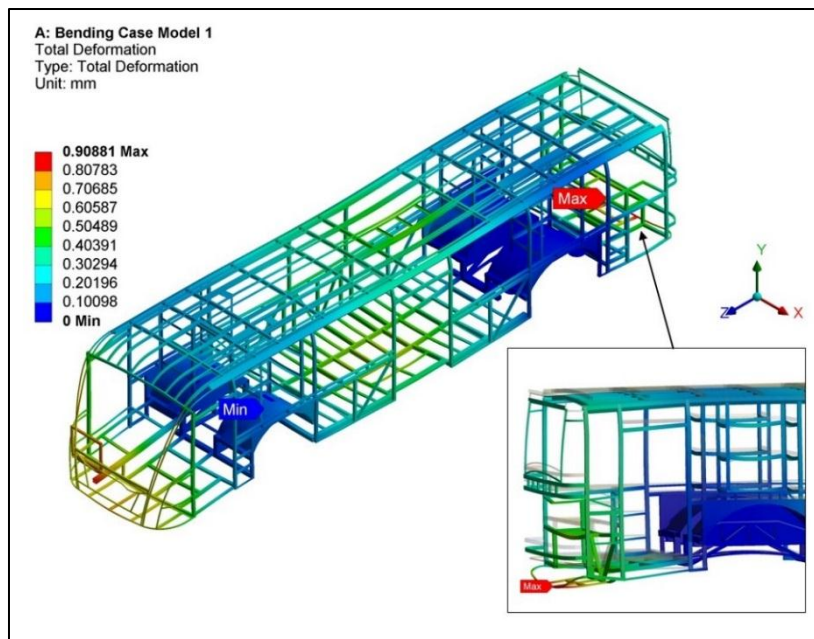
4.3 ผลการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขานต่ำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ภายใต้เงื่อนไขและข้อกำหนดในการวิเคราะห์ในกรณีการตัด การบิด และการเบรก ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.6 ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปของตัวเลขที่เป็นค่าการเคลื่อนที่ของจุดต่อนั้น ๆ และยังมี การแสดงแถบชั้นสีของการวิเคราะห์เพื่อให้สามารถเข้าใจในลักษณะของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้ง่าย โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วยค่าความเค้น ความเครียด และระยะการเสียรูปของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งจะมีรายละเอียดของผลการวิเคราะห์ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่แต่ละรูปแบบดังต่อไปนี้

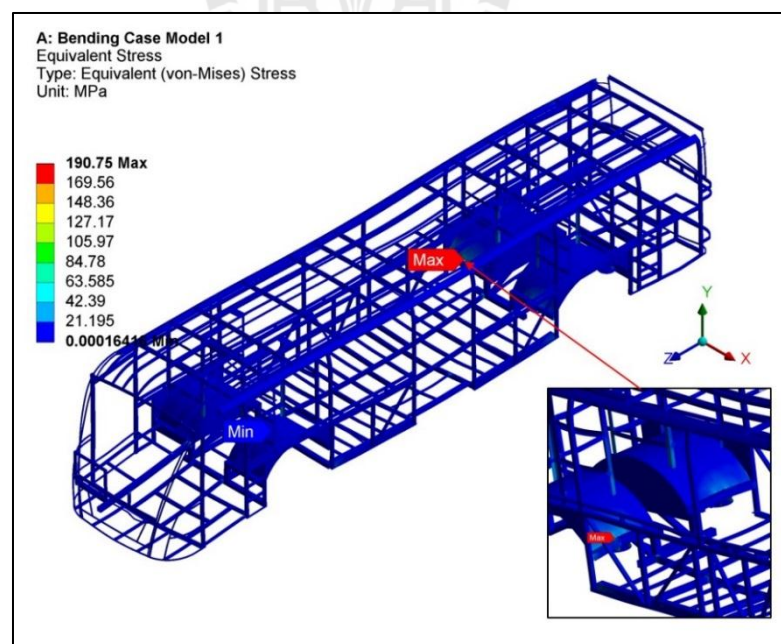
4.3.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 1

ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 1 นั้น จะนำแบตเตอรี่ทั้งหมด 11 ชุด ติดตั้งที่ตำแหน่งบนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลัง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1). ผลการวิเคราะห์ในกรณีการตัดของโครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง พบว่าเมื่อรถโดยสารไฟฟ้าหยุดนิ่งบนพื้นเรียบ จะเกิดภาระกรรมจากมวลต่าง ๆ กระทำกับโครงสร้างรถโดยสารด้วยความเร่งโน้มถ่วง ซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูปสูงสุดเท่ากับ 0.908 มิลลิเมตร ที่บริเวณด้านหลังดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบขับเคลื่อน ส่วนค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสารเท่ากับ 190.75 MPa จะเกิดขึ้นที่บริเวณล้อหลังด้านขวา ซึ่งเป็นตำแหน่งของชุดจับยึดถ่วงลมที่เชื่อมต่อกับโครงสร้างแชสซี ดังแสดงในรูปที่ 4.11

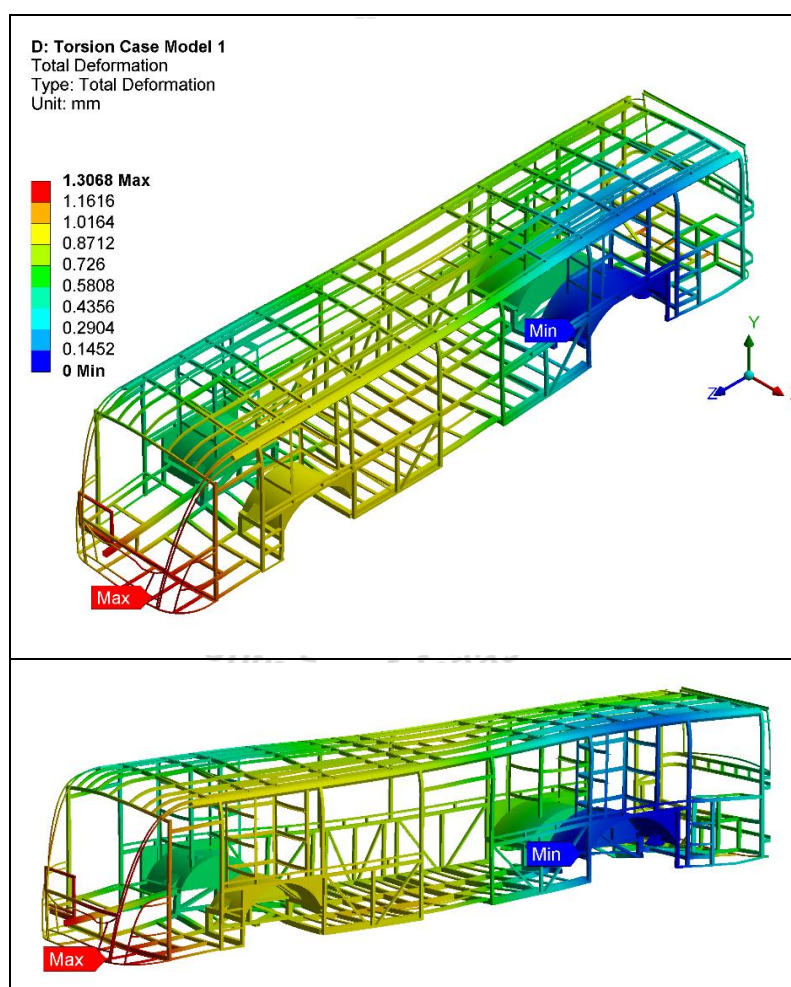


รูปที่ 4.10 แสดงระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1
กรณีการค้ำของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง

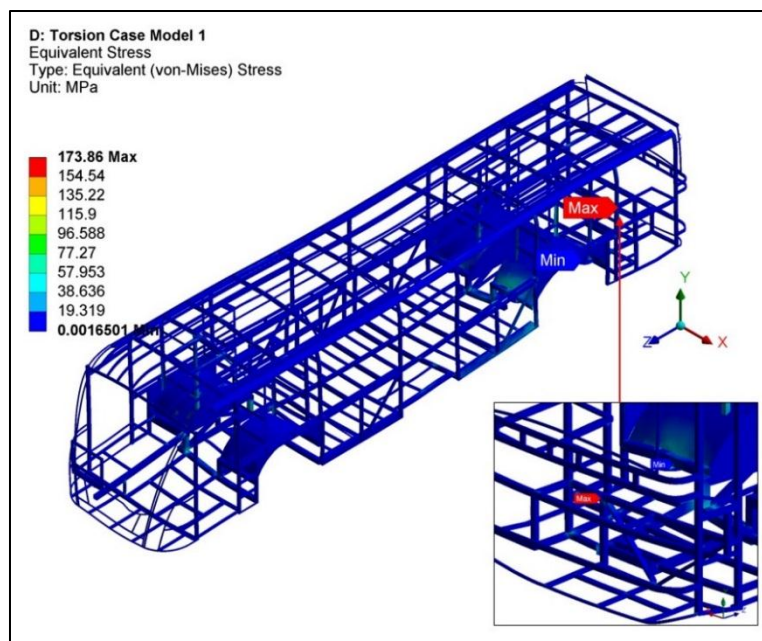


รูปที่ 4.11 แสดงค่าความเค้นวอนมิสซจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1
กรณีการค้ำของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง

2). ผลการวิเคราะห์ในกรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน พบว่าเมื่อรถโดยสารไฟฟ้าขับผ่านถนนที่มีสภาพพื้นผิวถนนที่ไม่เรียบ จะทำให้โครงสร้างของรถโดยสารไฟฟ้านั้นเกิดการบิดตัว ทำให้โครงสร้างเกิดการเสียรูปสูงสุดเท่ากับ 1.306 มิลลิเมตร ที่บริเวณด้านหน้าของโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ค่าความเค้นวอนมีสเตรสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 173.86 MPa บริเวณรอยต่อของโครงสร้างตัวถังที่ด้านหลัง ซึ่งเป็นที่ติดตั้งอุปกรณ์ระบบไฟต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

