

**การศึกษาพฤติกรรมการชนของท่อทรงกรวยผนังบางโดยใช้วัสดุประกอบ
เสริมแรงภายใต้แรงกระแทกในแนวแกน**

**The Study of Crashworthiness Behavior of Tapered Thin-Walled Composite Tubes
Subjected to Impact Loading**

จารุวัฒน์ ภูณะยา^{1,*}, นิรุต อ่อนสลุง¹, ชวลิต ถิ่นวงศ์พิทักษ์¹, สมญา ภูณะยา²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม เขตภาษีเจริญ จ.กรุงเทพฯ 10163

* ติดต่อ: E-mail: jaruptum@yahoo.com โทรศัพท์: 045 353 308, โทรสาร: 045 353 309

Jaruwat Poonaya*, Nirut Onsalung, Chawalit Thinvongpituk, Somya Poonaya

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering Ubonratchatani University, Ubonratchatani 34190, Thailand Tel:

04535-3380, Fax: 045-353333, *E-mail: jaruptum@yahoo.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา พฤติกรรมการเสียหายของโครงสร้างที่ทำจากวัสดุประกอบเสริมแรงที่รับแรงกระแทกที่แนวตั้ง โดยชิ้นงานมีลักษณะเป็นท่อผนังบางทรงกรวย ปลายตัด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของปากท่อด้านเล็ก คือ 40 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของปากท่อด้านใหญ่ คือ 80, 90 และ 120 mm ตามลำดับ มุมของชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ 10.32° , 12.14° และ 20.97° ตามลำดับ เรซินที่ใช้ขึ้นรูปเป็นแบบทนต่อแรงกระแทก ใช้เส้นใยแก้วเบอร์ 450 และเบอร์ 600 เรียงทับซ้อนกันจนได้ขนาดความหนา คือ 2 mm. ทดสอบโดยใช้แรงกระแทกตามแนวแกนโดยใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ที่ความเร็วขณะกระแทกประมาณ 6.80 m/s ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาพบว่า โครงสร้างที่ศึกษาจะเสียหายในรูปแบบ Crush Mode หรือ Bending Mode และพบว่าโครงสร้างที่มีมุม 10.32° สามารถดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้ดีที่สุด ในขณะที่โครงสร้างที่มีมุมกรวย 20.97° ดูดซับพลังงานจากการกระแทกได้น้อยที่สุด

คำหลัก: การกระแทก, การดูดซับพลังงาน, วัสดุประกอบ

Abstract

This study is aimed to investigate the crush behavior of tapered thin walled composite tube subjected to impact load. The specimens were truncated conical fiber reinforced composite tubes. The smaller diameter of tube was 40 mm while the larger diameter was varied as 80, 90 and 120 mm. The apex angles of specimens were 10.32° , 12.14° and 20.97° manufactured with isophthalic resin and E-Glass No. 450 and 600. They were tested under impact load with speed of 6.80 m/s. The result revealed that the specimens fail into 2 modes i.e. crush mode or bending mode. It was also found that the tube with 10.32° gives highest impact energy absorption while the tube with 20.97° gives lowest energy absorption.

Keywords: FRP, Crashworthiness, Structural impact.

1. บทนำ

ปัจจุบันโครงสร้างที่ทำหน้าที่ในการรับแรงจากการชนหรือการกระแทกของงานด้านยานยนต์มักนิยมใช้วัสดุจำพวกโลหะ เช่น เหล็ก ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับแรงจากการชนหรือการกระแทกได้ดี แต่ข้อด้อยที่สำคัญของวัสดุจำพวกโลหะคือในการนำมาใช้งานระยะยาวจะเกิดการผุกร่อน ความสามารถในการทนต่อความร้อนต่ำ รูปทรงหลังการเสียรูปก่อให้เกิดอันตราย อีกทั้งต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง ดังนั้นวัสดุประกอบเสริมแรง (Fiber reinforced composite, FRP) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งวัสดุเหล่านี้มีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ น้ำหนักเบา ความแข็งแรง ความสามารถในการดูดซับพลังงานสูง ทนต่อแรงกระทำซ้ำๆ ได้ดี ทนต่อการกัดกร่อน ไม่เหนียวนำทางไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากคุณสมบัติดังกล่าว ปัจจุบันจึงเป็นที่นิยมนำเอาวัสดุประกอบเสริมแรง มาใช้ในทางวิศวกรรม ได้แก่ ระบบท่อหล่อเย็น โครงสร้างกันชน

