

การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร  
ภายใต้แรงกด แรงบิดและแรงดัด

Study on the Crashworthiness of Bus Side Frame under Quasi Static Load:  
Axial, Twisting, and Bending Load

นิรุต อ่อนสลุง\* ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ ชاکริต โพธิ์งาม  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190  
โทร 04535-3380 โทรสาร 045-353333 \*E-mail: bignirut@yahoo.com

Nirut Onsalung\*, Chawalit Thinwongpituk, Chakrit Pho-Ngam  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Ubonratchatani University, Ubonratchatani 34190, Thailand  
Tel: 04535-3380, Fax: 045-353333, \*E-mail: bignirut@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้านการชน ของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร 3 แบบ ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันทั่วไป ได้แก่ 1. โครงสร้างต่อแบบขนาน 2. โครงสร้างต่อแบบสลับฟันปลา 3. โครงสร้างต่อแบบทแยงมุม โดยทดสอบให้รับภาระใน 3 ลักษณะคือ ภาระแบบกดในแนวแกน ภาระแบบบิดและภาระแบบดัด การศึกษานี้ใช้วิธีการทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine และการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทาง FEA ชื่อ ABAQUS ผลการทดสอบสามารถนำมาคำนวณหาพลังงานที่โครงสร้างแต่ละแบบสามารถดูดซับไว้ได้ ภายใต้ภาระต่างๆ กัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสามารถที่แตกต่างกันของโครงสร้างแต่ละแบบในการรองรับภาระต่างๆกัน อันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาโครงสร้างรถยนต์โดยสารต่อไปในอนาคต

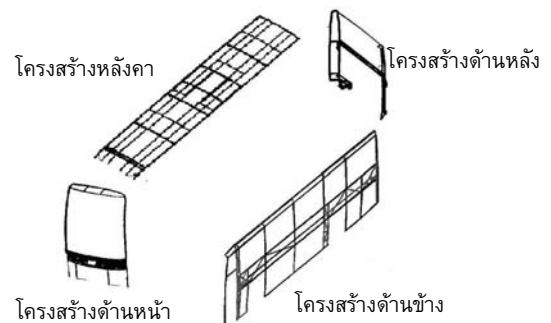
Abstract

This paper was aimed to investigate the energy absorption capacity of bus side wall structures. Three patterns of the side wall generally used in Thailand were investigated, which are horizontally parallel joint, diagonally parallel joint and head-to-tail diagonal joint. The study was conducted experimentally using Universal Testing Machine with 3 modes of load i.e.: axial crushing, twisting and bending. In order to compare, the FEA simulation was also carried out using a commercial package code, ABAQUS. The result of this study reveals the

crashworthiness behavior of each structure. This is very crucial for further improvement of bus structure design.

1. บทนำ

ประเทศไทยมีโรงงานประกอบรถโดยสารทั้งขนาดเล็กและใหญ่อยู่จำนวนมาก มีการต่อรถโดยสารเพื่อใช้บริโภคภายในประเทศทั้งเป็นรถท่องเที่ยวและรถโดยสารทั่วไป โดยมีแนวโน้มจำนวนรถโดยสารเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ [1] อย่างไรก็ตามในการออกแบบและผลิตรถโดยสารทั่วไปนั้นยังขาดการคำนวณและออกแบบทางวิศวกรรมอย่างเหมาะสม ส่งผลให้เกิดความสิ้นเปลือง รถมีน้ำหนักมากและขาดความน่าเชื่อถือด้านความปลอดภัย แม้แต่ข้อกำหนดของกรมการขนส่งทางบกก็กำหนดไว้เพียงพิกัดขนาด น้ำหนักรวมสูงสุดและการกระจายน้ำหนักลงเพลานั้น [2] โครงสร้างหลักของรถยนต์โดยสารประกอบด้วยโครงสร้างสำคัญ 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของโครงสร้างรถยนต์โดยสาร

จากรูปที่ 1 เป็นการแสดงส่วนประกอบโครงสร้างของรถยนต์โดยสารซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ ได้แก่ โครงสร้างด้านหน้า โครงสร้างหลังคา โครงสร้างด้านข้างและโครงสร้างด้านหลัง โครงสร้างเหล่านี้จะถูกนำมาประกอบกันเป็นโครงสร้างรถยนต์โดยสาร โดยต่อขึ้นไปจากแชสซีของรถแต่ละคัน โครงสร้างแต่ละส่วนถูกออกแบบให้รับภาระในทิศทางและลักษณะต่างๆกัน เช่น แรงกดในแนวแกนหรือการบิดของโครงสร้างเมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้น จากการศึกษาส่วนใหญ่ลักษณะการเสียหายของรถยนต์โดยสารมักจะเกิดในลักษณะที่คล้ายกับมาตรฐานการทดสอบรถยนต์ทั่วไป เช่น การชนด้านข้าง ลำตัวรถ การชนแบบเต็มหน้ารถและการชนแบบครึ่งหน้ารถ โดยการชนแบบต่างๆ เหล่านี้จะสอดคล้องและเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบรถยนต์ที่มีใช้ในต่างประเทศ เช่น มาตรฐานความปลอดภัยของสหพันธ์ยานยนต์ (Federal Motor Vehicle Safety Standard, FMVSS) การประเมินและทดสอบรถยนต์ใหม่ (New Car Assessment Program, NCAP) และการทดสอบมาตรฐานความปลอดภัยบนทางด่วน (Insurance Institute for Highway Safety, IIHS) [3]

