การเปรียบเทียบการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรูปตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน

Comparison of energy absorption of 3D S-shape frame structures subjected to axial compression loading

สมญา ภูนะยา[1*], ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์[2]

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม กรุงเทพฯ 10163
โทร 02-4570068 ต่อ 121 อีเมล์ somyanew@hotmail.com
[2] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ. วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190
โทร 0-45288400 ext 3308, อีเมล์ chawalit@rocketmail.com

บทคัดย่อ

อุบัติเหตุจากการชนของรถยนต์ส่วนใหญ่มักจะเกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าของรถยนต์ ทำให้เกิดการบาดเจ็บและสูญเสียชีวิตของผู้ขับขี่ เพื่อที่จะเพิ่มความปลอดภัยและลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นดังกล่าวให้เบาบางลง ดังนั้นการศึกษาพฤติกรรมการชนและการเพิ่มความสามารถในการดูดซับพลังงานเนื่องจากการชนของโครงสร้างรูปตัวเอส ซึ่งเป็นโครงสร้างด้านหน้าของรถยนต์เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อหาค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรูปตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยการพิจารณาการดูดซับพลังงานของโครงสร้างในลักษณะของหน้าตัดรูปร่างต่างๆ ได้แก่ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, หน้าตัดวงกลม, หน้าตัดหกเหลี่ยม และ หน้าตัดแปดเหลี่ยม นอกจากนั้นยังพิจารณาค่าการดูดซับพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงของความหนา ค่าการดูดซับพลังงานกับมุมการหมุนของหน้าตัดของชิ้นงาน ในการวิเคราะห์จะใช้วิธีการระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอเลเมนต์ วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียม AA-6063-T7 ความเร็วในการชนเท่ากับ 2,000 มิลลิเมตรต่อวินาที และเวลาในการวิเคราะห์ 0.3 วินาที จากผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าการดูดซับพลังงาน จะเพิ่มขึ้นตามความหนาที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานกับรูปร่างหน้าตัดต่างๆ ของโครงสร้างรูปตัวเอส พบว่า โครงสร้างหน้าตัดหกเหลี่ยม ให้ค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด รองลงมาคือหน้าตัดแปดเหลี่ยม , หน้าตัดวงกลม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะให้ค่าการดูดซับพลังงานน้อยที่สุด และเมื่อทำการหมุนหน้าตัดของโครงสร้างจะพบว่า โครงสร้างหน้าตัดสี่เหลี่ยมเท่านั้น ที่มีผลต่อค่าการดูดซับพลังงาน โดยจะให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุดที่มุม 45° ส่วนหน้าตัดอื่นๆ ที่นำมาพิจารณา พบว่ามุมการหมุนของหน้าตัดไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการดูดซับพลังงาน

คำหลัก: การดูดซับพลังงาน การชนของโครงสร้าง แรงกดแนวแกน โครงสร้างตัวเอส

Abstract

To increase the safety of transporting system and to reduce the damage of occupants a car front collision. It is necessary to study the crush behavior and to enhance the energy absorption capacity of a car front structure, which is a 3D S-shape frame structure. This research is aimed to determine the energy absorption of S-frame using finite element method. The crushing behaviors of a 3D S-shape are extruded aluminum frame in square, circle, hexagon and octagon cross-section. The shapes of each structure are aluminium AA-6063-T7 material. The running time and initial velocity for computer simulation are 0.3 second and 2000 mm/s in the Z direction respectively. The results can be found that the energy absorption increases with the thickness increases. The comparison of the cross-sectional shapes can found that the energy absorption of hexagonal section is the highest, octagonal section, circular section and that of square section is the lowest, respectively. Finally, the cross-section of s-frame is rotated about an axial structure. The result can found that the energy absorption of square section is the highest at 45° and the other cross-sectional angles are not affected to the variation of energy absorption.

