

การวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้สภาวะการชนกระแทกด้านหน้า
ตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29



นางสาวสิริภรณ์ ส่ำกลาง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

THE CRASHWORTHINESS FRONTAL ANALYSIS OF PASSENGER-BUS
STRUCTURE UNDER ECE REGULATION No.29




A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้สถานะการขนส่งทางถนน
ตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....


(อ. ดร.พัชรวัฒน์ เจริญอมรภักดิ์)

ประธานกรรมการ


.....

(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)


.....


(ผศ. ดร.วิณา พันเพ็ง)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)


.....

(ผศ. ดร.ศรภกา แข็งการ)

กรรมการ


.....

(อ. ดร.วัชรพงษ์ ปะดั่งทะเล)

กรรมการ


.....

(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐียงกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ


.....

(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ลี้ริกรรม์ สำกลาง : การวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้สภาวะการชนกระแทกด้านหน้า
ตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29 (THE CRASHWORTHINESS FRONTAL ANALYSIS
OF PASSENGER-BUS STRUCTURE UNDER ECE REGULATION No.29) อาจารย์ที่
ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 92 หน้า.

คำสำคัญ: การชนกระแทกด้านหน้า/ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์/วิธีการขัดแจ้ง/ECE-R29

รถบรรทุกและรถโดยสารเป็นประเภทรถที่เกิดอุบัติเหตุบ่อยและเกิดความเสียหายมากที่สุด โดยอันดับแรกของลักษณะการชนคือการชนกระแทกด้านหน้า ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สิน หากมีการออกแบบและทดสอบโครงสร้างรถบรรทุกและรถโดยสาร ให้มีความแข็งแรงและระบบความปลอดภัยให้เป็นไปตามมาตรฐาน ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายแก่ชีวิตได้ ทั้งนี้กระบวนการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถบรรทุกและรถโดยสารในประเทศไทยมีเพียงการทดสอบการพลิกคว่ำเท่านั้น มาตรฐานและการทดสอบการชนด้านหน้านั้นยังไม่ถูกนำมาเป็นข้อกำหนดในการผลิตโครงสร้างของรถบรรทุกและรถโดยสารที่ถูกผลิตในประเทศไทย ส่งผลให้โครงสร้างรถโดยสารมีความน่าเชื่อถือน้อย เนื่องจากไม่มีข้อมูลการวิเคราะห์มารองรับตลอดจนไม่มีมาตรฐานการชนด้านหน้ามารองรับ

ผู้วิจัยจึงสนใจในศึกษาการวิเคราะห์การชนของโครงสร้างรถโดยสารภายใต้แรงกระแทกด้านหน้าให้เป็นไปตามมาตรฐาน ECE-R29 ทำการวิเคราะห์แบบจำลองของโครงสร้างรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ (Low Floor Bus) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากจาก บริษัท เซิตชัย คอร์ปอเรชั่น จำกัด ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบขัดแจ้ง ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench เพื่อวิเคราะห์และปรับปรุงความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารให้เป็นไปตามมาตรฐาน ECE-R29 ซึ่งโครงสร้างรถโดยสารมีความแข็งแรงและความปลอดภัยที่เป็นไปตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29 และ ได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างของรถโดยสารให้สามารถส่งถ่ายพลังงานไปยังผู้ขับขี่ได้น้อยลง

ผลลัพธ์ของการจำลองการวิเคราะห์นั้นพบว่าโครงสร้างเดิมไม่สามารถผ่านมาตรฐาน ECE-R29 ได้ เนื่องจากมีชิ้นส่วนของโครงสร้างลูกลำหุ่นจำลองผู้ขับขี่ ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างเดิมมีค่าอยู่ที่ 53 kJ ค่าพลังงานตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่อยู่ที่ 157.22 J คิดเป็น 0.29% ของพลังงานทั้งหมด และค่าชะลอตัวของความเร่งอยู่ที่ 16.1 g จากนั้นได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างให้สามารถผ่านมาตรฐาน ECE-R29 โดยการเพิ่มโครงสร้างท่อผนังบางเข้าไป พบว่าค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างเดิมมีค่าอยู่ที่ 54.2 kJ ค่าพลังงานตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่อยู่ที่ 103.4 J คิดเป็น 0.29% ของพลังงานทั้งหมด และค่าชะลอตัวของความเร่งอยู่ที่ 13.8 g คิดเป็น 14.3% เมื่อเทียบกับ

ค่าการชะลอตัวของความเร่งเดิม นอกจากนี้ ได้ประยุกต์ใช้คำสั่ง Virtual Topology ให้กับการจำลอง การวิเคราะห์ คำสั่ง Virtual Topology นี้สามารถช่วยลดระยะเวลาในการจำลองได้ ส่งผลให้ต้นทุน ของการวิเคราะห์ลดลงอีกด้วย



สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา ศิวะวัฒน์ คำทอง

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [Signature]

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม กัศมภ์ ทัฬหี

SIREEGORN SUMKLANG : THE CRASHWORTHINESS FRONTAL ANALYSIS OF PASSENGER-BUS STRUCTURE UNDER ECE REGULATION No.29. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 92 PP.

Keywords: CRASHWORTHINESS FRONTAL/FINITE ELEMENT METHOD/EXPLICIT DYNAMICS/ECE R-29

Trucks and buses are the types of vehicles that cause the most damage in the event of an accident. The first type of accident is a frontal crash, which causes damage to life and assets. If the structure of buses is designed and tested to be strong and the safety systems satisfy standards, this is another factor that can reduce the risk of injury. However, designing and constructing bus structures in Thailand is only an overturned test. The front crash standard is not yet considered a structural requirement for buses made in Thailand. As a result, the bus structure is less reliable due to the absence of analytical information to support it and a lack of a standard for frontal accidents.

This thesis analyses the passenger-bus structure under the frontal crash based on United Nations Economic Commission of Europe (UNECE) Regulation no. 29 (ECE-R29). The structure of the bus used for analysis in this research was provided by Cherdchai Corporation Co., Ltd. The Finite Element Method was used to enhance the design and preliminary analysis of the bus structure before actual fabrication and testing. The computer program used to analyze the explicit finite element method is called Explicit Dynamic ANSYS® Workbench. The bus structure is strong and safe, satisfying ECE-R29, and the bus structure has been improved to transfer less energy to the driver.

The original structure did not pass ECE-R29 due to structural components encroaching on the driving dummy. The energy absorption of the original structure was 53 kJ, the residual energy on the driver dummy was 157.22 J, 0.29% of the total energy, and the acceleration deceleration was 16.1 g. The structure has been improved to be able to pass the ECE-R29 standard by adding a thin-walled pipe structure. The energy absorption of the improved structure was 54.2 kJ, and the

residual energy on the driver dummy was 103.4 J, representing 0.29% of the total energy. The deceleration value was 13.8 g, representing 14.3% compared to the original deceleration value. In addition, the Virtual Topology command has been applied to the analysis simulation. This Virtual Topology command can reduce the simulation time. As a result, the cost of analysis is also reduced.



School of Mechatronics Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

Co-Advisor's Signature.....

Singyorn
Sutpal S.
Jim (1414)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีณา ฟันเพ็ง อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ที่ให้โอกาสทางการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ให้แนวทาง ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และให้ วิธีการแก้ปัญหาด้วยความเมตตากรุณาอย่างยิ่ง ตลอดจนความช่วยเหลือในการตรวจทานแก้ไข วิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์อันประกอบไปด้วย ดร.พัชรวิวัฒน์ เจริญอมรกิจดี ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โศภณา แข็งการ และ ดร.วัชรพงษ์ ปะตังทะเล ที่ตรวจทานและให้คำแนะนำในการแก้ไขเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรในสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการจัดเตรียมเอกสารสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกภาคส่วนที่ส่วนช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท เชิดชัย คอร์ปอเรชั่น จำกัด และ เจ้าหน้าที่ทุกภาคส่วนที่มีช่วยเหลือให้วิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การเลี้ยงดู อบรม ให้คำแนะนำ และ ส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาตลอด และ เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สิริภรณ์ ส้ากลาง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ปรัชญ์นัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 มาตรฐานการทดสอบรถโดยสารในประเทศไทย.....	4
2.2 ข้อกำหนดการชนด้านหน้าของรถโดยสาร.....	5
2.2.1 ข้อกำหนดคณะกรรมการการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติข้อที่ 29.....	5
2.2.2 เจือไน้ในการผ่านการทดสอบ.....	7
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานการชนกระแทก.....	7
2.3.1 การดูดซับพลังงาน.....	8
2.3.2 การดูดซับพลังงานจำเพาะ.....	8
2.3.3 แรงชนกระแทกเฉลี่ย.....	9
2.3.4 แรงชนกระแทกสูงสุด.....	9
2.3.5 ประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก.....	9
2.4 การเสียรูปแบบคืบตัวและแบบถาวร.....	9
2.5 ระเบียบวิธีพลังงานของการเสียรูปแบบพลวัต.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6	อัตราความเครียด	10
2.7	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	11
	2.7.1 VIRTUAL TOPOLOGY IN ANSYS	12
2.8	วิธีการชดเชยและปริยาย.....	13
	2.8.1 สมการอนุพันธ์สำหรับวิธีชดเชย.....	14
	2.8.2 การคำนวณขั้นตอนเวลาสำหรับวิธีชดเชย.....	14
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
	2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชนความเร็วต่ำ	15
	2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การชนด้านหน้า	16
3	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	18
3.1	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	18
3.2	สถานที่ในการศึกษาวิจัย.....	19
3.3	เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	19
	3.3.1 เครื่องทดสอบแรงดึง	19
	3.3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์	20
3.4	ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับการทดสอบ	20
	3.4.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง	20
	3.4.2 การทดสอบแรงดึง	21
	3.4.3 การจำลองการทดสอบแรงดึง	21
3.5	ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับงานวิจัยอื่น	22
	3.5.1 งานวิจัยระเบียบวิธีสถิติ.....	22
3.6	ผลตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์	22
	3.6.1 ผลตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับการทดสอบ.....	23
	3.6.2 ผลตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับงานวิจัยอื่น.....	25
4	การจำลองการชนกระแทกของท่อผนังบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
4.1	การออกแบบท่อผนังบาง	28
4.2	การจำลองการวิเคราะห์	30

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1	วัสดุที่ใช้ผลิตท่อผนังบาง.....	30
4.2.2	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับท่อผนังบาง.....	30
4.2.3	เงื่อนไขและขอบเขต	31
4.3	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์	32
4.4	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	37
5	การตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างอย่างง่ายโดยระเบียบวิธีชัดเจน.....	38
5.1	โครงสร้าง CRASH FRAME	38
5.2	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับ CRASH FRAME.....	39
5.3	การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตสำหรับ CRASH FRAME	42
5.4	ผลการจำลองและการเปรียบเทียบผลการจำลอง.....	44
5.5	สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะของ CRASH FRAME	47
6	การวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้สภาวะการชนกระแทกด้านหน้า	
	ตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29.....	48
6.1	แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร.....	48
6.2	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโครงสร้างรถโดยสาร	49
6.3	เงื่อนไขและขอบเขต	50
6.4	ผลการจำลอง	53
6.5	การปรับปรุงโครงสร้างและการจำลอง.....	55
6.6	ค่าใช้จ่ายในการจำลองการวิเคราะห์.....	58
6.7	สรุปผล	59
7	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	61
7.1	สรุปผลการวิจัย.....	61
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	62
	รายการอ้างอิง	63
	ภาคผนวก ก.....	68
	ประวัติผู้เขียน.....	92

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ผลลัพธ์ค่าความเค้นสูงสุดและค่าระยะยืดของการทดสอบและการจำลอง.....	25
3.2	ผลลัพธ์ค่าความเค้นสูงสุดและค่าระยะการเสียรูปของงานวิจัย Agarwal และ Mthembu และการจำลอง	26
4.1	ค่ามวลและพื้นที่หน้าตัดของท่อผนังแต่ละรูปแบบ	29
4.2	คุณสมบัติของ ALUMINIUM ALLOY 6061	30
4.3	ค่าประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน.....	35
5.1	คุณสมบัติวัสดุเหล็กกล้า.....	41
6.1	คุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างรถโดยสาร	51
6.2	ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจำลองการวิเคราะห์.....	59

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	การทดสอบการพลิกคว่ำตามข้อกำหนด ECE-R66.....	4
2.2	การทดสอบการกระแทกด้านหน้า.....	6
2.3	ข้อปฏิบัติการยึดโครงสร้างรถในการทดสอบ	7
2.4	กราฟความสัมพันธ์แรงที่กระทำกับโครงสร้างและระยะการโก่งตัวของโครงสร้าง.....	8
2.5	ลักษณะของเอลิเมนต์	12
2.6	ข้อแตกต่างระหว่างระเบียบวิธีชัดแจ้งและปริยาย	13
2.7	แบบจำลองโครงรถโดยสารประเภท low floor ที่ได้รับความอนุเคราะห์โดย บริษัท เชิตชัยคอร์ปอเรชั่น จำกัด.....	15
3.1	UNIVERSAL TENSILE TESTING MACHINE (UTM).....	20
3.2	รูปแบบชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8	21
3.3	ชิ้นงานสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8	21
3.4	แบบจำลองชิ้นงานทดสอบแรงดึง	22
3.5	โครงสร้างรถโดยสารในงานวิจัยของ Agarwal และ Mthembu.....	22
3.6	กราฟความสัมพันธ์ระยะยืดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่าผลลัพธ์คงที่	23
3.7	กราฟความสัมพันธ์ค่าความเค้นสูงสุดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่าผลลัพธ์คงที่.....	24
3.8	ลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ	24
3.9	การจำลองการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ.....	25
3.10	ผลการจำลองจากงานวิจัย Agarwal และ การจำลองด้วย ANSYS® Workbench.....	26
4.1	รูปแบบของหน้าตัดท่อผนังบาง.....	29
4.2	ความสัมพันธ์ขนาดเอลิเมนต์และระยะโก่งตัว	31
4.3	ลักษณะเอลิเมนต์และขอบเขตของท่อผนังบาง.....	32
4.4	การเสียรูปของท่อผนังบางหน้าตัดวงกลม	32
4.5	กราฟเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างงานวิจัยนี้และงานวิจัยของ Quadfasel.....	33
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและระยะการโก่งตัวของท่อผนังบางหนา 2 MM.....	34
4.7	ค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8	ผลการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางแต่ละหน้าตัด 36
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการชะลอตัวของความเร่งและความหนาของท่อผนังบาง 36
5.1	โครงสร้างสำหรับการจำลองการตกกระแทกของ CRASH FRAME 39
5.2	ลักษณะของเอลิเมนต์ในการจำลองโครงสร้าง 40
5.3	วัสดุของโครงสร้าง Crash Frame 42
5.4	การจัดวางโครงสร้างก่อนปล่อยตกอิสระตามมาตรฐาน DNV 2.7-1..... 43
5.5	ขอบเขตของภาระที่กระทำต่อโครงสร้าง Crash Frame 43
5.6	กราฟสมมูลพลังงาน..... 44
5.7	กราฟเปรียบเทียบสมมูลพลังงานกับงานวิจัย ANJIKAR และ PANCHAGADE..... 45
5.8	บริเวณที่มีค่าความเคียดจากพลาสติกสูง 45
5.9	ค่าสูงสุดของ VON-MISES STRESS..... 46
6.1	โครงสร้างรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ (LOW FLOOR BUS)..... 49
6.2	ขนาดลูกตุ้มที่ใช้ชนกระแทก..... 49
6.3	ลักษณะของเอลิเมนต์ 50
6.4	การจำแนกโครงสร้างตามวัสดุและค่าค่าคุณสมบัติ ณ จุดคราก..... 51
6.5	ตำแหน่งการจับยึดโครงสร้าง 52
6.6	ขอบเขตการชนกระแทกของลูกตุ้ม 53
6.7	ลักษณะการเสียรูปของโครงสร้างในช่วงเวลาที่ต่างกัน..... 53
6.8	กราฟการดูดซับพลังงานของโครงสร้าง 54
6.9	กราฟค่าพลังงานตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่..... 55
6.10	โครงสร้างที่ถูกปรับปรุงด้วยท่อผนังบางประกอบกับโครงสร้างรถ..... 55
6.11	โครงสร้างที่ถูกปรับปรุงด้วยท่อผนังบาง 56
6.12	กราฟการดูดซับพลังงานของโครงสร้างปรับปรุง..... 56
6.13	กราฟค่าพลังงานตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่ของโครงสร้างปรับปรุง 57
6.14	ลักษณะการเสียรูปของโครงสร้างในช่วงเวลาที่ต่างกันของโครงสร้างปรับปรุง 57
6.15	กราฟเทียบระยะเวลาในการวิเคราะห์..... 58
6.16	กราฟการดูดซับพลังงานของการปรับใช้คำสั่ง VIRTUAL TOPOLOGY 58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

สถิติการเกิดอุบัติเหตุจราจรทางบกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกปี ประเภทของรถที่เกิดอุบัติเหตุ 10 อันดับแรก ส่วนใหญ่เป็นประเภทรถบรรทุกและรถโดยสาร เมื่อจำแนกตามลักษณะการเกิดอุบัติเหตุพบว่า อันดับแรกของลักษณะการชนคือการชนกระแทกด้านหน้า เช่น ชนสิ่งกีดขวาง ต้นไม้ เกาะกลางถนน และคน เป็นต้น (กลุ่มงานสถิติ, 2563) ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สิน หากมีการออกแบบและทดสอบโครงสร้างรถบรรทุกและรถโดยสารให้มีความแข็งแรงและระบบความปลอดภัยให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล จะเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดความเสียหายแก่ชีวิตได้ ทั้งนี้กระบวนการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถบรรทุกและรถโดยสารในประเทศไทยมีเพียงการทดสอบการพลิกคว่ำเท่านั้น มาตรฐานและการทดสอบการชนด้านหน้านั้นยังไม่ถูกนำมาเป็นข้อกำหนดในการผลิตโครงสร้างของรถบรรทุกและรถโดยสารที่ถูกผลิตในประเทศไทย ส่งผลให้โครงสร้างรถโดยสารขาดความน่าเชื่อถือเนื่องจากไม่มีข้อมูลการวิเคราะห์มารองรับ ตลอดจนไม่มีมาตรฐานการชนด้านหน้ามารองรับ

มาตรฐานในการทดสอบการชนด้านหน้าของรถโดยสารมีหลากหลายมาตรฐาน และมีการทดสอบที่แตกต่างกันออกไป เช่น FMVSS-208 (In Federal Motor Vehicle Safety Standard), Euro NCAP (The European New Car Assessment Programme), ECE-R29 (United Nations Economic Commission for Europe Regulation) เป็นต้น มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบรถยนต์ในประเทศไทยนั้นอ้างอิงตามมาตรฐาน ECE โดยที่มาตรฐานพลิกคว่ำที่ใช้ทดสอบรถโดยสารอ้างอิงตามมาตรฐาน ECE ข้อกำหนดที่ 66 (ECE-R66) ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษามาตรฐานการชนด้านหน้าตามมาตรฐาน ECE ซึ่งข้อกำหนดที่ใช้ในการทดสอบการชนด้านหน้าของมาตรฐาน ECE นั้นคือข้อกำหนดคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติข้อที่ 29 (ECE-R29)

การทดสอบโครงสร้างของรถโดยสารให้เป็นไปตามมาตรฐานนั้นเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตให้สูงขึ้น จึงมีการนำกระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมาช่วยในการวิเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์ที่เป็นที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน คือ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม เนื่องจากเป็นระเบียบวิธีที่มีความสามารถในการจัดการกับความซับซ้อน รวมทั้งมีผลการคำนวณที่มีความแม่นยำ (Lee and Bathe, 1993) หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ

การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นโดเมนย่อยเล็ก ๆ เรียกว่า เอลิเมนต์ (Elements) และมีจุดเชื่อมต่อ (Node) แต่ละเอลิเมนต์เข้าด้วยกันเป็นโครงตาข่าย (Mesh) ความแม่นยำของคำตอบที่ได้จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับรูปแบบการเสีรูปของเอลิเมนต์ นอกจากนี้ ระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ยังมีพฤติกรรมที่ให้ค่าความแข็งแกร่งของการวิเคราะห์โครงสร้างสูงกว่าความเป็นจริง รวมไปถึงปัญหาเรื่องความเที่ยงตรงของผลลัพธ์อีกด้วย (Felippa, 2004)

งานวิจัยนี้ศึกษา ปรับปรุง และวิเคราะห์ความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสารในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุกรณีที่มีการชนกระแทกด้านหน้า ในการทดสอบการชนด้านหน้านั้นเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตรถโดยสารทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่มากขึ้น เพื่อลดค่าใช้จ่ายและการทดสอบแบบลองผิดลองถูก ระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกนำมาปรับใช้แทนการทดสอบ โดยระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในการวิเคราะห์ด้านวิศวกรรม สามารถวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงได้ ซึ่งการวิเคราะห์แบบแม่นยำตรง (Exact Solution) ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ จึงนำระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาเป็นแนวทางในการปรับปรุงการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารเบื้องต้นก่อนการนำไปผลิตและทดสอบจริง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบชัดแจ้งเรียกว่า Explicit Dynamic ANSYS® Workbench เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการวิเคราะห์และพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองของโครงสร้างรถโดยสารภายใต้แรงกระทำด้านหน้าให้เป็นไปตามข้อกำหนด ECE-R29 โครงสร้างโดยสารที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นมานั้น ต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถรองรับแรงกระแทกจากการชนภายใต้แรงกระทำด้านหน้าได้ ก่อให้เกิดความเสียหายของโครงสร้างที่มีผลกระทบต่อผู้ขับขี่น้อยลง และเป็นไปตามข้อกำหนด ECE-R29 ทั้งยังสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับมาตรฐานความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างรถโดยสารได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างง่ายด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับการทดลองและงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารตามมาตรฐาน ECE-R29

1.2.3 เพื่อปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารให้มีความแข็งแรงและความปลอดภัยให้เป็นไปตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29

1.2.4 เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบโครงสร้างรถโดยสาร

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 วิเคราะห์แบบจำลองของโครงสร้างรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ (Low Floor Bus) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เชิดชัย คอร์ปอเรชั่น จำกัด

1.3.2 พิจารณาแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารส่วนหน้าที่มีผลภายใต้เงื่อนไขการชนกระแทกตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29

1.3.3 วิเคราะห์แบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบชัดแจ้งผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ชื่อว่า Explicit Dynamic ANSYS® Workbench

1.3.4 พิจารณาลักษณะรอยเชื่อมของโครงสร้างแบบเชื่อมต่อแข็งเกร็ง (rigid joint)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้โครงสร้างของรถโดยสารมีความแข็งแรงเป็นไปตามข้อกำหนด ECE-R29

1.4.2 เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับโครงสร้างรถโดยสารที่ผลิตและออกแบบภายในประเทศ

1.4.3 ลดต้นทุนในการสร้างและทดสอบโครงสร้างรถ



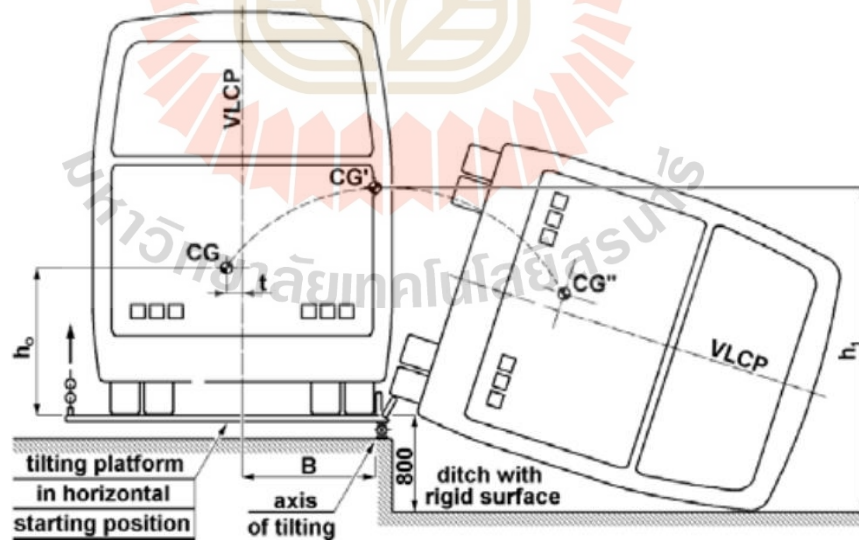
บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์ความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสารในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุกรณีที่มีการชนกระแทกด้านหน้า ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบชัดแจ้ง (Explicit) ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้ข้อสรุปดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1 มาตรฐานการทดสอบรถโดยสารในประเทศไทย

มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบรถโดยสารในประเทศไทยเป็นการทดสอบการพลิกคว่ำของโครงสร้างรถโดยสารอย่างเดียวนั้น โดยอ้างอิงตามข้อกำหนดคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติข้อที่ 66 หรือ ECE-R66 ซึ่งเป็นการทดสอบการทรงตัวของรถโดยสาร เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยขณะขับขี่บนทางลาดชัน กำหนดให้รถโดยสารที่มีความสูงมากกว่า 3.6 m ขึ้นไป ต้องมีเกณฑ์การทรงตัวไม่ต่ำกว่า 30 องศา ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การทดสอบการพลิกคว่ำตามข้อกำหนด ECE-R66

2.2 ข้อกำหนดการชนด้านหน้าของรถโดยสาร

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาเกี่ยวกับการชนกระแทกด้านหน้า มาตรฐานการชนกระแทกด้านหน้าของรถโดยสารมีมาตรฐานสากลรองรับหลากหลายมาตรฐาน เช่น FMVSS (In Federal Motor Vehicle Safety Standard) Euro NCAP (The European New Car Assessment Programme) และ ECE (United Nations Economic Commission for Europe Regulation) เป็นต้น มาตรฐานที่งานวิจัยนี้ให้ความสนใจ คือ ECE เนื่องจากเป็นมาตรฐานที่ประเทศไทยนั้นอ้างอิงในการผลิตโครงสร้างของยานพาหนะ ซึ่งมีรายละเอียดของข้อกำหนดในการทดสอบดังนี้

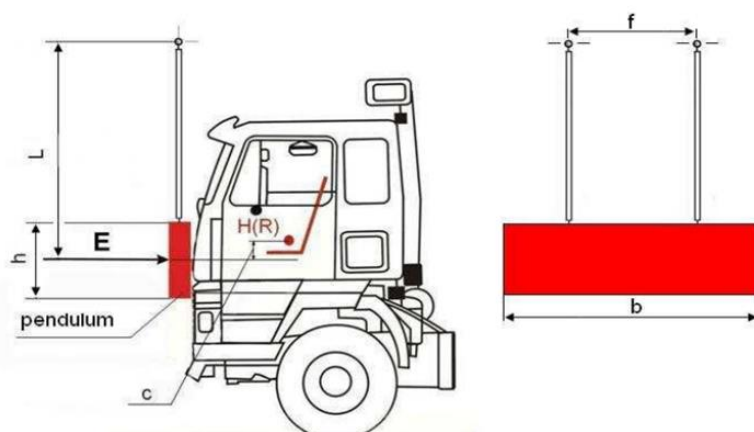
2.2.1 ข้อกำหนดคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติข้อที่ 29 (ECE-R29)

ข้อกำหนดคณะกรรมการมาตรฐานการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติข้อที่ 29 เป็นข้อกำหนดที่ใช้เป็นมาตรฐานในการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างส่วนหน้าของรถโดยสารและรถบรรทุก มีการทดสอบแยกย่อยด้วยกัน 3 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบ A (การทดสอบการชนกระแทกด้านหน้า) การทดสอบ B (การทดสอบการชนกระแทกกับเสา) และ การทดสอบ C (การทดสอบความแข็งแรงของหลังคา) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสนใจเพียงการทดสอบ A เท่านั้น โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

2.2.1.1 การทดสอบ A (การทดสอบชนกระแทกด้านหน้า)

การทดสอบ A คือการทดสอบชนกระแทกด้านหน้าที่มีจุดประสงค์เพื่อประเมินความต้านทานของห้องโดยสารเมื่อเกิดอุบัติเหตุชนกระแทกด้านหน้า ลูกตุ้มที่ใช้ทดสอบการชนกระแทกต้องทำจากเหล็กและมวลมีมวลไม่น้อยกว่า 1,500 kg มีความกว้าง 2,500 mm และ สูง 800 mm (ระบุไว้ที่ b และ h ในรูปที่ 2.2) ขอบจะต้องโค้งมนให้มีรัศมีความโค้ง $10\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ ถูกแขวนไว้โดยอิสระโดยคานสองคานที่ยึดไว้อย่างแน่นหนาและเว้นระยะห่างอย่างน้อย 1,000 mm (ระยะ f) คานต้องมีความยาวไม่น้อยกว่า 3,500 mm จากแกนของช่วงล่างถึงศูนย์กลางเรขาคณิตของลูกตุ้ม (ระยะ L) ลูกตุ้มจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ในตำแหน่งแนวตั้งจุดศูนย์กลางถ่วงอยู่ที่ $50\text{ mm} +5/-0\text{ mm}$ (ระยะ c) ใต้จุด R ของที่นั่งคนขับ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.2

พลังงานในการกระแทกจะมีค่า 29.4 kJ ในกรณีของยานพาหนะที่มีมวลรวมไม่เกิน 7,500 kg และ 55 kJ ในกรณียานพาหนะที่มีมวลรวมเกิน 7,500 kg

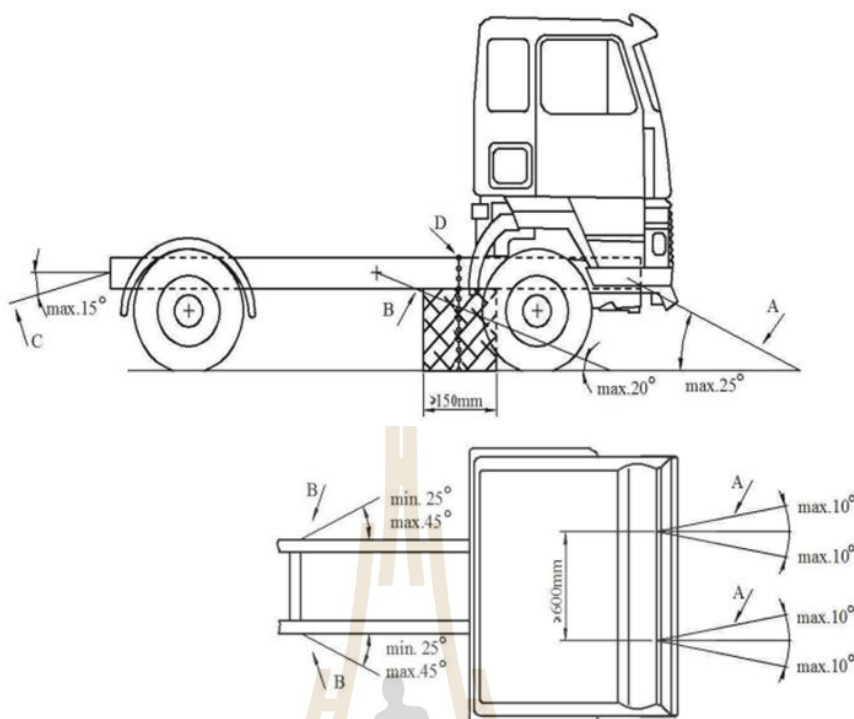


รูปที่ 2.2 การทดสอบการกระแทกด้านหน้า

2.2.1.2 ข้อปฏิบัติการยึดโครงสร้างรถในการทดสอบชนกระแทกด้านหน้า

การทดสอบชนกระแทกด้านหน้าจะต้องนำไปใช้กับห้องโดยสารที่ติดตั้งบนยานพาหนะด้วยวิธีต่อไปนี้