ของรถยนต์ และโครงสร้างความปลอดภัยตามริมถนนเนื่องจากการชนของยานพาหนะ[1]

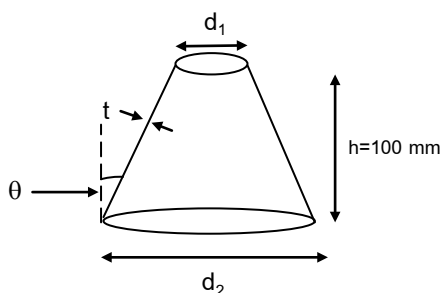
ซึ่งลักษณะโครงสร้างที่ทำการศึกษามักมีหลายรูปแบบ เช่น ทรงกลม ทรงกระบอก ทรงกรวย เป็นต้น สำหรับท่อทรงกรวยนั้นมีการศึกษามากมายแล้ว เช่น การศึกษาของ G.M. Nagel และคณะ [1,2,3] การศึกษาของ S.R. Reid [4] แต่การศึกษาดังกล่าวล้วนเป็นการศึกษาวัสดุกลุ่มโลหะ ในส่วนของกลุ่มพลาสติกหรือโพลีเมอร์ก็มีตัวอย่างผลการศึกษา เช่น การศึกษาของ Mamalis A.G. และคณะ [5] เป็นต้น สำหรับการศึกษาวัสดุประกอบเสริมแรงนั้นมีผลการศึกษาจำนวนหนึ่งโดยพบว่า ในกรณีของวัสดุประกอบเสริมแรงนั้น มีการเสียหายแบบแตกเปราะซึ่งเกิดจากการกระจายแรง [6] และยังมีผลการศึกษาที่รายงานว่าลักษณะการเสริมเส้นใยที่ต่างกันและวิธีการขึ้นรูปที่ต่างกันจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะการเสียหายของท่อไม่เหมือนกัน

อย่างไรก็ตามพบว่าในกรณีการศึกษาท่อชนิดวัสดุประกอบเสริมแรงนั้น ยังมีการศึกษาท่อที่มีลักษณะทรงกรวยน้อยมาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาพฤติกรรมการรับแรงกระแทกของโครงสร้างทรงกรวยที่สร้างจากวัสดุประกอบภายใต้แรงกระทำแบบกึ่งคงที่ โดยจะใช้ค่าพลังงานดูดซับและพลังงานดูดซับจำเพาะเป็นตัวแปรหลักในการศึกษา

2. ชิ้นงานและวิธีการทดลอง

2.1 ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งศึกษาอิทธิพลของมุมกรวยที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานของท่อหน้าตัดกลมผนังบางรูปทรงกรวย ที่ทำด้วยวัสดุประกอบเสริมแรงโดยชิ้นงานมีลักษณะเป็นท่อผนังบางทรงกรวยปลายตัด ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของชิ้นงานทดสอบ

จากรูปที่ 2 แสดงขนาดของชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากท่อด้านเล็ก (d_1) คือ 40 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของปากท่อด้านใหญ่ (d_2) คือ 80, 90 และ 120 mm ตามลำดับ มุมกรวยของชิ้นงานที่ใช้ในการศึกษา (θ) ได้แก่ 10.32° , 12.14° และ 20.97° ตามลำดับ ชิ้นงานดังกล่าวขึ้นรูปโดยใช้ใยแก้วและเรซินที่มีคุณสมบัติดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของใยแก้วที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน (E-glass fiber)

คุณสมบัติ	เบอร์	
	450	600
Mass per unit (g/m^2)	440	615
Binder content (%)	3.3	0.53
Width (mm)	1040	1000
Intensity in vertical (N/150 mm)	150	4600
Intensity in horizontal (N/150 mm)	150	4400

ตารางที่ 2 แสดงคุณสมบัติของเรซินที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงาน

ก) แสดงคุณสมบัติของเรซินขณะเป็นของเหลว

คุณสมบัติ	คุณสมบัติของเรซิน
Viscosity (poise at 25°C)	5.00 – 7.00
Gel time (min. at 25°C)	30 - 50

ข) แสดงคุณสมบัติของเรซินขณะแข็งตัว

คุณสมบัติ	Casting	FRP
Tensile strength (kg/mm^2)	7.9	11.5
Elongation (%)	6.0	-
Flexural strength (kg/mm^2)	13.8	14.8
Flexural modulus (kg/mm^2)	290	685
Volume shrinkage (%)	8.0 – 8.1	-

จากตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของใยแก้ว (E-glass fiber) ที่ใช้ขึ้นรูปท่อ โดยใช้ เส้นใยแก้ว เบอร์ 450 และเบอร์ 600 เรียงสลับชั้นกัน ใช้เรซินที่มีค่าคุณสมบัติตามตารางที่ 2 ซึ่งเป็นแบบทนต่อแรงกระแทก (Ester H6650HEX) ขึ้นรูปจนได้ขนาดความหนา (t) คือ 2 mm ทดสอบโดยใช้แรงกระแทกตามแนวแกนโดยใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ที่ความเร็วขณะกระแทกประมาณ 6.80 m/s

จากนั้นนำผลที่ได้จากการทดสอบไปคำนวณผลของพลังงานที่ท่อสามารถดูดซับได้

2.2. ตัวแปรที่พิจารณา

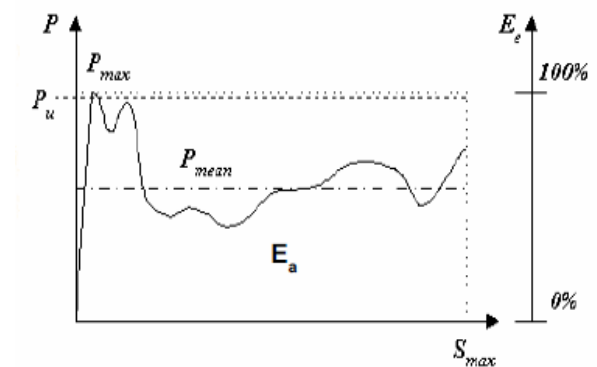
ในการศึกษาทางด้านการเสียหายของโครงสร้างภายใต้การชน (Crashworthiness) มักจะศึกษากราฟภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้างดังตัวอย่างกราฟในรูปที่ 3 โดยมีตัวแปรที่สำคัญหลายตัว เช่น ภาระวิกฤติ (Critical Load, P_{cr}) หมายถึง ภาระแรกที่ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายอย่างสังเกตเห็นได้ ภาระเฉลี่ย (Mean crushing load, P_{mean}) หมายถึง ภาระเฉลี่ยตลอดการเสียรูปของโครงสร้างภายใต้การกระแทกจนสิ้นสุดการยุบตัว ภาระสูงสุด (Maximum Load, P_{max}) หมายถึง ภาระสูงสุดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการยุบตัวจากเริ่มต้นจนสิ้นสุด พลังงานที่ดูดซับได้ (Energy absorption, E_a) หมายถึง พลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ตลอดช่วงเวลาการกระแทกหรือการยุบตัว และพลังงานดูดซับจำเพาะ (Specific energy absorption, E_s) หมายถึง พลังงานที่โครงสร้างสามารถดูดซับได้ เมื่อเทียบกับขนาดน้ำหนักของตัวโครงสร้างเอง โดยในบทความนี้ได้มุ่งเน้นศึกษาค่าพลังงานที่ดูดซับได้และพลังงานดูดซับจำเพาะของท่อผนังบาง ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญในการบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการชนของท่อ โดยการหาค่าพลังงานดูดซับนั้นสามารถหาได้จากพื้นที่ใต้กราฟของภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้าง เมื่อเกิดการชนหรือสามารถเขียนเป็นสมการดังสมการที่ 1