***Keywords**:* Energy absorption, impact structures, axial load, S-frame

1. บทนำ

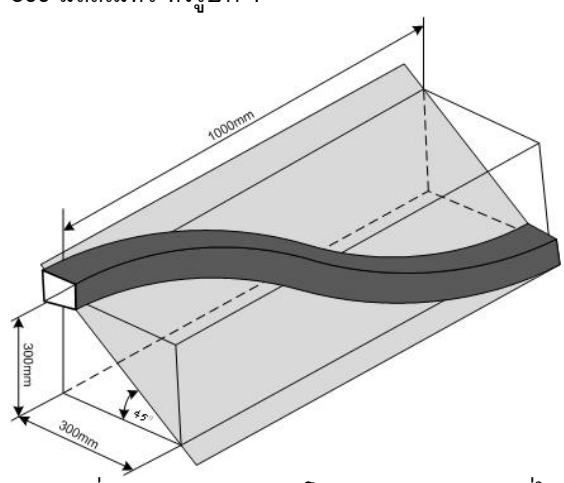
การออกแบบและการพัฒนาชิ้นส่วนของโครงสร้างในยานพาหนะต่างๆ เช่น รถยนต์ เครื่องบิน และ เรือ เป็นต้น เป็นสิ่งสำคัญ จุดประสงค์ของการออกแบบคือ เพื่อลดความเสียหายของโครงสร้างและเพิ่มความปลอดภัยของผู้โดยสาร เมื่อโครงสร้างเกิดการกระแทกขึ้น ชิ้นส่วนของโครงสร้างจะเกิดการเสียรูปในช่วงพลาสติก เนื่องจากพลังงานจลน์ที่มากระทำ วิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการลดการเสียรูปช่วงพลาสติกให้เบาบางลง คือการใช้ชิ้นส่วนผนังบาง (Thin-walled members) ได้แก่ โครงสร้างแผ่นบาง (Plates) โครงสร้างเปลือกบาง (Shells) ท่อ (Tubes) แผ่นประกบ (Sandwich plates) และวัสดุประกอบ (Composite materials) เป็นต้น เพื่อรองรับการกระแทก เรามักเรียกโครงสร้างผนังบางดังกล่าวว่า “ตัวดูดซับพลังงาน” (Energy absorber) ตัวดูดซับพลังงานจะทำหน้าที่ดูดซับพลังงานจลน์ที่มากระทำกับโครงสร้างให้ลดน้อยลงที่สุด ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา มีนักวิจัยได้ทำการศึกษาอย่างมากมายทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง เกี่ยวกับการยุบลงในช่วงพลาสติก กับปัญหาของชิ้นส่วนผนังบาง โดยมีการจำแนกตามขนาดและรูปร่าง เช่น ท่อกลม[1] ท่อสี่เหลี่ยม [2] ท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยม [3] กรวยกลม [16] กรวยหน้าตัดสี่เหลี่ยม [4] โครงสร้างแผ่นประกบ [5] โครงสร้างรังผึ้ง [6] และโครงงานหน้าตัดหมวกปิด [7] ส่วนการจำแนกตามวัสดุ เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง และวัสดุประกอบ เป็นต้น นักวิจัยได้พัฒนาตัวดูดซับพลังงานในอนาคต โดยวัสดุที่ใช้ให้มีน้ำหนักเบา เพื่อลดการแบกภาระของยานพาหนะ ลดการสิ้นเปลืองน้ำมัน และให้ความสามารถการดูดซับพลังงานดีที่สุด และการจำแนกตามลักษณะการรับโหลดที่แตกต่างกัน ได้แก่ แรงตามแนวแกน [1] แรงดัด [2, 8] แรงบิด [9] และแรงผสม [10] นอกจากนั้นนักวิจัยส่วนใหญ่ยังคำนึงถึงคุณสมบัติที่สำคัญในการศึกษา ได้แก่ พฤติกรรมการความเสียหาย[11] ผลอัตราความเครียดของวัสดุ[3,15] ความสามารถการดูดซับพลังงาน และการเลือกจุดวิกฤต เมื่อชิ้นส่วนมีความแตกต่างกันตามลักษณะข้างต้นแล้ว คุณสมบัติที่ศึกษาก็จะมีความแตกต่างกันไปด้วย จึงสามารถหาคำตอบที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือได้จากวิธีการต่างๆ เช่น วิธีทางการทดลอง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ และวิธีการวิเคราะห์ทางทฤษฎี โดย