- 1) โซ่หรือเชือกแต่ละเส้นต้องทำจากเหล็กกล้าและต้องรับแรงดึงได้อย่างน้อย 10,000 kg
- 2) โครงสร้างตามยาวของโครงรถต้องรองรับด้วยแท่นไม้ที่มีความกว้างของหน้าตัดไม่น้อยกว่า 150 mm ดังแสดงในรูปที่ 2.3
- 3) การเคลื่อนตัวไปด้านหลังของโครงรถจะต้องถูกจำกัดด้วยโซ่หรือเชือก A (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) ที่ยึดกับด้านหน้าของโครงรถอย่างสมมาตร และ จุดยึดห่างกันไม่น้อยกว่า 600 mm โซ่หรือเชือกนั้นจะต้องทำมุมกับพื้นราบไม่เกิน 25° และเมื่อวัดมุมของโซ่หรือเชือกมุมมองด้านบน จำต้องทำมุมไม่เกิน 10° เมื่อเทียบกับแกนตามยาวของโครงรถ
- 4) การเคลื่อนที่ด้านข้าง (ด้านซ้ายและด้านขวา) จะต้องถูกจำกัดด้วยโซ่หรือเชือก B ที่ยึดติดกับโครงรถ ระยะระหว่างจุดยึดกับรถจะต้องไม่เกิน 5 m และห่างจากด้านหน้ารถมากกว่า 3 m โซ่หรือเชือกทำมุมกับพื้นราบไม่เกิน 20° และเมื่อวัดมุมของโซ่หรือเชือกมุมมองด้านบนต้องทำมุมไม่น้อยกว่า 25° และไม่เกิน 45° เมื่อเทียบกับแกนตามยาวของโครงรถ
- 5) โซ่หรือเชือก C จะต้องรับแรงดึงได้มากกว่า 10 kN มุมของโซ่หรือเชือก C กับแนวราบต้องไม่เกิน 15°



รูปที่ 2.3 ข้อปฏิบัติการยึดโครงสร้างรถในการทดสอบ

2.2.2 เงื่อนไขในการผ่านการทดสอบ

เงื่อนไขในการผ่านการทดสอบตามข้อกำหนด ECE R-29 โดยอ้างอิงจากบทความ UNECE Information Document (2009) มีเนื้อหาสำคัญดังนี้

- 2.2.2.1 ไม่มีชิ้นส่วนของโครงสร้างรถลำพื้นที่ผู้ขับขี่
- 2.2.2.2 พลังงานจากการชนกระแทกส่งถ่ายไปยังผู้ขับขี่ไม่เกินร้อยละ 30 ของพลังงานทั้งหมดที่ระบุไว้ตามข้อกำหนด

2.2.2.3 หลังจากเกิดอุบัติเหตุการชน ผู้ขับขี่ต้องสามารถออกจากที่นั่งคนขับได้

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานการชนกระแทก

โครงสร้างทางกลหรือโครงสร้างทางโยธาทั่วไปนั้น จะมีการรับภาระแรงที่กระทำในรูปแบบสถิตยศาสตร์ มีการเสียรูปในแบบยืดหยุ่นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น โครงสร้างประเภทนี้จึงต้องพิจารณา ค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดและความเค้นเป็นหลัก ในทางกลับกันโครงสร้างที่ใช้ในการรับการชนกระแทกจะพิจารณาปัจจัยที่แตกต่างกันออกไป โดยจะพิจารณาค่าของพลังงานการชนกระแทกเป็นหลัก ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานนั้นมีหลากหลายปัจจัย ตัวอย่างเช่น วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป รูปร่างหน้าตัด ความหนา ลักษณะของโครงสร้าง รวมถึงน้ำหนัก

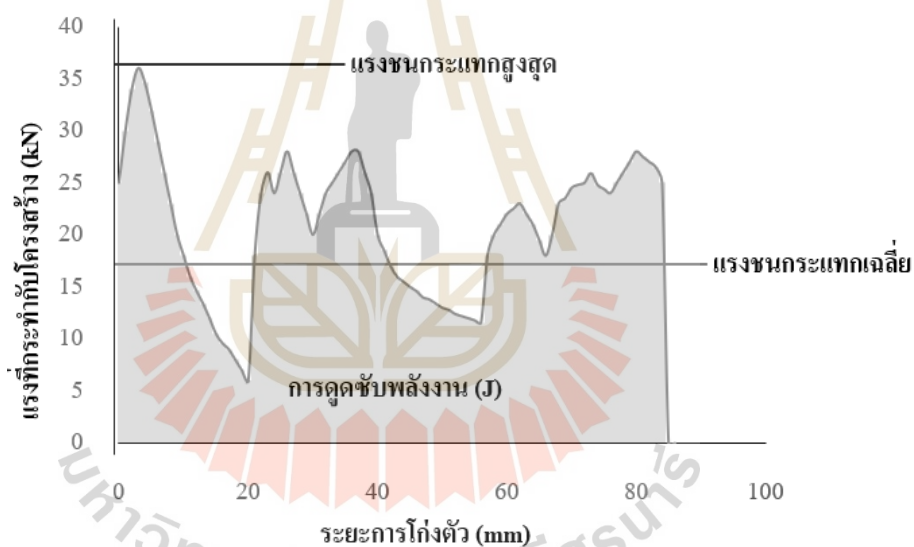
ของโครงสร้าง ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับพลังงาน การหาประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานสามารถพิจารณาได้จากตัวชี้วัด ดังต่อไปนี้

2.3.1 การดูดซับพลังงาน (Energy Absorption, EA)

การดูดซับพลังงาน หมายถึง ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ที่กระทำกับโครงสร้าง ค่าการดูดซับพลังงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.1 โดยหาจากพื้นที่ใต้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับโครงสร้างและระยะการโก่งตัวของโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.4

$$EA(dx) = \int_0^{dx} F(x) dx \quad (2.1)$$

โดยที่ตัวแปร F คือ แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง และ x คือ ระยะการโก่งตัวของโครงสร้าง



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์แรงที่กระทำกับโครงสร้างและระยะการโก่งตัวของโครงสร้าง

2.3.2 การดูดซับพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Absorption, SEA)

การดูดซับพลังงานจำเพาะ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ที่กระทำกับโครงสร้างต่อมวลของโครงสร้าง กล่าวคือ การดูดซับพลังงานส่วนต่อมวล การดูดซับพลังงานจำเพาะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$SEA = EA/m \quad (2.2)$$

โดยที่ตัวแปร m คือ มวลของโครงสร้าง

2.3.3 แรงชนกระแทกเฉลี่ย (Mean Crush Force, MCF)

แรงชนกระแทกเฉลี่ย หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงทั้งหมดที่กระทำกับโครงสร้าง คำนวณได้จากสมการที่ 2.3

$$MCF = EA(dx)/dx \quad (2.3)$$

2.3.4 แรงชนกระแทกสูงสุด (Peak Crushing Force, PCF)

แรงชนกระแทกสูงสุด หรือ PCF หมายถึง ภาระแรงสูงสุดที่กระทำกับโครงสร้าง โดยค่าแรงชนกระแทกสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 2.4 แรงชนกระแทกเฉลี่ยควรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานที่สูง

2.3.5 ประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก (Crush Force Efficiency, CFE)

ประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงชนกระแทกเฉลี่ยต่อแรงชนกระแทกสูงสุด สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ 2.4 โดยค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทกบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงของโครงสร้าง ค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทกอุดมคติมีค่าเท่ากับ 100%

$$CFE = (MCF/PCF) \times 100 \quad (2.4)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับโครงสร้างและระยะการโก่งตัวของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 2.4 ค่าที่แสดงในกราฟคือ ค่าการดูดซับพลังงาน ค่าแรงชนกระแทกเฉลี่ย และค่าแรงชนกระแทกสูงสุด

2.4 การเลือกรูปแบบคินตัวและแบบถาวร

การทดสอบแรงดึงแกนเดียวของวัสดุประเภทโลหะจะก่อให้เกิดการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ ในการทดสอบจะมีแรงกระทำต่อชิ้นงานทดสอบ และเมื่อนำแรงกระทำนั้นออกแล้ว หากชิ้นงานทดสอบสามารถคืนรูปกลับสู่ขนาดเริ่มต้นได้ ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบนั้นจะถูกเรียกว่า การเสียรูปแบบคินตัว (Elastic Deformation) เนื่องจากระหว่างเกิดการเสียรูปแบบคินตัว อนุภาคของโลหะประเภทนี้จะเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อนำแรงกระทำออกจากชิ้นงานอนุภาคสามารถกลับคืนสู่จุดเริ่มต้น ทำให้ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบสามารถกลับสู่รูปทรงเดิมได้ ในทางกลับกัน หากอนุภาค

ของโลหะสามารถเคลื่อนได้เป็นระยะไกลขึ้น และ ไม่สามารถกลับสู่ระยะเริ่มต้นได้ ทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการเสียรูปแบบไม่คืนตัว หรือ การเสียรูปถาวร (Plastic Deformation)

2.5 ระเบียบวิธีพลังงานของการเสียรูปแบบพลาสติก

ในกรณีการเสียรูปแบบพลาสติกเนื่องจากแรงภายนอก กำหนดช่วงเวลากระทำเพื่อคำนวณพลังงานจลน์ของโครงสร้างจากสมดุลพลังงาน ดังสมการที่ 2.5

$$E_{in} = D + W^e + K \quad (2.5)$$

โดยที่	E_{in}	คือ งานเนื่องจากแรงกระทำ
	D	คือ พลังงานกระจายเนื่องจากการเสียรูปแบบถาวร
	W^e	คือ งานที่ถูกกระทำ ในช่วงการเสียรูปแบบคืนตัว
	K	คือ พลังงานจลน์ของโครงสร้าง

2.6 อัตราความเครียด

อัตราความเครียด คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดต่อระยะเวลาที่เปลี่ยนไป สามารถหาอัตราความเครียดได้จากสมการที่ 2.6

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\Delta t} = \frac{(l-l_0)}{l_0 \Delta t} \quad (2.6)$$

โดยที่	$\dot{\epsilon}$	คือ อัตราความเครียด
	ϵ	คือ ความเครียด
	Δt	คือ ระยะเวลาที่เปลี่ยนไป
	l	คือ ระยะที่เปลี่ยนไป
	l_0	คือ ระยะเริ่มต้น

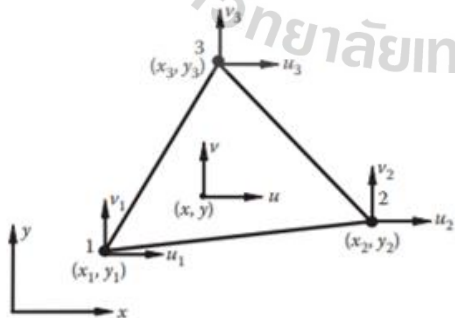
ค่าอัตราความเครียดเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเลือกวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีการขัดแจ้งและปริยาย ซึ่งจะถูกกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.8

2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

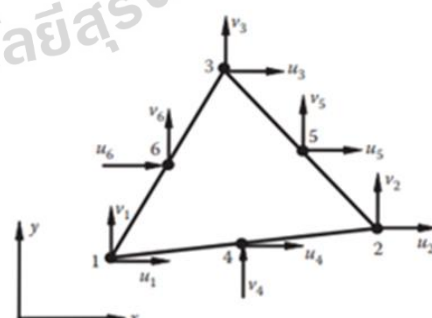
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method : FEM) เป็นการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมเชิงตัวเลขสำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยพร้อม ๆ กับสมการปริพันธ์ ผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากการกำจัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ หรือการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นระบบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์ทางคณิตศาสตร์

การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้ 1) ก่อนการประมวลผล (Pre-Processing) 2) หาคำตอบ (Solving) 3) แสดงผล (Post-Processing) และ 4) การปรับปรุงออกแบบ (Redesign) ขั้นตอนที่มีความสำคัญมากที่สุด คือ ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนก่อนการประมวลผล ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะทำการเตรียมรูปร่างของปัญหา หรือ Geometry หลังจากนั้นจะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาเป็นชิ้นเล็ก ๆ ด้วยเอลิเมนต์ (Element) และมีการกำหนดขอบเขตต่าง ๆ ของปัญหา เมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จึงจะสามารถดำเนินการในขั้นตอนถัดไปได้

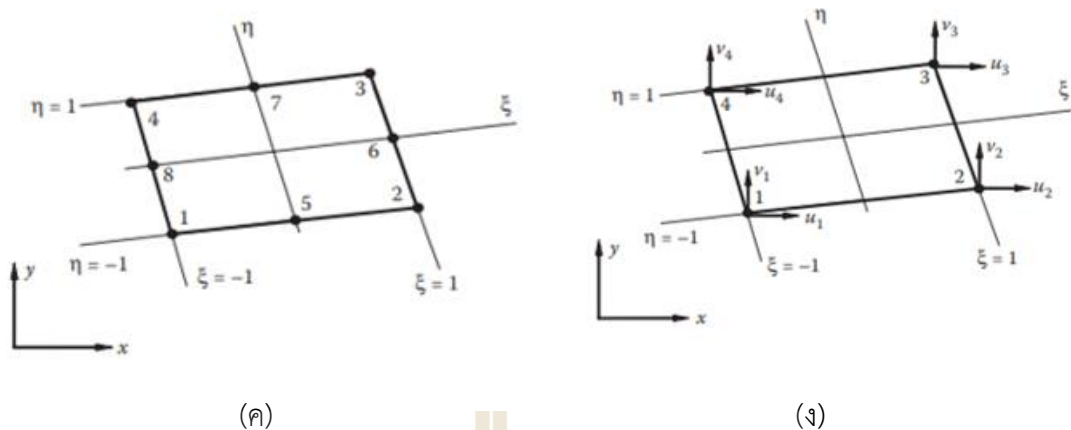
โดยทั่วไปรูปร่างของเอลิเมนต์จะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปร่าง คือ รูปร่างสี่เหลี่ยม และ สามเหลี่ยม นอกจากการจำแนกเอลิเมนต์ตามลักษณะรูปร่างที่แตกต่างกันแล้ว ยังสามารถจำแนกลักษณะของเอลิเมนต์ได้จากสมการที่ใช้กำหนดเอลิเมนต์นั้น ๆ อีกด้วย งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเอลิเมนต์ 4 ลักษณะ โดยรูปที่ 2.5 (ก) และ (ข) มีสมการอนุพันธ์อันดับ 1 เป็นสมการของเอลิเมนต์ ซึ่งทำให้มีจำนวนจุดเชื่อมต่อ (Node) ที่มุมของรูปร่างเท่านั้น ต่างจากเอลิเมนต์ในรูปที่ 2.5 (ข) และ (ง) ที่มีสมการอนุพันธ์อันดับ 2 เป็นสมการของเอลิเมนต์ ซึ่งมีจำนวนจุดเชื่อมต่อที่มากกว่า



(ก)



(ข)



รูปที่ 2.5 (ก) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ (ข) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 6 จุดต่อ

(ค) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ (ง) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ

1) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 3 จุดต่อ (Constant Strain Triangle) เป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีด้านสามด้านเป็นเส้นตรง ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่จุดยอดสามจุดของรูป

2) เอลิเมนต์สามเหลี่ยม 6 จุดต่อ (Quadratic Triangular Element) เป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีด้านสามด้านเป็นเส้นโค้งพาราโบลา โดยทั้ง 6 จุดต่ออาจจะไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน ประกอบด้วย 3 จุดต่อที่จุดยอดสามจุดของรูปและอีก 3 จุดต่อบนด้านทั้งสามด้าน

3) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 4 จุดต่อ (Linear Quadrilateral Element) เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีด้านสี่ด้านเป็นเส้นตรง ประกอบด้วย 4 จุดต่อที่จุดยอดสี่จุดของรูป

4) เอลิเมนต์สี่เหลี่ยม 8 จุดต่อ (Quadratic Quadrilateral Element) เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่มีด้านสี่ด้านเป็นเส้นโค้งพาราโบลา โดยทั้ง 8 จุดต่ออาจจะไม่อยู่ในระนาบเดียวกัน ประกอบด้วย 4 จุดต่อที่จุดยอดสี่จุดของรูปและอีก 4 จุดต่อบนด้านทั้งสี่ด้าน

2.7.1 Virtual Topology in ANSYS

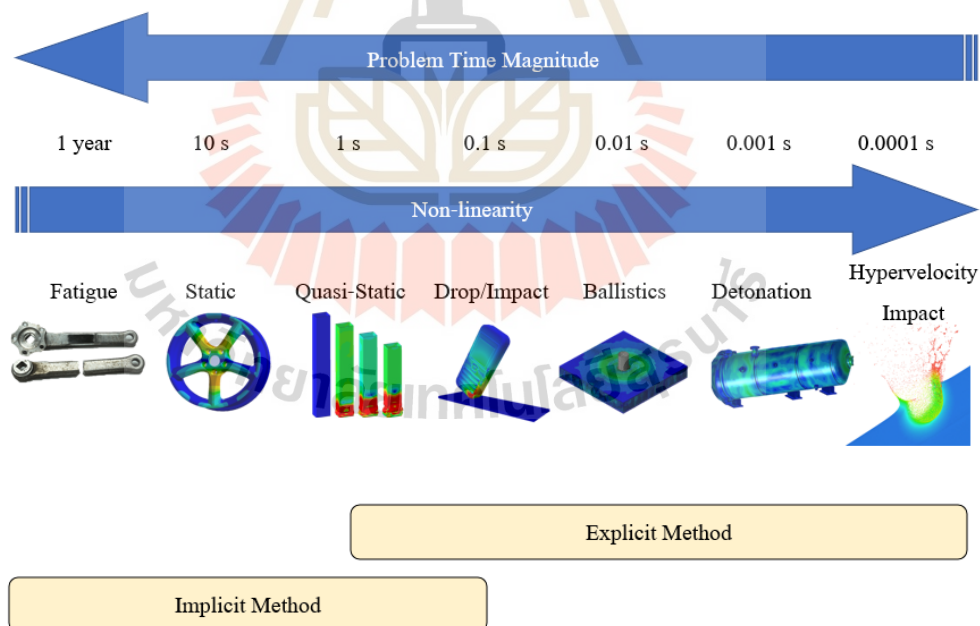
หลังจากการนำแบบจำลองเข้าสู่โปรแกรม ANSYS หากใช้เอลิเมนต์ตั้งต้นของโปรแกรมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์อาจทำให้ใช้ทรัพยากรในการจำลองค่อนข้างมาก คำสั่ง Virtual Topology จะช่วยลดจำนวนเอลิเมนต์ให้กับการจำลอง โดยการทำให้รูปร่างของเอลิเมนต์เป็นรูปแบบอย่างง่าย การรวมผิวบางส่วนที่สามารถรวมกันได้เข้าด้วยกัน หรือ แยกผิวบางส่วนที่มีความซับซ้อนออกจากกัน เพื่อให้เอลิเมนต์สามารถอยู่ในรูปร่างอย่างง่ายได้ คำสั่งนี้สามารถช่วยลดเอลิเมนต์ทรัพยากรในการวิเคราะห์ได้ ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาในการวิเคราะห์ลดลงด้วย

2.8 วิธีการชัดแจ้งและปริยาย

วิธีการชัดแจ้ง (Explicit methods) และวิธีการปริยาย (Implicit methods) เป็นวิธีการที่ถูกใช้ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ (Ordinary differential equations) และสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ที่ขึ้นกับเวลา ข้อแตกต่างระหว่างการวิเคราะห์ด้วยวิธีการชัดแจ้งและวิธีการปริยาย คือ ช่วงของระยะเวลาที่ภาระกระทำต่อชิ้นงานหรือโครงสร้าง

การวิเคราะห์ด้วยวิธีชัดแจ้งนั้นเป็นวิธีแก้ปัญหาในเหตุการณ์ชิ้นงานหรือโครงสร้างได้รับภาระกระทำแบบไดนามิก ควรใช้วิธีการที่ชัดแจ้งเมื่อชิ้นงานหรือโครงสร้างมีอัตราความเครียดมากกว่า 10 หน่วย/วินาที ซึ่งโดยทั่วไปนั้นภาระที่กระทำกับชิ้นหรือหรือโครงสร้างประเภทนี้จะเป็นภาระแบบชนกระแทกหรือการตกอย่างอิสระ เช่น รถยนต์ชน เหตุการณ์ซีปนาวูธ เป็นต้น

การวิเคราะห์ด้วยวิธีปริยายมีภาระกระทำต่อชิ้นงานหรือโครงสร้างแบบสถิต ช่วงระยะเวลาที่ภาระกระทำต่อโครงสร้างนั้นยาวนานกว่าวิธีปริยาย และมีผลกระทบของอัตราความเครียดต่อโครงสร้างน้อย ความแตกต่างระหว่างวิธีชัดแจ้งและปริยายแสดงในรูปที่ 2.6 (VanLehn et al., 2004)



รูปที่ 2.6 ข้อแตกต่างระหว่างระเบียบวิธีชัดแจ้งและปริยาย

งานวิจัยนี้ศึกษาและวิเคราะห์ความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสารในกรณีเกิดการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29 เป็นการวิเคราะห์ที่ขึ้นอยู่กับช่วงระยะเวลาสั้น ทฤษฎีในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของวิธีการตัดแฉงซึ่งมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

2.8.1 สมการอนุพันธ์สำหรับวิธีตัดแฉง

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation) ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ด้วยวิธีตัดแฉงเป็นสมการที่กล่าวถึงการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน สำหรับการอนุรักษ์พลังงานสามารถหาได้จากสมการที่ 2.7

$$E = \frac{1}{\rho} (\sigma_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\epsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\epsilon}_{xy} + 2\sigma_{yz}\dot{\epsilon}_{yz} + 2\sigma_{zx}\dot{\epsilon}_{zx}) \quad (2.7)$$

โดยที่ E คือ พลังงานทั้งหมด

ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุ

σ คือ ความเคียด

ϵ คือ ความเค้น

2.8.2 การคำนวณขั้นตอนเวลาสำหรับวิธีตัดแฉง

การแก้ปัญหาด้วยวิธีตัดแฉงจำเป็นต้องทำให้มั่นใจขนาดการเพิ่มของขั้นตอนเวลา (timestep) มีความเหมาะสม เพื่อให้การวิเคราะห์มีความเสถียรและความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์ ซึ่งเกณฑ์ของขั้นตอนเวลาถูกกำหนดไว้ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$\Delta t \leq f \left[\frac{h}{c} \right]_{\min} \quad (2.8)$$

โดยที่ Δt คือ เวลาที่เพิ่มขึ้น

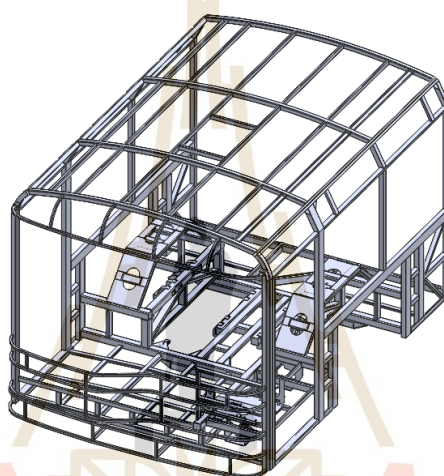
f คือ ขั้นตอนเวลา

h คือ ขนาดของเอลิเมนต์

c คือ ความเร็วในเสียงของเอลิเมนต์

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษานี้ศึกษาการวิเคราะห์ความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสาร ในกรณีเกิดการชนกระแทกด้านหน้าของรถประเภท low floor ที่ออกแบบโดยบริษัท เซิตซ์คอร์ปอเรชั่น จำกัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งอ้างอิงตามข้อกำหนดคณะกรรมการการเศรษฐกิจยุโรป แห่งสหประชาชาติข้อที่ 29 เป็นการศึกษาพฤติกรรมแบบพลวัต และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการช่วยวิเคราะห์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชนกระแทกด้วยความเร็วต่ำ และการชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างรถโดยสาร ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารประเภท low floor ที่ได้รับความอนุเคราะห์ โดยบริษัท เซิตซ์คอร์ปอเรชั่น จำกัด

2.9.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชนความเร็วต่ำ

Quadfasel et al. (2019) ศึกษาการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางที่ทำจากวัสดุ High Manganese Steel หน้าตัดหกเหลี่ยม ซึ่งงานทดสอบมีความหนา 1 mm, 0.8 mm, 0.7 mm และ 0.65 mm เปรียบเทียบการทดสอบจริงและการจำลอง ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ ABAQUS 6.14 ภายใต้ภาระแรงกระทำการชนกระแทกที่ความเร็วต่ำด้วยความเร็ว 6.2 m/s กำหนดเอลิเมนต์ให้แบบจำลองเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยม (Quadratic Element) พบว่าการทดสอบจริงและการจำลองมีระยะและลักษณะการเสียรูปที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ ยังพบว่าความหนาของท่อผนังบางนั้นมีผลต่อค่าการชะลอตัวของความเร่ง (Deceleration) โดยท่อผนังบางที่มีความหนามาก จะมีค่าการชะลอตัวของความเร่งมากกว่าท่อผนังบางที่มีความหนาน้อยกว่า ทั้งนี้ โครงสร้างที่มีการชะลอตัวของความเร่งสูง

ไม่ใช่โครงสร้างที่ดีเสมอไป จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าการชะลอตัวในระยะที่ปลอดภัยกับผู้โดยสารด้วย โดยต้องมีค่าการชะลอตัวของความเร่งไม่เกิน 15 เท่าของค่าความเร่งโน้มถ่วง (15 g)

Vinayagar และ Senthil (2017) ทำการศึกษาการชนกระแทกของท่อผนังบาง 2 ชั้น ท่อผนังบางถูกกำหนดให้ชั้นนอกสุดมีลักษณะเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 90 mm ที่ความหนา 2 mm ทำการศึกษาค่าความแตกต่างของท่อผนังบางชั้นที่ 2 โดยการกำหนดให้มีหน้าตัดที่แตกต่างกัน คือ หน้าตัดวงกลม หน้าตัดสามเหลี่ยม และหน้าตัดหกเหลี่ยม และปรับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผนังบางชั้นที่ 2 ตั้งแต่ 60 mm ถึง 80 mm เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างท่อผนังบางแบบชั้นเดียวและแบบ 2 ชั้น ด้วยความเร็วในการชนกระแทก 0.167 mm/s โดยไม่มีการยึดฐานของท่อผนังบาง พบว่าท่อผนังบางแบบ 2 ชั้นสามารถดูดซับพลังงานการชนกระแทกได้ดีกว่าท่อผนังบางแบบชั้นเดียว และความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางแบบ 2 ชั้นหน้าตัดหกเหลี่ยม เป็นรูปแบบที่สามารถดูดซับพลังงานได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับหน้าตัดอื่น ๆ นอกจากนี้เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผนังบางยังมีผลต่อค่าการดูดซับพลังงานอีกด้วย หากท่อผนังบางรูปแบบ 2 ชั้นมีระยะห่างระหว่างทั้ง 2 ชั้นน้อย จะสามารถดูดซับพลังงานการชนกระแทกได้มากกว่าท่อที่มีระยะห่างระหว่างทั้ง 2 ชั้นที่มากกว่า

2.9.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์การชนด้านหน้า

Kerthikeyan et al. (2019) ศึกษาการชนกระแทกด้านหน้าของกันชนรถยนต์ขนาดเล็ก ตามมาตรฐาน FMVSS ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench โดยวัสดุที่ใช้วิเคราะห์มีด้วยกัน 3 วัสดุ ได้แก่ ABS, Glass-Fiber และ Polymer 30% Glass-Fiber และแบ่งลักษณะการชนออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การชนด้านหน้าแบบเต็มรูปแบบ และการชนด้านหน้าแบบครึ่งกันชน พบว่าระยะการยุบตัวของกันชนด้านหน้าแบบเต็มรูปแบบของที่ทำจาก ABS มีระยะการยุบตัวที่มากที่สุด มีการยุบตัวอยู่ที่ 77.4 mm และค่าการยุบตัวของ Glass-Fiber และ Polymer 30% Glass-Fiber มีค่าอยู่ที่ 75.68 และ 75.23 mm ตามลำดับ และค่าระยะการยุบตัวของการชนแบบครึ่งกันชนที่ทำจาก ABS มีระยะการยุบตัวที่มากที่สุดเช่นกัน โดยมีการยุบตัวอยู่ที่ 108.02 mm และค่าการยุบตัวของ Glass-Fiber และ Polymer 30% Glass-Fiber มีค่าอยู่ที่ 104.83 และ 104.75 mm ตามลำดับ

Fripin et al. (2019) ศึกษาการชนกระแทกด้านหน้าของรถโดยสารในประเทศมาเลเซียภายใต้มาตรฐาน ECE-R29 และ NCAP ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ ABAQUS มาตรฐานทั้ง 2 มาตรฐานมีการกำหนดขอบเขตที่แตกต่างกัน คือ ข้อกำหนด ECE-R29 กำหนดให้โครงสร้างของรถโดยสารถูกชนกระแทกด้วยลูกตุ้มที่มีขนาด 1,000 mm x 800 mm และมีน้ำหนักมากกว่า 1,500 kg ชนเข้ากับโครงสร้างด้านหน้าของรถโดยสาร ส่วนมาตรฐาน NCAP นั้นกำหนดให้รถโดยสารเคลื่อนที่ชนกับผนังแข็งเกร็งที่ความเร็ว 56 km/h โดยผลลัพธ์ที่ได้พบว่าพลังงานในการชนของข้อกำหนด

ECE-R29 นั้นต่ำกว่าข้อกำหนด NCAP โดยมีค่าพลังงานอยู่ที่ 55 kJ และ 142 kJ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม โครงสร้างที่ทดสอบตามข้อกำหนด ECE-R29 มีการเสียรูปของโครงสร้างด้านหน้ามากกว่าการทดสอบ NCAP



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้แนะนำให้เสนอการวิเคราะห์ความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างรถโดยสารในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุการชนกระแทกด้านหน้าของรถประเภท low floor ที่ออกแบบโดยบริษัท เชิดชัย คอร์ปอเรชั่น จำกัด อ้างอิงมาตรฐานในการทดสอบตามข้อกำหนด ECE-R29 พร้อมทั้งปรับปรุงให้โครงสร้างมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น งานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ โดยผ่านโปรแกรม Explicit Dynamic ANSYS® Workbench

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยได้ดำเนินการตามลำดับต่อไปนี้

3.1.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับการชนด้านหน้าของรถโดยสารตามข้อกำหนดคณะกรรมการการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติข้อที่ 29 ซึ่งเป็นการศึกษาพฤติกรรมแบบพลวัต จึงทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชนที่ความเร็วต่ำ การทดสอบวัตถุตกอิสระ แล้วจึงศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชนกระแทกด้านหน้าของรถโดยสารต่อไป

3.1.2 ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

ตรวจสอบความถูกต้องการวิเคราะห์แบบจำลองของโปรแกรม Explicit Dynamic ANSYS® Workbench สามารถแบ่งการตรวจสอบเป็น 2 ขั้นตอน คือ การจำลองขึ้นงานอย่างง่าย และการจำลองโครงสร้างอย่างง่าย โดยเปรียบจากการผลารทดลองและงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

3.1.3 วิเคราะห์แบบจำลองการชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างรถโดยสาร

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์เรียบร้อยแล้ว จึงทำการวิเคราะห์การชนกระแทกด้านหน้าของแบบจำลองโครงสร้างรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ (low floor) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เชิดชัย คอร์ปอเรชั่น จำกัด ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench และกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตในการจำลองตามข้อกำหนดคณะกรรมการการเศรษฐกิจยุโรปแห่งสหประชาชาติข้อที่ 29

3.1.4 ปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารและระเบียบวิธีชัดเจน

เมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างรถในแบบจำลองแรกแล้ว จึงทำการปรับปรุงโครงสร้างแบบจำลองเดิมให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งความเสียหายมาที่บุคคลผู้ขับขี่ให้น้อยลง

สามารถลดต้นทุนในการผลิต และ ทำการปรับปรุงการวิเคราะห์โครงสร้างให้มีความสามารถในการวิเคราะห์ให้มีความแม่นยำ และ รวดเร็วมากขึ้น

3.1.5 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

นำผลการทดสอบทั้งหมดที่ทดสอบด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench มาวิเคราะห์ เพื่อเปรียบเทียบหาโครงสร้างที่ดีที่สุด จากนั้นอภิปรายและสรุปผลการทำวิจัย