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

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

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

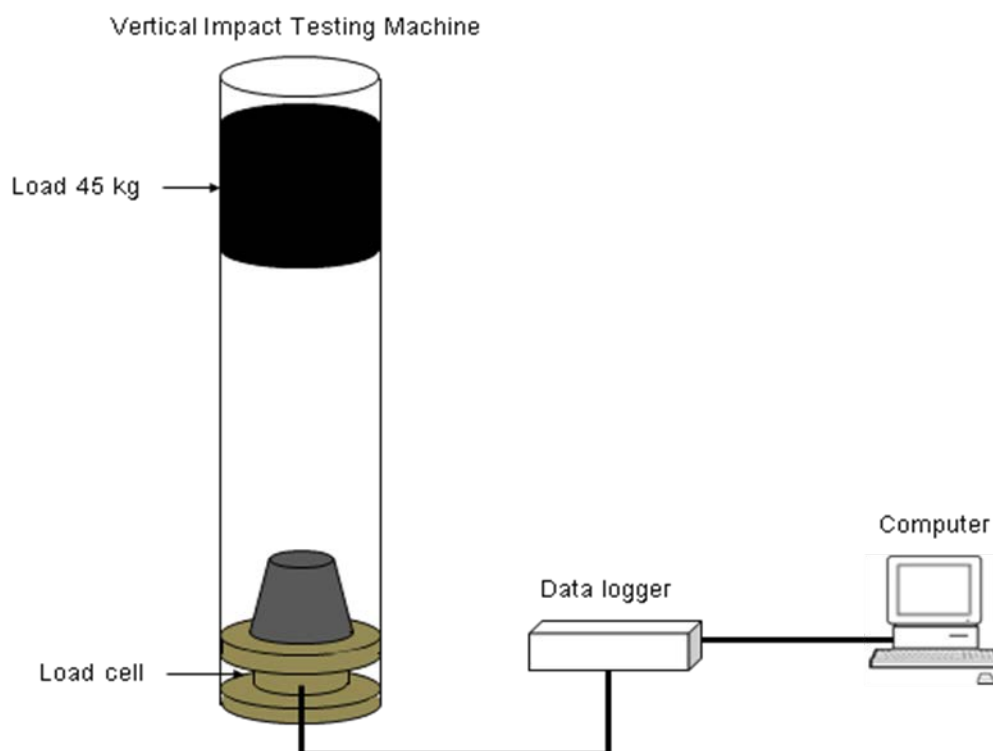
โดยที่ E_s คือค่าพลังงานดูดซับ P_{mean} คือค่าภาระเฉลี่ย S คือค่าระยะการยุบตัว และ $mass$ คือมวลของโครงสร้าง



รูปที่ 3 กราฟแสดงภาระและระยะยุบตัวของโครงสร้างพร้อมกับแสดงตัวแปรต่างๆที่นิยมใช้ในการศึกษา

2.2. วิธีการทดลอง

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองโดยใช้เครื่อง Vertical Impact Testing Machine ซึ่งมีลักษณะเป็นหอสูง มีตุ้มน้ำหนักซึ่งสามารถปรับขนาดได้ตั้งแต่ 20 – 60 kg ปลดปล่อยที่ความสูงต่างๆ ได้ เพื่อให้ตกกระแทกชิ้นงานด้านล่าง ซึ่งมี Load cell เป็นตัวบันทึกค่าแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นงาน โดยสามารถบันทึกค่าได้สูงสุดถึง 10,000 ค่าต่อวินาที รูปที่ 4 แสดงลักษณะของเครื่อง Vertical Impact Testing Machine



รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบ

3. ผลการศึกษา

3.1 รูปแบบการเสียหายของชิ้นงาน



รูปที่ 5 แสดงการวางชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบจริง

จากรูปที่ 5 แสดงลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อใช้ในการทดสอบจริง ในการศึกษาค้างนี้ใช้ตุ้มน้ำหนักเป็นภาระขนาด 45 kg ปลอยที่ระดับความสูง 2.37 m ซึ่งจะทำให้ความเร็วขณะกระทบเป็น 6.8 m/s (ประมาณ 25 km/hr)



รูปที่ 6 แสดงลักษณะการเสียหายของชิ้นงานสำหรับ
ท่อที่มีมุมเอียง 10.32° , 12.14° และ 20.97°
ตามลำดับ



(ก) (ข)



(ค)

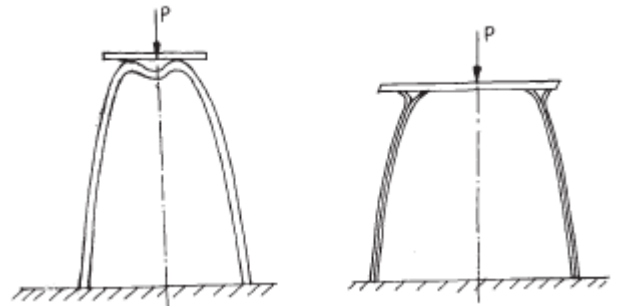
รูปที่ 7 แสดงลักษณะการเสียหายของหน้าตัดของท่อ

(ก) แบบสามเหลี่ยม (ข) แบบสี่เหลี่ยม

(ค) แบบวงกลม

ลักษณะการเสียหายของชิ้นงานแสดงในรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ตามลำดับ โดยพบว่า โดยทั่วไปชิ้นงาน จะเกิดการเสียหายจากด้านบนซึ่งแคบกว่าและค่อยๆ ขยายการเสียหายลงมาตามความยาว จากการ สังเกตการณ์เสียหายพบว่า ท่อที่มีมุมเอียง 10.32° และ 12.14° มีแนวโน้มเสียหายแบบ Crush mode ส่วนท่อที่มีมุมเอียง 20.97° มีแนวโน้มเสียหายแบบ Bending mode ทั้งนี้ลักษณะการเสียหายแบบ

