

การจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัด หลายเหลี่ยมภายใต้แรงกระแทก

Computer Simulation to Study Energy Absorption of Multi-Corners Cross- Section Tubes Subject to Impact Loads

สมญา ภูณะยา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Faculty of Engineering, Ubonratchathani University, Warinchamrap, Ubonratchathani 34190

Tel : 0-4535-3309 E-mail: somyanew@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความวิชาการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การวิเคราะห์ความเสียหายช่วงพลาสติกของท่อที่มีหน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกระแทก โดยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ส่วนหน้าตัดหลายเหลี่ยมของท่อ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เช่น หน้าตัดสี่เหลี่ยม หน้าตัดหกเหลี่ยม หน้าตัดแปดเหลี่ยม และหน้าตัดวงกลม การวิเคราะห์จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกระแทกกับตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา คือ ผลของความหนา ผลของรูปร่างและผลของแรงที่มากระทำ ได้แก่ แรงตามแนวแกน แรงดัด และแรงบิด จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ คือ ผลของความหนา เมื่อท่อมีความหนาเพิ่มขึ้น จะให้การดูดซับพลังงานมากขึ้น ส่วนผลของรูปร่าง พบว่าภายใต้แรงกดตามแนวแกนของท่อ ท่อหน้าตัดวงกลมจะให้ค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด ส่วนภายใต้แรงดัดของท่อ ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะให้ค่าการดูดซับพลังงานมากที่สุด และภายใต้แรงบิด ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยมจะให้การดูดซับพลังงานมากที่สุด

คำสำคัญ: ตัวดูดซับพลังงาน แรงกระแทก ไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

The main objective of the paper is to study the plastic collapsed analysis of multi-corners cross-sectional tube subjected to impact loads by using computer simulation with a finite element method.

The various cross-sectional shapes include square, hexagonal, octagonal and circular cross-sections. The analysis results were between energy absorption of multi-corners cross sectional tubes and parametric variables. The parametric variables include thickness of tube, cross-sectional shape, and impact load. The study of the impact load includes axial compression, bending and torsion. From the results, it can be concluded that the effect of wall thickness is seen that the energy absorption increases as the initial wall thickness increases. For axial compression load, the energy absorption of sectional circle is the highest. For bending load, the energy absorption of the sectional square is the highest. Finally, for torsion load, the energy absorption of the sectional hexagonal is the highest.

Keywords: Energy absorber, impact load, finite element

1. บทนำ

ในการออกแบบด้านการชนของยานพาหนะหรือชิ้นส่วนโครงสร้างต่างๆ จุดประสงค์ของการออกแบบคือเพื่อลดความเสียหายของโครงสร้างและเพิ่มความปลอดภัยของผู้โดยสาร สิ่งสำคัญเป็นการป้องกันและการลดอัตราการตายและบาดเจ็บเนื่องจากอุบัติเหตุ มีนักวิจัยจำนวนมากที่ทำการวิจัยด้านความสามารถการดูดซับพลังงานของโครงสร้าง โดยเฉพาะการใช้ชิ้นส่วนผนังบาง (thin-walled members) ได้แก่ โครงสร้างแผ่นบาง

(plates) โครงสร้างเปลือกบาง (shells) ท่อ (tubes) แผ่นประกบ (sandwich plates) และวัสดุประกอบ (composite materials) เป็นต้น เพื่อรองรับการกระแทก เรามักเรียกโครงสร้างผนังบางดังกล่าวว่า "ตัวดูดซับพลังงาน" (energy absorber) ตัวดูดซับพลังงานจะทำให้หน้าที่ดูดซับพลังงานจนกระทั่งมากกว่าโครงสร้างให้ลดน้อยลงที่สุดหรือเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นๆ โดยตัวแปรที่ทำการศึกษา ประกอบด้วยพฤติกรรมความเสียหาย ประเภทของวัสดุ เป็นต้น โดยเฉพาะพฤติกรรมความเสียหายของตัวดูดซับพลังงาน จะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ ได้แก่ ลักษณะรูปร่าง ขนาด วัสดุ และลักษณะการรับแรง เป็นต้น ดังนั้น ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาในแต่ละปัญหาจะมีความสัมพันธ์และสอดคล้องกันไป ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Andrews K.R.F และ คณะ ในปี 1983 [1] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมความเสียหายของท่อทรงกระบอกกลมภายใต้แรงกดตามแนวแกน ผลการทดลองสรุปว่า ท่อหนาที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความหนาแน่นน้อยกว่า 80 ถึง 90 พฤติกรรมความเสียหายเป็นแบบโมดคอนเซอร์ตินา (Concertina Mode) ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และท่อบางที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่อความหนาแน่นสูงกว่า 90 จะให้พฤติกรรมความเสียหายเป็นแบบโมดไดมอนด์ (Diamond Mode) ดังแสดงในรูปที่ 1(ข)



รูปที่ 1 แสดงพฤติกรรมความเสียหายของท่อทรงกระบอกกลม (ก) โมดคอนเซอร์ตินา (ข) โมดไดมอนด์

ในการหาคำตอบที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือได้จากวิธีการต่างๆ เช่น วิธีการทดลอง ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และวิธีการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ส่วนผลการวิเคราะห์ส่วนใหญ่จะแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากกระทำกับระยะที่เสียรูปร่างไป แต่ในบทความนี้ จะเป็นการวิเคราะห์โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นสำคัญ