วิธีการวิเคราะห์ทั้งสามวิธีนี้ จะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการแก้ปัญหาการชนได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่นมีนักวิจัยศึกษาโดยใช้วิธีการทดลอง เพื่อศึกษาชิ้นส่วนโครงสร้างภายใต้แรงกระทำในแนวแกน[1,15,16,18] แรงดัด[2,8,17] และแรงเฉือง[10] เป็นต้น ส่วนวิธีทางไฟไนต์เอเลเมนต์ มีนักวิจัยที่นำวิธีนี้มาใช้ เช่นการวิเคราะห์แบบจำลองพฤติกรรมความเสียหายของท่อหกเหลี่ยมภายใต้แรงกดตามแนวแกนการใช้โปรแกรม LS-DYNA [19] การวิเคราะห์แบบจำลองของกรวยหน้าตัดวงกลมภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [14] การวิเคราะห์โครงสร้างรถบัส โดยใช้โปรแกรม ABAQUS[21-23] และการวิเคราะห์แบบจำลองลักษณะความเสียหายของท่อสี่เหลี่ยมรูปตัวเอส โดยใช้โปรแกรม PAM-CRASH [20] เป็นต้น ส่วนการศึกษาทางทฤษฎี มีนักวิจัยที่สนใจทำการศึกษาการเขียนกลไกความเสียหายช่วงพลาสติกภายใต้แรงกระทำต่างๆ และสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์[1-3,6,8,9,12,13,20,24] โดยผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของแรงกระทำกับระยะยุบตัวของชิ้นส่วนโครงสร้าง เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรูปตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยการพิจารณาการดูดซับพลังงานของโครงสร้างในลักษณะของหน้าตัดรูปร่างต่างๆ ได้แก่ หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส, หน้าตัดวงกลม, หน้าตัดหกเหลี่ยม และ หน้าแปดเหลี่ยม นอกจากนั้นยังพิจารณาค่าการดูดซับพลังงานกับการเปลี่ยนแปลงของความหนา ค่าการดูดซับพลังงานกับมุมการหมุนของหน้าตัดของชิ้นงาน ในการวิเคราะห์จะใช้วิธีการระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอเลเมนต์ วัสดุที่ใช้เป็นอลูมิเนียม AA-6063-T7 ความเร็วในการชนเท่ากับ 2,000 มิลลิเมตรต่อวินาที [20] และเวลาในการวิเคราะห์ 0.3 วินาที ซึ่งมีนักวิจัยที่ทำการศึกษาโครงสร้างรูปตัวเอสมีมากพอสมควร Kim, H.S. and Wierzbicki, T. 2004. [20] ได้ทำการศึกษาในผลของรูปร่างหน้าตัดโครงสร้างรูปหมวก (Hat-type) เพื่อเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรูปตัวเอสตามลักษณะต่างๆ C.Zhang and A.Saigal [25] ได้ทำการศึกษาโครงสร้างรูปตัวเอส ที่มีการเสริมความแข็งแรงภายในโครงสร้าง(stiffener) และทำการเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรูปตัวเอสตามลักษณะการเสริมแรงและการอัดโฟมของโครงสร้างหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างอัดโฟมภายในสามารถเพิ่มค่าการดูดซับพลังงานได้มากกว่าโครงสร้างที่ไม่มีโฟมอยู่ภายใน

2. ขนาดและคุณสมบัติของวัสดุ

ในการวิเคราะห์โครงสร้างรูปตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอเลเมต์ โดยการสร้างแบบจำลองตามขนาดที่ใช้ในการคำนวณจริง คือ โครงสร้างมีขนาดหน้าตัดของความยาวเส้นรอบวงเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ความหนา 1, 2, และ 3 มิลลิเมตร ความยาวในแนวแกน Z = 1,000 มิลลิเมตร มีส่วนโค้งรัศมี 695.321 มิลลิเมตร ประกอบกันเป็นรูปตัวเอส มีมิติในแนวแกน X = 300 มิลลิเมตร และ Y = 300 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงขนาดของโครงสร้างรูปตัวเอส ที่ใช้ในการวิเคราะห์