Crush mode และ Bending mode มีลักษณะดัง แสดงเป็นภาพจำลองในรูปที่ 8



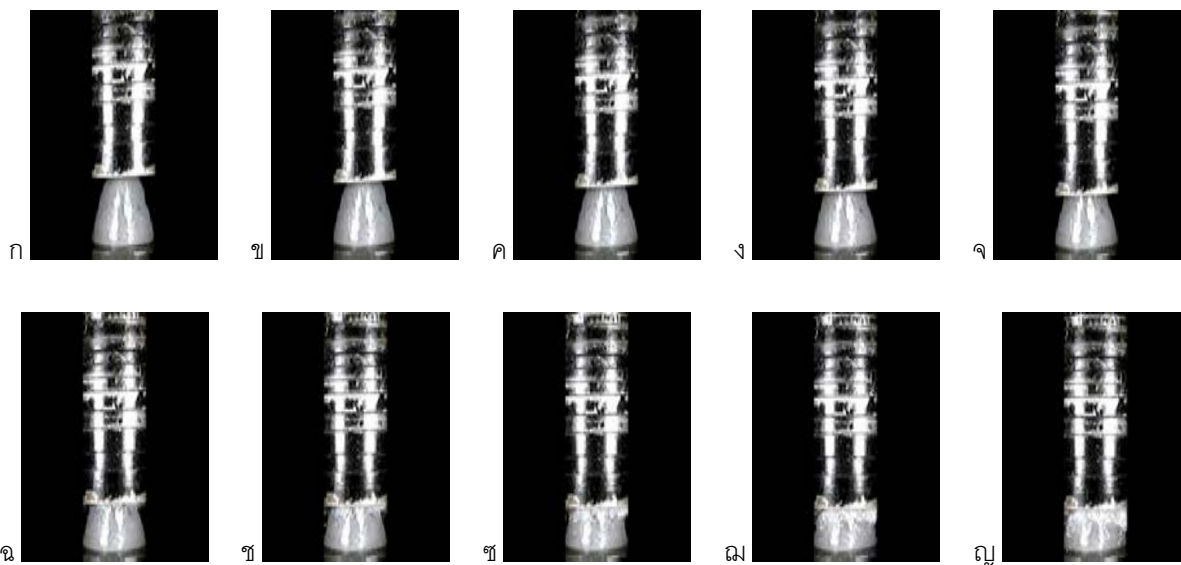
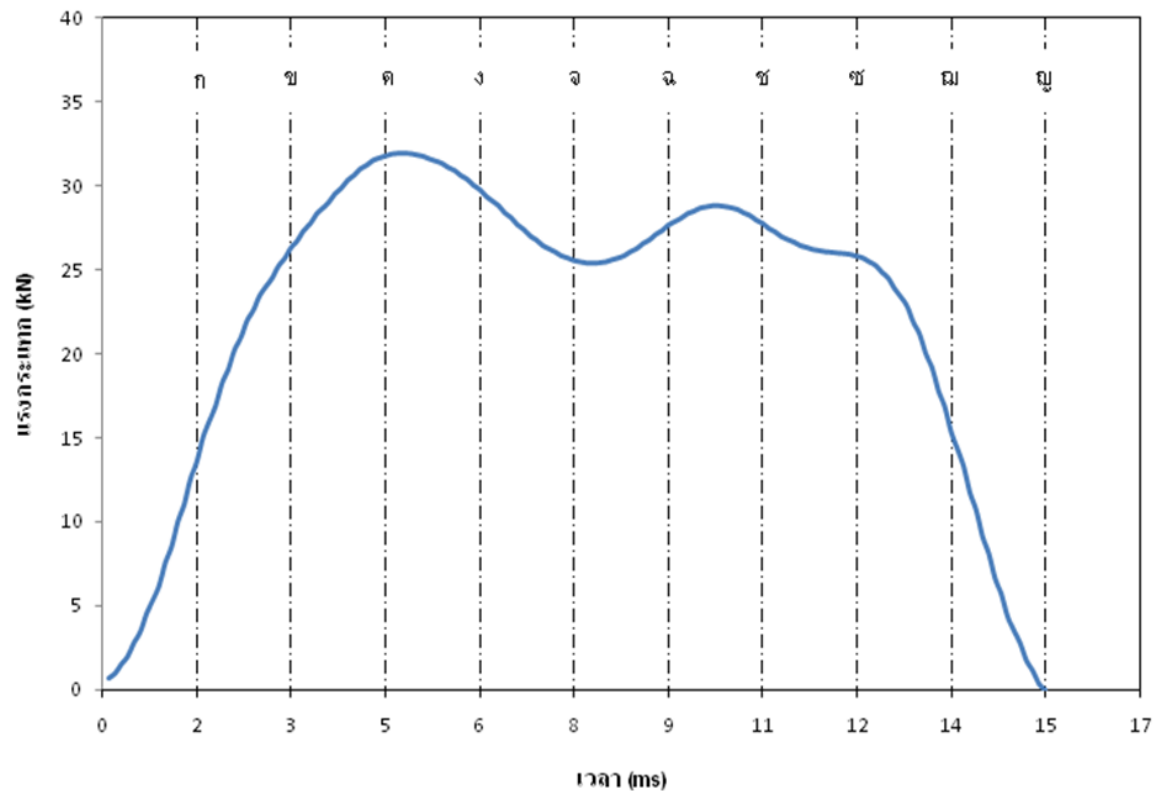
(ก)