3.2 สถานที่ในการศึกษาวิจัย

ศึกษาวิจัย ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา และ บริษัท เชิดชัย คอร์ปอเรชั่น จำกัด 1075 ถนนมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้สภาวะการชนกระแทกด้านหน้าตามมาตรฐานยุโรป ข้อกำหนดที่ 29 สามารถแบ่งเครื่องมือและอุปกรณ์ในการศึกษาวิจัยได้ 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 เครื่องทดสอบแรงดึง

ในการตรวจความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์มีการตรวจสอบโดยเปรียบเทียบจากการทดสอบชิ้นงานอย่างและโครงสร้างอย่างง่าย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการทดสอบชิ้นงานอย่างง่าย โดยการทดสอบการดึงชิ้นงานทดสอบขอวัสดุ RST 4003 ด้วยเครื่อง Universal Tensile Testing Machine (UTM) และเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานเพื่อหาความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์



รูปที่ 3.1 Universal Tensile Testing Machine (UTM)

3.3.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

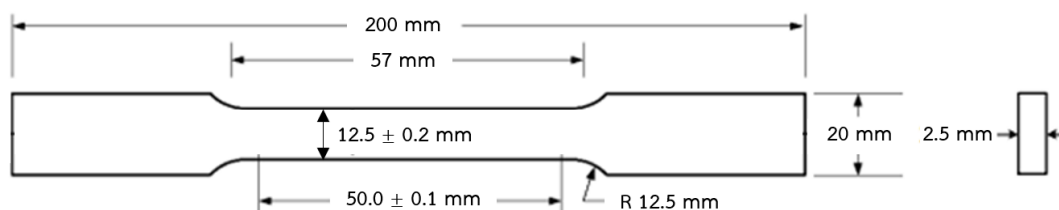
โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การชนกระแทกนั้นมีหลากหลาย โปรแกรม อาทิ ABAQUS, ANSYS LS-DYNA และ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench เป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมแบบพลวัต โปรแกรมดังกล่าวในข้างต้นทุกโปรแกรมมีงานวิจัยที่ยืนยันสามารถความถูกต้องแม่นยำของการวิเคราะห์ งานวิจัยนี้เลือกที่จะใช้โปรแกรม Explicit Dynamic ANSYS® Workbench ในการวิเคราะห์

3.4 ตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับการทดสอบ

ในงานวิจัยนี้พิจารณาการทดสอบแรงดึงเทียบกับผลการจำลองของชิ้นทดสอบที่ทำจากวัสดุ Stainless Steel RST 4003 ซึ่งเป็นหนึ่งในวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างของรถโดยสารที่ศึกษาในงานวิจัย อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบแรงดึงสำหรับกลุ่มโลหะ ASTM E8: Standard Test Methods for Tension of Metallic Materials (Nguyen et al., 2018) กำหนดขึ้นโดย ASTM (American Society for Testing and Materials) ใช้เพื่อทดสอบสมบัติวัสดุ โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังต่อไปนี้

3.4.1 เตรียมชิ้นงานทดสอบแรงดึง

ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบแรงดึงทำจากวัสดุ Stainless Steel RST 4003 ที่มีความหนา 2.5 mm โดยจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E8 ซึ่งกำหนดรูปแบบของชิ้นทดสอบไว้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รูปแบบชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8

3.4.2 การทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุด้วยการดึงชิ้นงานที่ความเร็วต่ำให้ยืดออกในแนวแกนจนเกิดความเสียหาย ภาระที่กระทำต่อชิ้นงานทดสอบนั้นต้องเป็นภาระแรงดึงเท่านั้น งานวิจัยนี้ทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 5 ชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำการทดสอบแรงดึงด้วยเครื่อง INSTRON 5582 Tensile Test 100 kN ณ อาคารเครื่องมือ 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ความเร็วในการดึงชิ้นงานอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E8 ที่ความเร็ว 0.9 mm/s



รูปที่ 3.3 ชิ้นงานทดสอบแรงดึงตามมาตรฐาน ASTM E8

3.4.3 การจำลองการทดสอบแรงดึง

แบบจำลองชิ้นงานทดสอบแรงดึงขึ้นรูปโดยโปรแกรม SOLIDWORKS ตามรูปแบบมาตรฐานของการทดสอบ ASTM E8 และนำแบบจำลองเข้าโปรแกรม Explicit Dynamic ANSYS® Workbench แบบจำลองถูกกำหนดให้ถูกยึดตรึง 1 ด้าน (Fixed Support) และอีกด้านถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ที่ความเร็ว (Velocity) 0.9 mm/s ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ขนาดของเอลิเมนต์ถูกกำหนดไว้ที่ขนาด 0.1 mm ถึง 5 mm เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของค่าผลลัพธ์ จากการหาค่าคงที่ของผลลัพธ์ (Convergence Result)



รูปที่ 3.4 แบบจำลองชิ้นงานทดสอบแรงดึง

3.5 ตรวจสอบความถูกต้องเบื้องต้นของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับงานวิจัยอื่น

การจำลองเพื่อวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จำเป็นต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ผ่านการเปรียบเทียบการทดสอบกับแบบจำลองไปแล้ว แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความถูกต้องและเพิ่มความน่าเชื่อถือของการจำลองมากขึ้น จึงได้ศึกษาและเปรียบเทียบผลการจำลองกับงานวิจัยอื่น ๆ เพิ่มเติม โดยมีงานวิจัยที่ทำการเปรียบเทียบดังนี้

3.5.1 งานวิจัยระเบียบวิธีสถิต (Static Method)

Agarwal และ Mthembu (2021) ศึกษาการรับแรงแบบสถิตของโครงสร้างรถโดยสารผ่านโปรแกรม ABAQUS โดยให้โครงสร้างรถรับแรงขนาด 128,511 N บริเวณขอบของโครงสร้าง และยึดที่ปลายทั้ง 2 ด้านของโครงสร้าง (Fixed Support) ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม Static Structural ANSYS® Workbench ในการวิเคราะห์



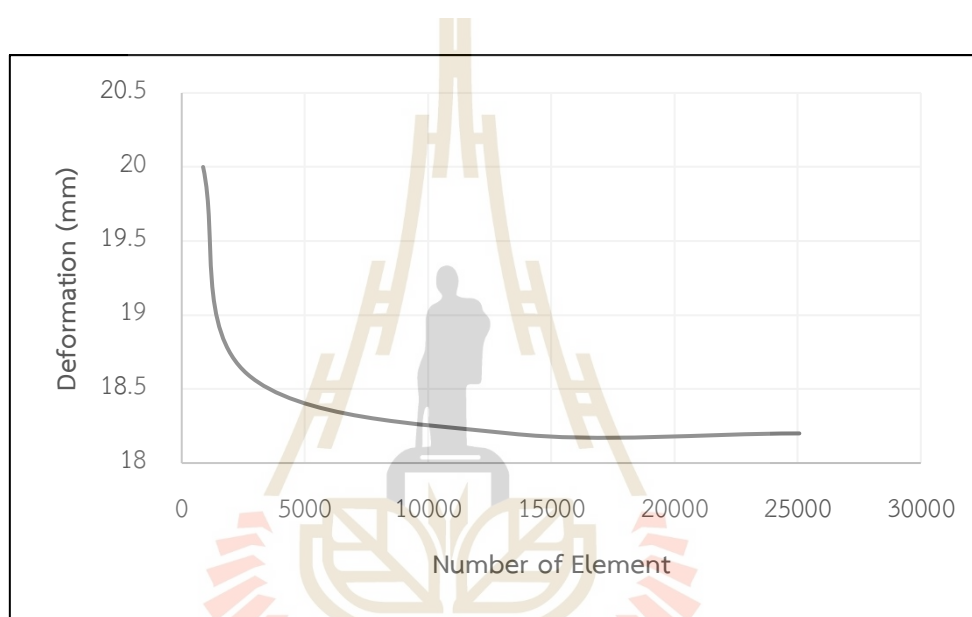
รูปที่ 3.5 โครงสร้างรถโดยสารในงานวิจัยของ Agarwal และ Mthembu (2021)

3.6 ผลตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับการทดสอบ

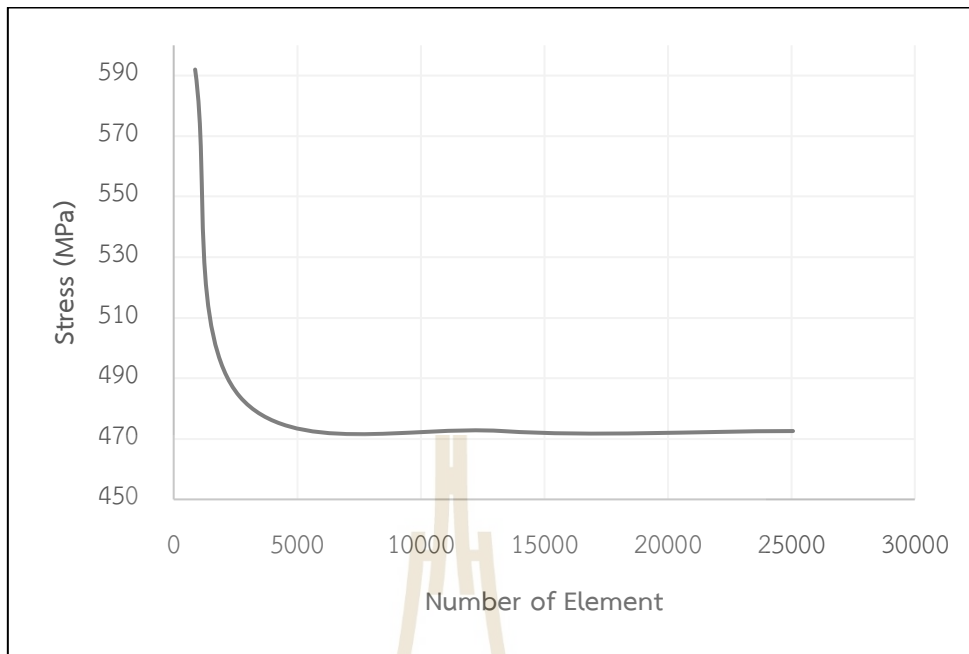
บทนี้เป็นการนำเสนอผลการตรวจสอบความถูกต้องและผลของการจำลองต่าง ๆ ในงานวิจัยที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 ด้วยโปรแกรม Static Structural ANSYS® Workbench สามารถแบ่งผลการจำลองได้ 2 ส่วน คือ การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับการทดสอบ และการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับงานวิจัยอื่น

3.6.1 ผลตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับการทดสอบ

จากการทดสอบแรงดึงของชิ้นงานทดสอบทั้งหมด 5 ชิ้น และเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลอง โดยกำหนดเงื่อนไขขอบเขตเดียวกัน ในการจำลองมีความจำเป็นต้องหาขนาดของเอลิเมนต์ที่ก่อให้เกิดค่าผลลัพธ์ที่คงที่ (Convergence Result) เพื่อยืนยันความถูกต้องของค่าผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจำลอง ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกที่จะศึกษาการจำลองแรงดึงของชิ้นงานทดสอบ ที่มีขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 5 mm ถึง 0.1 mm ค่าคงของผลลัพธ์เริ่มคงที่ เมื่อมีจำนวนของเอลิเมนต์อยู่ที่ 15,000 เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7



รูปที่ 3.6 กราฟความสัมพันธ์ระยะยืดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่าผลลัพธ์คงที่

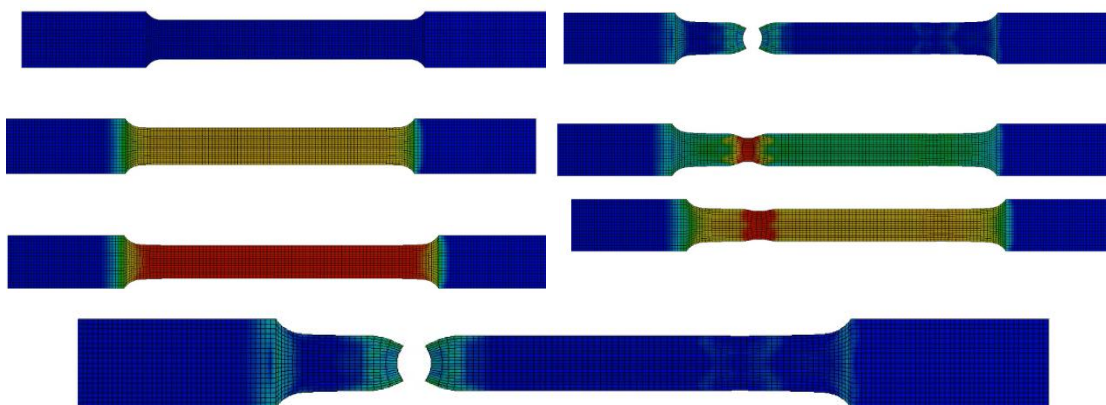


รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ค่าความเค้นสูงสุดและจำนวนเอลิเมนต์ที่ค่าผลลัพธ์คงที่

นอกจากนี้ ยังพบว่าลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานจากทดสอบจริงและการจำลองมีลักษณะการเสียรูปที่เหมือนกัน คือ มีลักษณะเป็นคอคอดบริเวณที่ชิ้นงานเกิดการขาดแยกออกจากกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และ รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะเสียรูปของชิ้นงานตั้งแต่เริ่มดึงชิ้นงาน จนกระทั่งชิ้นงานเกิดการขาด



รูปที่ 3.8 ลักษณะการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.9 การจำลองการเสียรูปของชิ้นงานทดสอบ

เมื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของค่าความเค้นสูงสุดและค่าระยะที่ยืดจนเกิดการเสียรูป พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ 0.34% และ ค่าระยะยืดตัวคลาดเคลื่อน 0.4% เมื่อเทียบกับผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ผลลัพธ์ค่าความเค้นสูงสุดและค่าระยะยืดของการทดสอบและการจำลอง

	ค่าความเค้นสูงสุด (MPa)	ค่าระยะยืดตัว (mm)
การทดสอบ	474.18	18.28
การจำลอง	472.57	18.2
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	0.34%	0.4%

สำหรับงานวิจัยนี้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ ต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าหรือเท่ากับ 5% จากการเปรียบเทียบผลการทดสอบและการจำลอง ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่า 5% สรุปได้ว่าการจำลองการทดสอบแรงดึงมีความถูกต้องและแม่นยำ เมื่อเทียบจากผลการทดสอบ ทำให้ทราบว่าโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench มีความถูกต้องในการจำลอง

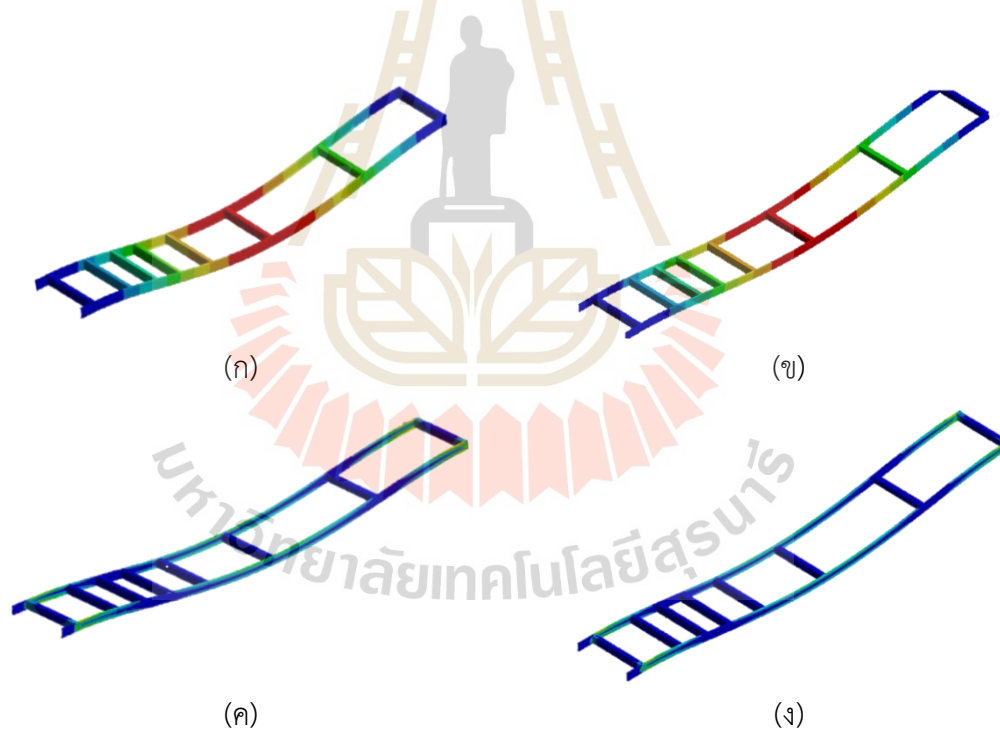
3.6.2 ผลตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับงานวิจัยอื่น

จากผลการศึกษาและจำลองโครงสร้างรถโดยสารในงานวิจัยของ Agarwal และ Mthembu (2021) โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการจำลองด้วยโปรแกรม ABAQUS ภายในงานวิจัยนี้จะศึกษาผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Static Structural ANSYS® Workbench เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องในการจำลองโปรแกรม ANSYS® Workbench พบว่าความคลาดเคลื่อนของ

ค่าความเค้นสูงสุดที่ได้มีค่าอยู่ที่ 0.02% เท่านั้น ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนของระยะยึดตัวอยู่ที่ 0.006% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ แสดงค่าในตารางที่ 3.2 (รูปที่ 3.10 แสดงผลการจำลองจากงานวิจัยของ Agarwal และ Mthembu และ การจำลองด้วย ANSYS® Workbench)

ตารางที่ 3.2 ผลลัพธ์ค่าความเค้นสูงสุดและค่าระยะการเสียรูปของงานวิจัย Agarwal และ Mthembu และการจำลอง

	ค่าความเค้นสูงสุด (MPa)	ค่าระยะยึดตัว (mm)
งานวิจัย Agarwal และ Mthembu (2021)	347.45	3280.49
การจำลอง ANSYS® Workbench	347.54	3280.7
เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน	0.02%	0.006%



รูปที่ 3.10 ผลการจำลองจากงานวิจัย Agarwal และ การจำลองด้วย ANSYS® Workbench

- (ก) ระยะยึดตัวผลการจำลองจากงานวิจัย Agarwal
- (ข) ระยะยึดตัวผลการจำลองด้วย ANSYS® Workbench
- (ค) ความเค้นผลการจำลองจากงานวิจัย Agarwal และ
- (ง) ความเค้นผลการจำลองด้วย ANSYS® Workbench

บทที่ 4

การจำลองการชนกระแทกของท่อผนังบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิจัยในบทที่ 3 เป็นการเปรียบเทียบการจำลองแบบสถิตของชิ้นงานและโครงสร้างอย่างง่าย ตรวจสอบความแม่นยำและถูกต้องของโปรแกรม ANSYS® Workbench ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ จากนั้นจึงเข้าสู่การวิเคราะห์การจำลองการชนกระแทกโดยระเบียบวิธีชัดแจ้ง (Explicit Dynamic) โดยในบทนี้เป็นการวิเคราะห์การชนกระแทกโครงสร้างของท่อผนังบาง ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง เพื่อนำมาปรับใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างของรถโดยสาร

โครงสร้างของยานพาหนะจำเป็นต้องมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง เพื่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่และผู้โดยสารในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุการชนกระแทก (Abdulqadir, 2018) การที่โครงสร้างของยานพาหนะจะแข็งแรงได้นั้นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งวัสดุประเภทที่มีความแข็งแรงสูงก็เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมากด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้อาจส่งผลให้ยานพาหนะมีน้ำหนักที่สูงเกินความจำเป็นและไม่เหมาะสมกับการใช้งานในยานพาหนะบางประเภท ตัวอย่างเช่น รถที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (รถยนต์อีโค) และรถยนต์นั่งสมรรถนะสูง (รถสปอร์ต) จึงมีการนำท่อผนังบางมาปรับใช้กับโครงสร้างของยานพาหนะ เพื่อให้โครงสร้างยานพาหนะมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

ปัจจุบันท่อผนังบางถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบินและรถยนต์มากขึ้น เนื่องจากท่อผนังบางนั้นมีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานที่เกิดจากการชนกระแทกได้ดี (Baroutaji, Sajjia & Olabi, 2017) ในการขึ้นรูปท่อผนังบางวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปมีหลากหลายประเภท อาทิ วัสดุประเภทโลหะ โลหะผสม หรือแม้กระทั่งวัสดุผสม (คอมโพสิต) ก็ถูกนำมาใช้ในการผลิตท่อผนังบางด้วยเช่นกัน (Balakrishnan et al., 2017) ทั้งนี้ ยังได้ศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุที่นิยมนำมาขึ้นรูปท่อผนังบาง จากการศึกษาวิจัยของ Hsu และ Jones ได้ทำการทดลองการชนกระแทกท่อผนังบางที่ขึ้นรูปด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และอะลูมิเนียมผสม (aluminium alloy) พบว่าการดูดซับพลังงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Hsu & Jones, 2004) และจากงานวิจัยอื่น ๆ พบว่าวัสดุที่นิยมนำมาขึ้นรูปท่อผนังบาง คือ อะลูมิเนียมผสม (aluminium- alloy) เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีอัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง (high strength to weight ratio) ความเหนียวที่ต้านการแตกหักสูง (high fracture toughness) และมีน้ำหนักที่เบา (light weight) อะลูมิเนียมผสมจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้โครงสร้างรับพลังงานการชนกระแทก

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานการชนกระแทกของท่อผนังบางไม่ได้มีเพียงปัจจัยเรื่องวัสดุเพียงอย่างเดียว Yu and Lu (Lu & Yu, 2003) Seitzberger et al. (Seitzberger et al., 2000) และ Rajendran et al. (Rajendran et al., 2000) ได้ศึกษาท่อผนังบางแบบทรงกลมและแบบทรงสี่เหลี่ยม พบว่าท่อผนังบางแบบทรงสี่เหลี่ยมนั้นมีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าท่อผนังบางแบบทรงกลม Song et al. (Song et al., 2013) และ Najafi et al. (Najafi et al., 2011) จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานการชนกระแทกของท่อผนังบางแบบทรงกรวยเปรียบเทียบกับท่อผนังบางแบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม โดยท่อผนังบางแบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมนั้นมีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกที่ต่ำกว่าท่อผนังบางแบบทรงกรวย Vinayagar and Kumar ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางแบบ 2 ชั้นที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน (วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยม) (Vinayagar and Kumar, 2017) และ Shakeri et al. ทำการศึกษาปัจจัยเรื่องความหนาของท่อผนังบาง ความหนาของท่อผนังบางนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานซึ่งแสดงให้เห็นว่าท่อผนังบางแบบสองชั้นและความหนาของท่อมีผลต่อการดูดซับพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ (Shakeri et al., 2019)

ในการทดสอบการชนกระแทกของท่อผนังบางนั้นมีระยะเวลาในการทดสอบและมีค่าใช้จ่ายที่สูง เพื่อลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบ Wang et al. ศึกษาการเสียรูปของท่อผนังบางที่ถูกแรงกดกระทำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง และค่าเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 3%) (Wang et al., 2018) Gairola and Jayaganthan ศึกษาการรับแรงดัดของท่อผนังบาง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ ANSYS (Gairola & Jayaganthan, 2021) นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์อื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงในข้างต้นอีกด้วย เช่น SimScale, OpenFoam และ LS-DYNA เป็นต้น

ในบทนี้จึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง โดยปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ความหนาและรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกันของท่อผนังบาง ดำเนินการวิเคราะห์การชนกระแทกของท่อผนังบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench

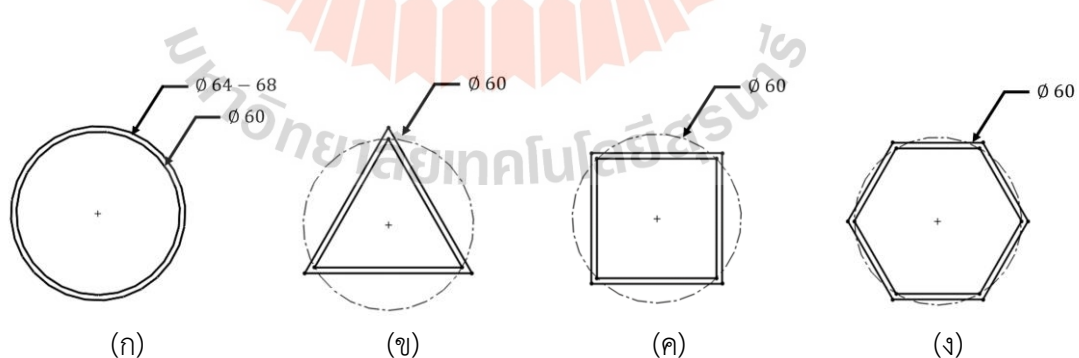
4.1 ออกแบบท่อผนังบาง

ในบทนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง ปัจจัยหลักที่ศึกษา คือ ความหนาและรูปร่างหน้าตัดของท่อผนังบาง โดยความหนาของท่อผนังบางถูกกำหนดไว้ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 2 mm 3 mm และ 4 mm ท่อผนังบางมีความสูง 150 mm และรูปร่างหน้าตัดของท่อผนังบางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแต่ละหน้าตัดอยู่ที่ 60 mm รูปร่างของหน้า

ตัดที่ศึกษาในงานวิจัยมี 4 รูปร่าง ได้แก่ วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และ หกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.1 นอกจากนี้มวลและพื้นที่หน้าตัดของแต่ละรูปแบบถูกวัดค่าและบันทึกผลดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คำนวณและพื้นที่หน้าตัดของท่อผนังแต่ละรูปแบบ

รูปร่างหน้าตัด	ความหนา (mm)	มวล (g)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)
วงกลม	2	157.77	389.56
	3	240.47	593.76
	4	325.72	804.25
สามเหลี่ยม	2	134.68	332.55
	3	208.34	514.42
	4	286.20	706.68
สี่เหลี่ยม	2	143.94	355.41
	3	220.77	545.12
	4	300.84	742.84
หกเหลี่ยม	2	151.41	373.86
	3	231.33	571.18
	4	314.05	775.43



รูปที่ 4.1 รูปแบบของหน้าตัดท่อผนังบาง (ก) หน้าตัดวงกลม (ข) หน้าตัดสามเหลี่ยม (ค) หน้าตัดสี่เหลี่ยม และ (ง) หน้าตัดหกเหลี่ยม

4.2 การจำลองการวิเคราะห์

การทดสอบชิ้นงานจริงมีต้นทุนที่สูงและใช้ระยะเวลาในการทดสอบ เพื่อลดต้นทุนและระยะเวลาในการทดสอบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการจำลองการชนกระแทกต่อผนังบาง โดยรายละเอียดในการจำลองการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

4.2.1 วัสดุที่ใช้ผลิตท่อผนังบาง

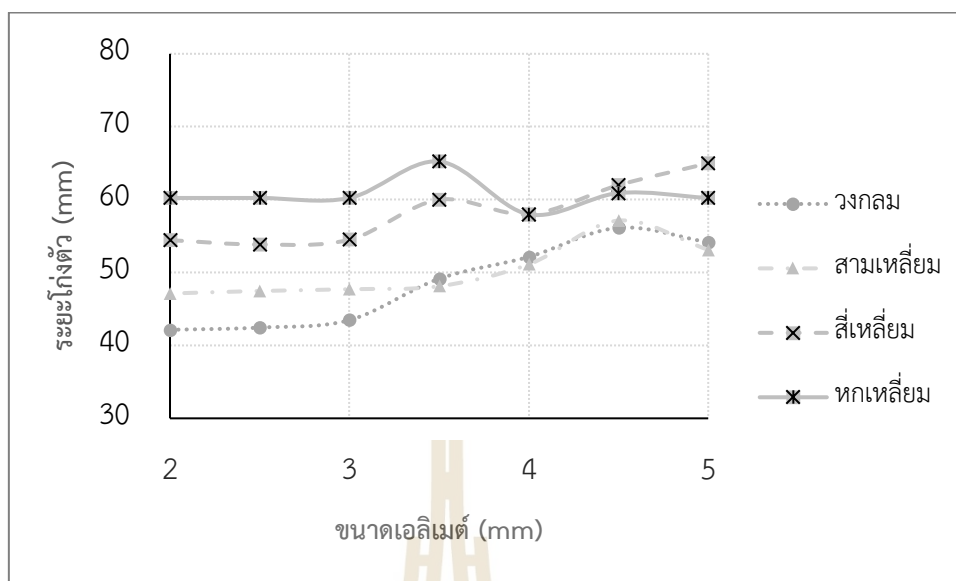
จากงานวิจัยของ Hsu และ Jones ที่ได้ทำการศึกษาการชนกระแทกของท่อผนังบางจากวัสดุที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้วัสดุที่สามารถดูดซับพลังงานได้ดีที่สุดคือ aluminium alloy ในบทนี้จึงเลือกที่จะศึกษาการชนกระแทกต่อผนังบางที่ขึ้นรูปจากวัสดุ aluminium alloy 6061 (Hsu & Jones, 2004) และค่าคุณสมบัติของ aluminium alloy 6061 แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของ aluminium alloy 6061

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
ความหนาแน่น (kg/m^3)	2,700
มอดุลัสของยัง (GPa)	68.9
ความแข็งแรง (MPa)	276
อัตราส่วนปัวซอง	0.33

4.2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ลักษณะของเอลิเมนต์ถูกกำหนดให้เป็นรูปแบบสามเหลี่ยม ขนาดเอลิเมนต์ของท่อผนังบางและวัตถุที่ชนกระแทกที่ 2.5 mm และ 60 mm ตามลำดับ ซึ่งเป็นขนาดของเอลิเมนต์ที่ค่าผลลัพธ์ระยะโก่งตัวของท่อผนังบางที่แสดงในรูปที่ 4.2 นอกจากนี้เอลิเมนต์แบบ refinement ถูกนำมาปรับใช้กับแบบจำลอง ซึ่งช่วยลดโอกาสการเคลื่อนขยับของเอลิเมนต์ ส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ลดลง การประมวลผลข้อมูลจึงมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น จำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้งหมดมีเอลิเมนต์ 69,955 เอลิเมนต์ และจำนวนจุดเชื่อมต่อ 21,822 จุด รูปที่ 4.3 แสดงลักษณะเอลิเมนต์ของท่อผนังบางและวัตถุชนกระแทก



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ขนาดเอลิเมนต์และระยะโก่งตัว

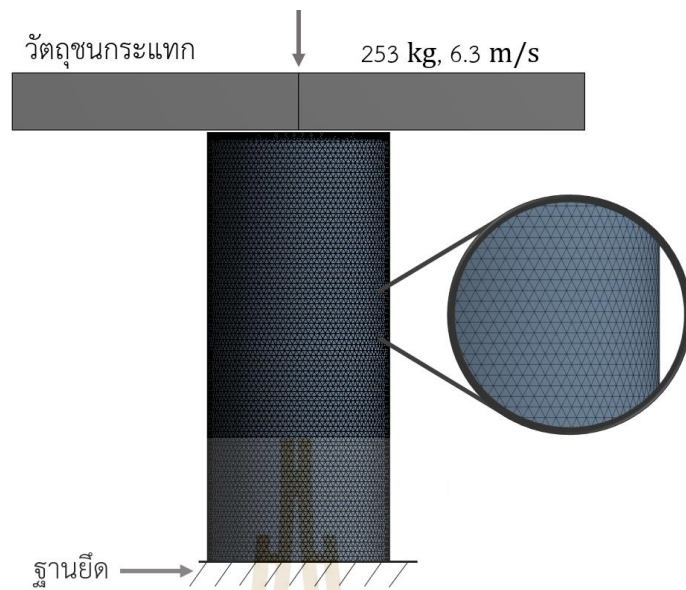
4.2.3 เงื่อนไขและขอบเขต

ท่อผนังบางจะได้รับพลังงานจากการชนกระแทกโดยการ กำหนดให้ปล่อยวัตถุชนกระแทกที่มีน้ำหนัก 253 kg ที่ความสูง 2 m จากข้อกำหนดนี้ท่อผนังบางจะได้รับพลังงานการชนกระแทก 5 kJ และการชะลอตัวของความเร่งที่เกิดจากการชนกระแทกนั้นควรมีค่าน้อยกว่า 15 g หรือ 15 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก เพื่อความปลอดภัยของผู้โดยสารหากนำท่อผนังบางนี้มาปรับใช้กับโครงสร้างรับแรงกระแทกของรถยนต์ (Gairola & Jayaganthan, 2021)

รูปที่ 4.3 แสดงการกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง โดยกำหนดให้ท่อผนังบางเป็นวัตถุที่สามารถเสียรูปได้ (flexible) ผิวส่วนล่างของท่อผนังบางเป็นฐานยึดที่มั่นคง (fixed support) และกำหนดให้วัตถุชนกระแทกเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid) จากความสูงในการปล่อยวัตถุชนกระแทกสามารถเปลี่ยนเป็นความเร็วเริ่มต้นของวัตถุชนกระแทกได้ดังสมการที่ 4.1 (Quadfasel et. al., 2019)

$$v = \sqrt{2gh} \quad (4.1)$$

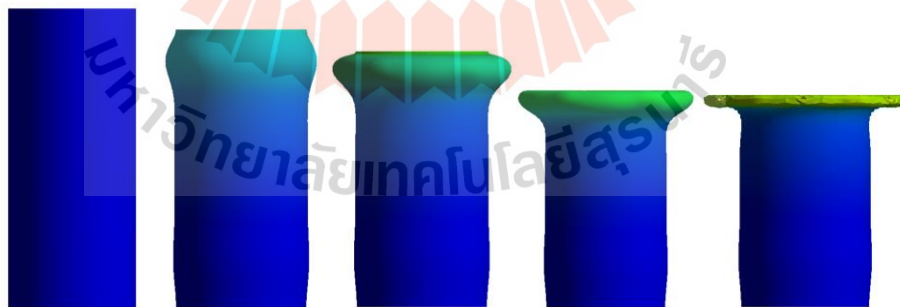
โดยตัวแปร v คือ ความเร็วต้น g คือ ค่าแรงโน้มถ่วง และ h คือ ความสูงของระยะชนกระแทก จากสมการที่ 4.1 สามารถหาค่าความเร็วเริ่มต้นของวัตถุชนกระแทกได้ 6.3 m/s



รูปที่ 4.3 ลักษณะเอลิเมนต์และขอบเขตของท่อผนังบาง

4.3 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

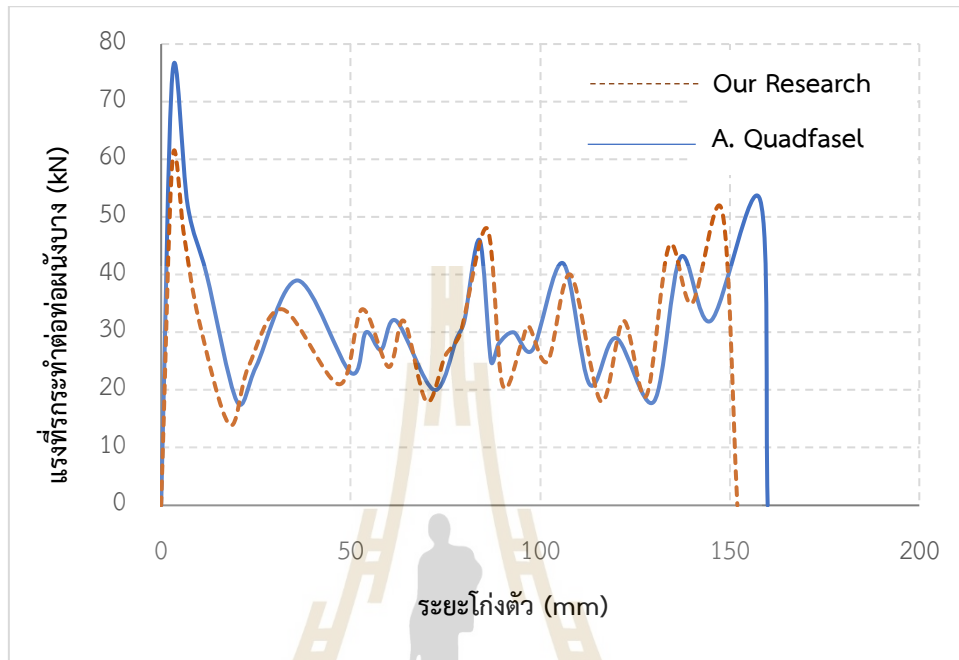
ผลการจำลองพบว่า ลักษณะการเสียรูปของท่อผนังบางที่ได้รับการชนกระแทกจะเริ่มจากการโก่งตัวออกด้านข้างของท่อ จากนั้นผนังท่อส่วนที่โก่งตัวออกจะเริ่มเกิดการเสียรูปแบบการพับตัวลง ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเสียรูปของท่อผนังบางหน้าตัดวงกลม

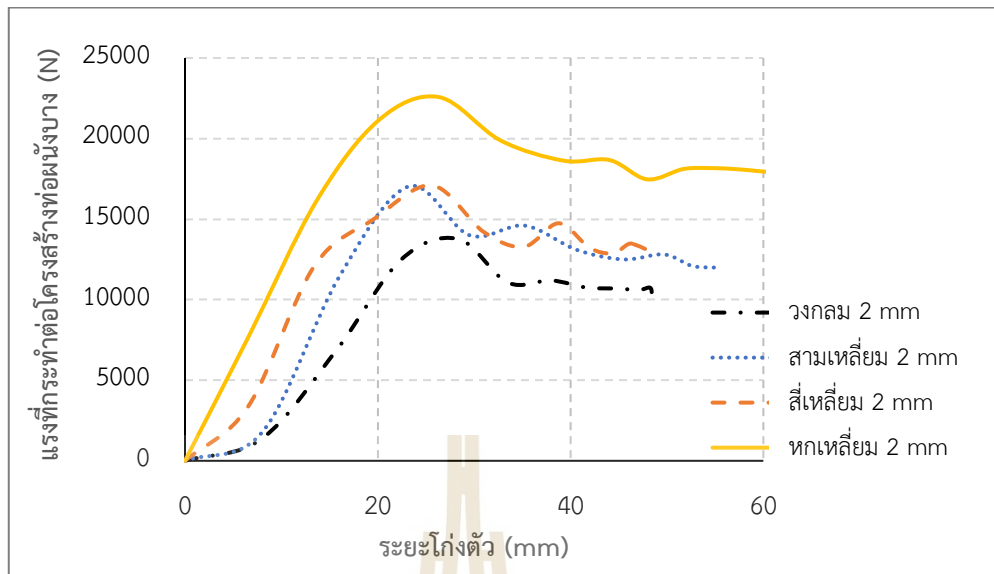
ผลลัพธ์ของการจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Quadfasel และคณะทำเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้อง และ ความแม่นยำของการจำลอง พบว่าผลลัพธ์ของการจำลองในงานวิจัยนี้

มีค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางที่ต่ำกว่างานวิจัยของ Quadfasel (Quadfasel et al., 2017) เล็กน้อย แต่มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Quadfasel ดังแสดงในรูปที่ 4.5

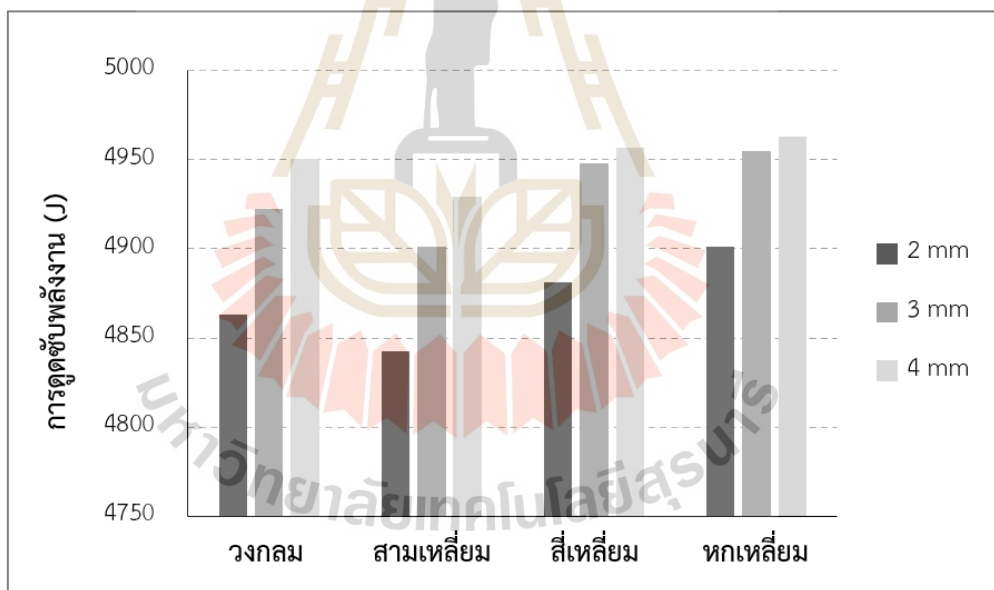


รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานระหว่างงานวิจัยนี้ และงานวิจัยของ Quadfasel และคณะ

เมื่อนำระยะการโก่งตัวของท่อผนังบางที่มีความหนา 2 mm มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับท่อผนังบางหนาและระยะการโก่งตัว จะได้กราฟความสัมพันธ์รูปที่ 4.6 วิเคราะห์จากกราฟดังกล่าวพบว่าท่อผนังบางที่มีหน้าตัดรูปร่างหกเหลี่ยมมีค่าการดูดซับพลังงานสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดอื่น ๆ โดยค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ นำค่าการดูดซับพลังงานที่ได้หารด้วยมวลของท่อผนังบาง เพื่อหาค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ และหาค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและระยะการโก่งตัวของต่อผนังบางหนา 2 mm



รูปที่ 4.7 ค่าการดูดซับพลังงานของต่อผนังบาง

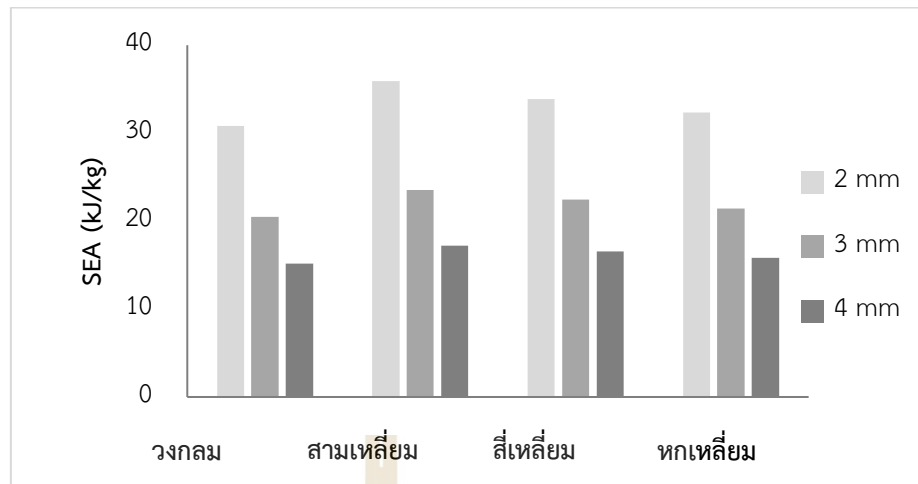
เมื่อวิเคราะห์ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.7 พบว่าค่าการดูดซับพลังงานของต่อผนังบางมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ หากความหนาของต่อผนังบางนั้นเพิ่มขึ้น การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แม้ว่าค่าการดูดซับพลังงานของต่อผนังบางเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความหนาของต่อ แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ พบว่ามวลของต่อผนังบางเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาของ

ท่อผนังบาง และค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางที่มีความหนา 3 mm และ 4 mm มีค่าการดูดซับพลังงานแตกต่างจากท่อผนังบางที่หนา 2 mm เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.8

จากค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก รูปร่างหน้าตัดแบบหกเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทกที่สูง บ่งชี้ถึงความสามารถในการรับแรงของท่อผนังบางว่ามีประสิทธิภาพในการรับแรงได้สูง

ตารางที่ 4.3 ค่าประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน

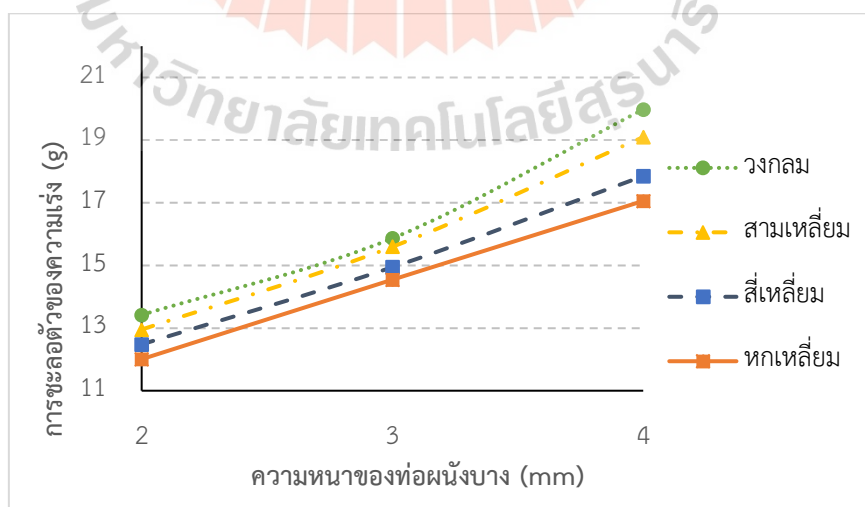
รูปร่างหน้าตัด	ความหนา (mm)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	CFE (%)
วงกลม	2	4.86	30.804	70.94
	3	4.92	20.46	65.74
	4	4.95	15.20	67.52
สามเหลี่ยม	2	4.84	35.94	65.84
	3	4.90	23.52	62.93
	4	4.93	17.23	63.94
สี่เหลี่ยม	2	4.88	33.90	74.32
	3	4.95	22.42	73.32
	4	4.97	16.52	76.67
หกเหลี่ยม	2	4.90	32.36	79.51
	3	4.96	21.44	76.95
	4	4.98	15.86	78.43



รูปที่ 4.8 ผลการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางแต่ละหน้าตัด

การนำท่อผนังบางมาปรับใช้กับโครงสร้างรับแรงชนกระแทกของรถยนต์นอกเหนือจากการวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก ยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารอีกด้วย โดยค่าการชะลอตัวของความเร่งไม่เกิน 15 g ค่าการชะลอตัวที่ได้จากการจำลองมีหน่วยเป็น m/s^2 นำค่าการชะลอตัวหารด้วยค่าความเร่งโน้มถ่วง ($9.81 m/s^2$)

จากรูปที่ 4.9 ท่อผนังบางที่ความหนา 4 mm (ทุกหน้าตัด) และท่อผนังบางที่ความหนา 3 mm (หน้าตัดวงกลมและสามเหลี่ยม) แม้ว่าจะมีค่าการดูดซับพลังงานที่สูงแต่มีค่าการชะลอตัวของความเร่งที่สูงกว่า 15 g จึงอาจจะไม่เหมาะสมกับการนำมาปรับใช้ในการรับแรงชนกระแทกกับโครงสร้างรถยนต์



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการชะลอตัวของความเร่งและความหนาของท่อผนังบาง

4.4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยในบทนี้ทำขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench โดยเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Quadfasel และคณะพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในงานวิจัยนี้มีความใกล้เคียงกับของวิจัยของ Quadfasel และคณะส่งผลให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองนั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ และ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง โดยศึกษาด้วยกันทั้งหมด 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือ ความหนาของท่อผนังบาง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของท่อผนังบางและประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานมีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อความหนาของท่อผนังบางนั้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และอีกปัจจัยคือรูปร่างของหน้าตัดท่อผนังบาง เมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะพบว่ารูปร่างที่มีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานจำเพาะมากที่สุดคือ รูปร่างแบบหกเหลี่ยม ถัดมาคือรูปร่างสี่เหลี่ยม วงกลม และสามเหลี่ยมตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในการนำมาปรับใช้กับโครงสร้างรับแรงกระแทกของรถยนต์ นอกจากจะวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานแล้วต้องคำนึงถึงการชะลอตัวของความเร่งด้วยเช่นกัน เนื่องจากหากมีการชะลอตัวของความเร่งที่สูงเกินกว่า 15 g อาจส่งผลให้เกิดอันตรายต่อผู้โดยสารได้ ดังนั้นในการนำท่อผนังบางมาปรับใช้จึงจำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องของความปลอดภัยต่อผู้โดยสาร



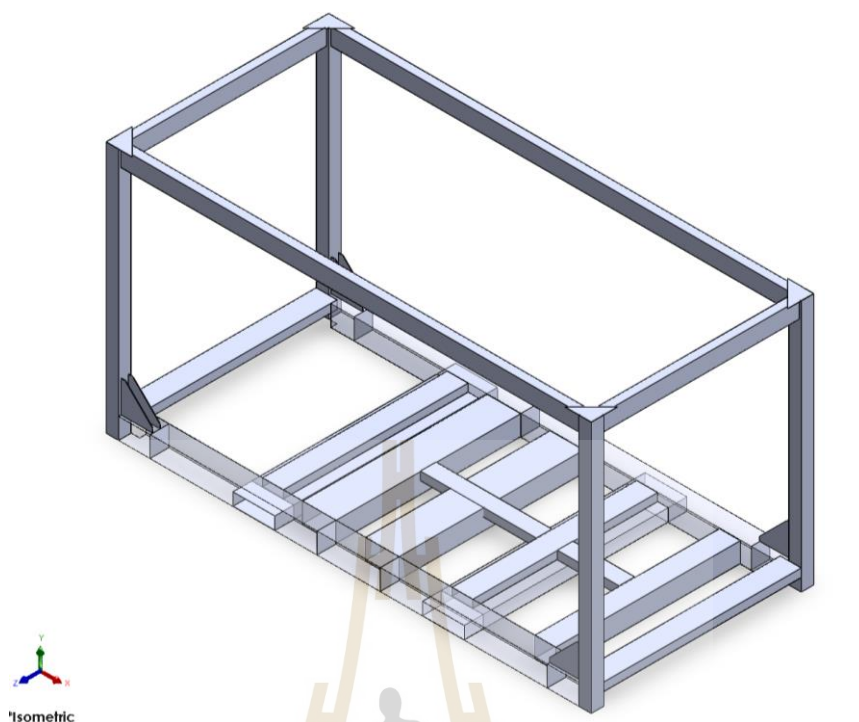
บทที่ 5

การตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างอย่างง่ายโดยวิธีชัดเจน

การทดสอบการตกกระแทก หรือ Drop Test เป็นการปล่อยวัตถุหรือโครงสร้างให้ตกอย่างอิสระ โดยทั่วไปจะใช้ในการตรวจสอบความแข็งแรงของบรรจุภัณฑ์ในการทนทานต่อแรงกระแทก เนื่องจากบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับการขนส่ง และ เพื่อให้มั่นใจว่าสินค้าที่ถูกจัดส่งจะปลอดภัย ไม่เกิดความเสียหาย จึงต้องทำการทดสอบการตกกระแทก

5.1 โครงสร้าง Crash Frame

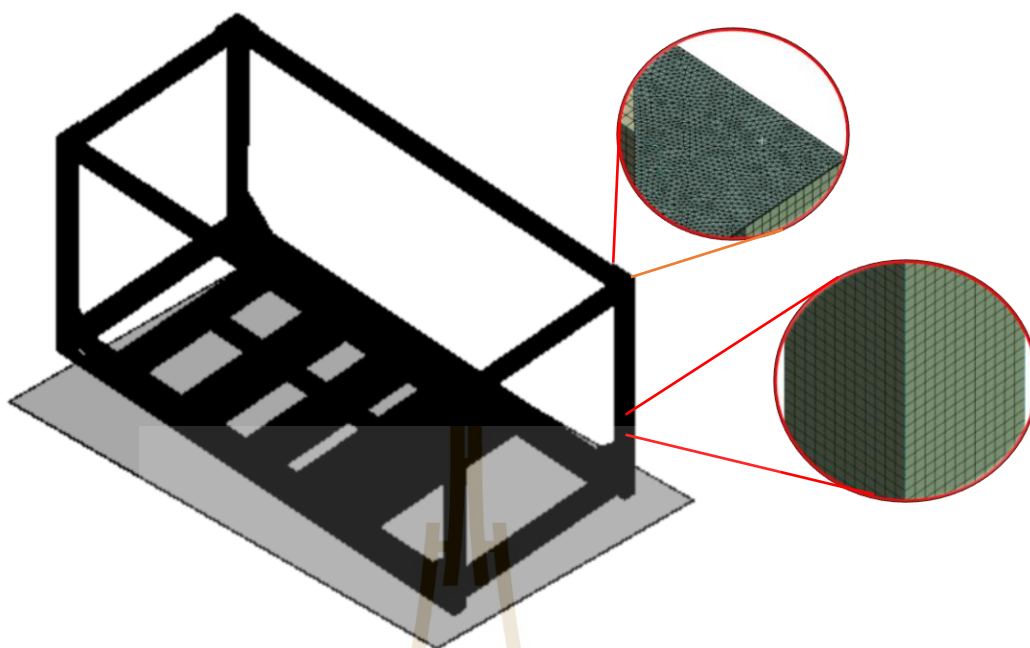
งานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองการตกกระแทกของโครงสร้างเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองแบบ โครงสร้างที่ใช้การทดสอบเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า Crash Frame โดยทั่วไปจะใช้สำหรับบรรจุชิ้นส่วนอุตสาหกรรม ขณะทำการขนส่งอาจมีความเสียหายที่เกิดจากอุบัติเหตุกรณีเครนที่ใช้ยกสินค้าเหล่านี้พัง หรือ การตกกระแทกเล็กน้อยขณะเครนทำการวางโครงสร้างเหล่านี้ ความเสียหายนี้ส่งผลให้เกิดอัตราความเครียดและความเค้นที่สูงบนโครงสร้าง ดังนั้นโครงสร้าง Crash Frame ควรสามารถรองรับแรงกระแทก เพื่อป้องกันความเสียหายขณะถูกขนส่ง ดังนั้นงานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade ศึกษาการทดสอบการตกแบบอิสระของโครงสร้าง Crash Frame โดยอ้างอิงมาตรฐาน DNV ข้อที่ 2.7-1 (Anjekar & Panchagade, 2013) รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างโครงสร้างที่ใช้จำลองในงานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade



รูปที่ 5.1 โครงสร้างสำหรับการจำลองการตกกระแทกของ Crash Frame

5.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยของ Anjkar และ Panchagade ได้กำหนดลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองเป็นแบบ 2 มิติ โดยมีสมการกำหนดลักษณะของเอลิเมนต์เป็นสมการอันดับหนึ่ง และใช้รูปร่างของเอลิเมนต์ 2 รูปร่าง คือ สามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม แต่รูปร่างเอลิเมนต์สามเหลี่ยมนั้นจะถูกกำหนดให้ใช้ในบริเวณที่ลักษณะเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมไม่สามารถทำได้เท่านั้น และสามารถมีเอลิเมนต์สามเหลี่ยมได้ไม่เกิน 5% ของเอลิเมนต์ทั้งหมด ลักษณะของเอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ลักษณะของเอลิเมนต์ในการจำลองโครงสร้าง

ขนาดของเอลิเมนต์ถูกกำหนดให้มีขนาดเล็กที่สุดที่ 5 mm และ ค่าเฉลี่ยของขนาดเอลิเมนต์ อยู่ที่ 10 mm นอกจากนี้ ยังกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการวัดคุณภาพของลักษณะเอลิเมนต์ โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

5.2.1 กำหนดขนาดมุมของเอลิเมนต์สามเหลี่ยมใหญ่สุดและเล็กสุดที่ 120 องศา และ 10 องศา ตามลำดับ และขนาดมุมของเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมใหญ่สุดและเล็กสุดที่ 135 องศา และ 35 องศา ตามลำดับ

5.2.2 ค่าอัตราส่วนความกว้าง (Aspect Ratio) มีค่าน้อยกว่า 5

5.2.3 ค่าอัตราส่วน Jacobian (Jacobian Ratio) มีค่ามากกว่า 0.5

5.2.4 ค่าลักษณะความยาวจำเพาะ (Characteristic Length) อยู่ระหว่าง 5 ถึง 20

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยระเบียบวิธีชัดแจ้งจะต้องมีความละเอียดสูงเพื่อความถูกต้องของผลลัพธ์ เอลิเมนต์ที่มีความละเอียดสูงจะส่งผลต่อระยะเวลาที่ใช้ในการจำลอง หรือ การคำนวณขั้นตอนเวลา (Time Step) โดยค่าวิกฤตของขั้นตอนเวลาจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและขนาดของเอลิเมนต์ สามารถคำนวณค่าขั้นตอนเวลาได้จากสมการที่ 5.1

$$\Delta t = \frac{L_s}{c} \quad (5.1)$$

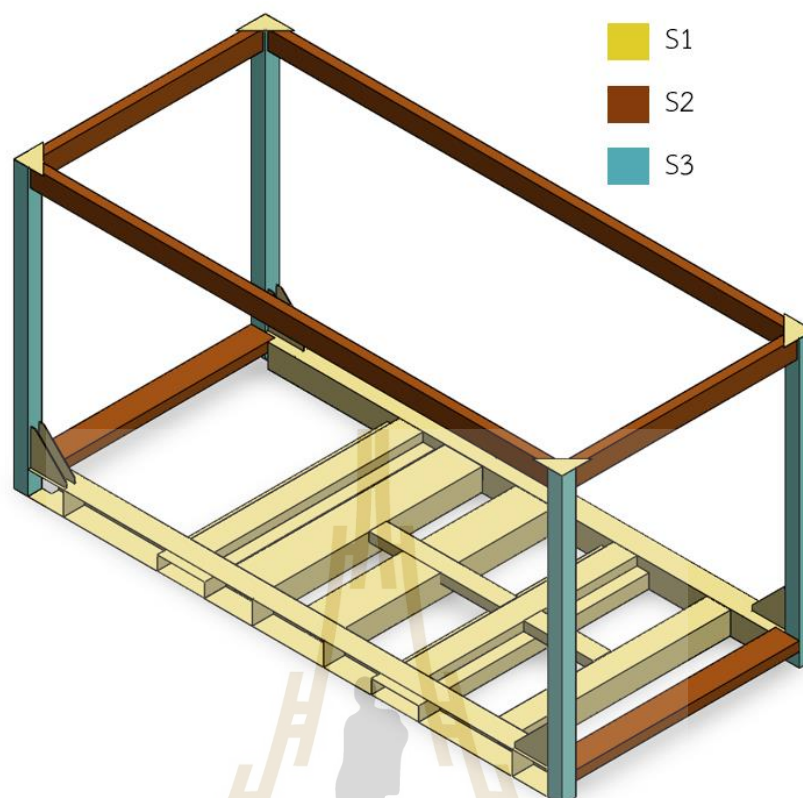
โดย Δt คือ ขั้นตอนเวลา L_s คือ ความยาวที่เล็กที่สุดของเอลิเมนต์ c ความเร็วเสียงขององค์ประกอบวัสดุ ซึ่งค่านี้สามารถหาได้จากสมการที่ 5.2

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (5.2)$$

เมื่อ E คือ Young's Modulus ρ คือ ความหนาแน่นของมวล (Mass Density) และ ν คือ Poisson's Ratio โดยวัสดุที่ใช้สร้างโครงสร้าง Crash Frame ทำจากเหล็กกล้าที่มีความหนาแตกต่างกัน แบ่งออกเป็น 3 ความหนา ส่งผลให้ค่าคุณสมบัติของวัสดุบางคุณสมบัติมีค่าต่างกัน และค่าคุณสมบัติที่จำเป็นต้องใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างที่กระทำโดยแรงแบบพลวัตต้องใช้คุณสมบัติวัสดุที่ไม่เป็นเชิงเส้น ประกอบไปด้วยคุณสมบัติดังตารางที่ 5.1 และ โครงสร้างที่แบ่งสี่วัสดุแสดงในรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติวัสดุเหล็กกล้า

คุณสมบัติวัสดุ	S1	S2	S3
E-modulus (GPa)	210	210	210
Poisson ratio	0.3	0.3	0.3
Density (kg/m ³)	7120	7120	7120
Yield strength (MPa)	260	240	220
Ultimate strength (MPa)	487	417	360
Strain at rupture (%)	21	21	25



รูปที่ 5.3 วัสดุของโครงสร้าง Crash Frame

5.3 การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขต

การกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของการจำลองถูกกำหนดโดยมาตรฐาน DNV 2.7-1 โดยมีการกำหนดขอบเขตดังนี้

5.3.1 โครงสร้าง Crash Frame ต้องตกลงบนพื้นคอนกรีต หรือ พื้นแข็ง

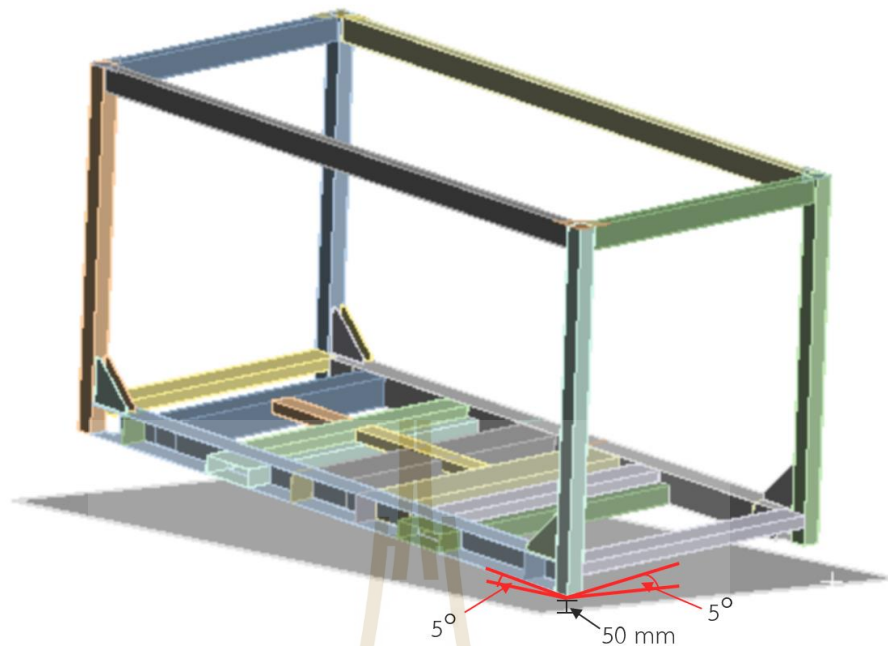
5.3.2 มุมของโครงสร้างต้องเอียงขึ้นสองข้าง และทำมุมกับพื้นราบมากกว่า 5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 5.4

5.3.3 ระยะต่ำสุดและสูงสุดของโครงสร้างเมื่อวัดจากพื้นต้องต่างกันไม่เกิน 400 mm

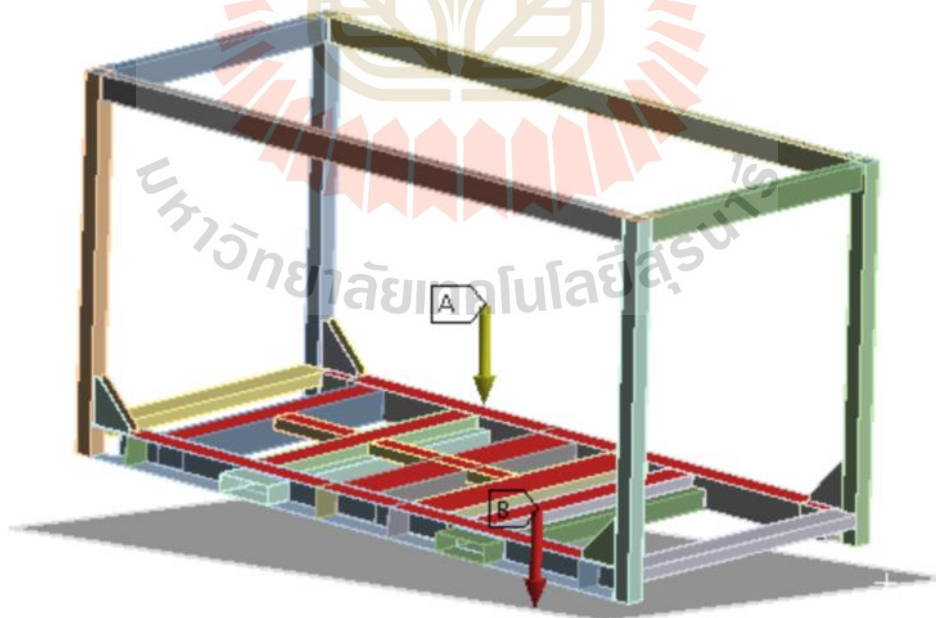
5.3.4 ระยะต่ำสุดของโครงสร้างเมื่อวัดจากพื้นต้องมีระยะห่าง 50 mm

5.3.5 โครงสร้างจะต้องไม่เกิดการเสียรูปแบบถาวร

นอกจากนี้ ยังกำหนดให้ภาระแรงกระทำที่บริเวณพื้นผิวที่ถูกแรงเงาให้เป็นสีแดง ดังรูปที่ 5.5 โดยภาระแรงที่กระทำที่ผิวบริเวณนี้ถูกกำหนดโดยน้ำหนักของโครงสร้างของเครื่องจักร โดยกำหนดให้มีความเร่งโน้มถ่วง 9.81 m/s^2 ดังลูกศร A และ ใส่แรงกระทำที่ 20,000 N ดังลูกศร B จากนั้นกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างโครงสร้างและพื้นเท่ากับ 0.45



รูปที่ 5.4 การจัดวางโครงสร้างก่อนปล่อยตกอิสระตามมาตรฐาน DNV 2.7-1

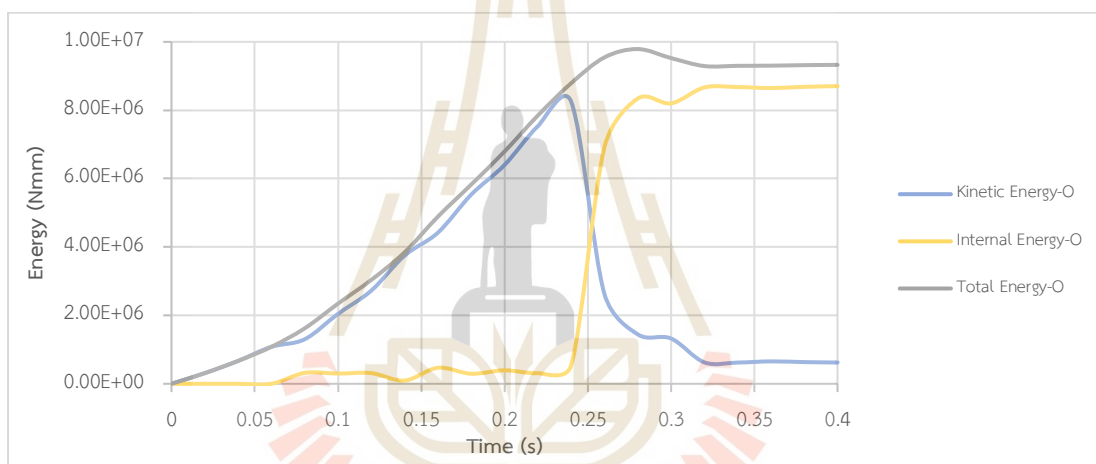


รูปที่ 5.5 ขอบเขตของภาระที่กระทำต่อโครงสร้าง Crash Frame

5.4 ผลการจำลองและการเปรียบเทียบผลการจำลอง

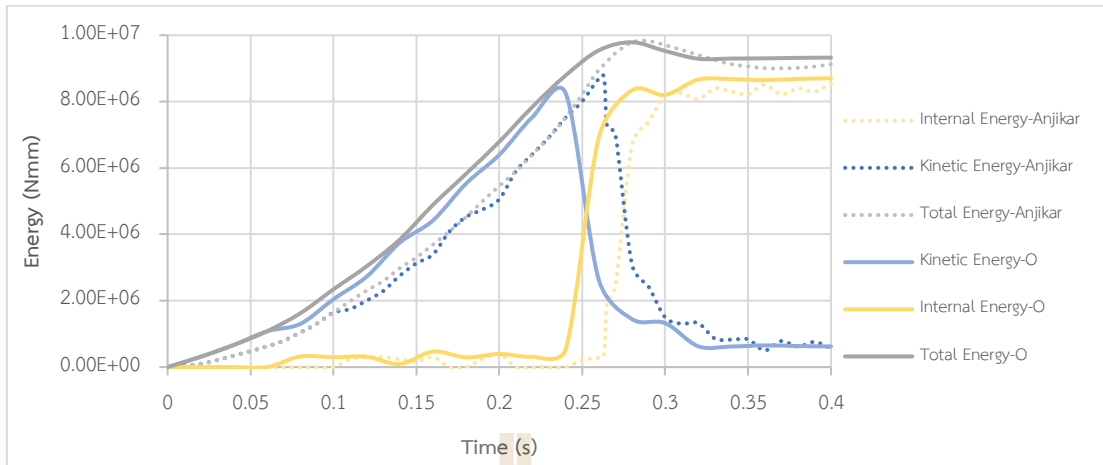
การตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์การจำลองสามารถตรวจสอบได้จากค่าของพลังงานทั้งหมด (Total Energy) โดยค่าพลังงานรวมทั้งหมดจะต้องคงที่ไม่เกิดความแปรปรวน ในทางปฏิบัติการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่สามารถได้ค่าผลลัพธ์ของพลังงานที่คงที่ได้ 100% แต่สามารถเกิดความแปรปรวนได้ไม่เกิน 10% เมื่อวัดจากค่าก่อนหน้า จึงจะสามารถเชื่อถือความถูกต้องของการจำลองได้

รูปที่ 5.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานและเวลา จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ ไม่เกิดการแปรปรวนของค่าพลังงานทั้งหมด จากนั้น พลังงานลดลงเล็กน้อยและเข้าสู่ช่วงคงที่ ในช่วงที่พลังงานคงที่เป็นค่าพลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้



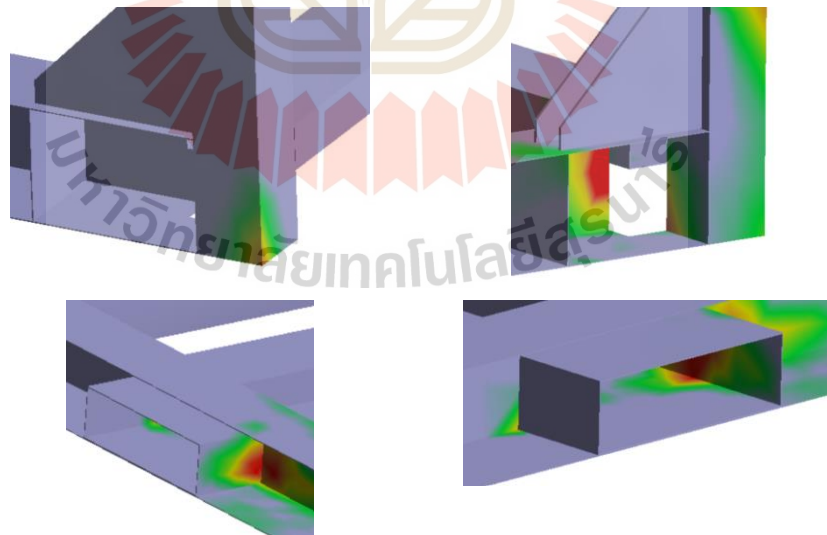
รูปที่ 5.6 กราฟสมดุลพลังงาน

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะของกราฟสมดุลพลังงานกับงานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานจะสูงกว่าเล็กน้อยในช่วงระยะเวลาเดียวกัน แต่ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มเป็นรูปแบบเดียวกันอย่างชัดเจน และมีค่าของผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 5.7



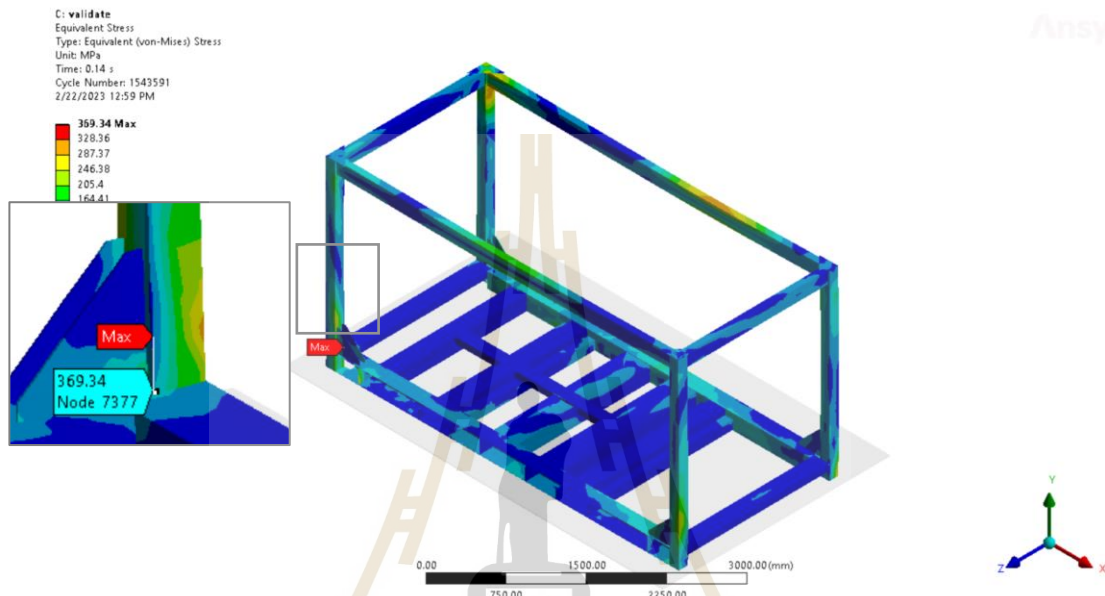
รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบสมมูลพลังงานกับงานวิจัย Anjkar และ Panchagade

รูปที่ 5.8 แสดงภาพขยายของจุดที่มี Maximum Plastic Stain โดยสังเกตว่าบริเวณที่มีความเครียดจากพลาสติกสูงจะอยู่บริเวณมุมของโครงสร้าง และบริเวณโครงสร้างเหล็กกล่องบริเวณตรงกลาง โดยค่าสูงสุดของความเครียดจากพลาสติกอยู่ที่ 18.2% เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Anjkar และ Panchagade ที่มีค่าอยู่ที่ 18% จะพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.11% เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ (ยอมรับได้ไม่เกิน 5%)

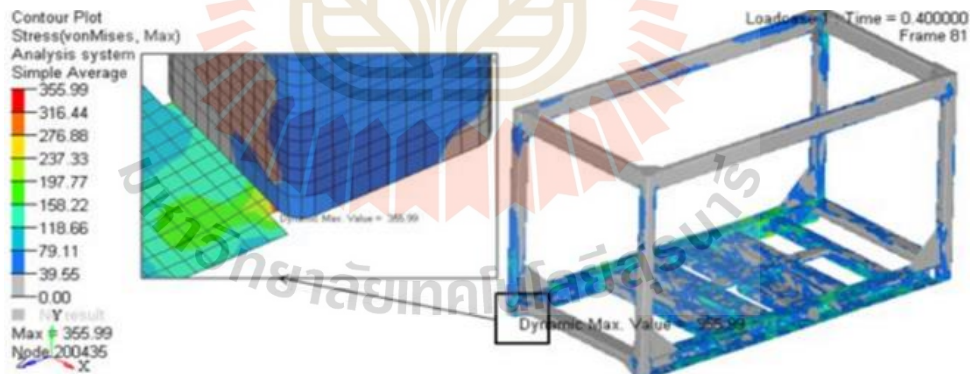


รูปที่ 5.8 บริเวณที่มี Maximum Plastic Stain

รูปที่ 5.9 แสดงค่าสูงสุดของ von-Mises stress อยู่ที่บริเวณมุมด้านหลังของโครงสร้าง Crash Frame มีค่าอยู่ที่ 369.34 MPa เมื่อเทียบกับค่าสูงสุดของ von-Mises stress ในงานวิจัย Anjekar และ Panchagade ที่มีค่าอยู่ที่ 356 MPa จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.75% เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ (ยอมรับได้ไม่เกิน 5%)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.9 ค่าสูงสุดของ von-Mises stress (ก) งานวิจัยนี้ และ (ข) งานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade

5.5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยบนนี้เปรียบเทียบผลการจำลองการปล่อยโครงสร้าง Crash Frame ให้ตกอย่างอิสระ โดยอ้างอิงบทความของ Anjekar และ Panchagade เพื่อยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมช่วยจำลอง Explicit Dynamic ANSYS® Workbench และ ศึกษาตัวแปรควบคุมต่าง ๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องของการจำลอง

ผลลัพธ์ของสมมูลพลังงานของการจำลองในบทนี้มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade มีค่าพลังงานจะสูงกว่าเพียงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบในช่วงระยะเวลาเดียวกัน จุดสูงสุดของค่าความเครียดอยู่ในบริเวณเดียวกันและมีค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเครียดอยู่ที่ 1.11% ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าร้อยละที่สามารถยอมรับได้ แต่สูงกว่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และ ค่าสูงสุดของ von-Mises stress มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 3.75% เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่สามารถยอมรับได้ (ยอมรับได้ไม่เกิน 5%) ส่งผลให้ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench นั้นมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ



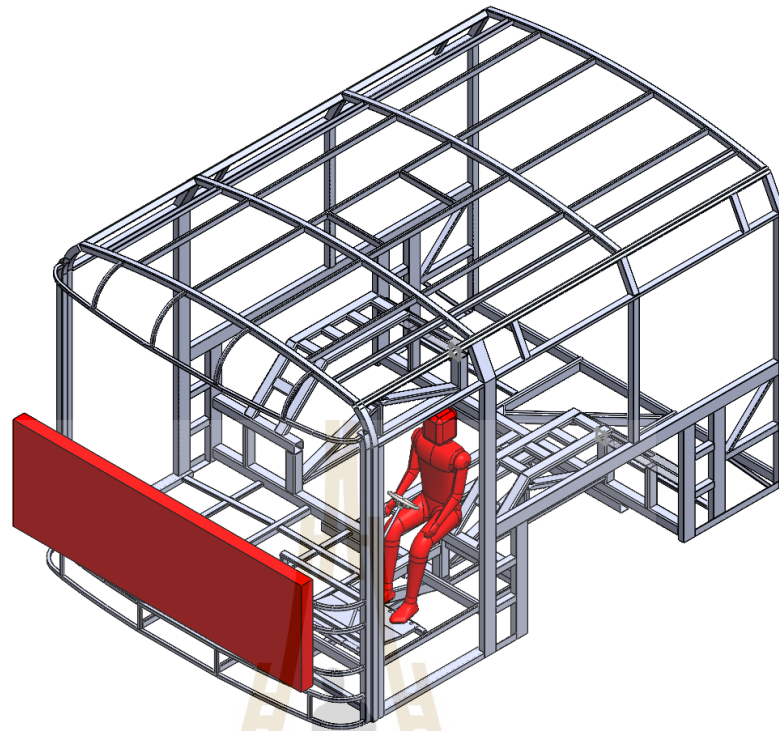
บทที่ 6

การวิเคราะห์โครงสร้างรถโดยสารภายใต้สภาวะการชนกระแทกด้านหน้าตาม มาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29

การวิเคราะห์การชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างรถโดยสารในประเทศไทยนั้นอ้างอิงมาตรฐานการชนด้านหน้ามาจากข้อกำหนด ECE-R29 ซึ่งถูกกำหนดให้โครงสร้างรถโดยสารรับพลังงานที่กระทำต่อโครงสร้างมากกว่า 55 kJ จากการชนกระแทกของลูกตุ้มที่ใช้ในการทดสอบที่มีน้ำหนักมากกว่า 1,500 kg (รายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 2) และทำการวิเคราะห์การชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench มีลำดับขั้นตอนการจำลองดังต่อไปนี้

6.1 แบบจำลองโครงสร้างรถโดยสาร

โครงสร้างของรถโดยสารที่ใช้ในการจำลองการวิเคราะห์เป็นโครงสร้างรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ (Low Floor Bus) ที่ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เชิดชัย คอร์ปอเรชั่น จำกัด นอกจากนี้แล้วได้ทำการเพิ่มหุ่นจำลองผู้ขับขี่ ซึ่งหุ่นจำลองผู้ขับขี่อ้างอิงจากมาตรฐานหุ่นจำลองของข้อกำหนด ECE-R29 และ ลูกตุ้มที่ใช้สำหรับการชนกระแทกดังแสดงในรูปที่ 6.1 ลูกตุ้มที่ใช้มีขนาดเท่ากับ $2,500 \times 800 \times 100 \text{ mm}^3$ ดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.1 โครงสร้างรถโดยสารประเภทพื้นต่ำ (Low Floor Bus)

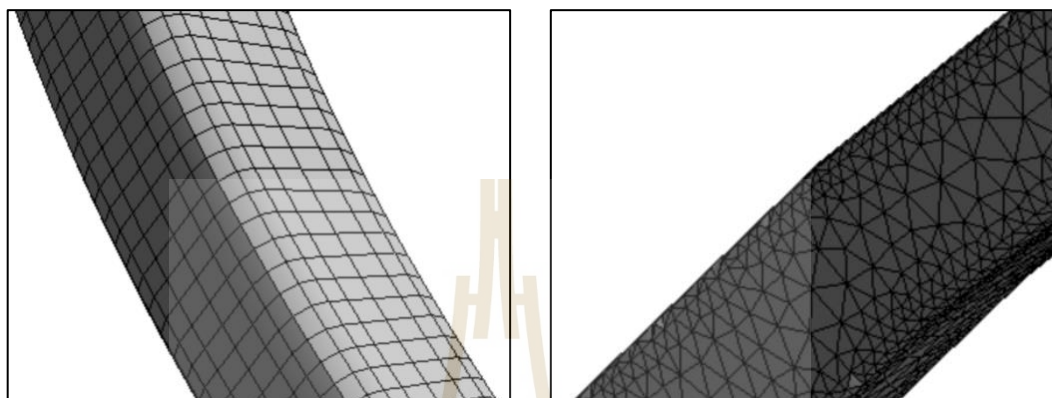


รูปที่ 6.2 ขนาดลูกตุ้มที่ใช้ชนกระแทก

6.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับโครงสร้างรถโดยสาร

จากการศึกษางานวิจัยของ Anjkar และ Panchagade พบว่าลักษณะเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์แบบชัดแจ้ง (Explicit) เป็นเอลิเมนต์ที่มีสมการอนุพันธ์ลำดับ 1 และ รูปร่างแบบสี่เหลี่ยม จึงนำมาปรับใช้กับงานวิจัยนี้ ซึ่งมีการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้บริเวณโครงสร้างที่ได้รับ

การชนกระแทกโดยตรงจากลูกตุ้มมีขนาดอยู่ที่ 4 mm บริเวณที่คาดว่าได้รับผลกระทบจากการกระแทกมีขนาดเอลิเมนต์อยู่ที่ 10 mm และ บริเวณอื่น ๆ 30 mm ลักษณะของเอลิเมนต์แสดงในรูปที่ 6.3



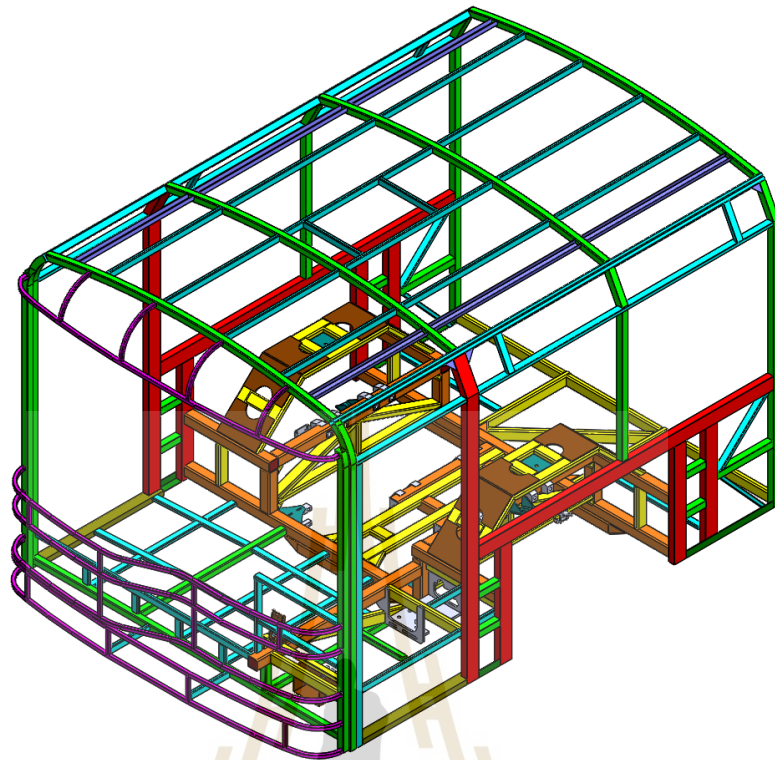
รูปที่ 6.3 ลักษณะของเอลิเมนต์

นอกจากนี้ ได้ทำการตรวจวัดคุณภาพของเอลิเมนต์โดยอ้างอิงตามเกณฑ์ของงานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade เพื่อให้ผลลัพธ์ของการจำลองที่ได้มีความถูกต้องมากที่สุด ซึ่งมีข้อกำหนดของเอลิเมนต์ดังนี้

- 6.2.1 ค่าอัตราส่วนความกว้าง (Aspect Ratio) มีค่าน้อยกว่า 5
- 6.2.2 ค่าอัตราส่วน Jacobian (Jacobian Ratio) มีค่ามากกว่า 0.5
- 6.2.3 ค่าลักษณะความยาวจำเพาะ (Characteristic Length) อยู่ระหว่าง 5 ถึง 20

6.3 เงื่อนไขและขอบเขต

โครงสร้างของรถโดยสารถูกสร้างขึ้นจากวัสดุ 2 ชนิดหลัก ได้แก่ เหล็กกล้า (Steel) และ Stainless Steel-RST4003 การกำหนดวัสดุถูกจำแนกด้วยสีของวัสดุดังแสดงในรูปที่ 6.4 นอกจากนี้ ยังจำแนกด้วยค่าคุณสมบัติของวัสดุที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ ในการวิเคราะห์แบบสถิตินั้นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์นั้นมีเพียงค่าความหนาแน่น อัตราส่วนปัวซอง (Poisson Ratio) และ โมดูลัสของยัง (Young's modulus) แต่ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีชัดแจ้ง หรือ การวิเคราะห์โครงสร้างแบบไม่เป็นเชิงเส้น จำเป็นจะต้องใช้ค่าคุณสมบัติ ณ จุดคราก (Yield Strength) ในการวิเคราะห์ด้วย วัสดุที่ใช้สร้างโครงสร้างและค่าคุณสมบัติ ณ จุดคราก แสดงดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.4 การจำแนกโครงสร้างตามวัสดุและค่าค่าคุณสมบัติ ณ จุดคราก

ตารางที่ 6.1 คุณสมบัติวัสดุของโครงสร้างรถโดยสาร

สีของโครงสร้าง	วัสดุ	Yield strength (MPa)
Orange	RST4003 Stainless Steel 80x80x4 mm	539
Yellow	RST4003 Stainless Steel 80x40x3 mm	539
Red	Profile Steel 100x50x1.8 mm	402
Green	Profile Steel 50x50x2.3 mm	421
Cyan	Profile Steel 50x25x2.3 mm	419
Magenta	Profile Steel 25x25x2 mm	450
Purple	Steel SS400 Thickness 2 mm	313
Brown	Steel SS400 Thickness 4 mm	360
Dark Brown	Steel SS400 Thickness 6 mm	294
Teal	Steel SS400 Thickness 8 mm	341
Olive Green	C Profile 3"	311
Dark Green	Angle Bar 2"x2"x4 mm	323

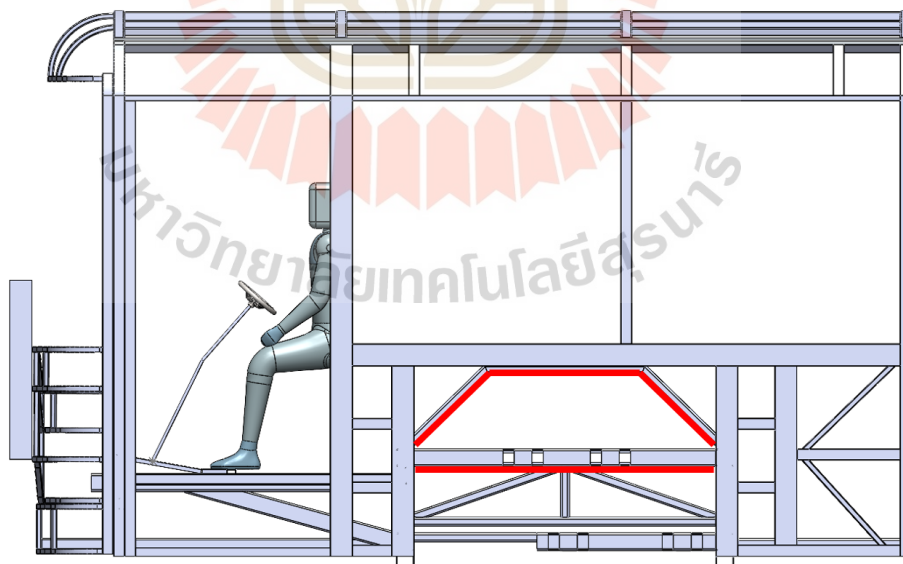
หลังจากทำการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับโครงสร้าง หลังจากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้กับโครงสร้าง โดยทำการกำหนดจุดยึดแบบตรึงแน่น (Fixed) ในบริเวณแถบสีแดงดังแสดงในรูปที่ 6.5 ซึ่งเป็นบริเวณโครงล้อของรถโดยสาร

ข้อกำหนด ECE-R29 ได้กำหนดให้โครงสร้างถูกชนกระแทกด้วยลูกตุ้มที่มีค่าพลังงานเท่ากับ 55 kJ ด้วยมวลของลูกตุ้มที่มากกว่า 1,500 kg การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตข้อนี้จำเป็นต้องกำหนดความเร็วเริ่มต้นให้กับลูกตุ้ม ซึ่งสามารถหาความเร็วได้จากสมการที่ 6.1

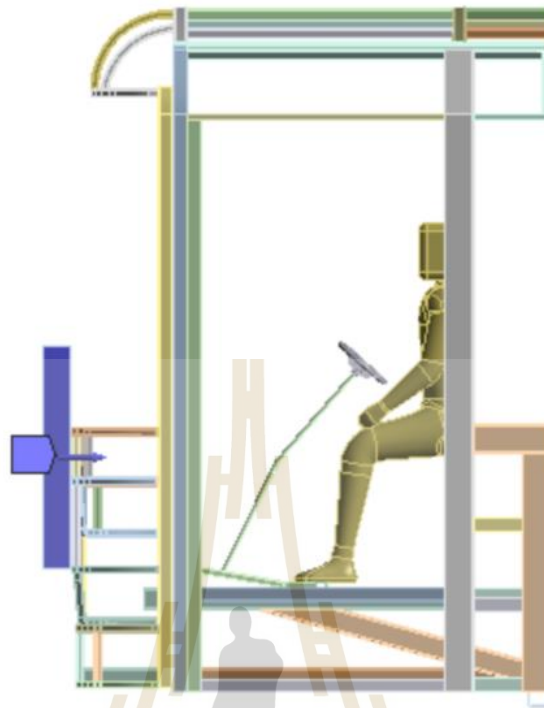
$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6.1)$$

โดย E คือ ค่าพลังงานการชนกระแทก
 m คือ มวลที่ชนกระแทก
 v คือ ความเร็วเริ่มต้นของมวลชนกระแทก

ค่าความเร็วเริ่มต้นของมวลที่ใช้ชนกระแทกที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 8.565 m/s จากนั้น นำค่าความเร็วเริ่มต้นนี้กำหนดให้กับลูกตุ้มเพื่อให้ลูกตุ้มมีพลังงานก่อนชนเท่ากับ 55 kJ โดยลูกตุ้มจะเคลื่อนที่เข้าหาโครงสร้างรถโดยสารดังรูปที่ 6.6



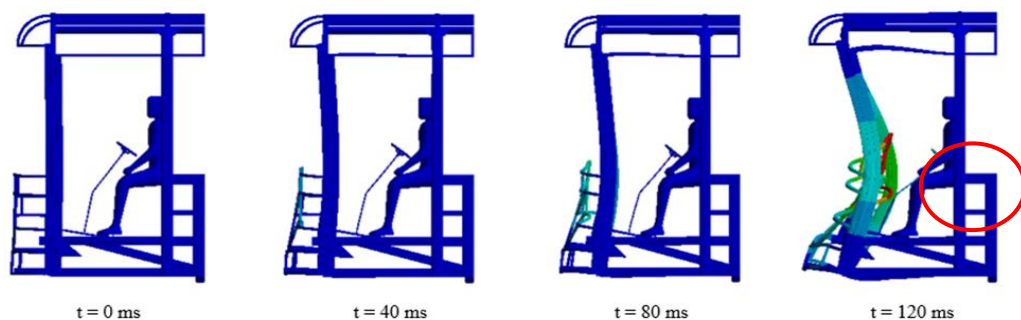
รูปที่ 6.5 ตำแหน่งการจับยึดโครงสร้าง



รูปที่ 6.6 ขอบเขตการชนกระแทกของลูกตุ้ม

6.4 ผลการจำลอง

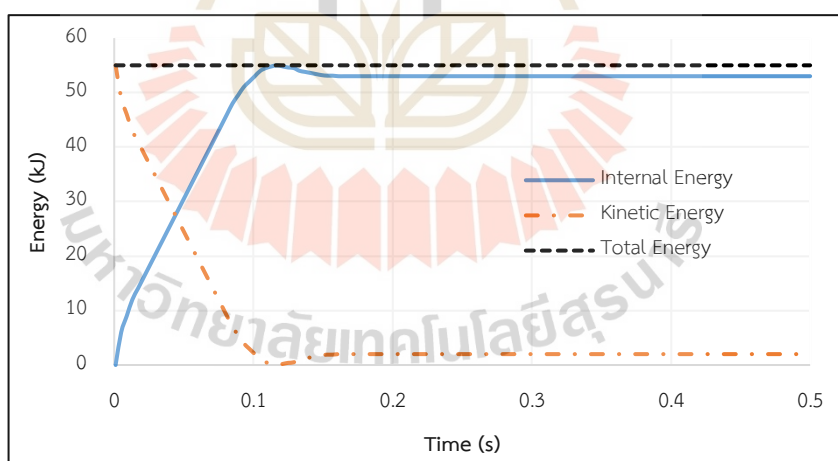
ผลลัพธ์ของการเสียรูปของโครงสร้างในแต่ละช่วงระยะเวลาแสดงในรูปที่ 6.7 โดยแบ่งเป็น 4 ช่วงหลัก ๆ คือ ช่วงก่อนชน ช่วงเริ่มชน ช่วงขณะชน และ ช่วงหลังการชน จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ของการเสียรูปที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างในส่วนของพวงมาลัยที่สัมผัสกับหุ่นจำลองผู้ขับขี่ ซึ่งตามข้อกำหนด ECE-R29 นั้นมีข้อกำหนดห้ามไม่ให้โครงสร้างหรือชิ้นส่วนใดลูกถ้วยบริเวณผู้ขับขี่ ส่งผลให้โครงสร้างไม่เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ECE-R29



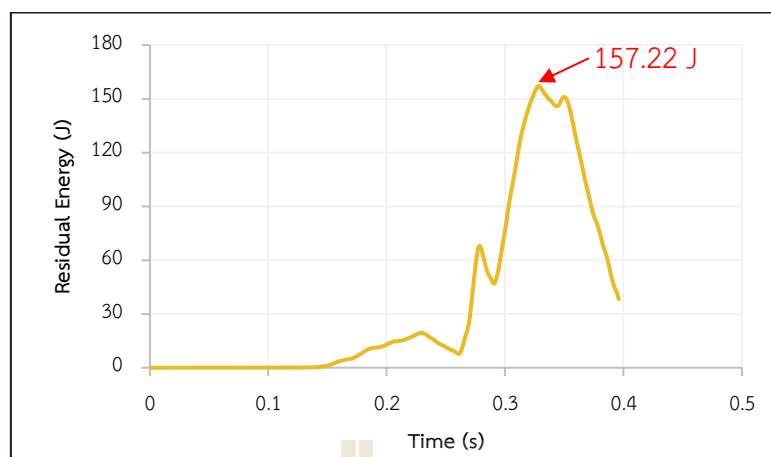
รูปที่ 6.7 ลักษณะการเสียรูปของโครงสร้างในช่วงเวลาที่ต่างกัน

รูปที่ 6.8 แสดงลักษณะของการดูดซับพลังงาน โดยค่าพลังงานที่เกิดจากลูกตุ้มเคลื่อนที่เข้าชนกับโครงสร้างของรถโดยสาร คือ พลังงานจลน์ หรือ Kinetic Energy เมื่อชนเข้ากับโครงสร้างของรถโดยสาร พลังงานจะถูกเปลี่ยนจากพลังงานจลน์เป็นพลังงานภายในที่โครงสร้างได้รับอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าโครงสร้างไม่สามารถดูดซับพลังงานไว้ได้ทั้งหมด สามารถดูดซับพลังงานได้เพียง 53 kJ เท่านั้น พลังงานส่วนที่เหลืออาจจะเกิดการตกค้างที่ลูกตุ้มที่ใช้ชน หรือ ถูกปลดปล่อยออกไปยังโครงสร้างบริเวณอื่น นอกจากการวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างแล้ว ยังทำการวัดค่าพลังงานที่ตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่ เพื่อตรวจสอบว่ามีค่าพลังงานตกค้างเกิน 30% ของพลังงานทั้งหมดหรือไม่ พบว่าค่าพลังงานที่ตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่มีค่าอยู่ที่ 157.22 J ซึ่งคิดเป็น 0.29% ของพลังงานทั้งหมด ดังที่ในรูปที่ 6.9

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับท่อผนังบางที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 4 นั้น ได้พบว่านอกจากค่าพลังงานแล้ว ในการวิเคราะห์การชนของโครงสร้างยานพาหนะจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าการชะลอตัวของความเร่งด้วย เนื่องจากการชะลอตัวของความเร่งที่สูงนั้นอาจเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดอันตรายกับผู้โดยสารหรือผู้ขับขี่ได้ งานวิจัยของ Quadfasel ได้พบว่าค่าการชะลอตัวของความเร่งจะต้องไม่เกิน 15 g (15 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก) ซึ่งค่าการชะลอตัวของความเร่งของโครงสร้างก่อนทำการปรับปรุงนี้มีค่าอยู่ที่ 16.1 g



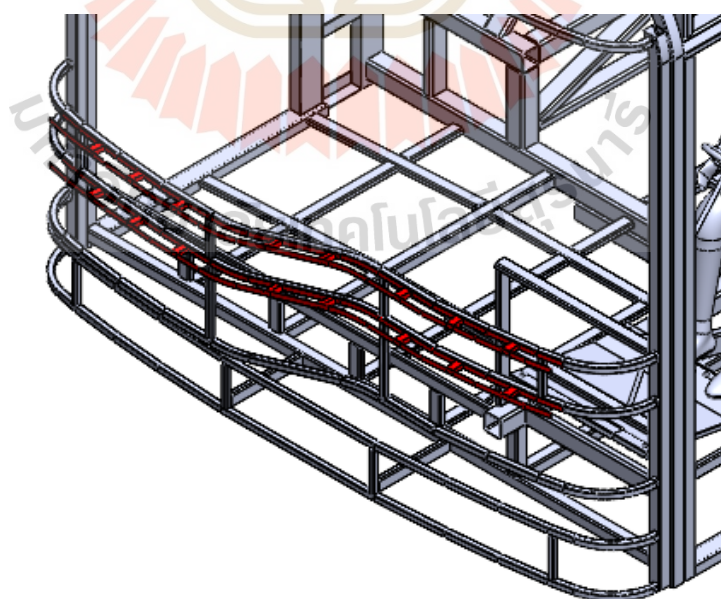
รูปที่ 6.8 กราฟการดูดซับพลังงานของโครงสร้าง



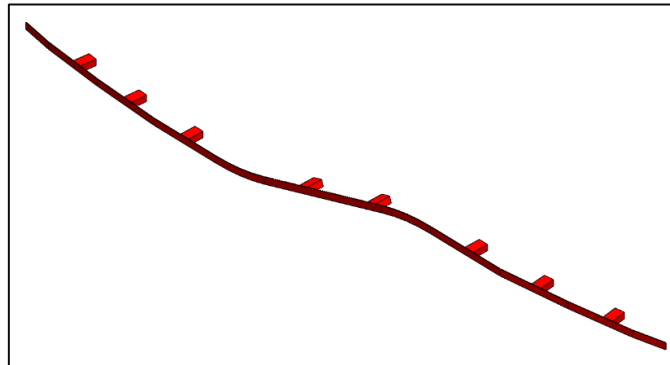
รูปที่ 6.9 กราฟค่าพลังงานตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่

6.5 การปรับปรุงโครงสร้างและการจำลอง

จากการศึกษาและทำการวิจัยในบทที่ 4 การวิเคราะห์การชนกระแทกของท่อผนังบางทำให้ทราบว่าท่อผนังบางรูปร่างหน้าตัดทรงแท่งเหลี่ยมเป็นรูปร่างที่สามารถดูดซับพลังงานได้มากที่สุด แต่โครงสร้างส่วนใหญ่เป็นท่อผนังบางรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยม เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการหาวัสดุใหม่ จึงทำการนำท่อผนังบางหน้าตัดสี่เหลี่ยมมาประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงโครงสร้างให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น โดยทำการเพิ่มท่อผนังบางหน้าตัดสี่เหลี่ยมในบริเวณด้านหน้าของผู้ขับขี่ ดังที่แสดงในรูปที่ 6.10 และ 6.11



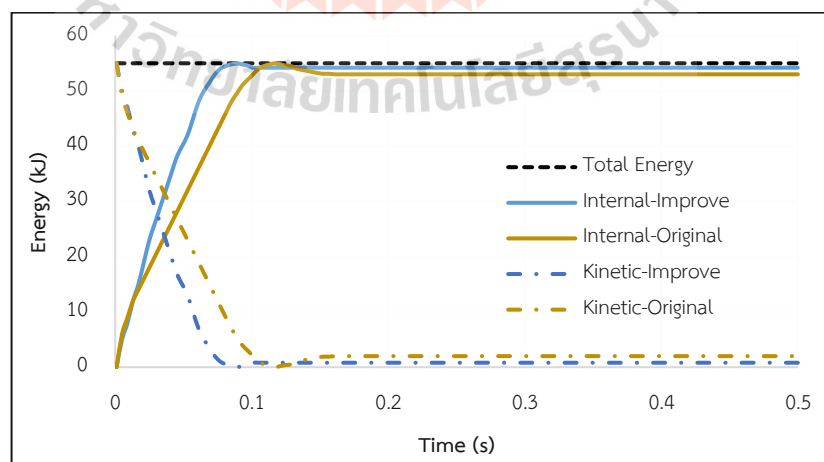
รูปที่ 6.10 โครงสร้างที่ถูกปรับปรุงด้วยท่อผนังบาง



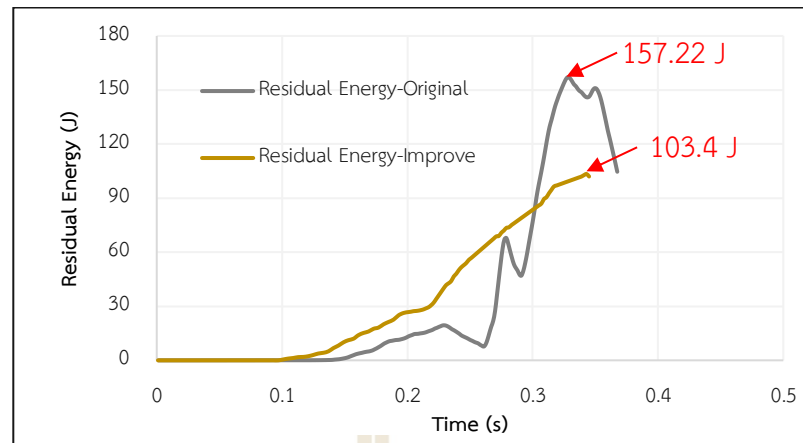
รูปที่ 6.11 โครงสร้างที่ถูกปรับปรุงด้วยท่อผนังบาง

ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงขึ้นสามารถดูดซับพลังงานได้มากกว่าโครงสร้างเดิม โดยสามารถดูดซับพลังงานได้ 54.2 kJ ดังแสดงในรูปที่ 6.12 และ เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่ โครงสร้างที่ถูกปรับปรุงมีค่าอยู่ที่ 103.4 J คิดเป็น 0.19% ของพลังงานทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 6.13 นอกจากนี้จากค่าพลังงานตกค้างที่ลดลงแล้วนั้น จากรูปที่ 6.14 พบว่าโครงสร้างที่ถูกปรับปรุงสามารถผ่านมาตรฐาน ECE-R29 ได้ เนื่องจากไม่มีโครงสร้างส่วนใดลูกล้มหุ่นจำลองผู้ขับขี่

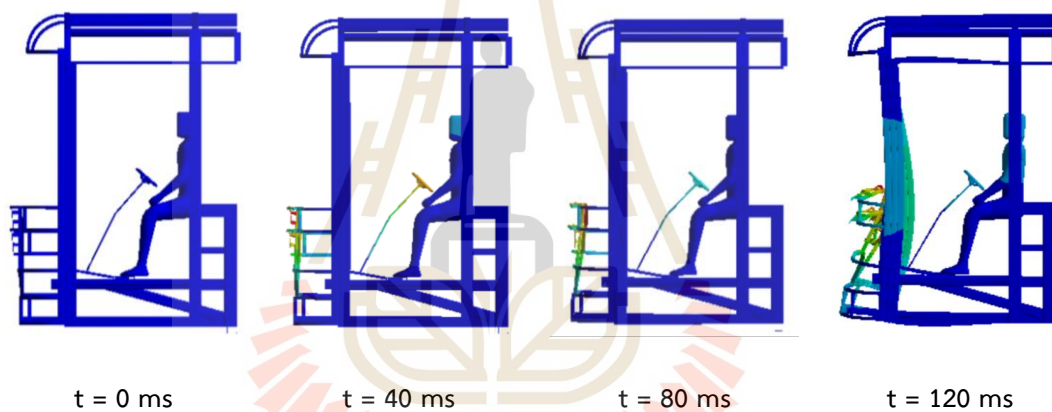
จากข้อกำหนดของงานวิจัย Quadfasel การชะลอตัวของความเร่งต้องน้อยกว่า 15 g (15 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก) ซึ่งโครงสร้างหลังทำการปรับปรุงนั้นสามารถช่วยลดค่าการชะลอตัวของความเร่งให้ลดลงได้ โดยค่าอยู่ที่ 13.8 g ซึ่งสามารถช่วยลดค่าการชะลอตัวของความเร่งได้ 14.3%



รูปที่ 6.12 กราฟการดูดซับพลังงานของโครงสร้างปรับปรุง

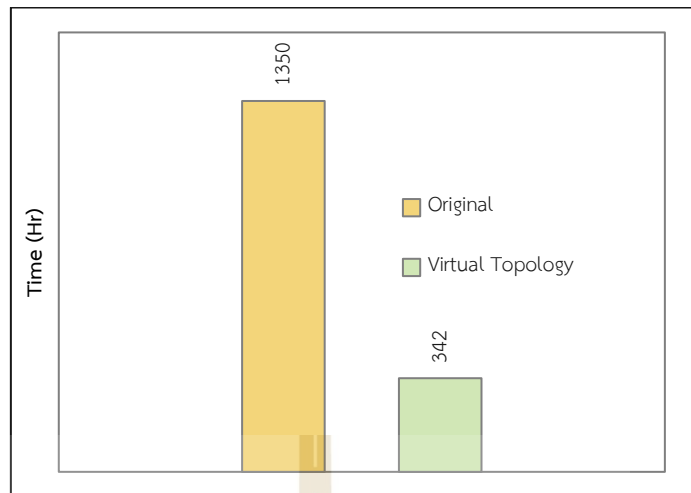


รูปที่ 6.13 กราฟค่าพลังงานตกค้างบนหุ่นจำลองผู้ขับขี่ของโครงสร้างปรับปรุง



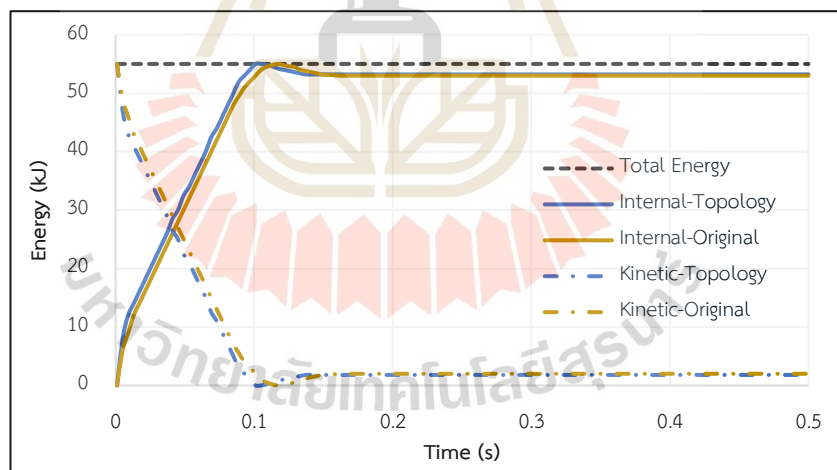
รูปที่ 6.14 ลักษณะการเสียรูปของโครงสร้างในช่วงเวลาที่ต่างกันของโครงสร้างปรับปรุง

เนื่องจากระยะเวลาในการจำลองการวิเคราะห์นั้นใช้เวลาค่อนข้างนาน จึงทำการหาวิธีการในการลดระยะเวลาในการจำลองการวิเคราะห์ คือ คำสั่ง Virtual Topology สามารถลดระยะเวลาจาก 1,350 ชั่วโมง เหลือ 342 ชั่วโมง ซึ่งคำสั่ง Virtual Topology สามารถช่วยลดระยะเวลาในการจำลองการวิเคราะห์ได้ถึง 3.95 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 กราฟเทียบระยะเวลาในการวิเคราะห์

ผลลัพธ์การดูดซับพลังงานที่ได้จากการใช้คำสั่ง Virtual Topology มีความใกล้เคียงกับการจำลองการวิเคราะห์โดยที่ยังไม่มีคำสั่ง Virtual Topology เข้ามาช่วย ดังแสดงในรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 กราฟการดูดซับพลังงานของการปรับใช้คำสั่ง Virtual Topology

6.6 ค่าใช้จ่ายในการจำลองการวิเคราะห์

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์การชนด้านหน้าของโครงสร้างรถโดยสารเป็นการช่วยลดต้นทุนที่ใช้ในการผลิตโครงสร้างจริงเพื่อทดสอบ แต่อย่างไรก็ตามในการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ช่วยในการวิเคราะห์ก็ยังมีต้นทุนเช่นกัน งานวิจัยนี้คำนวณต้นทุนการ

วิเคราะห์จากค่าไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการช่วยวิเคราะห์เท่านั้น ยังไม่คำนวณในส่วนของต้นทุนค่าจ้างผู้วิจัยหรือค่าใบอนุญาตโปรแกรม โดยแบ่งเป็น 2 กรณีหลัก คือ 1) การวิเคราะห์แบบไม่ใช้คำสั่ง Virtual Topology และ 2) การวิเคราะห์แบบใช้คำสั่ง Virtual Topology

การคำนวณค่าไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้าสามารถหาได้จากการนำกำลังไฟฟ้าคูณด้วยจำนวนชั่วโมงที่เครื่องใช้ไฟฟ้าทำงาน จากนั้นนำมาคูณกับค่าไฟฟ้าต่อหน่วย ดังแสดงในสมการที่ 6.2

$$\text{ค่าไฟฟ้าของเครื่องใช้ไฟฟ้า} = \text{กำลังไฟฟ้า (Watt)} \times \text{จำนวนชั่วโมง} \times \text{ค่าไฟฟ้าต่อหน่วย} \quad (6.2)$$

จากการคำนวณกำลังไฟฟ้าของคอมพิวเตอร์พบว่าคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการช่วยวิเคราะห์นั้นมีกำลังไฟฟ้าอยู่ที่ 527 วัตต์ จำนวนชั่วโมงที่ใช้ถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีดังที่กล่าวในข้างต้น และค่าไฟฟ้าต่อหน่วยอ้างอิงตามค่าไฟฟ้าในเดือน มกราคม 2566 อยู่ที่ 4.72 บาท ต่อ 1,000 kW ค่าไฟฟ้าของการวิเคราะห์ด้วยคอมพิวเตอร์แสดงดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการจำลองการวิเคราะห์

กำลังไฟฟ้า (watt)	จำนวนชั่วโมง	ราคาค่าไฟ/หน่วย	จำนวนเงิน (บาท)
527	1350	4.72	3,358.04
527	342	4.72	850.70

6.7 สรุปผล

งานวิจัยนี้ทำการจำลองการวิเคราะห์โครงสร้างของรถโดยสารภายใต้สภาวะการชนกระแทกด้านหน้าตามข้อกำหนด ECE-R29 โดยใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench โครงสร้างรถโดยสารในตอนต้นนั้นไม่สามารถผ่านข้อกำหนด ECE-R29 ได้ เนื่องจากมีโครงสร้างของพวงมาลัยลูกล่ำบริเวณพุนจำลองผู้ขับขี่ และมีพลังงานตกค้างบนพุนจำลองผู้ขับขี่ 157.22 J จึงได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างด้วยการเสริมท่อนั่งบนหน้าตัดสี่เหลี่ยม ซึ่งผลของการจำลองโครงสร้างหลังการปรับปรุง พบว่าบริเวณพุนจำลองผู้ขับขี่ไม่ถูกลูกล่ำด้วยพวงมาลัย และช่วยลดพลังงานตกค้างบนพุนจำลองผู้ขับขี่เหลือ 103.4 J

ในการวิเคราะห์การชนของโครงสร้างยานพาหนะต้องคำนึงถึงการชะลอตัวของความเร่งที่กระทำต่อโครงสร้างด้วย ค่าการชะลอตัวของความเร่งควรมีค่าน้อยกว่า 15 g เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่หรือผู้โดยสาร ค่าการชะลอตัวของความเร่งก่อนทำการปรับปรุงโครงสร้างนั้น มีค่าอยู่ที่ 16.1

g ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่กำหนด โครงสร้างที่ถูกปรับปรุงนี้มีค่าอยู่ที่ 13.8 g สามารถลดค่าการชะลอตัวของความเร่งได้ถึง 14.3%

นอกจากนี้ ยังมีการปรับปรุงการวิเคราะห์ที่สามารถวิเคราะห์ได้เร็วขึ้น โดยใช้คำสั่ง Virtual Topology ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ได้ 3-4 เท่า เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์แบบเดิม



บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์และจำลองการชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างรถโดยสารตามมาตรฐานยุโรปข้อกำหนดที่ 29 เพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของโครงสร้างรถโดยสารให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล และ ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยวิเคราะห์โปรแกรม Explicit Dynamic ANSYS® Workbench โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 3 ส่วนหลัก ซึ่งมีรายละเอียดโดยสรุปดังนี้

ในงานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซับพลังงาน 2 ปัจจัย คือ รูปร่างของหน้าตัด และความหนาของท่อผนังบาง ซึ่งพบว่าท่อผนังบางรูปร่างหน้าตัดหกเหลี่ยมสามารถดูดซับพลังงานได้มากที่สุด การดูดซับพลังงานของหน้าตัดอื่น ๆ นั้น มีค่าการดูดซับพลังงานที่แตกต่างจากหน้าตัดหกเหลี่ยมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในส่วนของความหนาของท่อผนังบางนั้นส่งผลต่อการดูดซับพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ หากท่อผนังบางมีความหนาเพิ่มขึ้น ค่าการดูดซับพลังงานก็เพิ่มขึ้นตามด้วย อย่างไรก็ตาม หากนำมาปรับใช้กับโครงสร้างรถยนต์หรือรถโดยสาร จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าการชะลอตัวของความเร่งด้วย หากมีค่าการชะลอตัวของความเร่งสูงกว่า 15 g อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ขับขี่และผู้โดยสารได้

การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ไม่เพียงแต่ตรวจสอบกับชิ้นงานอย่างง่ายเท่านั้น ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์จากงานวิจัยของ Anjekar และ Panchagade ผลการจำลองมีแนวโน้มของสมมูลพลังงานไปในทิศทางเดียวกัน ค่าสูงสุดของความเค้น von-Mises และ ค่าความเครียดจากพลาสติกสูงที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วงค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ทำให้ผลการจำลองที่ได้จากการเปรียบเทียบมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ นอกจากนี้ยังทำให้ทราบถึงค่าคุณสมบัติของวัสดุที่จำเป็นต่อการวิเคราะห์อีกด้วย

การจำลองการชนกระแทกด้านหน้าของโครงสร้างรถโดยสารตามข้อกำหนด ECE-R29 ในเบื้องต้นโครงสร้างรถโดยสารไม่สามารถผ่านมาตรฐานนี้ได้ เนื่องจากโครงสร้างของพวงมาลัยลูกล้าผู้ขับขี่จึงได้ทำการปรับปรุงโครงสร้างรถโดยสารด้วยการเสริมชิ้นส่วนท่อผนังบางหน้าตัดสี่เหลี่ยมให้กับโครงสร้างรถโดยสาร ซึ่งช่วยให้โครงสร้างสามารถผ่านข้อกำหนด ECE-R29 ได้ นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงการวิเคราะห์ให้สามารถวิเคราะห์ได้เร็วขึ้น โดยใช้คำสั่ง Virtual Topology ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ได้ 3-4 เท่า เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์แบบเดิม

7.2 ข้อเสนอแนะ

7.2.1 การวิเคราะห์การชนกระแทกด้วยระเบียบวิธีชัดแจ้งสามารถใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์อื่น ๆ นอกจาก Explicit Dynamic ANSYS® Workbench ในการช่วยวิเคราะห์ได้ เช่น SimScale, ABAQUS และ LS-DYNA

7.2.2 การจำลองใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน หากมีการปรับแก้คุณลักษณะเอลิเมนต์ในส่วนที่ไม่ได้รับผลกระทบจากการชนกระแทกเป็นเอลิเมนต์แบบแท่ง สามารถช่วยลดระยะเวลาในการจำลองได้

7.2.3 การสร้างโครงสร้างจริงมาวิเคราะห์จะช่วยให้ผลการจำลองน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

7.2.4 หากทำการสร้างโครงจริงเพื่อทำการทดสอบ ควรเป็นโครงสร้างที่ถูกย่อขนาดลงเพื่อประหยัดต้นทุนและเวลาในการสร้างโครงสร้าง

7.2.5 ทั้งนี้ หากต้องการให้โครงสร้างผ่านมาตรฐาน ECE-R29 ควรมีการทดสอบการทดสอบประเภท B และ C ด้วย



รายการอ้างอิง

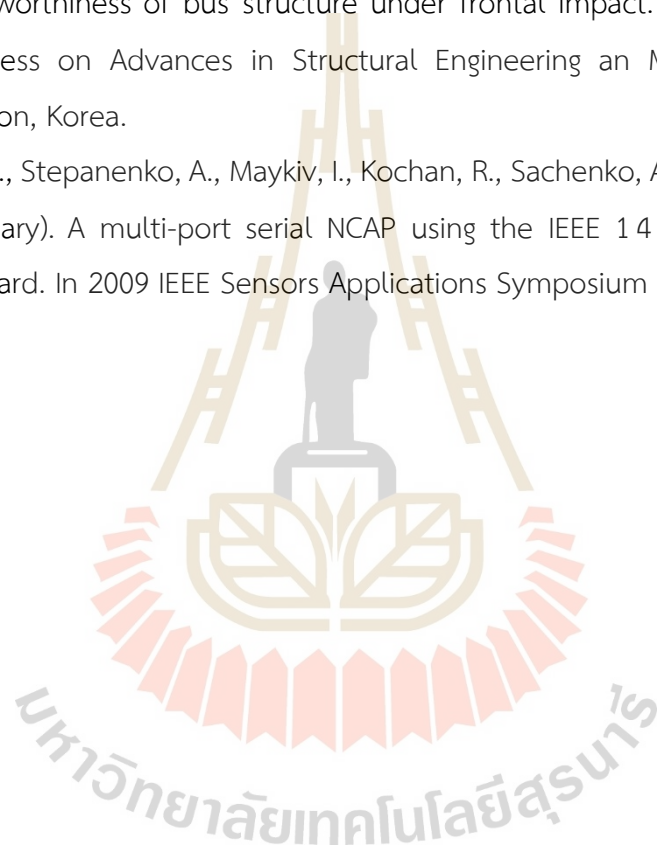
- กลุ่มงานสถิติ (2563), สถิติอุบัติเหตุรถโดยสารสาธารณะและรถบรรทุกประจำปีงบประมาณ 2563, กองแผนงานกรมการขนส่งทางบก
- มติชนออนไลน์ (2559), รถทัวร์ชนรถบรรทุกอ้อย, ข่าวอาชญากรรม-กระบวนการยุติธรรม
- Lee, N. S., & Bathe, K. J. (1993). Effects of element distortions on the performance of isoparametric elements. *International Journal for numerical Methods in engineering*, 36(20), 3553-3576.
- Güler, M. A., Cerit, M. E., Mert, S. K., & Acar, E. (2020). Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3026-3041.
- Deb, A., Mahendrakumar, M. S., Chavan, C., Karve, J., Blankenburg, D., & Storen, S. (2004). Design of an aluminium-based vehicle platform for front impact safety. *International journal of impact engineering*, 30(8-9), 1055-1079.
- Marzbanrad, J., Mehdikhanlo, M., & Pour, A. S. (2010). An energy absorption comparison of square, circular, and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 33(3), 159-166.
- Ismail, K. I., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Jawaid, M., & Safri, S. N. A. (2019). Low velocity impact and compression after impact properties of hybrid bio-composites modified with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 163, 455-463.
- Yang, Z., Deng, B., Deng, M., & Sun, G. (2018). A study on finite element analysis of electric bus frame for lightweight design. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 175, p. 03049). EDP Sciences.
- Akram, M. W., Islam, M. W., & Choudhury, S. K. (2017). Investigation of Different Mechanical Properties of Commonly Available Papers. In *International Conference on Mechanical, Industrial and Materials Engineering*.

- San Ha, N., & Lu, G. (2020). Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics. *Thin-Walled Structures*, 157, 106995.
- Liu, X., Liang, R., Hu, Y., Tang, X., Bastien, C., & Zhang, R. (2021). Collaborative optimization of vehicle crashworthiness under frontal impacts based on displacement oriented structure. *International Journal of Automotive Technology*, 22(5), 1319-1335.
- Kiani, M., & Yildiz, A. R. (2016). A comparative study of non-traditional methods for vehicle crashworthiness and NVH optimization. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(4), 723-734.
- Liao, X., Li, Q., Yang, X., Li, W., & Zhang, W. (2008). A two-stage multi-objective optimisation of vehicle crashworthiness under frontal impact. *International Journal of Crashworthiness*, 13(3), 279-288.
- Gao, D., Li, X., & Chen, H. (2019). Application of improved particle swarm optimization in vehicle crashworthiness. *Mathematical problems in Engineering*, 2019.
- Zhu, T., Xiao, S., Lei, C., Wang, X., Zhang, J., Yang, B., ... & Li, Y. (2021). Rail vehicle crashworthiness based on collision energy management: an overview. *International Journal of Rail Transportation*, 9(2), 101-131.
- Wang, H., Li, G. Y., & Li, E. (2010). Time-based metamodeling technique for vehicle crashworthiness optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(37-40), 2497-2509.
- Abdulqadir, S.F. (2018). Design a new energy absorber longitudinal member and compare with S-shaped design to enhance the energy absorption capability, *Alexandria Engineering Journal*, vol.57(4), December 2018, pp. 3405 – 3418.
- Baroutaji, A., Sajjia, M. and Olabi, A. (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, *Thin-Walled Structures*, vol.118(1), May 2017, pp. 137 – 163.
- Jin, M.Z., Yin, G.S., Hao, W.Q., Tuo, H.L. and Yao, R.Y. (2020). Energy absorption characteristics of multi-cell tubes with different cross-sectional shapes under quasi-static axial crushing, *International Journal of Crashworthiness*, October 2020, pp. 1 – 16.

- Wei, Z. (2021). Generation of deceleration pulses of the trolley in child restraint systems' dynamic test based on simulations and experimental validations, *Journal of Engineering Studies and Research*, vol.27(2), October 2021, pp. 107 – 114.
- Sun, G., Wang, Z., Hong, J., Song, K. and Li, Q. (2018). Experimental investigation of the quasi-static axial crushing behavior of filament-wound CFRP and aluminum/CFRP hybrid tubes, *Composite Structure*, vol.194(1), June 2018, pp. 208 – 225.
- Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M. and Byar, A. (2011). LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol.42(11), November 2011, pp. 1809 – 1825.
- Jiang, R., Zhang, T., Sun, H., Liu, D., Chen, H. and Wang, D. (2021). Study on light weighting of CFRP bumper beam using entropy-based TOPSIS approach, *Automotive Engineering*, vol.43(3), March 2021, pp. 421 – 428.
- Zhu, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G. and Li, Q. (2017). On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes, *Composite Structures*, vol.175(1), September 2017, pp. 58 – 69.
- Chen, J., Xu, S., Liu, Z., Tang, A. and Li, W. (2021). Lightweight optimization of aluminum alloy energy absorbing box for crash safety. *Automotive Engineering*, vol.43(3), March 2021, pp. 241 – 247.
- Robson, J.D., Engler, O., Sigli, C., Deschamps, A., and Poole, W.J. (2020). Advances in microstructural understanding of wrought aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol.51(9), July 2020, pp. 4377 – 4389.
- Hsu, S.S. and Jones, N. (2004). Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes, *International Journal of Crashworthiness*, vol.9(2), March 2004, pp. 195 – 217.
- Wang, Q., Hou, R., Li, J. and Ke, Y. (2018). Analytical and experimental study on deformation of thin-walled panel with non-ideal boundary conditions, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.149(1), December 2018, pp. 298 – 310.

- Nguyen, H. H., Nguyen, T. N., & Vu, H. C. (2018). Ductile fracture prediction and forming assessment of AA6061-T6 aluminum alloy sheets. *International Journal of Fracture*, 209(1), 143-162.
- VanLehn, K., Bhembe, D., Chi, M., Lynch, C., Schulze, K., Shelby, R., ... & Wintersgill, M. (2004, August). Implicit versus explicit learning of strategies in a non-procedural cognitive skill. In *International conference on intelligent tutoring systems* (pp. 521-530). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Anjekar, P. S., & Panchagade, D. R. (2013). FEA Simulation and Validation on Prototype of Compressor Crash Frame for Drop Test as per Industry Standard DNV 2.7-1. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(12), 2.
- Rizzi LI, Ortúzar JdD. Estimating the willingness-to-pay for road safety improvements. *Transport Reviews*. 2006;26(4):471-85.
- Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education.
- Rao, S. S. (2017). *The finite element method in engineering*. Butterworth-heinemann.
- Liu, G. R., Dai, K. Y., & Nguyen, T. T. (2007). A smoothed finite element method for mechanics problems. *Computational Mechanics*, 39(6), 859-877.
- Cerit, M. E., Mert, S. K., & Acar, E. (2020). Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3026-3041.
- Dede, G., & ÖZCANLI, M. (2016). Weight Reduction of Intercity Bus by Different Seat Construction Design in Compliance with APTA and FMVSS Standards. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 243-255.
- Afripin, M. A. A., Zainudin, A. Z., Sahar, M. A. H. F. M., & Yusof, M. (2019, November). Frontal impact on bus superstructure as per UNECE R29 and NCAP. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 670, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- Chen, D. Y., Wang, L. M., Wang, C. Z., Yuan, L. K., Zhang, T. Y., & Zhang, Z. Z. (2015). Finite element based improvement of a light truck design to optimize crashworthiness. *International Journal of Automotive Technology*, 16(1), 39-49.

- Raich, H., & DaimlerChrysler, A. G. (2003, May). Safety analysis of the new actros megaspace cabin according to ECE-R29/02. In Proceedings of the 4th European LS-DYNA users conference (pp. 22-23).
- Sharma, S. K., & Sharma, R. C. (2018). An investigation of a locomotive structural crashworthiness using finite element simulation. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 11(4), 235-244.
- Jongpradist, P., Senawat, S., & Muangto, B. (2015, August). Improvement of crashworthiness of bus structure under frontal impact. In The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15) Incheon, Korea.
- Wobschall, D., Stepanenko, A., Maykiv, I., Kochan, R., Sachenko, A., & Kochan, V. (2009, February). A multi-port serial NCAP using the IEEE 1451 smart transducer standard. In 2009 IEEE Sensors Applications Symposium (pp. 293-297). IEEE.





ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Veena Phunpeng, Sireegorn Sumklang and Thongchart Kerdphol (2021). **Static and Modal Analysis of UAV Composite-Based Structures**. International Symposium on Sustainable Aviation (ISSA), 25 – 27 November 2021, Bangkok, Thailand.

สิริกรณม์ สํากกลาง, วีณา พันเพ็ง, กนต์ธร ชานีประศาสน์ และ วัชรพงษ์ ปะตังทะโล. (2022). การจำลองการชนกระแทกของท่อผนังบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36, วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565, ประจวบคีรีขันธ์, ประเทศไทย.

Sireegorn Sumklang, Jiraphon Srisertpol, Watcharapong Patangtalo and Veena Phunpeng. (2022). **The Frontal Impact Analysis of Passenger-bus Structure Based on ECE-R29**. The 12th TSME International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2022), 13 – 16 December 2022, Phuket, Thailand. (In Press)

Static and Modal Analysis of UAV Composite-Based Structures

Veena Phunpeng, Sireegorn Sumklang and Thongchart Kerdphol

Abstract: An unmanned aerial vehicle (UAV) wing must be strong to support heavy take-off weight and high impact load on landing. Hence, the wing is considered as a crucial structure to deal with lift force. Conventionally, the UAV wings were made from heavy metals. Nowadays, the wing structure should be lightweight to fly a longer distance, improving flight operations. To fill in this research gap, this paper proposes a sustainable utilization of composite materials for constructing UAV wings. The static and modal structures of the wing are analyzed. The finite element method is used to analyze the UAV wing structure. The wing structure deformations, stresses, and strains are investigated through the ANSYS® Workbench software. Finally, to avoid the relative UAV component failure, the natural frequency analysis is demonstrated.

Keywords: Wing structure, Composite materials, Static structure, Natural frequency

Nomenclature

AL-2024 : Aluminium-2024
 CFRP : Carbon-fiber-reinforced polymers
 GFRP : Glass-fiber-reinforced polymers
 FEM : Carbon dioxide
 UAV : Unmanned Aerial Vehicle

1. Introduction

The main UAV component is the wing structure which, generates lift force, maintaining UAV stability in the air. The wing structure is connected to the fuselage and is subjected to repeat external force or continuous force. The wings must be strong to withstand the mentioned force. However, when the wing is too heavy, it affects the lift of a UAV. There are several materials to construct UAV wings. The majority of the material used in most aircraft types is aluminum alloy due to its strength and low density (compared with steel). Nowadays, the enhanced materials

V. Phunpeng (✉) S. Sumklang
 School of Mechatronics Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
 e-mail: veenap@g.sut.ac.th; sireegorn.s@gmail.com

T. Kerdphol
 Department of Electrical and Electronic Engineering, Kyushu Institute of Technology, Fukuoka, Japan
 e-mail: kerdphol@ele.kyutech.ac.jp

© Springer International Publishing AG 2021
 T.H. Karakoç et al. (eds.), *Sustainable Aviation*,
 DOI 10.1007/

2

called composite materials have played an essential role in the aviation industry including UAV structures.

A composite material is a combination of two materials with different physical and chemical properties. When there is a combination, it provides a novel material that improves the performances and properties (i.e., stronger, lighter, more resistant to electricity and so on) (Boransan et al., 2021, Saensuriwong et al., 2021). Therefore, composite materials are used to build UAV wings due to the weightless and strength. For analyzing the UAV structure, the finite element method (FEM) is commonly used. The FEM is a method based on mathematical principles to solve engineering problems. It has been used to analyze various engineering topics (e.g., material behavior, strength in structures and fluid flow). Most of the engineering problems can be expressed in terms of partial differential equations. To solve system of equations, the numerical method is applied to determine an approximated solution (Serkan et al., 2020).

This research work studies a UAV wing structure based on well-known composite materials (i.e., carbon-reinforced plastic (CFRP) and glass-fiber-reinforced plastic (GFRP)). To investigate the strength of the wing structure (i.e., stress, strain and deformation), the static structural module based on ANSYS software is used to simulate the strength of various types of material. To determine the natural mode shape and frequency of the wing structure during free vibration, the natural frequency is examined by the modal analysis. Finally, the obtained results are compared with the results of conventionally used material (i.e., aluminum alloy (Al)).

2. Method

In the design of the UAV structure, stability is taken into account. It is necessary to analyze the strength and aerodynamic of the UAV specially the main structures. This research focuses on the finite element method for strength and natural frequency analysis of UAV wings.

2.1. Materials

This research studies the strength of wing structures based on composite materials. The materials used to construct a wing are described as follows: carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP), glass-fiber-reinforced plastic (GFRP), and aluminum-2024 (AL-2024). The properties of materials are shown in Table 1 (Nielsen L.F., 2005).

Table 1:
Material Properties.

Material	Young's modulus (GPa)	Density (kg/m ³)	Poisson ratio
AL-2024	73.8	2770	0.34
CFRP	121	1490	0.27
GFRP	45	2000	0.3

2.2. Wing Design

Previously, several research works have studied wing construction, while the cross-section area of the wing is an airfoil shape. The airfoil commonly used for UAV wing is NACA-4412 (Sharma et al., 2013). Thus, the airfoil of NACA-4412 is

examined in this study. Fig. 1 shows the shape and dimensions of a rib with 3 mm of thickness. The ribs, spars and skin are structured together as described in Fig. 2.

Fig.1. An airfoil shape (NACA-4412) for a rib.

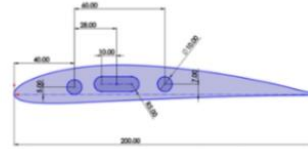
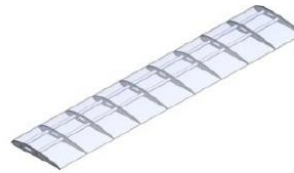


Fig.2. A CAD model of UAV wing without surface.



The material for the studied model is applied while the structure's overall weight is calculated. The total weight of the structure shows in Table 2. The CFRP represents the lightest material, while aluminum-2024 is the heaviest material.

Table 2: Weight of the structure.

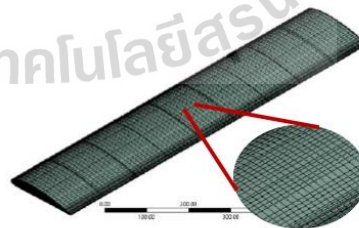
Material	Total weight (kg)
AL-2024	1.826
CFRP	0.982
GFRP	1.220

2.3. Numerical

The numerical method has been used to determine an approximated solution of engineering principles. The model validation must be performed to verify idealization. By applying a smaller mesh, a more accurate result can be obtained while it requires a longer running/simulation time. Following the previous research (Ting et al.), the proper mesh size has been verified. Thus, this study has mainly evaluated the mesh in three criteria; that is skewness, aspect ratio and orthogonal quality (Ting et al.,2019). The hexahedral mesh is shown in Fig. 3.

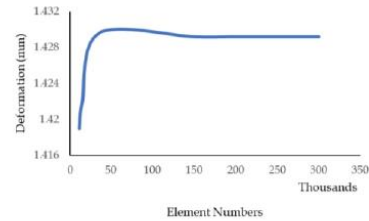
In addition to evaluated meshes, results were also validated by comparing the results with the number of elements (V. Phunpeng and P.M. Baiz, Mixed, 2015). It was found that with the element number higher than 150,000 the result became invariable and when the number of elements increased, the result remained the same as shown in Fig. 4.

Fig.3. Hexahedral mesh.



4

Fig.4. Validation number of elements.



Considering a wing structure, the lift force is induced by the aerodynamic based on an airfoil shape. The velocity of the UAV is defined at 20 m/s, which is an average (standard) velocity of small UAVs during a flight operation (Theys and Schutte, 2020). The lift coefficient can be obtained from airfoil data (Anderson, 2010) and formulation shown,

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_l \quad (1)$$

$$L = \frac{1}{2} (1.225) (20)^2 (0.41636431) (0.4741) \quad (2)$$

$$L = 48.3626 \approx 50 \text{ N} \quad (3)$$

The wing structure is connected to the fuselage, which acts as a cantilever beam. The external force, body force, and boundary are applied in the simulation model (see Fig.5), while the one-end at area C is fixed. The body force acts on the center gravity of the wing structure and the top surface is subjected to the distributed load of 50 N (Ramesh, 2013).

Fig.5. External and body force with boundary.



Next, the modal analysis is used to determine natural mode shapes and frequencies of the structure during free vibration. The modal analysis of wing structure is analyzed without a permanent stress condition. The configuration setting of modal analysis is similar to static structural analysis. To determine the natural frequency and displacement at the free-end, the ANSYS Workbench® software is used.

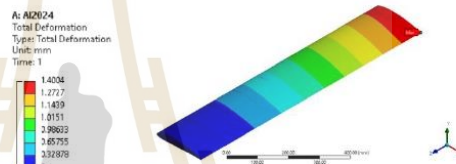
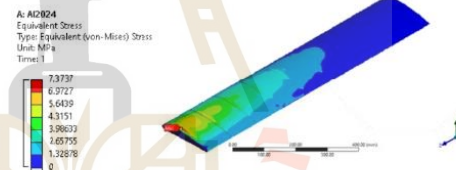
3. Results and Discussion

In static structure analysis, the total deformation, maximum equivalent stress, and maximum equivalent strain with various types of materials are observed, as shown in Table 3. The CFRP provides the highest deformation, equivalent stress, and equivalent strain, while the AL-2024 exhibits the lowest deformation, equivalent stress, and equivalent strain.

Table 3: The results of static structural analysis.

Material	Total Deformation (mm)	Maximum Equivalent Stress (MPa)	Maximum Equivalent Strain (mm/mm)
AL-2024	1.4004	7.374	1.00E-04
CFRP	15.104	15.196	1.85E-03
GFRP	13.373	12.116	1.52E-03

Figs. 6 and 7 show the simulation results of an AL-2024 wing structure, where the gradient color displays the variation of deformation, equivalent stress, and equivalent strain. Fig. 6 demonstrates the total deformation of the wing structure under static structural analysis. At the one-end, it yields the maximum deformation highlighted in red color, while the blue color signifies the minimum deformation. Similarly, the red color and blue color in Fig. 7 indicate the maximum and minimum equivalent stress of AL-2024 wing structures. Based on the static structure analysis, it is confirmed that the maximum equivalent stress and strain occur at the wing root. The CFRP has the advantage of a high strength-to-weight ratio for use in lightweight.

Fig.6. Total deformation of AL-2024 wing under static structural analysis.**Fig.7.** Equivalent stress of AL-2024 wing under static structural analysis.

Due to the resonance factor affecting the failure of UAV wing structures, the maximum deformation is determined without pre-stress conditions using the modal analysis. Table 4. examines the natural frequency and maximum deformation of the wing structure. By obtaining the natural frequency of the aircraft wing, it would be useful to calculate the resonance of the wing structure used to prevent the failure of the wing structure.

Table 4: The results of modal analysis.

Material	Natural frequency (Hz)	Total weight (kg)
CFRP with skin	10.163	0.982
GFRP with skin	9.455	1.220
CFRP without skin	4.748	0.373
GFRP without skin	4.266	0.463

4. Conclusion

Conventionally, UAV-wing structures are made of heavy metal or high-density materials, which could significantly affect the lift force and durability of

UAVs. This paper proposes a sustainable utilization of composite materials for constructing UAV wings. The typical wing model is analyzed using the ANSYS Workbench® to determine the high performance and light-weight structure. Compared with the glass-fiber-reinforced plastic and aluminum, the carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP) provides superior performances in terms of light-weight, flexibility, and external load. In modal analysis, the lowest frequency mode is considered. The natural frequency of the CFRP wing structure is higher than those of GFRP, resulting in the delay of resonance. Consequently, the CFRP can be utilized and extended to apply in other aviation structures i.e., fuselage, empennage, nacelle, cowlings structures, and other structures such as automotive parts, motorcycle frames, sports equipment.

References

- Aabid, A., Zakuan, M.A.M.B.M., Khan, S.A. and Ibrahim, E.Y., 2021. Structural analysis of three-dimensional wings using finite element method. *Aerospace Systems*, p.1-17. <https://doi.org/10.1007/s42401-021-00114-w>
- Anderson, J.D., 2010. *Fundamentals of Aerodynamics*. New York: McGraw-Hill.
- Boransan, W., Kerdphol, T. and Phunpeng, V., 2021. Experimental manufacturing of glass fiber composites considering flexural behaviour. *Spektrum Industri*, 19(2), p.87-95. <http://dx.doi.org/10.12928/si.v19i2.21658>
- Gotten, F., Finger, D.F., Havermann, M., Braun, C., Marino, M. and Bil, C., 2021. Full configuration drag- estimation of short-to-medium range fixed-wing UAVs and its impact on initial sizing optimization. *CEAS Aeronautical Journal*, 12(1), p.589-596. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00522-w>
- Phunpeng, V. and Biaz, P.M., 2014. Mixed finite element formulations for strain-gradient elasticity problems using the FEniCS environment. *Finite Elements in Analysis and Design*, 96(1), p.23-40. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2014.11.002>
- Ramesh, K., Balakrishnan, S. R. and Balaji, S., 2013. Design of an aircraft wing structure for static analysis and fatigue life prediction. *International Journal for Engineering Research & Technology*, 2(5), p.129-135.
- Saensuriwong, K., Kerdphol, T. and Phunpeng, V., 2021. Laboratory study of polypropylene-based honeycomb core for sandwich composites. *Spektrum Industri*, 19(2), p.97-104. <http://dx.doi.org/10.12928/si.v19i2.21659>
- Sullivan, R.W., Hwang, Y., Rohani, M. and Lacy, T., 2009. Structural analysis and testing of an ultralight unmanned-aerial-vehicle carbon-composite wing. *Journal Aircraft*, 46(3), p.814-820. <https://doi.org/10.2514/1.36415>
- Theys, B. and Schutte, J.D., 2020. Forward flight tests of a quadcopter unmanned aerial vehicle with various spherical body diameters. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 12(1), p.1-8. <https://doi.org/10.1177/SAGE-JOURNALS-UPDATE-POLICY>
-

Ting, K.S., Balasubramanian, E., Surendar, G. and Sachin, S., 2019. Finite element analysis, prototyping and field testing of amphibious unmanned aerial vehicles. UPB Scientific Bulletin, Series D, 18(2), p.125-140.

Thomas, B. and Roy, T., 2015. Vibration and damping analysis of functionally graded carbon nanotubes reinforced hybrid composite shell structures. Journal of Vibration and Control, 23(11), p.1711-1738.
<https://doi.org/10.1177/1077546315599680>



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005



การจำลองการชนกระแทกของท่อผนังบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ Crashworthiness Analysis of Thin-Walled Tubes Using Finite Element Method

สิริกรณ์ สักกลาง*, วิณา พันเพ็ง, กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และ วัชรพงษ์ ปะดิงทะโล

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000
*ติดต่อ: sireegorn@gmail.com

บทคัดย่อ

ปัจจุบันท่อผนังบางนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์และอุตสาหกรรมอากาศยานมากขึ้น เนื่องด้วยท่อผนังบางนั้นมีโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานจากการชนกระแทก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง โดยปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ความหนา (2 mm 3 mm และ 4 mm) และรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกันของท่อผนังบาง (อาทิเช่น วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และ หกเหลี่ยม) โดยกระบวนการวิจัยจะดำเนินการวิเคราะห์การชนกระแทกของท่อผนังบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench จากการวิเคราะห์ผลการจำลองพบว่าท่อผนังบางหน้าตัดหกเหลี่ยมมีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานจากการชนมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับท่อผนังบางรูปร่างหน้าตัดอื่นๆ ในส่วนของความหนาท่อผนังบาง หากท่อผนังบางมีความหนาเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ถึงอย่างไรก็ตามหากมีการนำมาปรับใช้กับโครงสร้างสำหรับการชนกระแทกของรถยนต์หรืออากาศยาน การดูดซับพลังงานของท่อผนังบางจำเป็นต้องมีการชะลอตัวของความเร็วจึงต่ำกว่า 15g เพื่อความปลอดภัยต่อผู้โดยสาร

คำหลัก: การชนกระแทก การดูดซับพลังงาน ท่อผนังบาง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

Nowadays, thin-walled tubes are increasingly used in automotive and aerospace industries due to their being lightweight and effective in absorbing energy from collisions. This research aims to study the effect of energy-absorbing and absorption efficiency of thin-walled tubes at different thicknesses (i.e., 2 mm, 3 mm, and 4 mm) and cross-sections (i.e., circle, triangle, square, and hexagon). The analysis of thin-walled structure deformations, energy absorption, and acceleration was accomplished using Explicit Dynamic ANSYS® Workbench software. The simulation results found that hexagonal cross-section thin-walled tubes had the most outstanding absorption efficiency in absorbing collision energy compared to the others. The energy absorption efficiency increases when the structure thickness is increased. However, when the thin-walled tubes are used as a bumper structure in automobiles or aircraft, the capability of crash force should be reduced and provide a deceleration of less than 15g to ensure passenger safety.

Keywords: crashworthiness; energy absorption; thin-walled tube; finite element

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005



1 บทนำ

โครงสร้างของยานพาหนะจำเป็นต้องมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นสูง เพื่อความปลอดภัยของผู้ขับขี่และผู้โดยสาร ในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุการชนกระแทก [1] การที่โครงสร้างของยานพาหนะจะแข็งแรงได้นั้นต้องใช้วัสดุที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งวัสดุประเภทที่มีความแข็งแรงสูงก็เป็นวัสดุที่มีน้ำหนักมากด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้อาจส่งผลให้ยานพาหนะมีน้ำหนักที่สูงเกินความจำเป็นและไม่เหมาะสมกับการใช้งานในยานพาหนะบางประเภท ตัวอย่างเช่น รถที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (รถยนต์อีโค) และรถยนต์นั่งสมรรถนะสูง (รถสปอร์ต) จึงมีการนำท่อนั่งบางมาปรับใช้กับโครงสร้างของยานพาหนะ เพื่อให้โครงสร้างยานพาหนะมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักที่เหมาะสมต่อการใช้งาน

ปัจจุบันท่อนั่งบางถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องบินและรถยนต์มากขึ้น เนื่องจากท่อนั่งบางนั้นมีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานที่เกิดจากการชนกระแทกได้ดี [2-4] ในการขึ้นรูปท่อนั่งบางวัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูปมีหลากหลายประเภท อาทิ วัสดุประเภทโลหะ โลหะผสม หรือแม้กระทั่งวัสดุผสม (คอมโพสิต) ที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตท่อนั่งบางด้วยเช่นกัน [5-10] ทั้งนี้ยังได้ศึกษางานวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับวัสดุที่นิยมนำมาขึ้นรูปท่อนั่งบาง จากการศึกษา งานวิจัยของ Hsu และ Jones [11] ได้ทำการทดลองการชนกระแทกท่อนั่งบางที่ขึ้นรูปด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และอะลูมิเนียมผสม (aluminium alloy) พบว่าการดูดซับพลังงานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และจากงานวิจัยอื่นๆ พบว่าวัสดุที่นิยมนำมาขึ้นรูปท่อนั่งบาง คือ อะลูมิเนียมผสม (aluminium alloy) [12-15] เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีอัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง (high strength to weight ratio) ความเหนียวที่ต้านการแตกหักสูง (high fracture toughness) และมีน้ำหนักที่เบา (light weight) [16] อะลูมิเนียมผสมจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมในการนำมาใช้โครงสร้างรับพลังงานการชนกระแทก

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานการชนกระแทกของท่อนั่งบางไม่ได้มีเพียงปัจจัยเรื่องวัสดุเพียงอย่างเดียว Yu and Lu [17] Seitzberger et al. [18] และ Rajendran et al. [19] ได้ศึกษาท่อนั่งบางแบบทรงกลม

และแบบทรงสี่เหลี่ยม พบว่าท่อนั่งบางแบบทรงสี่เหลี่ยมนี้มีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าท่อนั่งบางแบบทรงกลม Song et al. [20] Najafi et al. [21] จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานการชนกระแทกของท่อนั่งบางแบบทรงกรวยเปรียบเทียบกับท่อนั่งบางแบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม โดยท่อนั่งบางแบบทรงกระบอกหน้าตัดวงกลมนั้นมีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานจากการชนกระแทกที่ต่ำกว่าท่อนั่งบางแบบทรงกรวย Vinayagar and Kumar [22] ทำการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อนั่งบางแบบ 2 ชั้น ที่มีหน้าตัดแตกต่างกัน (วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยม) และ Shakeri et al. [23] ทำการศึกษาปัจจัยเรื่องความหนาของท่อนั่งบาง ความหนาของท่อนั่งบางนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานซึ่งแสดงให้เห็นว่าท่อนั่งบางแบบสองชั้นและความหนาของท่อนั่งบางต่อการดูดซับพลังงานอย่างมีนัยสำคัญ

ในการทดสอบการชนกระแทกของท่อนั่งบางนั้น มีระยะเวลาในการทดสอบและมีค่าใช้จ่ายที่สูง เพื่อลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายในการทดสอบ Wang et al. [24] Golewski et al. [25] ศึกษาการเสียรูปของท่อนั่งบางที่ถูกแรงกดกระทำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ ABAQUS ผลลัพธ์ที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากการทดลองและค่าเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (น้อยกว่า 3%) Gairola and Jayagathan [26] ศึกษาการรับแรงดัดของท่อนั่งบาง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ ANSYS นอกจากนี้ยังมีโปรแกรมช่วยวิเคราะห์อื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงในข้างต้นอีกด้วย เช่น SimScale, OpenFoam และ LS-DYNA เป็นต้น

งานวิจัยนี้จึงศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อนั่งบาง โดยปัจจัยที่ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ ความหนาและรูปร่างหน้าตัดที่แตกต่างกันของท่อนั่งบาง ดำเนินการวิเคราะห์การชนกระแทกของท่อนั่งบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005



2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานการชนกระแทกนั้นมีหลากหลายปัจจัย ตัวอย่างเช่น วัสดุที่ใช้ในการขึ้นรูป รูปร่างหน้าตัด ความหนา รวมถึงน้ำหนักของโครงสร้าง ปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับพลังงานการชนกระแทก การหาประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานการชนกระแทกสามารถพิจารณาได้จากตัวชี้วัดดังต่อไปนี้

2.1 การดูดซับพลังงาน (Energy Absorption, EA)

การดูดซับพลังงาน หมายถึง ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ที่กระทำกับโครงสร้าง ค่าการดูดซับพลังงานสามารถหาได้จากสมการที่ 1 โดยหากพื้นที่ใต้กราฟของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับโครงสร้างและระยะการโก่งตัวของโครงสร้างดังที่แสดงในกราฟที่ 1

$$EA(dx) = \int_0^{dx} F(x) dx \quad (1)$$

โดยที่ตัวแปร F คือ แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง และ x คือ ระยะการโก่งตัวของโครงสร้าง

2.2 การดูดซับพลังงานจำเพาะ (Specific Energy Absorption, SEA)

การดูดซับพลังงานจำเพาะ หมายถึง ความสามารถในการดูดซับพลังงานจลน์ที่กระทำกับโครงสร้างเทียบต่อหน่วยมวลของโครงสร้าง การดูดซับพลังงานจำเพาะหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$SEA = EA/m \quad (2)$$

โดยที่ตัวแปร m คือ มวลของโครงสร้าง

2.3 แรงชนกระแทกเฉลี่ย (Mean Crush Force, MCF)

แรงชนกระแทกเฉลี่ย หมายถึง ค่าเฉลี่ยของแรงทั้งหมดที่กระทำกับโครงสร้าง คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$MCF = EA(dx)/dx \quad (3)$$

2.4 แรงชนกระแทกสูงสุด (Peak Crushing Force, PCF)

แรงชนกระแทกสูงสุด หรือ PCF หมายถึง ภาระแรงสูงสุดที่กระทำกับโครงสร้าง โดยค่าแรงชนกระแทกสูงสุดและ

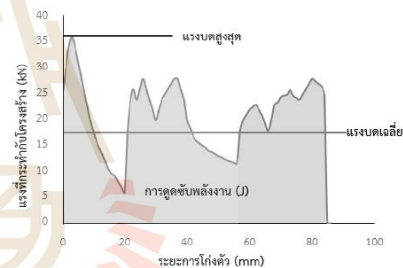
แรงชนกระแทกเฉลี่ยควรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เพื่อให้มีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานที่สูง

2.5 ประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก (Crush Force Efficiency, CFE)

ประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงชนกระแทกเฉลี่ยต่อแรงชนกระแทกสูงสุด สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการที่ 4 โดยค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทกบ่งบอกถึงความสามารถในการรับแรงของโครงสร้าง ค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทกอุดมคติมีค่าเท่ากับ 100%

$$CFE = (MCF/PCF) \times 100 \quad (4)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับโครงสร้างและระยะการโก่งตัวของโครงสร้างแสดงดังกราฟที่ 1 ค่าที่แสดงในกราฟคือ ค่าการดูดซับพลังงาน ค่าแรงชนกระแทกเฉลี่ย และ ค่าแรงชนกระแทกสูงสุด



กราฟที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับโครงสร้างและระยะการโก่งตัวของโครงสร้าง

3 การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ การออกแบบ และ การจำลองการวิเคราะห์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบ

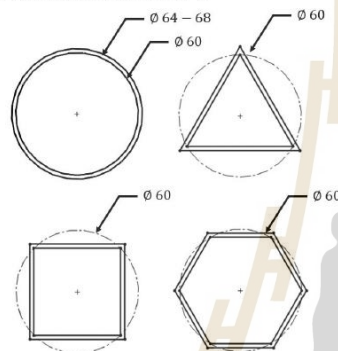
งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน ปัจจัยหลักที่ศึกษา คือ ความหนาและรูปร่างหน้าตัดของท่อผนังบาง โดยแบบจำลองทุกแบบขึ้นรูปแบบจำลองด้วยโปรแกรม SOLIDWORKS 2020

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005



ความหนาของท่อน้ำบางถูกกำหนดไว้ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 2 mm 3 mm และ 4 mm ท่อน้ำบางมีความสูง 150 mm และรูปร่างหน้าตัดของท่อน้ำบางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแต่ละหน้าตัดอยู่ที่ 60 mm รูปร่างของหน้าตัดที่ศึกษาในงานวิจัยมี 4 รูปร่าง ได้แก่ วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และ หกเหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 1 นอกจากนี้มวลและพื้นที่หน้าตัดของแต่ละรูปแบบถูกวัดค่าและบันทึกผลดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 รูปแบบของหน้าตัดท่อน้ำบาง

ตารางที่ 1 ค่ามวลและพื้นที่หน้าตัดของท่อน้ำบางแต่ละรูปแบบ

รูปร่างหน้าตัด	ความหนา (mm)	มวล (g)	พื้นที่หน้าตัด (mm ²)
วงกลม	2	157.77	389.56
	3	240.47	593.76
	4	325.72	804.25
สามเหลี่ยม	2	134.68	332.55
	3	208.34	514.42
	4	286.20	706.68
สี่เหลี่ยม	2	143.94	355.41
	3	220.77	545.12
	4	300.84	742.84
หกเหลี่ยม	2	151.41	373.86
	3	231.33	571.18
	4	314.05	775.43

3.2 การจำลองการวิเคราะห์

การทดสอบชิ้นงานจริงมีต้นทุนที่สูงและใช้ระยะเวลาในการทดสอบ เพื่อลดต้นทุนและระยะเวลาในการทดสอบระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการจำลองการชนกระแทกท่อน้ำบาง โดยรายละเอียดในการจำลองการวิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

3.2.1 วัสดุ

งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการชนกระแทกท่อน้ำบางที่ขึ้นรูปจากวัสดุ aluminium alloy 6061 ค่าคุณสมบัติของ aluminium alloy 6061 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของ aluminium alloy 6061

คุณสมบัติ	ค่าคุณสมบัติ
ความหนาแน่น (kg/m^3)	2,700
มอดูลัสของยัง (GPa)	68.9
ความแข็งแรง (MPa)	276
อัตราส่วนปัวซอง	0.33

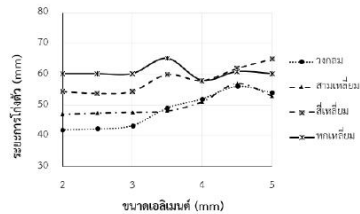
3.2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การชนกระแทกท่อน้ำบางด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ Explicit Dynamic ANSYS® Workbench

ลักษณะของเอลิเมนต์ถูกกำหนดให้เป็นรูปแบบสามเหลี่ยม ขนาดเอลิเมนต์ของท่อน้ำบางและวัตถุที่ชนกระแทกที่ 2.5 mm และ 60 mm ตามลำดับ ซึ่งเป็นขนาดของเอลิเมนต์ที่ค่าผลลัพธ์ระยะโค้งตัวของการจำลองที่แล้วดังที่แสดงในกราฟที่ 2 นอกจากนี้เอลิเมนต์แบบ refinement ถูกนำมาปรับใช้กับแบบจำลอง ซึ่งช่วยลดโอกาสการเคลื่อนขยับของเอลิเมนต์ ส่งผลให้เกิดการบิดเบี้ยว (distortion) ลดลง การประมวลผลจึงมีความแม่นยำเพิ่มขึ้น จำนวนเอลิเมนต์ของแบบจำลองทั้งหมดมีเอลิเมนต์ 69,955 เอลิเมนต์ และจำนวนจุดเชื่อมต่อ 21,822 จุด รูปที่ 2 แสดงลักษณะเอลิเมนต์ของท่อน้ำบางและวัตถุชนกระแทก

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005



กราฟที่ 2 ความสัมพันธ์ขนาดเอลิเมนต์และระยะโง่งตัว

3.2.3 เส้นใยและขอบเขต

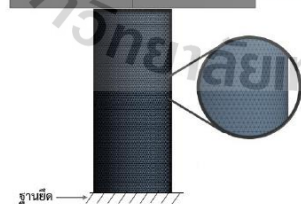
ท่อผนังบางจะได้รับพลังงานจากการชนกระแทกโดยการกำหนดให้ปล่อยวัตถุชนกระแทกที่มีน้ำหนัก 253 kg ที่ความสูง 2 m จากข้อกำหนดนี้ท่อผนังบางจะได้รับพลังงานการชนกระแทก 5 kJ และการชะลอตัวของความเร็วก่อเกิดจากการชนกระแทกนั้นควรมีค่าน้อยกว่า 15 g หรือ 15 เท่าของแรงโน้มถ่วงโลก เพื่อความปลอดภัยของผู้โดยสารหากนำท่อผนังบางนี้มาปรับใช้กับโครงสร้างรับแรงกระแทกของรถยนต์ [26]

รูปที่ 2 แสดงการกำหนดขอบเขตของแบบจำลอง โดยกำหนดให้ท่อผนังบางเป็นวัตถุที่สามารถเสียรูปได้ (flexible) ผิวส่วนล่างของท่อผนังบางเป็นฐานยึดที่มั่นคง (fixed support) และกำหนดให้วัตถุชนกระแทกเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid) จากความสูงในการปล่อยวัตถุชนกระแทกสามารถเปลี่ยนเป็นความเร็วเริ่มต้นของวัตถุชนกระแทกได้ดังสมการที่ 5 [27]

$$v = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

โดยตัวแปร v คือความเร็วต้น g คือค่าแรงโน้มถ่วง และ h คือความสูงของระยะชนกระแทก จากสมการที่ 5 สามารถหาค่าความเร็วเริ่มต้นของวัตถุชนกระแทกได้ 6.3 m/s

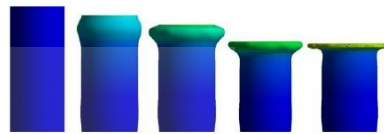
วัตถุชนกระแทก | 253 kg, 6.3 m/s



รูปที่ 2 ลักษณะเอลิเมนต์และขอบเขตของท่อผนังบาง

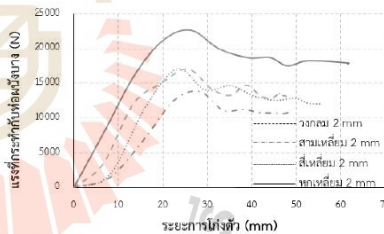
4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

ผลการจำลองพบว่าลักษณะการเสียรูปของท่อผนังบางที่ได้รับการชนกระแทกจะเริ่มจากการโง่งตัวออกด้านข้างของท่อ จากนั้นผนังท่อส่วนที่โง่งตัวออกจะเริ่มเกิดการเสียรูปแบบการพับตัวลง ดังที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเสียรูปของท่อผนังบางหน้าตัดวงกลม

เมื่อนำระยะการโง่งตัวของท่อผนังบางที่มีความหนา 2 mm มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับท่อผนังบางหนาและระยะการโง่งตัว จะได้กราฟความสัมพันธ์ดังกราฟที่ 3 วิเคราะห์จากกราฟดังกล่าวพบว่าท่อผนังบางที่มีหน้าตัดรูปร่างกลมเหลี่ยมมีค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าตัดอื่นๆ โดยค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟ นำค่าการดูดซับพลังงานที่ได้หารด้วยมวลของท่อผนังบาง เพื่อหาค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ และหาค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก ผลลัพธ์แสดงในตารางที่ 3



กราฟที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำและระยะการโง่งตัวของท่อผนังบางหนา 2 mm

เมื่อวิเคราะห์ตารางที่ 3 และกราฟที่ 4 พบว่าค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางมีความสัมพันธ์กันอย่างน้อยก็สำคัญ หากความหนาของท่อผนังบางนั้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แม้ว่าค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความหนาของท่อ แต่เมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะ พบว่ามวลของท่อผนัง

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005

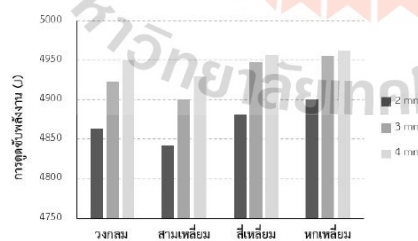


บางเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความหนาของท่อผนังบาง และค่าการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางที่มีความหนา 3 mm และ 4 mm มีค่าการดูดซับพลังงานแตกต่างจากท่อผนังบางที่หนา 2 mm เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่งผลให้ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะลดลงอย่างเห็นได้ชัด

จากค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก รูปร่างหน้าตัดแบบหกเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมมีค่าประสิทธิภาพของแรงชนกระแทกที่สูง ปังชี้ถึงความสามารถในการรับแรงของท่อผนังบางว่ามีประสิทธิภาพในการรับแรงได้สูง

ตารางที่ 3 ค่าประสิทธิภาพการดูดซับพลังงาน

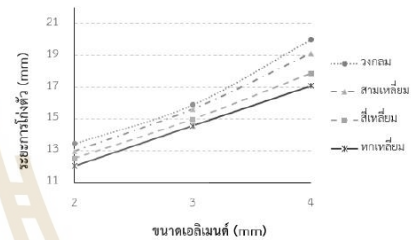
รูปร่างหน้าตัด	ความหนา (mm)	EA (kJ)	SEA (kJ/kg)	CFE (%)
วงกลม	2	4.86	30.804	70.94
	3	4.92	20.46	65.74
	4	4.95	15.20	67.52
สามเหลี่ยม	2	4.84	35.94	65.84
	3	4.90	23.52	62.93
	4	4.93	17.23	63.94
สี่เหลี่ยม	2	4.88	33.90	74.32
	3	4.95	22.42	73.32
	4	4.97	16.52	76.67
หกเหลี่ยม	2	4.90	32.36	79.51
	3	4.96	21.44	76.95
	4	4.98	15.86	78.43



กราฟที่ 4 ผลการดูดซับพลังงานของท่อผนังบางแต่ละหน้าตัด

การนำท่อผนังบางมาปรับใช้กับโครงสร้างรับแรงชนกระแทกของรถยนต์นอกเหนือจากการวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงานและประสิทธิภาพของแรงชนกระแทก ยังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้โดยสารอีกด้วย โดยค่าการชะลอตัวของความเร่งไม่เกิน 15 g [26] ค่าการชะลอตัวที่ได้จากการจำลองมีหน่วยเป็น m/s^2 นำค่าการชะลอตัวหารด้วยค่าความเร่งโน้มถ่วง ($9.81 m/s^2$)

ท่อผนังบางที่มีความหนา 4 mm (ทุกหน้าตัด) และท่อผนังบางที่มีความหนา 3 mm (หน้าตัดวงกลมและสามเหลี่ยม) แม้ว่าจะมีค่าการดูดซับพลังงานที่สูงแต่มีค่าการชะลอตัวของความเร่งที่สูงกว่า 15 g จึงอาจจะไม่เหมาะสมกับการนำมาปรับใช้ในการรับแรงชนกระแทกกับโครงสร้างรถยนต์



กราฟที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการชะลอตัวของความเร่งและความหนาของท่อผนังบาง

5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานของท่อผนังบาง โดยศึกษาด้วยกันทั้งหมด 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือ ความหนาของท่อผนังบาง พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของท่อผนังบางและประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานมีความสัมพันธ์กันน้อยสำคัญ กล่าวคือ เมื่อความหนาของท่อผนังบางนั้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานก็เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และอีกปัจจัยคือรูปร่างของหน้าตัดท่อผนังบาง เมื่อวิเคราะห์ค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะพบว่ารูปร่างที่มีประสิทธิภาพการดูดซับพลังงานจำเพาะมากที่สุดคือ รูปร่างแบบหกเหลี่ยม ถัดมาคือรูปแบบสี่เหลี่ยม วงกลม และสามเหลี่ยมตามลำดับ

อย่างไรก็ตามในการนำมาปรับใช้กับโครงสร้างรับแรงชนกระแทกของรถยนต์ นอกจากจะวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005



การดูดซับพลังงานแล้วต้องคำนึงถึงการชะลอตัวของความเร่งด้วยเช่นกัน เนื่องจากหากมีการชะลอตัวของความเร่งที่สูงเกินกว่า 15 g อาจส่งผลให้เกิดอันตรายต่อผู้โดยสารได้ ดังนั้นในการนำท่อนั่งบางมาปรับใช้จึงจำเป็นต้องพิจารณาในเรื่องของความปลอดภัยต่อผู้โดยสารด้วย

6 เอกสารอ้างอิง

- [1] Abdulqadir, S.F. (2018). Design a new energy absorber longitudinal member and compare with S-shaped design to enhance the energy absorption capability, *Alexandria Engineering Journal*, vol.57(4), December 2018, pp. 3405 – 3418.
- [2] Baroutaji, A., Sajjia, M. and Olabi, A. (2017). On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments, *Thin-Walled Structures*, vol.118(1), May 2017, pp. 137 – 163.
- [3] Jin, M.Z., Yin, G.S., Hao, W.Q., Tuo, H.L. and Yao, R.Y. (2020). Energy absorption characteristics of multi-cell tubes with different cross-sectional shapes under quasi-static axial crushing, *International Journal of Crashworthiness*, October 2020, pp. 1 – 16.
- [4] Wei, Z. (2021). Generation of deceleration pulses of the trolley in child restraint systems' dynamic test based on simulations and experimental validations, *Journal of Engineering Studies and Research*, vol.27(2), October 2021, pp. 107 – 114.
- [5] Balakrishnan, V., Roshan, P., Goel, S., Jayaganthan, R. and Singh, I.V. (2017). Experimental and XFEM simulation of tensile and fracture behavior of al-6061 alloy processed by severe plastic deformation, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, vol.6(1), January 2017, pp. 55 – 72.
- [6] Sun, G., Wang, Z., Hong, J., Song, K. and Li, Q. (2018). Experimental investigation of the quasi-static axial crushing behavior of filament-wound CFRP and aluminum/CFRP hybrid tubes, *Composite Structure*, vol.194(1), June 2018, pp. 208 – 225.
- [7] Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M. and Byar, A. (2011). LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol.42(11), November 2011, pp. 1809 – 1825.
- [8] Jiang, R., Zhang, T., Sun, H., Liu, D., Chen, H. and Wang, D. (2021). Study on light weighting of CFRP bumper beam using entropy-based TOPSIS approach, *Automotive Engineering*, vol.43(3), March 2021, pp. 421 – 428.
- [9] Zhu, G., Sun, G., Liu, Q., Li, G. and Li, Q. (2017). On crushing characteristics of different configurations of metal-composites hybrid tubes, *Composite Structures*, vol.175(1), September 2017, pp. 58 – 69.
- [10] Chen, J., Xu, S., Liu, Z., Tang, A. and Li, W. (2021). Lightweight optimization of aluminum alloy energy absorbing box for crash safety. *Automotive Engineering*, vol.43(3), March 2021, pp. 241 – 247.
- [11] Hsu, S.S. and Jones, N. (2004). Quasi-static and dynamic axial crushing of thin-walled circular stainless steel, mild steel and aluminium alloy tubes, *International Journal of Crashworthiness*, vol.9(2), March 2004, pp. 195 – 217.
- [12] Duddeck, F., Hunkeler, S., Lozano, P., Wehrle, E. and Zeng, D. (2016). Topology optimization for crashworthiness of thin-walled structures under axial impact using hybrid cellular automata, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol.54(3), April 2016, pp. 415 – 428.
- [13] Xu, F. and Wang, C. (2016). Dynamic axial crushing of tailor-welded blanks (TWBs) thin-walled structures with top-hat shaped section, *Advances in Engineering Software*, vol.96(1), June 2016, pp. 70 – 82.

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

CST-0005



- [14] Zhang, S., Pedersen, P.T. and Ocakli, H. (2015). Collisions damage assessment of ships and jack-up rigs, *Ships and Offshore Structures*, vol.10(5), July 2015, pp. 470 – 478.
- [15] Davies, M. A., & Balachandran, B. (2000). Impact dynamics in milling of thin-walled structures, *Nonlinear Dynamics*, vol.22(4), August 2000, pp. 375 – 392.
- [16] Robson, J.D., Engler, O., Sigli, C., Deschamps, A., and Poole, W.J. (2020). Advances in microstructural understanding of wrought aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol.51(9), July 2020, pp. 4377 – 4389.
- [17] Lu, G. and Yu, T. (2003). *Energy Absorption of Structures and Materials*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [18] Seitzberger, M., Rammerstorfer, F.G., Gradinger, R., Degischer, H.P., Blaimschein, M. and Walch, C. (2000). Experimental studies on the quasi-static axial crushing of steel columns filled with aluminium foam, *International Journal of Solids and Structures*, vol.37(30), July 2000, pp. 4125 – 4147.
- [19] Rajendran, R., Sai, K.P., Chandrasekar, B., Gokhale, A. and Basu, S. (2009). Impact energy absorption of aluminium foam fitted AISI 304L stainless steel tube, *Materials and Design*, vol.30(5), May 2009, pp. 1777 – 1784.
- [20] Song, J., Chen, Y. and Lu, G. (2013). Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.66, January 2013, pp. 239 – 248.
- [21] Najafi, A. and Rais-Rohani, M. (2011). Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell and multi-corner crush tubes, *Thin-Walled Structures*, vol.49(1), January 2011, pp. 1 – 12.
- [22] Vinayagar, K. and Kumar, A.S. (2017). Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures, *Thin-Walled Structures*, vol.112(1), March 2017, pp. 184 – 193.
- [23] Shekari, M.R., Hekmatzadeh, A.A. and Amiri, S.M. (2019). On the nonlinear dynamic analysis of base-isolated three-dimensional rectangular thin-walled steel tanks equipped with vertical baffle, *Thin-Walled Structures*, vol.138(1), May 2019, pp. 79 – 94.
- [24] Wang, Q., Hou, R., Li, J. and Ke, Y. (2018). Analytical and experimental study on deformation of thin-walled panel with non-ideal boundary conditions, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.149(1), December 2018, pp. 298 – 310.
- [25] Golewski, P., Gajewski, J. and Sadowski, T. (2017). Optimization of a thin-walled element geometry using a system integrating neural networks and finite element method, *Archives of Metallurgy and Materials*, vol.62(1), August 2017, pp. 435 – 442.
- [26] Gairola, S. and Jayaganthan, R. (2021). XFEM simulation of tensile and fracture behavior of Ultrafine-Grained Al 6061 alloy, *Metals*, vol.11(11), November 2021, pp. 1761 – 1782.
- [27] Quadfasel, A., Teller, M., Madivala, M., Haase, C., Roters, F. and Hirt, G. (2019). Computer-Aided Material Design for Crash Boxes Made of High Manganese Steels, *Metals*, vol.9(7), July 2019, pp. 772 – 783.
- [28] Sun, G., Xu, F., Li, G., and Li, Q. (2014). Crashing analysis and multiobjective optimization for thin-walled structures with functionally graded thickness, *International Journal of Impact Engineering*, vol.64(1), February 2014, pp. 62 – 74.

The 12th TSME International Conference on Mechanical Engineering
13th – 16th December 2022
Phuket, Thailand



CST0014

The Frontal Impact Analysis of Passenger-bus Structure Based on ECE-R29

Sireegorn Sumklang*, Watcharapong Patangtalo and Veena Phunpeng

School of Mechatronics Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand

* Corresponding Author: E-mail: sireegorn@gmail.com

Abstract. The bus is the type of vehicle that causes the most damage in the event of an accident. The first type of an accident is frontal crashworthiness which causes damage to life and assets. Damage to life and assets occurs due to a bus structure that may not satisfy a frontal crashworthiness regulation. However, designing and constructing bus structures in Thailand is only an overturned test. The front crash standard is not yet considered a structural requirement for buses made in Thailand. This paper analyses passenger-bus structure under the frontal crash based United Nations Economic Commission of Europe (UNECE) Regulation no. 29. A computer simulation model is performed to determine the structural strength to withstand the load produced by the full-frontal impact. Finite element simulation is used to perform a frontal impact analysis on a passenger-bus structure. According to the simulation results, the energy absorption based on the ECE-R29 regulation is 55 kJ, the model structure can absorb 52.4 kJ. The total deformation observed from the ECE-R29 simulation shows severe deformation in the frontal structures, which causes damage to the driver's dummy. Reinforced thin-walled tubular construction has been to improve the bus's structural strength. The driver's dummy is unaffected by the structure's distortion. As a result, the safety and reliability standards of buses are elevated.

Keywords: Crashworthiness, Explicit dynamics, Frontal impact, ECE R-29.

1. Introduction

The number of traffic accidents on the road tends to rise annually. The vehicles that cause the most damage during an accident are trucks and buses. According to the classification of accidents based on the type of accident, this was observed that frontal collision was the most frequent cause of the accident, which can include colliding stuff such as trees, traffic islands, persons, and barriers [1]. Front collision accidents cause damage to life and assets. However, the damage to life and assets incurred is partly due to the structure of the bus having strength and safety that do not satisfy the standards of a frontal collision. The standard for bus construction in Thailand is based on the overturning standard in the bus structure test, which is the ECE-R66, but the frontal crashworthiness standard was not considered. Trial and error testing of the bus structure is one of the factors that increase the cost of the bus. Analyzing and simulating testing before structural testing, can help reduce costs and trial and error.

Analysis of engineering problems with some large structures is unable to create actual structures for testing or analysis due to the high cost of building. The most of analytical method is the Finite Element Method (FEM) because of its ability to deal with the complexity of both differential equations. FEM operates on the principle of dividing the problem domain into smaller pieces called elements and

connecting with a mesh [2, 3]. The accuracy of the answers obtained by this finite element method depends on the deformation pattern of the element. Constant Strain Triangular Element is more flexible to the mesh of complex geometry problems, although its accuracy is less than Bilinear Quadrilateral element [4].

In addition, were studied related research, research by Cerit et al. [5] compared the original cone bumper model and the bumper model that improved the corrugated shape of the front structure to have the ability to absorb energy while carrying the load of the front impact driver to analyze the strength of the front passenger compartment structure under the European standard ECE R-29 front impact conditions. It was discovered that both models could absorb energy by deflecting the bumper model itself with kinetic energy. Dede et al. [6] studied the design of a compact car body with 6061 T6 aluminum as a reference to Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) No. 208, which defines the speed of the structure with LS-DYNA, dynamic collisions are simulated at 30 mph. Additionally, Afripin et al. [7] a compression test were carried out at a speed of 2 m/s and the findings were compared with the simulation of this test piece. A T-joint weld test specimen was built to accomplish bending at the weld location. Two front collision standards, ECE R-29 and NCAP, were examined. The frontal crash test, according to NCAP, with a speed of 56 km/h, and the test, according to ECE-R29 used a pendulum weighing 1,500 kg. Compared to the ECE R-29, the bus structure in the NCAP was subjected to higher energy.

In this study, the ECE R-29 regulation is used to evaluate the strength and safety of bus structures in the event of an accident frontal crashworthiness. The finite element method is the norm for engineering analysis. The Finite Element Method was utilized as a guideline to enhance the design and preliminary analysis of the bus structure before actual fabrication and testing. It also lowers the costs and limits associated with testing. The computer program used to analyze the explicit finite element method is called Explicit Dynamic ANSYS® Workbench.

2. Methodology

The research process is divided into 2 parts: First, find information on the requirements of ECE-R29 regulations then set the boundary through the Explicit Dynamic ANSYS® Workbench.

2.1. Frontal collision standard

The assessments used in the frontal impact studies were ECE-R29, which cover frontal collisions of the bus. For ECE-R29, a pendulum is utilized with a specific angular velocity.

2.1.1. ECE R-29

ECE-R29 is a frontal crash test standard recommended by the United Nations (UN). There are three impact tests: Tests A, B, and C. Test A aims to assess a cab's resilience in a frontal impact accident. Test B is an impact test to the cab's pillar, while Test C is a strength test of the cab's roof [8]. This research examines driver protection in frontal collision accidents. As a result, Test A is used to examine the bus structure.

According to the ECE-R29 Test A frontal impact test, a pendulum with an impact energy of 55 kJ strikes the bus. The pendulum plate has a surface area of 2,500 mm by 800 mm, weighing at least 1,500 kg equally distributed. The beams connected to the pendulum have a distance between the beams of 1000 mm and 3500 mm from the support point to the geometric center of the impact surface, as shown in Figure 1. The impact surface must come into contact with the bus's front portion 55 mm below the C-point of the driver's seat [9]. After the impact, there shouldn't be any contact between the driver manikin and non-resilient bus structure components to comply with the requirement.

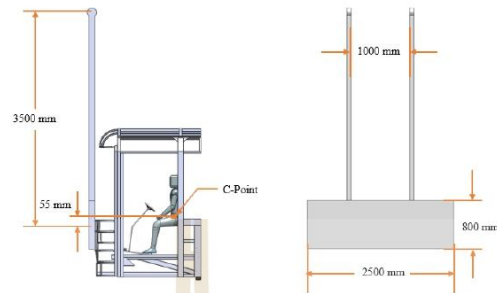


Figure 1. Front impact test according to ECE-R29 Test A.

2.2. Boundary conditions

This research used the Finite Element Method to simulate the frontal crashworthiness of a passenger bus structure and applied the requirement of the ECE-R29 regulations to define the boundaries of the structure. The bus structure is made of two materials: steel with a density of 7830 kg/m^3 and a young's modulus of 210 GPa ; and stainless steel RST 4003 with a density of 7740 kg/m^3 and a young's modulus of 200 GPa . The structure of the bus has a total weight of 11 tons. The front parts of the bus structure mesh with 231,972 nodes and 678,452 elements. The mesh size is set to 2 to 15 mm in areas with large deformations and 60 mm in others. A rigid driver dummy is fixed to the floor plate at the driver position.

The pendulum and front parts of the bus structure have surface-to-surface contact interaction. The angular velocity of the pendulum can be specified from Equation 1.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$

Where E is the impact energy and I is the moment of inertia of the pendulum at the point of rotation calculated as $20,717 \text{ kg/m}^3$. The initial angular velocity (ω) of the pendulum is 2.306 rad/s [10] to achieve an impact of 55 kJ as shown in Figure 2.

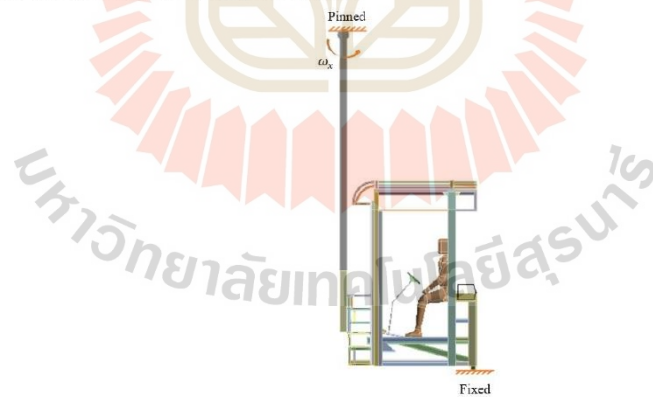


Figure 2. Configuring boundaries according to ECE-R29 Test A.

3. Results

The bus structure was simulated for frontal crashworthiness following the requirements of the ECE-R29 regulations through the Explicit Dynamic ANSYS® Workbench, which considers the following results:

3.1. Deformation result

The deformations in each phase simulated are shown in Figure 3, divided into four stages: 1) before the collision, 2) at the start of the collision, 3) during the collision, and 4) after the collision. The deformation results have shown the structure of the bus encroach on the driver's dummy, according to the ECE-R29 regulations, parts of the structure disallow encroach on the driver's dummy.

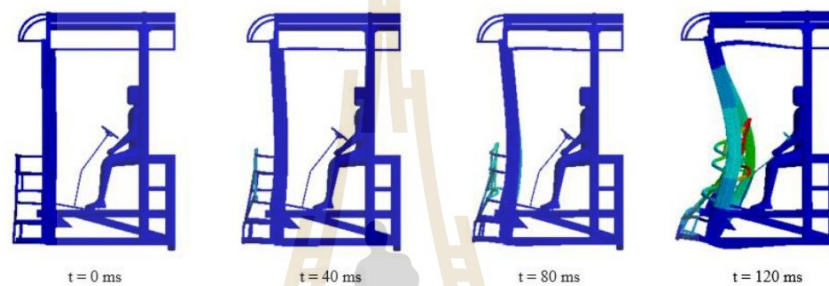


Figure 3. Deformation characteristics at different times of Test A.

3.2. Impact energy result

The ECE-R29 specification states that the total energy generated by a collision acting on a structure must be greater than 55 kJ. The energy received by the structure is in the form of kinetic energy, which is converted into internal energy. The internal energy curve shows the maximum energy absorption of the structure is 52.4 kJ. The energy absorbed by the structure is not equivalent to the total energy produced by the collision. These energies are the frictional energy between the pendulum structure and the bus during a frontal collision.

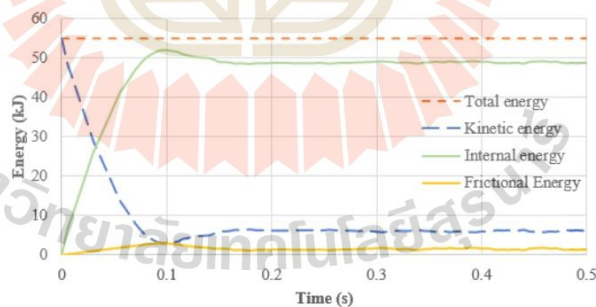


Figure 4. Energy absorption plot of ECE-R29.

3.3. Improve structure

The ECE-R29-tested bus construction did not satisfy the requirements due to the structure of the steering wheel touching the driver's dummy. The structure was necessary to improve by inserting a thin-walled hexagonal structure made of aluminum alloy 6061 into the front of the dummy to prevent the driver's dummy from striking the steering wheel. As shown in Figure 5, four thin-walled structures were inserted into the front structure of the driver's dummy to prevent the structure from encroaching on the driver's dummy.

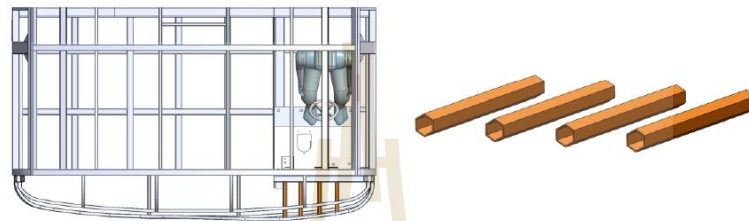


Figure 5. Inserting thin-walled structure.

The distance between the driver's dummy and the steering wheel was measured in order to identify structural encroachments on the driver's dummy based on Jongpradist et al.'s research distance determination [11]. The distance C_1 is the distance between the steering wheel and the knee of the driver dummy. The distance C_2 is the distance between the steering wheel and the chest of the driver dummy. The distance C_3 is the distance between the steering wheel and point c.

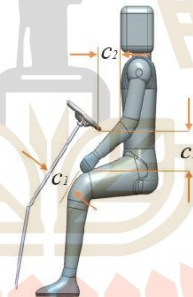


Figure 6. Clearance between the steering wheel and the driver's dummy.

Bus structure failed ECE-R29 requirements, and structural improvements were required to prevent the structure from encroaching on the driver's dummy. The C_3 spacing is the distance between the steering wheel and point c. The distance C_3 is the most encroached by the steering wheel, with the driver's dummy being encroached by 86mm. The distances C_1 and C_2 have the driver's dummy encroachment at 67 and 23, respectively. The improved construction reduces the structural encroachment on the driver dummy, as a result, the bus structure does not encroach on the driver's dummy. The improved construction can pass the ECE-R29 without encroaching on the driver's dummy. The invasion values for the structure are shown in Table 2.

Table 1. Minimum clearance between the steering wheel and the driver's dummy.

Clearance (mm)	ECE-R29	ECE-R29 with thin-walled
C ₁	-67	13
C ₂	-23	6
C ₃	-86	11

The results of dummy injuries were described in Table 2. The injury value of the driver's dummy was examined in this research concerning the NCAP regulation [12]. NCAP requirements are based on driver injuries, detailed as follows:

- The simulated head assessment parameter relates to the head injury criteria (HIC₁₅). A HIC₁₅ score of 700 (impact interval greater than 15 ms) indicates a 5% chance of risk.
- The neck area has the shear force and the tension force doesn't exceed 3.5 kN at 0 ms, 1.5 kN at 25-35 ms, and 1.1 kN at 45 ms. Extension bending moment less than 57 Nm.
- The upper leg has a compression force that doesn't exceed 7.56 kN, and the knee displacement doesn't exceed 15 mm.
- The lower leg has a compression force that doesn't exceed 8 kN

The before and after improvement structures were successful in satisfying the NCAP requirement's injury value.

Table 2. Injury value of driver's dummy.

Injury	ECE-R29	ECE-R29 with thin-walled	Limit
HIC ₁₅	61.8	57.4	700
Neck area			
Shear force (kN)	1.2	0.96	3.5
Tension force (kN)	0.91	0.85	3.5
Bending moment (Nm)	18.3	17.9	57
Upper leg			
Compression force (kN)	2.8	2.2	7.56
Knee displacement (mm)	12.9	10.1	15
Lower leg			
Compression force (kN)	3.2	2.9	8

Conclusion

This research used the nonlinear explicit finite element method to evaluate the frontal crashworthiness of the bus structure under ECE-R29 regulations with Explicit Dynamic ANSYS® Workbench. The simulation result demonstrates that the total energy generated by the collision must be greater than 55 kJ, but the structure can absorb only 52.4kJ of energy. The rest of the energy is converted to frictional energy. Moreover, the bus structure doesn't satisfy the ECE-R29 due to the driver's dummy being struck by the steering wheel. Therefore, the structure has been improved by inserting the thin-walled hexagonal structure so that the structure of the steering wheel doesn't strike the driver's dummy. The improved structure satisfies ECE-R29 requirements. In addition to that driver's dummy injury costs were determined concerning NCAP requirements. The structure of the bus analyzed complies with NCAP requirements.

Acknowledgments

The authors gratefully acknowledge the External Grants and Scholarships for Graduate Students from Suranaree University of Technology and Cherdchai Corporation Co.,Ltd..

References

- [1] Rizzi LI, Ortúzar JdD. Estimating the willingness-to-pay for road safety improvements. *Transport Reviews*. 2006;26(4):471–85.
- [2] Reddy, J. N. (2019). *Introduction to the finite element method*. McGraw-Hill Education.
- [3] Rao, S. S. (2017). *The finite element method in engineering*. Butterworth-heinemann.
- [4] Liu, G. R., Dai, K. Y., & Nguyen, T. T. (2007). A smoothed finite element method for mechanics problems. *Computational Mechanics*, 39(6), 859-877.
- [5] Cerit, M. E., Mert, S. K., & Acar, E. (2020). Experimental and numerical study on the crashworthiness evaluation of an intercity coach under frontal impact conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(13), 3026-3041.
- [6] Dede, G., & ÖZCANLI, M. (2016). Weight Reduction of Intercity Bus by Different Seat Construction Design in Compliance with APTA and FMVSS Standards. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 243-255.
- [7] Afripin, M. A. A., Zainudin, A. Z., Sahar, M. A. H. F. M., & Yusof, M. (2019, November). Frontal impact on bus superstructure as per UNECE R29 and NCAP. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 670, No. 1, p. 012014). IOP Publishing.
- [8] Chen, D. Y., Wang, L. M., Wang, C. Z., Yuan, L. K., Zhang, T. Y., & Zhang, Z. Z. (2015). Finite element based improvement of a light truck design to optimize crashworthiness. *International Journal of Automotive Technology*, 16(1), 39-49.
- [9] Raich, H., & DaimlerChrysler, A. G. (2003, May). Safety analysis of the new actros megaspace cabin according to ECE-R29/02. In *Proceedings of the 4th European LS-DYNA users conference* (pp. 22-23).
- [10] Sharma, S. K., & Sharma, R. C. (2018). An investigation of a locomotive structural crashworthiness using finite element simulation. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 11(4), 235-244.
- [11] Jongpradist, P., Senawat, S., & Muangto, B. (2015, August). Improvement of crashworthiness of bus structure under frontal impact. In *The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM15)* Incheon, Korea.
- [12] Wobschall, D., Stepanenko, A., Maykiv, I., Kochan, R., Sachenko, A., & Kochan, V. (2009, February). A multi-port serial NCAP using the IEEE 1451 smart transducer standard. In *2009 IEEE Sensors Applications Symposium* (pp. 293-297). IEEE.

ประวัติผู้เขียน

นางสาว สิริภรณ์ ส้ากลาง เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน พ.ศ.2541 จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนบุญวัฒนา อ.เมือง จ.นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตในหลักสูตรวิศวกรรมอากาศยาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2562

ในปี พ.ศ. 2564 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก เป็นระยะเวลา 2 ปี ในระหว่างการศึกษาได้รับมอบหมายให้เป็นผู้ช่วยสอนประจำรายวิชาดังต่อไปนี้

1. ENG85 1010 ENGINEERING GRAPHICS I (International Program)
2. 585401 COMPUTER AIDED ENGINEERING II (International program)
3. ENG25 1010 ENGINEERING GRAPHICS I (การเขียนแบบวิศวกรรม 1)
4. 525210 FUNDAMENTAL OF COMPUTER AIDED ENGINEERING
5. 537203 AIRCRAFT MATERIALS
6. 551263 THERMO-FLUID SYSTEM (ระบบทางความร้อนและของไหล)
7. 536342 THERMO-FLUID LABORATORY FOR AUTOMOTIVE
8. 537201 INTRODUCTION FLIGHT TRAINING WITH FLIGHT SIMULATOR
9. 558201 SOLID MECHANICS

ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้สะสมความรู้ จากประสบการณ์การทำงาน การสอน และการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษามาประยุกต์ใช้กับงานวิจัย และมีโอกาสได้ทำวิจัยในด้านการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จนได้รับการเผยแพร่ผลงานจำนวนทั้งสิ้น 3 งาน มีรายละเอียดดังปรากฏในภาคผนวก ก.