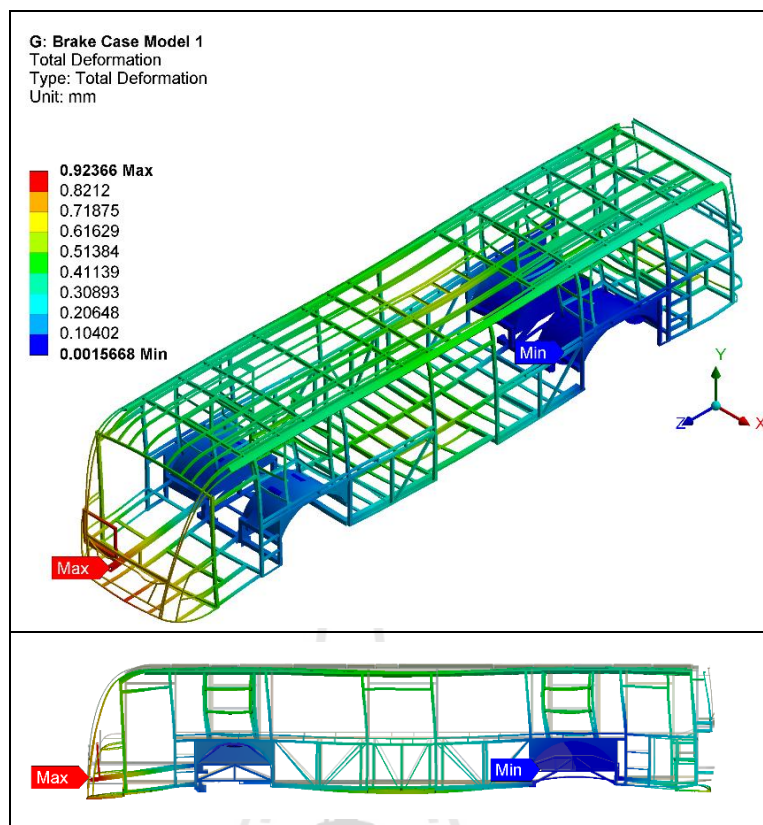


รูปที่ 4.12 แสดงระยการเสียรูปจากตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 1
กรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน

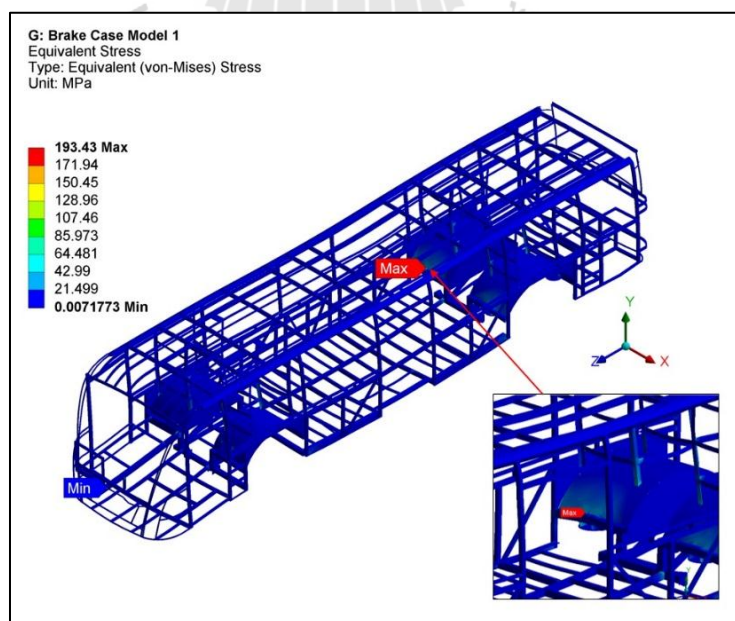


รูปที่ 4.13 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสจากตำแหน่งการวางเบดเตอร์ูปแบบที่ 1
กรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวฉนวน

3). ผลการวิเคราะห์ในการเบรก พบว่าเมื่อรถโดยสารไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เกิดการชะลอตัวอย่างรวดเร็วจนหยุดนิ่ง โดยใช้ระยะเวลา 4 วินาที ทำให้เกิดผลกระทบจากมวลต่าง ๆ กระทำด้วยความเร่งในแนวยาวของรถโดยสาร ทำให้เกิดการเสียรูปสูงสุดที่โครงสร้างเท่ากับ 0.923 มิลลิเมตร บริเวณด้านหน้าของโครงสร้าง มีลักษณะเป็นคาน ซึ่งเป็นที่ติดตั้งของชุดระบบบังคับล้อและตำแหน่งของพนักงานขับรถโดยสาร ลักษณะของการเสียรูปจะแสดงในรูปที่ 4.14 ส่วนค่าความเค้นวอนมิสเสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างเมื่อเกิดการเบรกมีค่าเท่ากับ 193.43 MPa บริเวณชุดจับยึดตุ้มลมที่ล้อหลังด้านขวาดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายกับแผ่นชุ่มล้อได้



รูปที่ 4.14 แสดงระยะการเสียรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณีการเบรก

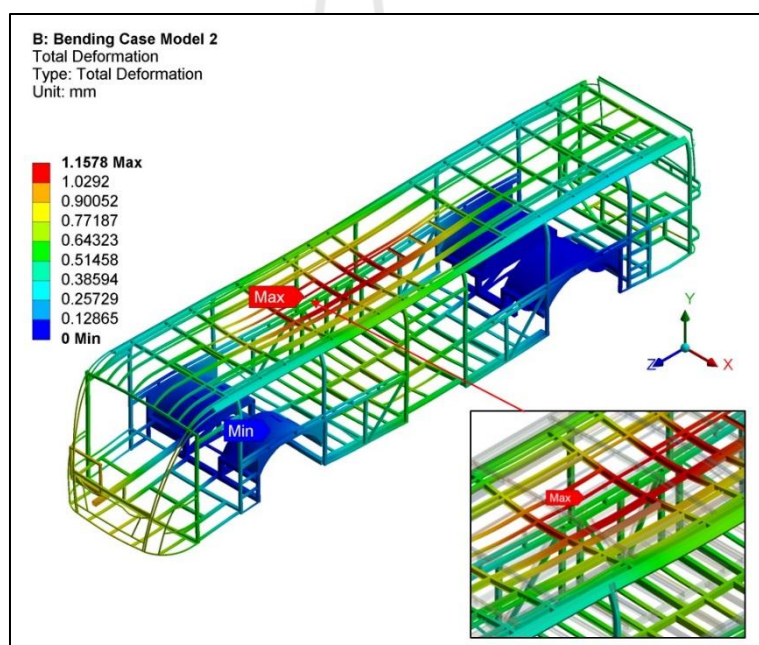


รูปที่ 4.15 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 1 กรณีการเบรก

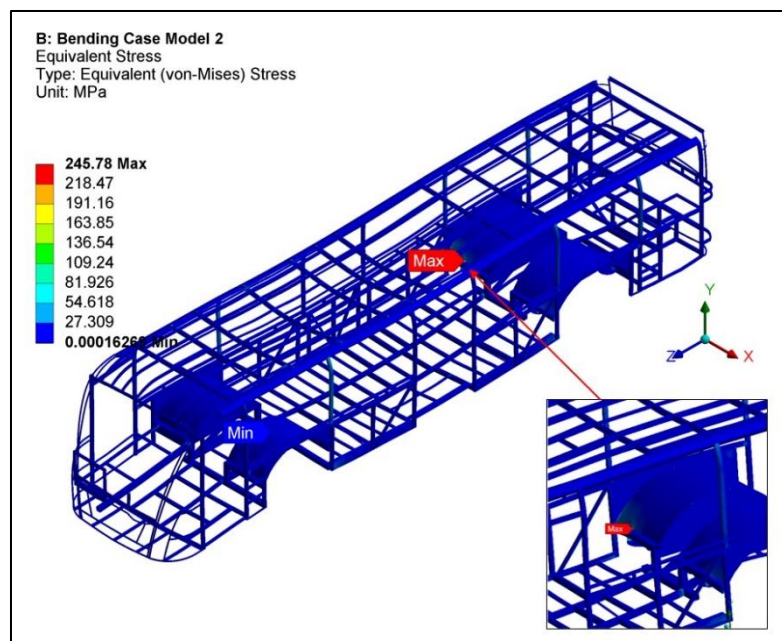
4.3.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 2

สำหรับตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 2 นั้น จะนำแบตเตอรี่ทั้งหมด 11 ชุด ติดตั้งที่ตำแหน่งบนหลังคา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1). ผลการวิเคราะห์ในกรณีการตัดของโครงสร้างอันเนื่องมาจากความแรงโน้มถ่วง พบว่าเมื่อเกิดการระดมการตัดจากมวลต่าง ๆ กระทำกับ โครงสร้างรถโดยสารด้วยความแรงโน้มถ่วง ซึ่งทำให้โครงสร้างเกิดการเสยรูปสูงสุดเท่ากับ 1.157 มิลลิเมตร ที่บริเวณโครงสร้างหลังคาดังแสดงในรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ติดตั้งแบตเตอรี่และเครื่องปรับอากาศ เนื่องจากโครงสร้างหลังคาจะไม่มีเสาหลักในช่วงตรงกลางของ โครงสร้าง ทำให้เกิดการเสยรูปได้ง่าย ส่วนค่าความเค้นวอนมีสเตรสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับ โครงสร้างรถโดยสารเท่ากับ 245.78 MPa จะเกิดขึ้นที่บริเวณล้อหลังด้านขวา ซึ่งเป็นตำแหน่งของชุดขับเคลื่อนที่เชื่อมต่อกับ โครงสร้างแชสซี ดังแสดงในรูปที่ 4.17