ส่วนวัสดุที่นิยมใช้ในการออกแบบตัวดูดซับพลังงาน ได้แก่ เหล็ก อลูมิเนียม ทองเหลือง และวัสดุประกอบ เป็นต้น คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการศึกษา เช่น ลักษณะการขึ้นรูป ความแข็งแรง น้ำหนัก และพฤติกรรมของวัสดุในการเสียรูปช่วงพลาสติกแบบสมบูรณ์ (perfectly plastic) หรือพฤติกรรมพลาสติกแบบการแข็งเพิ่มขึ้น (hardening plastic) ดังนั้น ในการพัฒนาตัวดูดซับพลังงานในอนาคต วัสดุที่ใช้ควรมีน้ำหนักเบา เพื่อลดการแบกภาระของยานพาหนะ ลดการสิ้นเปลืองน้ำมัน และให้ความสามารถการดูดซับพลังงานดีที่สุด ในปี 2009 Ahmad และ Thambiratnam [2] ได้ศึกษาการจำลองทางคอมพิวเตอร์และการดูดซับพลังงานของกรวยกลมเดิม โฟมภายใต้แรงกระแทกแบบพลศาสตร์ ผลการศึกษาจะพบว่าท่อที่มีการเติมโฟมจะให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานที่สูงกว่าท่อที่ไม่เติม และความสามารถการดูดซับพลังงานของกรวยกลมจะเพิ่มขึ้น เมื่อความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้น

ลักษณะแรงที่มากกระทำกับตัวดูดซับพลังงานสามารถจำแนกได้ตามงานวิจัยของนักวิจัยที่ได้ทำการศึกษาไว้ ได้แก่ แรงตามแนวแกน [3] แรงตัด [4] แรงบิด [5-6] และแรงผสม ของ Nagel และ Thambiratnam (ในปี 2006) [7] ได้ทำการศึกษาการดูดซับพลังงานของท่อทรงกรวยภายใต้แรงผสม โดยใช้วิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ จะพบว่า ที่มุมกรวยที่ 5 องศาจะให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานลดลงเมื่อมุมของแรงที่ 10-15 องศา แต่ที่มุมกรวยมากกว่า 5 องศาความสามารถการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นกับมุมของแรงที่เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาส่วนใหญ่มักจะแสดงในรูปของแรงกับระยะการยุบตัว เพื่อนำไปวิเคราะห์หาความสามารถการดูดซับพลังงานของตัวดูดซับพลังงาน

ในทางทฤษฎี นิยามของ "การดูดซับพลังงาน" คือ ความสามารถของชิ้นส่วนโครงสร้าง ที่ทำหน้าที่ในการดูดซับพลังงานจนกระทั่งมากกว่าโครงสร้างให้เบาบางหรือลดลงน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้โครงสร้างหลักเกิดความเสียหาย ดังนั้น ในการหาค่าการดูดซับพลังงานภายในโครงสร้าง สามารถหาได้จากกฎสมดุลกำลังงาน (power balance) กล่าวได้ว่า "กำลังงานภายนอกที่มากกระทำเท่ากับกำลังงานภายในตัวดูดซับพลังงาน" [8] ดังนี้

$$\dot{E}_{ext} = \dot{E}_{int} \quad (1)$$

เมื่อ กำลังงานภายนอก ($\dot{E}_{ext}$) คือ

$$\dot{E}_{ext} = F\dot{u} + M\dot{\psi} \quad (2)$$

โดยที่ F คือแรงภายนอก M คือโมเมนต์ $\dot{u}$ คือความเร็วเคลื่อนที่ตามแนวแกน และ $\dot{\psi}$ คือความเร็วเชิงมุมของแกนหมุน สำหรับ กำลังงานภายในตัวข้อพลังงาน ($\dot{E}_{int}$) สามารถหาได้โดยสมมติว่า “กำลังงานภายในตัวข้อพลังงาน จะเกิดขึ้นตามเส้นการพับตัว (hinge line) ของตัวข้อพลังงานเท่านั้น” [8] ดังสมการที่ (3) คือ

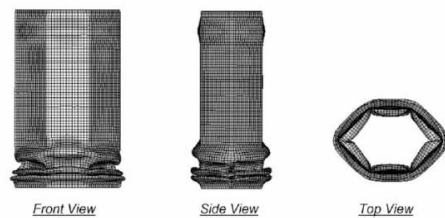
$$\dot{E}_{int} = \int_s (M_{\alpha\beta} \dot{\kappa}_{\alpha\beta} + N_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta}) ds + \sum_{l=1}^n \int_{l^i} M_n^i [\dot{\psi}_i] dl^i \quad (3)$$

เมื่อ n คือจำนวนทั้งหมดของเส้นการพับตัว S คือพื้นที่ผิวของตัวข้อพลังงาน l^i คือความยาวของเส้นการพับตัว $\dot{\psi}$ คือความเร็วเชิงมุมของเส้นการพับตัว $\dot{\kappa}_{\alpha\beta}$ คืออัตราการหมุน $\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$ คืออัตราการยืด $M_{\alpha\beta}$ คือโมเมนต์ดัด $N_{\alpha\beta}$ คือแรงยืด และ $M_n = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \frac{\sigma_0 t^2}{4}$ คือโมเมนต์ดัด

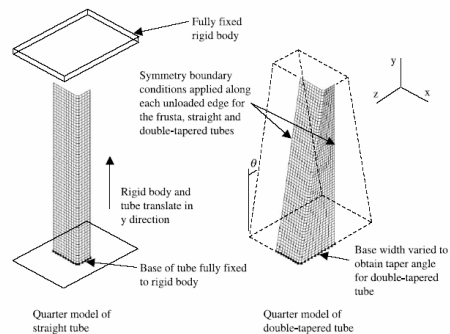
บนระนาบความเครียดช่วงพลาสติก โดยที่ t คือความหนา และ σ_0 คือความเค้นจุดคราก

ส่วนวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเสียหายของตัวข้อพลังงาน เนื่องจากพลังงานจลน์มากกระทำ สำหรับโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่พบบ่อยๆ และนิยมใช้กันในการวิเคราะห์ปัญหาเหล่านี้ ได้แก่ ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, CATIA, NASTRAN, และ PAM-CRASH เป็นต้น ในการวิเคราะห์นี้ นักวิจัยส่วนใหญ่ มักจะสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ให้เหมือนจริงกับการทดลอง ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ รูปร่าง เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ของปัญหา และผลการวิเคราะห์ของทั้งสองวิธี จะถูกนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ใช้คำนวณ ตัวอย่างลักษณะของแบบจำลองที่สร้างจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังรูปที่ 2 แสดงแบบจำลองพฤติกรรมความเสียหายของท่อเหล็กเหลี่ยมภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรม LS-DYNA [3] ในรูปที่ 3 แสดงการสร้างแบบจำลองของกรวยหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [9] และรูปที่ 4 แสดงแบบจำลองและลักษณะความเสียหายของท่อสี่เหลี่ยมรูปตัวเอส (S) โดยใช้โปรแกรม PAM-CRASH [10]

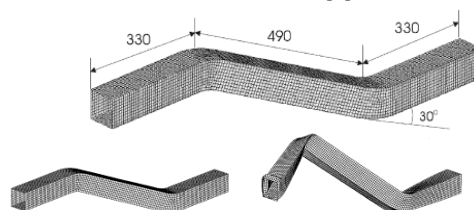
ดังนั้น ในบทความวิชาการนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา การวิเคราะห์ความเสียหายช่วงพลาสติกของท่อที่มีหน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกระทำ โดยวิธีการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของแรงและระยะยุบตัวของตัวข้อพลังงาน แล้วจึงนำไปคำนวณหาความสามารถการดูดซับพลังงานต่อไป ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา ได้แก่ ผลของขนาด ผลของรูปร่าง และผลของลักษณะแรงที่มากระทำ ได้แก่ แรงตามแนวแกน แรงดัด และแรงบิด รวมทั้งผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาและจำนวนเหลี่ยมของหน้าตัดของท่อที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2 การจำลองพฤติกรรมความเสียหายของท่อเหลี่ยมภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรม LS-DYNA [3]



รูปที่ 3 แสดงการสร้างแบบจำลองของกรวยหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยใช้โปรแกรม ABAQUS [9]



รูปที่ 4 แสดงแบบจำลองและลักษณะความเสียหายของท่อสี่เหลี่ยมรูปตัวเอส (S frame) โดยใช้โปรแกรม PAM-CRASH [10]

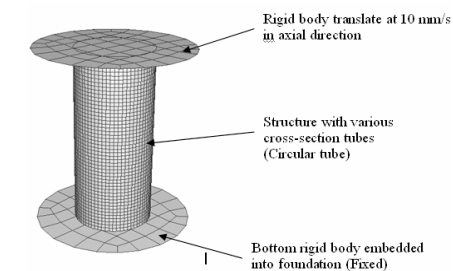
2. วิธีการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกระแทก โดยการใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งผลของแรงกระแทกที่มากกระทำ ประกอบด้วย แรงในแนวแกน แรงดัด และแรงบิด โดยมีคุณสมบัติของหน้าตัดต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของหน้าตัดของท่อ

รูปร่าง ของ หน้าตัด	พื้นที่หน้าตัด mm ²			โมเมนต์ความเฉื่อย ของพื้นที่รอบแกน นอน Ixx, cm ⁴			โมเมนต์ความเฉื่อย ของพื้นที่เชิงขั้ว Izz cm ⁴		
	ความหนา			ความหนา			ความหนา		
	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm
สี่เหลี่ยม	316.00	624.00	924.00	32.87	63.32	91.45	6.58	126.63	182.89
หกเหลี่ยม	316.52	626.10	928.76	36.70	71.05	103.14	73.41	142.10	206.29
แปดเหลี่ยม	316.69	626.75	930.18	38.23	74.10	107.73	76.45	148.21	215.46
วงกลม	316.86	627.44	931.73	40.30	78.24	113.93	80.59	156.48	227.86

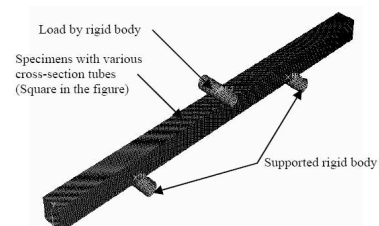
การสร้างแบบจำลองของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงในแนวแกน ดังรูปที่ 5 ประกอบด้วย ท่อที่มีหน้าตัดหลายเหลี่ยม และแผ่นระนาบกลม 2 ชั้น ที่อยู่บริเวณด้านล่างของท่อ จะถูกยึดไว้ไม่ให้เคลื่อนที่ ส่วนแผ่นกลมด้านบนจะถูกให้เคลื่อนที่ตามแนวแกน ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ส่วนเอลิเมนต์ที่ใช้กับท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมจะเป็นเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมสี่โนดเปลือกบาง (4-node shell element) และแผ่นระนาบกลม 2 ชั้น จะเลือกเป็นแบบแข็งเกร็ง (rigid body) มีลักษณะการสัมผัสกันระหว่างผิวเป็นแบบพื้นผิวต่อพื้นผิว (surface to surface) ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.2



รูปที่ 5 แสดงแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ของท่อกลมผนังบางภายใต้แรงกดตามแนวแกน

คุณสมบัติของวัสดุ โดยกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ความหนาแน่นที่ พฤติกรรมวัสดุในช่วงขีดจำกัดกับความยืดหยุ่น (elasticity limit) มีค่า Young's modulus เท่ากับ 300,000 เมกะปาสคาล อัตราส่วนปัวซอง เท่ากับ 0.3 และความหนาแน่น 7800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนคุณสมบัติวัสดุในช่วงพลาสติกซิตี (plasticity) เป็นพฤติกรรมการเสียรูปช่วงพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (plastic perfectly) โดยเริ่มต้นให้ค่าคงที่ที่ความเค้นจุดคราก (yield stress) เท่ากับ 200 เมกะปาสคาล ส่วนตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา คือ หน้าตัดที่มีจำนวนเหลี่ยมที่เพิ่มขึ้น ได้แก่ ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม ท่อหน้าตัดแปดเหลี่ยม และ ท่อหน้าตัดวงกลม โดยท่อจะมีขนาดของตามแนวของเส้นรอบวงของหน้าตัดของท่อเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ความหนา 1, 2, และ 3 มิลลิเมตร

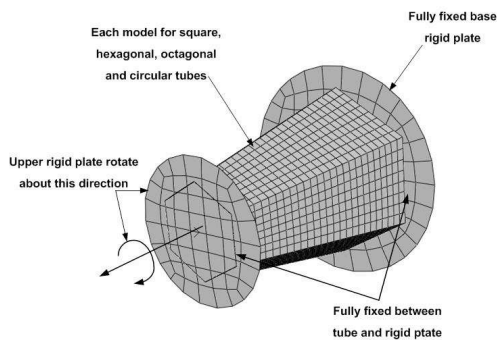
ส่วนการสร้างแบบจำลองของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงดัด ได้แสดงในรูปที่ 6 เป็นการแสดงลักษณะการสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย ท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมที่มีขนาดความยาวตามแนวเส้นรอบวงของหน้าตัดเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ความยาว 1,500 มิลลิเมตร ความหนา 1, 2, และ 3 มิลลิเมตร และมีท่อกลมที่มีความแข็งเกร็งสูง (rigid body) จำนวน 3 ชั้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร โดยท่อกลมด้านล่างจำนวน 2 ชั้น เป็นจุดรองรับยึดอยู่กับที่ ส่วนท่อกลมด้านบนจะถูกให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ทิศทางลงตามแนวขวางของท่อ เพื่อให้ท่อเกิดการดัดขึ้น ส่วนเอลิเมนต์ที่ใช้กับท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมจะเป็นเอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมสี่โนดเปลือกบาง (4-node shell element) การสัมผัสกันของท่อเป็นการสัมผัสแบบพื้นผิวต่อพื้นผิว (surface to surface) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.2



รูปที่ 6 แสดงแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมภายใต้แรงดัด

คุณสมบัติของวัสดุของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยม ภายใต้แรงดัด จะกำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ความหนาแน่นที่ พฤติกรรมวัสดุในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elasticity limit) มีค่ายังค์มอดูลัสเท่ากับ 300,000 เมกะปาสคาล อัตราส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.3 และความหนาแน่น 7800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีคุณสมบัติวัสดุในช่วงพลาสติกซิติ (plasticity) เป็นพฤติกรรมการเสียรูปช่วงพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (plastic perfectly) โดยเริ่มมีค่าคงที่ที่ความเค้นจุดคราก (yield stress) เท่ากับ 200 เมกะปาสคาล ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา คือ หน้าตัดที่มีจำนวนเหลี่ยมเพิ่มขึ้น ได้แก่ ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยม ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม ท่อหน้าตัดแปดเหลี่ยม และ ท่อหน้าตัดวงกลม

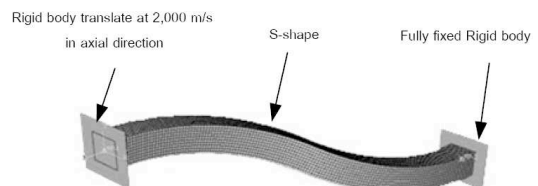
การสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยม ภายใต้แรงบิด ดังแสดงในรูปที่ 8 แสดงท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม โดยมีขนาดของหน้าตัดตามแนวเส้นรอบวงเท่ากับ 200 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ความหนา 1, 2, และ 3 มิลลิเมตร และมีแผ่นกลมความแข็งเกร็งสูง (rigid body) จำนวน 2 แผ่น โดยแผ่นกลมที่อยู่ด้านล่างของท่อจะยึดอยู่กับที่ ส่วนแผ่นกลมด้านบนจะถูกเชื่อมติดกับหน้าตัดของท่อเพื่อทำการบิดรอบแกนของท่อด้วยความเร็ว 0.0174 เรเดียนต่อวินาที ส่วนเอเลเมนต์ที่ใช้กับท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมจะเป็นเอเลเมนต์แบบสี่เหลี่ยมสี่โนดเปลือกบาง (4-node shell element) การสัมผัสกันของท่อเป็นการสัมผัสแบบพื้นผิวต่อพื้นผิว (surface to surface) มีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเท่ากับ 0.2



รูปที่ 8 แสดงการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของท่อหน้าตัดหกเหลี่ยม ทรงกรวย ภายใต้แรงบิด

คุณสมบัติของวัสดุของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยม ภายใต้แรงบิด กำหนดให้วัสดุมีคุณสมบัติเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ความหนาแน่นที่ พฤติกรรมวัสดุในช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น (elasticity limit) มีค่ายังค์มอดูลัสเท่ากับ 300,000 เมกะปาสคาล อัตราส่วนปัวส์ซองเท่ากับ 0.3 และความหนาแน่น 7800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร มีคุณสมบัติวัสดุในช่วงพลาสติกซิติ (plasticity) เป็นพฤติกรรมการเสียรูปช่วงพลาสติกอย่างสมบูรณ์ (plastic perfectly) โดยเริ่มมีค่าคงที่ที่ความเค้นจุดคราก (yield stress) เท่ากับ 200 เมกะปาสคาล

ส่วนในการวิเคราะห์ท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมที่มีลักษณะเป็นรูปตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน โดยการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอเลเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 9 ท่อมีขนาดของหน้าตัดตามแนวเส้นรอบวงเท่ากับ 320 มิลลิเมตร ความยาว 1,000 มิลลิเมตร มีรัศมีความโค้ง 695.321 มิลลิเมตร ความหนา 1, 2, และ 3 มิลลิเมตร และมีแผ่นสี่เหลี่ยมความแข็งเกร็งสูง (rigid body) จำนวน 2 ชิ้น โดยชิ้นที่อยู่ด้านซ้ายจะถูกยึดอยู่กับที่ ส่วนแผ่นสี่เหลี่ยมที่อยู่ด้านขวาจะเคลื่อนตามแนวแกน ด้วยความเร็วในการชนเท่ากับ 2,000 มิลลิเมตรต่อวินาที [10]



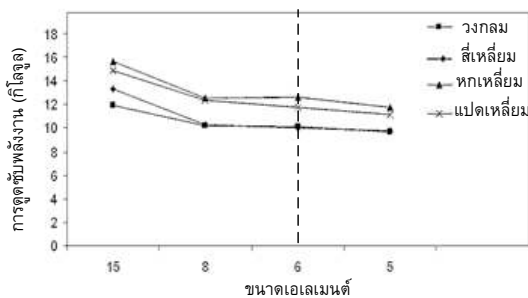
รูปที่ 9 แสดงแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ของโครงสร้างตัวเอส ภายใต้แรงกดตามแนวแกน

วัสดุในการวิเคราะห์ คือ อลูมิเนียม AA-6063-T7 ซึ่งมีคุณสมบัติวัสดุคือ ความหนาแน่น 2,770 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พฤติกรรมของวัสดุเป็นช่วงขีดจำกัดความยืดหยุ่น มีค่ายังค์มอดูลัส 6,900 เมกะปาสคาล และอัตราส่วนปัวส์ซอง 0.3 และช่วงเสียรูปพลาสติก จะแสดงในตารางที่ 2

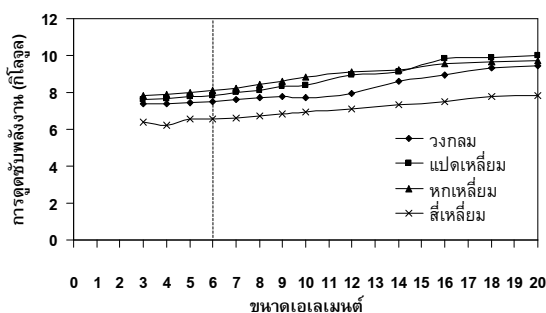
ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของวัสดุในช่วงเสียรูปพลาสติก [10]

ความเค้นพลาสติก (เมกะปาสคาล)	ความเครียดพลาสติก (มิลลิเมตร)
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

ก่อนการวิเคราะห์ปัญหานี้ จะต้องทำการหาจำนวน
 เอลิเมนต์ที่เหมาะสม ที่ไม่ทำให้คำตอบของการวิเคราะห์มี
 ผลต่อจำนวนเอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 10



(ก) ท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงบิด



(ข) ท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมรูปตัวเอส

รูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ความอิสระของเอลิเมนต์ที่ไม่มีผล
 ต่อค่าการดูดซับพลังงานของท่อ (ก) ท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยม
 ภายใต้แรงบิด (ข) ท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมรูปตัวเอส

ในรูปที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์ความอิสระของ
 เอลิเมนต์ที่ไม่มีผลต่อค่าการดูดซับพลังงานของท่อ
 จำนวนหลายเหลี่ยมภายใต้แรงบิดดังรูปที่ 10(ก) และท่อ
 จำนวนหลายเหลี่ยมรูปตัวเอส ดังรูปที่ 10(ข) ซึ่งจะพบว่า

จำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม เท่ากับ 6 เนื่องจาก ค่าการ
 ดูดซับพลังงานเริ่มมีค่าคงที่หรือมีเสถียรภาพ เมื่อจำนวน
 เอลิเมนต์เพิ่มมากขึ้น

3. ผลการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยม ภายใต้แรง
 กระแทก โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีไฟไนต์
 เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญในการวิเคราะห์ จะมุ่งเน้นถึง
 ขนาด รูปร่างของหน้าตัด และลักษณะพฤติกรรมความ
 เสียหาย ดังนี้

3.1 ผลของความหนา

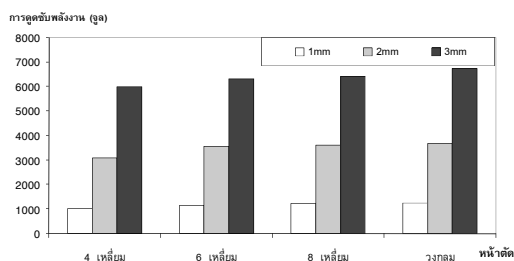
ในการศึกษาขนาดของตัวดูดซับพลังงาน นักวิจัย
 ส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นถึง การเปลี่ยนแปลงของความหนา
 ความยาว และขนาดหน้าตัดของตัวดูดซับพลังงาน ซึ่งผล
 ของการเปลี่ยนแปลงขนาดเหล่านี้ เพื่อให้ได้ขนาดที่
 เหมาะสม และให้ค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานดี
 ที่สุด ดังนั้น ในบทความนี้จะทำการศึกษาผลของการ
 เปลี่ยนแปลงของความหนากับค่าการดูดซับพลังงานของ
 ท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยม ที่มีความยาวและพื้นที่หน้าตัด
 เท่ากัน

ในรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบค่าการดูดซับ
 พลังงานของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกดตาม
 แนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงของความหนา ผลการ
 วิเคราะห์พบว่า ค่าการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นกับความ
 หนาที่เพิ่มขึ้น

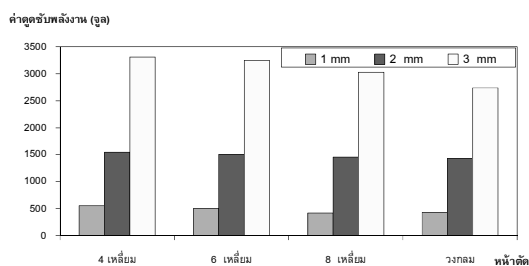
ส่วนในรูปที่ 12 เป็นการเปรียบเทียบค่าการดูดซับ
 พลังงานของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงดัดกับ
 การเปลี่ยนแปลงของความหนา ผลการวิเคราะห์พบว่า
 ค่าการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นกับความหนาที่เพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 13 เป็นการเปรียบเทียบค่าการดูดซับ
 พลังงานของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงบิดกับ
 การเปลี่ยนแปลงของความหนา ผลการวิเคราะห์พบว่า
 ค่าการดูดซับพลังงานจะเพิ่มขึ้นกับความหนาที่เพิ่มขึ้น

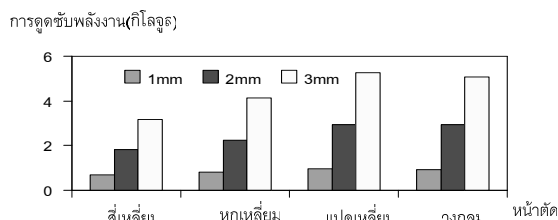
ในรูปที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงาน
 ของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมรูปตัวเอสภายใต้แรงกด
 ตามแนวแกนกับการเปลี่ยนแปลงความหนา ผลการ
 วิเคราะห์จะพบว่าเมื่อความหนามีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า
 การดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น



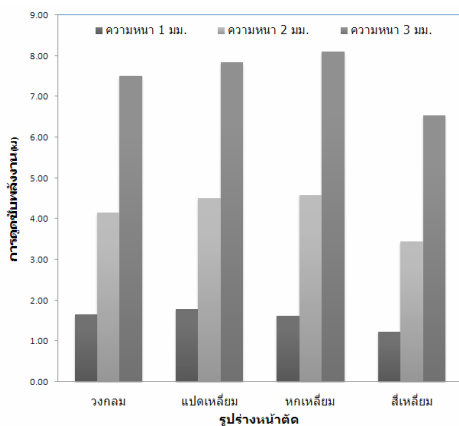
รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดหลายภายใต้แรงกดตามแนวแกน



รูปที่ 12 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกด



รูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงบิด



รูปที่ 14 แสดงผลของความหนาแน่นกับการดูดซับพลังงานของโครงสร้างตัวเอสที่รูปร่างหน้าตัดต่างๆ

3.2 ผลของรูปร่างหน้าตัด

การวิเคราะห์ผลการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกระทำ ประกอบด้วย แรงในแนวแกน แรงดัด และแรงบิด โดยผลของรูปร่างหน้าตัดของท่อที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยม ท่อน้ำตัดหกเหลี่ยม ท่อน้ำตัดแปดเหลี่ยม และท่อน้ำตัดวงกลม ซึ่งผลของการวิเคราะห์เพื่อให้ได้รูปร่างหน้าตัดที่มีค่าความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงที่สุด ดังนี้

ในรูปที่ 11 เป็นการเปรียบเทียบค่าการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงกดตามแนวแกน ผลการวิเคราะห์พบว่า ท่อน้ำตัดวงกลมจะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานสูงกว่ากับท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยม หน้าตัดหกเหลี่ยม และ หน้าตัดแปดเหลี่ยม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 แสดงร้อยละความแตกต่างของค่าการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดวงกลมมีค่าสูงกว่าท่อน้ำตัดต่างๆ

ตารางที่ 3 แสดงร้อยละความแตกต่างการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดวงกลมเปรียบเทียบกับท่อน้ำตัดต่างๆ ภายใต้แรงกดแนวแกน

รูปร่างหน้าตัด	ร้อยละความแตกต่างการดูดซับพลังงาน		
	1 mm	2 mm	3 mm
สี่เหลี่ยม	18.76	16.27	11.02
หกเหลี่ยม	7.69	3.35	6.16
แปดเหลี่ยม	1.01	1.73	5.03
วงกลม	0	0	0

ส่วนในรูปที่ 12 เป็นผลการเปรียบเทียบของท่อน้ำตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงดัด พบว่า การดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดสี่เหลี่ยมมีค่าสูงกว่าท่อน้ำตัดหกเหลี่ยม หน้าตัดแปดเหลี่ยม และหน้าตัดวงกลม ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงร้อยละความแตกต่างของค่าการดูดซับพลังงานของท่อน้ำตัดวงกลมมีค่าสูงกว่าท่อน้ำตัดต่างๆ

ตารางที่ 4 แสดงร้อยละความแตกต่างการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกับท่อหน้าตัดต่างๆ ภายใต้แรงดัด

รูปร่างหน้าตัด	ร้อยละความแตกต่างการดูดซับพลังงาน		
	1 mm	2 mm	3 mm
หกเหลี่ยม	8.45	2.55	1.97
แปดเหลี่ยม	23.79	6.40	8.57
วงกลม	22.29	7.39	17.42
สี่เหลี่ยม	0	0	0

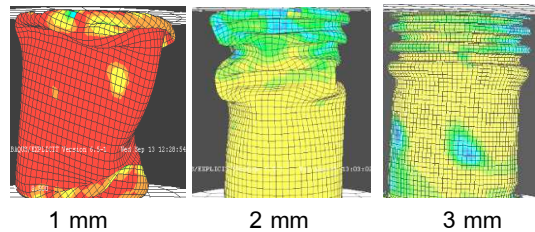
ส่วนในรูปที่ 13 ผลการเปรียบเทียบของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมภายใต้แรงบิด พบว่า การดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างวงกลมมีค่าสูงกว่าท่อรูปร่างหน้าตัดแปดเหลี่ยม หน้าตัดหกเหลี่ยม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีค่าการดูดซับพลังงานน้อยที่สุด ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนเหลี่ยมของหน้าตัดที่เพิ่มขึ้น จะมีความสามารถในการดูดซับพลังงานภายใต้แรงบิดได้มากขึ้น

ส่วนในรูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยมรูปทรงตัวเอสภายใต้แรงกดตามแนวแกน พบว่า การดูดซับพลังงานของท่อรูปร่างหกเหลี่ยมมีค่าสูงกว่าท่อรูปร่างหน้าตัดแปดเหลี่ยม หน้าตัดวงกลม และหน้าตัดสี่เหลี่ยมมีค่าการดูดซับพลังงานน้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากท่อหกเหลี่ยม เป็นท่อที่มีจำนวนเหลี่ยมที่เหมาะสมในการรับแรงกดตามแนวแกนและแรงดัดภายในท่อได้มากกว่าท่อที่มีจำนวนเหลี่ยมอื่นๆ เช่น เมื่อจำนวนเหลี่ยมของท่อเพิ่มขึ้นเริ่มจากแปดเหลี่ยมขึ้นไปจนถึงท่อวงกลม(เปรียบเสมือนมีจำนวนเหลี่ยมไปจำกัด) จะมีผลทำให้ค่าการดูดซับพลังงานลดลง

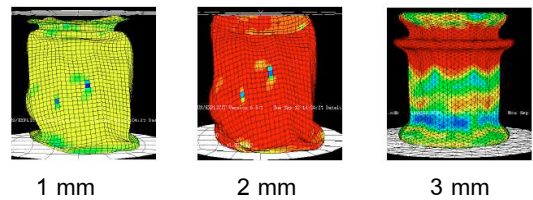
3.3 ผลของลักษณะพฤติกรรมความเสียหาย

การวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมความเสียหายของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยม ภายใต้แรงกระแทก ดังแสดงในรูปที่ 15(ก-ง) เป็นการแสดงลักษณะพฤติกรรมความเสียหายของท่อกลม, ท่อแปดเหลี่ยม, ท่อหกเหลี่ยม และท่อสี่เหลี่ยม ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมความเสียหายของท่อหน้าตัดหลายเหลี่ยม จะพบว่า ท่อที่มีขนาดความหนา 3 มิลลิเมตร จะมีลักษณะเป็นโมดคอนเซอร์ตินา ดังที่ได้กล่าวไว้ในรูปที่ 1 ซึ่งลักษณะของโมดจะมีการพบตัวเป็นชั้นๆ อย่างเป็นระเบียบและสมมาตร และโมดคอนเซอร์ตินา นี้ ยังให้ค่าการดูดซับพลังงาน

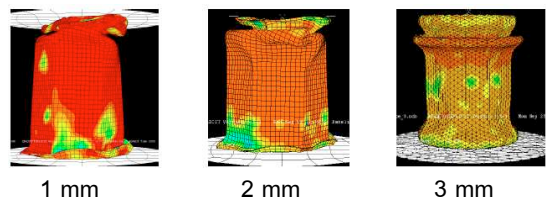
สูงสุด ส่วนท่อกลมที่มีความหนา 1 และ 2 มิลลิเมตร มีลักษณะเป็นโมดโดมอนต์ ที่มีการพบตัวอย่างไม่เป็นระเบียบและไม่สมมาตร และให้ค่าการดูดซับพลังงานต่ำกว่าโมดคอนเซอร์ตินา



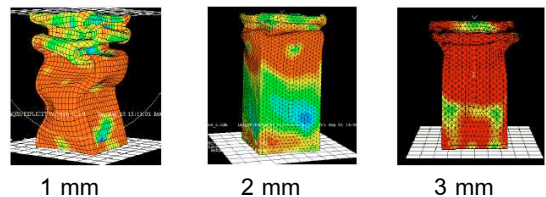
1 mm 2 mm 3 mm
(ก) พฤติกรรมความเสียหายของท่อกลม ที่ความหนา 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร



1 mm 2 mm 3 mm
(ข) พฤติกรรมความเสียหายของแปดเหลี่ยม ที่ความหนา 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร



1 mm 2 mm 3 mm
(ค) พฤติกรรมความเสียหายของหกเหลี่ยม ที่ความหนา 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร



1 mm 2 mm 3 mm
รูปที่ 15 (ง) พฤติกรรมความเสียหายของสี่เหลี่ยม ที่ความหนา 1, 2 และ 3 มิลลิเมตร

รูปที่ 15 (ก-ง) แสดงลักษณะพฤติกรรมความเสียหายของท่อกลม, ท่อแปดเหลี่ยม, ท่อหกเหลี่ยม, และท่อสี่เหลี่ยมตามลำดับ

4. สรุป

ในบทความวิชาการนี้ได้ทำการวิเคราะห์ความเสียหายช่วงพลาสติกของท่อที่มีหน้าตัดหลายเหลี่ยม ภายใต้แรงกระแทก โดยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ตัวแปรที่สำคัญในการศึกษา ได้แก่ ผลของขนาด ผลของรูปร่างหน้าตัด ลักษณะพฤติกรรมความเสียหาย ภายใต้แรงที่มากระทำ ได้แก่ แรงตามแนวแกน แรงดัด และแรงบิด รวมทั้งผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของความหนาและจำนวนเหลี่ยมของหน้าตัดของท่อที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ พบว่า ภายใต้แรงกดตามแนวแกนของท่อ ท่อหน้าตัดดвутงกลมจะให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานมากที่สุด ส่วนภายใต้แรงดัดของท่อ ท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจะให้ค่าการดูดซับพลังงานสูงสุด และภายใต้แรงบิดของท่อ ท่อหน้าตัดหกเหลี่ยมจะให้ความสามารถในการดูดซับพลังงานมากที่สุด ดังนั้น จากผลการวิเคราะห์ตามลักษณะของแรงดังกล่าว จะทำให้นักวิจัยและวิศวกรออกแบบด้านการชน ได้ตัดสินใจเลือกใช้นาตัดและหน้าตัดของท่อตามลักษณะแรงที่มากระทำอย่างเหมาะสมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ช่วยสนับสนุนให้บทความนี้สำเร็จลงได้ดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Andrew, K.R.F., England, G.L. and Ghani, E. 1983. Classification of the axial collapse of cylindrical tubes under quasi-loading. International Journal of Mechanical Sciences, 25(9/10): 687-696.
- [2] Ahmad, Z. and Thambiratnam, D.P. 2009. Dynamic simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loads. Computers and Structures, 87: 185-197.
- [3] Rossi, A. Fawaz, Z. and Behdinan, K. 2005. Numerical simulation of the axial collapse of

thin-walled polygonal section tubes. Thin-Walled Structure, 43: 1646-1661.

- [4] Poonaya, S. and Thinvongthituk, C. 2007. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under axial compression and bending loading. Proceeding of the 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. 17-19 October 2007, chonburi, Thailand.
- [5] Poonaya, S. and Thinvongthituk, C. 2008. Comparison of energy absorption of various section steel tubes under torsion loading. Proceeding of the 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand. 4-7 November 2008, changmai, Thailand.
- [6] Weigang, C. and Wierzbicki, T. 2000. Torsional collapse of thin-walled prismatic columns. Thin-Walled Structures, 36:181-196.
- [7] Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P. 2006. Dynamic simulation and energy absorption of tapered thin-walled tubes under oblique impact loading. International Journal of Impact Engineering, 32:1595-1620.
- [8] Poonaya, S., Teebonma, U., and Thinvongpituk, C. 2009. Plastic collapse analysis of thin-walled circular tubes subjected to bending. Thin-walled structures, 47:637-645.
- [9] Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P. 2005. Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular tubes. Thin-Walled Structure, 43:1225-1242.
- [10] Kim, H.S. and Wierzbicki, T. 2004. Closed-form solution of crushing response of three-dimensional thin-walled S frames with rectangular cross-sections. International Journal of Impact Engineering, 30:87-112.