(ข)

รูปที่ 8 แสดงลักษณะการเสียหายของชิ้นงานขณะ กระแทก

(ก) Bending mode (ข) Crush mode

นอกจากนี้ การศึกษานี้ยังได้ทำการบันทึกภาพ เคลื่อนไหวด้วยความเร็วสูงเพื่อสังเกตพฤติกรรม การเสียหายของชิ้นงานในเวลาต่างๆ โดยทำการแสดง ภาพการเสียหาย ณ เวลาต่างๆ และที่แรงตอบสนอง ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อชิ้นงานเกิด การแตกร้าว แนวโน้มของแรงจะมีค่าตกลง (ที่ ตำแหน่ง ง, จ, ช, ซ, ฉ) เนื่องจากไม่มีแรงต้านใน โครงสร้างนั่นเอง



รูปที่ 9 แสดงผลการทดสอบแรงกระทำและภาพการเสียหายของชิ้นงานขณะทดสอบ

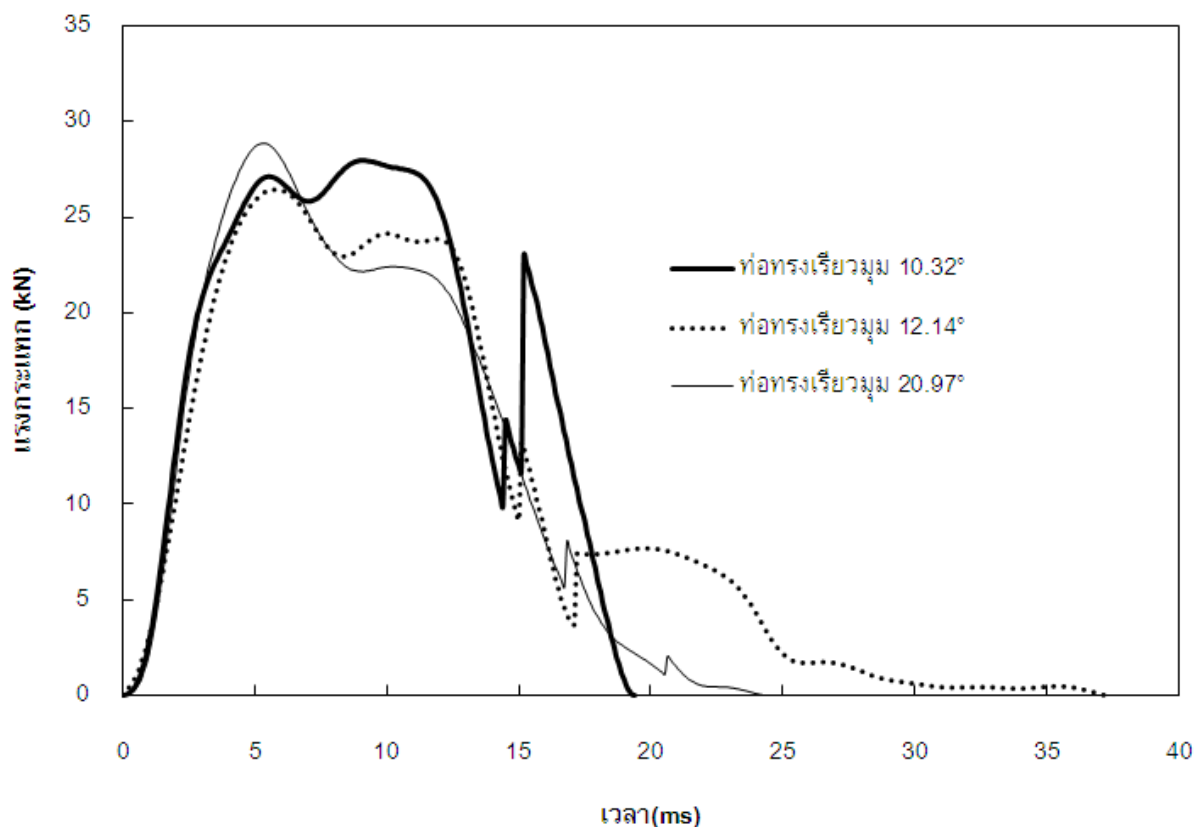
3.2 ค่าการดูดซับพลังงานของชิ้นงาน

จากการศึกษาครั้งนี้ได้บันทึกแรงตอบสนองของท่อผนังบางทรง กรวย ที่มีขนาด ของมุมที่กระทำกับแนวตั้ง 3 ขนาด โดยทำการทดสอบด้วยเครื่อง Vertical