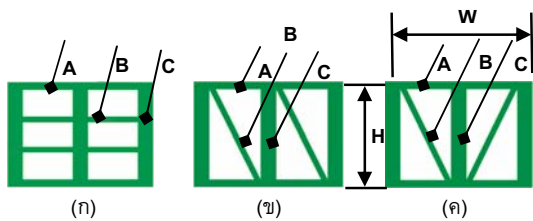
2. วิธีการศึกษาและการดำเนินการ

2.1 ลักษณะของโครงสร้างที่ศึกษา

การศึกษานี้มุ่งศึกษาความสามารถด้านการชนของโครงสร้างแผงด้านข้างของรถยนต์โดยสาร โดยทำการเลือกบริเวณส่วนที่มีการต่อเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้โครงสร้างเป็นหลัก จากการสำรวจพบว่าโครงสร้างแผงข้างของรถยนต์โดยสารทั่วไปมักต่อขึ้นโดยใช้เหล็กกล่องและนิยมต่อใน 3 รูปแบบ คือ 1.การต่อแบบขนาน 2.การต่อแบบทแยงมุมและ 3.การต่อแบบสลัฟพื้นปลา ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2 [4]

ตารางที่ 1 แสดงขนาดของเหล็กที่ใช้ในการต่อโครงสร้างด้านข้าง

ชนิดของเหล็กกล่อง	ขนาดหน้าตัด (mm × mm)
A	25 × 25
B	18.7 × 18.7
C	50 × 25



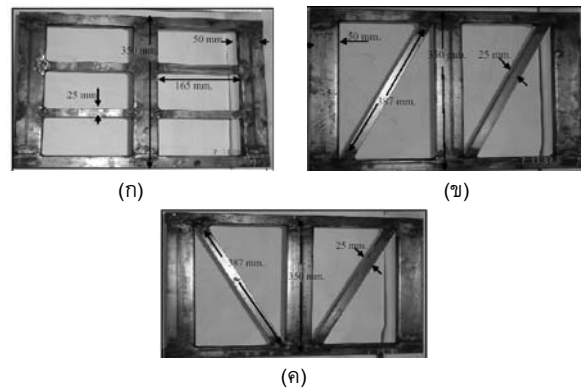
รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองส่วนของโครงสร้างในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

- ก. การต่อแบบขนานในแนวนอน
- ข. การต่อแบบทแยงมุม
- ค. การต่อแบบสลัฟพื้นปลา

จากตารางที่ 1 แสดงขนาดของเหล็กกล่องแต่ละชนิดที่ใช้ประกอบโครงสร้างทั้ง 3 แบบ เพื่อการทดสอบ โดยทำการย่อส่วนจากขนาดเหล็กที่ใช้จริงเพื่อให้มีขนาดที่ทำการทดสอบกับเครื่องทดสอบได้ โดยรักษ้อัตราส่วนของความกว้างและความยาวต่อความหนาไว้เป็นหลัก

และหาซื้อได้จากท้องตลาดทั่วไป โดยเหล็กชนิด C จะใช้เป็นคานหลักของโครงสร้างเหล็กชนิด A ใช้ต่อในแนวตั้งฉากกับคานหลักและเหล็กชนิด B ใช้ต่อเสริมระหว่างโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 แสดงลักษณะการต่อของโครงสร้างทั้ง 3 แบบในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (CAD MODEL) ในรูปที่ 2 (ก) เป็นการต่อโครงสร้างแบบขนานในแนวนอนโดยใช้เหล็กกล่องชนิด C เป็นคานหลักในแนวนอนแล้วใช้เหล็กกล่องชนิด A ต่อขวางขึ้นในแนวตั้งฉาก จากนั้นจะใช้เหล็กชนิด B เป็นส่วนเสริมโครงสร้างในลักษณะขนานกับคานหลัก รูปที่ 2 (ข) เป็นการต่อแบบทแยงมุมโดยใช้เหล็กแบบ A และ C ต่อในลักษณะเดียวกับแบบขนานแต่จะใช้เหล็กชนิด B ต่อเสริมในลักษณะให้เหล็กต่อทแยงมุมและรูปที่ 2 (ค) เป็นการต่อแบบสลัฟพื้นปลา ซึ่งการต่อจะคล้ายกันกับการต่อแบบทแยงมุมแต่จะใช้เหล็กชนิด B ต่อเสริมในลักษณะสลัฟพื้นปลา โดยโครงสร้างทั้ง 3 แบบเมื่อประกอบกันแล้วโครงสร้างจะมีความสูงของทั้งหมด H = 350 mm. และมีความกว้างทั้งหมด W = 480 mm.