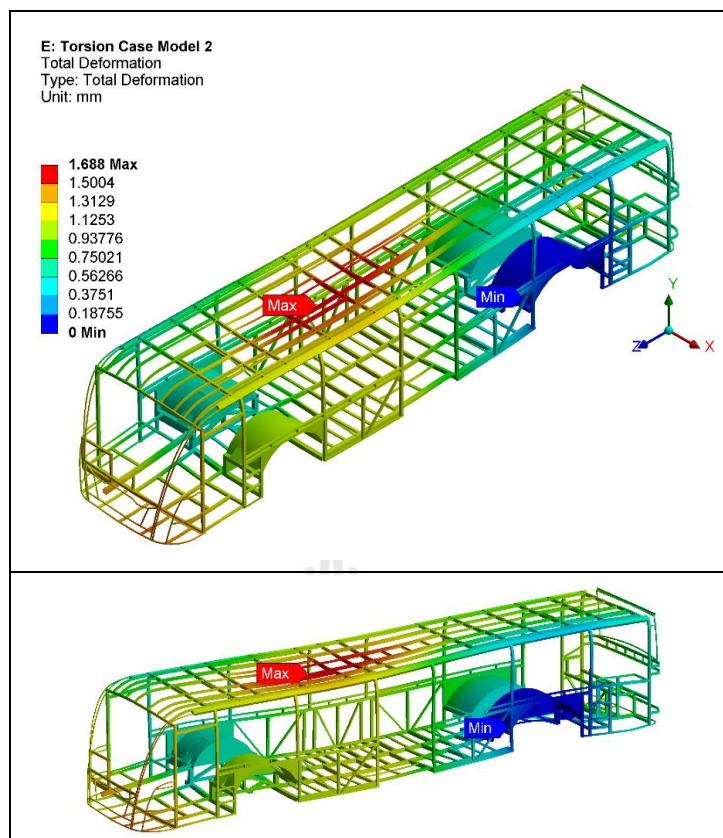


รูปที่ 4.16 แสดงระยะการเสยรูปจากตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 2 กรณีการตัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความแรงโน้มถ่วง

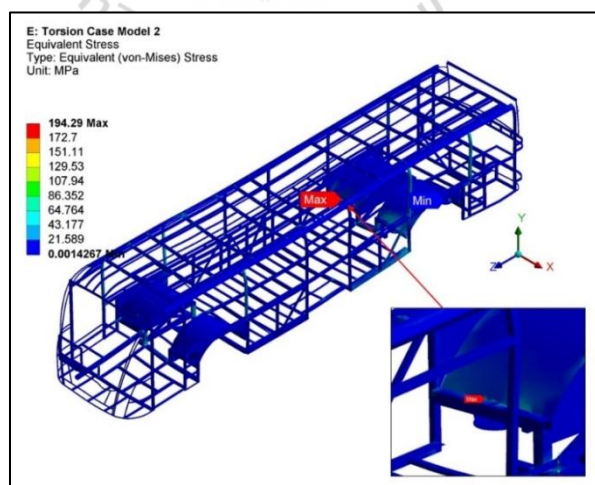


รูปที่ 4.17 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสสจากตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 2
 กรณีการคัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง

2). ผลการวิเคราะห์ในกรณีการบิดตัวของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน พบว่าระยะการเสีรูปของ โครงสร้างสูงสุดเมื่อเกิดการบิดตัวจากภาระกรรมของมวลต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 1.688 มิลลิเมตร เกิดขึ้นที่บริเวณหลังคา ในตำแหน่งที่ติดตั้งแบตเตอรี่และเครื่องปรับอากาศ ของรถโดยสารไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.18 สำหรับบริเวณที่เกิดความเค้นวอนมิสเสส สูงสุดที่สามารถ ก่อให้เกิดอันตรายต่อการเสียหายของ โครงสร้างได้ จะอยู่ที่บริเวณล้อหลังด้านขวา ในตำแหน่งของ ชุดจับยึดถูกลม ซึ่งมีค่าความเค้นวอนมิสเสสสูงสุดเท่ากับ 194.29 MPa ดังแสดงในรูปที่ 4.19

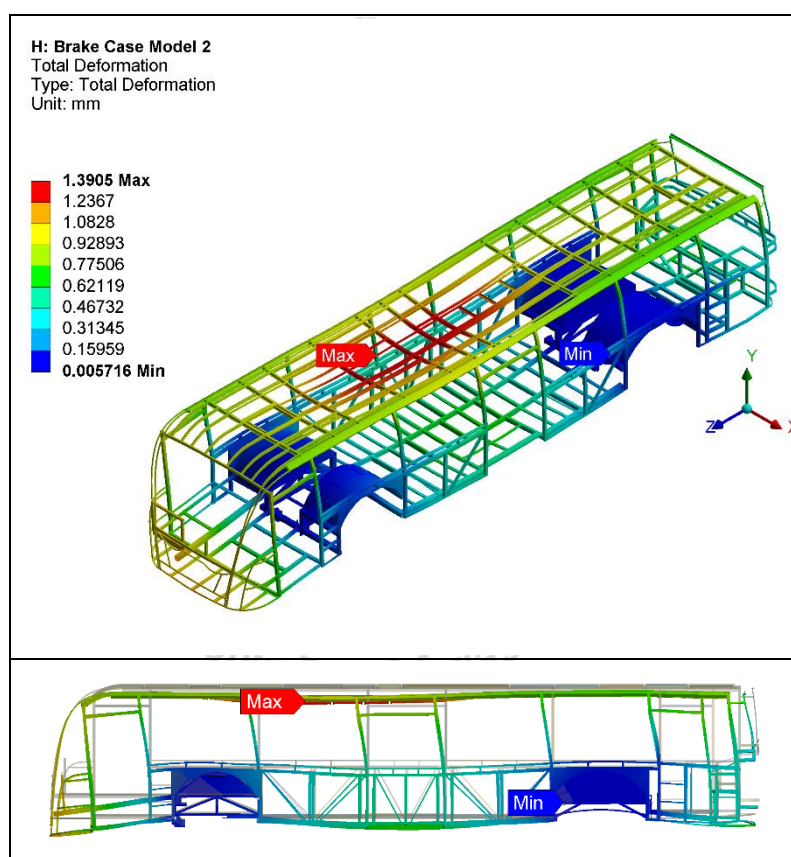


รูปที่ 4.18 แสดงระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2
กรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวดน

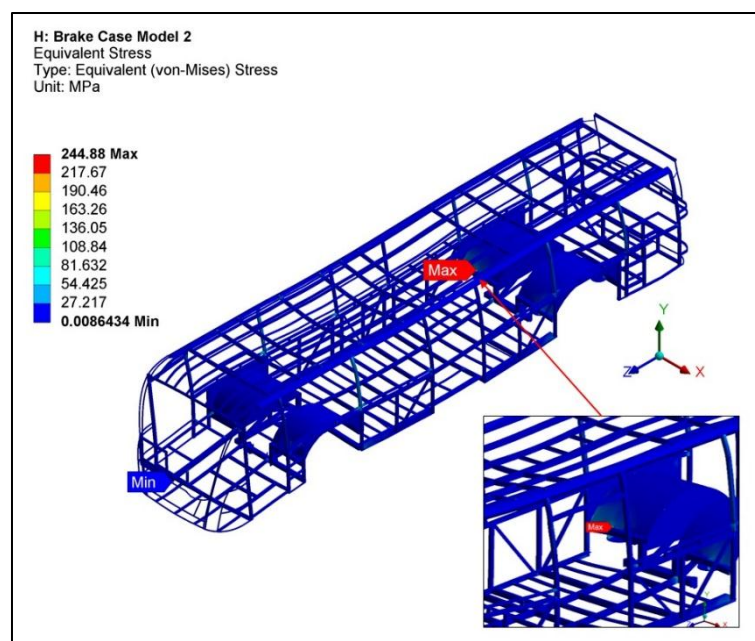


รูปที่ 4.19 แสดงค่าความเค้นวอนมิสซจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2
กรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวดน

3). ผลการวิเคราะห์ในการเบรก พบว่าเมื่อรถโดยสารไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เกิดการชะลอตัวอย่างรวดเร็วจนหยุดนิ่ง โดยใช้ระยะเวลา 4 วินาที มวลต่าง ๆ จากวัตถุที่บรรทุกบนรถโดยสาร จะก่อให้เกิดการกระทำได้ด้วยความเร่งในแนวยาวของรถโดยสาร ทำให้เกิดการเสียรูปสูงสุดที่โครงสร้างบริเวณตำแหน่งการติดตั้งเบตเตอร์และเครื่องปรับอากาศบนหลังคาของรถโดยสารไฟฟ้า มีระยะการเสียรูปสูงสุดเท่ากับ 1.390 มิลลิเมตร ส่วนค่าความเค้นวอนมีสเชสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง จะเกิดขึ้นที่จุดจับยึดดงลมที่ล้อทางด้านขวาดังเดิมดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งมีค่าความเค้นวอนมีสเชสสูงสุดเท่ากับ 244.88 MPa



รูปที่ 4.20 แสดงระยะการเสียรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการเบรก

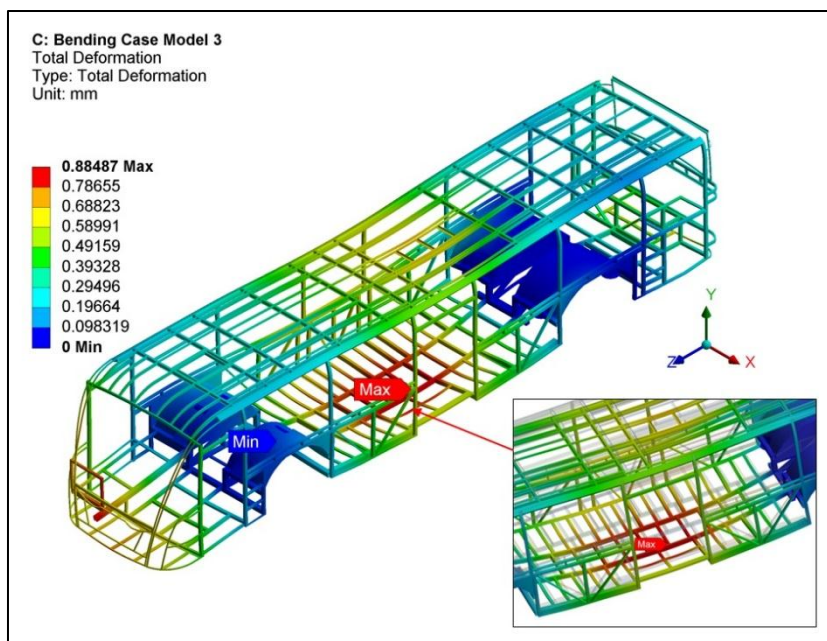


รูปที่ 4.21 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 2 กรณีการเบรก

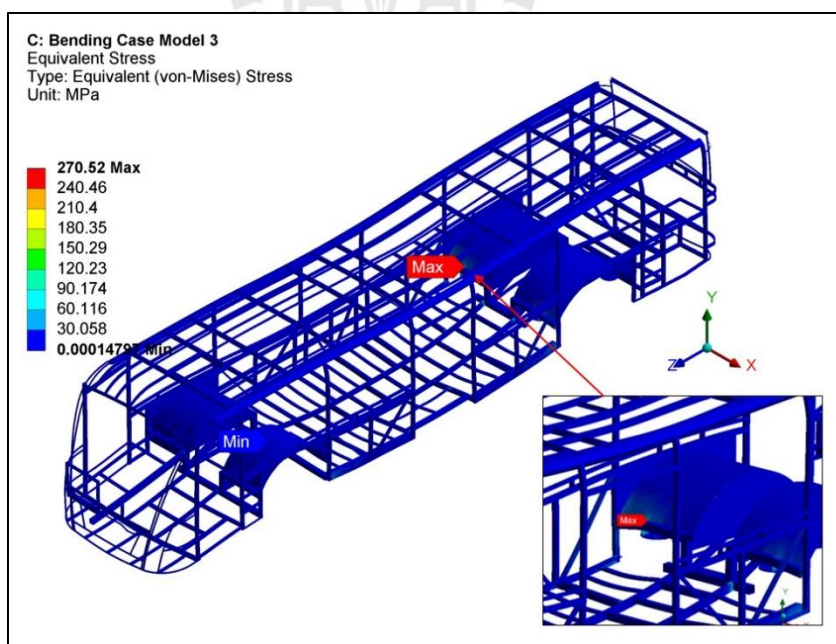
4.3.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3

สำหรับตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3 นั้น จะติดตั้งชุดเบตเตอร์ที่ตำแหน่งบนพื้นรถโดยสารจำนวน 8 ชุด ที่ตำแหน่งบนซุ้มล้อหน้าด้านขวา ซุ้มล้อหลังด้านซ้าย และซุ้มล้อหลังด้านขวาอย่างละ 1 ชุด ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

1). ผลการวิเคราะห์ในกรณีการตัดของโครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วงพบว่าระยะการเสียรูปสูงสุดของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าเมื่อเกิดผลกระทบจากภาระกรรมของมวลต่าง ๆ ของวัตถุที่กระทำจากความเร่งโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 0.884 มิลลิเมตร ซึ่งจุดที่เกิดการเสียรูปมากที่สุดจะเป็นบริเวณพื้นห้องโดยสาร เป็นตำแหน่งที่ติดตั้งเบตเตอร์และที่นั่งผู้โดยสาร ดังแสดงในรูปที่ 4.22 สำหรับค่าความเค้นวอนมิสเสสูงสุดที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างมีค่าเท่ากับ 270.52 MPa โดยจุดที่เกิดค่าความเค้นวอนมิสเสสูงสุดจะอยู่ที่บริเวณชุดจับยึดตุ้มล้อหลังด้านขวาดังแสดงในรูปที่ 4.23

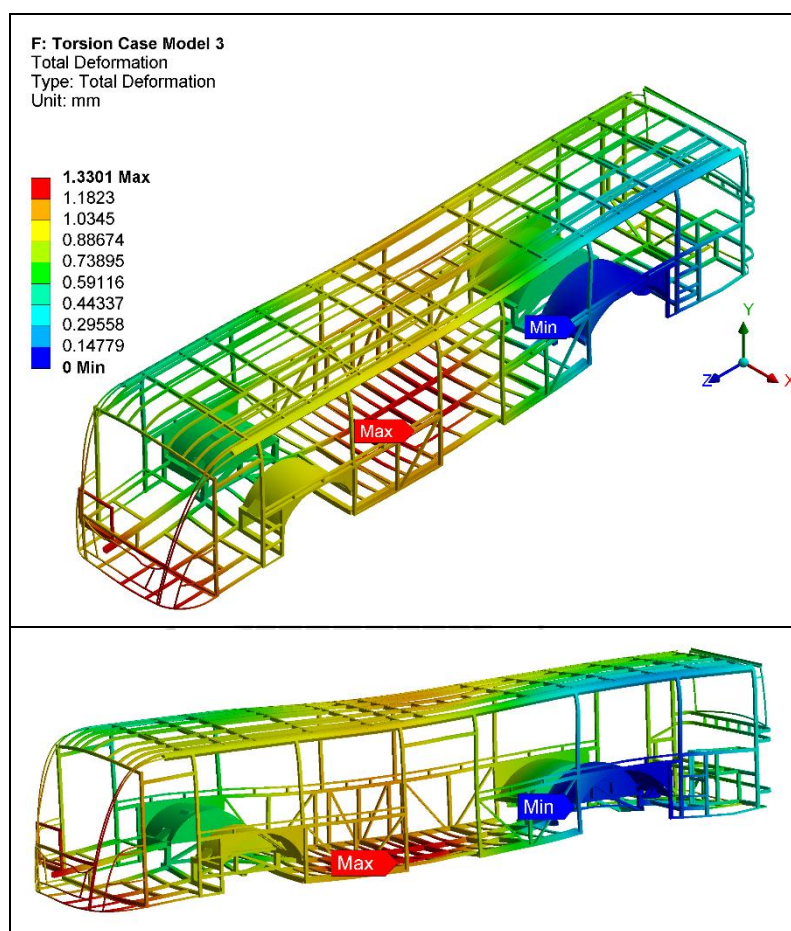


รูปที่ 4.22 แสดงระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางเบดเตอร์รูปแบบที่ 3
กรณีการคัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง

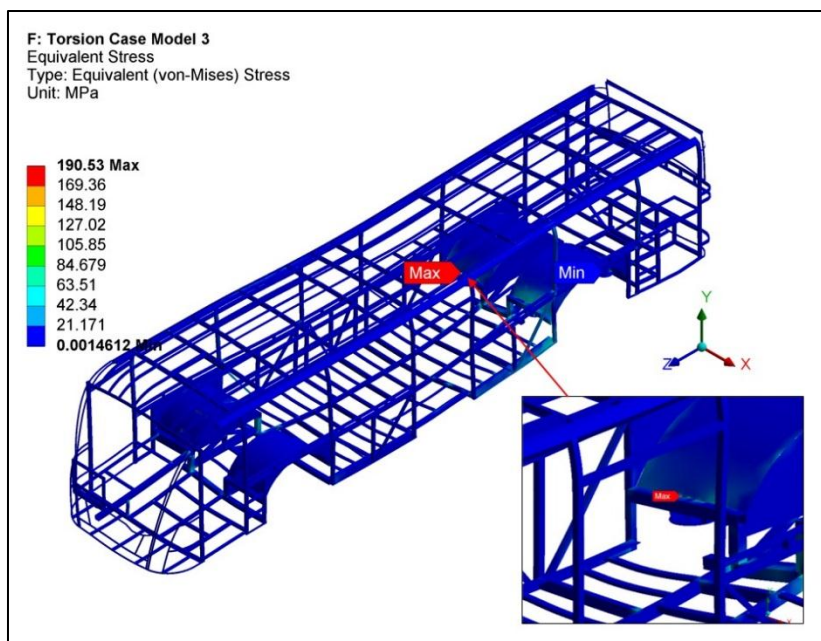


รูปที่ 4.23 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสจากตำแหน่งการวางเบดเตอร์รูปแบบที่ 3
กรณีการคัดของ โครงสร้างอันเนื่องมาจากความเร่งโน้มถ่วง

2). ผลการวิเคราะห์ในกรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน ในตำแหน่งการวางเบดเตอร์รูปแบบที่ 3 พบว่าระยะการเสียรูปของโครงสร้างสูงสุดเมื่อเกิดการบิดตัว จากภาระกรรมของมวลต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 1.330 มิลลิเมตร เกิดขึ้นที่บริเวณ โครงสร้างพื้นรถโดยสาร จะเกิดการ โกงตัวของ โครงสร้างแซตซีในช่วงตรงกลางดังแสดงในรูปที่ 4.24 ส่วนค่าความเค้นวอน มีสเชตสูงสุดที่เกิดขึ้นกับ โครงสร้างจะมีค่าเท่ากับ 190.53 MPa ที่บริเวณ โครงสร้างที่เป็นจุดยึดถูง ลมที่ล้อหลังด้านขวาดังแสดงในรูปที่ 4.25