Impact Testing Machine ได้ผลตามรูปที่ 10 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าลักษณะของเส้นกราฟที่เกิดขึ้นกับแต่ละโครงสร้างนั้น จะมีการแกว่งตัวขึ้นลงและมีลักษณะของเส้นกราฟคล้ายกัน โดยพบว่าชิ้นงานที่มีมุม 10.32° มีแนวโน้มค่าของแรงปฏิกิริยาสูงกว่าท่อที่มีมุม 12.14° และ 20.97° ตามลำดับ

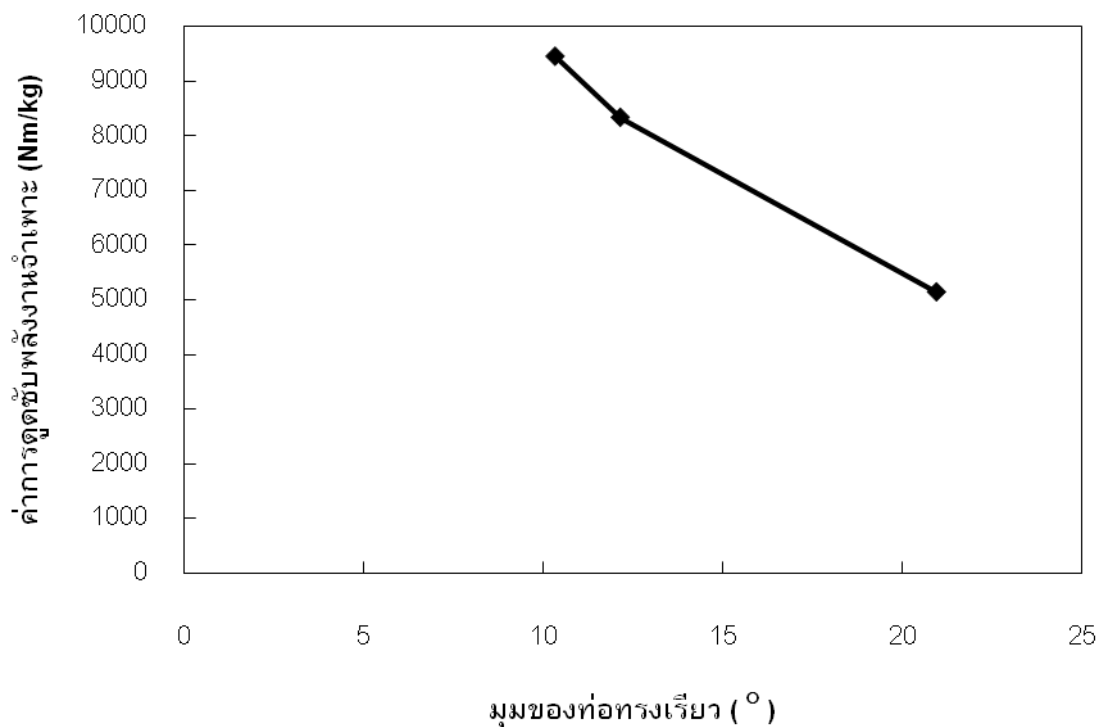
เมื่อนำค่าที่ได้จากกราฟมาวิเคราะห์หาค่าการดูดซับพลังงาน ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 11 ซึ่งพบว่า ท่อทรงกรวยทำมุมกับแนวตั้ง 10.32° , 12.14° และ 20.97° มุมที่ให้ค่าการดูดซับพลังงาน (E_s) ดีที่สุด คือ มุม 10.32° ซึ่งมากกว่ามุม 12.14° และมุม 20.97° โดยท่อที่ทำมุมกับแนวตั้ง 10.32° สามารถดูดซับพลังงานได้ $752.90 \text{ N}\cdot\text{m}$ ส่วนท่อที่ทำ