รูปที่ 3 แสดงส่วนของโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบจริง  
 ก. การต่อแบบขนานในแนวนอน ข. การต่อแบบทแยงมุม  
 ค. การต่อแบบสลัฟพื้นปลา

จากรูปที่ 3 เป็นการแสดงรูปแบบการต่อโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบจริงโดยมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างที่ใช้วิเคราะห์ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยชิ้นงานทั้ง 3 แบบข้างต้นทำจากเหล็กกล่องขนาดตามตารางที่ 1 และลักษณะสอดคล้องกันกับรูปที่ 2 และรูปที่ 3

บทความนี้ได้นำเสนอผลการศึกษาเฉพาะส่วนของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้แรงกดในแนวแกน แรงบิดและแรงดัด โดยในการศึกษานี้ได้ทำการทดสอบโครงสร้างทั้ง 3 แบบด้วยเครื่องทดสอบ Universal Testing Machine เปรียบเทียบกับการจำลองด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (ABAQUS) จากนั้นทำการคำนวณผลของพลังงานที่โครงสร้างแต่ละแบบสามารถดูดซับได้ สำหรับโครงสร้างส่วนอื่นๆ เช่น โครงสร้างหลังคาอยู่ในระหว่างการศึกษาและจะได้นำเสนอในโอกาสต่อไป

2.2 ตัวแปรที่พิจารณา

ในการศึกษาทางด้านการเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน (Crashworthiness) มักจะศึกษาจากกราฟของภาวะและระยะยุบตัวของโครงสร้างดังตัวอย่างกราฟในรูปที่ 4 โดยมีตัวแปรที่สำคัญหลายตัว

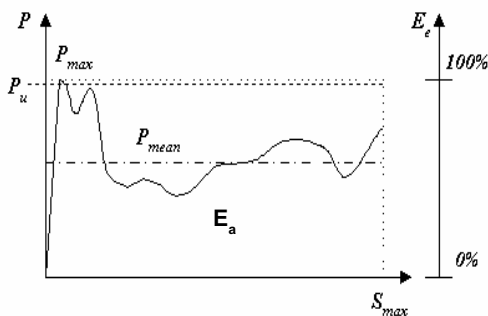
เช่น การวิกฤติ (Critical Load,  $P_{cr}$ ) หมายถึง ภาระแรกที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายอย่างสังเกตเห็นได้ ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load,  $P_{mean}$ ) หมายถึง ภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว ภาระสูงสุด (Maximum Load,  $P_{max}$ ) หมายถึง ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการยุบตัวจากเริ่มต้นจนสิ้นสุด พลังงานที่ดูดซับได้ (Energy absorption,  $E_a$ ) หมายถึง พลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ตลอดช่วงเวลาการกระแทก หรือการยุบตัวและพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption,  $E_s$ ) หมายถึง พลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ เมื่อเทียบกับขนาดน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง โดยในบทความนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาค่าพลังงานที่ดูดซับได้และพลังงานดูดซับจำเพาะของโครงสร้าง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของโครงสร้าง โดยในการหาค่าพลังงานดูดซับนั้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้าง เมื่อเกิดการชนหรือสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ 1

$$E_a = \int PdS \approx P_{mean} \cdot S \quad (1)$$

โดยที่  $E_a$  คือค่าพลังงานดูดซับ  $P_{mean}$  คือค่าภาระเฉลี่ย  $S$  คือค่าระยะการยุบตัว และสามารถหาค่าพลังงานดูดซับจำเพาะได้จากสมการที่ 2

$$E_s = \frac{\int PdS}{mass} \approx \frac{P_{mean} \cdot S}{mass} \quad (2)$$

โดยที่  $E_s$  คือค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ  $P_{mean}$  คือค่าภาระเฉลี่ย  $S$  คือระยะยุบตัวของโครงสร้าง และ  $mass$  คือ มวลของโครงสร้าง