วัสดุในการวิเคราะห์ คือ อลูมิเนียม AA-6063-T7 ซึ่งมีคุณสมบัติวัสดุคือ ความหนาแน่น 2,770 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ค่ายังค์มอดูลัส 6,900 เมกะปาสคาล และอัตราส่วนปัวก์ซอง 0.3 พฤติกรรมของวัสดุเป็นช่วงความยืดหยุ่นเชิงเส้นและช่วงเสียรูปอย่างถาวรเป็นการเพิ่มความเครียดพลาสติก (Linearly elastic

and plastic strain hardening) แสดงดังตารางที่ 1

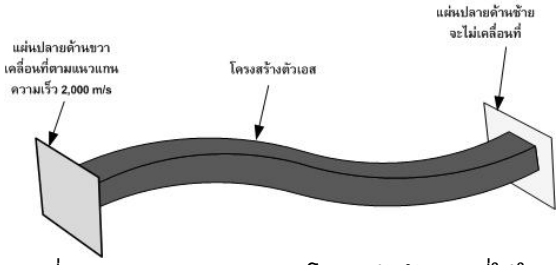
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุในช่วงเสียรูปอย่างถาวร [20]

ความเค้นพลาสติก Plastic Stress (เมกะปาสคาล)	ความเครียดพลาสติก Plastic Strain
86.94	0
95.94	0.00027
101.3	0.00211
109.3	0.005746
127.3	0.01493
149.3	0.0263
169.5	0.06939
171	0.1527

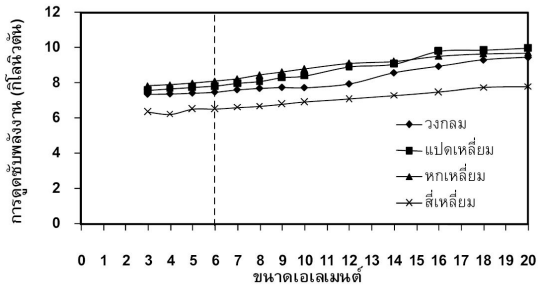
3. ความถูกต้องของโปรแกรม

ในการวิเคราะห์โครงสร้างรูปตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้วิธีทางไฟไนต์เอเลเมต์ สิ่งสำคัญอย่างหนึ่งคือการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมที่ให้ความถูกต้องและได้ผลที่แม่นยำ โดยการวิเคราะห์จำนวนเอเลเมนต์ที่มีเสถียรภาพ ในการสร้างแบบจำลองตามขนาดที่ใช้ในการคำนวณจริง และทำการสร้างแผ่นวัตถุแข็งเกร็ง 2 แผ่น อยู่บริเวณปลายด้านซ้ายและปลายขวาของโครงสร้าง โดยให้ปลายด้านซ้ายไม่เคลื่อนที่ ส่วนปลายด้านขวาจะ เคลื่อนที่กดตามแนวแกนของโครงสร้างด้วยความเร็วคงที่ ที่ 2000 มิลลิเมตรต่อวินาที และ เวลาในการชน 0.3 วินาที ดังรูปที่ 2 โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของแรงปฏิกิริยาที่เกิดจากการกดชิ้นงานกับระยะยุบตัวของโครงสร้างตัวเอส แล้วนำไปคำนวณหาค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างตัวเอส โดยการหาพื้นที่ใต้กราฟระหว่างแรงกับระยะยุบตัวของโครงสร้าง

จากรูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับพลังงานและขนาดเอเลเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของเอเลเมนต์ของโครงสร้างตัวเอส ที่มีหน้าตัดวงกลม หน้าตัดแปดเหลี่ยม หน้าตัดหกเหลี่ยม และหน้าตัดสี่เหลี่ยม พบว่าขนาดเอเลเมนต์เท่ากับ 6 จะให้เสถียรภาพของเอเลเมนต์ที่เหมาะสมของโครงสร้างตัวเอส



รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองของโครงสร้าตัวเอส ที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางไฟไนต์เอเลเมนต์



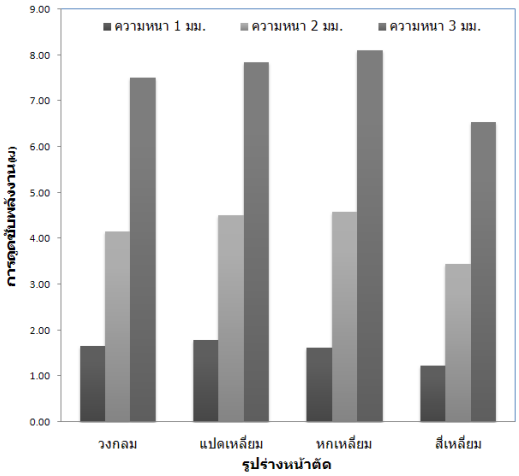
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดซับพลังงานและขนาดเอเลเมนต์ เพื่อการวิเคราะห์ความเสถียรภาพของเอเลเมนต์ของโครงสร้างตัวเอส ที่มีหน้าตัดวงกลม หน้าตัดแปดเหลี่ยม หน้าตัดหกเหลี่ยม และหน้าตัดสี่เหลี่ยม

4. ผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์การเปรียบเทียบความสามารถการดูดซับพลังงานของโครงสร้างตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยตัวแปรที่จะทำการศึกษามีดังนี้

4.1 ผลความหนากับการดูดซับพลังงาน

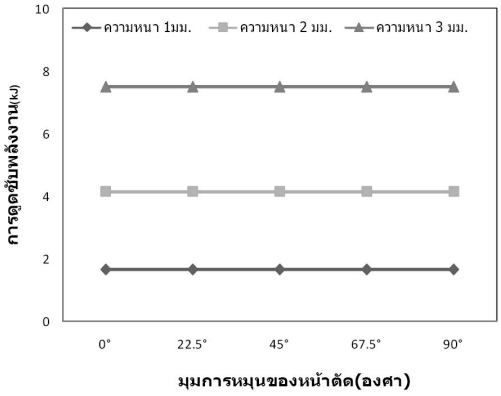
การศึกษาผลของความหนากับการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรูปตัวเอส เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบด้านการชนของโครงสร้าง เพื่อทราบแนวโน้มของตัวแปร ดังแสดงในรูปที่ 4 จะพบว่าเมื่อความหนามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย ทุกๆ รูปร่างหน้าตัดที่ทำการวิจัย



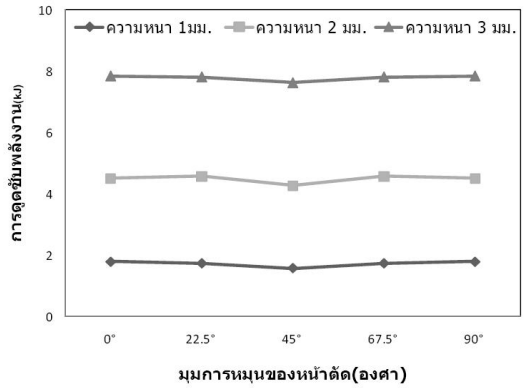
รูปที่ 4 แสดงผลของความหนากับค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างตัวเอสที่รูปร่างหน้าตัดต่างๆ