มุม 12.14° และ 20.97° ให้ค่าการดูดซับพลังงานเท่ากับ $711.88 \text{ N}\cdot\text{m}$ และ $637.76 \text{ N}\cdot\text{m}$ ตามลำดับ ในส่วนของค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ (E_s) พบว่ามีแนวโน้มเหมือนกัน โดย ท่อทรง กรวย ทำมุมกับแนวตั้ง 10.32° , 12.14° และ 20.97° มีค่าพลังงานดูดซับจำเพาะ (E_s) เป็น $9.46 \text{ kN}\cdot\text{m/kg}$, $8.34 \text{ kN}\cdot\text{m/kg}$ และ $5.14 \text{ kN}\cdot\text{m/kg}$ ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลจากการศึกษาในครั้งนี้ แม้พบว่ามุมของท่อที่ต่างกันจะส่งผลต่อค่าการดูดซับพลังงานของท่อก็ตาม แต่วัสดุประกอบ (FRP) ที่ใช้ขึ้นรูปท่อ เป็นวัสดุที่เทคนิคในการขึ้นรูปส่งผลต่อค่าการดูดซับพลังงานอย่างมาก เช่น การวางตัวของชั้นใยแก้ว จำนวนชั้นของใยแก้ว การจัดเรียงของตัวเส้นใย รูปแบบของแม่พิมพ์และกระบวนการขึ้นรูป เป็นต้น ซึ่งจะได้ศึกษาและพัฒนาในโอกาสต่อไป



รูปที่ 10 แสดงผลการทดสอบแรงกระแทกที่กระทำต่อท่อทรงกรวยมุมต่างๆ



รูปที่ 11 แสดงค่าการดูดซับพลังงานจำเพาะของท่อทรงรียาวมุมต่างๆ

ตารางที่ 3 แสดงพลังงานที่ขึ้นงานดูดซับได้และผล
การคำนวณตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

มุมของท่อ (°)	น้ำหนัก (kg)	P _{mean} (kN)	stroke (mm)	E _a (Nm)	E _s (Nm/kg)
10.32	0.08	20.68	37.65	752.90	9461.70
12.14	0.08	16.58	44.46	711.88	8342.10
20.97	0.12	16.14	40.76	637.76	5140.80

4 สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า โครงสร้างของวัสดุ
ประกอบเสริมแรงทรงกรวยมีลักษณะการเสียหาย
จากการกระแทกในแบบ Crush mode และแบบ
Bending mode โดยพบว่าเมื่อมุมกรวยมีค่าสูงขึ้น
โครงสร้างมีแนวโน้มจะเสียหายแบบ Bending mode
นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมุมกรวยมีค่ามากขึ้น

โครงสร้างจะสูญเสียความสามารถในการรับแรง
กระแทก ในกรณีที่ศึกษานี้พบว่า ท่อที่มีมุมกรวย
10.32° รับแรงกระแทกได้ดีที่สุด โดยเมื่อพิจารณา
ความสามารถในการดูดซับพลังงานจากการกระแทก
จะเห็นว่าท่อที่มีมุมกรวย 10.32° มีค่าการดูดซับ
พลังงานมากกว่าท่อที่มีมุมกรวย 12.14° และ
20.97° อยู่ 5.76% และ 18.05% ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัย
แห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในโครงการ
นี้

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่
ให้การสนับสนุนเครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] 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 :201-216.
- [2] 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 :1595-1620.
- [3] Nagel, G.M. and Thambiratnam, D.P. (2005).
Computer simulation and energy absorption of
tapered thin-walled rectangular tubes, Thin-wall
Structures, 43 :1225-1242.
- [4] Reid, S.R. and Reddy, T.Y. (1996). Static
and dynamic crushing of tapered sheet metal
tubes of rectangular cross-section. Int J Mech
Sci, vol.28(9), 1986, pp. 623-637.
- [5] Mamalis, AG., Manolakos, D.E., Viegelaan,
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) :323-335.
- [6] Abramowicz, W. and Jones, N. (1983). On
the crushing mechanics of thin-walled structures,
Int J Appl Mech, 50 :727-734.