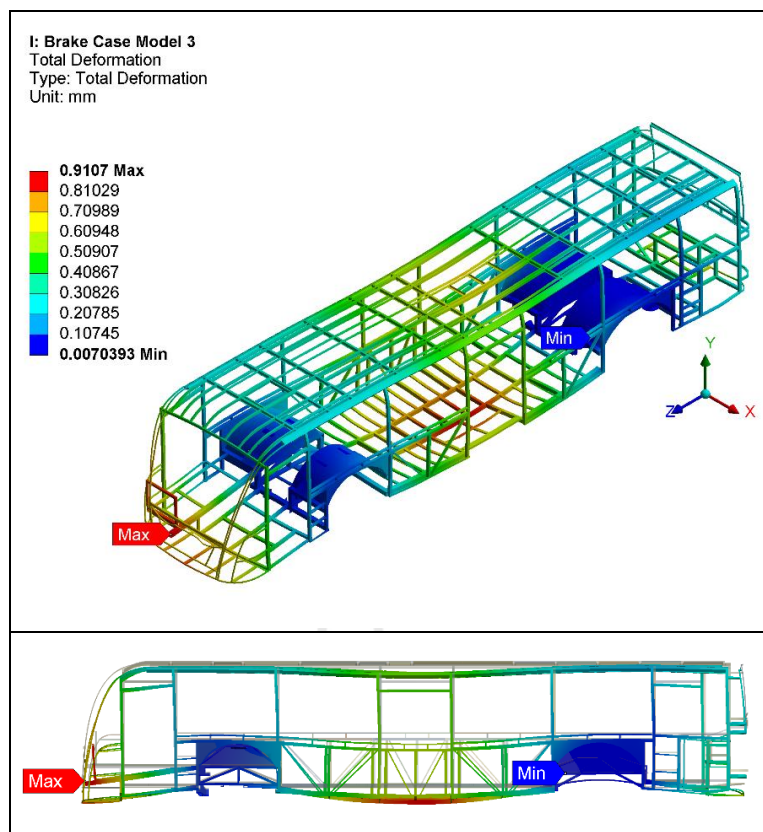


รูปที่ 4.24 แสดงระยะการเสียรูปจากตำแหน่งการวางเบดเตอร์รูปแบบที่ 3 กรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน

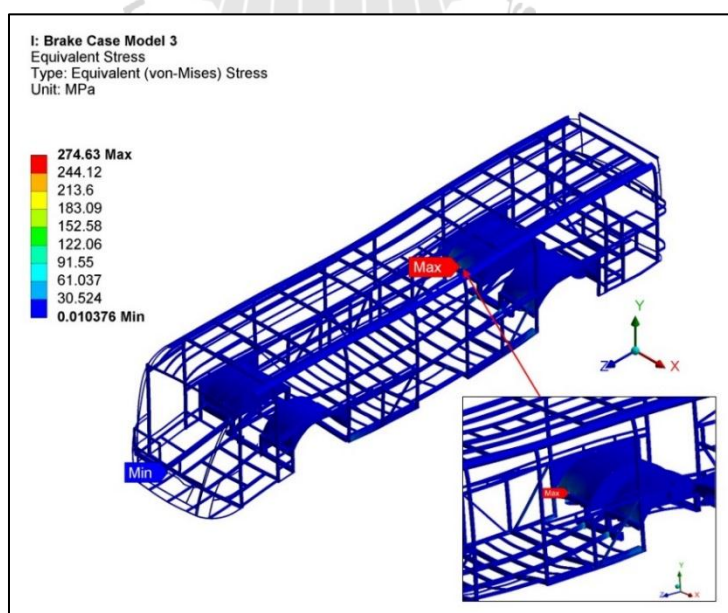


รูปที่ 4.25 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซสจากตำแหน่งการวางเบดเตอร์รูปแบบที่ 3
กรณีการบิดตัวของโครงสร้างอันเนื่องมาจากสภาพพื้นผิวถนน

3). ผลการวิเคราะห์ในการเบรก พบว่าเมื่อรถโดยสารไฟฟ้าขับเคลื่อนด้วยความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เกิดการชะลอตัวอย่างรวดเร็วจนความเร็วเท่ากับศูนย์หรือหยุดนิ่ง โดยใช้ระยะเวลา 4 วินาที มวลต่างๆ จากวัตถุที่บรรทุกบนรถโดยสาร จะก่อเป็นภาระกรรมที่กระทำด้วยความเร่งในแนวยาวของรถโดยสาร ทำให้เกิดระยะการเสียดรูปสูงสุดที่โครงสร้างเท่ากับ 0.910 มิลลิเมตร จะเกิดขึ้นที่บริเวณโครงสร้างด้านหน้าที่ตำแหน่งของคนขับและตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์บังคับเลี้ยว เนื่องจากโครงสร้างมีลักษณะเป็นคานเดี่ยวยาวออกมา ไม่มีจุดรองรับ เมื่อเกิดแรงจากการเบรกจึงทำให้เกิดการเสียดรูปดังแสดงในรูปที่ 4.26 สำหรับค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดจะอยู่ที่ตำแหน่งจุดยึดดูลงที่ล้อหลังด้านขวาดังแสดงในรูปที่ 4.27 โดยค่าความเค้นวอนมิสเซสสูงสุดเท่ากับ 274.63 MPa



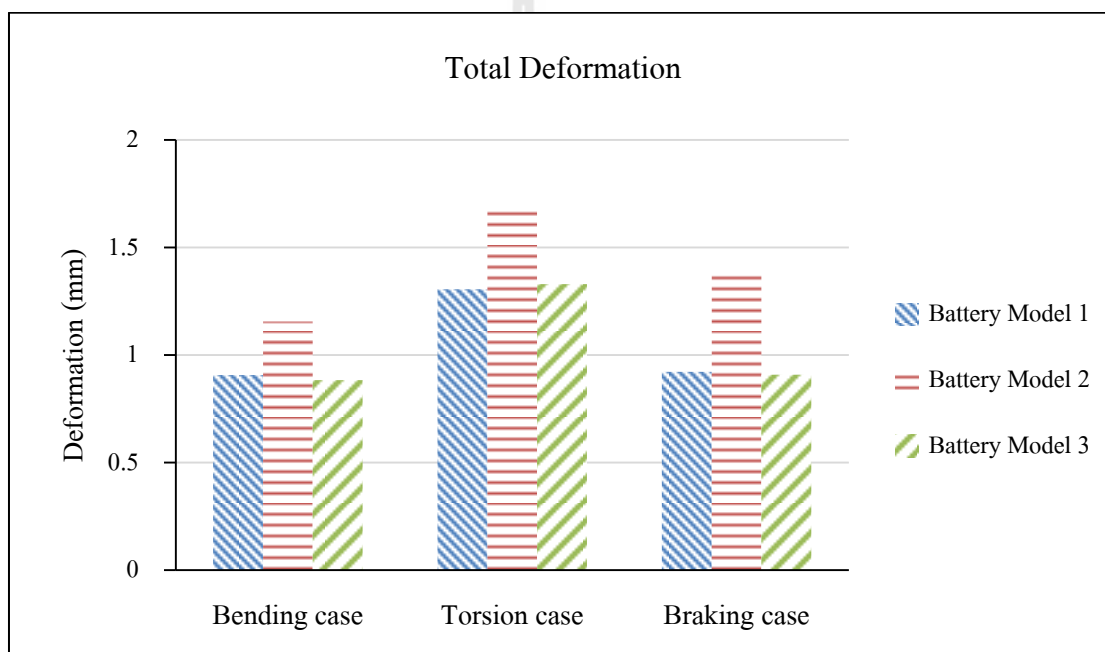
รูปที่ 4.26 แสดงระยะการเสียรูปจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3 กรณีการเบรก



รูปที่ 4.27 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเสจากตำแหน่งการวางเบตเตอร์รูปแบบที่ 3 กรณีการเบรก

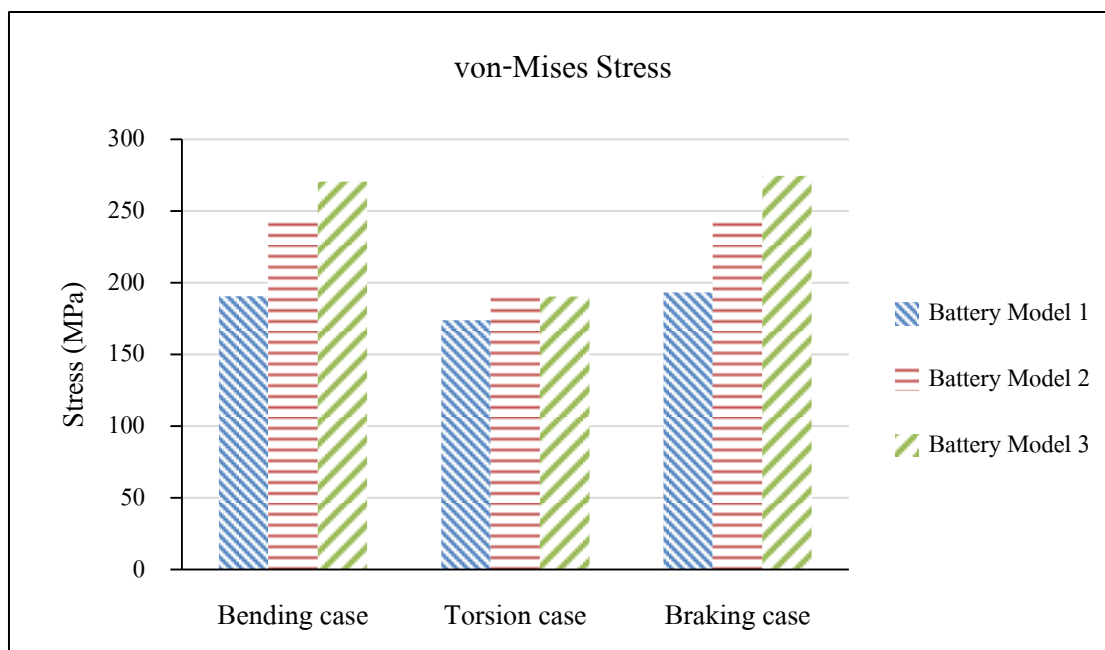
4.3.4 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ในแต่ละกรณี