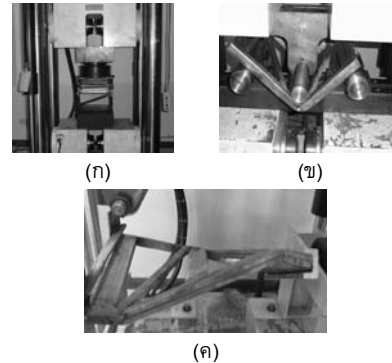
รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้างพร้อมกับแสดงตัวแปรต่างๆ ที่นิยมใช้ในการศึกษา

### 2.3 โครงสร้างและแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้ดำเนินการโดยใช้ 2 วิธีด้วยกัน คือ 1. การทดสอบจริงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine 2. การทดสอบด้วยการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์ (FEA) โดยในการทดสอบจริงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine นั้นได้สร้างอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานขึ้นมา ซึ่งออกแบบให้จับชิ้นงานเพื่อทดสอบการกดในแนวแกน การดัดและการบิด โดยมีลักษณะต่างๆ ตามรูปที่ 5 หลังจากนั้นทำการทดสอบด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งได้ทำการ

จำลองโครงสร้างต่างๆ ทั้งหมดที่แสดงในรูปที่ 2 ให้มีลักษณะเหมือนกับการทดสอบจริง โดยใส่คุณสมบัติและเงื่อนไขต่างๆ ของโครงสร้างให้กับโปรแกรม

#### 2.3.1 โครงสร้างที่ใช้กับเครื่อง Universal Testing Machine



รูปที่ 5 แสดงลักษณะการจับยึดโครงสร้างที่ใช้ในการทดสอบจริง

(ก) การทดสอบแบบกด (ข) การทดสอบแบบดัด

(ค) การทดสอบแบบบิด

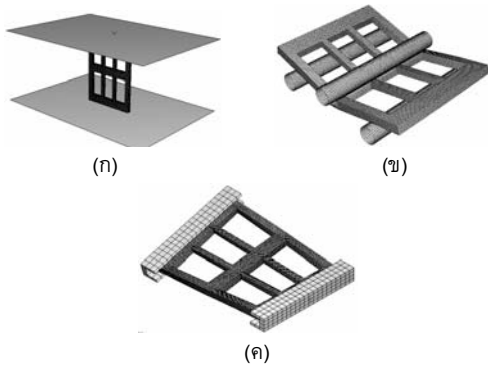
จากรูปที่ 5 แสดงอุปกรณ์จับยึดที่สร้างขึ้นและลักษณะการจับชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบจริงในการศึกษาครั้งนี้ จากรูปที่ 5 (ก) แสดงลักษณะการจับยึดโครงสร้างที่รับภาระด้วยแรงกดในแนวแกน รูปที่ 5 (ข) แสดงลักษณะการจับยึดโครงสร้างที่รับภาระแบบดัดและรูปที่ 5 (ค) แสดงลักษณะการจับยึดชิ้นงานที่รับภาระแบบบิด

#### 2.3.2 แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

การศึกษานี้ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางไฟไนท์เอลิเมนต์ ชื่อ ABAQUS โดยได้จำลองโครงสร้างแต่ละแบบด้วยเอลิเมนต์แบบเปลือกบาง (Shell Element) ชนิด 4 Node โครงสร้างที่ทดสอบในโปรแกรมจะสร้างให้มีคุณสมบัติและลักษณะต่างๆ ตามแบบในรูปที่ 2 ซึ่งในการทดลองนี้ได้สมมุติให้โครงสร้างทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกันความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ 10 mm/min ซึ่งเท่ากันกับการทดสอบจริงระยะกดในแนวแกน 60 mm ระยะมุดดัด 0.17 เรเดียน และระยะมุดบิด 0.28 เรเดียน จำนวนเอลิเมนต์ที่ใช้ในแต่ละกรณีประมาณ 20,000 เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมและได้จากการวิเคราะห์หาจำนวน Mesh Independent โดยรูปแบบและลักษณะของโครงสร้างที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ดูได้จากรูปที่ 6

ในรูปที่ 6 (ก) เป็นรูปแบบโครงสร้างที่รับภาระแบบกดในแนวแกน โดยให้โครงสร้างที่ทำการทดสอบวางอยู่ระหว่างแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) สองแผ่นคือ แผ่นด้านบนกับแผ่นด้านล่างแล้วกำหนดจุดอ้างอิง (Reference Node) ที่แผ่น Rigid body ทั้งสองโดยคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้สมมุติให้เป็นแบบ Elastic - Plastic และกำหนดให้แผ่นด้านล่างยึดติดกับที่ ในขณะที่แผ่นด้านบนสามารถเลื่อนกดลงมาในแนวตั้ง โดยจุดอ้างอิงด้านบนจะทำหน้าที่วัดระยะยุบตัวของโครงสร้างจากเริ่มต้นจนสิ้นสุดระยะยุบตัว ส่วนจุดอ้างอิงด้านล่างจะทำหน้าที่วัดแรงปฏิกิริยาที่ได้จากการกด ในรูปที่ 6 (ข) แสดงรูปแบบโครงสร้างที่ทดสอบภาระแบบดัด โดยมีจุดรองรับสูงสุดตรงบริเวณด้านบนปลายของ