4.2 ผลการหมุนของหน้าตัดรอบแกนของโครงสร้างตัวเอสกับการดูดซับพลังงาน

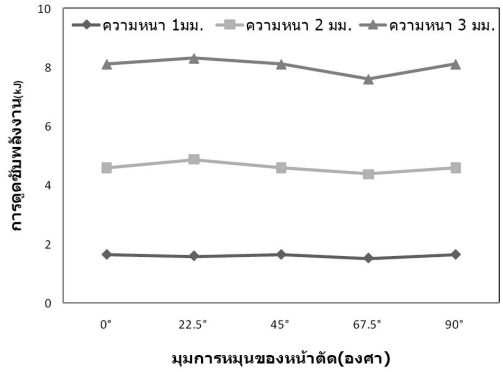
เมื่อทำการหมุนหน้าตัดของโครงสร้างรูปตัวเอสกับค่าการดูดซับพลังงาน จะพบว่ามุมการหมุนของหน้าตัดโครงสร้างรูปตัวเอสที่มีรูปร่างหน้าตัดวงกลม หน้าตัดแปดเหลี่ยม และหน้าตัดหกเหลี่ยม ไม่มีผลต่อค่าการดูดซับพลังงาน ดังแสดงดังรูปที่ 5(ก-ค) แต่สำหรับมุมการหมุนของรูปร่างหน้าตัดสี่เหลี่ยม จะมีผลต่อการดูดซับพลังงาน โดยเฉพาะที่มุม 45 องศา จะให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 5(ง)



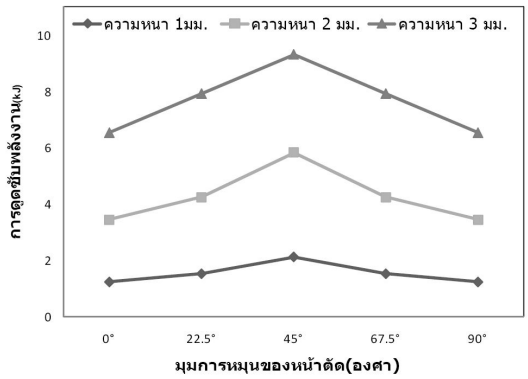
(ก) หน้าตัดวงกลม



(ข) หน้าตัดแปดเหลี่ยม



(ค) หน้าตัดหกเหลี่ยม



(ง) หน้าตัดสี่เหลี่ยม

รูปที่ 5 แสดงผลระหว่ามุมการหมุนของหน้าตัดกับการดูดซับพลังงานของโครงสร้างตัวเอส

5. สรุปผล

การวิเคราะห์การดูดซับพลังงานของโครงสร้างตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้วิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ จะเป็นการศึกษาตัวแปรที่สำคัญที่จะใช้ในการออกแบบ ที่ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงผลและแนวโน้มที่เกิดขึ้นของตัวแปรต่างๆ ที่จะศึกษาและมีผลต่อค่าการดูดซับพลังงานของโครงสร้างรูปร่างตัวเอส ซึ่งในการ

ออกแบบในปัญหาการชนของโครงสร้าง สิ่งที่ต้องการคือความสามารถในการดูดซับพลังงานที่มากที่สุด เพื่อลดพลังงานจลน์ที่เป็นพลังงานภายนอกที่มากระทำ แล้วทำให้โครงสร้างหลักเกิดความเสียหายให้น้อยที่สุด ดังนั้น จึงสามารถสรุปผลการศึกษาตัวแปรที่สำคัญ ดังนี้

5.1 เมื่อความหนาของโครงสร้างเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงขึ้น

5.2 ที่มุมศูนย์องศากับแนวระดับ พบว่าหน้าตัดหกเหลี่ยม จะให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด รองลงมาคือหน้าตัดแปดเหลี่ยม หน้าตัดวงกลม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะให้ค่าการดูดซับพลังงานต่ำที่สุด

5.3 เมื่อมีการหมุนหน้าตัดของโครงสร้างรูปตัวเอส จะพบว่าหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมที่หมุนรอบแกนมุม 45 องศา จะให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงที่สุด ส่วนหน้าตัดวงกลม หน้าตัดหกเหลี่ยม และหน้าตัดแปดเหลี่ยม มุมการหมุนของหน้าตัดไม่มีผลต่อค่าการดูดซับพลังงาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยามและมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ช่วยสนับสนุนให้มีบทความนี้ขึ้นมาอย่างสำเร็จลุล่วงได้ดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Alexander, JM. (1960). An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading, Quart J Mech Appl Math., 13(1), pp.10–15.

[2] Kecman, D. (1983). Bending collapse of rectangular and square section tubes, Int. J. Mech. Sci., 25(9-10), pp.623.

[3] Abramowicz, W. and Jones, N. (1983). On the crushing mechanics of thin-walled structures, Int J Appl Mech., 50, pp.727-734.

[4] Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P. (2004). A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes, Int J Mech Sci., 46, pp.201-216.

[5] Corbett, GG. and Reid, SR. (1993). Local loading of simply-supported steel-grout sandwich plate, Int J Impact Engng., 13(3), pp.443-461.

[6] Wierzbicki, T. (1983). Crushing analysis of metal honeycombs, Int J Impact Engng., 1(2), pp.157-174.

[7] White, MD. and Jone, N. 1999. Experimental quasi-static axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections. Int J Mech Sci. 41:179-208.

[8] Elchalakani, M., X. L. Zhao. and Grzebietaet, R. (2002). Bending tests to determine slenderness limits for cold-formed circular hollow sections, Journal of Constructional Steel Research, 58, pp.1407-1430.

[9] Weigang, Chen and Tomasz, Wierzbicki. (2000). Torsional collaps of thin-walled prismatic columns, Thin-Walled Structures, 36, pp.181-196.

[10] Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P. (2006). Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading, Int J Impact Engng., 32, pp.1595-1620.

[11] Andrew, K.R.F., England, G.L. and Ghani, E. (1983). Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under qusi-loading, Int J Mech Sci., 25(9/10), pp.687-696.

[12] Abramowicz, W. and Jone, N. (1984). Dynamic axial crushing of circular tubes. Int J Impact Engng, 2(3), pp.263-281.

[13] Jone, N. (1984). Recent studies in the dynamic plastic behavior of structures, Appl Mech Rev., 42(4), pp.95-115.

[14] Poonaya, S., Thinvongthituk, C. and Teebonma, U. (2005). Some analytical methods of plastic collapse of circular steel tube under quasistatic axial compression, The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 19-21 October 2005, Songkhla, Thailand.

[15] Dong-KuK, Kim and Sunghak, Lee. (1999). Impact enegy absorption of 6061 aluminum extruded tubes with different cross-sectional shapes, Material & Design. 20(1), pp.41-49.

[16] Mamalis, AG., Manolakos, D.E., Viegelahn, G.L., Vaxevanidis, N.M. and Johnson, W. (1986). On the inextensional axial collapse of thin-walled PVC conical shells, Int J Mech Sci., 28(6), pp.323-335.

[17] Kotelko, M. (2004). Load-capacity and collapse analysis of thin-walled beams and column-recent, Thin-Walled Structure, 42, pp.153-175.

[18] Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P. (2005). Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes, Thin-Walled Structure, 43, pp.1225-1242.

[19] Rossi, A., Fawaz, Z. and Behdinan, K. (2005). Numerical simulation of the axial collapse of thin-walled polygonal section tubes, Thin-Walled Structure, 43, pp.1646-1661.

[20] Kim, H.S. and Wierzbicki, T. (2004). Closed-form solution of crushing response of three-dimensional thin-walled S frames with rectangular cross-sections, Int J Impact Engng., 30, pp.87-112

[21]นิรุต อ่อนสลุง, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2548). การศึกษาผลตอบสนองต่อการกดของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสาร, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, 19-21 ตุลาคม 2548, ภูเก็ต, ประเทศไทย.

[22]นิรุต อ่อนสลุง, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2549). การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้แรงกด แรงบิดและแรงดัด, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, 18-20 ตุลาคม 2548, นครราชสีมา, ประเทศไทย.

[23]นิรุต อ่อนสลุง, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์ และอำไพศักดิ์ ทีบุญมา (2550). การศึกษาความสามารถในการดูดซับพลังงานของแบบจำลองโครงสร้างด้านข้างรถยนต์โดยสารภายใต้การชน, วิศวกรรม มข. ปีที่ 34, ฉบับที่ 3, หน้า 343-354

[24]Thinvongpituk, C. Poonaya, S. and Teebonma, U. (2008). The ovalisation of thin-walled circular tubes subjected to bending, World Congress on Engineering, 2, pp.1517-1571.

[25] C.Zhang and A.Saigal, (2007). Crash behavior of a 3D S-shape space frame structure, Journal of Materials Processing Technology, 191, pp. 256–259.