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าในกรณีการตัด การบิด และการเบรก นำมาพล็อตกราฟจะได้กราฟเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของระยะการเสีรูปในแต่ละกรณีดังแสดงในรูปที่ 4.28 และกราฟเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของค่าความเค้นวอนมิสเชสในแต่ละกรณีดังแสดงในรูปที่ 4.29 ซึ่งจะพบว่าระยะการเสีรูปจากตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 3 จะมีระยะการเสีรูปที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ระยะการเสีรูปจากกรณีการบิดของโครงสร้างจะมีค่าที่สูงที่สุด จุดที่เกิดการเสีรูปมากที่สุดโดยส่วนมากจะอยู่ที่ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ เนื่องจากมีน้ำหนักที่มากจึงทำให้โครงสร้างเกิดการเสีรูปได้ง่าย



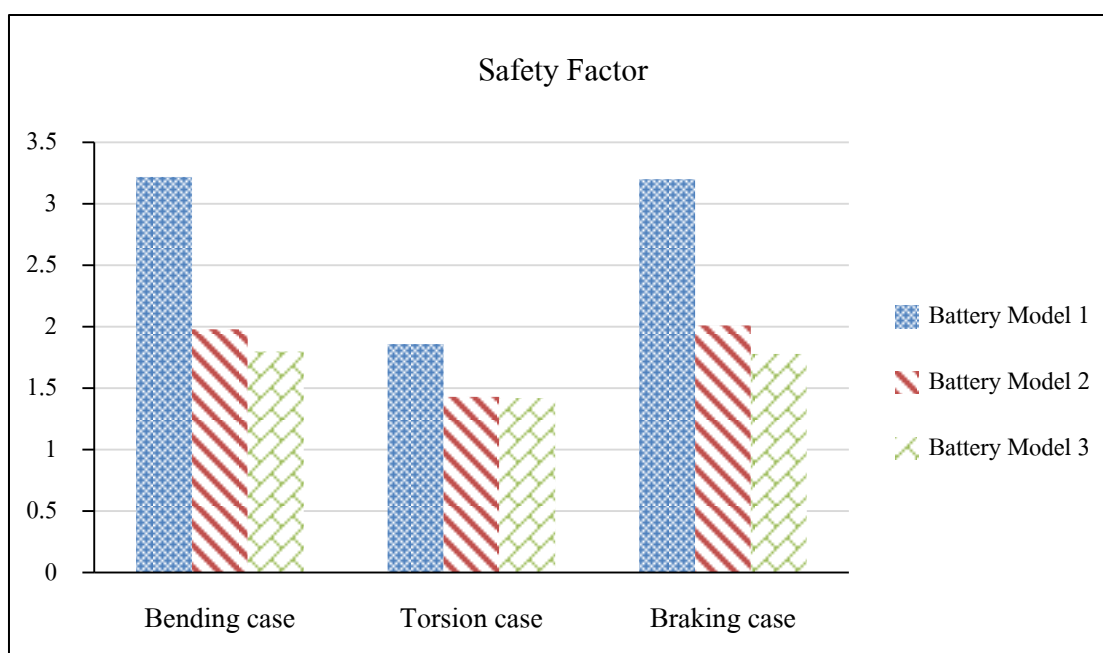
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของระยะการเสีรูปในแต่ละกรณี

สำหรับตำแหน่งการวางแบตเตอรี่รูปแบบที่ 1 นั้น จะเกิดความเค้นวอนมิสเชสกับโครงสร้างรถโดยสารน้อยที่สุด ซึ่งจุดที่เกิดค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงที่สุดนั้น จากการวิเคราะห์ในกรณีการตัด การบิด และการเบรก พบว่าเกิดขึ้นที่โครงสร้างบริเวณจุดจับยึดตุ้มลมที่ล้อหลังด้านขวาเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากโครงสร้างที่เพลาลังนั้น ไม่มีโครงสร้างที่ช่วยรับแรง เมื่อเกิดแรงกระทำจุดทำให้บริเวณดังกล่าวเกิดความเค้นที่สูง



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของค่าความเค้น von-Mises ในแต่ละกรณี

การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าในแต่ละกรณี ด้วยภาระกรรมที่คูณค่าความปลอดภัยกับค่าไดนามิกส์แพ็คเกจอร์ จะพบว่าการออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนทั้ง 3 รูปแบบ เมื่อทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลลัพธ์ที่ได้จะยังคงมีค่าความปลอดภัยเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความปลอดภัยจากการตำแหน่งการวางแบตเตอรี่บนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลังของโครงสร้างรถโดยสาร (รูปแบบที่ 1) จะได้ค่าความปลอดภัยสำหรับการใช้งานที่มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรูปแบบอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของค่าความปลอดภัยในแต่ละกรณี

จากผลการเปรียบเทียบการออกแบบตำแหน่งการติดตั้งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างของรถโดยสารไฟฟ้า จะพบว่าระยะการเสียดรูปและค่าความเค้นวอนมิสเซสที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าทั้งสามรูปแบบนั้น มีค่าที่อยู่ในเกณฑ์ที่มีความปลอดภัยต่อการใช้งาน ซึ่งค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของทั้งสามรูปแบบนั้นมีค่าเกินกว่า 1.5 ซึ่งเป็นเกณฑ์ทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ แต่เนื่องจากข้อจำกัดในด้านต่าง ๆ ของรถโดยสารตัวอย่างเช่น จำนวนที่นั่ง การติดตั้งอุปกรณ์ส่วนควบ ความสะดวกในการซ่อมบำรุง เป็นต้น ผู้วิจัยได้เลือกการติดตั้งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ตำแหน่งบนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลังของโครงสร้างรถโดยสาร (รูปแบบที่ 1) เป็นการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากเพลาน้ำสามารถรับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 8,500 กิโลกรัม และเพลาลังสามารถรับน้ำหนักสูงสุดเท่ากับ 13,000 กิโลกรัม ซึ่งสามารถรับภาระกรรมที่กระทำได้สูง และยังมีค่าความปลอดภัยที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนรูปแบบอื่น ๆ ทำให้มีพื้นที่ใช้งานในห้องโดยสารที่เพิ่มมากขึ้น ลักษณะของพื้นรถโดยสารจะเป็นพื้นต่ำตลอดทั้งคัน (Fully Low Floor) ทำให้สะดวกสบายต่อการใช้งานของผู้โดยสารและผู้พิการอีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการออกแบบตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน และวิเคราะห์ผลกระทบของตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ที่มีผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนต้า งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนทั้งหมด 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้ รูปแบบที่ 1 จะวางที่ตำแหน่งบนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลังของโครงสร้างรถโดยสาร รูปแบบที่ 2 จะวางที่ตำแหน่งบนหลังการรถโดยสาร และรูปแบบที่ 3 จะวางที่ตำแหน่งบนพื้นรถโดยสารและบนซุ้มล้อ โดยได้ทำการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสถิตยศาสตร์ทั้งหมด 3 กรณี ดังต่อไปนี้ 1) กรณีการตัดเนื่องจากความเร่งโน้มถ่วงของโลก 2) กรณีการบิดเนื่องจากสภาพพื้นผิวถนนไม่สม่ำเสมอ 3) กรณีการเบรก ซึ่งจะใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ ANSYS 14.5 ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้า ผู้วิจัยสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้ามาแปลความแล้วได้ข้อสรุปของงานวิจัยดังต่อไปนี้

1) จากผลการวิเคราะห์ระยะการเสีรูปร่างของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนต้าทั้ง 3 กรณี จะพบว่า ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่บนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลังของโครงสร้างรถโดยสาร (รูปแบบที่ 1) และตำแหน่งการวางแบตเตอรี่บนพื้นรถโดยสารและบนซุ้มล้อ (รูปแบบที่ 3) จะก่อให้เกิดระยะการเสีรูปร่างของโครงสร้างที่น้อยกว่าตำแหน่งการวางแบตเตอรี่บนหลังการรถโดยสาร (รูปแบบที่ 2)

2) จากผลการวิเคราะห์ความเค้นวอนมิสเชสที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าประเภทขนต้าทั้ง 3 กรณี จะพบว่า ตำแหน่งการวางแบตเตอรี่บนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลังของโครงสร้างรถโดยสาร (รูปแบบที่ 1) จะก่อให้เกิดค่าความเค้นวอนมิสเชสที่น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งการวางแบตเตอรี่บนหลังการรถโดยสาร (รูปแบบที่ 2) และตำแหน่งการวางแบตเตอรี่บนพื้นรถโดยสารและบนซุ้มล้อ (รูปแบบที่ 3) จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นวอนมิสเชสสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งโครงสร้างบริเวณซุ้มล้อหลังด้านขวา บริเวณจุดจับยึดตุ้ม ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าได้

3) จากผลการวิเคราะห์ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ จะพบว่า การออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนบนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลังของโครงสร้างรถโดยสาร (รูปแบบที่ 1) จะได้ค่าความปลอดภัยสูงที่สุด

4) จากการออกแบบตำแหน่งการวางแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนบนซุ้มล้อหน้าและซุ้มล้อหลังของโครงสร้างรถโดยสาร (รูปแบบที่ 1) จะให้ผลกระทบต่อความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าในน้อยที่สุด และมีความเหมาะสมต่อการออกแบบโดยรวมของรถโดยสารไฟฟ้าประเภทชานต่ำ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบผลความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากการโปรแกรมวิเคราะห์ โดยจะต้องมีการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารจริง เพื่อยืนยันความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

2) การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ควรจะมีการพิจารณาความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารแบบพลศาสตร์ เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำมากขึ้น เนื่องจากมีเงื่อนไขและข้อกำหนดที่ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงบนท้องถนน

3) ควรจะมีการศึกษาความแข็งแรงของรอยเชื่อม เพื่อให้ได้เงื่อนไขการสัมผัสกันระหว่างชิ้นส่วนของโครงสร้างในแบบจำลองที่คล้ายคลึงกับการสัมผัสจริง