โครงสร้างและมีท่อนเหล็กกอดอยู่ตรงกลางด้านบนหนึ่งตัว ซึ่งได้กำหนดคุณสมบัติของตัวรองรับและตัวกอดให้เป็น Rigid Body และกำหนดจุดอ้างอิง (Reference Node) ที่ตัวกอดและตัวรองรับทั้งสอง โดยจุดอ้างอิงด้านบนได้กำหนดให้วัดระยะการกอดและวัดแรงกอดที่กระทำกับโครงสร้าง รูปที่ 6 (ค) เป็นรูปแบบโครงสร้างที่รับภาระแบบบิดโดยมีอุปกรณ์ที่ใช้จับยึดที่ปลายทั้งสองเพื่อใช้ในการบิดขึ้นงาน ซึ่งกำหนดคุณสมบัติของตัวบิดทั้งสองให้เป็นแบบ Rigid Body และมีจุดอ้างอิงที่ตรงกลางของทั้งสองข้างเพื่อกำหนดให้จุดอ้างอิงวัดระยะการบิด และวัดโมเมนต์ที่เกิดจากการบิดโดยการคำนวณ

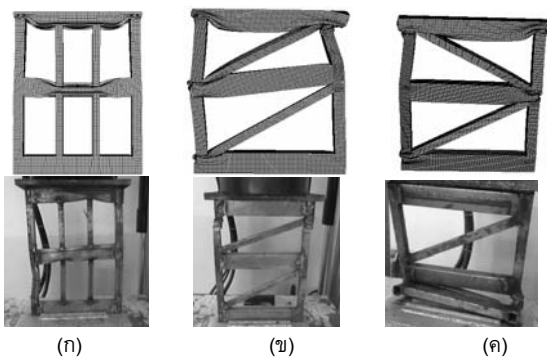


รูปที่ 6 แสดงลักษณะการจับยึดโครงสร้างที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์  
 (ก) การทดสอบแบบกอด (ข) การทดสอบแบบดัด  
 (ค) การทดสอบแบบบิด

### 3. ผลการศึกษา

#### 3.1 รูปแบบการเสียหายของโครงสร้างภายใต้ภาระต่าง ๆ กัน

##### 3.1.1 รูปแบบการเสียหายของการทดสอบภายใต้ภาระแบบกอดในแนวแกนของโครงสร้าง

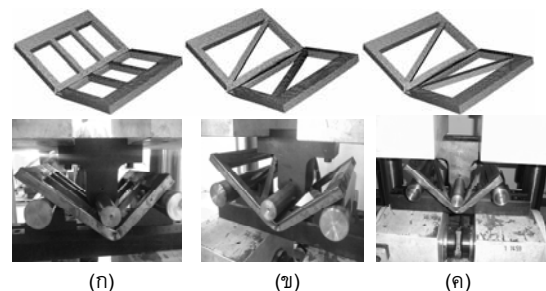


รูปที่ 7 แสดงลักษณะการเสียหายของโครงสร้างภายใต้ภาระแบบกอด  
 (ก) การต่อแบบขนาน (ข) การต่อแบบทแยงมุม  
 (ค) การต่อแบบสลัฟพื้นปลา

จากรูปที่ 7 ได้แสดงรูปแบบการเสียหายของโครงสร้างแบบต่างๆ ภายใต้ภาระแบบกอดโดยรูปด้านบนเป็นผลจากโปรแกรมและรูปด้านล่างเป็นรูปแบบการเสียหายที่ได้จากการทดลอง ในรูปที่ 7(ก) เป็นโครงสร้างที่ต่อแบบขนานโครงสร้างจะเกิดการเสียหายที่บริเวณชิ้นส่วน

ที่ใช้เสริมความแข็งแรง จากนั้นจะส่งผลมายังบริเวณคานหลักจนเกิดการเสียหายยุบตัว ส่วนในรูปที่ 7 (ข) เป็นการทดสอบการกอดของโครงสร้างที่ต่อแบบทแยงมุม โดยลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นจะเริ่มยุบตัวที่ตรงบริเวณเสาที่อยู่กับคานหลัก โดยมีการพับตัวของเหล็กที่บริเวณมุมของโครงสร้างเป็นหลักและมีลักษณะการเสียหายที่คล้ายกันระหว่างการทดลองและการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รูปที่ 7 (ค) เป็นโครงสร้างที่ต่อแบบสลัฟพื้นปลาภายใต้ภาระการกอดซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกันกับการต่อแบบทแยงมุม คือ เกิดการเสียหายที่ตรงบริเวณมุมของโครงสร้างเป็นหลัก

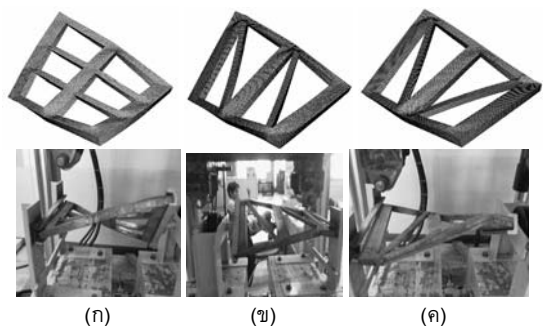
##### 3.1.2 รูปแบบการเสียหายของการทดสอบภายใต้ภาระแบบดัดของโครงสร้าง



รูปที่ 8 แสดงลักษณะการเสียหายของโครงสร้างภายใต้ภาระแบบดัด  
 (ก) การต่อแบบขนาน (ข) การต่อแบบทแยงมุม  
 (ค) การต่อแบบสลัฟพื้นปลา

จากรูปที่ 8 เป็นรูปแบบหรือลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นจากภาระแบบดัดที่กระทำกับโครงสร้างทั้ง 3 แบบ ในรูปที่ 8 (ก) คือโครงสร้างที่ต่อแบบขนานภายใต้ภาระการกอด ลักษณะการเสียหายที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะที่โครงสร้างเกิดการดัดระหว่างกลาง ซึ่งเกิดการเสียหายมากในบริเวณตรงกลางโครงสร้างเป็นหลัก ส่วนในรูปที่ 8 (ข) และรูปที่ 8 (ค) เป็นโครงสร้างที่ต่อแบบทแยงมุมและต่อแบบสลัฟพื้นปลาก็มีลักษณะการเสียหายที่คล้ายกัน

##### 3.1.3 รูปแบบการเสียหายของการทดสอบภายใต้ภาระแบบบิดของโครงสร้าง



รูปที่ 9 แสดงลักษณะการเสียหายของโครงสร้างภายใต้ภาระแบบบิด  
 (ก) การต่อแบบขนาน (ข) การต่อแบบทแยงมุม  
 (ค) การต่อแบบสลัฟพื้นปลา

ตารางที่ 2 แสดงพลังงานที่โครงสร้างดูดซับได้และผลการคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ชนิดการต่อ	น้ำหนักชิ้นงาน (kg)	Experiments						Finite Element					
		$P_{mean}$ (kN)	Moment (N.m)	องศาการบิด/ตัด (Rad)	Stroke (mm)	Ea (N.m)	Es (N.m/kg)	$P_{mean}$ (kN)	Moment (N.m)	องศาการบิด/ตัด (Rad)	Stroke (mm)	Ea (N.m)	Es (N.m/kg)
<b>Axial load</b>													
ขนาน	1.67	11.73	-	-	60	703.80	421.44	22.56	-	-	60	1353.7	810.6
ทแยงมุม	1.65	11.31	-	-	60	678.60	411.27	17.156	-	-	60	1029.4	623.88
สลับฟันปลา	1.65	9.73	-	-	60	583.80	353.82	16.603	-	-	60	996.18	603.75
<b>Bending load</b>													
ขนาน	1.67	2.41	421.5	0.17	30	71.66	42.91	5.08	889	0.17	30	151.13	90.5
ทแยงมุม	1.65	1.36	238	0.17	30	40.41	24.49	4.85	848.75	0.17	30	144.29	87.45
สลับฟันปลา	1.65	1.34	234.5	0.17	30	39.74	24.08	4.45	778.75	0.17	30	132.39	80.24
<b>Twisting load</b>													
ขนาน	1.67	2.14	375.00	0.28	50	105.00	62.87	5.21	912.35	0.28	50	255.46	152.97
ทแยงมุม	1.65	2.38	416.70	0.28	50	116.68	70.72	7.24	1267.46	0.28	50	354.89	215.08
สลับฟันปลา	1.65	2.40	419.20	0.28	50	117.38	71.14	7.15	1251.8	0.28	50	350.51	212.43

หมายเหตุ ความหมายของตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

$P_{mean}$  = ค่าภาระเฉลี่ยที่ใช้ในการทดสอบตลอดระยะเวลาการยุบตัว  
หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของ P-S Diagram

Moment = ผลคูณของภาระเฉลี่ยกับรัศมีของพูลเสของเครื่อง  
ทดสอบการบิดและการตัด (R=175 mm)

$E_a$  = พลังงานดูดซับ หาได้จากผลคูณของ  $P_{mean}$  กับ Stroke  
สำหรับการกด และผลคูณของ Moment กับ มุมบิดหรือ  
มุมตัดสำหรับการทดสอบการบิดและการตัด

$E_s$  = พลังงานดูดซับจำเพาะ หาได้จาก พลังดูดซับหาร  
น้ำหนักของโครงสร้าง

จากรูปที่ 9 เป็นการแสดงลักษณะการเสียหายของโครงสร้างที่  
เกิดขึ้นจากการบิด ในรูปที่ 9 (ก) เป็นโครงสร้างที่ต่อแบบขนาน  
ภายใต้ภาระแบบตัด ลักษณะการเสียหายจะเกิดการบิดที่ชิ้นส่วนคาน  
หลัก รูปที่ 9 (ข) และรูปที่ 9 (ค) แสดงลักษณะการเสียหายของ  
โครงสร้างแบบทแยงมุมและแบบสลับฟันปลา ซึ่งจะมีการบิดที่ตรง  
บริเวณคานหลักค่อนข้างมากและเกิดการโก่งตัวเล็กน้อยซึ่งมีลักษณะ  
คล้ายๆ กันทั้ง 2 แบบ

**3.2 ค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างต่าง ๆ ภายใต้ภาระ  
ต่าง ๆ กัน**

จากการศึกษาครั้งนี้ได้คำนวณผลของการดูดซับพลังงานของ  
โครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร ที่มีการต่อใน 3 รูปแบบและท่า

การทดสอบจากเครื่อง Universal Testing Machine เปรียบเทียบ  
การทดสอบจากโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ ได้ผลตามตารางที่ 2 และ  
สามารถวิเคราะห์ผลการศึกษาดังนี้

### 3.2.1 การทดสอบภายใต้ภาระแบบกด (Axial Load)

ในการทดสอบโครงสร้างภายใต้ภาระแบบกด การต่อโครงสร้าง  
แบบขนานให้ค่าการดูดซับพลังงานดีที่สุดและมากกว่าโครงสร้างที่  
ต่อแบบทแยงมุม และแบบสลับฟันปลา โดยโครงสร้างที่ต่อแบบ  
ขนานสามารถดูดซับพลังงานได้ 703.8 N.m ส่วนการต่อแบบทแยง  
มุมและแบบสลับฟันปลาให้ค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 678.6 N.m  
และ 583.8 N.m ตามลำดับ

สำหรับการทดลองกับโปรแกรม FEA การต่อแบบขนาน  
สามารถดูดซับพลังงานได้ 1,353.7 N.m ส่วนการต่อแบบทแยงมุม  
และแบบสลับฟันปลา โครงสร้างสามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ  
1,029.4 N.m และ 996.18 N.m ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าการต่อ  
แบบขนานสามารถที่จะดูดซับพลังงานได้มากกว่าการต่อแบบอื่นๆ  
ซึ่งผลการเปรียบเทียบของ FEA มีความสอดคล้องกับการทดสอบ  
จากเครื่อง Universal Testing Machine

### 3.2.2 การทดสอบภายใต้ภาระแบบตัด (Bending Load)

ผลการทดสอบของโครงสร้างภายใต้ภาระแบบตัดที่ได้จากการ  
ทดสอบจริง คือ โครงสร้างที่ต่อแบบขนานให้ค่าการดูดซับพลังงาน  
เท่ากับ 71.66 N.m ส่วนโครงสร้างที่มีการต่อแบบทแยงมุมให้ค่าการดูด  
ซับพลังงานเท่ากับ 40.41 N.m และโครงสร้างที่ต่อแบบสลับฟันปลา

ให้ค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 39.74 N.m จากผลการทดสอบจะสังเกตเห็นว่าการต่อโครงสร้างแบบขนานจะให้ค่าการดูดซับพลังงานจากการดัดมากกว่าการต่อแบบอื่นๆ

จากการวิเคราะห์ผลโดยโปรแกรม FEA ผลที่ได้คือการต่อโครงสร้างแบบขนานให้ค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 151.13 N.m การต่อแบบทแยงมุมให้ค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 144.29 N.m และการต่อแบบสลัฟพื้นปลาให้ค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ 132.39 N.m จะเห็นได้ว่าการต่อแบบขนานสามารถให้ค่าการดูดซับพลังงานได้มากกว่าโครงสร้างแบบอื่นๆ และมีความสอดคล้องกับการทดลอง