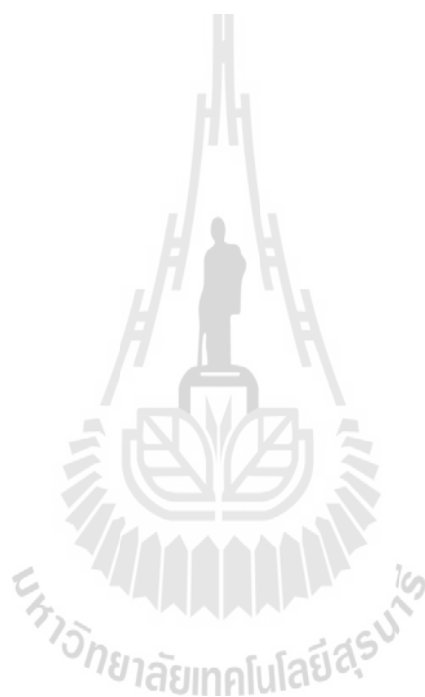
4) จำเป็นจะต้องมีการออกแบบและปรับปรุงโครงสร้างในจุดที่เกิดค่าความเค้นสูง เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้

5) การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารไฟฟ้าด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นจะต้องระมัดระวังเรื่องความผิดพลาดที่เกิดจากการเขียนแบบจำลอง เพราะจะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้หรือผลลัพธ์ที่ได้เกิดข้อผิดพลาด

รายการอ้างอิง

- ปราโมทย์ เคชะอำไพ (2555). **ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. พิมพ์ครั้งที่ 5. 613 หน้า
- มนตรี พิรุณเกษตร (2548). **กลศาสตร์ของวัสดุ**. วิทยพัฒน์. กรุงเทพฯ. 632 หน้า
- 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.
- Belsare, V., Pathak, C., and Kulkarni, M. (2012). Rollover Analysis of Passenger Bus as per AIS-031. **International Journal of Engineering Research and Development**. Vol.4, Issue 5, pp.49-59.
- Croccolo, D., De Agostinis, M., and Vincenzi, N. (2011). Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via FEM: a Methodology Applied to a Case Study. **Strojniski vestnik-Journal of Mechanical Engineering**. Vol.57, No.11, pp.799-809.
- Jason C. Brown, A. John Robertson, and Stan T. Serpento (2002). **Motor Vehicle Structures: Concepts and Fundamentals**. SAE International. 285 pp.
- Ko, H.Y., Shin, K.B., Jenó, K.W., and Cho, S.H. (2009). A study on the crashworthiness and rollover characteristics of low-floor bus made of sandwich composites. **Journal of Mechanical Science and Technology**. Vol.23(10), pp.2686-2693.
- Lapo, C., Klomkaew, R., and Chamniprasart, K. (2011). Design and Analysis of Double Decker Bus Chassis. **The 5th South East Asia Technical University Consortium (SEATUC) Symposium**. Hanoi: Vietnam, February 7-14, 2011.
- Lin, Y.C., and Nian, H.C. (2006). Structure Design Optimization of the Body Section Using the Finite Element Method. **SAE World Congress & Exhibition**. U.S.A., April 3-6, 2006.
- Meznar, D., and Lazovic, M. (2010). The Strength of the Bus Structure with the Determination of Critical Points. **Strojniski vestnik-Journal of Mechanical Engineering**. Vol.56, No.9, pp.544-550.

Wen-wei Wang, Cheng-jun Zhou and Jiao-yang Chen (2012). Pure Electric Bus Crashworthiness Analysis. **International Conference on Mechanical Engineering and Material Science (MEMS 2012)**. ISSN 1951-6851.





ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลภาระกรรมต่าง ๆ ของรถโดยสารไฟฟ้า

1. Front Area	
- คนขับ 1 คน + ที่นั่ง (คิคน้ำหนักคนขับ 70 kg, ที่นั่ง 13 kg)	83 kg
- ผู้โดยสาร 4 คน + ที่นั่ง (คิคน้ำหนักผู้โดยสาร 70 kg, ที่นั่ง 13 kg)	332 kg
- คอนโซล + พวงมาลัย + อุปกรณ์ต่างๆ	85.2 kg
- Steering Pump	45 kg
2. Middle Area	
- ผู้โดยสาร 33 คน + ที่นั่ง (คิคน้ำหนักผู้โดยสาร 70 kg, ที่นั่ง 13 kg)	2,739 kg
3. Rear Area	
- ผู้โดยสาร 8 คน + ที่นั่ง (คิคน้ำหนักผู้โดยสาร 70 kg, ที่นั่ง 13 kg)	664 kg
- Air Pump	58 kg
- Cooling Pack	65 kg
- Control Unit	120 kg
4. Battery Pack	
- แบตเตอรี่ Lithium-Ion จำนวน 11 ชุด	2,530 kg
5. Roof Area	
- พัดลมระบายอากาศ	35 kg
- เครื่องปรับอากาศ	280 kg
6. อื่น ๆ	
- ประตู + กระจก + วัสดุและอุปกรณ์ภายในต่าง ๆ	3,518 kg

น้ำหนักสูงสุดที่โครงสร้างแชสซีสามารถรับน้ำหนักได้ตามข้อมูลจำเพาะของเพลารถโดยสารไฟฟ้า

Front Axle รุ่น ZF RL-85A 8,500 kg

Rear Axle รุ่น AVE-130 13,000 kg

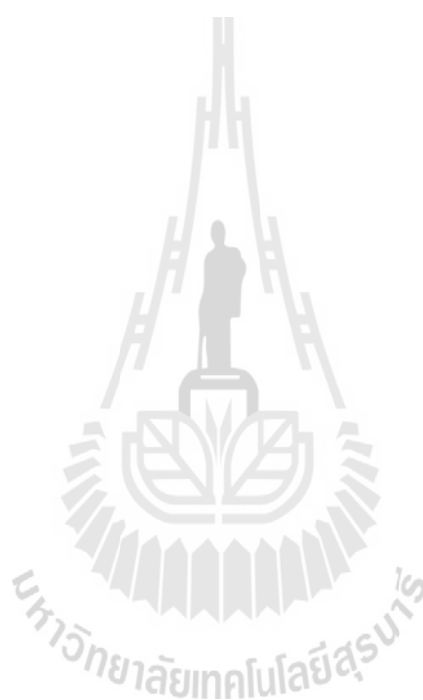
ดังนั้นน้ำหนักสูงสุดที่โครงสร้างแชสซีสามารถรับได้เท่ากับ 21,500 kg

ภาคผนวก ข
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Prasatsup, W., and Chamniprasart, K. (2016). Structure Analysis of Low Floor Electric Bus using the Finite Element Method. **The 10th South East Asia Technical University Consortium (SEATUC) Symposium**. Tokyo: Japan, February 22-24, 2016.



STRUCTURE ANALYSIS OF LOW FLOOR ELECTRIC BUS USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Worakiat Prasatsup, Kontorn Chamniprasart*

School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology

* e-mail : kontorn@sut.ac.th

ABSTRACT

Currently, the industrial sectors are realized the importance of energy. Because the fuel is used widely, the current volume of available fuel is limited and phased down indefinitely. The automotive industry is another large industry that still depends on fuel energy. Because the fuel cannot stand longer in the future and the combustion of fuel causes pollution to environment. The automotive industry has researched and developed alternative energy vehicles to reduce the use of fuel. The electric vehicle is one choice for alternative energy vehicles. It is the most popular and has been developed for higher performance. Currently, the use of private automobile have increased, especially in Thailand, the average orders of automobile per year has increased. Therefore, the traffic jam in the city can causes air pollution. A campaign of using the public bus transportation instead of private automobiles is seriously applied in community. A project "Electric Bus", that uses electric energy to drive and is environmentally-friendly, has been made the electric bus is a low floor bus and is suitable to use in the city. All kinds of passenger can use the low floor electric bus, the bus is comfortable, safe and easy to use for disable and elderly. In the design and production processes of the low floor electric bus, the safety must be the first priority. The purpose of this work is to analyze the structural strength of the low floor electric bus using Finite Element Method. The battery module location on the low floor electric bus is a main subject to be analyzed its effect of the bus structure. The analysis can forecast the structural strength in terms of stress, strain, and displacement under several load and constrain conditions. The methodology of the analysis is applied through case studies, which reflect the actual duty cycle of the bus. The results are expected to effectively enhance the improvement and development of the low floor electric bus structure.

1. INTRODUCTION

The statistics of road accidents take place every year causing many fatalities and severe injuries to the passenger. The safety must be the first priority for design and production of the new bus. If making the bus are safer, this problem can be reduced. Currently, the structural design and analysis of the bus are modern and more comfortable for engineers. Computer simulations become more important for the bus simulation. They can analyze the structural strength using Finite Element Method. FEM is a powerful numerical engineering analysis, and widely used in static and dynamic stress analyses of vehicles. The results of the numerical analysis revealed that the location of maximum deflection and maximum stress agrees well with theoretical maximum location of simple beam loaded by uniform force (Veloso, et al. 2009). Crococo, et al. (2011) presented an analyzed structural of an articulated urban bus chassis, with a total length of 18 m, two chassis, using Finite Element Method. The structural response was expressed in terms of stress, strain, and displacement, under several loading, at reflecting the actual duty cycle of the bus. Hemant B.Patil, et al. (2013) proposed the stress analysis of automotive chassis with various thickness and change the position of cross member in order to reduce the magnitude of stress at critical point of the chassis.

The purpose of this work is to simulate and forecast the structural response of the low floor electric bus, in terms of stress, strain and displacement, under bending loading and torsion loading that are exerted on the chassis structure, and represent the actual duty cycle of the bus, using Finite Element Method.

2. EXPERIMENT

2.1 Experimental Apparatus

2.1.1 Computer Aided Design. The model of low floor electric bus is modeled from the generation of CBL.EV (Cherdchai Industrial Factory Co., Ltd.). It is created using computer aided design (CAD) SolidWorks 2013. The model composes of 3D beam elements. The electric bus model is chassis structure combined with the body structure as shown in Figure 1. The chassis structure and body structure have assembly parts about 540 parts.