### 3.2.3 การทดสอบภายใต้ภาวะแบบบิด (Twisting Load)

ผลการทดสอบโครงสร้างภายใต้ภาวะแบบบิด ที่ได้จากการทดสอบจริง คือ การต่อแบบขนานสามารถดูดซับพลังงานจากการบิดได้เท่ากับ 105 N.m การต่อแบบทแยงมุมสามารถดูดซับพลังงานได้เท่ากับ 116.68 N.m และการต่อแบบสลัฟพื้นปลาได้ 117.38 N.m จากการทดสอบจะเห็นว่า โครงสร้างที่ต่อแบบสลัฟพื้นปลาและการต่อแบบทแยงมุมมีค่าใกล้เคียงกันมากซึ่งอาจจะสรุปได้ไม่ชัดเจนแต่เมื่อเทียบกับการต่อแบบขนานแล้วสามารถดูดซับพลังงานจากการบิดได้มากกว่า

ผลการทดลองจากโปรแกรม FEA จะได้ผลการดูดซับพลังงานของโครงสร้างแบบขนานเท่ากับ 255.46 N.m การต่อโครงสร้างแบบทแยงมุมให้ผลการดูดซับพลังงานเท่ากับ 354.89N.m และโครงสร้างที่ต่อแบบสลัฟพื้นปลาได้ผลการดูดซับพลังงานเท่ากับ 350.51 N.m จากผลการทดสอบพบว่า การต่อโครงสร้างแบบทแยงมุมและแบบสลัฟพื้นปลามีความสามารถใกล้เคียงกัน โดยทั้งคู่ให้ผลการดูดซับพลังงานได้ดีกว่าการต่อแบบขนาน และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบทั้งสองวิธีจะให้ค่าที่ต่างกันเมื่อเทียบกับการทดลอง แต่มีแนวโน้มไปทางเดียวกัน

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดสอบจากการทดลองและผลการทดสอบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แม้พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแต่ขนาดของตัวแปรต่างๆ ยังคงมีความแตกต่างกันอยู่มาก โดยค่าที่ได้จากการทดลองจะน้อยกว่าค่าจาก FEA ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น อิทธิพลของรอยเชื่อมในชิ้นงานจริง ขนาดของเหล็กที่ไม่สม่ำเสมอ ผลของความผิดและอิทธิพลของคุณสมบัติของวัสดุบางประการที่ไม่ได้รวมไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ซึ่งจะได้ศึกษาและพัฒนาในโอกาสต่อไป

## 4. สรุปผลการศึกษา

จากการทดสอบจริงและ FEA ได้ผลสรุป คือ ภายใต้ภาวะแบบกดและภาวะแบบดัด การต่อโครงสร้างแบบขนานให้ผลการดูดซับพลังงานได้ดีกว่าโครงสร้างที่ต่อแบบทแยงมุมและแบบสลัฟพื้นปลา ส่วนการทดสอบภายใต้ภาวะแบบบิด การต่อโครงสร้างแบบทแยงมุมและแบบสลัฟพื้นปลาให้ผลที่ใกล้เคียงกัน อาจสรุปได้ว่าโครงสร้างที่ต่อแบบเฉียงไม่ว่าจะเป็นการต่อแบบทแยงมุมหรือการต่อแบบสลัฟพื้นปลาจะดูดซับพลังงานจากการบิดได้ดีกว่าการต่อแบบขนาน

เนื่องจากน้ำหนักของโครงสร้างค่อนข้างใกล้เคียงกันมาก ค่าพลังงานดูดซับจำเพาะจึงมีแนวโน้มไปทางเดียวกันกับค่าพลังงานดูดซับ แต่มีค่าน้อยกว่าเพราะถูกหารด้วยน้ำหนักของโครงสร้าง

## 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในโครงการนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมการขนส่งทางบก, "สถิติจำนวนรถใหม่ที่จดทะเบียนตามกฎหมายว่าด้วยรถยนต์และล้อเลื่อนกฎหมายว่าด้วยการขนส่งทางบก" ฝ่ายสถิติการขนส่ง กองวิชาการและวางแผน, กรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม, พ.ศ. 2534 - 2538.
- [2] กรมการขนส่งทางบก, "คู่มือตรวจสอบน้ำหนักกรรมสูงสุดและน้ำหนักลงเพลาของรถโดยสาร" กรมการขนส่งทางบก กระทรวงคมนาคม, มีนาคม พ.ศ. 2535.
- [3] Himat F.Mahood and Bahig B.Fileta (2004), "Design of vehicle structures for crash energy management", Vehicle crashworthiness and occupant protection, American Iron and steel Institute.
- [4] นิรุติ อ่อนสูง และคณะ (2548), "การศึกษาผลตอบสนองต่อการกดของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 19-21 ตุลาคม 2548, จังหวัดภูเก็ต.