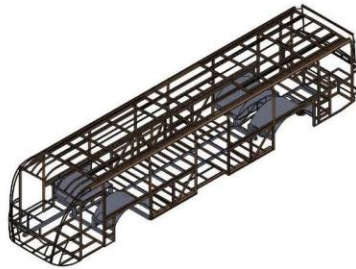


Fig. 1 CAD model of low floor electric bus

2.1.2 Computer Aided Engineering. The structural analysis of the low floor electric bus using computer aided engineering (CAE) ANSYS for creating a mesh and simulation of structural strength using Finite Element Method. The accuracy of results depends upon the accuracy of CAD geometry and quality of meshing.

2.2 Technique

2.2.1 Material Data. The material properties of the model are considered under the linear elastic and isotropic behavior. The chassis structural is stainless steel grades RST4003 with Yield strength = 539 N/mm², a Tensile strength = 541 N/mm², a Young's modulus = 193 GPa and a Poisson's ratio = 0.26. The external dimensions of stainless steel rectangular section tubular is 80x40 mm and 80x80 mm with the wall thickness of 4 mm. The body structural is steel grades ss400 with Yield strength = 450 N/mm², a Tensile strength = 505 N/mm², a Young's modulus = 173 GPa and a Poisson's ratio = 0.30. The external dimensions of steel rectangular section tubular is 50x50 mm, 50x25 mm. The wall thickness is the range of 2 to 4 mm. The external dimension of angle steel is 40x40 mm with the wall thickness of 4 mm and 6 mm.

2.2.2 Bending Loads. Each load applied to the chassis and body structure is introduced as a lumped mass. For remote boundaries conditions, the lumped masses are defined. Ansys allows the control of the specific geometry behavior, which can be defined as either rigid or deformable. Lumped masses, that are applied to the chassis as shown in Figure 2, consist of 315 kg of distributed masses belonging to the air condition and

ventilators on the roof, 545.20 kg of distributed masses on the front chassis (e.g. driver, steering pump, battery), 2,739 kg of distributed masses belonging to passengers' mass on the middle chassis, 907 kg of distributed masses on the rear chassis (e.g. passengers, air pump, cooling pack, control units) and 2,530 kg of 11 battery modules. Fixed supports have been applied to the rear axle. Moreover, the standard gravitational acceleration g (9.81 m/s²) has been applied to the whole mass system.

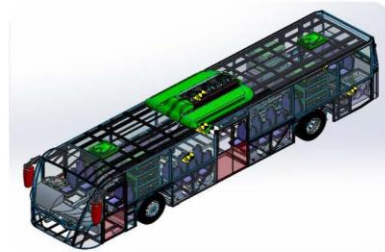


Fig. 2 Lumped masses are applied to the chassis

2.2.3 Torsion Loads. When the electric bus run on an uneven road, the chassis could be subjected to torsion loads. The supports to be fixed have been chosen as follows:

- (I) Left front axle constraint and right rear axle constraint.
- (II) Right front axle constraint and left rear axle constraint.

3. ANALYSIS

3.1 Governing Equations

3.1.1 Stress Theory

The von Mises stress is an equivalent or effective stress at which yielding is predicted to occur in ductile materials (for example, steel or aluminum alloy), can be evaluated from:

$$\sigma_{vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (1)$$

The derivation of this form of the von Mises stress is based on the principal axes

The maximum von Mises stress failure criterion is based on the von Mises-Hencky theory, also known as the scalar-energy theory or the maximum distortion energy theory. The theory states that a ductile material starts to yield at a location when the von Mises stress becomes equal to the stress limit. In most cases, the yield strength is used as the stress limit. According to the von Mises failure criterion, the factor of safety (FOS) is expressed as:

$$FOS = \frac{\sigma_{limit}}{\sigma_{vm}} \quad (2)$$

3.2 Finite Element Analysis

3.2.1 Bending Load Case.

In the case of bending analysis, when the chassis structure receives the load of lumped mass, the maximum deformation was 0.202 mm, which occurred on the structure of the roof, air condition area. The maximum strain was 212.750 $\mu\epsilon$, which occurred on the floor between the structure of body and chassis, near the rear axial, and the maximum stress was 35.488 MPa, which occurred in the maximum strain point. Figure 3 to Figure 5 show the stress, strain and deformation in the chassis of low floor electric bus, respectively.

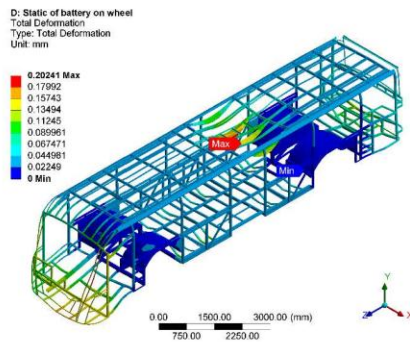


Fig. 3 Total displacements – Bending load case (Scale 3.1e+003)

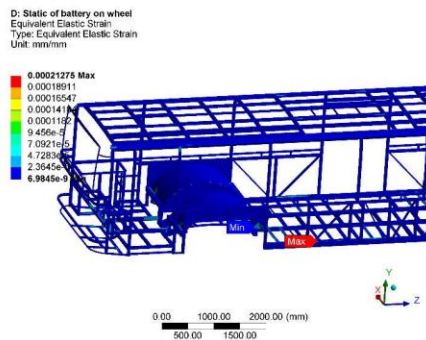


Fig. 4 Von-Mises equivalent strain

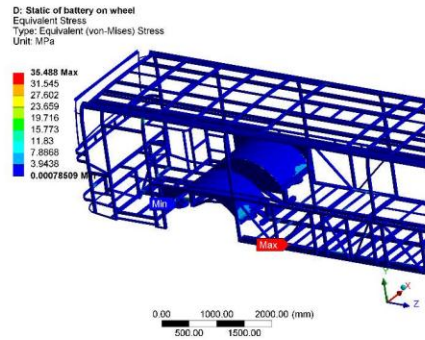


Fig. 5 Von-Mises equivalent stress

3.2.1 Torsion Load Case.

In the case of torsion analysis, when the electric bus run on an uneven road, the chassis could be subjected to torsion load. The maximum deformation was 0.245 mm as shown in Figure 6.

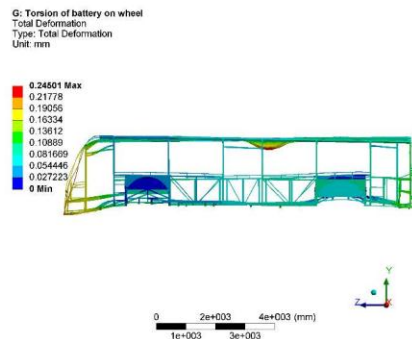


Fig. 6 Total displacements – Torsion load case (Scale 2.6e+003)

CONCLUSION

The static structural analysis of low floor electric bus was performed via the Finite Elements Method using computer aided engineering ANSYS Workbench 14.5. The results of this analysis showed the maximum stress in the chassis structure, when the chassis is subjected to the actual duty cycle. The results of this analysis are expected to use for designing the low floor electric bus structural and adjust the corresponding weaknesses of the structure. It can reduce time consumption in the design engineering process and also reduce the cost of actual test that can enhance high effective productions of the low floor electric bus.

REFERENCES

Veloso, V., Magalhães, H.S., Bicalho, G.I., and Palma, E.S., Failure investigation and stress analysis of a longitudinal stringer of an automobile chassis, *Journal of Engineering Failure Analysis*, vol. 16, issue 5, pp. 1696-1702, 2009

Croccolo, D., De Agostinis, M., and Vincenzi, N., Structural Analysis of an Articulated Urban Bus Chassis via FEM: a Methodology Applied to a Case Study, *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 11, pp. 799-809, 2011

Patil, B., Kachave, D., and Deore, R., Stress Analysis of Automotive Chassis with Various Thicknesses, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 6, issue 1, pp.44-49, 2013

NOMENCLATURE

σ_{sm} : Von Mises stress
 σ_{limit} : Yield strength

Subscripts

CAD : Computer Aided Design
CAE : Computer Aided Engineering
FEM : Finite Element Method
FOS : Factor of safety



Worakiat Prasatsup

received the B.E. (2012) degrees in automotive engineering from Suranaree University of Technology.



Kontorn Chamnirasart

Received the B.S. (1980) degree in Mechanical Engineering from (First Class Honer) from Royal Thai Air Force Academy, Thailand, M.Sc. (1987) degree in Mechanical Engineering from University of Pittsburgh, USA, and Ph.D. (1992) degree in Mechanical Engineering from University of Pittsburgh, USA

ประวัติผู้เขียน

นายวรเกียรติ ปราสาททรัพย์ เกิดเมื่อวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2532 เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนจ่าการบุญ จังหวัดพิษณุโลก ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนจ่ากร้อง จังหวัดพิษณุโลก และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมยานยนต์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2555 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ณ สถาบันการศึกษาเดิม

ระหว่างศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ได้มีประสบการณ์เป็นผู้สอนปฏิบัติการรายวิชาระดับปริญญาตรีของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต จำนวน 11 รายวิชา ดังนี้

- 1). วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 1, 3
- 2). วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมการผลิต 1, 3
- 3). วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมยานยนต์ 2, 3, 4
- 4). วิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 1, 2
- 5). การเขียนแบบวิศวกรรม 1, 2

ผลงานวิจัย ได้เสนอบทความเรื่อง : **“STRUCTURE ANALYSIS OF LOW FLOOR ELECTRIC BUS USING THE FINITE ELEMENT METHOD”** ในการประชุมทางวิชาการ SEATUC 2016 (10th SOUTH EAST ASIAN TECHNICAL UNIVERSITY CONSORTIUM SYMPOSIUM) ระหว่างวันที่ 22-24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559 ณ เมืองโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข.